

2. 運航実績データによる飛行距離の測定手法の検討

航空交通管理領域 ※福田 豊、蔭山 康太、山本 哲士、宮津 義廣、行木 宏一

1. はじめに

航空交通管理（ATM：Air Traffic Management）は、全ての関係者の協力下で便宜や切れ目のないサービスを通じた、安全で経済的かつ効率的な航空交通と空域の動的かつ統合的な管理である^[1]。国際民間航空機関（ICAO：International Civil Aviation Organization）の第11回航空会議において、ATMのパフォーマンスに関する指標、目標値、ATM全体の基本的な特性の定義化等が勧告された^[2]。欧米では、ATMのパフォーマンスを測定するための指標が検討されており、それに利用するデータベース、ツール等が開発され、運用されている。

電子航法研究所は、ATMパフォーマンスに関する研究を実施している。この研究では、航空交通管制に用いる情報処理システムの実績データを使用して、ATMのパフォーマンスを測定、解析する手法を検討するものである。これまでに、出発時刻や到着時刻の遅延や空港での地上走行時間等の測定と解析を行ってきた。

航空機が出発空港から到着空港までに飛行した距離は、短いほど燃料消費量の低減や飛行時間の短縮等の便益があるため、経済性や効率性の指標として考えられる。航空機は航空管制官の管制指示に従いながら、飛行計画経路に基づいて飛行する。しかし、他の航空機との管制間隔の確保や悪天空域の回避等ために、迂回やショートカットにより飛行計画経路とは異なる運航をすることがある。そのため、実際の飛行距離を測定することは、ATMの実態の把握、課題の抽出、RNAVを利用した経路設定等のATMの改善策の検討のために有効である。

欧州のユーロコントロールは、効率性の指標として飛行経路長や飛行距離の測定が行われている^[3]。ここでは、エンルート空域を対象として、出発空港と到着空港間を、大圏経路長、飛行計画経路長、飛行距離等に区分して解析している。米国でも同様の測定および解析が実施されており、

欧米のエンルート空域での飛行距離を比較した結果が報告されている^[4]。

本報告では、レーダで測定された航空機の航跡を使用して、飛行距離を測定する手法、および、飛行距離の解析例を紹介する。

2. 飛行距離の測定手法

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）から航空機の航跡を抽出し、飛行距離を測定する。測定手順を以下に示す。

- (1) システム座標から緯度経度への座標変換
- (2) 各航空交通管制部の航跡の接続
- (3) 航跡から飛行距離の算出

2.1 座標変換

RDPは多重レーダ処理により、各々のレーダ系座標による観測点を全レーダに共通なシステム座標に変換して利用している。このシステム座標は各航空交通管制部を原点とした平射図法（視点が接平面と反対側の地球表面上にある図法）である^[5]。RDPには、時刻、便名、x座標、y座標、高度等のデータが10秒間隔で記録されている。

飛行距離の測定のために観測点の座標をシステム座標から緯度経度に変換する。図1のとおりシステム座標平面上の観測点を \bar{P} 、原点を O 、地球上の観測点を P 、地球中心を C 、視点を e とする。平射図法では原点 O から観測点 \bar{P} への方位角 ν は地球上の原点 O から観測点 P への方位角 ν と等しい。これらの性質を利用して原点から観測点 P への方位角 ν と角距離 δ を求め、球面三角法により緯度経度を求める。

観測点 \bar{P} のシステム座標を (x, y) とする。ここで、y軸は原点 O での真北の方向とする。システム座標平面での $O\bar{P}$ の距離 r と方位角 ν は

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \tan \nu &= x/y \end{aligned} \quad (1)$$

