

1. 北太平洋上空のフリールーティング運用可能性の検討

航空交通管理領域 ※平林 博子, ブラウン マーク
 東京都立大学 武市 昇

1 はじめに

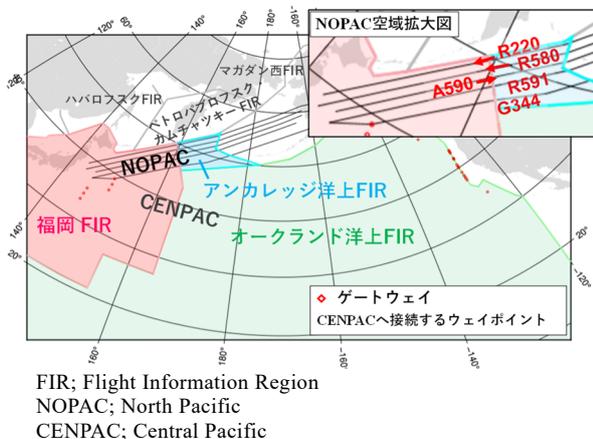
アジアと北米を結ぶ主要路線の多くは北太平洋上空域を飛行する。アラスカからカムチャッカ半島の南側を北限とする北太平洋上空域の飛行情報区 (FIR: Flight Information Region) は、福岡 FIR, アンカレッジ洋上 FIR 及びオークランド洋上 FIR で構成され (図 1), 日米の管制機関により航空管制等の航空交通業務が提供されている。太平洋等の大洋上空では、地上レーダー施設を整備することが困難であるため、航空機間に確保すべき最小間隔 (管制間隔) はレーダー監視環境下と比較すると大きくとる必要があり空域容量は小さい。太平洋上空での空域容量拡大及び航空交通の効率化を図るため、日米管制当局により、日米航空管制調整グループ (IPACG: Informal Pacific ATC Coordinating Group) 会議が 1989 年に設立された[1, 2]。IPACG では、1990 年代に国際民間航空機関 (ICAO: International Civil Aviation Organization) で策定された衛星を使用した将来の航空航法システム (FANS (Future Air Navigation system) 構想), それに引き継ぐ新 CSN/ATM (Communication, Surveillance, Navigation/Air Traffic Management) システム構想[3]を受け、航空管制分野における技術向上を活用した管制

間隔短縮の導入を積極的に進めてきた。現在北太平洋上空域で適用可能な管制間隔は航空機性能に応じ変化し、適用可能最小間隔は、縦/横方向はそれぞれ 30NM/30NM, 垂直方向は 1,000ft である[4]。IPACG 設立当初は各々 15 分/100NM, 2,000ft であったことから、大幅な管制間隔短縮が可能な環境が整備されてきたことがうかがえる。さらに、今後 Space-based ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) 等の将来の監視システムを想定すると、大洋上空でのさらなる管制間隔短縮の可能性がある[5]。

管制間隔短縮が可能となることで空域あたりに飛行可能な航空機数は増加し、現状よりも制約が少ない運航者設計経路 (UPR; User Preferred routes) など運航者の希望する飛行経路運用の可能性が高まる。現在 IPACG では、北太平洋上空域にある NOPAC と呼ばれる 5 本の平行固定経路の再構築が検討されている。NOPAC の南側空域 (図 1 に示す”CENPAC”空域) ではすでに UPR 運用が導入されており、NOPAC 再構築では経路間幅を短縮し、一部高度帯では航空機性能依存の専用経路とすることで、空域容量を増加させつつ UPR 運用空域拡大を目指すものである。NOPAC 再構築のイメージを図 2 に示す。

