

ハブ・スポーク型ネットワークにおける遅延リカバリ問題の解法*

Methodology for delay recovery problem under hub-spokes network system*

竹林幹雄**・黒田勝彦**・黒沢直紀***・溝端翔平****

By Mikio TAKEBAYASHI**, Katsuhiko KURODA**, Naoki KUROSAWA*** and Shohei MIZOBATA****

1. はじめに

ネットワークを基本とした産業、特に航空輸送においては定時性の確保は空港の混雑が深刻化するにつれ、大きく注目されるようになってきている。米国では90年代に入ってから、オヘア空港などの主要ハブ空港での恒常的な遅延のみならず、ローコストキャリアの台頭による航空機の小型化の増進の影響で、中小の空港においてもフライトの遅延、キャンセルが深刻化している。とりわけ、機材繰りの問題でフライト計画を大きく変更しなければならない場合、その損失の大きさはネットワークの規模が大きければ大きいほど深刻である。

米国では80年代中期から遅延の影響を回避するための手法、リスケジュールの研究が盛んに行われるようになっていく。ロサンゼルス空港やニューヨーク・ラガーディア空港など主要空港での遅延が非常に深刻化していたため、こういった手法の開発は喫緊の課題だったのである。代表的な研究としては時間帯近似法を用いたArguelo¹⁾、Tengueville²⁾の研究が挙げられよう。しかし、リスケジュールの方法論そのものはスケジュール問題と本質的には同質であるため、Barnhartの一連のスケジュール問題に関する解法研究³⁾⁴⁾にも触れる必要があろう。Barnhartはスケジュール問題を機材配置問題とクルー割り当て問題の複合として捉える必要性を説き、特に機材配置問題に関して列遅延生成法を取り入れた線形計画問題で求解可能であることを理論的に示した。Barnhartの研究は解法を大きく進化させたということでその後の研究に大きく影響を与えたといえ、本研究での解法でもその成果を利用している。

しかし、多くの研究では意思決定者は1人であり、すなわち1エアラインの行動が最適化されればよいという前提のもとに問題が定式化されている(例えばRosenberger⁵⁾)。

*キーワードズ: 遅延, リスケジュール, ハブ・スポーク型ネットワーク

**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, TEL078-803-6017)

**正員, 工修, 日本通運(株) 航空貨物部門

(東京都港区東新橋1丁目9番3号, TEL: 03-6251-1111)

**学生員, 神戸大学大学院自然科学研究科

(神戸市灘区六甲台町1-1, TEL078-803-6017)

しかし、実際には次のようになっている。米国を例に挙げると、1エアラインの運航計画は最終的には運行計画管理者であるAOC (Airline Operation Center)⁶⁾が把握するが、各地点に配置されたハブ空港(ローカルハブと呼ぶことにする)での離発着管理はローカルハブ・オペレータ(LHOと呼ぶことにする)に一任されている。このLHOは自空港のハブキャリアの運行を最優先するが、換言すると自空港の利用が最も効率よく行われるように離発着管理を行うことができるのである。このような構造になっているため、遅延などが生じた場合運行管理で空港間でコンフリクトが生じる。AOCはこういった運行におけるコンフリクトを把握し、フライト調整を行うがその手法そのものは明らかになっていない。また、全体としてどのようにパフォーマンスが改善されたのかは、実際のところ言及されていないのである。

このような空港間の利害対立が生じるのは、米国国内市場のように広範な単一市場だけではなく、欧州市場や規制緩和が進む東アジア市場も例外ではない。スターアライアンスに代表されるグローバル・アライアンスが拡大するにつれ、アライアンスのネットワークパフォーマンス向上が問われるようになり、これはひとえにスケジュールの遅れを、少なくとも近距離路線でどのように解消すべきかということに大きく依存するようになると考えられる。

本研究は以上のような問題意識に基づき、ハブ・スポーク型航空輸送ネットワークにおける遅延リカバリ問題を捉える基本的枠組みを提供するとともに、複数ハブ下におけるスケジュール調整法について定式化、およびその数値計画的解法について検討する。

2. モデル

(1) リスケジュール問題における問題設定

航空市場におけるスケジュール・リスケジュール問題の枠組みでは、伝統的に①機材取り回し、②スロット制約、③乗組員割り当て、の3種の制約が何らかの形で考慮されていることが多い。しかし、スケジュール問題と異なり、リスケジュール問題の場合、既に旅客の予約が完了しているため、次のような問題を新たに考慮する必要がある。

- 1) 遅延・キャンセルにより影響を受ける旅客の不利益。
- 2) 機材の供給座席数。
- 3) リスケジュールによって新たに生じるリリーパーフライトの費用。

1)はリスケジュールにより遅延・キャンセルの影響を受ける旅客の不利益は、通常さまざまな形でコストとしてエアラインに反映されるが、このコストを縮小することでエアラインの収益構造への影響を最小限に抑えることができる。また、旅客の不満はネットワークへの信頼性の低下につながるため、長期的にはできるだけ縮小することで、ネットワークの信頼性の向上が期待でき、需要の維持を図ることができる。2)は予約が完了しているために、旅客のスケジュール上の機材への割り当ては決定している。リスケジュールを行う場合、新たな割り当てを考えなければならないが、この際機材の容量制約が非常に大きなウェイトを占めることになるため、考慮する必要がある。3)は場合によってはリリーパーフライトを行う必要が生じ、その際の費用も勘案する必要がある。

