フローコリドー空域の時空間最適化

吉野純平[1]・武市昇[2]・原田明徳[3]

[1]非会員　東京都立大学大学院　システムデザイン研究科　航空宇宙システム工学域

（〒191-0065 東京都日野市旭が丘六丁目六番地）
E-mail: yoshino-jumpei@ed.tmu.ac.jp

[2]正会員　東京都立大学大学院教授　システムデザイン研究科　航空宇宙システム工学域（同上）

E-mail: takeichi@tmu.ac.jp (Corresponding Author)

[3]非会員　高知工科大学准教授　システム工学群（〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185）
E-mail: harada.akinori@kochi-tech.ac.jp

将来の航空交通管理において，交通需要の大きな都市圏間等を結ぶフローコリドーと呼ばれる細長い空域を導入することが検討されている．これは自律間隔維持の性能を持つ航空機のみが，航空管制を要することなく高効率な軌道に沿って飛行できる空域となる．本稿では，空域全体の燃料消費量の削減のため福岡から東京へ向かうフローコリドーの開始地点を最適化することを検討する．より多くの便のフローコリドーの利用を可能とし，かつ他の便にとってはできるだけ障害とならないようにし，全体の便益を向上することを意図している．そして燃料消費量を評価指標とした最適化により，巡航時の後半からフローコリドーを導入することにより空域全体での燃料消費量を最小化できることを明らかにした．このとき西方面から東京へ向かう全便の約70%がフローコリドーの利用により燃料消費量を削減でき，全消費量の6.6%を削減できることが明らかとなった．これは福岡から東京までの全経路をフローコリドーにする場合の約2倍の削減量となった．

Key Words: *air traffic management, flow corridor, spatio temporal optimization, cost benefit analysis*

1. はじめに

航空輸送需要は，近年のコロナ禍を経て再び増加し続けることが予測されている[1]．このような持続的な航空交通需要の増加に対応するための各国・地域における航空交通管理の中長期的な計画の一環として，時間を基準とした運航の導入による整然とした交通流の形成が挙げられ[2,3]，さらに長期的には自律間隔維持[4]と呼ばれる航空機の機上での監視能力の活用が計画されている．

フローコリドー（Flow Corridor）とは，大都市圏間や大規模空港間のような交通量の多い経路に沿って配置される細長い空域として考案された[5,6]．フローコリドー内を飛行する航空機は，自律間隔維持の機能を用いて周辺の交通状況を把握し他の航空機から安全な間隔を維持することにより[4]，管制官の介入を要することなく安全に飛行することができるものと期待されている．これによりフローコリドー内では，航空機が互いに協調的な微小な操作で安全かつほぼ最適な軌道に沿って飛行することができる[7]．一方，フローコリドーの外部は従来通り，管制官による監視及び誘導による航空管制が行われるので，空域全体としては安全性を損なうことなく交通容量を拡大することが可能となるものと考えられる[8]．また，航空機間での自律間隔維持の機能の有無が混在する状況を適切に処理できるものと期待される．

このようなフローコリドー空域の設定方法に関しては，米国内の複雑な航空輸送ネットワークへの導入を目標として，フローコリドーを利用する航空機の飛行距離の増加を最小化するように設計した研究[9,10]や，交通需要の大きな空港や都市間のネットワークをグループ化した研究が行われて来た[11-14]．一方，日本国内の大都市間の運航経路はあらかじめほとんど交錯しないように設定されているため，これらの既存の経路に沿ったフローコリドーの導入が可能であると考えられる．そして著者らはこれまでに，日本国内の特定の飛行経路へのフローコリドーの導入を想定した便益を評価した[15]．さらに，内部を運航する便の得られる便益だけでなく，外部を運航する便のコストの増加も評価し，大型機の3分の1強の機材が自律間隔維持の機能を導入しフローコリドー内を運航す

るだけで，日本の空域全体として便益が得られることを明らかにしている[16].

