

# 7. 洋上管制運用効率化のための経路設計に関する考察

航空交通管理領域 ※平林 博子, ブラウン マーク, 福島 幸子

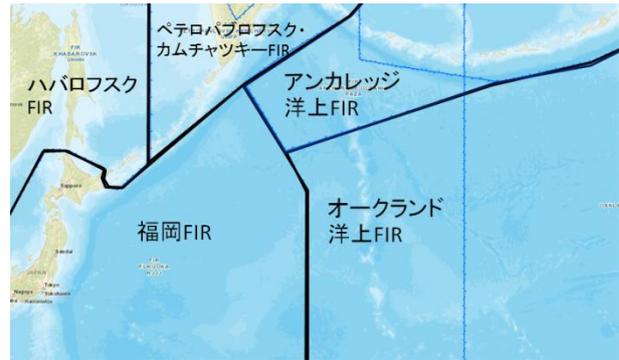
## 1 はじめに

アジア各国と北米間を結ぶ多くの飛行は北太平洋上空を飛行する。北太平洋上空は、日本、米国そしてロシアの管制機関がそれぞれ航空管制を担当する飛行情報区（FIR：Flight Information Region）に分かれており、日本の管轄である福岡 FIR は、おおむね、東は東経 165 度、北は日本とアラスカを結ぶ北緯 45 度～50 度の範囲である（図 1）。福岡 FIR とアンカレッジ FIR 間には、ロシアとの FIR 境界線に沿うようにほぼ平行する ATS（Air Traffic Services）経路が設定されており、NOPAC（North Pacific）と呼ばれている。現在のように 5 本の経路が設定されたのは 1980 年代であり<sup>[1]</sup>、今日までその骨格はほぼ変更されていない。一方で、CPDLC（Controller Pilot Data Link Communications）通信、ADS-C（Automatic Dependent Surveillance - Contract）監視機能、及び PBN（Performance - Based Navigation）機能の採用により、洋上管制空域で適用できる航空機間に必要とされる管制間隔は短縮されてきている。

近年洋上の管制運用方式は、上層風を考慮した経路である PACOTS（Pacific Organized Track System）を提供するとともに、運航者が自由に経路設計できる利用者設定経路（UPR：User Preferred Route）運用を取り入れている。運航者にとっては経路選択肢が増え、より目的にあった経路で飛行できる。しかし実際は、飛行経路が錯綜する、または集中することで、希望高度で飛行できる機会が少なくなり、結果、見込んでいたほどの便益が得られない可能性がある<sup>[2, 3]</sup>。

本稿では、洋上空域において飛行経路の自由度を上げた状況をシミュレーションすることで、洋上管制運用の効率性、各飛行の効率性と飛行経路の関係について考察する。構成は次のとおりである。2 章では、現在の洋上管制の特徴を説明し、現状の管制運用状況を巡航高度に関する視点から述べる。3 章では NOPAC 経路の代

わりに、NOPAC のある空域（以下「NOPAC 空域」とする。）において UPR 運用を実施した場合のシミュレーション結果について報告する。4 章でまとめる。



参照 Global Flight Information Region (FIR)

<https://gis.icao.int/icaofir/>

図 1 北太平洋上の FIR

## 2 北太平洋上空域の航空管制

洋上空域はレーダー覆域外であるため、監視・通信方法及びそれらに依存する管制運用方式が国内空域とは異なる。この章では、洋上管制運用の特徴について述べる。

### 2.1 管制空域、管制方式の概要

図 2 に NOPAC 経路を示す。NOPAC 経路は固定経路であり、北から二本の経路を西行き専用、三本目を東行き専用として運用している。北米各都市と日本間の最短経路は NOPAC 空域を通ることから、交通需要の高い空域のひとつである。

航空機間に必要な管制間隔は、1980 年代は、縦 15 分、横 100NM、垂直 2,000feet（NOPAC においては横・垂直のそれぞれ 1/2 間隔を同時に満たす複合間隔を適用）であった。現在では航法性能が RNP（Required Navigation Performance）4 を満たす航空機間では、ADS-C 監視下で CPDLC 通信を実施している場合、縦 30NM、横 30NM が適用でき、また、短縮垂直間隔（RVSM: Reduced Vertical Separation Minima）適合機では垂直間隔は 1,000feet まで短縮可能である。

