

2018 年度 博士論文

階層的な空間構造を考慮した移動コストを最小化する都市形態

Urban Forms Minimizing the Travel Cost
Considering Hierarchical Spatial Structure

首都大学東京大学院

近藤 赳弘

目次

第1章 はじめに.....	1
1.1 研究の背景.....	2
1.2 既往研究.....	8
1.3 研究の目的.....	11
1.4 本研究の構成.....	13
参考文献 (1章)	16
第2章 都市の概念とモデルの定義.....	18
2.1 コンパクトシティの概念.....	19
2.2 都市モデルの概念.....	21
2.3 都市モデルの定義.....	22
2.3.1 2次元都市モデル.....	23
2.3.2 3次元都市モデル.....	24
2.4 パラメータ定義.....	25
参考文献 (2章)	27
第3章 最適な2次元都市モデルの算出.....	28
3.1 多層の床を想定しない場合の最適な2次元都市モデルの算出.....	29
3.1.1 1次拠点1つの場合.....	30
3.1.2 1次拠点2つと2次拠点1つの場合.....	35
3.2 多層の床を想定する場合の最適な2次元都市モデルの算出.....	46
3.2.1 1次拠点1つの場合.....	47
3.2.2 1次拠点2つと2次拠点1つの場合.....	52
参考文献 (3章)	56
第4章 最適な3次元都市モデルの算出.....	57
4.1 多層の床を想定しない場合の最適な3次元都市モデルの算出.....	58
4.1.1 1次拠点1つの場合.....	59
4.1.2 1次拠点4つと2次拠点1つの場合.....	66
4.2 多層の床を想定する場合の最適な3次元都市モデルの算出.....	89
4.2.1 1次拠点1つの場合.....	90

4.2.2 1次拠点4つと2次拠点1つの場合.....	93
参考文献(4章)	107
第5章 都市モデルの比較・考察.....	108
5.1 パラメータの値と都市モデルの関係.....	110
5.1.1 多層の床を想定する場合の最適な2次元都市モデル.....	111
5.1.2 多層の床を想定する場合の最適な3次元都市モデル.....	123
5.2 2次元都市モデルと3次元都市モデルの比較.....	134
5.3 多層の床の想定有/無による最適都市形態の比較.....	137
5.3.1 2次元都市モデルにおける多層の床の想定有/無による比較..	138
5.3.2 3次元都市モデルにおける多層の床の想定有/無による比較..	141
5.4 単一拠点と複数拠点の都市モデルの比較.....	144
5.5 実際の都市と都市モデルの比較.....	147
5.6 仮想的な都市と都市モデルの比較.....	150
5.7 比較・考察のまとめ.....	152
参考文献(5章)	154
第6章 総括.....	155
6.1 各章の要約.....	156
6.2 都市モデルの評価.....	158
6.3 研究の展望.....	160
参考文献(6章)	162
Appendix.....	163
補足.....	163
(補足1)	163
(補足2)	163
(補足3)	163
(補足4)	164
(補足5)	165
(補足6)	167
(補足7)	169
(補足8)	171
(補足9)	174

目次

(補足 10)	175
(補足 11)	176
(補足 12)	176
(補足 13)	177
(補足 14)	178
(補足 15)	180
(補足 16)	181
(補足 17)	182
(補足 18)	184
(補足 19)	186
(補足 20)	187
(補足 21)	188
(補足 22)	194
(補足 23)	195
(補足 24)	197
(補足 25)	198
(補足 26)	201
(補足 27)	203
(補足 28)	206
(補足 29)	220
(補足 30)	221
(補足 31)	222
(補足 32)	227
(補足 33)	227
(補足 34)	228
図一覽.....	232
表一覽.....	235
Abstract	236
研究業績一覽.....	239
謝辞.....	240

第1章 はじめに

第1章では、本研究の背景と、関連する既往研究、研究の目的、論文の構成について述べる。

1.1節では、研究の背景を述べる。日本では、コンパクトシティをキーワードに、様々な都市政策が展開されている。しかし、コンパクトシティに対する明確な定義付けはなく、社会的な共通理解も不明確である。また、どのような都市形態がコンパクトな都市なのか具体的に示した研究も少なく、コンパクトシティを実現することによる効果の定量的な分析も十分とは言えない。したがって、コンパクトシティの定量的な評価が必要である。本研究では、最適な都市形態という観点から、コンパクトシティの定量的な評価を試みる。

1.2節では、コンパクトシティの定量的な評価を試みた既往研究について述べる。特に、モデルを用いて最適な都市形態を示した研究に着目する。

1.3節では、1.1節、1.2節を踏まえ、研究の目的を述べる。本研究の目的は、移動コストの最小化という観点からコンパクトシティを形成するための最適都市モデルを定式化し、最適な都市形態について定量的な分析を行うこととする。

1.4節では、本研究の構成について述べる。

1.1 研究の背景

日本の都市政策の一つとして、コンパクトシティをキーワードに様々な試みが行われている。

近代的な新都市の源流は、1898年にハワードが述べた、「田園都市構想」にある。ハワードは、「明日の田園都市」の中で、中心部にある4km²の市街地を20km²の田園が取り囲む都市モデルを提案した。また、田園都市が閉鎖的孤立的にならないため、中心都市や他の田園都市と高速交通機関ネットワークで結ぶことを提案した(図1.1-1)。また、ペリーは、1924年に「近隣住区論」にて、1つの小学校を必要とする人口規模から成るコミュニティを「住区」とし、住区と幹線道路から成り立つ都市を提案した(図1.1-2)。これらの構想の共通な考え方として、無秩序に広がっていた空間を集積し、様々な活動を効率化させるということがある。つまり、コンパクト性の本質は、都市の様々な活動がお互いに近接した立地によって形成されていることであると言える。

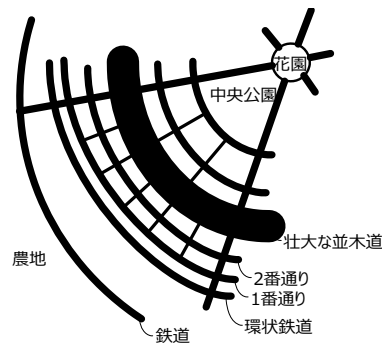


図 1.1-1 田園都市のイメージ

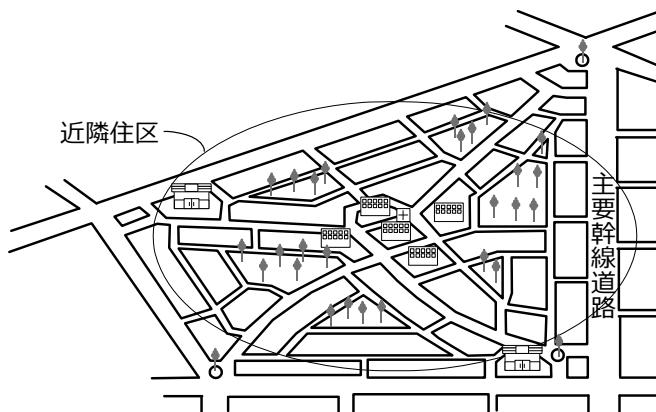


図 1.1-2 近隣住区のイメージ

コンパクトシティという言葉がはっきりと使われたのは、1974年に発表されたダンツィックとサアティの著書「コンパクト・シティ」[1-1]の中である。ここでは、平面的であったこれまでの新都市思想に対し、垂直方向の空間を利用することで、多くの層からなる巨大な都市構造物に集積させることが提案された(図1.1-3) (補足1)。

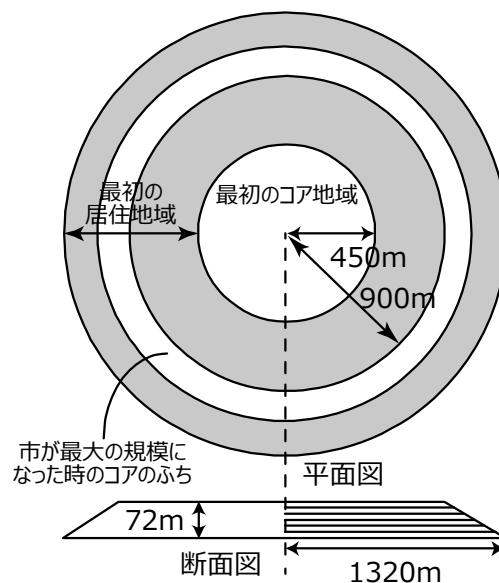


図1.1-3 コンパクト・シティのイメージ

実際に、日本を始め世界各国の大都市においては、高層建築物が多数建築されてきており、特に近年はこの傾向は著しい。例えば、日本初の超高層ビルとしては地上147mの「霞が関ビルディング」が存在する。近年では、296mの「横浜ランドマークタワー」や、300mの「あべのハルカス」が存在する。海外では、アメリカ合衆国に存在する地上541mの「ワンワールドトレードセンター」や、上海に存在する地上632mの「上海タワー」など、500mを超す建物も存在する。また、ハイパービルディング等、都市機能を有する超巨大建築物の構想も発表されている。例えば、Frank Lloyd Wrightは、著書「A Testament」の中で、「Mile High Illinois」という528階建ての巨大建築物を計画している[1-2]。早稲田大学の尾島俊雄研究室は、基底面積110km²に対して地上高10kmの超々高層建築「東京バベルタワー」を提唱している[1-3]。また、1990年前後には、大林組による「エアロポリス2001」、竹中工務店による「スカイシティー1000」な

ど、超々高層建築物の構想が、ゼネコン各社から発表されている。これらの計画が提案された背景としては、スプロール現象を防止する社会的な必要性、技術的な可能性の追求、将来予測される高度に都市機能が集約したコンパクトシティの実現可能性の検討がある。

コンパクトシティへの取り組みとして、例えば、平成20年11月の「東北コンパクトシティ検討委員会」がある。この委員会は国土交通省東北地方整備局により設立され、持続可能な社会に向けての検討が実施されている[1-4]。ここで目指すコンパクトシティとは、都市の周辺に広がる農山漁村との有機的な共生を図り、近隣市町村と都市機能を補完し合う都市を指す。また、東北地方太平洋沖地震により甚大な被害を受けた東北地方を“日本の先駆的モデル地域”として復興させるべきとの指摘が多方面からなされており[1-5]、そこではコンパクトシティの考え方はさらに重要性を増しつつある。

日本政府もコンパクトな街づくりを促進している。平成26年8月の改正都市再生特別措置法の施行にあわせ、立地適正化計画制度が集約都市形成支援事業の対象に追加された[1-6]。この支援事業は、医療施設、社会福祉施設、教育文化施設等の都市の核となる施設の集約地域への移転や、移転跡地の都市的土地利用からの転換を促進する支援制度として創設されたものであり、コンパクトシティの形成を目指している。ここでのコンパクトシティとは、拡散した都市機能を集約させ、生活圏の再構築を進めることによって創造される、歩いて暮らせる集約型のまちを意味する。さらに、平成28年9月には、都市の国際競争力と防災機能の強化を実現するとともに、コンパクトで賑わいのあるまちづくりを進め、あわせて、老朽化が進んでいる住宅団地の再生を図るための「都市再生特別措置法等の一部を改正する法律」が施行された[1-7]。

また、平成26年7月には、「国土のグランドデザイン2050」[1-8]が公表された。ここでは、「コンパクト+ネットワーク」、「多様性と連携による国土・地域づくり」というキーワードが挙げられている。この中で、各種サービスを効率的に提供するためには、集約化（コンパクト化）が必要であること、複数の地域間の連携により、より高次の都市機能によるサービスが成立するための圏域人口を確保すること、人・モノ・情報の交流促進により、新たな価値創造が可能になることが述べられている（図1.1-4、図1.1-5）。

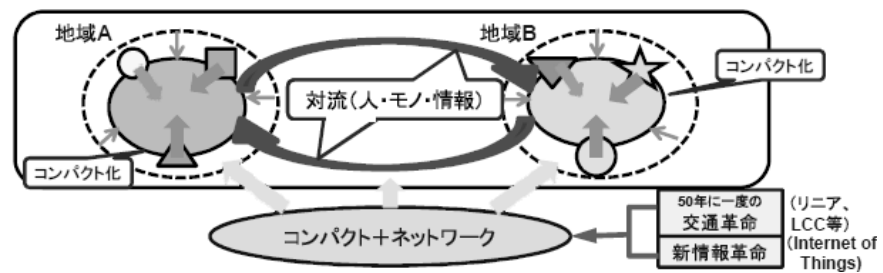


図 1.1-4 コンパクト+ネットワーク

(出典：「国土のグランドデザイン2050」概要)

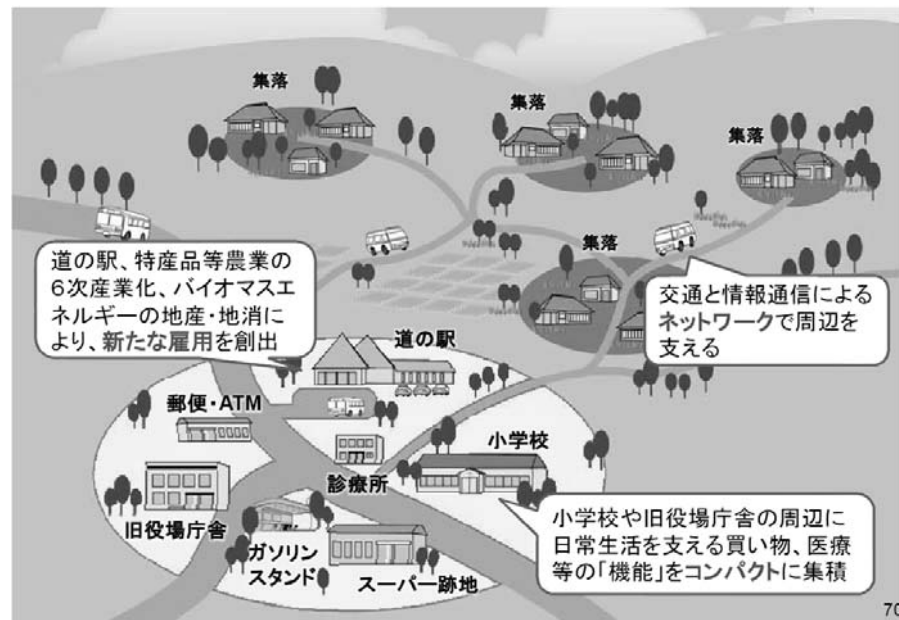


図 1.1-5 小さな拠点

(出典：「国土のグランドデザイン2050」参考資料[2])

コンパクトシティへの転換が模索されている理由はいくつかある。

第1に、環境問題への取り組みである。近年、環境意識の高まりとともに、エネルギー効率が高く環境負荷が小さい都市が求められている。ここには2つの側面がある。1つは、都市機能の集約やテクノロジーによるエネルギー利用の効率化である。地域冷暖房やコージェネレーションによるエネルギー供給の

効率化や、再生可能エネルギーの利用促進のためには、高密度かつある程度の規模を持った一体型の開発が必要となる。もう1つは、自然環境の確保である。自然環境を確保するためには、空間を立体的に利用し、地表面を自然的利用に開放する必要がある。つまり、高密度な空間と低密度な空間のメリハリをつけて分離する、広域的な土地利用計画が必要となる。

第2に、都市サービスの維持である。人口減少・少子高齢社会が進む中、土地利用の密度低下による都市基盤設備の維持更新が懸念されており、都市サービスの維持は重要な課題である。地域の活力を維持するとともに、医療・福祉・商業等の生活機能を確保し、高齢者が安心して暮らせるよう、地域公共交通と連携して、コンパクトな街づくりを進めていくための「コンパクト・プラス・ネットワーク」は、国土交通省の重点施策の一つとなっている[1-9]。また、都市再生特別措置法等の一部を改正する法律が定められた理由にもある通り、大都市については、経済の牽引役として世界の都市間競争に対応し、世界中からヒト・モノ・カネ・情報を呼び込むことを目的にした、国際的なビジネス・生活環境、大規模災害に対応するための環境整備という観点もある。

第3に、防災対策である。日本では、中心部に高層建物と老朽化した木造住宅が密集した地区が混在しており、防災上の問題を抱えている都市が多い。一方で、利用されていない土地があちこちに点在しており、市街地の無秩序な拡大や都市を取り巻く自然環境の消失、土地利用の低密度化による都市サービスの低下を招いている。また、近年多発している、地震、台風、ゲリラ豪雨などの大規模自然災害に備えた街づくりを行う必要もある。防災の観点から安全・安心を確保し得るコミュニティ再生を行うこともまた、都市計画の大きなテーマとなっている。

このような理由から、コンパクトシティを前提とした都市計画が数多く立案されている。しかし、コンパクトシティに対する明確な定義付けはなく、社会的な共通理解も不明確である。また、どのような都市形態がコンパクトな都市なのか具体的に示した研究も少なく、コンパクトシティを実現することによる効果の定量的な分析も十分とは言えない。たとえば、高層建築物で構成される市街地は、垂直方向の移動に手間がかかり、移動の利便性が高いとは限らない。そのため、コンパクトシティの効果を測る指標を設け、定量的に分析し、評価

することは、今後、社会的合意を形成して都市計画施策を実現するにあたって必要不可欠である。

本研究では、前述の国土のグランドデザイン2050で挙げられている、「コンパクト+ネットワーク」というキーワードに着目し、コンパクトシティの効果を測る指標として移動コストを取り上げる。また、複数の地域間の連携により成り立つ都市構造を前提とする。本研究では、このように複数の小さなコンパクトシティが連携して成り立つ都市構造を、玉川[1-10]を参考に、コンパクトシティ・システムと呼び、コンパクトシティ・システムを構成している都市構造のもと、都市機能が集約された中心部へのアクセシビリティを最大化することがコンパクトシティとして重要な要素であるにとらえる。つまり、本研究では、移動コストを最小化する都市形態を最適な都市形態と定義し、コンパクトシティの定量的な評価を試みる。

1.2 既往研究

前節で述べた通り、コンパクトシティを実現させるためには、コンパクトシティ・システムを構成している都市構造のもと、都市機能が集約された中心部へのアクセスビリティを最大化することが重要である。したがって、移動コストがコンパクトシティの効果を計る指標となる。移動コストの最小化という観点から最適な都市形態について述べた既往研究としては、まず、森本[1-11]に代表される、実際の都市におけるコンパクトシティの効果の把握が挙げられる。ただし、このように現実の都市を対象とした分析においては都市固有の事情が影響するため、得られた効果の汎用性の判断には困難な問題も残る。その点で、モデル都市における最適な都市形態の研究を併用することは、汎用性の判断に資すると期待される。

モデルを用いて最適な都市形態を示した研究の代表例に、直方体の都市モデルを想定して最適な立体的都市形態を示した、腰塚[1-12]や栗田ら[1-13]のものがある。また鈴木[1-14]は、直方体を積み重ねた都市モデルを想定して最適な都市形態を求めた。しかし、これらの研究には、次の課題が残っている。前者の1個の直方体で都市形態を近似したモデルでは、都心部と周辺部の建物高さの違い、すなわち密度の違いを反映できない。後者の複数の直方体を積み上げたモデルは、これをある程度反映できる。しかし、計算量の制約から直方体の数を少なくせざるを得ないため、直方体の形状や大きさに都市形態が制約され、また直方体が具体的な都市のどのような構成要素に対応しているのかが不明確になるので、得られた形態の解釈が困難になる。さらに、両者はともに、実際の大都市にみられる拠点施設の機能分担や交通ネットワークの階層構成が都市形態に与える影響を考慮していないなど課題が残る。また、腰塚は都市域の任意の地点に都市域の外からの交通の入り口があることを想定している。本研究では公共交通機関を中心としたコンパクトシティ・システムが成立する都市を前提とするため、これらの都市モデルとは前提条件が異なる。他に、羽賀ら[1-15]は、隣棟間隔を考慮して非連続な空間における都市モデルを想定し、移動負荷を求めているが、本研究では、連続な都市形態を想定することとする。

コンパクトシティ・システムについては、例えば近藤ら[1-16]の研究がある。近藤らは、移動時間の最適化という観点から、単純な都市モデルを設定し分析

している。その結果、生活需要の段階に応じた多段階の生活拠点と交通機関を導入することで、平均移動時間が1割以上短縮できることが示されている。しかし、人口密度分布すなわち3次元都市形態を加味していないなど、現実の都市にそぐわない部分もある。

これらの課題に対応するため、近藤ら[1-17]は、階層的な拠点と交通手段を導入した最適な都市形態を算出した。この論文は、交通手段としての徒歩、バス、エレベータの移動コストの比を、現実に近い特定の値に固定して、最適な拠点間距離を算出した。その結果は、超高層建築物に都市をまとめることが必ずしも効率的ではなく、交通手段を活用して水平方向に都市を展開させると効率的になる可能性もあることを示唆した。ただしこの論文は、本来の都市空間とは異なり縦横ともに連続な関数で表す事ができる空間と捉えている。すなわち、人口が3次元都市空間のどの方向についても均一に分布している状態、いわば住民が3次元都市空間に均一な密度で浮かんでいる状態を仮定している。図1.2-1に、垂直方向に連続な関数で表されるモデルと、非連続な関数で表されるモデルについて、人口分布を示す。垂直方向に連続な関数で表される空間を想定する場合、2次元都市モデルにおいては図形の面積、3次元都市モデルにおいては図形の体積が人口、つまり、都市の規模とみなす必要がある。一方で、垂直方向に非連続な関数で表される空間を想定する場合、2次元都市モデルにおいては床の長さ、3次元都市モデルにおいては床面積を都市の規模とみなす事ができる。垂直方向に連続な関数で表される空間を想定すると、移動コストを求める際に縦横ともに微積分という最適化計算の強力な手段が適用可能になり、計算が簡略化できるという大きな利点をもたらした。しかし、階高が存在し垂直方向に非連続な関数として捉えられる建物の集合体としての現実の都市とは垂直方向の移動コストの扱いが異なる。このため得られた最適な都市形態が本来のものと異なる危険性がある。また、規模が床面積で把握される現実の都市との比較が困難であるなど、課題が残る。

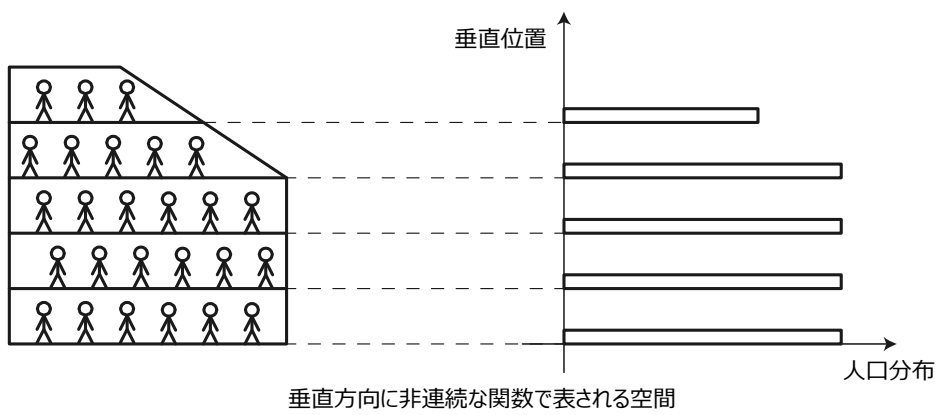
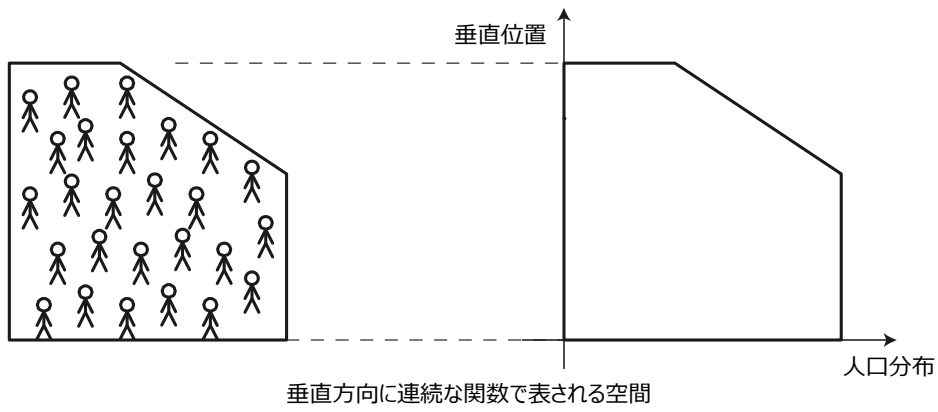


図 1.2-1 垂直方向の空間の捉え方

1.3 研究の目的

本研究では、既往研究の課題に対応するため、垂直方向に非連続な関数として捉えられる都市モデルを用いて、移動コストの最小化という観点からコンパクトシティを形成するための都市モデルを定式化する。この上で、1.1節にて定義した最適な都市形態、すなわち、移動コストを最小化する都市形態について定量的な分析を行うことを目的とする。このとき、移動としては、前記の多くのコンパクトシティに関連する研究、提言、施策に倣って、水平移動は徒歩と公共交通機関、垂直移動はエレベータを前提とする。

ある場所から別の場所へ移動する場合には、一度地上に降りて地上レベルを移動し、目的地にて目的の高さまで上ることを想定する(図1.3-1)。この場合、建物の中の水平移動と建物の外の水平移動は一体としてみなすことができる。なお、本研究ではエレベータや建物の出入り口に向かうために必要な遠回りは誤差として無視する。必ず一度地上に降りることを前提にすると、隣棟間隔は無視することができ、都市全体を1つの建物のように捉えることができる。この場合、垂直方向に非連続な関数として捉えられる都市モデルは、階高分の距離を隔てた多層の床から成る都市モデルと考えることができる。

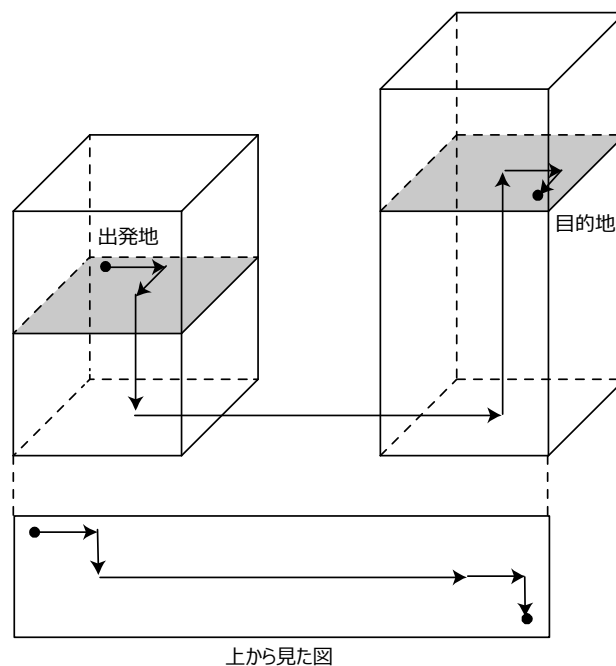


図 1.3-1 建物間の移動

前述の通り既往研究では、本来の都市空間とは異なり、垂直方向に一定の距離すなわち階高を隔てた多層の床からなることを考慮せず、縦横ともに連続な空間と捉えている。これに対して、多層の床を想定すると、次の利点がある。第1に、多層の床を想定した都市モデルでは、垂直方向の移動コストの現実とのかい離が、従来のモデルより少なくなると期待できる。第2に、床面積を都市の規模と見なせるため、現実の都市と規模を揃えた比較が容易になる。第3に、近年の日本の建築物では階高が大きくなる傾向があるなどの諸要因の変化が都市に与える影響について、より厳密な分析が可能になる。第4に、連続的な関数の採用によって計算量を削減しつつ、既往研究における形態の解釈の困難さを軽減できると期待される。これは、多層の床を想定することは、前述の鈴木による複数の直方体を積み上げた場合において、直方体の高さとして実際の都市における最小値を想定したうえで、都市の境界を離散的でなく連続的な関数で表すことに相当するためである。

このため本研究では、都市内に垂直方向に一定の階高を持った多層の水平な床があり、住民はその床に均等分布していると想定して、最適な都市形態を算出する。

さらに、次の6つの方法で都市モデルの特性を分析し、評価を行う。第1に、都市形態の決定にかかわる変数を変化させ、都市モデルの特性を分析する。第2に、2次元都市モデルと3次元都市モデルの比較を行う。第3に、多層の床の考慮有無による最適都市形態の比較を行う。第4に、単一拠点と複数拠点の都市モデルの比較を行う。第5に、実際の都市と都市モデルの比較を行う。第6に、仮想的な都市と都市モデルの比較を行う。

これらにより、本研究による定量的な分析が、今後、社会的合意を形成して都市計画施策を実現する[1-18]にあたって役立つことを期待する。

1.4 本研究の構成

本研究は、次の6章から構成される(図1.4-1)。

第1章では、本研究の社会的背景および目的について述べる。既往の研究や考え方を整理した上で、コンパクトシティを検討する上での課題点から本研究の着目点を把握するとともに本研究の位置づけを明確にし、研究目的や研究の構成を述べる。

第2章では、本研究で用いる都市モデルについて、概念と定義を述べる。

第3章では、2次元都市モデルについて、多層の床を想定しない場合とする場合の最適な都市形態を算出する。まず、計算の準備となる基礎的な状況を確認することを目的として、階層的な空間構造を形成していない場合、すなわち1次拠点が1つのみ存在している単純な線形都市について、最適な都市形態を算出する。次に、1次拠点が2つと2次拠点が1つある場合について、最適な都市形態を算出する。第3章のうち3.1節は近藤 [1-17]にも記載した内容だが、3.2節や第4章を述べる上での基礎的研究となることから、一部モデルの設定と表現を見直し、再掲載する。この際、他の章と前提条件を統一するため、パラメータの文字や値を一部変更し記載する。また、近藤 [1-17]には記述誤りがあったため、本研究にて正しい記述に修正を行う。

第4章では、3次元都市モデルについて、最適な都市形態を算出する。第3章と同様に、1次拠点が1つある場合と、1次拠点が4つと2次拠点が1つある場合について、多層の床を想定しない場合とする場合の最適な都市形態を算出する。第4章のうち4.1節は近藤 [1-17]にも記載した内容だが、4.2節や第5章を述べる上での基礎的研究となることから、一部モデルの設定と表現を見直し、再掲載する。第3章と同様、他の章と前提条件を統一するため、パラメータの文字や値を一部変更し記載する。また、近藤 [1-17]には記述誤りがあったため、本研究にて正しい記述に修正を行う。

第5章では、第3章、第4章で算出した都市モデルについての考察を記す。

5.1節では、パラメータを変化させ、都市モデルの特性について考察を述べる。

5.2節では、2次元都市モデルと3次元都市モデルの比較を示す。5.3節では、多層の床を想定する場合としない場合についての比較を示す。5.4節では、コンパクトシティ・システムとすることの評価をするため、単一拠点と複数拠点の

都市モデルの比較を示す。5.5 節では、東京都多摩市を例に、実際の都市と 3 次元都市モデルの比較を示す。5.6 節では、東京バベルタワーを例に、仮想的な都市と 3 次元都市モデルの比較を示す。

第 6 章では、結論として第 2 章から第 5 章で得られた知見をまとめ、研究の展望を述べる。

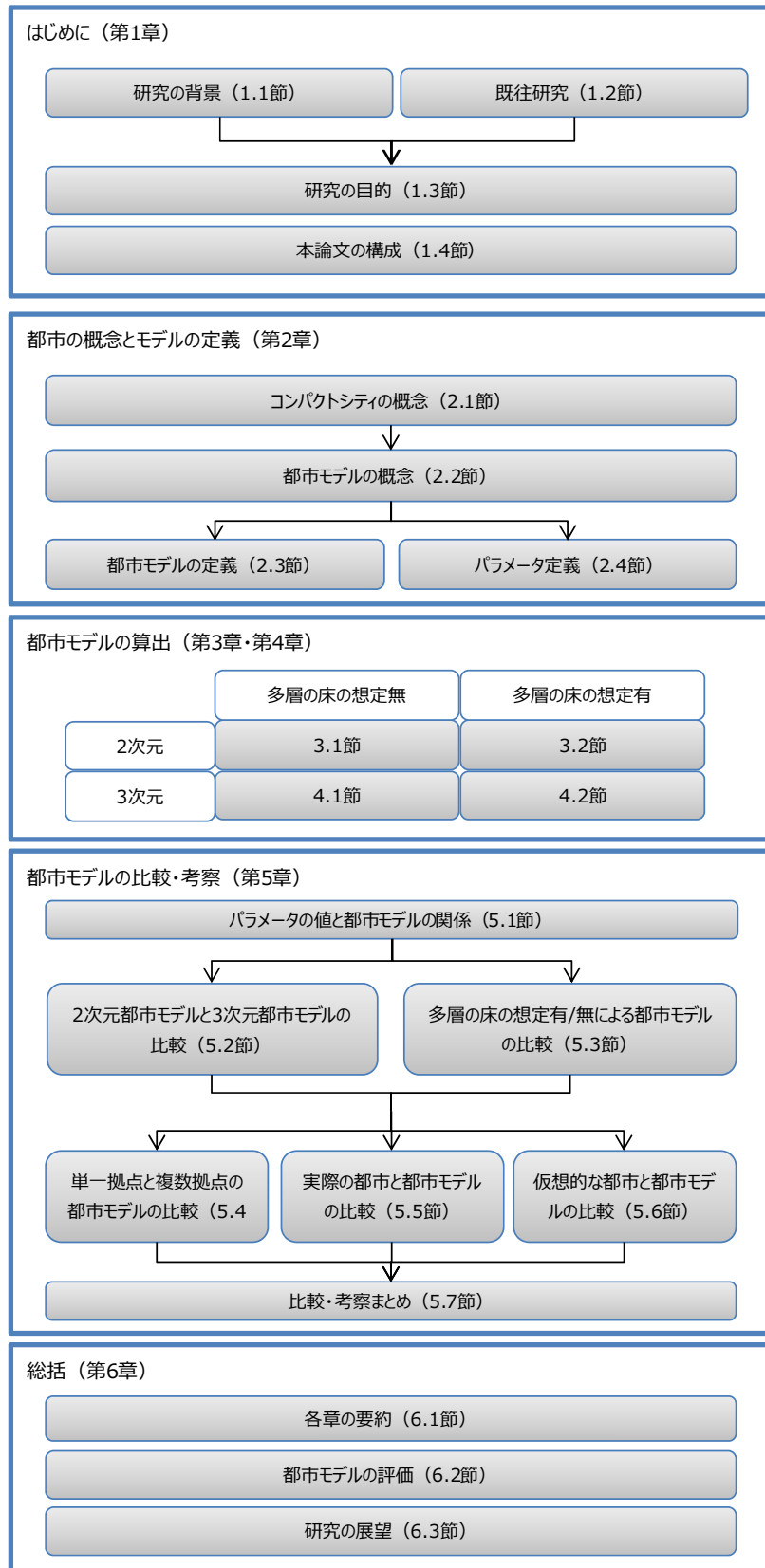


図 1.4-1 論文の構成

参考文献（1章）

- [1-1]G.B.ダンツィク、T.L.サアティ、コンパクトシティ、日科技連出版社、1974
- [1-2] Frank Lloyd WRIGHT : A TESTAMENT、Horizon Press、1957
- [1-3] 尾島俊雄：千メートルビルを建てる-超々高層のハードとソフト、1997
- [1-4]国土交通省、コンパクトシティ～より良い暮らしのために～、
<http://www.thr.mlit.go.jp/compact-city/index.html>、2017.5.27
- [1-5]毎日新聞、2011.4.11
- [1-6]国土交通省、“コンパクトシティ形成支援”、
http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_machi_tk_000054.html、2017.2.21
- [1-7]国土交通省、都市再生特別措置法等の一部を改正する法律が平成28年9月1日に施行されました、http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_machi_tk_000059.html、2017.5.27
- [1-8] 国土交通省、「国土のグランドデザイン2050 ～対流促進型国土の形成～」、http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk3_000043.html、2018.6.2
- [1-9] 国土交通省、コンパクト・プラス・ネットワーク、
http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_ccpn_000016.html、2018.6.2
- [1-10] 玉川英則編：コンパクトシティ再考、学芸出版社、2008
- [1-11]森本章倫、都市のコンパクト化が財政及び環境に与える影響に関する研究、都市計画論文集、Vol. 46、No. 3、pp. 739-744、2011
- [1-12]腰塚武志：コンパクトな都市のプロポーシオン、日本都市計画学会都市計画論文集、30、pp.499-504、1995.11.1
- [1-13]栗田治、腰塚武志：省エネルギー直方体都市のプロポーシオン解析 沙漠の摩天楼シバームの数理、日本建築学会計画系論文集、544、pp.125-131、2001.6
- [1-14]鈴木勉：コンパクトな立体都市形態に関する考察、日本都市計画学会都市計画論文集、28、pp.415-420、1993.11.1
- [1-15]羽賀正和、吉川徹：空地及び高さの効用と移動負荷を考慮した高層・低層集合住宅群の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、F-1、pp.1483-1486、2010.7
- [1-16]近藤起弘、吉川徹：多段階の公共交通機関と地域拠点の導入による平均移動時間最小化モデル、日本都市計画学会都市計画論文集、45-3、pp.139-144、2010

[1-17] 近藤赳弘：移動コストを最小化する立体都市モデル—階層的な拠点と交通手段の導入を仮定して—、首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域平成23年度修士論文、2011.3

[1-18] 肥後洋平・森英高・谷口守：「拠点へ集約」から「拠点を集約」へ—安易なコンパクトシティ政策導入に対する批判的検討—、都市計画論文集、Vol.49、No.3、pp.921-926、2014

第 2 章 都市の概念とモデルの定義

第 2 章では、本研究で用いるコンパクトシティの概念、都市モデルの概念を明確にし、都市モデルを定義する。

2.1 節では、コンパクトシティの概念について述べる。中心にセンターすなわち集約地域が存在し、全住民の拠点までの総移動コストを最小化する都市形態を、コンパクトシティとする。さらに本研究では、複数の小さなコンパクトシティが連携してできる都市構造からなる、コンパクトシティ・システムを想定する。

2.2 節では、都市モデルの概念について述べる。都市は『地区—都市—広域都市』の 3 段階の空間構成から成り立ち、それぞれの段階に合わせて、徒歩・バス・鉄道の 3 段階の移動を想定する。

2.3 節では、本研究で用いる都市モデルを定義する。本研究では、中心の拠点に対して対称な都市モデルとし、2 次元都市モデルと 3 次元都市モデルを用いる。また、都市内の任意の地点から最も次数が高い拠点に対し、最もコストの小さい方法で移動するものとする。

2.4 節では、都市形態を決定する要因となるパラメータのうち、2.3 節で定義した距離以外のパラメータを定義する。これらのパラメータとして、例えば移動コスト、階高、床面積などがある。ただし、本研究では、公共交通機関や拠点の整備・運営にかかるコスト等については考慮しない。

2.1 コンパクトシティの概念

本研究が想定するコンパクトな都市のイメージは、図 2.1-1 の下段に示す「コンパクトな街」のように、都市機能が集中し、無秩序に拡散していない街となる。

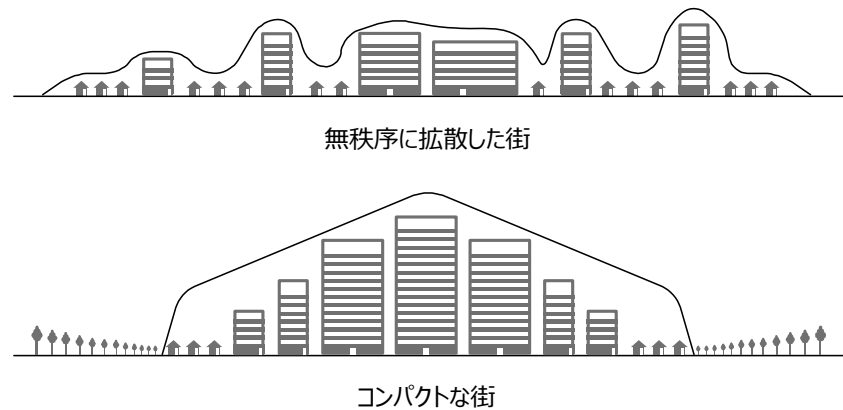


図 2.1-1 コンパクトな都市のイメージ

コンパクトシティの定義は様々だが、例えば、1.1 節で述べた立地適正化計画制度[2-1]の通り、拡散した都市機能を集約させ、都市機能の近接化による歩いて暮らせる集約型のまちであり、生活圏の再構築を進めていくため、医療施設、社会福祉施設、教育文化施設等の都市のコアとなる施設の集約地域への移転や、移転跡地の都市的土地利用からの転換が促進されたまち、と定義することができる。また、イギリスの PPG13 を参考にすると、次の 5 つの性質を持った都市と定義できる。(1)都市域が無制限に連続していない、(2)居住密度が適度に高い、(3)センターが維持され、商業機能等が拡散的でない、(4)各種の機能が適度に混合している、(5)公共交通機関と市街地が連携している[2-2]。この定義は前述の立地適正化計画制度の内容とも一致する。そこで本研究では、中心にセンターすなわち集約地域（以下、「拠点」と呼ぶ）が存在し、全住民の拠点までの総移動コストを最小化する都市形態を最適な都市形態とする。

さらに本研究ではコンパクトシティ・システムを想定する。これは、複数の小さなコンパクトシティが連携してできる都市構造を指しており、実際の大都市にみられる拠点施設の機能分担や交通ネットワークの階層構成を再現したも

第2章 都市の概念とモデルの定義

のである。この都市構造の採用により、コンパクトシティの欠点として指摘される、多彩なサービスなど都市性の欠如を解決できる可能性がある。

2.2 都市モデルの概念

人々は、より安く財・サービスを入手するために、最近接の施設を利用すると仮定すると、施設利用の需要の割合によって、段階的な生活域が想定できる。そこで本研究では、簡明な例として、図 2.2-1 のように都市は『地区—都市—広域都市』の3段階の空間構成から成り立ち、各段階において、需要の頻度に応じた一定の生活機能が充足されるものと想定する。また、それぞれの段階に合わせて、徒歩・バス・鉄道の3段階の移動を想定する。各段階に応じた生活機能を充足させるための拠点施設はそれぞれの段階における生活域の中心に存在し、拠点を形成しているものとする。例えば、日用品販売店など高頻度に利用する施設は、徒歩でアクセス可能な生活域である『地区』の中心にあると想定する。大規模病院など利用頻度は少ないが、より高次のサービスが提供できる中枢施設は、『都市』の中心に存在し、拠点を形成していると想定する。さらに、この拠点は交通拠点を兼ね備えているものとする。『地区』における拠点を1次拠点、『都市』における拠点を2次拠点、『広域都市』における拠点を3次拠点とし、上位の拠点は下位の拠点機能を併設するものとする。拠点に移動する場合には、まず『地区』内において徒歩で1次拠点に移動し、必要があればそこからバスなどの短距離交通手段で2次拠点に向かう。さらに必要があれば、鉄道など長距離公共交通機関で3次拠点に向かうものとする。

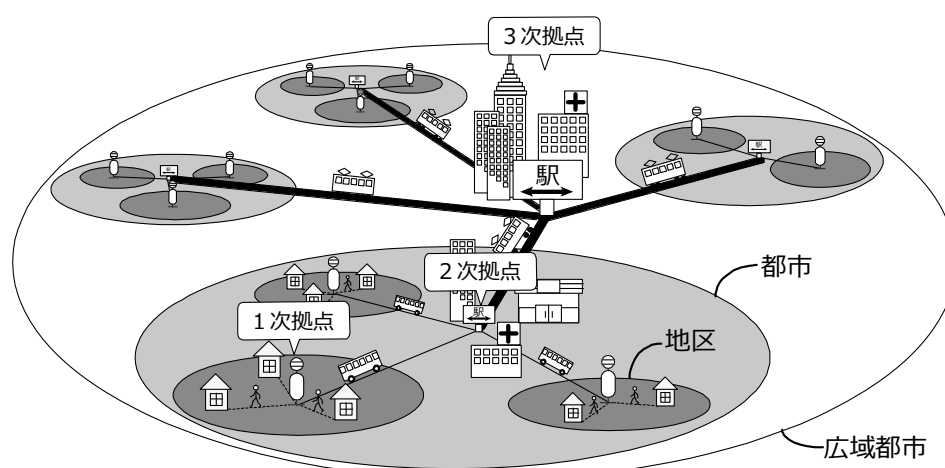


図 2.2-1 コンパクトシティ・システム

2.3 都市モデルの定義

本研究では、都市モデルと移動方法について、次の前提を置く。都市内の任意の地点から最も次数が高い拠点への移動のみを対象とする。ただし、高次になればなるほど大規模な拠点施設となり、利用頻度が少ないため、

広域都市の中心のような高次の拠点に存在する拠点施設は大規模であり、低次の拠点施設に比べて利用頻度が少ないため、広域都市の中心への移動頻度は少ないと想定される。また、大規模な拠点施設が存在するため、居住スペースが少ないと想定されることから、3次拠点への移動は対象としない。つまり、1次拠点のみ存在する場合は広域都市内の任意の地点から1次拠点への移動を対象とする。1次拠点と2次拠点の両方が存在する場合は都市内の任意の地点から2次拠点までの移動を対象とする。このとき、住民は最もコストの小さい方法で移動するものとする。目的地とする拠点を O_1 とし、目的地以外の拠点を O_2 、 O_3 、 \dots とする。複数拠点がある場合は、 O_1 を原点とし、距離 d の位置かつ原点对称となるように O_2 、 O_3 、 \dots と拠点を配置する。住民は x 軸、 y 軸、 z 軸の方向にだけ移動できると想定し、距離はマンハッタン距離で計測する。

2.3.1 2次元都市モデル

実際の都市は3次元で捉えられるが、本研究では3次元都市モデルを検討する前に、移動軸が1つ少なく、取り扱いが比較的容易な2次元都市モデルを検討する。単純な2次元都市モデルにおいて最適な都市形態を算出することで、3次元都市モデルを検討する上での第一歩とする。

2次元都市モデルは、鉄道あるいは幹線道路沿いに発展した都市、あるいは3次元都市モデルの断面と見なすことができる。この場合、3次元都市モデルにおいて「床面積」に該当する都市の規模を表す指標は、2次元都市モデルでは床の長さとなる。これは、たとえば、都市の断面図における床の断面の長さで見なしても良い。以下では、これを「床長さ」と呼ぶこととする。また、床長さの総和を「延床長さ」と呼ぶ。

本研究における2次元都市モデルとして、図2.3.1-1のように、1次拠点が2つと、2次拠点が1つ存在する都市を想定する。都市モデルの対称性を考慮して、2次拠点 O_1 を中心として、 d の位置に1次拠点 O_2 、 $-d$ の位置に1次拠点 O_3 が存在しているものとする。 x 軸方向については、都市域 r を定める。垂直方向は、 x の関数として表す。

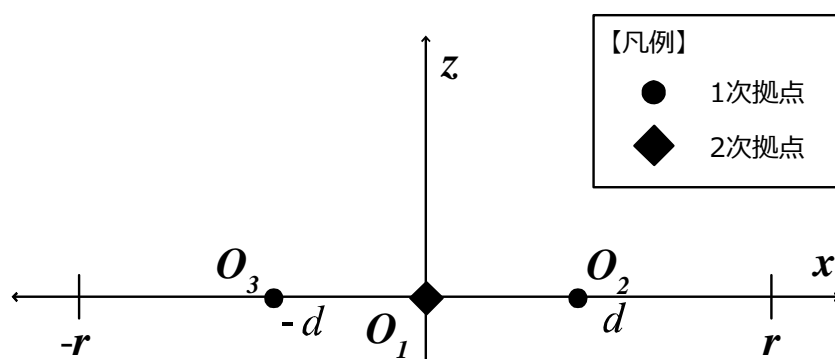


図 2.3.1-1 2次元都市モデル

2.3.2 3次元都市モデル

3次元都市モデルは、2次元都市モデルに水平方向の移動軸を1つ加えた都市モデルである。このため、拠点を含み、かつ、移動方向と水平な断面は、2次元都市モデルと同じと考えられる。また、現実の都市における移動軸と同種・同数となるため、現実の都市との比較も可能となる。

本研究における3次元都市モデルとして、図2.3.2-1のように、1次拠点が4つと、2次拠点が1つ存在する都市を想定する。都市モデルの対称性を考慮して、2次拠点 O_1 を中心として、 $(d, 0)$ の位置に1次拠点 O_2 、 $(0, d)$ の位置に1次拠点 O_3 、 $(-d, 0)$ の位置に1次拠点 O_4 、 $(0, -d)$ の位置に1次拠点 O_5 が存在しているものとする。x軸方向については、都市域 r を定める。y軸方向については x の関数として都市域を定めることができるため、パラメータとしては設定しない。垂直方向は、 x 、 y の関数として表す。

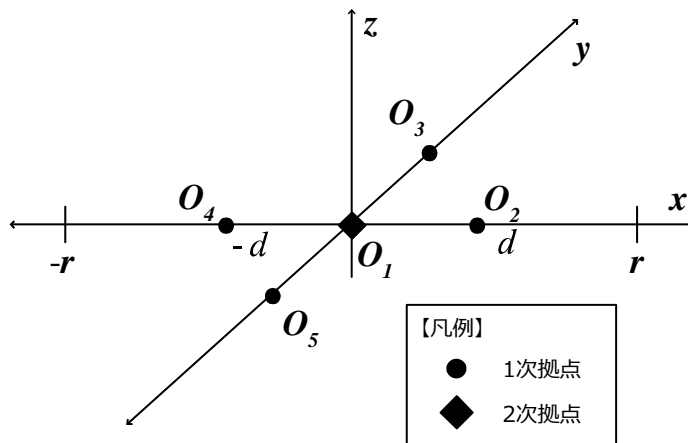


図 2.3.2-1 3次元都市モデル

2.4 パラメータ定義

2.4節では、都市形態を決定する要因となるパラメータのうち、2.3節で定義した距離以外のパラメータを定義する。

移動コストについて、次の前提を置く。単位距離当たりの移動時間を移動コストと捉え、移動時間に比例する各移動手段の平均移動速度の逆数を採用する。なお、単位距離当たりの移動時間以外に、公共交通機関や拠点の整備・運営にかかるコスト等も移動を行う上で必要となる。ただし、これらのコストは移動の発生に関わらず、ある程度は固定的に必要となるコストである。したがって、本研究におけるモデルには外的要因として影響を及ぼすと判断し、本モデルには組み込まない。

水平方向の階層的な移動手段の例として、1次拠点及び1次拠点を併設した2次拠点までは徒歩すなわち低速、1次拠点から2次拠点まではバスすなわち中速を想定する。垂直方向の移動手段はエレベータを想定する。それぞれの平均的な速度[2-3][2-4][2-5][2-6][2-7][2-8]の逆数、すなわち単位距離を移動するために必要な時間を移動コストとする。移動コストを表すパラメータとして、垂直方向は c_d 、水平方向の徒歩によるものは c_{h1} 、バスによるものは c_{h2} を用いる(表 2.4-1)。また、 $c_d > c_{h1} > c_{h2}$ が成立するとことを前提とする。

表 2.4-1 移動コスト

		速度	コスト
垂直方向の移動		C_d	2.7km/h
水平方向の移動	徒歩	C_{h1}	4.8km/h
	バス	C_{h2}	16.8km/h

その他のパラメータとして、階高を a 、床面積を D とする。また、都市全体の総移動コストを G 、最高高さを H 、1次拠点を經由する人口を V とする。具体的な値を扱う際の長さの単位は、計算の都合上、km に統一する(図 2.4-1)。

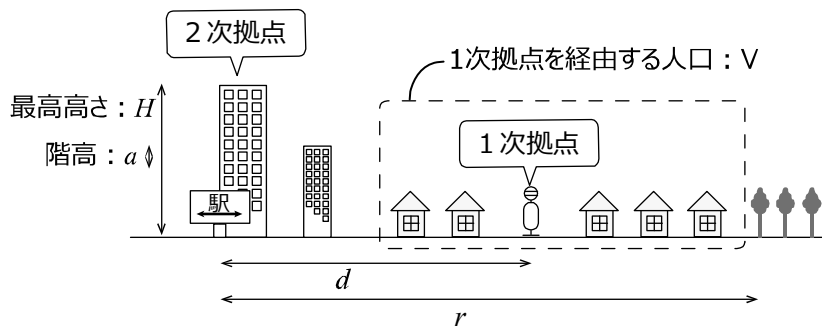


図 2.4 -1 パラメータの定義

参考文献 (2 章)

- [2-1] 国土交通省HP : コンパクトシティ形成支援、
http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_machi_tk_000054.html、参照 2017.1.22
- [2-2] 中村隆司:コンパクトな都市と土地利用計画、日本不動産学会誌、第 15 巻
第 3 号、pp.18-24、2001
- [2-3] 新たな自転車利用を考える懇談会、
http://www.mlit.go.jp/road/ir/ircouncil/bicycle_environ/1s.html、参照 2015.2.15
- [2-4] 田宮佳代子、山中英生、山川仁、濱田俊一:自転車歩行者通行空間としての
の自歩道等のサービス水準に関する分析、土木計画学研究・講演集、22(2)、
pp.287-290、1999.10
- [2-5] 公益財団法人特別区協議会 特別区制度懇談会:別紙 5 第 3 回東京の自
治のあり方研究会資料、
<http://www.tokyo-23city.or.jp/research/kondankai/kontop.html>、参照 2015.2.15
- [2-6] 平林英樹(2006):GPS データを用いた駅端末バスの速度低下要因の分析、
芝浦工業大学工学部土木工学科卒業論文梗概、2006
- [2-7] 神奈川県、鉄道と LRT の基本特性の比較、
<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f6601/p19849.html>、参照 2015.2.15
- [2-8] 三菱電機HP :
- <http://www.mitsubishielectric.co.jp/elevator/product/list/index.html>、参照 2015.2.15

第 3 章 最適な 2 次元都市モデルの算出

第 3 章では、 x, z の 2 軸方向に広がる 2 次元都市モデルについて、最適な都市形態を算出する。

3.1 節では、多層の床を想定しない場合の都市モデルについて、最適な都市形態を算出する。

3.2 節では、多層の床を想定する場合の都市モデルについて、最適な都市形態を算出する。

各節において、単純な都市モデルである 1 次拠点 1 つの場合の都市モデルと、都市域が階層化されている都市モデルを想定した、1 次拠点 2 つと 2 次拠点 1 つの場合の都市モデルについて、最適な都市形態を算出する。

3.1 多層の床を想定しない場合の最適な2次元都市モデルの算出

3.1節では、多層の床を想定しない場合の最適な都市形態を算出する。

まず、最も単純な都市モデルを想定し、全人口が1つの1次拠点に移動する場合について、3.1.1節にて最適な都市形態を算出する。次に、都市域が階層化されている都市モデルを想定し、1次拠点と2次拠点が存在する場合について、3.1.2節にて最適な都市形態を算出する。

3.1.1.1 1次拠点1つの場合

まず、最も単純な都市モデルを想定し、2.3.1節にて定義した都市モデルの1次拠点 O_1 、 O_2 、 O_3 を考慮せず、全人口が2次拠点 O_1 に移動する場合（図 3.1.1-1）について、多層の床を想定しない場合の最適都市モデルを前述の青木[3-1]を参考に算出する。ただし、青木は、都市内の任意の点から任意の点までの移動を考慮して最適な都市形態を求めているが、本研究では都市内の任意の点から拠点までの移動を考慮して最適な都市形態を求めている点に、違いがある。