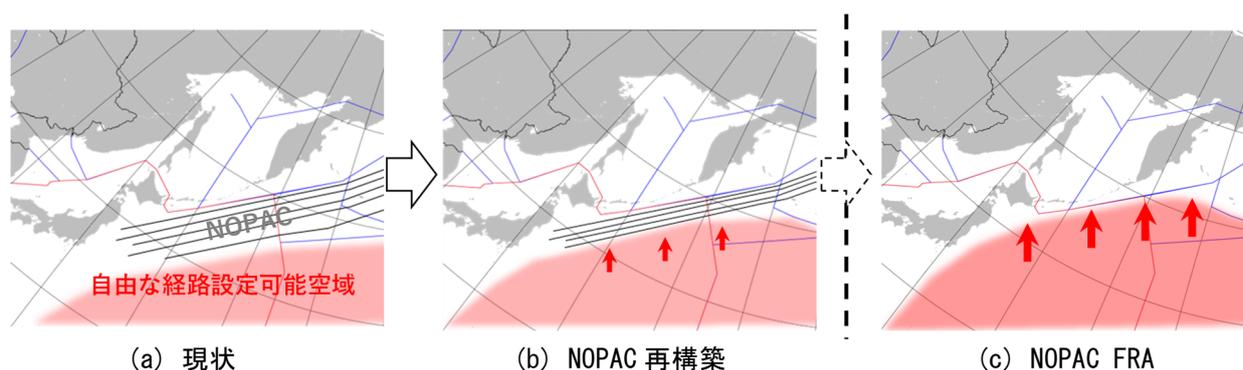
本研究では、NOPAC 再構築の先を見据えた空域/経路環境を想定する。NOPAC 経路を完全に排除し、NOPAC 空域 (現在の NOPAC 経路が設定されている空域のこと。以降「NOPAC 空域」とする。) を自由に設計可能なフリールーティング空域とした場合 (図 2 参照) の運用可能性について検討するものであり、本稿は、検討における評価指標, 評価手順, 及び評価結果[6]を概説するものである。

なお、本研究は東京都立大学法人 (東京都立大学) との共同研究の枠組みで実施している。



FIR; Flight Information Region
 NOPAC; North Pacific
 CENPAC; Central Pacific

図 1 対象空域の FIR 構成



段階的な NOPAC 再構築により経路間隔は短縮され経路数は 5 本から 4 本へ縮小される(b)。本研究では自由な運航者経路設定可能空域のさらなる拡大を想定し、全ての NOPAC 経路を排除した空域/経路構成を検討する。

図2 NOPAC 再構築及び NOPAC FRA による自由な運航者経路設定可能空域の拡大 (イメージ)

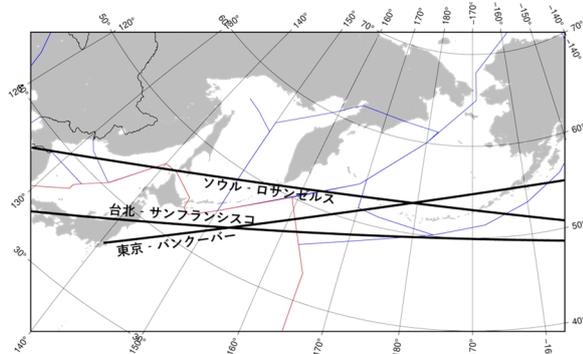
2 北太平洋上空域の現在の経路運用の概要

2.1 NOPAC

NOPAC 経路は、日本の東北沖からアラスカ半島までの空域に約 50NM の経路間隔で設定されている。日本を含む東アジア地域と北米大陸間の最短距離経路 (大圏経路) は NOPAC 空域周辺と重なることもあり (図 3 参照), NOPAC 空域は高需要空域である。円滑な交通流形成のために、図 1 拡大図に示すように NOPAC 経路の一部経路は一方通行運用を実施している。北から 2 本 (R220 及び R580) は西行専用経路, 3 本目 (A590) は東行専用経路である。

2.2 PACOTS 及び UPR

NOPAC 空域の南側である CENPAC に固定経路は存在しない。上層風を考慮し計算された経路が日ごとに設定され、日米航空局から公示される。この経路を PACOTS (Pacific Organized Track System) と呼ぶ。PACOTS は、複数の主



アジアと北米間の最短距離経路 (大圏経路) は NOPAC 空域周辺と重なる。

図3 最短距離経路 (大圏経路) 例

要都市間を想定し計算, 設計される。例えば、東京からシアトルを想定し計算されるのはトラック 1, 東京からサンフランシスコはトラック 2 として公示される。西行きのトラック名はアルファベットが付加される。シアトルから東京はトラック C, サンフランシスコから東京はトラック E 等である。CENPAC では PACOTS 運用に加え UPR の導入も進んでいる。UPR により飛行経路を計画する際は、PACOTS トラックとの関連でいくつかの制限があるが、その制限は管制間隔短縮可能性が進むにつれ緩和されてきている。

3 評価指標及び評価手順

3.1 評価指標

本件では、個々の飛行における評価指標に運航者経路データから飛行距離, 飛行時間, 及び消費燃料を算出し使用した。また、運用可能性を測る目的で、空域容量に影響のある航空機間の潜在的管制間隔喪失 (PLOS; Potential of Loss of Separation) も評価指標として使用した。PLOS は、欧州で導入されている FRA (Free Route Airspace) の評価時に、複雑性を示す指標として使用されている[7]。

