

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：82664

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760495

研究課題名（和文） 我が国の航空交通流の特性分析と航空交通流管理の改善手法に関する研究

研究課題名（英文） Study on the characteristics of the air traffic flow and improvement of air traffic management procedures in Japan

研究代表者

平田 輝満 (Terumitsu Hirata)

一般財団法人運輸政策研究機構運輸政策研究所・研究員

研究者番号：80450766

研究成果の概要（和文）：

本研究では、我が国の航空交通流の最大のボトルネックである羽田空港発着便の遅延状況および混雑緩和のための出発制御手法の実態を分析し、その特性を明らかにした。さらに 4 本目の滑走路を供用開始後の羽田空港における方面別滑走路方式の遅延への影響とその解消による効果を推計した。最後に、離着陸機が相互従属運用であることを念頭に、時間帯別の離着陸便数の最適配分モデルの開発を行い、最適化による遅延や CO₂ の削減効果を示した。

研究成果の概要（英文）：

This study focuses on the air traffic flow management in Japan, and firstly the characteristics of air traffic flow to/from Haneda airport was analyzed. Based on its characteristics, the improved air traffic flow management procedures were proposed such as the introduction of metering of dual arrival flow and the optimization of the allocation of departure and arrival flight number in a time-series manner.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木計画学・交通工学

キーワード：交通工学，航空交通流管理，航空管制

1. 研究開始当初の背景

我が国では 2010 年に羽田・成田空港が容量拡大したが、アジアを中心とした国際需要の拡大や小型機による多頻度化を考慮すると、早晚、首都圏を中心に容量不足の再来が予想されるとともに、航空交通量の増加により空港のみならず空域における混雑も顕在化してきている。また、温暖化対策からみた航空からの CO₂ に関しては、他の交通機関に比して代替燃料の短中期的な実現は困難であり、発生源対策は効果が限定的である。実際に運輸部門からの CO₂ のうち、航空の占める割合は年々増加しており、運用面の対策として管制や運航の方法を工夫すること

による CO₂ 削減が極めて重要と言える。

管制運用面では、従来型管制方式では長期的な航空交通量の増大に対応できないことから、システム全体の交通流を一元的に管理しようとする「航空交通流管理 (ATFM: Air Traffic Flow Management)」が近年世界的に重要視され、その初期的な手法が現在実施されている。現在の ATFM では、航空会社から事前に提出される飛行計画をもとに中長期的な交通量予測を行い、ある特定の空域や空港で過度の混雑の発生が予測される場合には、予め離陸前に出発空港で地上待機をさせたり、飛行経路を変更して混雑していない空域へ交通量を分散させたりしている。このよ

うな ATFM をさらに高度化させ、空域全体を一つの空域とみなし、各航空機の飛行経路をより自由に効率よく設定できるようにするとともに、時間を含めた飛行経路（軌道）を高度に管理し、一度飛んだら全交通流が整然と目的地まで飛行できるようにする「軌道ベース運航」に移行することが、欧米含め、我が国の航空交通システムの変革の長期的な方向性となっている。

2. 研究の目的

ATFM の高度化手法について新たな提案をすることを大きな目的とし、具体的には、我が国における実際の全国の航空交通流データを分析し、現在の航空交通流の特性および ATFM の効率性について明らかにすること、遅延や CO2 削減のための ATFM の高度化手法について新たな方法論を提案すること、を主要な個別の目的とした。

3. 研究の方法

詳細な航空交通流に関する管制・運航実績データを活用して、我が国の国内線で羽田空港到着機の航空機遅延の発生状況と ATFM の実行頻度について、空域の混雑などからその実態と要因について統計解析を行った。