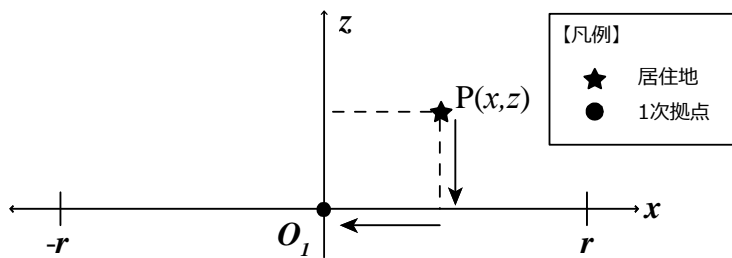


図 3.1.1-1 2次元都市モデルにおける拠点が1つの場合の移動方法

都市内の位置を座標 x で表し、都市域を式 3.1.1-1 の通り仮定する。

$$-r \leq x \leq r \quad (3.1.1-1)$$

ただし、 r は無限大を含む任意の実数とする。次に、地点 x における建物の高さを $h(x)$ で表し、計算の簡便さのために、この値は自然数ではなく非負の実数とする。また、都市形態は任意の地点において連続であるとする。このとき、個人の位置は、地点 x と居住階数 z で記述され、 z は式 3.1.1-2 を満たす。

$$0 \leq z \leq h(x) \quad (3.1.1-2)$$

ここで都市域の外側では人口は0であると考え、式 3.1.1-3 が成立する。

$$h(x) = 0 \quad \text{for} \quad x \leq -r, r \leq x \quad (3.1.1-3)$$

このとき、移動コストが最小となる都市を考える場合、床が連続に存在していることは明らかである。また、都市居住者の単位必要面積は均一であると仮定しておくと、都市人口と都市の延床長さは同一視できる。さらに日常生活域の人口は一定とし、総人口ないしは延床長さで単位を基準化しておけば、式 3.1.1-4 のようになる。

$$\int_{-r}^r h(x)dx = 1 \quad (3.1.1-4)$$

さらに、都市内の任意の点を $P(x, z)$ と表し、2地点間の距離をマンハッタン距離で定義すると、任意の点 P から1次拠点 O_1 までの移動コスト $C(x, z)$ (点 P の居住者の移動コスト) は、式 3.1.1-5 となる。

$$C(x, z) = c_{hl} \cdot |x| + c_d \cdot z \quad (3.1.1-5)$$

以上より、都市全体の総移動コスト G は、式 3.1.1-6 の通り表す事ができる。

$$G = \int_{-r}^r \int_0^{h(x)} C(x, z) dz dx \quad (3.1.1-6)$$

式 3.1.1-4 より、地点 x における高さを表す関数 $h(x)$ を決定すれば、都市域 r が決定される。一方で、式 3.1.1-5、式 3.1.1-6 より、総移動コストは、移動単位距離当たりのコストを表すパラメータ c_d 、 c_{hl} と、都市域を表す r 、地点 x における高さを表す関数 $h(x)$ によって決まる。ここで、 $h(x)$ から r が定まることから、総移動コストは、水平、垂直移動距離のコストを表すパラメータ c_d 、 c_{hl} と、地点 x における建物の高さを表す関数 $h(x)$ によって決定される。パラメータ c_d 、 c_{hl} を定数と考えると、地点 x における建物の高さを表す関数 $h(x)$ が求まる。そこで、総移動コストを最小化する都市形態を $H(x)$ とし、任意の都市形態と最適な都市形態の差を、式 3.1.1-7 とすると、地点 x における建物の階数を表す関数 $h(x)$ は式 3.1.1-8 と表す事ができる。

$$\varepsilon \cdot \eta(x) = h(x) - H(x) \quad (3.1.1-7)$$

$$h(x) = \varepsilon \cdot \eta(x) + H(x) \quad (3.1.1-8)$$

このとき、式 3.1.1-3 の条件から、関数 $\eta(x)$ は、次の条件を満足しなければならない。

$$\eta(x) = 0 \quad \text{for } x \leq -r, r \leq x \quad (3.1.1-9)$$

また、式 3.1.1-4 の条件から、日常生活域の人口は一定なので、式 3.1.1-10 が成立する。

$$\int_{-s}^s \eta(x) dx = 0 \quad (3.1.1-10)$$

任意の都市形態の総移動コストを G_h 、最適な都市形態の総移動コストを G_H とすると、式 3.1.1-11 を満たす必要がある。

$$G_H < G_h \quad (3.1.1-11)$$

一方、式 3.1.1-8 より、 $h(x)$ は変数 ε の関数と見ることができるので、関数 $\eta(x)$ が全域で恒等的に 0 でない時、関数 $h(x)$ の最小化条件は式 3.1.1-12 となる。つまり、式 3.1.1-13 が成立する。

$$\left[\frac{\partial G_h}{\partial \varepsilon} \right]_{\varepsilon=0} = 0 \quad (3.1.1-12)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_h - G_H}{\varepsilon} = 0 \quad (3.1.1-13)$$

このとき、 $G_h - G_H$ は、式 3.1.1-14 の通りである。

$$\begin{aligned} G_h - G_H &= \int_{-r}^r \int_0^{h(x)} C(x, z) dz dx - \int_{-r}^r \int_0^{H(x)} C(x, z) dz dx \\ &= \int_{-r}^r Q(x) dx \end{aligned} \quad (3.1.1-14)$$

$$\text{ただし、} Q(x) = \int_0^{h(x)} C(x, z) dz - \int_0^{H(x)} C(x, z) dz \quad (3.1.1-15)$$

$Q(x)$ は、式 3.1.1-5 を代入すると式 3.1.1-16 となる。

$$Q(x) = c_{hl} \cdot h(x) |x| + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x) - c_{hl} \cdot H(x) \cdot |x| - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x) \quad (3.1.1-16)$$

さらに、式 3.1.1-8 を代入して、 ε の 2 乗以上の高次の項は無視しうるとして整理する(補足2)と、式 3.1.1-17 となる。

$$Q(x) = \{c_{hl} \cdot |x| + c_d H(x)\} \cdot \varepsilon \eta(x) \quad (3.1.1-17)$$

したがって、総移動コスト最小化条件は、式 3.1.1-18 の通り表す事ができる。

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_h - G_H}{\varepsilon} = \int_{-r}^r \phi(x) \cdot \eta(x) dx = 0 \quad (3.1.1-18)$$

$$\text{ただし、} \phi(x) = \{c_{hl} \cdot |x| + c_d H(x)\} \quad (3.1.1-19)$$

ここで、関数 $\eta(x)$ は、式 3.1.1-9、式 3.1.1-10 を満たしていれば、どのような値でもよい。つまり、式 3.1.1-18 は任意の関数 $\eta(x)$ において成立しなければならない。従って、平均値の定理より、関数 $\phi(x)$ は一定値である必要があり、式 3.1.1-20、式 3.1.1-21 が成立する。

$$\phi(x) = \{c_{hl} \cdot |x| + c_d H(x)\} = \text{const} \quad (3.1.1-20)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x) = 0 \quad (3.1.1-21)$$

式 3.1.1-21 は、 $x < 0$ のとき、式 3.1.1-23 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x) = \frac{\partial}{\partial x} \{-c_{h1} \cdot x + c_d \cdot H(x)\} = 0 \quad (3.1.1-22)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} \quad (3.1.1-23)$$

また、 $0 \leq x$ のとき、式 3.1.1-25 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x) = \frac{\partial}{\partial x} \{c_{h1} \cdot x + c_d \cdot H(x)\} = 0 \quad (3.1.1-24)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (3.1.1-25)$$

以上より、総移動コストを最小化する都市形態 $H(x)$ は、式 3.1.1-26 となる。

$$H(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} x + C \quad \text{for } x < 0$$

$$H(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d} x + C \quad \text{for } 0 \leq x \quad (3.1.1-26)$$

また、境界条件より、式 3.1.1-27 が成立するため、式 3.1.1-26 の切片 C は、式 3.1.1-28 となる。

$$H(r) = 0 \quad , \quad H(-r) = 0 \quad (3.1.1-27)$$

$$C = \frac{c_{h1}}{c_d} r \quad (3.1.1-28)$$

さらに、式 3.1.1-4 より、式 3.1.1-29 が成立する^(補足3)ため、都市域 r は、式 3.1.1-30 となる。

$$\int_{-r}^r H(x) dx = \int_{-r}^0 \left(\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dx + \int_0^r \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dx = \frac{c_{h1}}{c_d} r^2 = 1 \quad (3.1.1-29)$$

$$r = \sqrt{\frac{c_d}{c_{h1}}} \quad (r > 0 \text{ より}) \quad (3.1.1-30)$$

以上より、求めるべき最適な都市形態は、式 3.1.1-31 の通り表す事ができ、図 3.1.1-2 のように拠点を中心とした二等辺三角形となる。

$$H(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} x + \sqrt{\frac{c_{h1}}{c_d}} \quad \text{for } x < 0$$

$$H(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d} x + \sqrt{\frac{c_{h1}}{c_d}} \quad \text{for } 0 \leq x \quad (3.1.1-31)$$

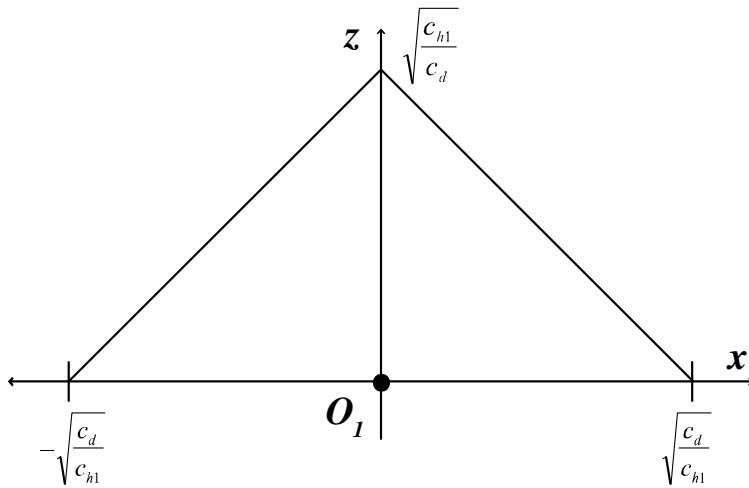


図 3.1.1-2 拠点が1つの場合の最適な2次元都市モデル

3.1.2 1次拠点2つと2次拠点1つの場合

次に、都市域が階層化されている都市モデルを想定し、2.3.1節にて定義した都市モデルの1次拠点 O_2 、 O_3 を考慮し、全人口が2次拠点 O_1 に移動する場合について、多層の床を想定しない場合の最適都市モデルを算出する。

都市内の任意の点を $P(x, z)$ と表し、住民は2次拠点 O_1 まで、移動コスト（図3.1.2-1の $P(x, z)$ から地上までの垂直移動と、そこから2次拠点までの水平移動のコストの合計）が最も小さい方法で移動する。

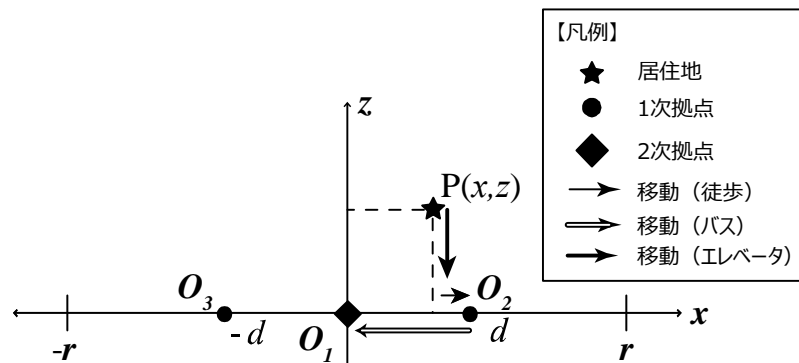


図 3.1.2-1 2次元都市モデルにおける拠点が複数の場合の移動方法

このとき、1次拠点を經由するかどうかは、經由した方が水平移動コストが小さいかどうかで決まる。これは、 $P(x, z)$ の高さ z には関係なく、水平方向の位置 x だけで決定することを意味する。1次拠点 O_2 を經由して2次拠点 O_1 へ移動する条件は、式3.1.2-1となる。

$$c_{h1}|x| \geq c_{h1}|x - (-d)| + c_{h2} \cdot d \tag{3.1.2-1}$$

また、1次拠点 O_3 を經由して2次拠点 O_1 へ移動する条件は、式3.1.2-2となる。

$$c_{h1}|x| \geq c_{h1}|x - d| + c_{h2} \cdot d \tag{3.1.2-2}$$

式3.1.2-1を x について解く(補足4)と、式3.1.2-1を満たす x の範囲は式3.1.2-3となる。

$$x \leq -\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \tag{3.1.2-3}$$

同様に、式3.1.2-2を満たす x の範囲は式3.1.2-4となる。

$$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x \quad (3.1.2-4)$$

したがって、ボロノイ図を描くと図 3.1.2-2 の通りとなり、任意の点 P から 2 次拠点 O_1 までの移動コスト $C(x, z)$ (点 P の居住者の移動コスト) は、式 3.1.2-5 となる。

$$C(x, z) = c_{h1} \cdot |x - (-d)| + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot z \quad \text{for } x < -\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$$

$$C(x, z) = c_{h1} \cdot |x| + c_d \cdot z \quad \text{for } -\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x < \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$$

$$C(x, z) = c_{h1} \cdot |x - d| + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot z \quad \text{for } \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x \quad (3.1.2-5)$$

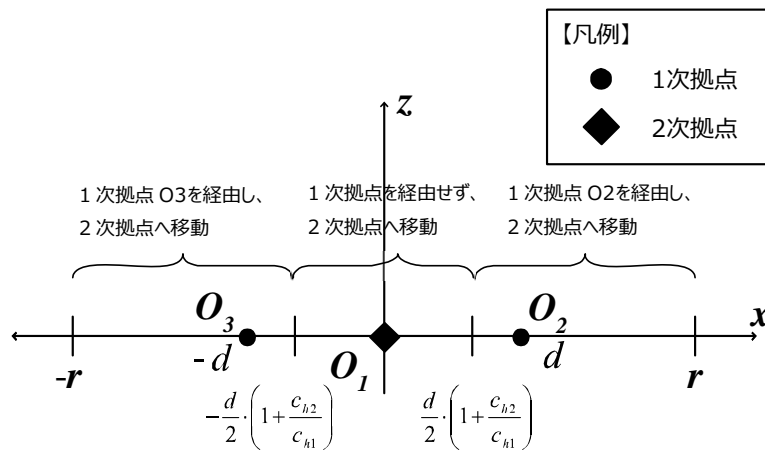


図 3.1.2-2 2次元都市モデルのボロノイ図

その他の条件は、3.1.1 と同じであり、同様に計算を行う。都市内の位置を座標 x で表すと、都市域は式 3.1.2-6 と仮定する。

$$-r \leq x \leq r \quad (3.1.2-6)$$

ただし、 r は無限大を含む任意の実数とする。次に、地点 x における建物の階数を $h(x)$ で表し、計算の簡便さのために、この値は自然数ではなく非負の実数とする。また、都市形態は任意の地点において連続であるとする。このとき、個人の位置は、地点 x と居住階数 z で記述され、 z は式 3.1.2-7 を満たす。

$$0 \leq z \leq h(x) \quad (3.1.2-7)$$

ここで都市域の外側では人口は0であると考え、式3.1.2-8が成立する。

$$h(x) = 0 \quad \text{for} \quad x \leq -r, r \leq x \quad (3.1.2-8)$$

このとき、移動コストが最小となる都市を考える場合、床が連続に存在していることは明らかである。また、都市居住者の単位必要面積は均一であると仮定しておく、都市人口と都市の延床長さは同一視できる。さらに日常生活域の人口は一定とし、総人口ないしは延床長さで単位を基準化しておけば、式3.1.2-9のようになる。

$$\int_{-r}^r h(x) dx = 1 \quad (3.1.2-9)$$

従って、都市全体の総移動コスト G は、式3.1.2-10の通り表す事ができる。

$$G = \int_{-r}^r \int_0^{h(x)} C(x, z) dz dx \quad (3.1.2-10)$$

式3.1.2-9より、地点 x における高さを表す関数 $h(x)$ を決定すれば、都市域 r が決定される。一方で、式3.1.2-5、式3.1.2-10より、総移動コストは、移動単位距離当たりのコストを表すパラメータ c_d 、 c_{h1} 、 c_{h2} と、都市域を表す r 、地点 x における高さを表す関数 $h(x)$ によって決まる。ここで、 $h(x)$ から r が定まることから、総移動コストは、水平、垂直移動距離のコストを表すパラメータ c_d 、 c_{h1} 、 c_{h2} と、高さを表す関数によって決定される。以降では、パラメータ c_d 、 c_{h1} 、 c_{h2} は定数と考え、地点 x における建物の高さを表す関数 $h(x)$ が求まる。そこで、総移動コストを最小化する都市形態を $H(x)$ とし、任意の都市形態と最適な都市形態の差を式3.1.2-11とすると、地点 x における建物の階数を表す関数 $h(x)$ は式3.1.2-12と表す事ができる。

$$\varepsilon \cdot \eta(x) = h(x) - H(x) \quad (3.1.2-11)$$

$$h(x) = \varepsilon \cdot \eta(x) + H(x) \quad (3.1.2-12)$$

このとき、式3.1.2-8の条件から、関数 $\eta(x, y)$ は、次の条件を満足しなければならない。

$$\eta(x) = 0 \quad \text{for} \quad x \leq -r, r \leq x \quad (3.1.2-13)$$

また、式3.1.2-9の条件から、日常生活域の人口は一定なので、式3.1.2-14が成立する。

$$\int_{-r}^r \eta(x) dx = 0 \quad (3.1.2-14)$$

任意の都市形態の総移動コストを G_h 、最適な都市形態の総移動コストを G_H とすると、式 3.1.2-15 を満たす必要がある。

$$G_H < G_h \quad (3.1.2-15)$$

一方、式 3.1.2-12 より、 $h(x)$ は変数 ε の関数と見ることができるので、関数 $\eta(x)$ が全域で恒等的に 0 でない時、関数 $h(x)$ の最小化条件は式 3.1.2-16 となる。つまり、式 3.1.2-17 が成立する。

$$\left[\frac{\partial G_h}{\partial \varepsilon} \right]_{\varepsilon=0} = 0 \quad (3.1.2-16)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_h - G_H}{\varepsilon} = 0 \quad (3.1.2-17)$$

このとき、 $G_h - G_H$ は、式 3.1.2-18 の通りである。

$$\begin{aligned} G_h - G_H &= \int_{-r}^r \int_0^{h(x)} C(x, z) dz dx - \int_{-r}^r \int_0^{H(x)} C(x, z) dz dx \\ &= \int_{-r}^r Q(x) dx \end{aligned} \quad (3.1.2-18)$$

$$\text{ただし、} Q(x) = \int_0^{h(x)} C(x, z) dz - \int_0^{H(x)} C(x, z) dz \quad (3.1.2-19)$$

ここで、式 3.1.2-19 に式 3.1.2-5 を代入して、 $Q(x)$ を求める。1 次拠点經由有無

により場合分けをすると、 $x < -\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$ のとき、式 3.1.2-20 となる。

$$\begin{aligned} Q(x) &= \{c_{h1} \cdot |x - (-d)| + c_{h2} \cdot d\} \cdot h(x) + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot h^2(x) \\ &\quad - \{c_{h1} \cdot |x - (-d)| + c_{h2} \cdot d\} \cdot H(x) - \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot H^2(x) \end{aligned} \quad (3.1.2-20)$$

$-\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x < \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$ のとき、式 3.1.2-21 となる。

$$Q(x) = c_{h1} \cdot |x| \cdot h(x) + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot h^2(x) - c_{h1} \cdot |x| \cdot H(x) - \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot H^2(x) \quad (3.1.2-21)$$

$\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x$ のとき、式 3.1.2-22 となる。

$$Q(x) = \{c_{h1} \cdot |x - d| + c_{h2} \cdot d\} \cdot h(x) + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot h^2(x) - \{c_{h1} \cdot |x - d| + c_{h2} \cdot d\} \cdot H(x) - \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot H^2(x) \quad (3.1.2-22)$$

さらに、式 3.1.2-12 を代入して、 ε の 2 乗以上の高次の項は無視しうるとして整理する(補足5)と、 $x < -\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$ のとき、式 3.1.2-23 となる。

$$Q(x) = \{c_{h1} \cdot |x - (-d)| + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot H(x)\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x) \quad (3.1.2-23)$$

$-\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x < \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$ のとき、式 3.1.2-24 となる。

$$Q(x) = \{c_{h1} \cdot |x| + c_d \cdot H(x)\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x) \quad (3.1.2-24)$$

$\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x$ のとき、式 3.1.2-25 となる。

$$Q(x) = \{c_{h1} \cdot |x - d| + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot H(x)\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x) \quad (3.1.2-25)$$

したがって、総移動コスト最小化条件は、式 3.1.2-26、式 3.1.2-27 の通り表す事ができる。

$$\delta G_h = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_h - G_H}{\varepsilon} = \int_{-s}^s \phi(x) \cdot \eta(x) dx = 0 \quad (3.1.2-26)$$

ただし、

$$\phi(x) = c_{h1} \cdot |x - (-d)| + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot H(x) \quad \text{for } x < -\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$$

$$\phi(x) = c_{h1} \cdot |x| + c_d \cdot H(x) \quad \text{for } -\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x < \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$$

$$\phi(x) = c_{h1} \cdot |x - d| + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot H(x) \quad \text{for } \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x \quad (3.1.2-27)$$

ここで、関数 $\eta(x)$ は、式 3.1.2-13、式 3.1.2-14 を満たしていれば、どのような値でもよい。つまり、式 3.1.2-26 は任意の関数 $\eta(x)$ において成立しなければならない。従って、平均値の定理より、関数 $\phi(x)$ は一定値である必要があり、式 3.1.2-28、式 3.1.2-29 が成立する。

$$\phi(x) = \text{const.} \quad (3.1.2-28)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x) = 0 \quad (3.1.2-29)$$

このとき、式 3.1.2-29 について、 $x < -d$ のとき、式 3.1.2-31 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x) = \frac{\partial}{\partial x} [-c_{h1} \cdot \{x - (-d)\} + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot H(x)] = 0 \quad (3.1.2-30)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} \quad (3.1.2-31)$$

また、 $-d \leq x < -\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき、式 3.1.2-33 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x) = \frac{\partial}{\partial x} [c_{h1} \cdot \{x - (-d)\} + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot H(x)] = 0 \quad (3.1.2-32)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (3.1.2-33)$$

また、 $-\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x < 0$ のとき、式 3.1.2-35 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x) = \frac{\partial}{\partial x} \{-c_{h1} \cdot x + c_d \cdot H(x)\} = 0 \quad (3.1.2-34)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} \quad (3.1.2-35)$$

また、 $0 \leq x < \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき、式 3.1.2-37 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x) = \frac{\partial}{\partial x} \{c_{h1} \cdot x + c_d \cdot H(x)\} = 0 \quad (3.1.2-36)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (3.1.2-37)$$

また、 $\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x < d$ のとき、式 3.1.2-39 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x) = \frac{\partial}{\partial x} \{-c_{h1} \cdot (x-d) + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot H(x)\} = 0 \quad (3.1.2-38)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} \quad (3.1.2-39)$$

また、 $d \leq x$ のとき、式 3.1.2-41 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x) = \frac{\partial}{\partial x} \{c_{h1} \cdot (x-d) + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot H(x)\} = 0 \quad (3.1.2-40)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (3.1.2-41)$$

以上より、総移動コストを最小化する都市形態 $H(x)$ は、式 3.1.2-42 となる。

$$H_1(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} x + C_1 \quad \text{for } x < -d$$

$$H_2(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d} x + C_2 \quad \text{for } -d \leq x < -\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$$

$$H_3(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} x + C_3 \quad \text{for } -\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x < 0$$

$$H_4(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d} x + C_4 \quad \text{for } 0 \leq x < \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$$

$$H_5(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} x + C_5 \quad \text{for } \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x < d$$

$$H_6(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d}x + C_6 \quad \text{for } d \leq x \quad (3.1.2-42)$$

また、境界条件より、式 3.1.2-43 が成立する^(補足6)ため、式 3.1.2-42 の切片 C は、式 3.1.2-44 となる。

$$\begin{aligned} H_1(-r) &= 0 \quad , \quad H_6(r) = 0 \quad , \\ H_1(-d) &= H_2(-d) \quad , \quad H_5(d) = H_6(d) \quad , \\ H_2\left(-\frac{d}{2}\left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) &= H_3\left(-\frac{d}{2}\left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) \quad , \\ H_4\left(\frac{d}{2}\left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) &= H_5\left(\frac{d}{2}\left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) \\ H_3(0) &= H_4(0) \end{aligned} \quad (3.1.2-43)$$

$$C_1 = C_6 = \frac{c_{h1}}{c_d}r \quad , \quad C_2 = C_5 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d) \quad ,$$

$$C_3 = C_4 = d \cdot \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d}\right) + \frac{c_{h1}}{c_d}(r - 2 \cdot d) \quad (3.1.2-44)$$

であり、さらに、式 3.1.2-9 より、式 3.1.2-45 が成立する^(補足7)ため、都市域 r は、式 3.1.2-46 となる。

$$\begin{aligned} \int_{-r}^r H(x)dx &= \int_{-r}^{-d} \left(\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r\right) dx + \int_{-d}^{-\frac{d}{2}\left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d)\right) dx \\ &\quad + \int_{-\frac{d}{2}\left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^0 \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + d \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d}\right) + \frac{c_{h1}}{c_d}(r - 2 \cdot d) \right\} dx \\ &\quad + \int_0^{\frac{d}{2}\left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \left\{ -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + d \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d}\right) + \frac{c_{h1}}{c_d}(r - 2 \cdot d) \right\} dx \\ &\quad + \int_{\frac{d}{2}\left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d) \right\} dx + \int_d^r \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r\right) dx \\ &= \frac{c_{h1}}{c_d} \left\{ d^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c_{h2}^2}{c_{h1}^2} + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} - \frac{3}{2} \right) + r^2 \right\} = 1 \end{aligned} \quad (3.1.2-45)$$

$$r = \sqrt{\frac{c_d}{c_{h1}} - d^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c_{h2}^2}{c_{h1}^2} + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} - \frac{3}{2} \right)} \quad \left(0 \leq r \quad , \quad 0 < \frac{c_{h2}}{c_{h1}} < 1 \quad \text{より} \right)$$

$$(3.1.2-46)$$

このとき、式 3.1.2-47 が成立するため、式 3.1.2-46 のルートの中身は必ず正となる。

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{c_{h2}^2}{c_{h1}^2} + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} - \frac{3}{2} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{c_{h2}}{c_{h1}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{c_{h2}}{c_{h1}} + 3 \right) < 0 \quad (3.1.2-47)$$

以上より、求めるべき最適な都市は、式 3.1.2-48 の通り表す事ができ、最適な都市形態は、図 3.1.2-3 のようにそれぞれの拠点位置で最大値を取る二等辺三角形である。

$$H_1(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} \sqrt{\frac{c_d}{c_{h1}} - d^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c_{h2}^2}{c_{h1}^2} + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} - \frac{3}{2} \right)}$$

for $x < -d$

$$H_2(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} \left(\sqrt{\frac{c_d}{c_{h1}} - d^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c_{h2}^2}{c_{h1}^2} + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} - \frac{3}{2} \right)} - 2 \cdot d \right)$$

for $-d \leq x < -\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$

$$H_3(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} x + d \cdot \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d} \right) + \frac{c_{h1}}{c_d} \left(\sqrt{\frac{c_d}{c_{h1}} - d^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c_{h2}^2}{c_{h1}^2} + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} - \frac{3}{2} \right)} - 2 \cdot d \right)$$

for $-\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x < 0$

$$H_4(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d} x + d \cdot \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d} \right) + \frac{c_{h1}}{c_d} \left(\sqrt{\frac{c_d}{c_{h1}} - d^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c_{h2}^2}{c_{h1}^2} + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} - \frac{3}{2} \right)} - 2 \cdot d \right)$$

for $0 \leq x < \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$

$$H_5(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} \left(\sqrt{\frac{c_d}{c_{h1}} - d^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c_{h2}^2}{c_{h1}^2} + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} - \frac{3}{2} \right)} - 2 \cdot d \right)$$

for $\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x < d$

$$H_6(x) = -\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} \sqrt{\frac{c_d}{c_{h1}} - d^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c_{h2}^2}{c_{h1}^2} + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} - \frac{3}{2} \right)}$$

for $d \leq x$

(3.1.2-48)

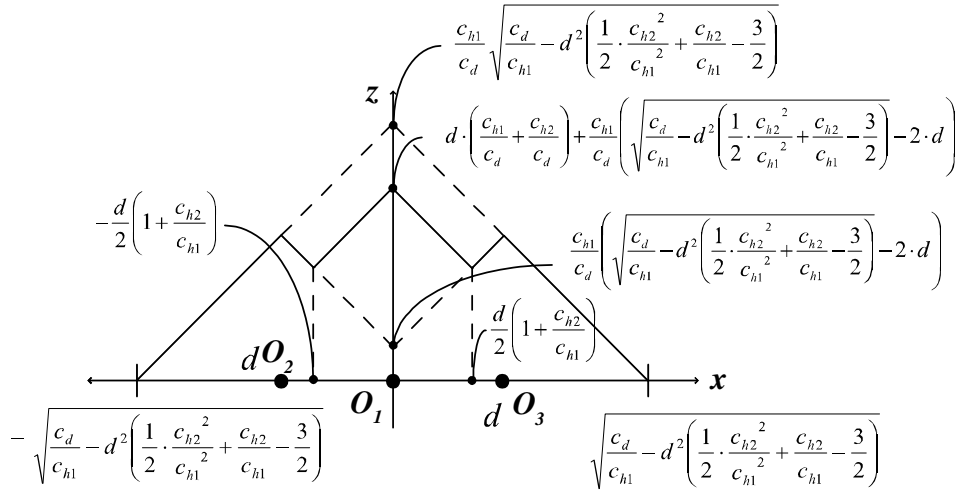


図 3.1.2-3 多層の床を想定しない場合における拠点が複数の場合の最適な2次元都市モデル

また、2次拠点が形成する生活域の都市形態の最大値は、1次拠点が形成する生活域の都市形態の最大値に比べて $\frac{c_{h2}}{c_d} \cdot d$ だけ大きく、この値は、式 3.1.2-49 の通

り表すことができる。

$$H_{\max}(x) = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left\{ r - \frac{d}{2} \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \quad (3.1.2-49)$$

このとき、表記上の簡便さのため、定数 α を式 3.1.2-50 のとおり設定すると、総移動コスト G は式 3.1.2-51 となる。

$$\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) = \alpha \quad (3.1.2-50)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} G = & c_{h1} \left[\int_0^\alpha x \cdot \left\{ -\frac{c_{h1}}{c_d} x + d \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d} \right) + \frac{c_{h1}}{c_d} (r - 2d) \right\} dx \right. \\ & + \int_\alpha^d (d-x) \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} (r - 2d) \right\} dx \\ & \left. + \int_d^r (x-d) \left\{ -\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right\} dx \right] \\ & + c_d \left[\int_0^{\frac{c_{h1}\alpha + c_{h1}(r-2d)}{c_d}} y \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} y + r \right\} dy \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_{\frac{c_{h1}\alpha + c_{h1}(r-2d)}{c_d}}^{d\left(\frac{c_{h1} + c_{h2}}{c_d} + \frac{c_{h1}}{c_d}(r-2d)\right)} y \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}}y + d\left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) + r - 2d \right\} dy \\
 & + \int_{\frac{c_{h1}\alpha + c_{h1}(r-2d)}{c_d}}^{\frac{c_{h1}d + c_{h1}r}{c_d}} y \cdot \left[\left(-\frac{c_d}{c_{h1}}y + r \right) - \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}}y - (r - 2d) \right\} \right] dy \\
 & + c_{h2} \left[d \cdot \left[\frac{1}{2} \left[\left(-\frac{c_{h1}}{c_d}d + \frac{c_{h1}}{c_d}r \right) + \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d}\alpha + \frac{c_{h1}}{c_d}(r - 2d) \right\} \right] \cdot (d - \alpha) \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \frac{1}{2}(r - d) \left(-\frac{c_{h1}}{c_d}d + \frac{c_{h1}}{c_d}r \right) \right] \right] \tag{3.1.2-51}
 \end{aligned}$$

式 3.1.2-51 を計算すると、式 3.1.2-52 となる^(補足8)。

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2}G & = \frac{3d^3c_{h2}^3 + 9d^3c_{h1}c_{h2}^2 + (12dr^2 - 15d^3)c_{h1}^2c_{h2}}{24c_{h1}c_d} \\
 & + \frac{(8r^3 - 12dr^2 + 3d^3)c_{h1}^3}{24c_{h1}c_d} \tag{3.1.2-52}
 \end{aligned}$$

3.2 多層の床を想定する場合の最適な2次元都市モデルの算出

3.2節では、多層の床を想定する場合の最適な都市形態を算出する。

3.1節と同様に、まず、最も単純な都市モデルを想定し、全人口が1つの1次拠点に移動する場合について、3.2.1節にて最適な都市形態を算出する。次に、都市域が階層化されている都市モデルを想定し、1次拠点と2次拠点が存在する場合について、3.2.2節にて最適な都市形態を算出する。

3.2.1 1次拠点1つの場合

3.1.1節と同じ都市モデルについて、階高を想定した場合の最適な都市形態を求める。

都市内の位置を座標 x で表し、都市域を式 3.2.1-1 の通り仮定する。

$$-r \leq x \leq r \quad (3.2.1-1)$$

ただし、 r は無限大を含む任意の実数とする。次に、地点 x における建物の高さを $h(x)$ で表し、計算の簡便さのために、この値は自然数ではなく非負の実数とする。また、都市形態は任意の地点において連続であるとする。階高 a (定数)、最上床階と最高高さの差を h' ($0 < h' \leq a$) とすると、地点 x における階数は式 3.2.1-2 となる。

$$\frac{h(x) - h'}{a} + 1 \quad (3.2.1-2)$$

式 3.2.1-2 を、自然数 m を用いて、式 3.2.1-3 のように表す。

$$m + 1 \quad (3.2.1-3)$$

以降は、 z 軸での対称性を考慮し、 $0 \leq x$ についてのみを対象に計算を行う。居住階数を z ($0 < z \leq m + 1$ を満たす自然数)、延床長さを D 、 z 階における床長さを $s(z)$ と置くと、延床長さ D は式 3.2.1-4 となる。

$$s(1) + s(2) + \dots + s(m+1) = \sum_{k=1}^{m+1} s(k) = \frac{D}{2} \quad (3.2.1-4)$$

このとき、移動コストが最小となる都市を考える場合、床が連続に存在していることは明らかである。また、都市居住者の単位必要面積は均一であると仮定しておく、都市人口と都市の延床長さは同一視でき、総移動コスト G は、式 3.2.1-5 の通り表す事ができる。

$$\frac{G}{2} = \sum_{k=1}^{m+1} \int_0^{s(k)} x \cdot c_{hl} dx + \sum_{k=1}^{m+1} s(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \quad (3.2.1-5)$$

ここで、式 3.2.1-4 より、 z 階における床長さを $s(z)$ を決定すれば、階数 $m+1$ が決定される。一方で、式 3.2.1-5 より、総移動コストは、移動単位距離当たりのコストを表すパラメータ c_d 、 c_{hl} と、 z 階における床長さ $s(z)$ 、階数 $m+1$ によって決まる。以上より、日常生活域の人口は一定とすると、パラメータ c_d 、 c_{hl} と、延床長さ D は定数と考えられ、総移動コストは z 階における床長さ $s(z)$ に

よって決定される。そこで、総移動コストを最小化する z 階における床長さを $s(z)$ とし、任意の都市形態と最適な都市形態の差を、式 3.2.1-6 とすると、 z 階における床長さ $s(z)$ は式 3.2.1-7 と表す事ができる。

$$\varepsilon \cdot \eta(z) = s(z) - S(z) \quad (3.2.1-6)$$

$$s(z) = \varepsilon \cdot \eta(z) + S(z) \quad (3.2.1-7)$$

このとき、延床長さ D は一定なので、式 3.2.1-8 を満たす必要がある。

$$\sum_{k=1}^{m+1} \eta(k) = 0 \quad (3.2.1-8)$$

任意の都市形態の総移動コストを G_s 、最適な都市形態の総移動コストを G_S とすると、式 3.2.1-9 を満たす必要がある。

$$G_s < G_S \quad (3.2.1-9)$$

一方、式 3.2.1-7 より、 $s(z)$ は変数 ε の関数と見ることができるので、関数 $\eta(z)$ が全域で恒等的に 0 でない時、関数 $s(z)$ の最小化条件は式 3.2.1-10 となる。つまり、式 3.2.1-11 が成立する。

$$\left[\frac{\partial G_s}{\partial \varepsilon} \right]_{\varepsilon=0} = 0 \quad (3.2.1-10)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_s - G_S}{\varepsilon} = 0 \quad (3.2.1-11)$$

このとき、 $G_s - G_S$ は、式 3.2.1-12 の通りである。

$$G_s - G_S = \left\{ \sum_{k=1}^{m+1} \int_0^{s(k)} x \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m+1} s(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \right\} - \left\{ \sum_{k=1}^{m+1} \int_0^{S(k)} x \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m+1} S(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \right\} \quad (3.2.1-12)$$

式 3.2.1-12 に、式 3.2.1-7 を代入し、 ε の 2 乗以上の高次の項は無視しうるとして整理する(補足9)と、式 3.2.1-13 となる。

$$G_s - G_S = \left\{ \sum_{k=1}^{m+1} \int_0^{\varepsilon \cdot \eta(k) + S(k)} x \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m+1} (\varepsilon \cdot \eta(k) + S(k)) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \right\} - \left\{ \sum_{k=1}^{m+1} \int_0^{S(k)} x \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m+1} S(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \right\}$$

$$= \sum_{k=1}^{m+1} c_{h1} \cdot S(k) \cdot \varepsilon \cdot \eta(k) + \sum_{k=1}^{m+1} \varepsilon \cdot \eta(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \quad (3.2.1-13)$$

したがって、総移動コスト最小化条件は、式3.2.1-14の通り表す事ができる。

$$\begin{aligned} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_s - G_S}{\varepsilon} &= \sum_{k=1}^{m+1} c_{h1} \cdot S(k) \cdot \eta(k) + \sum_{k=1}^{m+1} \eta(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \\ &= \sum_{k=1}^{m+1} c_{h1} \cdot S(k) \cdot \eta(k) + \sum_{k=1}^{m+1} \eta(k) \cdot k \cdot a \cdot c_d - \sum_{k=1}^{m+1} \eta(k) \cdot a \cdot c_d = 0 \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.2.1-14)$$

式3.2.1-14に、式3.2.1-8を代入すると、式3.2.1-15となる。

$$\begin{aligned} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_s - G_S}{\varepsilon} &= \sum_{k=1}^{m+1} c_{h1} \cdot S(k) \cdot \eta(k) + \sum_{k=1}^{m+1} \eta(k) \cdot k \cdot a \cdot c_d \\ &= \sum_{k=1}^{m+1} \eta(k) \cdot \{c_{h1} \cdot S(k) + k \cdot a \cdot c_d\} = 0 \end{aligned} \quad (3.2.1-15)$$

ここで $\eta(k)$ は、式3.2.1-8を満たす任意の関数式なので、 p を $p \geq 3$ を満たす自然数とし、 $\eta(1)=1$ 、 $\eta(2)=-1$ 、 $\eta(p)=0$ とした場合、式3.2.1-16となるため、式3.2.1-17が成立する。

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_s - G_S}{\varepsilon} = (c_{h1} \cdot S(1) + 1 \cdot a \cdot c_d) - (c_{h1} \cdot S(2) + 2 \cdot a \cdot c_d) = 0 \quad (3.2.1-16)$$

$$(c_{h1} \cdot S(1) + 1 \cdot a \cdot c_d) = (c_{h1} \cdot S(2) + 2 \cdot a \cdot c_d) \quad (3.2.1-17)$$

また、 p を $p \geq 4$ を満たす自然数とし、 $\eta(1)=1$ 、 $\eta(2)=0$ 、 $\eta(3)=-1$ 、 $\eta(q)=0$ とした場合、式3.2.1-18となるため、式3.2.1-19が成立する。

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_s - G_S}{\varepsilon} = (c_{h1} \cdot S(1) + 1 \cdot a \cdot c_d) - (c_{h1} \cdot S(3) + 3 \cdot a \cdot c_d) = 0 \quad (3.2.1-18)$$

$$(c_{h1} \cdot S(1) + 1 \cdot a \cdot c_d) = (c_{h1} \cdot S(3) + 3 \cdot a \cdot c_d) \quad (3.2.1-19)$$

同様にして、 p を $p \geq q$ を満たす自然数とし、 $\eta(1)=1$ 、 $\eta(2)=0$ 、 $\eta(3)=0$ 、 \dots 、 $\eta(q)=-1$ 、 $\eta(p)=0$ とした場合、式3.2.1-20となるため、式3.2.1-21が成立する。

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_s - G_S}{\varepsilon} = (c_{h1} \cdot S(1) + 1 \cdot a \cdot c_d) - (c_{h1} \cdot S(q) + q \cdot a \cdot c_d) = 0 \quad (3.2.1-20)$$

$$(c_{h1} \cdot S(1) + 1 \cdot a \cdot c_d) = (c_{h1} \cdot S(q) + q \cdot a \cdot c_d) \quad (3.2.1-21)$$

以上より、式3.2.1-22が成立すると言える。

$$\begin{aligned}
 c_{h1} \cdot S(1) + 1 \cdot a \cdot c_d &= c_{h1} \cdot S(2) + 2 \cdot a \cdot c_d \\
 &= \dots \\
 &= c_{h1} \cdot S(k) + k \cdot a \cdot c_d \\
 &= \dots \\
 &= c_{h1} \cdot S(m+1) + (m+1) \cdot a \cdot c_d
 \end{aligned}
 \tag{3.2.1-22}$$

以上より、式 3.2.1-23 が成立する。

$$S(k) = S(1) - (k-1) \cdot a \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} = -k \cdot a \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} + \left(S(1) + a \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} \right)
 \tag{3.2.1-23}$$

つまり、1階の床長さを $s(1)$ とし、1階上がるごとに $a \cdot \frac{c_d}{c_{h1}}$ だけ床長さは小さく

なる都市形態が、総移動コストを最小化する最適な都市形態である(図 3.2.1-1)。このことは、図 3.2.1-1 の斜線のように都市の上端部を結ぶと、傾斜が水平方向の移動コストに比例し垂直方向のそれと反比例する直線、すなわち拠点までの移動コストが一定となる線となることを意味する。この線に対してはみ出した床と達しない床があれば、この線に揃えることで移動コストを削減できるので、直感的に解釈可能な結果である。

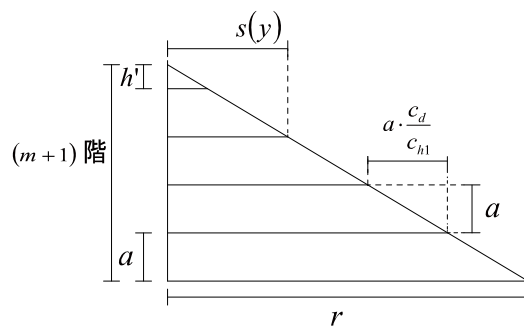


図 3.2.1-1 床と階高のイメージ

このとき、1階の床長さを $s(1)$ が決定すると、都市の最高高さ $h(x)$ も決定する。また、階高 a は定数とみなすことができるため、 $h(x)$ が決まると、階数の最大値 $m+1$ も決定する。さらに、階数 m が決定すると、都市の延床長さ D も決定し、両者は単調増加の関係にある(図 3.2.1-2)。つまり、階高を持ち、拠点が一つある最適な都市形態は、延床長さを与えると、自然と決定される。

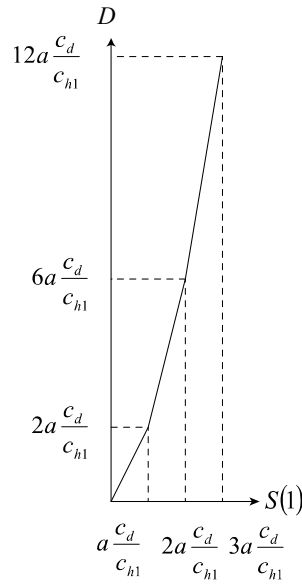


図 3.2.1-2 1階の床長さと延床長さの関係

なお、都市の延床長さは、式 3.2.1-4 より、式 3.2.1-24 となる。

$$\begin{aligned}
 \sum_{k=1}^{m+1} S(k) &= \sum_{k=1}^{m+1} \left\{ -k \cdot a \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} + \left(S(1) + a \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} \right) \right\} \\
 &= -\frac{(m+1) \cdot \{1 + (m+1)\}}{2} \cdot a \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} + (m+1) \cdot \left(S(1) + a \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} \right) \\
 &= -\frac{m \cdot (m+1)}{2} \cdot a \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} + (m+1) \cdot S(1) = \frac{D}{2} \quad (3.2.1-24)
 \end{aligned}$$

したがって、1階の床長さを $s(1)$ は式 3.2.1-25 となる。

$$S(1) = \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{(m+1)} + \frac{m}{2} \cdot a \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} \quad (3.2.1-25)$$

また、総移動コスト G は、式 3.2.1-26 となる。

$$\begin{aligned}
 G &= 2 \cdot \left\{ \sum_{k=1}^{m+1} \int_0^{s(k)} x \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m+1} s(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \right\} \\
 &= \frac{3 \cdot c_{h1}^2 \cdot D^2 + 6 \cdot a \cdot m \cdot (1+m) \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot D - a^2 \cdot m \cdot (1+m)^2 \cdot (2+m) \cdot c_d^2}{12 \cdot (m+1) \cdot c_{h1}} \quad (3.2.1-26)
 \end{aligned}$$

3.2.2 1次拠点2つと2次拠点1つの場合

3.1.2節と同じ都市モデルについて、階高を想定した場合の最適な都市形態を求める。

都市内の任意の点を $P(x, z)$ と表し、住民は2次拠点 O_1 まで、移動コストが最も小さい方法で移動する。1次拠点を經由するかどうかは、 $P(x, z)$ の高さ z には関係なく、水平方向の位置 x だけで決定するため、3.1.2節と同じである。また、1次拠点までの移動、あるいは、1次拠点を經由せずに2次拠点へ移動する場合の最適な都市形態は、3.2.1節にて求めた1次拠点が1つある場合と同じである。つまり、各拠点に対する最適な都市形態は、1階上がるごとに $a \cdot \frac{c_d}{c_{h1}}$ だ

け床長さは小さくなるため、傾きが $\frac{c_{h1}}{c_d}$ の三角形となる。また、移動コストが

最小となる都市を考える場合、床が連続に存在していることは明らかである。以降は、 z 軸での対称性を考慮し、 $0 \leq x$ についてのみを対象に計算を行う。

$0 \leq x < \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$ のとき、都市の高さを表す関数は、式 3.2.2-1 となる。

$$z_1 = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + h_1(0) \quad (3.2.2-1)$$

$\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x < d$ のとき、都市の高さを表す関数は、式 3.2.2-2 となる。

$$z_2 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + A \quad (3.2.2-2)$$

$d \leq x < s$ のとき、都市の高さを表す関数は、式 3.2.2-3 となる。

$$z_3 = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + B \quad (3.2.2-3)$$

式 3.2.2-1 より、 $x = \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$ のときの都市の高さは式 3.2.2-4 となる。

$$h_1 \left(\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) = h_1(0) - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \quad (3.2.2-4)$$

床が連続して存在しているため、式 3.2.2-2、式 3.2.2-4 より、式 3.2.2-5 が成立

する。

$$A = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot d \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + h_1(0)$$

$$z_2 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + h_1(0) - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot d \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \quad (3.2.2-5)$$

同様に、式3.2.2-2、式3.2.2-5より、式3.2.2-6が成立する。

$$h_2(d) = h_1(0) - d \cdot \frac{c_{h2}}{c_d} \quad (3.2.2-6)$$

同様に、式3.2.2-3、式3.2.2-6より、式3.2.2-7が成立する。

$$B = d \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + h_1(0)$$

$$z_3 = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + h_1(0) + d \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \quad (3.2.2-7)$$

以上より、最適な都市形態は図3.2.2-1になる。

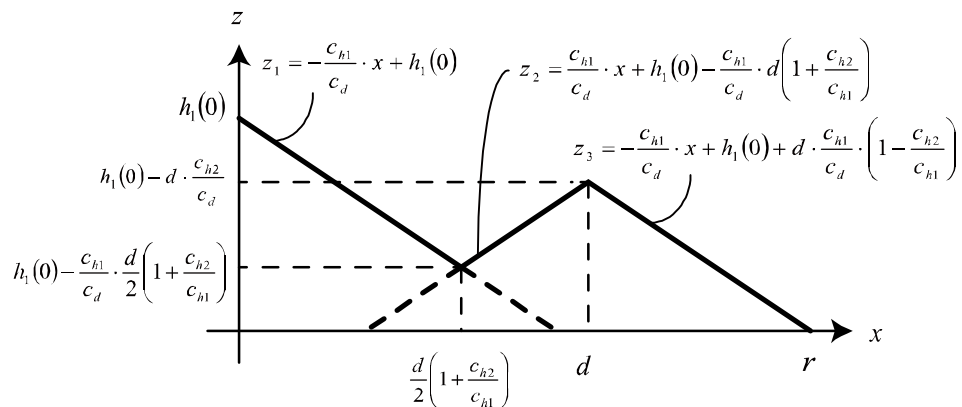


図3.2.2-1 多層の床を想定する場合における拠点が複数の場合の最適な2次元都市モデル

この時、都市端である $x=r$ では、都市の高さは0となるため、式3.2.2-7より、式3.2.2-8が成立する。

$$r = d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot h_1(0) \quad (3.2.2-8)$$

ここで、高さ z の床長さを $s(z)$ で表すと、式 3.2.2-1、式 3.2.2-5、式 3.2.2-7 より、式 3.2.2-9、式 3.2.2-10、式 3.2.2-11 が成立する^(補足10)。

$0 \leq z \leq h_1(0) - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき、

$$s(z) = \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - z) + d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \quad (3.2.2-9)$$

$h_1(0) - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) < z \leq h_1(0) - d \cdot \frac{c_{h2}}{c_d}$ のとき、

$$s(z) = 3 \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - z) - 2 \cdot d \cdot \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \quad (3.2.2-10)$$

$h_1(0) - d \cdot \frac{c_{h2}}{c_d} < z \leq h_1(0)$ のとき、

$$s(z) = \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - z) \quad (3.2.2-11)$$

階高 a (定数)、最上床階と最高高さの差を $h'(x)$ ($0 < h'(x) \leq a$) とすると、地点 x における階数は式 3.2.2-12 となる。

$$\frac{h(x) - h'(x)}{a} + 1 \quad (3.2.2-12)$$

式 3.4-5 を、自然数 m を用いて、式 3.2.2-13 のように表す。

$$m(x) + 1 \quad (3.2.2-13)$$

また、表記上の簡便さのため、定数 α を式 3.2.2-14 のとおり設定する。

$$\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) = \alpha \quad (3.2.2-14)$$

さらに、式 3.2.2-1、3.2.2-5、3.2.2-7 より、それぞれの範囲における k 階における連続した床の長さを、式 3.2.2-15、式 3.2.2-16、式 3.2.2-17 の通り $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 、 $x_3(k)$ で表す。

$$x_1(k) = \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - a \cdot (k - 1)) \quad (3.2.2-15)$$

$$x_2(k) = \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (a \cdot (k - 1) - h_1(0)) - d \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \quad (3.2.2-16)$$

$$x_3(k) = \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - a \cdot (k-1)) + d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \quad (3.2.2-17)$$

このとき、延床長さは式 3.2.2-18 となる。

$$\begin{aligned} & 2 \times \left[\sum_{k=1}^{m(\alpha)+1} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - a \cdot (k-1)) + d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} \right. \\ & \quad + \sum_{k=m(\alpha)+2}^{m(d)+1} \left\{ 3 \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - a \cdot (k-1)) - 2 \cdot d \cdot \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right\} \\ & \quad \left. + \sum_{k=m(d)+2}^{m(0)+1} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - a \cdot (k-1)) \right\} \right] \quad (3.2.2-18) \end{aligned}$$

また、総移動コストは、式 3.2.2-19 となる。

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{m(\alpha)+1} \int_0^\alpha x \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m(\alpha)+1} \alpha \cdot a \cdot (k-1) \cdot c_d \\ & \quad + \sum_{k=m(\alpha)+2}^{m(0)+1} \int_0^{x_1(k)} x \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=m(\alpha)+2}^{m(0)+1} x_1(k) \cdot a \cdot (k-1) \cdot c_d \\ & \quad + \sum_{k=1}^{m(\alpha)+1} \int_\alpha^d (d-x) \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m(\alpha)+1} (d-\alpha) \cdot a \cdot (k-1) \cdot c_d \\ & \quad + \sum_{k=m(\alpha)+2}^{m(d)+1} \int_{x_2(k)}^d (d-x) \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=m(\alpha)+2}^{m(d)+1} \{d-x_2(k)\} \cdot a \cdot (k-1) \cdot c_d \\ & \quad + \sum_{k=1}^{m(d)+1} \int_d^{x_3(k)} (x-d) \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m(d)+1} \{x_3(k)-d\} \cdot a \cdot (k-1) \cdot c_d \\ & \quad + \left\{ \sum_{k=1}^{m(\alpha)+1} (d-\alpha) + \sum_{k=m(\alpha)+2}^{m(d)+1} \{d-x_2(k)\} + \sum_{k=1}^{m(d)+1} \{x_3(k)-d\} \right\} \cdot d \cdot c_{h2} \end{aligned} \quad (3.2.2-19)$$

参考文献 (3章)

- [3-1] 青木義次：よしつぐノート 29、総移動コストを最小化する都市形態、
http://www.aokilab.arch.titech.ac.jp/lab/y_notes/notes/29_ynote.pdf、参照 2010.8.1

第4章 最適な3次元都市モデルの算出

4章では、 x,y,z の3軸方向に広がる3次元都市モデルについて、最適な都市形態を算出する。

4.1節では、多層の床を想定しない場合の都市モデルについて、最適な都市形態を算出する。

4.2節では、多層の床を想定する場合の都市モデルについて、最適な都市形態を算出する。

各節において、単純な都市モデルである1次拠点1つの場合の都市モデルと、都市域が階層化されている都市モデルを想定した、1次拠点4つと2次拠点1つの場合の都市モデルについて、最適な都市形態を算出する。

4.1 多層の床を想定しない場合の最適な3次元都市モデルの算出

4.1節では、多層の床を想定しない場合の最適な都市形態を算出する。

2次元都市モデルの場合と同様、まず、最も単純な都市モデルを想定し、全人口が1つの1次拠点に移動する場合について、4.1.1節にて最適な都市形態を算出する。次に、都市域が階層化されている都市モデルを想定し、1次拠点と2次拠点が存在する場合について、4.1.2節にて最適な都市形態を算出する。

4.1.1 1次拠点1つの場合

2次元都市モデルの場合と同様に、まず、最も単純な都市モデルを想定し、2.3.1節にて定義した都市モデルの1次拠点 O_2 、 O_3 、 O_4 、 O_5 を考慮せず、全人口が2次拠点 O_1 に移動する場合（図4.1.1-1）について、多層の床を想定しない場合の最適都市モデルを算出する。

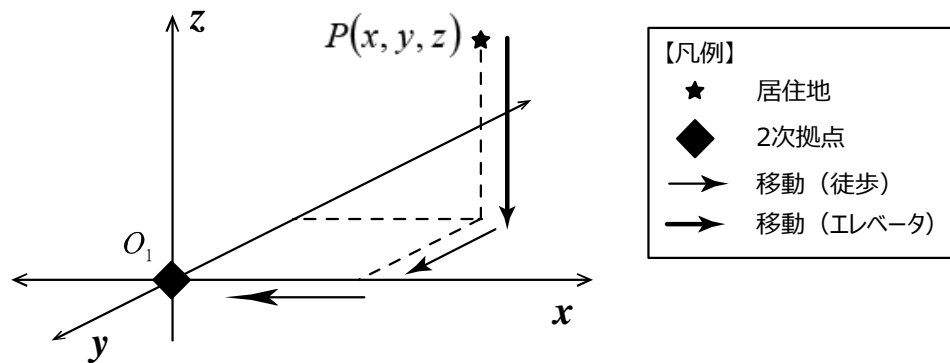


図 4.1.1-1 3次元都市モデルにおける拠点が1つの場合の移動方法

3次元都市モデルの場合は、都市内の位置を座標 x 、 y で表し、都市域を式4.1.1-1、式4.1.1-2の通り設定する。

$$-r \leq x \leq r \tag{4.1.1-1}$$

$$Y_S(x) \leq y \leq Y_N(x) \tag{4.1.1-2}$$

ただし、 r は無有限大を含む任意の実数とする。次に、地点 (x, y) における建物の階数を $h(x, y)$ で表し、計算の簡便さのために、この値は自然数ではなく非負の実数とする。また、都市形態は任意の地点において連続であるとする。このとき、個人の位置は、地点 x 、 y と居住階数 z で記述され、 z は式4.1.1-3を満たす。

$$0 \leq z \leq h(x, y) \tag{4.1.1-3}$$

ここで都市域の外側では人口は0であると考えると、式4.1.1-4が成立する。

$$h(x, y) = 0 \tag{4.1.1-4}$$

for $x \leq -r, r \leq x, Y_S(x) \leq y, Y_N(x) \leq y$

このとき、移動コストが最小となる都市を考える場合、床が連続に存在していることは明らかである。また、都市居住者の単位必要面積は均一であると仮定

しておくと、都市人口と都市の延床面積は同一視でき、さらに日常生活域の人口は一定とし、総人口ないしは延床面積で単位を基準化しておけば、式4.1.1-5のようになる。

$$\int_{-r}^r \int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} h(x, y) dy dx = 1 \quad (4.1.1-5)$$

さらに、都市内の任意の点を $P(x, y, z)$ と表し、2地点間の距離をマンハッタン距離で定義すると、任意の点 P から1次拠点 O_1 までの移動コスト $C(x, y, z)$ (点 P の居住者の移動コスト) は、式4.1.1-6となる。

$$C(x, y, z) = c_{hl}(|x| + |y|) + c_d \cdot z \quad (4.1.1-6)$$

以上より、都市全体の総移動コスト G は、式4.1.1-7の通り表す事ができる。

$$G = \int_{-r}^r \int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} \int_0^{h(x,y)} C(x, y, z) dz dy dx \quad (4.1.1-7)$$

