航空機の経路最適化に関する研究

萩原 秀樹*・鈴木 るり*・生田 陽一**

A Study on the Optimization of Aircraft Route

Hideki HAGIWARA, Ruri SUZUKI and Yoichi IKUTA

Abstract

In this study, the simulation programs to compute the optimum aircraft routes, i.e. minimum time, minimum fuel and time/fuel saving routes, were developed based on the forward dynamic programming algorithm. The flight performance of B747-400 was also investigated to represent the air speed, fuel consumption, etc. during climbing, cruising and descent as the functions of flight altitude and weight.

Using forecasted upper wind data provided by the U.K. Meteorological Office, the optimum route simulations for B747-400 flying Narita-San Francisco route were performed. By analyzing the simulation results, it was found that compared with the present daily routes instructed by the U.S. Air Route Traffic Control Center, the flight time and fuel were considerably saved on the computed optimum routes.

1. はじめに

北太平洋上空を飛行する航空機は強い偏西風を受けており、偏西風をベクトル的に考慮して経路選定を行う必要がある。実際には、日本～北米間の日々の飛行経路(経由地点の緯度・経度)は、アメリカの Oakland にある ARTCC (Air Route Traffic Control Center) から指示されており、その経路を PACOTS (Pacific Organized Track System) と呼んでいる。PACOTS は毎日最新の高層風予報データに基づいて計算され、普通、日本から北米へ 3 本、北米から日本へも 3 本設定される。航空機は高度 29,000 フィート以上では、3 本の PACOTS のうちから 1 本を選び、そのルート上を飛行しなければならない。(ただし飛行高度については、交通状況が許す限り自由に上昇(降下)できる。)⁽¹⁾

このように現在のところ、日本～北米間の飛行経路選定はアメリカの ARTCC に依存しているが、数年後には日本から北米に至る東行の PACOTS の選定を日本の運輸省航空局が担当する予定になっている。また将来的には、各航空会社の自由裁量で飛行経路が選定できるようになることが予想される。しかし、ARTCC における飛行ルート計算のアルゴリズムは明らかにされておらず、実用的な経路選定システムの開発が強く望まれている。

本研究では、航空機の最適経路を前進型ダイナミックプログラミングを用いて計算するシミュレーションプログラムを開発した。またボーイング 747-400 の飛行性能を調査し、飛行高度と機体重量に対する対気速度や燃料消費量などの関係を明らかにした。そして英国 Meteorological Office による高層風予報データを用いて、成田～サンフランシスコ間を飛行するボーイング 747-400 の最適ルートシミュレーションを行い、得られた最短時間ルートや最小燃料消費ルートについて考察した。また、それらのルートを実際の飛行ルートと比較し、PACOTS にどの程度改善の余地があるかを検討したので、その結果を報告する。

* 正 会 員 東京商船大学(〒135 東京都江東区越中島 2-1-6)

** 学生会員 東京商船大学大学院(〒135 東京都江東区越中島 2-1-6)

2. 航空機の経路最適化

本研究では、3次元空間内を自由に飛行できる1機の航空機の経路最適化を考える。(毎日の最適な飛行ルートは、代表的な1機の航空機について、高層風を考慮して決定すればよい。実際のフライトに際しては、多くの航空機がその最適ルートを利用するので、安全な航空機間間隔を維持するために交通管制が行われる。)最適化の手法としては、前進型ダイナミックプログラミングを採用した。以下では、最短時間ルートと最小燃料消費ルートおよび飛行時間と燃料の両方を節約するルートの求め方を述べる。

なお航空機が長距離を巡航する場合、いくつかの巡航方式があるが、ここでは飛行計画を立てる際に通常用いられている「高速巡航方式(High-speed Cruise)」を採用する。これは、基本的には飛行時間の短縮を目的とする巡航方式であり、航空機の対気速度を機体重量に関係なく、高度の関数として定めて巡航するものである¹⁰⁾。以下の経路最適化においては、離陸後の上昇と着陸前の降下を除き、航空機は常に高速巡航方式で飛行するものとする。

2.1 最短時間ルート

最短時間ルートの計算方法は、以下のとおりである。

(1) 出発地と目的地を結ぶ大圏ルートに等間隔で直交する n 本の大圏を引き、それらの上空に一定間隔で設置されたグリッドからなるグリッド面を設定する。航空機は各グリッド面上のグリッドを經由して出発地から目的地へ飛行するものとし、相次ぐ2つのグリッド間では航空機の対地針路および上昇(降下)角は一定とする(図1参照)。

(2) 出発地から1番目のグリッド面上の各グリッド $G(1, i)$ ($i=1, 2, \dots, p$; p はグリッド面上のグリッド数) まで一定の対地針路で航空機を飛行させ、その間の飛行時間 $T(\text{origin} \rightarrow G(1, i))$ を求めて記憶する。航空機は離陸後、機種により固有の上昇性能に基づいて各グリッドと同高度まで上昇し、そこから各グリッドまで水平に飛行するものとする。

