

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 —

AIRCRAFT SCHEDULING MODELS FOR GENERAL TYPE OF NETWORK : Comparing
the Linear Programming Approach and the Dynamic Programming Approach

徳永幸之・稲村 肇

By Yoshiyuki TOKUNAGA and Hajime INAMURA

The consensus today is that the problem of aircraft scheduling is unsolvable by quantitative optimization techniques because of the ever increasing complexity of the models and the prohibitively large numbers of variable. (Maximilian M.E. 1985) Still this paper challenge to solve the problem using both linear integer programming and dynamic programming, and to compare the results and the computational performance, since a practical model has been required to develop for domestic airlines both in Japan and in developing countries. Linear programming model considering the forwarding of aircrafts was proposed to solve a scheduling for a general type of network. A modified stagecoach type dynamic programming model was also proposed. The results suggest that the DP is more effective than the LP from a computational point of view.

1. 本研究の背景

航空機材の航空ネットワークに対するスケジューリングは、以下の要件を満たすことが要求される。

- ① 利益（利用者数）が最大化されること
- ② 多空港間のネットワークに対応できること
- ③ 出発時刻及びルートを自由に設定できること
- ④ 機種の違いを評価できること
- ⑤ 出発時刻による需要変動を取り入れられること
- ⑥ 乗継ぎ利用者も扱えること
- ⑦ 夜間駐機などの空港側制約条件を満たすこと
- ⑧ 乗務員に関する各種の制約を満たすこと

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とMathaisel¹⁾により整理されている。すなわち、1950年代以降 Dantzigをはじめ、世界最高レベルのOR学者達により主とし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。その中心となったのがMITのDepartment of Aeronautics and Astronauticsである。しかし、1960年代以降それらのグループによる数理計画法による研究は停止し、旧来の単純なスケジューリング結果を各担当部局に提示し、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。

このように数理計画法に基づく研究が停止した主たる理由として、コンピュータの能力の限界が挙げられている。それは、

1) 米国における航空ネットワーク及び機材の数は、我々の想定している規模より遙かに大きく、決定変数の数が膨大となる。

2) 米国におけるスケジューリングは極めてフレキシ

キーワード：航空ネットワーク、線形計画法、動的計画法

* 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

ブルであり、極端に言えば日々スケジュールが変わるといった状態であり、大規模モデル計算はコストパフォーマンスが悪い。

- 3) 米国の航空規制は頻繁に変化し、それに対応するためにはモデルを頻々変更する必要がある。

加うるに、当時の世界最大のコンピュータはIBM system360であり、その汎用ソフトウェアMPSXの限界はMIPで分解原理を使用しても制約条件が10,000程度、整数変数は数千程度であった（実数変数は無制限）。また、米国は当時から航空業界の競争が厳しく、あるエアラインにとっての最適解は他のエアラインのスケジューリングに依存しており、ユニークに定まらないため、最適化手法自体が意味をなさない。

これらにより数理計画法による接近法は諦められた。しかし、今我々が想定している条件は全く異なる。すなわち、

- 1) ネットワークは中規模である。
- 2) スケジューリングは季節により異なる程度である。
- 3) 規制はそれ程変化しない。
- 4) 航空会社間の競争条件はそれ程厳しくない。

加えて、コンピュータは1970年以降急速に発達しており、現在のスーパーコンピュータは演算速度で当時の100~1000倍程度になっている。

エア・コンピューターネットワークや国内航空ネットワークといった中規模ネットワーク（空港数 ≤ 20 ）に対する航空機材のスケジューリング（機材数 ≤ 30 ）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。この程度のネットワークは、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. 本研究の目的

従来の航空ネットワークのスケジュールの作成は、直接法と段階法に分けられる。直接法は、フライト選択を順次行い、先に選択されたフライトに可能な小さな変更を加えるものである。段階法は、まずルート毎に運航頻度を決定し、次いで出発時刻を決定する方法である。¹⁾ 段階法は競合交通がない地域で需要が出発時刻に鈍感な場合には有用な方法である。しかし、我が国のように競合交通（新幹線等）と競