式4.1.1-5より、高さ(都市形態)を表す関数 $h(x, y)$ を決定すれば、都市域 r が決定される。一方で、式4.1.1-6、式4.1.1-7より、総移動コストは、移動単位距離当たりのコストを表すパラメータ c_d 、 c_{hl} と、都市域を表す r 、地点 (x, y) における建物の高さを表す関数 $h(x, y)$ によって決まる。ここで、 $h(x, y)$ から r が定まることから、総移動コストは、水平、垂直移動距離のコストを表すこれら2つのパラメータと、地点 (x, y) における建物の高さを表す関数 $h(x, y)$ によって決定される。パラメータ c_d 、 c_{hl} を定数と考えると、地点 (x, y) における建物の高さを表す関数 $h(x, y)$ が求まる。そこで、総移動コストを最小化する都市形態を $H(x, y)$ とし、任意の都市形態と最適な都市形態の差を、式4.1.1-8とすると、地点 (x, y) における建物の高さを表す関数 $h(x, y)$ は式4.1.1-9と表す事ができる。

$$\varepsilon \cdot \eta(x, y) = h(x, y) - H(x, y) \quad (4.1.1-8)$$

$$h(x, y) = \varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y) \quad (4.1.1-9)$$

このとき、式4.1.1-4の条件から、関数 $\eta(x, y)$ は、次の条件を満足しなければならない。

$$\eta(x, y) = 0 \quad \text{for} \quad x \leq -r, r \leq x, y \leq Y_S(x), Y_N(x) \leq y \quad (4.1.1-10)$$

また、式4.1.1-5の条件から、日常生活域の人口は一定なので、式4.1.1-11が成立する。

$$\int_{-r}^r \int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} \eta(x, y) dy dx = 0 \quad (4.1.1-11)$$

任意の都市形態の総移動コストを G_h 、最適な都市形態の総移動コストを G_H とすると、式 4.1.1-12 を満たす必要がある。

$$G_H < G_h \quad (4.1.1-12)$$

一方、式 4.1.1-9 より、 $h(x, y)$ は変数 ε の関数と見ることができるので、関数 $\eta(x, y)$ が全域で恒等的に 0 でない時、関数 $h(x, y)$ の最小化条件は、式 4.1.1-13 となる。つまり、式 4.1.1-14 が成立する。

$$\left[\frac{\partial G_h}{\partial \varepsilon} \right]_{\varepsilon=0} = 0 \quad (4.1.1-13)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_h - G_H}{\varepsilon} = 0 \quad (4.1.1-14)$$

このとき、 $G_h - G_H$ は、式 4.1.1-15 の通りである。

$$\begin{aligned} G_h - G_H &= \int_{-r}^r \int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} \int_0^{h(x,y)} C(x, y, z) dz dy dx \\ &\quad - \int_{-r}^r \int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} \int_0^{H(x,y)} C(x, y, z) dz dy dx \\ &= \int_{-r}^r \int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} Q(x, y) dy dx \end{aligned} \quad (4.1.1-15)$$

ただし、

$$Q(x, y) = \int_0^{h(x,y)} C(x, y, z) dz - \int_0^{H(x,y)} C(x, y, z) dz \quad (4.1.1-16)$$

$Q(x, y)$ は、式 4.1.1-6 を代入すると、式 4.1.1-17 となる^(補足11)。

$$\begin{aligned} Q(x, y) &= c_{h1} \cdot (|x| + |y|) \cdot h(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x, y) \\ &\quad - c_{h1} \cdot (|x| + |y|) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y) \end{aligned} \quad (4.1.1-17)$$

さらに、式 4.1.1-9 を代入して、 ε の 2 乗以上の高次の項は無視しうるとして整理すると^(補足12)、式 4.1.1-18 となる。

$$Q(x, y) = \{c_{h1} \cdot (|x| + |y|) + c_d \cdot H(x, y)\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) \quad (4.1.1-18)$$

したがって、総移動コスト最小化条件は、式 4.1.1-19 の通り表す事ができる。

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_h - G_H}{\varepsilon} = \int_{-r}^r \int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} \phi(x, y) \cdot \eta(x, y) dy dx = 0 \quad (4.1.1-19)$$

ただし、

$$\phi(x, y) = c_{h1} \cdot (|x| + |y|) + c_d \cdot H(x, y) \quad (4.1.1-20)$$

ここで、関数 $\eta(x, y)$ は、式 4.1.1-10、式 4.1.1-11 を満たしていれば、どのような値でもよい。つまり、式 4.1.1-19 は条件を満たす任意の関数 $\eta(x, y)$ において成立しなければならない。従って、平均値の定理より、関数 $\phi(x, y)$ は一定値である必要があり、式 4.1.1-21、式 4.1.1-22、式 4.1.1-23 が成立する。

$$\phi(x, y) = c_{h1} \cdot (|x| + |y|) + c_d \cdot H(x, y) = \text{const.} \quad (4.1.1-21)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) = 0 \quad (4.1.1-22)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) = 0 \quad (4.1.1-23)$$

式 4.1.1-22 は、 $x < 0$ のとき、式 4.1.1-25 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) = -c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = 0 \quad (4.1.1-24)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = \frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.1-25)$$

また、 $0 \leq x$ のとき、式 4.1.1-27 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) = c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = 0 \quad (4.1.1-26)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.1-27)$$

式 4.1.1-23 は、 $y < 0$ のとき、式 4.1.1-29 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) = -c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = 0 \quad (4.1.1-28)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = \frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.1-29)$$

また、 $0 \leq y$ のとき、式4.1.1-31が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) = c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = 0 \quad (4.1.1-30)$$

よって、

$$\frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.1-31)$$

以上より、総移動コストを最小化する都市形態 $H(x, y)$ は、式4.1.1-32となる。

$$H_1(x, y) = \frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} y + C \quad \text{for} \quad x < 0, \quad y < 0$$

$$H_2(x, y) = \frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + C \quad \text{for} \quad x < 0, \quad 0 \leq y$$

$$H_3(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} y + C \quad \text{for} \quad 0 \leq x, \quad y < 0$$

$$H_4(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + C \quad \text{for} \quad 0 \leq x, \quad 0 \leq y \quad (4.1.1-32)$$

また、境界条件より、式4.1.1-33が成立するため、式4.1.1-32の切片 C と都市域を表す関数は、式4.1.1-34となる^(補足13)。

$$\begin{aligned} H_1(x, Y_S(x)) &= 0, & H_2(x, Y_N(x)) &= 0 \\ H_3(x, Y_S(x)) &= 0, & H_4(x, Y_N(x)) &= 0 \\ H_4(r, 0) &= 0, & H_2(-r, 0) &= 0 \end{aligned} \quad (4.1.1-33)$$

$$\begin{aligned} C &= \frac{c_{h1}}{c_d} r \\ Y_S(x) &= -x - r \quad \text{for} \quad x < 0, \quad y < 0 \\ Y_N(x) &= x + r \quad \text{for} \quad x < 0, \quad 0 \leq y \\ Y_S(x) &= x - r \quad \text{for} \quad 0 \leq x, \quad y < 0 \\ Y_N(x) &= -x + r \quad \text{for} \quad 0 \leq x, \quad 0 \leq y \end{aligned} \quad (4.1.1-34)$$

さらに、式 4.1.1-5 より、式 4.1.1-35 が成立するため、都市域 r は、式 4.1.1-36 となる^(補足14)。

$$\begin{aligned}
 \int_{-r}^r \int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} H(x, y) dy dx &= \int_0^r \int_0^{-x+r} \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
 &\quad + \int_0^r \int_{x-r}^0 \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
 &\quad + \int_{-r}^0 \int_0^{x+r} \left(\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
 &\quad + \int_{-r}^0 \int_{-x-r}^0 \left(\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
 &= \frac{2c_{h1}}{3c_d} r^3 = 1 \tag{4.1.1-35}
 \end{aligned}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3c_d}{2c_{h1}}} \tag{4.1.1-36}$$

以上より、求めるべき最適な都市形態は、式 4.1.1-37 の通り表す事ができる。

$$\begin{aligned}
 H(x, y) &= \frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} y + \sqrt[3]{\frac{3c_{h1}^2}{2c_d^2}} \quad \text{for } x < 0, y < 0 \\
 H(x, y) &= \frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \sqrt[3]{\frac{3c_{h1}^2}{2c_d^2}} \quad \text{for } x < 0, 0 \leq y \\
 H(x, y) &= -\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} y + \sqrt[3]{\frac{3c_{h1}^2}{2c_d^2}} \quad \text{for } 0 \leq x, y < 0 \\
 H(x, y) &= -\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \sqrt[3]{\frac{3c_{h1}^2}{2c_d^2}} \quad \text{for } 0 \leq x, 0 \leq y
 \end{aligned} \tag{4.1.1-37}$$

またこのとき、都市域の境界は、式 4.1.1-38 となる。

$$\begin{aligned}
 Y_S(x) &= -x - \sqrt[3]{\frac{3c_d}{2c_{h1}}} \quad \text{for } x < 0, y < 0 \\
 Y_N(x) &= x + \sqrt[3]{\frac{3c_d}{2c_{h1}}} \quad \text{for } x < 0, 0 \leq y
 \end{aligned}$$

$$Y_S(x) = x - \sqrt[3]{\frac{3c_d}{2c_{h1}}} \quad \text{for} \quad 0 \leq x, \quad y < 0$$

$$Y_N(x) = -x + \sqrt[3]{\frac{3c_d}{2c_{h1}}} \quad \text{for} \quad 0 \leq x, \quad 0 \leq y \quad (4.1.1-38)$$

以上より、1次拠点へ移動する場合の最適な人口分布は、図4.1.1-2のように、

$-\sqrt[3]{\frac{3c_d}{2c_{h1}}} \leq x, y \leq \sqrt[3]{\frac{3c_d}{2c_{h1}}}$ の範囲で、x軸・y軸を対角線とし、原点での高さ

$\sqrt[3]{\frac{3c_{h1}^2}{2c_d^2}}$ を頂点とする四角錐となる。

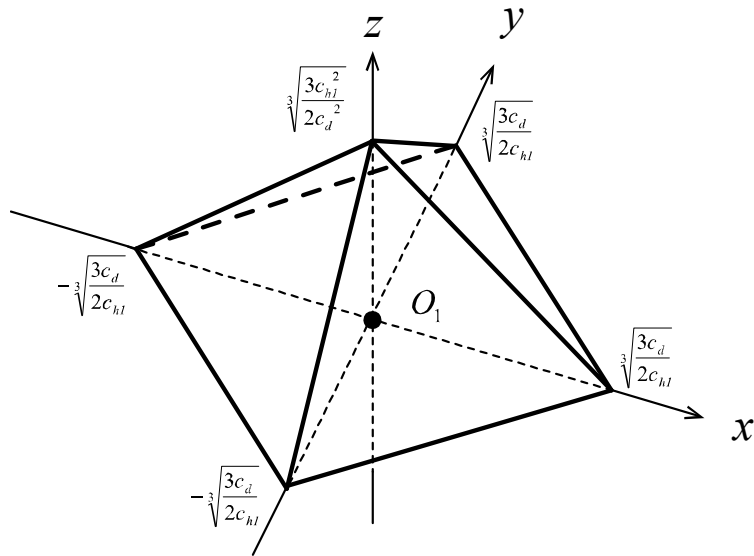


図 4.1.1-2 多層の床を想定しない場合における拠点が1つの場合の最適な3次元都市モデル

4.1.2 1次拠点4つと2次拠点1つの場合

次に、都市域が階層化されている都市モデルを想定し、2.3.1節にて定義した都市モデルの1次拠点 O_2 、 O_3 を考慮し、全人口が2次拠点 O_1 に移動する場合について、多層の床を想定しない場合の最適都市モデルを算出する。

都市内の任意の点を $P(x, y, z)$ と表し、住民は2次拠点 O_1 まで、移動コスト（図4.1.2-1の $P(x, y, z)$ から地上までの垂直移動と、そこから2次拠点までの水平移動のコストの合計）が最も小さい方法で移動する。

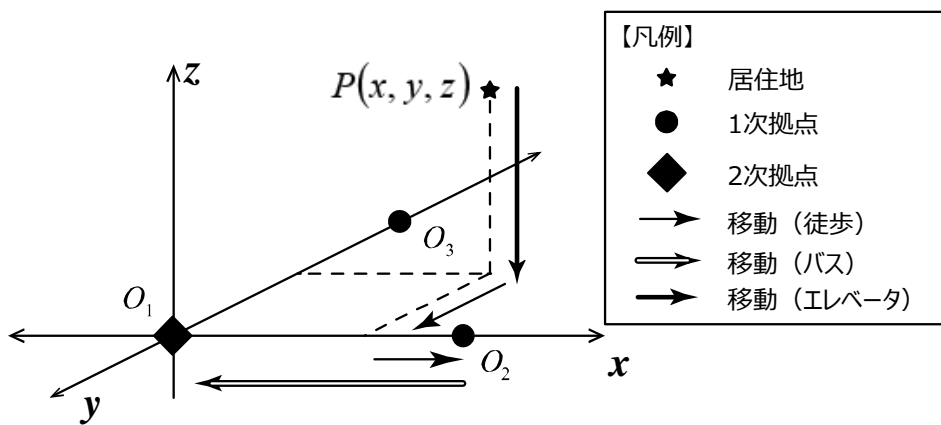


図 4.1.2-1 3次元都市モデルにおける拠点が複数の場合の移動方法

このとき、3.1.2節と同様に、1次拠点を經由するかどうかは、經由した方が水平移動コストが小さいかどうかで決まる。つまり、式4.1.2-1、式4.1.2-2の条件が成立する場合、1次拠 O_2 または1次拠 O_3 を經由する。

$$c_{h1} \cdot (x+y) \geq c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h1} \cdot y + c_{h2} \cdot d \tag{4.1.2-1}$$

$$c_{h1} \cdot (x+y) \geq c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot |y-d| + c_{h2} \cdot d \tag{4.1.2-2}$$

式4.1.2-1を x について解く^(補足15)と、式4.1.2-1を満たす x の範囲は式4.1.2-3となる。

$$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x \tag{4.1.2-3}$$

同様に、式4.1.2-2を満たす x の範囲は式4.1.2-4となる。

$$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y \tag{4.1.2-4}$$

式 4.1.2-3、式 4.1.2-4 を満たす範囲の中で、住民は1次拠点 O_2 、あるいは、1次拠点 O_3 のうち移動コストの小さくなる方の拠点を經由して2次拠点へ移動する。つまり、 $\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x < d$ かつ $\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y < d$ のときで、式 4.1.2-5 を満たす場合は1次拠点 O_2 を經由し、式 4.1.2-6 を満たす場合は1次拠点 O_3 を經由する。

$$c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h1} \cdot y + c_{h2} \cdot d \leq c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot |y-d| + c_{h2} \cdot d \quad (4.1.2-5)$$

$$c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h1} \cdot y + c_{h2} \cdot d \geq c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot |y-d| + c_{h2} \cdot d \quad (4.1.2-6)$$

式 4.1.2-5 を解くと、式 4.1.2-7 となり、式 4.1.2-6 を解くと、式 4.1.2-8 となる。

$$x \geq y \quad (4.1.2-7)$$

$$x \leq y \quad (4.1.2-8)$$

また、 $d \leq x$ かつ $d \geq y$ のとき、住民は1次拠点 O_2 を經由して2次拠点へ移動し、 $d \geq x$ かつ $d \leq y$ のとき、住民は1次拠点 O_3 を經由して2次拠点へ移動することは明らかである。さらに、マンハッタン距離を考えているため、 $d \leq x$ かつ $d \leq y$ のとき、住民は O_2 、 O_3 どちらの1次拠点を經由しても、コストは同じとなる。

本研究では、以降の計算の簡便のため、 $\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x < d$ かつ $\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y < d$

の場合と同様に、 $x \geq y$ のとき、住民は1次拠点 O_2 を經由して2次拠点へ移動し、 $x \leq y$ のとき、住民は1次拠点 O_3 を經由して2次拠点へ移動することと仮定する(図 4.1.2-2)。

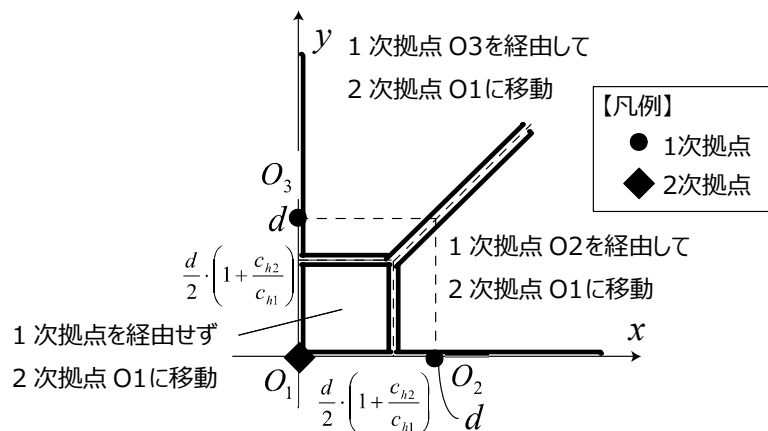


図 4.1.2-2 3次元都市モデルのボロノイ図

したがって、任意の点 $P(x, y, z)$ から2次拠点 O_1 までの移動コスト $C(x, y, z)$ (点 P の居住者の移動コスト) は、式 4.1.2-9 となる。

$$\begin{aligned}
 C(x, y, z) &= c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot y + c_d \cdot z \\
 &\text{for } 0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), \quad 0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \\
 C(x, y, z) &= c_{h1} \cdot |x - d| + c_{h1} \cdot y + c_d \cdot z + c_{h2} \cdot d \\
 &\text{for } \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x, \quad x \geq y \\
 C(x, y, z) &= c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot |y - d| + c_d \cdot z + c_{h2} \cdot d \\
 &\text{for } \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y, \quad x \leq y
 \end{aligned} \tag{4.1.2-9}$$

その他の条件は、4.1.1 と同じであり、同様に計算を行う。無限大を含む任意の実数 r を用いて、都市域を式 4.1.2-10、式 4.1.2-11 の通り仮定する。

$$-r \leq x \leq r \tag{4.1.2-10}$$

$$Y_S(x) \leq y \leq Y_N(x) \tag{4.1.2-11}$$

次に、地点 (x, y) における建物の階数を $h(x, y)$ で表し、この値は自然数ではなく非負の実数とする。また、都市形態は任意の地点において連続であるとする。このとき、個人の位置は、地点 x, y と居住階数 z で記述され、 z は式 4.1.2-12 を満たす。

$$0 \leq z \leq h(x, y) \tag{4.1.2-12}$$

ここで都市域の外側では人口は0であると考えると、式 4.1.2-13 が成立する。

$$h(x, y) = 0 \quad \text{for } x \leq -r, r \leq x, y \leq Y_S(x), Y_N(x) \leq y \tag{4.1.2-13}$$

このとき、移動コストが最小となる都市を考える場合、床が連続に存在していることは明らかである。また、都市居住者の単位必要面積は均一であると仮定しておく、都市人口と都市の延床面積は同一視できる。さらに日常生活域の人口は一定とし、総人口ないしは延床面積で単位を基準化しておけば、式 4.1.2-14 のようになる。

$$\int_{-r}^r \int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} h(x, y) dy dx = 1 \tag{4.1.2-14}$$

従って、都市全体の総移動コスト G は、式 4.1.2-15 の通り表す事ができる。

$$\frac{1}{4} \cdot G = \int_0^r \int_0^{Y_N(x)} \int_0^{h(x,y)} C(x, y, z) dz dy dx \quad (4.1.2-15)$$

式 4.1.2-14 より、地点(x, y)における高さを表す関数 $h(x, y)$ を決定すれば、都市域 r が決定される。一方で、式 4.1.2-9、式 4.1.2-15 より、総移動コストは、移動単位距離当たりのコストを表すパラメータ c_d, c_{h1}, c_{h2} と、都市域を表す r 、地点(x, y)における高さを表す関数 $h(x, y)$ によって決まる。ここで、 $h(x, y)$ から r が定まることから、総移動コストは、水平、垂直移動距離のコストを表すパラメータ c_d, c_{h1}, c_{h2} と、高さを表す関数によって決定される。以降では、パラメータ c_d, c_{h1}, c_{h2} は定数と考えると、地点(x, y)における高さを表す関数 $h(x, y)$ が求まる。そこで、総移動コストを最小化する都市形態を $H(x, y)$ とし、任意の都市形態と最適な都市形態の差を式 4.1.2-16 とすると、地点(x, y)における高さを表す関数 $h(x, y)$ は式 4.1.2-17 と表す事ができる。

$$\varepsilon \cdot \eta(x, y) = h(x, y) - H(x, y) \quad (4.1.2-16)$$

$$h(x, y) = \varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y) \quad (4.1.2-17)$$

このとき、式 4.1.2-13 の条件から、関数 $\eta(x, y)$ は、次の条件を満足しなければならない。

$$\eta(x, y) = 0 \quad \text{for } r \leq x, Y_N(x) \leq y \quad (4.1.2-18)$$

また、式 4.1.2-14 の条件から、日常生活域の人口は一定なので、式 4.1.2-19 が成立する。

$$\int_0^r \int_0^{Y_N(x)} \eta(x, y) dy dx = 0 \quad (4.1.2-19)$$

任意の都市形態の総移動コストを G_h 、最適な都市形態の総移動コストを G_H とすると、式 4.1.2-20 を満たす必要がある。

$$G_H < G_h \quad (4.1.2-20)$$

一方、式 4.1.2-17 より、 $h(x, y)$ は変数 ε の関数と見ることができるので、関数 $\eta(x, y)$ が全域で恒等的に 0 でない時、関数 $h(x, y)$ の最小化条件は、式 4.1.2-21 となる。つまり、式 4.1.2-22 が成立する。

$$\left[\frac{\partial G_h}{\partial \varepsilon} \right]_{\varepsilon=0} = 0 \quad (4.1.2-21)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_h - G_H}{\varepsilon} = 0 \quad (4.1.2-22)$$

このとき、 $G_h - G_H$ は、式4.1.2-23の通りである。

$$\begin{aligned} G_h - G_H &= \int_0^r \int_0^{Y_N(x)} \int_0^{h(x,y)} C(x,y,z) dz dy dx \\ &\quad - \int_0^r \int_0^{Y_N(x)} \int_0^{H(x,y)} C(x,y,z) dz dy dx \\ &= \int_0^r \int_0^{Y_N(x)} Q(x,y) dy dx \end{aligned} \quad (4.1.2-23)$$

$$\text{ただし、} Q(x,y) = \int_0^{h(x,y)} C(x,y,z) dz - \int_0^{H(x,y)} C(x,y,z) dz \quad (4.1.2-24)$$

ここで、式4.1.2-24に式4.1.2-9を代入して、 $Q(x)$ を求める^(補足16)。1次拠点経由

有無により場合分けをすると、 $0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ かつ $0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき、

式4.1.2-25となる。

$$Q(x,y) = c_{h1} \cdot (x+y) \cdot h(x,y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x,y) - c_{h1} \cdot (x+y) \cdot H(x,y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x,y) \quad (4.1.2-25)$$

$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x$ かつ $x \geq y$ のとき、式4.1.2-26となる。

$$\begin{aligned} Q(x,y) &= c_{h1} \cdot (|x-d| + y) \cdot h(x,y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x,y) + c_{h2} \cdot d \cdot h(x,y) \\ &\quad - c_{h1} \cdot (|x-d| + y) \cdot H(x,y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x,y) - c_{h2} \cdot d \cdot H(x,y) \end{aligned} \quad (4.1.2-26)$$

$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y$ かつ $x \leq y$ のとき、式4.1.2-27となる。

$$\begin{aligned} Q(x,y) &= c_{h1} \cdot (x + |y-d|) \cdot h(x,y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x,y) + c_{h2} \cdot d \cdot h(x,y) \\ &\quad - c_{h1} \cdot (x + |y-d|) \cdot H(x,y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x,y) - c_{h2} \cdot d \cdot H(x,y) \end{aligned}$$

(4.1.2-27)

さらに、式4.1.2-17を代入して、 ε の2乗以上の高次の項は無視しうるとして整理する

(補足17)と、 $0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ かつ $0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき、式4.1.2-28となる。

$$Q(x, y) = \{c_{h1} \cdot (x + y) + c_d \cdot H(x, y)\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) \quad (4.1.2-28)$$

$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x$ かつ $x \geq y$ のとき、式4.1.2-29となる。

$$Q(x, y) = \{c_{h1} \cdot (|x - d| + y) + c_d \cdot H(x, y) + c_{h2} \cdot d\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) \quad (4.1.2-29)$$

$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y$ かつ $x \leq y$ のとき、式4.1.2-30となる。

$$Q(x, y) = \{c_{h1} \cdot (x + |y - d|) + c_d \cdot H(x, y) + c_{h2} \cdot d\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) \quad (4.1.2-30)$$

したがって、総移動コスト最小化条件は、式4.1.2-31、式4.1.2-32の通り表す事ができる。

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{G_h - G_H}{\varepsilon} = \int_0^r \int_0^{Y_N(x)} \phi(x, y) \cdot \eta(x, y) dy dx = 0 \quad (4.1.2-31)$$

ただし、

$$\phi(x, y) = c_{h1} \cdot (x + y) + c_d \cdot H(x, y)$$

$$\text{for } 0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \text{ かつ } 0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$$

$$\phi(x, y) = c_{h1} \cdot (|x - d| + y) + c_d \cdot H(x, y) + c_{h2} \cdot d$$

$$\text{for } \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x \text{ かつ } x \geq y$$

$$\phi(x, y) = c_{h1} \cdot (x + |y - d|) + c_d \cdot H(x, y) + c_{h2} \cdot d$$

$$\text{for } \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y \text{ かつ } x \leq y \quad (4.1.2-31)$$

ここで、関数 $\eta(x, y)$ は、式4.1.2-18、式4.1.2-19を満たしていれば、どのような値でもよい。つまり、式4.1.2-30は任意の関数 $\eta(x, y)$ において成立しなければならない。従って、平均値の定理より、関数 $\phi(x, y)$ は一定値である必要があり、式4.1.2-32、式4.1.2-33が成立する。

$$\phi(x, y) = \text{const} \quad (4.1.2-32)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) = 0 \quad , \quad \frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) = 0 \quad (4.1.2-33)$$

このとき、 $0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ かつ $0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき、式4.1.2-35、式4.1.2-37

が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) = c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = 0 \quad (4.1.2-34)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.2-35)$$

かつ、

$$\frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) = c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = 0 \quad (4.1.2-36)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.2-37)$$

また、 $\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x < d$ かつ $x \geq y$ のとき、式4.1.2-39、式4.1.2-41が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) = -c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = 0 \quad (4.1.2-38)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = \frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.2-39)$$

かつ、

$$\frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) = c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = 0 \quad (4.1.2-40)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.2-41)$$

また、 $d \leq x$ かつ $x \geq y$ のとき、式 4.1.2-43、式 4.1.2-45 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) = c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = 0 \quad (4.1.2-42)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.2-43)$$

かつ

$$\frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) = c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = 0 \quad (4.1.2-44)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.2-45)$$

また、 $\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y < d$ かつ $x \leq y$ のとき、式 4.1.2-47、式 4.1.2-49 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) = c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = 0 \quad (4.1.2-46)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.2-47)$$

かつ

$$\frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) = -c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = 0 \quad (4.1.2-48)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = \frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.2-49)$$

また、 $d \leq y$ かつ $x \leq y$ のとき、式 4.1.2-51、式 4.1.2-53 が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) = c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = 0 \quad (4.1.2-50)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial x} H(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.2-51)$$

かつ

$$\frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) = c_{h1} + c_d \cdot \frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = 0 \quad (4.1.2-52)$$

つまり、

$$\frac{\partial}{\partial y} H(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \quad (4.1.2-53)$$

となる。以上より、総移動コストを最小化する都市形態 $H(x, y)$ は、式 4.1.2-54

となる。

$$H_1(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_1$$

$$\text{for } 0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), \quad 0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$$

$$H_2(x, y) = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_2$$

$$\text{for } \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x < d, \quad x \geq y$$

$$H_3(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_3$$

$$\text{for } d \leq x, \quad x \geq y$$

$$H_4(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_4$$

$$\text{for } \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y < d, \quad x \leq y$$

$$H_5(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_5$$

$$\text{for } d \leq y, \quad x \leq y \quad (4.1.2-54)$$

また、境界条件より、式 4.1.2-55 が成立するため、式 4.1.2-54 の切片 C と都市

域を表す関数は、式 4.1.2-56 となる^(補足18)。

$$\begin{aligned}
 H_3(r,0) &= 0 & H_1(x, Y_N(x)) &= 0 & H_2(x, Y_N(x)) &= 0 & , \\
 H_3(x, Y_N(x)) &= 0 & H_4(x, Y_N(x)) &= 0 & H_5(x, Y_N(x)) &= 0 & , \\
 H_1\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) &= H_2\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) & , \\
 H_1\left(x, \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) &= H_4\left(x, \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) & , \\
 H_2(d, y) &= H_3(d, y) & , & H_4(x, d) &= H_5(x, d) & , \\
 H_2(x, x) &= H_4(x, x) & , & H_3(x, x) &= H_5(x, x) & \quad (4.1.2-55)
 \end{aligned}$$

$$C_1 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} , \quad C_2 = C_4 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d) , \quad C_3 = C_5 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r$$

$$Y_N(x) = -x + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \quad \text{for} \quad 0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), \quad 0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$$

$$Y_N(x) = x + r - 2 \cdot d \quad \text{for} \quad \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x < d, \quad x \geq y$$

$$Y_N(x) = -x + r \quad \text{for} \quad d \leq x, \quad x \geq y$$

$$Y_N(x) = x - r + 2 \cdot d \quad \text{for} \quad \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y < d, \quad x \leq y$$

$$Y_N(x) = -x + r \quad \text{for} \quad d \leq y, \quad x \leq y \quad (4.1.2-56)$$

さらに、式 4.1.2-14 より、式 4.1.2-57 が成立する必要がある。

$$\int_0^r \int_0^{Y_N(x)} H(x, y) dy dx = \frac{1}{4} \quad (4.1.2-57)$$

このとき、 d と r の大小関係より、積分を行う範囲は変化する。まず、 $2 \cdot d \leq r$ の時、 $Y_N(x)$ の表す図形は、図 4.1.2-3、4.1.2-4 のようになる。

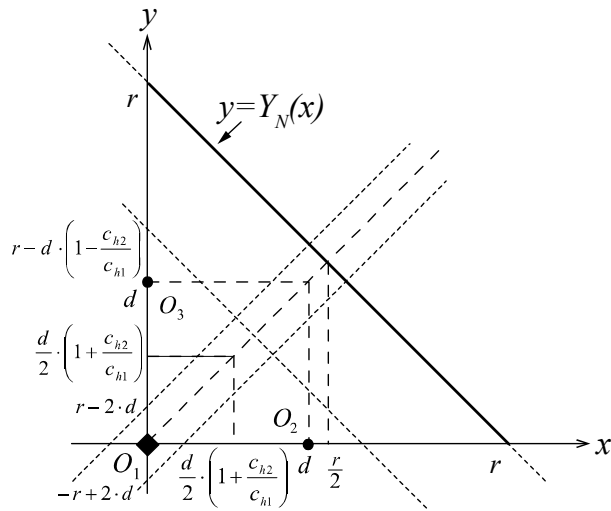


図 4.1.2-3 積分範囲①

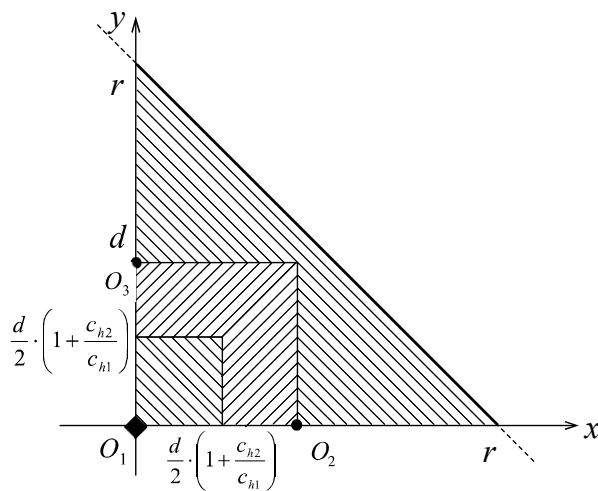


図 4.1.2-4 屋根のかかり方①

また、 $2 \cdot d > r$ の時、 $Y_M(x)$ の表す図形は、次のようになる。このとき、 d と r の大小関係、 c_{h1} 、 c_{h2} の値の大小関係によって、2通りの図を描くことができる。

ただし、 $c_{h1} > c_{h2}$ とするため、 $r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \geq d$ つまり、 $2 \cdot d > r \geq d \cdot \left(2 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ の

とき、図 4.1.2-5、4.1.2-6 のようになり、 $r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) < d$ かつ

$r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \geq -r + 2 \cdot d$ つまり、 $\frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq r < d \cdot \left(2 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき、図4.1.2-7、

4.1.2-8 のようになる。

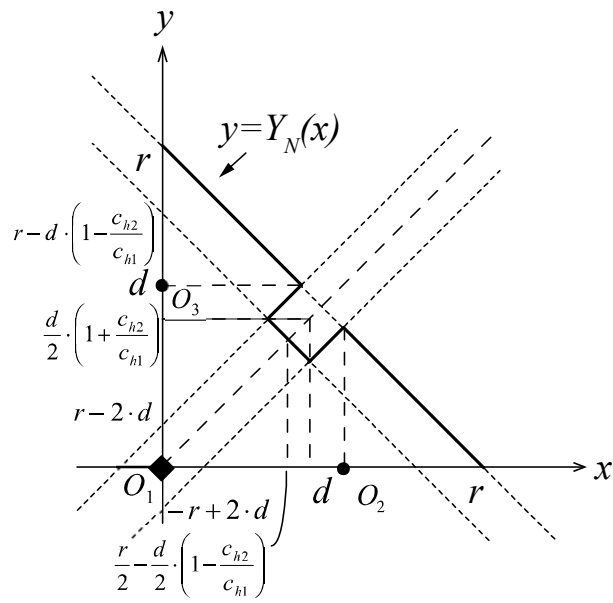


図 4.1.2-5 積分範囲②

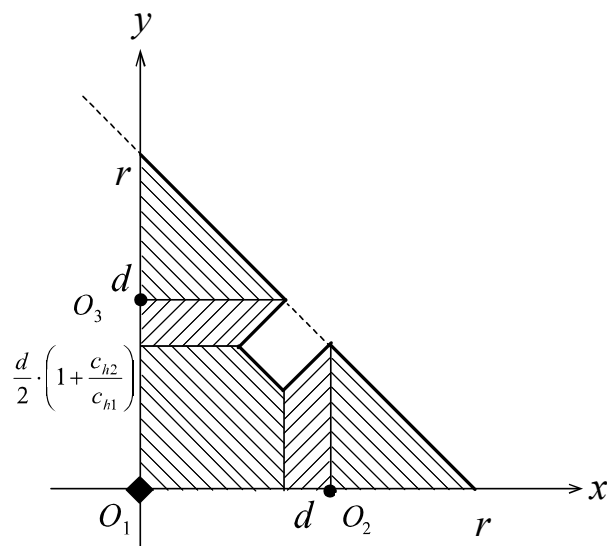


図 4.1.2-6 屋根のかかり方②

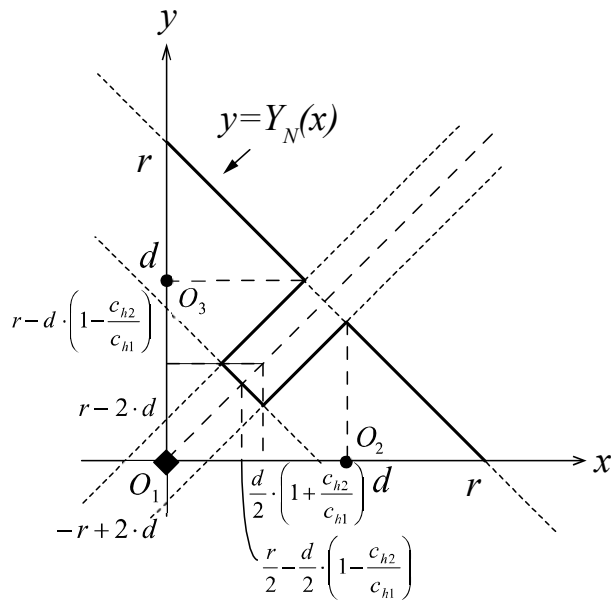


図 4.1.2-7 積分範囲③

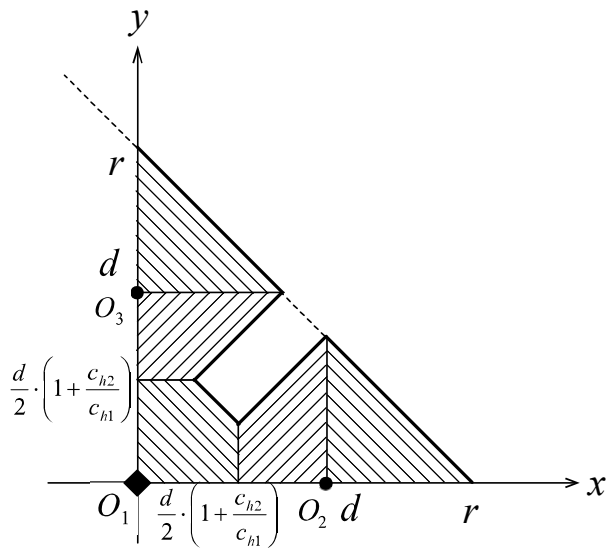


図 4.1.2-8 屋根のかかり方③

さらに、 $r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) < -r+2 \cdot d$ つまり、 $r < \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき、図 4.1.2-9、

4.1.2-10 のようになる。

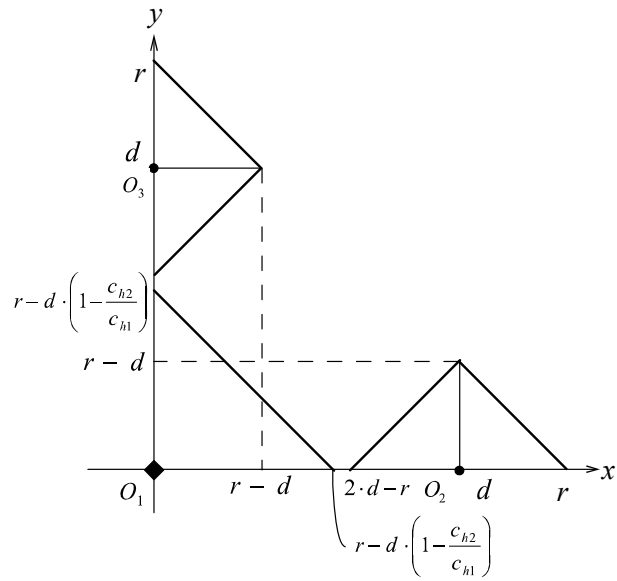


図 4.1.2-9 積分範囲④

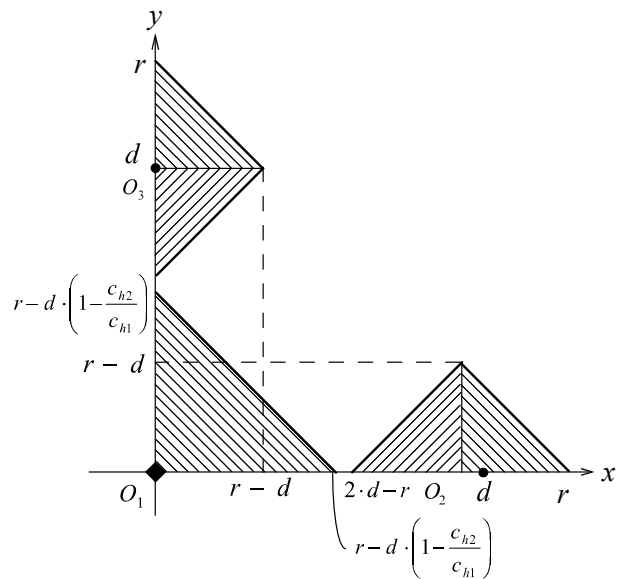


図 4.1.2-10 屋根のかかり方④

以上より、拠点間距離と都市域と都市形態の関係をまとめると、図 4.1.2-11 となる。

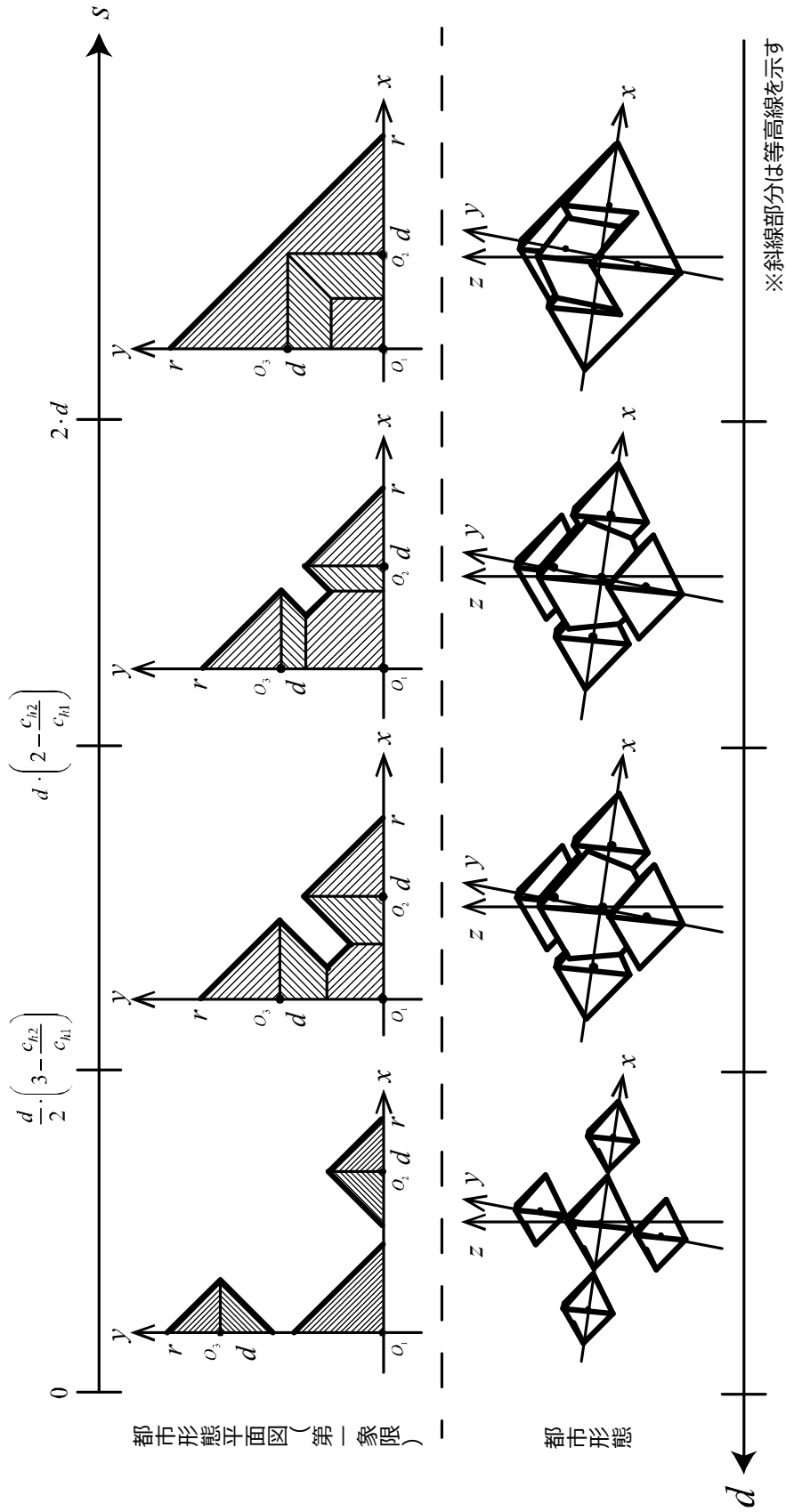


図 4.1.2-11 拠点間距離と都市域と都市形態の関係

移動コストが最小となる都市を考える場合、床が連続に存在していることは明らかであるため、最適な都市形態となる場合は、 $2 \cdot d \leq r$ のときである。 $y=x$ において対称な図形となることも考慮すると、式4.1.2-57は、 $2 \cdot d \leq r$ のとき、式4.1.2-58となる^(補足19)。

$$\begin{aligned}
 \int_0^r \int_0^{y_N(x)} H(x, y) dy dx &= \int_0^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_0^x -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left[x + y - \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} \right] dy dx \\
 &+ \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \int_0^x \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \{ x - y + (r - 2 \cdot d) \} dy dx \\
 &+ \int_d^r \int_0^x -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (x + y - r) dy dx \\
 &+ \int_{\frac{r}{2}}^r \int_0^{-x+r} -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (x + y - r) dy dx \\
 &= \frac{2 \cdot c_{h1}^3 \cdot r^3 + (c_{h2}^3 + 3 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^2 + 3 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2} - 7 \cdot c_{h1}^3) \cdot d^3}{24 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d} = \frac{1}{8}
 \end{aligned}
 \tag{4.1.2-58}$$

したがって、都市域 r は式4.1.2-59となる。

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d - (c_{h2}^3 + 3 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^2 + 3 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2} - 7 \cdot c_{h1}^3) \cdot d^3}{2 \cdot c_{h1}^3}}
 \tag{4.1.2-59}$$

このとき、3乗根のかっこの中身は、式4.1.2-60が成り立つため、 r のルートの中身は必ず正となるので、条件を満たすすべてのコストの値において、この都市形態は成立する。

$$c_{h2}^3 + 3 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^2 + 3 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2} - 7 \cdot c_{h1}^3 = (c_{h2} - c_{h1}) \cdot (c_{h2}^2 + 4 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 7 \cdot c_{h1}^2) < 0
 \tag{4.1.2-60}$$

このとき、 $2 \cdot d \leq r$ が成立するための d の条件は、式4.1.2-61より、式4.1.2-62となる。

$$\begin{aligned}
 8 \cdot d^3 - s^3 &= 8 \cdot d^3 - \frac{24 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d - 8 \cdot (c_{h2}^3 + 3 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^2 + 3 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2} - 7 \cdot c_{h1}^3) \cdot d^3}{16 \cdot c_{h1}^3} \\
 &= \frac{8 \cdot (c_{h2}^3 + 3 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^2 + 3 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2} + 9 \cdot c_{h1}^3) \cdot d^3 - 24 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d}{16 \cdot c_{h1}^3} \leq 0
 \end{aligned}
 \tag{4.1.2-61}$$

$$0 \leq d \leq \sqrt[3]{\frac{3 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d}{(c_{h2} + 3 \cdot c_{h1}) \cdot (c_{h2}^2 + 3 \cdot c_{h1}^2)}} \quad (4.1.2-62)$$

ここで、x 軸上の断面図、y=x 上の断面図を描くと、図 4.1.2-12、図 4.1.2-13 のようになる。

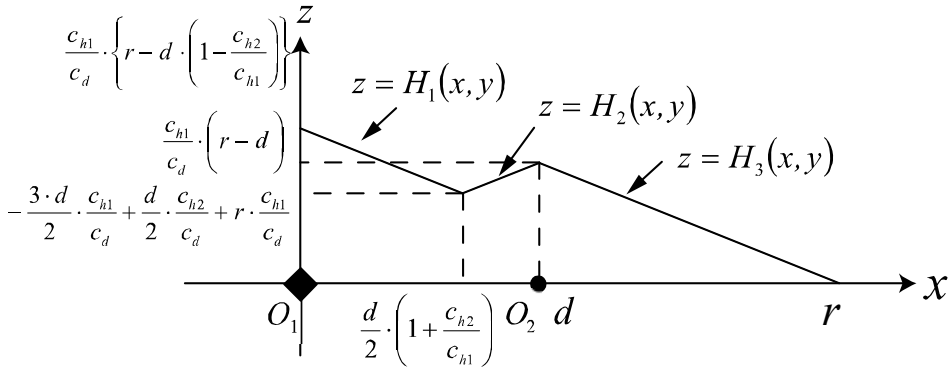


図 4.1.2-12 多層の床を想定しない場合の x 軸上の断面図

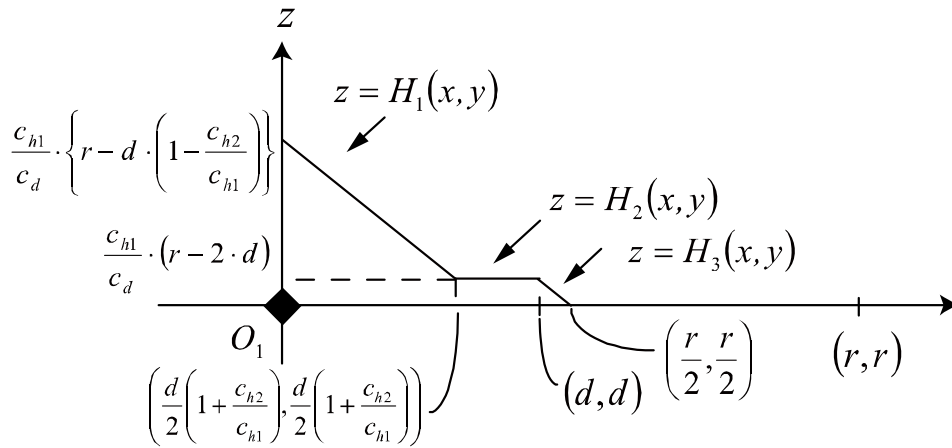


図 4.1.2-13 多層の床を想定しない場合の y=x 上の断面図

また、 $h(x, y)$ の値によって、xy 平面の面積は、 $0 \leq z < \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d)$ のとき図

4.1.2-14、 $\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d) \leq z < -\frac{3 \cdot d}{2} \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \cdot \frac{c_{h2}}{c_d} + r \cdot \frac{c_{h1}}{c_d}$ のとき図 4.1.2-15、

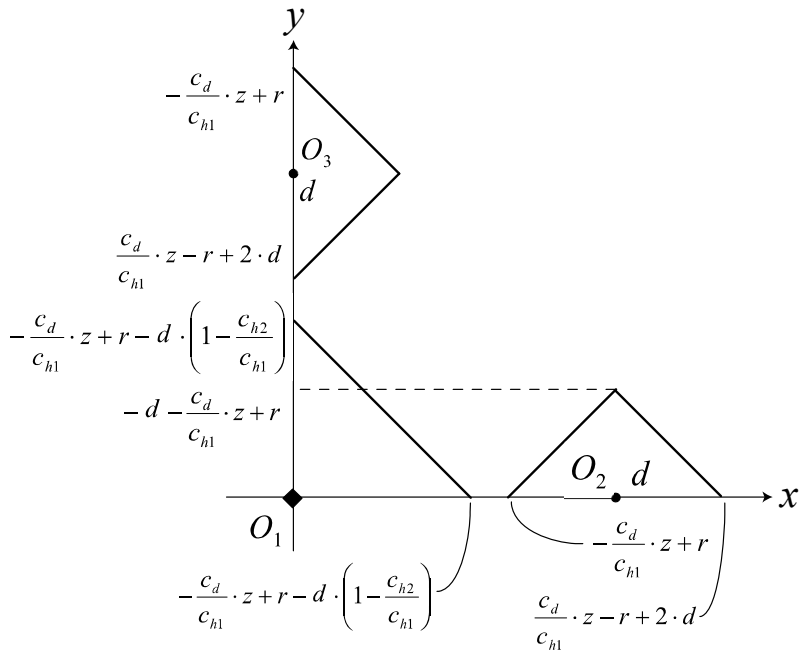


図 4.1.2-16 xy 平面③

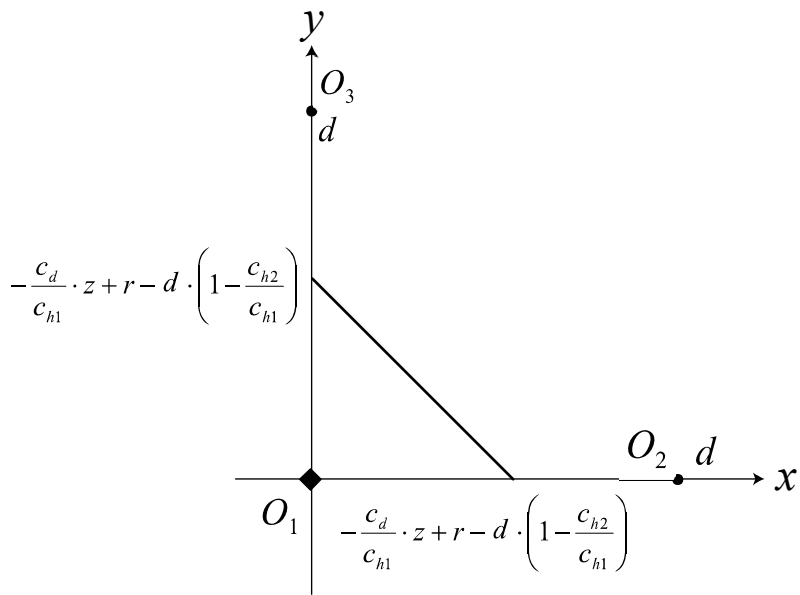


図 4.1.2-17 xy 平面④

また、xy 平面の面積は、 $0 \leq z < \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d)$ のとき式 4.1.2-63 となる。

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r \right)^2 \quad (4.1.2-63)$$

$\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r-2 \cdot d) \leq z < -\frac{3 \cdot d}{2} \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \cdot \frac{c_{h2}}{c_d} + r \cdot \frac{c_{h1}}{c_d}$ のとき式 4.1.2-64 となる。

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right\}^2 \\
 & + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) + \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right\} \\
 & \cdot \left\{ \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right\} \\
 & + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(-d - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r \right) + \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right\} \cdot \left\{ d - \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \\
 & + \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \right)^2 \\
 & = \frac{c_d^2 \cdot z^2 + 2 \cdot \{(c_{h2} - c_{h1}) \cdot c_d \cdot d - c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + c_{h1}^2 \cdot r^2 + 2 \cdot (c_{h1}^2 - c_{h1} \cdot c_{h2}) \cdot (r-2 \cdot d) \cdot d}{4 \cdot c_{h1}^2}
 \end{aligned} \tag{4.1.2-64}$$

$-\frac{3 \cdot d}{2} \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \cdot \frac{c_{h2}}{c_d} + r \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} \leq z < \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r-d)$ のとき式 4.1.2-65 となる。

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot \left(-d - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r \right) \\
 & = \frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{(10 \cdot c_{h1} - 2 \cdot c_{h2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + 5 \cdot c_{h1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \\
 & + \frac{(2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r + (c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2}
 \end{aligned} \tag{4.1.2-65}$$

$\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r-d) \leq z \leq \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}$ のとき式 4.1.2-66 となる。

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 \tag{4.1.2-66}$$

さらに、1次拠点を経由して2次拠点へ移動する住民は、図 4.1.2-18 の斜線部分の体積となるので、式 4.1.2-67 となる(補足 20)。

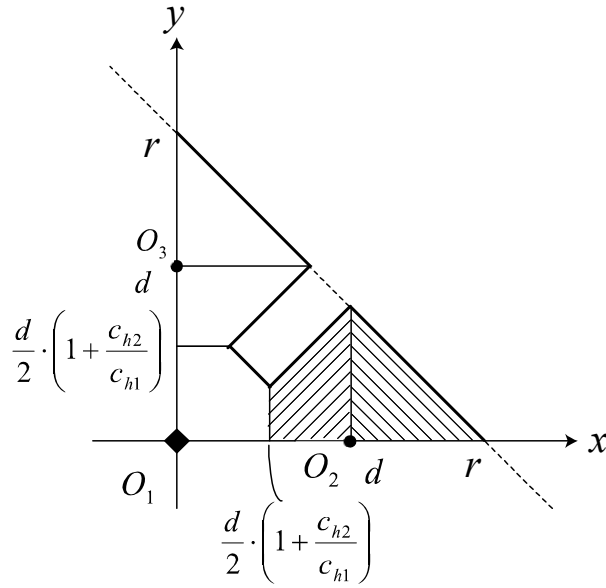


図 4.1.2-18 多層の床を想定しない場合において1次拠点を経由して2次拠点
へ移動する人口の分布

$$\begin{aligned}
 & \int_0^d \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \int_0^x \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \{x - y + (r - 2 \cdot d)\} dy dx + \int_d^r \int_0^x -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (x + y - r) dy dx \\
 & + \int_r^r \int_0^{-x+r} -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (x + y - r) dy dx \\
 & = \frac{2 \cdot c_{h1}^3 \cdot r^3 + (-3 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^2 - 6 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2} - 3 \cdot c_{h1}^3) \cdot d^2 \cdot r}{24 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d} \\
 & + \frac{(-c_{h2}^3 + 9 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^2 + 21 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2} - 5 \cdot c_{h1}^3) \cdot d^3}{48 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d} \tag{4.1.2-67}
 \end{aligned}$$