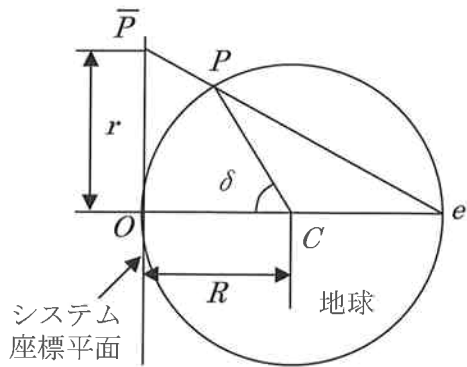


図1 平射図法

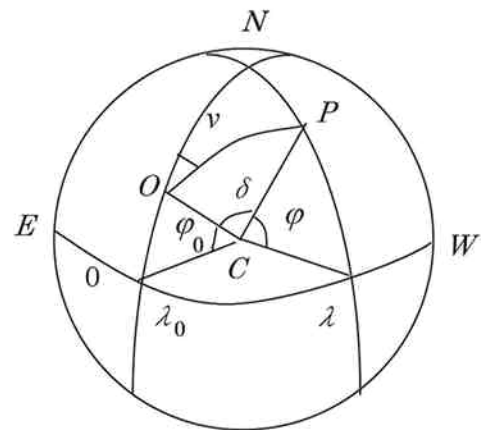


図2 緯度・経度と角距離・方位角の関係

により求められる。

OP の角距離 δ は

$$\delta = 2 \tan^{-1}(r/2R) \quad (2)$$

となる。ここで、 R は地球半径である。

図2のとおり、極を N 、原点を O （緯度 ϕ_0 、経度 λ_0 ）、 P を観測点（緯度 ϕ 、経度 λ ）、 OP の角距離を δ 、方位角を ν とする。球面三角法より、方位角 ν と角距離 δ から観測点 P の緯度 ϕ と経度 λ への変換式は、

$$\begin{aligned} \sin \phi &= \sin \phi_0 \cos \delta + \cos \phi_0 \sin \delta \cos \nu \\ \tan(\lambda - \lambda_0) &= \frac{\sin \delta \sin \nu}{\cos \phi_0 \cos \delta - \sin \phi_0 \sin \delta \cos \nu} \end{aligned} \quad (3)$$

となる^[6]。また、反対に観測点 P の緯度 ϕ と経度 λ から方位角 ν と角距離 δ への変換式は

$$\begin{aligned} \cos \delta &= \sin \phi \sin \phi_0 + \cos \phi \cos \phi_0 \cos(\lambda - \lambda_0) \\ \tan \nu &= \frac{\cos \phi \sin(\lambda - \lambda_0)}{\sin \phi \cos \phi_0 - \cos \phi \sin \phi_0 \cos(\lambda - \lambda_0)} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。観測点 P の緯度 ϕ 、経度 λ は式(3)より、原点 O の緯度 ϕ_0 、経度 λ_0 、 OP の方位角 ν 、角距離 δ より求められる。

2.2 航跡の接続

各航空交通管制部では管轄する空域内を飛行する航空機の航跡がそれぞれ記録されている。航空機の航跡は各航空交通管制部の境界線で区分されてなく、重複している部分がある。そのため、航空交通管制部の管轄空域をまたがって飛行する航空機の出発空港から到着空港までの飛行距

離を算出するためには、航跡を区分し、接続する必要がある。

ここでは、以下の順位をつけて航跡を接続した。

- (1)東京航空交通管制部
- (2)福岡航空交通管制部
- (3)札幌航空交通管制部
- (4)那覇航空交通管制部

初めに、航空機を抽出し、その航跡が記録されている航空交通管制部を抽出する。次に、その中で優先順位が高い航空交通管制部での航跡の開始時刻と終了時刻を求める。さらに、その次の優先順位の航空交通管制部での航跡の開始時刻と終了時刻を求め、この範囲が最初の航空交通管制部の航跡の時間範囲より広い部分を元の航跡に付け加える。このような手順を繰り返して、航空機の全体の航跡を作成する。

2.3 飛行距離の算出

航空機の出発空港から目的空港までの飛行距離 L は、航空機の開始点から終了点までの各観測点 P_i 間の角距離を累積し、さらに、出発空港から開始点の角距離 $P_D P_0$ 、目的空港から終了点の角距離 $P_N P_A$ を加算し、地球半径 R を乗算することにより算出する。地球半径 R は 3432.5NM とした。

$$L = \left(\sum_{i=0}^{N-1} P_i P_{i+1} + P_D P_0 + P_N P_A \right) R \quad (5)$$

ここで、航空機の第 i 番目の観測点を P_i 、観測点数を N 、出発空港の位置を P_D 、到着空港の位置

表1 測定機数

	新千歳	大阪	関西	福岡	那覇
羽田発	667	364	213	581	308
羽田着	680	363	211	572	323

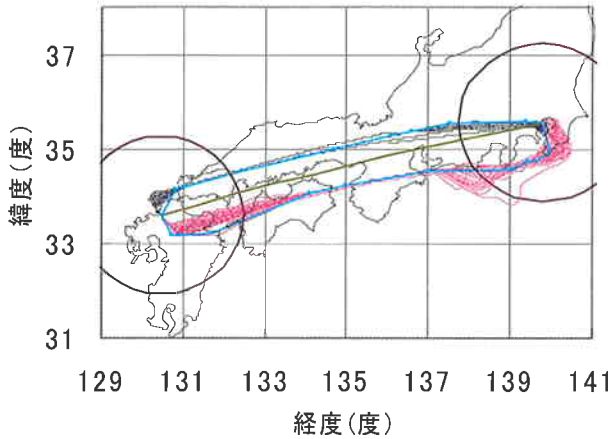


図3 羽田－福岡の航跡例

を P_A とする。第 i 番目の観測点 P_i (緯度 ϕ_i 、経度 λ_i) と第 $i+1$ 番目の観測点 P_{i+1} (緯度 ϕ_{i+1} 、経度 λ_{i+1}) 間の角距離 $P_i P_{i+1}$ は、式(4)より