次に、シミュレーション手法と最適化手法を活用してターミナル空域における到着機処理と複数滑走路における離着陸運用の高度化による交通流管理の効率化効果を分析した。

4. 研究成果

(1) 我が国の ATFM の実態分析

① 出発制御手法と制御効果・影響の整理

ATFM はある空港や空域で将来的に過度の混雑の発生が予想される場合に、航空機の出発を遅らせたり（出発制御）、特定空域への入域間隔を調整したり、飛行経路を変更したりすることで、空港や航空路セクタにおいて適切に管制処理可能な量の範囲内に交通量を調整し、安全性の確保、消費燃料の節約、空域の有効活用などを達成する機能である。

出発制御においては、ある空域や空港の将来の交通量と処理容量の予測をもとに制御を行っているため、当然ながらその予測精度に応じて、出発制御の効果や影響が変化する。出発制御をはじめとした ATFM における予測上の不確実性として、交通量と容量それぞれに対して主なものは以下のとおりである。まず、交通量予測においては、スポットの出発時刻、離陸時刻、飛行時間などが考えられる。また容量予測においては、使用滑走路、風向風速、機材構成、離陸機数などが考えられる。これら交通量と容量の予測上の不確実性により、ATFM で想定した空中待機時間と実際の空中待機時間には差が生じる。図 1 には ATFM

による制御レベルとその効果のイメージを示している。例えば、処理容量が想定以上だった場合には空中待機時間は想定より減少し、場合によっては希少な空港容量資源に空きができてしまうこともあり得る。トータルの遅延を最小化するためにはこのような未使用スロットの発生を防ぐ必要があり、そのためには適度な量の交通量を常にターミナル空域に維持することが重要となる。一方で、制御が不十分であると過剰な空中待機が発生し、管制官の負荷や安全性、閑居負荷の面で問題がある。

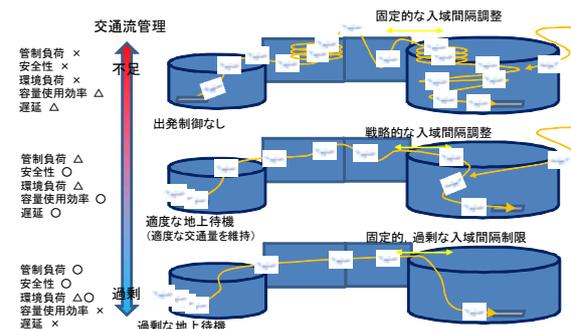


図1 ATFMの制御レベルと効果・影響のイメージ

② 空中待機時間からみた出発制御の有効性分析

出発制御の有効性について空中待機時間で評価する。2008年度の羽田空港の全到着機の運航実績データを用いて分析を行った。データ制約から「進入管制区内」における空中待機時間（ベクター時間）が算出できないため、本研究では飛行時間の遅延により分析した（実績飛行時間と飛行予定時間の差を空中待機時間として分析：飛行予定時間は到着予定時刻 ETA と離陸予定時刻（ETD: Estimated Time of Departure）の差で算出）。その際、NOTAM 情報からそれら羽田以外の混雑に起因した出発制御がかかっている時間帯の便を分析対象から除外し、また、基準となる飛行予定時間データについては出発空港別到着方式別の非制御便の飛行実績時間の平均を算出し、各出発空港別に各到着方式と北風時到着方式（具体的には 34ILS）の実績飛行時間の平均の差から各到着方式に対応した飛行計画時間に補正を行った。

図 2 は北風運用時（滑走路 34-ILS）の飛行方面別の非制御機と制御機の実績空中待機時間の分布を示している。まず、飛行方面別にその分布形状が大きく異なる。北方面からの便の出発非制御便と出発制御便の飛行遅延時間の分布をみると両者に大差はない。一方、西方面からの便をみると北方面便に比べて大きな飛行遅延（空中待機）が生じており、制御便の待機時間の増加も西便の方が大きい。制御便で想定した待機時間よりはやは

