

2022 年度 学位論文（修士）

フローコリドー空域の時空間最適化

2023 年 1 月 27 日

東京都立大学大学院

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

21863635 吉野 純平

指導教員 武市 昇 教授

目次

1.	序論	1
1.1.	研究背景	1
1.2.	研究目的	1
2.	使用データ	2
2.1.	CARATS Open Data	2
2.2.	MSM	2
2.3.	運航性能モデル	3
2.3.1.	BADA モデルを用いた燃料消費量の推定と速度の扱い	4
3.	フローコリドーの設定	5
3.1.	フローコリドーの運用概念	5
3.2.	二次元経路の設定	6
3.3.	フローコリドー空域の高度帯の設定	7
3.3.1.	軌道最適化による高度帯の設定	7
3.3.2.	BADA モデルを用いた軌道生成による高度帯の設定	8
4.	干渉機体の迂回による運航コスト増加量の推定	10
4.1.	干渉機体の抽出	10
4.2.	回避方法と回避軌道の生成	11
4.2.1.	水平回避	11
4.2.2.	垂直回避	12
5.	利用機体のフローコリドーへの合流と運航コストの評価	15
5.1.	合流方法と進入軌道の生成	15
5.1.1.	直接合流	15
5.1.2.	迂回合流	16
5.2.	フローコリドー利用機体の評価	17
6.	空域全体の便益評価	18
6.1.	軌道最適化を用いた便益評価	18
6.2.	BADA モデルを用いた便益評価	20
7.	結論	26
	参考文献	27
	謝辞	28

1. 序論

1. 1. 研究背景

航空輸送需要は、近年のコロナ禍の後も徐々に増加することが予測^[1]されている。しかし、現在の交通流制御では交通量の増加に対しての対処が難しく、更なる混雑や遅延の発生につながる恐れがある。それに対応するための各国・地域における航空交通管理の長期的な計画の一環^[2]として、ASAS（Aircraft Separation Assistance System）等の専用の装置による自律間隔維持を用いた運航が検討されている。自律間隔維持では各航空機が自律的に他機との間隔を維持することができ、管制官の指示を必要としない。しかし、自律間隔維持は専用の装置を有する航空機同士でのみ可能であり、現状は全ての航空機に実装するには長い時間を要すると考えられている。そこで専用の装置の有無によって空域を分け、自律間隔維持を用いた運航を可能とするフローコリドーの導入が検討されている。

フローコリドーは自律間隔維持の装置を有する機体のみが運航する空域で、交通量の多い主要都市間での導入が想定されている。内部では自律間隔維持が可能な機体のみが飛行するため、管制官の介入を必要とせず、より効率的な高密度運航を可能とする。しかし、フローコリドーを利用しない機体にとっては障害物となってしまう。先行研究^[3]では、フローコリドーの導入を想定し、外の機体がフローコリドー空域を回避するシミュレーションによる便益評価や、フローコリドー導入区間の最適化、導入時刻の最適化の研究が存在する。しかし、フローコリドー空域の空間的な配置と時間的な配置は複合的に考えられていない。

1. 2. 研究目的

本研究では、各時刻において適切にフローコリドー空域を配置することにより、フローコリドー導入時の更なる便益の向上を目標とする。そこで本研究では、福岡発羽田行きの経路にフローコリドーを導入し、羽田空港に西方向から着陸する便がフローコリドーを利用することを想定し、日本上空の航空交通流を実際の運航データを用いて便益評価を行う。各時間帯においてフローコリドー空域の配置を変化させ、フローコリドーを利用する機体の運航コスト削減量と利用しない機体がフローコリドー空域を回避した際の運航コスト増加量を総合的に評価し、フローコリドー空域の時空間最適化を試みる。

2. 使用データ

2.1. CARATS Open Data

本研究の解析には国土交通省提供の CARATS Open Data^[4]を利用した。CARATS Open Data は時刻、経度、緯度、高度、型式のデータが約 10 秒おきに格納されている。本研究では 2018 年度の各月 12 週間 84 日分のデータを利用した。図 2.1 にある 1 日の国内便の航跡データを示す。

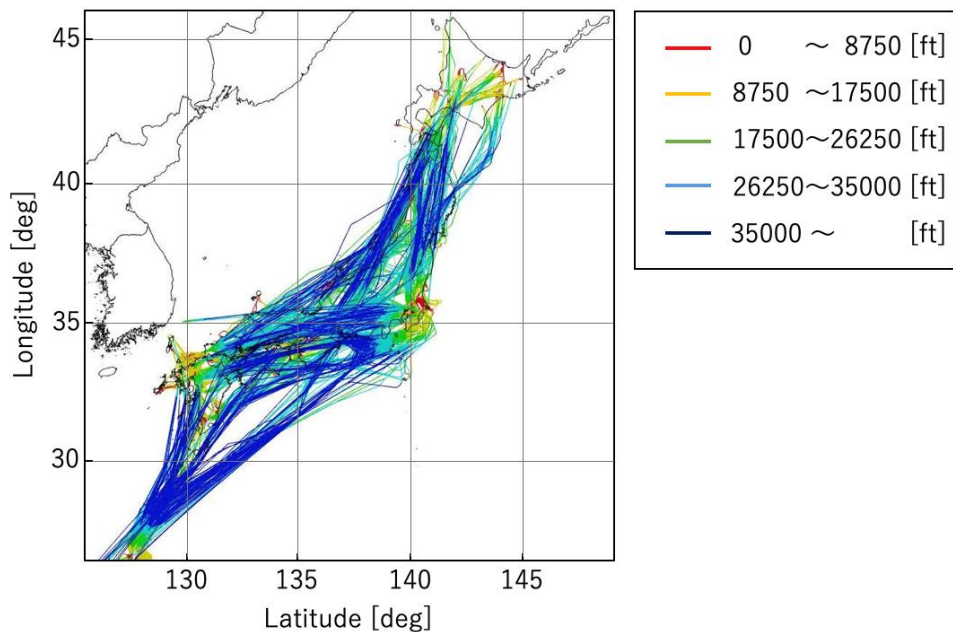


図 2.1 ある一日の航跡データ

2.2. MSM

航空機の運航を解析する際に気象予報データを必要とするが、本研究では気象庁提供のメソ数値気象予報モデル (MSM : Meso Scale Model) ^[5]を使用した。MSM では 3 時間おきに各種気象情報の予報値が計算され提供されている。本研究ではこの MSM データを時間的、空間的に線形補完し要素を取り出している。表 2.1 に MSM の概要を示し、図 2.2 にある時刻のある高度面における気温を示す。

表 2.1 MSM の概要

要素	各気圧面 (1000hPa・975hPa・950hPa・925hPa・900hPa・850hPa・800hPa・700hPa・600hPa・500hPa・400hPa・300hPa) における高度, 風 (東西成分と南北成分), 気温, 上昇流, 相対湿度
初期値	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC (1 日 8 回)
予報時間	39 時間 3 時間間隔
データ形式	国際気象通報式 FM92 GRIB 二進形式格子点資料気象通報式(第 2 版) ※略称: GRIB2
配信領域	北緯 22.4 度~47.6 度, 東経 120 度~150 度
格子系	等緯度等経度: 0.1 度×0.125 度 (格子数 253×241)

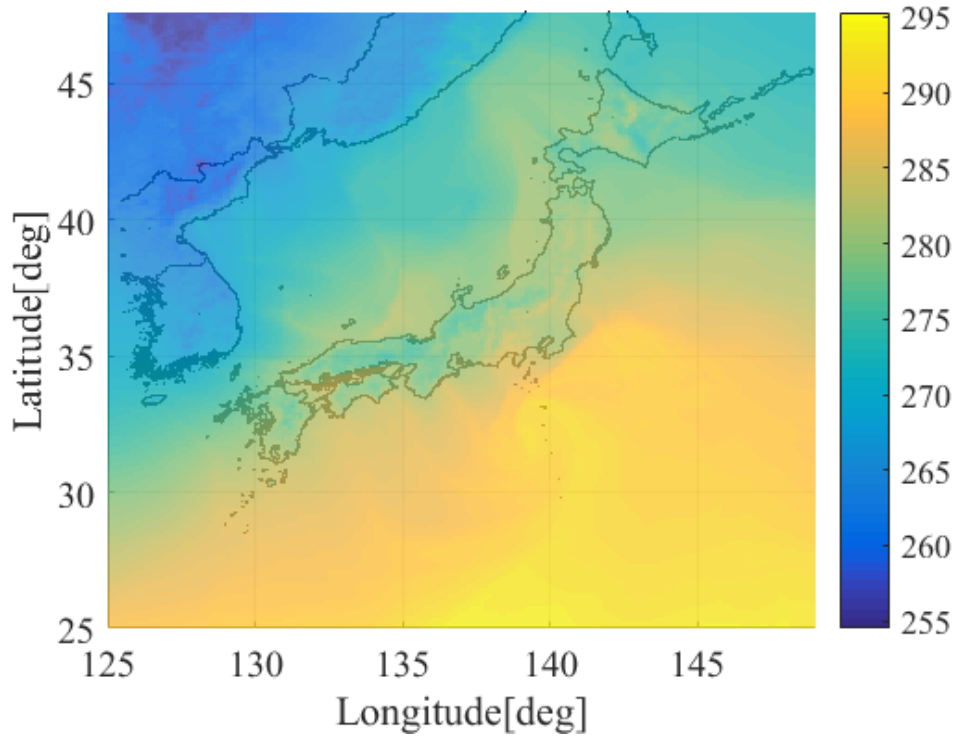


図 2.2 MSM から得られる気温データ

2.3. 運航性能モデル

航空機の飛行状態を推定するために, 本研究では BADA (Base of Aircraft Data) モデル^[6]を使用した. BADA モデルは欧州航空法安全機構 (EUROCONTROL) が開発および維持している航空機の運航性能モデルであり, 航空機を質点としたエネルギー保存則に基づくモデルである. 航空機の型式ごとに性能データが提供されている.