交通需要は時刻とともに変化し，かつ運航の効率も上昇，巡航，降下の各運航局面において大きく異なる．特に降下の区間では，フローコリドーの導入により従来の航空管制で実施されているベクタリングなどの航空管制を解消できるため，大きな便益が得られる．そこで本研究では，目的空港へ向かう経路の途中から部分的なフローコリドーを導入することを想定し，その最適化およびもたらしうる効果を明らかにする．

2. 使用するデータ

(1) 運航データ

本研究の解析には国土交通省提供のCARATSオープンデータ[17]を利用した．CARATSオープンデータは時刻，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-1にある1日の国内便の航跡データを示す．

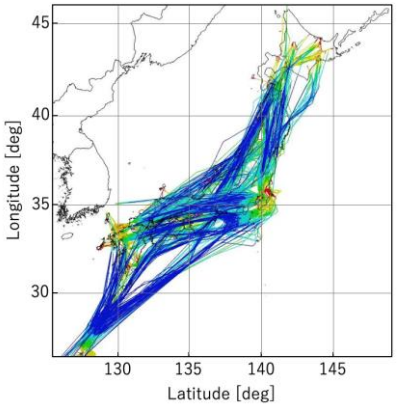


図-1　ある1日の航跡データ

(2) 気象データ

航空機の運航の解析に用いる気象データとしては，気象庁提供のメソ数値気象予報モデル（Meso Scale Model，以下MSM）[18]を使用する．MSMでは3時間おきに，300～1000hPaの12の気圧面，0.1度および0.125度の緯度及び経度の格子点上の3時間ごとの気象予報値が提供されている．

(3) 航空機運航モデル

航空機の燃料消費量の推定には，BADA（Base of Aircraft Data）モデル[19]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る．本研究ではCARATSオープンデータより求めた型式，高度および速度，およびMSMの気象データをBADAモデルに適用し，燃料消費量を求めた．ただし，上昇率，降下率，飛行速度はBADAモデルの標準値を用い，巡航高度は実運航データの外れ値を除きほぼ等しいばらつきを与えた．また，航空機の質量はCARATSオープンデータに含まれていないため，国内便の質量分布[20]を参考としてBADAモデルの標準質量の70%，80%，90%，100%の質量をそれぞれ20%，30%，30%，20%の割合で与えた．

3. フローコリドーの想定経路

本研究では，単一の航空路としては最も交通量の大きい，福岡から東京へ至る経路にフローコリドーを導入することを想定する．フローコリドーには，外部の便との間隔を確保するため，左右5NMの幅，および上下1000ftの空間を付与する．そして，図-2aに示す通常の航空管制の妨害とならないよう，図-2bに示すように航空管制の行われるセクター内ではその境界線にフローコリドーの経路を設定している．YURRYからARLONまで導入したフローコリドーの概念図を図-3に示す．本研究では，時間とともに変化する交通状況に応じて，この開始地点を図-4に示すように最適化することを検討する．