り小さい。また、制御便についても空中待機時間がマイナス、つまり予定より早着する便数割合も相当数存在する。つまり、10分の空中待機が生じる混雑を想定した制御だが、実際には混雑していないことも多いことが示唆される。北便と西便の空中待機時間の傾向が異なる理由を考察すると、一つは北からの便は便数自体が多くなく（羽田到着の3割が北で残り西方面）、エンルート上での混雑はSPENS方面に比べ小さいこと、もう一つは進入管制区に入域してからレーダー誘導するスペースが北からの便は西からの便にくらべ狭隘である可能性があることが挙げられる。また進入管制区の空域の形状から北からの便は誘導の自由度が比較的小さいのではないかと考えられ、その結果、出発制御がかかるような混雑時でも西からの便より結果的に優先的に着陸している可能性もある。

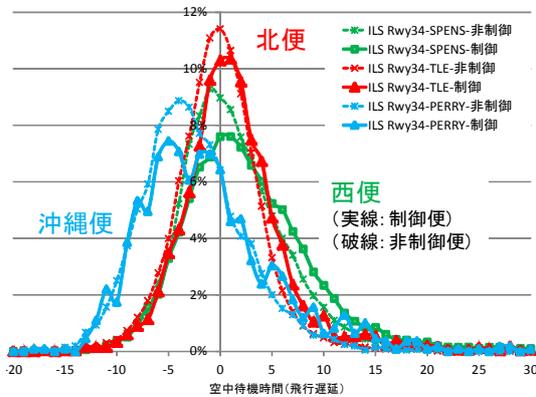


図 2 飛行方面別の非制御機と制御機の実績空中待機時間(北風時:滑走路 34-ILS)

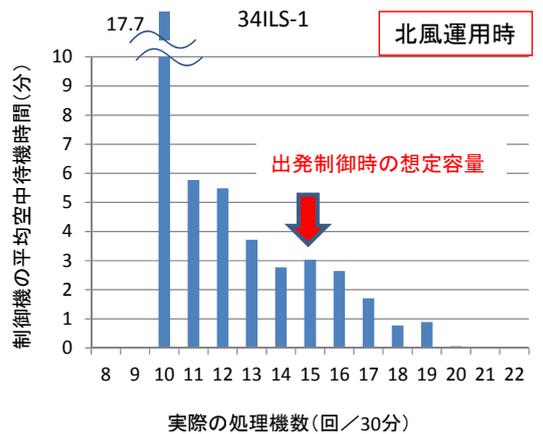


図 3 実績の着陸処理機数(回/30分)と制御便の空中待機時間の平均

空中待機時間に対して大きく影響を与えると考えられるのが滑走路処理容量の予測誤差である。図 3 は 365 日各日の毎 30 分の実績到着処理機数とその時の空中待機時間の年間平均(制御便のみ)を示している(北

風好天時のみ)。この図から実際の処理機数が想定していた容量よりも小さくなるほど実際の空中待機時間が大きくなる傾向が示されており、容量予測の精度向上が ATFM において重要であることが分かる。

(2) 方面別滑走路制約の遅延への影響に関するシミュレーション分析

①羽田空港における方面別滑走路方式

再拡張後の羽田空港では 3~4 本の滑走路を同時運用し離陸機と着陸機が相互に従属運用される方式に変更され、空港周辺の飛行経路も到着 2 本、出発 2 本に増えている限られた空域でこれら飛行経路増加に伴う離着陸機の輻輳を避け、安全に空中で誘導処理するために、飛行方面別に使用する滑走路を限定している。この「方面別滑走路」は、各時間帯で滑走路別の処理容量に合わせた比率での方面別便数設定がエアライン側で必要となることを意味する。現在計画している滑走路別の時間処理容量の比率は従来の平均的な方面別需要比率を考慮して決められている。しかしながら、時間帯別の需要変動やアジア方面(西方面)を中心とした今後の国際需要の増加を考慮すると、方面別に処理容量を決めている方面別滑走路方式が空港全体の処理効率を低下させることが懸念される。

