

9. 運航実績データによる飛行距離の予測性の検討

航空交通管理領域 ※蔭山 康太 秋永 和夫 福田 豊 宮津 義廣

1. はじめに

航空交通の安全や効率性の向上を目的として、航空交通管理（ATM）においては新技術の導入などが急速かつ継続的に進められているところである。新技術の導入などを効果的に進めるためには、運航実績データを用いた ATM の性能（パフォーマンス）の評価が不可欠である。評価結果のフィードバックによりパフォーマンス向上のためのボトルネックの把握、あるいは導入などの効果の検証が可能となる。

国際民間航空機関（ICAO：International Civil Aviation Organization）は、ATM パフォーマンスにおける 11 種類の重要分野（KPA：Key Performance Areas）を設定した。本稿では KPA の中、特に予測性を対象とした検討例を示す。予測性は KPA の一分野であり、運航実績の計画への適合度に対応する [1]。

検討例では、特に飛行距離の予測性を対象とした。日本の代表的な幹線の運航実績データを用いて、飛行距離について計画値の延伸の現状を解析した。同時に、飛行中の局面において実績値が計画値と大きく異なる、すなわち予測性が低減する箇所を検討した。

2. 飛行距離の予測性

ATM サービスの提供者は空域構成や環境などによる制約を考慮して、飛行経路を設定し公示する。この飛行経路の組み合わせに基づいて、運航者は飛行計画を立案する。この飛行計画の立案時に想定される飛行距離を、その計画値と定義した。

一方で、交通状況や天候の急変などにより計画された飛行経路からの逸脱が発生した場合、飛行距離の実績値は計画値と異なる。実績値が計画値と近いほどに、飛行距離の予測性は高くなる。

空港のスポットや滑走路などは有限なリソースであり、効率的な活用が必要である。運航スケジュールに基づいた予めの配分により効率的なリソースの活用が可能となるが、スケジュールからの逸脱は、この効率的なリソース活用の妨げとなる。スケジュールに近い運航の実現のためには飛行距離の実績値は計画値と近い、すなわち飛行距離の予測性は高い必

要がある。ATM においては予測性の向上を目的として、軌道ベース運用の導入などが検討されている [2]。

また、飛行距離の予測性は、以下のように ATM パフォーマンスの他の分野に関連する。航空機の運航では定時性は非常に重要であるが、飛行距離の予測性は定時性と密接に関連する。

同時に、航空機の運航における環境への配慮は近年その重要性を増している。燃料消費量は環境の分野における重要な指標の一つである。実績値の計画値からの延伸は、燃料消費量の増加の原因となる。一方で、飛行計画の立案時に運航者は飛行距離の計画値や予想される航空機重量に基づき搭載する燃料量を決定するため、実績値が計画値を下回る場合には、必要以上の量の燃料が搭載されたことを意味する。その搭載された燃料量の増加は航空機全体の重量の増加となり、その結果として燃料消費量が増加することとなる。このように環境の観点からも、飛行距離の実績値は計画値と近いことが好ましい。

なお、飛行距離の解析は、KPA の一分野である効率の観点からも可能である [3]。効率の観点からは、燃料消費量が最小となるような飛行距離が好ましい。

日本の航空交通を対象とした飛行距離の予測性の解析により、予測性の現状が明らかになる。同時に、飛行中の各局面での予測性の比較により、予測性におけるボトルネックの把握が可能となる。

3. 予測性の検討

3.1 計画経路

飛行に際しては、出発前に航空管制機関に提出する飛行計画が作成される。運航者が希望する飛行経路が、一連の航空路として飛行計画に記載される [4]。航空管制機関は提出された飛行計画の承認を行う。

離陸から航空路までの経路は SID（Standard Instrument Departure）およびトランジションとして定められる。飛行計画の承認時に航空路に適した SID・トランジションが航空管制機関により割り当てられ、パイロットに伝達される。一方、航空路から着陸のための進入開始までの経路は、進入の開始に先立って

必要に応じて STAR (Standard Terminal Arrival) やレーダ誘導などにより指示される [5], [6]。

各飛行では、飛行計画の承認時に割り当てられた SID・トランジションを離陸時から航空路までの計画経路とした。また、航空路から進入開始までの計画経路として、飛行計画に記された航空路に適合すると考えられる STAR を割り当てた。

