

1. はじめに

輸送サービス機関にとっては、正確にスケジュールを消化し、的確なサービス提供を行うことは一つの使命であるといえる。とりわけ航空旅客輸送においては航空会社はそのフライトスケジュールの定時性を保つことが大変重要である。航空会社は出発前までにチケットの予約を受け付けて販売しているので、予約を受けたサービスを確実に提供する義務がある。すなわち、フライトスケジュールを正確に消化しなければならない。しかし現在、ハブ・アンド・スポーク型輸送(以下 HS)が主流になっている欧米の航空輸送市場において、フライトの遅延・キャンセルの頻発が問題視されている。ひとたびある空港で遅延が発生すれば、その影響は一気にネットワーク全体に波及すると考えられる。また旅客に相当の不利益が生じることは明らかであると言えよう。このことは予約客、自社の収益へ悪影響を与える上、航空会社の信用問題にも密接に関わるため、極力回避しなければならない。加えて、中・長期的な収益性を確保していくという意味においてもこの問題の重要性は無視できないと言える。リスケジュールの技術を有しているか否かが、その航空会社に対する需要をどれだけ喚起できるかに直接結びつくと考えられる。航空会社が確実にリスケジュールの技術を持っているとすれば、それが航空会社自身の余分に必要となるコスト削減につながり、旅客にとっては航空会社を評価する際の基準の一つとなる。そういう意味においても、リスケジュールの問題はイールド・マネジメントの一つとして位置付けることができる。

今回本稿で取り上げるリスケジュールの問題は、単にフライトスケジュールをうまく組み直すことだけが目的ではなく、フライトの出発前と出発後におけるそれぞれの収益管理の問題を統合した、総合的なイールド・マネジメントのモデル化のための前段階であると考えられる。

スケジュールの混乱を招くようなトラブルが発生した場合、航空会社は単に定刻を繰り下げて運航を行うのでは十分であるとは言えない。スケジュールを組み替えること(リスケジュール)によって旅客の旅行時間の遅れを少しでも取り戻さなければな

らない。しかし、航空旅客輸送は他の輸送機関と比べても大規模で運航コストも高いため、リスケジュールは困難な作業であると言える。しかし別の見方をすれば、航空会社が的確なリスケジュールを行える技術を有していることは、旅客からの信用を得るという点において何よりも重要であると言える。これは航空旅客輸送に関わる全ての主体にとって不可避の問題であると言える。

これまでもフライトのスケジュールリングに関する研究は数多く行われてきている。しかし、それらのいずれのモデルも HS ネットワークへの適用可能性が明らかにされていないことや、機材の容量(座席数)に限りがあるという条件が考慮されていないなどの問題があった。

そこで本研究では、今述べたような問題点を考慮しつつ、これからの国際航空輸送市場においても主流になると考えられる HS ネットワークにも適用できる効率的なリスケジュールのモデルを新たに開発することを目的とする。

2. 最適スケジュール調整モデル

(1) 概要

ネットワーク内のある空港で機材のトラブル、空港周辺の気象条件により空港閉鎖を余儀なくされることによって、フライトの遅延が発生したときに航空会社は、リスケジュールを行う。その際追加的に負担することになるコストを最小になるように新たなフライトスケジュールを作成する。

本モデルで想定する参加主体は航空会社と旅客である。フライトスケジュールは本来、出発都市と到着都市、そして「定刻」が定められている。しかし本モデルではこの定刻を考えない。代わりに、1日の作業時間帯を任意の幅で複数の時間帯に分割し、各時間帯において機材が出発するのか、到着するのかを判断する。この時間帯近似¹⁾を本モデルに取り入れることにより、機材の動きが簡略化され捉えやすくなるという利点をもつ。

以下に、モデルの前提条件を列挙する。

- ・ 想定する空港間ネットワークは HS 型とする。
- ・ ハブ空港にはそこを拠点として運航路線を展開する航空会社が存在するものとする。
- ・ 航空会社は全てのリンクで同一容量(座席数)の機材を使用して運航しているものとする。

*Keywords 空港計画, 交通計画評価

**学生会員, 神戸大学大学院自然科学研究科

***正員, 工博, 神戸大学工学部建設学科

(神戸市灘区六甲台町 1-1, TEL 078-803-6017)

- ・ 機材は1つの時間帯に到着と出発の両方が同時には起こらないものとする。
- ・ 旅客はその日の内に必ず目的地へ到着するものとする。
- ・ 翌日には想定ネットワーク内の全ての空港で本来のスケジュールに復帰するものとする。
- ・ 当初予定のフライトがキャンセルされたとしても、OD旅客は変わらないものとする。

通常、スケジューリングの問題を航空旅客輸送の分野において考える場合、クルーの勤務形態管理の問題²⁾が付随するが、簡単のために本モデルではこの問題を考慮しないこととする。

