

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] . PACOTS の経路の数は，運航者の要望，天候，制限空域その他の要件により増減するが，最大数は，日本 - 北米間が東行 5 本，西行 6 本，日本 - ハワイ間は 2 本ずつ，東南アジア - 北米間は東行 2 本，西行 5 本である . 洋上空域の非固定経路では FL290 (Flight Level) (29,000ft) 以上の定められた高度を使用する . 我が国の航空交通流管理センターが東行経路，米国のオークランド管制センターが西行経路を作成している .

東行 PACOTS の経路設定には，ワシントン世界空域予報中枢 (World Area Forecast Center: WAFC) と東京地域空域予報中枢 (Regional Area Forecast Center: RAFC) からの気象予報を使用している . これは PACOTS が運用される時間帯の約 24 時間前の観測値に基づく気象予報である . 航空機の安全で効率的な運航を目指すため，より最新の観測値に基づく気象予報を使用し，経路設定を動的に実現する「動的経路計画システム」が検討されている .

航空機の経路最適化については，秋から初冬の気象データによる特定の都市間のシミュレーションが実施されている^{[2]-[3]} . 気象条件には季節変動がある . また，太平洋上空には，出発地，目的地，重量，出発時刻等の条件が異なる複数の航空機が飛行している . 動的な経路設定方式の検討のためには，このような条件下での最適経路の傾向の調査が重要である .

本研究では，出発地と目的地間の最小時間経路 (Minimum Time Track: MTT) ，最小燃料経路 (Minimum Fuel Track: MFT) 等の最適経路を算出するシミュレータを開発した . 日本と北米，ハワイ間を結ぶ航空機の最適経路のシミュレーションを実施し，最適経路の飛行時間，消費燃料等について，航空機の飛行条件および時間的な変化を調査した .

2. 最適経路の算出

最適経路を算出するために，前進型ダイナミックプログラミングにより最適化する . これは，航空交通流管理センターで PACOTS 経路の設定に使用している洋上可変経路発生システムと基本的に同じ方法である . ここでは，最適経路および最適な飛行プロファイルの算出方法を示す . ここで，飛行プロファイルは，通過点毎の高度を示す .

2.1 経路ネットワーク

初めに，出発地と目的地間に経路ネットワークを作成する . シミュレーションでは，緯経度が一定間隔毎の格子点で経路ネットワークを構成した . 経路ネットワーク上の点には，飛行できる高度を定義する . 航空機は経路ネットワーク上の点を通して出発地から目的地まで飛行する .

図 1 に経路ネットワークの例を示す . 出発地から第 1 番目の等経度面上の点 $P(1,i)$ ($i=1,2,\dots,n$; n は等経度面上の点数) まで航空機を飛行させ，その間の飛行時間と消費燃料の時間燃料荷重和を求めて，各点に記憶する . ここで，時間燃料荷重和 q は，飛行時間 t ，消費燃料 f ，時間係数 ct ，燃料係数 cf より，

$$q = ct \cdot t + cf \cdot f \tag{1}$$

と定義する .

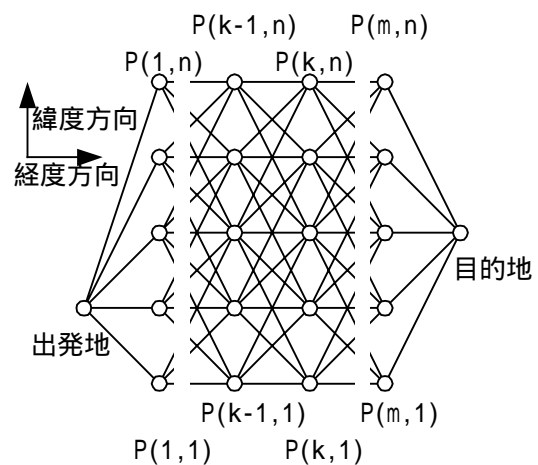


図 1 経路ネットワークの例

時間係数と燃料係数は、飛行時間と消費燃料を費用のように統一した評価値に変換するために使用する。最適経路の算出では、時間燃料荷重和を最小とする経路を求める。時間係数を 0 に定義することにより MFT となり、燃料係数を 0 に定義することにより MTT となる。

