

羽田空港到着機を対象とした出発制御の実態に関する基礎的分析

Analysis of air traffic flow control by expected departure clearance time for Haneda arrivals

三村大地**・平田輝満***・清水吾妻介****・屋井鉄雄*****

By Daichi MIMURA**・Terumitsu HIRATA***・Azumanosuke SHIMIZU****・Tetsuo YAI*****

1. 研究の背景と目的

近年、航空交通需要の増大とともに、羽田空港を中心とした混雑空港や周辺混雑空域が主な原因となり、航空遅延の増大が問題となってきた。空港や空域における過度な混雑は、航空管制の運用上、安全面・効率面で問題となる。特に到着機の集中により目的地空港の上空で多数の着陸待ちが発生することは、限られた空域で到着機の交通整理を行う管制官の作業負荷が上昇し、また CO2 排出の面でも問題となる。そこで、2005 年に本格運用を開始した航空交通管理センターにおいて、全国の空港および空域における将来交通量を予測し、予め設定した容量値を超えると予測した場合、対象機の出発時刻の調節（出発制御）等を行っている¹⁾。これが航空交通流管理（ATFM）の主な業務である。簡単に言えば、空中待機が予測される時間分を出発空港で地上待機させるということである。

この出発制御について、今後、より効率的な制御方法や経済・環境面の効率性などを加味した制御方法等を検討するには、現行の出発制御がどういった交通流の状況で実施されているのか、また出発制御によって安全性を確保した上でどのような運航が実際になされているのかについて分析を行う必要がある。本研究では国土交通省航空局より提供頂いた航空機の運航データを利用し、遅延発生の原因や、出発制御発出の仕組み等を確認し、出発制御の実態を基礎的ながらも概ね把握することを目的とした。

我が国では近年、坂下²⁾がホームページ上に公表される各航空会社の発着実績データを収集し分析することにより羽田空港における遅延の現状を明らかにしているが、我が国の ATFM の評価に関する研究は一部の研究機関のみでしか行われていない。木村³⁾は運航データを用いた評価指標の導出が必要であると、蔭山⁴⁾は

運航データを用いて、機材繰りによる遅延の波及について分析している。しかし、気象状況・地理的条件・交通量の時間変動や日毎変動を考慮し、全国的に分析した研究については存在しない。

2. 研究に用いるデータの概要

本研究では、国土交通省航空局管制保安部より提供を受けた、運航実績データの各項目(出発、離陸、着陸、到着、出発制御の時刻など)のうち、2008 年 4 月 1 日から 2009 年 3 月 31 日までの羽田到着機全 168957 便のデータを用いる。

このデータに加えて羽田航空気象データ(METAR)、使用機材データ、航空気象データから推定した羽田空港使用滑走路データを独自に追加整備した。

3. 着陸容量の変動

発着枠検討時の羽田空港の着陸容量は 31 機/時とされている。しかし、ATFM の運用では表 1 に示すように北風運用時 C 滑走路を離着陸共用とした時は 34 機/時(A 滑走路とともに 2 本で着陸可能)、北風運用で C 滑走路着陸不可時と南風運用時は 30 機/時を滑走路の標準的な着陸容量としている。ただし、これらの値は交通状況、

表 1 滑走路運用方法による着陸容量の違い

北風 C滑走路使用時 滑走路容量34機/時	北風 C滑走路着陸不可時 滑走路容量30機/時	南風 滑走路容量30機/時	南風 低視程時 滑走路容量26~30機/時