3.2 計画値の算出

飛行距離の計画値を SID・トランジション部分、STAR 部分、中間部分に分割して、それぞれ以下のように算出した。SID・トランジションおよび STAR には多くの旋回が含まれ、さらには旋回の開始・終了には高度などについて条件が付与される場合が多く存在する。このため、フィックスの並びとして、これらの経路長を算出するのは困難である。そこで、米国ジェプソン社製の高速シミュレーション・ソフトウェア TAAM を各経路長の計測に使用した。各 SID・トランジションおよび進入開始後の経路を含む STAR をモデルとして入力して、TAAM 上で航空機の運航を模擬した。TAAM は模擬された飛行の航跡を記録する機能を有する。記録された航跡より、各 SID・トランジションおよび進入開始後の経路長を含む STAR 上の飛行距離を計測した。

中間部分は一連のフィックスに展開が可能であるため、飛行経路長 L は次式により算出される。

$$L = \sum_i^{n-1} s_{i,i+1} \quad (1)$$

ここで $s_{i,i+1}$ は、飛行経路の展開後のフィックス $W_i (i = 1, 2, 3, \dots, n-1)$ と、 W_i の次に記載されるフィックス W_{i+1} 間の大圏距離を意味する。飛行経路における最初のフィックス W_1 は SID の最終地点と合致する。また最終フィックス W_n は STAR の先頭地点と合致する。

3.3 飛行距離の実績値の取得

全国に 4 カ所ある航空交通管制部で使用されているレーダ情報処理システム (RDP : Radar Data Processing system) のジャーナルを合成することで、飛行距離の実績値を取得した [3]。RDP のジャーナルには 10 秒間隔で各飛行の座標推移が記録される。

飛行距離の実績値 M を次式により算出した。

$$M = \sum_i^{n-1} d_{i,i+1} \quad (2)$$

表 1 路線毎の解析対象便数

路線	2月	8月	計
新千歳 → 羽田	364	363	727
羽田 → 新千歳	364	363	727
福岡 → 羽田	304	255	559
羽田 → 福岡	317	308	625

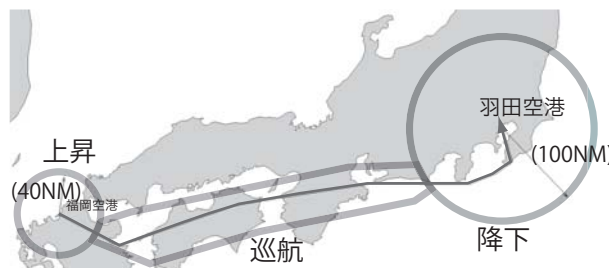


図 1 計画経路の局面への分類 (福岡 → 羽田)

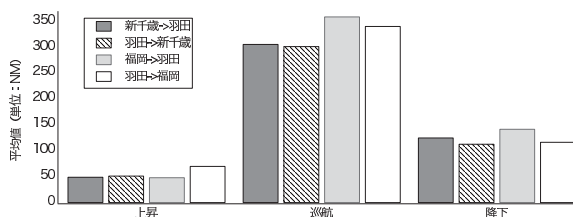


図 2 計画値の局面毎の平均値

ここで $d_{i,i+1}$ は、RDP のジャーナル中で同一の飛行について連続して記録された 2 つの座標 W_i と W_{i+1} の大圏距離を表す。

4. 適用例

4.1 対象データ

日本の国内線の代表的な路線である東京国際 (羽田)・新千歳空港間および羽田・福岡空港間の 2007 年 2 月・8 月の飛行を対象として、飛行距離の予測性を検討した。福岡から羽田への路線では延べ 13 日間分、他の路線では延べ 14 日間分のデータを取得した。路線毎の解析対象便数を表 1 に示す。

解析対象の飛行において飛行計画に記載された航空路は全て同一であるが、SID・トランジションおよび STAR の経路長は離陸・着陸滑走路により異なるために、離陸・着陸滑走路は飛行距離の計画値に影響を与える。今回の検討では、RDP ジャーナルより取得した対象便の滑走路の使用実績に対応する SID・トランジション、進入経路を含む STAR の経

表 2 実績値の延伸（全体の飛行距離，単位：NM）

路線	計画値	平均	標準偏差
新千歳 → 羽田	482.6	3.1	15.3
羽田 → 新千歳	468.4	6.2	19.6
福岡 → 羽田	551.8	9.1	22.0
羽田 → 福岡	529.9	-8.2	14.9