出発地から第 k 番目の等経度面上の各点 $P(k,i)$ ($i=1,2,\dots,n$) までの時間燃料荷重和の最小値は、第 k-1 番目の等経度面上の点 $P(k-1,j)$ までの時間燃料荷重和の最小値 $Q_{\min}(k-1,j)$ と $P(k-1,j)$ から $P(k,i)$ までの時間燃料荷重和 $Q(P(k-1,j),P(k,i))$ の合計を最小にすることにより求められる。

$$Q_{\min}(k,i) = \min(Q_{\min}(k-1,j) + Q(P(k-1,j),P(k,i))) \quad (2)$$

ここで、 $\min()$ は第 k-1 番目の等経度面上の点を順次変えて探索を行い、最小値を見つけることを示す。式(2)より、第 k 番目の等経度面上の点 $P(k,i)$ までの時間燃料荷重和の最小値、および、それを与える 1 つ前の等経度面の点を記憶する。

上記の手順を繰り返し、最終(第 m 番目)の等経度面上の点 $P(m,i)$ ($i=1,2,\dots,n$) までの時間燃料荷重和の最小値を求める。最後に $P(m,i)$ から目的地までの時間燃料荷重和を加算し、目的地までの時間燃料荷重和の最小値を計算する。このようにして、出発地から目的地までの時間燃料荷重和の最小値とその経路を求める。

2.2 飛行時間と消費燃料の算出

出発地から目的地までの最適な飛行プロファイルを求める方法を示す。航空機の飛行時間と消費燃料を計算するためには、航空機の飛行特性をモデル化した飛行特性データを使用する。

出発地から目的地までの飛行区間を上昇区間、巡航区間、降下区間に区分する。出発地から最低巡航高度までの区間を上昇区間、上昇区間と降下区間の間の区間を巡航区間、巡航高度から目的地までの区間を降下区間とする。

上昇区間では、指定高度まで上昇するために必要な時間、燃料、距離の飛行特性データに基づいて計算する。巡航区間では、巡航可能な最高高度、航続率の飛行特性データに基づいて計算する。ここで、航続率は無風時に単位燃料 1,000lbs (454kg) を消費する間に飛行できる距離とする。巡航中は単位燃料を消費する毎に高度上昇の検

査を実施し、上昇が可能となった時点で上昇する飛行プロファイル案を作成する。降下区間では、指定高度から降下し着陸するまでに必要な時間、燃料、距離の飛行特性データに基づいて計算する。

図 2 に風を考慮して真対気速度を対地速度に変換するモデルを示す。真対気速度は飛行特性データから得られる。経路ネットワーク上のひとつの線分の始点から目標点に航跡が向かうように、風向、風速を考慮して、真針路を設定する。真対気速度と風速のベクトル和が対地速度となる。

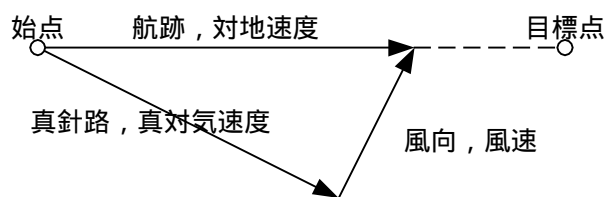


図 2 真対気速度から対地速度への変換

2.3 気象データ

気象データは、地球上の格子点の風向、風速、気温等のデータである。格子点は、緯度、経度ともに 1.25 度の間隔で、高度は気圧高度 100hPa, 150hPa, 200hPa, 250hPa, 300hPa, 400hPa, 500hPa, 700hPa, 850hPa, 最大風速面、圏界面の 11 レベルである。この格子点から線形補間により、航空機の飛行に影響を与える点の風向、風速、気温を求める。

気象予報は、協定世界時 (Coordinated Universal Time: UTC) の 0 時と 12 時の観測値に基づく数値予報として配信される。予報時刻は観測時刻から 12 時間、18 時間、24 時間、30 時間先等の 6 時間毎である。シミュレーションでは、予報時刻の中間の時刻で、気象データを切り替えて使用する。