争市場にあり、出発時刻に非常に敏感であると考えられるビジネス客の需要が多い状況においては、直接法を用いるべきであると考えられている。

最近のDaskinとPanayotopoulos²⁾の研究では、ハブ&スポーク型ネットワークにおける機材の割り当て問題を線形整数問題として定式化し、ラグランジュ乗数法により解いている。しかし、候補スケジュールは限定されており、出発時刻による需要の変動は考慮されていない。

出発時刻による需要の変動を考慮したものに田村・稲野³⁾の研究がある。これは、地域航空のスケジューリングを対象とし、ハブ&スポーク型のネットワークを列挙法に分枝限定法を用いて解くものである。しかし、この手法を多空港間の一般型のネットワークに拡張した場合、列挙される候補スケジュールの数は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飛躍的に増大する。例えば、各空港間の飛行時間を2時間、整備時間を30分、空港運用時間を15時間とした場合、列挙される候補スケジュールの数は図-1に示すとおりである。中規模のネットワークにおいても時間間隔を短くした場合には、分枝限定法によって組合せ数を減少させたとしても解くことは非常に困難になると考えられる。この外にも数々の研究があるが、それは田村等³⁾の研究に詳しいためここでは省略する。

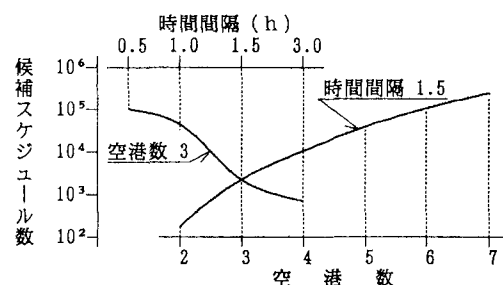


図-1 列挙法による候補スケジュールの数

このように、従来の研究はLP又はMIPが中心であり、DPによるものは極めて少ない。これは一般に両者の性質としてLPの方がDPより論理演算の回数が少なく迅速に解が得られるからである。しかし、このことはモデルが巨大化した場合は必ずしも言えない。すなわち、航空スケジューリングは現在LP又はMIPのアルゴリズムを前提とする限り

は、モデルの変数及び制約数は数万個程度と巨大になるため、主記憶装置では不足し仮想記憶装置を使用せざるを得ない。それに対し、DPにおける論理演算の回数はLP程には増加しないことが予想されるからである。

以上のことから、本研究では出発時刻による需要の変動を考慮し、直接法により最適スケジュールを作成することを目的としている。具体的には、これまでハブ&スポーク型において定式化されてきたLP問題を多空港間の一般型ネットワークへ拡張する。また、ネットワークが大きくなったり、より精密に解を求めようとすると、変数や制約条件が膨大となり解くことが困難となってしまう問題に対し、DPによる定式化も同時に提案する。本研究ではMIP、DP共に極めて簡略化されたモデルであるが、これらの中規模モデルに発展させた場合の演算効率を考慮するために、同一の小規模ネットワークで解を求め、解の性質の考察、演算速度の比較を行うのも大きな目的である。

3. 前提条件の設定

(1) 段階の設定

LP及び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に分割し、各空港毎に段階を設定する。この時間間隔を短くしていけば、最終的には出発時刻に関して全く制約を設けないことと同じとなる。ただし、LPにおいては段階数に比例して決定変数ならびに制約条件式が増加し、計算機のメモリ使用量および計算時間は指数的に増加するため、計算機の能力により制約を受けることになる。また、DPにおいても段階数に比例して計算回数が増加するため、必要以上に段階数を増やすことは得策ではない。

航空機は、どの段階からすべての空港へ向かって出発できるものとする。ただし、同一時刻、同一ルートには一便しか割当てないものとする。また、到着空港へ空港運用時間内に到着できない場合には出発させないものとする。

(2) 乗客数の仮定

航空便数が無限大であるという条件下で、ある時刻 k に空港 i から空港 j へ出発したい人の人数を時刻 k におけるルート ij の潜在需要とする。潜在需

要の分布形は図-2に示すような朝夕ピークの分布形を仮定した。

実際には航空便の数が限られているため、時刻 k にルート ij へ航空機が割当てられた場合、その便の乗客にはその時刻を希望した人だけでなく、その前後の航空便のない時刻に出発を希望していた人も含まれると考えられる。そこで、ある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、時刻 k に出発する航空機の乗客の出発希望時刻分布が図-2の斜線で示す分布形であるとする、潜在需要のうちこの斜線部分が顕在化され、その便の乗客となるとする。

