航空機の経路最適化に関する研究— II. — —気温を考慮した飛行性能に基づくシミュレーション—

鈴木 るり * ・萩原 秀樹 *

A Study on the Optimization of Aircraft Route— II. —

—Simulations Based on the Flight Performance

Corrected for the Air Temperature—

Ruri SUZUKI and Hideki HAGIWARA

Abstract

In this study, the effect of the air temperature on the flight performance of B747-400 was investigated for climbing and cruising and the correction coefficients corresponding to the deviation of temperature from the international standard atmosphere were computed. By applying these correction coefficients to the basic flight performance in the standard atmosphere, we can easily obtain the flight performance in arbitrary air temperature.

Based on the flight performance corrected for the air temperature, a number of minimum fuel route simulations using forward dynamic programming were performed. From the results of the simulations, it was found that compared with the present daily routes provided by the U.S. Air Route Traffic Control Center, about 3% fuel saving was achieved on the average on the minimum fuel routes between Narita and San Francisco.

1. はじめに

現在、日本～北米間を飛行する航空機は、アメリカのオークランドにある ARTCC (Air Route Traffic Control Center) から指示される PACOTS (Pacific Organized Track System) に従った経路 (ウェイポイントで指示される) を飛行している。しかし近い将来、日本から北米への東行の PACOTS の選定を日本が担当する予定となっている。

前回の研究では、B747-400 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等の関係を明らかにした⁽¹⁾。そして、その飛行性能に基づき、高層風予報データを用いて、風をベクトル的に考慮した最適経路シミュレーションを行った。最適経路計算には前進型ダイナミックプログラミングを用いた。シミュレーションが提供した経路は、実際の飛行経路よりかなり有利なものであったが、前回の研究では国際標準大気を仮定しており、気温の影響は考慮されていなかった。また、1993 年 11 月 23 日～11 月 30 日までの 7 日分しかシミュレーションを行わなかったため、航空機の最適経路を求めるアルゴリズムの開発にとどまり、実際の飛行経路との比較による最適経路の有効性の確認が不十分であった。

今回は、気温と飛行性能の関係を調査し、上昇中・巡航中について気温を考慮した飛行性能を求め、その飛行性能を用いる最適経路シミュレーションプログラムを開発した。そして、1994 年 10 月末から 1995 年 1 月初めまでの約 2 カ月の期間について最小燃料消費ルート of シミュレーションを行い、実際のルートとの比較・検討を行ったので、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)

2. 気温を考慮したボーイング747-400の飛行性能

航空機の上昇中・巡航中（水平飛行中）および降下中における飛行性能は、機体重量・飛行高度およびその高度における気温から求められる。前回は、日本航空(株)より入手したボーイング747-400(以下B747-400)の飛行性能データ⁽²⁾より、各飛行性能についての回帰式やデータテーブルを作成した⁽¹⁾。

今回は、上昇時の上昇時間・上昇燃料・上昇速度および巡航時の巡航速度・燃料消費量の5種類の飛行性能について、気温との関係を調査した。降下時については、気温の影響はないものとした。また、巡航方式は前回同様に高速巡航方式（High-speed Cruise）を採用した。

標準気温（国際標準大気気温）における飛行性能の値を X_{ST} とし、飛行中の気温が標準気温より $\Delta T^{\circ}\text{C}$ 高いときの飛行性能の値を $X_{\Delta T}$ とした場合、 $X_{\Delta T}$ は次式により求められるものとした。

$$X_{\Delta T} = X_{ST} (1 + K_{\Delta T}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$K_{\Delta T}$: 標準気温より $\Delta T^{\circ}\text{C}$ 気温が高いときの気温補正係数

