

21. 洋上経路の管制間隔短縮の効果

管制システム部 ※福田 豊 福島 幸子 住谷 美登里 瀬之口 敦

1. はじめに

中部太平洋空域では、航空機の効率的な運航確保の観点から、気象条件を考慮し、「日」単位に経路を設定する PACOTS (Pacific Organized Track System : 太平洋編成経路システム) が運用されている¹⁾。

洋上空域では航空機相互間に確保すべき最低間隔(管制間隔)の短縮が進められており、1998年に横間隔が100 NM(海里: 1 NM = 1,852 m)から50 NMに短縮された。そして、2000年には垂直間隔が2,000 ft(1 ft = 0.305 m)から1,000 ftに短縮された。現在、同経路、同高度を飛行する先行機と後続機の縦間隔は時間で15分となっている。今後は、ADS(Automatic Dependent Surveillance : 自動位置情報伝送・監視機能)やCPDLC(Controllor Pilot Data Link Communications : 管制官パイロット間データリンク通信)の本運用に際して、更なる管制間隔の短縮が期待されている。

ICAO(International Civil Aviation Organization : 国際民間航空機関)では、航空機運航者がスケジュール通りの出発・到着時刻で、希望する通りの飛行経路を、最少の制約で、規定された安全レベルを満足しつつ運航できるようにシームレスな全世界規模の航空交通管理システムの構築を目指している。つまり、航空機は出発地から目的地まで飛行時間や燃料消費量等の観点での最適な飛行プロファイルで飛行することが望ましい。ここで、飛行プロファイルは、経路と高度による航空機の飛行軌道を示す。

航空機が希望する飛行プロファイルが競合し、航空機間に管制間隔が確保できない場合では、航空管制官が航空機の高度等の変更を指示し、管制間隔を確保する。航空機が高度変更した場合は、最適な飛行プロファイルに比較して燃料消費量が増加する。管制間隔を短縮することにより、管制間隔を確保するための最適な飛行プロファイルからの変更量が小さくなり、より効率的な運航が期待できる。

これまでに、洋上空域の管制間隔の短縮に関する

安全性については報告されているが²⁾、経済性については検討されていない。本報告では、東行PACOTSを対象として縦間隔と横間隔の管制間隔を短縮した場合について、飛行時間短縮量と消費燃料節約量の推定し、その効果を示す。

2. PACOTSの特徴

東行PACOTSは、通常、東京から北米西海岸へ3本、東京からハワイへ2本、香港・台北から北米西海岸へ2本の経路が設定される。航空交通管理センターが気象予報に基づき、OTG(Oceanic Track Generator : 洋上経路発生システム)を使用して経路を選定し、NOTAM(Notice to Airmen)で公示する。表1に東行PACOTSの代表的な経路と対応する都市対を示す。また、図1に経路例として、2002年11月21日の東行PACOTSを示す。

表1 経路名と都市対

経路名	都市対
トラック1 (TRK1)	東京からシアトル
トラック2 (TRK2)	東京からサンフランシスコ
トラック3 (TRK3)	東京からロサンゼルス
トラック11, 12 (TRK11,12)	東京からホノルル
トラック14 (TRK14)	香港・台北からサンフランシスコ
トラック15 (TRK15)	香港・台北からロサンゼルス

各経路は日本側のゲートから北米西海岸とハワイのゲートまでの地点を経度10度毎に緯度1度単位で指定する。洋上空域はRNP10(Required Navigation Performance : 航法性能要件)が適用され、経路間には50NMの横間隔が確保される。TRK3、TRK14、TRK15は経路の一区間を共有することがあるが、それ以外の経路は、通常はゲートを含めて経路区間を共有しない。

