

21. 気象変化に対応する洋上経路の再設定手法

管制システム部 福田 豊 福島 幸子 瀬之口 敦

1. はじめに

現在，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) が運用されている^[1]。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。

東行 PACOTS の経路設定には，PACOTS が運用される時間帯の約 24 時間前の気象予報を使用している。気象予報は 12 時間毎に配信されており，最新の気象予報に基づいて経路を動的に設定することにより，航空機の効率的な運航が期待できる。

電子航法研究所では，最新の気象予報に基づいて経路設定を動的に実現する動的経路計画システムを検討している。これまでに，PACOTS の設定に使用されている洋上可変経路発生システム (OTG: Oceanic Track Generator) と同等の機能を持ち，動的経路計画システムに必要な機能を模擬するシミュレータを開発し，航空機の最適経路の特徴を検討してきた^{[2]-[3]}。これより PACOTS のような気象条件を考慮した可変経路は大圏経路より約 2% の消費燃料が低減できること，気象条件の時間変動や機体重量等の

フライト条件により最適経路が変化することを確認した。

本報告では，最新の気象予報に基づいて，日本から北米西海岸への洋上経路を再設定した場合の特徴を示す。

2. PACOTS の特徴

2.1 経路設定

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

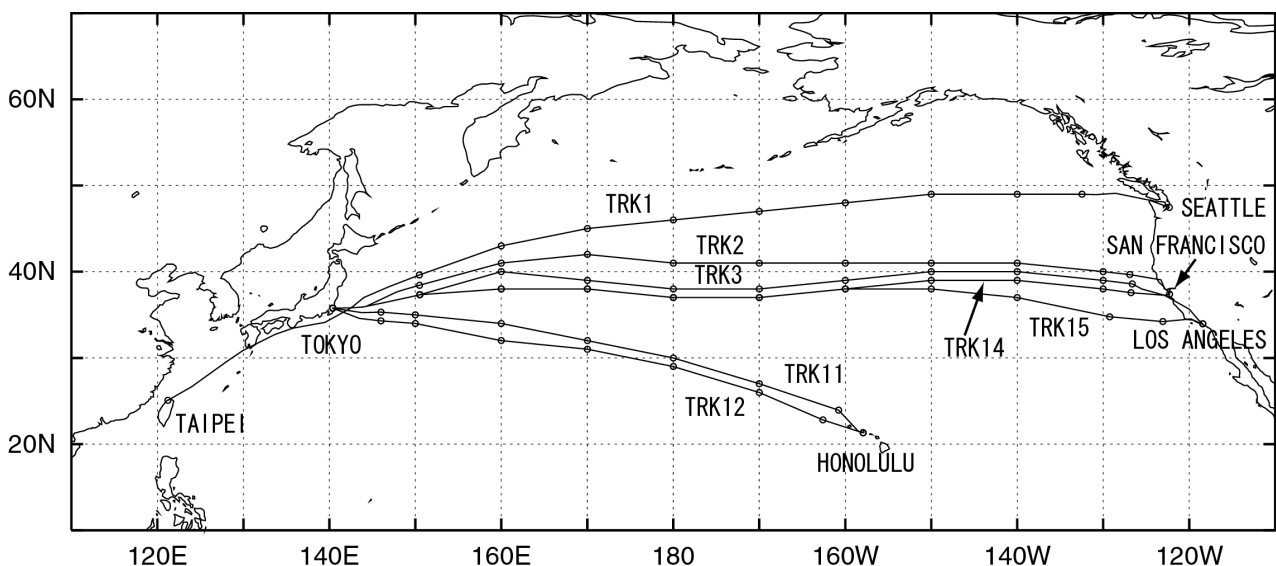


図 1 東行 PACOTS の経路例

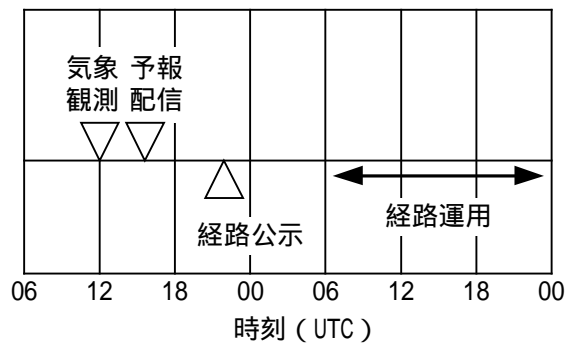


図2 経路の運用時間帯と気象予報時刻

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を経度 10 度毎の地点で指定する。洋上空域は RNP10 (Required Navigation Performance) 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することはない。

2.2 経路の運用時間と気象予報時刻

長距離の国際線のフライトは、出発地と目的地の時差を考慮した乗客の利便性の良い時間帯に設定される。PACOTS の運用時間帯はフライト数が多い時間帯に合わせて設定される。東行 PACOTS の運用時間帯は、協定世界時 (UTC: Coordinated Universal Time) の 7 時から 23 時までである。