このようなリスケジュール特有の問題を含めながら、問題を定式化することになるが、制約が複雑化すれば非常に求解が困難になる。本研究では、問題の本質がリスケジュールにおける空港間の調整問題であるため、リスケジュール特有の問題は全て考慮し、スケジュール問題共通の問題設定については①のみ考慮することとし、②、③は緩和し、今後の課題とすることとした。

次に本研究で採用した主な前提を以下に示す⁷⁾。

【前提条件】

- 1) 当該トラブルが発生した時間帯以降でのリスケジュールで考慮される旅客の行動は既に決定されており、ノー・ショウ（予約していながら搭乗しない）などの不確実性は考慮しないものとする。
- 2) 各機材は着陸後、整備のために一定の時間駐機しなければならない。整備終了後であれば任意の時間帯に離陸できるものとする。
- 3) フライトスケジュールは時間帯近似法によって記述された時間帯で管理されるものとする。
- 4) 全てのエアライン、全てのフライトで同一の機材が運行されることとする。
- 5) エアラインはリスケジュール後、翌日第1便までに全てのフライトを復旧しなければならないとする。
- 6) エアラインは全ての旅客を翌日第1便までに全ての目的地に輸送しなければならないとする。

1)はリスケジュール対象フライト以降のフライトに搭乗する旅客の影響を計量するための仮定である。全て予約通りに実行される状態をもとに計算されることを表している。2)はディスパッチを行うことができる最小時間は整備時間

で決定されることを表すために導入した。3)以降は計算の煩雑さを避けるために導入された設定であり、今後より実用性を向上させるためには緩和する必要がある。特に、4) 5)に関しては、翌日以降の任意の時間にダイヤグラムが復旧する状態を許すことは理論的には可能である。しかし計算が非常に煩雑になるため、本研究では最終調整時刻を与件にし、エアラインのスケジュールに関する未知数を限定することとした。

次に調整の主体となる2種類の空港オペレータについての設定について検討する。

欧米の空港では通常、特定エアライン（ないしはグループ）のシェアが突出している場合が多く、その多くはハブ指定している場合がほとんどである。当該空港はそのエアラインの意向を最大限受け入れることになり、それはスケジュールやスロット割り当てに関しても同様である。このため、スケジュールに関する限り当該空港（ここではその性質からローカルハブ空港と呼ぶことにする）の目的とエアラインのスケジュール調整の目的はほぼ同一視できるものと仮定できる。本研究ではこのようなローカルハブ空港のオペレータをLHOとして表すこととする。すなわち、自空港をハブ空港とするエアラインのスケジュール調整を最優先し、その他のエアラインのスケジュールはそれに準じるという判断を行うものとする。このため、LHO間で優先するスケジュールが異なるため、スケジュール調整にコンフリクトが生じる。LHO間だけで調整することも可能であると考えられるが、早期に新たなスケジュールを確定する必要があるため、意思決定過程を簡略化することが望まれる。そのため本研究ではLHOを超越する形で調整を行う主体をAOCで行わせることとした。米国におけるAOCはエアラインに帰属するものでその機能はGrandeau⁶⁾が紹介しているように自エアラインのスケジュールの管理であり、エアライン間の調整を行うものではない。しかし、その調整機能をLHO間に拡張することは制度上の問題を除けば可能である。このため、本研究ではAOCの調整機能を想定し、モデル化することとした。ただし、AOCの調整がネットワーク全体となれば、検討規模が巨大となるため、以下のような前提条件を設けてAOCの調整権限の範囲を縮小するものとした。

【AOC行動における前提】

AOCはハブ間フライトのコンフリクト（ここではハブ間をつなぐフライトにおいて、LHOごとに同じ機材の取り回しに関して異なるスケジュールを割り付けること）が存在する場合のみ調整する。すなわち、調整権限はハブ間フライトのみとする。スポークへのフライトはLHOが独自に設定するものとする。

AOC行動の前提にあるように、AOCの干渉はハブ間フライトに限定される。AOCはネットワーク全体の効率を向上

させることを行うが、それはハブ間フライトの調整を通じた間接制御であることを表している。

(2) 定式化

定式化においては前提条件3)で示した時間帯近似法に沿った方法を採用する。以降、特に断らない限り時間帯 t は実時間をいくつかの時間帯に集計化したもので表されているものとする。ただし、時間帯の長さは一定である。

まず、LHOの行動については、自空港を利用する旅客およびハブ指定したエアラインの費用を最小化するように、自空港発着スケジュールの再調整（リスケジュール）を行うことを目的とする。 r を出発地（ここでは出発空港を示す）、 s を到着地（到着空港を示す）とし、 k を調整前の旅客の選択する経路番号、 k' を調整後の経路番号であるとする。また、フライトの運航区間（リンクとする）番号を l とする。LHOの制御変数が、時間帯 t 、運航区間 l での割付を表すバイナリ変数 $g_l^{t,a}$ とすると、LHOの直面する問題は以下のような費用最小化問題として定式化することができる。