この水平飛行および以後のグリッド間の飛行では、一定時間間隔(例えば15分間隔)で対気速度と風向・風速から針路修正角および対地速度を計算して、航空機を飛行させる(図2参照)。また同時に、その時間間隔中の燃料消費量を計算し、その積算により離陸時からの燃料消費量を求める。飛行中の機体重量は、離陸時の機体重量から燃料消費量の積算値を減じるにより求められる。

(3) 出発地から k 番目のグリッド面上の各グリッド $G(k, i)$ ($i=1, 2, \dots, p$) までの最短飛行時間 $T_{\min}(k, i)$ は、1つ前($k-1$ 番目)のグリッド面上のグリッド $G(k-1, j)$ までの最短飛行時間 $T_{\min}(k-1, j)$ と、 $G(k-1, j)$ から $G(k, i)$ までの飛行時間 $T(G(k-1, j) \rightarrow G(k, i))$ との和を最小にすることにより決定される(図3参照)。

$$T_{\min}(k, i) = \text{Min} \{ T_{\min}(k-1, j) + T(G(k-1, j) \rightarrow G(k, i)) \} \quad (1)$$

$$(k=2, 3, \dots, n)$$

上式において Min は、 $k-1$ 番目のグリッド面上のグリッド $G(k-1, j)$ を順次変えて探索を行い、右辺の最小値すなわち $T_{\min}(k, i)$ を見出すことを意味する。

(1) 式が最短飛行時間を求める前進型ダイナミックプログラミングの方程式であり、

図1 航空機の最適ルートを計算するためのグリッド面

図2 針路修正角と対地速度を求めるためのベクトル三角形

$T_{\min}(1, j) = T(\text{origin} \rightarrow G(1, j))$ である。(1)式により、 k 番目のグリッド面上の各グリッド $G(k, i)$ までの最短飛行時間 $T_{\min}(k, i)$ を求めて記憶し、またその $T_{\min}(k, i)$ を与える 1 つ前のグリッド面上のグリッドを $G_{\min}(k, i)$ として記憶する。

(4) 上述の手順を繰り返し、最終 (n 番目) のグリッド面上の各グリッド $G(n, i)$ ($i=1, 2, \dots, p$) までの最短飛行時間 $T_{\min}(n, i)$ を求める。そして、 $G(n, i)$ から目的地まで一定の対地針路で

航空機を飛行させ、その間の飛行時間 $T(G(n, i) \rightarrow \text{destination})$ を計算する。その際、 $G(n, i)$ からある地点までは水平に飛行し、そこから目的地に着陸するまでは、機種により固有の降下性能に基づいて降下するものとする。

出発地から目的地までの最短飛行時間 $T_{\min}$ は、 $T_{\min}(n, i)$ と $T(G(n, i) \rightarrow \text{destination})$ の和を最小にすることにより求められる。

$$T_{\min} = \min_i \{T_{\min}(n, i) + T(G(n, i) \rightarrow \text{destination})\} \quad (2)$$

(5) $T_{\min}$ を与える n 番目のグリッド面上のグリッドを $G(n, i^*)$ とし、 $G(n, i^*)$ への出発点となる $n-1$ 番目のグリッド面上のグリッド $G_{\min}(n, i^*)$ を、 $G(n-1, i^*)$ とする。次に、 $G(n-1, i^*)$ への出発点となる $n-2$ 番目のグリッド面上のグリッド $G_{\min}(n-1, i^*)$ を、 $G(n-2, i^*)$ とする。

この手順を出発地に向けて繰り返せば、最短時間ルート $\text{origin} \rightarrow G(1, i^*) \rightarrow G(2, i^*) \rightarrow \dots \rightarrow G(n, i^*) \rightarrow \text{destination}$ を求めることができる。

以上の最短時間ルートを求めるアルゴリズムでは、出発地と目的地を結ぶ大圏ルートを中心として飛行経路の探索を行っているので、出発地と目的地の位置関係がどのような場合でも正確な最短時間ルートを求めることができる。飛行中に高層風予報データが更新された場合には、航空機の現在位置を出発点として、同じ手順により目的地までの最短時間ルートを再計算すればよい。また、飛行が禁止されている（もしくは探索を行う必要のない）空域を自由に設定することができ、さらに必要であれば、相次ぐグリッド面の間隔を大圏ルート上の位置によって変える等の工夫をこらすこともできる。

なお最適化の手法として、後進型ではなく前進型のダイナミックプログラミングを用いたのは、後進型では目的地にもっとも近いグリッド面から最適化計算を始めるため、各グリッドを出発する時刻を定めることができず、その出発時刻を数多く仮定して（つまりグリッドの出発時刻も状態変数として）計算を進めねばならないからである。

2.2 最小燃料消費ルート

一般に、最小燃料消費ルートを求める場合には、目的地への到着時刻を指定し、針路と上昇（降下）角およびエンジン出力を制御して、その指定時刻に最小の燃料消費量で目的地に到着するルートを見出すことになる。

