

2023 年度（令和 5 年度） 修士論文

人工流星を用いた大気密度分布の 推定手法の確立

Observations of Atmosphere Using Artificial Meteors, Especially Atmospheric Density
Distribution

東京都立大学

システムデザイン研究科 システムデザイン専攻

航空宇宙システム工学域 博士前期課程

学修番号 22863629

氏名 茂木 千帆

指導教員 佐原 宏典 教授

2024 年（令和 6 年）1 月 26 日

摘要

高度 50km~200km の中層大気と呼ばれる領域では、地上における気候変動や気象予報、電波通信等、我々の日常生活に大きな影響を及ぼす現象が頻繁に起こっている。しかし、そのメカニズム解明に特に必要不可欠と言われている中層大気の大気データを中長期的に取得できる大気観測手法は未だ確立されていない。

そこで我々は、中層大気の観測手法として「人工流星」を提案している。人工流星とは、人工衛星から流星源と呼ばれる金属球を放出し、大気圏に突入させることで人工的に流星を発生させるものである。人工流星は組成や大気圏への突入速度、突入角、形状、密度が全て既知であるため、天然流星と比べて高精度な大気データの取得が可能となる。人工流星が実現すれば、任意時刻かつ任意地点での中間圏の大気観測を中長期的に行うことが可能となり、高精度な大気循環システムの把握への貢献が大いに期待できる。特に大気密度分布は地上の気候変動などにも大きく関わることから、人工流星を用いた大気密度分布の逆推定を行うことができれば、より高精度な大気モデルの作成が可能になる。そこで、人工流星を用いた大気密度分布の逆推定手法の確立のため、以下の2つを本研究の目的とした。

- 人工流星の軌跡から大気密度分布を逆推定する遺伝的アルゴリズムを用いたシミュレータを構築する。
- 複数のケースでのシミュレーションから、本研究で用いたシミュレータの推定精度と傾向を明らかにする。

第2章では、遺伝的アルゴリズムを用いた推定シミュレータについて、その概要や遺伝的操作の方法について説明している。第3章では、人工流星の軌道シミュレータについてその支配方程式や元とする大気モデル、いくつかのパラメータについて説明し、推定シミュレータとの互換を明らかにしている。第4章では、構築したシミュレータを用いて、3つの揺らぎ方が異なる Case について大気密度分布の逆推定を行った結果と、それに対する考察を述べている。周期的な揺らぎを定義し、その揺らぎを含む大気密度分布で人工流星の軌跡を導出する軌道シミュレータと、遺伝的アルゴリズムを用いた推定シミュレータを組み合わせた、大気密度分布の逆推定シミュレータを構築した。また、逆推定シミュレータによって、揺らぎが 9~20%の範囲に収まる場合は 1000 世代付近で最適解を導いており、軌跡においてはその誤差は 0.01~0.08km であった。大気密度分布においても、その誤差は全ての Case で 15~30%以内に収まっているものの、Case3 のような揺らぎの範囲が個体内で大きい場合には真の最適解に到達できない場合があることがわかった。

第5章では、本研究の結論をまとめ、今後の課題について述べている。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 中層大気観測の必要性	1
1.2 人工流星.....	2
1.3 大気密度分布研究の現状.....	4
1.4 研究目的.....	4
第 2 章 推定手法	5
2.1 推定手法の選定	5
2.2 遺伝的アルゴリズム	5
2.2.1 概要.....	5
2.2.2 遺伝子の生成	6
2.2.3 目的関数	6
2.2.4 選択とエリート保存戦略	7
2.2.5 交叉.....	7
2.2.6 突然変異	7
第 3 章 シミュレータ	9
3.1 シミュレータ概要	9
3.2 軌道シミュレータ	10
3.2.1 大気モデル.....	10
3.2.2 揺らぎの表現	11
3.2.3 運動方程式.....	11
第 4 章 結果と考察	14
4.1 シミュレーション条件	14
4.2 シミュレーション結果	19
4.3 考察.....	31
4.3.1 揺らぎによる影響.....	31
4.3.2 遺伝的操作による影響.....	31
4.4 推定手法の確立に向けた検討.....	31
第 5 章 結論	33
5.1 結論.....	33
5.2 今後の課題	33

図目次

図 1-1	各高度ごとの主な観測手法	1
図 1-2	人工流星のイメージ図 ²⁾	3
図 1-3	再突入した人工衛星の地上観測によって取得された 3 次元軌跡 ³⁾	3
図 1-4	高度 271.5km の保持期間中の大気密度評価 ⁴⁾	4
図 2-1	遺伝的アルゴリズムのフローチャート	6
図 3-1	本シミュレータのフローチャート	9
図 3-2	Exponential Atmospheric Model による大気密度の高度分布	10
図 3-3	Exponential Atmospheric Model による飛行経路長に対する高度の関係	11
図 3-4	2次元の極座標系	12
図 4-1	Case1 における大気密度分布	15
図 4-2	Case2 における大気密度分布	15
図 4-3	Case3 における大気密度分布	16
図 4-4	Case1 における軌跡	17
図 4-5	Case2 における軌跡	17
図 4-6	Case3 における軌跡	18
図 4-7	Case1 の経路長に対する高度	19
図 4-8	Case2 の経路長に対する高度	19
図 4-9	Case3 の経路長に対する高度	20
図 4-10	Case1 の拡大図	21
図 4-11	Case2 の拡大図	21
図 4-12	Case3 の拡大図	22
図 4-13	Case1 の大気密度分布の比較	23
図 4-14	Case2 の大気密度分布の比較	23
図 4-15	Case3 の大気密度分布の比較	24
図 4-16	Case1 の最適解	25
図 4-17	Case2 の最適解	25
図 4-18	Case3 の最適解	26
図 4-19	Case1 における最適解の誤差	27
図 4-20	Case2 における最適解の誤差	27
図 4-21	Case3 における最適解の誤差	28
図 4-22	Case1 における 100 世代毎の残差の変化	29
図 4-23	Case2 における 100 世代毎の残差の変化	29
図 4-24	Case3 における 100 世代毎の残差の変化	30

表目次

表 3-1	物理定数.....	13
表 4-1	擬似観測データのパラメータ	14
表 4-2	Case 毎の諸元.....	31

第1章 序論

本章では、中層大気観測の必要性と現状の問題点、中でも大気密度分布をもたらす地上や人工衛星への影響と研究について説明したのち、その観測手法として人工流星を提案する。それらを踏まえ、本研究の目的を人工流星による大気密度分布の逆推定手法の確立とした。

1.1 中層大気観測の必要性

高度 50km~200km の中層大気と呼ばれる領域 (図 1-1) では、地上の気候変動や気象予報、電波通信等、我々の日常生活に大きな影響を及ぼす現象が頻繁に起こっている。例えば、環境問題としてしばしば取り上げられるオゾンホール現象の原因は、フロンによるオゾン破壊の他に中層大気内の大循環に起因するオゾン減少も関係していることがわかっている。さらに、中層大気はその下にある対流圏とも密接に関係しており、地球規模の大気の大循環によって地表付近の気候変動や異常気象が引き起こされている。この一例として、成層圏での数日間での気温の上昇が対流圏の異常気象と関係していた事例もある。

以上のことから、中層大気に関する知見は地表で生活する我々にとっても重要である。

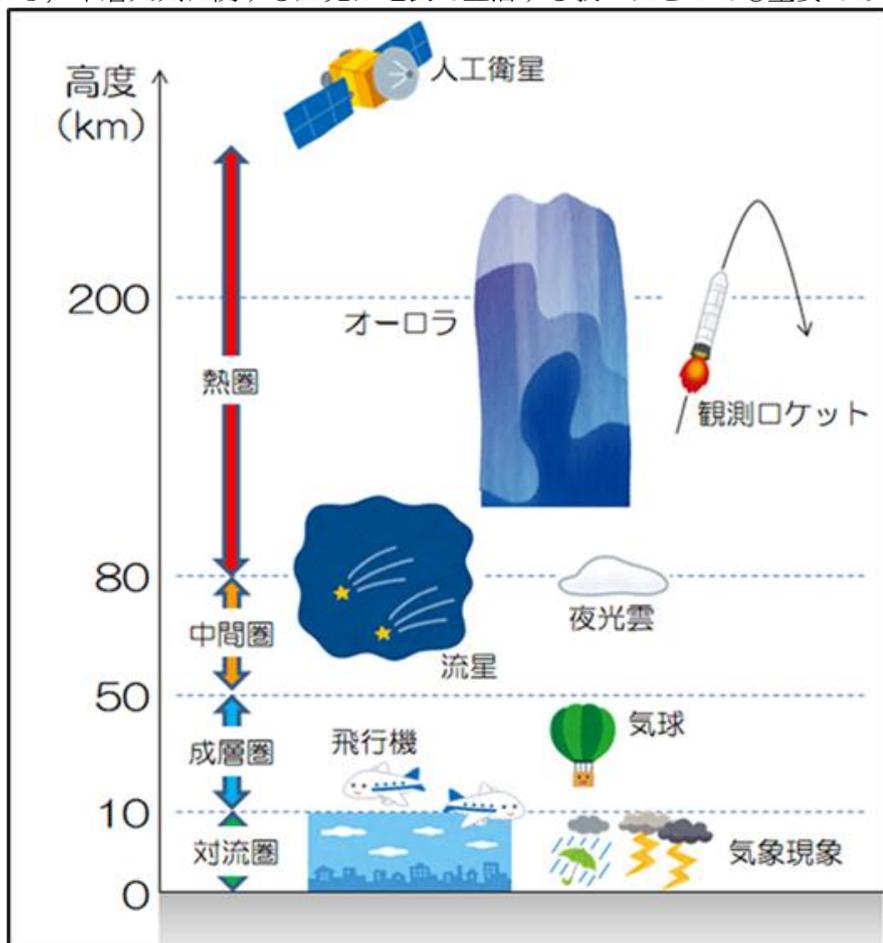


図 1-1 各高度ごとの主な観測手法

中層大気の挙動を把握するために、現在では様々な大気観測手法が用いられている。対流圏や成層圏では航空機や気球などを用いた観測が、熱圏では人工衛星や観測ロケットなどを用いた観測が主流となって

いる。また中間圏では、天然流星や地上に設置されたレーダーを用いた観測が行われている。しかし、これらの観測手法は中長期的な観測が困難であるために不十分である。また、中間圏では特に高度 60km～70km の電離 D 層についての大気データはほぼ皆無であり、高精度な大気循環システムが解明されていない原因の一つとなっている。

中間圏の観測手法の一つは天然流星の観測である。これは分光器や流星レーダーで天然流星の観測を行った後、発光特性などから大気組成や大気温度などを推定する手法である。しかし、天然流星は組成や軌道要素などが未知であるため、多くのパラメータを仮定した上で解析する必要がある。さらに、発生場所や時刻の予測は困難であるために、高精度な大気データを得る手法としては十分とはいえない。もう一つの手法であるレーダーによる観測は、長時間の定常的な観測が可能であり、電波のビームを任意の方向に向けることで風ベクトルや乱流の立体構造を取得することができる。一方、レーダーによる観測は、大気循環の時間的な変化を知るには非常に有用であるが、レーダーが設置されている場所が限定的かつその地点でのみの観測を行うため、広範囲の大気データを得るには至っていない。これらのことから、気候変動のメカニズム解明に必要不可欠な中層大気の大気データを中長期的に取得可能な大気観測手法の確立が求められる。

1.2 人工流星

中間圏の大気観測手法として、我々の研究室は株式会社 ALE¹⁾らと共に人工流星を提案している。人工流星とは、人工衛星から流星の素となる流星源と呼ばれる金属の粒を放出し、大気圏に突入させることで人工的に流星現象を発生させるものである (図 1-2)。軌道上を周回する人工衛星から流星源を進行方向逆方向に放出すると、流星源は高度を下げる。大気圏再突入後の空力加熱に起因するアブレーションによって、流星源が発光し人工的な流星現象が実現する。人工流星は組成や突入速度、突入角、形状、密度がすべて既知であるため、多くのパラメータを仮定しておく必要のある天然流星よりも高精度な大気データの取得が可能と考えられる。人工流星が実現すれば、任意時刻かつ任意地点での中間圏の大気観測を中長期的に行うことが可能となり、詳細の不明な領域を補間した高精度な大気循環システムの把握への貢献が大いに期待できる。

2019 年 1 月 18 日に人工流星ミッションのための実証衛星 ALE-1 が打ち上げられ、人工流星を発生させることは叶わず、2023 年 10 月 4 日に地球大気圏へ再突入した。後続衛星である ALE-2 は 2019 年 12 月 6 日に打ち上げられ、軌道投入に成功して地上局との通信が正常に行えることが確認されたが、放出機構が流星源を送り出すことのできない状態となってしまう、2020 年度中での実現には至らなかった。現在は ALE-3 のエンジニアリングモデルが完成しており、引き続き世界初の人工流星の実現を目指している。

人工流星の観測には、流星レーダー等の他、民生品程度の望遠鏡あるいはカメラシステムを想定している。2023 年 12 月 26 日 21 時 38 分、日本各地で人工衛星の再突入が観測された²⁾際には、有志による地上からのカメラ撮像から再突入した人工衛星の 2 次元的な軌跡が取得された。このことから、人工流星もこれと同様に軌跡の取得が可能であると考えられる。

1.3 大気密度分布研究の現状

中層大気の大気データにおいて、重要なパラメータの一つが大気密度分布である。太陽フレアや磁気嵐による大気加熱・膨張による影響は様々である。例えば、大気密度分布が変動し人工衛星の姿勢が大きく変わったり、大気抵抗によって衛星の高度が減少したりするなど、人工衛星自体の寿命に関わる影響が及ぼされることもある。上空の大気と地表付近における気温差によって、密度が大きい冷たい空気が下降し、反対に密度の小さい空気は上空へ移動する。これにより突発的な集中降雨などの異常気象が発生することが分かっている。