【最適化問題：LHO】

$$\text{Object: } \min Z^n(g_l^{t,a}; G^*) = \sum_l c_l \sum_i g_l^{t,a} - \sum_l c_l \sum_i f_l^{t,i} + \sum_{rs} \sum_k \sum_{k'} (delay)_{kk'}^{rs} u_{kk'}^{rs} (g_l^{t,a}) D \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{t=1}^{t-1} g_l^{t,a} \delta_l^{t,i} \geq \sum_{t=1}^t g_l^{t,d} \delta_l^{t,i}, \text{ for } \forall i \in I, \quad (2-1)$$

$$\sum_l g_l^{1,d} \delta_l^{1,i} \leq h_i, \text{ for } \forall i \in I, \quad (2-2)$$

$$g_l^{t+R_l,a} = g_l^{t+R_l,d}, \text{ for } \forall l \in \Theta, \quad (3)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=t-1} g_l^{t,a} \delta_l^{t,i} - \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{l=t-1} g_l^{t,d} \delta_l^{t,i} = h_i, \text{ for } \forall i \in I, \quad (4)$$

$$u_l^{t,i} \leq seat \cdot g_l^{t,i}, \quad (5)$$

$$g_l^{t,i} = \{0,1\}, \text{ for } \forall l \in \Theta, t = \{0, T-1\}, \quad (6)$$

$$\sum_{k'} \sum_k u_{kk'}^{rs,k} = X_{rs}. \quad (7)$$

ここで、 $g_l^{t,a}$ 、 $g_l^{t,d}$ ：制御変数であり、 a が到着、 d が出発であることを示す。時間帯 t におけるリンク l で出発便（到着便）が設定されていれば1、そうでなければゼロを取る。 $u_{kk'}^{rs}$ ：ODペア rs の旅客のうち経路を k から k' に変更されたフローであり、元々の経路フロー u_k^{rs} に関しては

$$u_k^{rs} = \sum_{k'} u_{kk'}^{rs,k}$$

の関係を満たす。また、 u_k^{rs} とリンクフローとは以下の関係を満たす。

$$u_l^{t,i} = \sum_{rs} \sum_k u_k^{rs} \delta_k^{rs,l,i}, \quad (8)$$

$u_l^{t,i}$ はフライト (l,t) でのリンクフローであり、 $\delta_k^{rs,l,i}$ 経路 rsk を選択した旅客がフライト (l,t) を使用する場合1を取り、それ以外はゼロとなるバイナリ変数である。

c_l はフライトに固有の運行費用である。

$f_l^{t,i}$ は変更前のフライトスケジュールであり、与件である。

$(delay)_{kk'}^{rs}$ ：ODペア rs の旅客のうち、経路変更（ k から k' へ）を行った場合の不利益を表す。これは以下のような関係式から導かれる。

$$(delay)_{kk'}^{rs} = R_k^{rs} - R_{k'}^{rs}, \quad (9)$$

R_k^{rs} と $R_{k'}^{rs}$ は変更前と変更後の経路旅行時間を表す。また、 $R_{k'}^{rs}$ は待ち時間も考慮された値である。

D は旅客の平均的な遅延の時間価値である。 G^* はAOCの最適化行動の帰結として与えられるハブ間スケジュールである。 R_l はリンク l でのラインホール時間である。

また i は空港番号を表し、 I は空港番号の集合を表す。 h_i は翌朝 $t=1$ 時点での必要機材数である。

式(1)は目的関数であり、AOCの制御下における最適化であることを表している。式(2-1)、(2-2)は機材運行に関する制約であり、駐機している数以上のフライトは設定できないことを示している。特に(2-2)は初発($t=1$)時での空港での機材数の釣り合い式であり、 $t=1$ で全ての機材が発着すれば等式で表されることになる。式(3)は任意の機材の運行の連続性に関する制約で、運行は全て連続的に行われることを表している。式(4)は最終時間帯 T での機材のバランスを表しており、翌日第1便までに復旧することを表したものである。式(5)は機材容量の制約、式(6)は制御変数が全てバイナリ変数であることを表す。また式(7)はサブ問題として定義される旅客の配分でのOD交通量の保存制約である。

次にAOCの行動について定式化を行う。

AOCはネットワーク全体の効率化を目指してハブ間フライトの調整を行うものとする。このとき、「ネットワーク全体の効率化」の指標の違いからさまざまな形式で定式化が可能であると考えられる。通常、AOCに関してはエアラインの運行効率も考慮したLHOと同形式の問題設定を行うことが考えられる。しかし、このように考えた場合、乗り継ぎ旅客の不効用は直行旅客の不効用とエアラインの費用の大きさと比較すると埋没してしまう可能性がある。しかし、遅延により乗り継ぎが不可能になるなど乗り継ぎ旅客の不効用はネットワーク規模で発生することから、乗り継ぎ旅客の不効用を適切にリスケジュールに反映させる必要があると考えられる。ゆえに本稿では、LHOは空港の直接利用者であるエアラインと直接利用客の不利益を考慮するが、AOCは局所的な最適化では捨象される可能性のある乗り継ぎ旅客の効率性をもって「ネットワークの効率化」の指標とすることとし、乗り継ぎ旅客の不効用を最適化する

