

ダイナミック・プログラミングによる航空ネットワークのスケジューリングモデル

徳永幸之*・稲村 肇**

本研究で提案するモデルは、ラウンド&ロビン型の航空ネットワークを対象とした、ダイナミック・プログラミングによる航空機材のスケジューリングモデルである。本論では、逐次決定法、資源配分法及び分枝限定法による定式化を行い、計算時間や解の比較検討を行った。その結果、小規模ネットワークに対しては分枝限定法、大規模ネットワークに対しては逐次決定法が有効であることが明らかとなった。さらに、北海道におけるコンピューター路線に本モデルを適用し、本モデルの適用性を確認した。

Keywords : aircraft scheduling, round and robin type network, dynamic programming

1. 本研究の背景

近年、わが国においても地方都市間を結ぶコンピューター航空に対する要望が高まっており、その導入検討に当たっては、需要予測と運航計画に基づく採算性の検討が不可欠である。一般に、航空機材は高価で導入機数が限られるため、効率的な運航計画(機材のスケジュール)を作成できるか否かが、採算性に大きく影響してくる。

航空ネットワークには、1か所または数か所の空港(ハブ空港)から放射状の路線を考えるハブ&スポーク型のネットワークと、全ての空港間を結ぶ路線を考えるラウンド&ロビン型のネットワークがある。ハブ&スポーク型はネットワークが大規模になってもルート数はそれほど増加せず、需要の少ない空港間にもハブ空港経由の乗継ぎによるサービスが可能であるなどの長所を持つが、乗継ぎにより直行便に比べ乗客数が減少するなどの問題点もある。米国においてはネットワークが大規模であることなどからハブ&スポーク型のネットワークとなっており、米国を中心とする航空ネットワークのスケジューリングに関する研究もハブ&スポーク型のネットワークに適用したものがほとんどである。しかし、コンピューター航空のように比較的規模の小さいネットワークにおいては、ラウンド&ロビン型のネットワークに対しスケジューリングを考えることが望ましい。

また、最近では、まず需要に応じて運航頻度を決め、次いでその運航頻度を制約条件としてスケジュールを決定する段階法が主流となっている。しかし、わが国のように比較的近距离で競合交通機関と競争関係にあり、出発時刻に非常に敏感であると考えられるビジネス客が多い場合、乗客数の時刻変動を考慮できるモデルが必要で

ある。

このようなスケジューリングモデルは、航空会社の運営面でも地域振興面でも重要な課題であるが、未だ実用的なモデルは開発されていない。また、今回想定しているような需要及びネットワークは、日本国内のみならず東南アジアやその他開発途上国における国内線にも多く、この研究に対する需要は多い。

2. 従来の研究と本研究の目的

これまでの航空ネットワークのスケジューリングに関する研究は、Etschmaierら¹⁾により整理されている。すなわち、1950年代以降主として米国において数理計画法によるスケジューリングが研究され、計算機の発達に伴い急速に発展してきた。しかし、米国における航空ネットワークの規模が非常に大きいことや制約が非常に多いことから、数理計画法に基づく研究は停止し、1960年代以降は旧来の単純なスケジューリング結果を各担当部に提示しこれを修正する、いわゆるマン・マシン・システムの研究が主流をなしている。しかし、今我々が想定しているネットワークは小規模(10空港, 10機程度)であるため、数理計画法で扱えるならそれが望ましいことは言うまでもない。

線形計画法(LP)によるモデルはDaskinら²⁾の研究をはじめとして数多くあるが、これらはハブ&スポーク型ネットワークを対象としたものである。筆者ら³⁾はラウンド&ロビン型のネットワークに対しLPモデルを作成したが、飛行の連続性が保証されないこと、夜間駐機等の空港側制約条件を取り込むことが困難であることが明らかとなった。

動的計画法(DP)によるモデルもSimpson⁴⁾, Chan⁵⁾の研究をはじめ数多くあるが、これらは段階法における運行頻度決定等の各段階に適用したものである。しかし、需要は一般に朝夕ピークを持つ分布形となっており⁶⁾,

* 正会員 東北大学助手 工学部土木工学科
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科

出発時刻によってはロードファクターが低くなり、段階法においては頻度決定にフィードバックが必要となる。

このような乗客数の時刻変動を考慮するには、直接フライト選択を行う直接法を用いるべきであると考えられる。田村ら⁷⁾は、ハブ&スポーク型の地域航空ネットワークを列挙法に分枝限定法を用いて解いている。しかし、この手法をラウンド&ロビン型のネットワークに拡張した場合、列挙法では全ての組合せを考慮するため、空港数の増加や出発時刻の時間間隔を短くすることにより計算時間が飛躍的に増大する。これに対し、DPでは各段階(時間断面)毎にそれまでの最適解のみを考えれば良いため、組合せの数はそれほど増加せず、計算時間を大幅に短縮することが可能である。