3. 最適経路シミュレーション

3.1 シミュレーション条件

表 1 にシミュレーション条件の標準値を示す。経路ネットワークの接続数は、図 1 の $P(k-1,j)$ ($j=1,2,\dots,n$) の各点から $P(k,i)$ ($i=1,2,\dots,n$) に接続する線分数の最大値である。

表 1 標準的なシミュレーション条件

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	Mach0.85
離陸重量	735,000lbs
離陸時刻	0900UTC
飛行最低高度	FL290
高度間隔	2,000ft 毎
出発地と目的地の対	東京 - シアトル 東京 - サンフランシスコ 東京 - ロサンゼルス 東京 - ホノルル
経路ネットワーク	経度間隔 5 度 緯度間隔 1 度 接続数 11 点
気象予報	ワシントン WAFC 発行 観測時刻 12 時 2001 年 5 月 1 日, 8 月 1 日, 11 月 1 日, 2002 年 2 月 1 日 から各 7 日間, 合計 28 日間 無風データ (比較用)

3.2 偏西風と最適経路

図 3 に季節毎の東西方向の平均風速を示す。各日の 12 時間後の気象予報を東経 150 度から西経 130 度まで平均した。高度は FL330 とした。風

速の最大値の緯度は、南から北へ向けて 2 月, 5 月, 8 月, 11 月の順番である。

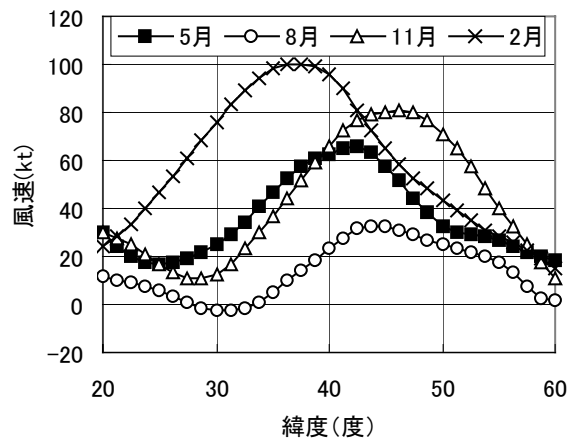


図 3 季節毎の風速

図 4 に無風時と 2 月 1 日の東行(E)と西行(W)の MFT を点線で示す。参考として大圏経路を実線で示す。無風時の MFT は大圏経路とほぼ一致している。2 月は偏西風が強いため、東行は偏西風を利用するように、東京 - ホノルルは大圏経路から北側、それ以外は大圏経路から南側に迂回している。西行は偏西風を避けるように、東京 - ホノルルは南側、それ以外は大圏経路から北側に迂回している。無風時は、MTT と MFT は一致する。