このような影響を及ぼすことから、大気密度分布に関する研究は盛んに行われている。2019年10月1日に運用を終了した超低高度衛星技術試験機「つばめ」(SLATS)のミッションの1つが大気密度に関するデータの取得である。これにより既存の経験的大気モデルの精度向上を図る目的であった。図に、高度271.5kmの保持期間中の実測値と主に使用される大気モデルによる大気密度の比較を示す。

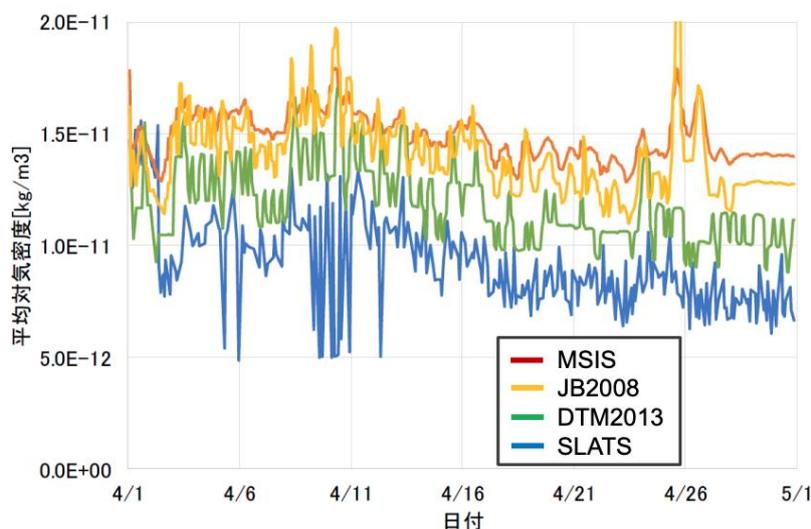


図 1-4 高度 271.5km の保持期間中の大気密度評価⁴⁾

これにより、軌道上データが最も使用されている NRLMSISE-00 によって算出される値に比べて 30%程度低い結果が得られた。このことから、現在使用されている大気モデルは実際の大気密度分布に比べて差異や揺らぎがあると考えられる。この揺らぎはときによってはオーダーが変わることもあるため、これによって今後深刻な人工衛星の寿命予測や異常気象予測に重大な欠陥が生じる可能性がある。

1.4 研究目的

中層大気の大気データのうち、特に重要なパラメータの一つである大気密度分布を明らかにすることは、高精度な大気循環システムの把握や気候変動のメカニズム解明のために必要不可欠である。人工流星を放出し、その軌跡を描く大気密度分布を逆推定することで、これまでの観測手法の問題点を解消しつつ、大気観測に役立てることができる。以上のことから、中層大気の新たな観測手法としての人工流星による大気密度分布の推定手法を確立するため、以下の2つを本研究の目的とする。

- 人工流星の軌跡から大気密度分布を逆推定する遺伝的アルゴリズムを用いたシミュレータを構築する。
- 複数のケースでのシミュレーションから、本研究で用いたシミュレータの推定精度と傾向を明らかにする。

第2章 推定手法

本章では、遺伝的アルゴリズムを用いた逆推定手法を説明する。選択、交叉、突然変異といった遺伝的操作の概要と本研究における工夫点、目的関数の設定や初期集団の生成方法について述べる。

2.1 推定手法の選定

人工流星の軌跡から大気密度分布を逆推定することは、大気モデルに対して適切な係数を与えて補正しこれによって得られる軌跡と人工流星の軌跡の差を最小にするという最適化を行うことである。大気密度分布は、高度や領域によっては不連続点がある可能性を否定できないものの、基本的には連続的に分布していると考えられる。よって連続最適化問題として捉える必要がある。最適化問題における解の良さを数値で表現する目的関数 (objective function) の値の大小で、解の候補の中から制約条件を満たす最適解

(optimal solution) を導くことが最適化問題を解くということである。例えば航空宇宙分野においては、除去衛星によってデブリを複数除去する際の除去衛星の軌道設計などがあげられる⁵⁾。同様の問題がいくつか存在しており、目的関数や制約条件によってその問題の解き方を選ぶ必要がある。

連続最適化問題において最も単純なアルゴリズムが最急降下法 (勾配法) である。最急降下法とは、関数を微分していきその地点を次々と移動させ、接線の傾きが最小になる地点を最小値すなわち最適解とする方法である。微分方程式の解が求まらない場合や、微分自体ができないような関数の場合も利用できることから一般的に使用される方法であるが、接線を求める点と点の移動距離が大きいと解が収束しない場合や、局所解に陥りやすいという欠点もある。

比較的短時間かつ最適解に近い解を得るための手法として、ヒューリスティックアルゴリズム (heuristic algorithm) がある。この中でも特に問題を指定せず、汎用的に使用できるものをメタヒューリスティックアルゴリズム (metaheuristic algorithm) という。この多くが生物の進化過程にヒントを得ており、進化計算アルゴリズム (evolutionary computation algorithm) と呼ばれる。

本研究においては、大気モデルに対する補正值の組み合わせの探索は軌道計算を逐一行いながら探索していくため、

- 計算量と計算時間が比較的少なく済む
- 局所最適解に陥りにくい

この2点に合う手法を選択する必要がある。

2.2 遺伝的アルゴリズム

2.2.1 概要

先述した選定条件に沿って、本研究では遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm) ⁶⁾ を使用することとした。遺伝的アルゴリズムとは、John Henry Holland が提案した最適解探索アルゴリズムで、生物の進化の過程を模した最適化手法の一つである。生物における各個体の特徴は、遺伝子によって決定づけられる。遺伝子が並んだものを染色体と呼び、遺伝的アルゴリズムにおいては解となる値を遺伝子、それらが複数並んだものを染色体という。これを持つ個体それぞれが、問題に対する解の良さを評価する適応度関数によって評価され、最適解を導く。一般的な遺伝的アルゴリズムのフローチャートを図に示す。

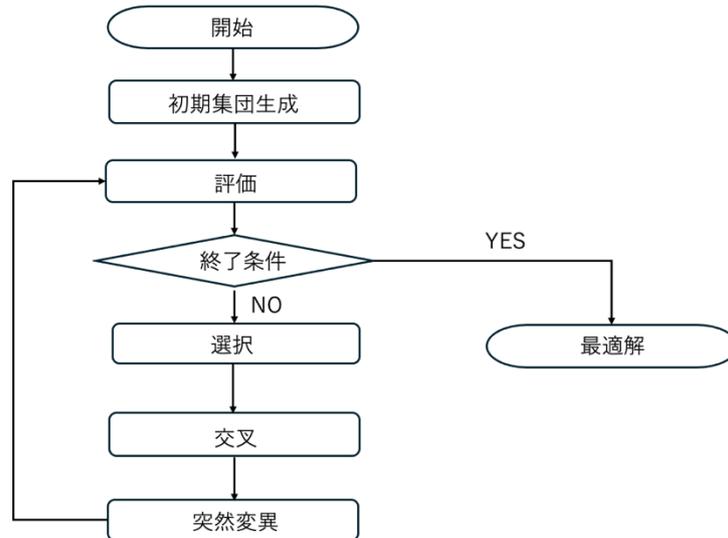


図 2-1 遺伝的アルゴリズムのフローチャート

遺伝的アルゴリズムの利点としては、1. 最適解の発見が容易であること、2. 多様性を確保できること、3. 並列処理が可能であること、4. ほとんどどのような問題にも適用できることが挙げられる。遺伝的アルゴリズムは膨大な数の候補解を生成し進化させるため、本来必要とされる試行錯誤の時間を短時間に行うことができる。また遺伝的操作によって適応度の低い候補解も進化の可能性があるため、より広い解空間を探索することで真の最適解に近づくことができる。さらに、複数の候補解を同時に進化させることで計算時間を短縮できる。遺伝的アルゴリズムは事前にモデルを必要としないため、最適化問題が連続的・離散的のいずれであっても適用可能である。

2.2.2 遺伝子の生成

遺伝的アルゴリズムを含む進化計算アルゴリズムは、乱数を用いて最適解を探索する。そのため、その精度に大きく関わるのは初期集団となる乱数の質である。この質の良し悪しで、解の精度や計算時間が変化する。コンピュータでは規則性も再現性もない真の乱数を生成するのは非常に困難であるため、ある方法で生成した擬似乱数を使用することになる。本研究ではこの生成方法として広く使用されているメルセンヌ・ツイスター法⁹⁾を選定した。メルセンヌ・ツイスター法とは、1996年から1997年にわたって松本真・西村拓士によって開発された擬似乱数生成アルゴリズムである。生成速度がそれまでの乱数生成法に比べて高速であり、周期が $2^{19937} - 1$ という長周期かつ1周期で623次元空間に均等分布することが証明されている。本研究でシミュレータ開発に用いたMATLAB[®]には乱数発生器としてメルセンヌ・ツイスターが用意されているため、これを用いて乱数を生成した。この乱数列を持つ個体を100個準備し、推定を行っていく。

2.2.3 目的関数

最適解かどうかの判断は目的関数によって決められる。本研究では、疑似観測データと推定データの軌跡を比較し、フライトパス全体で算出される大気密度分布の残差を目的関数とした。残差の計算は以下の式(2.1)で定義される。

$$Residual = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i - \hat{d}_i)^2} \quad (2.1)$$

ここで d_i は擬似観測データにおける大気密度分布、 \hat{d}_i は推定データにおける大気密度分布である。また n は人工流星の高度である。本研究では高度0~550kmまでの高度でそれぞれの大気密度分布を算出している。現在の大気モデルは実観測される大気密度分布から15~30%程度のモデル誤差があることがわかっているため、残差が最小かつこの範囲に収まることを終了条件とし、これを満たす個体を最適解とした。

2.2.4 選択とエリート保存戦略

遺伝的操作の一つ目は、個体群の中から適応度の高いものを選んだり、次節で説明する交叉における親となる個体を選んだりする「選択」である。選択方法は大きく分けて「ルーレット選択」、「ランキング選択」、「トーナメント選択」の3種類がある。本研究ではこのうち「ルーレット選択」と「トーナメント選択」を使用した。

「ルーレット選択」とは、選択されやすい確率を各個体に割り振って選択する方法である。選択確率は各個体の適応度の比で決定される。適応度が $fitness(I_k)$ である個体 I_k が選択される確率 $rouProb(I_k)$ は式(2.2)のように定式化できる。

$$rouProb(I_k) = \frac{fitness(I_k)}{\sum_i fitness(I_i)} \quad (2.2)$$

この確率に基づいてランダムに個体を選択されることになり、適応度の比が大きい、すなわち選択確率が高いものが選ばれやすくなる。選択確率が低いものは選ばれにくくなるものの絶対に選ばれないというわけではないため、優秀でない個体も遺伝子を残すことができる可能性があるという生物の進化過程に従った処理が可能となる。ルーレット選択は世代交代を繰り返すと個体群内に類似した個体が増えてしまい、各個体間に適応度の差が小さくなるため、ランダムに選択するのと変わらなくなってしまう。そのため、ある程度の世代交代後は別の選択手法を導入することが考えられる。

「トーナメント選択」とは、個体群内からランダムに S 個取り出し、その中で最も良い個体を選択するという手法である。 S はトーナメントサイズと呼ばれ、この値を目的に応じて調整することで、適応度の低い個体の選択確率を決めることができる。

交叉する個体の選択に対して補助的に用いられるのが「エリート保存戦略」である。エリート保存戦略とは、交叉する個体を選択する際に適合度の高い個体は無条件で次世代に残すことで、その世代で個体群における最良個体が淘汰されることを防ぎ、前の世代よりも悪くなることを回避できる。しかし、あまりに多くの個体を残すと、同じような遺伝子が個体群内に拡散されるため局所最適解に陥りやすくなるため、どれくらいの個体を残すか見極める必要がある。

2.2.5 交叉

交叉とは、2つの個体の一部の遺伝子を交換し新たな子個体を生成する遺伝操作である。遺伝子列内で交叉させる点を交叉点と呼び、この点の数によって交叉方法が分かれる。交叉点が1つの交叉を「一点交叉」、2つあるものを「二点交叉」、さらに複数の点で遺伝子を分けて交叉させる「多点交叉」と、ある決まりに従って並ぶ遺伝子のみを交換する「一様交叉」などが主である。現在多くの問題は「二点交叉」か「一様交叉」で交叉を行うものが多い。これは「多点交叉」では「二点交叉」ほどの計算速度でほとんどその精度が変わらないためである。また本研究の初期段階では「一点交叉」を用いていたが、遺伝子列が長いために一点のみでの交叉では最適解を導くまでに多大な計算時間を要するだけでなく、世代数を進めてもその精度の向上が見込めないと判断したため「二点交叉」を適用した。

2.2.6 突然変異

突然変異とは、いずれの親も持っていない遺伝子を子に持たせる操作である。ある一定の確率で突然変異を起こすことで、局所最適解に陥った状況を変化させることができる。あまり頻繁に突然変異が起きると、親個体から受け継がれた良い遺伝子を失うことになるため、突然変異率は適切に設定する必要がある。

