

フローコリドー：期待される効果と導入要件

武市 昇¹・山本 聡史¹・諸岡 康郎¹・原田 明德²

¹非会員 首都大学東京 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: takeichi@tmu.ac.jp

²非会員 高知工科大学システム工学群 (〒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は、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の導入が検討されている。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。一方、その外部を飛行する航空機にとっては巨大な障害物となり、その回避のために燃料消費量と所要時間が増加してしまう。本稿では、フローコリドー内部の飛行およびフローコリドーの回避に伴う運航コストの増減を評価し、フローコリドーの導入が便益をもたらす要件を明らかにする。評価の結果、ごく一部の大型機が自律間隔維持の機能を搭載しフローコリドーを利用できるようになるだけで、空域全体として便益が得られることが明らかとなった。早期のフローコリドーの導入が望ましいと結論できる。

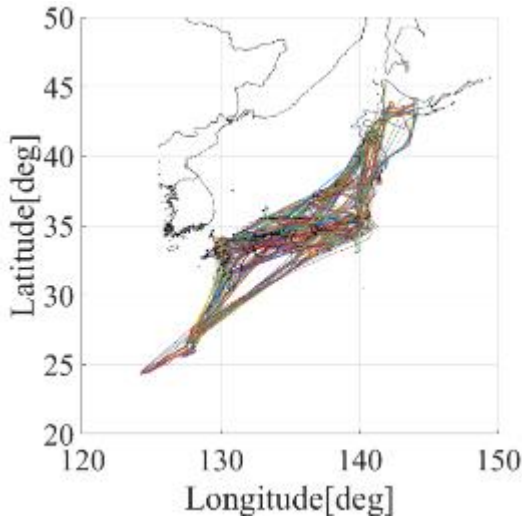
Key Words: *air traffic management, air corridor, cost-benefit analysis, installation assessment*

1. はじめに

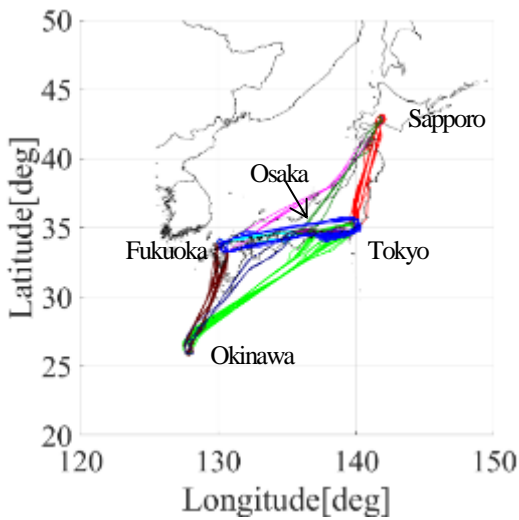
今日の航空交通においては、特定の混雑空港間の交通量の割合が高くなっている。図-1a に現在の日本の国内便の軌跡を示す。日本国内では、東京と札幌、大阪、福岡および沖縄間の航空便数だけで全体の 20%以上を占め、米国では特定の 10%の空港間の航空便が全体の 33%を占める²⁾。このような特定の経路上では、多くの航空機がほぼ同一の経路上を同一の方位に向かって飛行する。フローコリドー (Flow Corridor) とは、このような特定の方位の交通量の多い経路に沿って配置される細長い空域として考案³⁾された。フローコリドー内を飛行する航空機は、自律間隔維持⁴⁾の機能により管制官の介入を要することなく安全にほぼ最適軌道に沿って飛行することができる。一方、フローコリドーの外部は従来通りの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り、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进行处理することができるものと考えられる。

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⁶⁾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⁸⁾が行われて来た。一方、図-1b に示すように、日本国内の大都市間の運航経路はあらかじめ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に対してあらゆる機種・質量の航空機の燃料消費量が最小となる飛行経路を求め、それらと現在の運航効率とを比較した¹⁾。フローコリドーの空域は、あらゆる質量のあらゆる機種の最適軌道を包含するように設定されるものと考えられ、この研究からその空域の概形が示唆された。一方、フローコリドーはその外部を飛行する航空機にとっては極めて大きな障害物となり、それらの運航コストの増加は無視できないものとなる可能性がある。フローコリドーの導入に際しては空域全体としての便益が向上することが必須であり、そのためには外部を飛行する航空機の運航コストの増加量を定量的に評価する必要がある。そこで本研究では、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し、外部の航空機がそれを回避するための飛行経路とその際の運航コストの増加量を評価する。一方、フローコリドー内部を最適軌道に沿って飛行することを想定した運航コストの低減量も評価する。これらの比較により、空域全体として便益を得られる条件を明らかにし、フローコリドーの導入要件を明らかにする。