X_{ST} は、機体重量と飛行高度の関数として回帰式より求めることができる⁽¹⁾。B747-400の飛行性能データテーブルには、上昇時の性能に関しては X_{ST} および ΔT が $+20^{\circ}\text{C}$ 、 $+15^{\circ}\text{C}$ 、 $+10^{\circ}\text{C}$ 、 -20°C のときの $X_{\Delta T}$ が、巡航時の性能に関しては X_{ST} および ΔT が $+20^{\circ}\text{C}$ 、 $+10^{\circ}\text{C}$ 、 -10°C 、 -20°C のときの $X_{\Delta T}$ が記載されている。それらのデータから気温補正係数 $K_{\Delta T}$ を機体重量と飛行高度に無関係な量として決定した。ある飛行性能に関して4通りの気温補正係数を求めておくことにより、任意の気温における飛行性能を(1)式による4通りの $X_{\Delta T}$ に内挿計算をほどこすことで簡単に算出することができる。

図1は、離陸重量680,000ポンドにおける上昇高度と上昇時間（ある高度まで上昇するのに必要な時間）の関係を示した図である。図中、●は標準気温のときの上昇時間を示し、○は上昇終了時の気温が標準気温より 20°C 高いとき、×は 15°C 高いとき、△は 10°C 高いとき、+は 20°C 低いときの上昇時間を示している。 K_{+20} 、 K_{+15} 、 K_{+10} 、 K_{-20} は、標準気温との気温差が $+20^{\circ}\text{C}$ 、 $+15^{\circ}\text{C}$ 、 $+10^{\circ}\text{C}$ 、 -20°C のときの気温補正係数である。図中の実線は、標準気温における上昇時間の回帰曲線にそれぞれの気温補正係数をほどこして求めた回帰曲線を示している。標準気温より気温が高くなるほど、上昇に要する時間が長くなることわかる。

図2に上昇高度と上昇燃料（ある高度まで上昇するのに必要な燃料）の関係を、図3に上昇高度と上昇速度（ある高度まで上昇する間の平均対気速度）の関係を、図1と同じ気温差について示した。離陸重量および図中の印も図1と同様で、各気温差についての気温補正係数 K を図中に示し、実線は各気温差についての回帰直線である。図2および図3より、ある高度まで上昇するのに気温が高くなるほど多くの燃料が必要であり、上昇速度は速くなることわかる。

図4は、巡航中の飛行高度と対気速度の関

図1 B747-400がある高度まで上昇するのに必要な時間（離陸重量680,000ポンドの場合）

図2 B747-400がある高度まで上昇するのに必要な燃料（離陸重量680,000ポンドの場合）

係を示した図で、●は標準気温における巡航速度を、○は気温が標準気温より20°C高いとき、×は10°C高いとき、また△は10°C低いとき、+は20°C低いときの対気速度をそれぞれ示している。それぞれの気温差における気温補正係数をKで示し、実線で標準気温における回帰直線に各気温補正係数をほどこして求めた回帰直線を示している。図4より、気温が高くなるほど対気速度は速くなることがわかる。最高速度が得られる31,000フィートにおいては、気温が標準気温より20°C高いときの対気速度は520ノットで、20°C低いときの対気速度は476ノットであり、同じ高度でも44ノットの差がある。

図5に、巡航中(飛行高度34,000フィート)における機体重量と燃料消費量の関係を、図4と同じ気温差について示す。同じ機体重量でも気温が高くなるほど燃料消費量が多くなることがわかる。

表1は、気温と各飛行性能の関係をまとめたものである。気温が標準気温より高い場合は、上昇時間は長く、上昇燃料は多く、上昇速度は速くなる。また巡航中の対気速度は速くなり、燃料消費量は多くなる。気温が標準気温より低い場合は、その逆となる。

3. 気温を考慮した飛行性能を用いた最小燃料消費ルートのシミュレーション例

前回の研究で使用した気温を考慮していない飛行性能を用いた場合と、今回求めた気温を考慮した飛行性能を用いた場合について、最小燃料消費ルートシミュレーションを行い、両ルートにどの程度の差が生じるかを調査した。最適経路計算は、前回同様前進型ダイナミックプログラミングを用いた⁽¹⁾。シミュレーションに使用した高層風・気温データは、日本航空㈱から入手した米国のNational Meteorological Centerによる北太平洋上空の高層風・気温データである。