実際には、高層風の時間変化は比較的ゆるやかで、数時間程度ではほとんど変動しないので、あるルート上をエンジン出力を制御して対気速度を変えながら飛行しても、一定のエンジン出力で飛行することに比べ、有利な高層風を利用できることはない。また民間航空機の場合、運航の定時性を確保することが重要であり、最短時間ルートに比べて大幅に遅い到着時間を指定することはできない。

したがって、ここではエンジン出力の制御は行わず、航空機は常に高速巡航方式で飛行するものとする。また、目的地への到着時刻は指定せず、単に評価量を燃料消費量として、前述の最短時間ルートを求めるのと同じアルゴリズムで計算されたルートを、最小燃料消費ルートと呼ぶことにする。

出発地から目的地までの最小燃料消費量を求めるための前進型ダイナミックプログラミングの方程式は、次のようになる。

図3 k 番目のグリッド面上のグリッド $G(k, i)$ に至る飛行経路の探索

$$F_{\min}(k, i) = \underset{j}{\text{Min}} \{F_{\min}(k-1, j) + F(G(k-1, j) \rightarrow G(k, i))\} \quad (3)$$

ただし、 $F_{\min}(k, i)$ は出発地から k 番目のグリッド面上の各グリッド $G(k, i)$ までの最小燃料消費量で、 $F(G(k-1, j) \rightarrow G(k, i))$ は $k-1$ 番目のグリッド面上のグリッド $G(k-1, j)$ から $G(k, i)$ までの燃料消費量である。

(3) 式は、高速巡航方式で飛行し、高層風に時間変動がなく、さらに目的地への到着時刻を指定しないという条件のもとでは、数学的に厳密な最小燃料消費量を与えてくれる。

2.3 飛行時間・燃料節約ルート

上述の最小燃料消費ルートを求めるアルゴリズムでは、目的地への到着時刻を指定しないので、燃料消費量は最小となるが、到着時刻が最短時間ルートに比べ、かなり遅くなってしまう可能性がある。そこで、評価量を飛行時間と燃料消費量の荷重和として、飛行時間と燃料の両方を節約するルートも考えることにする。(以後、このルートを飛行時間・燃料節約ルートと呼ぶ。)

目的地までの飛行時間と燃料消費量の荷重和を最小にするための前進型ダイナミックプログラミングの方程式は、次のようになる。

$$J_{\min}(k, i) = \underset{j}{\text{Min}} \{J_{\min}(k-1, j) + J(G(k-1, j) \rightarrow G(k, i))\} \quad (4)$$

ただし、 $F_{\min}(k, i)$ は出発地から k 番目のグリッド面上の各グリッド $G(k, i)$ までの飛行時間と燃料消費量の荷重和の最小値で、 $J(G(k-1, j) \rightarrow G(k, i))$ は $k-1$ 番目のグリッド面上のグリッド $G(k-1, j)$ から $G(k, i)$ までの飛行時間と燃料消費量の荷重和である。

$J(G(k-1, j) \rightarrow G(k, i))$ は、以下のように表せる。

$$J(G(k-1, j) \rightarrow G(k, i)) = T(G(k-1, j) \rightarrow G(k, i)) / T_{\text{total}} + C \cdot F(G(k-1, j) \rightarrow G(k, i)) / F_{\text{total}} \quad (5)$$

ここで T_{total} と F_{total} は、それぞれ出発地から目的地までの飛行時間および燃料消費量の概略値であり、 C は重み係数である。 T_{total} と F_{total} は、グリッド間の飛行時間と燃料消費量の単位が異なり、またそれらの値が大きく違うので、それらを無次元化してほぼ同じ値にし、評価を容易にするための係数である。 T_{total} と F_{total} には、飛行実績の平均値を用いてもよいし、(1) 式および (3) 式により求められた最短飛行時間および最小燃料消費量を用いてもよい。

3. ボーイング 747-400 の飛行性能

航空機の最適経路を求めるには、対象とする航空機の飛行性能を把握する必要がある。今回の研究では、ボーイング 747-400 (以下 B747-400) を対象機とし、その飛行性能データを日本航空(株)より入手した⁽³⁾。そして、大気として国際標準大気を仮定し、B 747-400 の上昇中、巡航中(水平飛行中)および降下中における対気速度や燃料消費量等を高度と機体重量から算出する回帰式またはデータテーブルを作成した。以下、それらについて述べる。

なお B747-400 は、1989 年に初飛行した最新の 747 型機で、全長 70.7m、全幅 65.1m、最大離陸重量 395 トン、標準座席数 373 席である。推力 26.3 トンのエンジンを 4 基装備しており、497 ノットの巡航速度で 6,600 マイル(NM)を飛行できる。

3.1 上昇性能

B747-400 が離陸後、ある高度まで上昇するのに要する時間を図 4 に、必要な燃料を図

図 4 B747-400 がある高度まで上昇するのに必要な時間

5 に示す。また、ある高度まで上昇する間の平均対気速度を図 6 に示す。(ここでの高度 (Flight altitude) は気圧高度であり、高度 18,000、30,000、39,000 フィートは、それぞれ気圧 500、300、200hPa に相当する。以後、高度はすべて気圧高度である。) 図中には、離陸重量が 58、68、78 および 88 万ポンドの場合のデータがプロットされており、20,000 フィート以上の高度については回帰曲線が描かれている。