(a)



(b)

図-1 現在のある一日の航空機の軌跡, a: 全便の軌跡, b: 主要都市間の軌跡

2. フローコリドー利用による運航コスト低減量

(1) フローコリドーの配置

福岡・東京間にフローコリドー空域を適切に設定するため、まず現状の交通流の様子を分析する。図-2に現状のある一日の飛行経路を示す。多くの便が SPIDE というウェイポイントから巡航に入り、FLUTE というウェイポイントからベクタリングなどの管制指示を受ける管制セクターに入る。フローコリドーはこれらの管制指示の妨害とならないように配置する必要がある。そこで、本研究ではこのセクターのもっとも内側を通るようにフローコリドーを配置することとした。この経路を図-2に赤線で示す。この場合、セクター内の管制指示はほぼ従来通りの空域を用いることができるため、ほとんど影響していないものと認識する。

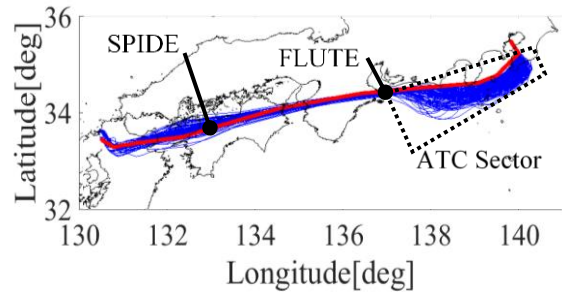


図-2 ある一日の福岡発東京着の便の水平面内の軌跡, 青線: 実運航軌道, 赤線: フローコリドー空域

(2) 運航コスト低減量の評価

次に最適軌道と実軌道の運航コストの比較により、フローコリドーの導入がもたらし得る運航コストの低減量を評価する。この評価には、2014年度の42日間の運航データ¹³⁾、数値気象予報データ¹⁴⁾、および航空機運航性能モデル¹⁵⁾を用いた。現在、福岡から東京までの経路では、一日あたり約50便が運航されている。それらのうち、ほぼ半数はB777-200(以下B772と略す)といった大型機、約20%がB767-3(同B763)のような中型機、約30%がB737-800(B738)のような小型機により運航されている。本稿ではこれら3機種を対象として評価する。運航データからは質量の情報を得られないため、過去の実績データ¹⁶⁾に基づいてB772、B763、B738のそれぞれの質量を性能モデルの標準質量の90%、80%、90%として解析を行うこととした。

運航コストは次式により評価される。

$$\begin{aligned} Cost &= Fuel + CI \left[\frac{\$/hour}{cents/lb} \right] \times Time \\ &\cong Fuel + \frac{CI}{79.4} [kg/s] \times Time \end{aligned} \quad (1)$$

運航コストは燃料消費量と所要時間の線形和で定義され、コストインデックスによりそれらの重み付けが行われる。コストインデックスも運航データには含まれないため、本稿ではB772、B763、B738のそれぞれについて80、60、40として解析を行った。横方向の飛行経路は図-2に示すように定められているので、指示対気速度(IAS)と気圧高度を最適化することにより最適軌道を求める。最小化するコスト関数は以下の様になる。

$$Cost = \int_{x_{in}}^{x_{fin}} F(x) dx + \frac{CI}{79.4} [kg/s] \times Time \quad (2)$$

x_{in} および x_{fin} は初期位置及び終端位置であり、 $F(x)$ は燃料流量である。最適軌道は離陸および着陸の滑走路端から14.9NM離れた高度5000ftの位置とし、飛行経路の全長は917.6kmとなった。初期と終端の速度は運航性能モデルの値を適用した。飛行速度と加速度の上限および

下限, 気圧高度および推力の上限値を制約として与えた. コスト関数が非線形であるため SQP 法を用い, 局所解を避けるためマルチスタート法を用いた. また, 一年間の平均の風速を与えて解析を行った. 実運航データの一便あたりの平均運航コストと, 最適軌道の運航コストを表-1 にまとめる. また, 質量を標準の 70~100%まで変化した場合の最適軌道の気圧高度を図-3 に示す. フローコリドーの空域は, これらの軌道を全て含むように設定される.