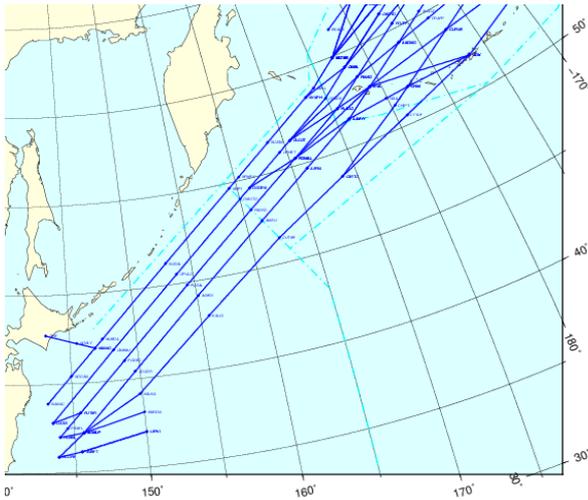


図2 NOPAC 概要図

## 2.2 PACOTS, UPR 及び DARPs

洋上管制空域では、可変経路の運用が進んでいる。毎日の上層風を考慮し PACOTS と呼ばれる可変経路を日米の管制機関が提供している。PACOTS は、北米及びハワイと日本及び東南アジアを結ぶ経路であり、ジェット気流等を考慮し計算され、各経路間は洋上空域では原則交差・合流することなく経路間隔が維持されるよう設定されている。また、運航者自身で経路を計算し飛行する UPR の運用も実施されている。さらに、飛行中に運航者自身が最新の予報風データを使用した計算の結果、経路を変更した方がその運航者にとって便益があるとみなされた場合、CPDLC を介して飛行中に経路変更を要望する DARP (Dynamic Airborne Reroute Procedure) の運用も拡大しつつある。

## 2.3 巡航高度に関する解析

洋上空域を飛行するフライトは長距離飛行であり、その時の機体の重量・飛行速度に最適な巡航高度で飛行することが、燃料消費の観点から重要となる。そこで、現状どの程度希望高度で飛行できているか、二つの解析を実施した。日本出発機の希望高度取得率解析及び高度変更リクエストに対する応答状況解析である。

### 2.3.1 日本出発機の希望高度取得率解析

日本から出発する洋上便は、韓国、中国及び東南アジアからの上空通過機との間に、洋上管制空域において管制間隔が維持できるように巡航高度をアサインされるため、リクエストする巡

航高度に応じられず、下の高度（低い高度）に抑えられることが発生する<sup>[4]</sup>。出発後にデータリンク設定が確認できた後は短縮間隔を適用できるため、上昇が可能となる。

2013年3月から2016年3月までの約3年分の、日本から出発する（ただし沖縄地域を除く）洋上空域を飛行する飛行計画高度に対するアサイン高度、洋上空域へ入域時の高度、及び福岡 FIR から隣接 FIR へ移管時の高度を比較した。

計画高度と各高度の高度差の分布を図3に、高度差がゼロ未満（計画高度より低い高度）、高度差がゼロ、及びゼロより大きい（計画高度より高い高度）割合を表1に示す。

出発前の承認段階では、3割の航空機は計画高度よりも低い高度がアサインされているが、出発後はその割合は17%まで減少する。また、隣接 FIR 移管時には、日本出発機の約9割の飛行は計画高度以上の高度で飛行している。

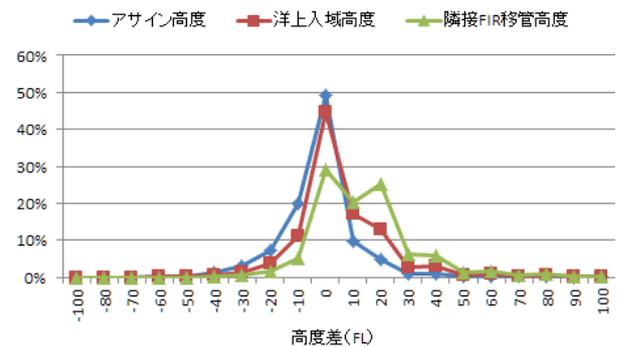


図3 各高度と計画高度との高度差の分布

表1 高度差ゼロ未満、ゼロ、及びゼロより大きい飛行数の割合

	承認高度	洋上入域高度	隣接 FIR 移管高度
高度差ゼロ未満	33%	17%	8%
高度差ゼロ	49%	45%	29%
高度差ゼロより大きい	18%	38%	63%