以上より、移動コストは、式 4.1.2-68 となる^(補足 21)。

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{8} \cdot G = & \left\{ \int_0^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_0^x x \cdot H_1(x, y) dy dx + \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \int_0^x (d - x) \cdot H_2(x, y) dy dx \right. \\
 & + \int_d^r \int_0^{xy} (x - d) \cdot H_3(x, y) dy dx + \int_r^r \int_0^{-x+r} (x - 2 \cdot d) \cdot H_3(x, y) dy dx \\
 & \left. + \int_0^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_y^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} y \cdot H_1(x, y) dx dy + \int_0^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d y \cdot H_2(x, y) dx dy \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_0^d \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \int_y^d y \cdot H_2(x, y) dx dy + \int_0^d \int_d^{-y+r} y \cdot H_3(x, y) dx dy \\
 & + \int_d^r \int_y^{-y+r} y \cdot H_3(x, y) dx dy \Big\} \cdot c_{h1} \\
 & + \left[\int_0^{\frac{c_{h1}}{c_d}(r-2d)} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r \right)^2 \cdot z \right\} dz \right. \\
 & + \int_{\frac{c_{h1}}{c_d}(r-2d)}^{\frac{3d}{2} \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \frac{c_{h2}}{c_d} + r \frac{c_{h1}}{c_d}} \left\{ \frac{c_d^2 \cdot z^2 + 2 \cdot (c_{h2} - c_{h1}) \cdot c_d \cdot d - c_{h1} \cdot c_d \cdot r}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \cdot z \right. \\
 & \quad \left. + \frac{c_{h1}^2 \cdot r^2 + 2 \cdot (c_{h1}^2 - c_{h1} \cdot c_{h2}) \cdot (s-2 \cdot d) \cdot d}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \right\} dz \\
 & + \int_{\frac{c_{h1}}{c_d}(r-d)}^{\frac{3d}{2} \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \frac{c_{h2}}{c_d} + r \frac{c_{h1}}{c_d}} \left\{ \frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + (10 \cdot c_{h1} - 2c_{h2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \cdot z \right. \\
 & \quad + \frac{5 \cdot c_{h1}^2 \cdot r^2 + (2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \\
 & \quad \left. + \frac{(c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \right\} dz \\
 & + \int_{\frac{c_{h1}}{c_d}(r-d)}^{\frac{c_{h1}}{c_d} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\}} \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\}^2 \cdot z \right] dz \Big\} \cdot c_d \\
 & + \left\{ \frac{2 \cdot c_{h1}^3 \cdot r^3 + (-3 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^2 - 6 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2} - 3 \cdot c_{h1}^3) \cdot d^2 \cdot r}{24 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d} \right. \\
 & \quad \left. + \frac{(-c_{h2}^3 + 9 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^2 + 21 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2} - 5 \cdot c_{h1}^3) \cdot d^3}{48 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d} \right\} \cdot d \cdot c_{h2} \\
 & = \frac{12 \cdot c_{h1}^4 \cdot r^4 + (16 \cdot c_{h1}^3 \cdot c_{h2} - 16 \cdot c_{h1}^4) \cdot d \cdot r^3}{192 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d} \\
 & \quad + \frac{(5 \cdot c_{h2}^4 + 20 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^3 + 30 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2}^2 - 44 \cdot c_{h1}^3 \cdot c_{h2} - 11 \cdot c_{h1}^4) \cdot d^4}{192 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d}
 \end{aligned}$$

(4.1.2-68)

4.1.2の都市モデルについて、拠点間距離 d を変化させた場合の都市モデルの挙動と、最適都市モデルとなる時の拠点間距離 d を求める。式4.1.2-68に、2.3

で定義した移動コストを代入し、総移動コストを縦軸にとったグラフを式 4.1.2-62 の範囲で描くと、図 4.1.2-19 のようになる。

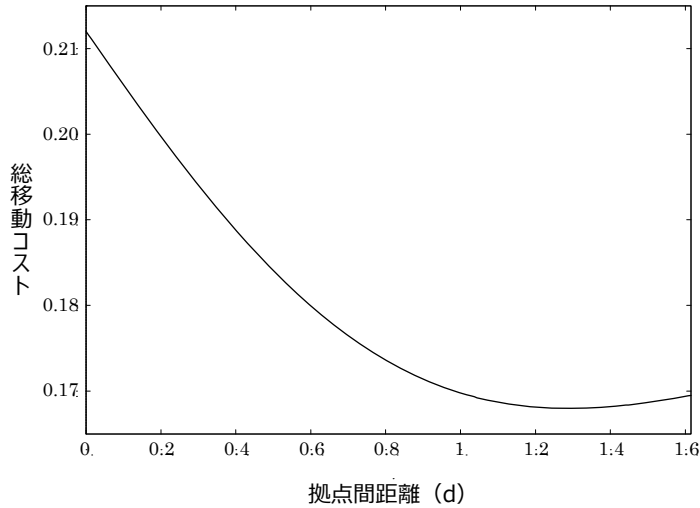


図 4.1.2-19 拠点間距離と総移動コストの関係

コストに具体値を代入したとしても、式が複雑すぎて数学的に最適解を求めることが困難であるため、Excel のソルバーを利用して最小値を求めることとする。このとき、 $d=1.289$ のときに、最小値 0.164 をとることが分かった。

2次元都市モデルの場合、 $\frac{d}{s}=0.483$ となるのに対し、3次元都市モデルでは、

$\frac{d}{s}=0.426$ となっている。また、1次拠点上の都市の高さとの割合は、0.646 となるのに対し、0.757 となっている。つまり、2次元都市モデルに比べ、3次元都市モデルでは、1次拠点の位置がやや内側により、都市の高さが高くなっている。これは、y軸上にも拠点を設けることで、立体にすることによる2次拠点の生活圏域の人口に対し、x軸上の1次拠点の生活圏域の人口のほうが多くなるため、拠点がやや内側へ寄ったものと考えられる。

4.2 多層の床を想定する場合の最適な3次元都市モデルの算出

4.2節では、多層の床を想定する場合の最適な都市形態を算出する。

4.1節と同様に、まず、最も単純な都市モデルを想定し、全人口が1つの1次拠点に移動する場合について、4.2.1節にて最適な都市形態を算出する。次に、都市域が階層化されている都市モデルを想定し、1次拠点と2次拠点が存在する場合について、4.2.2節にて最適な都市形態を算出する。

4.2.1 1次拠点1つの場合

4.1.1節と同じ都市モデルについて、階高を想定した場合の最適な都市形態を求める。

地点 (x,y) における建物の高さを $h(x,y)$ で表し、計算の簡便さのために、この値は自然数ではなく非負の実数とする。また、都市形態は任意の地点において連続であるとする。階高 a (定数)、最上床階と最高高さの差を h' ($h'(0 < h \leq a)$) とすると、地点 (x,y) における階数は式4.2.1-1となる。

$$\frac{h(x,y) - h'}{a} + 1 \tag{4.2.1-1}$$

式4.2.1-1を、自然数 m を用いて、式4.2.1-2のように表す。

$$m + 1 \tag{4.2.1-2}$$

以降は、 x 軸、 y 軸での対称性を考慮し、第一象限についてのみを対象に計算を行う。居住階数を z ($0 < z \leq m + 1$ を満たす自然数)、延床面積を D 、 z 階における床面積を $s(z)$ と置くと、延床面積 D は式4.2.1-3となる。

$$s(1) + s(2) + \dots + s(m+1) = \sum_{k=1}^{m+1} s(k) = \frac{D}{4} \tag{4.2.1-3}$$

このとき、移動コストが最小となる都市を考える場合、床が連続に存在していることは明らかである。また、マンハッタン距離であることから、移動コストが最小となる都市形態の z 階の床の形状は、 x 軸方向の位置を $r(z)$ とすると、 $x = r(z)$ 、 $y = r(z)$ を結ぶ2等辺三角形になることは明らかである。したがって、 z 階における床面積 $s(z)$ と、 z 階における x 軸方向の位置 $r(z)$ の関係は、式4.2.1-4となる。

$$s(z) = \frac{1}{2} \cdot r(z)^2 \tag{4.2.1-4}$$

また、 z 階における都市域 $y_z(x)$ は、式4.2.1-5で表す事ができる。

$$y_z(x) = -x + r(z) \tag{4.2.1-5}$$

さらに、マンハッタン距離を想定しているため、 x 軸方向あるいは y 軸方向で切断した場合の断面図は、3.2.1と同じ傾きになる。そのため、 x 軸方向ある

いは y 軸方向の断面においては傾きが $\frac{c_{h1}}{c_d}$ の三角形となる。

以上より、3.2.1と同様、1階の床面積を $s(1)$ が決定すると、都市の最高高さ $h(x,y)$ も決定する。また、階高 a は定数とみなすことができるため、 $h(x,y)$ が決まると、階数 m も決定する。さらに、階数 m が決定すると、都市の延床面積 D も決定する。以上より、階高を持ち、拠点が一つある最適な都市形態は、延床面積を与えると、自然と決定される。そこで、都市域を r とすると、最適な都市形態は図4.2.1-1の通りとなる。多層の床を想定しない場合と比較すると、垂直方向の捉え方が異なるため都市の大きさは異なるが、断面図は同じ傾きの三角形となるため、図4.1.1-2と相似な図形となる。

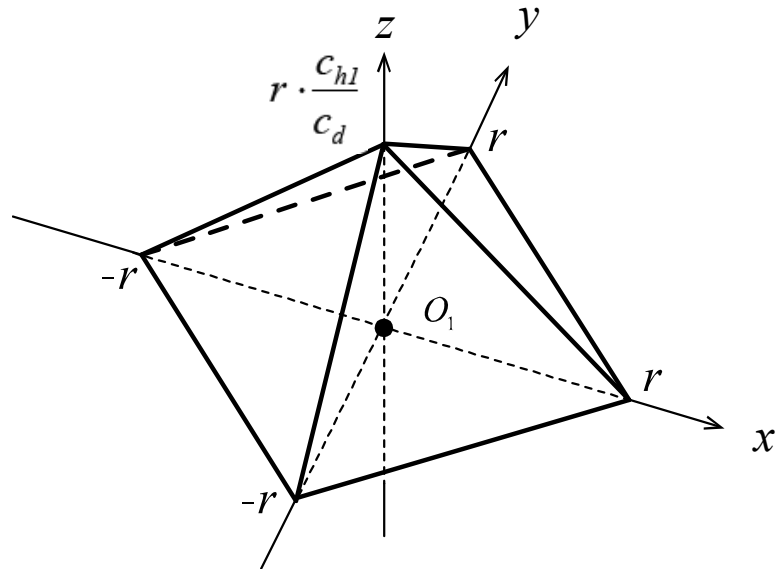


図4.2.1-1 多層の床を想定する場合における拠点が1つの場合の最適な3次元都市モデル

この際の床面積と式4.2.1-6の通り表す事ができる(補足22)。

$$\begin{aligned} \frac{D}{4} &= \sum_{k=1}^{m+1} \frac{1}{2} \left\{ r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1) \right\}^2 \\ &= \frac{1}{12} (m+1) \left\{ a^2 m(2m+1) \frac{c_d^2}{c_{h1}^2} - 6amr \frac{c_d}{c_h} + 6r^2 \right\} \end{aligned} \quad (4.2.1-6)$$

また、移動コストは、式4.2.1-7の通り表す事ができる(補足23)。

$$\frac{1}{4} C = c_{h1} \left[\sum_{k=1}^{m+1} \left\{ \int_0^{r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1)} x \cdot \left(-x + r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1) \right) dx \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & \left. + \int_0^{r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1)} y \cdot \left(-y + r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1) \right) dy \right\} \\
 & + c_d \left[\sum_{k=1}^{m+1} \frac{1}{2} \left\{ r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1) \right\}^2 a(k-1) \right] \\
 = & \frac{1}{24} (m+1) \left\{ a^3 m^2 (m+1) \frac{c_d^3}{c_{h1}^2} - 6amr^2 c_d + 8r^3 c_{h1} \right\} \quad (4.2.1-7)
 \end{aligned}$$

4.2.2 1次拠点4つと2次拠点1つの場合

4.1.2節と同じ都市モデルについて、階高を想定した場合の最適な都市形態を求める。

都市内の任意の点を $P(x, y, z)$ と表し、住民は2次拠点 O_1 まで、移動コストが最も小さい方法で移動する。1次拠点を經由するかどうかは、 $P(x, y, z)$ の高さ z には関係なく、水平方向の位置 (x, y) だけで決定するため、4.1.2節と同じである。また、移動コストが最小となる都市を考える場合、床が連続に存在していることは明らかである。以降は、 y 軸での対称性を考慮し、 $0 \leq x$ についてのみを対象に計算を行う。

任意の点 P から2次拠点 O_1 までの移動コスト $C(x, y, z)$ (点 P の居住者の移動コスト) は、式 4.2.2-1 となる。

$$C(x, y, z) = c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot y + c_d \cdot z$$

for $0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), 0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$

$$C(x, y, z) = c_{h1} \cdot |x - d| + c_{h1} \cdot y + c_d \cdot z + c_{h2} \cdot d$$

for $\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x, x \geq y$

$$C(x, y, z) = c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot |y - d| + c_d \cdot z + c_{h2} \cdot d$$

for $\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y, x \leq y$ (4.2.2-1)

ここで建物の高さを定式化する。このため、建物外形を x 軸方向あるいは y 軸方向で切断した断面図における、建物外形を検討する。例として、図 4.2.2-1 で直線 A-B に沿って切断したと仮定する。

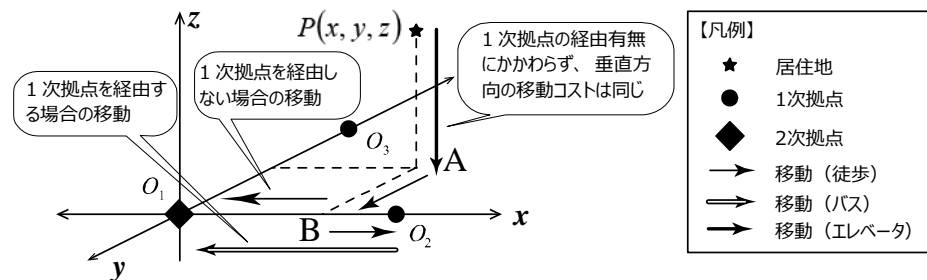


図 4.2.2-1 3次元都市モデルにおける拠点が複数の場合の移動の考え方

この論文ではマンハッタン距離を想定しているため、点Pから1次拠点 O_2 までの移動経路は、断面図内の垂直方向のエレベータによる移動P-Aと、断面図内の水平移動A-B、さらに断面図外の水平移動B- O_2 に分けられる。最後にB- O_2 は断面図内のすべての床の端で共通である。このことから、断面図内の建物外形のうち同一の1次拠点 O_2 を経由する部分は、点Bを1次拠点と見なした場合における、線状都市の最適形態と一致する。したがって、建物外形の傾きはこれと同じ $\frac{c_{h1}}{c_d}$ になる。従って、各拠点を經由する地域の最適な都市形態は、 x 軸方向あるいは y 軸方向の断面においては、拠点の高さ位置を頂点とし、傾きが $\frac{c_{h1}}{c_d}$ の三角形となる。つまり、地点 (x, y) における建物の高さを $H(x, y)$ は、式4.2.2-2となる。

$$H_1(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_1$$

$$\text{for } 0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), \quad 0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$$

$$H_2(x, y) = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_2$$

$$\text{for } \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x < d, \quad x \geq y$$

$$H_3(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_3$$

$$\text{for } d \leq x, \quad x \geq y$$

$$H_4(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_4$$

$$\text{for } \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y < d, \quad x \leq y$$

$$H_5(x, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_5$$

$$\text{for } d \leq y, x \leq y \quad (4.2.2-2)$$

また、境界条件より、式4.2.2-3が成立するため、式4.1.2-54の切片Cと都市域を表す関数は、式4.2.2-4となる^(補足24)。

$$\begin{aligned} H_3(s,0) &= 0, & H_1(x, Y_N(x)) &= 0, & H_2(x, Y_N(x)) &= 0, \\ H_3(x, Y_N(x)) &= 0, & H_4(x, Y_N(x)) &= 0, & H_5(x, Y_N(x)) &= 0, \\ H_1\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) &= H_2\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right), \\ H_1\left(x, \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) &= H_4\left(x, \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right), \\ H_2(d, y) &= H_3(d, y), & H_4(x, d) &= H_5(x, d), \\ H_2(x, x) &= H_4(x, x), & H_3(x, x) &= H_5(x, x) \end{aligned} \quad (4.2.2-3)$$

$$C_1 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\}, \quad C_2 = C_4 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d), \quad C_3 = C_5 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r$$

$$Y_N(x) = -x + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \quad \text{for } 0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), \quad 0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$$

$$Y_N(x) = x + r - 2 \cdot d \quad \text{for } \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x < d, \quad x \geq y$$

$$Y_N(x) = -x + r \quad \text{for } d \leq x, \quad x \geq y$$

$$Y_N(x) = x - r + 2 \cdot d \quad \text{for } \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y < d, \quad x \leq y$$

$$Y_N(x) = -x + r \quad \text{for } d \leq y, \quad x \leq y \quad (4.2.2-4)$$

さらに、最高高さを $H=h(0)$ とすると、式4.2.2-5となるため、式4.2.2-6が成立する。

$$H = h(0) = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} \quad (4.2.2-5)$$

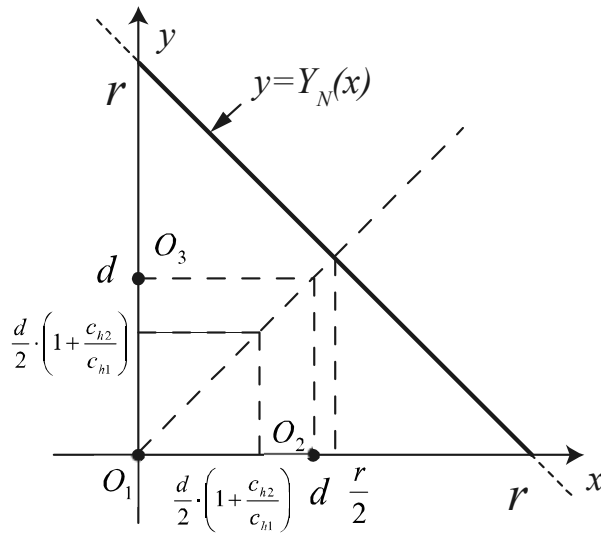
$$r = \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot h(0) + d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \quad (4.2.2-6)$$

このとき、 d と r の大小関係により、 xy 平面における都市域 $Y_N(x)$ が示す図形

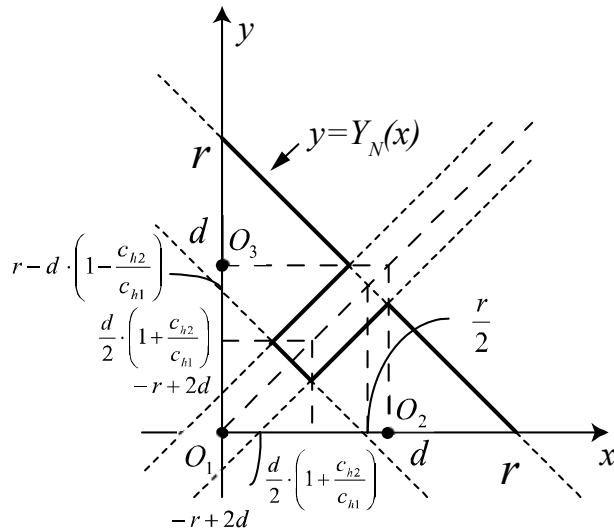
は図4.2.2-2の通り3パターンに分類できる。左から、 $d \leq \frac{r}{2}$ つまり、 $2 \cdot d \leq r$ の

場合、 $d > \frac{r}{2}$ かつ $-r+2 \cdot d \leq \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ つまり $\frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq r < 2 \cdot d$ の場合、

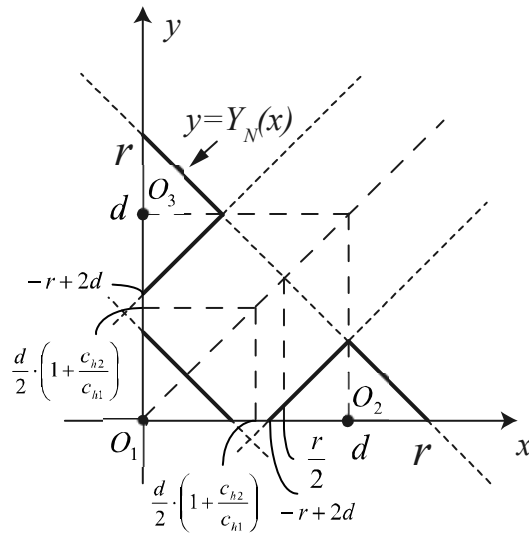
$-r+2 \cdot d > \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ つまり $r < \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ の場合を示す。



a. $2 \cdot d \leq r$ の場合



b. $\frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq r < 2 \cdot d$ の場合



c. $r < \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ の場合

図 4.2.2-2 $Y_N(x)$ が示す図形

都市形態は $y=x$ について対称な図形であるため、以降は $y \leq x$ の領域に限定して計算する。 $2 \cdot d \leq r$ の場合、 x 軸上の断面図、 $y=x$ 上の断面図を描くと、図 4.2.2-3、図 4.2.2-4 のようになる。

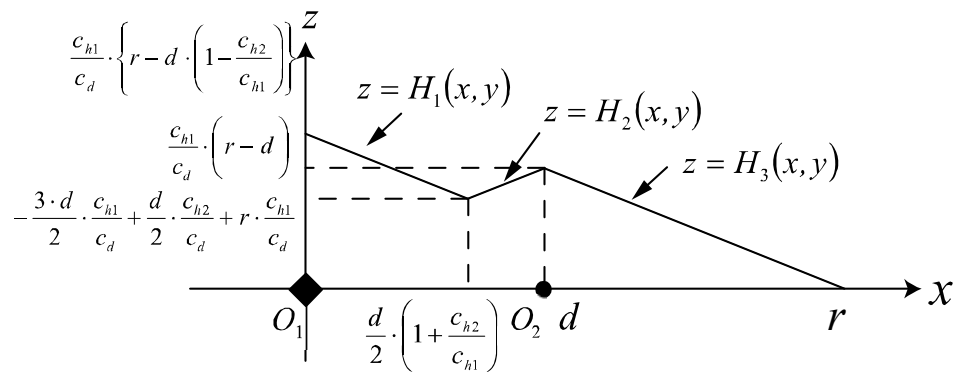


図 4.2.2-3 多層の床を想定する場合の x 軸上の断面図

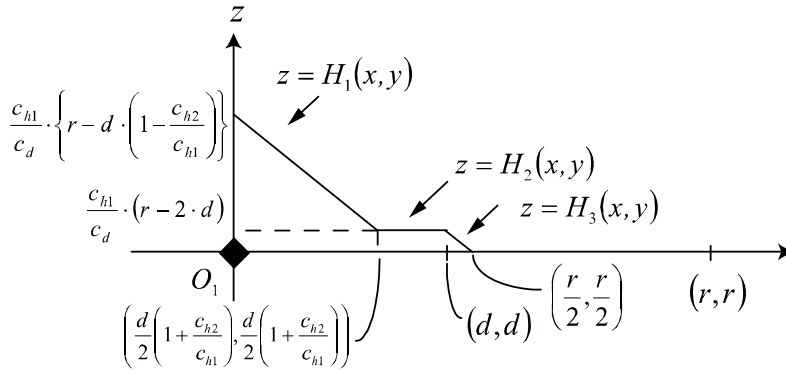


図 4.2.2-4 多層の床を想定する場合の $y=x$ 上の断面図

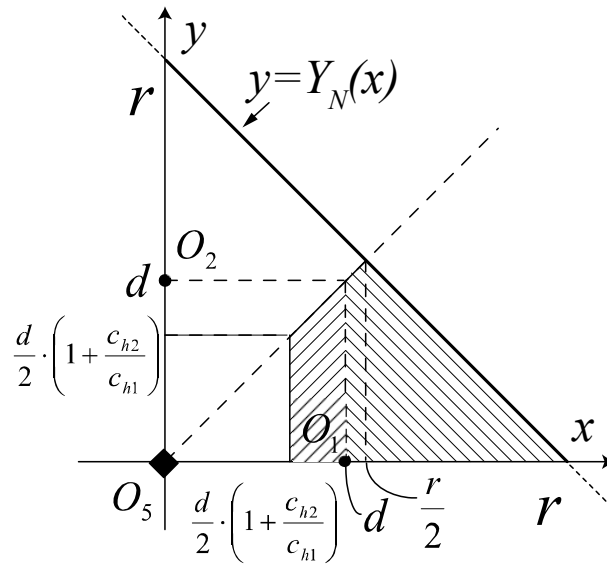
高さ $z = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d)$ 、 $z = -\frac{3 \cdot d}{2} \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \cdot \frac{c_{h2}}{c_d} + r \cdot \frac{c_{h1}}{c_d}$ 、 $z = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - d)$ 、

$z = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}$ の時の階数を、それぞれ m_A 、 m_B 、 m_C 、 m_D とし、高さ z

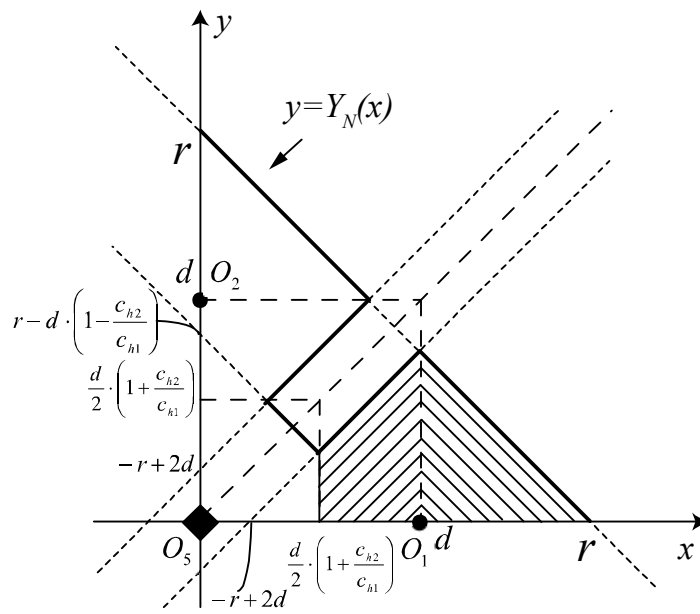
の床面積を $s(z)$ で表す。1階～ m_A+1 階のときの床面積を s_{1-m_A} 、 m_A+2 階～ m_B+1 階のときの床面積を $s_{m_A-m_B}$ 、 m_B+2 階～ m_C+1 階のときの床面積を $s_{m_B-m_C}$ 、 m_C+2 階～ m_D+1 階のときの床面積を $s_{m_C-m_D}$ とする(補足25)と、延床面積 D は、階数 m を用いて、式 4.2.2-7 の通り表す事ができる(補足26)。

$$\frac{1}{8} \cdot D = \sum_{k=1}^{m_A+1} s_{1-m_A} + \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} s_{m_A-m_B} + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} s_{m_B-m_C} + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} s_{m_C-m_D} \quad (4.2.2-7)$$

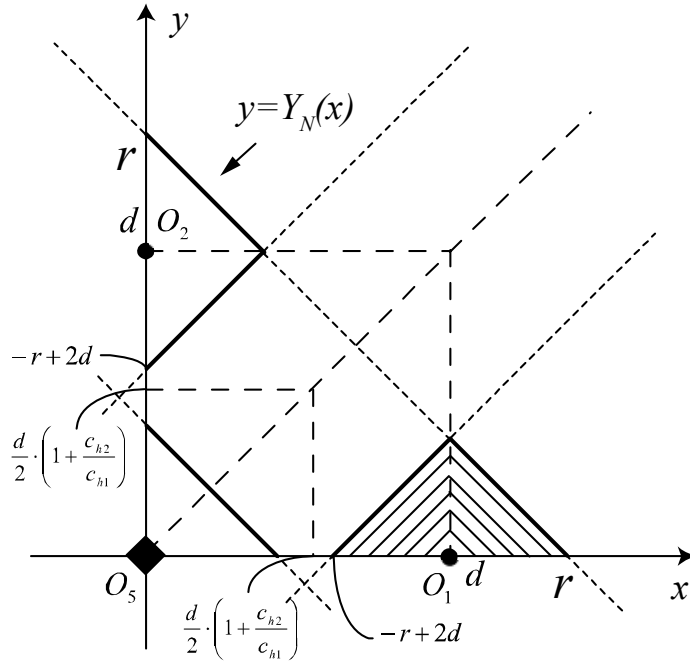
この式において左辺の都市の延床面積 D を 8 で割っているのは、第一象限かつ $y \leq x$ についてのみを計算しているためである。また、1次拠点を經由して2次拠点へ移動する人口は図 4.2.2-5 の斜線部分の床面積の和と同じとみなすことができ、これを V とする(補足27)と、総移動コスト C が式 4.2.2-8 の通り求まる(補足28)。



a. $2 \cdot d \leq r$ の場合



b. $\frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq r < 2 \cdot d$ の場合



c. $r < \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ の場合

図 4.2.2-5 多層の床を想定する場合において1次拠点を經由して2次拠点へ移動する人口の分布

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{8} \cdot C &= c_{h1} \cdot \left[\sum_{k=1}^{m_A+1} \left[\int_0^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} x \cdot x dx + \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d x \cdot (d-x) dx \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \int_d^{\left(\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r\right)\frac{1}{2}} x \cdot (x-d) dx \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \int_{\left(\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r\right)\frac{1}{2}}^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+s} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right] \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\}} x \cdot x dx \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\}}^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} \cdot x dx \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \right] \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \Big] \\
 & + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
 & + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}^{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \\
 & + \int_{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - r + 2 \cdot d}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \\
 & \left. + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right] \\
 & + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
 & + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}^{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \Big] \\
 & + \sum_{k=1}^{m_A+1} \int_0^{\left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot \frac{1}{2}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - y \right\} \cdot y dy \\
 & + \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
 & + \int_{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d}^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \\
 & + \int_{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - d + r}^{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) \right. \\
 & \left. - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \Big] \\
 & + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
 & \left. + \int_0^{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - d + r} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1) a + r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right] \\
 & + c_d \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_A+1} \frac{1}{4} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right)^2 \cdot (k-1) \cdot a \right. \\
 & + \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} \left[\frac{c_d^2 \cdot z^2 + \{2 \cdot (c_{h2} - c_{h1}) \cdot c_d \cdot d - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \\
 & \left. + \frac{c_{h1}^2 \cdot r^2 + (c_{h1}^2 - c_{h1} \cdot c_{h2}) \cdot (2 \cdot d \cdot r - 4 \cdot d^2)}{4 \cdot c_{h1}^2} \right] \cdot (k-1) \cdot a \left. \right] \\
 & + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\left\{ \frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{(10 \cdot c_{h1} - 2 \cdot c_{h2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + 5 \cdot c_{h1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{(2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r + (c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right\} \cdot (k-1) \cdot a \right] \\
 & + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 \cdot (k-1) \cdot a \left. \right) \\
 & + c_{h2} \cdot V \cdot d \tag{4.2.2-8}
 \end{aligned}$$

同様に、 $\frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq r < 2 \cdot d$ の場合の1次拠点を経由して2次拠点へ移

動する人口は図4.2.2-5のbの斜線部分の床面積の和と同じとみなすことができ、これを V とする(補足29)と、延床面積(補足30)、総移動コスト(補足31)は、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{8} \cdot D & = \sum_{k=1}^{m_B+1} S_{m_A-m_B} + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} S_{m_B-m_C} + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} S_{m_C-m_D} \\
 \frac{1}{8} \cdot C & = c_{h1} \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1) a + \frac{1}{2} \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \right. \\
 & + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1) a + \frac{1}{2} \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \\
 & \left. \left. + \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \right. \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \Big] \\
 & + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
 & + \int^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left. \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \right. \\
 & + \int^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left. \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \right. \\
 & + \int^d_{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a-r+2 \cdot d} \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \\
 & + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \Big] \\
 & + \sum_{k=m_C+2}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
 & + \int^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left. \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \right] \\
 & + \sum_{k=1}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a + \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
 & + \int^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left. \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
 & + \int^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a-d+r}_{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a + \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d} \left. \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \right] \\
 & + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
 & + \int_0^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a-d+r} \left. \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right] \\
 & + c_d \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_B+1} \left(\frac{c_d^2 \cdot z^2 + \{2 \cdot (c_{h2} - c_{h1}) \cdot c_d \cdot d - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + c_{h1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{(c_{h1}^2 - c_{h1} \cdot c_{h2}) \cdot (2 \cdot d \cdot r - 4 \cdot d^2)}{4 \cdot c_{h1}^2} \right) \cdot (k-1) \cdot a \right. \\
 & \left. + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\left\{ \frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{(10 \cdot c_{h1} - 2 \cdot c_{h2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + 5 \cdot c_{h1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{(2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r + (c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right\} \cdot (k-1) \cdot a \right] \\
 & \left. + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 \cdot (k-1) \cdot a \right) \\
 & + c_{h2} \cdot V \cdot d \tag{4.2.2-9}
 \end{aligned}$$

また、 $r < \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$ の場合の1次拠点を経由して2次拠点へ移動する人口は

図4.2.2-5のcの斜線部分の床面積の和と同じとみなすことができ、これをVとする(補足32)と、延床面積(補足33)、総移動コスト(補足34)は、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{8} \cdot D & = \sum_{k=1}^{m_C+1} S_{m_B-m_C} + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} S_{m_C-m_D} \\
 \frac{1}{8} \cdot C & = c_{h1} \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) a + \frac{1}{2} \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \right\}} x \cdot x dx \right. \right. \\
 & \left. \left. + \int_{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) a + \frac{1}{2} \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \right\}}^{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \right. \right. \\
 & \left. \left. + \int_{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) a - r + 2 \cdot d}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \right. \right. \\
 & \left. \left. + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) a + r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right] \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
 & + \int_0^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \left. \right] \\
 & + \sum_{k=1}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
 & + \int_0^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a - d + r} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \left. \right] \\
 & + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
 & + c_d \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_C+1} \left[\frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{ (10 \cdot c_{h1} - 2 \cdot c_{h2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r \} \cdot z + 5 \cdot c_{h1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \right. \\
 & + \left. \left. \frac{(2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r + (c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right\} \cdot (k-1) \cdot a \right] \\
 & + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 \cdot (k-1) \cdot a \Big) \\
 & + c_{h2} \cdot V \cdot d \tag{4.2.2-10}
 \end{aligned}$$

本モデルにおける制約条件のうち、移動コスト c_d 、 c_{h1} 、 c_{h2} 、階高 a 、都市の延床面積 D はモデルの前提条件として設定できるため、定数として扱う。また、都市の高さ h 、都市端までの距離 r は、拠点間距離 d によって決まるため、最適な都市形態をもとめることは、最適な拠点間距離 d を求めることと同義である。

第2章で述べたように長さの単位を km、コストは表1の値、階高は一般的な住宅を考慮して 0.00285km [4-1]とし、延床面積を 1km²としてExcelのソルバーを用いて数値的に最適解を求めると、 $2 \cdot d \leq r$ の場合、 $d = 0.091$ km、総移動コス

トは0.023となった。 $\frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq r < 2 \cdot d$ については、境界値である $a = 2d$ の

ときに最適値を取り、 $r < \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ については境界値である $r = \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ の

ときに最適値を取。これらの値はいずれも $2 \cdot d \leq r$ の場合で求めたものよりも大きな値となる。したがって、最適な都市形態を取る時の総移動コストは、 $2 \cdot d \leq r$ の場合で求めたものとなる。

参考文献 (4章)

- [4-1] 「建築構造設計指針（平成21年版）」について，
http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/__icsFiles/afieldfile/2014/10/14/1293759_003.pdf, 参照 2017.1.22

第5章 都市モデルの比較・考察

5章では、3章、4章にて算出した最適都市モデルの比較・考察を行う。

5.1節では、延床面積、階高、垂直方向の移動コスト、バスの移動コストをそれぞれ変化させた場合の関数の挙動について述べる。関数の挙動を捉えることにより、各パラメータの値と最適な都市形態の関係を明らかにする。ここでは、多層の床を想定する場合の都市モデルを対象とし、3.2.2節にて算出した1次拠点2つと2次拠点1つの2次元都市モデルと、4.2.2節にて算出した1次拠点4つと2次拠点1つの3次元都市モデルについて述べる。

5.2節では、2次元都市モデルにおける最適な都市形態と、3次元都市モデルにおける最適な都市形態を比較する。これにより、都市を断面ではなく、3次元として捉えることによる利点を考察する。多層の床を想定する場合の都市モデルを対象とし、3.2.2節で求めた都市モデルと、4.2.2節で求めた都市モデルを用いる。

5.3節では、多層の床の想定有無による最適な都市形態の比較検討を行う。これにより、多層の床を想定することの利点を考察する。5.3.1節では、1次拠点2つと2次拠点1つの2次元都市モデルを対象とし、3.1.2節で求めた都市モデルと、3.2.2節で求めた都市モデルを用いる。5.3.2節では、1次拠点4つと2次拠点1つの3次元都市モデルを対象とし、4.1.2節で求めた都市モデルと、4.2.2節で求めた都市モデルを用いる。

5.4節では、単一拠点と複数拠点の都市モデルを比較する。これにより、複数の小さなコンパクトシティが連携してできるコンパクトシティ・システムの効果を計る。多層の床を想定した3次元都市モデルを対象とし、4.2.1節で求めた都市モデルと、4.2.2節で求めた都市モデルを使用する。

5.5節では、実際の都市と都市モデルを比較する。これにより、算出した都市モデルの妥当性について考察を行う。都市モデルは、多層の床を前提とし、4.2.2節で求めた都市モデルを用いる。実際の都市としては、東京都多摩市を選定した。

5.6節では、仮想的な都市と、算出した都市モデルを重ねて比較する。仮想的な都市として、東京バベルタワーを取り上げる。また、都市モデルは4.2.2節にて算出した都市モデルを使用する。

5.7節では、以上の結果のまとめを行う。

各節で用いる都市モデルを、表5-1にまとめた。

表5-1 比較・考察の対象とする都市モデル

	2次元都市モデル				3次元都市モデル				実際の都市	仮想的な都市
	多層の床の想定無		多層の床の想定有		多層の床の想定無		多層の床の想定有			
1次拠点の数	1	2	1	2	1	4	1	4	-	-
2次拠点の数	0	1	0	1	0	1	0	1	-	-
5.1.1				○						
5.1.2								○		
5.2				○				○		
5.3.1		○		○						
5.3.2						○		○		
5.4							○	○		
5.5								○	○	
5.6										○

5.1 パラメータの値と都市モデルの関係

5.1 節では、パラメータの値を変化させた場合の都市モデルの挙動を検討する。5.1.1 節では2次元都市モデルについて、5.1.2 節では3次元都市モデルについて比較する。なお、本研究では、多層の床を想定する都市モデルについてのみ扱う。

本研究では、単位当たりの移動コストを表すパラメータとして、垂直方向は c_d 、水平方向の徒歩によるものは c_{h1} 、バスによるものは c_{h2} を用いた。その他のパラメータとして、階高を a 、床面積を D とした。このうち、水平方向の徒歩による移動コストが変化することは無いと考えられるため、その他のパラメータである床面積(D)、階高(a)、垂直方向は(c_d)、水平方向のバスによる移動コスト(c_{h2})を変化させた場合の都市モデルの挙動を示す。なお、3章、4章より、総移動コストはこれらのパラメータと拠点間距離(d)と最高高さ(H)による関数で表す事ができる。したがって、各パラメータは前提条件として与えられているものと考え、拠点間距離(d)と最高高さ(H)が決まると最適な都市形態が一意に決まる。

5.1.1 多層の床を想定する場合の最適な2次元都市モデル

3.2.2節で算出した多層の床を想定する場合の最適な2次元都市モデルについて、移動コストが最小となる拠点間距離と最高高さを求める。本研究では、第2章で述べたように長さの単位を km とし、階高は一般的な住宅を考慮して 0.00285km とする。延床長さが 1km の場合について、Excel のソルバーを用いて数値的に最適解を求めた結果は図 5.1.1-1 となる。図 5.1.1-1 の通り、1次拠点の経由有無が分かれる地点を、本論文では「谷位置」と呼ぶことにする。

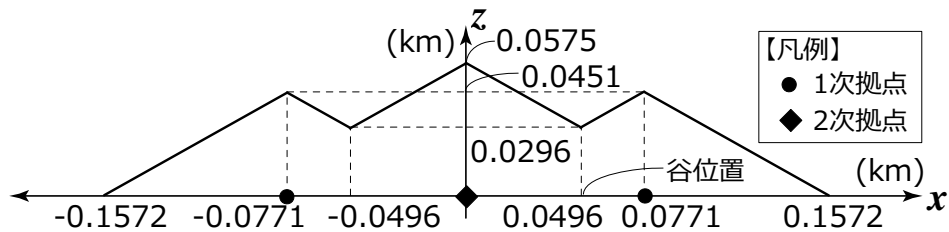


図 5.1.1-1 2次元都市モデルにおける最適な都市形態

また、延床長さを 5~100km の範囲にわたって 5km ずつ 20 段階で変化させた場合の結果を、表 5.1.1-1、図 5.1.1-2 に示す。階高を 0.002~0.0039km の範囲にわたって 0.0001km ずつ 20 段階で変化させた場合の結果を表 5.1.1-2、図 5.1.1-3 に示す。垂直方向の移動コストを 0.2~4km の範囲にわたって 24 段階で変化させた場合の結果を表 5.1.1-3、図 5.1.1-4 に示す。バスの移動コストを 0.01~0.208km の範囲にわたって 24 段階で変化させた場合の結果を表 5.1.1-4、図 5.1.1-5 に示す。ここでは、実際の都市で取り得る値を含み、かつ、関数の挙動を捉えられるように、変化させる値を幅広く設定した。また、図 5.1.1-3、5.1.1-4、5.1.1-5 では、延床長さを 10km と想定した。また、延床長さが異なることから、表には比較のために平均移動コストを記載してある。

表 5.1.1-1 2次元都市モデルにおいて延床長さを変化させた場合の計算結果

床長さ D (km)	5	10	15	20	25	30	35
拠点間距離 d (km)	0.0901	0.1275	0.1561	0.1803	0.2015	0.2208	0.2385
最高高さ H (km)	0.0674	0.0959	0.1178	0.1362	0.1525	0.1671	0.1807
都市域 r (km)	0.1842	0.2616	0.3209	0.3709	0.4150	0.4549	0.4915
谷位置 (km)	0.0579	0.0820	0.1004	0.1159	0.1296	0.1420	0.1533
谷位置階数 (階)	13	18	22	25	28	31	34
1次拠点階数 (階)	19	27	33	38	43	47	50
2次拠点階数 (階)	24	34	42	48	54	59	64
1次拠点経由床長さ V (km)	2.8646	5.7284	8.5926	11.4575	14.3208	17.1845	20.0485
平均移動コスト G/D	0.0165	0.0235	0.0289	0.0335	0.0375	0.0411	0.0444
垂直方向の移動コスト	0.0399	0.1149	0.2129	0.3294	0.4618	0.6086	0.7683
水平方向の移動コスト	0.0425	0.1201	0.2207	0.3398	0.4749	0.6243	0.7867

床長さ D (km)	40	45	50	55	60	65	70
拠点間距離 d (km)	0.2550	0.2704	0.2851	0.2990	0.3123	0.3250	0.3373
最高高さ H (km)	0.1932	0.2050	0.2162	0.2268	0.2370	0.2467	0.2561
都市域 r (km)	0.5256	0.5577	0.5880	0.6168	0.6443	0.6707	0.6962
谷位置 (km)	0.1639	0.1739	0.1833	0.1922	0.2008	0.2089	0.2168
谷位置階数 (階)	36	38	40	42	44	46	48
1次拠点階数 (階)	54	57	60	63	66	69	71
2次拠点階数 (階)	68	72	76	80	84	87	90
1次拠点経由床長さ V (km)	22.9135	25.7778	28.6416	31.5055	34.3702	37.2337	40.0987
平均移動コスト G/D	0.0475	0.0504	0.0532	0.0558	0.0583	0.0607	0.0631
垂直方向の移動コスト	0.9402	1.1233	1.3170	1.5209	1.7343	1.9569	2.1884
水平方向の移動コスト	0.9612	1.1470	1.3433	1.5498	1.7658	1.9911	2.2252

床長さ D (km)	75	80	85	90	95	100
拠点間距離 d (km)	0.3491	0.3606	0.3717	0.3825	0.3929	0.4032
最高高さ H (km)	0.2651	0.2738	0.2823	0.2905	0.2985	0.3063
都市域 r (km)	0.7207	0.7444	0.7674	0.7897	0.8114	0.8326
谷位置 (km)	0.2244	0.2318	0.2389	0.2459	0.2526	0.2592
谷位置階数 (階)	49	51	52	54	55	57
1次拠点階数 (階)	74	76	79	81	83	85
2次拠点階数 (階)	94	97	100	102	105	108
1次拠点経由床長さ V (km)	42.9631	45.8267	48.6909	51.5553	54.4198	57.2828
平均移動コスト G/D	0.0653	0.0674	0.0695	0.0716	0.0735	0.0755
垂直方向の移動コスト	2.4284	2.6766	2.9328	3.1967	3.4682	3.7469
水平方向の移動コスト	2.4679	2.7187	2.9776	3.2441	3.5181	3.7995

表 5.1.1-2 2次元都市モデルにおいて階高を変化させた場合の計算結果

階高 a (km)	0.0020	0.0021	0.0022	0.0023	0.0024	0.0025	0.0026
拠点間距離 d (km)	0.1068	0.1095	0.1120	0.1145	0.1170	0.1194	0.1218
最高高さ H (km)	0.0805	0.0825	0.0844	0.0863	0.0881	0.0899	0.0917
都市域 r (km)	0.2194	0.2248	0.2300	0.2352	0.2402	0.2451	0.2499
谷位置 (km)	0.0686	0.0704	0.0720	0.0736	0.0752	0.0768	0.0783
谷位置階数(階)	21	21	20	20	20	19	19
1次拠点階数(階)	32	31	31	30	29	29	28
2次拠点階数(階)	41	40	39	38	37	36	36
1次拠点經由床長さ V (km)	5.7289	5.7276	5.7286	5.7283	5.7282	5.7287	5.7283
平均移動コスト G/D	0.0198	0.0202	0.0207	0.0212	0.0216	0.0220	0.0225
垂直方向の移動コスト	0.0970	0.0993	0.1015	0.1037	0.1058	0.1079	0.1100
水平方向の移動コスト	0.1006	0.1031	0.1055	0.1079	0.1102	0.1125	0.1147

階高 a (km)	0.0027	0.0028	0.0029	0.0030	0.0031	0.0032	0.0033
拠点間距離 d (km)	0.1240	0.1264	0.1286	0.1307	0.1329	0.1351	0.1372
最高高さ H (km)	0.0934	0.0951	0.0967	0.0984	0.1000	0.1015	0.1031
都市域 r (km)	0.2546	0.2593	0.2638	0.2682	0.2727	0.2770	0.2812
谷位置 (km)	0.0797	0.0812	0.0827	0.0840	0.0855	0.0869	0.0882
谷位置階数(階)	18	18	18	18	17	17	17
1次拠点階数(階)	28	27	27	26	26	25	25
2次拠点階数(階)	35	34	34	33	33	32	32
1次拠点經由床長さ V (km)	5.7287	5.7287	5.7280	5.7291	5.7286	5.7270	5.7290
平均移動コスト G/D	0.0229	0.0233	0.0237	0.0241	0.0245	0.0249	0.0252
垂直方向の移動コスト	0.1120	0.1139	0.1159	0.1178	0.1196	0.1214	0.1232
水平方向の移動コスト	0.1169	0.1191	0.1212	0.1232	0.1253	0.1273	0.1293

階高 a (km)	0.0034	0.0035	0.0036	0.0037	0.0038	0.0039
拠点間距離 d (km)	0.1392	0.1413	0.1433	0.1453	0.1472	0.1491
最高高さ H (km)	0.1046	0.1061	0.1076	0.1090	0.1105	0.1119
都市域 r (km)	0.2854	0.2896	0.2936	0.2976	0.3015	0.3054
谷位置 (km)	0.0895	0.0908	0.0921	0.0934	0.0946	0.0958
谷位置階数(階)	16	16	16	16	16	15
1次拠点階数(階)	25	24	24	24	23	23
2次拠点階数(階)	31	31	30	30	30	29
1次拠点經由床長さ V (km)	5.7289	5.7278	5.7289	5.7276	5.7290	5.7293
平均移動コスト G/D	0.0256	0.0260	0.0263	0.0267	0.0270	0.0274
垂直方向の移動コスト	0.1250	0.1267	0.1284	0.1301	0.1317	0.1334
水平方向の移動コスト	0.1312	0.1331	0.1350	0.1369	0.1387	0.1405

表 5.1.1-3 2次元都市モデルにおいて垂直方向の移動コストを変化させた場合の計算結果

垂直方向のコスト c_d	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26
拠点間距離 d (km)	0.0937	0.0960	0.0982	0.1005	0.1026	0.1047	0.1068
最高高さ H (km)	0.1310	0.1278	0.1249	0.1221	0.1195	0.1170	0.1147
都市域 r (km)	0.1927	0.1974	0.2020	0.2065	0.2110	0.2153	0.2195
谷位置 (km)	0.0602	0.0617	0.0632	0.0646	0.0660	0.0673	0.0686
谷位置階数 (階)	24	24	23	23	22	22	21
1次拠点階数 (階)	37	36	35	34	33	33	32
2次拠点階数 (階)	46	45	44	43	42	42	41
1次拠点経由床長さ V (km)	5.7288	5.7284	5.7287	5.7284	5.7279	5.7286	5.7289
平均移動コスト G/D	0.0174	0.0178	0.0182	0.0186	0.0190	0.0194	0.0198
垂直方向の移動コスト	0.0855	0.0875	0.0895	0.0914	0.0933	0.0952	0.0970
水平方向の移動コスト	0.0883	0.0905	0.0926	0.0947	0.0967	0.0987	0.1007

垂直方向のコスト c_d	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.34	0.36
拠点間距離 d (km)	0.1089	0.1108	0.1128	0.1147	0.1185	0.1221	0.1257
最高高さ H (km)	0.1126	0.1105	0.1086	0.1067	0.1033	0.1002	0.0973
都市域 r (km)	0.2237	0.2277	0.2317	0.2356	0.2433	0.2507	0.2579
谷位置 (km)	0.0700	0.0712	0.0725	0.0738	0.0762	0.0785	0.0808
谷位置階数 (階)	21	21	20	20	19	19	18
1次拠点階数 (階)	32	31	30	30	29	28	27
2次拠点階数 (階)	40	39	39	38	37	36	35
1次拠点経由床長さ V (km)	5.7275	5.7288	5.7279	5.7283	5.7289	5.7288	5.7281
平均移動コスト G/D	0.0201	0.0205	0.0209	0.0212	0.0219	0.0225	0.0232
垂直方向の移動コスト	0.0988	0.1005	0.1022	0.1039	0.1072	0.1103	0.1133
水平方向の移動コスト	0.1026	0.1045	0.1063	0.1081	0.1117	0.1151	0.1185

垂直方向のコスト c_d	0.38	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
拠点間距離 d (km)	0.1291	0.1325	0.1480	0.1623	0.1753	0.1874	0.1985
最高高さ H (km)	0.0947	0.0922	0.0823	0.0750	0.0694	0.0648	0.0610
都市域 r (km)	0.2649	0.2717	0.3033	0.3320	0.3583	0.3827	0.4053
谷位置 (km)	0.0830	0.0852	0.0952	0.1043	0.1127	0.1205	0.1276
谷位置階数 (階)	18	17	15	14	13	12	12
1次拠点階数 (階)	27	26	23	21	20	18	17
2次拠点階数 (階)	34	33	29	27	25	23	22
1次拠点経由床長さ V (km)	5.7279	5.7288	5.7299	5.7282	5.7266	5.7275	5.7292
平均移動コスト G/D	0.0238	0.0244	0.0272	0.0297	0.0320	0.0342	0.0362
垂直方向の移動コスト	0.1163	0.1192	0.1326	0.1445	0.1553	0.1653	0.1747
水平方向の移動コスト	0.1217	0.1248	0.1396	0.1529	0.1652	0.1766	0.1872

垂直方向のコスト c_d	1.00	2.00	3.00	4.00
拠点間距離 d (km)	0.2096	0.2964	0.3630	0.4164
最高高さ H (km)	0.0578	0.0405	0.0328	0.0282
都市域 r (km)	0.4273	0.6002	0.7315	0.8386
谷位置 (km)	0.1348	0.1905	0.2334	0.2677
谷位置階数 (階)	11	8	6	5
1次拠点階数 (階)	16	12	9	8
2次拠点階数 (階)	21	15	12	10
1次拠点経由床長さ V (km)	5.7257	5.7258	5.7197	5.7415
平均移動コスト G/D	0.0381	0.0530	0.0642	0.0734
垂直方向の移動コスト	0.1833	0.2510	0.2998	0.3396
水平方向の移動コスト	0.1975	0.2792	0.3419	0.3939

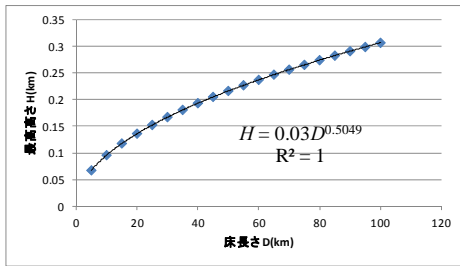
表 5. 1. 1-4 2次元都市モデルにおいてバスの移動コストを変化させた場合の
計算結果

バスのコスト c_{h2}	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070
拠点間距離 d (km)	0.1916	0.1697	0.1550	0.1438	0.1347	0.1272	0.1207
最高高さ H (km)	0.0773	0.0819	0.0860	0.0897	0.0930	0.0960	0.0989
都市域 r (km)	0.3198	0.2991	0.2855	0.2756	0.2676	0.2613	0.2559
谷位置 (km)	0.1004	0.0930	0.0886	0.0857	0.0835	0.0819	0.0806
谷位置階数(km)	8	11	13	15	17	18	19
1次拠点階数(階)	26	26	26	27	27	27	27
2次拠点階数(階)	28	29	31	32	33	34	35
1次拠点經由床長さ V (km)	6.4425	6.2670	6.1131	5.9720	5.8440	5.7228	5.6088
平均移動コスト G/D	0.0189	0.0201	0.0211	0.0220	0.0228	0.0235	0.0242
垂直方向の移動コスト	0.0920	0.0977	0.1027	0.1072	0.1113	0.1151	0.1186
水平方向の移動コスト	0.0972	0.1029	0.1079	0.1124	0.1165	0.1203	0.1238

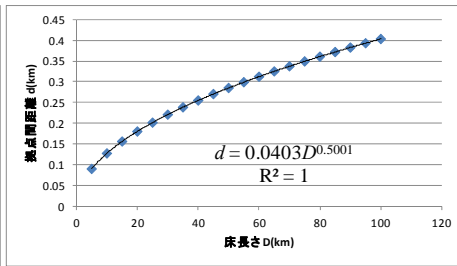
バスのコスト c_{h2}	0.080	0.090	0.100	0.110	0.120	0.130	0.140
拠点間距離 d (km)	0.1150	0.1100	0.1055	0.1014	0.0978	0.0944	0.0913
最高高さ H (km)	0.1015	0.1040	0.1063	0.1085	0.1106	0.1126	0.1145
都市域 r (km)	0.2513	0.2474	0.2439	0.2408	0.2381	0.2357	0.2334
谷位置 (km)	0.0796	0.0787	0.0780	0.0775	0.0770	0.0767	0.0763
谷位置階数(km)	20	21	22	23	24	25	26
1次拠点階数(階)	27	28	28	28	28	28	29
2次拠点階数(階)	36	37	38	39	39	40	41
1次拠点經由床長さ V (km)	5.4999	5.3973	5.2999	5.2057	5.1139	5.0251	4.9429
平均移動コスト G/D	0.0249	0.0255	0.0261	0.0266	0.0271	0.0276	0.0281
垂直方向の移動コスト	0.1219	0.1249	0.1278	0.1305	0.1331	0.1355	0.1378
水平方向の移動コスト	0.1271	0.1301	0.1330	0.1357	0.1383	0.1408	0.1431