表 3 局面毎の延伸（単位：NM）

上昇		
路線	計画値	標準偏差
新千歳 → 羽田	-4.0	4.5
羽田 → 新千歳	-4.6	6.3
福岡 → 羽田	-0.2	3.4
羽田 → 福岡	-15.5	9.4
巡航		
路線	計画値	標準偏差
新千歳 → 羽田	0.3	5.3
羽田 → 新千歳	2.5	3.0
福岡 → 羽田	0.0	12.4
羽田 → 福岡	1.7	3.2
降下		
路線	計画値	標準偏差
新千歳 → 羽田	6.8	12.1
羽田 → 新千歳	8.4	18.8
福岡 → 羽田	9.3	16.8
羽田 → 福岡	5.6	11.3

路長から飛行距離の計画値を算出した。

4.2 飛行の局面分類

離陸から着陸までの飛行の局面として上昇・巡航・降下の 3 種類を定義した。上昇・降下時には、ターミナル空域でのレーダ誘導により、先行機との間隔設定や高度制限を充足させるために経路長が延伸される場合や、効率の向上のために短縮される場合がある。同時に、悪天候の回避のために経路を逸脱する場合もある。巡航時の逸脱は、主として悪天候の回避のためとなる。

飛行局面の区切りを出発空港・目的空港から一定距離内と、それ以外の中間部として以下のように各局面を定義した。

- 上昇… 出発空港から半径 40NM 未満の範囲の飛行。SID は離陸滑走路により異なるため、離陸滑走路の影響が飛行距離に表れると想定される範囲とし

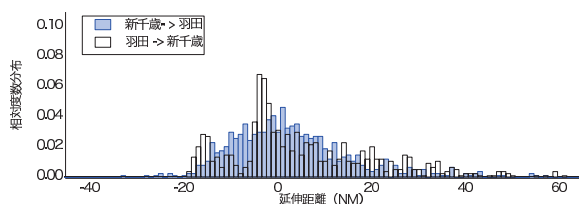


図 3 延伸の相対度数分布（羽田・新千歳間）

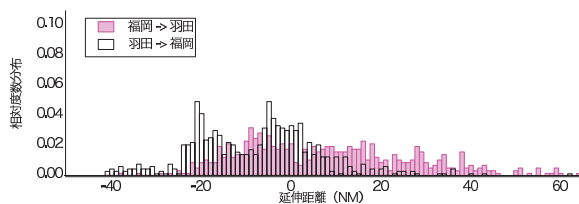


図 4 延伸の相対度数分布（羽田・福岡間）

て、半径 40NM を設定した。

- 降下… 目的空港から半径 100NM 未満の範囲の飛行。到着ターミナル空域の広さなどを考慮して、半径 100NM を設定した。
- 巡航… それ以外の範囲の飛行。

福岡から羽田への路線の計画経路を例として、飛行局面の区切りを図 1 に示す。飛行局面の区切りである空港からの距離を統一することで、異なる路線間での上昇・降下の局面における予測性の比較が可能となる。

各局面における計画経路長の平均を図 2 に示す。4.1 節で述べたように、上昇・降下の局面での計画経路長は滑走路の使用により異なるため、これらの局面における平均は滑走路の使用実績に依存する。

4.3 予測性の検討

4.3.1 全体の飛行距離

はじめに離陸から着陸までの全体の飛行距離を対象とした予測性の検討結果を示す。飛行距離の実績値から計画値を減ずることで算出した延伸の平均・標準偏差を計画値の平均とともに表 2 に示す。また、図 3（羽田・新千歳間の路線）および図 4（羽田・福岡間の路線）に延伸の相対度数分布を示す。

平均・標準偏差ともに、福岡から羽田への路線で最大となることが表 2 から示される。一方で、経路長の計画値の平均（552NM）に対する割合を算出すると、同路線での平均は 2%程度、標準偏差は 4%程度となる。他の路線では、これらの割合は、さらに小さい。すなわち、経路長の計画値に対して延伸の