る。突然変異率は通常、大きくとも 1%とすることが経験的に推奨されている。他にも、染色体の長さ、すなわち個体のもつ遺伝子の数の逆数で突然変異率を決定する考え方もある。本研究で扱った例では遺伝子数が平均で 2600 個以上と多いため、個体数の割に突然変異率が約 0.04%と小さく、最適解の探索に時間を要した。このため、1%の確率で突然変異するように設定した。この突然変異率に従って、選択された親個体が持っていない遺伝子（値）に遺伝子を置換した。置換する値は初期集団で使用された乱数の範囲内としている。

第3章 シミュレータ

本章では、シミュレータ全体の構成について触れたのち、最適化問題を解く上で必要な人工流星の軌道計算シミュレータについて説明する。軌道を算出するために必要な大気モデルは、本研究では成立性を優先し比較的簡単なモデルである指数関数モデルを用いた。これに対する揺らぎの表現方法と、軌道計算を行うための常微分方程式の解き方について触れ、揺らぎを加えた場合の軌跡の様子を示す。

3.1 シミュレータ概要

本研究で扱うシミュレータを MATLAB®を用いて開発した。シミュレータは軌道計算フェーズと遺伝的アルゴリズムを用いた逆推定フェーズに分かれており、最適解を導くまでこの2つのフェーズを繰り返す。シミュレータ全体のフローチャートを図 3-1 に示す。

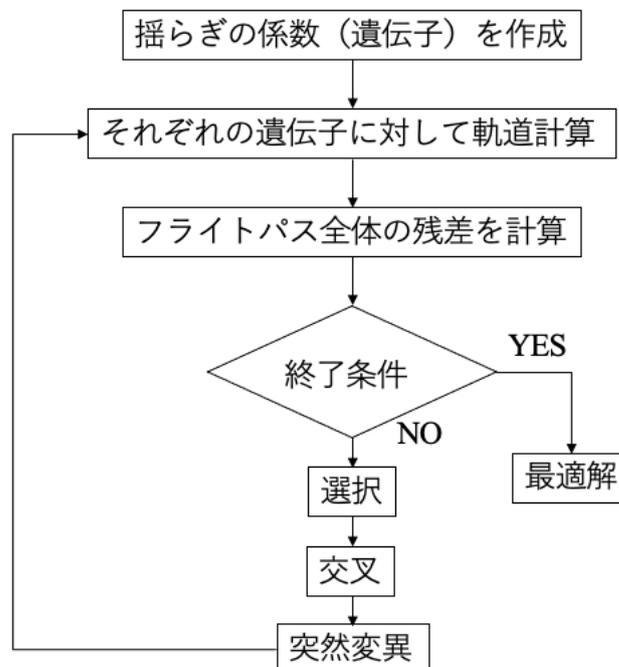


図 3-1 本シミュレータのフローチャート

本研究におけるシミュレータは、軌道計算と逆推定の2つのフェーズを繰り返すことで大気密度分布を逆推定する。軌道計算フェーズは、軌道上を周回する ALE-3 から放出された流星源の軌道を表現して擬似データを得ることと、逆推定シミュレータで得られる推定結果と照合することを目的としている。ここでいう擬似観測データとは、ある大気密度分布による大気抵抗を受けた人工流星の軌跡である。擬似としているのは人工流星の実現は 2025 年以降を目標としており、現在その観測データが存在しないためである。逆推定フェーズは、先述した遺伝的アルゴリズムを用いた推定を行うシミュレータであり、得られた大気密度分布で都度軌跡を得て照合することでその適応度を計算し、最適解を導く。

3.2 軌道シミュレータ

3.2.1 大気モデル

大気の様子を知ることによって我々は天気を予測したり、地球近傍で運用される人工衛星の挙動や再突入体の予測をしたりしている。この際に使用されるのが、高度毎の大気の圧力や温度、密度を定量的に定義した大気モデルである。大気モデルの研究は盛んであり、さまざまな研究機関や国によって策定されている。一例として、米国海軍研究所 (the U.S. Naval Research Laboratory, NRL) が公開しているモデル NRLMSISE-00 がある。これは地上から宇宙空間までの高度に対応しており、質量分析計と非干渉散乱レーダーによって得られた実際の衛星の効力データを加味した経験モデルである。しかし大気は常に変動しており、特に高高度領域においてはその変動は大きく、その全容を網羅的に表現することは困難である。そのため、目的や高度によって大気モデルを選定する必要がある。本研究の逆推定には、現状使用されている大気モデルを補正することで大気密度分布を推定する手法を取る。その手法の確立のための第一段階として2次元の大気モデルである Exponential Atmospheric Model⁷⁾ (指数関数モデル) を補正する。Exponential Atmospheric Model は、高度ごとに2種類のモデルを適用し組み合わせている。高度 0km は1958年に米国標準大気拡張委員会によって最初のモデルが策定された U.S. Standard Atmosphere と呼ばれるモデルで、0~700km の中緯度における太陽活動の季節平均とした大気を考慮している。その上空は宇宙研究委員会 (COSPAR) によって定義された COSPAR International Reference Atmosphere の1972年版モデルを使用している。高度 25~500km では CIRA-72、500~1,000km は外圏温度 $T_{\infty} = 1,000\text{K}$ における CIRA-72 を使用して定義されている。CIRA-72 は高度 90~2,500km まで適用できる広範囲なモデルであり、気圧方程式及び拡散方程式によって標準大気の密度を求めることができる。

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{h_{ellp} - h_0}{H}\right) \quad (3.1)$$

ここで、 ρ_0 は基本密度 [kg/m^3]、 h_{ellp} は高度 [km]、 h_0 は基本高度 [km]、 H はスケールハイト [km] である。

このモデルから取得した大気密度の高度分布を図 3-2 に、飛行経路長に対する高度の関係を図 3-3 に示す。

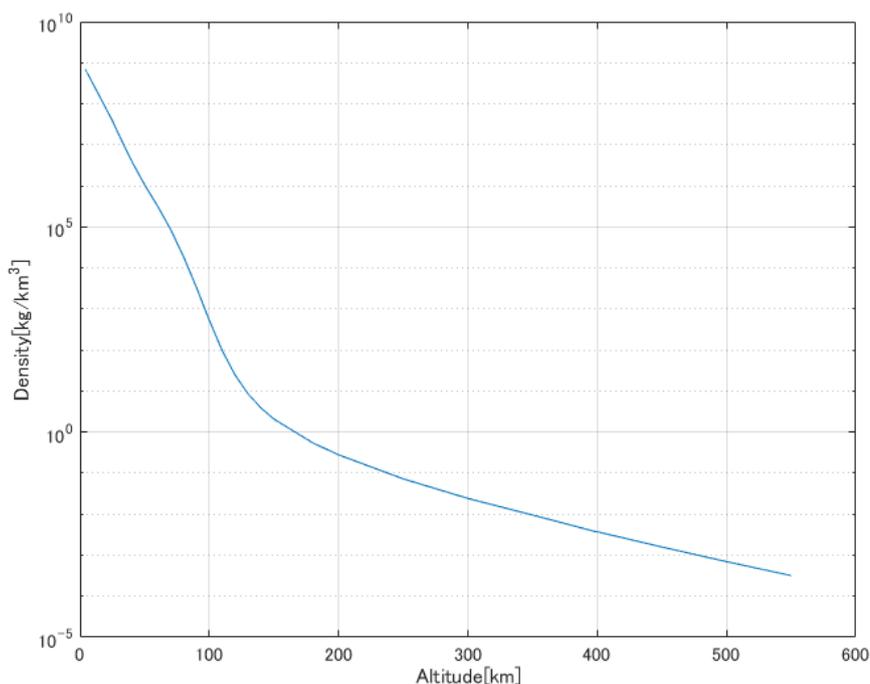


図 3-2 Exponential Atmospheric Model による大気密度の高度分布

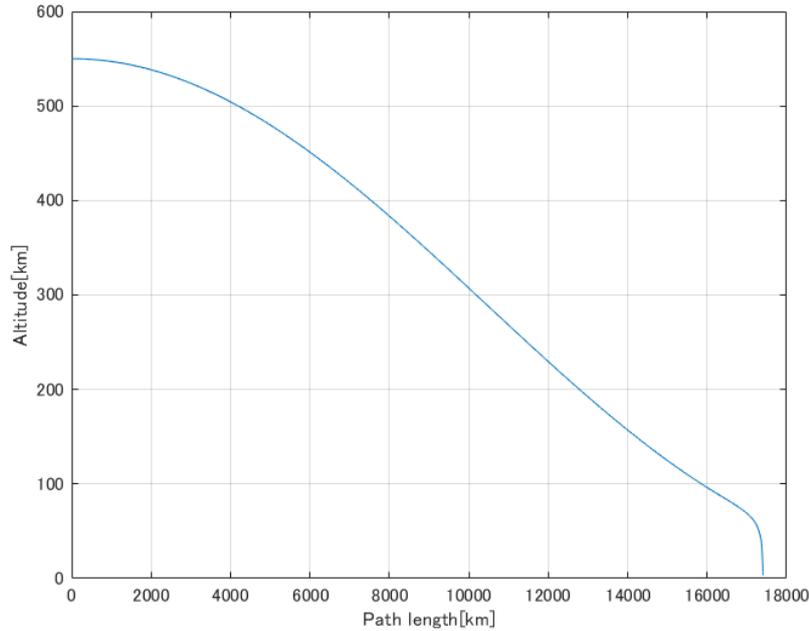


図 3-3 Exponential Atmospheric Model による飛行経路長に対する高度の関係

3.2.2 揺らぎの表現

先述したように、実際の気にはモデルからの揺らぎがあることがわかっている。現状では宇宙空間から地表付近までを網羅した大気密度分布のデータは非常に少ないため、揺らぎを含んだ大気モデルと、それによってどのような軌跡が取得できるかを定義する必要がある。本研究では式 (3.2) に示すような周期的な揺らぎを定義した。

$$\rho_{base} = \rho \left[1 + \frac{A}{100} \sin \left(\frac{h}{h_{max}} (N + 1)\pi + \varphi \right) \right] \quad (3.2)$$

ここで ρ は Exponential Atmospheric Model によって算出される大気密度、 A は変動振幅、 h_{max} は最大高度、 N は節の数、 φ は初期位相である。実際の気密度が周期的に変動しているとは限らないが、簡単な揺らぎを表現するためこの式を用いることとする。

3.2.3 運動方程式

流星源の諸元や放出速度等の初期条件から、衛星放出後の流星源の位置や高度変化、速度を求めることで流星源の軌跡を可視化できる。この軌跡を得るための微分方程式は、4 段 4 次の Runge-Kutta 法を用いた。Runge-Kutta 法は数値解析における常微分方程式の数値解を求める際の手法として広く一般的に使用されており、複数勾配の重み付け平均を利用することで高精度な数値解を得ることが可能である。Runge-Kutta 法における数値計算においては、計算ステップの選び方によって誤差や計算時間などが変化する。計算ステップが大きすぎる場合、丸め誤差の影響は無視できない大きさとなってしまう。また計算ステップが小さすぎる場合は計算負荷が大きくなるため膨大な計算時間を要する。そこで本研究においては計算コストと計算精度の両面を考慮し、タイムステップを $10^{-2}s$ とした。

本研究の目的は推定手法を確立することであるため、簡単のために 2 次元で流星源の軌跡を表すこととする。また、太陽輻射圧や潮汐力、流星源の質量現象については考慮しない。座標系を図 3-4 に示す。

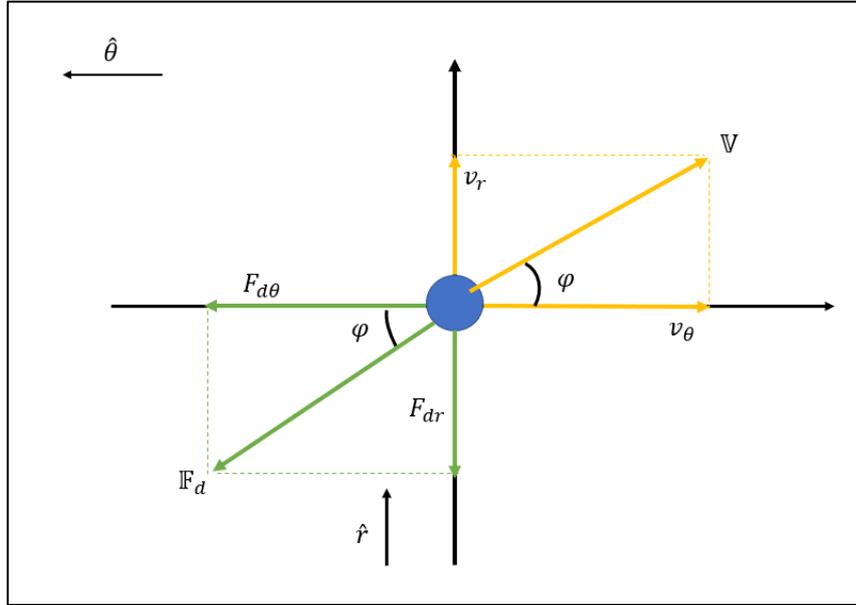


図 3-4 2次元の極座標系

流星源の位置と速度は一般化座標・一般化速度とみなし，式 (3.3) のようなラグランジアンを用いて運動方程式を解く．

$$L = T - U \quad (3.3)$$

ここで L はラグランジアン， T は質点の運動エネルギー， U はポテンシャルエネルギーである．このラグランジアン L を用いて， r と θ に関する運動方程式を得る．

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{r}} \right) - \frac{\partial L}{\partial r} = -F_{dr} \quad (3.4)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = -rF_{d\theta} \quad (3.5)$$

F_{dr} と $F_{d\theta}$ は抗力の成分であり，抗力係数 C_d と対抗面積 A を用いて

$$F_{dr} = F_d \sin \varphi \quad (3.6)$$

$$F_{d\theta} = F_d \cos \varphi \quad (3.7)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2 \quad (3.8)$$

