

遅延・キャンセルの影響を考慮した航空機のリスケジュール方法：マルチハブ空港の場合*
Methodology of flight re-scheduling for reduction of cost due to flight cancel/delay: case of multi hub
airports

溝端翔平**, 竹林幹雄***, 黒沢直紀**, 黒田勝彦****
By Shohei MIZOBATA **, Mikio TAKEBAYASHI ***, Naoki KUROSAWA **, Katsuhiko KURODA ****

1. はじめに

本研究では複数ハブ空港から成る 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ングのモデルを新たに開発することを目的とする。

一般にフライトの遅延やキャンセルが発生した場合、航空会社はスケジュールの再作成（リスケジュールング）を行う。当初のスケジュールから新たに作成したスケジュールへ変更する際、機材のローテーションの変更が伴う。この作業における諸費用が実質的な航空会社の損益になる。スケジュールを構成し直す場合、航空会社はこの損益を最小にするようにリスケジュールングを行わなければならない。しかもこの損益は、その時点での収益の確保という視点から見たものに留まらない。航空サービスという公共性の高いサービスの場合、旅客の被る損失（スケジュール変更に伴う費用の増大、旅行機会の損失など）も同時に考慮しなければならない。わが国の航空事情では現在のところ、深刻な遅延はそれほど現れていないが、航空ネットワークを拡充するにつれ、また航空利用者が国内移動でも増加するにつれ、その復旧の重要性が増すと考えられる。

本研究では特に現在の航空サービスで標準化されている HS ネットワークを対象とし、複数空港間でのスケジュール調整を取り上げる。

2. 最適スケジュール調整モデル

(1) 概要

リスケジュールングを考える上で重要な項目がふたつある。

どの時間帯のどのフライトをキャンセルすべきか、という判断。

フライトをキャンセルされた旅客を運ぶ場合、他のフライトの座席容量制約を考慮。

を考える場合、フライト時間を厳密に表現すれば膨大な組み合わせを処理しなければならず、非現実的である。本モデルでは Yu¹⁾らに従い、時間帯近似法による発着枠管理によるシステムを構築する。これは離発着を定刻ではなく、1日を任意の幅で複数の時間帯に分割し、各時間帯で行われる出発と到着というように時間の概念を緩和するものである。これにより定刻による表現と比較しても最適化における組み合わせ回数を大幅に減少させることが可能になるため、本モデルでも取り入れることとした。

に関しては他のフライトの座席残数が線形制約として働くシステムを考えなければならない。本モデルではこれをサブモデルとして組み込む方法を提案する。

(2) 空港間調整のモデル化

システムに複数のハブ空港が存在する場合を考える。ここでは、それぞれのハブ空港で乗り入れているエアラインの優先性が異なるという一般的な場合を考えている。ハブ空港で優先権を持っているエアラインは自分たちのスケジュール変更が他社よりも優先される、としている。

複数のハブ空港で同時にリスケジュールングを行えば、空港間でそれぞれがリンクや発着時間帯に関して意思や希望が存在するため、空港間で対立が生じる。それぞれの空港の最適スケジュールは他の空港とは異なる可能性が考えられるのである。そのためシステム全体を効率的に運営するには空港間の対立を解消する必要がある。本研究では各空港を統括する調整組織を仮定し、それを Airline Operations Control Center (以下 AOCC) とした。AOCC はネットワーク全体の最適化を目指す。全ネットワークを監視できるわけではない。ゆえに、ネットワーク

*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

****フェロー, 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)

の効率性を何らかの指標により間接的に判断するものとした．ここでは乗り継ぎが多い HS ネットワークにおいて，乗り継ぎ旅客の不効用最小化を目的とすると設定し，モデル化を行った．他方，AOCC は全ネットワークを決定するのではなく，上記の目的を達成するために，限定的なネットワークの変更のみ指示できるものと考えた．ここではハブ間のスケジュールのみ変更できるものとした．

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．
- ・ 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．
- ・ 旅客は当日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．
- ・ 全てのスケジュール旅客フローは与件であり，混雑状況も与件であるとする．

通常，スケジュール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．

(3) モデルの定式化

遅延発生の際，航空会社はリスケジューリングを行う．その際に航空会社自身や旅客が負担することになる追加的コストが発生する．したがって，航空会社はコスト最小化を目的として定式化される．当初航空会社はネットワーク内の各空港で翌日のフライト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が作成されている．リスケジューリングを行う必要が無ければ，当初に作成した最適なスケジュールを消化している状態であるとする．

次にシステム全体の評価としては，本研究では AOCC は航空会社が行ったリスケジューリングの結果を乗り継ぎ旅客の損益が最小化されること評価す

るものとした．これに関しては他にも検討の可能性が存在するが，詳細な検討は今後の課題としたい．

このように AOCC を航空会社の上位の存在として位置づけ，これら 2 つの主体関係に階層性をもたせることにより，コンフリクトを解消することが可能となる．そこで，本モデルでは最適スケジュール調整過程を 2 段階に分けて考える．すなわち，AOCC による最適スケジュール調整（第 1 段階）と航空会社による最適スケジュール調整（第 2 段階）である．