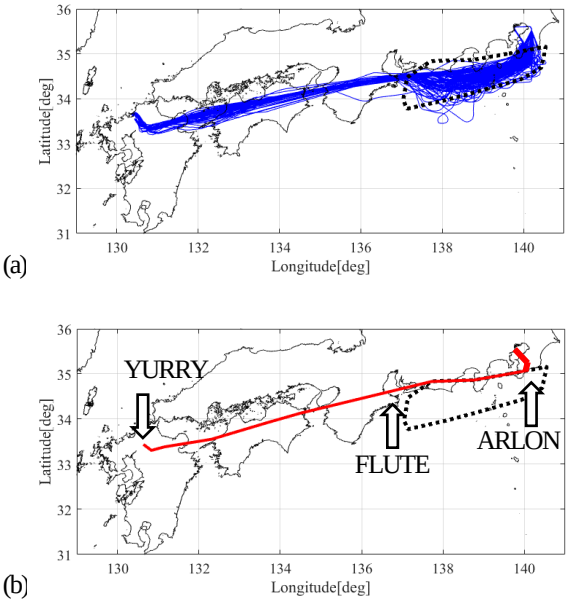


図-2　ある1日の航跡データ，a: 航空管制を受ける航跡（青線），b: フローコリドーの経路（赤線）と各ウェイポイントの位置

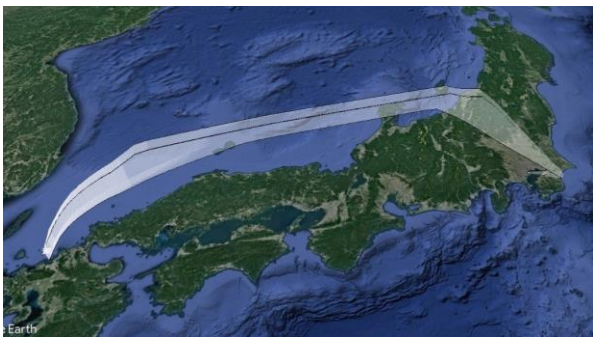


図-3　YURRYからARLONまで導入した場合のフローコリドーの概念図



図-4　開始位置を最適化したフローコリドーの概念図

4.　費用便益評価

(1)　フローコリドー利用の便益の評価

フローコリドーを利用する便は，離陸からフローコリドーの入り口まで飛行し，その後はフローコリドー内を飛行する．経路の一例を図-5に示す。この時の飛行経路の燃料消費量をBADAモデルを用いて解析する．同時に，CARATSオープンデータを用いて，実際の飛行経路の燃料消費量も計算する．そしてこれらの差からフローコリドー利用時の燃料消費量の削減量を求める．



図-5　フローコリドーへ入る飛行経路の例，緑線: 実軌道，赤線: 同便がフローコリドーへ入るための経路

(2)　フローコリドー回避時のコストの評価

フローコリドーを利用できない便は，その空域を避けて飛行しなければならない．この場合，図-6に示すようにフローコリドーの空域を水平あるいは垂直に回避する．ただし，垂直に回避する際の上昇率及び降下率にはBADAの標準的な値を適用する．各便に対していずれの回避方法の場合も燃料消費量を解析し，その少ない方を回避経路とする．そして実軌道の燃料消費量に対する増加量を計算する．

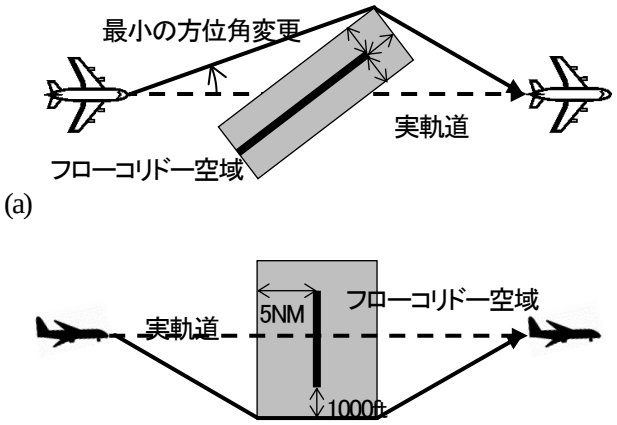


図-6　回避軌道，(a) 水平回避経路，(b) 垂直回避経路

(3)　フローコリドー利用の可否の決定

上記の(1)および(2)の手順により，フローコリドーの利用/非利用による燃料消費量の増減を解析することができる．そして各便は(1)および(2)のいずれかの燃料消費量が少ない方を選択して運航することとなる．図-7にある1日の全運航便の航跡とフローコリドー空域の例を示す．これらの各便に対して燃料消費量の増減を解析した．

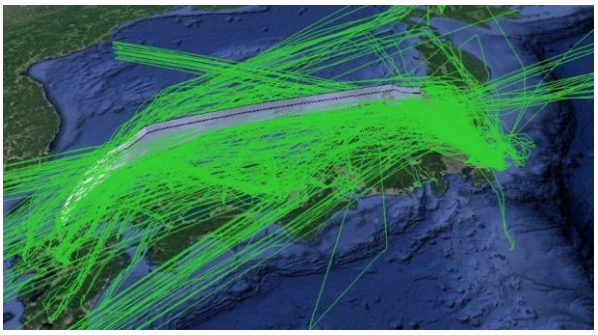


図-7　1日の全運航便の航跡とフローコリドー空域の例

5.　解析結果

フローコリドーの最適な開始位置を求めるため，YURRYを起点として100km~800kmまでを開始位置と想定し，一時間ごとの費用便益評価を実施した．その結果の各時間帯の最適な開始位置を図-8に，空域全体の燃料消費量のフローコリドー利用による削減量と回避による増加量を図-9にそれぞれ示す．この結果から，1日を通