$$\cos P_i P_{i+1} = \sin \phi_{i+1} \sin \phi_i + \cos \phi_{i+1} \cos \phi_i \cos(\lambda_{i+1} - \lambda_i) \quad (6)$$

として求められる。また、 $P_D P_0$ と $P_N P_A$ も同様に求められる。

航空機の出発空港から到着空港までの飛行距離以外に、空港周辺空域での飛行距離を求めるため出発空港および到着空港から半径 100NM の区間距離も算出する。この場合は式(5)において、累積する範囲を各区間のみ限定することにより求められる。

3. 測定結果

飛行距離の測定手法を実績データに適用し、飛行距離を測定した。測定期間は平成17年8月の7日間と11月の6日間とした。空港ペアは羽田空港と新千歳空港、大阪伊丹空港、関西空港、福岡空港、那覇空港とした。表1に測定機数を示す。

3.1 羽田－福岡の測定結果

図3に11月の1日分の羽田－福岡の航跡の重ね書き図を示す。青線が羽田から福岡、赤線が福岡から羽田の航跡である。また、緑線で大圏経路、水色線で標準的な飛行計画経路を示す。飛行計画

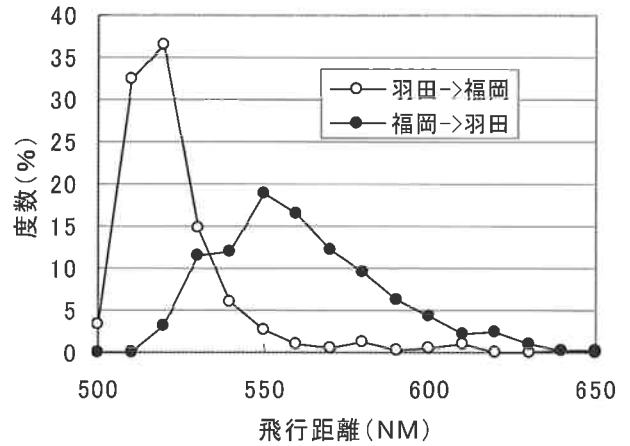


図4 羽田－福岡の飛行距離

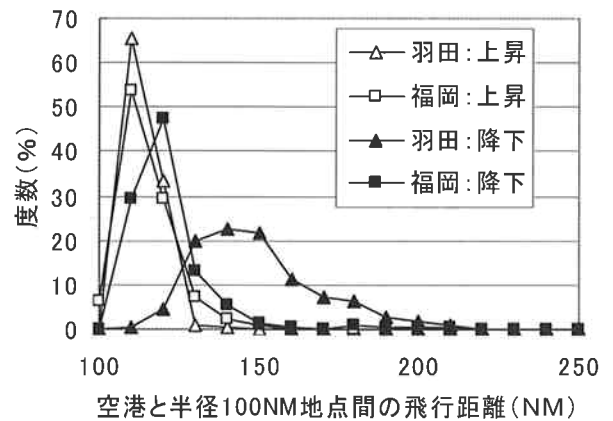


図5 羽田－福岡の上昇・降下飛行距離

経路はエンルート部分のみとし、ターミナル空域内の標準計器出発方式と標準到着経路は含めない。さらに、紫色の円が羽田空港および福岡空港を中心とした半径 100NM の範囲を示す。この範囲内の距離を上昇フェーズと降下フェーズとした。出発空港付近では、経路上の先の FIX への直行指示によるショートカットが見られる。また、到着空港付近では、着陸の時間調整のための迂回が見られる。迂回の大きさは、羽田空港が福岡空港より大きい。

図4に羽田－福岡の飛行距離の分布を示す。福岡から羽田の方が、羽田から福岡に比べて、飛行距離が長く、分布が広い。これらの差は、福岡から羽田の飛行計画経路が大圏経路より離れているため、および、羽田空港付近での迂回が大きいためと考えられる。