(2) モデルの定式化

リスケジューリングを行うことによって、航空会社には便数を追加する場合に負担する追加的コストが生じ、一方旅客は旅行が遅れることによる不利益が生じる。したがって、本モデルはコスト最小化を目的として定式化されることになる。

HS ネットワークの特徴として、多くの旅客が出発地から目的地までフライトを乗り継いで移動するということがある。また、ハブ空港の数が増えれば増えるほど移動経路の数も増える。さらに本モデルでは、時間帯を考慮しているため、どの時間帯にどのリンクを移動するかによって考え得る移動経路の数は倍増する。

当初航空会社は、ネットワーク内の各空港に翌日のフライトスケジュールのために必要な機材数を配置できるように最適なスケジュールを作成しているものとする。また、遅延発生前に関しては、当初予定したスケジュール通りの運航を行っているので、各フライトで機材容量（座席数）をオーバーせず旅客を輸送している。よって、何も問題が発生しなければODはすべて保存されるものとする。しかし、実際にスケジュールに乱れが生じてしまった場合、あるフライトから別のフライトに機材を取りまわすことを余儀無くされることが考えられる。それによって乗る機材が無くなってしまふ旅客が現れることが予想される。しかし、そのような旅客も必ず目的地へ到達できるようにしなければならない。

以下にモデルで用いる記号、変数を定義する。

i, j : 空港番号, l : 空港 i と空港 j 間のリンク, k : 経路, rs : OD, t : 時間帯, x_l : リスケジューリング前における1日あたりのリンク l の総便数, y_l : リスケジューリング後における1日あたりのリンク l の総便数, u_l^t : t 期のリンク l のフライトに搭乗する旅客数, X_{rs} : rs 間OD交通量, $u_{rs,k}^{rs,k}$: rs 間を経路 k で旅行する旅客数, $u_{kk'}^{rs}$: rs 間を経路を k から k' に変更される旅客数, s : 機材容量

(座席数), c_l : リンク l に配便するための1便あたりの運航コスト, d : 単位時間あたり, 旅客1人あたりの遅延コスト, h_i : 翌日のフライトのために空港 i で必要な機材数, ac_i^t : 時間帯 t において空港 i にいる機材数, T_k^{rs} : rs 間を経路 k で移動する旅客の総旅行時間, $T_{k'}^{rs}$: rs 間を新しい経路 k' で移動する旅客の総旅行時間, f_l^t : t 期に経路 k のリンク l に配便されるとき1, そうでない場合0をとる(リスケジューリング前), g_l^t : t 期に経路 k のリンク l に配便されるとき1, そうでない場合0をとる(リスケジューリング後), a_l^t : t 期にリンク l のフライトが到着するとき1, そうでない場合0をとる, b_l^t : 機材が t 期にリンク l のフライトでその日の予定を終了するとき1, そうでない場合0をとる, $\delta_{l,t}^{rs,k}$ は, rs 間の旅行で経路 k が t 期にリンク l を利用するとき1, そうでない場合0をとる, である。ここで定式化する問題を主問題Aとする。

以下に目的関数及び制約条件を示す。

$$Obj: \min z(y_l) \\ = \sum_l c_l y_l - \sum_l c_l x_l + \sum_{rs} \sum_k \sum_{k'} (delay)_{kk'}^{rs} u_{kk'}^{rs} d \quad (1)$$

sub.to

$$f_l^t = 0 \quad or \quad 1 \quad (2)$$

$$g_l^t = 0 \quad or \quad 1 \quad (3)$$

$$t f_l^t \leq t g_l^t \quad (4)$$

$$y_l = \sum_t g_l^t \quad (5)$$

$$x_l = \sum_t f_l^t \quad (6)$$

$$y_l \geq x_l > 0 \quad (7)$$

$$a_l^t = 0 \quad or \quad 1 \quad (8)$$

$$b_l^t = 0 \quad or \quad 1 \quad (9)$$

$$-\sum_l \sum_t a_l^t + \sum_l \sum_t b_l^t + \sum_l \sum_t f_l^t = 0 \quad (10)$$

$$-\sum_l \sum_t a_l^t + \sum_l \sum_t b_l^t + \sum_l \sum_t g_l^t = 0 \quad (11)$$

$$-\sum_l a_l^t + \sum_l f_l^{t+1} = 0 \quad (12)$$

$$-\sum_l a_l^t + \sum_l g_l^{t+1} = 0 \quad (13)$$

$$u_l^t \leq s g_l^t \quad for \quad \forall l, t \quad (14)$$

$$u_l^t = \sum_{rs,k} u_{rs,k}^{rs,k} \delta_{l,t}^{rs,k} \quad (15)$$

$$\sum_k u_{rs,k}^{rs,k} = X_{rs} \quad (16)$$

$$(delay)_{kk'}^{rs} = T_{k'}^{rs} - T_k^{rs} \quad for \quad \forall rs, k, l, t \quad (17)$$