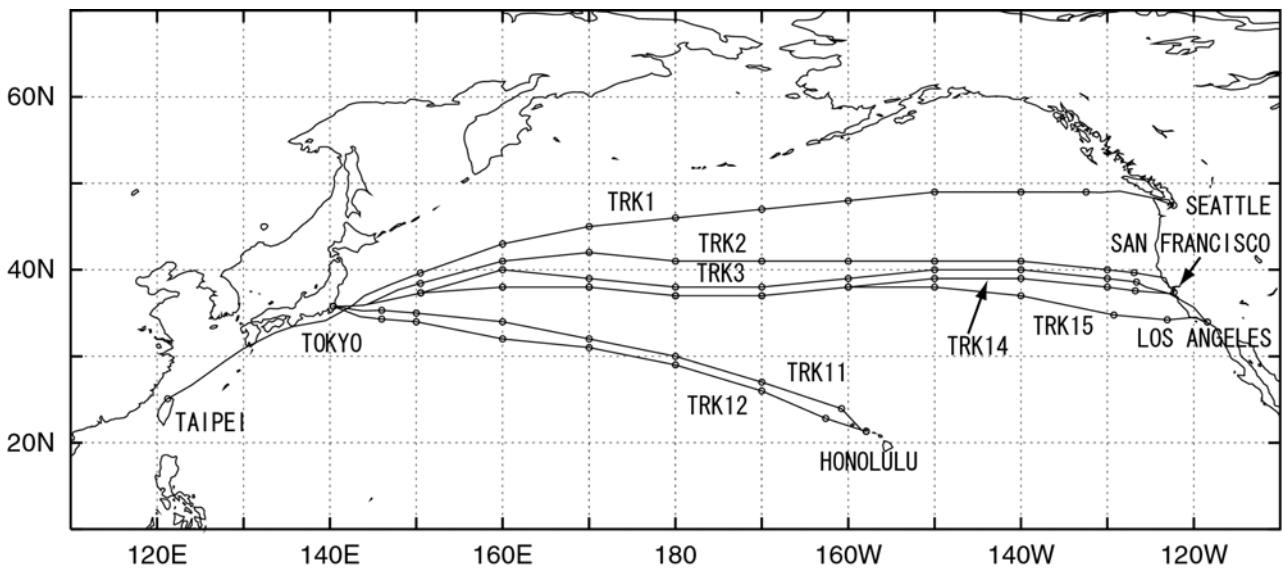


図1 東行 PACOTS の経路例 (2002年11月21日)

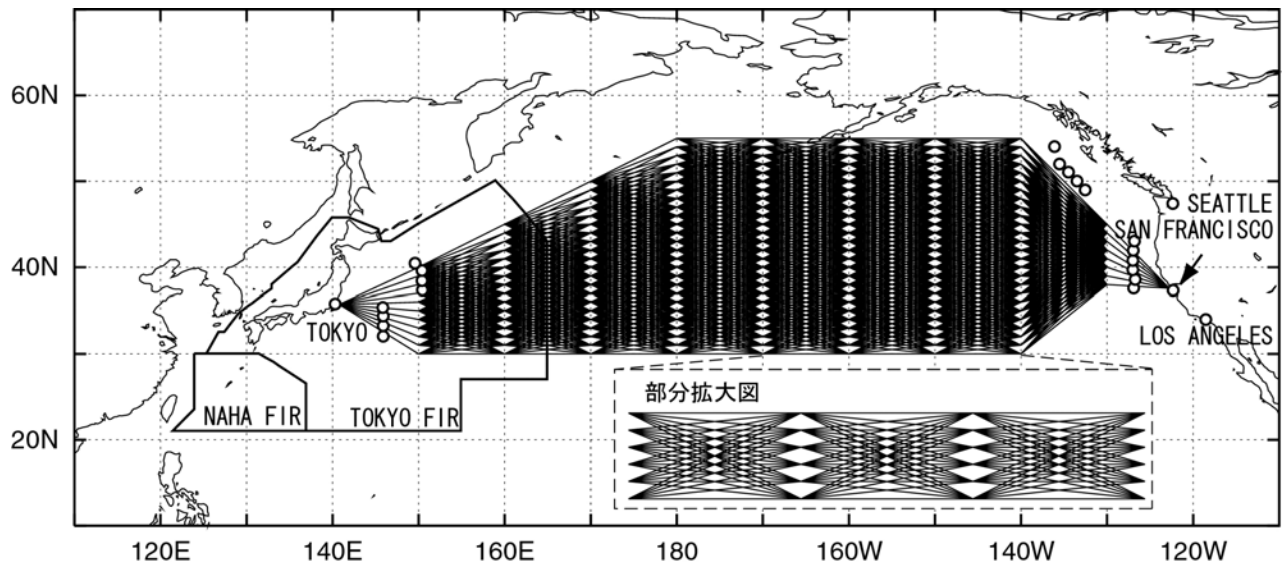


図2 シミュレーションに使用した経路ネットワーク例 (TRK2用)