図 4、図 5 より、ある高度まで上昇するのに要する時間と燃料は、高度が高くなる程、また離陸重量が重くなる程多くなることが分かる。各離陸重量において、上昇に必要な時間は高度の 2 次関数、上昇に必要な燃料は高度の 1 次関数として近似されている。

図 6 より、ある高度まで上昇する間の平均速度は、高度が高くなる程大きくなるが、離陸重量にはあまり影響されないことが分かる。図中、離陸重量が 68 万ポンドの場合について、上昇中の平均速度が高度の 1 次関数の組合せとして近似されている。

3.2 巡航性能

B747-400 が巡航可能な最高高度と機体重量の関係を、図 7 に示す。図 7 より、機体重量が軽い程、高い高度を巡航できることが分かる。巡航可能な最高高度は、機体重量の 1 次関数の組合せとして近似されている。

B747-400 の巡航中における対気速度と高度の関係を、図 8 に示す。図 8 より、対気速度は高度と共に増加するが、31,000 フィートで最大の 499 ノットとなり、それ以上の高度ではやや減少することが分かる。これは、高度が高くなるにつれて空気密度が小さくなり、抵抗が減って対気速度が増すが、31,000 フィート以上では空気密度の減少によるエンジン推力の低下が大きくなるためである。図中、対気速度は高度の 1 次関数の組合せとして近似されている。

B747-400 の巡航中における 1 時間あたりの燃料消費量と機体重量および高度の関係を、図 9 に示す。図 9 より、一定の高度では機体重量が重い程、燃料消費量が多くなることが分かる。また、機体重量が重い場合には、低い高度を飛行する方が燃料消費量は少ないが、重量が軽くなるにつれて、より高い高度を飛行する方が燃料消費量は少なくなることが分かる。巡航中における燃料消費量については、高度との関係が複雑なので回帰式は用いず、20,000 ポンドごとの機体重量と 1,000 フィートごとの高度に対して燃料消費量のデータテーブルを作成した。

図 5 B747-400 がある高度まで上昇するのに必要な燃料

図 6 B747-400 がある高度まで上昇する間の平均対気速度

図 7 B747-400 が巡航可能な最高高度

3.3 降下性能

B747-400 がある高度から降下し、着陸するまでに必要な時間と燃料を、図 10 に示す。また着陸するまでに必要な距離を、図 11 に示す。降下時の機体重量は、フライトによる違いが比較的小さいので、両図とも高度のみをパラメータとして降下性能を表している。図中、20,000 フィート以上の高度については、回帰曲線が描かれている。

図 10、図 11 より、飛行高度が高い程、降下に多くの時間と燃料および距離が必要であることが分かる。降下に必要な時間と燃料は高度の平方根の関数として近似され、距離は高度の 1 次関数として近似されている。

4. シミュレーションで使した高層風データ

最適ルートシミュレーションでは、日本航空(株)から入手した英国 Meteorological Office による北太平洋上空の高層風データを使用した。データの期間は、1993 年 11 月 23 日から 11 月 30 日までの 8 日間である。

この高層風データでは、北太平洋上の各グリッドポイントにおける風向・風速が、毎日 30 時間先まで 6 時間間隔で予報されている。毎日 06GMT の予報値は、前日 12GMT を基準時とする 18 時間予報であり、12GMT、18GMT および翌日 00GMT、06GMT の予報値は、当日 00GMT を基準時とする 12、18、24、30 時間予報である。グリッドポイントは、緯度方向 2.5°、経度方向 5°の間隔で、気圧 150、200、250、300、400、500、700、850hPa の 8 レベルに設定されている。

高層風データの例として、11 月 23 日 12GMT および 11 月 30 日 12GMT の 250hPa 等圧面上における風向・風速を、図 12 および図 13 に示す。11 月 23 日 (図 12) には、ジェット気流は日本東方から北東に向かってアリューシャン列島に達し、アラスカ半島の南から一気にハワイ付近まで南下している。

風速は 35°N、140°E 付近で最強で、約 160 ノットである。

これに対し 11 月 30 日 (図 13) には、ジェット気流は日本付近からやや南方に蛇行しながら 32°~40°N の間を東に向かい、150°W 付近から北東に向かった後、南下している。風速は 38°N、175°W 付近で最

図 8 B747-400 の巡航中における対気速度

図 9 B747-400 の巡航中における 1 時間あたりの燃料消費量

図 10 B747-400 がある高度から降下し着陸するまでに必要な時間と燃料

強で、170 ノットに達している。

このように、北太平洋上空の高層風は時期によって大きく異なるので、航空機の最適ルートを選定する場合、高層風(特にジェット気流)の正確な予測が不可欠となる。現在では、30 時間先までの高層風を高い精度で予測することができ、航空機の飛行時間は長くて 12 時間程度なので、飛行期間中の高層風はほぼ正確に予測できると言える。なお高度方向の 8 レベルのうち、ジェット気流がもっとも強いのは、気圧 200、250、300hPa の 3 レベルである。この気圧は、国際標準大気では高度 39,000、34,000、30,000 フィートに相当し、航空機が通常巡航する高度帯と一致している。