2.3.1. BADA モデルを用いた燃料消費量の推定と速度の扱い

本研究では、燃料消費量の推定をする際に BADA モデルを使用した。また、実際の航空機の速度調整には指示対気速度 (IAS) を用いるが、速度計測器の取り付け誤差等は考慮されておらず、IAS を直接求めることは困難である。そこで本研究では、較正対気速度 (CAS) を IAS と等しいものとして扱う。

3. フローコリドーの設定

3.1. フローコリドーの運用概念

日本上空の航空交通は、主要 5 空港間の航空便数だけで日本全体の 20%以上を占め^[7,8]、米国においても特定の 10%の空港間の便が全体の 3 割以上を占める^[9]。このような特定の経路上では、多くの航空機がほぼ同じ経路上を同一方向へ飛行しており、それらはほかの便と共に管制官に誘導されながら飛行している。フローコリドーは前述の通り、このような交通需要の大きな都市間などを結ぶ細長い空域として導入が検討されている。交通量の多い大都市間に適切に配置することにより、内部を飛行する航空機は自律間隔維持を用いて最適な速度と高度で目的地まで飛行することができるため、運航コストを低減することが可能である。またその際地上管制官はフローコリドー外を飛行する航空機にのみ管制を行えばよい。安全性を損なうことなく空域全体としての交通容量を拡大することが可能となる。このフローコリドーの概念図を図 3.1 に示す。

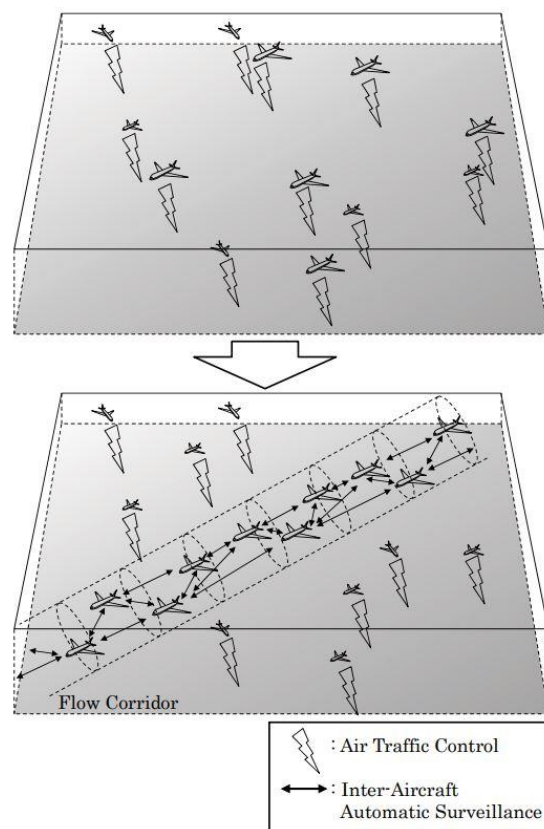


図 3.1. フローコリドー概念図^[5]

3.2. 二次元経路の設定

本研究では、福岡発羽田行きの経路にフローコリドーを導入することを想定している。福岡空港付近に存在する YURRY というウェイポイントから FLUTE 付近までは標準的な RNAV 経路に従い、それ以降はフローコリドー外部の管制指示に影響を与えないよう、羽田 ATC セクターの最も内側を通り、羽田空港付近の ARLON を経由し羽田空港 34L 滑走路着陸を终点とする経路を設定した。参考に図 3.2 にある 1 日の福岡－羽田便の航跡を、図 3.3 に西日本を出発し羽田空港に着陸する便の航跡を、図 3.4 に設定した二次元経路を示す。

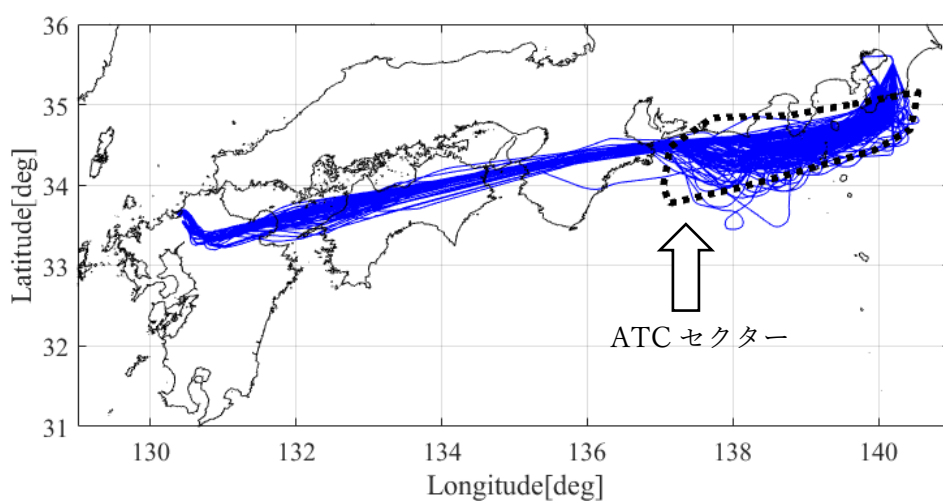


図 3.2 ある 1 日の福岡－羽田便の航跡

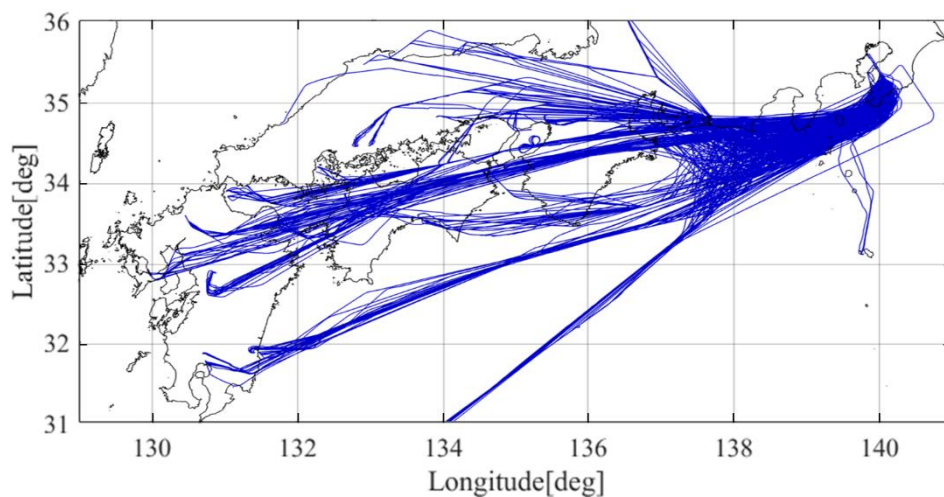


図 3.3 ある 1 日の西日本発羽田着便の航跡

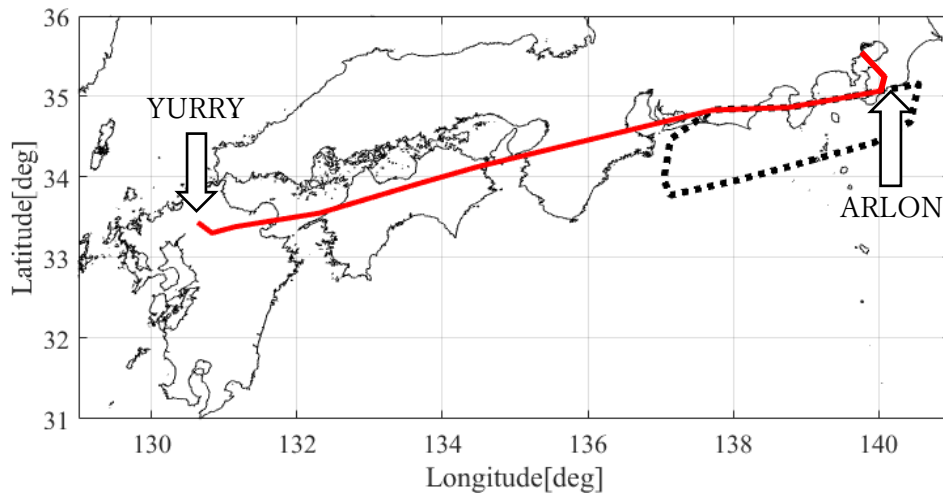


図 3.4 設定したフローコリドーの二次元経路

3. 3. フローコリドー空域の高度帯の設定

前節でフローコリドー空域の二次元経路を決定したので、本節ではフローコリドー空域の高度帯を設定する。本研究では、先行研究で行われてきた軌道最適化を用いて決定する手法に加え、BADA モデルを用いてフローコリドー利用機体の軌道を生成し高度を決定する手法を用いる。また、それぞれの手法について運航コストの評価を行い、結果の比較を行う。