②方面別滑走路の遅延シミュレーション

上記の懸念に対し、既開発の羽田再拡張後の容量モデルから推計した容量カーブ(図 4)を活用し、再拡張後の容量をフルで使用した場合の発着ダイヤを想定した遅延シミュレーションを行い、方面別滑走路の有無の影響を分析した。

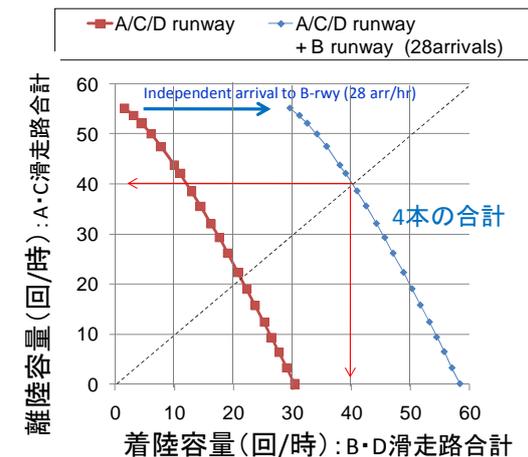


図 4 羽田再拡張後(南風時)の離着陸容量カーブ

図 5 には「40 万回/年相当需要」を仮定した遅延時間のシミュレーション結果を示している。現時点では、40 万回/年相当に容量

拡大された際に、実際にどのようなダイヤ設定がされるか不明であり、時間帯別により詳細に発着量の規制がされることも想定されるが、ここでは単純に2011年7月ダイヤの交通量を全時間帯で同比率(40/35)で拡大したダイヤを使用している。この単純な仮定のもとで遅延を推計すると、方面別滑走路制約ありでは西方面到着機で大きく容量をオーバーするため、終日を通して大きな遅延が発生することになる。一方で、方面別滑走路を仮に解消できると最大でも15分程度の遅延に抑えることができることが示され、方面別滑走路解消の効果が大きいことが分かる。

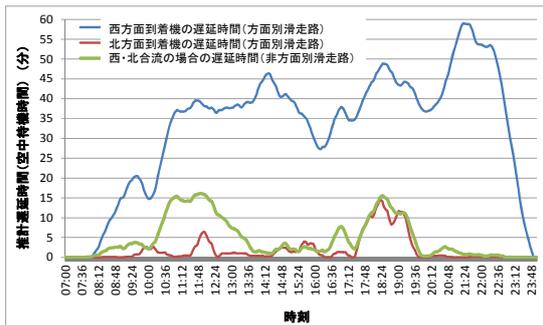


図5 40万回/年相当のダイヤを前提とした遅延時間のシミュレーション結果

(3) 離着陸便数の最適配分モデルの開発と遅延・CO2排出の削減効果に関する分析

① 離着陸便数の最適配分モデル

前節では羽田空港の方面別滑走路制約の遅延に与える影響分析を行ったが、シミュレーションでは離陸機を完全に優先して、つまり遅延は全て到着機に割り当てる方式を仮定した。当然ながら、この離陸と着陸の優先順位づけの仕方によって、遅延時間の発生の仕方も変化する。遅延時間、もしくはより一般的な遅延コストを最小化するためには、時系列的な離着陸の需要変化や羽田空港の離着陸容量間のトレードオフ関係を考慮し、時間帯別にダイナミックに離着陸容量を配分する必要がある。

離着陸容量の最適配分に関してモデル化する際に目的関数としては遅延時間の最小化が一般的であろう。このような問題の最適化モデルは既に提案されており、例えばGilbo (1997)による定式化が挙げられる。Gilboは一定時間刻みの時間枠に対して、出発・到着予定の時間枠では処理できず次の時間枠にキューとして残る機数の累積合計値を最小化する下記のような整数計画問題として定式化を行った。

$$\min_{v,u} \sum_{i=1}^N \alpha_i X_{i+1} + (1-\alpha_i) Y_{i+1} \quad (1a)$$

s.t.