以上のことから本研究では、DP直接法によりモデルを作成する。本モデルの特徴は以下のとおり。

- ① ラウンド&ロビン型ネットワークに対応できる。
- ② 出発時刻及びルートを自由に設定できる。
- ③ 機種の違いを評価できる。
- ④ 乗客数の時刻変動を取り入れられる。
- ⑤ 夜間駐機などの空港側制約条件を満たす。

具体的には、逐次決定法、資源配分法及び分枝限定法による定式化を行い、簡単な例で計算時間や解の比較検討を行う。さらに、北海道における通勤ター路線に適用し、本モデルの適用性について検討を行う。

3. 最適化の考え方

航空ネットワークのスケジューリングにおいて、最適化すべきものとして、航空会社の利益と利用者の便益が考えられる。本研究では、通勤ター航空の導入において採算性が最も重要な問題となっていることから、航空会社の利益を最大化させることを目的とする。

航空会社の利益については、本研究の目的がDPによる定式化と各モデルの比較にあるため、以下のような前提を置いた。

(1) 利益関数の設定

一般に、航空機の運航による利益は、運賃収入から運航経費を差し引いたものである。ここでは、運航経費を飛行時間に比例して変動する費用と飛行1回当りの費用に分けて考える。すなわち、機種 h の飛行機が時刻 k にルート ij へ出発した場合の利益 p_{ijk}^h は、次式によって計算される。

$$p_{ijk}^h = q_{ijk}^h \cdot u_{ij} - t_{ij} \cdot v^h - c^h \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 q_{ijk}^h : 機種 h , 出発時刻 k , ルート ij の乗客数

u_{ij} : ルート ij の運賃

t_{ij} : ルート ij の飛行時間

v^h : 機種 h の飛行時間当りにかかる費用

c^h : 機種 h の飛行1回当りにかかる費用

なお、固定費は飛行するしないにかかわらず一定である

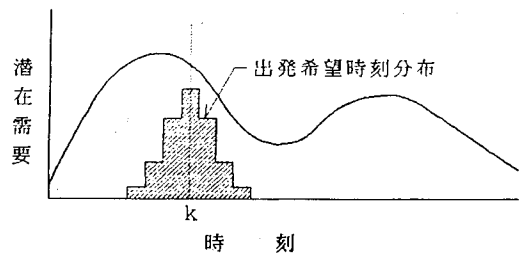


図-1 潜在需要と出発希望時刻分布

ため、ここでは考慮しない。

(2) 乗客数の設定

航空便数が無限大であるという条件下での航空利用者数を潜在需要とする。潜在需要は一般に図-1に示すような分布形をしていると考えられる。実際には航空便数が限られているため、ある時刻に航空機が割り当てられた場合、その便の乗客にはその時刻を希望していた人だけでなく、その前後の時刻を希望していた人も含まれると考えられる。そこで、航空便の出発時刻に対する乗客の本来の出発希望時刻の分布を出発希望時刻分布とする。例えば、図-1のような出発希望時刻分布を仮定すると、潜在需要のうちこの出発希望時刻分布に従った斜線部分が顕在化され、時刻 k に出発する航空便の乗客となる。

この出発希望時刻分布について、渡部ら⁸⁾は前後の航空便の出発時刻の影響を考慮し、分布の幅は出発間隔とすべきであるとしている。また、田村ら^{7),9)}は乗客数ではなく、航空利用率として扱っている。しかし、この関係を厳密に表現することは本研究の目的とは直接関係しないため、本研究では簡単のために乗客数の分布とし、分布の幅は一定であると仮定する。

潜在需要の分布形については、渡部ら¹⁰⁾により要因分析、モデル化もなされているが、本研究では田村ら^{7),9)}の調査結果を参考として、朝夕ピーク型の分布形を仮定する。

4. DPによる定式化

(1) 1機の場合

DPによる定式化を行うため、空港運用時間を適当な時間間隔で分割し、段階を設定する。各段階においてそこに至る一連のフライトによる累積利益が計算され、その中で利益最大となるスケジュールが各段階での決定となり、その累積利益がその段階における状態となる。

これは単純な駅馬車問題の応用であるが、一般のDPとは以下の点で異なっている。すなわち、一般のDPにおいては各段階での決定に際し、その直前の状態のみを考えればよいが、航空ネットワークでは他空港からの飛行時間及び整備時間に相当する時間間隔(段階)分だ