ものと設定した。

AOCの直面する最適化問題は以下のように定式化される。

$$\text{Object: } \min Z^{AOC} (g_l^{t,a} \in \Pi^{HUB}) \\ = \sum_{rs} \sum_k \sum_{k'} (delay)_{kk'}^{rs} u_{kk'}^{rs} \delta_{kk'}^{rs, CONNECT} d, \quad (10)$$

Subject to

$$u_{kk'}^{rs} = \arg \{ \min (Z^n : n = 1, \dots, N) \} \\ , \text{for } \forall rs \in \Omega, kk' \in \Xi \quad (11)$$

$$g_l^{t,a} = \{0,1\}, \text{for } \forall l, t, \quad (12)$$

ここで $u_{kk'}^{rs}$ は OD ペア rs の旅客のうち kk' という変更を行った旅客のフローを表す。 $\delta_{kk'}^{rs, CONNECT}$ は OD ペア rs の旅客のうち kk' という変更を行った旅客が乗り継ぎ旅客である場合 1 を取り、それ以外はゼロとなるバイナリ変数である。 Ω は対象とする OD ペアの集合であり、 Ξ は旅客の経路選択集合である。 Π^{HUB} は AOC が持つ戦略の集合である。

(3) 解法

本モデルはbi-level最適化問題に加えて、動的最適化の要素も組み込まれた極めて複雑な最適化問題である。しかし、モデルを構成している部分問題自体は全て線形計画問題として記述されるものである。ゆえに、線形計画問題の特性を考慮しつつ問題を分解すれば、大幅に計算量が削減できると考えられる。

まず、 G^* が与えられたものとし、最適化問題の部分問題である各LHOの最適化問題について考える。これはネットワークの構成問題（離散凸計画問題）と動的最適化を組み合わせた問題であり、基本的にナップザック問題の系としてとらえることができる。この系の問題についてはハブオペレータが 1 人の場合、Barnhartが効率的な解法アルゴリズム³⁴⁾を提案している。これは機材の運用計画に対して列遅延生成法を適用し、検討する組み合わせの規模を大幅に縮小するものである。これは複数のハブオペレータが存在したとしても、各オペレータの最適化問題そのものは本質的に同じであり、本稿で提案するモデルの部分問題の解法としても適用可能である。

さて、部分問題【LHO】はネットワーク構成問題（右辺第 1, 2 項）と旅客の不効用項（右辺第 3 項）で構成される。ネットワーク構成問題はBarnhartの方法³⁴⁾で求解可能であるが、旅客の不効用の計算はネットワークが確定しなければ計算することはできない。言い換えると、旅客の不効用の計算とネットワーク構成問題は互いに干渉する構造となっている。しかし、旅客の不効用計算は、旅客の配分を線形計画問題化して行うため、旅客の配分問題を常に実行可能な状態にすることで通常の繰り返し演算を適用することが可能になると考えられる。実際、旅客の線形計画問題に対して、実行可能性を保証するためのスケジュールを

罰金項として組み込むことで、実行可能性を保証しつつかつネットワーク構成問題と旅客の不効用計算を繰り返し演算として実行することが可能になる。

AOCの最適化は次のように考えることができる。AOCとLHOの関係はbi-level問題⁸⁹⁾であり、今下位のLHOの最適解の候補が $\{x^w\}$ として与えられたとしよう。AOCはコンフリクトが生じる局所最適解を抽出し、時間帯が早いコンフリクトから比較することになる。これが分枝限定法の分枝 w に相当する。新たに条件設定された分枝 w に関して新たなLHOのスケジュール $\{x^w(w)\}$ を構成し、分枝を更新して探索を続行する。全ての時間帯、全ての分枝を比較することでAOCの最適戦略を求めることができる。この方法によれば、非線形性の強い最適化問題でも求解可能であるが、厳密な意味での分枝限定法の適用は、計算に長時間を要する。このため、実用範囲ではどん欲法などの簡略解法を用いることが考えられる。

以上の流れをまとめると次のようになる。

【最適化アルゴリズム（AOC:深さ優先, LHO:列遅延生成法）】

STEP 0: 実行可能解を設定する。

STEP 1: [LHO 最適化]

STEP 1.1: 列遅延生成法で構成されたLHOの線形計画問題（リスケジュール）を繰り返し演算により解く。このとき旅客の配分も同時に解かれる。収束後、STEP 1.2 に進む。

STEP 1.2: 全てのLHOのリスケジュールが終了すればSTEP 2 へ、そうでなければSTEP 1.1 にもどり、探索を続ける。

STEP 2: [AOC 調整過程]