## 2.4 高度変更リクエストに対する応答

RNP4 機が増加することで、短縮管制間隔の適用が可能となり、高度変更リクエストに対し

て希望に応じられるケースが増加すると考えられる。2009 年から 2012 年までの CPDLC のメッセージ解析から、北米便の約 25% は高度変更に対する最初の返答は Unable であった<sup>[5]</sup>。その後 2013 年の追加解析では、CPDLC では 26~27%、HF 通信機では 33~35% の Unable リプライ率であり、反方向または交差経路上の関連機の関係で、夏に高い傾向であることが示された<sup>[6, 7]</sup>。RNP4 機の割合は 2013 年以降上昇し、その後高い値を維持しており、特に NOPAC 経路を飛行する機材は 9 割近くが RNP4 機である。ここでは、2013 年以降の Unable リプライ率の傾向について報告する。

CPDLC 及び HF 通信記録から、高度変更リクエストに対して 10 分以内に返答された最初の回答を対象とし、Unable であった割合を Unable リプライ率とした。メッセージ抽出期間は 2013 年 3 月から 2016 年 3 月までの 2 か月毎の 1 週間のデータ (7 日 x 19 か月、計 133 日分) であり、その間の高度変更リクエスト数は 37,259 (内 85% の 31,851 が CPDLC) であった。

表 2 に対象期間での Unable リプライ率、図 4 に洋上空域全体及び NOPAC の北から 3 経路 (以下「NOPAC3」とする。) の各月の Unable リプライ率を時系列で示す。HF における Unable リプライ率が高い傾向は変わらない。全体においては緩やかな減少につづく横ばい傾向が見られる。また、一方通行化が計られており交差経路が発生しない NOPAC3 では、洋上空域全体よりも低い値を示している。高度変更リクエストメッセージの 3 分の 1 は NOPAC3 を飛行するものである。

図 5 に NOPAC3 に関する Unable リプライ率と RNP4 機の割合を重ね合わせて示す。2014 年 1 月まで RNP4 の割合が増加するのに伴い、Unable リプライ率が減少している。2014 年 3 月以降は RNP4 の割合が増加し続けているのに対し、Unable リプライ率はほぼ横ばいである。現状の RNP4 搭載率、適用管制間隔及び経路編成の環境では、高度変更リクエストのうち約 2 割は最初の応答ではリクエストが応じられていない状況である。実際の運用では、最初の応答で Unable であった場合、リクエストをキープし高度変更可能な状況になったときにリクエスト

に応じるケースも多々見受けられる。2.3 節において隣接 FIR 移管時は高い割合で、計画高度以上の高度で飛行していたことは、このような実運用の表れと思われる。

表 2 Unable リプライ率 (2013 年 3 月から 2016 年 3 月)