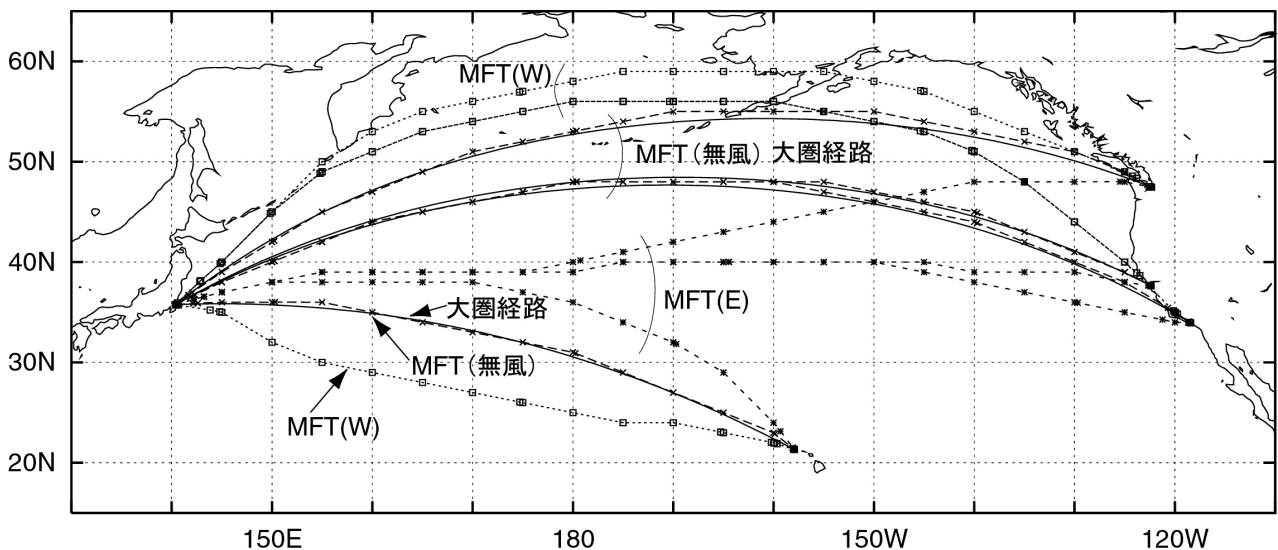


図 4 大圏経路と最適経路(無風時と 2 月 1 日)

速の最大値は 2 月, 11 月, 5 月, 8 月の順番に大

3.3 MTT と MFT の差

図5に東京 - ロサンゼルス間の28日間のMTTとMFTの飛行時間と消費燃料の関係を示す。MFTはMTTより消費燃料が19,000lbs程度少く、飛行時間が13分程度長い。

無風時のMTTの飛行プロファイルは最低高度での巡航となる。これは、高高度より低高度が気温が高く、マック値が一定の巡航方式では、低高度の真対気速度が大きいためである。

無風時のMFTの飛行プロファイルは燃料を消費するにつれて高度を段階的に上昇させ、最終的にはFL430まで高度を上昇する。これは、高高度が低高度より航続率が大きいためである。巡航可能な最高高度は、燃料を消費して機体重量が軽くなるほど高高度となる。

図5では、MTTの一部がMFTと重なっている。これは、偏西風の影響によりMTTの飛行プロファイルが最低高度ではなく、より高い高度を飛行してMFTとの差が小さくなったためである。

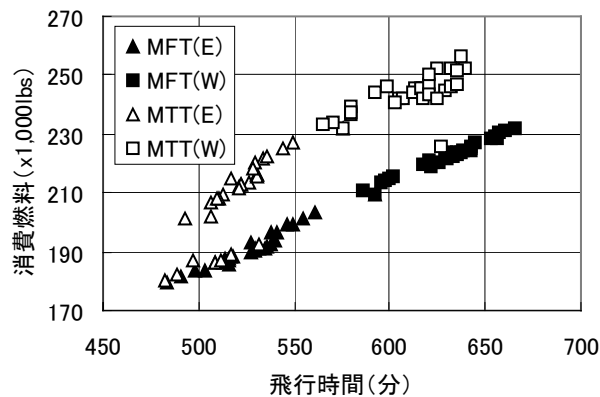


図5 飛行時間と消費燃料

3.4 最適経路の荷重係数による変化

図6に5月1日の東京 - ロサンゼルス間の荷重係数による飛行時間と消費燃料の変化を示す。横軸は荷重係数の比(燃料係数/時間係数)とし、両端はMTTとMFTを示す。MTTとMFTの間で、燃料係数を大きくすることにより、消費燃料が減少し、飛行時間が増加する。

東行では、(燃料係数/時間係数)を大きくするにつれて、飛行時間はなだらかに増加し、消費燃料は0.0003付近で大きく減少する。西行では、飛行時間と消費燃料は0.0005付近の変化が大きい。

