

ダイナミックプログラミングを利用した 太平洋線の航路決定方式

神子良夫・森 彪・五十嵐有司

1. はじめに

各航空会社は、航空機の飛行前に目的地までの飛行計画(以下フライトプランという)を作成し、航空機はそれに沿って目的地まで飛行する。フライトプランは区間と航路が同じであっても、気象条件、特に風向と風速および旅客と貨物の搭載量が変わると所要時間や燃料搭載量が変わるので、毎回飛行前に作成することになっており、日本航空ではコンピュータを使用して作成している。フライトプランは航空機の航路、高度、巡航速度を決定し、所要時間と必要燃料量を算出し、最大許容離陸重量を決定している。

飛行航路は区間により途中の通過地点等航路を定められていることが多いが、太平洋上では割合自由な航路を、運航する各航空会社が決めて飛ぶことができる。その際追い風を利用し、向い風を避けた航路を選ぶと、目的地まで短時間で着き、燃料消費量を減らすことができる。そのため太平洋線のフライトプランの作成に当っては、航路の決定が重要な要素となる。

これまでの航路決定方法は、各区間の飛行経験から得られた数十ないし百数十の飛行径路に対し、気象条件を考慮してすべての所要時間を計算し、その中で最短時間のものを航路として決定す

るという方法であり、太平洋線についても同様な方法で航路が決定されていた。

最近、太平洋線の航路決定方式の見直しが行なわれ、DP的な考え方を利用すると所要時間の短い航路が選定できることがわかったので、以下にこれを紹介する。

2. 気象情報とその入手

ジェット機は地上3万フィート(9000m)以上の航路を飛行する。この高度には地上では想像もできない強い風が帯状に吹いている。この風のことをジェット気流というが、これを上手に利用することが飛行時間の短縮と燃料消費の削減に大きく作用する。またこのジェット気流は地上の気象にも大きな影響を与えているので、この上層気象の観測は世界的な規模で行なわれている。WMO (World Meteorological Organization: 国連世界気象機構)の加盟各国は観測気球を上げ、そのデータを米国気象庁内のNMC (National Meteorological Center)に集め解析し、毎日2回(グリニッチ標準時で0時と12時)12時間後、18時間後、30時間後の予測を行なっている。その予測結果は経度5°、緯度2.5°間隔のメッシュの交点について、高度850MB, 700MB, 500MB(これを低層とよぶ)、400MB, 300MB, 250MB, 200MB(中層)、150MB, 100MB(高層)の各交点の風

MB: milli-Bar

かみこ よしお、もり あきら、いがらし ゆうじ
日本航空㈱ 情報システム部

向、風速、気温および圏界面高度（対流圏と成層圏の境目）について数値化されている。この数値化された気象情報をデジタルウエザーと呼び、各航空会社に無料で提供されており、日本航空もNMCからこのデータサービスを受けている。

日本航空では、このデジタルウエザーデータの中層のみを利用している。このデータ受信は午前1時～午前4時（グリニチ12時観測データ分）と午後1時～午後4時（グリニチ0時観測データ分）に特別な回線（1050BPS）でNMCと日本航空のコンピュータ対コンピュータでやりとりが行なわれ、1回に約30万桁を受信している。日本航空ではこのデータを整理してフライトプラン用気象データに直している。

3. DPの定式化

最小飛行時間コース問題を次のように考えてみる。

「飛行機が航行できる場を複数（有限な）の点の集合体と考え、その点をどのように通っていったら目的地までの飛行所要時間が最小となるか。」

そこで今1, 2, 3, ..., Nという点がある場合、1からNに至る最短時間を求めることにする。相隣なる点*i, j*の間では*i*から*j*に到着するまでに要する時間を*t_{ij}*とする時、*i*から出発してNまでに、

$$i \rightarrow i_2 \rightarrow i_3 \cdots i_k \rightarrow N$$

の順に通っていったとすると、全所要時間は、

$$T(i, i_2, i_3, \dots, i_k) = t_{i, i_2} + t_{i_2, i_3} + \dots + t_{i_k, N}$$

となるから、

$$f_i = \min_{(i_2 \dots i_k)} T(i, i_2, \dots, i_k) \quad (1-1)$$

とおけば*f_i*が1からNまでの最短時間となる。そこで最適性の原理「初期の状態と最初の決定が何であっても、残った決定は最初から生じた状態に関して最適政策を構成しなければならないという性質を持っている。」から(1-1)式は、

$$f_i = \min_{i_2} \{ t_{i, i_2} + \min_{(i_2, i_3 \dots i_k, N)} \} \quad (1-2)$$