3. 横間隔短縮の効果の推定

3.1 シミュレーション条件

出発地と目的地間の最適な経路を算出するために、経路ネットワークを作成し、前進型ダイナミックプログラミングにより探索する^{[3]-[6]}。経路ネットワークは PACOTS の運用で使用されている経路ネットワークを参考にして、単純な格子点にモデル化する。図2に TRK2 用の経路ネットワーク例を示す。他の経路用の経路ネットワークもゲートの位置の違いを除いて、ほぼ同様とする。表2に各経路の南北の範囲、表3にゲート地点を示す。経路の各地点の緯度接続範囲は±5度とする。

横間隔を 30NM に短縮した PACOTS を効率的に設定するためには、経路を構成する地点の緯度の単位を細かくする必要がある。ここでは、経路ネットワークの格子点の緯度の間隔を 1 度単位と 1/6 度単位を使用し、両者を比較する。

作成する経路は東京からシアトル (TRK1)、サンフランシスコ (TRK2)、ロサンゼルス (TRK3) へ各 1 本、東京からホノルル (TRK11、TRK12) へ 2 本の合計 5 本とする。

気象データは気象庁の全球客観解析データを使用する。全球客観解析データは地球上の格子点の風向、風速、気温等のデータであり、数値予報の初期値として使用される。格子点は、緯度 1.25

表2 経路作成空域の南北の範囲

東京から北米	北緯 30 度～55 度
東京からハワイ	北緯 20 度～55 度

表3 ゲートの位置

都市名	経度	緯度
東京	東経 150 度	北緯 30 度～40 度
シアトル	西経 130 度	北緯 49 度～51 度
サンフランシスコ	西経 130 度	北緯 38 度～45 度
ロサンゼルス	西経 130 度	北緯 38 度～45 度
ホノルル	西経 160 度	北緯 21 度～24 度

度、経度 1.25 度間隔である。航空機が飛行する高度帯の気圧レベルは 300 hPa、250 hPa、200 hPa である。これらは、高度にしてそれぞれ FL300 (1FL(Flight Level) = 100 ft)、FL340、FL390 に相当する。全球客観解析データの時間間隔は 6 時間であり、フライトの時間進行に伴い、データを切替えて使用する。

経路作成の対象期間は、2002 年 5 月 20 日～28 日、8 月 20 日～28 日、11 月 20 日～28 日、2003 年 2 月 20 日～28 日の合計 36 日間とする。

3.2 最適経路の算出

最適経路の探索では、出発地から目的地までの燃料消費量が最小となる経路を算出する。経路ネットワークの各点に出発地からその点までの燃料消費量の最小値とその経路を求め、飛行時間と共に記憶させる。これを出発地から目的地まで繰り返すと、目的地の記憶値が経路全体の燃料消費量と飛行時間になる。経路ネットワークの各線分の飛行では、航空機の性能をモデル化した飛行性能データを使用して、飛行時間、燃料消費量を算出する。この時、高層風の影響を考慮して対地速度を求める。表 4 に標準フライトの条件を示す。

計算時間を短縮するために、初めに航空機の高度を東経 160 度まで FL330、東経 160 度から西経 170 度まで FL350、西経 170 度より東側は FL370 として、最適経路を探索する。次に、最適経路上を FL290 から巡航可能な最高高度まで、最適な高度を探索し、最適な飛行プロファイルを算出する。

表4 標準フライトの条件

項目	条件
航空機型式	B747-400
巡航方式	高速巡航方式 (Mach 一定)
巡航速度	Mach 0.85
離陸重量	735,000 lbs
離陸時刻	0900 UTC
飛行最低高度	FL290 (29,000ft)
高度間隔	1,000 ft