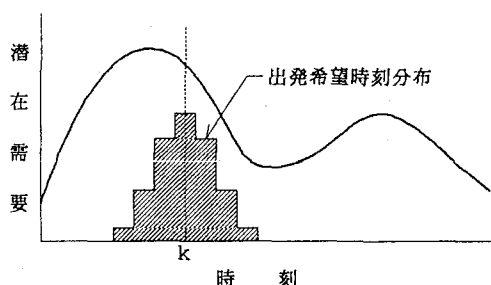


図-2 潜在需要と出発希望時刻分布

航空便の出発時刻と乗客の出発希望時刻の関係について、渡部ら⁴⁾は前後の航空便の出発時刻の影響を考慮すべきであるとしている。また、便数と需要に関する研究^{5) 6)}もなされているが、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分布の幅は一定であると仮定する。分布形については、図-2に示す分布形を用いることとした。

(3) 利益関数の仮定

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と考えられる。運航経費の主なものは、燃料費、人件費、整備費および離着陸料と考えられる。ここでは、燃料費を飛行時間に比例して変動する費用と考え、残りを飛行1回当りの固定費用と考えた。すなわち、機種 h の飛行機が時刻 k に i 空港から j 空港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。

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

ここで、 q_{ijk}^h : 機種 h , 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 $i j$ 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

4. LP による定式化

(1) 決定変数と目的関数

LP においては、まず決定変数として機種 h を時刻 k にルート $i j$ (i 空港発、 j 空港着) に割り当てるか否かを表す変数 x_{ijk}^h を定義する。

$$x_{ijk}^h = \begin{cases} 1 & \cdots \text{割り当てる} \\ 0 & \cdots \text{割り当てない} \end{cases} \quad (2)$$

$i \neq j$

決定変数の数は (機材数 $\times$ ルート数 $\times$ 段階数) となる。ただし、この段階数は各ルート毎に (空港運用時間 - ルート飛行時間) に対する段階数となる。

この決定変数に対し、在籍機材を各時刻、各ルート割り当てたときの利益を最大化する変数の組を見つけることを目的とする。すなわち、目的関数は次式で表される。

$$P = \sum_h \sum_i \sum_j \sum_k p_{ijk}^h \cdot x_{ijk}^h \rightarrow \max \quad (3)$$

(2) 機材制約

各機材を各時刻、各ルートに割り当てる場合、ある機材 h については、同一時刻には一つのルートにしか割り当てられない。これにはその時刻に飛行中のフライトも含まれる。すなわち、時刻 k に各ルート $i j$ を出発するフライトまたは飛行中のフライトに割り当てられるのは 1 以下でなければならない。

$$\sum_{i,j,k} x_{ijk}^h \leq 1 \quad (4)$$

$$i \neq j$$

$$k \in \{k \mid K - T_{ij} \leq k \leq K\}$$

$$T_{ij} = \lceil (t_{ij} + w) / \Delta t \rceil + 1$$

ここで、 w : 整備時間

Δt : 時間間隔

$\lceil \cdot \rceil$: ガウスの記号

この機材制約を図で表すと、図-3 (a) で○印のついたフライトとなる。また、機材制約式は (機材数 $\times$ 段階数) だけ必要となる。

(3) 回送制約

ある機材 h について、ルート $i j$ への割り当を考えると、その前の飛行ルート $I J$ の到着空港 J と

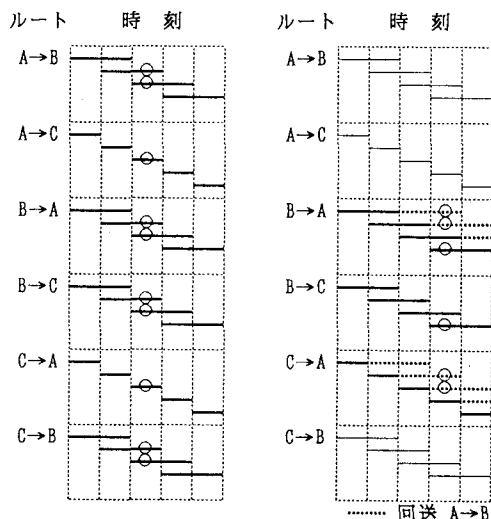
今回の出発空港 i が異なる場合、空港 J から i へその機材が回送されるまではそのルート $i j$ に割り当てることはできない。すなわち、ルート $I J$ 飛行後直ちにルート $J i$ を飛行するものとして、ルート $I J$ を飛行し時刻 K までに i 空港まで回送できないフライトと、時刻 K にルート $i j$ を出発するフライトのなかで割り当てられるのは 1 以下でなければならない。