と表せる．次に，質点の運動エネルギー T を式(3.9)に示す．

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \\ &= \frac{1}{2} m (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2) \end{aligned} \quad (3.9)$$

ただし， m は流星源の質量である．また，ポテンシャルエネルギー U を式(3.10)に示す．

$$U = -\frac{\mu m}{r} \quad (3.10)$$

μ は地球の重力定数 $[\text{km}^3/\text{s}^2]$ である．式(3.6)(3.7)より，ラグランジアン L は式(3.11)のように求まる．

$$L = \frac{1}{2} m (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2) + \frac{\mu m}{r} \quad (3.11)$$

式(3.11)を式(3.4)(3.5)に代入し、 $x_1 = r$, $x_2 = \dot{r}$, $x_3 = \theta$, $x_4 = \dot{\theta}$ とすれば、式(3.12)のように1階の連立微分方程式を定義できる。

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= x_1 x_4^2 - \frac{\mu}{x_1^2} - \frac{F_{dr}}{m} \\
 \dot{x}_3 &= x_4 \\
 \dot{x}_4 &= -\frac{1}{x_1} \left(2x_2 x_4 + \frac{F_{d\theta}}{m} \right)
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

これらを数値的に解くために、MATLAB®のソルバである ode45 を用いた。また、地球に再突入する人工流星の流星源の質量と、軌道計算における計算パラメータを表 3-1 に示す。

表 3-1 物理定数

地球の重力定数	$\mu=3.986004418 \times 10^5 [\text{km}^3/\text{s}^2]$
地球の半径	$R_e=6378.0 [\text{km}]$
抗力係数	$C_d=1.0 [-]$
対抗面積	$A=(5.0 \times 10^{-6})^2 \pi [\text{km}^2]$
初期質量	$m_0=4.3 \times 10^{-3} [\text{kg}]$

第4章 結果と考察

本章では、開発したシミュレータによって3つの擬似観測データについて大気密度分布を逆推定した結果と、それに対する考察を述べ、本研究で開発したシミュレータの有用性と課題について述べる。