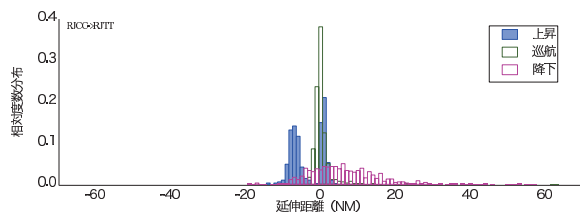


図 5 局面毎の相対度数分布（新千歳 → 羽田）

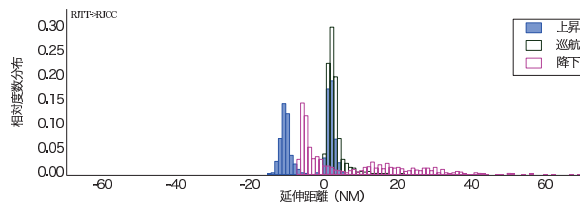


図 6 局面毎の相対度数分布（羽田 → 新千歳）

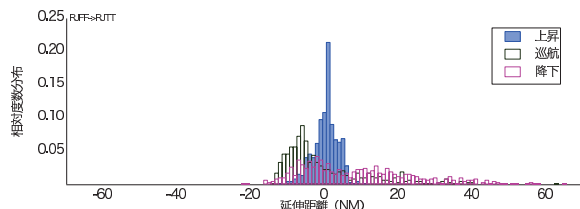


図 7 局面毎の相対度数分布（福岡 → 羽田）

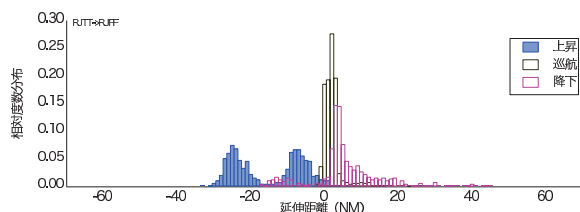


図 8 局面毎の相対度数分布（羽田 → 福岡）

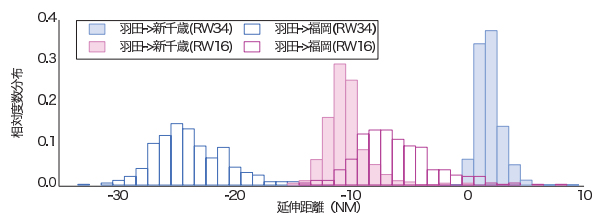


図 9 出発の局面における延伸の相対度数分布

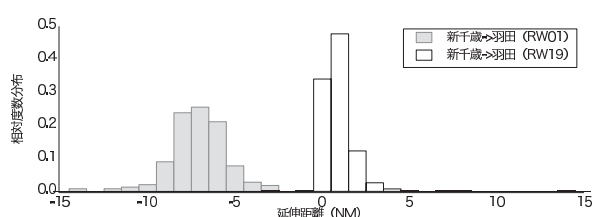


図 10 出発の局面における延伸の相対度数分布

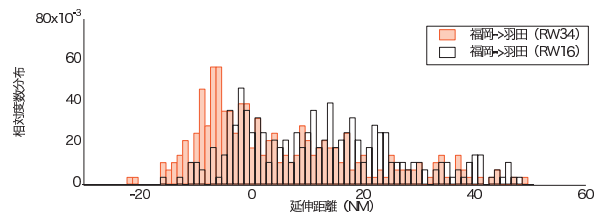


図 11 到着の局面における延伸の相対度数分布（福岡 → 羽田）

平均・標準偏差は非常に小さく，全体の飛行距離を対象とした場合には予測性は非常に高いことが示される。

4.3.2 局面毎の比較

各航跡および計画経路を 4.2 節で示した区切りに基づいて局面に分類し，局面毎に予測性を検討した。表 3 に局面毎の延伸の平均および標準偏差を示す。また，図 5，図 6，図 7 および図 8 に，各路線の局面毎の延伸の相対度数分布を路線毎に示す。

巡航の局面の標準偏差は，福岡から羽田の路線で大きい。解析対象データの航跡からはレーダ誘導が巡航の局面から既に開始されていることが示される。このレーダ誘導は，悪天候の回避に加えて羽田空港の到着機の順序・間隔付けを目的とする。

到着の局面の延伸のばらつきは他の局面よりも大きくなる傾向は各路線に共通する。特に，福岡から羽田への路線（図 7）で，ばらつきが特に大きくなる。この大きなばらつきも，主として到着機の順序・間隔付けに伴うレーダ誘導に起因するものと考えられる。表 2 および図 4 からは，同路線では全体の飛行距離の延伸が大きい傾向が示されたが，この延伸は到着機の順序・間隔付けに起因することとなる。