3. 3. 1. 軌道最適化による高度帯の設定

フローコリドー空域を設定するにあたり、前項で二次元上の経路が決定したため、本項では軌道最適化により高度帯を決定する。フローコリドーは多くの機体の最適軌道を内包する空域が望ましいとされているが、その最適な軌道は機種や重量により異なる。そこで本研究では大型・中型・小型ジェット旅客機の代表的な 3 機種について、機体質量をそれぞれ 4 通り変えた計 12 個のケースの解析を行う。機体質量は国内線の実際の質量分布^[10]を参考に、BADA 標準質量の 100% , 90% , 80% , 70%とした。

本研究における最適軌道の導出とは、二次元の飛行経路、初期点及び終端点での機種ごとの初期値、飛行中の高度・速度等の上限と下限を与えたうえで、航空機の運航コストを最小化する高度・速度の履歴を求めることである。そこでソルバーとしては非線形関数の最適化問題を解くことが可能な逐次二次計画法 (SQP , Sequential Quadratic Programming) ^[11,12]を用いた。また、最適化変数は高度と速度とし、目的関数は運航コストとした。また本研究では運航コストJは燃料消費量と飛行時間の線形和として定義される(1)式を用いた。

$$J = \int_0^t \mu(t)dt + \frac{C_i}{80}t \quad (1)$$

ここで J [kg] は運行コスト， t [sec] は飛行時間， μ [kg/s] は燃料流量， C_i はコストインデックスである．初期速度と終端速度及び高度，初期重量， C_i は現実的な値を設定するため，実運航データや航空機運航者で実際に用いられている値を参考に値を定めた．また最適化変数である高度と速度の履歴の初期値は複数用意し，マルチスタート法を利用することにより局所最適解を避け大域的最適解を求めた．最適化を行う際には，より現実の飛行状態に近づけるために上昇中と降下中の CAS はそれぞれで一定，巡航中はマッハ数を一定としている．気象条件としては 2015 年の年間平均風を使用した．

以上の手法を用いて計 12 通りの最適軌道を導出した．一般的に航空機は垂直方向に 1000[ft]，水平方向に 5[NM] の安全間隔を設けて飛行している．そこで本研究では導出した最適軌道より垂直方向に 1000[ft]，水平方向に 5[NM] の幅を持たせた空域をフローコリドー空域とする．以下，図 3.5 に軌道最適化より設定したフローコリドー空域を示す．

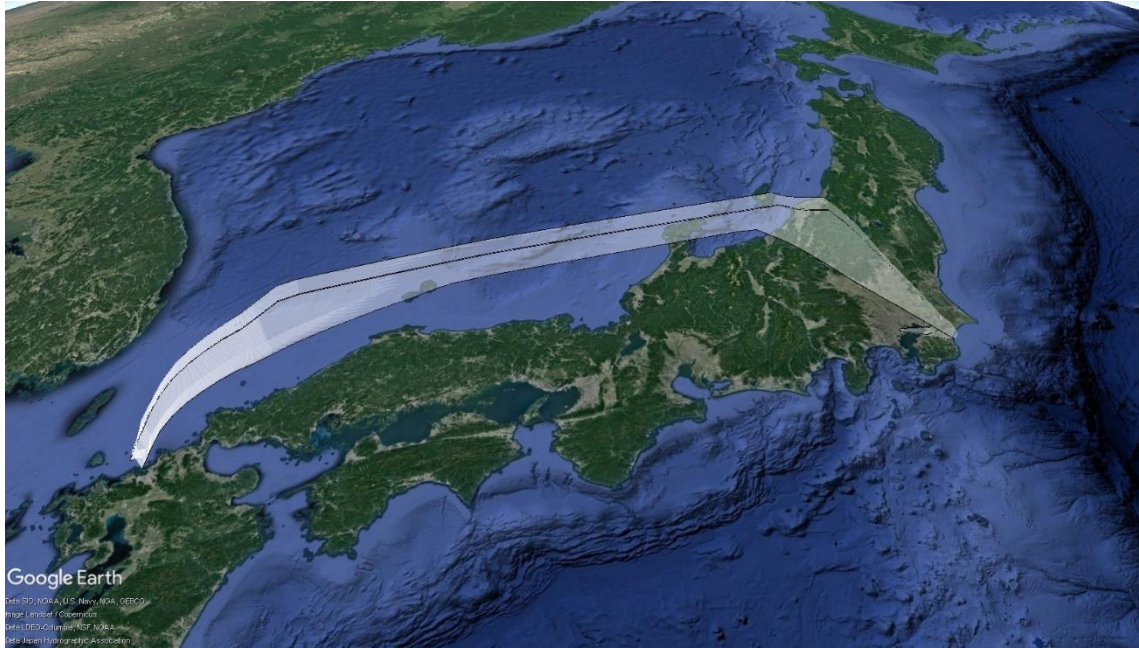


図 3.5 軌道最適化より設定したフローコリドー空域

3.3.2. BADA モデルを用いた軌道生成による高度帯の設定

本研究では，軌道最適化のほかに BADA モデルを用いて軌道の生成を行い，生成された軌道より高度帯の設定を行う．BADA モデルでは航空機の型式別に，高度毎の標準的な各種の速度，上昇降下率などのパラメータが格納されているため，より現実的な軌道の生成，評価が可能である．CARATS Open Data，BADA モデルおよび MSM データを用いてフローコリドーを利用する機体の軌道(BADA 軌道)の生成を行う．BADA モデルには，標準的

な真対気速度 V_{TAS} や上昇率 $ROCD$ 等の飛行時のパラメータが含まれる。それらの値と MSM の気象データより得られる風速 V_W は、位置、高度、時間の関数で表せられるので、以下の微分方程式(2)式をたてることができる。これを解くことにより BADA 軌道を作成する。

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{TAS}(h) + V_W(h, x, t) \\ ROCD(h) \end{pmatrix} \quad (2)$$

また、BADA モデルを使用することでより正確な燃料消費量の算出が可能であり、コストインデックスを用いた運航コストではなく燃料消費量で評価することが可能である。これは軌道最適化の評価指標である運航コストの計算でコストインデックスが 0 であることと同義であるため、最適軌道が燃料消費量を最小とする場合と比較することが可能である。

BADA 軌道では、1000[ft]ごとに任意の巡航高度を選択できるようになっており、その中で最も削減できる燃料消費量が大い巡航高度を選択する。軌道最適化と同様に導出した BADA 軌道より垂直方向に 1000[ft]、水平方向に 5[NM]の幅を持たせた空域をフローコリドー空域とする。以下、図 3.6 に BADA モデルより設定したフローコリドー空域の一例を示す。



図 3.6 BADA モデルより設定したフローコリドー空域

4. 干渉機体の迂回による運航コスト増加量の推定

4.1. 干渉機体の抽出

第3節より決定したフローコリドー空域は、フローコリドーを利用せず外部を飛行する航空機にとっては巨大な障害物となるため、それらの機体は迂回して飛行しなくてはならない。この迂回をシミュレーションするために、設定したフローコリドー空域と飛行経路が干渉している機体を実運航データを用いて抽出する。解析には CARATS Open Data より2018年度84日間の実運航データを用いた。また本研究では先行研究^[3]と同様の解析対象除外ルールを設け、その概要を表4.1に示す。これはフローコリドーと同様の RNAV 経路を利用し飛行している便は干渉を避けられないことから、それらの機体はフローコリドーに沿って飛行することで、従来通りの運航コストで飛行できると考えられるためである。また、これらの除外ルールを適用し得られたある1日の干渉機体の航跡データを図4.1に、干渉位置を図4.2に示す。

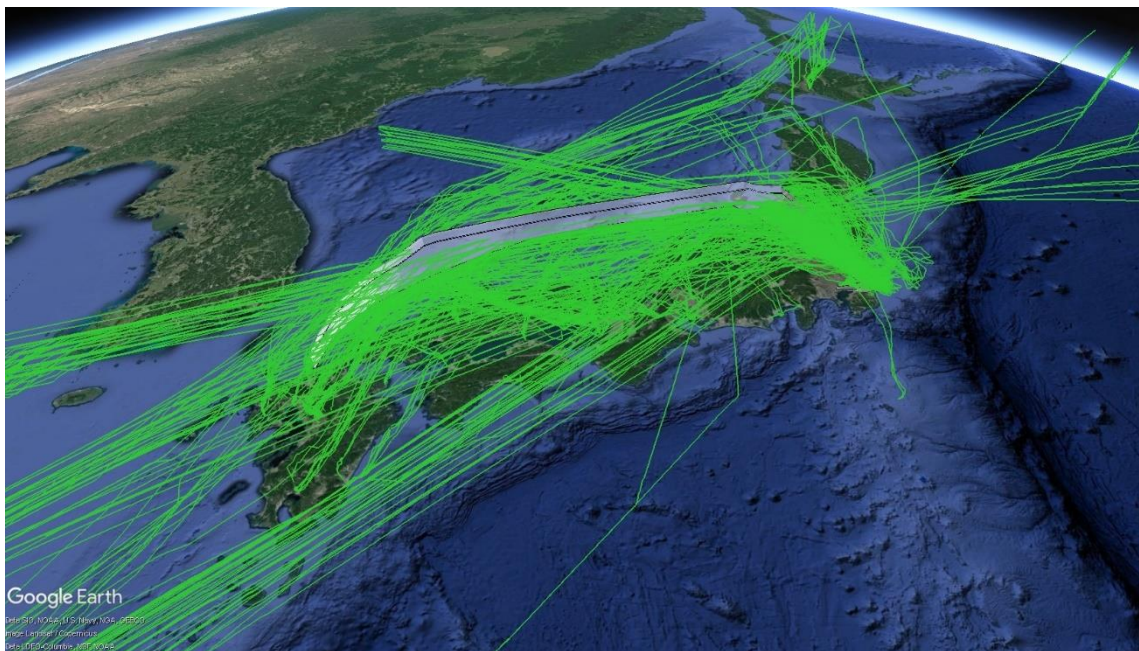


図 4.1 抽出したある一日の航跡
(白：フローコリドー空域，緑：干渉機体航跡)