図6に、1994年10月29日2023GMTにサンフランシスコを離陸し、成田へ向かった西行のフライトのルートを示す。図中、実線で気温を考慮した飛行性能を使用して求めた最小燃料消費ルート(以後MFR (Minimum Fuel Route)と略す)、点線で気温を考慮していない飛行性能を用いたMFR、矢印で実際の飛行ルート(以後AR (Actual Route)と略す)を示す。また、10月30日00GMTの250hPa等圧面高度上における風向・風速図を重ねて示した。太い実線で囲まれているのは、飛行禁止区域である。

図3 B747-400がある高度まで上昇する間の平均対気速度(離陸重量680,000ポンドの場合)

図4 B747-400の巡航中における対気速度

図5 B747-400の巡航中における1時間当たりの燃料消費量(飛行高度34,000フィートの場合)

図6において、3本のルートの形状に大きな差は見られないが、気温を考慮したMFRが最も北側となっている。3本のルートとも、東太平洋では45°N付近、西太平洋では40°N付近のジェット気流の強い区域を迂回するルートとなっている。この例では、両MFRは、ARに比べ約6.9%の燃料を節約することができた。

図7に、図6のフライトの飛行距離と飛行高度の関係を示す。実線がAR、点線が気温を考慮した飛行性能を用いたMFRを表している。この例では、気温を考慮しなかった飛行性能を用いたMFRの飛行高度は、気温を考慮した場合と同じであった。この飛行の離陸重量は767,478ポンドであった。ARでは離陸後すぐに高度35,000フィートまで上昇し、その後少しずつ高度を上げて、飛行距離約3,800マイル以後は39,000フィートを飛行した。一方MFRでは、機体重量が重いうちはARより7,000フィート低い28,000フィートを飛行し、燃料を使用して機体重量が軽減するにつれ、ARより大幅に高度を上げて飛行する方法が採られた。飛行距離が3,200マイル以後は、高度40,000フィートを飛行した。前述したMFRの6.9%の燃料節約は、主としてARとの飛行高度の差によって得られたものと考えられる。

上記と同じシミュレーションを東行・西行について、1994年10月28日(西行は27日)～95年1月8日までの約2カ月にわたって行った。その結果、気温を考慮した飛行性能を用いた場合と気温を考慮しなかった場合のMFRは、ほとんどのシミュレーションにおいてルートの形状・飛行高度とも大きな差はなかった。これは、飛行経路上の気温が出発地から目的地まで常に標準気温より高い(もしくは低い)ということではなく、標準気温より高い場合と低い場合が混在するので、気温の高低による飛行性能の変化が相殺されてしまうためと考えられる。しかし図1～図5に示すように、航空機の飛行性能は気温によりかなり大きく変化するので、信頼性の高い最適ルートを得るには気温を考慮した飛行性能を用いてシミュレーションを行う必要がある。

4. 実際の飛行ルートと最小燃料消費ルートの比較

前述した気温を考慮した飛行性能を用いたMFRとARについて、東行・西行別に飛行ル

表1 気温と飛行性能の関係

	標準気温より 気温が高い場合	標準気温より 気温が低い場合
上昇時間	長い	短い
上昇燃料	多い	少ない
上昇速度	速い	遅い
巡航中の 対気速度	速い	遅い
巡航中の 燃料消費量	多い	少ない

図6 1994年10月29日 サンフランシスコ発成田行きのフライトにおける最小燃料消費ルート
(実線: 気温を考慮した最小燃料消費ルート、
点線: 気温を考慮していない最小燃料消費ルート、
矢印: 実際の飛行ルート)

図7 1994年10月29日 サンフランシスコ発成田行きのフライトにおける最小燃料消費ルートの飛行高度
(点線: 気温を考慮した最小燃料消費ルート、
実線: 実際の飛行ルート)

図8 1994年10月28日から95年1月8日までの66フライト分の実際の飛行ルート群 (東行)

図9 1994年10月28日から95年1月8日までの66フライト分の最小燃料消費ルート群 (東行)

図10 1994年10月28日から95年1月8日までの66フライト分の実際の飛行ルートの飛行高度 (東行)

図11 1994年10月28日から95年1月8日までの66フライト分の最小燃料消費ルートの飛行高度 (東行)

ートや飛行高度、燃料消費量等の比較を行った。東行については、1994年10月28日～95年1月8日の間の66フライト、西行については1994年10月27日～1月8日の間の67フライトについて比較を行った。