して最適な開始位置がほぼ変化せず，またフローコリドーの導入が常に便益をもたらすことが明らかとなった．一例として，9時~10時の時間帯の最適なフローコリドー空域と，その利用便および回避便の航跡を図-10に示す．この時の最適な開始地点の位置は，ほぼFLUTEと一致している．つまり，現在の航空管制により運航効率が低下している範囲をフローコリドーに置き換えることにより大きな便益を達成していることになる．

また，1日あたり約450便ある西方面から東京行きの便のうち，約310便がフローコリドーを利用することにより便益を得られることが明らかとなった．さらに，これら西方面からの全便の1日の燃料消費量（約1660t）を6.6%（約109t）削減できることも明らかとなった．YURRYからARLONまでの全体のフローコリドーによる燃料消費量の削減量が3.4%であるので，便益を約2倍に改善できたことになる．航空機の規模ごとの削減量の平均値を表-1に示す。大型機の削減量がより大きいことは自明であるが、小型であっても機体規模比に比べて大きな削減効果が期待できることが明らかとなった。

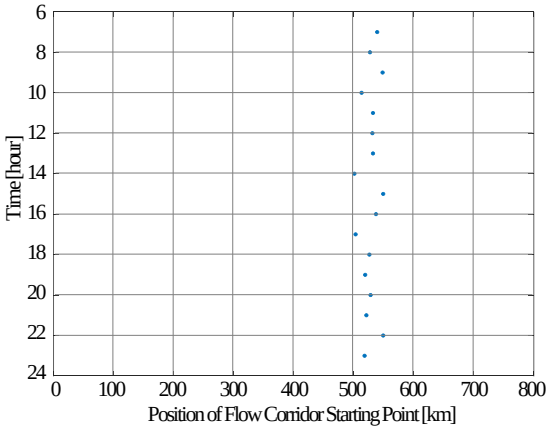


図-8　各時間帯のフローコリドーの最適な開始位置

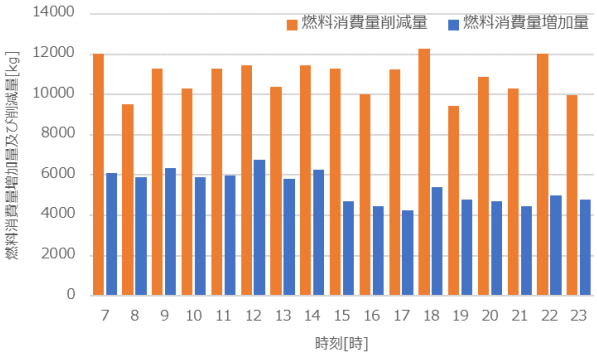


図-9　空域全体の燃料消費量の削減量と増加量

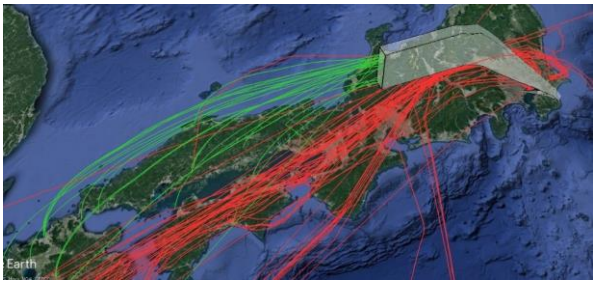


図-10　ある1日の9時~10時の航跡，緑線: フローコリドー利用便，赤線: 非利用便

表-1　フローコリドー利用便の規模ごとの燃料消費量削減量

大型機	487.4 [kg]
中型機	426.6 [kg]
小型機	298.7 [kg]