$$h_i \leq ac_i^T \quad (18)$$

上記の式(1)は目的関数である．第1項と第2項の差で航空会社の追加的コストを表し，第3項が旅客の旅行が遅れることによる損益を表している．式(10)及び(11)は，機材の連続性に関する制約条件式である．式(14)は，機材容量に関する制約条件式である．式(16)は，OD保存の制約条件式である．式(18)は，翌日のフライトスケジュールのための各空港への機材配置を満足させるための制約条件式である．

3. 解法

(1) 概要

前章において定式化した主問題 A は，そのままの形では直接に最適解を求めることができない．したがって，この点を解決するために新たに補助問題 A' を主問題から導出する必要がある．

先にも述べたように，本モデルでは1日の作業時間を複数時間帯に区切っているため，各時間帯で機材の出発と到着を判断できる．1つの機材に着目し，その機材に関して到着するリンクを最終時間帯から順に分枝限定法³⁾を利用して決定し，新たにスケジュールを決定していく方法をとる．早い時間帯からスケジュールを作るのではなく，最終時間帯から到着を保証していくことで，最適性原理によって動的に最適解を探索する方法を試みる．

(2) 補助問題の導出

補助問題 A' の目的関数及び制約条件を以下に示す．

$$Obj: \min z(a_i^t) = \sum_l \sum_t c_l a_i^t - \sum_l c_l x_l \quad (19)$$

sub.to

$$\sum_l u_l^t a_i^t \leq ac^t \cdot s \quad (20)$$

$$-\sum_l \sum_t a_i^t + \sum_l \sum_t b_l^t + \sum_l \sum_t g_l^t = 0 \quad (21)$$

$$-\sum_l a_i^t + \sum_l g_l^{t+1} = 0 \quad (22)$$

$$a_i^t = 0 \quad or \quad 1 \quad (23)$$

$$b_l^t = 0 \quad or \quad 1 \quad (24)$$

$$g_l^t = 0 \quad or \quad 1 \quad (25)$$

$$u_l^t \geq 1 \quad for \quad \forall l, t \quad (26)$$

$$h_i \leq ac_i^T \quad (27)$$

ここで導出した補助問題 A' は，到着を保証するバイナリー変数 a_i^t を操作変数として表現しているため，0-1 ナップザック問題として捉えることができる．

(3) 手順

まず，問題を解く最初の段階で初期実行可能解を求める．ある時間帯 t 期にネットワーク内のある空港において t' 期間だけ閉鎖する，あるいは機材のトラ

ブルによりそのスケジュールが t' 期間遅延した場合を取り上げる．リスケジューリングを行ったときに考え得る新しいスケジュールで最も望ましくない場合の解を初期実行可能解とする．これは，フライトスケジュールを後ろに平行移動することで得られる．すなわち，フライトの遅延の影響を受けるフライトスケジュールを全て t' 期遅延させる．遅延した便に乗る予定の旅客は全員，目的地への到着が t' 期遅れることになる．そのとき，航空会社が運航しなければならない便数は不変だが，旅行の遅延によって旅客の損益が発生することになる．ここで，初期実行可能解は具体的に式(28)のように表される．旅客の損益の総和を X とすると以下のように表わされる．

$$X = \sum_{rs} \sum_k \sum_{k'} (delay)_{kk'}^{rs} u_{kk'}^{rs} d = \sum_{rs} \sum_k \sum_{k'} t' u_{kk'}^{rs} d \quad (28)$$

この初期実行可能解が最適値の上限値 U となる．すなわち，以下の関係を満たすことになる．リスケジューリングを行った結果求められる目的関数値がこの上限値よりも大きいときは，最適解とはなり得ないことになる．

$$U = X = \sum_{rs} \sum_k \sum_{k'} t' u_{kk'}^{rs} d \quad (29)$$

リスケジューリングは，元々計画していた機材運用計画を組み替えるなどの操作を行い，新たにスケジュールを作成し直すものである．本モデルでは，新しいフライトスケジュールは(2)で設定した補助問題を利用して決定する．補助問題は到着を保証するバイナリー変数 a_i^t を用いて表現した 0-1 ナップザック問題²⁾である．ここで，最終時間帯から分枝限定法を利用して機材ごとにどのリンクのフライトを到着させるかを決定し，時間をさかのぼり，予定通りフライトをしたところまで接続させる．1つの機材でフライトが接続，つまり機材の連続性を保証する制約を満たせば，別の機材について同じ操作を繰り返す．全ての機材についてフライトが接続，つまり式(21)および式(22)を満たせば分枝限定法の作業を終了し，暫定的に新しいフライトスケジュールが決定する．