STEP 2.1: 全てのコンフリクトから導かれる分枝 w を探索終了すれば探索終了でAOCの最適解を得る。そうでなければSTEP 2.2 に進む。

STEP 2.2: 最も早い時刻に生じるコンフリクトを探索する。探索後STEP 2.3 に進む。

STEP 2.3: 分枝限定法を適用する。コンフリクトごとに分枝 w を構成する。最も遅い時間帯に生じるコンフリクトまで構成を終了すれば、そのときのAOCの目的関数値を計算し、STEP 2.4 に進む。そうでなければ時間帯を進め、STEP 2.2 にもどる。

STEP 2.4: 分枝 w で保存された最適候補の組み合わせと比較する。目的関数値が改良されていれば、新たに最適候補として保存し、当該分枝での探索を続行する。そうでなければ分枝 w での探索を中止し、別の分枝 w' に移動し、STEP 2.1 に戻る。

STEP 2.4での探索候補の絞り込みが探索精度に大きく影響する。ここでは深さ優先としたアルゴリズムを採択しているが、保存される分枝の数が多ければそれだけ精度よく探索することができる。

3. 数値計算

ここでは、提案したモデルの挙動を簡単な数値計算により確認し、モデルの挙動特性を把握する。

(1) 基本設定

対象とする市場は6ノードで構成され、空港1、2がそれぞれハブである（図-1参照）。空港3～6はスポーク空港である。ハブ1は路線[1]～[6]および [11], [12]を決定できる。ハブ2は[1], [2], [7]～[10], [13]および [14]を制御できる。ただし、AOCの干渉が[1][2]で行われる場合は、その決定が優先される。

次にリスケジュール前の機材運行スケジュールは表-1に示すとおりである。表中のセル内の番号は空港番号を表し、無印のものは出発, “-”記号は到着, “s”は駐機, “0”は飛行中であることを示す¹。

表からわかるように、元のスケジュールでは $t=1$ からスケジュールを開始し、 $t=16$ で全て終了するように構成されている。これを図化したものが図-2である。左から右に向かって機材1～6が表記されている。

次にOD旅客数、時間帯別OD旅客数、フライト別旅客フロー、機材の費用構成に関しては表-2～5に示したものを用了。ここで用いたフローや費用項目は仮想的なものであり、無論他のパターンでも計算可能であるが、本稿ではモデルの挙動認識を容易にするために、以降全てこの条件を基本とする。機材の容量に関してはB-767を想定し、375席/機とし、遅延の時間価値 D は $D=100$ とした。

(2) シナリオ分析によるモデルの挙動特性

以下のようなシナリオを用いてモデルの挙動を把握する。

〔例〕

$t=5$ においてハブ1から2に運行予定だったフライト番号7（機材番号2）の出発時刻が最低1期以上ずれ込む。

初期実行可能解（図-3 参照）は全てのフライトを単純に遅延させ、構成されるスケジュールとなり、3399 人のノンストップフライトの旅客、1856 人の乗り継ぎ旅客に影響が出ることになる。

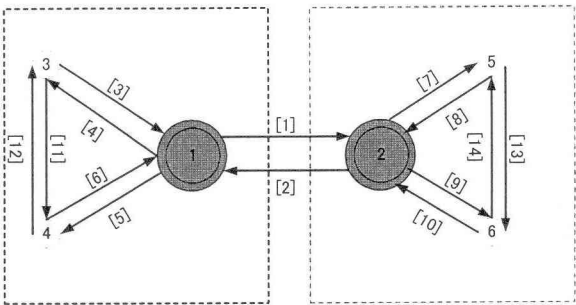


図-1 数値計算で使用したネットワーク

表-1 機材ローテーション

aircraft	t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	s3	s3	3	-1	1	-4	4	-1	1	-3	3	-1	1	0	0	-2	s2	s2	s2	s2	
2	s4	s4	4	-1	1	0	0	-2	2	-5	5	-2	2	0	0	-1	s1	s1	s1	s1	
3	1	0	0	-2	2	-5	5	-2	2	0	0	-1	1	-4	s4	s4	s4	s4	s4	s4	
4	2	0	0	-1	1	-3	3	-1	1	0	0	-2	2	-6	s6	s6	s6	s6	s6	s6	
5	s5	s5	5	-2	2	-6	6	-2	2	-6	6	-2	2	-5	s5	s5	s5	s5	s5	s5	
6	s6	s6	6	-2	2	0	0	-1	1	-4	4	-1	1	-3	s3	s3	s3	s3	s3	s3	