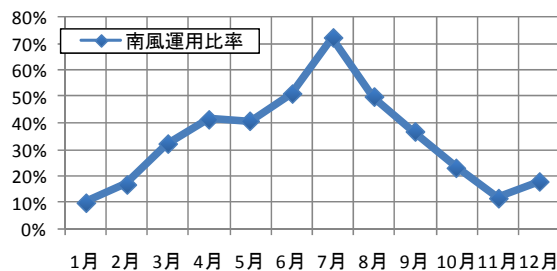


図 1 滑走路運用推定結果

*キーワード: 羽田空港, 遅延, 出発制御

**正員, 修(工), NTTロジスコ (元 東京工業大学大学院総合理工学研究科)

***正員, 博(工), (財)運輸政策研究機構運輸政策研究所

****学生員, 工修, 東京工業大学大学院総合理工学研究科

*****正員, 工博, 東京工業大学大学院総合理工学研究科

気象状況等を考慮し変動させている。例えば、南風運用の低視程時は 24～30 機/時を設定するケースが多い。そのため滑走路の運用方法によって着陸容量は変化する。滑走路運用は羽田空港の気象条件等で決められる。基本的には効率的な運用という点から北風運用を極力実施し、地上風速の追風成分が大きくなる (ex. 5 ノット超) 等の条件で南風運用となる。航空気象データから滑走路運用を推定した結果を図 1 に示す。

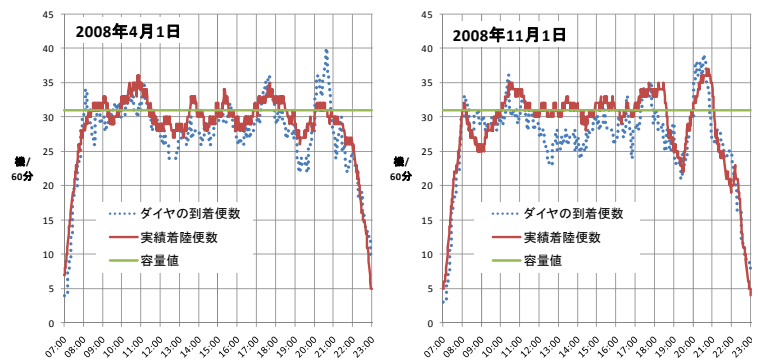


図 2 ダイヤ上と実績の到着機数の推移(4月1日, 11月1日の例)
(1 分毎の 1 時間移動平均)

4. 出発制御の実施基準

出発制御を発出するかどうかを決定しているのは ATM センターの管理管制官である。その管制官は ATM システムが計算した、空域、及び空港における交通量予測と当日の気象状況を考慮した処理容量を比較し、許容量を超えると判断した場合に安全かつ円滑な交通流を確保するため出発制御をある一定時間実施すると決定する。ATM システムに出発制御の開始を入力すると、ATM システムが自動的に出発制御の対象となる各航空便に対し、出発制御時刻(以下、EDCT)を算出し、対象機は出発空港で待機することになる。

羽田空港到着機に関する EDCT は 30 分間の着陸容量(滑走路運用、気象条件等によって変化)と羽田空港進入管制区におけるレーダベクターによる迂回時間(以下、空中待機時間)の許容量(羽田の場合は標準的な値として 10 分)によって決まる。羽田到着機における出発制御実施までのプロセスを以下に示す。

1. 到着が予定される機を着陸予定時刻(ETA)順に並べる。
2. 滑走路の着陸容量に基づき着陸可能時間を算出する。
3. 交通量予測システムで空中待機時間が 10 分を超えている時間帯をチェックする。
4. 空中待機時間が許容値(羽田の場合 10 分)を超えた機が出発制御対象機となる。
5. 空中待機時間が許容値(羽田の場合 10 分)を超えた分を出発空港における待機時間とする。

5. ダイヤ設定(羽田到着便の運航便数)について

遅延の原因の要因として容量値を超過したダイヤ設定が考えられる。羽田空港着陸便のダイヤを 7 時、8 時といった毎正時間 1 時間ごとの時間帯別便数でみると、容量値 31 機/時以下の便数設定になっている。しかし、実績の着陸数では容量を超えた運航が見られる。