東行 PACOTS は航空交通流管理センターが選定する。気象予報はワシントン世界空域予報センター (WAFC: World Area Forecast Center) と気象庁から配信される。図 2 に PACOTS の運用時間帯と気象予報の時刻を示す。運用日の前日の 12 時の気象観測に基づく予報が 16 時頃に配信され、前日の 22 時までには経路が公示される。

3. 経路再設定のシミュレーション方法

気象予報は 12 時間毎に更新される。そこで、前日 12 時の気象予報に基づいて設定された東行 PACOTS を当日 0 時の気象予報を考慮して再設定した場合の消費燃料の低減量を求める。対象とする経路は東京からシアトル、サンフランシスコ、ロサンゼルスへの 3 本とする。

3.1 気象データ

気象データは緯度 1.25 度、経度 1.25 度間隔の格子点の風向、風速、気温等のデータである。航空機が飛行する高度帯の気圧レベルは 300hPa (FL(Flight Level)300), 250hPa (FL340), 200hPa (FL390) である。気象の予報値は前日 12 時と当日 0 時の気象予報、気象の真値は全球客観解析データを使用する。全球客観解析データは予報値を観測値で較正したデータであり、数値予報の初期値として使用される。予報値と全球客観解析データは共に 6 時間間隔のデータである。これらは全て気象庁発行のデータを使用する。

経路作成の対象期間は、2002 年 5 月 21 日 ~ 28 日、8 月 21 日 ~ 28 日、11 月 21 日 ~ 28 日、2003 年 2 月 21 日 ~ 28 日の合計 32 日間とする。

3.2 最適経路の算出

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]。経路ネットワークは PACOTS の運用で使用されていたデータとする。図 3 に TRK2 用の経路ネットワークを示す。他の経路用の経路ネットワークもほぼ同様である。表 2 に各経路のゲート地点を北側から順に示す。また、図 3 にそれらの位置を白丸で示す。

表 2 日本側と北米側のゲート地点

日本側ゲート	ADGOR, CALMA, ETRON, RIPKI, SEALS, MORAY
北米側ゲート	TRK1 KATCH, MANJO, NUDGE, ORNAI, PRETY
	TRK2 FULMR, SMURA, KLARK, MRITA, TREVR,
	TRK3 SMURA, KLARK, MRITA, TREVR

最適経路の探索では、出発地から目的地までの消費燃料が最小となる経路を求める。出発地から東へ向かい等経度上の点までの消費燃料の最小値とその経路を求め、各点に記憶する。この処理を目的地まで繰り返し、出発地から目的地までの最小消費燃料とその経路を求める。経路ネットワークの各線分の飛行では、航空機の

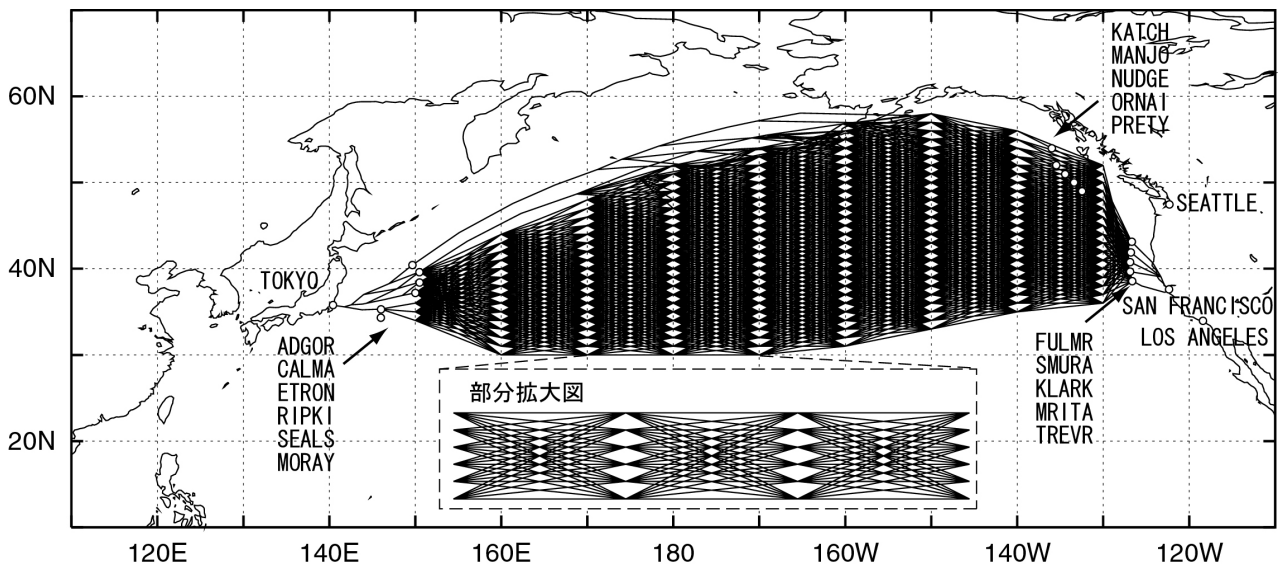


図3 経路ネットワークの例とゲート地点

特性をモデル化した飛行特性データを使用して、飛行時間、消費燃料を算出する。この時、高層風の影響を考慮して対地速度を求める。表3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、フライトプロファイルを算出する。