REFERENCES

1) International Air Transport Association: Air Passenger Numbers to Recover in 2024, IATA Press Release No. 10, 2022. https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/（2023年10月12日閲覧）
2) 国土交通省航空局: CARATS ロードマップ，https://www.mlit.go.jp/common/001286417.pdf（2023年10月12日閲覧）
3) Federal Aviation Administration: Vision for Trajectory Based Operations, Tech. Rep., Washington, DC, 2017, https://www.faa.gov/air_traffic/technology/tbo/documents（2023年10月12日閲覧）
4) Wing, D. J. and Cotton, W. B.: Autonomous Flight Rules: A Concept for Self-Separation in U.S. Domestic Airspace, NASA TP-2011-217174, November 2011.
5) Hering, H.: Air Traffic Freeway System for Europe, EEC Note No. 20/05, EURTOCONTROL Experimental Centre, Nov. 2005.
6) Yousefi, A., Lard, J. and Timmerman, J.: Nextgen flow corridors initial design, procedures, and display functionalities, IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference, Oct. 3-7, 2010.
7) Nakamura, Y. and Takeichi, N.: A Self-Separation Algorithm for High Density Air Corridor Allocated Optimal Flight Trajectory, AIAA-2016-0426, AIAA Modeling and Simulation Technology Conference, San Diego, CA, 4-8 Jan. 2016.
8) 武市昇, 中村陽一, 蔭山康太: フローコリドーの概念と実用化への課題, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 60, No. 12, pp. 449-454, 2012.12.
9) Xue, M.: Design Analysis of Corridors-in-the-sky, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, Aug. 10-13, 2009.
10) Yousefi, A., Zadeh, A. N. and Tafazzoli, A.: Dynamic allocation and benefit assessment of NextGen flow corridors, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 33, Aug. 2013, pp. 297-310 .
11) Sridhar, B., Grabbe, S., Sheth, K. and Bilimoria, K.: Initial

Study of Tube Networks for Flexible Airspace Utilization, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Keystone, Colorado, 21-24 August 2006.
12) Hoffman, R. and Prete, J.: Principles of airspace tube design for dynamic airspace configuration, AIAA-2006-6768, AIAA ATIO Conference, Anchorage, Alaska, 2008.
13) Wing, D., Smith, J. C. and Ballin, M. G.: Analysis of a Dynamic Multi-track Airway Concept for Air Traffic Management, NASA/tp-2008-215323, NASA Langley Research Center, July 2008.
14) Xue, M. and Kopardekar, P.: High-capacity tube network design using the Hough transform, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 32, No. 3, pp. 788-795, 2009.
15) Takeichi, N. and Abumi, Y.: Benefit optimization and operational requirement of flow corridor in Japanese airspace, Journal of Aerospace Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G, Vol. 230, pp. 1780-1787, July 2016.
16) 山本聡史, 諸岡康郎, 武市昇, 原田明徳: 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（土木計画学）, Vol. 75, No. 2, 2019, pp. 90-96.
17) CARATS Open Data, provided by Japan Civil Aviation Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Press Release on CARATS Open Data, Feb, 2015.
18) Japan Meteorological Agency, https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/nwp.html （2023年10月12日閲覧）
19) Nuic, A.: User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.13, Eurocontrol Experimental Center, May 2015.
20) Nakamura, Y. and Kageyama, K.: Validation Study of a Fuel-Burn Estimation Model, Proceedings of the 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Takamatsu, Japan, Nov. 20-22, 2013.

SPATIO-TEMPORAL OPTIMIZATION OF A FLOW CORRIDOR IN JAPANESE AIRSPACE

Jumpei YOSHINO, Noboru TAKEICHI and Akinoti HARADA

The introduction of long, narrow airspace called flow corridors between metropolitan areas with large traffic demands is being considered for future air traffic management. This is an airspace where only aircraft with capability of self-separation can fly along a near-optimal trajectory without being subject to air traffic control. This paper investigates optimizing the starting point of the flow corridor from Fukuoka to Tokyo in order to minimize fuel consumption in the entire airspace. This is intended to allow more flights to use the flow corridor and to avoid obstructions to other flights as much as possible, thereby improving the overall benefit. Optimization using fuel consumption as the evaluation index revealed that the introduction of flow corridors in the latter half of the cruise route minimizes fuel consumption in the entire airspace. It was found that approximately 70% of all flights from the west to Tokyo could reduce fuel consumption by using flow corridors, thus saving 6.6% of the total consumption. This is almost twice the reduction of using flow corridors for the entire route from Fukuoka to Tokyo.