荷重係数の変更により、経路と飛行プロファイルはMTTとMFTの間で変化する。

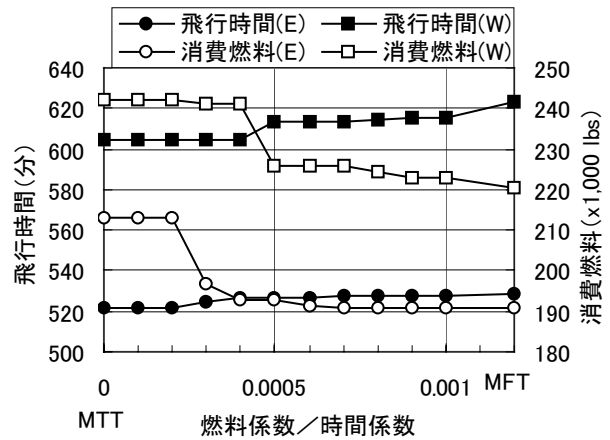


図6 荷重係数による飛行時間と消費燃料の変化

3.5 離陸重量による飛行プロファイルの変化

図7に離陸重量を635,000lbs, 735,000lbs, 835,000lbsとした場合の5月1日の東京 - ロサンゼルス間東行のMFTの飛行プロファイルを示す。飛行プロファイルは、離陸重量が大きくなるにつれて、低高度となる。これは、機体重量が大きくなるにつれて、巡航可能な最高高度が低高度になるためである。

離陸重量が大きいほど全体の消費燃料が大きく、飛行時間が小さくなる。これは、低高度が高高度より航続率が小さく、マック値が一定の巡航方式の真対気速度が大きいためである。

MTTでは、通常の飛行プロファイルは最低高度となり、離陸重量には依存しない。

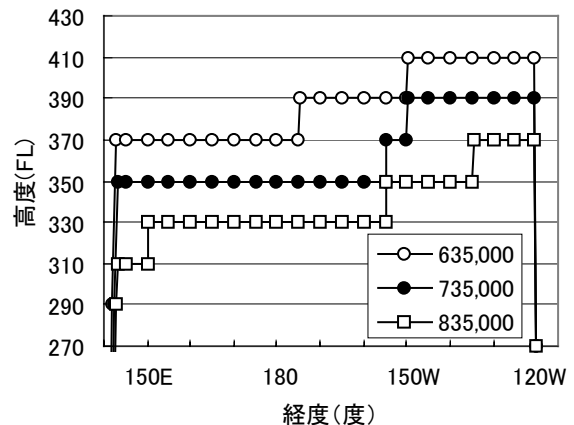


図7 離陸重量による飛行プロファイルの変化

3.6 最適経路の同一性

図8に東京 - シアトル, 東京 - サンフランシスコ, 東京 - ロサンゼルス間の東行と西行の MFT の経路数の平均値を示す。ここで, 3 本の中で 2 本が同一地点を共有している場合は, 経路数を 2 本とする。東京に近い経度での同一性が高い。これは, 東京を中心として各経路が設定され, 中心部は周辺部に比較して, 経路が接近し易いためである。また, 東行が西行より東京付近の同一性が高い。これは, 東京付近を飛行する航空機の機体重量等の条件について, 東行が西行より類似しているためである。

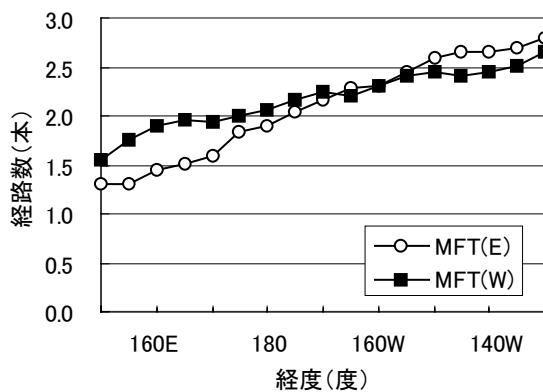


図8 最適経路の同一性

3.7 最適経路の季節変化

東京 - ロサンゼルス間の東行(E)および西行(W)の MTT と MFT の 28 日間の飛行時間 (図 9), 消費燃料 (図 10), 経路長 (図 11) の季節毎の変動を示す。また, 無風の MFT を点線, MTT を一点鎖線で示す。