4.1 シミュレーション条件

本研究では、擬似観測データを3つ作成し、それぞれについてシミュレーションを行った。擬似観測データのパラメータを、表4-1に示す。

表 4-1 擬似観測データのパラメータ

	Case1	Case2	Case3
A	10	10	50
N	20	50	50
φ	90	10	90

Case1 から Case3 の大気密度分布の様子と、それによって算出される人工流星の軌跡を図4-1 から図4-6に示す。

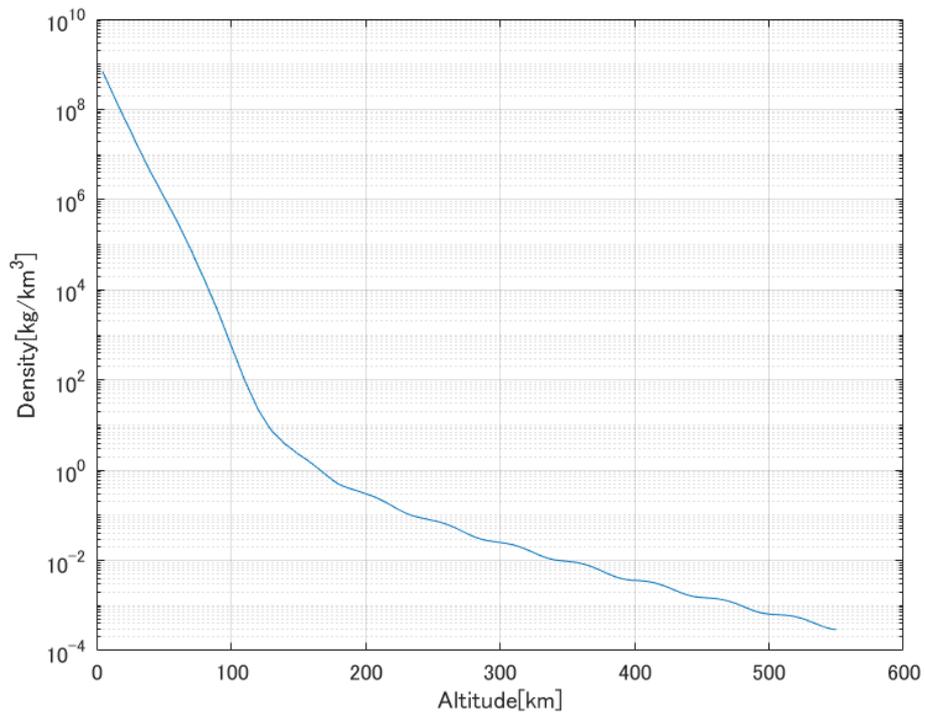


図 4-1 Case1 における大気密度分布

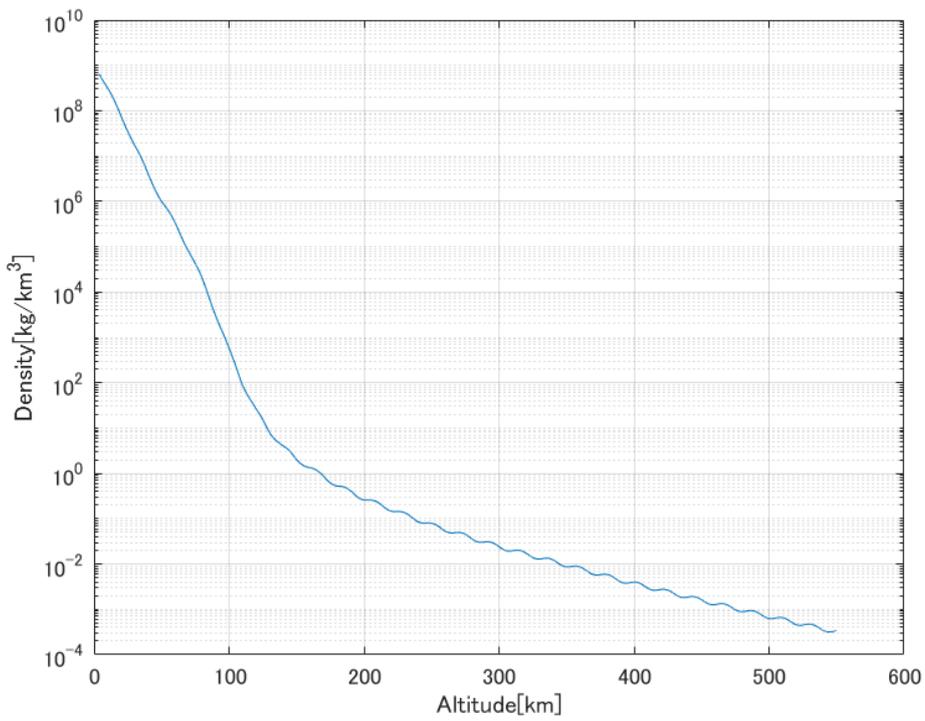


図 4-2 Case2 における大気密度分布

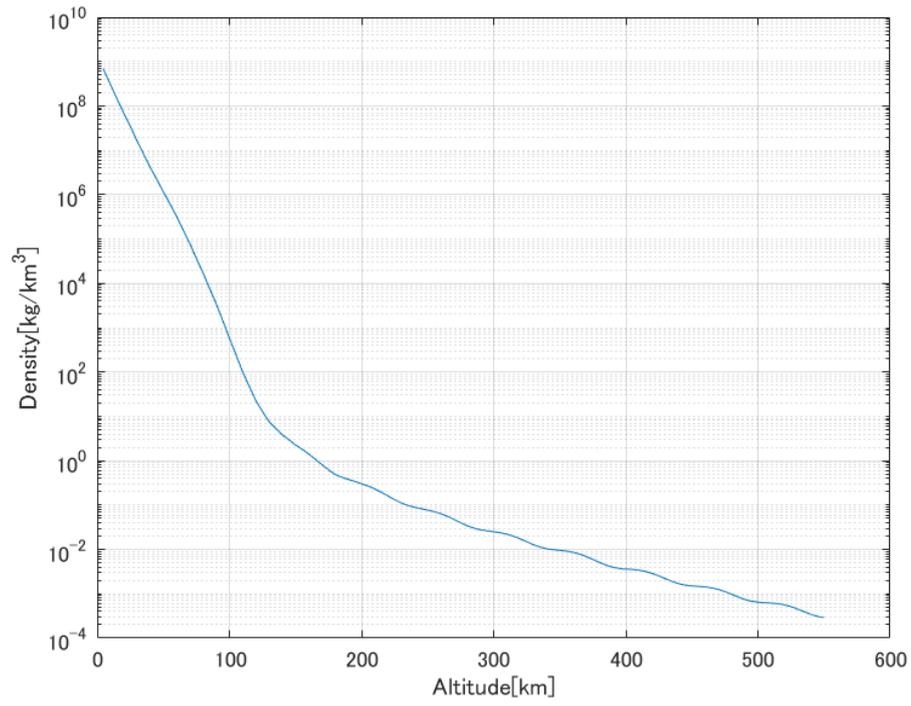


図 4-3 Case3 における大気密度分布

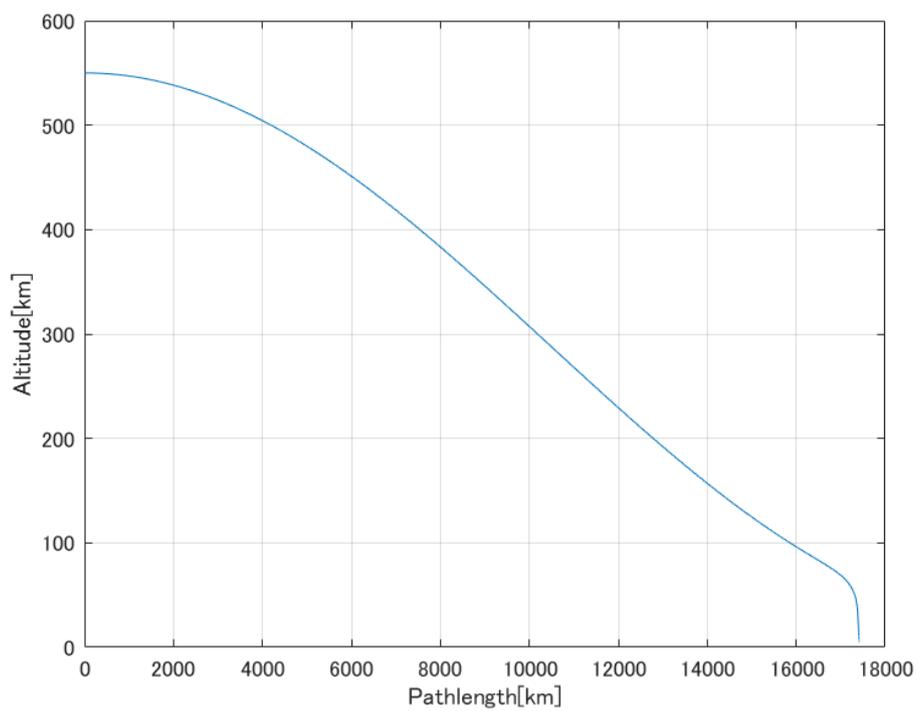


図 4-4 Case1 における軌跡

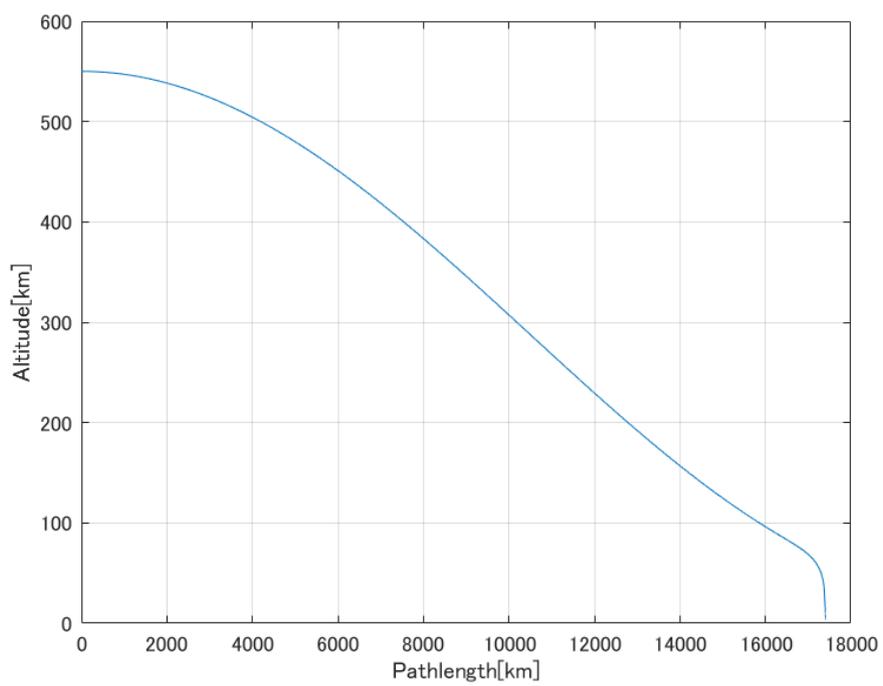


図 4-5 Case2 における軌跡

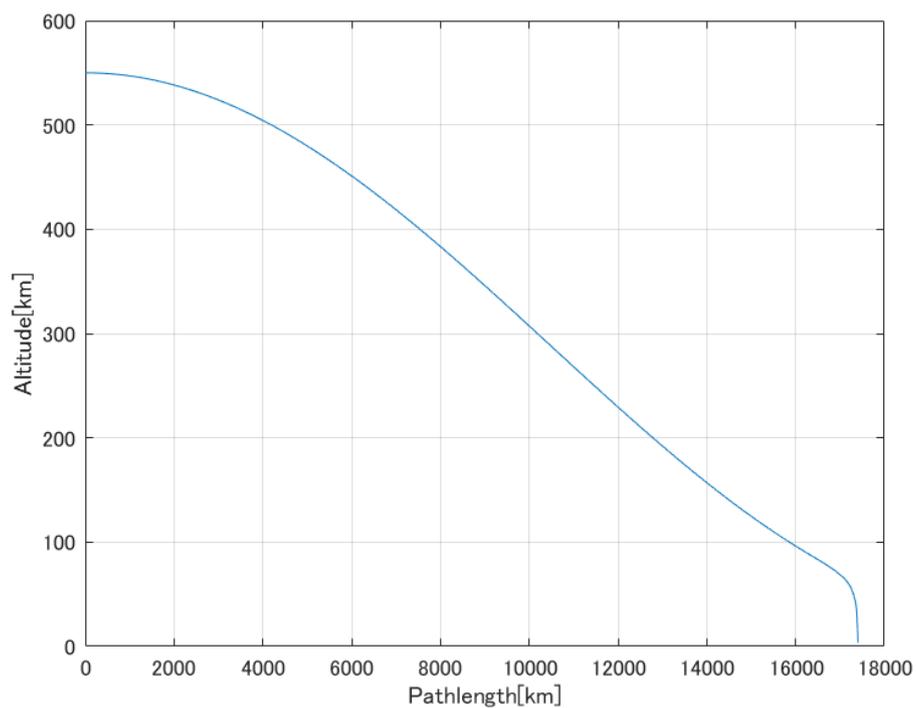


図 4-6 Case3 における軌跡

遺伝操作としては、選択手法には「ルーレット選択」を使用する。その際、残差を計算し遺伝子の配列に差がないと判断された場合「トーナメント選択」に切り替えるようにした。また、これの補助に「エリート保存戦略」、交叉には「二点交叉」を用いた。なお、突然変異率は1%とした。

4.2 シミュレーション結果

Case1～Case3 の擬似観測データと最適解によって導かれた人工流星の飛行経路長に対する高度で表した軌跡を、図 4-7 から図 4-9 に示す。図内の凡例において擬似観測データによる軌跡を base, 初期世代を first, 以降の世代については 100 世代ごとで、適応度が最も高い個体によって取得される軌跡を表している。なお、1 から 99 世代を 100s, 100 から 199 世代を 200s というように表している。最適解に至るまでの世代数には差があるものの、外形は大まかに一致している。

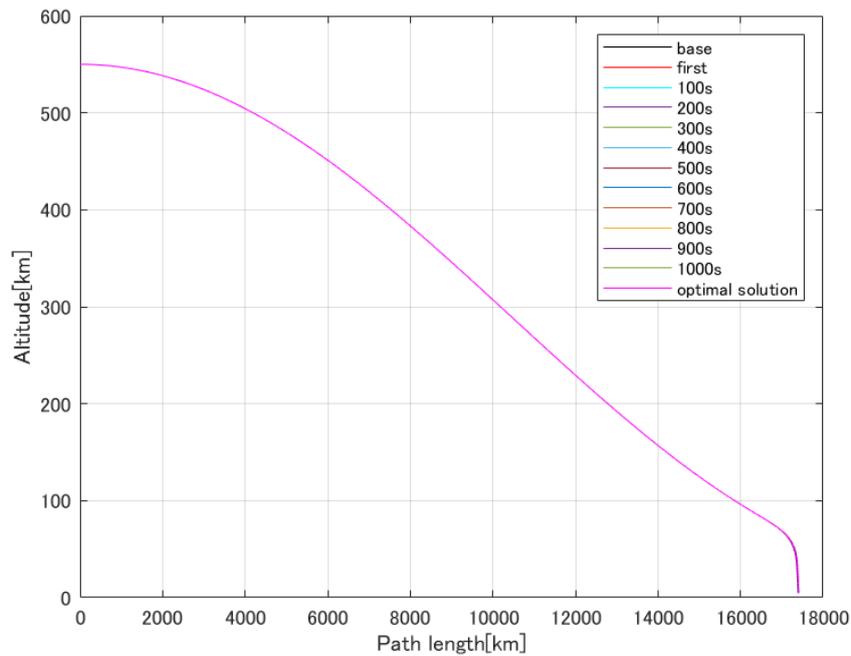


図 4-7 Case1 の経路長に対する高度

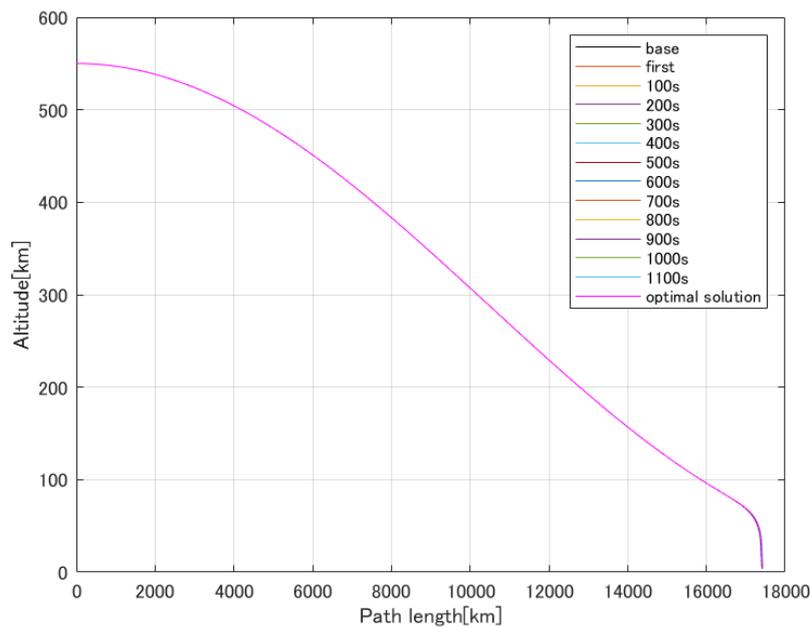


図 4-8 Case2 の経路長に対する高度

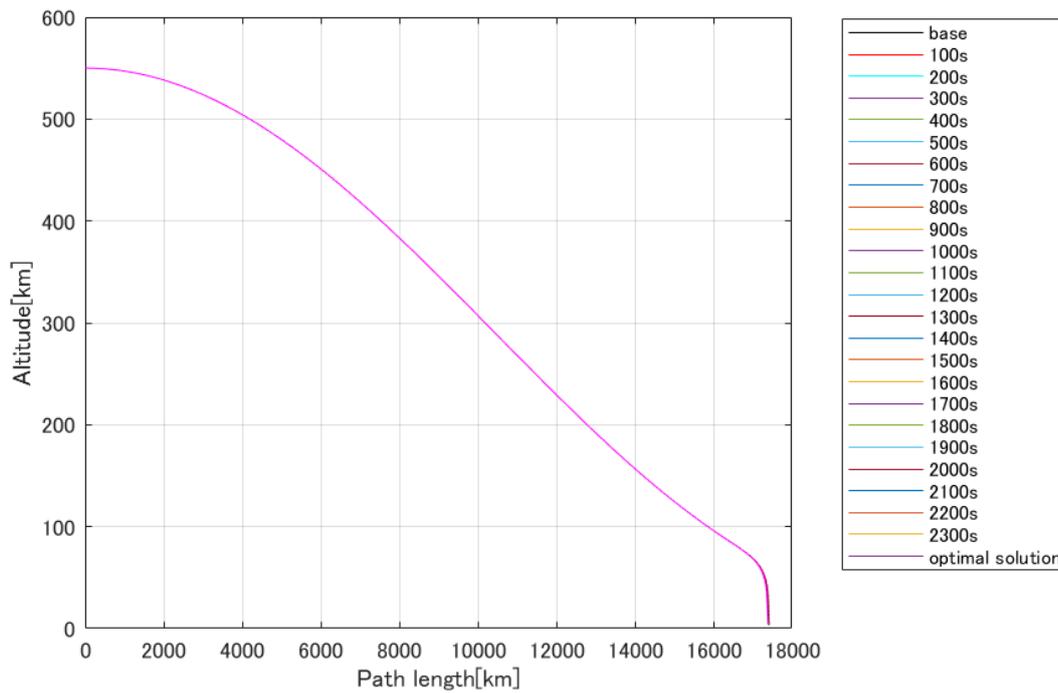


図 4-9 Case3 の経路長に対する高度

Case1～Case3 において，一部を拡大した図を図 4-10 から図 4-12 に示す．これより，全ての Case において最適解で導かれた軌跡が，擬似観測データの軌跡に最も近づいていることが分かる．その差は約 0.01～0.08km 程度であった．