となる。ここで*i₂=j*とおけば(1-2)式は、

$$f_i = \min_j (t_{ij} + f_j) \quad (i=1, 2, \dots, N-1) \quad (1-3)$$

となり*i=N*の時は当然、

$$f_N = 0 \quad (1-4)$$

となる。そこで1からNに到る最短時間は(1-4)式の境界条件のもとに(1-3)式を解けばよい。

(1-3)式をコンピュータを使って解くために次のように反復計算を行なう。

(i) initial SET

$$f_i^{(0)} = t_{iN} \quad (i=1, 2, \dots, N-1)$$

$$f_N^{(0)} = 0$$

(ii) 反復1回目

$$f_i^{(1)} = \min_{j \neq i} (t_{ij} + f_j^{(0)}) \quad (i=1, 2, \dots, N-1)$$

$$f_N^{(1)} = 0$$

(iii) 反復*k*回目

$$f_i^{(k)} = \min_{j \neq i} (t_{ij} + f_j^{(k-1)}) \quad (i=1, 2, \dots, N-1)$$

$$f_N^{(k)} = 0$$

(iv) 反復(*k*+1)回目

$$f_i^{(k+1)} = \min_{j \neq i} (t_{ij} + f_j^{(k)}) \quad (i=1, 2, \dots, N-1)$$

$$f_N^{(k+1)} = 0$$

(v) 停止条件

$$f_i^{(k+1)} - f_i^{(k)} \approx 0 \quad (i=1, 2, \dots, N-1)$$

4. モデルによるDP方式選定の最短時間航路と現行方式選定の最短時間航路の比較

図1のように横400海里、縦200海里の地域を横20、縦40の網目に区切り、地点(15, 2)から地点(1, 6)まで時速600ノットで飛行する場合の両方式の最短飛行時間航路を比較してみる。DP方式では、ある点から次の点を選択するのに隣接8地点だけの所要時間を計算し、通過地点までの最短所要時間とその時の航路を記憶しておき、到着地点までの反復計算を行なう。現行方式では0の点を経由してゆく1024通りの航路に対して所要時間を計算し、その中で最短のものを航路として決定する。図2と図3はその計算例である。*J*≥6の地域では西風が吹いており*J*≤6の地域では東風

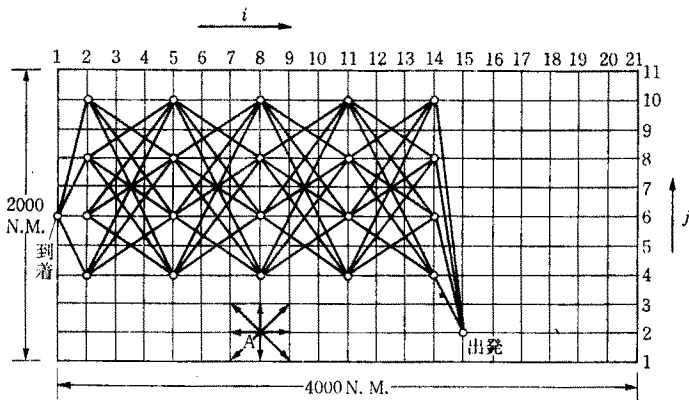


図1 計算条件

- ① 風: $J \geq 6$ の Area に関しては 90° の風 $J=0$ のとき 0 で J の増加方向に 1 N.M. ゆくごとに W ふえる。
 $J < 6$ の Area に関しては 270° の風 $J=0$ のとき 0 で J の減少方向に 1 N.M. ゆくごとに W ふえる。
- ② 航空機の飛行速度: 600 N.M./h.

が吹いており、いずれも $J=6$ に近づくにつれて風速が減ってくるものとしてある。図2と図3を見てわかるとおり、向い風が強くなればなるほど現行のあらかじめの通過地点を仮りに設定しておく方式では航路の選択の自由度が少ないために最短時間飛行航路を見逃し、大きな所要時間の差となって現われる。図3の特徴は出発直後に見掛上の迂回径路をとっていることであり、実運航の場合と合っている。出発後はなるべく早くジェット気流に乗る地点と巡航高度に達するように飛行するので迂回航路をとることがある。一方到着地点の付

近では空港に着陸するための進入コースが定められており、迂回航路をとることはない。以後現行方式を旧方式と呼び、新方式の航路決定方法と特徴を旧方式と比較しながら記述を進めていく。(注)