最適ルートシミュレーションでは、巡航中、15 分毎に上述の高層風データを用いて、時間、位置および高度に関する線形補間を行い、航空機が受ける高層風を算出した。

5. 最適ルートシミュレーション

前述した経路最適化の手法と B747-400 の飛行性能および高層風データを用いて、成田～サンフランシスコ間の最適ルートシミュレーションを行った。

5.1 シミュレーションの方法

シミュレーションでは、成田～サンフランシスコ間を結ぶ大圏ルートを 10 等分し、9 枚のグリッド面を設定した。各グリッド面上には、水平方向に 60 マイルの間隔で 41 個(大圏ルートの南北に 20 個ずつ)、垂直方向に高度 20,000 フィートから 44,000 フィートまでの間に 1,000 フィートの間隔で 25 個のグリッドを設置した。

航空機が離陸後上昇する際には、図 4、図 5 の回帰式により上昇に必要な時間と燃料を求めた。(離陸重量については内挿計算を行った。)また、図 6 の回帰式により上昇中の平均対気速度を求め、それに高度 18,000 フィート(500hPa)における高層風をベクトル的に加えて上昇中の平均対地速度を算出した。そして、その平均対地速度に上昇に必要な時間を乗じて進出距離を求め、上昇終了地点を定めた。

巡航中には、図 8 の回帰式により対気速度を求め、また 3.2 で述べたデータテーブルから内挿計算により燃料消費量を求めた。巡航可能な最高高度は、図 7 の回帰式から決定した。なお、航空機が巡航中に上昇する場合、実際には段階的に高度を上げていくステップ上昇方式が用いられる。しかしシミュレーショ

図 11 B747-400 がある高度から降下し着陸するまでに必要な距離

図 12 1993 年 11 月 23 日 12GMT における 250hPa 等圧面上の高層風

図 13 1993 年 11 月 30 日 12GMT における 250hPa 等圧面上の高層風

ンにおいては、相次ぐグリッド間では一定の上昇角で上昇するものとし、対気速度や燃料消費量は上昇角に無関係とした。(相次ぐグリッド間で 10,000 フィート上昇しても、上昇角は約 0.2 度にすぎない。)

着陸のために降下する際には、図 11 の回帰式により降下に必要な距離を求め、目的地からその距離だけ手前に降下開始地点を定めた。そして、図 10 の回帰式により降下に必要な時間と燃料を算出した。

5.2 最短時間ルートのシミュレーション例

11 月 23 日 0913GMT に成田を離陸してサンフランシスコに向かうフライトについて、最短時間ルート(以後 MTR (Minimum Time Route) と略す)を求めるシミュレーションを行った結果を、図 14 に示す。図中には+印でグリッドの位置が示されており、成田からサンフランシスコまでの MTR が太線で描かれている。また、最終グリッド面において MTR と同高度のグリッドに至る最短時間ルート群が細線で描かれている。

矢印のルートは実際の飛行ルート(以後 AR (Actual Route) と略す)で、図の左上において太線で囲まれたエリア (Restricted area) は、ロシア上空の飛行禁止エリアを簡略化して示したものである。飛行期間中における高層風の概略を示すために、11 月 23 日 12GMT における 250hPa 等圧面上の風向・風速が重ねられている。

図 14 より、MTR は離陸後 160°W 付近まで、ジェット気流の最強部を通っていることが分かる。また、最終グリッド面までの最短時間ルート群も、経度 180°付近まではジェット気流の最強部に集中しており、そこから大きく扇形に広がって最終グリッドに達している。このことより、日本から北米へのフライトでは、ジェット気流の追い風を利用することが極めて重要であることが分かる。

MTR と AR はさほど大きく離れていないが、MTR の飛行時間は 7 時間 44 分で、実際の飛行時間より 28 分短い結果となった。これは、MTR の飛行距離が AR より約 70 マイル短いことに加え、MTR では対気速度のもっとも大きい高度 31,000 フィートを常に飛行したのに対し、AR では燃料の節約を図るため、高度 35,000 フィートから 37,000 フィートを飛行したことによる。実際の燃料消費量は 164,600 ポンドで、MTR の燃料消費量より約 9,700 ポンド少なかった。

次に、11 月 23 日 2011GMT にサンフランシスコを離陸して成田に向かうフライトについて、MTR を求めるシミュレーションを行った結果を、図 15 に示す。また、ロシア上空に飛行禁止エリアを設けない場合のシミュレーション結果を、図 16 に示す。両図には、飛行期間中における高層風の概略を示すために、11 月 24 日 00GMT における 250hPa 等圧面上の風向・風速が重ねられている。

図 15 より、MTR は日本付近から北東に向かう強いジェット気流を南に迂回していることが分かる。ロシア上空に飛行禁止エリアが設けられているために、北方を通るルートは千島列島と日本の東方でジェット気流の強い向かい風を受けることになり、不利なものとなっている。