$$X_{i+1} = \max(0; X_i + a_i - u_i) \quad (1b)$$

$$Y_{i+1} = \max(0; Y_i + d_i - v_i) \quad (1c)$$

$$0 \leq u_i \leq B_i \quad (1d)$$

$$0 \leq v_i \leq \varphi(u_i) \quad (1e)$$

ここで、 N は時間枠数、 X_i 、 Y_i は時間枠 i の到着、出発のキュー(遅延機数)、 a は到着遅延と出発遅延の重み係数、 a_i 、 d_i は到着、出発予定機数、 u_i 、 v_i は各時間枠で設定する到着と出発の容量で、容量カーブをもとに v_i は u_i の関数で表さ、 B_i は到着容量上限を表す。このGilboモデルでは、予定時間枠から次の時間枠に遅延する機数(キュー)の重み付け和になっているが、本来であれば全機の遅延時間の(重み付け)合計値が望ましいと考えられる。しかしながら、ある時間枠への容量割り当てというアプローチでは航空機個々の遅延時間を正確に求めることができない。そこで本研究では各時間枠に到着もしくは出発予定だった機数全て a_{i+1} が、前の時間枠からのキュー X_i に当該時間枠の平均処理間隔 (T/u_{i+1} : 割り当てられる容量の逆数)を乗じた時間だけ遅延すると仮定して総遅延時間を近似的に求めた。

$$\min_{v,u} \sum_{i=1}^N \alpha(T/u_{i+1})X_{i+1}a_{i+1} + (1-\alpha)(T/v_{i+1})Y_{i+1}d_{i+1} \quad (2)$$

ここで、キューから遅延時間に換算したことで制御変数に関して非線形となるため、本研究では、平均処理間隔である T/u 、 T/v の u 、 v を定数 u^* 、 v^* として与え整数線形計画問題として解いた。

② ケーススタディ

ケーススタディとして(2)で使用した「40万回/年相当」の羽田の発着需要をもとにしたダイヤから15分刻みの時間枠の発着回数を作成した。容量カーブは図4に示すモデル推計値をもとに離散的な容量として作成し、ノーマルな容量に加え、容量がやや低下したケース(1離陸1着陸減/15分(仮の値))も仮定した。最適化の条件については、最適化をしない場合を含め離着陸の遅延に対する異なる重み係数 α の設定により、①離陸完全優先(非最適化)、②着陸完全優先(非最適化)、③離着陸イーブンの重み付け ($\alpha=0.5$)、④離陸と着陸遅延のコスト比で重み付け ($\alpha=0.534$)、⑤着陸をやや優先する重み付け ($\alpha=0.7$)、の5種類で試算した。ここで④については、Eurocontrol および国土交通省の費用対効果分析のガイドラインを参考に計算した。図6に①~⑤の重み付けによる計算結果