図 2 はより詳細にダイヤ設定と着陸機数を把握する

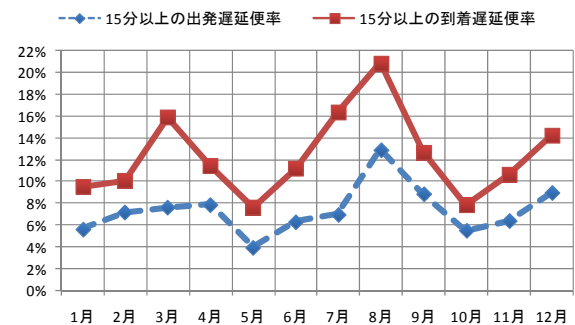


図 3 遅延便率の月別の推移

ために 7:20～8:19, 7:21～8:20・・・のように 1 分刻みの 1 時間移動平均で便数をカウントし、ダイヤの便数と実績着陸便数を算出したものである(実績着陸便数は着陸時刻でカウント。ダイヤではブロックインまでの地上走行時間が考慮されているので両者を正確には比較できないが、1 時間の移動平均であるため大きな誤差はないと考えられる)。これを見ると時間帯別では容量値内に収まっていたダイヤ設定で容量値を大幅に超過している状況が把握できる。4 月 1 日のダイヤでは 20 時 40 分から 1 時間に 40 便が設定されている。ダイヤ設定では 00 分などの利用者にわかりやすい時間に多くの便を設定し、また 5 分刻みでダイヤを決めているため、偏りが生じ、1 時間あたりの容量以上の便数が設定されているのが現状である。

実績着陸便数を見てみると、容量値を超えている 20 時台で 4 月 1 日と 11 月 1 日では全く異なる運用がみられる。4 月 1 日はダイヤで最大 40 機設定されていたものの、実際には 31 機しか着陸していない。着陸できなかった機は後の時刻に着陸が遅らされているため、21 時から 22 時でダイヤよりも実績着陸数が大きくなっている。一方で 11 月 1 日はほぼダイヤ設定どおりに 37 機が実際に着陸している。この違いは滑走路運用方法の違いによる差である。11 月 1 日は北風運用(C 滑走路を離着陸共用として運用)した結果 37 機が着陸できた

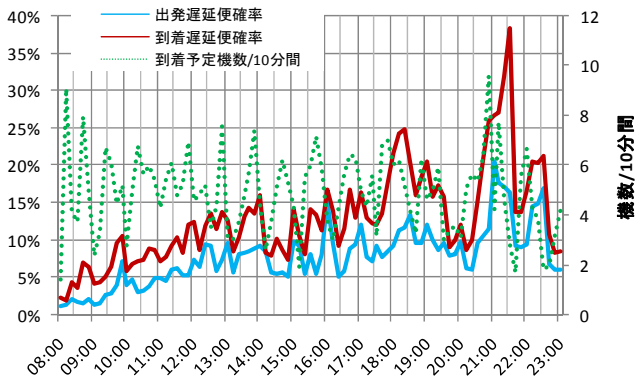


図4 15分以上の遅延便率の到着時刻別の推移

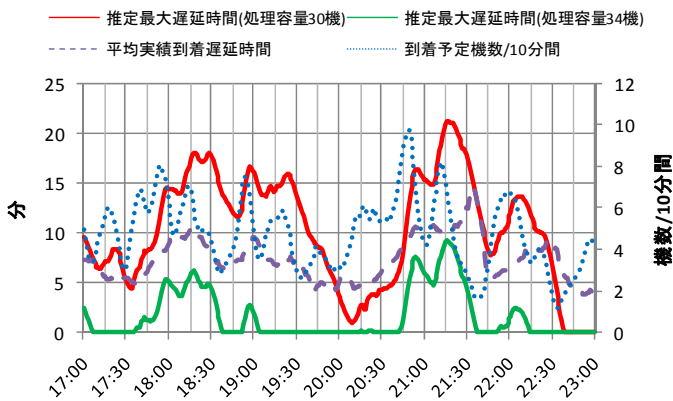


図5 30機着陸した場合の推定最大到着遅延時間

と考えられる。つまり、20～21時のダイヤ設定は結果としてC滑走路を離着陸共用にできることを期待して組まれているとも見ることが可能で、南風運用時などC滑走路を離着陸共用にできなかった場合には大幅に遅延が発生すると考えられる。

6. 出発遅延・到着遅延

遅延について分析する上で重要であるとされている指標がダイヤ時刻からの15分以上の遅延である⁵⁾。ダイヤ上の出発時刻からの15分以上の遅延である出発遅延とダイヤ上の到着時刻からの15分以上の遅延である到着遅延についてどのような条件で遅延が発生するのかを確認する。出発での遅延は運航当日の悪天、機材繰り、乗客の混雑、出発制御の理由が考えられる。一方、出発後の遅延は飛行時の迂回が主な原因となる。まずそれぞれについて月別、予定到着時間帯別、路線別に実態について確認する。