表 4.1. 解析除外対象と除外ルール

解析除外対象	除外理由	除外ルール
フローコリドーと同様の RNAV 経路を利用し羽田に着陸する便で、フローコリドーを横切る必要のない便	フローコリドーに沿って飛行することで従来通りの運航コストで飛行できると考えられるため	フローコリドーに沿って飛行する羽田着便かつ、出発地点（離陸空港）の緯度が 33.5[度]以下の機体
福岡を離陸してフローコリドーと同様の RNAV 経路を利用する便	フローコリドーに沿って飛行することで従来通りの運航コストで飛行できると考えられるため	福岡発かつ、フローコリドーに沿って飛行した機体
ATC セクター内で干渉する便	着陸管制の影響で干渉しており、避けて飛行しても運航コストに殆ど影響は無いと考えられるため	羽田着便かつ、経度 138[度]以上、高度 25000[ft]以下で干渉している機体

4. 2. 回避方法と回避軌道の生成

前節で抽出した干渉機体がフローコリドーを回避飛行する際の回避方法と回避軌道の作成について検討する。本研究では飛行方位を変更し横方向に避ける水平回避と、飛行高度を変更し下方から避ける垂直回避の二通りの回避方法を採用した。これは実際にパイロットが航空機を操縦する際に飛行方位の変更と、一定の上昇率降下率による高度の変更が容易に行うことが出来ることから、より簡易的で現実的な回避軌道とするためである。フローコリドーと干渉する全ての機体に対し、前述の二通りの回避方法を適用し、より回避によって増加する運航コスト又は燃料消費量が小さい回避方法を採用する。

4. 2. 1. 水平回避

前節で紹介した回避方法のうち本節では、飛行方位のみを変更して回避する水平回避について説明する。対象機体はフローコリドーから安全間隔 5[NM]を確保し飛行するために、図 4.2 に示すような回避軌道を想定する。対象機体は回避開始地点から飛行方位の変更を行い、フローコリドーを回避した後、再び飛行方位を変更し元の軌道へと戻るものとする。この時、回避開始地点と回避終了地点はいずれも飛行方位の変更角が最小となるように設定する。以下、図 4.3 に水平回避の一例を示す。

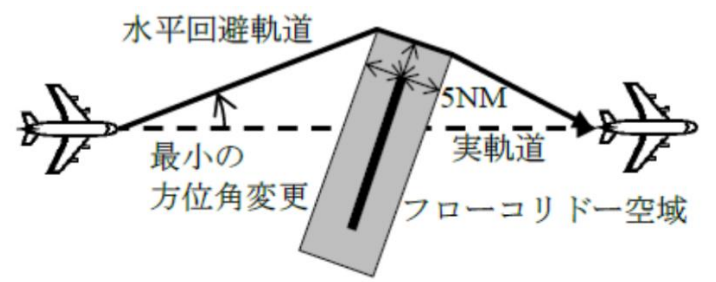


図 4.2 水平回避軌道概念図

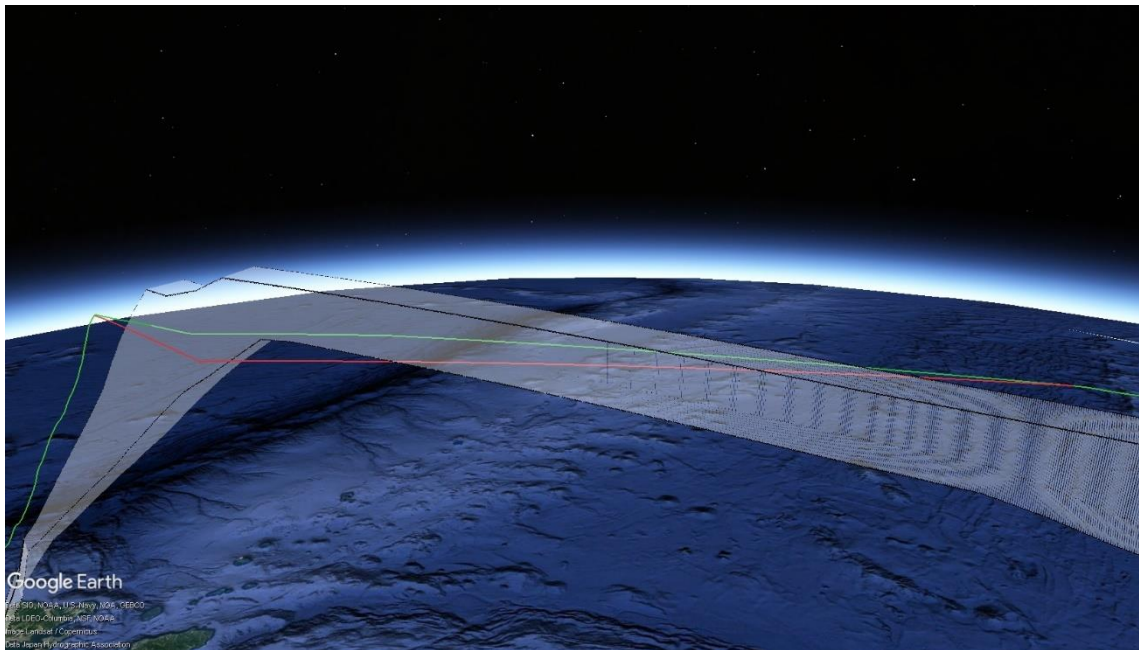


図 4.3 水平回避軌道の一例
(緑：元の軌道，赤：回避軌道)

4. 2. 2. 垂直回避

第 4.2 節で紹介した回避方法のうち本節では、飛行高度のみを変更して回避する垂直回避について説明する。対象機体はフローコリドーから安全間隔 1000[ft]を確保し飛行するために、図 4.4 に示すような回避軌道を想定する。対象機体は回避開始地点から標準的な降下率で降下し、フローコリドーを回避した後、標準的な上昇率で上昇を行い元の軌道へと戻るものとする。本研究では垂直回避に用いる降下率と上昇率は BADA モデル記載の標準的な値を使用する。また垂直回避軌道を作成する際にフローコリドーと干渉する直前直後に高度の変更がある場合は、上昇や降下をせずに元の軌道と接続するようにする。この条件としては、干渉する前後 10 分以内にフローコリドーの下面の高度を飛行しているか否かとした。以下、図 4.5 に垂直回避の一例、さらに図 4.6 にある干渉機体が回避飛行を行う候補となる軌道を示す。

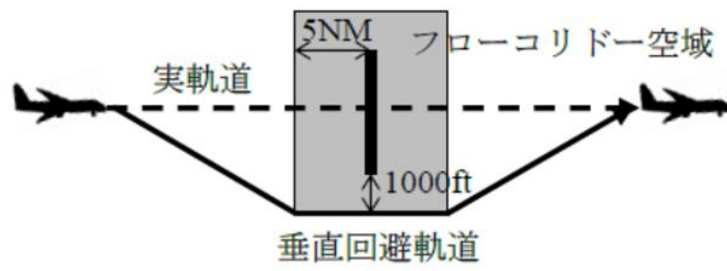


図 4.4 垂直回避軌道概念図

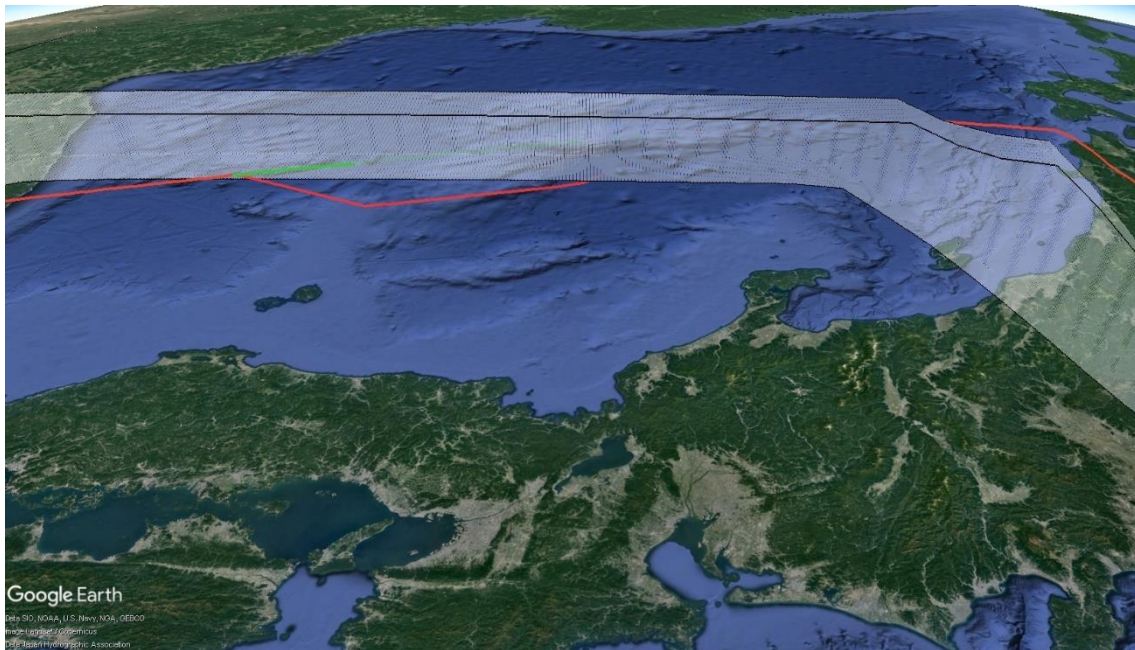


図 4.5 垂直回避軌道の一例
(緑：元の軌道, 赤：回避軌道)