(遅延時間の合計値)を示す。

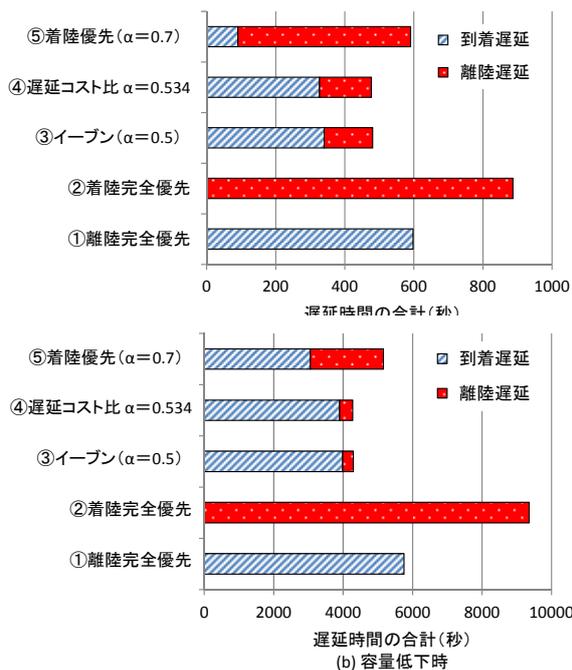


図 6 離着陸の重み付け係数別の最適容量配分時の総遅延時間

①②は離着陸のどちらかを完全に優先したケースで最適な容量設定をしないケースと考えられる。①②を比較すると着陸優先の方が総遅延時間が大きい。これは羽田の容量カーブの特徴が影響しており、前述のとおり到着1機が離陸2機と干渉することから到着比率を増やすと空港全体の容量が低下するからである。当然ながら離着陸の需要バランスや時系列の推移も影響するが、そのバランスに大きな差がなければ、どちらか一方を優先する際には羽田の場合離陸を優先させた方が総遅延時間は小さくなる傾向にあると考えられる。③の離着陸に公平な重みで最適化計算をすると①②と比べて総遅延時間が削減できることが分かる。上記の理由から基本的には離陸を優先させた方が総遅延時間を削減できるが、離着陸の需要推移を長期的に見て最適に容量配分を行うとさらに遅延が削減できることが分かる。遅延の内訳をみると、やはり離陸を優先させたほうが総遅延時間は削減できる傾向であるため到着遅延が相対的に大きくなる容量配分となっている。また当然ながら④⑤のように到着の重みを増やせば到着遅延から離陸遅延に付け替えが起こるが、総遅延時間は増加する。図6は単に総遅延時間で比較しているの、各重み付けにおける目的関数値はそれぞれ最適になっている。(b)の容量低下ケースをみると(a)のノーマル容量ケースに比べて当然ながら遅延時

間は増加するが、遅延の傾向はほぼ同様である。しかしながら、需給逼迫が厳しくなると滑走路全体の処理容量を最大化した方が総遅延時間を削減できる傾向が強くなるため、最適化時には離陸を優先する(到着遅延が増加する)傾向が強くなっていると考えられる。

(4)まとめ

本研究では、羽田空港発着便の交通流特性と出発制御の現状分析を行った後、主な滑走路運用特性である方面別滑走路制約と離着陸相互従属運用制約に起因した航空機遅延に関して分析を行った。方面別滑走路制約に関しては、現時点の需要を前提としても一定程度の遅延が発生していることが推計され、さらに将来的に大きな影響を与えることを示し、さらに方面別滑走路の解消により大きな遅延軽減効果があることも示した。また、遅延コスト最小化のための離着陸容量配分の最適化モデルを提案し、羽田空港の特性からどのような配分方法が最適となるか、最適化によりどの程度の遅延軽減ができるか定量的に把握した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- [Terumitsu HIRATA, Azumanosuke SHIMIZU, Tetsuo YAI](#): Runway Capacity Model for Multiple Crossing Runways and Impact of Tactical Sequencing -Case Study of Haneda Airport in Japan-, Asian Transport Studies (ATS), Volume 2, Issue 3, 2013. 査読有

[学会発表] (計3件)

- [平田輝満](#): 羽田空港における方面別滑走路制約と遅延分析, 第44回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2011年11月25日, 長良川国際会議場.
- [平田輝満](#), [屋井鉄雄](#): 空中待機時間からみた羽田空港到着機に対する出発制御の有効性分析, 第44回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2011年11月27日, 岐阜大学.
- [平田輝満](#), [宇田川佑介](#), [矢野夏子](#): 航空交通流管理における離着陸容量設定に関する一考察, 第50回飛行機シンポジウム, CD-ROM, 2012年11月6日, 朱鷺メッセ.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 輝満 (HIRATA TERUMITSU)
 一般財団法人運輸政策研究機構運輸政策研究所・研究員
 研究者番号: 80450766