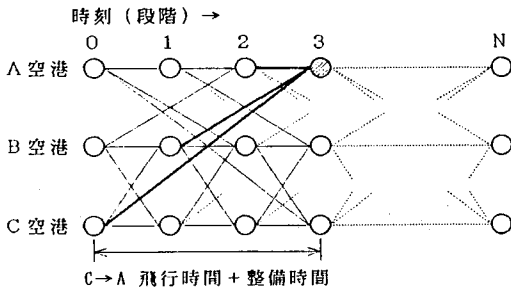


図-2 多段階決定過程

け廻らなければならない。例えば、図-2においてA空港の段階3でC空港からのフライトを考える場合、その飛行時間及び整備時間に相当する3段階前、すなわち段階0のC空港の状態にそのフライトによる利益を加えることになる。したがって、A空港の段階3における決定は、太線で示した各空港からのフライトを飛行して来たときの累積利益を比較することになる。

夜間駐機の問題に対しては、罰金法を導入する。すなわち、空港運用開始時点及び終了時点において、夜間駐機させない空港の状態(累積利益)に大きな罰金を課す。この操作により、夜間駐機させない空港を起終点とするスケジュールを除外することができる。

他空港からの飛来に対しては、空港運用開始よりそれに要する飛行時間が経過するまでは到着不可能であるため、空港*i*から空港*j*に時刻*k*に到着可能か否かを表す変数を導入しておく。

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & (k < T_{ij}) \\ 1 & (k \geq T_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

$$T_{ij} = [(T_{ij} + w) / \Delta t] + 1$$

ここで、 t_{ij} : ルート ij の飛行時間

w : 整備時間

Δt : 時間間隔

[] : ガウスの記号

DPによるスケジューリングの手順は、以下のとおり。(図-3)ここで、機種*h*は1機のため固定である。

- 1) 空港運用開始時点(段階0)における各空港の状態(累積利益)を設定する。*j*空港に夜間駐機させる機材数を B_j^h とすると、初期値は次式で設定される。

$$f_0(j) = \begin{cases} 0 & (B_j^h > 0) \\ -M & (B_j^h = 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 M : 罰金

- 2) 段階1より順次、到着可能なフライト($a_{ijk}=1$)を選択した場合(駐機も含む)のそれまでの累積利益が最大となるスケジュールを求める。すなわち、段階*n*、空港*j*における状態は式(4)により決定

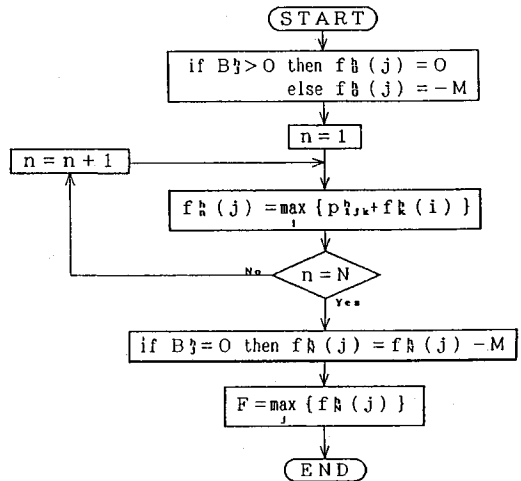


図-3 DPによるスケジューリングの手順

される。

$$f_n^h(j) = \max_i \{p_{i,j,k}^h + f_n^h(i)\} \quad (4)$$

$$i \in \{i | a_{ijk} = 1\}$$

$$k = n - T_{ij}$$

- 3) 空港運用終了時点(段階*N*)での決定が終了したら、夜間駐機させない空港($B_j^h = 0$)の累積利益に罰金を課す。

$$f_n^h(j) = f_n^h(j) - M \quad (5)$$

$$j \in \{j | B_j^h = 0\}$$

- 4) 各空港の累積利益の中で最大となる空港が終点となるスケジュールが最適スケジュールとなる。そのときの総利益は次式で表される。

$$F^h = \max_j \{f_n^h(j)\} \quad (6)$$

(2) DP逐次決定法

複数の機種、機材のスケジューリングを考える場合、まず1機ずつ逐次最適解を求めていく方法が考えられる。機種*h*(全機種数*H*)の*j*空港在籍機材数を Z_j^h (全機材数 $Z = \sum \sum Z_j^h$)とし、いま何番目の機材のスケジューリングを考えているかを*z*とすると、逐次決定法の手順は以下のとおり(図-4)。