3.2 評価手順

図 4 に本研究における評価手順を示す。まず、シミュレーションのために、シナリオ, ネットワーク, 気象データを準備する。シナリオは、ある一日に福岡 FIR 洋上管制空域を実際に飛行した飛行計画を基に、33 時間の間に 451 便

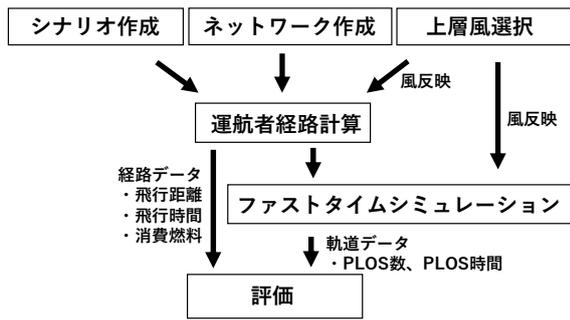
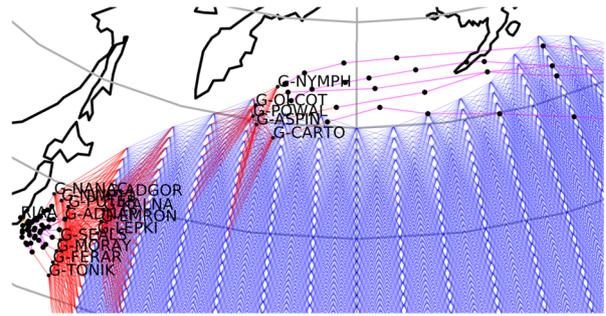


図4 本研究における評価手順

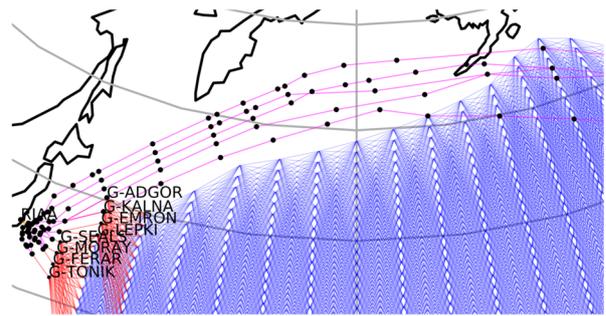
(178 シティペア) が飛行するシナリオを作成した。検討では、NOPAC 空域を自由に設計可能なフリールーティング空域と想定した空域設計（以降「NOPAC FRA」とする。）と、現行経路設計（以降「ベースライン」とする。）を比較することとし、NOPAC FRA 及びベースラインの2つのネットワークをシティペア毎作成した。図5に東京 - サンフランシスコ間のNOPAC FRA 及びベースラインネットワークを示す。シナリオは一日分の交通流を想定し作成していることから、反映させる上層風データは一回の経路計算及びシミュレーションでは一日分の気象データを使用した。気象データは、気象庁配信の全球数値予報モデル GPV 全球域 (GSM) のナウキャストを使用した。上層風選択手法及び日数については次章で説明する。

次に、シナリオ、ネットワーク、気象データを使用し、運航者経路を計算する。経路計算では、当所が所有するグラフ探索理論に基づく経路計算ツール[8]により、最短飛行時間経路を算出し運航者経路とした。そして、計算された運航者経路に基づき、AirTOP を使用したファストタイムシミュレーションを実施した。評価で使用する PLOS に影響を与える要素の一つに、シナリオにおける出発時刻があることから、AirTOP の出発時刻をランダムにシフトさせる機能を使用し（標準偏差 15 分の正規分布で設定）、オリジナルのシナリオに加え出発時刻をシフトした 5 パタンのファストタイムシミュレーションを実施した。

評価では、経路計算で得られた運航者経路から飛行距離、飛行時間並びに消費燃料、及びファストタイムシミュレーションにより得られた各飛行の軌道データより得られた PLOS を使



(a) NOPAC FRA ネットワーク



(b) ベースラインネットワーク

図5 東京 - サンフランシスコ間の経路計算のためのネットワーク

用した。PLOS は、対象空域での間隔欠如航空機対の数 (PLOS 数) 及び間隔欠如持続時間 (PLOS 時間) を3つの管制間隔を想定し検討した。想定した管制間隔は、現在最も使用されている水平方向 50NM 及び 30NM に加え、将来のさらなる管制間隔短縮を想定した 15NM を検討対象とした。垂直間隔はいずれの場合も Reduced Vertical Separation Minimum を想定し 1,000ft を使用した。