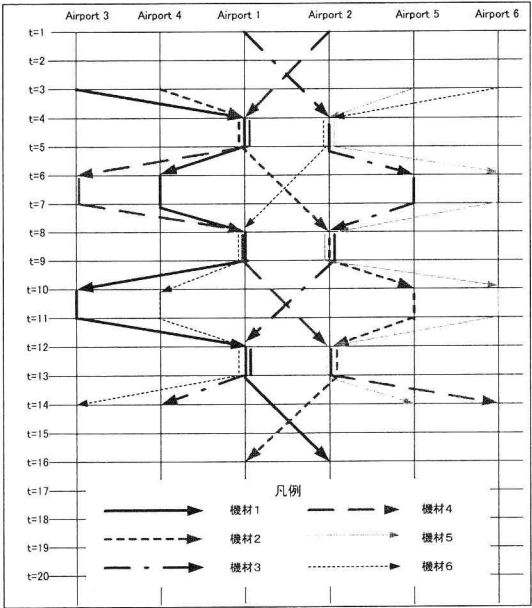


図-2 基本となる機材運用計画（遅延前）

表-2 OD旅客数

r \ s	1	2	3	4	5	6
1		350	138	162	86	92
2	330		92	72	168	165
3	156	190		110	40	46
4	166	214	80		34	36
5	192	166	46	40		78
6	220	174	52	48	88	

¹ 例えば $t=7$ で機材1は「4」であるが、この場合「 $t=7$ で機材1は空港4を出発」ということを表す。「s3」であれば「その時間帯は当該空港で駐機中」であることを表す。

さて、各LHOは自己の目的関数を最適化した結果、ハブ1の*t*=5においてコンフリクトが生じることが容易に理解される。すなわち、機材1および4は*t*=5での機材2のリリーバーフライトとして使用される可能性がある。結果的に1、4に関してコンフリクトが生じ、AOCの介入が必要となる。AOC介入の結果は図-4に示されるとおりである。

図-4では機材1（左側実線）がリリーバーフライト（*t*=5〜*t*=8）として設定されていることがわかる。リスクスケジュールの特徴として、多くの機材の運用パターンが入れ替わっていることがわかる。例えば、機材1と機材4（*t*=1でハブ2初発の長破線）の運用パターンは*t*=10で入れ替わっている。同様に機材2（左側2番目破線）は機材1と*t*=8で入れ替わっている。このような入れ替わり現象はAOCの介入により生じる。ハブ1から2へ向かうフライトのうち、*t*=5（最適スケジュールで機材1により運行）、*t*=10（機材1）および*t*=14（機材6）、2から1へのフライトのうち*t*=5、*t*=9および*t*=13が変更を受けたフライトである。

次に、AOCの介入によるコストの削減の程度について評価を行う。表-6は旅客の遅延費用の増分を比較したものである。ただし、エアラインの追加的費用は新たなフライトを設定しなかったためゼロとなっている。

また、復旧時間については、図-4に示されるように最終復旧時間は*t*=17と1期遅れることにとどめることができることがわかる。

表から明らかなように、旅客全体の費用に関してはAOCの介入により50%以上の削減が行われ、特に乗り継ぎ旅客のみに着目した費用削減効果は70%近くに上る。また、この数値計算ではリリーバーフライトは生じなかったが、遅延以降のフライトのロードファクターが極めて高ければリリーバーフライトが必要になると考えられるが、この点については別の機会に論じることとしたい。

最後に、AOC介入のパターンについて検討する。

図-5は*t*=9においてハブ2で遅延が発生するというシナリオの下で計算を実施したものである。図-4、5ともに見られるように2期間にわたって駐機するという長い駐機が取られていることがわかる。例えば図-4ではハブ1で*t*=8と*t*=10において機材3、4の駐機パターンがこれに相当する。これはAOCの目的関数が乗り継ぎ旅客の便益の関数となっているために、最も早期に乗り継ぎ旅客の輸送が完了する調整パターンを選択する傾向にあるためであると考えられる。しかし、この傾向は目的関数の設定に大きく依存するものか、あるいは目的関数の設定に依存せずリスクスケジュールを行う場合の一般的傾向であるかは即断できない。このため、異なる目的関数を設定の上、調整の特性に関する感度分析を実施し、目的関数の違いによる影響を検討することが必要であると考えられる。

表-3 時間帯別OD旅客フロー

<i>t</i> \ <i>t</i> '	11	12	13	14	15	16	21	22	23	24	25	26	31	32	33	34	35	36
1	0	94	0	0	42	56	92	0	38	46	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	62	0	34	22	29
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	82	52	66	20	18	78	0	24	14	48	54	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	66	0	36	18	26
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	90	38	44	24	18	82	0	30	12	62	63	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	62	0	40	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	84	48	52	0	0	78	0	0	58	48	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	0	350	138	162	86	92	330	0	92	72	168	165	156	190	0	110	40	46

<i>t</i> \ <i>t</i> '	41	42	43	44	45	46	51	52	53	54	55	56	61	62	63	64	65	66
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	66	70	28	0	18	16	62	58	22	20	0	30	72	62	32	26	34	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	48	74	16	0	16	20	64	60	24	20	0	18	72	52	20	22	30	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	52	70	36	0	0	66	48	0	0	30	76	60	0	0	0	24	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	166	214	80	0	34	36	192	166	48	40	0	78	220	174	52	48	88	0