- 1) $z=1, B_j^h = Z_j^h$ とおく。
- 2) 各機種*h*($\sum B_j^h > 0$)についてDPにより最適スケジュールを求め、その中で利益が最大となる機種を*z*番目の機材として割り当てる。
- 3) 決定したスケジュールの各フライトに対し、設定した乗客の希望出発時刻分布に従い、それぞれの時刻における潜在需要を減らす。
- 4) 決定した機種*h*、起終点空港*j*の在籍機材数を1機減らす($B_j^h = B_j^h - 1$)。
- 5) 全機材のスケジューリングが完了($z=Z$)となっ

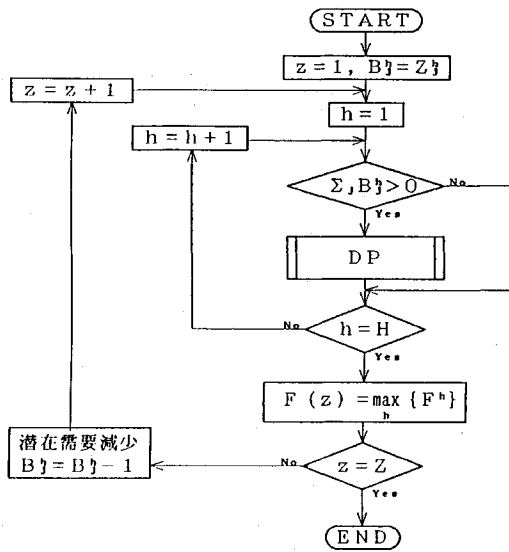


図-4 DP 逐次決定法の手順

表-1 資源配分の組合せ

組合せ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A 空港	XY	X	X	Y			Y		
B 空港		Y		X	XY	X		Y	
C 空港			Y			Y	X	X	XY

たら終了。まだ機材残っていれば $z=z+1$ として2)へ戻る。

逐次決定法は、アルゴリズムに見るとおり1機毎の逐次最適化であり、全体としての最適性は保証されない。

(3) DP 資源配分法

複数の機種、機材のスケジューリングを同時に最適化する方法として、資源配分問題との組合せが考えられる。すなわち、1機の場合のDPのアルゴリズムにおいて、各段階での決定を空港と機材の組合せで考える。例えば、3空港、2機(X, Y)の場合、表-1に示す組合せについて計算することになる。

この方法においては、検討時点(段階)において飛行中の機材も検討対象となり、飛行中の機材がいつどの空港へ到着するかを特定しておく必要がある。したがって、時間間隔を短縮していくとこれら全ての組合せは膨大な数になる。

(4) DP 分枝限定法一厳密解法

複数の機種、機材のスケジューリングを同時に最適化するもうひとつの方法として、分枝限定法の適用が考えられる。分枝限定法とは、ある問題の実行可能領域をいくつかの部分領域に分割し、それぞれに対応する子問題に置き換えて解く方法である。この領域分割の操作を分枝操作と呼び、領域分割前の問題を親問題、最初の問題を原問題と呼ぶ。

各機材単独での最適解を組合せた場合、同一ルートの近接フライト(同時出発を含む)の乗客にダブルカウントが生じる可能性がある。ダブルカウントが生じた解は実行可能解ではなく、実行可能解としてはダブルカウント分の利益を差し引く必要がある。しかし、一般にここで得られた実行可能解は最適解ではないため、ダブルカウントの生じたフライトのうちどれか1つを飛行禁止とした子問題に分枝させて解く必要がある。この過程において、それまでの実行可能解の中で利益最大のものが暫定解である。また、ダブルカウントを含めた利益はこの問題における実行不可能解を含めた最大値、すなわち上界値であり、上界値が暫定解より小さい場合には、これ以上分枝操作を行っても暫定解より良い解は得られないため、その枝は見切られて分枝停止となる。一方、ダブルカウントを差し引いた利益は実行可能解の下界値であり、分枝操作は下界値の大きい枝を優先させる。

この方法の手順は以下のとおりである。

- 1) DPにより各機材の最適スケジュールを求める。
- 2) 各フライトの乗客にダブルカウントがないかチェックし、ない場合は終了。
- 3) 全機材の累積利益からダブルカウント分の利益を差し引いて利益を修正し、これを暫定解とする。
- 4) ダブルカウントの生じたフライトに対応する a_{ijk} を0とし、ダブルカウントの生じた機材の1機について、DPで最適スケジュールを求める。
- 5) 全機材の利益合計(上界値)が暫定解より少ない場合、この枝は分枝停止となる。
- 6) ダブルカウントがないかチェックし、ない場合は分枝停止となる。
- 7) ダブルカウントがない状態の利益又はダブルカウントを差し引いた利益(下界値)が暫定解より大きい場合は暫定解を更新する。
- 8) 未分枝の枝がなくなったら親に戻り、原問題まで戻ったら終了。
- 9) 未分枝の枝の中で下界値の大きい枝について4)へ戻り分枝を進める。