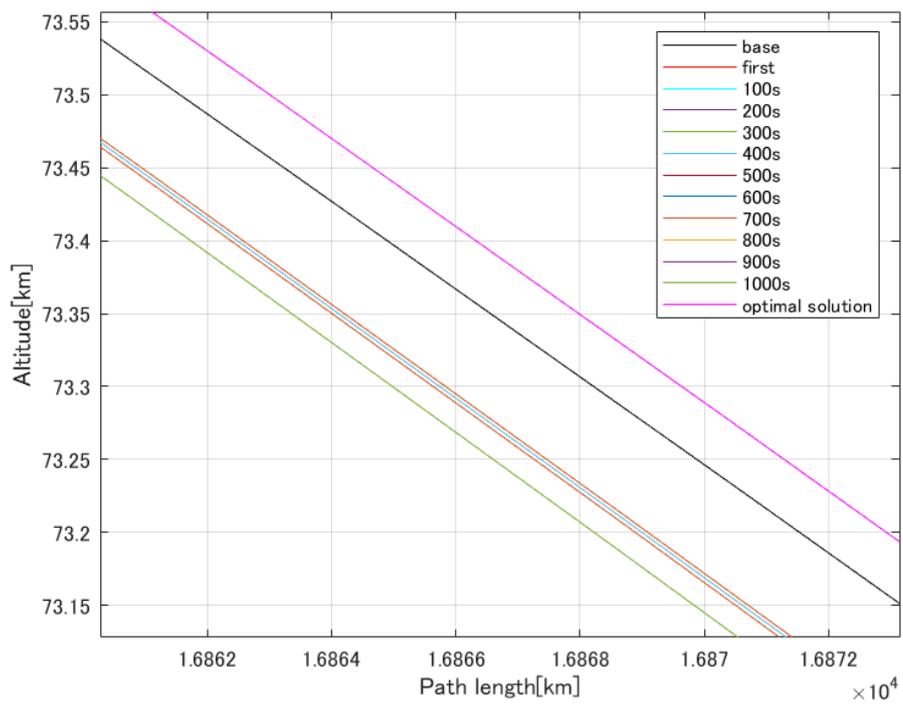


図 4-10 Case1 の拡大図

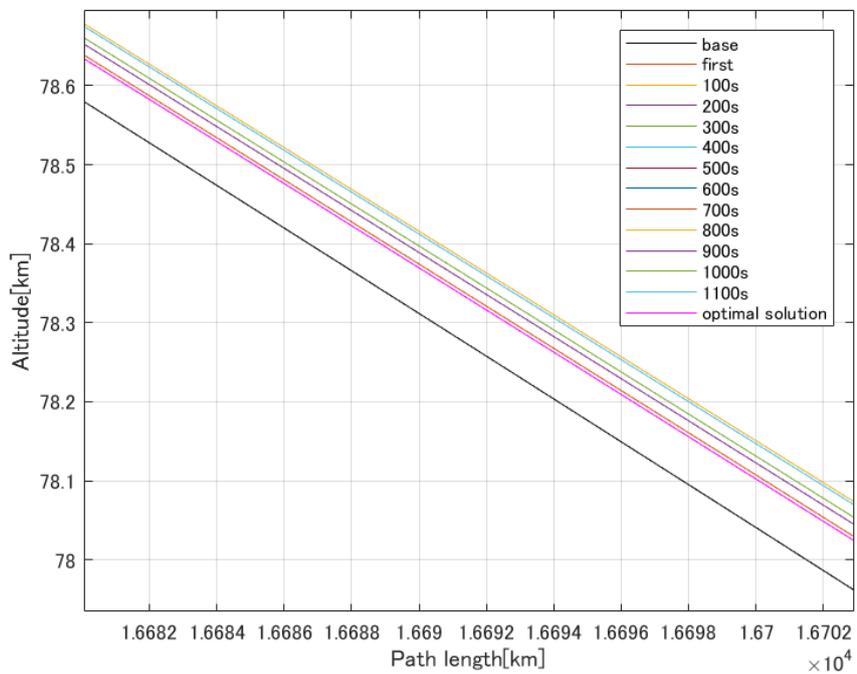


図 4-11 Case2 の拡大図

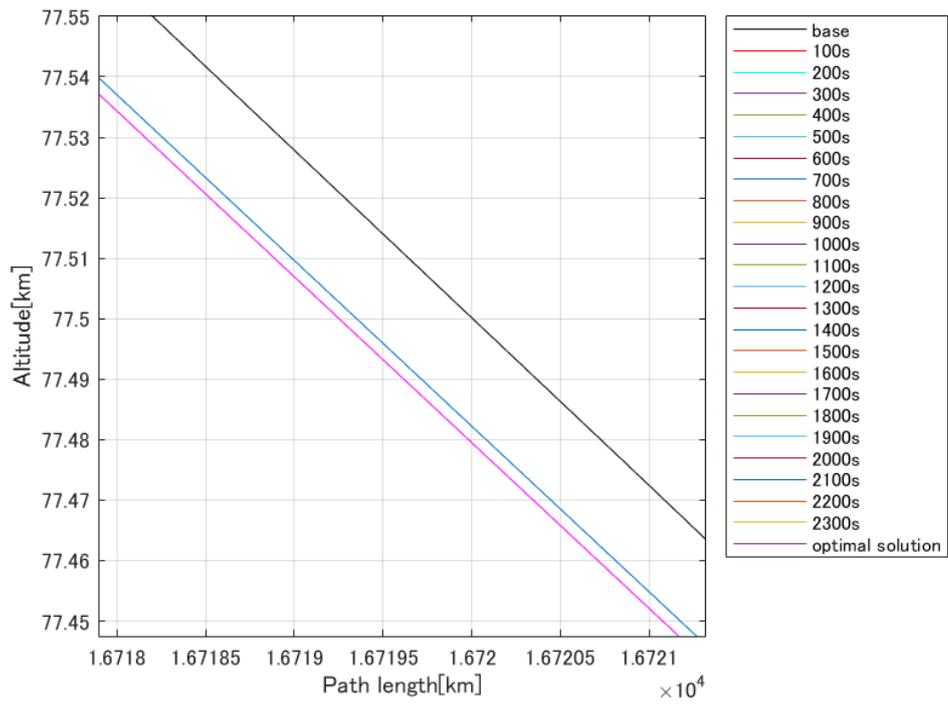


図 4-12 Case3 の拡大図

次に、大気密度分布について比較する。図 4-13 から図 4-15 に世代毎の大気密度分布を示す。

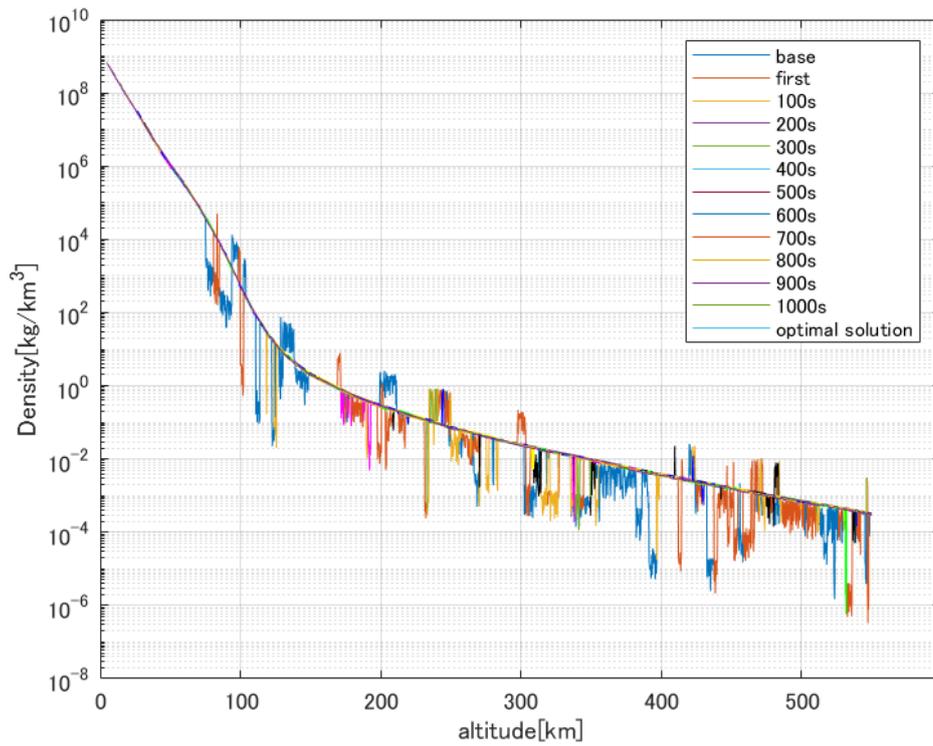


図 4-13 Case1 の大気密度分布の比較

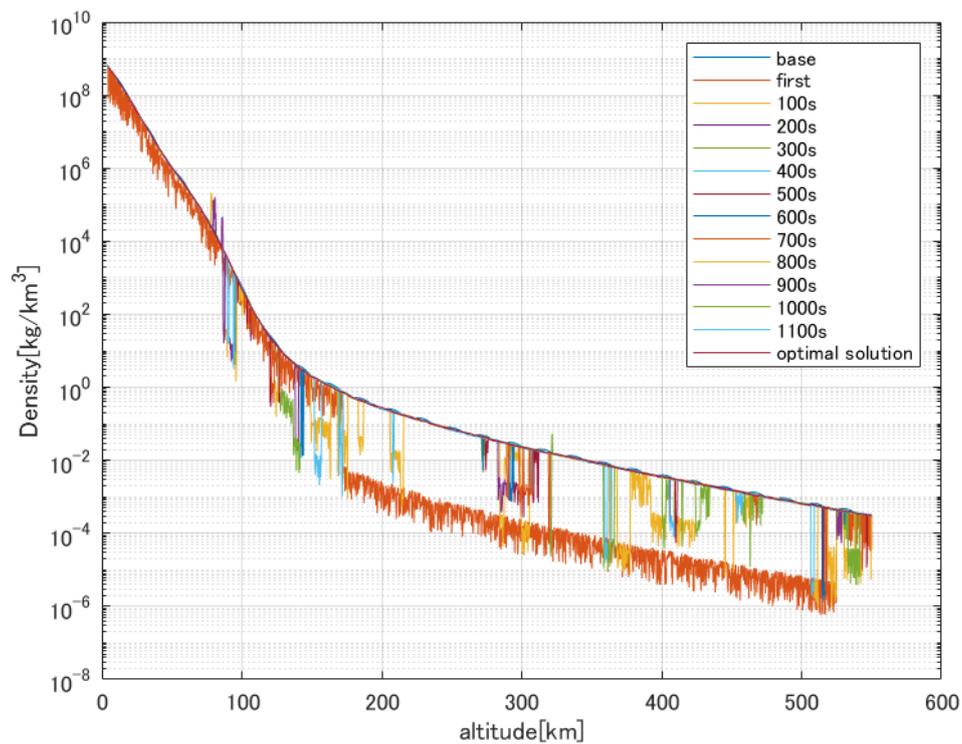


図 4-14 Case2 の大気密度分布の比較

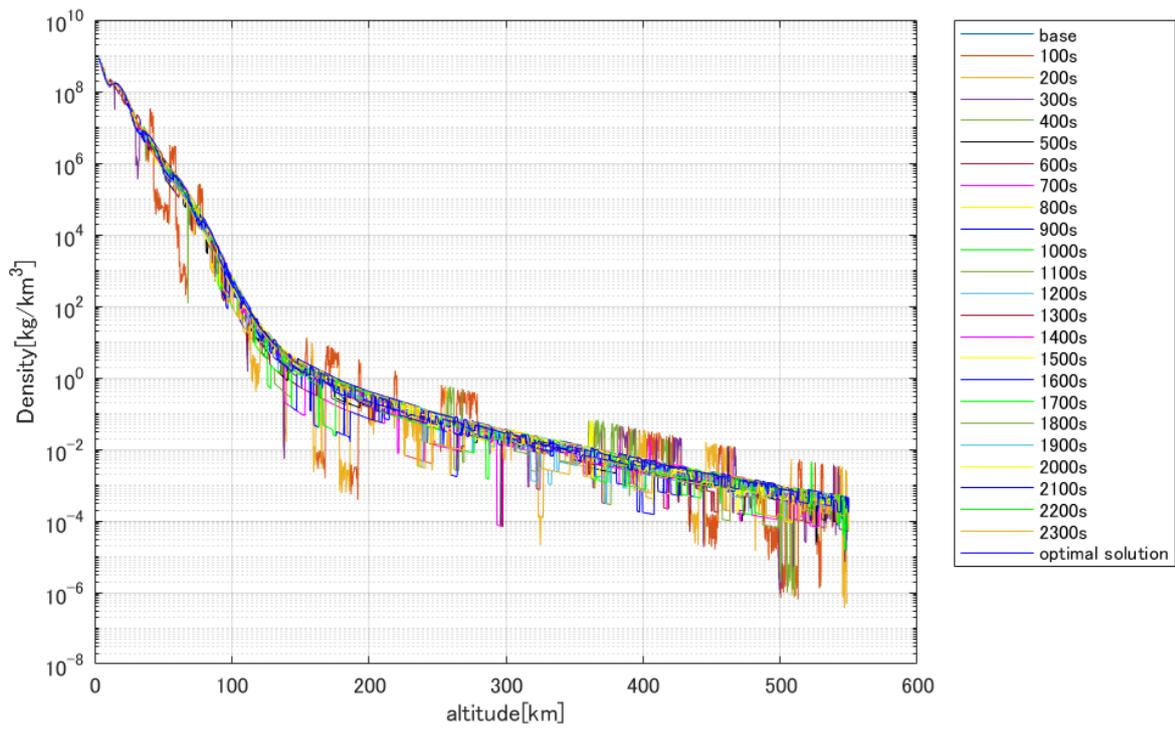


図 4-15 Case3 の大気密度分布の比較

このうち、擬似観測データと最適解のみを抜き出したものを図 4-16 から図 4-18 に示す。Case1 と Case2 については、その外形が概ね一致しているが、Case3 においては最適解として算出されたにも関わらずグラフの外形が著しく異なっている。