表-1 一便あたりの運航コスト低減量

一便あたりの運航コスト	Large size (B772)	Middle Size (B763)	Small Size (B738)
実軌道	10749.6	8111.9	4815.5
最適軌道	9363.0	6951.4	4277.3
低減量	1386.6	1160.5	538.2

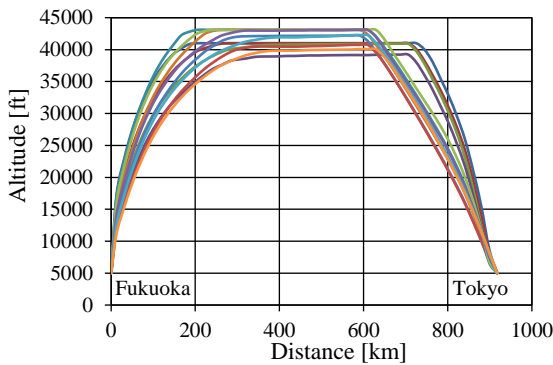


図-3 複数の機種 (B772, B763 および B738) の複数の質量 (70%~100%) の最適軌道の気圧高度

3. フローコリドー回避による運航コスト増加量

(1) フローコリドー空域の決定

フローコリドー内部では最適軌道を飛行する航空機同士の追い越しが頻発することが想定されている. そこでフローコリドー内部で追い越しを行う航空機間に少なくとも 5NM の水平距離を確保できるよう, 5NM の厚みを考慮し, 図4 のようにフローコリドー空域を設定した. このようにフローコリドーの空域は福岡から東京までの空域に広く存在する巨大な構造になる.

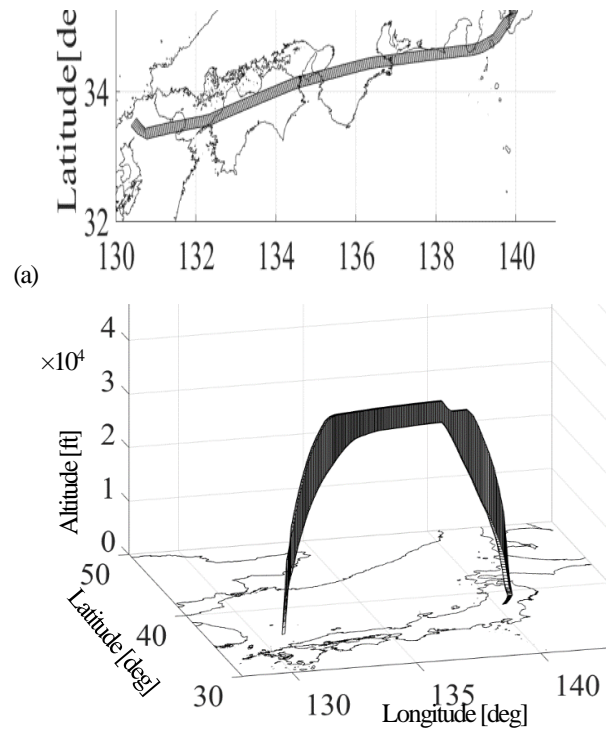


図-4 最適軌道を含むフローコリドー空域の設定, a: 平面図, b: 鳥瞰図

(2) フローコリドー空域と干渉する便の抽出

フローコリドーはその外部を飛行する航空機にとっては巨大な障害物となる. その為, 外部の航空機は図4に示されるフローコリドーを迂回して飛行しなくてはならない. この迂回に伴い, 各便は燃料消費量も飛行時間も増加してしまう. 本章ではこれらの増加量を定量的に評価する.

まず実運航データを解析しフローコリドーと飛行経路が干渉している機体を抽出する. ただし上述の通り, フローコリドーは管制セクター内を飛行する航空機と干渉しないように配置するため, 羽田空港到着便は現在とほぼ同じ管制, 効率で運航する事が可能と考え解析から除外した. 以下に例としてある1日のデータを解析して得られた干渉機体の航跡を図-5aに, それらの干渉位置を図-5bに示す. 干渉する便のほとんどは高高度を通過する国際便か, 地方空港間の国内便であった.