一例として、3空港、3機材(X, Y, Z)での分枝の例を図-5に示す。原問題1では機材XとYのフライトの中に乗客のダブルカウントがあり、ダブルカウント分を含めた利益(上界値)は3173、ダブルカウント分を差し引いた利益(下界値)は2332となることを示している。このダブルカウントが生じたフライトのうち、問題2では機材Yの当該フライトを、問題3では機材Xの当該フライトをそれぞれ飛行禁止として最計算したものである。問題5はダブルカウントが生じていない状態であり、このときの解2872がこの時点における暫定解である。点線で示した問題6~9は、上界値が暫定解

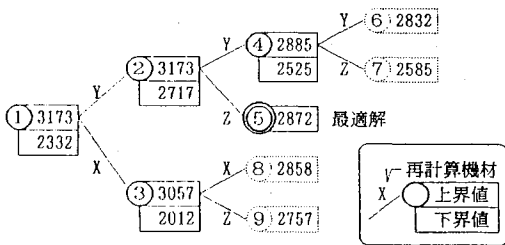


図-5 厳密解法における分枝の例

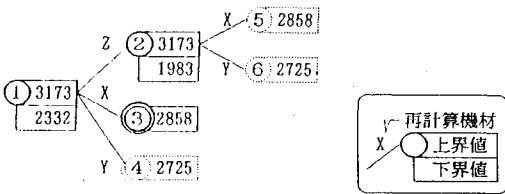


図-6 近似解法 2 における分枝の例

より小さくなり、分枝停止となったことを示している。この方法も、時間間隔を短縮していくとダブルカウントの生じるフライトが複数の段階にわたるため、分枝の数が膨大となる。

(5) DP 分枝限定法—近似解法 1

分枝の数を減らすため、近似解法を考える。この方法は、限定操作において、上界値が暫定解の α 倍より大きくない場合、その枝を見切り分枝停止にする。この操作によっても、近似解は最適解の $1/\alpha$ より大きいことが保証される。

(6) DP 分枝限定法—近似解法 2

(4) に示した分枝限定法のアルゴリズムでは、図-4 に見られるように同じ機材のスケジューリングを繰り返し再計算しなければならず、計算回数が非常に多くなってしまふ。そこで、乗客のダブルカウントのチェックをフライト毎ではなく、機材の 1 日のスケジュールにおいて行い、一度再計算した機材のスケジュールは以降変更しないものとする。すなわち、(4) のアルゴリズムの 4) を以下のように変更する。

- 4) ダブルカウントの生じた機材の 1 機について、潜在需要を残りの機材の乗客分だけ減らした状態で、DP により最適スケジュールを求める。ただし、既に一度再計算している機材については、対象から除外する。

この制約を設けることにより、計算回数は大幅に減らすことができるが、最適解の保証を失う。

(4) と同じ例題について解いた場合の分枝状況を図-6 に示す。枝の数は減少しているが、最適解 2872 は現れず、近似解 2858 となり 0.5% の誤差が生じている。

表-2 分枝限定法の比較

	枝の数	解	備考
厳密解法	16,947 (1.000)	4914	
近似解法 1	3,712 (0.219)	4914	$\alpha = 1.05$
	1,152 (0.068)	4864	$\alpha = 1.10$
近似解法 2	953 (0.056)	4914	

() 内は厳密解法を 1 とした比

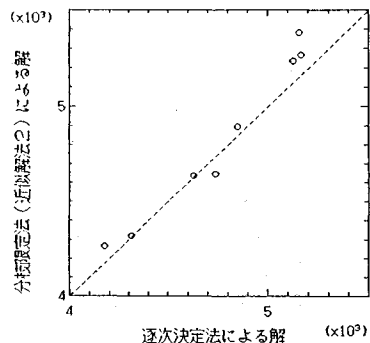


図-7 逐次決定法と分枝限定法(近似解法 2) の比較

6. 各手法の比較

逐次決定法は、先に述べたように全体としての最適性が保証されない。分枝限定法で用いた例題と同じ問題を逐次決定法により解くと、分枝限定法の近似解法 2 と同じ近似解 2858 (誤差 0.5%) となった。その他、7 空港、6 機までの様々なケースについて計算した結果では、いずれも誤差 5% 以内となっており、比較的良好な近似解が得られた。