バスのコスト c_{h2}	0.150	0.160	0.170	0.180	0.190	0.200	0.202
拠点間距離 d (km)	0.0884	0.0857	0.0831	0.0809	0.0787	0.0771	0.0768
最高高さ H (km)	0.1163	0.1180	0.1196	0.1211	0.1226	0.1241	0.1243
都市域 r (km)	0.2314	0.2296	0.2279	0.2264	0.2249	0.2236	0.2234
谷位置 (km)	0.0760	0.0758	0.0755	0.0754	0.0753	0.0756	0.0756
谷位置階数(km)	26	27	28	28	29	29	29
1次拠点階数(階)	29	29	29	29	29	29	29
2次拠点階数(階)	41	42	42	43	44	44	44
1次拠点經由床長さ V (km)	4.8634	4.7851	4.7167	4.6363	4.5664	4.4727	4.4544
平均移動コスト G/D	0.0285	0.0290	0.0294	0.0297	0.0301	0.0305	0.0305
垂直方向の移動コスト	0.1400	0.1421	0.1442	0.1461	0.1479	0.1496	0.1500
水平方向の移動コスト	0.1453	0.1474	0.1494	0.1513	0.1532	0.1549	0.1552

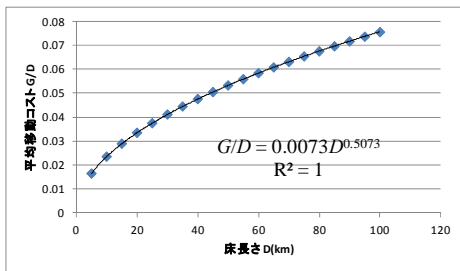
バスのコスト c_{h2}	0.204	0.206	0.208
拠点間距離 d (km)	0.0765	0.0762	0.0746
最高高さ H (km)	0.1246	0.1249	0.1251
都市域 r (km)	0.2231	0.2229	0.2226
谷位置 (km)	0.0757	0.0758	0.0745
谷位置階数(km)	29	29	30
1次拠点階数(階)	29	29	30
2次拠点階数(階)	44	44	44
1次拠点經由床長さ V (km)	4.4363	4.4183	4.4760
平均移動コスト G/D	0.0306	0.0307	0.0307
垂直方向の移動コスト	0.1503	0.1507	0.1510
水平方向の移動コスト	0.1556	0.1559	0.1563



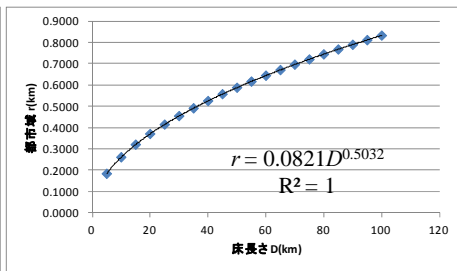
a. 床長さと最高高さ



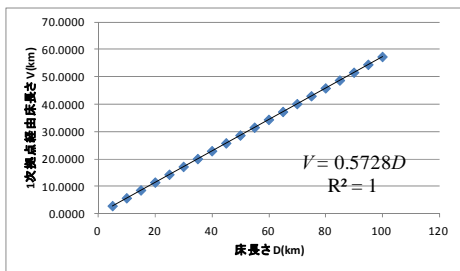
b. 床長さと拠点間距離



c. 床長さと平均移動コスト



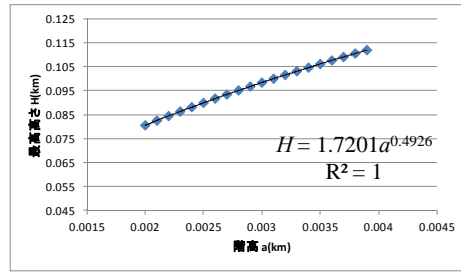
d. 床長さと都市域



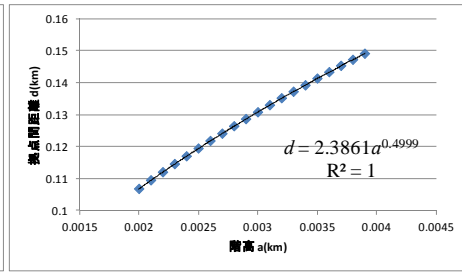
e. 床長さと1次拠点經由床長さ

図 5. 1. 1-2 2次元都市モデルにおいて延床長さを変化させた場合の緒元の関係

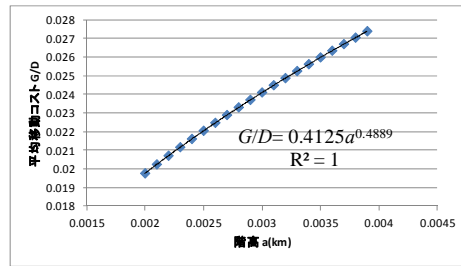
係



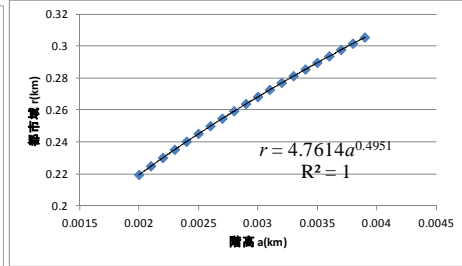
a. 階高と最高高さ



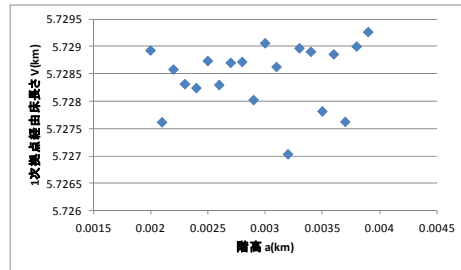
b. 階高と拠点間距離



c. 階高と平均移動コスト

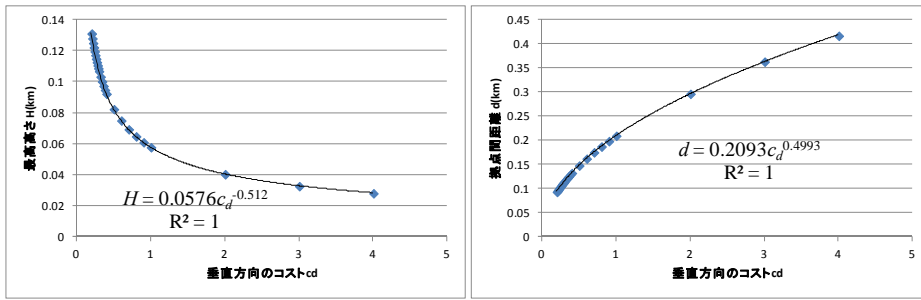


d. 階高と都市域



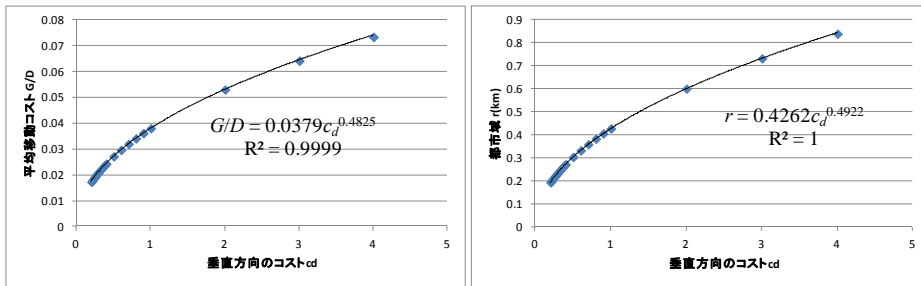
e. 階高と1次拠点経由床長さ

図 5.1.1-3 2次元都市モデルにおいて階高を変化させた場合の緒元の関係



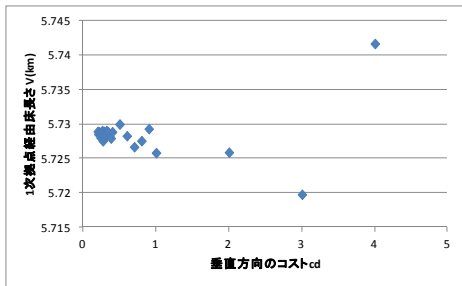
a. 垂直方向のコストと最高高さ

b. 垂直方向のコストと拠点間距離



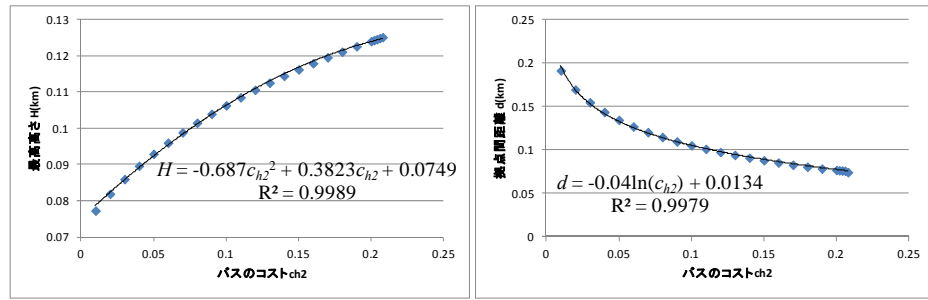
c. 垂直方向のコストと平均移動コスト

d. 垂直方向のコストと都市域



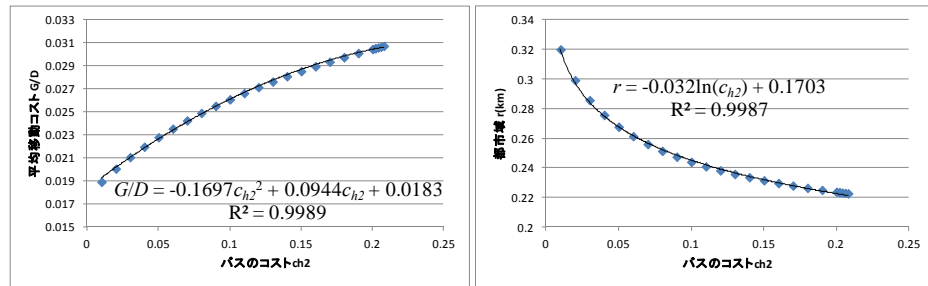
e. 垂直方向のコストと1次拠点経由床長さ

図 5.1.1-4 2次元都市モデルにおいて垂直方向の移動コストを変化させた場合の緒元の関係



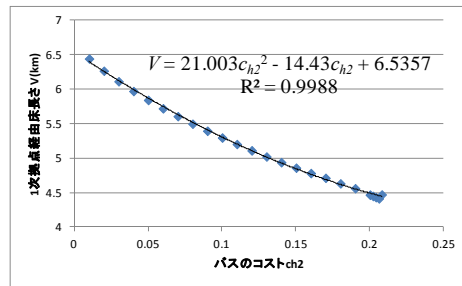
a. バスのコストと最高高さ

b. バスのコストと拠点間距離



c. バスのコストと平均移動コスト

d. バスのコストと都市域



e. バスのコストと1次拠点経由床長さ

図 5. 1. 1-5 2次元都市モデルにおいてバスのコストを変化させた場合の緒元
の関係

さらに、上記の場合について、拠点間距離と最高高さの関係を図 5.1.1-6 に示す。この結果から、人口すなわち延床長さを与えれば、総移動コストを最小化する都市形態が一意に定まる。そのときの拠点間距離(d)と最高高さ(H)の係に回帰式を当てはめると、高精度で次のように表すことができる。

(1) 延床長さを変化させた場合

$$H = 0.7588 \times d \quad (5.1.1-1)$$

(2) 階高を変化させた場合

$$H = 0.752 \times d \quad (5.1.1-2)$$

(3) 垂直方向の移動コストを変化させた場合

$$H = 0.0116 \times d^{-1.025} \quad (5.1.1-3)$$

(4) バスの移動コストを変化させた場合

$$H = 2.3819 \times d^2 - 1.0421 \times d + 0.19 \quad (5.1.1-4)$$

本研究で示した回帰式は、近藤ら[5-1]によって示された回帰式とは値がやや異なる。(1)の差異については、切片の設定の違いによるものである。床長さが0の場合、拠点間距離は0、階高は0となる。本研究では近藤らが算出した切片は数値的に求めた際の誤差と捉え、切片を0とすることを前提に回帰式を算出しておいた。なお、後述の5.1.2節でも同様の考え方としている。(2)、(3)、(4)の差異については、延床長さの違いによるものである。近藤らは延床長さを3.65847kmとしていたのに対し、本研究では前述の通り10kmとしている。図5.1.1-2のb、cの通り、最高高さ、拠点間距離は、延床長さのべき乗回帰式として表される。このため、近藤らの算出した回帰式とは値が異なる。また、各々の回帰式について数値的に求めた際の値とは誤差があるため、回帰式を組み合わせることで理論的に求めた回帰式と、(2)、(3)、(4)についても違いが生じている。

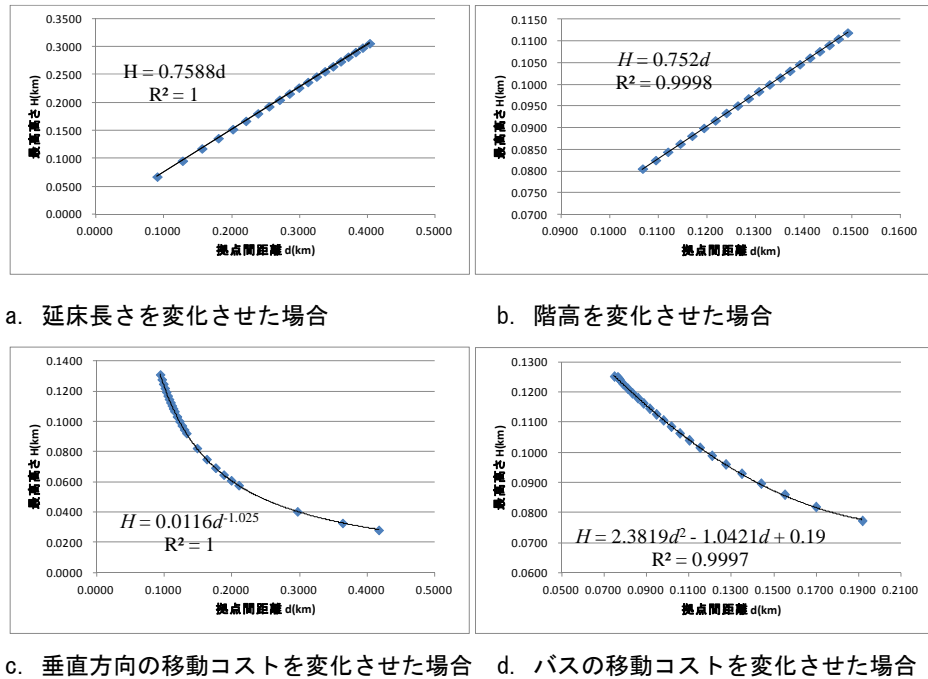


図 5.1.1-6 2次元都市モデルにおける拠点間距離と最高高さの関係

延床長さを変化させた場合、最高高さや拠点間距離は、おおよそ延床長さの増加率の平方根に比例して増加する。階高を変化させた場合も、延床長さを変化させた場合と同様である。

垂直方向の移動コストを変化させた場合、最高高さや拠点間距離は、おおよそ延床長さの増加率の平方根に比例して増加し、最高高さは垂直方向の移動コストの増加率の-1/2乗に比例して増加する。

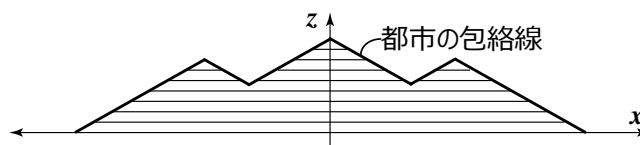


図 5.1.1-7 都市の包絡線

バスの移動コストを変化させた場合、最高高さと拠点間距離の関係は2次関数で表され、最適な都市形態は相似となっていない。また、他の場合と違い、単純な数式にならない。これは、バスの移動コストが変わると、直接2次拠点へ移動する人口と、1次拠点を經由して2次拠点へ移動する人口の割合が変化するためである。

1次拠点を經由する人口（1次拠点経由床長さ）と、階高・垂直方向のコストの間に相関関係はない。この原因は、次のように考えられる。階高が変化すると、同一地点における階数が増える。また、垂直方向の移動コストが増えると、都市の包絡線自体が増える。このため、階高・垂直方向のコストが増えると、2次拠点から水平方向に同じ距離に位置するところでも階数すなわち人口密度が増える。都市形態の変化に加え、人口密度も増えるため、1次拠点を經由する人口と、階高・垂直方向のコストの関係は単純な相関関係にならない。

5.1.2 多層の床を想定する場合の最適な3次元都市モデル

4.2.2節で算出した多層の床を想定する場合の最適な3次元都市モデルについて、移動コストが最小となる拠点間距離と最高高さを求める。5.1.1節と同様、長さの単位をkmとし、階高は0.00285kmとする。床面積が1km²の場合について、Excelのソルバーを用いて数値的に最適解を求めた際のx軸における断面図は、図5.1.2-1となる。

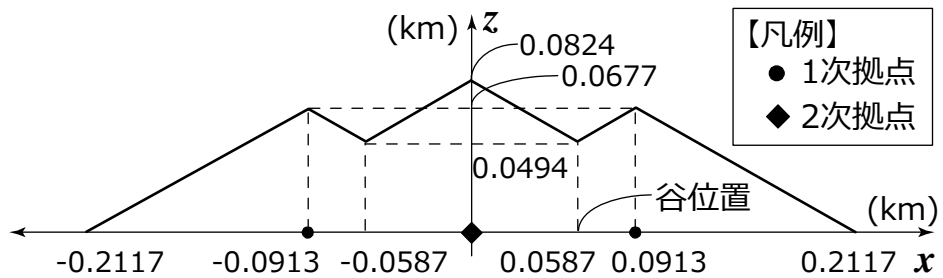


図 5.1.2-1 3次元都市モデルにおける最適な都市形態

また、延床面積を5~100km²の範囲にわたって5km²ずつ20段階で変化させた場合の結果を表5.1.2-1、図5.1.2-2に示す。階高を0.002~0.0039kmの範囲にわたって0.0001kmずつ20段階で変化させた場合の結果を表5.1.2-2、図5.1.2-3に示す。垂直方向の移動コストを0.2~4の範囲にわたって24段階で変化させた場合の結果を表5.1.2-3、図5.1.2-4に示す。バスの移動コストを0.01~0.208の範囲にわたって24段階で変化させた場合の結果を表5.1.2-4、図5.1.2-5に示す。ここでは、実際の都市で取り得る値を含み、かつ、関数の挙動を捉えられるように、変化させる値を幅広く設定した。また、図5.1.2-3、5.1.2-4、5.1.2-5では、延床面積を10km²と想定した。

表 5.1.2-1 3次元都市モデルにおいて延床面積を変化させた場合の計算結果

床面積 D (km ²)	5	10	15	20	25	30	35
拠点間距離 d (km)	0.1562	0.1968	0.2252	0.2479	0.2670	0.2838	0.2987
最高高さ H (km)	0.1419	0.1792	0.2053	0.2261	0.2437	0.2591	0.2728
都市域 r (km)	0.3639	0.4591	0.5259	0.5791	0.6240	0.6633	0.6984
谷位置 (km)	0.1004	0.1265	0.1448	0.1594	0.1717	0.1824	0.1920
谷位置階数(階)	29	37	43	47	51	54	57
1次拠点階数(階)	40	51	59	65	70	74	78
2次拠点階数(階)	49	62	72	79	85	90	95
1次拠点經由面積 V (km ²)	4.5104	9.0343	13.5760	18.0995	22.6173	27.1041	31.6255
平均移動コスト G/D	0.0393	0.0496	0.0569	0.0627	0.0676	0.0718	0.0756
垂直方向の移動コスト	0.0637	0.1620	0.2793	0.4109	0.5543	0.7078	0.8703
水平方向の移動コスト	0.1327	0.3345	0.5743	0.8428	1.1348	1.4471	1.7773

床面積 D (km ²)	40	45	50	55	60	65	70
拠点間距離 d (km)	0.3123	0.3249	0.3365	0.3473	0.3575	0.3672	0.3764
最高高さ H (km)	0.2853	0.2968	0.3074	0.3174	0.3268	0.3356	0.3441
都市域 r (km)	0.7303	0.7596	0.7869	0.8123	0.8363	0.8590	0.8805
谷位置 (km)	0.2008	0.2088	0.2163	0.2233	0.2298	0.2361	0.2420
谷位置階数(階)	60	62	65	67	69	71	72
1次拠点階数(階)	82	85	88	91	94	97	99
2次拠点階数(階)	100	104	107	111	114	117	120
1次拠点經由面積 V (km ²)	36.1834	40.6723	45.1832	49.7166	54.2734	58.8548	63.3182
平均移動コスト G/D	0.0791	0.0823	0.0853	0.0880	0.0906	0.0931	0.0954
垂直方向の移動コスト	1.0408	1.2188	1.4035	1.5946	1.7917	1.9944	2.2025
水平方向の移動コスト	2.1237	2.4848	2.8596	3.2471	3.6465	4.0572	4.4786

床面積 D (km ²)	75	80	85	90	95	100
拠点間距離 d (km)	0.3852	0.3935	0.4016	0.4093	0.4167	0.4239
最高高さ H (km)	0.3521	0.3598	0.3672	0.3743	0.3811	0.3877
都市域 r (km)	0.9011	0.9207	0.9396	0.9577	0.9752	0.9920
谷位置 (km)	0.2476	0.2530	0.2581	0.2631	0.2679	0.2725
谷位置階数(階)	74	76	77	79	80	82
1次拠点階数(階)	101	104	106	108	110	112
2次拠点階数(階)	123	126	128	131	133	136
1次拠点經由面積 V (km ²)	67.7922	72.4330	76.9364	81.4534	85.9804	90.5221
平均移動コスト G/D	0.0977	0.0998	0.1019	0.1038	0.1057	0.1076
垂直方向の移動コスト	2.4156	2.6336	2.8563	3.0833	3.3148	3.5503
水平方向の移動コスト	4.9102	5.3514	5.8019	6.2614	6.7294	7.2058

表 5.1.2-2 3次元都市モデルにおいて階高を変化させた場合の計算結果

階高 a (km)	0.0020	0.0021	0.0022	0.0023	0.0024	0.0025	0.0026
拠点間距離 d (km)	0.1749	0.1777	0.1805	0.1832	0.1858	0.1883	0.1908
最高高さ H (km)	0.1595	0.1621	0.1646	0.1670	0.1694	0.1716	0.1739
都市域 r (km)	0.4085	0.4151	0.4215	0.4277	0.4338	0.4397	0.4454
谷位置 (km)	0.1124	0.1142	0.1160	0.1178	0.1195	0.1211	0.1227
谷位置階数(階)	48	46	45	43	42	41	40
1次拠点階数(階)	65	63	61	59	58	56	55
2次拠点階数(階)	79	77	74	72	70	68	66
1次拠点経由面積 V (km ²)	9.0395	9.0427	9.0415	9.0347	9.0585	9.0436	9.0607
平均移動コスト G/D	0.0442	0.0449	0.0456	0.0463	0.0469	0.0476	0.0482
垂直方向の移動コスト	0.1449	0.1472	0.1494	0.1515	0.1535	0.1555	0.1574
水平方向の移動コスト	0.2972	0.3021	0.3068	0.3114	0.3158	0.3202	0.3244

階高 a (km)	0.0027	0.0028	0.0029	0.0030	0.0031	0.0032	0.0033
拠点間距離 d (km)	0.1933	0.1956	0.1979	0.2002	0.2024	0.2045	0.2066
最高高さ H (km)	0.1760	0.1782	0.1802	0.1822	0.1842	0.1861	0.1880
都市域 r (km)	0.4510	0.4564	0.4617	0.4669	0.4720	0.4770	0.4818
谷位置 (km)	0.1242	0.1257	0.1272	0.1287	0.1301	0.1315	0.1328
谷位置階数(階)	39	38	37	36	35	35	34
1次拠点階数(階)	53	52	51	50	48	47	46
2次拠点階数(階)	65	63	62	60	59	58	56
1次拠点経由面積 V (km ²)	9.0383	9.0492	9.0580	9.0646	9.0277	9.0285	9.0279
平均移動コスト G/D	0.0488	0.0494	0.0499	0.0505	0.0510	0.0516	0.0521
垂直方向の移動コスト	0.1593	0.1611	0.1629	0.1646	0.1663	0.1679	0.1695
水平方向の移動コスト	0.3285	0.3325	0.3364	0.3402	0.3440	0.3476	0.3512

階高 a (km)	0.0034	0.0035	0.0036	0.0037	0.0038	0.0039
拠点間距離 d (km)	0.2087	0.2107	0.2127	0.2146	0.2166	0.2185
最高高さ H (km)	0.1899	0.1917	0.1934	0.1952	0.1969	0.1986
都市域 r (km)	0.4866	0.4912	0.4958	0.5003	0.5047	0.5091
谷位置 (km)	0.1342	0.1355	0.1367	0.1380	0.1392	0.1404
谷位置階数(階)	33	32	32	31	31	30
1次拠点階数(階)	45	45	44	43	42	41
2次拠点階数(階)	55	54	53	52	51	50
1次拠点経由面積 V (km ²)	9.0247	9.0636	9.0566	9.0487	9.0384	9.0257
平均移動コスト G/D	0.0526	0.0531	0.0536	0.0540	0.0545	0.0550
垂直方向の移動コスト	0.1711	0.1726	0.1742	0.1756	0.1771	0.1785
水平方向の移動コスト	0.3547	0.3582	0.3615	0.3648	0.3681	0.3713

表 5.1.2-3 3次元都市モデルにおいて垂直方向の移動コストを変化させた場合の計算結果

垂直方向のコスト c_d	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26
拠点間距離 d (km)	0.1602	0.1629	0.1654	0.1679	0.1703	0.1726	0.1749
最高高さ H (km)	0.2709	0.2622	0.2542	0.2467	0.2398	0.2333	0.2272
都市域 r (km)	0.3746	0.3806	0.3866	0.3923	0.3978	0.4032	0.4085
谷位置(km)	0.1030	0.1047	0.1063	0.1079	0.1095	0.1110	0.1124
谷位置階数(階)	57	55	53	52	50	49	48
1次拠点階数(階)	78	75	73	71	69	67	65
2次拠点階数(階)	95	92	89	86	84	81	79
1次拠点経由面積 V (km ²)	9.0497	9.0371	9.0461	9.0503	9.0510	9.0471	9.0400
平均移動コスト G/D	0.0406	0.0412	0.0419	0.0425	0.0431	0.0437	0.0442
垂直方向の移動コスト	0.1333	0.1354	0.1375	0.1394	0.1413	0.1432	0.1449
水平方向の移動コスト	0.2724	0.2768	0.2812	0.2853	0.2894	0.2934	0.2972

垂直方向のコスト c_d	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.34	0.36
拠点間距離 d (km)	0.1771	0.1792	0.1814	0.1834	0.1874	0.1912	0.1949
最高高さ H (km)	0.2216	0.2162	0.2112	0.2064	0.1977	0.1898	0.1826
都市域 r (km)	0.4136	0.4186	0.4235	0.4283	0.4375	0.4463	0.4548
谷位置(km)	0.1138	0.1152	0.1166	0.1179	0.1205	0.1229	0.1253
谷位置階数(階)	46	45	44	43	41	40	38
1次拠点階数(階)	64	62	61	59	57	54	52
2次拠点階数(階)	77	75	74	72	69	66	64
1次拠点経由面積 V (km ²)	9.0596	9.0457	9.0606	9.0397	9.0585	9.0328	9.0349
平均移動コスト G/D	0.0448	0.0453	0.0458	0.0463	0.0473	0.0483	0.0492
垂直方向の移動コスト	0.1467	0.1484	0.1500	0.1516	0.1547	0.1577	0.1606
水平方向の移動コスト	0.3010	0.3047	0.3083	0.3118	0.3185	0.3251	0.3313

垂直方向のコスト c_d	0.38	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
拠点間距離 d (km)	0.1985	0.2019	0.2175	0.2311	0.2433	0.2543	0.2645
最高高さ H (km)	0.1761	0.1702	0.1464	0.1295	0.1167	0.1067	0.0985
都市域 r (km)	0.4630	0.4709	0.5068	0.5381	0.5660	0.5913	0.6145
谷位置(km)	0.1276	0.1298	0.1398	0.1486	0.1564	0.1635	0.1700
谷位置階数(階)	37	35	30	27	24	22	20
1次拠点階数(階)	50	49	42	37	33	30	28
2次拠点階数(階)	61	59	51	45	40	37	34
1次拠点経由面積 V (km ²)	9.0300	9.0591	9.0552	9.0508	9.0337	9.0271	9.0496
平均移動コスト G/D	0.0501	0.0509	0.0547	0.0581	0.0610	0.0637	0.0662
垂直方向の移動コスト	0.1633	0.1659	0.1778	0.1879	0.1969	0.2049	0.2121
水平方向の移動コスト	0.3373	0.3431	0.3696	0.3928	0.4135	0.4323	0.4496

垂直方向のコスト c_d	1.00	2.00	3.00	4.00
拠点間距離 d (km)	0.2740	0.3450	0.3948	0.4347
最高高さ H (km)	0.0917	0.0573	0.0434	0.0356
都市域 r (km)	0.6360	0.7962	0.9065	0.9932
谷位置(km)	0.1761	0.2218	0.2538	0.2794
谷位置階数(階)	19	11	9	7
1次拠点階数(階)	26	16	12	10
2次拠点階数(階)	32	20	15	12
1次拠点経由面積 V (km ²)	9.0488	9.0450	9.0484	9.0995
平均移動コスト G/D	0.0684	0.0852	0.0965	0.1053
垂直方向の移動コスト	0.2188	0.2654	0.2941	0.3142
水平方向の移動コスト	0.4657	0.5866	0.6713	0.7387

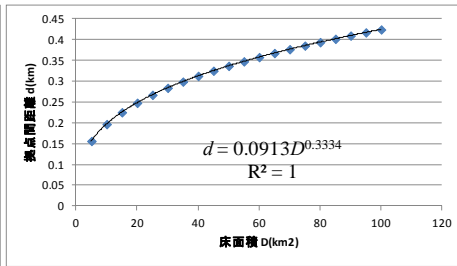
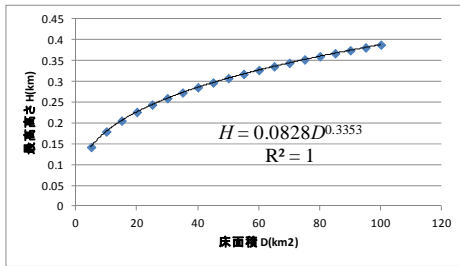
表 5.1.2-4 3次元都市モデルにおいてバスの移動コストを変化させた場合の
計算結果

バスのコスト ch2	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070	0.080
拠点間距離 d (km)	0.2472	0.2287	0.2155	0.2051	0.1964	0.1888	0.1821
最高高さ H (km)	0.1552	0.1619	0.1681	0.1740	0.1794	0.1846	0.1896
都市域 r (km)	0.4994	0.4836	0.4730	0.4651	0.4588	0.4536	0.4491
谷位置 (km)	0.1354	0.1308	0.1284	0.1272	0.1265	0.1261	0.1260
谷位置階数(km)	27	30	33	35	38	39	41
1次拠点階数(階)	49	50	50	51	51	52	52
2次拠点階数(階)	54	56	58	61	62	64	66
1次拠点経由面積 V (km ²)	10.8907	10.2147	9.7067	9.3531	9.0196	8.7666	8.5083
平均移動コスト G/D	0.0430	0.0448	0.0466	0.0482	0.0497	0.0512	0.0525
垂直方向の移動コスト	0.1400	0.1460	0.1518	0.1571	0.1622	0.1670	0.1716
水平方向の移動コスト	0.2897	0.3025	0.3140	0.3248	0.3349	0.3445	0.3536

バスのコスト ch2	0.090	0.100	0.110	0.120	0.130	0.140	0.150
拠点間距離 d (km)	0.1760	0.1705	0.1654	0.1607	0.1563	0.1522	0.1484
最高高さ H (km)	0.1942	0.1987	0.2030	0.2071	0.2110	0.2147	0.2183
都市域 r (km)	0.4453	0.4419	0.4389	0.4363	0.4339	0.4317	0.4297
谷位置 (km)	0.1260	0.1262	0.1264	0.1266	0.1269	0.1273	0.1276
谷位置階数(km)	43	44	46	47	48	50	51
1次拠点階数(階)	53	53	53	54	54	55	55
2次拠点階数(階)	68	69	71	72	74	75	76
1次拠点経由面積 V (km ²)	8.3059	8.0904	7.8917	7.7329	7.5583	7.4175	7.2616
平均移動コスト G/D	0.0538	0.0551	0.0563	0.0574	0.0585	0.0595	0.0605
垂直方向の移動コスト	0.1759	0.1801	0.1840	0.1878	0.1914	0.1949	0.1982
水平方向の移動コスト	0.3623	0.3706	0.3785	0.3861	0.3933	0.4003	0.4070

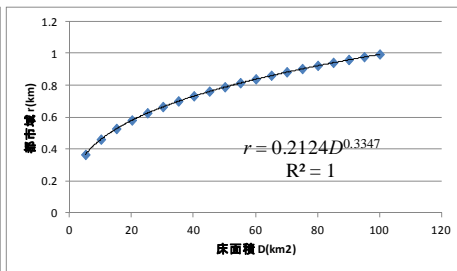
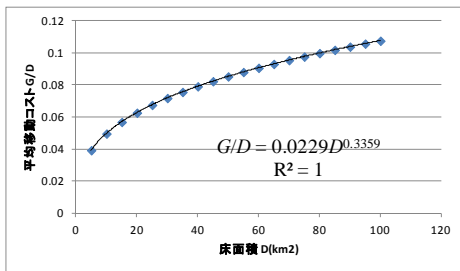
バスのコスト ch2	0.160	0.170	0.180	0.190	0.200	0.202	0.204
拠点間距離 d (km)	0.1448	0.1414	0.1382	0.1351	0.1322	0.1316	0.1310
最高高さ H (km)	0.2218	0.2251	0.2284	0.2315	0.2344	0.2350	0.2356
都市域 r (km)	0.4279	0.4263	0.4248	0.4234	0.4221	0.4218	0.4216
谷位置 (km)	0.1280	0.1284	0.1288	0.1291	0.1295	0.1296	0.1297
谷位置階数(km)	52	53	54	55	56	56	57
1次拠点階数(階)	55	56	56	56	57	57	57
2次拠点階数(階)	77	78	80	81	82	82	82
1次拠点経由面積 V (km ²)	7.1135	6.9928	6.8579	6.7287	6.6227	6.5985	6.5749
平均移動コスト G/D	0.0615	0.0624	0.0633	0.0642	0.0650	0.0652	0.0653
垂直方向の移動コスト	0.2014	0.2045	0.2075	0.2104	0.2131	0.2137	0.2142
水平方向の移動コスト	0.4134	0.4196	0.4255	0.4312	0.4368	0.4378	0.4389

バスのコスト ch2	0.206	0.207	0.208
拠点間距離 d (km)	0.1305	0.1302	0.1299
最高高さ H (km)	0.2362	0.2365	0.2367
都市域 r (km)	0.4213	0.4212	0.4211
谷位置 (km)	0.1298	0.1298	0.1298
谷位置階数(km)	57	57	57
1次拠点階数(階)	57	57	57
2次拠点階数(階)	82	82	83
1次拠点経由面積 V (km ²)	6.5505	6.5394	6.5279
平均移動コスト G/D	0.0655	0.0656	0.0656
垂直方向の移動コスト	0.2147	0.2150	0.2153
水平方向の移動コスト	0.4400	0.4405	0.4410



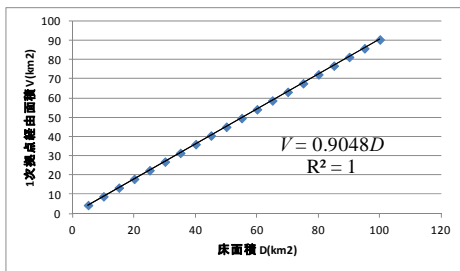
a. 床面積と最高高さ

b. 床面積と拠点間距離



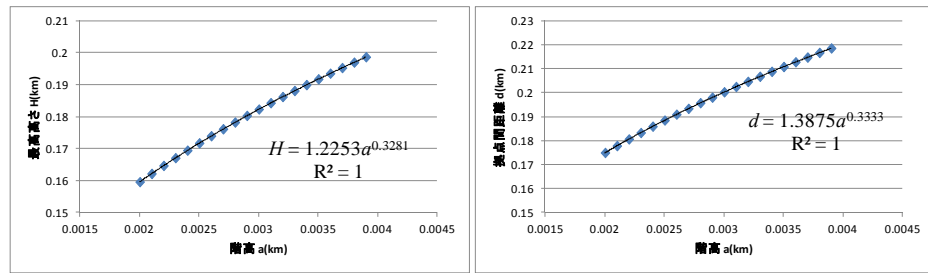
c. 床面積と平均移動コスト

d. 床面積と都市域



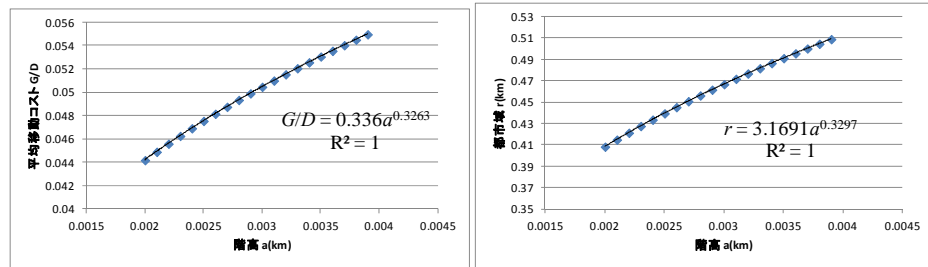
e. 床面積と1次拠点経由面積

図 5.1.2-2 3次元都市モデルにおいて延床面積を変化させた場合の緒元の関係



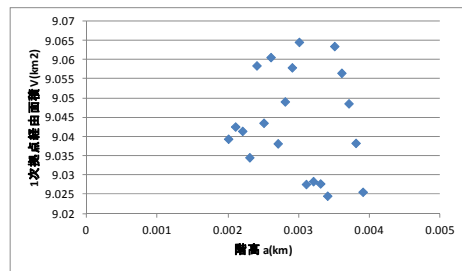
a. 階高と最高高さ

b. 階高と拠点間距離



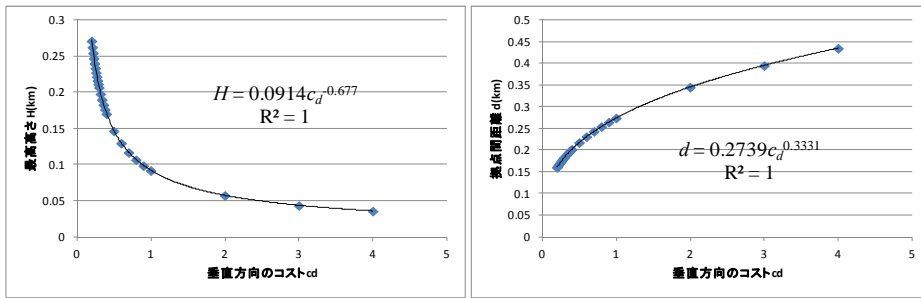
c. 階高と平均移動コスト

d. 階高と平均移動コスト



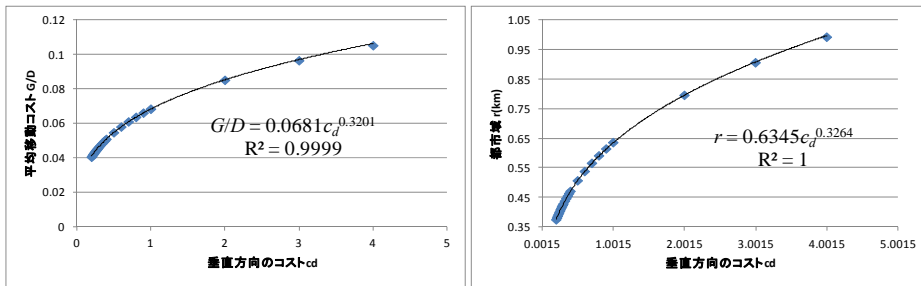
e. 階高と1次拠点経由面積

図 5.1.2-3 3次元都市モデルにおいて階高を変化させた場合の緒元の関係



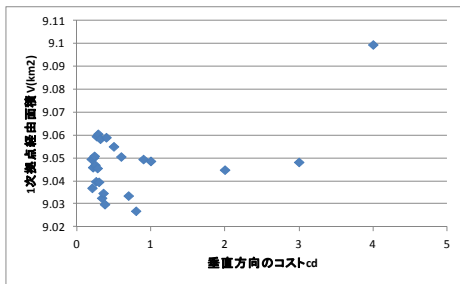
a. 垂直方向の移動コストと最高高さ

b. 垂直方向のコストと拠点間距離



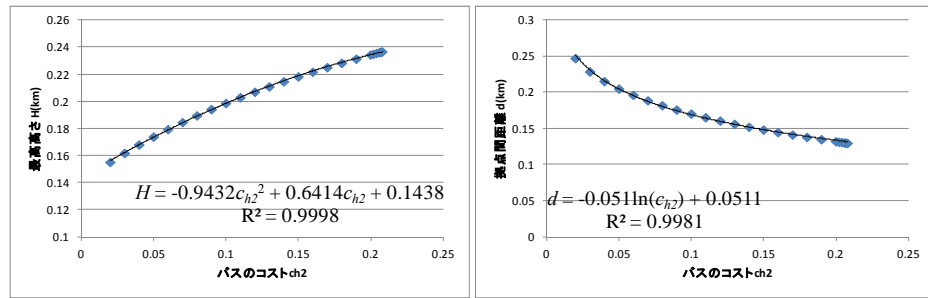
c. 垂直方向のコストと平均移動コスト

d. 垂直方向のコストと都市域



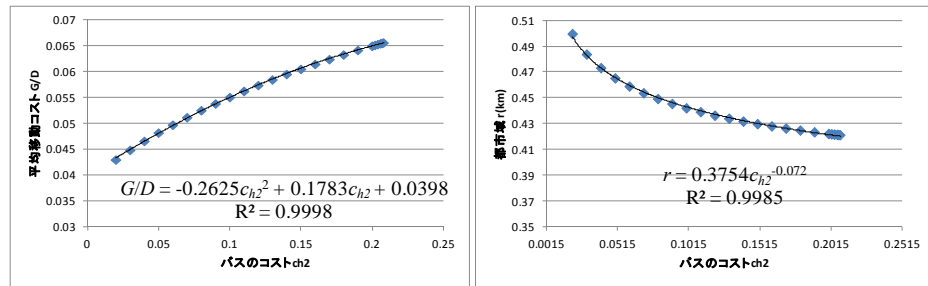
e. 垂直方向のコストと1次拠点経由面積

図 5.1.2-4 3次元都市モデルにおいて垂直方向の移動コストを変化させた場合の緒元の関係



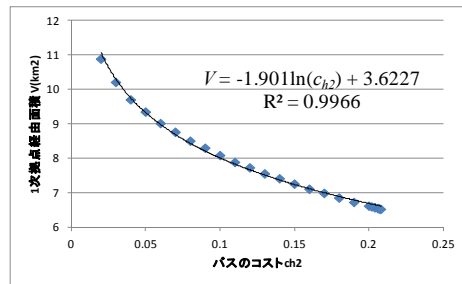
a. バスのコストと最高高さ

b. バスのコストと拠点間距離



c. バスのコストと平均移動コスト

d. バスのコストと都市域



e. バスのコストと1次拠点経由面積

図 5.1.2-5 3次元都市モデルにおいてバスの移動コストを変化させた場合の緒元の関係

さらに、上記の場合について、拠点間距離と最高高さの関係を図 5.1.2-6 に示す。この結果から、人口すなわち延床面積を与えれば、総移動コストを最小化する都市形態が一意に定まる。そのときの拠点間距離 d と最高高さ H の関係に回帰式を当てはめると、高精度で次のように表せる。

(1) 延床面積を変化させた場合

$$H = 0.9138 \times d \quad (5.1.2-1)$$

(2) 階高を変化させた場合

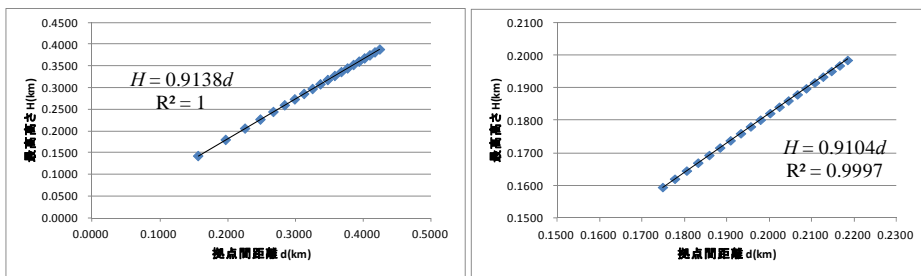
$$H = 0.9104 \times d \quad (5.1.2-2)$$

(3) 垂直方向の移動コストを変化させた場合

$$H = 0.0066 \times d^{-2.031} \quad (5.1.2-3)$$

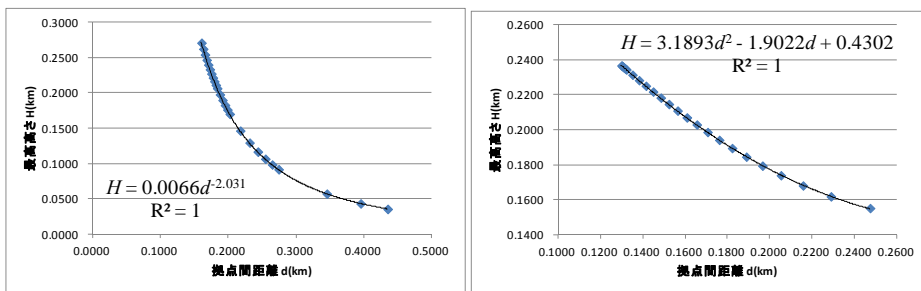
(4) バスの移動コストを変化させた場合

$$H = 3.1893 \times d^2 - 1.9022 \times d + 0.4302 \quad (5.1.2-4)$$



a. 延床長さを変化させた場合

b. 階高を変化させた場合



c. 垂直方向の移動コストを変化させた場合

d. バスの移動コストを変化させた場合

図 5.1.2-6 3次元都市モデルにおける拠点間距離と最高高さの関係

延床面積を変化させた場合、最高高さと拠点間距離の関係は一次関数となる。したがって、延床面積を変化させた場合には、最適な都市形態は相似形を保ちながら変化する。また、1次拠点を經由する人口と延床面積の関係も一次関数

となる。最高高さ・拠点間距離・総移動コスト・都市域は、おおよそ延床面積の増加率の3乗根に比例して増加する。

階高を変化させた場合は、延床面積を変化させた場合と同様、最適な都市形態は相似形を保ちながら変化する。また、最高高さ・拠点間距離・総移動コスト・都市域は、おおよそ階高の増加率の3乗根に比例して増加する。1次拠点を經由する人口と階高については、相関関係は見られない。多層の床を想定する場合の最適な2次元都市モデルと同様、階高が変化すると、都市形態の変化に加え、階数すなわち人口密度も変化するためである。

垂直方向の移動コストを変化させた場合、最高高さや拠点間距離の関係は累乗関数で表され、最適な都市形態の変化は相似的にならない。これは、垂直方向の移動コストが変化した場合、都市の最上部をつないだ線、すなわち都市の包絡線が変化するためである。拠点間距離は垂直方向の移動コストの増加率の3乗根に比例して増加し、最高高さは垂直方向の移動コストの増加率の $2/3$ 乗に比例する。また、階高を変化させた場合と同様、1次拠点を經由する人口と垂直方向の移動コストにも相関関係は見られない。

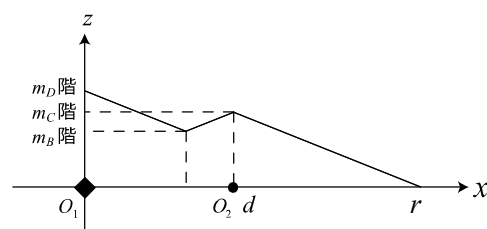
バスの移動コストを変化させた場合、最高高さや拠点間距離の関係は2次関数で表され、最適な都市形態の変化は相似形を保っていない。また、他の場合と違い、単純な数式にならない。これは、バスの移動コストが変わると、直接2次拠点へ移動する人口と、1次拠点を經由して2次拠点へ移動する人口の割合が変化するためである。1次拠点を經由する人口は、バスの移動コストが大きくなるにつれて少なくなる。

5.2 2次元都市モデルと3次元都市モデルの比較

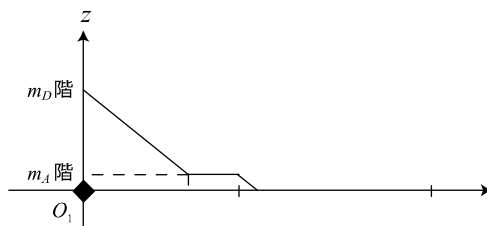
5.2節では、2次元都市モデルにおける最適な都市形態と、3次元都市モデルにおける最適な都市形態を比較する。多層の床を想定する場合の都市モデルを対象とし、3.2.2節で求めた都市モデルと、4.2.2節で求めた都市モデルを用いる。

5.1.1節、5.1.2節でも述べた通り、2次元都市モデルでは最高高さや拠点間距離がおおよそ延床長さの増加率の平方根に比例して増加しているのに対し、3次元都市モデルでは3乗根に比例して増加している。階高を変化させた場合や、拠点間距離と垂直方向の移動コストについても同様である。また、2次元都市モデルでは最高高さは垂直方向の移動コストの増加率の $-1/2$ 乗に比例して増加しているのに対し、3次元都市モデルでは $-2/3$ 乗に比例している。これらは、考慮する軸が1つ増えたことによる違いであり、関数の性質としては同じである。

2次拠点から都市端までの距離が同じとなること、つまり、都市域を合わせることを条件として2次元都市モデルと3次元都市モデルを算出すると、表5.2-1となる。表5.2-1では、図5.2-1に示す通り、階数を4.2.2節で設定した m_A 、 m_B 、 m_C 、 m_D を用いて表記する。また、2次元都市モデルに対する3次元都市モデルの値の割合も記載した。さらに、図5.2-2に、2次元都市モデルと、3次元都市モデルにおけるx軸上の断面図を重ね合わせて示す。



a. x軸上の断面図



b. y=x上の断面図

図5.2-1 階数の表記

図 5.2-2、表 5.2-1 の通り、2次元都市モデルと3次元都市モデルでは、最適な都市形態がやや異なる。都市域を合わせた場合、3次元都市モデルは2次元都市モデルに比べ、1次拠点がやや中心により、階高が高くなっている。1次拠点を經由する人口は、2次元都市モデルでは総人口の57.3%であるのに対し、3次元都市モデルでは90.4%である。つまり、2次元都市モデルは3次元都市モデルの単純な断面にならない。このことは、3次元都市モデルでは、郊外における平面の広がりが大きいため、総人口に占める都市モデルの中心部の人口はごくわずかであることを示している。2次元都市モデルでは総移動コストに対する垂直方向の移動コストが49.4%であったのに対し、3次元都市モデルでは32.6%となっている。つまり、2次元都市モデルでは総移動コストの1/2が水平方向の移動であったのに対し、3次元都市モデルでは2/3が水平方向の移動コストとなっている。これは、水平方向の移動軸が2次元都市モデルではx軸方向だけであったのに対し、3次元都市モデルではy軸が加わったためである。2次元都市モデルと3次元都市モデルは、ともに各軸方向に対する移動コストの割合はほぼ同じである。

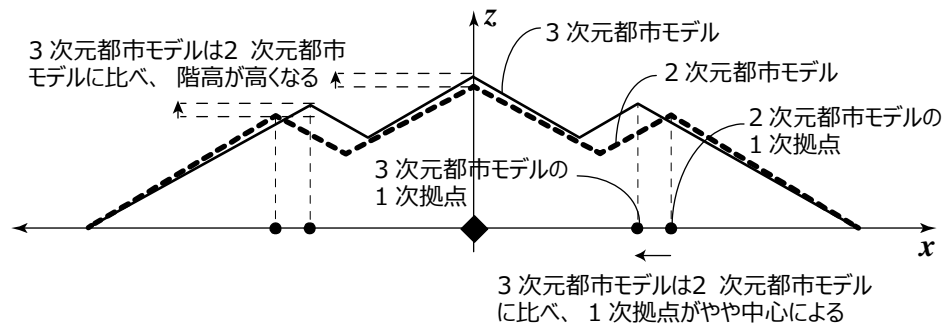


図 5.2-2 2次元都市モデルと3次元都市モデルの比較

表 5.2-1 2次元都市モデルと3次元都市モデルの比較

カテゴリ	説明	2次元都市	3次元都市	2次元都市 に対する3次元都市の値 の割合
移動コスト	垂直方向	0.37037		-
	徒歩	0.20833		-
	バス	0.05952		-
距離	階高	0.00285		-
	拠点間距離	0.2179	0.1924	88.3%
	都市域	0.4488	0.4488	100.0%
	谷位置(mB)	0.1401	0.1237	88.3%
高さ	最高高さ	0.1649	0.1751	106.2%
	mA階	-	0.0360	-
	mB階	0.0861	0.1056	122.6%
	mC階	0.1299	0.1442	111.0%
	mD階	0.1649	0.1751	106.2%
階数	mA階	-	12	-
	mB階	31	37	119.4%
	mC階	46	50	108.7%
	mD階	58	61	105.2%
面積	1~mA階	-	4.5602	-
	mA~mB階	-	4.3940	-
	mB~mC階	-	0.3666	-
	mC~mD階	-	0.0225	-
	総面積	29.2063	9.3433	32.0%
	1次拠点経由人口	16.7310	8.4476	50.5%
コスト	総移動コスト	1.1841	0.4533	38.3%
	平均移動コスト	0.0405	0.0485	119.7%
	垂直方向の移動コスト	0.5844	0.1479	25.3%
	水平方向の移動コスト	0.5997	0.3055	50.9%
	総移動コストに 対する垂直方向の 移動コストの割合	49.4%	32.6%	-
	総移動コストに 対する水平方向の 移動コストの割合	50.6%	67.4%	-

5.3 多層の床の想定有/無による最適都市形態の比較

5.3 節では、多層の床の想定有無による最適な都市形態の比較検討を行う。

5.3.1 節では 2 次元都市モデルについて、5.3.2 節では 3 次元都市モデルについて比較する。

5.3.1 2次元都市モデルにおける多層の床の想定有/無による比較

5.3.1節では、1次拠点2つと2次拠点1つの2次元都市モデルを対象とし、3.1.2節で求めた都市モデルと、3.2.2節で求めた都市モデルを用いる。

多層の床を想定する場合と想定しない場合では、都市の規模の考え方が異なる。いずれの場合も、都市居住者の単位必要面積は均一であると仮定しておく、都市人口と都市の延床長さは同一視できる。ただし、多層の床を想定しない場合は、垂直方向に床が連続して存在するため、延床長さと都市モデルの図形の面積が同一となる。つまり、多層の床を想定する場合は、人口すなわち延床長さが定数となる都市モデルを算出しているが、多層の床を想定しない場合は、人口すなわち都市モデルの図形の面積が定数となる都市モデルを算出している（図 5.3.1-1）。このため、多層の床の想定有無の都市モデルを比較するにあたり、都市モデルの図形の面積を同一とすることを条件とする。これにより、都市域や高さ、拠点間距離など、都市規模の比較が可能となる。また、移動コストを比較する際には、単位人口当たりの平均移動コストを比較することとする。平均移動コストは、多層の床を想定しない場合は総移動コストを体積で割り算出する。多層の床を想定する場合は総移動コストを床長さで割り算出する。

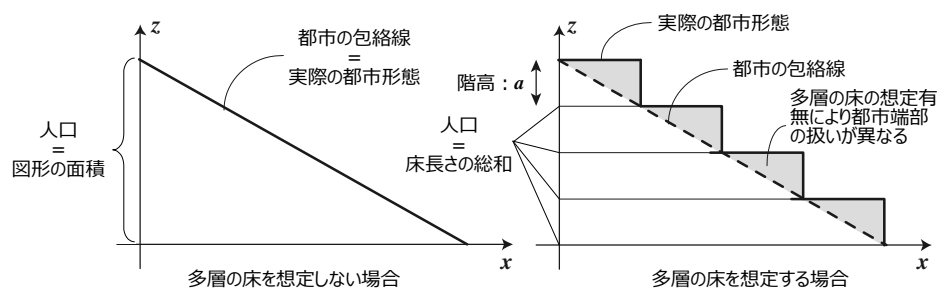


図 5.3.1-1 多層の床の想定有無による都市の規模の考え方

階高は、住宅を想定し 0.00285km とした場合と、オフィスを想定し 0.0035km とした場合の 2 通りを設定する[5-2]。また、床長さは階高有の時の都市モデルにおいて 1.5km、6km、30km とした場合の 3 通りを設定した。ここでは、5.3.2 節にて述べる 3次元都市モデルの x 軸断面とほぼ同じ大きさとなり、かつ、都市の規模による比較がしやすい値を採用した。したがって、階高と床長さの組み合わせにより、体積が 0.004275 km²、0.0171 km²、0.0855 km²、0.00525 km²、