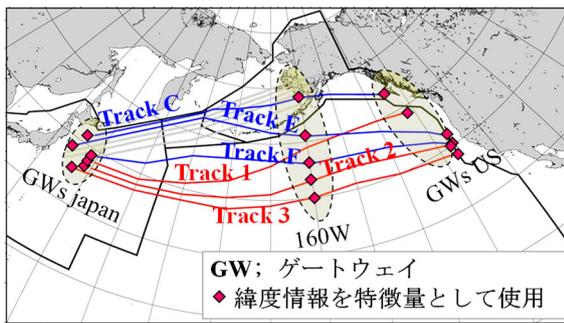
4 上層風選択手法

今回対象とする空域は強い偏西風であるジェット気流が優位であり飛行経路に大きな影響を与えることから、経路計算に上層風を考慮する必要がある。ジェット気流は季節によって風況が変化することから、季節を通じた影響を検討するためには対象空域におけるできるだけ多くの上層風パターンを考慮することが望ましい。しかし、経路計算及びファストタイムシミュレーションに費やす時間等、または検討におけるスピード感を考慮すると、実用的な上層風反映日数は 10 日程度である。実用的な選択日数で対象空域の季節を通じた傾向を表現するため、

本研究では、上層風選択においてクラスタリング手法を応用することを試みた。

上層風反映日を過去の数日分を選択することとし、数日分の組み合わせのために上層風を分類した。上層風の分類では、気象データそのものではなく過去の約7年分(2011年~2017年, 2,533日分)のPACOTS経路データを対象にクラスタリングを実施した。

図6にクラスタリングで使用した特徴量について示す。上層風は経路の南北の広がりに影響を与えることから、特徴量としてPACOTSの南北成分である緯度情報を使用した。非階層的クラスタリングであるX-means法を実施し、2,533日を6グループに分類した。それぞれのグループの割合を図7に示す。この割合に応じて上層風反映日を選択する。実用的な日数は10日程



【特徴量】

南北成分(緯度 φ)を特徴量に使用する。

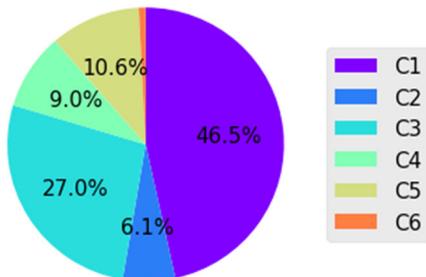
トラック k から F_k を作成する。

$$F_k = (\varphi_{GW_{Japan}}, \varphi_{160W}, \varphi_{GW_{US}})$$

特徴量 F_{day} は一日のトラック k ($k = C, E, F, 1, 2, 3$)

の F_k とする。 $F_{day} = [F_C, F_E, F_F, F_1, F_2, F_3]$

図6 特徴量の説明



C1, C2, ..., C6は各クラスタリンググループ
C6は1%未満

図7 クラスタリンググループの割合

度であると考えることから、最も少ない割合のグループから少なくとも1日を選択し、他のグループからは割合に応じた日数を選択することとした。クラスタリング対象期間のより最近(2017年)を中心に、11日上層風反映日として選択した。なお、1%未満であるグループ6からの選択は除外した。

ここではPACOTS東行トラック及び西行トラックの緯度情報の特徴量としたX-means法によるクラスタリングを実施したが、その後の特徴量及びクラスタリング手法を数パターン試行した検討結果から、ジェット気流の様相をより表している東行トラックのみを使用し、階層型クラスタリングであるウォード法の並びから一定間隔で選択する手法が、季節を通じた包括的評価時の上層風選択に最も適していることが示唆された[9]。

5 結果概要及び考察

5.1 個々の飛行経路

個々の飛行における提案空域/経路構成の優位性を測るため、NOPAC FRA飛行経路から得られる各指標(飛行距離, 飛行時間, 及び消費燃料)から、ベースラインネットワーク飛行経路から得られる各指標を減じた値を使用した。マイナスの値は、NOPAC FRA飛行経路の方がベースライン飛行経路と比較し、短い飛行距離, 短い飛行時間, または少ない消費燃料で飛行可能な経路であったことを示す。表1に示す各値の平均値はマイナス値を示し、全体としてNOPAC FRAの空域/経路構成はより便益のある飛行経路設定が可能であることを示した。