MTR と AR はほぼ一致しており、MTR の飛行時間は 10 時間 28 分で、実際の飛行時間より 21 分短かった。これは東行のフライトの場合と同様、MTR では常に対気速度が最大となる高度 31,000 フィートを飛行したのに対し、AR では燃料を節約するために主として高度 35,000 フィートから 39,000 フィートを飛行したことによる。実際の燃料消費量は 236,400 ポンドで、MTR の燃料消費量より約 8,100 ポンド少なかった。

図 16 より、飛行禁止エリアを設けない場合、MTR はベーリング海北部を通り、オホーツク海から北海道上空を経て成田に向かっている。この MTR は、ジェット気流の北側を迂回するルートであり、北米から日本へのフライトでは、ジェット気流の強い向かい風を南か北に迂回しなければならないことが分かる。MTR の飛行時間は 10 時間 24 分で、飛行禁止エリアを設けた場合の MTR より 4 分短かった。このシミュレーションでも

図 14 11 月 23 日 成田発サンフランシスコ行きのフライトにおける最短時間ルートシミュレーションの結果

(太線：最短時間ルート，矢印：実際の飛行ルート)

MTR の飛行高度は常に 31,000 フィートで、燃料消費量は飛行禁止エリアを設けた場合の MTR より約 1,500 ポンド少ない結果となった。

5.3 最短時間ルート、最小燃料消費ルートおよび飛行時間・燃料節約ルートの比較

上述のシミュレーションでは、MTR は AR に比べて飛行時間を約 20～30 分短縮できたが、燃料を約 7,000～10,000 ポンド余分に消費する結果となった。実際の運航では、飛行時間の短縮だけでなく燃料の節約を図ることも重要である。

そこで、11 月 23 日のサンフランシスコ発成田行きのフライトについて、2.2 および 2.3 で示したアルゴリズムに基づいて、最小燃料消費ルート（以後 MFR (Minimum Fuel Route) と略す）と飛行時間・燃料節約ルート（以後 TFSR (Time/Fuel Saving Route) と略す）を求めるシミュレーションを行った。TFSR を求める際には、(5) 式の T_{total} として MTR の飛行時間、 F_{total} として MFR の燃料消費量を用いた。

(5) 式の重み係数 C を変化させた場合の TFSR の飛行時間および燃料消費量を、図 17 に示す。横軸において、 $C=0$ の場合が MTR であり、右端には MFR の値がプロットされている。図中、実線が飛行禁止エリアを設けた場合の値であり、点線が飛行禁止エリアを設けない場合の値である。

図 17 より、重み係数 C の値を増やすにつれて（すなわち燃料の節約を重視するにつれて）、飛行時間は増加し燃料消費量は減少していることが分かる。飛行禁止エリアを設けた場合、MFR の飛行時間は 10 時間 48 分で MTR より 20 分長く、AR より 1 分短かった。また、MFR の燃料消費量は 232,500 ポンドで MTR より約 12,000 ポンド少なく、AR より約 3,900 ポンド少なかった。

最適ルートを選定する際に用いるべき重み係数の値は、運航者が飛行時間短縮と燃料節約のどちらを重視するかにより異なる。このシミュレーションでは、 $C=0.75$ か $C=1$ の場合が MTR に比べて燃料節約が大きく、かつ飛行時間もさほど増大していないので、好ましい結果と考えられる。 $C=1$ の場合、TFSR の飛行時間は MTR より 13 分長く、燃料消費量は MTR より約 11,000 ポンド少なかった。

図 15 11 月 23 日 サンフランシスコ発成田行きのフライトにおける最短時間ルートシミュレーションの結果（太線：最短時間ルート，矢印：実際の飛行ルート）（ロシア上空に飛行禁止エリアを設けた場合）

図 16 11 月 23 日 サンフランシスコ発成田行きのフライトにおける最短時間ルートシミュレーションの結果（太線：最短時間ルート，矢印：実際の飛行ルート）（ロシア上空に飛行禁止エリアを設けない場合）

図 17 重み係数を変化させた場合の飛行時間・燃料節約ルートの飛行時間と燃料消費量

図 17 重み係数を変化させた場合の飛行時間・燃料節約ルートの飛行時間と燃料消費量

各重み係数に対する TFSR および MFR の経路は、すべて MTR の経路とほぼ一致しており、燃料の節約は飛行高度を制御したことによるものであった。飛行禁止エリアを設けた場合において、MTR、重み係数 0.5 と 1.0 に対する TFSR、MFR および AR の飛行高度の変化を、図 18 に示す。横軸は、離陸時からの飛行距離である。

MTR では常に高度 31,000 フィートを飛行しているのに対し、燃料節約を重視する程、早い段階から高い高度へ上昇していくことが分かる。2 通りの TFSR および MFR では、最後の約 600 マイルは高度 41,000 フィートを飛行した。AR では巡航中、飛行距離の約 1 割を高度 31,000 フィート、約 6 割を 35,000 フィート、約 3 割を 39,000 フィートで飛行した。