表-4 フライト別旅客フロー

フライト番号	発時間帯	着時間帯	ラインホール	発空港	着空港	PAX
1	1	4	3	1	2	192
2	1	4	3	2	1	176
3	3	4	1	3	1	198
4	3	4	1	4	1	198
5	3	4	1	5	2	192
6	3	4	1	6	2	226
7	5	8	3	1	2	328
8	5	8	3	2	1	350
9	5	6	1	1	3	118
10	5	6	1	1	4	146
11	5	6	1	2	5	124
12	5	6	1	2	6	140
13	7	8	1	3	1	192
14	7	8	1	4	1	174
15	7	8	1	5	2	186
16	7	8	1	6	2	196
17	9	12	3	1	2	352
18	9	12	3	2	1	348
19	9	10	1	1	3	132
20	9	10	1	1	4	140
21	9	10	1	2	5	152
22	9	10	1	2	6	135
23	11	12	1	3	1	152
24	11	12	1	4	1	158
25	11	12	1	5	2	144
26	11	12	1	6	2	160
27	13	16	3	1	2	216
28	13	16	3	2	1	220
29	13	14	1	1	3	158
30	13	14	1	1	4	148
31	13	14	1	2	5	140
32	13	14	1	2	6	142

表-5 運行費用

	リンク番号	発空港	着空港	ラインホール	コスト
ハブ空港利用フライトの運行費用	1	1	2	3	35000
	2	2	1	3	35000
	3	1	3	1	25000
	4	3	1	1	25000
	5	1	4	1	25000
	6	4	1	1	25000
	7	2	5	1	20000
	8	5	2	1	20000
	9	2	6	1	20000
	10	6	2	1	20000
スボーク間輸送の運行費用	11	3	4	1	10000
	12	4	3	1	10000
	13	5	6	1	10000
	14	6	5	1	10000
駐機費用	15	1	1	1	1000
	16	2	2	1	1000
	17	3	3	1	1000
	18	4	4	1	1000
	19	5	5	1	1000
	20	6	6	1	1000

表-6 旅客の費用削減効果

初期実行スケジュール		最適スケジュール	
旅客全体の費用	乗り継ぎ旅客の費用	旅客全体の費用	乗り継ぎ旅客の費用
339900	185600	158400	77200

注) エアラインの新たなフライトは生じないので、エアラインの追加的費用はゼロである。

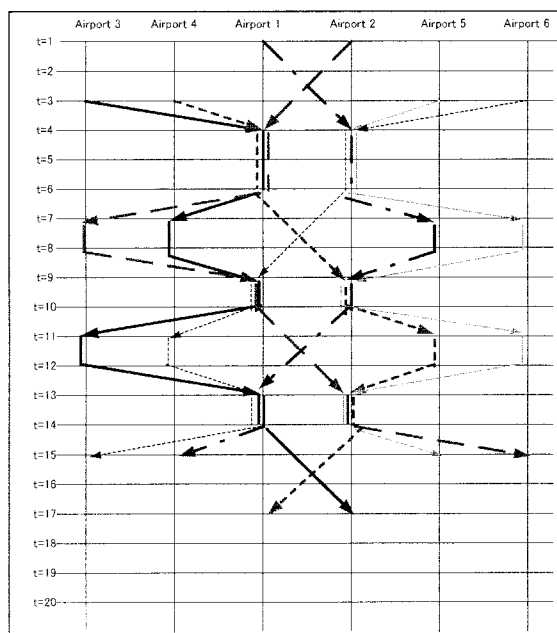


図-3 初期実行可能スケジュール (t=5で遅延発生)

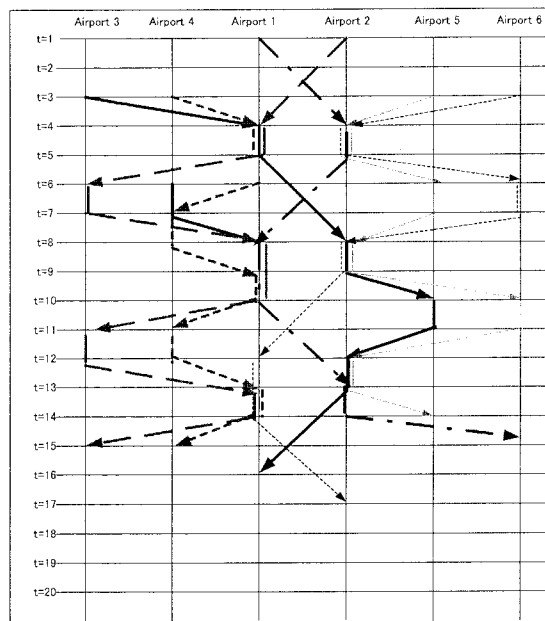


図-4 最適スケジュール (t=5で遅延発生)

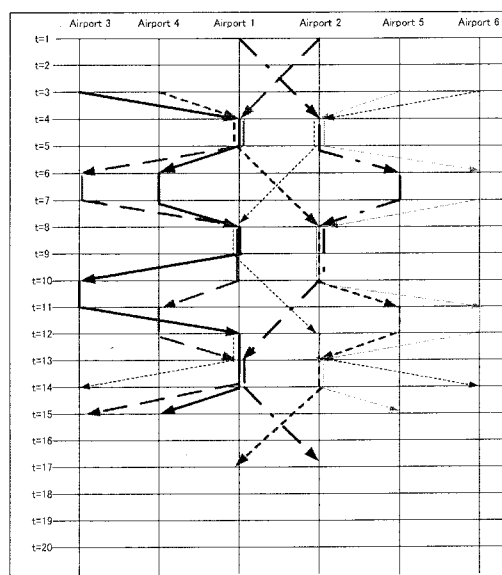


図-5 最適スケジュール (t=9で遅延発生)