表3 標準フライト条件

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
高度間隔	2,000 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3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北米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。

3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。最後に、TRK1とTRK2との間隔が確保されたTRK3を算出する。この作成順位のパターンをTRK1 TRK2 TRK3, TRK2 TRK1 TRK3, TRK3 TRK2 TRK1の3種類として、各経路とフライトプロファイルを算出する。これらのパターンの中で、3本の経路の消費燃料の平均値が最小となるパターンを選択する。ここで、基準経路に対して横間隔を確保する経路の作成では、基準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。

4. シミュレーション結果

前日12時の気象予報を旧予報、それに基づいて算出した経路を旧経路、当日0時の気象予報を新予報、それに基づく経路を新経路、全球客観解析データを実気象、それに基づく経路を理想経路とする。

実際の運用時には実気象は得られない。そこで、新予報の条件下で新経路と旧経路を比較し、経路を再設定する。再設定した新経路について、実気象の条件下での旧経路との消費燃料の差を求める。

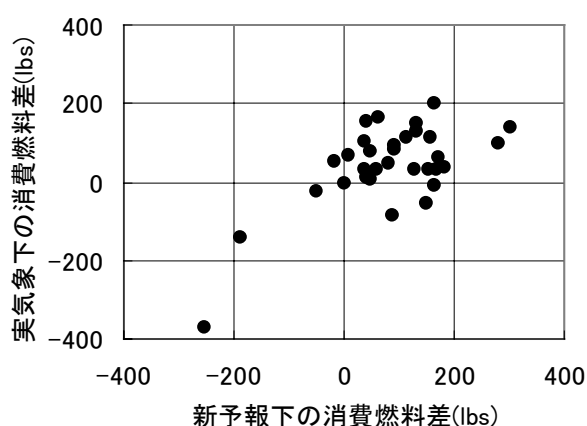


図 4 新経路と旧経路の消費燃料の差

図 4 に新予報の条件下での新経路と旧経路の消費燃料の差と実気象の条件下での新経路と旧経路の消費燃料の差の関係を示す。1 点が 1 日を示し、消費燃料の差は 3 本の経路の平均値を示す。

新予報の条件下で新経路と旧経路の消費燃料の差が正となる日数の割合は 84% である。これが負となる場合は、旧経路が新経路より消費燃料を低減できることを示し、算出順位による間隔付経路の最適化手法に改善点があることを示す。

実気象の条件下で旧経路の消費燃料の平均値は 184,395 lbs、理想経路は 184,294 lbs、その差は 101 lbs である。新経路の消費燃料は 184,351 lbs、理想経路との差は 57 lbs である。

新予報の条件下で新経路と旧経路の差が正となる場合に、経路を再設定する。この場合、実気象の条件下で新経路が旧経路より消費燃料が低減できる日数の割合は 89% である。再設定した新経路と旧経路の消費燃料の差の平均値は 70 lbs である。また、経路 1 本毎の新経路と旧経路の消費燃料の差の最大値は 1,297 lbs、最小値は -1,372 lbs である。この値が図 4 の分布より大きいのは、3 本の経路の偏差が大きい場合があるためである。

実気象の条件下で、再設定した新経路と旧経路の飛行時間の差の平均値は 0.284 分である。また、経路 1 本毎の新経路と旧経路の飛行時間の差の最大値は 4 分、最小値は -5 分である。出発地から目的地までの消費燃料と飛行時間には約 300 lbs/分の比例関係があり、新経路と旧経路の差もほぼこの関係となっている。

新経路と旧経路で変更される地点数の平均値は、経路の構成点 9 地点中 3 地点である。ゲートが変更される日数は 4 日間、各日当り 1 経路である。

この結果から、新予報は旧予報より実気象に近く、経路の再設定により、消費燃料が低減できることがわかる。但し、経路の再設定による消費燃料の低減量は、全消費燃料と比較すると小さい。これは、気象予報の更新による偏西風の予報位置の変化は、偏西風の幅（数 100 km）に比較して小さく、旧経路も偏西風帯の中に含まれるためと考えられる。

5. まとめ

前日 12 時と当日 0 時の気象予報に基づいて設定した経路の消費燃料等を比較した。新予報は旧予報より実気象に近く、新予報に基づく経路の再設定により、航空機の消費燃料を低減できる。但し、経路の再設定による消費燃料の低減量の平均値は 70 lbs であり、全消費燃料と比較すると、割合は小さい。これは、偏西風の予報位置の変化が偏西風の幅に比較して小さいためと考えられる。

今後は、出発時刻が異なるフライトに対応して、時間帯により経路を再設定した場合の消費燃料の変化、航空機間に管制間隔を確保しながら経路変更を実施する方法等について検討する予定である。

謝辞

シミュレーションデータの収集にご協力を頂きました国土交通省航空局管制保安部、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 16 年 3 月改訂
- [2] 福田他：“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
- [3] 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