なお MFR では、離陸後、27,000 フィートまでしか上昇せず、その高度で 1 番目のグリッド面まで約 430 マイル巡航した。これは、このフライトにおける離陸重量が 754,000 ポンドと比較的重かったので、1 番目のグリッド面までの燃料消費量を少なくするには、低い高度の方が有利だったからである。(一定距離を巡航するための燃料消費量を最小にする飛行高度は、機体重量が重いときには低く、重量が軽くなるにつれて高くなる。)

5.4 11月23日から11月30日までのシミュレーション結果

1993 年 11 月 23 日から 11 月 30 日までの毎日について、成田～サンフランシスコ間の MTR と MFR を求めるシミュレーションを行った。11 月 23 日から 30 日までの 8 日分の MTR を、図 19 (東行) および図 20 (西行) に示す。図中、各ルートに付けられている数字は出発日である。また図 20 において、実線は飛行禁止エリアを設けた場合の MTR、点線は飛行禁止エリアを設けない場合の MTR である。

図 19 より、成田からサンフランシスコまでの東行のフライトでは、MTR は 40°N ～ 50°N の緯度帯を通過しており、23 日から 30 日にかけて次第に南下していることが分かる。これは、ジェット気流が次第に南下したためで(図 12、図 13 参照)、MTR は 160°W 付近までジェット気流の最強部を通過していた。

図 20 より、サンフランシスコから成田までの西行のフライトで飛行禁止エリアを設けた場合、MTR は 11 月 23 日の南方ルートを除き、ベーリング海の中中部か南部を通り、 170°E 付近から飛行禁止エリアのすぐ東側を南下していることが分かる。これらの MTR はジェット気流の北側を迂回するものであるが、千島列島や日本の東方で強い向かい風を受けている。西行のフライトで飛行禁止エリアを設けない場合、MTR はベーリング海の北部を通り、オホーツク海から北海道上空を経て成田に向かうものが多いことが分かる。これらの MTR は、ジェット気流の北側を大きく迂回するものである。(ただし 11 月 29 日と 30 日のフライトでは、ジェット気流がかなり南下したため、MTR は飛行禁止エリアを設けた場合の MTR と同じであった。) MTR の飛行高度は、東行・西行ともほとんどのフライトにおいて常に 31,000 フィートであった。

MFR は、東行・西行ともすべてのフライトにおいて、ほぼ MTR と一致していた。また MFR の飛行高度は、33,000 フィート付近から段階的に 43,000 フィート付近まで上昇

図 18 各ルートの飛行高度の変化
(ロシア上空に飛行禁止エリアを設けた場合)

図 19 11月23日から11月30日までの8日分の
最短時間ルート(東行)

する場合が多かった。

AR は、東行ではすべてのフライトにおいて、ほぼ MTR と一致していた。西行では、170°E 付近より西では MTR とほぼ一致していたが、アラスカ湾やベーリング海では MTR のかなり北側を通る場合があった。(この区域には、北太平洋複合経路システム (North Pacific Composite Route System) というルート群が設定されており、AR はあらかじめ定められたルートを組み合わせたものになっている⁽¹⁾。) AR では、高度 35,000 フィートから 38,000 フィートの間を巡航することが多かった。

11 月 23 日から 30 日までの 8 日分のシミュレーションにおける MTR、MFR および AR の飛行時間と燃料消費量の平均値を、表 1 に示す。西行のフライトにおける MTR と MFR では、飛行禁止エリアを設けた場合と設けない場合の値が示されている。

表 1 には、AR の下に Simulated Actual Route (以後 SAR と略す) というルートがあるが、これは MTR や MFR を求めたのと同じ高層風データと飛行性能データを用いて、AR 上をシミュレーションにより航空機を飛行させた場合のルートである。実際のフライトでは、交通管制上の理由から巡航中の速度が指定されることがあり、また目的地上空で着陸待ちのために空中待機を行うこともある。そのような場合には、AR の飛行時間と燃料消費量をそのまま MTR や MFR のものと比べられないので、ここでは SAR を MTR や MFR と比較することにする。

表 1 より、成田発サンフランシスコ行きの東行では、8 フライトの平均で、MTR の飛行時間は SAR より 14 分短く、燃料消費量は SAR より約 11,100 ポンド多かった。また、MFR の飛行時間は SAR より 6 分短く、燃料消費量は SAR より約 3,400 ポンド少なかった。

サンフランシスコ発成田行きの西行では、飛行禁止エリアを設けた場合、8 フライトの平均で、MTR の飛行時間は SAR より 21 分短く、燃料消費量は SAR より約 11,600 ポンド多かった。また、MFR の飛行時間は SAR より 6 分短く、燃料消費量は SAR より約 5,400 ポンド少なかった。西行で飛行禁止エリアを設けない場合には、8 フライトの平均で、MTR の飛行時間は SAR より 28 分短く、燃料消費量は SAR より約 8,500 ポンド多かった。また、MFR の飛行時間は SAR より 11 分短く、燃料消費量は SAR より約 6,800 ポンド少ない結果となった。