4.1 実際の飛行ルート群と最小燃料消費ルート群

図8に、成田からサンフランシスコへの東行のAR群を示す。ARは飛行記録集積装置(AIDS; Aircraft Integrated Data System)に記録された各フライトの位置データをプロットしたもので、矢印の先端がAIDSに記録された緯度・経度を示している。この緯度・経度は、ARTCCから指示されたルートのウェイポイントに最も近い位置の緯度・経度が記録されている。図より、ARTCCのルートは緯度1°毎、経度10°毎に格子点を設定したダイナミックプログラミングを用いて求められたルートであることが推測される。ただし、千島列島の東方からベーリング海にかけては、北太平洋複合経路システム(NOPAC; North Pacific Composite Route System)というルート群が定められているため、格子点の間隔が他の区域とは異なっている。図9は、上記と同じ期間における成田からサンフランシスコへのMFR群である。シミュレーションでは、出発地から目的地への大圏ルートを10等分し、各等分点を通り大圏ルートに直交する大圏上に、水平方向に60マイルの間隔で格子点を設定している⁽¹⁾。図中、他のルートから離れ1本だけアリューシャン列島の南側からアラスカ湾の中部を飛行しているフライトがある。これは11月16日のルートで、この日はジェット気流の蛇行が大きく、西太平洋では30°N付近にある西風の強い区域が、160°W付近では55°N以北まで北上しその後125°W付近では40°Nまで南下した。MFRはその蛇行に沿ったルートとなっている。東行においては、AR群・MFR群ともジェット気流を利用するため、35°N～53°Nの比較的狭い緯度帯を飛行している。

図10に、AR群の飛行距離と飛行高度の関係を示す。この飛行高度もAIDSに記録されたものである。ほとんどのルートが離陸後すぐに35,000フィート以上まで上昇し、各フライトの半ば付近(飛行距離2,000マイル付近)で37,000～39,000フィートに上昇している。その後は余り高い高度を飛行せず、それぞれのフ

図12 1994年10月27日から95年1月8日までの67フライト分の実際の飛行ルート群 (西行)

図13 1994年10月27日から95年1月8日までの67フライト分の最小燃料消費ルート群 (西行)

図14 1994年10月27日から95年1月8日までの67フライト分の実際の飛行ルートの飛行高度 (西行)

図15 1994年10月27日から95年1月8日までの67フライト分の最小燃料消費ルートの飛行高度 (西行)

ライト毎の飛行高度差はあまり大きくない。

図11は、MFR群の飛行高度である。ほとんどのフライトにおいて、離陸後に上昇する高度は35,000フィート以下とAR群の飛行高度に比べ低くなっている。離陸直後で機体重量が重いときは低い高度を飛行し、飛行距離が大きくなり機体重量が軽減するにつれて段階的に高度を上げていく方法が採られている。これは、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ためである⁽¹⁾。また各フライト毎の飛行高度差もARより大きく、最高飛行高度もARより高い場合が多い。

図12に、サンフランシスコから成田への西行のAR群を示す。NOPAC以外の区域では、東行と同様に緯度1°毎経度10°毎の格子点が現れている。AR群は、主にベーリング海経由の北方ルートと大圏以南を飛行する南方ルートに大きく分かれている。

図13は、図12と同期間のサンフランシスコから成田へのMFR群である。AR群ほどはっきりしていないが、MFR群もベーリング海を経由する北方ルートと40°N付近を中心とする大圏以南のルートに大きく分かれている。AR、MFRともルート群の幅が30°N～60°Nと東行よりも広がっている。これは東行とは逆にジェット気流の強い区域を南北に迂回しているためである。

図14は、西行のAR群の飛行距離と飛行高度の関係を示す。離陸直後は機体重量が重いため高い高度まで上昇できず、東行のAR群より低い32,000～35,000フィートを飛行した。飛行距離が大きくなり機体重量が軽減すると徐々に高度を上げていき、最終的には39,000～41,000フィートを飛行し、各フライト毎の飛行高度差は東行のAR群より大きくなった。