5. DP による太平洋線の航路決定

日本航空は太平洋上の定期航空路のうち成田～バンクーバー、サンフランシスコ、ロスアンゼルス

(注) 600ノットは仮定の速度である。後述のようにB-747の巡航速度は475ノット程度で600ノットにはならない。

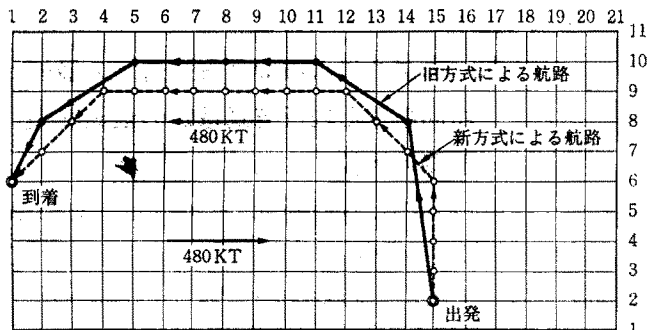


図2 条件 $W=1.2 \text{ N.M./h/N.M.}$ の場合
 <比較>

方式	目的地までの所要時間
旧方式	4時間50分
新方式	4時間36分

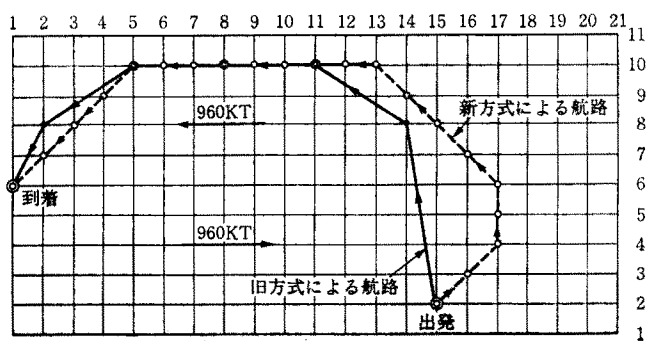
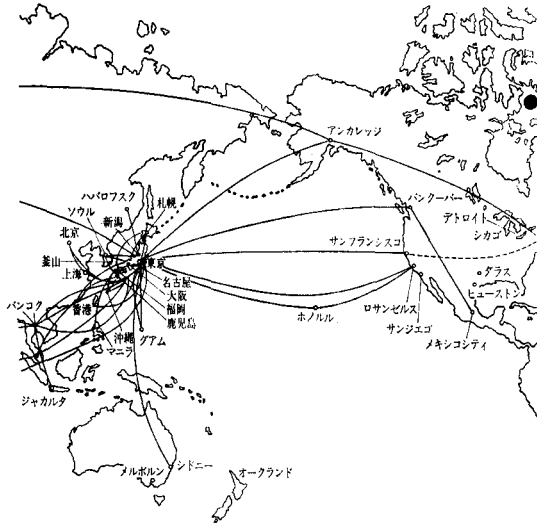


図3 条件 $W=2.4 \text{ N.M./h/N.M.}$ の場合
 <比較>

方式	目的地までの所要時間
旧方式	4時間23分
新方式	3時間37分

表 1 太平洋沿岸主要空港の位置

成 田	(NRT)	東経 140°	北緯 36°
バンクーバー	(YVR)	西経 123°	北緯 49°
サンフランシスコ	(SFO)	" 122°	" 38°
ロスアンゼルス	(LAX)	" 118°	" 34°
ホノルル	(HNL)	" 158°	" 21°



ス、ホノルル間をB-747で運航している。その位置は表1のとおりである。新方式による航路決定のため、以下の2つの準備作業を行なっておく。太平洋上を東経150°と西経130°の間を10°置き、北緯15°と北緯60°の間を1°置きに分割して仮りの経由地点を設定する。そして高度33000フィートの航空機(B-747)の標準巡航速度475ノットと前述のデジタルウエザーの風向と風速により、各経度上の各地点から隣接経度上の各地点までの所要時間をすべて計算しておく。

また出発地点と到着地点については、その地点と指定した経度上の各地点までの所要時間を別に計算する。これは出発地点と到着地点の近傍には指定された空域や通過地点があり、また高度の上昇や降下もともなりし、さらに追い風を利用するために見掛け上の迂回航路をとる場合があるので、きめの細い所要時間計算が必要なためである。区間による指定経度の範囲は表2のとおりである。以下航路選択決定方法を成田→ホノルル間

表 2 飛行区間の空域

NRT—YVR	[E150° ~ W130°]
←	N35° ~ N59°
→	N30° ~ N59°
NRT—SFO	[E150° ~ W130°]
←	N35° ~ N59°
→	N30° ~ N59°
NRT—LAX	[E150° W130°]
→	N34° ~ N59°
←	N30° ~ N59°
NRT—HNL	[E150° ~ W170°]
→	N21° ~ N40°
←	N18° ~ N40°
共 通 域	[E150° ~ W130°]
	N18° ~ N59°