	CPDLC	HF	メッセージ全体
洋上空域全体	24%	37%	26%
NOPAC3	20%	31%	21%

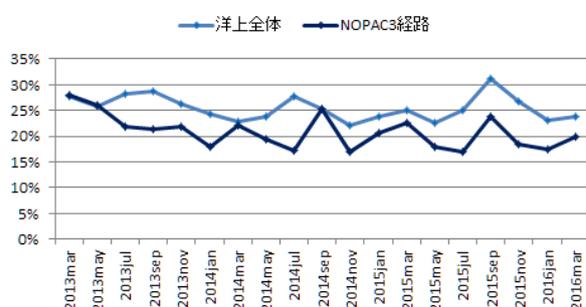


図 4 洋上空域及び NOPAC3 の Unable リプライ率

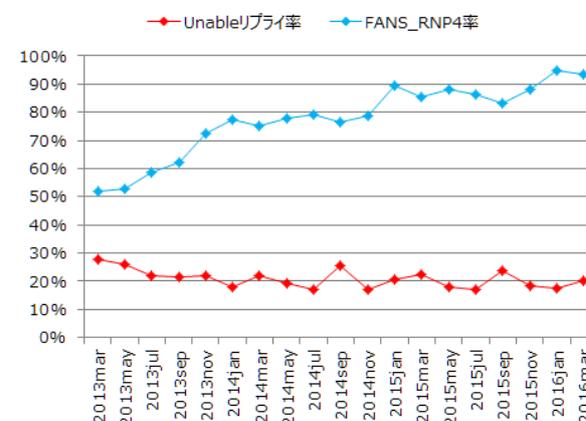


図 5 NOPAC3 における Unable リプライ率と RNP4 搭載率

### 3 Full UPR シミュレーション

将来監視能力の向上が期待できる新しい監視システムが開発、整備されれば、洋上空域におけるさらなる短縮間隔が適用できる可能性もある<sup>[8]</sup>。管制間隔が短縮されることで空域容量は増加し、運航者の経路選択枝を広げられる可能性がある。さらなる管制間隔の短縮が図られた

時、経路の自由度はどの程度まで高められるかを検討するために、NOPAC 空域で UPR 運用が可能となった場合 (Full UPR) のシミュレーションを実行した。ここでは、想定する適用間隔は、現状の最小適用値 30NM の半分の 15NM 適用とした。

### 3.1 ネットワーク

洋上管制シミュレーターを使用し、NOPAC 空域での UPR 運用を模擬した。福岡 FIR の NOPAC 空域に緯度 1 度、経度 10 度毎のネットワークを作成し、シナリオで出発地点、出発時刻及び到着地点を与えられた各飛行は、風情報を基に消費燃料最小となるよう動的計画法により最適経路を計算する<sup>[9, 10, 11]</sup>。UPR 可能空域は福岡 FIR 内のみとし、隣接するアンカレッジ洋上 FIR の経路は現状のものとした。ネットワーク図を図 6 に示す。

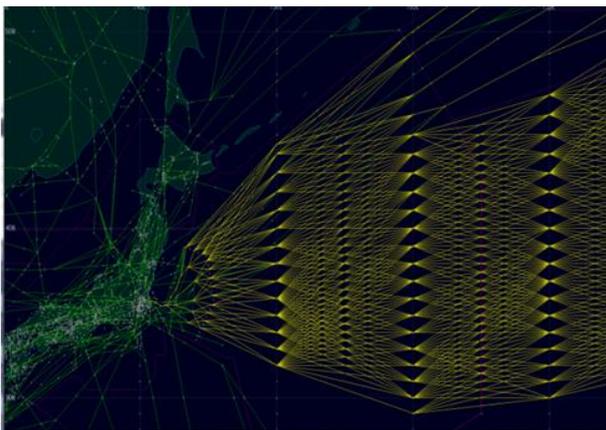


図 6 Full UPR ネットワーク図

### 3.2 シナリオ及び風データ

2015 年の比較的交通量の多い夏の日の飛行計画を基に、東南アジア、日本の各空港と北米各都市の空港を結ぶ飛行のシナリオを作成した。シナリオでは、東西交通流合わせて 24 時間 (13 時 UTC~翌 13 時 UTC) で 286 便が福岡 FIR の NOPAC 空域を飛行する。

風は、無風、夏の風 2 日、冬の風 3 日の計 6 パターンでシミュレーションを実行した。

### 3.3 パフォーマンス値比較

各フライトが最適経路を飛行したと仮定し、フライト毎にパフォーマンス値 (飛行時間、飛行距離及び消費燃料) を算出し比較した。比較

は、UPR 経路を飛行した場合から従来の経路を飛行した場合を減じることで (UPR - NOPAC)、UPR 経路の効果を示す。すなわち、マイナスの値であれば、従来経路よりも少ない飛行時間、短い飛行距離、少ない消費燃料で飛行したことを意味する。各パフォーマンス値の平均を比較した結果の統計値を表 3 に示す。UPR 経路にすることで、フライトあたり約 1~2 分程度の短縮効果があり、燃料にして 200~300 ポンド程度の便益となる。

表 3 現行 NOPAC 経路と Full UPR 運用を飛行した場合のパフォーマンス値比較

(Full UPR - 現行 NOPAC)

	飛行距離差(NM)	飛行時間差(分)	消費燃料差(ポンド)
無風	-10	-1	-252
夏 1	-6	-1	-233
夏 2	-8	-2	-385
冬 1	-16	-1	-207
冬 2	-20	-1	-263
冬 3	-6	-1	-119
西行き	-17	-2	-304
東行き	-5	-1	-178
全体	-11	-1	-243