$$\sum_{i,k} x_{ijk}^h + \sum_i x_{ijk}^h \leq 1 \quad (5)$$

$$i \neq J$$

$$k \in \{k \mid K - T_{IJ} - T_{ji} + 1 \leq k \leq K - T_{ij}\}$$

この回送制約を図で表すと、図-3 (b) で○印のついたフライトとなる。図中の破線は回送を表し、この図は回送ルート毎に作成される。(図-3はA空港からB空港へ回送の場合) また、回送制約式は (機材数 $\times$ ルート数 $\times$ 段階数) だけ必要となる。



(a) 機材制約

(b) 回送制約

図-3 LPにおける制約条件

(4) 時間・ルート制約

同一時刻、同一ルートには一便しか割り当てないという制約を設けるため、時刻 k 、ルート $i j$ に割り当てる機材の数は 1 以下とする。

$$\sum_h x_{ijk}^h \leq 1 \quad (6)$$

この時間・ルート制約式は (ルート数 $\times$ 段階数) だけ必要となる。

5. DPによる定式化

ここで使用するDP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、各段階の決定に際し直前の段階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飛行して来ることを考え、その飛行時間及び整備時間に相当する時間間隔分だけ遡らなければならない。例えば、図-4でC空港からA空港へのフライトでは、その3段階前の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。また、図-4でA空港の時刻（段階）3での決定は、各空港から太線で示したフライトを飛行してきたときの累積の利益を比較することになる。

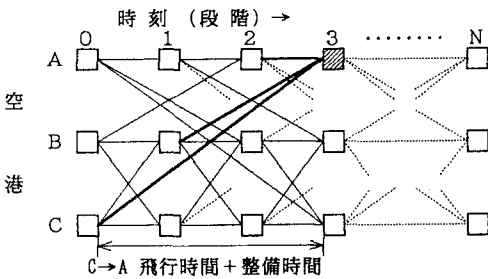


図-4 多段階決定過程

また、他空港からの飛来に対しては空港運用開始よりその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 までに到着可能か否かを表す変数 a_{ijk} を導入しておく。

$$a_{ijk} = \begin{cases} 0 & \dots k < T_{ij} \\ 1 & \dots k \geq T_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

この変数は、同一時刻、同一ルートに複数機を割当てないためにも使用し、飛行機が割当てられた場合には0とする。この変数が0の場合、そのフライトは候補スケジュールから除外する。

DPにおいては、1機の一連のスケジュールを逐次決定していくため、1機のスケジュールが決定した後にその乗客分だけ潜在需要を減らすことにする。これにより、近接フライト間での乗客のダブルカウントを防ぐことができる。