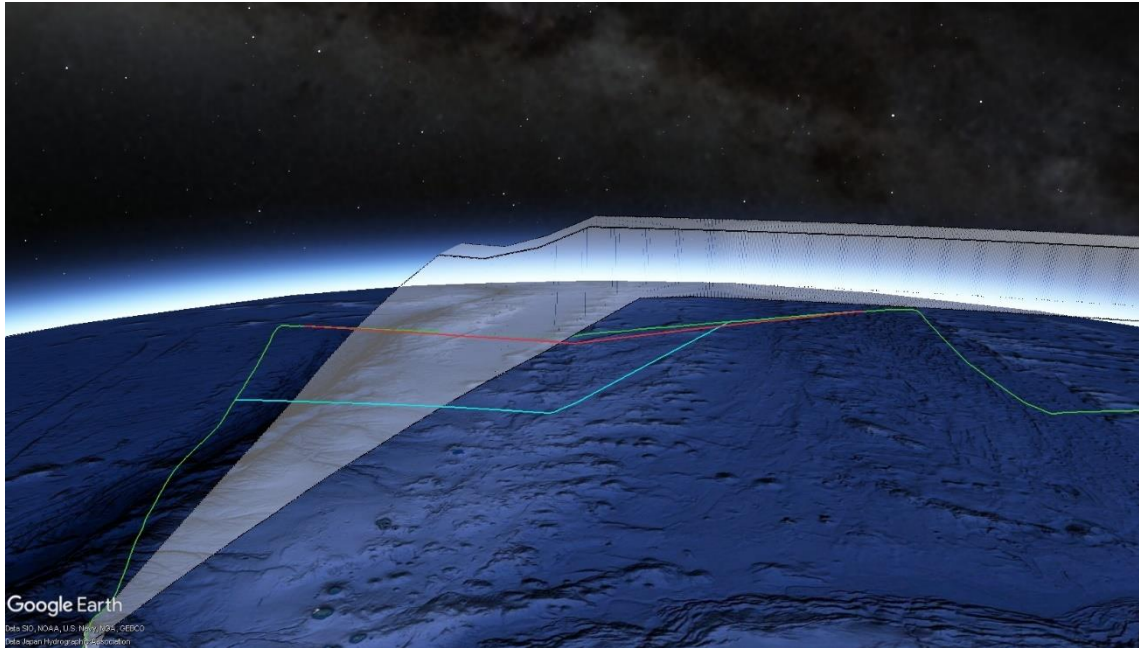


図 4.6 ある 1 便の回避飛行の候補
(緑：元の軌道, 赤：水平回避, 青：垂直回避)

5. 利用機体のフローコリドーへの合流と運航コストの評価

5.1. 合流方法と進入軌道の生成

フローコリドーを利用する機体は、フローコリドーへ合流するための飛行を行わなければならない。また、フローコリドー利用機体の運航コストを正確に評価するためには、合流までの軌道の評価と合流後フローコリドー内での軌道の評価が必要である。そこで、本研究ではこの合流までの軌道を進入軌道と呼び、各機体においてシミュレーションを行い、フローコリドー利用機体を正確に評価していく。

進入軌道は実際の運航を想定し、現実的な軌道を再現するために BADA モデルを用いて軌道の生成を行う。BADA モデルより型式ごとの標準的な速度や上昇率を用いる。軌道の生成は実運航データを基にして、航空機の方位変更角が出来るだけ小さくなるように元の軌道から軌道変更点を選択し、軌道変更点からフローコリドー入口まで BADA モデルによって軌道を生成する直接合流を基本とする。しかし、離陸空港とフローコリドーの入口位置が近すぎる場合など高度の制限により直接合流ができないことがある。この場合は、離陸後羽田空港とは逆方向の西側に迂回をしてフローコリドーに合流する迂回合流を考える。この際、実運航データは用いず、離陸から合流まで全て BADA モデルを用いて軌道の生成を行う。

5.1.1. 直接合流

前節で紹介した合流方法のうち本節では、実運航データを基にした直接合流について説明する。対象機体は軌道変更点からフローコリドー入口まで BADA 軌道で飛行を行う。この時、軌道変更点は飛行方位の変更角が最小となるように設定する。また、実運航データよりフローコリドー入口と同一の高度での飛行が見られる場合は、その高度のデータ点の中から軌道変更点を設定する。以下、図 5.1 に直接合流の一例を示す。

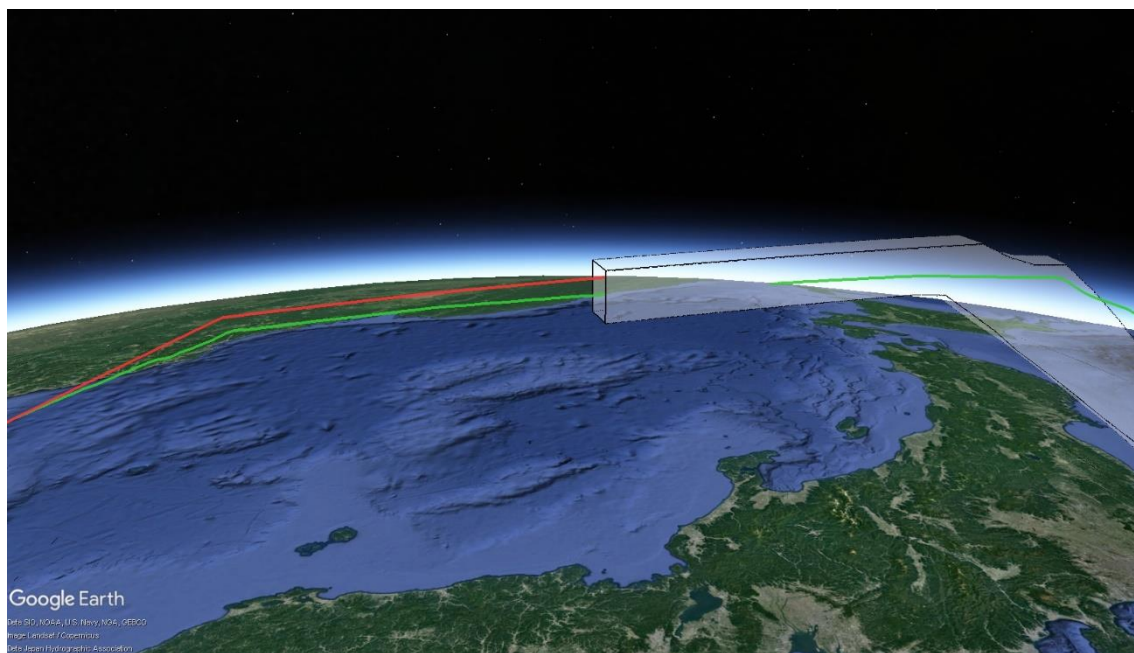


図 5.1 進入軌道（直接合流）の一例
（緑；元の軌道，赤：進入軌道）

5. 1. 2. 迂回合流

第 5.1 節で紹介した合流方法のうち本節では、離陸後西方向に迂回を行いフローコリドー入口へ合流を行う迂回合流について説明する。第 5.1 節で述べた通り、直接合流が不可能な機体は全てこの迂回合流によるフローコリドー進入を試みる。対象機体は離陸後西方向に飛行を行い、迂回点で飛行方位を変更しフローコリドー入口まで BADA 軌道で飛行を行う。この時、迂回点は離陸空港の座標、フローコリドーの入口位置の座標、BADA モデルより速度や上昇率等のデータを用いて設定する。以下、図 5.2 に迂回合流の一例を示す。