出発の局面の延伸の分布に着目すると，新千歳を出発する路線（図 5），羽田を出発する路線（図 6，図 8）において 2 種類の分布が認められる。これは離陸滑走路の違いによる影響の可能性が考えられたために，出発の局面の延伸の分布を離陸滑走路により分類して検討した。

羽田から新千歳，羽田から福岡，および新千歳から羽田への路線における，出発の局面の延伸の相対度数分布を図 9，図 10 にそれぞれ示す。各図では離陸滑走路により延伸を分類している。図 9 では，羽田空港の離陸滑走路である RW34R と RW34L を RW34，RW16R と RW16L を RW16 とし，それぞれまとめて分類した。各図からは離陸滑走路により出発の局面の延伸の分布が異なることが示される。

今回の検討では SID に基づき出発の局面の計画経路長を決定した。一方、実運航においては効率の向上を目的としてレーダ誘導により SID より経路長が短縮される場合などがある。この結果、実運航上の経路長と SID 長が一致しないこともある。離陸滑走路により、この経路長の差は異なるため、結果として分布が異なるを考える。

到着の局面においても、同様に実運航上の経路と計画経路の差異は発生するが、検討結果では、着陸滑走路による差異は出発の局面における離陸滑走路による差異ほど明確には表れない。到着の局面の延伸の分布例として、福岡から羽田への路線の分布を図 11 に示す。図では着陸滑走路による分布の違いは明確には示されない。これは到着の局面での延伸のばらつきが非常に大きいためであるとする。

4.3.3 時間帯による延伸の変化

飛行距離の延伸と時間帯の関連の検討を目的として、延伸の平均と標準偏差を 1 時間単位で算出した。図 12、図 13、図 14 および図 15 に、各路線の時間帯による平均と標準偏差の推移を示す。着陸時刻に基づいて各飛行の時間帯を分類した。

図において、折れ線グラフは各時間帯における延伸の平均を表す。また、折れ線から上に伸びる線は平均に標準偏差を加えた値、下に伸びる線は平均から標準偏差を減じた値を表す。各図においては上昇・巡航・降下の局面毎に平均・標準偏差の推移を算出して、横に並べて表示している。

4.3.2 節で述べたとおりに上昇の局面では離陸滑走路の混在により、ばらつきが大きくなる。一方、巡航の局面については、福岡から羽田への路線で各時間帯における標準偏差が大きい。他の路線では標準偏差は小さく、平均も各時間帯で、ほぼ一定である。新千歳から羽田への路線では 19 時台に標準偏差が特に大きいことが観測される。これはデータ記録期間中の 1 日に一部の飛行に待機旋回による延伸が発生したためであり、それらの飛行を除外すると、19 時台の標準偏差が他の時間帯より大きくなることはなくなる。