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， v_l^t : t 期のリンク l のフライトに搭乗する乗り継ぎ旅客数， X_{rs} : rs 間 OD 交通量， $u^{rs,k}$: rs 間を経路 k で旅行する旅客数， u_{kk}^{rs} : rs 間を旅行する経路を k から k' に変更される旅客数， $seac_l$: 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 に駐機中の機材数， 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， $T_{l,t}$: 時間帯 t リンク l のフライトの旅行時間， f_l^t : 当初のスケジュールにおける t 期に経路 k のリンク l に配便に関する 2 値変数であり，配便されれば 1，それ以外は 0 の値をとる， g_l^t : スケジュール変更後の t 期に経路 k のリンク l に配便に関する 2 値変数であり，配便されれば 1，それ以外は 0 の値をとる， a_l^t : t 期にリンク l のフライトの到着に関する 2 値変数であり，到着すれば 1，それ以外は 0 の値をとる， b_l^t : t 期の機材の駐機に関する 2 値変数であり，駐機すれば 1，それ以外は 0 の値をとる， $\delta_{l,t}^{rs,k}$: 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 の値をとる 2 値変数， $\delta_{l,t}^{p,q}$: 機材 p ，ローテーション q が t 期にリンク l の

フライトを利用するとき 1 の値をとる 2 値変数，
 G ：航空会社の最適化行動， G^* ：AOCC の最適化行動

以下に航空会社および AOCC の目的関数，制約条件を示す．

【最適化問題：航空会社】：Obj: $\min z(y_l)$

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

$$sub.to \quad - \sum_l \sum_t a_l^t + \sum_l \sum_t b_l^t + \sum_l \sum_t f_l^t = 0 \quad (2)$$

$$- \sum_l \sum_t a_l^t + \sum_l \sum_t b_l^t + \sum_l \sum_t g_l^t = 0 \quad (3)$$

$$u_l^t \leq seat \cdot g_l^t \quad for \quad \forall l, t \quad (4)$$

$$\sum_k u^{rs,k} = X_{rs} \quad (5)$$

$$(delay)_{kk'}^{rs} = T_{k'}^{rs} - T_k^{rs} \quad for \quad \forall rs, k, l, t \quad (6)$$

$$h_i \leq ac_i^{t,end} \quad (7)$$

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．(2) および (3) は機材の連続性を保証する制約である．(4) は機材容量 $seat$ に関する制約である．(5) は OD 保存に関する制約である．(7) は翌日のスケジュール復帰を保証する制約である．

【最適化問題：AOCC】 Obj: $\min z(g_l^t)$

$$= \sum_{rs} \sum_k \sum_{k'} (delay)_{kk'}^{rs} v_{kk'}^{rs} (g_l^t, y_l) d \quad (8)$$

$$sub.to: (delay)_{kk'}^{rs} = T_{k'}^{rs} - T_k^{rs} \quad for \quad \forall rs, k, l, t \quad (9)$$

$$and \quad G(g_l^t) = G^* \quad (10)$$

$$y_l = arc \min \{z(y_l)\} \quad (11)$$

(2-11) は各空港の最適化行動が最適制約として式に組み込まれることを表し，(2-12) は y_l が航空会社の問題の最適解であることを表す．

3. 解法

(1) 概要

前節において定式化を行ったが，直接には最適解を求めることは困難であるため，最初に元の問題から補助問題を作り出すことを考える²⁾．AOCC は遅延により到着が遅れた機材のため機材不足が生じたハブ空港においてフライトの優先順位を決定する．したがって，AOCC の補助問題は遅延発生時の各機材ローテーションの遅延コストの差最大化を目的とすると考えてよい．このとき AOCC が決定した優先されるフライトを与件とし，航空会社は残りのフライトについて補助問題を利用して解く．新しいスケジュール候補を求める．スケジュール候補による局所最適解を分枝限定法により比較することで，主問題の解を求めることが可能となる．

(2) 補助問題の導出

AOCC および航空会社の補助問題の目的関数，制約条件を以下に示す．

【補助問題：AOCC】：Obj: $\min z(g_l^t)$

$$= \sum_l \sum_t \left\{ (delay)_i v_l^t d \right\} g_l^t \delta_{l,t}^{p,q} - \sum_l \sum_t \left\{ (delay)_i v_l^t d \right\} g_l^t \delta_{l,t}^{p,q'} \quad (1)$$

sub.to

$$\sum_l v_l^t \delta_{l,t}^{p,q} \leq ac^t \cdot seat \quad (2)$$

$$\sum_l \delta_{l,t}^{p,q'} = ac_i^t \quad (3)$$

$$(delay)_l^t = T'_{l,t} - T_{l,t} \quad for \quad \forall l, t, p, q, q' \quad (4)$$