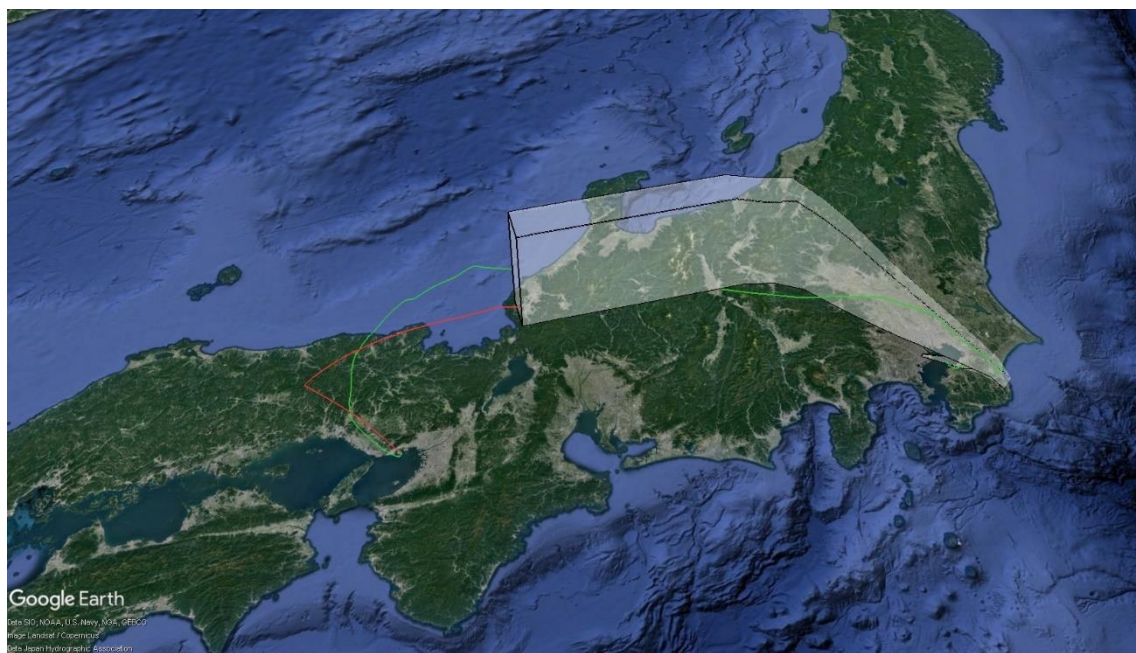


図 5.2 進入軌道（迂回合流）の一例
(緑；元の軌道, 赤：進入軌道)

5.2. フローコリドー利用機体の評価

前述したフローコリドー内での評価と、前節で述べた進入軌道のシミュレーションを用いることでフローコリドーを利用する機体の運航コストを正確に評価できるようになった。進入軌道の運航コストとフローコリドー内の飛行の運航コストの和が、実運航データより求められる従来の運航コストよりも小さい機体はフローコリドーを利用するとした。これは、フローコリドーを利用することによって少しでも便益を得られる機体は利用した方が良いという条件である。

6. 空域全体の便益評価

6.1. 軌道最適化を用いた便益評価

前節までで、フローコリドーを利用する機体が削減できる運航コストと、フローコリドーに干渉してしまう機体によって増加する運航コストを求めることが出来た。本節ではそれらを用いて時刻及び区間を考慮した空域全体の便益評価を行っていく。本研究では、羽田空港に西方向から着陸する機体の飛行がある7時から24時の間でのみフローコリドーを導入することを想定し、その間1時間ごとにフローコリドーの入口を巡航区間が含まれるように、フローコリドー始端から100kmから800km地点の間で変化させ評価を行う。

まずは、全ての機体を対象とした軌道最適化を用いた空域全体の便益評価の結果を以下に示す。

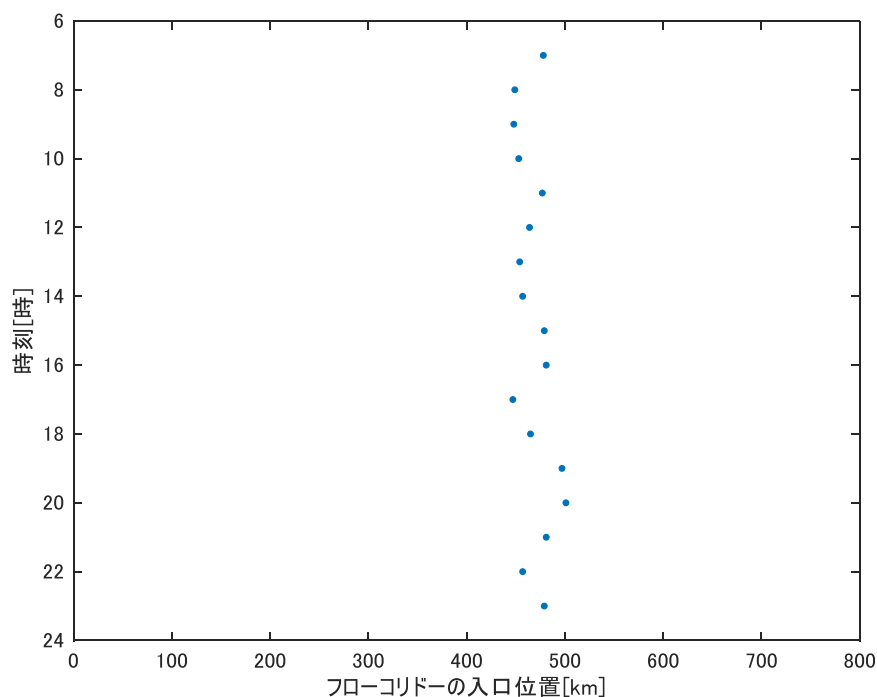


図 6.1 各時刻の最適なフローコリドーの入口位置

図 6.1 より、各時間帯における最適なフローコリドーの入り口位置は多少のばらつきはあるが、約 500km 地点付近に集まっていることが分かる。これはフローコリドーの入り口位置が羽田空港側に行くほど、フローコリドーを利用する機体数が増え運航コスト削減量も大きくなっていくことが影響している。しかし、羽田空港に近く飛行距離の短い空港からの機体は、フローコリドーを利用するためには従来の飛行よりも大幅に上昇しなければならないため、便益が得られなくなる。よって図のように特定の地点付近に最適な入口位置が集まる。また、1 日当たりの運航コスト削減量は 172362.8[kg]であり、これは福岡発羽田行き

の機体のみがフローコリドーを利用するとして評価を行った結果よりも大幅に増加しており、特定の空港間で専用のフローコリドーが導入されていなくても他の空港間でのフローコリドーを利用すれば便益を得ることが可能であることを示している。

次に、対象機体を絞った場合の空域全体の便益評価を行う。ここでは、中型機のみがフローコリドーを利用すると仮定し評価を行った。中型機を選択した理由としては、運航コストの削減量が大型機と同等、小型機よりも大きい傾向にあり、大型機よりも飛行割合が大きいためである。中型機のみを対象とした評価結果を以下の表 6.1 に示す。

表 6.1 対象機体を絞った場合の評価結果（中型機のみ）

1 日当たりの運航コスト削減量[kg]	49378.8
1 日当たりのフローコリドー利用便数[便]	74.5

表 6.1 より、1 日当たりの運航コスト削減量は 49378.8[kg]であり、これは全ての機体を対象とした場合の約 33[%]である。中型機の飛行割合が全体の 24[%]であることから考えると、中型機はフローコリドーを利用した際の便益は比較的大きいということが分かる。

6.2. BADA モデルを用いた便益評価

本節では, BADA モデルを用いた空域全体の便益評価を行う. 第 6.1 節で行った, 軌道最適化を用いた便益評価と同様の条件で評価を行う. まずは, 全ての機体を対象とした BADA モデルを用いた空域全体の便益評価の結果を以下に示す.