A) 月別遅延便率

月別の推移をみる目的は滑走路運用と遅延の関係を把握することである。図3より7、8月は南風運用比率が最も高いが遅延便率も最も高くなることが確認できる。南風運用による容量制限の影響が大きいと考えられる。

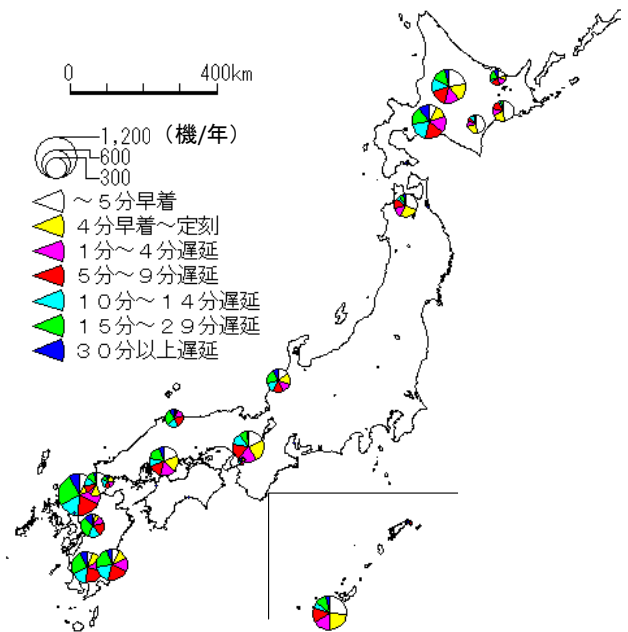


図6 21時台到着便の年間到着遅延便数の内訳

一方で、6月は南風運用比率が8月と同じであるのに対して遅延率は小さい。特に出発遅延が小さくなっている。これは、管制側だけではなく運航側の理由でも当然ながら遅延が発生し（例えば、乗客混雑による出発遅れなど）、8月が乗客が混雑するのに対して、6月は比較的空いていることが影響している可能性もある（羽田全路線の平均座席使用率は6月で63%、8月で73%：航空輸送統計年報2008より）。

次に1日の中で遅延しやすい時間帯の把握と空港・空域混雑時間帯の遅延状況を確認することとした。

図4より出発遅延便率は朝から夜にかけて徐々に増加していくことが確認できる。到着遅延に関しては羽田への到着予定便数の変動と遅延率の変動がほぼ同傾向であるが、到着予定便数のピークから少し遅れて遅延のピークが発生している。これは、当然ながら、遅延は到着機数の累積的な効果で生じるためである。

そこで、そのような累積的な影響をみるため、到着予定機数と処理容量の関係から各時刻における推定待ち時間（＝遅延時間）を算出した結果を図5に示す（遅延便の多い17時から23時のみで、到着予定機数は年間の平均値を使用）。処理容量は簡便のため30機/時で一定の場合と34機/時で一定の場合を仮定して算出した。当然ながら容量が30機/時の場合の方が推定待ち時間が大きく15分を超える遅延も発生すると推定されている。青破線の到着予定機数と推定待ち時間を比べると累積的な効果で遅延が遅れて発生する様子が算出されており、実績の到着遅延の変動とより相関していることが分かる。到着予定機数の集中が主な原因として遅延が発生してい

ることが分かる。

B) 路線別遅延便率

図6には到着遅延率が最も大きい21時台の羽田到着便の出発空港別の遅延時間別便数比率を示している。これより、伊丹や那覇路線などでは他の路線に比べて遅延が少ない傾向がある。伊丹などでは運用時間制限があるため割り当て可能な遅延時間に限度があることや、エアラインの判断で異なる制御対象便の間でEDCTを交換できる運用方式(タイムフレーム調整)を実施していることも影響していると考えられる。これら路線間の差は、そもそも混雑時間帯(制御のかかりやすい時間帯)にダイヤを多く設定している方が当然制御対象となる率が高くなると考えられる。そこで、各路線のダイヤ上の到着時刻からどの程度混雑時間帯にダイヤ設定されているかの程度を図る指標(混雑指標)を以下のように算出した。時間帯別の混雑度は、今回は簡便に、時間帯別の実績出発制御確率を使用した。つまり、各路線の毎正時間の1時間ごとの便数を算出し、その時間帯別の年間平均出発制御便率(定期便のうち1分以上の出発制御を受けた便の確率)を重みとして乗じて加算し、路線別全便数で除すことで混雑指標とした。上記のように算出した混雑指標と15分以上の到着遅延率の関係を示したのが図7である。伊丹、出雲、岡山などはダイヤを混雑時に組んでいるにも関わらず遅延の発生が抑えられており、一方で、大島、紋別、中標津などは混雑度の割には遅延が大きく発生していることが分かる。