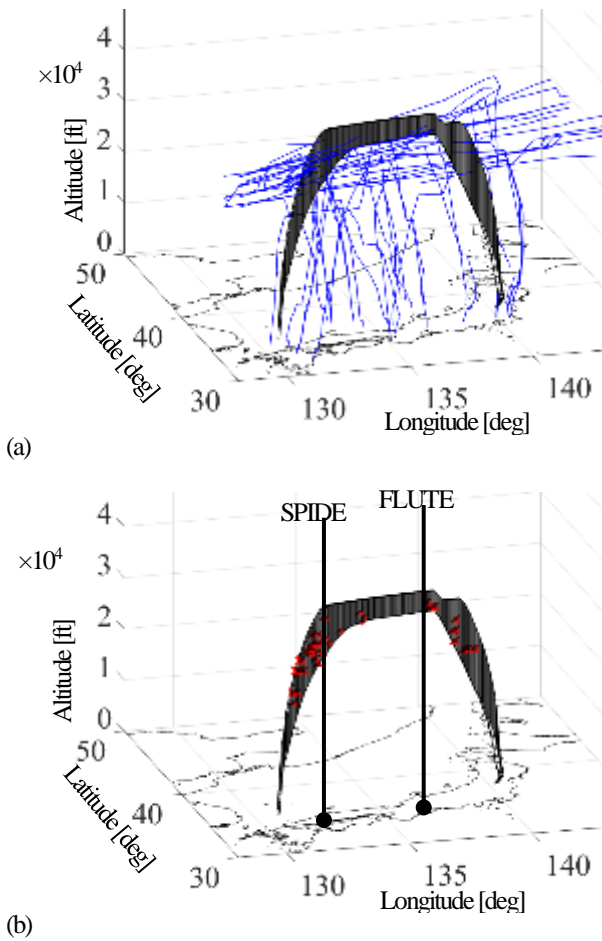


図-5 抽出された干渉便, a:軌道, b:干渉位置

(3) 回避軌道の解析

パイロットが航空機の進路を変更する際広く用いられているのが、MCP(Autopilot Mode Control Panel)である。この MCP を用いることによりパイロットは飛行方位の変更や、一定の上昇率或いは降下率による高度の変更を容易に行うことが出来る。そこで本研究では現実的にパイロットが簡便な操作で飛行しうる回避軌道として、飛行方位のみを変更しフローコリドを横方向に避ける横回避と、高度のみを変更し下方から避ける下回避の二種類を検討する。ただし、回避軌道の飛行速度は変更前と同様とする。

横回避軌道においては、フローコリドから 5NM の距離を維持するため、図-6a に示すような接線に沿って飛行することを想定する。回避する便はある点で飛行方位の変更を行い、フローコリドを回避した後、再び方位角を変更して元の軌道に戻るものとする。この時、回避開始地点と回避終了点はいずれも最も進路変更角が小さく済むような地点に設定する。一方下回避軌道ではフローコリドから 1000ft の高度差を確保するため、図-6b に示す接線に沿って飛行することを想定する。回避する便は、元の軌道から一定の降下率で降下し、フローコリドを回避後は一定の上昇率で上昇し元の軌道に戻

るものとする。これらの降下率および上昇率はいずれも -900ft/min とした。横回避と下回避の具体例を図-7に示す。

(4) 運航コスト増加量の評価

フローコリドと干渉した全ての便に対して、前項に示した二通りの回避軌道の数値解析を行い、運航コストの増加量のいずれか小さい方の回避軌道を選択した。このようにして得た解析結果を表-2に示す。この結果から、フローコリドと干渉している全ての機体がフローコリドを迂回するよう飛行した場合、一日あたり約 4500 の運航コストが増加することが明らかとなった。したがって、フローコリドの導入により空域全体としての便益がもたらされるためには、フローコリドの導入により少なくとも一日当たり 4500 の運航コストを低減しなければならない。

表-2 干渉便数と運航コスト増加量

干渉便数 (42 日間)	1877
横回避の便数	868
下回避の便数	1009
全運航コスト増加量 (42 日間)	188889.3
一日あたりの運航コスト増加量	4497.4