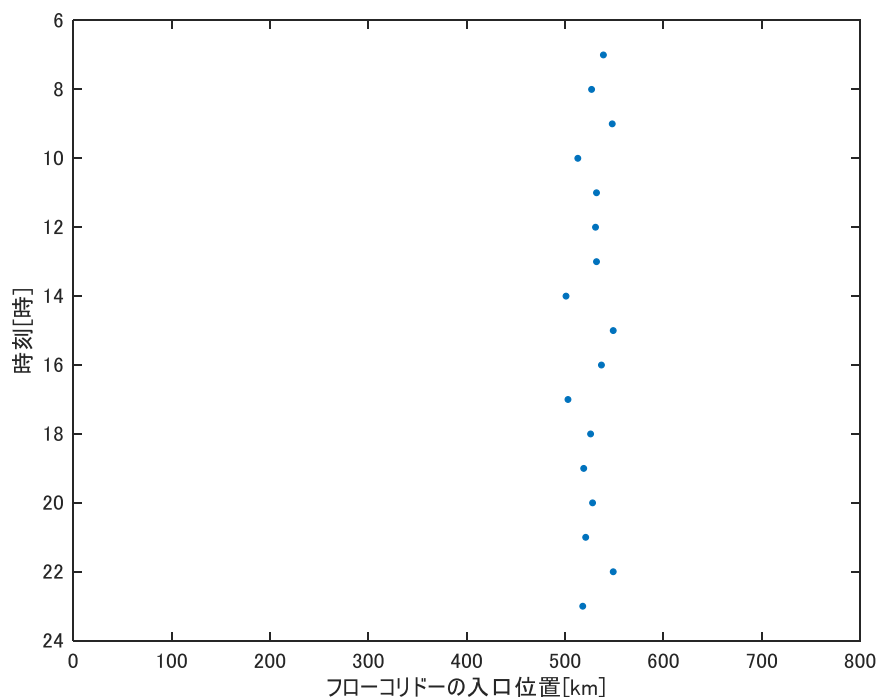


図 6.2 各時刻の最適なフローコリドーの入口位置

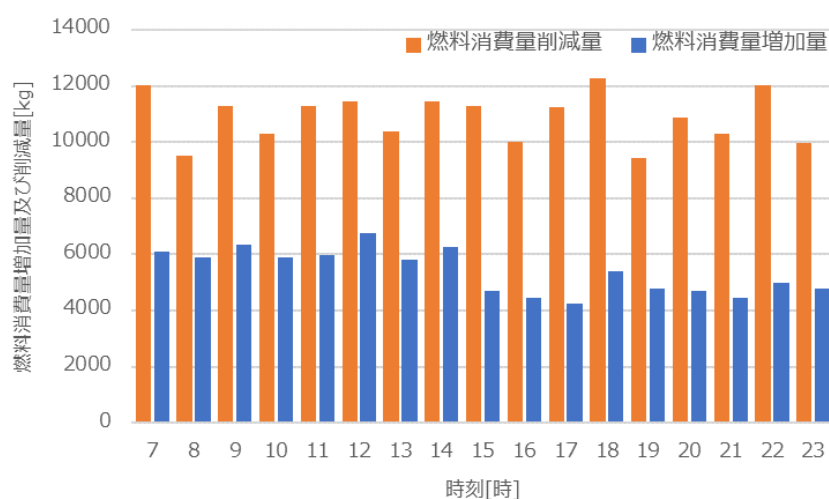


図 6.3 各時刻の燃料消費量の削減量及び増加量

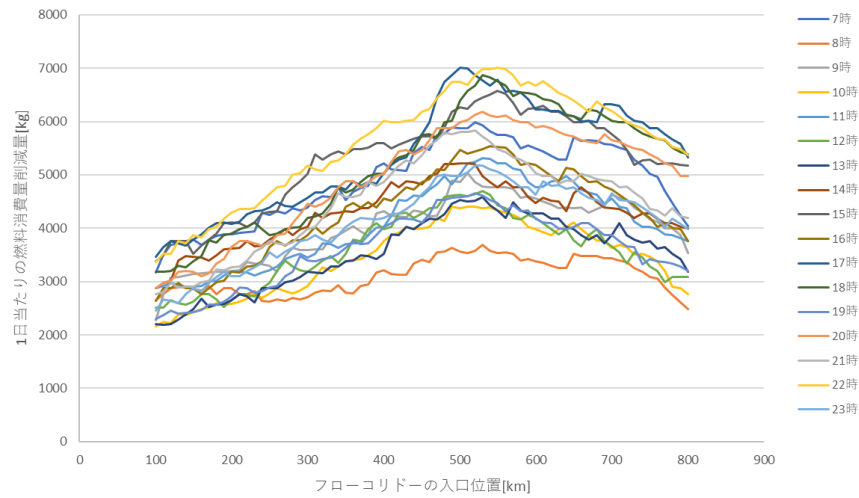


図 6.4 フローコリドー入口位置と 1 日当たりの燃料消費量削減量の関係

図 6.2 より，第 6.1 節の結果と同様に最適なフローコリドーの入口位置は特定の地点付近に集中していることが分かる．また，1 日当たりの燃料消費量削減量は 107826.4[kg]であった．図 6.3 には各時刻における，フローコリドーを利用する機体によって削減できる燃料消費量と，干渉機体が回避飛行を行うことによって増加する燃料消費量を示しており，全ての時間帯において削減量が増加量を上回っていることから，7 時から 24 時の時間帯においては常にフローコリドーを導入することが望ましいと分かる．図 6.4 ではフローコリドー入口位置と削減できる燃料消費量の関係を示している．図 6.4 より，フローコリドーの入口位置によって削減できる燃料消費量が大きく異なることから，各時間帯において適切にフローコリドーの入口位置を設定することが，フローコリドー導入時の更なる便益向上に繋がることが分かる．以下，ある 1 日のフローコリドー利用便と回避便の航跡を図 6.5 に，その中でも特に飛行便数の多い 9 時から 10 時でのフローコリドー導入時の概要図を図 6.6 に示す．この時，緑がフローコリドー利用便の航跡で赤がフローコリドー回避便の航跡である．

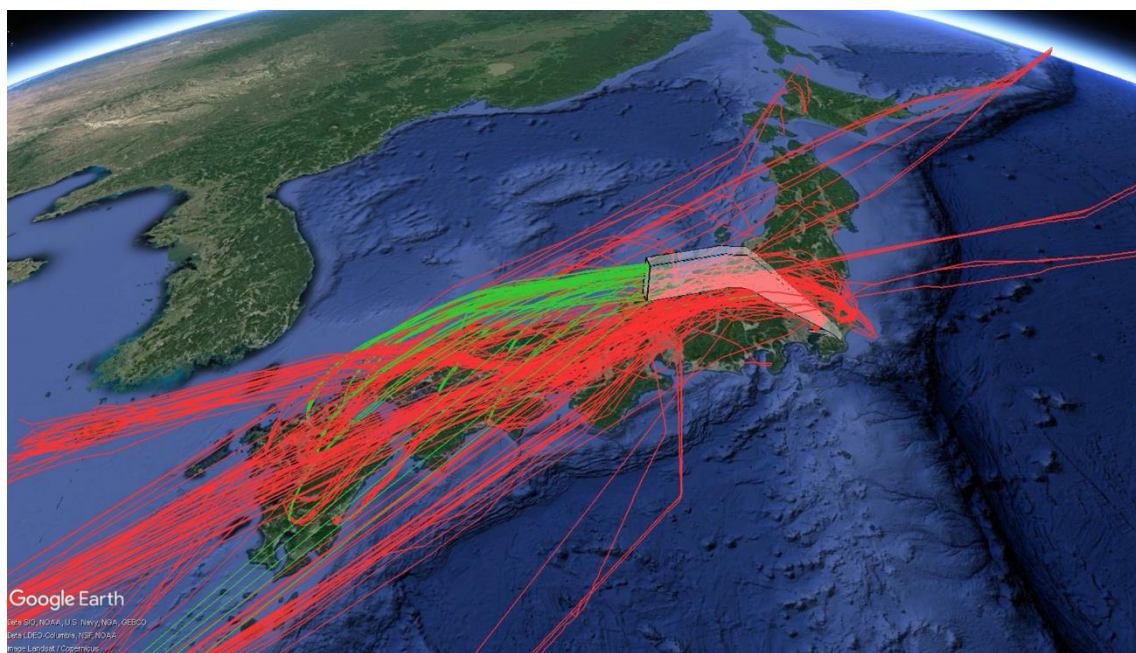


図 6.5 ある 1 日のフローコリドー利用便及び回避便の航跡
(緑：フローコリドー利用便の航跡，赤：フローコリドー回避便の航跡)

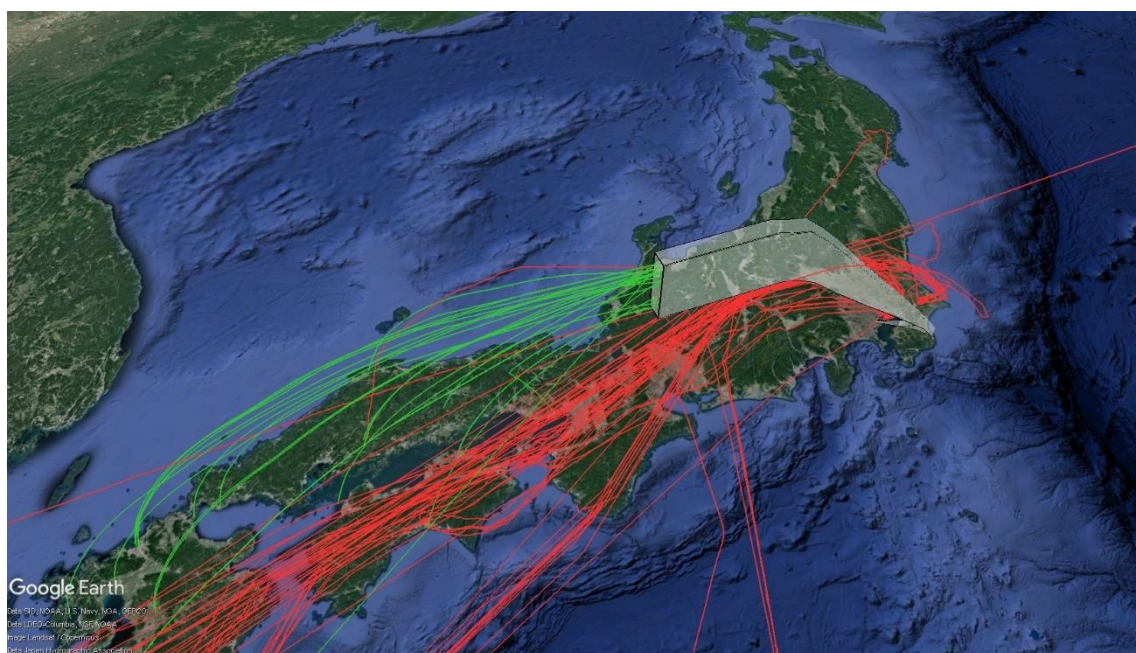


図 6.6 フローコリドー概要図
(緑：フローコリドー利用便の航跡，赤：フローコリドー回避便の航跡)

ここで、図 6.2 の条件でフローコリドーを運用したときの、フローコリドー内の状況を確認したところ、フローコリドー出口付近、つまり着陸の段階で接近しすぎてしまう機体があることが分かった。そこで、フローコリドーを利用する機体が安全な間隔で着陸できるように、フローコリドー内で時間調整を行った。本研究では、適切な着陸間隔を 120[s] としてフローコリドー出口で全ての機体が 120[s] 以上の間隔を保っているよう調整を行う。時間調整はフローコリドー内の巡航区間で速度を落とすことにより行い、改めて燃料消費量の算出を行い評価する。以下、図 6.7 に時間調整前後の時間間隔のヒストグラム、表 6.2 に調整時間と調整後の 1 日当たりの燃料消費量削減量を示す。