図8に消費燃料においてマイナス傾向の高い飛行を示す。NOPAC FRAでは、NOPAC空域とCENPAC間の境界がなくなり、NOPAC空域の南側を有効に使用することにより、便益の高い飛行経路設定が可能となる。一方で、プラス値となる飛行便もある。図9はプラス傾向の大きい経路例である。従来のNOPAC経路はFIR境界線に沿うように経路が設定されているが、今回、NOPAC空域にネットワークを作成した際、ネットワークとFIR境界線間及びNOPAC経路間に隙間が発生した。一部の飛行においては、この隙間が影響しプラス値となった。

表1 個々の飛行経路における指標値に関する統計値

飛行距離 f_d 、飛行時間 f_t 、及び消費燃料 f_c を比較する。

NOPAC FRA 経路値からベースライン経路値を減じる。 $f_{NOPAC FRA} - f_{ベースライン}$

マイナス値は NOPAC FRA 経路はベースライン飛行経路と比較し、短い飛行距離、短い飛行時間、または少ない消費燃料で飛行可能な経路であったことを示す。

| | Δf_d (NM) | | Δf_t (minutes) | | Δf_c (kg) | |
|------|-------------------|--------------|------------------------|-------------|-------------------|---------------|
| | 東行 | 西行 | 東行 | 西行 | 東行 | 西行 |
| 最大値 | 239 | 261 | 23 | 31 | 2053 | 4119 |
| 75%値 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 中央値 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | -154 |
| 25%値 | -3 | -18 | -2 | -5 | -194 | -662 |
| 最小値 | -645 | -663 | -47 | -120 | -7362 | -12136 |
| 平均値 | -6.9 | -14.3 | -1.6 | -3.6 | -242.6 | -468.5 |
| 標準偏差 | 34.6 | 58.2 | 3.7 | 7.5 | 565.8 | 908.1 |

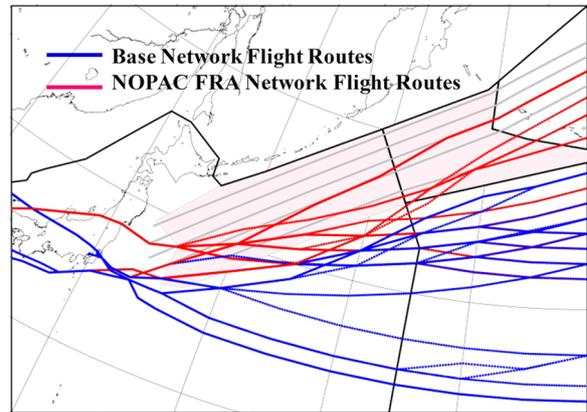
東行 $N = 3384$, 西行 $N = 2028$

IPACGのNOPAC再構築では、現在のNOPAC経路を構成しているウェイポイントを残す方向で検討が進められている。今回のシミュレーション結果から、IPACGでの検討の方向性は効率的な運航者経路設計の観点から有効であり、今後の研究に反映させていきたいと考えている。

5.2 NOPAC FRA 運用可能性 - PLOS

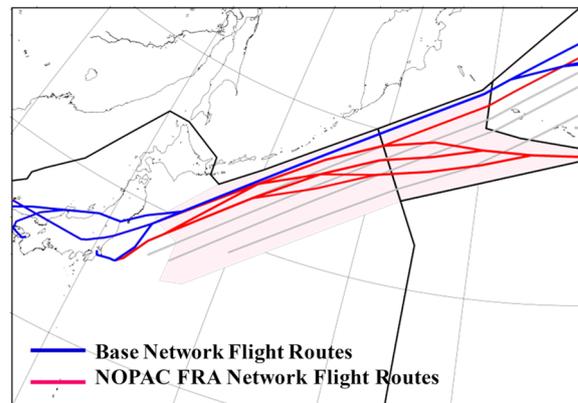
表2にPLOSに関する結果を示す。PLOS数はベースラインと比較しNOPAC FRAの方が多く結果であった。PLOS数が多くなると、間隔維持のため各飛行は垂直方向へ回避することが考えられ、結果、個々の飛行において理想高度での飛行が不可能となる可能性が高まると言える。PLOS数が高いことは、効率的な飛行経路運用の点から望ましいことではない。しかし、今回のシミュレーション結果では、適用管制間隔が小さくなると、NOPAC FRAとベースラインのPLOS数の差は小さくなること示された。さらに、PLOS時間においては、全ての管制間隔において、NOPAC FRAの方が短い結果であった。これは、同一飛行経路を飛行する飛行時間が短いことが影響を与えている。NOPAC FRAにおいては、PLOS数が高いことから各飛行経路は一旦近接するが、航空機対はすぐに離れていく傾向があり、結果、NOPAC FRAの方がPLOS時間は短くなった。