図5に羽田と福岡の上昇フェーズと降下フェーズの飛行距離の分布を示す。上昇フェーズでは両空港ともに 110NM から 120NM の度数が多く、

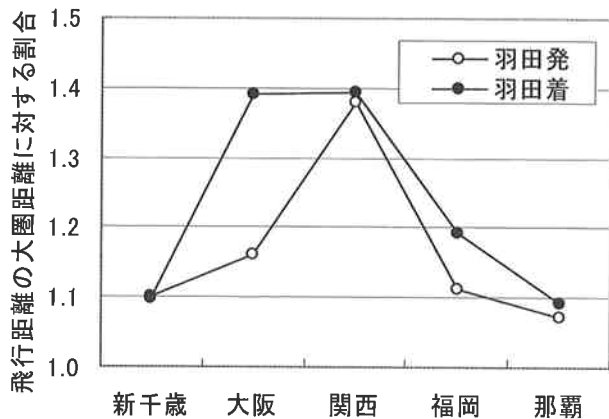


図6 空港毎の飛行距離の大圏距離に対する割合

大きな差はない。一方、降下フェーズでは、羽田が福岡より平均値が大きく、分布が広い。これは、羽田のターミナル空域内の経路に対する環境的な制約や空港の容量と航空機数の関係による空中での時間調整のための迂回等によると考えられる。図4と図5を比較すると、羽田の降下フェーズが、全体の飛行距離の分布の広がりに影響を与えていることがわかる。

3.2 各空港の測定結果

図6に羽田と新千歳、大阪、関西、福岡、那覇の平均飛行距離の大圏距離に対する割合を示す。白丸印が羽田から各空港、黒丸印が各空港から羽田を示す。

図7に羽田と各空港の上昇と降下の飛行距離を示す。羽田と各空港の上昇フェーズでは、関西を除いて110NMから120NMに分布している。また、各空港の降下フェーズは、関西を除いて120NMから140NMに分布している。どちらも関西が大きいのは、環境的な制約等によりターミナル空域の飛行計画経路が長いとためと考えられる。羽田の降下フェーズでは大阪、関西、福岡が新千歳と那覇より大きい。これはターミナル空域の入域点がこれらの大圏経路に対して離れていること、また、時間調整のための迂回用の空域が広い空域構成等によると考えられる。図6と図7を比較すると、全体の飛行距離には到着フェーズの影響が大きいことがわかる。

4. まとめ

ATMの効率性の指標として飛行距離を測定する手法を検討し、実際の解析例を示した。飛行距

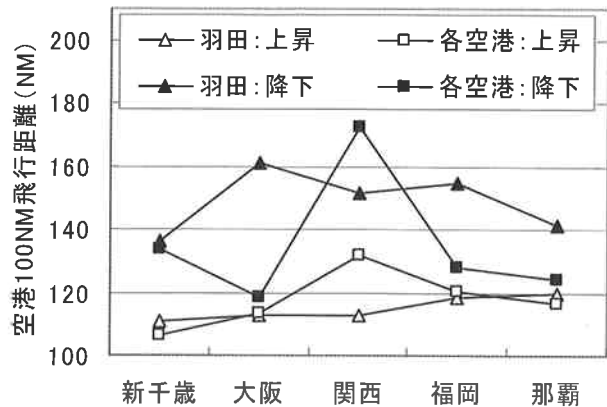


図7 上昇・降下フェーズの飛行距離

離が空港間と空港周辺の空域等の特徴を示すことがわかった。今後は、滑走路別の区分、飛行計画経路長との比較を行いたい。

謝辞

レーダデータの収集にご協力を頂きました札幌航空交通管制部、東京航空交通管制部、福岡航空交通管制部、那覇航空交通管制部の関係各位に感謝致します。

参考文献

- [1] ICAO : Global Air Traffic Management Operational Concept, Doc 9854, 2005.
- [2] ICAO : Eleventh Air Navigation Conference Report, Doc 9828, 2003.
- [3] EUROCONTROL Performance Review Commission : Performance Review Report 2005, April 2006.
(www.eurocontrol.int/prc/gallery/content/public/Docs/prr2005.pdf)
- [4] Kettunen et al. : Flight Efficiency Studies in Europe and the United States, 6th USR/Europe ATM R&D Seminar, June 2005. (atm2003.eurocontrol.fr/6th-usa-europe-atm-2005-r-d-seminar/papers_calendar)
- [5] 財団法人航空振興財団: 図説RDPシステム、pp.135-136, 平成9年2月.
- [6] Qihe H. Yang et al. : Map Projection Transformation, pp.73-74, Taylor & Francis, 2000.