図15は、MFR群の飛行高度である。離陸直後は27,000～35,000フィートと、ほとんどのルートがAR群より低い高度までしか上がっていない。機体重量の軽減とともに飛行高度を上げていくが、その上昇する

高度差はARよりも大きく、離陸直後と着陸直前の飛行高度差もARより大きくなった。今回のシミュレーションにおける最適化の評価対象は燃料消費量のみであり、飛行時間を評価対象としていないため、燃料節約のために機体重量が軽減するとARより大幅に高度を上げていく飛行方法が採られている。

ARにおいては、離陸後比較的早く上昇しその後の飛行高度差が小さい場合が多いが、燃料節約のためには図15に示されるように、機体重量が重いうちは低い高度を飛行し機体重量の軽減に合わせて上昇していく方法が有効である。

4.2 実際の飛行ルートと最小燃料消費ルートの燃料消費量

ARとMFRについて燃料消費量を比較する場合、ARにおいては交通管制上の理由から巡航中の対気速度が指定される場合があり、また目的地上空で着陸待ちのため空中待機を行うこともある。このような場合には、AIDSの燃料消費量のデータをMFRの結果と直接比較することができない。そこで、MFRを求めたのと同じ高層風・気温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。上昇時および降下時の経由地点については、空港付近で大きく迂回する場合があるのでAIDSの位置データを使用せず、飛行性能に従った上昇・降下を仮定した。そして、巡航中についてのみAIDSの位置データを使用した。このルートを、SAR (Simulated Actual Route) と呼ぶことにし、そのSARの燃料消費量をMFRの燃料消費量と比較した。

図16は東行、図17は西行におけるSARとMFRの燃料消費量を、出発日を横軸にとり示した図である。図中、□を点線で結んだものがSARの、○を実線で結んだものがMFRの燃料消費量を示している。途中、大きく途切れているのは高層風データの欠落日である。それ以外でSARの点線が途切れているのはAIDSデータが得られなかった日である。また、1点鎖線でSAR、2点鎖線でMFRの燃料消費量の平均値をそれぞれ示した。

東行・西行の全フライトにおいて、MFRの燃料消費量の方がSARの燃料消費量より少なくなっている。東行では、燃料消費量の平均値はSARが171,918ポンド、MFRが166,873ポンドで、MFRはSARに比べ平均して5,045ポンドの燃料が節約できた。西行では、SARが226,389ポンド、MFRが219,395ポンドで、MFRはSARに比べ平均して6,994ポンドの燃料の節約ができた。

燃料消費量の平均値は、西行が東行より50,000ポンド以上多かった。また、東行では各フライト間の燃料消費量の差は、最大で約40,000ポンドであるのに対し、西行では最大で約60,000ポンドと大きくなっている。これは、西行では強いジェット気流を北か南に大きく迂回しなければならないため、ジェット気流の南北方向の変動により燃料消費量にも大きな差が生じたのである。

4.3 実際の飛行ルートと最小燃料消費ルートのVertex

図18に東行の、図19に西行の各フライト毎のVertex(最高緯度)を示す。□を点線で結んだものがARの、○を実線で結んだものがMFRのVertexである。両図において、サンフランシスコの緯度を1点鎖線で、成

図16 1994年10月28日から95年1月8日までの各フライトの燃料消費量 (東行)

図17 1994年10月27日から95年1月8日までの各フライトの燃料消費量 (西行)

図18 1994年10月28日から95年1月8日までの各フライトのVertex (東行)

図19 1994年10月27日から95年1月8日までの各フライトのVertex (西行)

田の緯度を2点鎖線で示した。各フライトにおいて、成田より低緯度を経由した場合にはそのルートの最低緯度を、ARについては□で、MFRについては○で示した。

図18の東行において、ARとMFRのVertexに大きな差はなく、ARとMFRはほぼ一致していたことがわかる。10・11月はVertexが $48^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ にある場合が多いが、12・1月はVertexが $38^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ に移った。これはジェット気流の軸が11月の終わりに南に移動したためである。

図19の西行についても、ARとMFRのVertexに大きな差は見られず、ARとMFRはほぼ一致していたと言える。また11月の初旬までは、南方ルートが多かったために最低緯度が示されているフライトが多い。12・1月は、ジェット気流の軸が南に下がったために、AR・MFRとも北方ルートとなった。