空域容量の観点では、現状の管制間隔においては、NOPAC FRA空域/経路構成は現状と比較し効率的な運用が可能であるとは言いが、将来、さらなる管制間隔短縮が可能とな



ベースライン飛行経路と比較しNOPAC FRA飛行経路の方が2,000kg以上の消費燃料削減効果のある飛行経路例

図8 消費燃料においてマイナス傾向の高い飛行経路例



ベースライン飛行経路と比較しNOPAC FRA飛行系の方が1,000kg以上燃料を必要とする飛行経路例

図9 消費燃料においてプラス傾向の高い飛行経路例

表2 PLOS数及びPLOS時間のベースライン及びNOPAC FRAそれぞれの平均値

| | 50NM | | 30NM | | 15NM | |
|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| | ベースライン | NOPAC FRA | ベースライン | NOPAC FRA | ベースライン | NOPAC FRA |
| PLOS数 | 108 | 115 | 66 | 70 | 37 | 37 |
| PLOS時間(分) | 11893 | 11664 | 6796 | 6587 | 3264 | 3054 |

N = 72

ることで、効率的運用可能性が高まることが示唆された。運用可能性を検討する際は、管制官が監視可能な交通流であるかの判断も必要となると考えられ、支援機能、自動化、及び空域複雑性も視野にいれつつ、引き続き検討を続けていく予定である。

6 おわりに

北太平洋上空へフリールーティング運用を導入し自由な運航者設定経路運用が可能な空域を拡大した際の、飛行経路の優位性及び運用可能性についてシミュレーションを実施し評価した結果について紹介した。個々の飛行経路の優位性を測る目的とした評価指標として、飛行距離、飛行時間及び消費燃料を使用した結果は、全体としてNOPAC FRAの空域／経路構成はより便益のある飛行経路設定が可能であることを示した。一方、空域容量を測る目的として使用した評価指標である潜在的管制間隔喪失(PLOS)の結果は、現状の管制間隔においては、NOPAC FRA空域／経路構成は現状と比較し効率的な運用が可能であるとは言い切れない結果を示した。しかし、将来、さらなる管制間隔短縮が可能となることで、効率的運用可能性が高まることが示唆された。

謝辞

運用実績データのご提供をいただきました国土交通省航空局の関係各所の各位のご協力、及びIPACGメンバー各位のご助言に深く感謝いたします。

参考文献

[1] “Informal Pacific ATC Coordinating Group (IPACG),” FAA website, https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/mission_support/ato_intl/ipacg, (参照 Mar. 29 2022).

[2] “第29回日米航空管制調整グループ会議の開催及び日米航空管制当局間の協力に関する共同声明の採択,” 国土交通省航空局報道発表資料, 平成20年10月27日.

[3] ICAO, “Global Air Navigation Plan for CNS/ATM Systems,” ICAO Doc 9750.

[4] 国土交通省航空局, “航空保安業務処理規定第5管制業務処理規定,” 国空制第236号, 令和2年10月8日.

[5] “Global ATS Surveillance,” Aireon website, <https://aireon.com/products/global-ats-surveillance/>, (参照 Mar. 29 2022).

[6] Hiroko Hirabayashi, Mark Brown, Noboru Takeichi, “Feasibility study of free routing airspace operation over the North Pacific airspace,” ATM Seminar (2021), paper ID 23, Sept. 2021.

[7] Cesar Antonio Nava Gaxiola, Cristina Barrado, Pablo Royo, Enric Pastor, “Assessment of the North European free route airspace deployment,” Journal of Air Transport Management Volume 73, pp. 113-119, Oct. 2018.

[8] Mark Brown, Hiroko Hirabayashi, Navinda K. Wickramasinghe, “A Graph Search-Based Trajectory Optimiser for Practical Wind-Optimal Trajectories,” The Proceedings of the 2018 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2018), pp. 2201-2208, 2019.

[9] 平林 博子, ブラウン マーク, 武市 昇, “洋上航空交通運用評価のための経路データを用いた代表風選択,” 第59回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2021-5041-1D04, Nov. 2021.