7. 出発制御の実施状況

A) 年間制御便数

2008年度の羽田空港到着便に関する年間制御出発便数は30675便であった。全羽田到着便に対する割合は18%であり、1日平均84便(遅延時間0分を含めない場合は65便/日)の出発制御が実施されている。ここで、今回使用した出発制御便データについて、制御の原因(羽田空港の混雑か出発空港から羽田空港への途中空域の混雑か、等)を特定し分類していないため、全ての原因を含んだデータとなっている。また、一度は出発制御によるEDCTが発出されたが出発前に状況が変化しEDCTがキャンセルされた便についても出発制御便データに一部含まれているため、実際に出発制御で地上待機した便数より多めに算出されていることを付記しておく。

B) 月別制御便確率

図8より8月の制御便確率が32%と最も高く、一方で1月、2月は制御便確率10%とかなり低い。8月は1月、2月と比較して出発制御が発出される便の確率が3倍であることが分かる。また、8月に出発する10%の便で10分以上制御によって出発遅延が発生している。

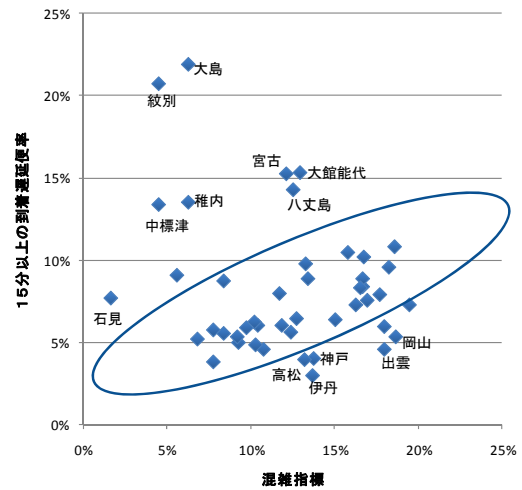


図7 混雑指標と到着遅延の相関

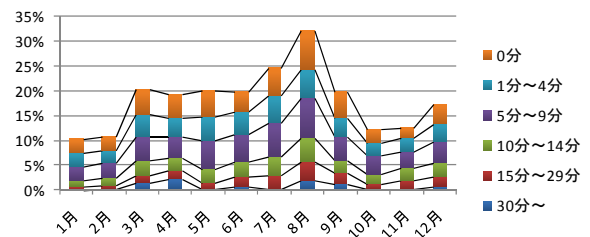


図8 出発制御が発出される便の確率の月別推移

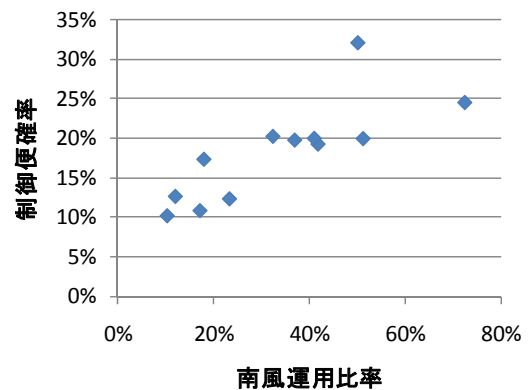


図9 月別の南風運用比率と制御便確率の相関

10分以上の制御便確率を8月と1月で比較すると、約5倍の差がある。

8月の制御便確率が高くなっている要因としては、南風運用比率の違いがあげられる。夏には南風運用比率が高くなり、冬には北風運用比率が高くなる傾向がみられる(図1)。

先述の通りC滑走路が離着陸共用として、運用された場合とそうでない場合では、処理容量に大きな差がある。C滑走路を離着陸共用として使わなかった場合には、ダイヤ設定上の到着回数を処理できず、処理できない便を遅らせるため出発制御が実施されているはずである。図9に月別の南風運用比率(つまりC滑走路を離着陸