3.7.1 飛行時間

東行の飛行時間と MTT と MFT の飛行時間の差の平均値は, 偏西風が強い季節になるにつれて小さくなる。これは, 偏西風が強くなるにつれて, MFT の飛行時間の低減量が MTT の低減量より大きくなるためである。

西行の飛行時間の平均値は, 8月, 5月, 2月, 11月の順に大きい。基本的には, 偏西風が強い季節になるにつれて, 飛行時間が大きくなると思われるが, 2月と11月が逆転している。これは, 11月の経路長が大きいことから, 11月の偏西風が2月より北側にあり, 11月は2月より北側への迂回距離が大きいためと考えられる。MTT と MFT の飛行時間の差は, 西行が東行よ

り大きい。

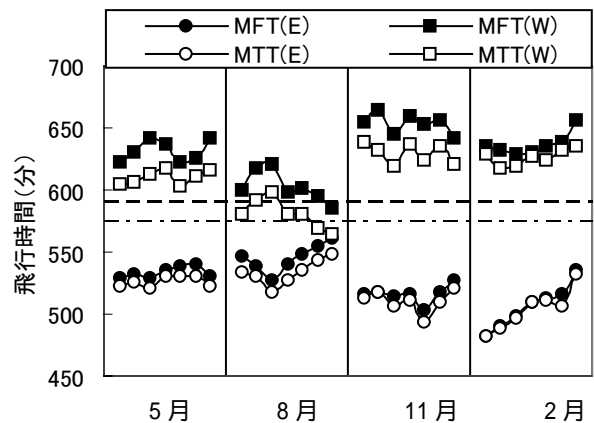


図9 最適経路の飛行時間

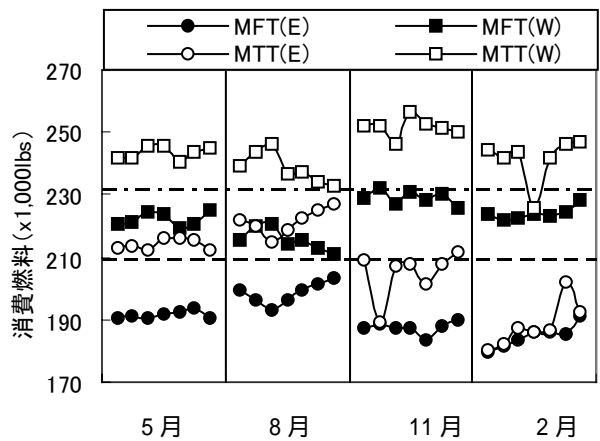


図10 最適経路の消費燃料

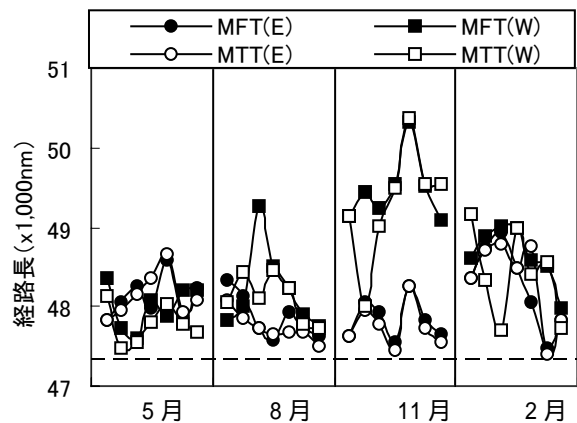


図11 最適経路の経路長

3.7.2 消費燃料

東行の消費燃料の平均値は, 飛行時間と同様の季節変化となる。MTT と MFT の消費燃料の差の平均値は, 2月を除いてほぼ等しい。2月は MTT が最低高度ではなく, 偏西風の強い高度を

利用することが多い。そのため、2月はMTTとMFTの飛行時間と消費燃料の差が小さい。

西行の消費燃料も飛行時間と同様の季節変化となる。MFTとMTTの消費燃料の差は、季節によらずにほぼ等しい。

3.7.3 都市対による変化

東京 - シアトル間では、東行の飛行時間と消費燃料は11月が2月より小さい。これは11月の偏西風が2月より北側にあるためと考えられる。東京 - サンフランシスコ間は、東京 - ロサンゼルス間とほぼ同様の季節分布となる。東京 - ホノルル間は、西行の2月の飛行時間、消費燃料、経路長が11月より大きく、偏西風の強さと同様である。このように、都市の位置と偏西風の相対的な関係により、最適経路の季節変化は部分的には異なる。