ここで，(3-2)は時間帯 t における機材容量に関する制約，(3-3)は時間帯 t における空港 i での機材ローテーションの総数に関する制約である．また(3-4)にリンク l 時間帯 t における旅行遅延時間を示す．

【補助問題：航空会社】：

$$Obj: \min z(a_l^t) = \sum_l \sum_t c_l a_l^t - \sum_l c_l x_l \quad (5)$$

$$sub.to: \sum_l u_l^t a_l^t \leq ac^t \cdot seat \quad (6)$$

$$- \sum_l \sum_t a_l^t + \sum_l \sum_t b_l^t + \sum_l \sum_t g_l^t = 0 \quad (7)$$

$$h_i \leq ac_i^{t,end} \quad (8)$$

ここで導出した航空会社の補助問題は、到着を保証するバイナリー変数 a_i' を操作変数として表現している。0-1 ナップザック問題として捉えることができる。また制約条件については航空会社の最適化問題の制約条件とほぼ同様である。

(3) 解法

まず、初期実行可能解を求める。これは遅延発生時間帯以降の時間帯において遅延の影響を受けるフライトのスケジュールを全て遅らせることにより、「最悪の状態であるが全ての制約条件を満足する解」として得ることができる。

次に AOCC は機材不足が生じたハブ空港において各ローテーションを比較し、フライトの優先順位を決定する。決定されたフライトを航空会社に与件として与える。航空会社は残りの機材スケジュールに関して、分枝限定法を用い決定していく。まず1つの機材ごとの動きに着目する。機材ごとに最終時間帯から到着リンクを決定し、機材編成によるコストを算定し、全体のスケジュールを作成する。そのときに機材の連続性(航空会社の補助問題の制約条件式(7))などの条件を満足しなければならない。全ての機材について同じ作業を行って暫定的に新スケジュールが決定する。

早い時間帯からスケジュールを作るのではなく、問題を解く最初の段階で最終時間帯を決定し、そこから最適性原理により動的に最適解を探索する方法について考究する。得られた最適解と初期実行可能解を比較して最終的にリスケジューリングが終了する。この解法において考慮すべき条件など詳細は講演時に発表する。以下の図-1は簡単な全体アルゴリズムである。

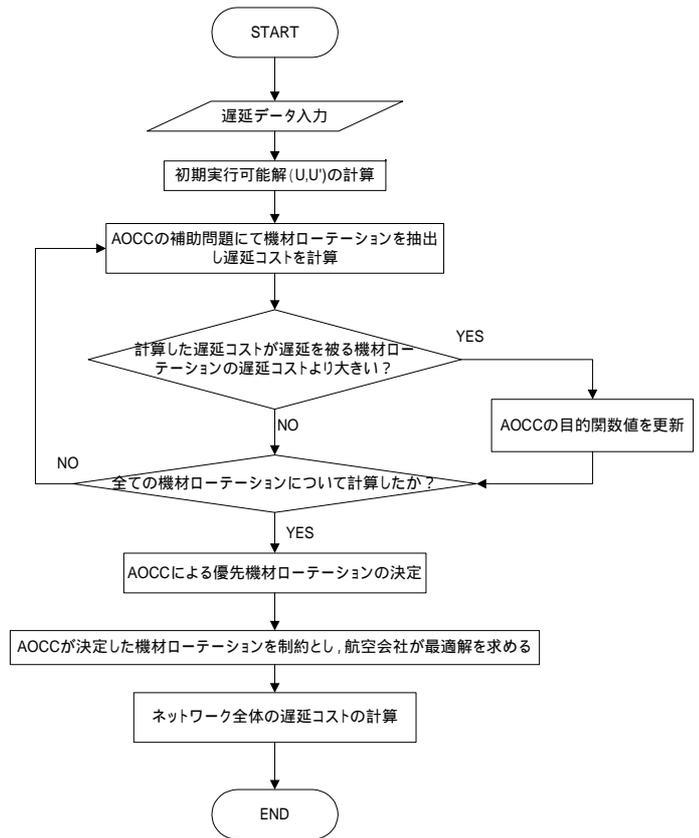


図 - 1 全体アルゴリズム

4. 数値計算例

前節において述べた最適解を得る方法を検証するために、フライトの遅延に関するシナリオ、空港間ネットワークやフライトに関するデータなど初期条件を与えて数値計算を行った。数値計算結果については講演時に発表する。

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) 竹林幹雄, 黒沢直紀: 航空旅客輸送における最適スケジュール調整手法に関する研究, 土木計画学研究・講演集 Vol.28, 2003.11
- 3) Cynthia Barnhart, Fang Lu and Rajesh Sheno: "Integrated Airline Schedule Planning" Operations Research in the Airline Industry, Kluwer Academic Publishers
- 4) 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