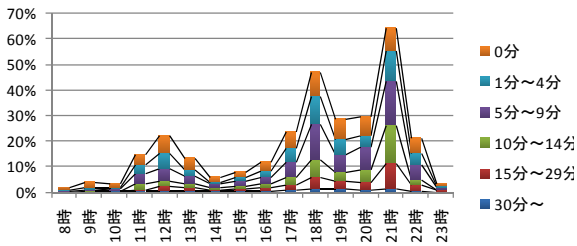


図 10 到着予定時間帯別制御便確率（年間平均）

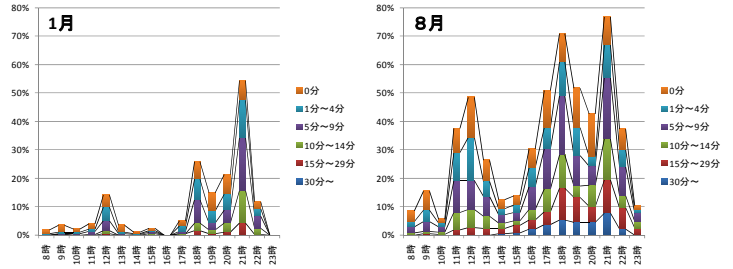


図 11 1月、8月の制御便確率と制御時間分布の時間帯別推移

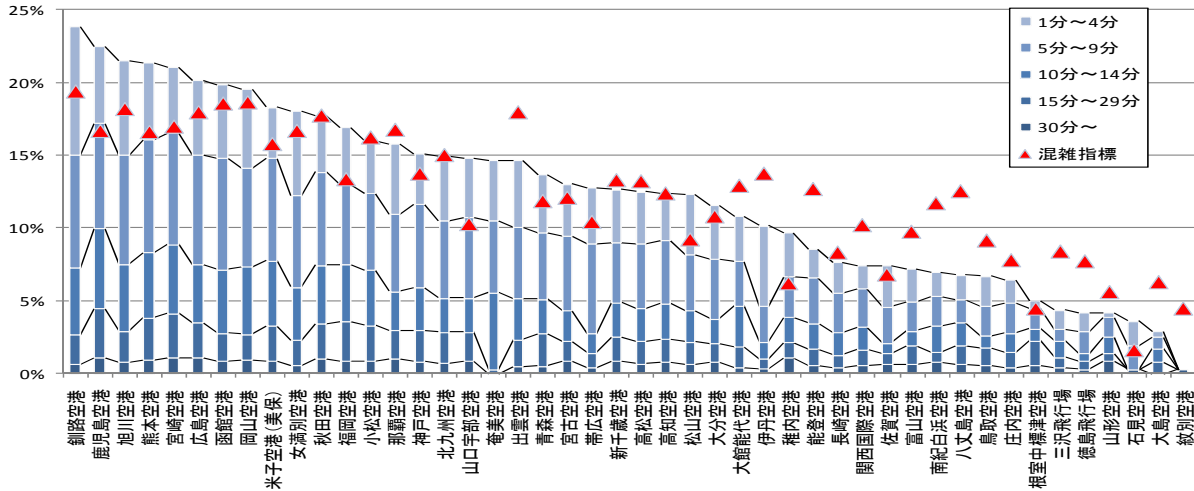


図 12 路線別の出発制御の実施状況（出発制御時間別の制御便確率の内訳）

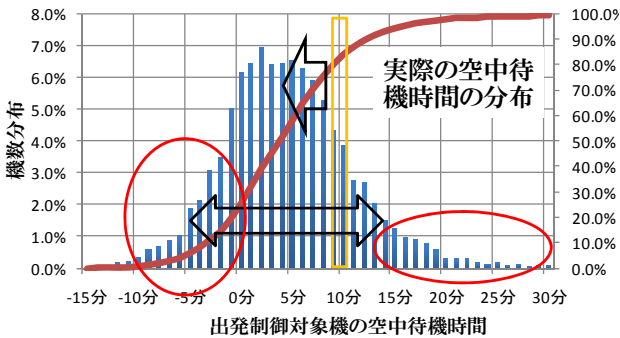


図 13 出発制御対象機の空中待機時間の分布

共用として使わなかった場合の比率) と制御便確率の相関を示しているが、両者の間には相関がみられることがわかる。一方で、もっとも制御便確率が高かった 8 月の南風運用比率は 7 月の南風運用比率よりも低いため、滑走路運用以外の要因も制御発出に影響を与えていることがわかる。