0.021 km²、0.105 km²の合計6通りの条件について比較を行う。

これらの条件のもと、最適な都市形態を算出し、表5.3.1-1に示す。表5.3.1-1には、都市域に対する拠点間距離の割合、都市域に対する1次拠点高さの割合、都市域に対する2次拠点高さの割合を併せて示す。また、拠点間距離、都市域、1次拠点の高さ、2次拠点の高さ、平均移動コストについて、多層の床を想定しない場合に対する多層の床を想定した場合の割合を表5.3.1-2に示す。

表5.3.1-1 2次元都市モデルにおいて最適な都市形態を構成するための要素の値の比較

a. 床長さが1.5kmの場合

体積 (km ²)	0.004275		0.00525	
	無	有	無	有
階高の考慮				
床長さ D (km)	-	1.5	-	1.5
階高 a (km)	-	0.00285	-	0.00350
拠点間距離 d (km)	0.0494	0.0495	0.0547	0.0547
都市域 r (km)	0.1023	0.0999	0.1133	0.1103
1次拠点の高さ(km)	0.0298	0.0283	0.0330	0.0312
2次拠点の高さ(km)	0.0377	0.0363	0.0418	0.0400
平均移動コスト G/D	0.0093	0.0088	0.0103	0.0097
都市域に対する拠点間距離の割合 d/r	48.3%	49.5%	48.3%	49.6%
都市域に対する1次拠点の高さの割合	29.1%	28.4%	29.1%	28.3%
都市域に対する2次拠点の高さの割合	36.9%	36.3%	36.9%	36.3%

b. 床長さが6kmの場合

体積 (km ²)	0.0171		0.021	
	無	有	無	有
階高の考慮				
床長さ D (km)	-	6	-	6
階高 a (km)	-	0.00285	-	0.00350
拠点間距離 d (km)	0.0988	0.0988	0.1094	0.1093
都市域 r (km)	0.2046	0.2020	0.2267	0.2235
1次拠点の高さ(km)	0.0595	0.0581	0.0660	0.0642
2次拠点の高さ(km)	0.0754	0.0740	0.0835	0.0818
平均移動コスト G/D	0.0186	0.0181	0.0206	0.0200
都市域に対する拠点間距離の割合 d/r	48.3%	48.9%	48.3%	48.9%
都市域に対する1次拠点の高さの割合	29.1%	28.8%	29.1%	28.7%
都市域に対する2次拠点の高さの割合	36.9%	36.6%	36.9%	36.6%

c. 床長さが 30km の場合

体積 (km ²)	0.0855		0.105	
	無	有	無	有
階高の考慮				
床長さ D (km)	-	30	-	30
階高 a (km)	-	0.00285	-	0.00350
拠点間距離 d (km)	0.2208	0.2208	0.2447	0.2447
都市域 r (km)	0.4574	0.4549	0.5069	0.5038
1次拠点の高さ(km)	0.1331	0.1317	0.1475	0.1457
2次拠点の高さ(km)	0.1686	0.1671	0.1868	0.1851
平均移動コスト G/D	0.0416	0.0411	0.0461	0.0455
都市域に対する拠点間距離の割合 d/r	48.3%	48.5%	48.3%	48.6%
都市域に対する1次拠点の高さの割合	29.1%	28.9%	29.1%	28.9%
都市域に対する2次拠点の高さの割合	36.9%	36.7%	36.9%	36.7%

表 5.3.1-2 2次元都市モデルにおいて多層の床を想定しない場合に対する多層の床を想定した場合の都市形態の割合

多層の床を想定した際の床長さ D (km)	1.5		6.0		30.0	
階高 a (km)	0.00285	0.0035	0.00285	0.0035	0.00285	0.0035
拠点間距離 d (km)	100.2%	100.0%	100.0%	99.9%	100.0%	100.0%
都市域 r (km)	97.6%	97.3%	98.8%	98.6%	99.5%	99.4%
1次拠点の高さ(km)	95.2%	94.7%	97.6%	97.4%	98.9%	98.8%
2次拠点の高さ(km)	96.3%	95.9%	98.1%	97.9%	99.2%	99.1%
平均移動コスト G/D	94.4%	93.8%	97.2%	96.9%	98.7%	98.6%

拠点間距離については、多層の床の想定有無にかかわらず、ほとんど変化はない。ただし、都市域は、多層の床を考慮した場合の方が、小さくなっている。つまり、多層の床を想定すると、相対的に1次拠点は外側へ移動する。また、階高が大きくなる、あるいは、延べ面積が小さくなるにつれて、これらの現象は顕著になる。バス停の間隔を 300m と仮定する[5-3]と、本モデルと同様の拠点配置となる都市の規模は 6km 程度と考えられる。この場合、都市域が 1%、都市の高さが 2%、平均移動コストが 3%ほど異なる。

5.3.2 3次元都市モデルにおける多層の床の想定有/無による比較

5.3.2節では、1次拠点4つと2次拠点1つの3次元都市モデルを対象とし、4.1.2節で求めた都市モデルと、4.2.2節で求めた都市モデルを用いる。

5.3.1節と同様に、多層の床の想定有無の都市モデルを比較するにあたり、都市モデルの体積を同一とすることを条件とする。また、移動コストを比較する際には、単位人口当たりの平均移動コストを比較することとする。平均移動コストは、多層の床を想定しない場合は総移動コストを体積で割り算出する。多層の床を想定する場合は総移動コストを床面積で割り算出する。

階高は、住宅を想定し0.00285kmとした場合と、オフィスを想定し0.0035kmとした場合の2通りを設定する。また、床面積は、0.1km²、1km²、10km²とした場合の3通りを設定した。つまり、階高と床面積の組み合わせにより、体積が0.000285 km³、0.00285 km³、0.0285 km³、0.00035 km³、0.0035 km³、0.035 km³の合計6通りの条件について比較を行う。

これらの条件のもと、最適な都市形態を算出し、表5.3.2-1に示す。表5.3.2-1には、都市域に対する拠点間距離の割合、都市域に対する1次拠点高さの割合、都市域に対する2次拠点高さの割合を併せて示す。また、拠点間距離、都市域、1次拠点の高さ、2次拠点の高さ、平均移動コストについて、多層の床を想定しない場合に対する多層の床を想定した場合の割合を表5.3.2-2に示す。

表 5.3.2-1 3次元都市モデルにおいて最適な都市形態を構成するための要素の値の比較

a. 床面積が 0.1km² の場合

体積 (km ³)	0.000285		0.000350	
	無	有	無	有
階高の考慮				
床面積 D (km ²)	-	0.1	-	0.1
階高 a (km)	-	0.00285	-	0.00350
拠点間距離 d (km)	0.0424	0.0424	0.0454	0.0453
都市域 r (km)	0.0995	0.0969	0.1065	0.1034
1次拠点の高さ(km)	0.0321	0.0307	0.0344	0.0327
2次拠点の高さ(km)	0.0389	0.0375	0.0417	0.0399
平均移動コスト G/D	0.0108	0.0103	0.0116	0.0109
都市域に対する拠点間距離の割合 d/r	42.6%	43.7%	42.6%	43.8%
都市域に対する1次拠点の高さの割合	32.3%	31.7%	32.3%	31.6%
都市域に対する2次拠点の高さの割合	39.1%	38.7%	39.1%	38.6%

b. 床面積が 1km² の場合

体積 (km ³)	0.00285		0.00350	
	無	有	無	有
階高の考慮				
床面積 D (km ²)	-	1	-	1
階高 a (km)	-	0.00285	-	0.00350
拠点間距離 d (km)	0.0913	0.0913	0.0978	0.0978
都市域 r (km)	0.2143	0.2117	0.2295	0.2263
1次拠点の高さ(km)	0.0692	0.0677	0.0741	0.0723
2次拠点の高さ(km)	0.0838	0.0824	0.0898	0.0880
平均移動コスト G/D	0.0233	0.0228	0.0249	0.0243
都市域に対する拠点間距離の割合 d/r	42.6%	43.1%	42.6%	43.2%
都市域に対する1次拠点の高さの割合	32.3%	32.0%	32.3%	32.0%
都市域に対する2次拠点の高さの割合	39.1%	38.9%	39.1%	38.9%

c. 床面積が 10km² の場合

体積 (km ³)	0.0285		0.0350	
	無	有	無	有
階高の考慮				
床面積 D (km ²)	-	10	-	10
階高 a (km)	-	0.00285	-	0.00350
拠点間距離 d (km)	0.1968	0.1968	0.2107	0.2107
都市域 r (km)	0.4616	0.4591	0.4944	0.4912
1次拠点の高さ(km)	0.1490	0.1476	0.1595	0.1578
2次拠点の高さ(km)	0.1806	0.1792	0.1934	0.1917
平均移動コスト G/D	0.0502	0.0496	0.0537	0.0531
都市域に対する拠点間距離の割合 d/r	42.6%	42.9%	42.6%	42.9%
都市域に対する1次拠点の高さの割合	32.3%	32.1%	32.3%	32.1%
都市域に対する2次拠点の高さの割合	39.1%	39.0%	39.1%	39.0%

表 5.3.2-2 3次元都市モデルにおいて多層の床を想定しない場合に対する多層の床を想定した場合の都市形態の割合

多層の床を想定した 実際の床面積 D (km ²)	0.1		1		10	
	0.00285	0.0035	0.00285	0.0035	0.00285	0.0035
階高 a (km)	0.00285	0.0035	0.00285	0.0035	0.00285	0.0035
拠点間距離 d (km)	100.0%	99.8%	100.0%	99.9%	100.0%	100.0%
都市域 r (km)	97.5%	97.0%	98.8%	98.6%	99.4%	99.4%
1次拠点の高さ(km)	95.6%	95.0%	98.0%	97.7%	99.0%	98.9%
2次拠点の高さ(km)	96.4%	95.9%	98.3%	98.1%	99.2%	99.1%
平均移動コスト G/D	95.2%	94.5%	97.8%	97.4%	99.0%	98.8%

この結果、2次元都市モデルにおける多層の床の想定有/無による比較の結果と同様のことが言える。

拠点間距離については、多層の床の想定有無にかかわらず、ほとんど変化はない。ただし、都市域は、多層の床を考慮した場合の方が、小さくなっている。つまり、多層の床を想定すると、相対的に1次拠点は外側へ移動する。また、階高が大きくなる、あるいは、延べ面積が小さくなるにつれて、これらの現象は顕著になる。大規模な都市を想定する場合、多層の床の想定有無による差異は小さいが、延床面積が10km²程度（後述の多摩市の例を踏まえれば、人口1.5万人程度）の都市においても、都市域、都市の高さ、平均移動コストが1%ほど異なる。また、バス停の間隔を300mと仮定する[5-3]と、本モデルと同様の拠点配置となる都市の規模は1km²程度と考えられる。この場合、都市域、都市の高さ、平均移動コストが2%ほど異なる。

ただし、2次元都市モデルにおける多層の床の想定有無による比較と比べると、3次元都市モデルにおける多層の床の想定有無による差異はやや小さい。これは、5.2でも述べた通り、総移動コストに対する垂直方向の移動コストの割合が、2次元都市モデルに比べて3次元都市モデルの方が小さいためと考えられる。

5.4 単一拠点と複数拠点の都市モデルの比較

5.4 節では、単一拠点と複数拠点の都市モデルを比較する。多層の床を想定した3次元都市モデルを対象とし、4.2.1 節で求めた都市モデルと、4.2.2 節で求めた都市モデルを使用する。

5.2 節と同様に、階高は、住宅を想定し 0.00285km とした場合と、オフィスを想定し 0.0035km とした場合の2通りを設定する。また、床面積は、0.1km²、1km²、10km²とした場合の3通りを設定し、合計6通りの条件について比較を行う。これらの条件のもと、最適な都市形態を算出し、表 5.4-1 に示す。また、単一拠点から構成される最適な都市形態に対する、複数拠点から構成される最適な都市形態の都市域、2次拠点の階数、移動コストの割合を表 5.4-2 に示す。

表 5.4-1 最適な都市形態の比較

a. 床面積が 0.1km² の場合

階高 a (km)	0.00285		0.00350	
拠点の構成	単一拠点	複数拠点	単一拠点	複数拠点
拠点間距離 d (km)	-	0.0424	-	0.0453
都市域 r (km)	0.0887	0.0969	0.0946	0.1034
1次拠点の階数	-	10	-	9
2次拠点の階数	17	13	15	11
移動コスト G	0.0014	0.0010	0.0015	0.0011

b. 床面積が 1km² の場合

階高 a (km)	0.00285		0.00350	
拠点の構成	単一拠点	複数拠点	単一拠点	複数拠点
拠点間距離 d (km)	-	0.0913	-	0.0978
都市域 r (km)	0.1941	0.2117	0.2074	0.2263
1次拠点の階数	-	23	-	20
2次拠点の階数	38	28	33	25
移動コスト G	0.0302	0.0228	0.0323	0.0243

c. 床面積が 10km² の場合

階高 a (km)	0.00285		0.00350	
拠点の構成	単一拠点	複数拠点	単一拠点	複数拠点
拠点間距離 d (km)	-	0.1968	-	0.2107
都市域 r (km)	0.4211	0.4591	0.4505	0.4912
1次拠点の階数	-	51	-	45
2次拠点の階数	83	62	72	54
移動コスト G	0.6566	0.4964	0.7023	0.5308

表 5.4-2 単一拠点都市モデルに対する複数拠点都市モデルの割合

a. 床面積が 0.1km² の場合

階高 a (km)	0.00285	0.00350
都市域 r (km)	109.2%	109.2%
2次拠点の階数	76.5%	73.3%
移動コスト G	74.9%	74.8%

b. 床面積が 1km² の場合

階高 a (km)	0.00285	0.00350
都市域 r (km)	109.1%	109.1%
2次拠点の階数	73.7%	75.8%
移動コスト G	75.4%	75.3%

c. 床面積が 10km² の場合

階高 a (km)	0.00285	0.00350
都市域 r (km)	109.0%	109.0%
2次拠点の階数	74.7%	75.0%
移動コスト G	75.6%	75.6%

表 5.4-2 より、複数拠点から構成される都市モデルにすることにより、単一拠点から構成される都市モデルと比べ、都市域は約 9% 増加する一方、2 次拠点の階数と移動コストは、約 25% 削減できる。このことは、床面積の大きさに関わらず共通して言える。これは、都市を x 軸上の断面で切った場合、拠点の構成方法に関わらず、各拠点に対する最高高さをつなぐ線（都市の包絡線）の傾きは同じためである。同じ面積を前提とする場合、図 5.4-1 の単一拠点モデルにおける色つき部分の面積が複数拠点モデルにおける斜線部分の面積と同じになる必要があるため、表 5.4-2 の結果となる。

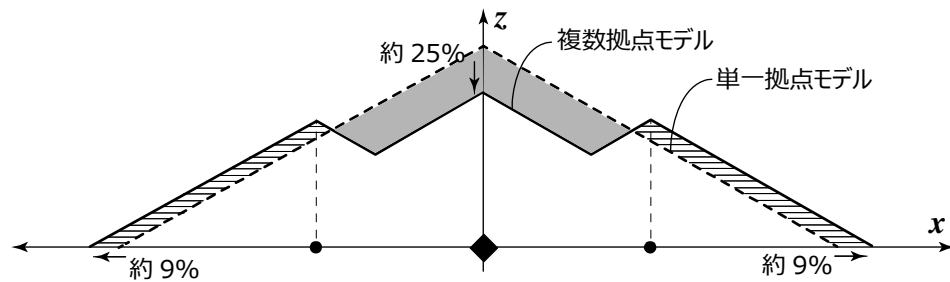


図 5.4-1 単一拠点都市モデルと複数拠点都市モデル

以上より、コンパクトシティ・システムを構成することにより、必要となる1階部分の面積は1割近く増えるものの、都市の最高高さに加え、移動コストも3/4に抑えることができる。このため、移動コストを最小化するという観点からすると、単一拠点ではなく、複数拠点から成るコンパクトシティ・システムとする効果は大きいと言える。

5.5 実際の都市と都市モデルの比較

5.5 節では、実際の都市と都市モデルを比較する。都市モデルは、多層の床を前提とし、4.2.2 節で求めた都市モデルを用いる。実際の都市としては、東京都多摩市を選定した。選定した理由は、緑地などで周囲の都市との間が不連続であり、また多摩ニュータウン開発に伴って中層建築物が多数建設されていることから、2.2 節で示した『都市』に該当すると考えられるためである。

都市モデルにおいては、3次元都市モデルの中に道路を含める必要がある。本研究では、都市における道路面積の割合を延床面積の20%とし、かつ、道路は各階ともに均等に存在するものと仮定する。多摩市の延床面積は7,474,635m²、道路面積は1,868,658.75 m²であるため、これらを合わせた9,343,293.75 m²を延床面積として[5-4]最適な都市形態を算出した結果を表5.5-1に示す。表5.5-1には、体積を合わせた場合の床を考慮しない都市モデルにおける最適な都市形態と、断面として都市域を合わせた多層の床を考慮する場合の2次元都市モデルにおける最適な都市形態も併せて記載する。さらに、多層の床を想定する場合については、容積率も併せて記載する。ただしここでは、都市モデルを1つの巨大な建築物のようにみなしているため、本来容積率の計算に含まれていない道路面積も含めて算出した値となっている。

表 5.5-1 多摩市と床面積を合わせた場合の最適な都市形態

	多層の床を 考慮しない場合	多層の床を 考慮する場合	2次元都市モデル
階高 (km)	-	0.00285	0.00285
延床面積 (km ²)	-	9.3433	29.2063
拠点間距離 (km)	0.1923	0.1924	0.2179
都市域 (km)	0.4512	0.4488	0.4488
1次拠点の高さ (km)	0.1457	0.1442	0.1299
2次拠点の高さ (km)	0.1765	0.1751	0.1649
総移動コスト	0.0490	0.4533	1.1841
容積率(%)	-	2319.6%	3254.0%

この結果、都市間距離は192.4m、都市域すなわち都市全域の半分の幅の値は448.8mとなり、最高高さは175.1m、1次拠点の高さは144.2mとなった。つまり、中心部から水平方向に200m以上にわたり、高さ100m以上の建物が続く

都市が最適となった。平均使用容積率が1,421%、最も高いブロックでも2,089%であるニューヨーク（マンハッタン）のミッドタウン地区[5-5]以上に高密度な都市が最適な都市となった。

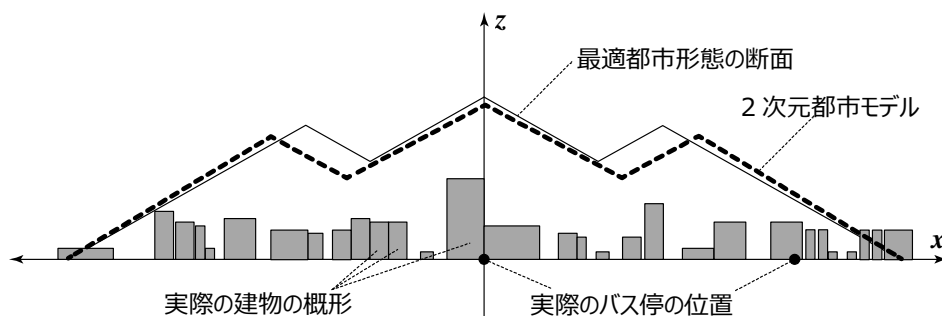


図 5.5-1 現実の都市と2次元・3次元都市モデルの比較

図 5.5-1 に、都市域を合わせた2次元都市モデルと3次元都市モデルの最適な都市形態と、多摩市の聖蹟桜ヶ丘駅を中心に川崎街道沿いに断面を捉えた図を重ねた。この図から、次の3点が言える。第1に、実際の都市は都市モデルと比べて建物高さが低い。多摩市には最適都市モデルの最高高さである175mを超す住居用高層建築物は1棟も存在しない。この高さを超す住居用の高層建築物は、日本でも数えるほどしか存在しない。第2に、都市モデルと比べて実際の都市は空地が多く、密度が低い。最適都市モデルの最高高さである175mとほぼ同じ高さを持つ建築物としては、例えば東京都江東区のプラウドタワー東雲キャナルコートがある。この建物の周囲50mには高層ビルは存在しない。つまり、モデルから算出された最適な都市形態は、現実の都市に比べて水平方向への広がり著しく小さく、高層建築物が続く都市となっており、実際の都市形態とは大きく異なる。第3に、都市モデルの拠点間距離よりも、実際のバス停1区間の方が長い。このように、算出した都市モデルと現実の都市形態が大きく異なる原因として、以下に述べる2つが挙げられる。

1つ目は、都市モデルで設定した垂直方向の移動コストの値である。この論文は、高層建築物の建設費、エレベータの設置費、エレベータの運用に係わる電気代等の諸費用、利用者の待ち時間をコストに含めていない。このため、垂直方向への移動には、設定したコストよりも実際には多大なコストがかかると

想定される。そこで、垂直方向の移動コストを変化させた場合のモデルの数理的挙動を明らかにするため、非現実的ではあるが極端に大きな値として、約10倍まで大きくした場合の最適な都市形態について、前述の5.1.2節の算出結果を確認する。この結果、最適な都市形態はやや水平方向に展開されるものの、縦横比は大きく変化しないことが表5.1.2-3よりわかる。垂直方向の移動コストを徒歩の移動コストの約10倍である2と仮定した場合、表5.1.2-3より、都市の最高高さ H は57.3m、都市域 r は796.2mとなる。都市域 r は都市全域の半分の幅の値であるため、両側すなわち都市全域を見ると、高さが水平方向の広がり約3.6%となる。あるいは、バスの移動コストを徒歩の約1/10である0.02と仮定すると、表5.1.2-4より、都市の最高高さは155.2m、都市域 r は499.4mとなり、高さが水平方向の広がり約15.5%となる。現実には、東京都多摩市付近を通る京王相模原線の京王永山駅と京王多摩センター駅の駅間距離は約2.3kmである。都市モデルと同様に、都市域は拠点間距離の約2.3倍と仮定すると、都市域 r は5.29kmと仮定できる。最高高さを175.1mとしたとしても、高さが水平方向の広がり約1.7%である。以上の計算結果は、垂直方向の移動コストを大きく見積もっても、あるいは水平方向の移動コストを小さく見積もっても、現実の都市形態に比べると、水平方向の広がり小さいことを意味する。また、図5.1.2-4 aは、垂直方向の移動コストを増加させると建物高さは単調に減少するものの、その効果は逡減することを示している。さらに図5.1.2-5 aからは、バスのコストを著しく減少させても、建物高さの減少には下限があることが予想される。このことは、現実の都市形態が、たとえば垂直方向の建設コストが非線形的に増加するなどの要因によって制約されていることを示唆している。

2つ目は、法例に基づく建築物の形態の規制である。多摩市では、都市計画に基づき建築物の高さの最高限度が指定されており[5-6]、高さ100m以上の住居を連続して建築することはできない。このほかにも、容積率や斜線規制、日影規制など、本モデルで想定している移動コスト以外の制約により、建築物の形態は規制される。このため現実の都市では、本モデルが示す移動コストを最小化する都市形態を建設することは不可能である。

5.6 仮想的な都市と都市モデルの比較

本研究で示された最適な都市形態と同様の形態を持つ都市は、「ハイパービルディング」や「アーコロジー」というキーワードで、建築家や企業により提案されてきた。たとえば、東京バベルタワーと、4.2.2節にて算出した都市モデルを重ねると、図5.6-1のようになる。重ねる時の条件として、都市モデルの1階部分の床面積が、東京バベルタワーの基底面積と同じ 110km^2 となるようにした。また、東京バベルタワーの基底面は円形と仮定した。前述の通り、この論文の都市モデルは、コンパクトシティ・システムの『地区』、『都市』の機能を満たす部分であり、これは東京バベルタワーの下層部（住居・商業・オフィス・ホテル施設部分）に該当する。この部分においては両者の概形が似ている。この論文の結果から、総移動コストの最小化という観点から見ても、これらの提案は合理的な都市形態に近い可能性があると言える。

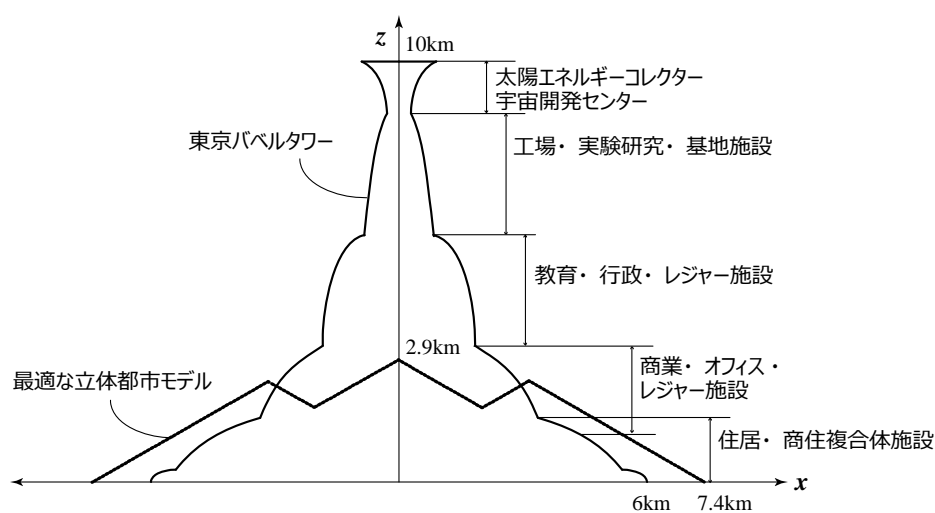


図5.6-1 東京バベルタワーと3次元都市モデルの比較

一方で、東京バベルタワーの最高部まで考慮すると、この論文で算出した最適な都市形態に比べて高層である。その他の超々高層建築物についても、例えば「Mile High Illinois」は、延床面積が約 1.7km^2 に対し、高さが約 1.6km であること、「エアロポリス 2001」は、人口等の面積が約 1.7km^2 に対し、高さが約 2km であること、「スカイシティ1000」[5-7]は、床面積が約 8km^2 に対し、高さが約 1km であることから、表5.1.2-1の値と比べても、この論文で算出し

た最適な都市形態に比べて高層である。その原因として、これらの提案の都市は、垂直方向に対しても、都市機能やある程度の階数ごとにクラスタリングされていることが考えられる。この論文の都市モデルも、水平方向に拠点を設けたのと同様に、垂直方向に拠点を設けたり、下層階には停止しないエレベータなどを前提としたりすることで、さらに高層化した都市モデルとなる可能性がある。

ただし、これらの仮想的な都市はいずれも実現していない。このことから、現実の都市形態の決定には、先に述べた法規制や高層建築物の建設および運営のコストなど、本研究が想定した移動コスト以外の観点が大きな影響を及ぼしていると推測される。この点はコンパクトシティを議論する際に注意すべきである。

5.7 比較・考察のまとめ

5.1 節より、2次元都市モデル、3次元都市モデル共に、人口すなわち延床面積を与えれば、総移動コストを最小化する都市形態が一意に定まり、延床面積や階高を変化させた場合、最適な都市形態は相似形を保ちながら変化することが明らかとなった。また、垂直方向の移動コストやバスの移動コストを変化させた場合も、高精度で回帰式を適合させることができた。これにより、式 5.1.1-1 や式 5.1.2-1 を用いることで、任意の規模の都市において最適な拠点間距離と最高高さを求めることができる。

5.2 節より、2次元都市モデルについても3次元都市モデルについても、最適都市モデルを表す関数の性質としては同じであると言える。しかし、3次元都市モデルでは水平方向の移動軸が1つ増えたため、2次元都市モデルに比べて最高高さは約6%高く、拠点間距離は約12%短くなっている。つまり、都市を2次元すなわち断面で捉えた場合と、3次元として捉えた場合では、最適都市モデルが異なると言える。

5.3 節より、2次元都市モデル・3次元都市モデル共に、多層の床を想定すると都市域が広がり、相対的に1次拠点は外側へ移動することが明らかとなった。この現象は、都市の高さが低くなる、階高が大きくなる、あるいは延べ面積が小さくなるにつれて顕著になる。3次元都市モデルの場合、多層の床の想定有無により、延床面積が10km²の都市では約1%、1km²の都市では約2%、都市域、都市の高さ、平均移動コストが異なる。このため、多層の床を想定することにより、より正確な都市モデルを求めることができる。また、2次元都市モデルにおける多層の床の想定有/無による比較と比べると、3次元都市モデルにおける多層の床の想定有無の差はやや小さい。これは、総移動コストに対する垂直方向の移動コストの割合が、2次元都市モデルに比べて3次元都市モデルの方が小さいためと考えられる。

5.4 節より、複数拠点から構成される都市モデルにすることにより、単一拠点から構成される都市モデルと比べ、都市域は増加するが、2次拠点数の階数と移動コストは3/4に抑えられることが明らかとなった。したがって、移動コストを最小化するという観点からすると、複数拠点から成るコンパクトシティ・システムとする効果は大きいと言える。

5.5 節より、算出した都市モデルと実際の都市では都市形態が大きく異なることが明らかとなった。この原因としては、本研究では考慮していないコストや、法規制などコストとは無関係の外的要因が挙げられる。これらを都市モデルに反映させることは、今後の課題である。

5.6 節より、算出した都市モデルと仮想的な都市モデルには類似点もあると言える。一方で、仮想的な都市モデルは算出した都市モデルよりもさらに高層であり、垂直方向における階層化も考慮されていると考えられる。ただし、これらの仮想的な都市はいずれも実現しておらず、本研究で考慮しているコスト以外の観点から、都市形態に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

参考文献（5章）

[5-1] 近藤起弘、吉川徹：階層的な空間構造を持つ線状都市における階高を考慮した最適都市形態－階高を考慮しない場合と比較して－、日本建築学会計画系論文集、733、pp.677-687、2017.3

[5-2] 「建築構造設計指針（平成21年版）」について、
http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/__icsFiles/afieldfile/2014/10/14/1293759_003.pdf, 参照 2017.1.22

[5-3] 鈴木勉：通勤バス路線上の停留所の最適配置、日本都市計画学会学術研究論文集、pp.247～252、1987.10

[5-4] 統計たま_平成26年版：<http://www.city.tama.lg.jp/zaisei/kokuzei/021531.html>,
参照 2017.1.22

[5-5] 森ビル都市再生プロジェクトチーム：都市のチカラ－超高層化が生活を豊かにする、幻冬舎、2003

[5-6] 建築物の高さの最高限度（絶対高さ制限）の指定：
<https://www.city.tama.lg.jp/plan/948/018998.html>, 参照 2017.1.22

[5-7] グループ V1000：縦型都市構想－自然との共存をめざす近未来立体都市、海文堂出版、1989年6月

第6章 総括

6章では、各章の要約と、最適都市モデルの評価、研究の展望について述べる。

6.1節には、これまで述べてきた3章から5章の内容をまとめて示す。

6.2節では、5章の内容を踏まえ、3章と4章で算出した都市モデルの評価を行う。

6.3節では、6.2節の内容を踏まえ、今後の研究の展望を示す。

6.1 各章の要約

以下に、各章の内容を要約する。

第1章では、本研究の背景と、関連する既往研究、研究の目的、論文の構成について述べた。

第2章では、本研究で用いるコンパクトシティの概念、都市モデルの概念を明確にし、都市モデルを定義した。

第3章では2次元都市モデルについて、1次拠点1つの場合と、1次拠点2つと2次拠点1つの場合の都市モデルを想定し、それぞれについて多層の床を想定する場合としない場合の最適な都市形態を算出した。

第4章では、3次元都市モデルについて、1次拠点1つの場合と、1次拠点4つと2次拠点1つの場合の都市モデルを想定し、それぞれについて多層の床を想定する場合としない場合の最適な都市形態を算出した。

第5章では、3章・4章で算出した都市モデルの分析・評価を行った。

5.1節より、2次元都市モデル、3次元都市モデル共に、人口すなわち延床面積を与えれば、総移動コストを最小化する都市形態が一意に定まり、延床面積や階高を変化させた場合、最適な都市形態は相似形を保ちながら変化することが明らかとなった。また、垂直方向の移動コストやバスの移動コストを変化させた場合も、高精度で回帰式を適合させることができた。これにより、式5.1.1-1や式5.1.2-1を用いることで、任意の規模の都市において最適な拠点間距離と最高高さを求めることができる。

5.2節より、2次元都市モデルについても3次元都市モデルについても、最適都市モデルを表す関数の性質としては同じであると言える。しかし、3次元都市モデルでは水平方向の移動軸が1つ増えたため、2次元都市モデルに比べて最高高さは約6%高く、拠点間距離は約12%短くなっている。つまり、都市を2次元すなわち断面で捉えた場合と、3次元として捉えた場合では、最適都市モデルが異なると言える。

5.3節より、2次元都市モデル・3次元都市モデル共に、多層の床を想定すると都市域が広がり、相対的に1次拠点は外側へ移動することが明らかとなった。この現象は、都市の高さが低くなる、階高が大きくなる、あるいは延べ面積が小さくなるにつれて顕著になる。3次元都市モデルの場合、多層の床の想定有

無により、延床面積が 10km^2 の都市では約 1%、 1km^2 の都市では約 2%、都市域、都市の高さ、平均移動コストが異なる。このため、多層の床を想定することにより、より正確な都市モデルを求めることができる。また、2次元都市モデルにおける多層の床の想定有/無による比較と比べると、3次元都市モデルにおける多層の床の想定有無の差はやや小さい。これは、総移動コストに対する垂直方向の移動コストの割合が、2次元都市モデルに比べて3次元都市モデルの方が小さいためと考えられる。

5.4節より、複数拠点から構成される都市モデルにすることにより、単一拠点から構成される都市モデルと比べ、都市域は増加するが、2次拠点の階数と移動コストは3/4に抑えられることが明らかとなった。したがって、移動コストを最小化するという観点からすると、複数拠点から成るコンパクトシティ・システムとする効果は大きいと言える。このことは、「国土のグランドデザイン2050」で述べられている、集約化（コンパクト化）と、複数の地域間の連携により、ハードの観点からは、各種サービスを効率的に提供するための都市形態となることを示唆している。

5.5節より、算出した都市モデルと実際の都市では都市形態が大きく異なることが明らかとなった。この原因としては、本研究では考慮していないコストや、法規制などコストとは無関係の外的要因が挙げられる。これらを都市モデルに反映させることは、今後の課題である。

5.6節より、東京バベルタワーの下層部と、本論文で算出した都市モデルの概形が似ていると言える。しかし、上層部を含めると、東京バベルタワーは都市モデルに比べて高層である。この原因として、都市機能が垂直方向においてもクラスタリングされていることが考えられる。しかし、この都市は実現していないことから、現実の都市形態の決定には、先に述べた法規制や高層建築物の建設および運営のコストなど、本研究が想定した移動コスト以外の観点が大きな影響を及ぼしていると推測される。

6.2 都市モデルの評価

本研究では、移動コストの最小化という観点からコンパクトシティを形成するための最適都市モデルを定式化した。また、都市形態を決定するパラメータの値を変化させ考察を行うことで、都市モデルに対する諸要因の変化の影響を把握した。さらに、都市モデルと現実の都市形態や仮想的な都市形態を比較し、差異を明らかにした。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

第1に、各都市モデルについて、拠点間距離 d と最高高さ H の関係を簡単な回帰式で表し、最適都市形態の挙動を明らかにした。都市形態を決定するパラメータの値を変化させると、最適な都市形態は、延床面積を変化させた場合には相似形を保ちながら変化するが、垂直方向の移動コストを変化させた場合や、バスの移動コストを変化させた場合には相似形を保たなかった。また、最適な都市形態は現実の都市形態に比べると水平方向の広がりが著しく小さかった。つまり、超高層建築物が都市の中心部に集中した都市が移動コストから求めた場合の最適な都市形態であることが示された。これらの結果は、2次元都市モデル、3次元都市モデル、床を想定する場合、床を想定しない場合共に、共通の結果であった。

第2に、3次元都市モデルを用いることの意義を示した。都市域を合わせた場合、3次元都市モデルは2次元都市モデルに比べ、1次拠点がやや中心により、階高が高くなる。つまり、都市を2次元すなわち断面で捉えた場合と、3次元として捉えた場合では、最適な都市形態がやや異なるため、3次元都市モデルを用いる必要がある。

第3に、多層の床を想定した都市モデルを用いることの意義を示した。多層の床を想定することで、通常は規模が床面積で把握される現実の都市との比較が容易になる。また、多層の床を想定する都市モデルとしない都市モデルでは最適な都市形態がやや異なる。この傾向は都市規模が小さいほど顕著であり、多層の床を想定したモデルを用いることによってより実態に近い平均移動コストを得ることができる。

第4に、複数拠点から成るコンパクトシティ・システムを形成する都市モデルとすることの効果を示した。複数拠点から構成される都市モデルにすることにより、単一拠点から構成される都市モデルと比べ、都市域は増加するが、2

次拠点の階数と移動コストは3/4に抑えられる。

以上のことから、サービスが成立するための圏域人口をパラメータとして設定し、多層の床を想定する3次元都市モデルを用いることで、中心部へのアクセスビリティを最大化する都市形態を決定することができる。また、この都市形態は、「国土のグランドデザイン2050」で述べられている、集約化（コンパクト化）と、複数の地域間の連携を実現するための、最適な都市形態となっている。

6.3 研究の展望

コンパクトシティを形成するための最適都市モデルについて今後の研究の展望を以下にまとめる。

1つ目に、より現実に近いコストの採用がある。これには、3つの観点がある。第1に、本研究が想定した移動コスト以外の観点をモデルに組み込むことである。たとえば、エレベータの待ち時間、拠点の整備・運営コスト、エレベータの設置・運用コストを考慮し、都市モデルを算出すると、より高精度なコンパクトシティ・システムの評価が可能となると期待できる。第二に、本研究では固定とした徒歩による移動コストを変化させることである。徒歩移動の負荷は移動距離の増加とともに加速度的に増えること[6-1]を考慮すると、より現実に近い都市モデルとなる可能性がある。また、徒歩移動の負荷を自動車移動による移動負荷と捉え、例えばパーク&ライドを想定した最適都市モデルを算出することも可能になる。第三に、縦方向のコストの移動コストに対する制約である。横方向の移動負荷は自動車・鉄道・飛行機などの発達により大幅に改善されてきたが、縦方向への移動はエスカレーター・エレベーターが導入されて以降、昇降速度の改善にとどまり大幅な改善は見られない。つまり、横方向に対して縦方向の移動負荷を改善することは困難であり、移動負荷に対する社会的な捉え方も異なる。そこで、縦方向のコストを非線形に増加していく関数として与えることや、最高高さに制限を設けることで、より現実に近い都市モデルのとなることが期待できる。

2つ目に、水平方向の広がりによる新たな1次拠点の発生と最適な都市形態の変化についての検討がある。本研究においては、都市形態は床面積に比例し相似な図形となる。しかし、水平方向の移動を徒歩で行う距離には限界があり、1つの1次拠点がカバーできる領域は限られる。そのため、床面積を大きくした場合には、新たな1次拠点を設定する必要があると考えられる。本研究では、探索的な試みとして、計算上最も簡単なモデルとして、2次拠点から見た同一水平方向線上に1次拠点が1つしかない場合を求めた。このため、都市規模が現実の都市に比べて著しく小さくなっている。さらに現実の都市では、2次拠点から離れるに従って拠点間距離が短くなり、最高高さも小さくなっていく1次拠点が数珠つなぎに配置されることが観察できる。したがって、単一の都市

域だけでなく、都市域同士のつながりについても考慮した最適都市モデルを作成することで、大規模な都市にも適合する都市モデルとなる。また、実際の都市では超高層建築物の間に空隙が設けられていることと、栗田[6-2]が垂直方向に連続な人口分布を想定して二棟の建物をつなぐ連絡通路の最適配置を求めていることを踏まえた、空隙を考慮した都市モデルの開発も課題である。

3つ目に、本研究の応用として、最適なパラメータの検討がある。本研究では、パラメータから最適な都市形態を算出したが、都市形態から最適なパラメータを逆算することもできる。これにより、既存の都市における各軸方向のコストの評価が可能となる。また、既存の都市形態を変化させないことを前提とし、最適な移動負荷となるような都市機能の指標を示す事も可能である。

本研究では、都市機能を集中させ移動コストを最小化することに主眼を置いたが、一方で、近年では都市構造を変えず新たな仕組みを導入することによりサービスを維持する方法も、コンパクトの考え方として検討されている。例えば、店舗ではなくインターネットでの売買や、自動運転技術を前提にすると、ある程度低密度な土地利用の方が、混雑を回避でき、コストが抑えられる可能性もある。このように、物理的なコンパクトを目指すのではなく、様々な観点からコンパクトの要素を捉え、モデルに組み込むことも、今後の課題である。

参考文献 (6章)

- [6-1] Le Phong Nguyen : 徒歩抵抗と公共交通機関を考慮した歩行者の都市内アクセスビリティの評価手法、首都大学東京 学位論文、2017.9
- [6-2] 栗田治 : 都市モデル読本、共立出版、pp.63-80、2004

Appendix

補足

(補足 1)

ダンツィックとサアティの著書「コンパクト・シティ」では、居住者の活動時間をずらすことで都市活動の効率化を図ることや、環境問題を踏まえ、都市の持続可能性を実現することも提案された。

(補足 2)

$$\begin{aligned}
 Q(x) &= c_{h1} \cdot h(x)|x| + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x) - c_{h1} \cdot H(x) \cdot |x| - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x) \\
 &= c_{h1} \cdot (\varepsilon \cdot \eta(x) + H(x))|x| + \frac{c_d}{2} \cdot (\varepsilon \cdot \eta(x) + H(x))^2 \\
 &\quad - c_{h1} \cdot H(x) \cdot |x| - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x) \\
 &= c_{h1} \varepsilon \cdot \eta(x)|x| + c_{h1} H(x)|x| + \frac{c_d}{2} \varepsilon^2 \cdot \eta^2(x) + c_d \varepsilon \cdot \eta(x) \cdot H(x) \\
 &\quad + \frac{c_d}{2} H^2(x) - c_{h1} \cdot H(x) \cdot |x| - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x) \\
 &= \frac{c_d}{2} \varepsilon^2 \cdot \eta^2(x) + \{c_{h1}|x| + c_d \cdot H(x)\} \varepsilon \cdot \eta(x)
 \end{aligned}$$

(補足 3)

$$\begin{aligned}
 \int_{-r}^r H(x) dx &= \int_{-r}^0 \left(\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dx + \int_0^r \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dx \\
 &= -\frac{1}{2} \frac{c_{h1}}{c_d} r^2 + \frac{c_{h1}}{c_d} r^2 - \frac{1}{2} \frac{c_{h1}}{c_d} r^2 + \frac{c_{h1}}{c_d} r^2 \\
 &= \frac{c_{h1}}{c_d} r^2
 \end{aligned}$$

(補足 4)

$c_{h1}|x| \geq c_{h1}|x - (-d)| + c_{h2} \cdot d$ を満たす x の範囲を求める。

$0 \leq x$ の場合、 $x - (-d) = x + d \geq 0$ であるため、絶対値を外すと、

$$c_{h1} \cdot x \geq c_{h1} \cdot (x + d) + c_{h2} \cdot d$$

つまり、

$$0 \geq c_{h1} \cdot d + c_{h2} \cdot d$$

となり、成立しない。

$x < 0$ の場合、かつ、 $0 \leq x - (-d)$ の場合、つまり、 $-d \leq x < 0$ の場合、絶対値を外すと、

$$-c_{h1} \cdot x \geq c_{h1} \cdot (x + d) + c_{h2} \cdot d$$

つまり、

$$-2 \cdot c_{h1} \cdot x \geq c_{h1} \cdot d + c_{h2} \cdot d$$

$$x \leq -\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$$

となるため、 $-d \leq x \leq -\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ の範囲で $c_{h1}|x| \geq c_{h1}|x - (-d)| + c_{h2} \cdot d$ が成

立する。

$x < 0$ の場合、かつ、 $0 > x - (-d)$ の場合、つまり、 $x < -d$ の場合、絶対値を外すと、

$$-c_{h1} \cdot x \geq -c_{h1} \cdot (x + d) + c_{h2} \cdot d$$

つまり、

$$0 \geq -c_{h1} \cdot d + c_{h2} \cdot d$$

となる。ここで、徒歩の移動コスト c_{h1} の方がバスの移動コスト c_{h2} よりも大きいことを想定しているため、 $c_{h1}|x| \geq c_{h1}|x - (-d)| + c_{h2} \cdot d$ は常に成立する。

以上より、 $c_{h1}|x| \geq c_{h1}|x - (-d)| + c_{h2} \cdot d$ を満たす x の範囲は、 $x \leq -\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$

となる。

(補足 5)

$x < -\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$ のとき、以下の通り。

$$\begin{aligned}
Q(x) &= \{c_{h1} \cdot |x - (-d)| + c_{h2} \cdot d\} \cdot h(x) + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot h^2(x) \\
&\quad - \{c_{h1} \cdot |x - (-d)| + c_{h2} \cdot d\} \cdot H(x) - \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot H^2(x) \\
&= \{c_{h1} \cdot |x - (-d)| + c_{h2} \cdot d\} \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x) + H(x)\} + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x) + H(x)\}^2 \\
&\quad - \{c_{h1} \cdot |x - (-d)| + c_{h2} \cdot d\} \cdot H(x) - \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot H^2(x) \\
&= \{c_{h1} \cdot |x - (-d)| + c_{h2} \cdot d\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x) + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \varepsilon^2 \cdot \eta^2(x) + c_d \cdot \varepsilon \cdot \eta(x) \cdot H(x) \\
&= \{c_{h1} \cdot |x - (-d)| + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot H(x)\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x)
\end{aligned}$$

$-\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x < \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)$ のとき、以下の通り。

$$\begin{aligned}
Q(x) &= c_{h1} \cdot |x| \cdot h(x) + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot h^2(x) - c_{h1} \cdot |x| \cdot H(x) - \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot H^2(x) \\
&= c_{h1} \cdot |x| \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x) + H(x)\} + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x) + H(x)\}^2 \\
&\quad - c_{h1} \cdot |x| \cdot H(x) - \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot H^2(x) \\
&= c_{h1} \cdot |x| \cdot \varepsilon \cdot \eta(x) + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \varepsilon^2 \cdot \eta^2(x) + c_d \cdot \varepsilon \cdot \eta(x) \cdot H(x) \\
&= \{c_{h1} \cdot |x| + c_d \cdot H(x)\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x)
\end{aligned}$$

$\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x$ のとき、以下の通り。

$$\begin{aligned}
Q(x) &= \{c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h2} \cdot d\} \cdot h(x) + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot h^2(x) \\
&\quad - \{c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h2} \cdot d\} \cdot H(x) - \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot H^2(x) \\
&= \{c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h2} \cdot d\} \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x) + H(x)\} + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x) + H(x)\}^2 \\
&\quad - \{c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h2} \cdot d\} \cdot H(x) - \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot H^2(x) \\
&= \{c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h2} \cdot d\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x) + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \varepsilon^2 \cdot \eta^2(x) + c_d \cdot \varepsilon \cdot \eta(x) \cdot H(x) \\
&= \{c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h2} \cdot d + c_d \cdot H(x)\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x)
\end{aligned}$$

(補足 6)

都市域は式 3.1.2-6 の通りであり、 $x \leq -r$ 、 $r \leq x$ の場合は人口が 0、すなわち、階高も 0 となるため、以下の条件が成立する。

$$H_1(-r)=0 \quad , \quad H_6(r)=0$$

また、都市形態は任意の地点において連続であるため、以下の条件が成立する。

$$H_1(-d)=H_2(-d) \quad , \quad H_5(d)=H_6(d) \quad ,$$

$$H_2\left(-\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right)=H_3\left(-\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) \quad ,$$

$$H_4\left(\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right)=H_5\left(\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right)$$

$$H_3(0)=H_4(0)$$

これを解くと、以下の通りとなる。

まず、

$$H_1(-r)=\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (-r) + C_1 = 0 \quad , \quad H_6(r)=-\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r + C_6 = 0$$

より、

$$C_1 = C_6 = \frac{c_{h1}}{c_d} r$$

が成立する。また、

$$H_1(-d)=\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (-d) + C_1 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (-d) + \frac{c_{h1}}{c_d} r \quad , \quad H_2(r)=-\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (-d) + C_2$$

となるため、

$$H_1(-d)=H_2(-d)$$

より、

$$C_2 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d)$$

が成立する。さらに、

$$H_2\left(-\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right)=-\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left(-\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) + C_2$$

$$= -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left(-\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d)$$

$$H_3 \left(-\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left(-\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) + C_3$$

となるため、

$$H_2 \left(-\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) = H_3 \left(-\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \quad ,$$

より、

$$C_3 = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left(-d \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d) = d \cdot \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d} \right) + \frac{c_{h1}}{c_d} (r - 2 \cdot d)$$

が成立する。C₄については、

$$H_3(0) = H_4(0)$$

より、

$$C_3 = C_4$$

が成立する。C₅については、

$$H_5(d) = H_6(d)$$

より、この時の条件はH₁(-d)=H₂(-d)の時と同様になるため、

$$C_5 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d)$$

が成立する。

(補足 7)

$$\begin{aligned}
\int_{-r}^r H(x)dx &= \int_{-r}^{-d} H_1(x)dx + \int_{-d}^{-\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} H_2(x)dx + \int_{-\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^0 H_3(x)dx \\
&\quad + \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} H_4(x)dx + \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d H_5(x)dx + \int_d^r H_6(x)dx \\
&= \int_{-r}^{-d} \left(\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r \right) dx + \int_{-d}^{-\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r-2 \cdot d) \right) dx \\
&\quad + \int_{-\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^0 \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + d \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d} \right) + \frac{c_{h1}}{c_d} (r-2 \cdot d) \right\} dx \\
&\quad + \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \left\{ -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + d \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d} \right) + \frac{c_{h1}}{c_d} (r-2 \cdot d) \right\} dx \\
&\quad + \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r-2 \cdot d) \right\} dx + \int_d^r \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r \right) dx \\
&= 1
\end{aligned}$$

ここで、各積分の値は以下の通りとなる。

$$\int_{-r}^{-d} \left(\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r \right) dx = \frac{c_{h1}}{2c_d} (r^2 - 2dr + d^2)$$

$$\begin{aligned}
&\int_{-d}^{-\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r-2 \cdot d) \right) dx \\
&= -\frac{c_{h2}}{8c_{h1}c_d} d^2 + \frac{c_{h2}}{4c_d} (2dr - 3d^2) + \frac{c_{h1}}{8c_d} (5d^2 - 4dr)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\int_{-\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^0 \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + d \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d} \right) + \frac{c_{h1}}{c_d} (r-2 \cdot d) \right\} dx \\
&= \frac{3c_{h2}}{8c_{h1}c_d} d^2 + \frac{c_{h2}}{4c_d} (2dr - d^2) + \frac{c_{h1}}{8c_d} (4dr - 5d^2)
\end{aligned}$$

$$\int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \left\{ -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + d \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d} \right) + \frac{c_{h1}}{c_d} (r-2 \cdot d) \right\} dx$$

$$= \frac{3c_{h2}^2}{8c_{h1}c_d}d^2 + \frac{c_{h2}}{4c_d}(2dr - d^2) + \frac{c_{h1}}{8c_d}(4dr - 5d^2)$$

$$\int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d) \right\} dx$$

$$= -\frac{c_{h2}^2}{8c_{h1}c_d}d^2 + \frac{c_{h2}}{4c_d}(2dr - 3d^2) + \frac{c_{h1}}{8c_d}(5d^2 - 4dr)$$

$$\int_d^r \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r \right) dx = \frac{c_{h1}}{2c_d}(r^2 - 2dr + d^2)$$

従って、以下が成り立つ。

$$\int_{-r}^r H(x) dx = \frac{c_{h1}}{c_d} \left\{ d^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c_{h2}^2}{c_{h1}^2} + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} - \frac{3}{2} \right) + r^2 \right\} = 1$$

(補足 8)

総移動コストは、以下の3種類の移動からなる。①徒歩による水平方向の移動、②垂直方向の移動、③バスによる水平方向の移動。それぞれにおける移動コストは、以下の通り。ただし、対称性を考慮し、 $0 \leq x$ の場合についてのみ計算する。

① 徒歩による水平方向の移動

$$\begin{aligned}
& c_{h1} \left[\int_0^\alpha x \cdot \left\{ -\frac{c_{h1}}{c_d} x + d \left(\frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{c_{h2}}{c_d} \right) + \frac{c_{h1}}{c_d} (r - 2d) \right\} dx \right. \\
& \quad + \int_\alpha^d (d - x) \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} (r - 2d) \right\} dx \\
& \quad \left. + \int_d^r (x - d) \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dx \right] \\
&= c_{h1} \left[-\frac{2c_{h1}\alpha^3 + 3\{(d-r)c_{h1} - dc_{h2}\} \cdot \alpha^2}{6c_d} \right. \\
& \quad + \frac{2c_{h1}\alpha^3 + (3r-9d) \cdot c_{h1}\alpha^2 + (12d^2 - 6dr) \cdot c_{h1}\alpha + (3d^2r - 5d^3) \cdot c_{h1}}{6c_d} \\
& \quad \left. + \frac{(r^3 - 3dr^2 + 3d^2r - d^3) \cdot c_{h1}}{6c_d} \right] \\
&= \frac{c_{h1}}{6c_d} \left[\{3dc_{h2} + (6r - 12d) \cdot c_{h1}\} \cdot \alpha^2 \right. \\
& \quad \left. + (12d^2 - 6dr) \cdot c_{h1}\alpha + (r^3 - 3dr^2 + 6d^2r - 6d^3) \cdot c_{h1} \right]
\end{aligned}$$

② 垂直方向の移動

$$\begin{aligned}
& c_d \left[\int_0^{\frac{c_{h1}\alpha + c_{h1}(r-2d)}{c_d}} y \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} y + r \right) dy \right. \\
& \quad + \int_{\frac{c_{h1}\alpha + c_{h1}(r-2d)}{c_d}}^{\frac{d}{c_d} \left(\frac{c_{h1} + c_{h2}}{c_d} \right) + \frac{c_{h1}(r-2d)}{c_d}} y \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} y + d \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2d \right\} dy \\
& \quad \left. + \int_{\frac{c_{h1}\alpha + c_{h1}(r-2d)}{c_d}}^{\frac{c_{h1}d + c_{h1}r}{c_d}} y \cdot \left[\left(-\frac{c_d}{c_{h1}} y + r \right) - \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} y - (r - 2d) \right\} \right] dy \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= c_d \left[- \left\{ \frac{2c_{h1}^2 \alpha^3 + (3r - 12d) \cdot c_{h1}^2 \alpha^2 + (24d^2 - 12dr) \cdot c_{h1}^2 \alpha}{6c_d} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{(-r^3 + 12d^2 r - 16d^3) \cdot c_{h2}^2}{6c_d} \right\} \right. \\
&\quad + \left\{ \frac{2c_{h1}^3 \alpha^3 + \{(3r - 9d) \cdot c_{h1}^3 - 3dc_{h1}^2 c_{h2}\} \cdot \alpha^2}{6c_{h1} c_d^2} \right. \\
&\quad \left. + \frac{\{(12d^2 - 6dr) \cdot c_{h1}^2 c_{h2} + (12d^2 - 6dr) \cdot c_{h1}^3\} \cdot \alpha}{6c_{h1} c_d^2} \right. \\
&\quad \left. + \frac{d^3 c_{h2}^3 + (3d^2 r - 3d^3) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (6d^2 r - 9d^3) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}}{6c_{h1} c_d^2} \right. \\
&\quad \left. + \frac{(3d^2 r - 5d^3) \cdot c_{h1}^3}{6c_{h1} c_d^2} \right\} \\
&\quad + \left\{ \frac{2c_{h1}^2 \alpha^3 + (3r - 9d) \cdot c_{h1}^2 \alpha^3 + (12d^2 - 6dr) \cdot c_{h1}^2 \alpha}{3c_d^2} \right. \\
&\quad \left. + \frac{(-r^3 + 3dr^2 - 4d^3) \cdot c_{h1}^2 + (r^3 - 3dr^2 + 3d^2 r - d^3) \cdot c_{h1}^2}{3c_d^2} \right\} \\
&= \frac{1}{6c_{h1} c_d} \left[4c_{h1}^3 \alpha^3 + \{(6r - 15d) \cdot c_{h1}^3 - 3dc_{h1}^2 c_{h2}\} \cdot \alpha^2 \right. \\
&\quad + \{(12d^2 - 6dr) \cdot c_{h1}^2 c_{h2} + (12d^2 - 6dr) \cdot c_{h1}^3\} \cdot \alpha \\
&\quad + d^3 c_{h2}^3 + (3d^2 r - 3d^3) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (6d^2 r - 9d^3) \cdot c_{h1}^2 c_{h2} \\
&\quad \left. + (r^3 - 3d^2 r + d^3) \cdot c_{h1}^3 \right]
\end{aligned}$$