資源配分法における組合せの数は、 n 空港、 m 機、最長飛行時間が g 段階の場合、 $n(gn)^{m-1}$ であり、空港及び機材の数の増加とともに組合せの数が著しく増加するため、計算機の記憶容量により解けるネットワークの大きさが制限される。パーソナルコンピュータでは 3 空港 3 機程度、大型計算機でも数機増える程度であり、実用モデルへの適用は不可能である。

分枝限定法の 3 手法を比較するため、3 空港 6 機で計算した結果を表-2 に示す。近似解法 2 の 1 回当たりの計算時間は他より若干長い、計算時間はほぼ枝の数に比例すると考えてよい。近似解法 1 ($\alpha = 1.10$) と近似解法 2 の枝の数はほぼ同じであるが、近似解法 2 では最適解が求まっているのに対し、近似解法 1 では近似解 (誤差 1%) となっている。厳密解法及び近似解法 1 においては、空港数、機材数の増加のみならず、時間間隔を短縮することによっても枝の数は増加する。一方、近似解法 2 における枝の数は、機材数 m のみに影響され、最大でも $2m!$ 遅よりは少ない。しかし、この場合でも

表-3 空港間距離及び所要時間

単位 [距離: km, 時間: h]

時間\距離	千歳	丘珠	函館	釧路	中標津	紋別	稚内
千歳	-	45	140	220	300	225	295
丘珠	-	-	160	240	310	220	260
函館	0.73	0.77	-	330	415	365	420
釧路	0.91	0.95	1.16	-	90	145	330
中標津	1.09	1.11	1.35	-	-	140	330
紋別	0.92	0.91	1.24	0.74	0.73	-	195
稚内	1.08	1.00	1.36	1.16	1.16	0.85	-

表-4 座席数及び運航費用

機種	座席数	飛行時間当り費用	飛行1回当り費用
YS-11	64	265千円	212千円

表-5 空港間運賃及び収支均衡LF

単位 [運賃: 千円]

LF\運賃	千歳	丘珠	函館	釧路	中標津	紋別	稚内
千歳	-	-	8.5	11.4	14.3	11.6	14.1
丘珠	-	-	9.2	12.1	14.6	11.4	12.8
函館	74.4%	70.8%	-	15.3	18.4	16.6	18.6
釧路	62.1%	60.0%	53.0%	-	8.7	15.3	
中標津	54.7%	54.3%	48.4%	-	-	8.5	15.3
紋別	61.4%	62.1%	50.8%	73.2%	74.4%	-	10.5
稚内	55.2%	58.2%	48.2%	53.0%	53.0%	65.2%	-

LF: 利益が0となるロードファクター

実用的な計算時間としてはせいぜい10機程度までである。

逐次決定法と分枝限定法の近似解法2の解を比較した結果を図-7に示す。点線は45°の線であり、これより上にプロットされた点は分枝限定法による解の方が高収益となり、良い結果が得られたことを示している。一般に分枝限定法の方が良い結果を得ることができた。

以上の比較から、3機程度までは分枝限定法の厳密解法(ただし、3空港まで)、6機程度までは分枝限定法の近似解法2、7機以上では逐次決定法を用いるのが実用的と考える。

7. 適用例

北海道のコミューター航空のネットワークを例として、DPによるスケジューリングモデルを適用した。現在、A社は道内の7空港間で、丘珠空港をハブとするハブ&スポーク型のネットワークにおいて、4機のYS-11型機で運航を行っている。本研究では、これをラウンド&ロビン型のネットワークとして、DPの逐次決定法と分枝限定法(近似解法2)により最適スケジュールを求め、現行スケジュールと比較を行う。また、夜間駐機をどの空港に何機させればよいかについて、4~6機で検討を行う。なお、DPによる解は近似解法を適用しているため最適性は保証されていない。

対象7空港間の距離及び所要時間は表-3に示すとおり

表-6 潜在需要及びポテンシャル

単位 [潜在需要: 人/日]

潜在需要	千歳	丘珠	函館	釧路	中標津	紋別	稚内
千歳	-	-	313	169	124	74	138
丘珠	-	-	510	287	222	140	290
函館	-	-	-	90	71	36	77
釧路	-	-	-	-	-	77	83
中標津	-	-	-	-	-	80	83
紋別	-	-	-	-	-	-	63
ポテンシャル	55	190	30	25	25	5	30