3.8 最適経路の時間的な変化

気象条件の時間的な変化に対応して、最適経路は変化する。最適経路の1日単位の変化と出発時刻の3時間単位の変化を示す。

3.8.1 日単位の変化

図12に東京 - ロサンゼルス間のMFTの日単位の飛行時間と消費燃料の差を示す。飛行時間と消費燃料の差には正の相関がある。標準偏差は飛行時間が9.9分、消費燃料が2,850lbs、経路長が434nmである。

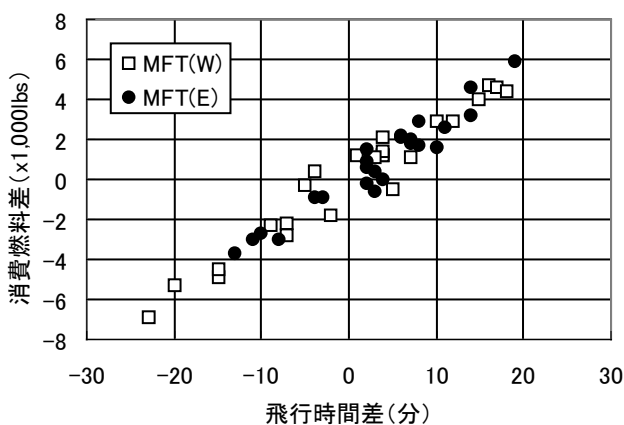


図12 飛行時間と消費燃料の差(1日単位)

3.8.2 出発時刻による変化

図13に東京 - ロサンゼルス間の出発地の出発時刻を0600, 0900, 1200, 1500UTCと3時間単位に変化させた場合のMFTの飛行時間と消費燃料の差を示す。標準偏差は飛行時間が2.8分、消費燃料が768bs、経路長が276nmである。日

単位の変化ほど大きくはないが、最適経路が変化している。

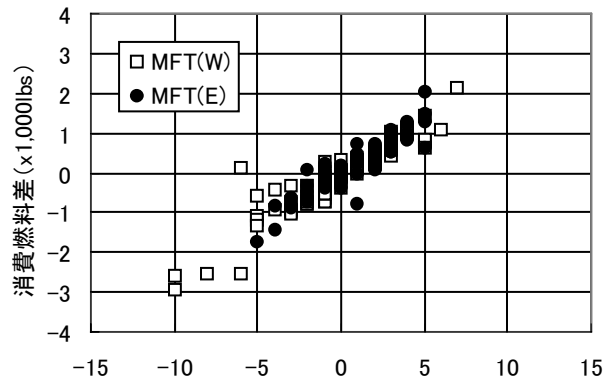


図13 飛行時間と消費燃料の差(3時間単位)

4. まとめ

洋上空域を飛行する航空機の最適な経路を算出するシミュレータを製作し、最適経路の飛行時間、消費燃料、経路長について、航空機の条件および時間的な変化を調査した。気象条件の変化に対応し、最適経路には時間的な変化があり、動的な経路の設定は有効と考えられる。

今後は、航空機間の管制間隔を確保するために最適な飛行プロファイルからの変更による飛行時間と消費燃料の増加の傾向、管制間隔を確保した複数の航空機全体の飛行時間と消費燃料の最適化、および、気象条件の変化に対する経路の変更方法について検討する予定である。

謝辞

シミュレーションにご協力を頂きました国土交通省航空局管制保安部、航空交通流管理センター、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13年3月改訂
- [2] 萩原他：“航空機の経路最適化に関する研究”，日本航海学会論文誌第91号，平成6年9月
- [3] 庄司他：“航空機の経路最適化に関する研究-IV”，日本航海学会論文誌第97号，平成9年9月