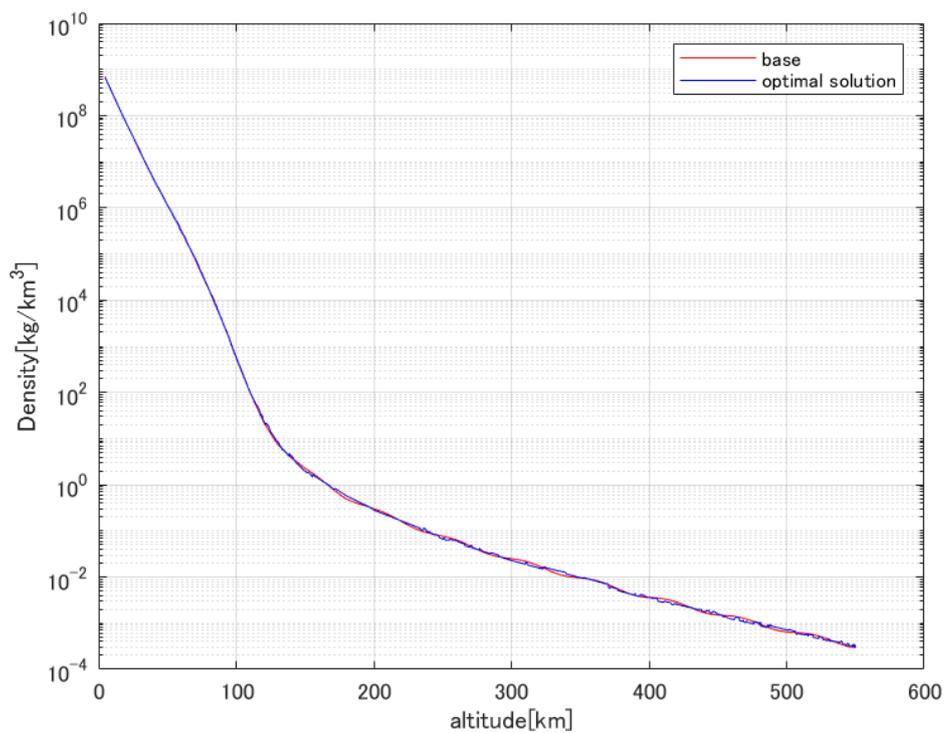


図 4-16 Case1 の最適解

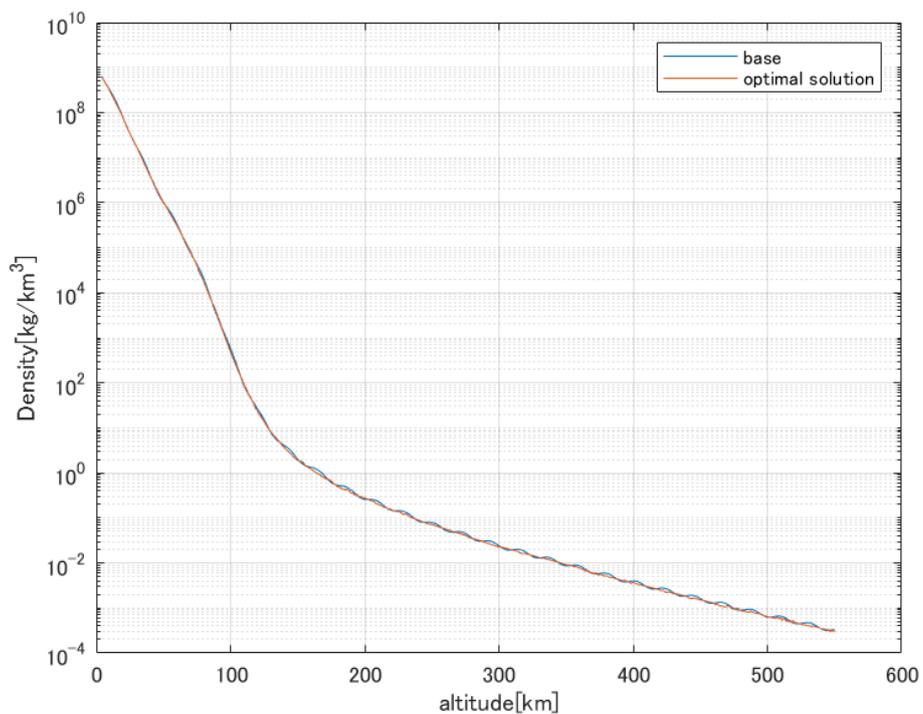


図 4-17 Case2 の最適解

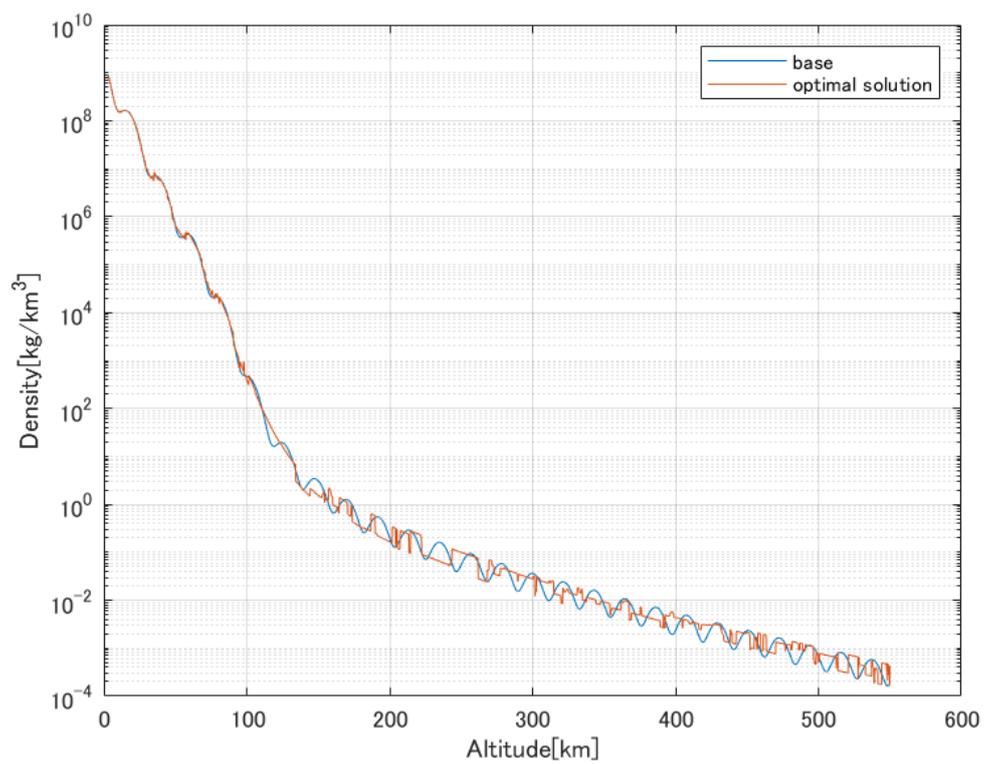


図 4-18 Case3 の最適解

Case1 から Case3 のそれぞれにおいて、最適解の擬似観測データからの誤差を加えた図を図 4-19 から図 4-21 に示す。いずれにおいても、目標とした誤差 15~30%以内には収まっているものの、Case3 においては Case1 や Case2 に比べてその誤差が大きい箇所が目立つ。

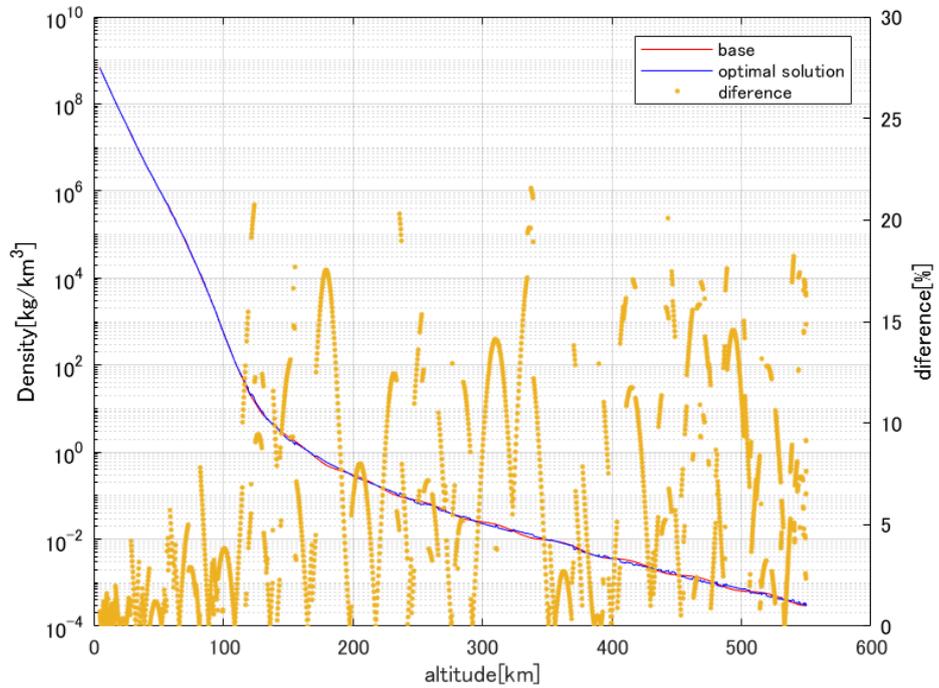


図 4-19 Case1 における最適解の誤差

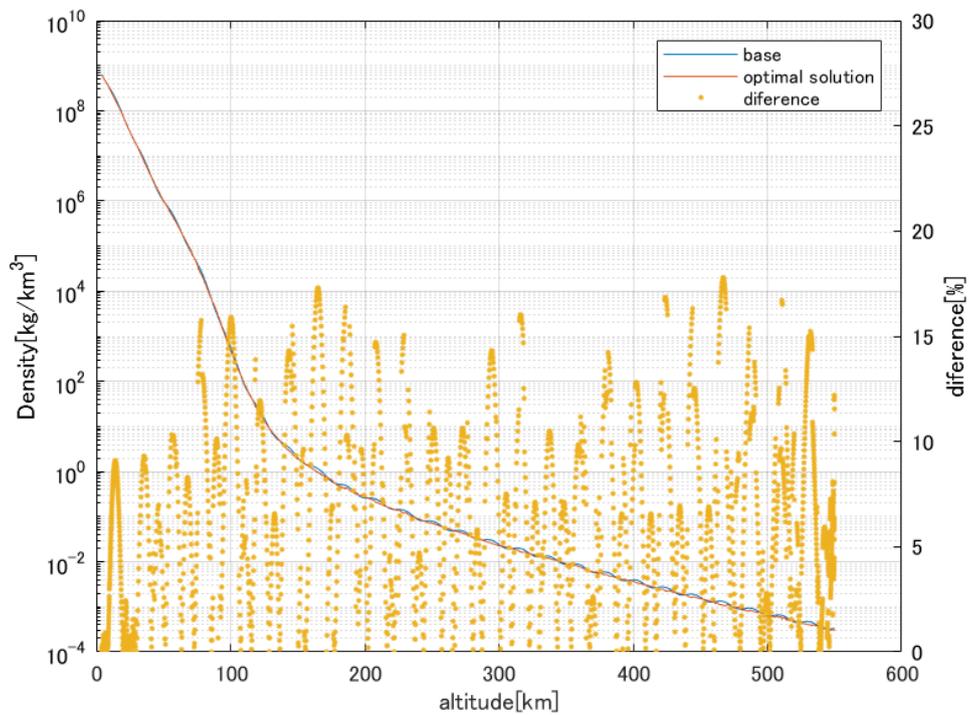


図 4-20 Case2 における最適解の誤差

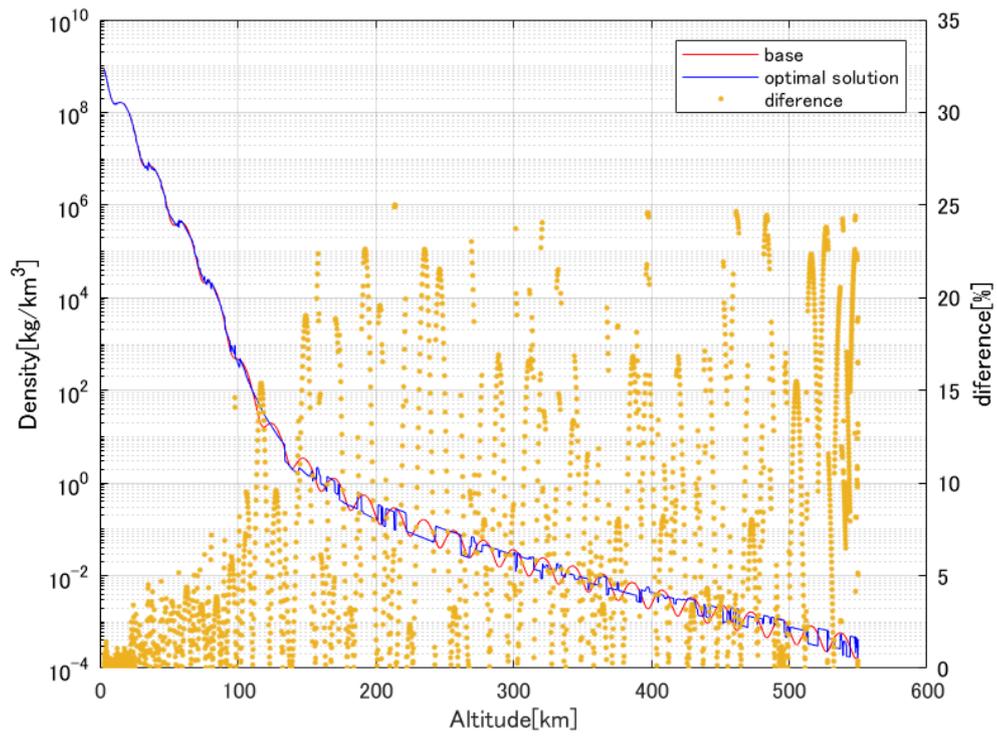


図 4-21 Case3 における最適解の誤差

図 4-22 から図 4-24 に、それぞれの 100 世代毎の残差の変化を示す。いずれの Case についても、世代を重ねることで最小の残差となるように変化している。中でも Case1 は他の 2 つと比較しても比較的早い世代で最適解を導いている上、その値も最小値であった。