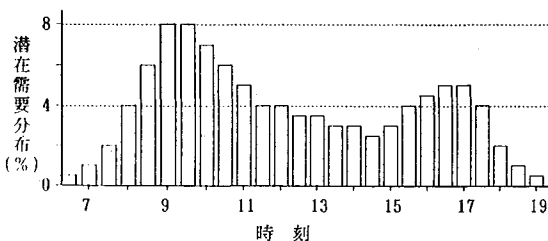


図-8 潜在需要分布

りである。ここで、距離100km以下の路線は設定しないものとした。所要時間は、現行航空ダイヤによる所要時間を回帰分析した結果の式(7)から求めた。また、整備時間は現行ダイヤにおける到着時刻と出発時刻の最短時間差である25分とした。運賃は、現行運賃を回帰分析した結果である式(8)により設定した。

$$t = 0.1361 D + 24.59 \quad (R^2 = 0.974) \dots\dots\dots (7)$$

$$u = 36.11 D + 3426 \quad (R^2 = 0.953) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 t : 所要時間 (min)

u : 運賃 (円)

D : 距離 (km)

機材の座席数及び運航費用は表-4に示すとおり設定した。ここで、国内航空会社のロードファクター(LF)が定期路線70%、コミューター航空50%(1989年度実績)であることから、運航費用は定員の6割程度の乗客による運賃収入と等しくなるように設定することとし、国内航空会社における燃料費と空港使用料の比で飛行時間当りの費用と飛行1回当りの費用に配分したものである。空港間の運賃及び収支が均衡するロードファクターを表-5に示す。

各空港の運用時間は8:00~19:00の11時間とし、30分間隔で段階を設定した。

空港間の1日の潜在需要は式(9)のような重力モデルを仮定し、運航実績に合うように各空港のポテンシャル及び係数を求めた。各空港のポテンシャル及び空港間の潜在需要を表-6に示す。このときの k の値は1333である。

$$Q = k\sqrt{A \cdot B} / L \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 Q : 1日の潜在需要

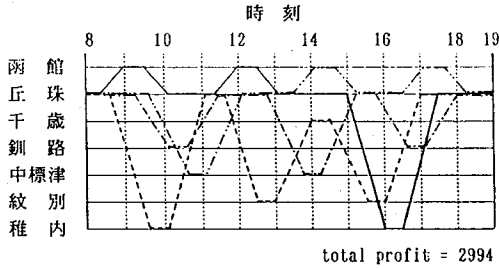


図-9 現行スケジュール

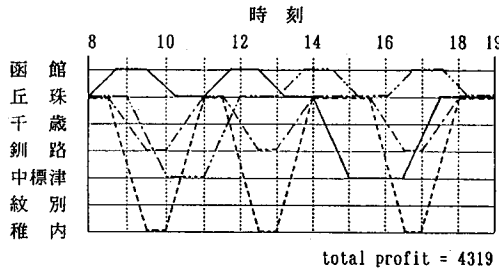


図-10 DPによる最適スケジュール

A, B: A 空港, B 空港のポテンシャル
 L: 距離
 k: 係数

潜在需要の分布形は、田村ら^{7),9)}によるの希望出発時刻に関するアンケート調査結果を参考として、各路線とも図-8に示す朝夕ピークの分布形を仮定した。

図-9 現行のスケジュールを、図-10にDPによるスケジュールを示す。なお、現行スケジュールの利益は、本研究で用いた乗客数及び利益関数の仮定により求めたものであり、推計値である。DPによる最適スケジュールの利益は現行推計値の約44%増しとなっており、航空会社にとって非常に効率的な運航が行えると考えられる。しかし、利用者の側からみると全く路線が設定されない空港が生じており、シビル・ミニマムの観点からは問題となる。

夜間駐機をどの空港に何機としたらよいかという問題について、4~6機で検討した結果が表-7である。ただし、この検討においては夜間駐機にかかる費用は各空港とも同じであるとしている。この表をみると、4機目までは丘珠空港に駐機させ、5機目は函館空港に、6機目は千歳空港に駐機させればよいことが分かる。

図-11に現行ネットワーク、DPにおける4機及び6機の場合のネットワークを示す。4機の場合、ラウンド&ロビン型で考えたにもかかわらず、結果としてハブ&スポーク型のネットワークとなっている。これは、例として取り上げた北海道の需要構造が丘珠一極集中となっているためである。しかし、6機の場合にはハブ空港(丘珠)からのスポーク路線以外の路線が表れており、

表-7 夜間駐機数と利益

	丘珠	千歳	函館	利益
4機	4	0	0	4319(max)
	3	0	1	4262
5機	5	0	0	4631
	4	0	1	4892(max)
	4	1	0	4743
6機	5	0	1	5234
	4	0	2	5265
	4	1	1	5378(max)