新たに作成したフライトスケジュールによってODが保存されない場合や，1日の作業を終えたときに機材の配置が乱れる場合がある．この場合には旅客の旅行を保証することと，航空会社が翌日から本来のスケジュールで運航するために追加便を投入する必要がある．

暫定的に決定した新スケジュールから，全旅客の新しい旅行時間，旅行の遅延時間が与件として与えられることになる．これにより，最終的な旅客の損益が計算される．

以上から全体の目的関数値が計算され，その値と初期実行可能解(上限値)を比較して，真の最適値が決

定する．得られた目的関数値が初期実行可能解よりも小さければ新スケジュールが採用されることになる．

(4) 数値計算例

図 1 に示すような，1つの空港を中心とした空港ネットワークに遅延に関するシナリオを与え，このモデルを適用して簡単な数値計算を行った．遅延に関するシナリオとして，「時間帯 $t=1$ 期に空港 2 から空港 1 へ飛行予定のフライトが 1 期遅延する」というものを想定して計算を行った．以下に，主な計算条件を示す．

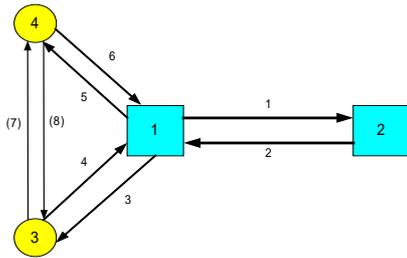


図 1 ネットワーク図
表 1 初期機材ローテーション

aircraft \ t	1	2	3	4	5	6	7	8
aircraft1	1	0	-2	2	0	-1	駐機1	駐機1
aircraft2	駐機3	3	-1	1	-4	駐機4	駐機4	駐機4
aircraft3	駐機4	4	-1	1	-3	駐機3	駐機3	駐機3
aircraft4	2	0	-1	1	0	-2	駐機2	駐機2

表 2 OD データ

r \ s	1	2	3	4	計
1		265	60	60	385
2	330		80	80	490
3	90	105		55	250
4	80	120	50		250
計	500	490	190	195	1375

表 3 各フライトの搭乗人数

便番号	出発空港	到着空港	出発時間帯	搭乗人数
1	1	2	1	245
2	2	1	1	250
3	3	1	2	250
4	4	1	2	250
5	1	2	4	245
6	1	3	4	190
7	1	4	4	195
8	2	1	4	240

紙面の都合上，計算条件およびその結果に関する詳細については，講演時に発表することとしたい．最後に，次章において今回提示したリスケジューリングのモデルの発展性について述べて結びとする．

4．今後の方向性

今回ここではリスケジューリングのために容量制約付きの時間帯近似モデルを提示した．

本モデルのこれからの発展方向として，複数のハブ空港から構成されている HS ネットワークに適用できるように改良を加えることが挙げられる．ハブ空港を複数考慮する場合，それぞれのハブ空港に自身の空港の運航管理を統括するオペレータ(そこを拠点としている航空会社が運航管制を担当している)が存在している．各空港のオペレータは当然，その空港のスケジュールをできるだけ予定通りに消化したいと考える．しかし，そこでそれぞれが好きなようにフライトを消化したとしても，全体として整合性が保たれるとは言えない．そのことを考慮すると，今回のようなモデルの定式化の表現ではふさわしいとは言えない．

HS ネットワークでは各空港のオペレータに加え，ネットワーク全体を管理するオペレータも存在している．モデルにおける新たな参加主体としてネットワーク管理者を想定する．このネットワーク管理者は，ハブ空港を乗り継ぎに利用する旅客の不便益を最小にすることを目的とする．全体ネットワーク管理者と各空港オペレータの両方を主体として考慮することで，モデルは階層性⁴⁾を帯びるものと考えられる．また，ハブ空港間での利害の均衡を保つ必要があるため，フライトの優先順位に関する問題等の考慮すべき条件が新たに考えられる．そういった事を踏まえた上で，新たなモデルの定式化および数値計算例は講演時に発表することとしたい．

参考文献

- 1) Michael F. Arguello, Jonathan F. Bard and Gang Yu : "Models and Methods for Managing Airline Irregular Operations" Operations Research in the Airline Industry, Kluwer Academic Publishers
- 2) Cynthia Barnhart, Fang Lu and Rajesh Sheno : "Integrated Airline Schedule Planning" Operations Research in the Airline Industry, Kluwer Academic Publishers
- 3) 今野浩，鈴木久敏：整数計画法と組み合わせ最適化，日科技連
- 4) 志水清孝：多目的と競争の理論，共立出版株式会社