5. おわりに

本稿では複数ハブ空港で構成された航空ネットワークにおける遅延における影響を最小限にとどめるようなリスケジュール方法について考究した。得られた主な知見を以下にまとめる。

- 1) AOCをLHOの上部組織としてハブ間フライトを調整する機能を持たせることを提案し、ダイヤグラムの調整を最適化問題として定式化した。

- 2) LHOの最適化問題とAOCの干渉問題をbi-level問題として示し、分枝限定法と列遅延生成法を組み合わせた解法アルゴリズムを提案した。
- 3) 簡単な数値計算の結果、AOCは乗り継ぎ旅客の利便性を確保するために、駐機時間を長くする傾向にあることがわかった。

本研究はまだ端緒に着いたばかりであり、克服すべき課題も多い。以下に課題を簡単に列挙する。

- 1) 機材の所属が分けられていないために、翌日のフライトを構成する機材が、もとのダイヤグラムと完全には一致しない。実際には機材の所属が大きな制約となるため、この制約を取り込む必要がある。
- 2) 2ハブの問題は特殊解となる可能性がある。すなわち、通常LHOが n (3以上) あれば、あるLHOの決定は残り $n-1$ のLHO間でのコンフリクトに影響を及ぼすが、 $n=2$ の場合はこのコンフリクトが捨象される。このため、3ハブ以上の一般的な場合について数値計算を実行し、その挙動特性を調べる必要がある。
- 3) 実際のスケジュール規模での演算特性を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Arguello, M.F., Bard, J.F. and Yu, G.: Models and methods for managing airline irregular operations, Operations Research in the Airline Industry edited by Yu, G., Chapter 1, 1-45, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 2) Thengvall, B.G., Bard, J.F. and Yu, G.: A bundle algorithm

- approach for the aircraft schedule recovery problem during hub closures, Transportation Science, Vol.37, No.4, 392-407, 2003.
- 3) Barnhart, C., Boland, N.L., Clarke, L.W., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., and Shenoi, R.G.: Flight string models for aircraft fleetling and routing, Transportation Science, Vol.32, No.3, 208-220, 1998.
- 4) Barnhart, C., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., Savelsbergh, M.W.P. and Vance, P.H.: Branch-and-price: column generation for solving huge integer programs, Operations Research, Vol.46, No.3, 316-329, 1998.
- 5) Rosenberger, J.M., Johnson, E.L. and Nemhauser, G.L.: Rerouting aircraft for airline recovery, Transportation Science, Vol.37, No.4, 408-421, 2003.
- 6) Grandea, S.C., Clarke, M.D. and Mathaisel, D.F.X.: The processes of airline system operations control, Operations Research in the Airline Industry edited by Yu, G., Chapter 11, 312-369, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 7) 溝端翔平, 竹林幹雄, 黒沢直紀, 黒田勝彦: 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, 第30回土木計画学研究発表会講演集, 2004 (CD-ROM).
- 8) Dempe, S.: A bundle algorithm applied to bilevel programming problems with non-unique lower level solutions, Computational Optimization and Applications, 15, pp.145-166, 2000.
- 9) Shimizu, K., Ishizuka, Y. and Bard, J.F.: Non-differentiable and Two-Level Mathematical Programming, Kluwer Academic Publishers, 1999.

ハブ・スポーク型ネットワークにおける遅延リカバリ問題の解法*

竹林幹雄**・黒田勝彦**・黒沢直紀***・溝端翔平****

本研究では複数ハブ間で構成される航空ネットワークにおける遅延リカバリのためのスケジュール調整方法について言及した。まず、システムをAOCとLHOによって構成される形式を提案し、bi-level最適化問題としての定式化およびその解法を列遅延生成法と分枝限定法を組み合わせたアルゴリズムとして示した。2ハブの数値計算結果の結果、単純にスケジュールを移動させる場合と比較して、大幅にコストが削減されネットワークの効率性が保証されることがわかった。

Methodology for delay recovery problem under hub-spokes network system*

Mikio TAKEBAYASHI**, Katsuhiko KURODA**, Naoki KUROSAWA*** and Shohei MIZOBATA****

This paper addresses the methodology of reduction of air traffic delay based on integer programming problem. It is assumed that each hub is used as the primary hub airport for the independent. In this paper, we propose the bi-level structure for optimizing the delay recovery: the upper level is the Aviation Operation Center (AOC), which is controlling the hub-to-hub schedule: the lower level is controlled by the Local Hub Operators (LHO), which handle both hub-to-hub and hub-to-spokes schedules. Finally, numerical examples are carried out to show how the proposed method works.