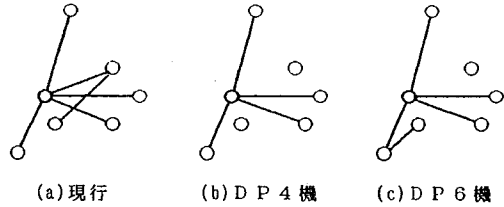


図-11 ネットワーク図

ラウンド&ロビン型で考えた効果が確認できた。

8. 結 論

本研究は、航空ネットワークのスケジューリング問題について、DPによる定式化を行った。その結果、これまで候補スケジュールの組合せの数が膨大となるため解くことが困難であったラウンド&ロビン型のネットワークについても解くことが可能となった。また、乗客数の時刻変動も考慮しているため、わが国のように競合交通機関と競争状態にある場合にも適合性の高いモデルとなっている。

DPの解法として、逐次決定法、資源配分法及び分枝限定法について比較検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 資源配分法は、空港数及び機材の増加により、考慮しなければならない空港と機材の組合せが増加し、計算機の記憶容量の制約から、3空港3機程度で限界となる。
- 2) 分枝限定法も、空港数及び機材の増加により、枝の数が増加し計算時間が増大する。近似解法2では枝の数は機材数だけによるが、それでも実用的にはせいぜい10機程度が限界である。
- 3) 逐次決定法は、機材数だけDP計算をするだけで計算時間は非常に短く、比較的よい近似解を与える。

ネットワークが小規模の場合、分枝限定法により厳密解または近似解を求めることが可能であるが、大規模になると分枝限定法では解くことが困難となる。しかし、大規模の場合でも逐次決定法によれば比較的よい近似解を求めることが可能である。

DPによるスケジューリングの適用性を確認するため、北海道におけるコンピューター航空に適用した。需要及び費用等は仮定したものではあるが、逐次決定法及び分枝限定法(近似解法2)により、現行スケジュールより高収益となるスケジュールを求めることができた。また、夜間駐機をどの空港に何機させればよいかという問題についても、容易に検討することができた。さらに、ラウンド&ロビン型のネットワークで考えた効果も確認できた。

本モデルにおいては単独路線の利用者しか考慮していないが、乗継ぎ利用者も考慮できるモデルに発展させる必要がある。また、シビル・ミニマム的な路線を取り込めるようにする必要がある。さらに、計算時間を短縮する方法や近似解の精度を上げる方法についても今後の研究課題である。

参 考 文 献

- 1) Etschmaier, M.M. and Mathaisel, D.F.X. : Airline Scheduling : An Overview, Transportation Science, Vol.19, No.2, pp.127~138,1985.
- 2) Daskin, M.S. and Panayotopoulos, N.D. : A Lagrangian Relaxation Approach to Assigning Aircraft to Routes in a Hub and Spoke Network, Transportation Science, Vol.23, No.2, pp.91~99,1989.
- 3) 徳永・稲村：多空港間航空ネットワークのスケジューリング-LPモデルとDPモデルの比較一，土木計画学研究講演集，No.13，pp.607~614，1990.
- 4) Simpson, R.W. : Scheduling and Routing for Airline Systems, MIT Flight Transportation Laboratory Report, R 68-3, 1969.
- 5) Chan, Y. : Route Network Improvement in Air Transportation Schedule Planning, MIT Flight Transportation Laboratory Report, R 72-3, 1972.
- 6) 例えば，Simpson, R.W. : Computerized Schedule Construction for an Airbus Transportation System, MIT Flight Transportation Laboratory Report, R 66-3, 1966.
- 7) 田村・稲野：地域航空における機材の最適スケジューリング，土木計画学研究論文集，No.5，pp.155~162，1987.
- 8) 渡部・森地・田村：航空機の最適スケジューリングに関する研究，土木学会年次講演概要集，No.41，pp.321~322，1986.
- 9) 田村：地域航空サービスにおける社会的最適便数についての考察，土木計画学研究講演集，No.12，pp.613~618，1989.
- 10) 渡部・森地・屋井・渡辺：航空運航頻度を考慮したスケジューリング手法に関する研究，土木学会年次講演概要集，No.42，pp.88~89，1987.

(1990.12.19 受付)

AIRCRAFT SCHEDULING MODELS BY USING DYNAMIC PROGRAMMING APPROACH

Yoshiyuki TOKUNAGA and Hajime INAMURA

An aircraft scheduling is very important for the examination of general aviation planning. Most of the previous studies were focused the hub and spoke type network, however, the round and robin type network scheduling is desirable for general aviation planning. This paper proposed the aircraft scheduling models for round and robin type network by using dynamic programming approach. We formulated three different models such as one after another method, resource allocation method and branch and bound method. The results suggest that branch and bound method is more effective for small size network, and one after another method is more effective for large size network. These models have applied for the network in a part of Hokkaido region.