③ バスによる水平方向の移動

$$\begin{aligned}
&c_{h2} \left[d \cdot \left[\frac{1}{2} \left[\left(-\frac{c_{h1}}{c_d} d + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) + \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} \alpha + \frac{c_{h1}}{c_d} (r - 2d) \right\} \right] \right] \cdot (d - \alpha) \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{2} (r - d) \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} d + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) \right] \\
&= dc_{h2} \left\{ -\frac{c_{h1} \alpha^2 + (2r - 4d) \cdot c_{h1} \alpha + (3d^3 - 2dr) \cdot c_{h1}}{2c_d} + \frac{(r^2 - 2dr + d^2) \cdot c_{h1}}{c_d} \right\}
\end{aligned}$$

$$= -\frac{dc_{h_1}c_{h_2}\alpha^2 + (2dr - 4d^2) \cdot c_{h_1}c_{h_2}\alpha + (2d^3 - dr^2) \cdot c_{h_1}c_{h_2}}{2c_d}$$

(補足 9)

$$\begin{aligned}
G_s - G_S &= \left\{ \sum_{k=1}^{m+1} \int_0^{s(k)} x \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m+1} s(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \right\} \\
&\quad - \left\{ \sum_{k=1}^{m+1} \int_0^{S(k)} x \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m+1} S(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \right\} \\
&= \left\{ \sum_{k=1}^{m+1} \int_0^{\varepsilon \cdot \eta(k) + S(k)} x \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m+1} (\varepsilon \cdot \eta(k) + S(k)) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \right\} \\
&\quad - \left\{ \sum_{k=1}^{m+1} \int_0^{S(k)} x \cdot c_{h1} dx + \sum_{k=1}^{m+1} S(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \right\} \\
&= \left\{ \sum_{k=1}^{m+1} \frac{1}{2} \cdot c_{h1} \cdot (\varepsilon^2 \cdot \eta^2(k) + 2 \cdot S(k) \cdot \varepsilon \cdot \eta(k) + S^2(k)) \right. \\
&\quad \left. + \sum_{k=1}^{m+1} \{ \varepsilon \cdot \eta(k) \cdot (k-1) + S(k) \cdot (k-1) \} \cdot a \cdot c_d \right\} \\
&\quad - \left\{ \sum_{k=1}^{m+1} \frac{1}{2} \cdot S^2(k) \cdot c_{h1} + \sum_{k=1}^{m+1} S(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d \right\} \\
&= \sum_{k=1}^{m+1} c_{h1} \cdot S(k) \cdot \varepsilon \cdot \eta(k) + \sum_{k=1}^{m+1} \varepsilon \cdot \eta(k) \cdot (k-1) \cdot a \cdot c_d
\end{aligned}$$

(補足 10)

$0 \leq z \leq h_1(0) - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき、原点から式 Z_3 で表される位置まで床は

連続しているため、 $s(z)$ は以下の通りとなる。

$$s(z) = \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - z) + d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$$

$h_1(0) - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) < z \leq h_1(0) - d \cdot \frac{c_{h2}}{c_d}$ のとき、原点から式 Z_1 で表される位

置と、式 Z_1 から式 Z_3 で表される位置に対して床が存在するため、 $s(z)$ は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} s(z) &= \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - z) \right\} \\ &\quad + \left[\left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - z) + d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} - \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (-h_1(0) + z) + d \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} \right] \\ &= 3 \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - z) - 2 \cdot d \cdot \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \end{aligned}$$

$h_1(0) - d \cdot \frac{c_{h2}}{c_d} < z \leq h_1(0)$ のとき、原点から式 Z_1 で表される位置に対して床が存

在するため、 $s(z)$ は以下の通りとなる。

$$s(z) = \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (h_1(0) - z)$$

(補足 11)

$$\begin{aligned}
Q(x, y) &= \int_0^{h(x,y)} C(x, y, z) dz - \int_0^{H(x,y)} C(x, y, z) dz \\
&= \int_0^{h(x,y)} \{c_{h1}(|x| + |y|) + c_d \cdot z\} dz - \int_0^{H(x,y)} \{c_{h1}(|x| + |y|) + c_d \cdot z\} dz \\
&= c_{h1} \cdot (|x| + |y|) \cdot h(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x, y) \\
&\quad - c_{h1} \cdot (|x| + |y|) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y)
\end{aligned}$$

(補足 12)

$$\begin{aligned}
Q(x, y) &= c_{h1} \cdot (|x| + |y|) \cdot h(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x, y) \\
&\quad - c_{h1} \cdot (|x| + |y|) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y) \\
&= c_{h1} \cdot (|x| + |y|) \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y)\} + \frac{c_d}{2} \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y)\}^2 \\
&\quad - c_{h1} \cdot (|x| + |y|) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y) \\
&= c_{h1} \cdot (|x| + |y|) \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot \{\varepsilon^2 \cdot \eta^2(x, y) + 2 \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) \cdot H(x, y)\} \\
&= \{c_{h1} \cdot (|x| + |y|) + c_d \cdot H(x, y)\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y)
\end{aligned}$$

(補足 13)

都市域は式 4.1.1-4 の通りであり、都市域の外側では人口が 0、すなわち、階高も 0 となるため、以下の条件が成立する。

$$H_1(x, Y_S(x)) = 0 \quad , \quad H_2(x, Y_N(x)) = 0$$

$$H_3(x, Y_S(x)) = 0 \quad , \quad H_4(x, Y_N(x)) = 0$$

$$H_4(r, 0) = 0 \quad , \quad H_2(-r, 0) = 0$$

これを解くと、以下の通りとなる。

まず、

$$H_4(r, 0) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot 0 + C = 0$$

より、

$$C = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r$$

が成り立つ。 $H_2(-r, 0) = 0$ についても同様のことが成り立つ。また、都市形態は任意の地点において連続であるため、地点(0,0)における階高が等しくなるため、式 4.1.1-32 の C の値はすべて同値となる。

次に、第一象限を例にとると、

$$\begin{aligned} H_4(x, Y_N(x)) &= -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot Y_N(x) + C \\ &= -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot Y_N(x) + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r = 0 \end{aligned}$$

が成立するため、

$$Y_N(x) = -x + r$$

が成立する。他も同様であり、4.1.1-34 が成立する。

(補足 14)

$$\begin{aligned}
\int_{-r}^r \int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} H(x, y) dy dx &= \int_0^r \int_0^{-x+r} H_4(x, y) dy dx + \int_0^r \int_{x-r}^0 H_3(x, y) dy dx \\
&\quad + \int_{-r}^0 \int_0^{x+r} H_2(x, y) dy dx + \int_{-r}^0 \int_{-x-r}^0 H_1(x, y) dy dx \\
&= \int_0^r \int_0^{-x+r} \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
&\quad + \int_0^r \int_{x-r}^0 \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
&\quad + \int_{-r}^0 \int_0^{x+r} \left(\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
&\quad + \int_{-r}^0 \int_{-x-r}^0 \left(\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
&= 1
\end{aligned}$$

ここで、各積分の値は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}
&\int_0^r \int_0^{-x+r} \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
&= \int_0^r \frac{c_{h1}}{2c_d} (x^2 - 2rx + r^2) dx \\
&= \frac{c_{h1}}{6c_d} r^3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\int_0^r \int_{x-r}^0 \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
&= \int_0^r \frac{c_{h1}}{2c_d} (x^2 - 2rx + r^2) dx \\
&= \frac{c_{h1}}{6c_d} r^3
\end{aligned}$$

$$\int_{-r}^0 \int_0^{x+r} \left(\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx$$

$$= \int_{-r}^0 \frac{c_{h1}}{2c_d} (x^2 + 2rx + r^2) dx$$

$$= \frac{c_{h1}}{6c_d} r^3$$

$$\int_{-r}^0 \int_{-x-r}^0 \left(\frac{c_{h1}}{c_d} x + \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx$$

$$= \int_{-r}^0 \frac{c_{h1}}{2c_d} (x^2 + 2rx + r^2) dx$$

$$= \frac{c_{h1}}{6c_d} r^3$$

従って、以下が成り立つ。

$$\int_{-r}^r \int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} H(x, y) dy dx = \frac{2c_{h1}}{3c_d} r^3 = 1$$

(補足 15)

$c_{h1} \cdot (x+y) \geq c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h1} \cdot y + c_{h2} \cdot d$ を満たす x の範囲を求める。第一象限のみを対象としているため、 $0 \leq x$ である。

$x-d \leq 0$ つまり、 $x \leq d$ の場合、絶対値を外すと、

$$c_{h1} \cdot (x+y) \geq -c_{h1} \cdot (x-d) + c_{h1} \cdot y + c_{h2} \cdot d$$

つまり、

$$2 \cdot c_{h1} \cdot x \geq (c_{h1} + c_{h2}) \cdot d$$

$$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x$$

となるため、 $\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x \leq d$ の範囲で $c_{h1} \cdot (x+y) \geq c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h1} \cdot y + c_{h2} \cdot d$

が成立する。

$x-d > 0$ つまり、 $x > d$ の場合、絶対値を外すと、

$$c_{h1} \cdot (x+y) \geq c_{h1} \cdot (x-d) + c_{h1} \cdot y + c_{h2} \cdot d$$

つまり、

$$0 \geq (-c_{h1} + c_{h2}) \cdot d$$

となり、 $c_{h1} > c_{h2}$ を前提としているため、常に成り立つ。

以上より、 $c_{h1} \cdot (x+y) \geq c_{h1} \cdot |x-d| + c_{h1} \cdot y + c_{h2} \cdot d$ が成立する x の範囲は、

$$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \leq x \text{ となる。}$$

(補足 16)

$0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$, $0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ の時、

$$\begin{aligned}
Q(x, y) &= \int_0^{h(x,y)} C(x, y, z) dz - \int_0^{H(x,y)} C(x, y, z) dz \\
&= \int_0^{h(x,y)} \{c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot y + c_d \cdot z\} dz - \int_0^{H(x,y)} \{c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot y + c_d \cdot z\} dz \\
&= (c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot y) \cdot h(x, y) + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot h^2(x, y) \\
&\quad - \left\{ (c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot y) \cdot H(x, y) + \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot H^2(x, y) \right\} \\
&= c_{h1} \cdot (x + y) \cdot h(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x, y) - c_{h1} \cdot (x + y) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y)
\end{aligned}$$

$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x$, $x \geq y$ の時、

$$\begin{aligned}
Q(x, y) &= \int_0^{h(x,y)} C(x, y, z) dz - \int_0^{H(x,y)} C(x, y, z) dz \\
&= \int_0^{h(x,y)} \{c_{h1} \cdot |x - d| + c_{h1} \cdot y + c_d \cdot z + c_{h2} \cdot d\} dz \\
&\quad - \int_0^{H(x,y)} \{c_{h1} \cdot |x - d| + c_{h1} \cdot y + c_d \cdot z + c_{h2} \cdot d\} dz \\
&= c_{h1} \cdot (|x - d| + y) \cdot h(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x, y) + c_{h2} \cdot d \cdot h(x, y) \\
&\quad - c_{h1} \cdot (|x - d| + y) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y) - c_{h2} \cdot d \cdot H(x, y)
\end{aligned}$$

$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y$, $x \leq y$ の時、

$$\begin{aligned}
Q(x, y) &= \int_0^{h(x,y)} C(x, y, z) dz - \int_0^{H(x,y)} C(x, y, z) dz \\
&= \int_0^{h(x,y)} \{c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot |y - d| + c_d \cdot z + c_{h2} \cdot d\} dz \\
&\quad - \int_0^{H(x,y)} \{c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot |y - d| + c_d \cdot z + c_{h2} \cdot d\} dz \\
&= c_{h1} \cdot (x + |y - d|) \cdot h(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x, y) + c_{h2} \cdot d \cdot h(x, y) \\
&\quad - c_{h1} \cdot (x + |y - d|) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y) - c_{h2} \cdot d \cdot H(x, y)
\end{aligned}$$

(補足 17)

$0 \leq x < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$, $0 \leq y < \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ の時、

$$\begin{aligned}
Q(x, y) &= c_{h1} \cdot (x+y) \cdot h(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x, y) - c_{h1} \cdot (x+y) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y) \\
&= c_{h1} \cdot (x+y) \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y)\} + \frac{c_d}{2} \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y)\}^2 \\
&\quad - c_{h1} \cdot (x+y) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y) \\
&= c_{h1} \cdot (x+y) \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot \{\varepsilon^2 \cdot \eta^2(x, y) + 2 \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) \cdot H(x, y)\} \\
&= \{c_{h1} \cdot (x+y) + c_d \cdot H(x, y)\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y)
\end{aligned}$$

$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq x$, $x \geq y$ の時、

$$\begin{aligned}
Q(x, y) &= c_{h1} \cdot (|x-d|+y) \cdot h(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x, y) + c_{h2} \cdot d \cdot h(x, y) \\
&\quad - c_{h1} \cdot (|x-d|+y) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y) - c_{h2} \cdot d \cdot H(x, y) \\
&= c_{h1} \cdot (|x-d|+y) \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y)\} + \frac{c_d}{2} \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y)\}^2 \\
&\quad + c_{h2} \cdot d \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y)\} \\
&\quad - c_{h1} \cdot (|x-d|+y) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y) - c_{h2} \cdot d \cdot H(x, y) \\
&= c_{h1} \cdot (|x-d|+y) \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot \{\varepsilon^2 \cdot \eta^2(x, y) + 2 \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) \cdot H(x, y)\} \\
&\quad + c_{h2} \cdot d \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) \\
&= \{c_{h1} \cdot (|x-d|+y) + c_d \cdot H(x, y) + c_{h2} \cdot d\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y)
\end{aligned}$$

$\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq y$ 、 $x \leq y$ の時、

$$\begin{aligned}
Q(x, y) &= c_{h1} \cdot (x + |y - d|) \cdot h(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot h^2(x, y) + c_{h2} \cdot d \cdot h(x, y) \\
&\quad - c_{h1} \cdot (x + |y - d|) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y) - c_{h2} \cdot d \cdot H(x, y) \\
&= c_{h1} \cdot (x + |y - d|) \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y)\} + \frac{c_d}{2} \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y)\}^2 \\
&\quad + c_{h2} \cdot d \cdot \{\varepsilon \cdot \eta(x, y) + H(x, y)\} \\
&\quad - c_{h1} \cdot (x + |y - d|) \cdot H(x, y) - \frac{c_d}{2} \cdot H^2(x, y) - c_{h2} \cdot d \cdot H(x, y) \\
&= c_{h1} \cdot (x + |y - d|) \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) + \frac{c_d}{2} \cdot \{\varepsilon^2 \cdot \eta^2(x, y) + 2 \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) \cdot H(x, y)\} \\
&\quad + c_{h2} \cdot d \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y) \\
&= \{c_{h1} \cdot (x + |y - d|) + c_d \cdot H(x, y) + c_{h2} \cdot d\} \cdot \varepsilon \cdot \eta(x, y)
\end{aligned}$$

(補足 18)

都市域は式 4.1.2-13 の通りであり、都市域の外側では人口が 0、すなわち、階高も 0 となるため、以下の条件が成立する。

$$\begin{aligned} H_3(r,0) &= 0 & H_1(x, Y_N(x)) &= 0 & H_2(x, Y_N(x)) &= 0 & , \\ H_3(x, Y_N(x)) &= 0 & H_4(x, Y_N(x)) &= 0 & H_5(x, Y_N(x)) &= 0 \end{aligned}$$

また、都市形態は任意の地点において連続であるため、以下の条件が成立する。

$$\begin{aligned} H_1\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) &= H_2\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) & , \\ H_1\left(x, \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) &= H_4\left(x, \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) & , \\ H_2(d, y) &= H_3(d, y) & , & H_4(x, d) = H_5(x, d) & , \\ H_2(x, x) &= H_4(x, x) & , & H_3(x, x) = H_5(x, x) \end{aligned}$$

これを解くと、以下の通りとなる。

まず、

$$H_3(r,0) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot 0 + C_3 = 0$$

より、

$$C_3 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r$$

が成立する。また、

$$H_2(d, y) = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot d - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_2$$

$$H_3(d, y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot d - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_3 = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot d - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot r$$

となり、

$$H_2(d, y) = H_3(d, y)$$

という条件より、

$$C_2 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d)$$

が成立する。また、

$$H_1\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_1$$

$$\begin{aligned} H_2\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) &= \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_2 \\ &= \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d) \end{aligned}$$

となり、

$$H_1\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) = H_2\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right)$$

という条件より、

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot d \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d) \\ &= \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} \end{aligned}$$

が成立する。また、 $H_2(x, x) = H_4(x, x)$ より、 $C_2 = C_4$ 、 $H_3(x, x) = H_5(x, x)$ より、 $C_3 = C_5$ が成立する。

(補足 19)

各積分の値は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}
& \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_0^x -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left[x+y - \left\{ r-d \cdot \left(1-\frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \right] dy dx \\
&= \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \frac{-3c_{h1}x^2 + 2\{(r-d) \cdot c_{h1} + dc_{h2}\} \cdot x}{2c_d} dx \\
&= \frac{d^3c_{h2}^3 + (2d^2r-d^3) \cdot c_{h1}c_{h2}^2 + (4d^2r-5d^3) \cdot c_{h1}^2c_{h2} + (2d^2r-3d^3) \cdot c_{h1}^3}{16c_{h1}^2c_d} \\
\\
& \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \int_0^x \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \{x-y + (r-2 \cdot d)\} dy dx \\
&= \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \frac{c_{h1}}{2c_d} \cdot \{x^2 + (2r-4d) \cdot x\} dx \\
&= \frac{d^3c_{h1}^3 + (6d^2r-9d^3) \cdot c_{h1}c_{h2}^2 + (12d^2r-21d^3) \cdot c_{h1}^2c_{h2} + (29d^3-18d^2r) \cdot c_{h1}^3}{48c_{h1}^2c_d} \\
\\
& \int_d^{\frac{r}{2}} \int_0^x -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (x+y-r) dy dx \\
&= \int_d^{\frac{r}{2}} -\frac{c_{h1}}{2c_d} \cdot (3x^2 - 2rx) dx \\
&= \frac{(r^3 - 8d^2r + 8d^3) \cdot c_{h1}}{16c_d} \\
\\
& \int_{\frac{r}{2}}^r \int_0^{-x+r} -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (x+y-r) dy dx \\
&= \int_{\frac{r}{2}}^r \frac{c_{h1}}{2c_d} \cdot (x^2 - 2rx + r^2) dx \\
&= \frac{r^3c_{h1}}{48c_d}
\end{aligned}$$

(補足 20)

各積分の値は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}
 & \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \int_0^x \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \{x - y + (r - 2 \cdot d)\} dy dx \\
 &= \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \frac{c_{h1}}{2c_d} \cdot \{x^2 + (2r - 4d) \cdot x\} dx \\
 &= \frac{d^3 c_{h1}^3 + (6d^2 r - 9d^3) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (12d^2 r - 21d^3) \cdot c_{h1}^2 c_{h2} + (29d^3 - 18d^2 r) \cdot c_{h1}^3}{48c_{h1}^2 c_d}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \int_d^{\frac{r}{2}} \int_0^x -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (x + y - r) dy dx \\
 &= \int_d^{\frac{r}{2}} -\frac{c_{h1}}{2c_d} \cdot (3x^2 - 2rx) dx \\
 &= \frac{(r^3 - 8d^2 r + 8d^3) \cdot c_{h1}}{16c_d}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \int_{\frac{r}{2}}^r \int_0^{-x+r} -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (x + y - r) dy dx \\
 &= \int_{\frac{r}{2}}^r \frac{c_{h1}}{2c_d} \cdot (x^2 - 2rx + r^2) dx \\
 &= \frac{r^3 c_{h1}}{48c_d}
 \end{aligned}$$

(補足 21)

総移動コストは、以下の3種類の移動からなる。①徒歩による水平方向の移動、②垂直方向の移動、③バスによる水平方向の移動。それぞれにおける移動コストは、以下の通り。

① 徒歩による水平方向の移動

$$\begin{aligned}
& \left\{ \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_0^x x \cdot H_1(x, y) dy dx + \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \int_0^x (d-x) \cdot H_2(x, y) dy dx \right. \\
& + \int_d^r \int_0^x (x-d) \cdot H_3(x, y) dy dx + \int_{\frac{r}{2}}^r \int_0^{-x+r} (x-2 \cdot d) \cdot H_3(x, y) dy dx \\
& + \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_y^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} y \cdot H_1(x, y) dx dy + \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d y \cdot H_2(x, y) dx dy \\
& + \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \int_y^d y \cdot H_2(x, y) dx dy + \int_0^d \int_d^{-y+r} y \cdot H_3(x, y) dx dy \\
& \left. + \int_d^r \int_y^{-y+r} y \cdot H_3(x, y) dx dy \right\} \cdot c_{h1}
\end{aligned}$$

各積分の値は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}
& \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_0^x x \cdot H_1(x, y) dy dx \\
& = \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_0^x x \cdot \left[-\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} \left\{ r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \right] dy dx \\
& = \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \frac{d}{2} \frac{-3c_{h1}x^3 + \{2(r-d) \cdot c_{h1} + 2dc_{h2}\}x^2}{2c_d} dx \\
& = \frac{7d^4 c_{h2}^4 + (16d^3 r - 4d^4) \cdot c_{h1} c_{h2}^3 + (48d^3 r - 54d^4) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}^2}{384c_{h1}^3 c_d} \\
& + \frac{(48d^3 r - 68d^4) \cdot c_{h1}^3 c_{h2} + (16d^3 r - 25d^4) \cdot c_{h1}^4}{384c_{h1}^3 c_d}
\end{aligned}$$

$$\int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \int_0^x (d-x) \cdot H_2(x, y) dy dx$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \int_0^x (d-x) \cdot \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} (r-2d) \right\} dy dx \\
&= \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d -\frac{c_{h1}}{2c_d} \{x^3 + (2r-5d) \cdot x^2 + (4d^2 - 2dr) \cdot x\} dx \\
&= \frac{3d^4 c_{h2}^4 + (16d^3 r - 28d^4) \cdot c_{h1} c_{h2}^3 - 6d^4 c_{h1}^2 c_{h2}^2}{384c_{h1}^3 c_d} \\
&+ \frac{(84d^4 - 48d^3 r) \cdot c_{h1}^3 c_{h2} + (32d^3 r - 53d^4) \cdot c_{h1}^4}{384c_{h1}^3 c_d}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\int_{\frac{d}{2}}^r \int_0^x (x-d) \cdot H_3(x, y) dy dx \\
&= \int_{\frac{d}{2}}^r \int_0^x (x-d) \cdot \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
&= \int_{\frac{d}{2}}^r -\frac{c_{h1}}{2c_d} \{3x^3 - (2r+3d) \cdot x^2 + 2drx\} dx \\
&= \frac{(7r^4 - 24dr^3 + 64d^3 r - 48d^4) \cdot c_{h1}}{384c_d}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\int_{\frac{r}{2}}^r \int_0^{-x+r} (x-2 \cdot d) \cdot H_3(x, y) dy dx \\
&= \int_{\frac{r}{2}}^r \int_0^{-x+r} (x-2 \cdot d) \cdot \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dy dx \\
&= \int_{\frac{r}{2}}^r \frac{c_{h1}}{2c_d} \{x^3 - 2(r+d) \cdot x^2 + (r^2 + 4dr) \cdot x - 2dr^2\} dx \\
&= \frac{(5r^4 - 16dr^3) \cdot c_{h1}}{384c_d}
\end{aligned}$$

$$\int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_y^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} y \cdot H_1(x, y) dx dy$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_y^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} y \cdot \left[-\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} \left\{ r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \right] dx dy \\
&= \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \left[\frac{12y^3 c_{h1}^2 + \left\{ (4d - 8r) \cdot c_{h1}^2 - 12dc_{h1}c_{h2} \right\} \cdot y^2}{8c_{h1}c_d} \right. \\
&\quad \left. + \frac{\left\{ 3d^2 c_{h1}^2 + (4dr - 2d^2) \cdot c_{h1}c_{h2} + (4dr - 5d^2) \cdot c_{h1}^2 \right\} \cdot y}{8c_{h1}c_d} \right] dx \\
&= \frac{3d^4 c_{h2}^4 + (8d^3 r - 4d^4) \cdot c_{h1}c_{h2}^3 + (24d^3 r - 30d^4) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}^2}{384c_{h1}^3 c_d} \\
&\quad + \frac{(24d^3 r - 36d^4) \cdot c_{h1}^3 c_{h2} + (8d^3 r - 13d^4) \cdot c_{h1}^4}{384c_{h1}^3 c_d}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d y \cdot H_2(x, y) dx dy \\
&= \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d y \cdot \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} (r - 2d) \right\} dx dy \\
&= \int_0^{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \left[\frac{\left(-4dc_{h1}c_{h2} + 4dc_{h1}^2 \right) \cdot y^2}{8c_{h1}c_d} \right. \\
&\quad \left. + \frac{\left\{ d^2 c_{h2}^2 + (4dr - 6d^2) \cdot c_{h1}c_{h2} + (5d^2 - 4dr) \cdot c_{h1}^2 \right\} \cdot y}{8c_{h1}c_d} \right] dy \\
&= \frac{d^4 c_{h1}^4 + (20d^4 - 12d^3 r) \cdot c_{h1}c_{h2}^3 + (18d^4 - 12d^3 r) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}^2}{192c_{h1}^3 c_d} \\
&\quad + \frac{(12d^3 r - 20d^4) \cdot c_{h1}^3 c_{h2} + (12d^3 r - 19d^4) \cdot c_{h1}^4}{192c_{h1}^3 c_d}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \int_y^d y \cdot H_2(x, y) dx dy \\
&= \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \int_y^d y \cdot \left\{ \frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} (r - 2d) \right\} dx dy \\
&= \int_{\frac{d}{2}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \frac{c_{h1}}{2c_d} \left\{ y^3 + 2(d - r) \cdot y^2 + (2dr - 3d^3) \cdot y \right\} dy
\end{aligned}$$

$$= -\frac{3d^4 c_{h2}^4 + (28d^4 - 16d^3 r) \cdot c_{h1} c_{h2}^3 - 6d^4 c_{h1}^2 c_{h2}^2}{384c_{h1}^3 c_d} \\ - \frac{(48d^3 r - 84d^4) \cdot c_{h1}^3 c_{h2} + (59d^4 - 32d^3 r) \cdot c_{h1}^4}{384c_{h1}^3 c_d}$$

$$\int_0^d \int_d^{-y+r} y \cdot H_3(x, y) dx dy \\ = \int_0^d \int_d^{-y+r} y \cdot \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dx dy \\ = \int_0^d \frac{c_{h1}}{2c_d} \{y^3 + 2(d-r) \cdot y^2 + (r^2 - 2dr + d^2) \cdot y\} dy \\ = \frac{c_{h1}}{24c_d} (6d^2 r^2 - 20d^3 r + 17d^4)$$

$$\int_d^r \int_y^{-y+r} y \cdot H_3(x, y) dx dy \\ = \int_d^r \int_y^{-y+r} y \cdot \left(-\frac{c_{h1}}{c_d} x - \frac{c_{h1}}{c_d} y + \frac{c_{h1}}{c_d} r \right) dx dy \\ = \int_d^r y \cdot \frac{c_{h1}}{2c_d} (4y^3 - 4ry^2 + r^2 y) dy \\ = \frac{(r^4 - 24d^2 r^2 + 64d^3 r - 48d^4) \cdot c_{h1}}{96c_d}$$

② 垂直方向の移動

$$\left[\int_0^{\frac{c_{h1}(r-2d)}{c_d}} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r \right)^2 \cdot z \right\} dz \right. \\ \left. + \int_{\frac{c_{h1}(r-2d)}{c_d}}^{\frac{3d}{2} \frac{c_{h1} + d}{c_d} + \frac{c_{h1}}{2c_d} + r} \left\{ \frac{c_d^2 \cdot z^2 + 2 \cdot (c_{h2} - c_{h1}) \cdot c_d \cdot d - c_{h1} \cdot c_d \cdot r}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{c_{h1}^2 \cdot r^2 + 2 \cdot (c_{h1}^2 - c_{h1} \cdot c_{h2}) \cdot (s-2 \cdot d) \cdot d}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \right\} dz \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \int_{\frac{c_d}{2} \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \frac{c_{h2}}{c_d} + r \frac{c_{h1}}{c_d}}^{\frac{c_{h1}}{c_d}(r-d)} \left\{ \frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{(10 \cdot c_{h1} - 2c_{h2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \right. \\
& + \frac{5 \cdot c_{h1}^2 \cdot r^2 + (2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \\
& + \left. \frac{(c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \right\} dz \\
& + \int_{\frac{c_d}{c_d}(r-d)}^{\frac{c_{h1}}{c_d} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 \cdot z \right) dz \cdot c_d
\end{aligned}$$

各積分の値は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}
& \int_0^{\frac{c_{h1}}{c_d}(r-2d)} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r \right)^2 \cdot z \right\} dz \\
& = \frac{(17r^4 - 96dr^3 + 192d^2r^2 - 160d^3r + 48d^4) \cdot c_{h1}^2}{48c_d^2} \\
& \int_{\frac{c_d}{c_d}(r-2d)}^{\frac{3d}{2} \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \frac{c_{h2}}{c_d} + r \frac{c_{h1}}{c_d}} \left\{ \frac{c_d^2 \cdot z^2 + 2 \cdot \{(c_{h2} - c_{h1}) \cdot c_d \cdot d - c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \right. \\
& + \left. \frac{c_{h1}^2 \cdot r^2 + 2 \cdot (c_{h1}^2 - c_{h1} \cdot c_{h2}) \cdot (s - 2 \cdot d) \cdot d}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \right\} dz \\
& = \frac{19d^4 c_{h1}^4 + (56d^3 r - 100d^4) \cdot c_{h1} c_{h2}^3 + (66d^4 - 24d^3 r) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}^2}{768c_{h1}^2 c_d^2} \\
& + \frac{(168d^3 r - 260d^4) \cdot c_{h1}^3 c_{h2} + (248d^3 r - 445d^4) \cdot c_{h1}^4}{768c_{h1}^2 c_d^2} \\
& \int_{\frac{c_d}{2} \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \frac{c_{h2}}{c_d} + r \frac{c_{h1}}{c_d}}^{\frac{c_{h1}}{c_d}(r-d)} \left\{ \frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{(10 \cdot c_{h1} - 2c_{h2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \right. \\
& + \frac{5 \cdot c_{h1}^2 \cdot r^2 + (2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \\
& + \left. \frac{(c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \cdot z \right\} dz
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= - \left\{ \frac{23d^4 c_{h2}^4 + (88d^3 r - 148d^4) \cdot c_{h1} c_{h2}^3}{768c_{h1}^2 c_d^2} \right. \\
&\quad + \frac{(186d^4 - 120d^3 r) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}^2 + (72d^3 r - 116d^4) \cdot c_{h1}^3 c_{h2}}{768c_{h1}^2 c_d^2} \\
&\quad \left. + \frac{(55d^4 - 40d^3 r) \cdot c_{h1}^4}{768c_{h1}^2 c_d^2} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\int_{\frac{c_{h1}}{c_d}(r-d)}^{\frac{c_{h1}}{c_d} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 \cdot z \right) dz \\
&= \frac{d^4 c_{h2}^4 + (4d^3 r - 4d^4) \cdot c_{h1} c_{h2}^3}{48c_{h1}^2 c_d^2}
\end{aligned}$$

③ バスによる水平方向の移動

$$\begin{aligned}
&\left\{ \frac{2 \cdot c_{h1}^3 \cdot r^3 + (-3 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^2 - 6 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2} - 3 \cdot c_{h1}^3) \cdot d^2 \cdot r}{24 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d} \right. \\
&\quad \left. + \frac{(-c_{h2}^3 + 9 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2}^2 + 21 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_{h2} - 5 \cdot c_{h1}^3) \cdot d^3}{48 \cdot c_{h1}^2 \cdot c_d} \right\} \cdot d \cdot c_{h2}
\end{aligned}$$

(補足 22)

$$\begin{aligned}
\frac{D}{4} &= \sum_{k=1}^{m+1} \frac{1}{2} \left\{ r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1) \right\}^2 \\
&= \sum_{k=1}^{m+1} \frac{1}{2} \left\{ r^2 - 2 \cdot r \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1) + \frac{c_d^2}{c_{h1}^2} a^2 (k^2 - 2 \cdot k + 1) \right\} \\
&= \sum_{k=1}^{m+1} \frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d^2}{c_{h1}^2} a^2 \cdot k^2 - \left(2 \cdot \frac{c_d^2}{c_{h1}^2} a^2 + 2 \cdot r \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot a \right) \cdot k \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{c_d^2}{c_{h1}^2} a^2 + 2 \cdot r \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot a + r^2 \right) \right\} \\
&= \sum_{k=1}^{m+1} \frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d^2}{c_{h1}^2} a^2 \cdot k^2 - 2 \cdot \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot a \left(\frac{c_d}{c_{h1}} a + r \right) \cdot k + \left(\frac{c_d}{c_{h1}} a + r \right)^2 \right\} \\
&= \frac{1}{2} \left\{ \frac{(2a^2m^3 + 9a^2m^2 + 13a^2m + 6m^2) \cdot c_d^2}{6c_{h1}^2} \right. \\
&\quad - \frac{(a^2m^2 + 3a^2m + 2a^2) \cdot c_d^2 + (am^2 + 3am + 2a) \cdot rc_{h1}c_d}{c_{h1}^2} \\
&\quad \left. + \frac{(a^2m + a^2) \cdot c_d^2 + (2am + 2a) \cdot rc_{h1}c_d + (m+1) \cdot r^2c_{h1}^2}{c_{h1}^2} \right\} \\
&= \frac{1}{12} (m+1) \left\{ a^2m(2m+1) \frac{c_d^2}{c_{h1}^2} - 6amr \frac{c_d}{c_h} + 6r^2 \right\}
\end{aligned}$$

(補足 23)

総移動コストは、以下の2種類の移動からなる。①徒歩による水平方向の移動、

②垂直方向の移動。それぞれにおける移動コストは、以下の通り。

① 徒歩による水平方向の移動

$$\begin{aligned}
& c_{h1} \left[\sum_{k=1}^{m+1} \left\{ \int_0^{r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1)} x \cdot \left(-x + r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1) \right) dx \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \int_0^{r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1)} y \cdot \left(-y + r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1) \right) dy \right\} \right] \\
&= c_{h1} \left[\sum_{k=1}^{m+1} \left\{ 2 \cdot \int_0^{r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1)} x \cdot \left(-x + r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1) \right) dx \right\} \right] \\
&= 2c_{h1} \left[\sum_{k=1}^{m+1} \left\{ -\frac{a^3 c_d^3 k^3 + (-3a^3 c_d^3 - 3a^2 r c_{h1} c_d^2) \cdot k^2}{6c_{h1}^3} \right. \right. \\
& \quad - \frac{(3a^3 c_d^3 + 6a^2 r c_{h1} c_d^2 + 3ar^2 c_{h1}^2 c_{h2}) \cdot k}{6c_{h1}^3} \\
& \quad \left. \left. - \frac{-a^3 c_d^3 - 3a^2 r c_{h1} c_d^2 - 3ar^2 c_{h1}^2 c_d - r^3 c_{h1}^3}{6c_{h1}^3} \right\} \right] \\
&= -\frac{(a^3 m^4 + 2a^3 m^3 + a^3 m^2) \cdot c_d^3 - (4a^2 m^3 + 6a^2 m^2 + 2a^2 m) \cdot r c_{h1} c_d^2}{24c_{h1}^3} \\
& \quad - \frac{(6am^2 + 6am) \cdot r^2 c_{h1}^2 c_d - (4m+1) \cdot r^3 c_{h1}^3}{24c_{h1}^3}
\end{aligned}$$

② 垂直方向の移動

$$\begin{aligned}
& c_d \left[\sum_{k=1}^{m+1} \frac{1}{2} \left\{ r - \frac{c_d}{c_{h1}} a(k-1) \right\}^2 a(k-1) \right] \\
&= \frac{c_d}{2c_{h1}} \sum_{k=1}^{m+1} \left\{ a^3 c_d^2 k^3 + (-3a^3 c_d^2 - 2a^2 r c_{h1} c_d) \cdot k^2 \right. \\
& \quad \left. + (3a^3 c_d^2 + 4a^2 r c_{h1} c_d + ar^2 c_{h1}^2) \cdot k \right. \\
& \quad \left. + (-a^3 c_d^2 - 2a^2 r c_{h1} c_d - ar^2 c_{h1}^2) \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{(3a^3m^4 + 6a^3m^3 + 3a^3m^2) \cdot c_d^3}{24c_{h1}^2} \\
&+ \frac{(-8a^2m^3 - 12a^2m^2 - 4a^2m) \cdot rc_{h1}c_d^2 + (6am^2 + 6am) \cdot r^2c_{h1}^2c_d}{24c_{h1}^2}
\end{aligned}$$

(補足 24)

都市域は式 4.1.2-13 と同様であり、都市域の外側では人口が 0、すなわち、階高も 0 となるため、以下の条件が成立する。

$$H_3(s,0)=0 \quad , \quad H_1(x, Y_N(x))=0 \quad , \quad H_2(x, Y_N(x))=0 \quad , \\ H_3(x, Y_N(x))=0 \quad , \quad H_4(x, Y_N(x))=0 \quad , \quad H_5(x, Y_N(x))=0$$

また、都市形態は任意の地点において連続であるため、以下の条件が成立する。

$$H_1\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) = H_2\left(\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) \quad ,$$

$$H_1\left(x, \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) = H_4\left(x, \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) \quad ,$$

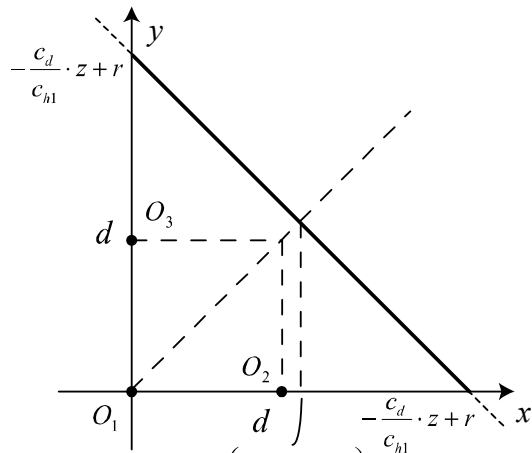
$$H_2(d, y) = H_3(d, y) \quad , \quad H_4(x, d) = H_5(x, d) \quad ,$$

$$H_2(x, x) = H_4(x, x) \quad , \quad H_3(x, x) = H_5(x, x)$$

つまり、式 4.1.2-55 と同様であり、補足 18 と同様である。

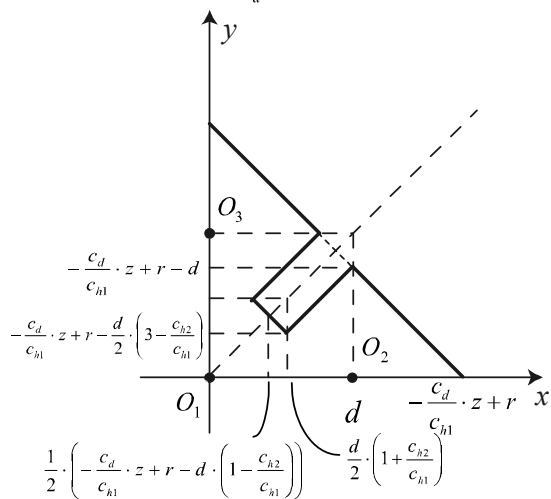
(補足 25)

式 4.2.2-2、4.2.2-4 より、各階の床の形を階高 z を用いて表すと、次の図の通りとなる。



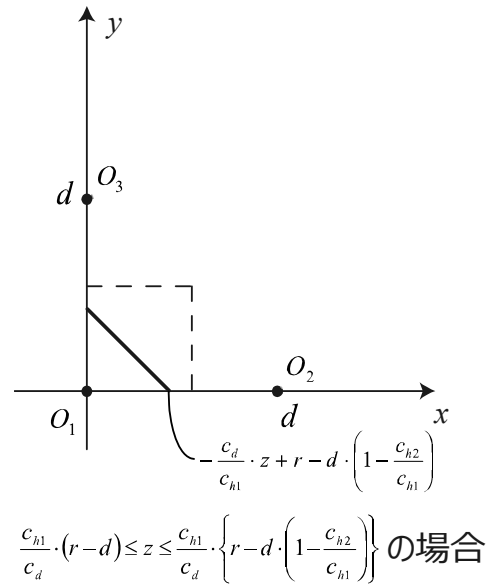
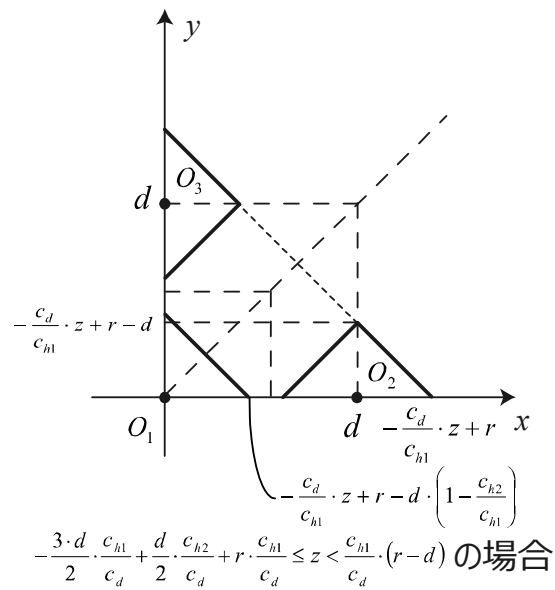
$$\frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r \right)$$

$0 \leq z < \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d)$ の場合



$$\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r - 2 \cdot d) \leq z < -\frac{3 \cdot d}{2} \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \cdot \frac{c_{h2}}{c_d} + r \cdot \frac{c_{h1}}{c_d}$$

の場合



従って、 $0 \leq z < \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r-2 \cdot d)$ のとき、つまり、1階～ m_A+1 階のときの床面積は次

の通りである。

$$s_{1-m_A} = \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r \right) \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r \right) \right\} = \frac{1}{4} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r \right)^2$$

$\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r-2 \cdot d) \leq z < -\frac{3 \cdot d}{2} \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \cdot \frac{c_{h2}}{c_d} + r \cdot \frac{c_{h1}}{c_d}$ のとき、つまり、 m_A+2 階～ m_B+1 階の

ときの床面積は次の通りである。

$$\begin{aligned}
s_{m_A-m_B} &= \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right\}^2 \\
&+ \frac{1}{2} \cdot \left[\left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) + \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right] \\
&\quad \cdot \left[\frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right] \\
&+ \frac{1}{2} \cdot \left[\left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \right) + \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right] \cdot \left[d - \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right] \\
&+ \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \right)^2 \\
&= \frac{c_d^2 \cdot z^2 + \{2 \cdot (c_{h2} - c_{h1}) \cdot c_d \cdot d - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + c_{h1}^2 \cdot r^2 + (c_{h1}^2 - c_{h1} \cdot c_{h2}) \cdot (2 \cdot d \cdot r - 4 \cdot d^2)}{4 \cdot c_{h1}^2}
\end{aligned}$$

$-\frac{3 \cdot d}{2} \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{2} \cdot \frac{c_{h2}}{c_d} + r \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} \leq z < \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r-d)$ のとき、つまり、 m_B+2 階 $\sim m_C+1$ 階のと

きの床面積は次の通りである。

$$\begin{aligned}
s_{m_B-m_C} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \right) \cdot 2 \right\} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \right) \\
&= \frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{(10 \cdot c_{h1} - 2 \cdot c_{h2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + 5 \cdot c_{h1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \\
&\quad + \frac{(2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r + (c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2}
\end{aligned}$$

$\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (r-d) \leq z \leq \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left\{ r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}$ のとき、つまり、 m_C+2 階 $\sim m_D+1$ 階のときの

床面積は次の通りである。

$$s_{m_C-m_D} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2$$

(補足 26)

$$\frac{1}{8} \cdot D = \sum_{k=1}^{m_A+1} S_{1-m_A} + \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} S_{m_A-m_B} + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} S_{m_B-m_C} + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} S_{m_C-m_D}$$

$z = (m-1) \cdot a$ とすると、各和の値は次の通りとなる。

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{m_A+1} S_{1-m_A} &= \frac{2a^2 c_d^2 m_A^3 + (3a^2 c_d^2 - 6arc_{h1} c_d) \cdot m_A^2}{24c_{h1}} \\ &+ \frac{(a^2 c_d^2 - 6arc_{h1} c_d + 6r^2 c_{h1}^2) \cdot m_A + 6r^2 c_{h1}^2}{24c_{h1}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} S_{m_A-m_B} &= \frac{2a^2 c_d^2 m_B^3 + [3a c_d^2 + \{6adc_{h2} + (-6ar - 6ad) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d] \cdot m_B^2}{24c_{h1}^2} \\ &+ \frac{[a^2 c_d^2 + \{6adc_{h2} + (-6ar - 6ad) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d]}{24c_{h1}^2} \\ &+ \frac{(24d^2 - 12dr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (6r^2 + 12dr - 24d^2) \cdot c_{h1}^2}{24c_{h1}^2} \cdot m_B \\ &+ \frac{-2a^2 c_d^2 m_A^3 + [\{(6ar + 6ad) \cdot c_{h1} - 6adc_{h2}\} \cdot c_d - 3a^2 c_d^2] \cdot m_A^2}{24c_{h1}^2} \\ &+ \frac{[-a^2 c_d^2 + \{(6ar + 6ad) \cdot c_{h1} - 6adc_{h2}\} \cdot c_d]}{24c_{h1}^2} \\ &+ \frac{(12dr - 24d^2) c_{h1} c_{h2} + (-6r^2 - 12dr + 24d^2) \cdot c_{h1}^2}{24c_{h1}^2} \cdot m_A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} S_{m_B-m_C} &= \frac{10a^2 c_d^2 m_C^3 + [15a^2 c_d^2 + \{(30ad - 30ar) \cdot c_{h1} - 6adc_{h2}\} \cdot c_d] \cdot m_C^2}{24c_{h1}^2} \\ &+ \frac{[5a^2 c_d^2 + \{(30ad - 30ar) \cdot c_{h1} - 6adc_{h2}\} \cdot c_d + 6d^2 c_{h2}^2]}{24c_{h1}^2} \\ &+ \frac{(12ds - 12d^2) c_{h1} c_{h2} + (30r^2 - 60dr + 30d^2) \cdot c_{h1}^2}{24c_{h1}^2} \cdot m_C \\ &+ \frac{-10a^2 c_d^2 m_B^3 + [\{6adc_{h2} + (30ar - 30ad) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d - 15a^2 c_d^2] \cdot m_B^2}{24c_{h1}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\left[-5a^2c_d^2 + \{6adc_{h2} + (30ar - 30ad) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d - 6d^2c_{h2}^2 \right]}{24c_{h1}^2} \\
& + \frac{\left((12d^2 - 12dr)c_{h1}c_{h2} + (-30r^2 + 60dr - 30d^2) \cdot c_{h1}^2 \right) \cdot m_B}{24c_{h1}^2} \\
\sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} S_{m_C-m_D} & = \frac{2a^2c_d^2m_D^3 + \left[3a^2c_d^2 + \{(6ad - 6ar) \cdot c_{h1} - 6adc_{h2}\} \cdot c_d \right] \cdot m_D^2}{24c_{h1}^2} \\
& + \frac{\left[a^2c_d^2 + \{(6ad - 6ar) \cdot c_{h1} - 6adc_{h2}\} \cdot c_d + 6d^2c_{h2}^2 \right]}{24c_{h1}^2} \\
& + \frac{\left((12dr - 12d^2)c_{h1}c_{h2} + (6r^2 - 12dr + 6d^2) \cdot c_{h1}^2 \right) \cdot m_D}{24c_{h1}^2} \\
& + \frac{-2a^2c_d^2m_C^3 + \left[6adc_{h2} + (6ar - 6ad) \cdot c_{h1} \right] \cdot c_d - 3a^2c_d^2}{24c_{h1}^2} \cdot m_C^2 \\
& + \frac{\left[-a^2c_d^2 + \{6adc_{h2} + (6ar - 6ad) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d - 6d^2c_{h2}^2 \right]}{24c_{h1}^2} \\
& + \frac{\left((12d^2 - 12dr) \cdot c_{h1}c_{h2} + (-6r^2 + 12dr - 6d^2) \cdot c_{h1}^2 \right) \cdot m_C}{24c_{h1}^2}
\end{aligned}$$

(補足 27)

第一象限かつ $y \leq x$ について、1 次拠点を経由して 2 次拠点へ移動する人口 (V) は次の通りである。

$$\begin{aligned}
V &= \sum_{k=1}^{m_A+1} \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot \frac{1}{2} \right\}^2 \\
&+ \sum_{k=m_A+2}^{m_c+1} \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right)^2 \\
&+ \sum_{k=1}^{m_A+1} \frac{1}{2} \cdot \left[\left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot \frac{1}{2} + \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \right. \\
&\quad \cdot \left. \left(\left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot \frac{1}{2} - \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right] \\
&+ \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} \frac{1}{2} \cdot \left[\left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right) + \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right\} \right. \\
&\quad \cdot \left. \left\{ d - \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \right] \\
&+ \sum_{k=m_B+2}^{m_c+1} \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right)^2
\end{aligned}$$

各和の値は、次の通りとなる。

$$\begin{aligned}
&\sum_{k=1}^{m_A+1} \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot \frac{1}{2} \right\}^2 \\
&= \frac{2a^2c_d^2m_A^3 + (3a^2c_d^2 - 6arc_{h1}c_d) \cdot m_A^2 + (a^2c_d^2 - 6arc_{h1}c_d + 6r^2c_{h1}^2) \cdot m_A + 6r^2c_{h1}^2}{48c_{h1}^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{k=m_A+2}^{m_c+1} \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right)^2 \\
&= \frac{2a^2c_d^2m_c^3 + \{3a^2c_d^2 + (6ad - 6ar)c_{h1}c_d\} \cdot m_c^2}{12c_{h1}^2} \\
&\quad + \frac{\{a^2c_d^2 + (6ad - 6ar)c_{h1}c_d + (6r^2 - 12dr + 6d^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot m_c}{12c_{h1}^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{-2a^2c_d^2m_A^3 + \{(6ar - 6ad)c_{h1}c_d - 3a^2c_d^2\} \cdot m_A^2}{12c_{h1}^2} \\
 & + \frac{[-a^2c_d^2 + (6ar - 6ad)c_{h1}c_d + (-6r^2 + 12dr - 6d^2) \cdot c_{h1}^2] \cdot m_A}{12c_{h1}^2} \\
 \\
 & \sum_{k=1}^{m_A+1} \frac{1}{2} \cdot \left[\left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot \frac{1}{2} + \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \right. \\
 & \quad \left. \cdot \left[\left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot \frac{1}{2} - \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right] \right] \\
 & = \frac{2a^2c_d^2m_A^3 + (3a^2c_d^2 - 6arc_{h1}c_d) \cdot m_A^2}{48c_{h1}^2} \\
 & + \frac{[a^2c_d^2 - 6arc_{h1}c_d - 6d^2c_{h2}^2 - 12d^2c_{h1}c_{h2} + (6r^2 - 6d^2) \cdot c_{h1}^2] \cdot m_A}{48c_{h1}^2} \\
 & + \frac{-6d^2c_{h2}^2 - 12d^2c_{h1}c_{h2} + (6r^2 - 6d^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \\
 \\
 & \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} \frac{1}{2} \cdot \left[\left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right) + \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right\} \right. \\
 & \quad \left. \cdot \left[d - \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right] \right] \\
 & = \frac{(2adc_{h2} - 2adc_{h1}) \cdot c_d m_B^2}{8c_{h1}^2} \\
 & + \frac{\{(2adc_{h2} - 2adc_{h1}) \cdot c_d - d^2c_{h2}^2 + (6d^2 - 4dr) \cdot c_{h1}c_{h2} + (4dr - 5d^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot m_B}{8c_{h1}^2} \\
 & + \frac{(2adc_{h2} - 2adc_{h1}) \cdot c_d m_A^2}{8c_{h1}^2} \\
 & + \frac{\{(2adc_{h1} - 2adc_{h2}) \cdot c_d + d^2c_{h2}^2 + (4dr - 6d^2) \cdot c_{h1}c_{h2} + (5d^2 - 4dr) \cdot c_{h1}^2\} \cdot m_A}{8c_{h1}^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right)^2 \\
&= \frac{2a^2 c_d^2 m_C^3 + \{3a^2 c_d^2 + (6ad - 6ar) \cdot c_{h1} c_d\} \cdot m_C^2}{12c_{h1}^2} \\
&+ \frac{\{a^2 c_d^2 + (6ad - 6ar) \cdot c_{h1} c_d + (6r^2 - 12dr + 6d^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot m_C}{12c_{h1}^2} \\
&+ \frac{-2a^2 c_d^2 m_B^3 + \{(6ar - 6ad) \cdot c_{h1} c_d - 3a^2 c_d^2\} \cdot m_B^2}{12c_{h1}^2} \\
&+ \frac{\{-a^2 c_d^2 + (6ar - 6ad) \cdot c_{h1} c_d + (-6r^2 + 12dr - 6d^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot m_B}{12c_{h1}^2}
\end{aligned}$$

(補足 28)

総移動コストは、以下の3種類の移動からなる。①徒歩による水平方向の移動、②垂直方向の移動、③バスによる水平方向の移動。それぞれにおける移動コストは、以下の通り。

① 徒歩による水平方向の移動

1-1. 徒歩による水平方向の移動 (x 軸方向)

$$\begin{aligned}
& c_{h1} \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_A+1} \left[\int_0^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} x \cdot x dx + \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d x \cdot (d-x) dx \right. \right. \\
& \left. \left. + \int_d^{\left(\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r\right)\frac{1}{2}} x \cdot (x-d) dx \right. \right. \\
& \left. \left. + \int_{\left(\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r\right)\frac{1}{2}}^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right] \right) \\
& + \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
& \left. + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\}}^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} \cdot x dx \right. \\
& \left. + \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \right. \\
& \left. + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right] \\
& + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
& \left. + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\}}^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} \cdot x dx \right. \\
& \left. + \int_{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \right. \\
& \left. + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a+r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
& \left. + \int \frac{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)}{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \right]
\end{aligned}$$