### 3.4 コンフリクト発生数比較

経路の自由度が高まると、飛行経路が錯綜する、または集中することで、コンフリクトが発生し希望高度で飛行できる機会が少なくなる可能性がある。各試行において、東経 145 度から東経 165 度の範囲で発生するコンフリクト数をカウントした。図 7 は 30NM 間隔適用とした場合の各試行におけるコンフリクト発生数である。UPR の方が全体では約 40%コンフリクト数が増加する。交差経路におけるコンフリクトの割合が増加する結果であった。季節による差もある。冬はジェット気流が強まるため、東行きは夏よりも南側に、西行きはジェット気流をさけるよう北側に集中する傾向がある。今回のシミュレーションでは、東西流で巡航高度を分けているため、上昇・降下が伴わない限り東西流間でのコンフリクトは発生しにくい。冬の風にお

いては、UPR では西行き交通流がひとつのノード（交差点，合流点）に集中することでコンフリクトが多くなる傾向があった。この時 NOPAC では、西行き二本に分散する傾向であった。冬3 は他の冬の風と比べると NOPAC のコンフリクト数が高い。冬3 では NOPAC の北二本のうち最北一本に集中しており、コンフリクト数が高い結果となった。洋上飛行においては上層風の影響が大きく、冬の風においても、冬1、2 と冬3 ではコンフリクト数が異なっている。上層風の傾向との関連を今後さらに検討していく必要がある。

図8 は各試行において、15NM 間隔を適用した場合のコンフリクト数を図7 で示した 30NM 間隔適用時のコンフリクト数と並べて示す。30NM 間隔適用時より約 67% コンフリクト数は減少した。さらなる短縮間隔適用が可能となることで、UPR 経路であったとしても、NOPAC を飛行する 30NM 間隔適用時よりもコンフリクト数は減少する。しかし、Full UPR の方が NOPAC よりもコンフリクト数が多い傾向は、30NM 間隔適用時と同じである。

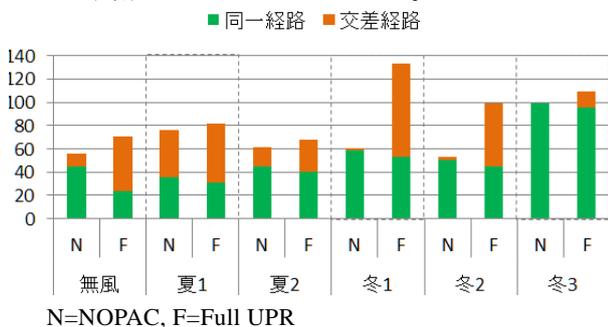


図7 30NM 間隔適用時のコンフリクト数

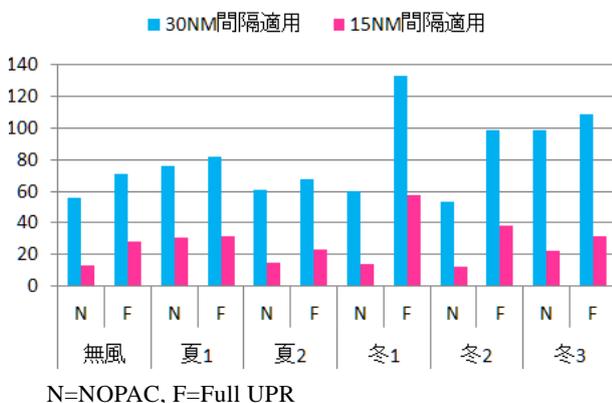


図8 15NM 間隔適用時のコンフリクト数を 30NM 間隔適用時と比較して

### 3.5 コンフリクトあたりの損失燃料の推定

シミュレーション試行において、高度を下げることによるコンフリクト回避措置を実施した。コンフリクトを回避することで、飛行高度が変わるため、飛行における消費燃料が変わる。コンフリクト回避前後で消費燃料を比較することで、コンフリクトあたりの損失燃料の推定を試みた。

コンフリクト回避措置を実施したのは、冬2 の試行である。福岡 FIR の NOPAC 空域においてコンフリクトが発生した場合、コンフリクトを回避するために福岡 FIR の NOPAC 空域において高度を 2,000ft 下げる措置を実施した。冬2 の試行においては、15NM 間隔適用時に 38 のコンフリクトが発生し、これらを回避するために 25 機において高度変更を実施した。高度変更を実施しなかった場合を比較すると、コンフリクト回避した一フライトあたり約 1,400 ポンド余分の燃料を消費した。38 のコンフリクトを回避した結果であることから、コンフリクトあたりの損失燃料は、約 926 ポンドと推定された。