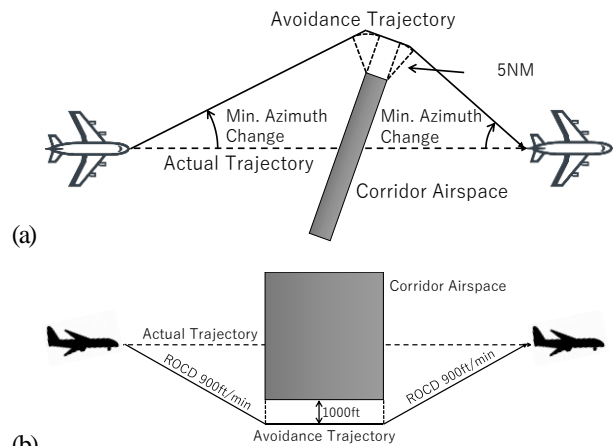


図-6 回避軌道, a:横回避, b:下回避

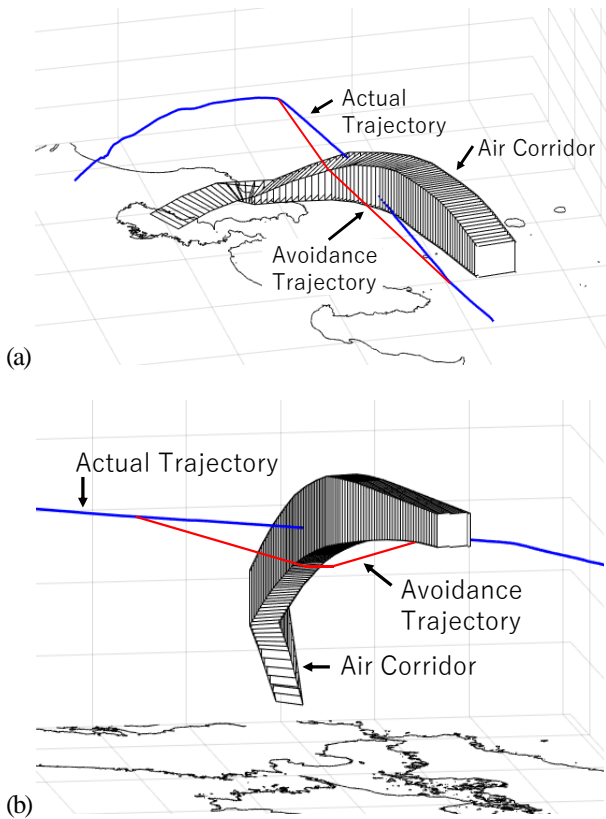


図-7 回避軌道の具体例, a: 横回避, b: 下回避

4. フローコリドールの導入要件

表-3に、現在の福岡発東京着便の運航便数、フローコリドール内を飛行することによる運航コスト低減量をまとめる。またこれらの値と、フローコリドール外の航空機が回避するための一日あたりの運航コスト増加量として得られた 4500 から、最適軌道によるコスト削減量がコスト増加量を上回る機数と、現在の運航便数に対する割合も表-3 に示す。この結果から、例えば B772 のような大型機あるいは中型機であれば一日あたり 4 便、B738 のような小型機種であれば一日あたり 9 便がフローコリドール内を運航するようになれば、それによる運航コスト低減量がフローコリドール外部の運航コスト増加量を上回ることになる。大型機は現在一日あたり 26.2 便が運航されているので、一日あたり 3.24 便以上つまり 4 便が運航すればフローコリドール導入の便益が得られることになる。年間の運航便数の割合では、12.4%、つまり全体の 8 分の 1 の機材が自律間隔維持の機能を導入してフローコリドール内を飛行できるようになるだけで、その導入の便益を得られるということである。一方、中型機および小型機では 33.4% および 55.7%、つまり 3 分の 1 以上および半分以上の機材が導入しなければフローコリドール導入の便益がもたらされない、ということになる。

表-3 運航コスト低減の要件

	Large size (B772)	Middle Size (B763)	Small Size (B738)
現在の一日あたりの運航便数	26.2	11.6	15.0
一便あたりの運航コスト低減量	1386.6	1160.5	538.2
運航コスト低減に必要な一日あたりの運航便数	3.24	3.88	8.36
運航コスト低減に必要な運航便数の割合[%]	12.4	33.4	55.7