C) 時間帯別制御便確率

図 10 より 18 時、21 時に到着予定の便で制御便確率が高いことが分かる。特に 21 時台は 60% を超える便で制御が発出されている。制御時間でも 21 時台では 15 分以上の制御便の確率が 10% を超えている。図 11 は制御便確率が最も高い月である 8 月と、最も低い月の 1 月の制御便確率と制御時間分布の時間帯別の推移を比較したものである。これらの傾向は前述の遅延分析で述べ

たように、到着便の集中、南風運用比率、乗客数などが同様に影響していると考えられる。

D) 路線別制御便確率

路線による制御実施の違いについて確認する。図 12 に示すように路線によって出発制御便確率が大きく異なることが確認できる。また、混雑度が同じでも、路線によって出発制御便確率が異なることも確認できる。

8. 飛行遅延からみた出発制御の有効性に関する考察

ATM センターでは出発制御を実施することで羽田進入管制区内における空中待機時間が 10 分となるように EDCT が算出されているが、想定した滑走路容量値と実際の処理機数の誤差や、EDCT と実績離陸時刻の誤差などの影響によって、実際の運航では空中待機時間が 10 分を超えたり、もしくは下回ったりする。空中待機時間が 10 分を超えた場合には、羽田空港進入管制区手前の空域で羽田進入管制区への入域間隔を制限したりなどして安全を確保して運航するが、管制負荷は増大する。また、その逆で空中待機が発生しない場合には、出発制御の実施によって、滑走路を使用していない時間が発生することになり（滑走路の使用効率の低下）、この場合、当該機はもっと早く着陸できたのに、余計に地上待機させられたこととなる。

本節では、出発制御の有効性について空中待機時間で評価する。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

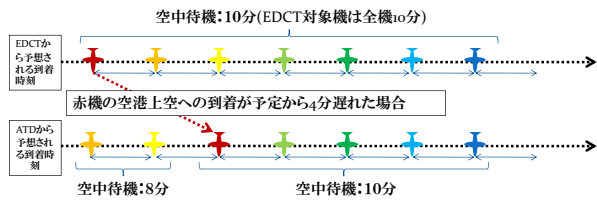


図 1 4 離陸遅延によるばらつきの発生例

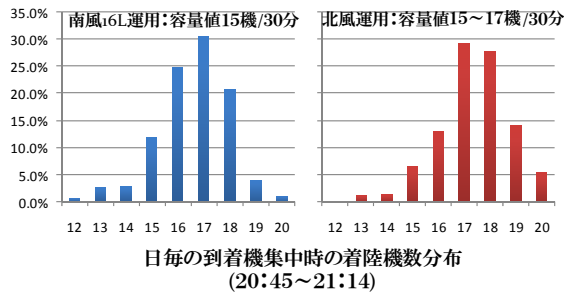


図 1 5 実際の着陸処理機数 (機/30分) の分布

ター時間) が算出困難なため、本研究では飛行時間の遅延 (実績飛行時間と飛行予定時間 (到着予定時刻 ETA と離陸予定時刻 ETD の差で算出) の差) を空中待機時間として分析を進めた。つまり、離陸以降の航空路における全ての飛行遅延が含まれることに注意されたい。

ATM センターで想定する出発制御対象機の空中待機時間は 10 分であるが、実際の空中待機時間の分布は図 13 に示すように、ばらつきが大きく、空中待機時間が 10 分よりも小さくなることも多数確認でき、0 分以下の機数も全体の 20%程度存在することが分かる。前述の通り、今回の出発制御データについては羽田の混雑以外の原因による制御機も含まれているため一概には言えないが、一定程度のばらつきは確認できる。以下では、この空中待機時間のばらつきについて簡単な考察を行う。