3.3 間隔付経路の算出

上記の最適経路の算出方法を基本として、東京から異なる目的地までの 5 本の間隔付経路を算出する。横間隔を確保する区間は日本側ゲートから米国側ゲートまでとして、複数の経路が同じゲートを共有しないこととする。

5 本の経路の作成順位を変化させて最適な間隔付経路を算出する。例えば、作成順位を TRK1、TRK2、TRK3、TRK11、TRK12 とした場合は、初めに TRK1 を算出する。次に TRK1 との間隔が確保された TRK2 を算出する。さらに、TRK1 と TRK2 との間隔が確保された TRK3 を算出する。その後、TRK11 と TRK12 を同様に算出する。この作成順位のパターンを TRK1 優先 (TRK1→TRK2→TRK3→TRK11→TRK12)、TRK2 優先 (TRK2→TRK1→TRK3→TRK11→TRK12)、TRK3 優先 (TRK3→TRK2→TRK1→TRK11→TRK12) の 3 種類として、各経路と飛行プロファイルを算出する。これらのパターンの中で、3 本の経路の燃料消費量の平均値が最小となるパターンを選択する。ここで、算出済の経路に対して横間隔を確保する経路の作成では、算出済の経路から横間隔が確保されない地点と線分を削除した経路ネットワークを使用する。

3.4 シミュレーション結果

図 3 に横間隔短縮時の飛行時間を示す。飛行時間は 5 本の経路の標準フライトの全期間の平均値とする。横間隔は、50NM、30NM、間隔なしとする。間隔なしは、横間隔を確保しない最適経路の場合である。また、経路上の地点の緯度は 1 度単位と 1/6 度単位を比較する。

横間隔 50NM 緯度 1 度単位を基準とした飛行

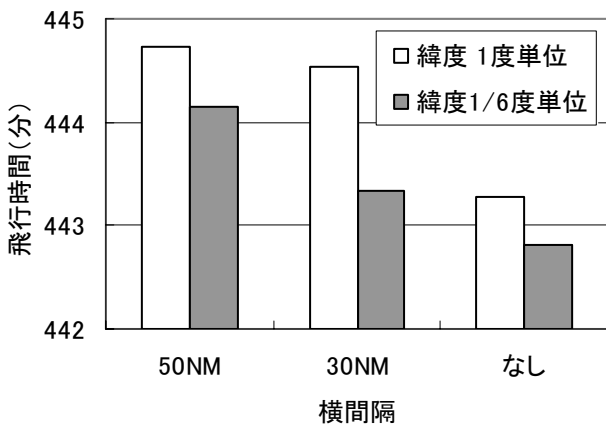


図3 横間隔短縮時の飛行時間

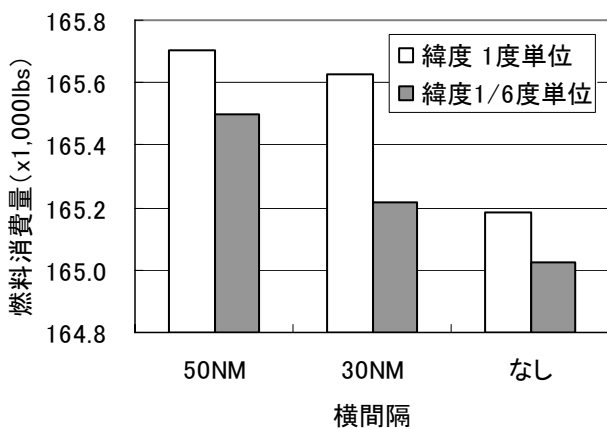


図4 横間隔短縮時の燃料消費量

時間短縮量は、横間隔 30NM 緯度 1 度単位が 0.2 分、横間隔 30NM 緯度 1/6 度単位が 1.4 分となる。横間隔 30NM を効率的に運用するためには、緯度 1/6 度単位が有効である。また、緯度 1 度単位から 1/6 度単位にすることにより、横間隔 50NM の場合でも 0.6 分の飛行時間が短縮できる。