各時間帯における標準偏差が、降下の局面で最大であることは全ての路線で共通する。降下の局面では、時間帯による平均の変動も大きい。

4.3.4 予測性の向上のために

4.3.2 節からは、SID と実運航上の経路に差異が生じることが示された。これは、SID が各飛行におけ

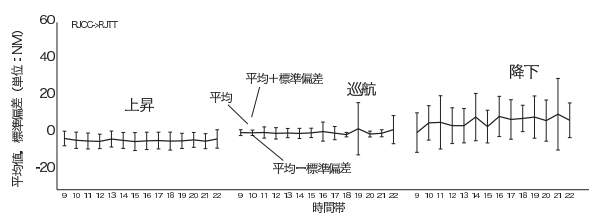


図 12 時間帯毎の延伸の変化（新千歳 → 羽田）

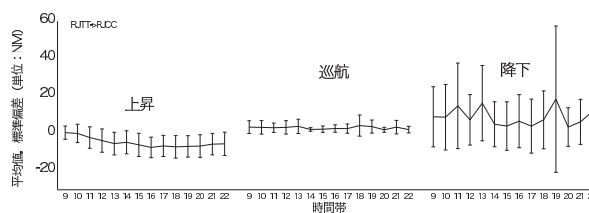


図 13 時間帯毎の延伸の変化（羽田 → 新千歳）

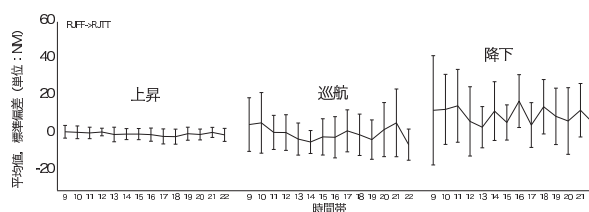


図 14 時間帯毎の延伸の変化（福岡 → 羽田）

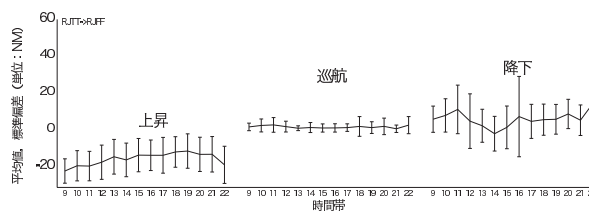


図 15 時間帯毎の延伸の変化（羽田 → 福岡）

る上昇率など機体性能の差異に関わらず一律に割り当てられているのに対して、実運航では、上昇率などに対応したレーダ誘導により効率を向上しているためと考える。上昇率などを考慮した飛行毎の計画経路の割り当てにより、上昇率と予測性の両立が可能となる。

4.3.2 節、4.3.3 節からは、飛行距離の予測性は最終局面である降下において大きく低下することが示された。この予測性の低減は、降下の局面固有の性質に起因すると考える。滑走路は有限なリソースであるために、レーダ誘導などによる着陸時刻の調整が必要である。この結果として、最終局面である降下で飛行距離が大きく延伸する。

運航中の状況の変化に応じてリソースの配分を更

新することは可能であるが、最終局面において飛行距離が延伸した場合、効率のよいリソース配分は困難となり得る。

同時に空港周辺は交通流が集中するため、各経路に使用される空域を小さくすることで、より多数の経路の設定が可能となる。降下の局面での飛行距離の延伸の短縮により、レーダ誘導に必要な空域を小さくすることが可能となる。

また、着陸の局面での飛行距離の延伸では降下中のエンジン推力の使用頻度などの可能性が存在するが、これにより燃料消費量あるいは二酸化炭素排出量は増加する。このように降下の局面での延伸は、環境の分野における ATM パフォーマンスも低下させる。

降下の局面における飛行距離の延伸の低減には、飛行の初期の段階からの戦略的な滑走路の着陸時刻の調整が有効と考える。この調整により、空港近辺における空域使用の低減、滑走路などのリソースの全体的に効率のよい配分、あるいは最小のエンジン推力の維持による継続降下などが可能となるため、予測性や環境の分野における ATM パフォーマンスが向上する。航空機の軌道上の全ての点で順序・間隔付けを予め行い、その結果に基づいて運航する軌道ベース運用では、このような戦略的な滑走路の着陸時刻の調整の実現が期待できる。

同時に、滑走路の増設などにより着陸容量を増大することで延伸の低減が期待できる。

5. おわりに

本稿では、飛行距離を対象とした予測性の解析結果を紹介した。日本の代表的な幹線を対象とした解析結果からは、飛行距離全体を対象とした場合、その予測性は高いことが示された。また、上昇・巡航・降下の 3 つの局面での予測性を比較した結果からは、最終局面である降下において予測性が大きく低減することが示された。

今回、解析対象としたデータの記録期間から現在までに羽田空港の滑走路増設などの各施策が、処理容量の向上を目的として実施されてきている。本稿で示した解析手法の継続的な適用により、各施策の効果を予測性の観点から検証することが可能となる。今後、このような効果の検証を実施していきたい。

謝辞

運用実績データのご提供を頂きました国土交通省の関係各所の各位のご協力にお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] International Civil Aviation Organization. Global Air Traffic Management Operational Concept. Doc 9854 AN/458, 2005.
- [2] 福田 豊他. トラジェクトリ予測の誤差要因解析. 第 10 回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 81–86, 2010.
- [3] 福田 豊他. 運航実績データによる飛行距離の測定手法の検討. 第 7 回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 15–18, 2007.
- [4] 航空交通管制協会（編）. 航空管制入門. 航空交通管制協会, 1995.
- [5] AIM-Japan 編纂委員会. *Aeronautical Information Manual Japan*. 2010.
- [6] 国土交通省航空局. 管制方式基準. 鳳文書林出版販売, 2010.
- [7] Waldo R. Tobler Qihe Yang, John P. Snyder. *Map Projection Transformation : Principles and Applications*. Taylor & Francis, 2000.