各和の値は、次の通りとなる。

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{m_A+1} \left[\int_0^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} x \cdot x dx + \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)}^d x \cdot (d-x) dx \right. \\
& \quad \left. + \int_d^{\left(\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r \right) \frac{1}{2}} x \cdot (x-d) dx \right. \\
& \quad \left. + \int \frac{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r}{\left(\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r \right) \frac{1}{2}} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right] \\
& = - \frac{3a^3 c_d^3 m_A^4 + \{ 6a^3 c_d^3 + (8a^2 d - 12a^2 s) \cdot c_{h1} c_d^2 \} \cdot m_A^3}{96 c_{h1}^3} \\
& \quad - \frac{\{ 3a^3 c_d^3 + (12a^2 d - 18a^2 r) \cdot c_{h1} c_d^2 + (18ar^2 - 24adr) \cdot c_{h1}^2 c_d \} \cdot m_A^2}{96 c_{h1}^3} \\
& \quad - \left\{ \frac{(4a^2 d - 6a^2 r) \cdot c_{h1} c_d^2 + (18ar^2 - 24adr) \cdot c_{h1}^2 c_d}{96 c_{h1}^3} \right. \\
& \quad \left. - \frac{8d^3 c_{h2}^3 + 12d^3 c_{h1} c_{h2}^2 - (12r^3 - 24dr^2 + 28d^3) \cdot c_{h1}^3}{96 c_{h1}^3} \right\} \cdot m_A \\
& \quad + \frac{8d^3 c_{h2}^3 + 12d^3 c_{h1} c_{h2}^2 - (12r^3 - 24dr^2 + 28d^3) \cdot c_{h1}^3}{96 c_{h1}^3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
& \quad \left. + \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)}^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \right. \\
& \quad \left. + \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \int_d^{\frac{c_d \cdot (k-1)a+r}{c_{h1}}} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \Big] \\
= & - \frac{3a^3 c_d^3 m_B^4 + \left[6a^3 c_d^3 + \left\{ 4a^2 d c_{h2} + (12a^2 d - 12a^2 r) \cdot c_{h1} \right\} \cdot c_d^2 \right] \cdot m_B^3}{96c_{h1}^3} \\
& - \left[\frac{3a^3 c_d^3 + \left\{ 6a^2 d c_{h2} + (18a^2 d - 18a^2 r) \cdot c_{h1} \right\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\left\{ 6ad^2 c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (18ar^2 - 36adr + 30ad^2) \cdot c_{h1}^2 \right\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_B^2 \\
& - \left[\frac{\left\{ 2a^2 d c_{h2} + (6a^2 d - 6a^2 r) \cdot c_{h1} \right\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \frac{\left\{ 6ad^2 c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (18ar^2 - 36adr + 30ad^2) \cdot c_{h1}^2 \right\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \\
& + \frac{-8d^3 c_{h2}^3 + (12d^3 - 12d^2 r) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (12dr^2 - 24d^2 r) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}}{96c_{h1}^3} \\
& + \left. \frac{(-12r^3 + 36dr^2 - 60d^2 r + 44d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_B \\
& + \frac{3a^3 c_d^3 m_A^4}{96c_{h1}^3} \\
& - \left[\frac{\left\{ (12a^2 r - 12a^2 d) \cdot c_{h1} - 4a^2 d c_{h2} \right\} \cdot c_d^2 - 6a^3 c_d^3 \right] \cdot m_A^3}{96c_{h1}^3} \\
& - \left[\frac{-3a^3 c_d^3 + \left\{ (18a^2 r - 18a^2 d) \cdot c_{h1} - 6a^2 d c_{h2} \right\} \cdot c_{h1}^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\left\{ -6ad^2 c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1} c_{h2} + (-18ar^2 + 36adr - 30ad^2) \cdot c_{h1}^2 \right\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_A^2 \\
& - \left[\frac{\left\{ (6a^2 r - 6a^2 d) \cdot c_{h1} - 2a^2 d c_{h2} \right\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \frac{\left\{ -6ad^2 c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1} c_{h2} + (-18ar^2 + 36adr - 30ad^2) \cdot c_{h1}^2 \right\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \\
& + \left. \frac{8d^3 c_{h2}^3 + (12d^2 r - 12d^3) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (24d^2 r - 12dr^2) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}}{96c_{h1}^3} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left. \frac{(12r^3 - 36dr^2 + 60d^2r - 44d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_A \\
& \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \right. \\
& \quad + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \\
& \quad + \int_{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a - r + 2 \cdot d}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \\
& \quad \left. + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right] \\
& = - \frac{11a^3 c_d^3 m_C^4 + [22a^3 c_d^3 + \{44a^2 d - 44a^2 r\} c_{h1} - 12a^2 d c_{h2}] \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \cdot m_C^3 \\
& \quad - \left[\frac{11a^3 c_d^3 + \{66a^2 d - 66a^2 r\} c_{h1} - 18a^2 d c_{h2}}{96c_{h1}^3} \cdot c_d^2 \right. \\
& \quad \left. + \frac{\{18ad^2 c_{h2}^2 + (36adr - 36ad^2) \cdot c_{h1} c_{h2} + (66ar^2 - 132adr + 66ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_C^2 \\
& \quad - \left[\frac{\{22a^2 d - 22a^2 r\} \cdot c_{h1} - 6a^2 d c_{h2}}{96c_{h1}^3} \cdot c_d^2 \right. \\
& \quad \left. + \frac{\{18ad^2 c_{h2}^2 + (36adr - 36ad^2) \cdot c_{h1} c_{h2} + (66ar^2 - 132adr + 66ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right. \\
& \quad \left. + \frac{-12d^3 c_{h2}^3 + (36d^3 - 36d^2 r) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (-36dr^2 + 72d^2 r - 36d^3) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}}{96c_{h1}^3} \right. \\
& \quad \left. + \frac{(-44r^3 + 132dr^2 - 132d^2 r + 44d^3) c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_C \\
& \quad + \frac{11a^3 c_d^3 m_C^4 - [12a^2 d c_{h2} + (44a^2 r - 44a^2 d) c_{h1}] \cdot c_d^2 - 22a^3 c_d^3}{96c_{h1}^3} \cdot m_C^3 \\
& \quad - \left[\frac{-11a^3 c_d^3 + \{18a^2 d c_{h2} + (66a^2 r - 66a^2 d) c_{h1}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left[\frac{\{-18ad^2c_{h_2}^2 + (36ad^2 - 36adr) \cdot c_{h_1}c_{h_2} + (-66ar^2 + 132adr - 66ad^2) \cdot c_{h_1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h_1}^3} \right] \cdot m_B^2 \\
 & - \left[\frac{\{6a^2dc_{h_2} + (22a^2r - 22a^2d) \cdot c_{h_1}\} \cdot c_d^2}{96c_{h_1}^3} \right. \\
 & + \frac{\{-18ad^2c_{h_2}^2 + (36ad^2 - 36adr) \cdot c_{h_1}c_{h_2} + (-66ar^2 + 132adr - 66ad^2) \cdot c_{h_1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h_1}^3} \\
 & + \frac{12d^3c_{h_2}^3 + (36d^2r - 36d^3) \cdot c_{h_1}c_{h_2}^2 + (36dr^2 - 72d^2r + 36d^3) \cdot c_{h_1}^2c_{h_2}}{96c_{h_1}^3} \\
 & \left. + \frac{(44r^3 - 132dr^2 + 132d^2r - 44d^3)c_{h_1}^3}{96c_{h_1}^3} \right] \cdot m_B \\
 & \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h_1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h_2}}{c_{h_1}} \right) \right\}} \right. \\
 & \left. + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h_1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h_2}}{c_{h_1}} \right) \right\}}^{\frac{c_d}{c_{h_1}} (k-1)a + r - d \left(1 - \frac{c_{h_2}}{c_{h_1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h_1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h_2}}{c_{h_1}} \right) \right\} \cdot x dx \right] \\
 & = - \frac{a^3c_d^3m_D^4 + [2a^3c_d^3 + \{(4a^2d - 4a^2r) \cdot c_{h_1} - 4a^2dc_{h_2}\} \cdot c_d^2] \cdot m_D^3}{32c_{h_1}^3} \\
 & - \left[\frac{a^3c_d^3 + \{(6a^2d - 6a^2r) \cdot c_{h_1} - 6a^2dc_{h_2}\} \cdot c_d^2}{32c_{h_1}^3} \right. \\
 & + \frac{\{6ad^2c_{h_2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h_1}c_{h_2} + (6ar^2 - 12adr + 6ad^2) \cdot c_{h_1}^2\} \cdot c_d}{32c_{h_1}^3} \left. \right] \cdot m_D^2 \\
 & - \left[\frac{\{(2a^2d - 2a^2r) \cdot c_{h_1} - 2a^2dc_{h_2}\} \cdot c_d^2}{32c_{h_1}^3} \right. \\
 & + \frac{\{6ad^2c_{h_2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h_1}c_{h_2} + (6ar^2 - 12adr + 6ad^2) \cdot c_{h_1}^2\} \cdot c_d}{32c_{h_1}^3} \\
 & + \frac{-4d^3c_{h_2}^3 + (12d^3 - 12d^2r) \cdot c_{h_1}c_{h_2}^2 + (-12dr^2 + 24d^2r - 12d^3) \cdot c_{h_1}^2c_{h_2}}{32c_{h_1}^3} \\
 & \left. + \frac{(-4r^3 + 12dr^2 - 12d^2r + 4r^3) \cdot c_{h_1}^3}{32c_{h_1}^3} \right] \cdot m_D
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{a^3 c_d^3 m_C^4 + \left[\{4a^2 d c_{h2} + (4a^2 r - 4a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2 - 2a^3 c_d^3 \right] \cdot m_C^3}{32c_{h1}^3} \\
& - \left[\frac{-a^3 c_d^3 + \{6a^2 d c_{h2} + (6a^2 r - 6a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2}{32c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\{ -6ad^2 c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (-6ar^2 + 12adr - 6ad^2) \cdot c_{h1}^2 \} \cdot c_d}{32c_{h1}^3} \right] \cdot m_C^2 \\
& - \left[\frac{\{2a^2 d c_{h2} + (2a^2 r - 2a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2}{32c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\{ -6ad^2 c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (-6ar^2 + 12adr - 6ad^2) \cdot c_{h1}^2 \} \cdot c_d}{32c_{h1}^3} \right. \\
& + \frac{4d^3 c_{h2}^3 + (12d^2 r - 12d^3) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (12dr^2 - 24d^2 r + 12d^3) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}}{32c_{h1}^3} \\
& \left. + \frac{(4r^3 - 12dr^2 + 12d^2 r - 4r^3) \cdot c_{h1}^3}{32c_{h1}^3} \right] \cdot m_C
\end{aligned}$$

1-2. 徒歩による水平方向の移動 (y 軸方向)

$$\begin{aligned}
& c_{h1} \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_A+1} \int_0^{\left\{ \frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + r}{c_{h1}} \right\} \frac{1}{2}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - y \right\} \cdot y dy \right) \\
& + \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + d \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d}{c_{h1}}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
& + \left. \int_{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + d \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d}{c_{h1}}}^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \right\} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
& + \left. \int_{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + d \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d}{c_{h1}}}^{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a - d + r}{c_{h1}}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \right] \\
& + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \right\} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \int_0^{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a - d + r}{c_{h1}}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \Bigg] \\
& + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)}{c_{h1}}}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right]
\end{aligned}$$

各和の値は、次の通りとなる。

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{m_A+1} \int_0^{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + r}{c_{h1}}} \frac{1}{2} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - y \right\} \cdot y dy \\
& = \frac{a^3 c_d^3 m_A^4 + (2a^3 c_d^3 - 4a^2 r c_{h1} c_d^2) \cdot m_A^3 + (a^3 c_d^3 - 6a^2 r c_{h1} c_d^2 + 6ar^2 c_{h1}^2 c_d) \cdot m_A^2}{96c_{h1}^3} \\
& \quad + \frac{(-2a^2 r c_{h1} c_d^2 + 6ar^2 c_{h1}^2 c_d - 4r^3 c_{h1}^3) \cdot m_A - 4r^3 c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \\
& \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d}{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d}{c_{h1}}}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
& \quad + \int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d}{c_{h1}}}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \\
& \quad + \int_0^{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a - d + r}{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d}{c_{h1}}}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) \right. \\
& \quad \left. \left. - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \right] \\
& = -\frac{a^3 c_d^3 m_B^4 + [2a^3 c_d^3 + \{12a^2 d c_{h2} + (-4a^2 r - 12a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2] \cdot m_B^3}{96c_{h1}^3} \\
& \quad - \frac{[a^3 c_d^3 + \{18a^2 d c_{h2} + (-6a^2 r - 18a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2]}{96c_{h1}^3} \\
& \quad + \frac{\{ -6ad^2 c_{h2}^2 + (60ad^2 - 36adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (6ar^2 + 36adr - 54ad^2) \cdot c_{h1}^2 \} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \cdot m_B^2 \\
& \quad - \frac{[6a^2 d c_{h2} + (-2a^2 r - 6a^2 d) \cdot c_{h1}] \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \\
& \quad + \frac{\{ -6ad^2 c_{h2}^2 + (60ad^2 - 36adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (6ar^2 + 36adr - 54ad^2) \cdot c_{h1}^2 \} \cdot c_d}{96c_{h1}^3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{(12d^2r - 24d^3) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (36dr^2 - 120d^2r + 96d^3) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}}{96c_{h1}^3} \\
& + \frac{(-4r^3 - 36dr^2 + 108d^2r - 72d^3) c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \Big] \cdot m_B \\
& + \frac{a^3 c_d^3 m_A^4 - \left[\left\{ (4a^2r + 12a^2d) \cdot c_{h1} - 12a^2 d c_{h2} \right\} \cdot c_d^2 - 2a^3 c_d^3 \right] \cdot m_B^3}{96c_{h1}^3} \\
& - \left[\frac{-a^3 c_d^3 + \left\{ (6a^2r + 18a^2d) \cdot c_{h1} - 18a^2 d c_{h2} \right\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\left\{ 6ad^2 c_{h2}^2 + (36adr - 60ad^2) \cdot c_{h1} c_{h2} + (-6ar^2 - 36adr + 54ad^2) \cdot c_{h1}^2 \right\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_A^2 \\
& - \left[\frac{\left\{ (2a^2r + 6a^2d) \cdot c_{h1} - 6a^2 d c_{h2} \right\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\left\{ 6ad^2 c_{h2}^2 + (36adr - 60ad^2) \cdot c_{h1} c_{h2} + (-6ar^2 - 36adr + 54ad^2) \cdot c_{h1}^2 \right\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{(24d^3 - 12d^2r) c_{h1} c_{h2}^2 + (-36dr^2 + 120d^2r - 96d^3) c_{h1}^2 c_{h2}}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{(4r^3 + 36dr^2 - 108d^2r + 72d^3) c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_A \\
& \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d \cdot (k-1)a+r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}{c_{h1}}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
& + \left. \int_0^{\frac{c_d \cdot (k-1)a-d+r}{c_{h1}}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \right] \\
& = - \frac{9a^3 c_d^3 m_C^4 + \left[18a^3 c_d^3 + \left\{ (36a^2d - 36a^2r) \cdot c_{h1} - 4a^2 d c_{h2} \right\} \cdot c_d^2 \right] \cdot m_C^3}{96c_{h1}^3} \\
& - \left[\frac{9a^3 c_d^3 + \left\{ (54a^2d - 54a^2r) \cdot c_{h1} - 6a^2 d c_{h2} \right\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\left\{ 6ad^2 c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1} c_{h2} + (54ar^2 - 108adr + 54ad^2) \cdot c_{h1}^2 \right\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_C^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \left[\frac{\{(18a^2d - 18a^2r) \cdot c_{h1} - 2a^2dc_{h2}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
 & + \frac{\{6ad^2c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1}c_{h2} + (54ar^2 - 108adr + 54ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \\
 & + \frac{-4d^3c_{h2}^3 + (12d^3 - 12d^2r) \cdot c_{h1}c_{h2}^2 + (-12dr^2 + 24d^2r - 12d^3) \cdot c_{h1}^2c_{h2}}{96c_{h1}^3} \\
 & \left. + \frac{(-36r^3 + 108dr^2 - 108d^2r + 36d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_C \\
 & + \frac{9a^3c_d^3m_B^4 - \{4a^2dc_{h2} + (36a^2r - 36a^2d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2 - 18a^3c_d^3}{96c_{h1}^3} \\
 & - \left[\frac{-9a^3c_d^3 + \{6a^2dc_{h2} + (54a^2r - 54a^2d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
 & \left. + \frac{\{-6ad^2c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1}c_{h2} + (-54ar^2 + 108adr - 54ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_B^2 \\
 & - \left[\frac{\{2a^2dc_{h2} + (18a^2r - 18a^2d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
 & + \frac{\{-6ad^2c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1}c_{h2} + (-54ar^2 + 108adr - 54ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \\
 & + \frac{4d^3c_{h2}^3 + (12d^2r - 12d^3) \cdot c_{h1}c_{h2}^2 + (12dr^2 - 24d^2r + 12d^3) \cdot c_{h1}^2}{96c_{h1}^3} \\
 & \left. + \frac{(36r^3 - 108dr^2 + 108d^2r - 36d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_B \\
 & \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\int_0^1 \left\{ \frac{1}{c_{h1}} \left[-\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}{c_{h1}} \right] \right\} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
 & \left. + \int_0^{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a - d + r}{c_{h1}}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \right] \\
 & = - \frac{9a^3c_d^3m_C^4 + [18a^3c_d^3 + \{(36a^2d - 36a^2r) \cdot c_{h1} - 4a^2dc_{h2}\} \cdot c_d^2] \cdot m_C^3}{96c_{h1}^3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \left[\frac{9a^3c_d^3 + \{(54a^2d - 54a^2r) \cdot c_{h1} - 6a^2dc_{h2}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\{6ad^2c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1}c_{h2} + (54ar^2 - 108adr + 54ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_C^2 \\
& - \left[\frac{\{(18a^2d - 18a^2r) \cdot c_{h1} - 2a^2dc_{h2}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\{6ad^2c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1}c_{h2} + (54ar^2 - 108adr + 54ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \frac{-4d^3c_{h2}^3 + (12d^3 - 12d^2r) \cdot c_{h1}c_{h2}^2 + (-12dr^2 + 24d^2r - 12d^3) \cdot c_{h1}^2c_{h2}}{96c_{h1}^3} \\
& + \left. \frac{(-36r^3 + 108dr^2 - 108d^2r + 36d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_C \\
& + \frac{9a^3c_d^3m_B^4 - \{4a^2dc_{h2} + (36a^2r - 36a^2d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2 - 18a^3c_d^3}{96c_{h1}^3} \\
& - \left[\frac{-9a^3c_d^3 + \{6a^2dc_{h2} + (54a^2r - 54a^2d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\{-6ad^2c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1}c_{h2} + (-54ar^2 + 108adr - 54ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_B^2 \\
& - \left[\frac{\{2a^2dc_{h2} + (18a^2r - 18a^2d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\{-6ad^2c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1}c_{h2} + (-54ar^2 + 108adr - 54ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \frac{4d^3c_{h2}^3 + (12d^2r - 12d^3) \cdot c_{h1}c_{h2}^2 + (12dr^2 - 24d^2r + 12d^3) \cdot c_{h1}^2}{96c_{h1}^3} \\
& + \left. \frac{(36r^3 - 108dr^2 + 108d^2r - 36d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_B
\end{aligned}$$

② 垂直方向の移動

$$c_d \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_d+1} \frac{1}{4} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right)^2 \cdot (k-1) \cdot a \right)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} \left[\frac{c_d^2 \cdot z^2 + \{2 \cdot (c_{h2} - c_{h1}) \cdot c_d \cdot d - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{c_{h1}^2 \cdot r^2 + (c_{h1}^2 - c_{h1} \cdot c_{h2}) \cdot (2 \cdot d \cdot r - 4 \cdot d^2)}{4 \cdot c_{h1}^2} \right] \cdot (k-1) \cdot a \\
& + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{(10 \cdot c_{h1} - 2 \cdot c_{h2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + 5 \cdot c_{h1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{(2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r + (c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right] \cdot (k-1) \cdot a \\
& + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 \cdot (k-1) \cdot a
\end{aligned}$$

各和の値は、次の通りとなる。

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{m_A+1} \frac{1}{4} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right)^2 \cdot (k-1) \cdot a \\
& = \frac{3a^3 c_d^2 m_A^4 + (6a^3 c_d^2 - 8a^2 r c_{h1} c_d) \cdot m_A^3 + (3a^3 c_d^2 - 12a^2 r c_{h1} c_d + 6ar^2 c_{h1}^2) \cdot m_A^2}{48c_{h1}^2} \\
& + \frac{(6ar^2 c_{h1}^2 - 4a^2 r c_{h1} c_d) \cdot m_A}{48c_{h1}^2} \\
& \sum_{k=m_A+2}^{m_B+1} \left[\frac{c_d^2 \cdot z^2 + \{2 \cdot (c_{h2} - c_{h1}) \cdot c_d \cdot d - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{c_{h1}^2 \cdot r^2 + (c_{h1}^2 - c_{h1} \cdot c_{h2}) \cdot (2 \cdot d \cdot r - 4 \cdot d^2)}{4 \cdot c_{h1}^2} \right] \cdot (k-1) \cdot a \\
& = \frac{3a^3 c_d^2 m_B^4 + [6a^3 c_d^2 + \{8a^2 d c_{h2} + (-8a^2 r - 8a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d] \cdot m_B^3}{48c_{h1}^2} \\
& + \left[\frac{3a^3 c_d^2 + \{12a^2 d c_{h2} + (-12a^2 r - 12a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{(24ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (6ar^2 + 12adr - 24ad^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \right] \cdot m_B^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\frac{\{4a^2dc_{h_2} + (-4a^2r - 4a^2d) \cdot c_{h_1}\} \cdot c_d}{48c_{h_1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{(24ad^2 - 12adr) \cdot c_{h_1}c_{h_2} + (6ar^2 + 12adr - 24ad^2) \cdot c_{h_1}^2}{48c_{h_1}^2} \right] \cdot m_B \\
& + \frac{-3a^3c_d^2m_A^4 + [\{(8a^2r + 8a^2d) \cdot c_{h_1} - 8a^2dc_{h_2}\} \cdot c_d - 6a^3c_d^2] \cdot m_A^3}{48c_{h_1}^2} \\
& + \left[\frac{-3a^3c_d^2 + \{(12a^2r + 12a^2d) \cdot c_{h_1} - 12a^2dc_{h_2}\} \cdot c_d}{48c_{h_1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{(12adr - 24ad^2) \cdot c_{h_1}c_{h_2} + (-6ar^2 - 12adr + 24ad^2) \cdot c_{h_1}^2}{48c_{h_1}^2} \right] \cdot m_A^2 \\
& + \left[\frac{\{(4a^2r + 4a^2d) \cdot c_{h_1} - 4a^2dc_{h_2}\} \cdot c_d}{48c_{h_1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{(12adr - 24ad^2) \cdot c_{h_1}c_{h_2} + (-6ar^2 - 12adr + 24ad^2) \cdot c_{h_1}^2}{48c_{h_1}^2} \right] \cdot m_A \\
& \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\left\{ \frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{(10 \cdot c_{h_1} - 2 \cdot c_{h_2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h_1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + 5 \cdot c_{h_1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h_1}^2} \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{(2 \cdot c_{h_1} \cdot c_{h_2} - 10 \cdot c_{h_1}^2) \cdot d \cdot r + (c_{h_2}^2 - 2 \cdot c_{h_1} \cdot c_{h_2} + 5 \cdot c_{h_1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h_1}^2} \right\} \cdot (k-1) \cdot a \right] \\
& = \frac{15a^3c_d^2m_C^4 + [30a^3c_d^2 + \{(40a^2d - 40a^2r) \cdot c_{h_1} - 8a^2dc_{h_2}\} \cdot c_d] \cdot m_C^3}{48c_{h_1}^2} \\
& + \left[\frac{15a^3c_d^2 + \{(60a^2d - 60a^2r) \cdot c_{h_1} - 12a^2dc_{h_2}\} \cdot c_d}{48c_{h_1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{6ad^2c_{h_2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h_1}c_{h_2} + (30ar^2 - 60adr + 30ad^2) \cdot c_{h_1}^2}{48c_{h_1}^2} \right] \cdot m_C^2 \\
& + \left[\frac{\{(20a^2d - 20a^2r) \cdot c_{h_1} - 4a^2dc_{h_2}\} \cdot c_d}{48c_{h_1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{6ad^2c_{h_2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h_1}c_{h_2} + (30ar^2 - 60adr + 30ad^2) \cdot c_{h_1}^2}{48c_{h_1}^2} \right] \cdot m_C
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{-15a^3c_d^2m_B^4 + \left[\{8a^2dc_{h2} + (40a^2r - 40a^2d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d - 30a^3c_d^2 \right] \cdot m_B^3}{48c_{h1}^2} \\
& + \frac{-15a^3c_d^2 + \{12a^2dc_{h2} + (60a^2r - 60a^2d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \\
& + \left[\frac{-6ad^2c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1}c_{h2} + (-30ar^2 + 60adr - 30ad^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \right] \cdot m_B^2 \\
& + \left[\frac{\{4a^2dc_{h2} + (20a^2r - 20a^2d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \right. \\
& \left. + \frac{-6ad^2c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1}c_{h2} + (-30ar^2 + 60adr - 30ad^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \right] \cdot m_B^2 \\
& \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 \cdot (k-1) \cdot a \\
& = \frac{3a^3c_d^2m_D^4 + \left[6a^3c_d^2 + \{8a^2d - 8a^2r\} \cdot c_{h1} - 8a^2dc_{h2} \right] \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \cdot m_D^3 \\
& + \left[\frac{3a^3c_d^2 + \{12a^2d - 12a^2r\} \cdot c_{h1} - 12a^2dc_{h2} \right] \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \\
& + \left[\frac{6ad^2c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1}c_{h2} + (6ar^2 - 12adr + 6ad^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \right] \cdot m_D^2 \\
& + \left[\frac{\{4a^2d - 4a^2r\} \cdot c_{h1} - 4a^2dc_{h2} \right] \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \\
& + \left[\frac{6ad^2c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1}c_{h2} + (6ar^2 - 12adr + 6ad^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \right] \cdot m_C \\
& + \frac{-3a^3c_d^2m_C^4 + \left[8a^2dc_{h2} + (8a^2r - 8a^2d) \cdot c_{h1} \right] \cdot c_d - 6a^3c_d^2}{48c_{h1}^2} \cdot m_C^3 \\
& + \frac{-3a^3c_d^2 + \{12a^2dc_{h2} + (12a^2r - 12a^2d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \\
& + \left[\frac{-6ad^2c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1}c_{h2} + (-6ar^2 + 12adr - 6ad^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \right] \cdot m_C^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\frac{\{4a^2dc_{h2} + (4a^2r - 4a^2d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \right. \\
& \left. + \frac{-6ad^2c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1}c_{h2} + (-6ar^2 + 12adr - 6ad^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \right] \cdot m_c
\end{aligned}$$

③ バスによる水平方向の移動

$$c_{h2} \cdot V \cdot d$$

(補足 29)

$\frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \leq r < 2 \cdot d$ について、第一象限かつ $y \leq x$ について、1次拠点を経由し

て2次拠点へ移動する人口 (V) は次の通りである。

$$\begin{aligned}
 V = & \sum_{k=1}^{m_c+1} \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right)^2 \\
 & + \sum_{k=1}^{m_B+1} \frac{1}{2} \cdot \left[\left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right) + \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) \right] \\
 & \quad \cdot \left[d - \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right] \\
 & + \sum_{k=m_B+2}^{m_c+1} \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right)^2
 \end{aligned}$$

1つ目の項の値は、次の通り。

$$\begin{aligned}
 & \sum_{k=1}^{m_c+1} \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right)^2 \\
 = & \frac{2a^2 c_d^2 m_c^3 + \{3a^2 c_d^2 + (6ad - 6ar)c_{h1} c_d\} \cdot m_c^2}{12c_{h1}^2} \\
 & + \frac{\{a^2 c_d^2 + (6ad - 6ar)c_{h1} c_d + (6r^2 - 12dr + 6d^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot m_c}{12c_{h1}^2} \\
 & + \frac{(6r^2 - 12dr + 6d^2) \cdot c_{h1}^2}{12c_{h1}^2}
 \end{aligned}$$

2つ目の項と3つ目の項については、補足 27 を参照。

(補足 30)

$$\frac{1}{8} \cdot D = \sum_{k=1}^{m_B+1} s_{m_S-m_B} + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} s_{m_B-m_C} + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} s_{m_C-m_D}$$

1 つ目の項の値は、次の通り。

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{m_B+1} s_{m_S-m_B} &= \frac{2a^2c_d^2m_B^3 + [3a^2c_d^2 + \{6adc_{h2} + (-6ar - 6ad) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d] \cdot m_B^2}{24c_{h1}^2} \\ &\quad + \frac{[a^2c_d^2 + \{6adc_{h2} + (-6ar - 6ad) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d]}{24c_{h1}^2} \\ &\quad + \frac{(24d^2 - 12dr) \cdot c_{h1}c_{h2} + (6r^2 + 12dr - 24d^2) \cdot c_{h1}^2}{24c_{h1}^2} \cdot m_B \\ &\quad + \frac{(24d^2 - 12dr)c_{h1}c_{h2} + (6r^2 + 12dr - 24d^2) \cdot c_{h1}^2}{24c_{h1}^2} \end{aligned}$$

2 つ目の項と 3 つ目の項については、補足 26 を参照。

(補足 31)

総移動コストは、以下の3種類の移動からなる。①徒歩による水平方向の移動、②垂直方向の移動、③バスによる水平方向の移動。それぞれにおける移動コストは、以下の通り。

① 徒歩による水平方向の移動

1-1. 徒歩による水平方向の移動 (x 軸方向)

$$\begin{aligned}
& c_{h1} \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \right. \\
& \quad + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}^{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \\
& \quad + \int_{\frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \\
& \quad \left. + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right] \\
& + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
& \quad + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \\
& \quad + \int_{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a - r + 2 \cdot d}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \\
& \quad \left. + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right] \\
& + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
& \quad \left. + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r - d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \right]
\end{aligned}$$

1つ目の項の値は、次の通り。

$$\sum_{k=1}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \int \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \\
& + \int \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \\
& + \int \frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + r}{d} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \Big] \\
= & - \frac{3a^3 c_d^3 m_B^4 + [6a^3 c_d^3 + \{4a^2 d c_{h2} + (12a^2 d - 12a^2 r) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2] \cdot m_B^3}{96c_{h1}^3} \\
& - \left[\frac{3a^3 c_d^3 + \{6a^2 d c_{h2} + (18a^2 d - 18a^2 r) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\{6ad^2 c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (18ar^2 - 36adr + 30ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_B^2 \\
& - \left[\frac{\{2a^2 d c_{h2} + (6a^2 d - 6a^2 r) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\{6ad^2 c_{h2}^2 + (12ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (18ar^2 - 36adr + 30ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \frac{-8d^3 c_{h2}^3 + (12d^3 - 12d^2 r) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (12dr^2 - 24d^2 r) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}}{96c_{h1}^3} \\
& + \left. \frac{(-12r^3 + 36dr^2 - 60d^2 r + 44d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_B \\
& + \frac{-8d^3 c_{h2}^3 + (12d^3 - 12d^2 r) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (12dr^2 - 24d^2 r) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}}{96c_{h1}^3} \\
& + \frac{(-12r^3 + 36dr^2 - 60d^2 r + 44d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3}
\end{aligned}$$

2つ目の項と3つ目の項については、補足 28 を参照。

1-2. 徒歩による水平方向の移動 (y 軸方向)

$$c_{h1} \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{c_d \cdot (k-1) \cdot a + d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2d} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \int \frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1) a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \\
 & + \int \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1) a - d + r \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \Bigg] \\
 & + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1) a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
 & \left. + \int_0^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1) a - d + r} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \right] \\
 & + \sum_{k=m_C+2}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1) a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right] \Bigg]
 \end{aligned}$$

1つ目の項の値は、次の通り。

$$\begin{aligned}
 & \sum_{k=1}^{m_B+1} \left[\int_0^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1) a + \frac{d}{2} \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) + r - 2 \cdot d} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
 & \left. + \int \frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1) a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \\
 & \left. + \int \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1) a - d + r \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \right] \Bigg] \\
 & = -\frac{a^3 c_d^3 m_B^4 + [2a^3 c_d^3 + \{12a^2 d c_{h2} + (-4a^2 r - 12a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2] \cdot m_B^3}{96 c_{h1}^3} \\
 & - \frac{[a^3 c_d^3 + \{18a^2 d c_{h2} + (-6a^2 r - 18a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d^2]}{96 c_{h1}^3} \\
 & + \frac{\{ -6ad^2 c_{h2}^2 + (60ad^2 - 36adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (6ar^2 + 36adr - 54ad^2) \cdot c_{h1}^2 \} \cdot c_d}{96 c_{h1}^3} \cdot m_B^2 \\
 & - \frac{[6a^2 d c_{h2} + (-2a^2 r - 6a^2 d) \cdot c_{h1}] \cdot c_d^2}{96 c_{h1}^3} \\
 & + \frac{\{ -6ad^2 c_{h2}^2 + (60ad^2 - 36adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (6ar^2 + 36adr - 54ad^2) \cdot c_{h1}^2 \} \cdot c_d}{96 c_{h1}^3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{(12d^2r - 24d^3) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (36dr^2 - 120d^2r + 96d^3) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}}{96c_{h1}^3} \\
& + \left. \frac{(-4r^3 - 36dr^2 + 108d^2r - 72d^3) c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_B \\
& - \frac{(12d^2r - 24d^3) c_{h1} c_{h2}^2 + (36dr^2 - 120d^2r + 96d^3) c_{h1}^2 c_{h2}}{96c_{h1}^3} \\
& - \frac{(-4r^3 - 36dr^2 + 108d^2r - 72d^3) c_{h1}^3}{96c_{h1}^3}
\end{aligned}$$

2つ目の項と3つ目の項については、補足28を参照。

② 垂直方向の移動

$$\begin{aligned}
& c_d \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_B+1} \left[\frac{c_d^2 \cdot z^2 + \{2 \cdot (c_{h2} - c_{h1}) \cdot c_d \cdot d - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + c_{h1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \right. \\
& + \left. \left. \frac{(c_{h1}^2 - c_{h1} \cdot c_{h2}) \cdot (2 \cdot d \cdot r - 4 \cdot d^2)}{4 \cdot c_{h1}^2} \right] \cdot (k-1) \cdot a \right. \\
& + \sum_{k=m_B+2}^{m_C+1} \left[\left\{ \frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{10 \cdot c_{h1} - 2 \cdot c_{h2}\} \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \right. \\
& + \left. \left. \frac{(2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r + (c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right\} \cdot (k-1) \cdot a \right] \\
& + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 \cdot (k-1) \cdot a
\end{aligned}$$

1つ目の項の値は、次の通り。

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{m_B+1} \left(\frac{c_d^2 \cdot z^2 + \{2 \cdot (c_{h2} - c_{h1}) \cdot c_d \cdot d - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + c_{h1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{(c_{h1}^2 - c_{h1} \cdot c_{h2}) \cdot (2 \cdot d \cdot r - 4 \cdot d^2)}{4 \cdot c_{h1}^2} \right) \cdot (k-1) \cdot a \\
& = \frac{3a^3 c_d^2 m_B^4 + [6a^3 c_d^2 + \{8a^2 d c_{h2} + (-8a^2 r - 8a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d] \cdot m_B^3}{48c_{h1}^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\frac{3a^3 c_d^2 + \{12a^2 d c_{h2} + (-12a^2 r - 12a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{(24ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (6ar^2 + 12adr - 24ad^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \right] \cdot m_B^2 \\
& + \left[\frac{\{4a^2 d c_{h2} + (-4a^2 r - 4a^2 d) \cdot c_{h1}\} \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \right. \\
& + \left. \frac{(24ad^2 - 12adr) \cdot c_{h1} c_{h2} + (6ar^2 + 12adr - 24ad^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \right] \cdot m_B
\end{aligned}$$

2つ目の項と3つ目の項については、補足 28 を参照。

③ バスによる水平方向の移動

$$c_{h2} \cdot V \cdot d$$

(補足 32)

$r < \frac{d}{2} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ について、第一象限かつ $y \leq x$ について、1 次拠点を経由して 2

次拠点へ移動する人口 (V) は次の通りである。

$$V = \sum_{k=1}^{m_c+1} \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right)^2 + \sum_{k=1}^{m_c+1} \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \right)^2$$

各行の値は、補足 29 を参照。

(補足 33)

$$\frac{1}{8} \cdot D = \sum_{k=1}^{m_c+1} S_{m_B - m_C} + \sum_{k=m_c+2}^{m_D+1} S_{m_C - m_D}$$

1 つ目の項の値は、次の通り。

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{m_c+1} S_{m_B - m_C} &= \frac{10a^2 c_d^2 m_c^3 + [15a^2 c_d^2 + \{(30ad - 30ar) \cdot c_{h1} - 6adc_{h2}\} \cdot c_d] \cdot m_c^2}{24c_{h1}^2} \\ &+ \frac{[5a^2 c_d^2 + \{(30ad - 30ar) \cdot c_{h1} - 6adc_{h2}\} \cdot c_d + 6d^2 c_{h2}^2]}{24c_{h1}^2} \\ &+ \frac{(12ds - 12d^2)c_{h1}c_{h2} + (30r^2 - 60dr + 30d^2) \cdot c_{h1}^2}{24c_{h1}^2} \cdot m_c \\ &+ \frac{6d^2 c_{h2}^2 + (12ds - 12d^2)c_{h1}c_{h2} + (30r^2 - 60dr + 30d^2) \cdot c_{h1}^2}{24c_{h1}^2} \end{aligned}$$

2 つ目の項については、補足 26 を参照。

(補足 34)

総移動コストは、以下の3種類の移動からなる。①徒歩による水平方向の移動、②垂直方向の移動、③バスによる水平方向の移動。それぞれにおける移動コストは、以下の通り。

① 徒歩による水平方向の移動

1-1. 徒歩による水平方向の移動 (x 軸方向)

$$\begin{aligned}
& c_{h1} \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \right. \\
& \quad + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \\
& \quad + \int_{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a - r + 2 \cdot d}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \\
& \quad \left. + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right] \\
& + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
& \quad \left. + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \right]
\end{aligned}$$

1つ目の項の値は、次の通り。

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} x \cdot x dx \right. \\
& \quad + \int_{\frac{1}{2} \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + \frac{1}{2} \left\{ r-d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}}^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right)} \left\{ -x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\} \cdot x dx \\
& \quad + \int_{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a - r + 2 \cdot d}^d \left(x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r - 2 \cdot d \right) \cdot (d-x) dx \\
& \quad \left. + \int_d^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a + r} \left(-x - \frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + r \right) \cdot (x-d) dx \right] \\
& = -\frac{11a^3 c_d^3 m_C^4 + \left\{ 22a^3 c_d^3 + \left\{ (44a^2 d - 44a^2 r) \cdot c_{h1} - 12a^2 d c_{h2} \right\} \cdot c_d^2 \right\} \cdot m_C^3}{96c_{h1}^3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \left[\frac{11a^3c_d^3 + \{(66a^2d - 66a^2r) \cdot c_{h1} - 18a^2dc_{h2}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\{18ad^2c_{h2}^2 + (36adr - 36ad^2) \cdot c_{h1}c_{h2} + (66ar^2 - 132adr + 66ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_c^2 \\
& - \left[\frac{\{(22a^2d - 22a^2r) \cdot c_{h1} - 6a^2dc_{h2}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{\{18ad^2c_{h2}^2 + (36adr - 36ad^2) \cdot c_{h1}c_{h2} + (66ar^2 - 132adr + 66ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{-12d^3c_{h2}^3 + (36d^3 - 36d^2r) \cdot c_{h1}c_{h2}^2 + (-36dr^2 + 72d^2r - 36d^3) \cdot c_{h1}^2c_{h2}}{96c_{h1}^3} \right. \\
& + \left. \frac{(-44r^3 + 132dr^2 - 132d^2r + 44d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_C \\
& + \frac{12d^3c_{h2}^3 + (36d^2r - 36d^3) \cdot c_{h1}c_{h2}^2 + (36dr^2 - 72d^2r + 36d^3) \cdot c_{h1}^2c_{h2}}{96c_{h1}^3} \\
& + \frac{(44r^3 - 132dr^2 + 132d^2r - 44d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3}
\end{aligned}$$

2つ目の項については、補足 28 を参照。

1 - 2. 徒歩による水平方向の移動 (y 軸方向)

$$\begin{aligned}
& c_{h1} \cdot \left[\sum_{k=1}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a+r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right. \right. \\
& + \left. \int_0^{\frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a-d+r} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \right] \\
& + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a+r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right]
\end{aligned}$$

1つ目の項の値は、次の通り。

$$\sum_{k=1}^{m_C+1} \left[\int_0^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{c_d}{c_{h1}} (k-1)a+r-d \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right) - y \right\} \cdot y dy \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \int_0^{\frac{c_d}{c_{h1}}(k-1)a-d+r} \left\{ \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a - y + r \right) - \left(\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot (k-1) \cdot a + y - r + 2 \cdot d \right) \right\} \cdot y dy \Bigg] \\
& = -\frac{9a^3 c_d^3 m_C^4 + [18a^3 c_d^3 + \{(36a^2 d - 36a^2 r) \cdot c_{h1} - 4a^2 d c_{h2}\} \cdot c_d^2] \cdot m_C^3}{96c_{h1}^3} \\
& \quad - \left[\frac{9a^3 c_d^3 + \{(54a^2 d - 54a^2 r) \cdot c_{h1} - 6a^2 d c_{h2}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& \quad \left. + \frac{\{6ad^2 c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1} c_{h2} + (54ar^2 - 108adr + 54ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_C^2 \\
& \quad - \left[\frac{\{(18a^2 d - 18a^2 r) \cdot c_{h1} - 2a^2 d c_{h2}\} \cdot c_d^2}{96c_{h1}^3} \right. \\
& \quad \left. + \frac{\{6ad^2 c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1} c_{h2} + (54ar^2 - 108adr + 54ad^2) \cdot c_{h1}^2\} \cdot c_d}{96c_{h1}^3} \right. \\
& \quad \left. + \frac{-4d^3 c_{h2}^3 + (12d^3 - 12d^2 r) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (-12dr^2 + 24d^2 r - 12d^3) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}}{96c_{h1}^3} \right. \\
& \quad \left. + \frac{(-36r^3 + 108dr^2 - 108d^2 r + 36d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3} \right] \cdot m_C \\
& \quad + \frac{4d^3 c_{h2}^3 + (12d^2 r - 12d^3) \cdot c_{h1} c_{h2}^2 + (12dr^2 - 24d^2 r + 12d^3) \cdot c_{h1}^2 c_{h2}}{96c_{h1}^3} \\
& \quad + \frac{(36r^3 - 108dr^2 + 108d^2 r - 36d^3) \cdot c_{h1}^3}{96c_{h1}^3}
\end{aligned}$$

2つ目の項については、補足 28 を参照。

② 垂直方向の移動

$$\begin{aligned}
& c_d \cdot \left(\sum_{k=1}^{m_C+1} \left[\frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{(10 \cdot c_{h1} - 2 \cdot c_{h2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + 5 \cdot c_{h1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{(2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r + (c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right] \cdot (k-1) \cdot a \right) \\
& + \sum_{k=m_C+2}^{m_D+1} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + r - d \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}} \right) \right\}^2 \cdot (k-1) \cdot a
\end{aligned}$$

1 つ目の項の値は、次の通り。

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{m_C+1} \left[\left\{ \frac{5 \cdot c_d^2 \cdot z^2 + \{(10 \cdot c_{h1} - 2 \cdot c_{h2}) \cdot c_d \cdot d - 10 \cdot c_{h1} \cdot c_d \cdot r\} \cdot z + 5 \cdot c_{h1}^2 \cdot r^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{(2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} - 10 \cdot c_{h1}^2) \cdot d \cdot r + (c_{h2}^2 - 2 \cdot c_{h1} \cdot c_{h2} + 5 \cdot c_{h1}^2) \cdot d^2}{4 \cdot c_{h1}^2} \right\} \cdot (k-1) \cdot a \right] \\
& = \frac{15a^3 c_d^2 m_C^4 + [30a^3 c_d^2 + \{(40a^2 d - 40a^2 r) \cdot c_{h1} - 8a^2 d c_{h2}\} \cdot c_d] \cdot m_C^3}{48c_{h1}^2} \\
& \quad + \left[\frac{15a^3 c_d^2 + \{(60a^2 d - 60a^2 r) \cdot c_{h1} - 12a^2 d c_{h2}\} \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \right. \\
& \quad \left. + \frac{6ad^2 c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1} c_{h2} + (30ar^2 - 60adr + 30ad^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \right] \cdot m_C^2 \\
& \quad + \left[\frac{\{(20a^2 d - 20a^2 r) \cdot c_{h1} - 4a^2 d c_{h2}\} \cdot c_d}{48c_{h1}^2} \right. \\
& \quad \left. + \frac{6ad^2 c_{h2}^2 + (12adr - 12ad^2) \cdot c_{h1} c_{h2} + (30ar^2 - 60adr + 30ad^2) \cdot c_{h1}^2}{48c_{h1}^2} \right] \cdot m_C
\end{aligned}$$

2 つ目の項については、補足 28 を参照。

③ バスによる水平方向の移動

$$c_{h2} \cdot V \cdot d$$

図一覧

図 1.1-1	田園都市のイメージ	2
図 1.1-2	近隣住区のイメージ	2
図 1.1-3	コンパクト・シティのイメージ	3
図 1.1-4	コンパクト+ネットワーク	5
図 1.1-5	小さな拠点	5
図 1.2-1	垂直方向の空間の捉え方	10
図 1.3-1	建物間の移動	11
図 1.4-1	論文の構成	15
図 2.1-1	コンパクトな都市のイメージ	19
図 2.2-1	コンパクトシティ・システム	21
図 2.3.1-1	2次元都市モデル	23
図 2.3.2-1	3次元都市モデル	24
図 2.4-1	パラメータの定義	26
図 3.1.1-1	2次元都市モデルにおける拠点が1つの場合の移動方法	30
図 3.1.1-2	拠点が1つの場合の最適な2次元都市モデル	34
図 3.1.2-1	2次元都市モデルにおける拠点が複数の場合の移動方法	35
図 3.1.2-2	2次元都市モデルのボロノイ図	36
図 3.1.2-3	多層の床を想定しない場合における拠点が複数の場合の最適な2次元都市モデル	44
図 3.2.1-1	床と階高のイメージ	50
図 3.2.1-2	1階の床面積と延床面積の関係	51
図 3.2.2-1	多層の床を想定する場合における拠点が複数の場合の最適な2次元都市モデル	53
図 4.1.1-1	3次元都市モデルにおける拠点が1つの場合の移動方法	59
図 4.1.1-2	多層の床を想定しない場合における拠点が1つの場合の最適な3次元都市モデル	65
図 4.1.2-1	3次元都市モデルにおける拠点が複数の場合の移動方法	66
図 4.1.2-2	3次元都市モデルのボロノイ図	67
図 4.1.2-3	積分範囲①	76

図 4.1.2-4	屋根のかかり方①	76
図 4.1.2-5	積分範囲②	77
図 4.1.2-6	屋根のかかり方②	77
図 4.1.2-7	積分範囲③	78
図 4.1.2-8	屋根のかかり方③	78
図 4.1.2-9	積分範囲④	79
図 4.1.2-10	屋根のかかり方⑤	79
図 4.1.2-11	拠点間距離と都市域と都市形態の関係	80
図 4.1.2-12	多層の床を想定しない場合の x 軸上の断面図	82
図 4.1.2-13	多層の床を想定しない場合の $y=x$ 上の断面図	82
図 4.1.2-14	xy 平面①	83
図 4.1.2-15	xy 平面②	83
図 4.1.2-16	xy 平面③	84
図 4.1.2-17	xy 平面④	84
図 4.1.2-18	多層の床を想定しない場合において 1 次拠点を經由して 2 次拠点 へ移動する人口の分布	86
図 4.1.2-19	拠点間距離と総移動コストの関係	88
図 4.2.1-1	多層の床を想定する場合における拠点が 1 つの場合の最適な 3 次元 都市モデル	91
図 4.2.2-1	3 次元都市モデルにおける拠点が複数の場合の移動の考え方	93
図 4.2.2-2	$YN(x)$ が示す図形	97
図 4.2.2-3	多層の床を想定する場合の x 軸上の断面図	97
図 4.2.2-4	多層の床を想定する場合の $y=x$ 上の断面図	98
図 4.2.2-5	多層の床を想定する場合において 1 次拠点を經由して 2 次拠点へ移 動する人口の分布	100
図 5.1.1-1	2 次元都市モデルにおける最適な都市形態	111
図 5.1.1-2	2 次元都市モデルにおいて延床長さを変化させた場合の緒元の関係	116
図 5.1.1-3	2 次元都市モデルにおいて階高を変化させた場合の緒元の関係	117

図 5.1.1-4	2次元都市モデルにおいて垂直方向の移動コストを変化させた場合の緒元の関係	118
図 5.1.1-5	2次元都市モデルにおいてバスのコストを変化させた場合の緒元の関係	119
図 5.1.1-6	2次元都市モデルにおける拠点間距離と最高高さの関係	121
図 5.1.1-7	都市の包絡線	121
図 5.1.2-1	3次元都市モデルにおける最適な都市形態	123
図 5.1.2-2	3次元都市モデルにおいて延床面積を変化させた場合の緒元の関係	128
図 5.1.2-3	3次元都市モデルにおいて階高を変化させた場合の緒元の関係	129
図 5.1.2-4	3次元都市モデルにおいて垂直方向の移動コストを変化させた場合の緒元の関係	130
図 5.1.2-5	3次元都市モデルにおいてバスのコストを変化させた場合の緒元の関係	131
図 5.1.2-6	3次元都市モデルにおける拠点間距離と最高高さの関係	132
図 5.2-1	階数の表記	134
図 5.2-2	2次元都市モデルと3次元都市モデルの比較	135
図 5.3.1-1	多層の床の想定有無による都市の規模の考え方	138
図 5.4-1	単一拠点都市モデルと複数拠点都市モデル	145
図 5.5-1	現実の都市と2次元・3次元都市モデルの比較	148
図 5.6-1	東京バベルタワーと3次元都市モデルの比較	150

表一覧

表 2.4-1	移動コスト	25
表 5-1	比較・考察の対象とする都市モデル	109
表 5.1.1-1	2次元都市モデルにおいて延床長さを変化させた場合の計算結果	112
表 5.1.1-2	2次元都市モデルにおいて階高を変化させた場合の計算結果	113
表 5.1.1-3	2次元都市モデルにおいて垂直方向の移動コストを変化させた場合の計算結果	114
表 5.1.1-4	2次元都市モデルにおいてバスの移動コストを変化させた場合の計算結果	115
表 5.1.2-1	3次元都市モデルにおいて延床面積を変化させた場合の計算結果	124
表 5.1.2-2	3次元都市モデルにおいて階高を変化させた場合の計算結果	125
表 5.1.2-3	3次元都市モデルにおいて垂直方向の移動コストを変化させた場合の計算結果	126
表 5.1.2-4	3次元都市モデルにおいてバスの移動コストを変化させた場合の計算結果	127
表 5.2-1	2次元都市モデルと3次元都市モデルの比較	136
表 5.3.1-1	2次元都市モデルにおいて最適な都市形態を構成するための要素の値の比較	139
表 5.3.1-2	2次元都市モデルにおいて多層の床を想定しない場合に対する多層の床を想定した場合の都市形態の割合	140
表 5.3.2-1	3次元都市モデルにおいて最適な都市形態を構成するための要素の値の比較	142
表 5.3.2-2	3次元都市モデルにおいて多層の床を想定しない場合に対する多層の床を想定した場合の都市形態の割合	143
表 5.4-1	最適な都市形態の比較	144
表 5.4-2	単一拠点都市モデルに対する複数拠点都市モデルの割合	145
表 5.5-1	多摩市と床面積を合わせた場合の最適な都市形態	147

Abstract

As one item of Japanese urban planning, various policies are being developed under the key concept of “compact city.” For example, there is a document entitled “Grand Design of National Spatial Development towards 2050, Japan” published in July 2014. It includes two key concepts, “compactness and networks as prerequisites” and “diversity and collaboration as a precondition of regional development.” In this document, the following points are indicated in order to effectively provide various services. First, effective service delivery in a population-decreasing society requires geographical “compactification.” Second, it is necessary to achieve agglomeration advantages by networking regions, adapted to the urban functions of individual areas. Third, in order to create new value, it is necessary to promote interaction of people, things, and information through collaboration among multiple regions.

In this way, while much urban planning assuming the compact city is drafted, there is no clear definition of the compact city or a concrete index, and the social common understanding is also unclear. Moreover, there are only few studies specifically showing what urban form comprises the compact city or concretely analyzing the effect of achieving the compact city. Therefore, this study attempts to calculate this urban form in concrete fashion and quantitatively evaluate the compact city. The compact city assumed by this study is a city where urban functions are concentrated rather than being scattered in disorderly manner. Therefore, travel cost is considered for an index to measure the effect of the compact city. In addition, the optimal urban form is defined as an urban form that minimizes travel cost. This study also assumes a compact city system, which is a city structure where multiple small compact cities are interlinked and which represents a hierarchical spatial structure as observed in actual cities. Although the lack of city functions in terms of various services provided has been highlighted as a disadvantage of compact cities, we may be able to solve this problem by employing this city structure.

In this study, three points are considered for eight urban models. The first point is the dimensions of the model. In this study, a two-dimensional urban model and a three-dimensional urban model are assumed. The second point is a consideration of

multiple floors. A continuous urban model in the vertical direction without considering multiple floors and a non-continuous urban model in the vertical direction while considering multiple floors are assumed. The third point is the number of bases. An urban model that has one base and an urban model that has a certain number of bases are assumed. By these combinations, eight urban models are assumed. Using these urban models, the optimal urban form that minimizes travel cost is obtained and evaluated.

The contents of each chapter are summarized below.

In Chapter 1, the social background and purpose of this study are described. First, some past researches are investigated. Next, some problems in considering a compact city are explored. Based on these, the purpose of this study is elucidated.

In Chapter 2, the concept of the compact city is described. In addition, concepts and definitions of the urban models used in this study are explained.

In Chapter 3, the optimal urban form is obtained from the two-dimensional urban model that is assumed as a simple model.

In Chapter 4, the optimal urban form is obtained from the three-dimensional urban model that is similar to actual cities.

In Chapter 5, consideration is given from six points regarding the urban model obtained in Chapters 3 and 4. First, the characteristics of urban models are described by changing the parameters that determine the urban form. As a result, it is possible to reveal the relationship between the optimal inter-base distance and the maximum height in the urban model of any scale. Second, the two-dimensional urban model and the three-dimensional urban model are compared. As a result, the two-dimensional urban model and the three-dimensional urban model differ in their optimal urban form. Third, the urban model considering multiple floors and that not considering multiple floors are compared. As a result, the urban model considering multiple floors is more accurate. Fourth, the urban model composed of a single base and that composed of multiple bases are compared in order to evaluate the advantages of configuring a compact city system. From the viewpoint of minimizing travel cost, it can be said that the effect of configuring a compact city system composed of multiple bases is great.

Fifth, an actual city and the three-dimensional urban model are compared. As an actual city, Tama City in suburban Tokyo is selected as an example. As a result, it is revealed that the urban form is greatly different between the three-dimensional urban model and the actual city. The reason for this is certain external factors such as regulations and costs that are not considered in this study. Constructing an urban model that reflects these aspects is future work. Sixth, a virtual city and the three-dimensional urban model are compared. As a virtual city, Tokyo Babel Tower is selected as an example. As a result, it is revealed that the urban form of the three-dimensional urban model is similar to the lower part of Tokyo Babel Tower. However, if including the upper part of Tokyo Babel Tower, it is higher than the three-dimensional urban model.

In Chapter 6, knowledge obtained from Chapters 2 to 5 and the prospects of this study are summarized.

研究業績一覧

1. 論文（査読あり）

- ・ 近藤赳弘、吉川徹：多段階の公共交通機関と地域拠点の導入による平均移動時間最小化モデル、都市計画論文集、Vol.45、No.3、pp.139-144、2010
- ・ 近藤赳弘、吉川徹：移動コストを最小化する立体都市形態 階層的な生活域と交通手段の導入を仮定して、日本建築学会計画系論文集、No.675、pp.1087-1093、2012.5
- ・ 近藤赳弘、吉川徹：コンパクトシティ・システムを内包する3次元都市形態、日本建築学会計画系論文集、No.703、pp.1923-1931、2014.9
- ・ 階層的な空間構造を持つ線状都市における階高を考慮した最適都市形態 - 階高を考慮しない場合と比較して-、日本建築学会計画系論文集、Vol. 82、No.733、pp. 677-687、2017.3
- ・ Takehiro KONDO, Tohru YOSHIKAWA : Urban Form that Minimizes the Total Travel Cost Assuming Multiple Floors in a Three-Dimensional City with Two-Stage Hierarchical Bases、Urban and Regional Planning Review、Volume 5、pp.1-24、2018

2. 論文（査読なし）

- ・ 近藤赳弘、吉川徹：多段階の公共交通機関と拠点施設の導入による都市のコンパクト化の可能性、日本建築学会学術講演梗概集 F-1、都市計画、建築経済・住宅問題 2010、pp.1081-1082、2010.7
- ・ 近藤赳弘、吉川徹：コンパクトシティ・システムを内包する立体都市モデルにおける総移動コストの定式化—階層的な拠点と交通手段の導入を仮定して—、都市計画報告集、11、pp.15-19、2012.5

謝辞

本研究をまとめるに当たり、多くの方々に多大なご支援をいただきましたことを、ここに謝意を表します。

恩師、吉川徹先生（首都大学東京）には学部4年生で研究室に迎えていただき、学生時代の3年間に加え、社会人になってからも6年間ご指導いただきました。都市解析研究の学術的な指導に加え、歴史、経済、芸術、雑学、社会人としての在り方についてなど、様々な場面でご指導いただきました。特に社会人になってからは、休日にもかかわらず定期的に打合せをさせていただいたこと、とても感謝しています。9年間、多くのご迷惑と大変なお手数をおかけしてしまったことをお詫びするとともに、こうして論文をまとめることができるまでご指導してくださったことに深く感謝いたします。

学位論文を審査していただいた角田誠先生（首都大学東京）、飯塚裕介先生（大東文化大学）には、土曜日にも関わらず審査会を実施いただき、適切かつ貴重なご意見、ご助言を賜りました。省略していた前提条件や計算プロセス、説明なく使用していた用語や表現などについてもご指摘いただき、より分かりやすく研究をまとめることができました。また、時代の動向を踏まえたご指摘いただき、本研究の発展や、新たな研究の観点についても勉強させていただきました。

吉川研究室の先輩、同期、後輩には、とても多くの刺激をいただきました。特に、讃岐亮先生（首都大学東京）には、研究を始めた時から、研究の方針や手法など様々なアドバイスをいただきました。また、同期の上原洋八氏、後輩の鈴木達也氏には、学生時代に夜遅くまで研究につき合ってくださいました。研究の話だけではなく様々な話で盛り上がり、楽しく研究できた学生生活を送れたからこそ、社会人になってからも研究を続けることができました。

最後に、学生時代に学業に専念できる環境を作ってくれた両親と、仕事と研究の両立ができるよう物理的にも精神的にも支えてくれた妻に感謝します。

2019年2月

近藤 赳弘