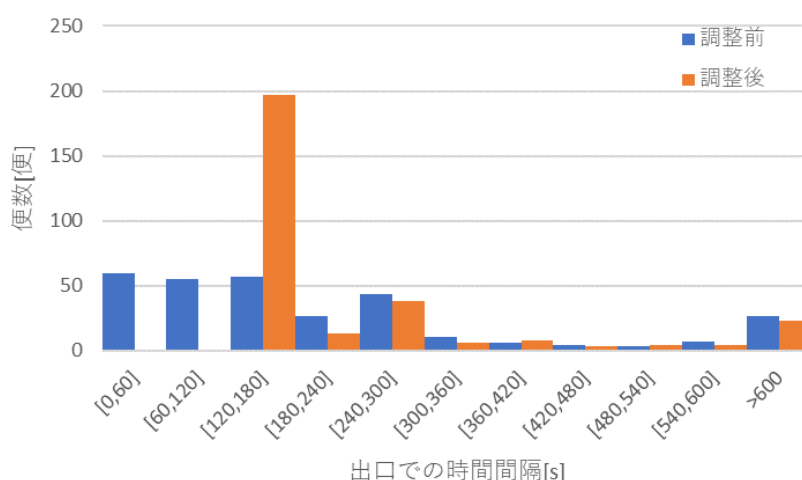


図 6.7 時間調整前後のフローコリドー出口での時間間隔と便数

表 6.2 時間調整と調整後の評価結果

総遅延時間[s]	25165.4
1 便当たりの調整時間[s]	79.7
調整後の 1 日当たりの燃料消費量削減量[kg]	109473.1

図 6.7 より時間調整前には 120[s] の安全な間隔を保てていない便が数多く存在したが、時間調整を行うことでそれらの便は最低でも 120[s] の間隔を保てるようになり、全ての機体が安全な間隔で着陸できるようになった。この時、1 日当たりの燃料消費量削減量は調整前よりも大きくなることが分かった。

さらに、軌道最適化より導出された最適軌道を飛行できるとした場合の削減できる燃料消費量と比較する。つまり、軌道最適化を用いた評価においてコストインデックスを 0 とした場合の評価結果と比較する。以下、表 6.3 にそれぞれの 1 日当たりの燃料消費量削減量を示す。

表 6.3 BADA 軌道と最適軌道の比較

	1 日当たりの燃料消費量削減量[kg]
BADA モデルを用いた評価結果	109473.1
軌道最適化を用いた評価結果	127287.2

表 6.3 より，最適軌道を飛行できると 1 日当たり 127287.2[kg]の燃料消費量を削減することが可能であり，これは BADA モデルを用いた評価結果よりも約 16[%]の便益をさらに向上させることが可能であることを示している。

次に，対象機体を絞った場合の空域全体の便益評価を行う．軌道最適化を用いた評価と同様に中型機のように絞った便益評価を行った．表 6.4 に評価結果を示す。

表 6.4 対象機体を絞った場合の評価結果（中型機のみ）

1 日当たりの燃料消費量削減量[kg]	33173.8
1 日当たりのフローコリドー利用便数[便]	82.6

表 6.4 より，1 日当たりの燃料消費量削減量は 33173.8[kg]であることが分かる．ここで，機体の分類ごとの 1 便当たりの利用効率を比較する．それぞれ対象機体を絞り，空域全体の便益評価を行い，導出した燃料消費量削減量をフローコリドー利用便数で割ることで 1 便当たりの平均燃料消費量削減量を調べた．その結果を以下の表 6.5 に示す。

表 6.5 各分類における 1 便当たりの燃料消費量削減量

	1 便当たりの削減量[kg]
大型機	487.4
中型機	426.6
小型機	298.7

表 6.5 より，大型機と中型機では同じような値だが若干大型機の方が大きくなり，これら 2 つに比べ小型機は小さな値となった．この結果は軌道最適化より求められる最適軌道を飛行した際の運航コスト削減量と同様の関係性となった。

次に，図 6.2 の条件において便益を得るために必要な最低フローコリドー利用率を調べた．その結果を以下の図 6.8 に示す。

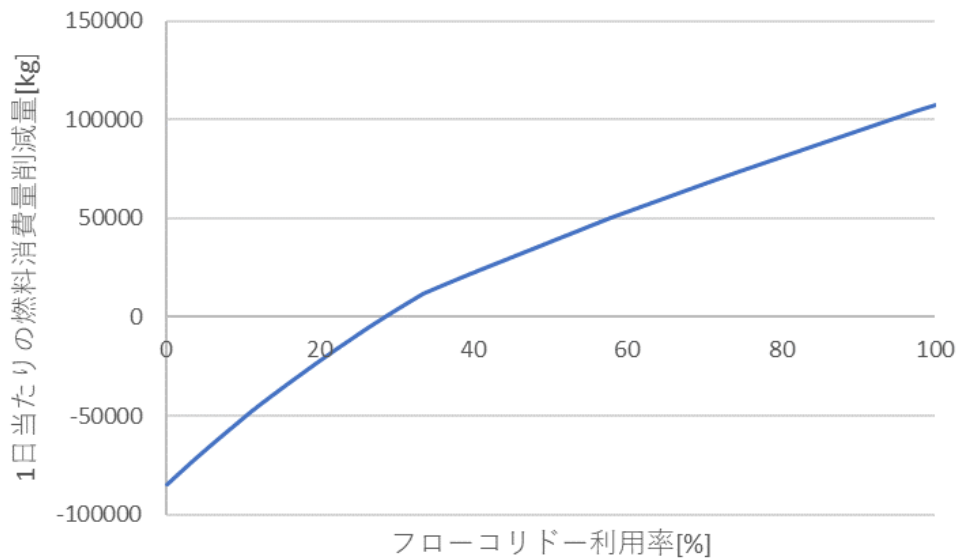


図 6.8 フローコリドー利用率と燃料消費量削減量の関係

図 6.8 よりフローコリドーを導入した際に、便益を少しでも得るには最低でも約 28.4[%]の機体がフローコリドーを利用する必要があると明らかとなった。つまり、全ての機体に自律間隔維持の機能が普及していなくても、フローコリドーを導入することで便益を得ることが可能であると言える。

7. 結論

本研究では、フローコリドー空域の時空間最適化を試みた。各時刻において適切なフローコリドー空域の配置を行うことによって、フローコリドー導入時の更なる便益向上を可能とすることが明らかとなった。BADA モデルを用いた評価の場合、1 日当たりに 109473.1[kg]の燃料消費量を削減できることが分かった。これは、従来の総燃料消費量の約 6.6[%]である。さらに、フローコリドー内で軌道最適化より導出した最適軌道を飛行できる場合、1 日当たりの燃料消費量削減量は 127287.2[kg]となり、BADA モデルを用いた結果よりも約 16[%]の便益向上が可能であることが分かった。また、自律間隔維持の普及率が低い段階でもフローコリドー導入による便益が得られるということが明らかとなった。BADA モデルを用いた評価の場合、削減できる燃料消費量が大きい機体から普及していったと仮定すると、約 28.4[%]の機体に普及していればフローコリドーを導入することで便益が得られると分かった。

今後の課題としては、福岡発羽田行きの経路だけではなく他の都市間を含む複数のフローコリドーを導入した場合の便益評価や、フローコリドー同士の合流や輻輳を考慮した場合のフローコリドー空域の配置の最適化などが考えられる。

参考文献

- [1] Cowles, B., and Moore, J.: IATA Presentation, COVID-19-Related ATM Economics Seminar, Video Teleconference, 08 October 2020.
- [2] 将来の航空交通システムに関する研究会, “将来の航空交通システムに関する長期ビジョン (CARATS), 国土交通省, 2010
- [3] 山本他, “フローコリドーの導入が便益をもたらすための利用率の推定” 土木学会論文集 D3, 75, 2, 2019, pp. 90-96
- [4] CARATS Open Data, provided by Japan Civil Aviation Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Press Release on CARATS Open Data, Feb, 2015.
- [5] Japan Meteorological Agency, <http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/nwp.html> (cited Jan. 26, 2023)
- [6] Nuic, A.: User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.13, Eurocontrol Experimental Center, May 2015.
- [7] 財団法人日本航空機開発協会, “平成 22 年度版 民間航空機関連データ集”, 2010
- [8] 武市昇, 福岡敬介, 中村陽一, 蔭山康太, “フローコリドーの運用方式の研究”, 第 14 回電子航法研究所発表会, 2014 年 6 月
- [9] Yousefi, A et al, :High volume tube shaped sectors (HTS), A network of high-capacity ribbons connecting congested city pairs, IEEE/AIAA 23rd Digital Avionics Systems Conference, Salt Lake City, UT, 2004
- [10] Nakamura, Y. and Kageyama, K.:Validation Study of a Fuel-Burn Estimation Model, Proceedings of the 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Nov.20-22, 2013, Takamatsu, Japan.
- [11] The MathWorks, <https://mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>, cited Jan. 26, 2023.
- [12] 山下信雄, “非線形計画法,” 朝倉書店, 2015.

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である武市昇教授には研究内容、研究方針に関して親身になってご指導いただきました。心より御礼申し上げます。3年間のご指導を通して研究のみならず様々なことを学び成長できたと実感しています。また、同研究室の先輩方には些細な質問や相談にも親身になって対応していただきました。同期には沢山のアドバイスをいただきました。自分の支えになってくださった全ての皆様に深く御礼申し上げます。