## 4 まとめ

北太平洋上空域における飛行経路設計に関して、現在より短縮した管制間隔が適用できた場合も想定し、どこまで経路の自由度を高められるかと検討するために、Full UPR シミュレーションを実行した。

巡航高度及び高度変更に関する解析から、日本を出発する洋上便においては、東・東南アジア地域からの飛行等上空通過機との間隔設定のため、飛行前においては3割の航空機は計画高度よりも低い高度がアサインされているが、出発後はその割合は17%まで減少し、さらに隣接 FIR 移管時には、日本出発機の約9割の飛行は計画高度以上の高度で飛行していることがわかった。

高度変更リクエストに対する応答状況では、RNP4 搭載率の上昇とともに Unable リプライ率は減少傾向であったが、2014 年以降は、RNP4 搭載率が上昇し続けているのに対して Unable リプライ率はほぼ横ばいである。現状の RNP4 搭載率、適用管制間隔及び経路編成の環境では、高度変更リクエストのうち約2割はそのリクエストが最初の応答では応じられていない状況で

ある。実際の運用では、最初の応答で Unable であった場合、リクエストをキープし高度変更可能な状況になったときにリクエストに応じるケースも多くある。

6 パタンの風における NOPAC, 及び Full UPR の 12 試行のシミュレーションを実行した。Full UPR 運用を NOPAC 空域に取り入れた場合、現状の NOPAC 経路を飛行した場合と比較するとコンフリクト発生数が約 40% 増加した。一方で、15NM 間隔が適用できれば、30NM 間隔適用時と比較してコンフリクト発生は 12 試行全体で約 67% 減少した。さらなる短縮間隔が適用できれば、NOPAC 空域における自由度の高い経路の飛行の可能性は上がるが、Full UPR の方が NOPAC よりもコンフリクト数が多い傾向は変わらない。コンフリクトあたりの損失燃料は約 926 ポンドと推定され、コンフリクト数が増える運用は全体効率を下げる結果となる。NOPAC 空域においては、コンフリクトの発生観点からは、Full UPR 運用よりはある程度固定経路を取り入れた運用の方が効果的であることが示唆される。

## 謝辞

洋上管制運用に関する情報を提供してくださいました航空交通管理センターの皆さまに感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 加戸, 空の航路はどのように設定されるか, 日本航空協会, 1984 年
- [2] ENRI, “A Study of Parallel Routes introducing 30 NM Intervals in the NOPAC Airspace” IPACG PM15, IP15, June 2015.
- [3] ENRI, “Simulation Study for the Examination of the Operational Effect of the Reduced Separation Application between in Ocean Control Airspace” IPACG PM19, IPX, April 2017.
- [4] 木下, 平田, 我が国からの国際線出発機と上空通過機のコンフリクト分析, 第 52 回飛行機シンポジウム, 2E04 (JSASS-201405141), 2014 年 10 月
- [5] 平林, 福島, 岡, 伊藤, 洋上管制の傾向分析及び PBN 導入効果に関する考察, 第 13 回電子航法研究所研究発表会, 2013 年 6 月
- [6] 平林, 福島, 太平洋上航空管制における高度変更リクエストに関する分析, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013 年 9 月
- [7] 平林, 福島, 岡田, 太平洋上における航空機間隔維持のための管制の傾向分析, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014 年 9 月
- [8] Aireon, “Space Based ADS-B”, ICAO SAT meeting, June 2016.
- [9] 福田, 福島, 住谷, 瀬之口, 洋上経路の管制間隔短縮の効果, 第 5 回電子航法研究所研究発表会, 2005 年 6 月
- [10] M.R. Jardin, “Real-Time conflict-Free Trajectory Optimization”, 5th USA/Europe ATM 2003 R & D Seminar, Budapest, Hungary, Jun. 2003.
- [11] 萩原, 庄司, 航空機の経路最適化に関する研究 - III. - フレキシブルルートの経済性評価 -, 日本航海学会論文集 第 95 号, pp.97-108, 1996 年 9 月