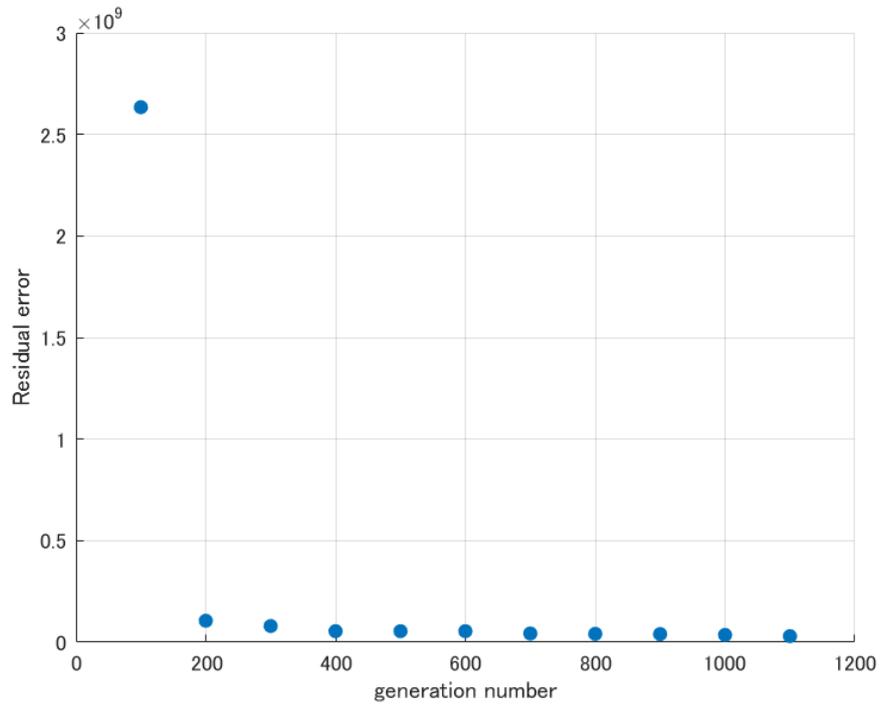


図 4-22 Case1 における 100 世代毎の残差の変化

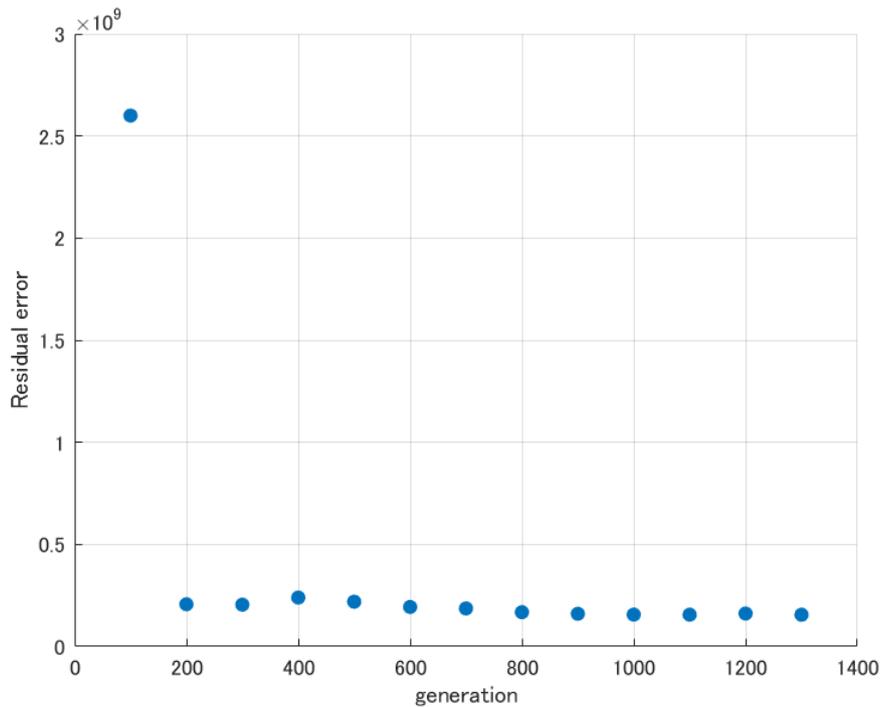


図 4-23 Case2 における 100 世代毎の残差の変化

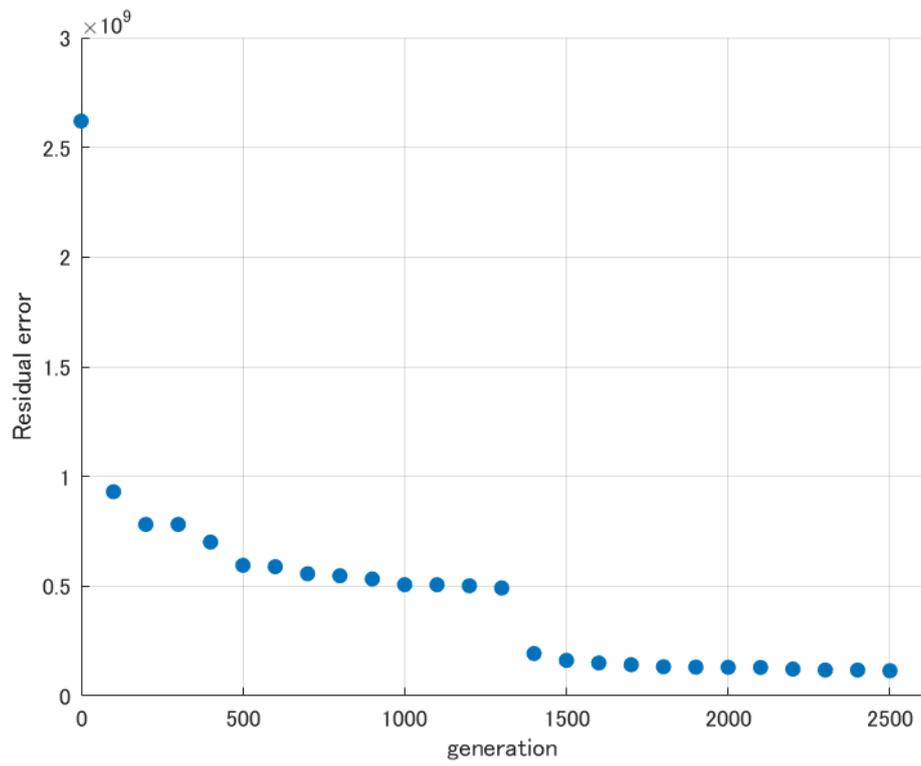


図 4-24 Case3 における 100 世代毎の残差の変化

表 4-2 に、それぞれの遺伝子数と最適解となった世代数、そのときの残差を示す。

表 4-2 Case 毎の諸元

	Case1	Case2	Case3
遺伝子数	2640	2648	2652
最適解に至った世代	1120	1297	2501
残差	2.9774e+07	1.5592e+08	1.1471e+08

4.3 考察

4.3.1 揺らぎによる影響

今回扱った Case1 から Case3 を比較すると、Case1 が最もよく推定できていると考えられる。反対に、全てのパラメータが最も大きい Case3 における推定が本シミュレータでは完全な推定が難しいと考えられる。それぞれの Case の揺らぎの割合を比較すると、Case1 は 9~15%、Case2 は 16~20%、Case3 は 15~30%であった。このことから、揺らぎの割合の大きさによって推定の精度と範囲が左右されるといえる。本シミュレータでは少なくとも 9~20%のずれに対しては、1,000~1,300 世代で最適解を導くことができる。しかし、揺らぎの割合が最小と最大で 15%もの差がある Case3 のような場合には世代数を要するうえ、最適解とされた大気密度分布に大きな誤差が見られ、揺らぎの割合が広く分布する場合はシミュレータの精度が保証できないと考えられる。

4.3.2 遺伝的操作による影響

本研究では 2 種類の選択手法を用いた。これはルーレット選択が適応度の低い個体も遺伝子を残せる可能性をもっているが、これのみで推定を行うと局所最適解に陥ったり、残差を比較した際にそれまで順調に減少していたものが急激に増加し最適解から明らかに離れてしまったりという現象が起こったためである。トーナメント戦略やエリート保存戦略を追加することで、これらの現象が起こる確率を大きく下げることができた。また簡単のために、交叉の方法は二点交叉を用いた。連続的に遺伝子の値が減少または増加する遺伝子を持つ場合、そのまとまりを崩さずに交叉することができる。しかしこの連続的な変化が頻繁、もしくは前後との関係性を持たない突発的な値を含むものが最適解である場合、二点交叉では限界があると考えられる。突然変異率について、当初は遺伝子の長さの逆数をとった確率で起こすようにしていたが、個体数を 100 個と少なく設定していたため突然変異が起こりにくく、数千世代を重ねても大きな変化が見られなかったため突然変異率を 1%とした。遺伝的アルゴリズムにおいて問題点としてよく挙げられるものに「ヒッチハイク問題」がある。ヒッチハイク問題とは、ある個体の遺伝子に明らかに最適解でない値が含まれているにも関わらず、その近傍の遺伝子の値が最適解と一致するために、不適合遺伝子が新しい個体に残り続けてしまうという現象である。このヒッチハイクが起こる確率は遺伝子の長さが長いほど大きくなる。本研究では約 0.2km 毎に流星源の高度が低下するように軌跡を求めているために、全ての Case で遺伝子数が平均で 2646 と長く、特に一番長い遺伝子数を持つ Case3 においてはこのヒッチハイク問題に陥った可能性が高いと考えられる。

4.4 推定手法の確立に向けた検討

今回は軌跡の形状や大気密度分布の変動に大きな特徴がみられた Case1 から Case3 を擬似観測データとして扱ったが、より詳しいシミュレータ精度を得るためには今回扱っていない 20~25%、25~30%などの揺らぎの割合を示す擬似観測データを作成し、比較する必要がある。また、先述したヒッチハイク問題を防ぐには「一様交叉」が効果的である。一様交叉は各遺伝子について独立して交叉を行うため、周囲に最適解があっても不適合遺伝子が守られる状況を防ぐことができる。このとき最適解を生成できる確率は、遺伝子の長さに左右されない。また、本来突然変異率は遺伝子数すなわち染色体長さの逆数をとった確率に沿って起こるよう設定するのが最も精度がよいといわれている。しかし本研究では高度 0~550km 地点まで

を対象とした軌道計算を行ったために染色体長さが非常に長くなった.このため突然変異率がかなり小さくなってしまいう問題点があった. 中層大気と呼ばれる高度 50~200km に限定した推定を行うようにすれば, この遺伝子数を減らすことにつながり, その突然変異率も 0.1%以上を見込むことができる. さらに, 遺伝的アルゴリズムにはさまざまな拡張手法が提案されている. 機械学習の一種に, 遺伝的アルゴリズムを拡張・特化させた遺伝的プログラミング (GP) は, 工学分野のみならず経済学分野でも使用されている. ニューラルネットワークなどの技術と組み合わせることで, より真の最適解に近い解を導くという研究もなされている. これらの遺伝的アルゴリズムにおける拡張手法や, 他の手法との組み合わせで本シミュレータの精度も向上する可能性がある. また, 解の精度がどうしても初期集団で生成する乱数の質に左右されることから, 本研究で用いたメルセンヌ・ツイスター法以外の乱数生成方法を試すことも最適解探索の精度向上につながると考えられる.

第5章 結論

本章では、これまでの章を踏まえた結論と、今後の課題について述べる。

5.1 結論

本研究では、人工流星を用いた中層大気の大気密度分布の推定手法の確立を目指して、遺伝的アルゴリズムによる逆推定について検討し、以下の結論を得た。

- 周期的な揺らぎを定義し、その揺らぎを含む大気密度分布で人工流星の軌跡を導出する軌道シミュレータと、遺伝的アルゴリズムを用いた推定シミュレータを組み合わせた、大気密度分布の逆推定シミュレータを構築した。
- 逆推定シミュレータによって、揺らぎが9~20%の範囲に収まる場合は1000世代付近で最適解を導いており、軌跡においてはその誤差は0.01~0.08kmであった。大気密度分布においても、その誤差は全てのCaseで15~30%以内に収まっているものの、Case3のような揺らぎの範囲が個体内で大きい場合には真の最適解に到達できない場合があることがわかった。

5.2 今後の課題

本研究では、人工流星の軌跡を導くシミュレータを構築するにあたり、いくつかのパラメータを定めた。様々な文献を基にパラメータを決定したが、そのパラメータを検証するための有用な既存データが見当たらず、軌道シミュレータ全体の精度を検証するには至らなかった。また、遺伝的アルゴリズムを用いた推定シミュレータにおいては、その成立性を優先したため全てのCaseで真の最適解を導くことができない場合があることがわかった。しかし、ALEはALE-3のエンジニアリングモデルが完成しており、2024年後半に打ち上げ、2025年に世界初の人工流星の実現を目指している。これにより人工流星の実データを手に入れば、シミュレータの精度を検証することが可能となる。さらに、本研究では用いていない遺伝的操作や遺伝子の生成方法、他の機械学習の手法と組み合わせることで、その精度向上やさらなる傾向の把握が可能であると考えられる。本研究では経路長と高度の2次元座標での推定のみを行ったが、今後は元とする大気モデルをNRLMSISE-00などの3次元モデルを用いることでより実観測に近い推定が可能となる。従って、今後の課題として、まずは軌道シミュレータの精度の検証と精度向上に努め、さらに推定シミュレータにおける遺伝的アルゴリズムの改良と検討を行うことが挙げられる。

参考文献

- 1) 株式会社 ALE Web site
<https://star-ale.com/> [cited on Jan. 4, 2024]
- 2) 人工流星ミッションのイメージ
https://star-ale.com/assets/images/skycanvas/img_sample_01.jpg [cited on Jan. 4, 2024]
- 3) 2023年12月26日21時38分の人工衛星の落下
<https://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=5632> [cited on Jan.5,2024]
- 4) 超低高度衛星技術試験機「つばめ」(SLATS)の運用結果について
https://www.satnavi.jaxa.jp/files/project/news/2019/pdf/01_slatsMaterial-sasaki.pdf [cited on Jan. 4, 2024]
- 5) 山田祐輔, 金崎雅博”進化計算を用いた複数デブリ投棄衛星の連続除去軌道最適化”, 第8回「スペースデブリワークショップ」講演資料集, 2018年
- 6) 大谷紀子: 進化計算アルゴリズム入門 生物の行動科学から導く最適解, オーム社, pp. 6-36, 2018年
- 7) Mersenne Twister とは? <http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/m-mat/MT/what-is-mt.html> [cited on Jan. 5, 2023]
- 8) D.A.Vallado, Fundamentals of Astrodynamics and Applications, Space Technology Library, 2013, pp.565-567.
- 9) U.S. Standard Atmosphere 1976
https://web.archive.org/web/20060513194709/http://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/us_standard.html [cited on Jan.4,2024]
- 10) About Atmospheric Modelweb Models at CCMC
https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/about_atmos.html [cited on Jan.4,2024]
- 11) 竹内端夫, 林友直, 関口豊: 人工衛星の落下推定法について, 宇宙科学研究所報告第15号 1983年8月, pp.26-28.
- 12) 半揚 稔雄: ミッション解析と軌道設計の基礎, 現代数学社, pp. 271-374, 2014
- 13) 木村菜摘: 人工流星の軌道とその運用に関する研究, 平成28年度卒業研究論文, 2020年
- 14) 東翼: 複数の人工流星の機動予測に基づく放出計画の提案, 令和4年度修士論文, 2023年

謝辞

本研究を進めるにあたり、約4年間にわたって熱心にご指導していただいた佐原宏典教授には深く感謝を申し上げます。人に比べて物事を理解するまでに時間を要し、決して優秀な学生とはいえなかった私ですが、時に優しく時に厳しく、教員として人生の先輩として背中を押し続けてくださったこと、そんな佐原先生のご指導を賜われたことが誇りです。また、株式会社 ALE の岡島礼奈様をはじめ関係者の皆様には、研究の機会と指針を与えてくださったことに大変感謝しております。さらに、同研究室の人工流星班の後輩諸君には、頼りない部分もあったこととは思いますが、ともに議論しよりよい研究を目指す良き仲間でした。感謝しております。未熟な私に多くのアドバイスや助言をくださった同研究室の同期や後輩の皆様、本当にありがとうございました。楽しむときはめいっぱい楽しみ、乗り越えねばならないことがあるときは努力と研鑽を重ねる尊敬できる同期や先輩、後輩に恵まれたことを実感し、この研究室で研究ができたことを大変嬉しく思います。研究室が違っていても、卒業年度が変わってしまっても、ともに努力し支え合ってくくださった友人たちがいなければ挫折していたかもしれないと思います。かけがえのない友人たちに出会えたことに感謝しています。最後に、どんなときも私を信じ支え、笑って見送り続けてくれた家族への感謝の意を表し、謝辞に代えさせていただきます。