図4に横間隔短縮時の燃料消費量を示す。管制間隔は飛行時間の図と同様である。横間隔 50NM 緯度 1 度単位を基準とした燃料節約量は、横間隔 30NM 緯度 1 度単位が 74 lbs (1 lbs = 0.454 kg)、横間隔 30NM 緯度 1/6 度単位が 490 lbs となる。また、緯度 1 度単位から 1/6 度単位にすることにより、横間隔 50NM の場合でも 210 lbs の燃料節約量となる。

図5に緯度 1/6 度単位における横間隔短縮時の飛行時間短縮量の季節分布を示す。横間隔 50NM 緯度 1 度単位を基準値とする。飛行時間短縮量は、横間隔 50NM が最大値で 1.5 分、横間隔 30NM が最大値で 2.5 分となる。

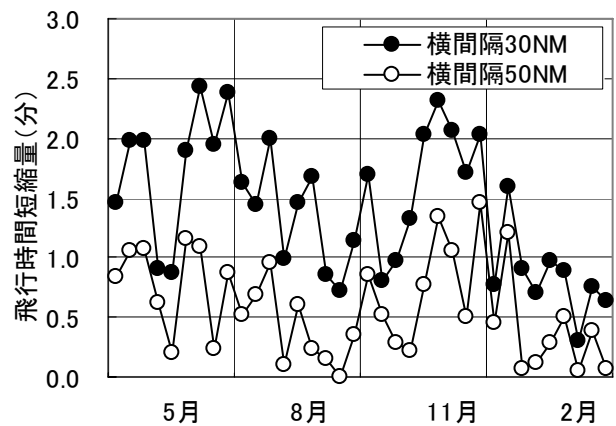


図5 飛行時間短縮量の季節分布

表5 経路毎の航空機数

経路名	航空機数
TRK1	15 機
TRK2	29 機
TRK3	29 機
TRK11	12 機
TRK12	3 機
合計	89 機

4. 縦間隔短縮の効果の推定

4.1 シミュレーション条件

横間隔短縮の効果の推定では各経路 1 機の合計 5 機の標準フライトを比較した。縦間隔短縮の効果の推定では、1 日分の全フライトについて、最適飛行プロファイルを算出し、管制間隔を確保するための高度変更による消費燃料の増加分を集計する。シミュレーションシナリオは 2002 年 5 月 21 日の運航データに基づいて作成した。表 5 に各経路の航空機数を示す。各航空機は離陸時刻の違いを除き、標準フライトと同様の条件にする。

コンフリクトを検出する領域は日本側ゲートから米国側ゲートまでとする。ここで、コンフリクトは複数の航空機が管制間隔を満足しない状態とする。管制間隔は縦間隔 15 分横間隔 50NM、縦間隔 50NM 横間隔 50NM、縦間隔 30NM 横間隔 30NM とする。経路の緯度は全て 1/6 度単位とする。コンフリクトの航空機に対して、どちらかの航空機の高度を変更し、コンフリクトを解決する。高度変更は管制間隔を確保するために必要

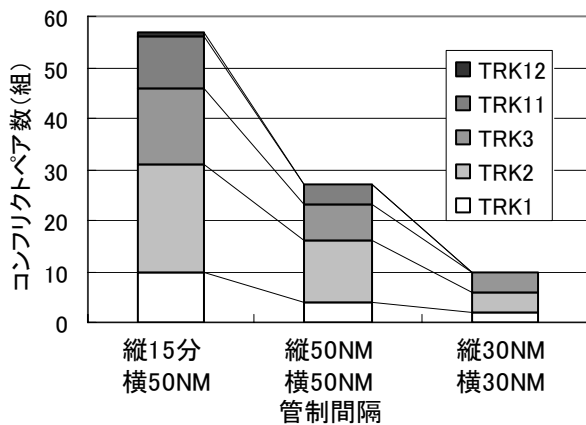


図6 最適飛行プロファイルでのコンフリクトペア数

な区間で経度 10 度単位毎に巡航高度を 1,000 ft 単位で低下する。

4.2 シミュレーション結果

図6に最適飛行プロファイルでのコンフリクトペア数を管制間隔区分毎に示す。コンフリクトペア数は縦間隔 15 分横間隔 50NM を基準として、縦間隔 50NM 横間隔 50NM は 47%、縦間隔 30NM 横間隔 30NM は 18%に減少する。