を例に Step を追って説明する。

(Step—1) 西経170°上の北緯23°と40°の間の地点からホノルルまでの所要時間を計算する。そして各地点からホノルルまでの最小所要時間と経路をその地点のデータとして保持する。

(Step—2) 成田から東経150°上の北緯24°から北緯40°の間の各地点までの所要時間を計算する。各地点のデータとして最小所要時間と経路を保持する。

Step—1 と—2 の緯度範囲は到着か出発または風向によって北寄または南寄に変わることもあり得る。

(Step—3) 西経160°上の各地点から西経170°上の各地点までの所要時間を計算し、西経160°の各地点からホノルルまでの最小所要時間を加えることにより西経170°上の各地点からホノルルまでの時間が求まり、前の Step と同様に各地点からホノルルまでの最小所要時間と経路をその地点のデータとして保持する。

以下、これを東経150°上の各緯度の地点まで繰返す。緯度範囲は Step—1 と Step—2 の範囲よりもずっと広がっている。ただしこの間では風向と風速がよほど異常でないかぎり見掛け上の迂回航路または北進南進によって所要時間が短い航路が

見つかることはない。また東経150°の地点の各緯度は Step—2 で所要時間を計算した範囲以外の地点については省略することができる。

(Step—4) 成田と東経150°の各緯度間の所要時間はすでに Step—2 で計算されているので、それを加えるとその地点を通過する成田—ホノルル間の最小所要時間が求まる。その中で最小時間の航路をフライトプラン用の航路として決定する。

6. DP による航路決定方式の効果

ここで新方式と旧方式の比較をしてみる。図1の○を經由地点にすると飛行可能な航路は1024通りある。しかし(8, 4) (5, 10) (2, 4)を通る経路を含むもの等は最短時間航路にはなり得ないことは明らかである。旧方式では当日の風向、風速等に無関係に最短時間航路になりそうなものをあらかじめ選んでおき、当日の風向、風速によりおのおの所要時間をすべて計算して、最短時間のものを選び決定している。

新方式ではどうであろうか。当日の風向、風速に対して(8, 4) (5, 10) (2, 4)の経路に対しても少なくとも1回だけは計算するが、その経路が最短所要時間航路の一部となり得ないとわかった時にそれ以後はまったく計算しないで済ませている。もっと本質的な言い方をすれば、細分化された地点間所要時間の経路所要時間への加算は1回だけしか行なわない。そしてこれまでの所要時間計算で最短所要時間航路となり得ないとわかった経路のことは忘れさせている。その結果旧方式では4×5の20地点を經由する航路1024のうち限定された数十または数百の航路の中で最短時間航路を選び決定しているが、新方式では7×13=91地点を經由する航路約1千億の航路の中で最短所要時間航路を選び決定していることになる。これが新方式の効果である。旧方式で決定された航路と新方式による航路を比較すると、航路が非常に離れている場合ほど新方式で決定された航路の所要時間短縮効果が大きい。テスト中で成田～バンク

ーバー間(平均8時間30分)の航路で、約15分短縮できる航路が見つかったことがある。テスト中で見つかった所要時間の短い航路は、新方式が実施されるまで旧方式の事前設定コースの中に登録しておくことにしている。

7. おわりに

フライトプランの作成は運航システムの中での基幹業務であり、1960年に日本航空の最初のジェット機であるDC—8の導入に際し小型の専用コンピュータによりコンピュータ化されたものである。その後コンピュータの機種変更およびデジタルウエザーとの結合等、種々の変遷があつて1974年以後現行方式でIBM-370-158により航路決定が行なわれている。この間、手作業をコンピュータに置き換えたような基本ロジックはまったく変わっていない。IBM-370によってフライトプランを作るようにした時、基本ロジックの見直しが行なわれ、新方式の検討が行なわれたが、コンピュータの処理能力に問題があるとして見送られた。

最近燃料価格の高騰がいちじるしく、日本航空では燃料費が1979年度では全費用の約1/3にも達している。社内各部門で燃料費節減のための方策が検討実施されており、本件もそのうちの1つである。新方式には高性能コンピュータへの更新時に移行する予定である。新方式の採用によりB-747の太平洋線の運航に対し、1便当たり平均600リットル、年間750キロリットルの燃料節減がはかれると見込んでいる。

次号予告

特集 スポーツのOR PART-II

インタビュー：川上哲治氏にきく野球哲学

スポーツ教育のためのM I S

……………舛本直文・松田義幸
スポーツを見ることの面白さについて

……………竹内 啓

スポーツの戦略(2)……………増田伸爾

強さと試合形式の合理性……………宮川雅巳・鳩山由起夫

総合報告

最近の多目的決定理論の動向……………竹田英二

ORサロン

社会工学とOR