DPによるスケジューリングの手順は、図-5に示されている。すなわち、

- 1) 機種数を H 、在籍機数を Z とする。（在籍機数

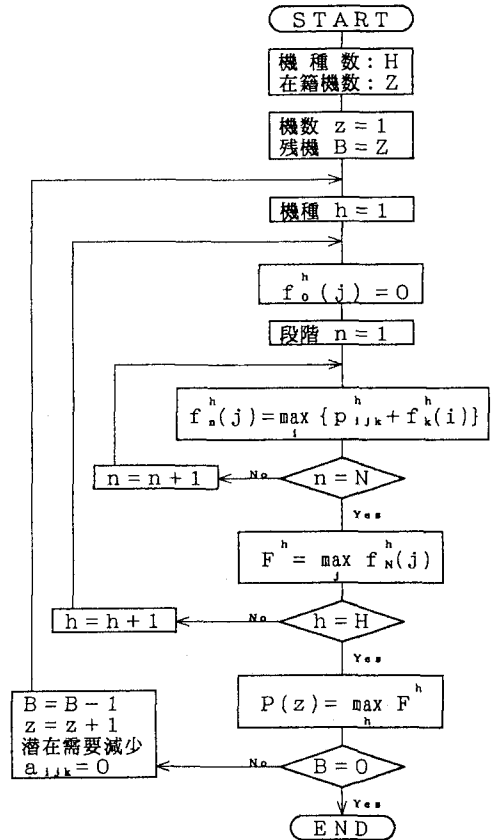


図-5 DPによるスケジューリングの手順

は機種毎に与える。) いま何番目の機材のスケジュールを考えているかを z で表し、残りの機数を B で表す。1機目の場合、 $z = 1$ 、 $B = Z$ となる。
2) ある機種 h について、空港運用開始時刻（段階 0）より順次、空港 j に到着可能なルート（ i 空港から）飛行してきた場合（駐機も含む）のそれまでの利益が最大となるルートを求める。すなわち、段階 0 における初期値を 0 として (8) 式、段階 n 、空港 j における決定は (9) 式により決定される。

$$f_0^h(j) = 0 \quad (8)$$

$$f_n^h(j) = \max_i \{p_{ijk}^h + f_{k-1}^h(i)\} \quad (9)$$

$$i \in \{i \mid a_{ijk} > 0\}$$

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

- 3) 空港運用終了時点（段階 N ）で各空港毎に、最後にその空港に到着するようなスケジュールの中

で最適ルートが決定される。したがって、この中で利益が最大となるスケジュールがその機種による最適スケジュールとなる。そのときの機種 h の総利益は次式で表される。

$$F^h = \max_j \{ f_N^h(j) \} \quad (10)$$

- 4) これを各機種とも求め、そのなかで利益最大となる機種を1機目として割り当てる。すなわち、 z 番目の機材について、決定されたスケジュールの総利益は次式で表される。

$$P(z) = \max_h \{ F^h \} \quad (11)$$

- 5) 決定したスケジュールの各フライトに対し、仮定した乗客の希望出発時刻分布に従い、それぞれの時間における潜在需要を減らす。
- 6) 決定したスケジュールの各フライトに対応する a_{ijk} を0とする。
- 7) 決定した機種の在籍機数を減らし、以下、全機種とも在籍機数が0となるまで2)~6)の手順を繰り返し、各機材のスケジュールを決定して行く。

6. LP及びDPの定式化上の問題点

従来多く研究されてきたハブ&スポーク型ネットワークを一般のネットワークに拡大すると、LPに関しては以下のような問題点が生じる。

① 飛行の連続性の問題。すなわち、連続するフライトにおいて着空港と発空港が異なる解が生じることである。本研究では、これを解決するために新たに回送制約というアイデアを導入したが、それに伴い新たな問題が生じた。すなわち、回送便は回送時間としては整合がとれるものの、その便の乗客数が少ない場合利益が負となりLP解として存在しないため、負となる利益(回送費用)を目的関数に導入できない。このため、後の計算例で見るように最適性は保障されない。これを解決するためには新たな定式化が必要となる。

② 乗客のダブルカウントの問題。すなわち、本研究の定式化においては、潜在需要分布を使用して、各フライトが実現した場合に期待される便益を予め与えている。したがって、LP解として時間的に近接したフライトが生じた場合、乗客数にダブルカウントが生じ、目的関数が過大評価される。しかし、

これは出発希望時刻分布の考え方及び目的関数と制約条件の形を変更することで解決可能である。

③ 決定変数及び制約条件の数の問題。すなわち、本研究の定式化による決定変数及び制約条件の数は、表-1の計算式によりに計算される。計算例に示すように、中規模ネットワークにおいてもその数は非常に多く、解けるネットワークの大きさは計算機的能力に依存することになる。

表-1 決定変数及び制約条件の数

	計算式(概算*)	n=5 m=10	n=10 m=20
決定変数	$n(n-1)(s-t)m$	2,600	23,400
機材制約	$(s-t)m$	130	260
回送制約	$n(n-1)(s-2t)m$	2,200	19,800
時間ルート制約	$n(n-1)(s-t)$	260	1,170
制約合計		2,590	21,230

*) 厳密には飛行時間が異なるためルート毎に計算が必要ここで、 n : 空港数

m : 機材数

s : 空港運用時間段階数(計算例では $s=15$)

t : 飛行時間段階数(計算例では $t=2$)