出発制御機の空中待機時間のばらつきは、主に、予定された離陸時刻 (出発制御時刻) からの遅れや、飛行時間の誤差 (気象条件の変化や、経路のショートカット、速度調整などによる) によって発生すると考えられる。離陸遅延による空中待機時間のばらつきについて、ばらつき発生の仕組みの例を示したのが図 1 4 である。ある機の離陸が 4 分遅れた場合を例とすると (その他の機は予定通り到着すると仮定)、離陸遅延した当該機は当初想定されていた着陸順序から 2 機分遅れるが空中待機時間は当初の想定から変化なく 10 分であるが、当該機の後に到着が予定されていた 2 機は空中待機時間が 8 分となり (処理容量を 30 回/時とすると)、滑走路の使用効率の上では問題はない。出発制御開始のトリガーを空中待機時間 10 分としているため、このような到着時刻の誤差を一定程度吸収することができる (飛行時間の遅れや早着も同様)。

一方で、空中待機時間に対してより影響を与えられられるのが滑走路処理容量の誤差である。前述の通り、風向などの

気象条件により滑走路の運用方式が異なり、それに応じて ATM センターにおける羽田の滑走路処理容量の想定値も変化する。気象条件の将来予測の困難さとともに、気象以外の様々な要因により滑走路処理容量は変化するため、この容量値の完全な予測は困難であり、その変動により空中待機時間も変動する。図 1 3 で示したように空中待機時間が 0 分以下 (実績飛行時間が飛行予定時間を下回る) になる場合は、滑走路処理容量の想定誤差も大きな影響を与えていると思われる (図 5 で示したように滑走路容量により想定遅延時間は大きく変化する)。図 1 5 は南風運用時 (16L) と北風運用時の実際の着陸処理機数の実績について、特に混雑する時間帯 (20:45~21:14) 30 分間の処理機数の分布を示したものである。南風運用時については標準的な容量値 15 機/30 分から比べると実績は 17 機/30 分がピークとなっており、想定よりも処理できていることが多く存在することが示唆される。北風時も同様に標準的な容量値の 15~17 機/30 分に対して 18~19 機処理できていることも多い。このような容量値の設定により、想定したほどの空中待機が実現されなくなるが、一方で過大に容量を設定すると思わぬ空中待機が発生し、管制官のワークロードが上がる可能性もある。このような処理容量の不確実性を考慮した最適な容量設定については、より詳細な実績パフォーマンスの分析をもとに、滑走路の使用効率と管制ワークロードの両者の視点から最適な設定方法について検討を行う必要がある。

9. まとめと今後の課題

本稿では、実際の運航データから、羽田到着機の遅延や出発制御の実態について基礎的な分析を行った。具体的には、遅延の時間変動や季節変動について気象条件の面などから分析を行い、また路線間比較からその差異を確認した。出発制御発出についても同様の分析を行い、さらに出発制御機の空中待機時間 (飛行遅れ時間) から、出発制御の有効性や交通量や容量の予測における不確実性の影響について考察を行った。今回のデータ分析にあたっては、羽田到着機への出発制御に着目したが、その原因としては羽田の混雑以外の途中空域の混雑やその他出発する地方空港における運用制限など、様々な原因が考えられるが、その原因別に分析ができていない。その問題への対応や、年間平均のみではなく各日の特徴を踏まえた詳細な分析や、路線別の遅延発生の特徴を考慮した、より効率的な出発制御方法に関する検討については今後の課題である。

参考文献

- 1) 国土交通省航空局管制保安部：航空保安業務の概要，2006。
- 2) 坂下文規，森地茂，日比野直彦：羽田空港における航空遅延に関する研究，第 39 回土木計画学研究発表会講演集 CD-ROM，2009。
- 3) 木村章：ATM システムパフォーマンスの評価 および欧州の実例について，電子航法研究所，航空管制 2008，No. 6。
- 4) 蔭山康太：ATM パフォーマンスの研究について (遅延時間の解析例)，電子航法研究所，航空管制 2009，No. 5
- 5) 例えば Eurocontrol：Performance Review Report 2008。