5. まとめ

本稿では、日本の空域を運航する全ての便に対し、福岡から東京へ向かうフローコリドール導入がもたらす影響を調べることで、その導入要件を明らかにした。一連の評価により、例えば B772 のような大型機であれば、一日の福岡発羽田着の便のうち 8 分の 1 程度の機材が自律間隔維持の機能を導入しフローコリドール内を飛行できるようになるだけで、空域全体として運航コストを低減することができる事が明らかとなった。一方、小型機では半分以上の導入が必要となる。この結果から、フローコリドールは、自律間隔維持の機能を大型機から優先的に導入することにより、その普及率が低い状況にあっても大きな効果を発揮しうることが明らかとなった。またフローコリドールの早期の導入そのものが、自律間隔維持装置の普及を促進することになる。したがって、自律間隔維持の機能の十分な普及を待つことなく、その普及の初期段階からフローコリドールを早期に導入することが望ましいと結論できる。

参考文献

- 1) 武市昇, 中村陽一, 蔭山康太: フローコリドールの概念と実用化への課題, 日本航空宇宙学会誌, Vol.60, No. 12, 2012 年 12 月, pp. 449-454.
- 2) 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.
- 3) Hering, H.: Air Traffic Freeway System for Europe, EEC Note No. 20/05, EURTOCONTROL Experimental Centre, Nov. 2005.
- 4) Yousefi, A., et al.: Nextgen flow corridors initial design, procedures, and display functionalities, IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference, Oct. 3-7, 2010.
- 5) 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.
- 6) Xue, M.: Design Analysis of Corridors-in-the-sky, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago,

- Aug. 10-13, 2009.
- 7) Yousefi, A., et al.: Dynamic Allocation and Benefit Assessment of NextGen Flow Corridors, 10th AIAA ATIO Conference, Fort Worth, Texas, 2010.
 - 8) 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.
 - 9) Hoffman, R. and Prete, J.: Principles of airspace tube design for dynamic airspace configuration, AIAA-2006-6768, AIAA ATIO Conference, Anchorage, Alaska, 2008.
 - 10) 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.
 - 11) Xue, M. and Kopardekar, P.: High-Capacity Tube Network Design using the Hough Transform, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 32, No. 3, 2009, pp. 788-795.
 - 12) Takeichi, N. and Abumi, Y.: Benefit Optimization and Operational Requirement of Flow Corridor in Japanese Air-space, Journal of Aerospace Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G, Vol. 230, pp.1780-1787, July 2016.
 - 13) CARATS Open Data, provided by Japan Civil Aviation Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Press Release on CARATS Open Data, Feb, 2015.
 - 14) Japan Meteorological Agency, <http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/nwp.html> (cited Feb. 15, 2018)
 - 15) Nuic, A.: User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.13, Eurocontrol Experimental Center, May 2015.
 - 16) 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.

COST-BENEFIT ANALYSIS FOR ASSESSMENT OF AIR CORRIDOR INSTALLATION INTO JAPANESE AIRSPACE

Noboru TAKEICHI, Satoshi YAMAMOTO, Yasuo MOROOKA
and Akinori HARADA

An air corridor is a kind of airspace concept where only the aircraft capable of self-separation can operate. Its installation is expected to increase the traffic capacity of the whole airspace, and aircraft flying inside it can reduce their fuel consumption and flight time. In contrast, aircraft flying outside it inevitably consume extra fuel and time in order to avoid the corridor airspace. In this study, the cost-benefit analysis is performed in order to clarify the feasibility and condition that the air corridor installation becomes beneficial. The operational cost increase of the flights outside the air corridor is analyzed as the difference between operational costs of the current trajectories and those of the trajectories modified to avoid the corridor airspace. The reduction of the operational cost by flying along the optimum trajectories inside the air corridor is also analyzed. Through an example analysis on the air corridor installation into the air traffic route from Fukuoka to Tokyo, the heaviest traffic in Japan, it has been found that even a small number of flights operated inside the air corridor can achieve the operational cost reduction larger than its increase per day. Through a detailed analysis on ascent, cruise and descent segments of the air corridor, it has been clarified possible to improve the potential benefit of the air corridor by appropriately choosing the segments for air corridor installation. It can be concluded that the installation of the air corridor becomes beneficial even when a small part of aircraft is capable of self-separation, and that the air corridor should be installed as early as onboard self-separation capability becomes available. In this way, the effectiveness of the proposed evaluation methodology for installation assessment of an air corridor has been clearly demonstrated.