一方、DPに関しても次のような問題点が生じる。今回のDPの定式化は駅馬車問題の応用であるため、アルゴリズムに見るとおり1機毎の逐次最適化となっている。グローバル最適化を行うためには、DPの資源配分問題又は n 次元ナップザック問題による定式化が必要となるが、それぞれ他の欠点がある。したがって、これを解決するためにはそれらの手法の長所を複合したモデル化が必要となる。しかし、DPは先に述べたLPの飛行連続性の問題は生じないという点で大きな長所がある。

7. 分析例

LPとDPの両手法を比較するため、分析例として3空港、2機によるスケジューリングを考えた。

空港の運用時間は7時から22時までの15時間とし、1.5時間間隔で11段階を設定した。各空港間の飛行時間及び運賃は表-2のとおり設定した。機種別の座席数、飛行時間当りの燃費、固定費(離着陸・整備費用等)は表-3のとおり設定した。ただし、駐機による費用は考えず、整備時間は各機種とも30分とした。なお、これらの値は実際のデータに基づくものではなく、乗客数が座席数の6割程度で利益が

表-2 空港間飛行時間及び運賃

空港	A	B	C
A		2.5/7	1.0/4
B	2.5/7		2.0/6
C	1.0/4	2.0/6	

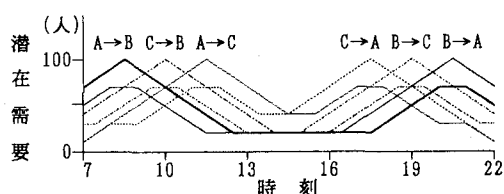
(飛行時間/運賃)

表-3 機種別諸元

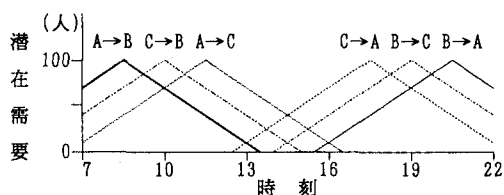
機種	X	Y
座席数	300	200
燃費	250	175
固定費	500	350

±0となるように設定したものである。

空港間の時間別潜在需要は朝夕ピークの分布形を3ケース仮定した。図-6にケース1及び2の分布形を示す。ケース3はケース1の需要を半分に減じたものである。



(a) ケース1



(b) ケース2

図-6 空港間時間別潜在需要

このような設定条件で、それぞれLP及びDPにより利益最大となるスケジュールを求めた。ただし、整数解を得るため、整数線形計画法により解いている。以下、各ケース毎に両手法の比較検討を行った結果を記す。

(1) ケース1

LPとDPにより求められた最適スケジュールを図-7に示す。図中の数字は、それぞれの機種による利益及び総利益を示している。

結果を比較すると、1機目(機種X)のスケジュールは同じ結果となった。これは列挙法により組合せ可能なスケジュールの総利益を全て比較した結果とも一致しており、最適解となっている。

2機目(機種Y)のスケジュールは、LPとDPとで異なっており、LPの総利益の方が大きくな

っている。これは図-7の○印を付けたフライトにおいて出発希望時刻分布に重なりが生じ、LPでは乗客がダブルカウントされているためである。DPでは1機目のスケジュール決定後潜在需要を減少させることによりダブルカウントを防いでいる。

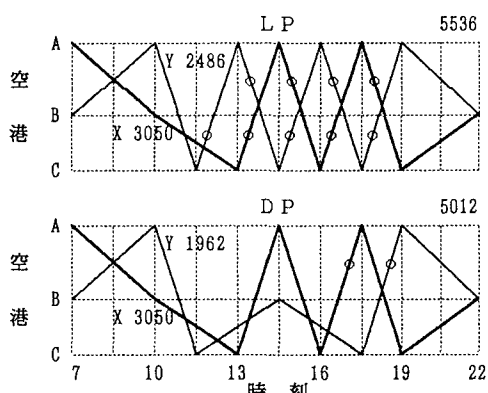


図-7 最適スケジュール(ケース1)

(2) ケース2

ケース2の潜在需要のパターンは、ケース1における朝または夕方の大きなピークだけしか需要がないものとしたものである。その外の時間帯では需要が全くないため、飛べば赤字となる。このときのLPとDPによる最適スケジュールを図-8に示す。