図7に管制間隔を確保するために最適飛行プロファイルから高度変更した機数を示す。全航空機の中で最適な飛行プロファイルで飛行できる航空機の割合は、縦間隔 15 分横間隔 50NM が 40%、縦間隔 50NM 横間隔 50NM が 25%、縦間隔 30NM 横間隔 30NM が 11%である。

航空機が最適飛行プロファイルから高度変更した場合は、最適な巡航高度ではなくなるため、燃料消費量が増加する。ここでは各航空機の燃料消費量を積算し、基準値からの燃料節約量を求めた。図8に管制間隔短縮時の燃料節約量の1日分の89機の合計値を示す。縦間隔 15 分横間隔 50NM の燃料消費量の合計値を基準とする。燃料節約量は、縦間隔 50NM 横間隔 50NM が 39,000 lbs、縦間隔 30NM 横間隔 30NM が 80,000 lbs である。1機当りの平均値では、それぞれ、440 lbs、900 lbs となる。

縦間隔なし横間隔 50NM は、航空機が横間隔 50NM の経路上を最適な高度で飛行した場合であり、縦間隔なし横間隔 30NM は、航空機が横間隔 30NM の経路上を最適な高度で飛行した場

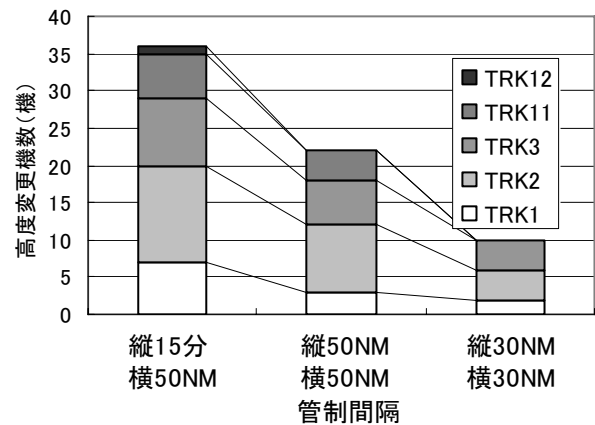


図7 最適飛行プロファイルから高度変更した機数

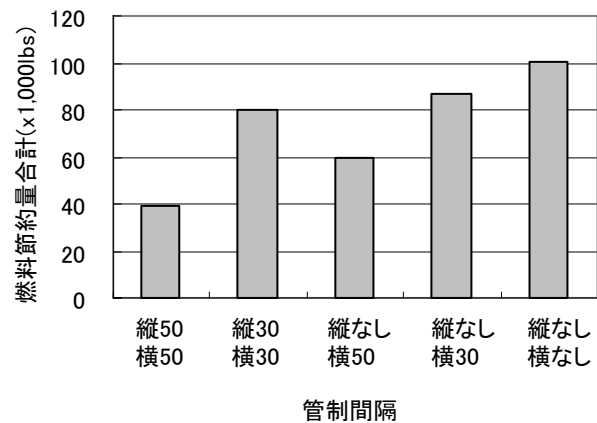


図8 縦横間隔短縮時の燃料節約量の合計値

合である。これらとそれぞれの縦間隔を確保した結果の比較により、高度変更による燃料増加量は、縦間隔 15 分が 59,000 lbs、縦間隔 50NM が 20,000 lbs、縦間隔 30NM が 7,400 lbs となる。縦間隔を小さくすることにより、高度変更による燃料増加量を低減できる。

縦間隔なし横間隔なしは、全航空機が最適な経路と高度を飛行した場合である。これは、各航空機の出発時刻に合わせて航空機毎に最適な経路を算出し、さらに管制間隔を限りなく小さくした場合に相当する。この値 100,000 lbs が燃料節約量の最大値と推定できる。

現実の環境では、管制間隔を確保するために高度変更の他に出発待機や経路変更も使用する。出発待機は、出発空港で地上待機し時間調整することにより、経路上の縦間隔を確保する方法である。出発待機により、最適な高度で飛行でき、高度変更と比較して、燃料増加量を低減できる。出発待