5. まとめ

今回の研究では、日本航空㈱から提供されたデータを用いてB747-400の気温と飛行性能の関係を調査し、上昇時間・上昇燃料・上昇速度および巡航中の対気速度・燃料消費量の5つの要素について、各要素毎に4通りの気温補正係数を算出した。その気温補正係数を用いることで、全ての機体重量と飛行高度に対し、任意の気温における飛行性能を求めることが可能となった。

最小燃料消費ルートのシミュレーションにおいて、気温を考慮した飛行性能を用いた場合と、気温を考慮しなかった場合とでは、最小燃料消費ルートの形状や飛行高度に大きな差は見られなかった。これは、飛行ルート上の気温が標準気温より高い時と低い時が混在するので、気温の高低による飛行性能の変化がある程度相殺されたためと考えられる。しかし、気温を考慮した飛行性能を用いることにより信頼性の高い最適ルートを得ることができ、飛行時間や燃料消費量を精度良く推定することが可能となった。

次に、1994年10月末から95年

1月初めの約2カ月の期間について、気温を考慮した飛行性能を用いたMFR(最小燃料消費ルート)とAR(実際のルート)を比較した。MFRでは、機体重量が重いうちは低い高度を飛行し、機体重量の軽減に合わせて高度を上げていく飛行方法により、燃料の節約を図ることができた。表2に、AR・SAR(AR上をシミュレ

表2 各ルートの飛行時間と燃料消費量の平均値
(東行66フライト分、西行67フライト分)

		Eastbound flight	Westbound flight
Average flight time	Actual Route	8h 20m	10h 38m
	Simulated Actual Route	8h 07m	10h 22m
	Minimum Fuel Route	8h 01m	10h 19m
Average fuel consumption	Actual Route	174,322 lbs	233,684 lbs
	Simulated Actual Route	171,918 lbs	226,389 lbs
	Minimum Fuel Route	166,873 lbs	219,395 lbs

ーションにより航空機を飛行させた場合のルート)・MFRの飛行時間と燃料消費量の平均値を示す。前述したようにARとMFRの平均値は直接比較できないため、SARとMFRの平均値を比較すると、東行・西行ともMFRの方が飛行時間で数分早く、燃料消費量では東行で約5,000ポンド、西行で約7,000ポンドの燃料の節約ができた。これは、東行・西行それぞれの使用燃料の約3%に相当する。高層風の変動が激しい冬季の2カ月間についてMFRとSARの比較を行ったことで、このシミュレーションの有効性が再確認できた。この結果から、PACOTSの経路選定システムとフライトプランにおける飛行高度の決定にはまだ改善の余地があると言える。

アメリカのARTCCのシミュレーションは、ある一定のフライトレベルにおける2次元(緯度・経度のみ)の経路最適化であり、高度については検討の対象としていない。本研究で開発したシミュレーションは、経路と高度の最適化を同時に行えることが大きな利点であり、この手法が実用化されれば、実際の航空機の経路選定に大きく寄与すると考えられる。

最後に、前回の研究から引き続き多くの御協力を頂いた日本航空(株)運航部の宮津義廣氏および戸上忠顕氏をはじめとするディスパッチャーの方々と、同社情報システム本部の市来敏綱氏に、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 萩原秀樹・鈴木るり・生田陽一：航空機の経路最適化に関する研究，日本航海学会論文集，第91号，p.141-152，1994年9月。
- (2) 日本航空(株)：Flight Plan Data Manual(B747-400)。

質 疑 応 答

天井 治(運輸省電子航法研究所)：航空路における最低飛行高度や管制における安全間隔等の制限を考慮してシミュレーションをなさいましたか。

鈴木るり：シミュレーションでは、垂直方向の格子点を20,000フィートから44,000フィートまで1,000フィート間隔で設定しており、上昇・降下中以外は20,000フィート以下は飛行しないようにしています。また、今回は1機の航空機の最小燃料消費ルートについてシミュレーションを行いましたので、管制による制限については考慮していません。