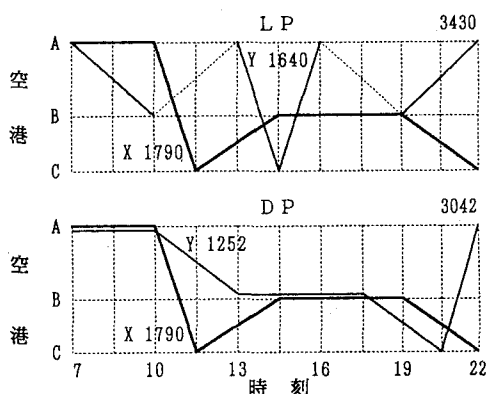


図-8 最適スケジュール(ケース2)

結果を比較すると、1機目(機種X)のスケジュールは同じ結果となったが、2機目(機種Y)のスケジュールについては異なった結果となっている。LPのスケジュールは連続していないが、これは破線で示したフライトが赤字となるため選択されない

ことによる。この回送が行われ、その費用が営業運航と同じだとするとY機の利益は64に減少し、総利益は1854となりDPによる結果を大きく下回ることになる。

(3) ケース3

ケース3は、潜在需要がケース1の半分しかなく、ピーク時間を除くとほとんどのフライトが赤字となる。このときのLPとDPによる最適スケジュールを図-9に示す。

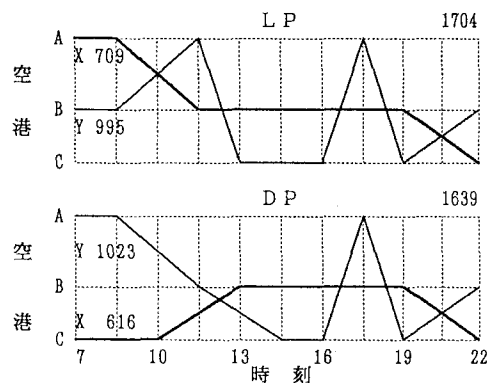


図-9 最適スケジュール (ケース3)

結果を比較すると、LPの方が全体としての総利益が大きくなっている。このケースでは、LPにおける飛行連続性の問題や近接フライト間での乗客のダブルカウントの問題などは生じておらず、LPによる結果が最適解となっている。DPにおいては、1機ずつ利益最大となるスケジュールを逐次決定していくため、全体としては最適性が保障されない。ケース3は最適解とならない一例である。ただし、DPによる結果はLPによる最大利益の4%減程度であり、次善のスケジュールと考えられる。

8. 結論と今後の展望

本研究では、LPとDPにより多空港間航空ネットワークのスケジューリング問題を解き、解の比較を試みた。ここで、LPにおいては回送制約を取り込むことにより一般型航空ネットワークの問題を解くことが可能となった。また、DPにおいては駅馬車問題を変形して定式化し、逐次最適化モデルを構築した。これらの定式化は先に述べたような大きな問題点を持つが、今後は次のような形で発展が可能

である。

- ① LPは飛行の連続性や乗継ぎ問題に対して大きな問題点を持つため、Wolfの方法による二次計画法へと拡張し、解決を図る。
- ② DPは同時決定問題へと拡張するために資源配分問題との複合モデルへと発展させる必要がある。また、乗継ぎ問題に対応するためには2段階DPへと拡張する必要がある。

表-4 計算時間

LP	DP	LP/DP
1.2 ~ 22 sec	0.008 sec	150 ~ 2740

(NEC/ACOSSystem2000)

現在の段階ではLP (MIP/QP) とDPの間で優劣は定かではない。すなわち、表-4に示すように今回の3空港2機のスケジューリングではDPの方が遙かに計算時間は短く、それを10空港、20機程度に拡張した場合もその優劣は変化しないと思われる。しかし、上記①、②のようにモデル自体を拡張した場合の優劣は定かではないため、今後両者を併行的に研究して行く必要がある。

参考文献

1) M.M.Etschmaier, D.F.X.Mathaisel :
"Airline Scheduling : An Overview" ;
Transportation Science, Vol.19, No.2, 1985

2) M.S.Daskin, N.D.Panayotopoulos :
"A Lagrangian Relaxation Approach to Assigning Aircraft to Routes in Hub and Spoke Network" ;
Transportation Science, Vol.23, No.2, 1989

3) 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, 1987

4) 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, 1986

5) 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, 1987

6) 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, 1989