機を利用する場合は、燃料節約量の基準値とした縦間隔 15 分横間隔 50 NM を含め、燃料消費量の合計値が小さくなる。そのため、管制間隔を短縮した場合の燃料節約量は小さくなると考えられる。

今回のシミュレーションでは航空機間の垂直間隔を 1,000 ft とし、全高度を東行の航空機が使用できるとした。しかし、東行と西行が混在する場合では、東行の航空機の高度変更の単位は 2,000 ft 間隔となる。この場合は、高度変更量が大きくなり、全体的な燃料増加量が大きくなる。特に高度変更の機数が多い縦間隔 15 分横間隔 50 NM の燃料消費量の合計値が大きくなり、管制間隔を短縮した場合の燃料節約量は大きくなると考えられる。

米国エネルギー省によるジェット燃料のニューヨーク・ハーバーの平成 17 年 2 月の平均価格は 1 ガロン (= 3.8 l) 当り 1.38 ドルである^[7]。この価格を参考にして、燃料価格を 1 lbs 当り 20 円とすると、縦間隔 30NM 横間隔 30NM の燃料節約量 80,000 lbs は約 1,600,000 円に相当する。

5. まとめ

東行 PACOTS を対象として洋上空域の管制間隔を短縮した場合の効果を計算機シミュレーションにより推定した。

経路の横間隔を短縮した場合について、5 本の経路に標準フライトを設定し、飛行時間の短縮量と消費燃料節約量を求めた。また、経路上の地点の緯度は 1 度単位と 1/6 度単位を比較した。現在の横間隔 50NM 緯度 1 度単位を基準として、横間隔 30NM 緯度 1 度単位は飛行時間短縮量が 0.2 分、燃料節約量が 74 lbs、横間隔 30NM 緯度 1/6 度単位はそれぞれ 1.4 分、490 lbs となった。横間隔 30NM を効率的に運用するためには、緯度 1/6 度単位が有効である。

経路の地点を緯度 1/6 度単位に向上した場合は、現状と同様の横間隔 50NM においても、飛行時間短縮量が 0.6 分、燃料節約量が 210 lbs となった。

横間隔の短縮に加えて縦間隔を短縮した場合について、1 日分のフライト 89 機の燃料節約量の合計値を推定した。縦間隔 15 分横間隔 50NM を基準として、縦間隔 50NM 横間隔 50NM が

39,000 lbs、縦間隔 30NM 横間隔 30NM が 80,000 lbs となった。1 機当りの平均値にするとそれぞれ、440 lbs、900 lbs となる。

今後、洋上空域の交通量は増加が予測されている。今回の推定では、現状の交通量を想定したが、増加した交通量においては、管制間隔の短縮がより有効であると考えられる。増加した交通量における効果の推定が今後の課題である。

謝辞

PACOTS の選定方法、OTG の機能についての情報を頂き、洋上空域の運用手法についてご討論を頂きました航空交通流管理センターの関係各位に感謝致します。また、シミュレーションデータの収集にご協力を頂きました東京航空交通管制部の各位に感謝致します。

参考文献

- [1] 国土交通省航空局：“航空路誌”、平成 17 年 3 月改訂
- [2] 長岡、天井、住谷：“洋上空域における ADS 使用時の縦方向衝突危険度”、信学技報 SANE2002-51、平成 14 年 10 月
- [3] 福田、福島：“洋上空域の航空機の最適経路の傾向”、第 3 回電子航法研究所研究発表会講演概要、平成 15 年 6 月
- [4] 福田：“洋上空域の効率的な運用手法—最適経路と経路および高度変更の経済性の検討—”、第 41 回飛行機シンポジウム講演集、平成 15 年 10 月
- [5] 福田：“洋上可変経路の時間帯毎の再設定の効果”、信学技報 SANE2004-39、平成 16 年 7 月
- [6] 福田：“空域の制約と洋上経路の効率性の関係”、第 42 回飛行機シンポジウム講演集、平成 16 年 10 月
- [7] 米国エネルギー省のジェット燃料の平均価格：www.eia.doe.gov/oil_gas/petroleum/info_glance/jetfuel.html