図 20 11 月 23 日から 11 月 30 日までの 8 日分の最短時間ルート (西行)
(実線は飛行禁止エリアを設けた場合、点線は飛行禁止エリアを設けない場合)

表 1 11 月 23 日から 11 月 30 日までの 8 日分のシミュレーションにおける各ルートの飛行時間と燃料消費量の平均値

		Eastbound flight	Westbound flight	
			With restricted area	Without restricted area
Average flight time	Minimum Time Route	7h 49m	10h 15m	10h 08m
	Minimum Fuel Route	7h 57m	10h 30m	10h 25m
	Actual Route	8h 14m	10h 47m	—
	Simulated Actual Route	8h 03m	10h 36m	—
Average fuel consumption	Minimum Time Route	176,596 lbs	232,699 lbs	229,630 lbs
	Minimum Fuel Route	162,042 lbs	215,704 lbs	214,336 lbs
	Actual Route	165,775 lbs	223,063 lbs	—
	Simulated Actual Route	165,459 lbs	221,095 lbs	—

6. まとめ

以上、航空機の最適経路を前進型ダイナミックプログラミングを用いて計算する方法を提案し、また B 747-400 の飛行性能に関する解析結果を示した。そして英国 Meteorological Office による高層風予報データを用いて、成田～サンフランシスコ間を飛行する B747-400 の最適ルートシミュレーションを行った。その主な結果は、次のとおりである。

- (1) アメリカの ARTCC から提供される日々の飛行経路 (PACOTS) は、基本的には最短時間ルートであり、航空機はそのルート上を極力燃料を節約するようにステップ上昇し、巡航している。
- (2) 最短時間ルートは、成田発サンフランシスコ行きの東行ではジェット気流の最強部を通るルートであり、その逆の西行ではジェット気流を北か南に迂回するルートである。
- (3) 西行の最短時間ルートでは、ロシア上空を自由に飛行できるならば、飛行禁止エリアを設けた場合に比べ、8 フライトの平均で飛行時間を 7 分短縮でき、燃料を約 3,100 ポンド節約できた。
- (4) ジェット気流の追い風を利用できる東行の最短時間ルートは、西行の最短時間ルート (飛行禁止エリアを設けた場合) に比べ、8 フライトの平均で飛行時間が 2 時間 26 分、燃料消費量が約 56,000 ポンド少なかった。
- (5) 最短時間ルートでは、ほとんどのフライトにおいて対気速度が最大となる高度 31,000 フィートを常に巡航した。一方、最小燃料消費ルートでは、機体重量が軽くなるにつれて上昇し、最終的には高度 41,000 フィートから 43,000 フィートを巡航することが多かった。
- (6) 最小燃料消費ルートと飛行時間・燃料節約ルートは、通過地点については、最短時間ルートとほぼ一致した。飛行高度については、燃料節約を重視する程、離陸後早い段階から高い高度へ上昇した。
- (7) 最短時間ルートは、実際のルート上をシミュレーションにより航空機を飛行させた場合に比べ、8 フライトの平均で、飛行時間を東行では 14 分、西行 (飛行禁止エリアを設けた場合) では 21 分短縮することができた。しかし燃料消費量は、東行で約 11,000 ポンド、西行で約 11,600 ポンド多くなった。
- (8) 最小燃料消費ルートは、実際のルート上をシミュレーションにより航空機を飛行させた場合に比べ、8 フライトの平均で、燃料消費量を東行では約 3,400 ポンド、西行 (飛行禁止エリアを設けた場合) では約 5,400 ポンド節約することができた。また飛行時間は、東行・西行とも 6 分短かった。

開発した最適ルートシミュレーションプログラムは、極めて有利な飛行経路を提供してくれた。そして現在の PACOTS は、まだ改善の余地があることが明らかになった。なお今回の研究では国際標準大気を仮定し、気温については考慮しなかったが、航空機の飛行性能は気温によってもある程度左右される。今後、気温もデータとして取り入れ、さらに精度の高いシミュレーションを行えるように、プログラムの改良を続ける予定である。

最後に、本研究を行うにあたり、多くの御協力を頂いた日本航空(株)運航部の宮津義廣次長および戸上忠顕主任をはじめとする Dispatcher の方々に、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) (社)日本航空機操縦士協会: Airman's Information Manual Japan.
- (2) 日本航空(株): 社内教育資料.
- (3) 日本航空(株): Flight Plan Data Manual (B747-400).

質 疑 応 答

長岡 栄 (電子航法研究所): 有効性の確認に実際の経路との比較で論じられていますが、実経路決定のアルゴリズムについては調べられましたか。

萩原秀樹: アメリカの ARTCC において行われている飛行ルート計算のアルゴリズムは明らかにされておらず、日本の各航空会社は単にブラックボックスの出力として 3 本の PACOTS ルートを受取り、そのうちから 1 本を選んでるのが現状です。アルゴリズムの詳細は分かりませんが、最適化手法としてはダイナミックプログラミングを用いているものと推測されます。