

離陸機数予測と到着間隔制御を考慮した滑走路運用シミュレーションと遅延評価

平田 輝満¹・久保 思温²・蒔田 良知³・二見 康友⁴

¹正会員 茨城大学大学院准教授 都市システム工学専攻 (〒316-8511茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: terumitsu.hirata.a@vc.ibaraki.ac.jp

²学生会員 茨城大学大学院 都市システム工学専攻 (〒316-8511茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: 17nm810x@vc.ibaraki.ac.jp

³正会員 株式会社大林組 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

⁴正会員 日本工営株式会社 (〒102-8539 東京都千代田区九段北1-14-6)

羽田空港では到着滑走路と2本の離陸滑走路が相互従属運用となっており、離着陸の順序付けにより滑走路全体の処理効率が変化する。本研究ではこの離着陸従属運用滑走路において、離陸時刻・離陸機数予測をもとに到着間隔制御を行うアルゴリズムを検討し、実際の到着間隔制御の方法と処理効率を考慮した容量・遅延評価シミュレーションを開発した。さらに、複数滑走路の需要バランスを考慮した動的な離陸滑走路決定による滑走路の運用効率改善と航空機遅延の軽減方策について検討し、シミュレーションによりその効果を定量評価した。その結果、動的に離陸滑走路を決定し滑走路ごとの需要バランスを確保することで滑走路全体の処理効率が向上し、遅延軽減が可能となることを示した。

Key Words : *Arrival Spacing, Departure Traffic Prediction, Runway Capacity, Simulation*

1. はじめに

我が国の航空需要は国際線を中心に今後も増加傾向が予測され、首都圏や一部地方の混雑空港においては航空会社からの発着希望に応えきれず容量不足が問題となっており、混雑が要因の一つと考えられる航空機遅延もここ数年悪化傾向が続いている¹⁾。抜本的な容量増加や遅延軽減のためには滑走路増設などの空港整備が必要であるが、一方で既存ストックを最大限活用した運用面での容量拡大方策の検討も重要と考えられる。航空管制の運用面における主な方策としては、出発到着航空機の戦略的な順序付け (Scheduling) と入れ替え (Position Shifting: PS) による混雑空港の滑走路容量 (スループット) の拡大可能性に関する研究が様々なされている。例えば、PS数制約を考慮した最適化 (Trivizas²⁾, Balakrishnan, et al.³⁾, 相原ら⁴⁾, など) や、出発時刻等の不確実性を考慮した最適化 (Solving, et al., 2011⁵⁾, など) がある。一方で、実運用への適用に関して、特に到着機の管制運用上、困難であると指摘されることも多く、特に、同経路上のPSが困難であること (Balakrishnan, et al.⁶⁾、スケジューリングと指示のタイミングを適切に考慮できないこと (いつ望ましい順序を決め、いつどのように個々の到着機に指示をすればよいか) (Solving, et al.⁵⁾ などが指摘されている。実運用上では、ヒースロー空港のように複数のホールディング・スタック (特定地点での

空中旋回待機場所) から着陸機を選択して一つの最終進入経路に誘導する際に、後方乱気流間隔の観点からスループットが最大化するような順序付けを行っているが^{7), 8)}、これは複数のホールディングで一度到着機を滞留させているために実行可能な方法であるとも言える。このように到着機のPSは現時点では困難が伴うが、出発機と到着機のPSは、出発機が滑走路脇で地上待機できることから比較的容易だと考えられる。つまり、出発機数と到着機数の状況を逐次判断しながら、到着間隔を制御し、離着陸の順序付けの観点のみからスループットを向上することになる。1本の滑走路を離着陸で共用する場合や、羽田空港のように異なる滑走路間で離着陸が従属運用になるケースで、そのような順序付け戦略の効果が期待される。特に羽田空港では、容量制約が厳しい南風運用時に1本の着陸滑走路と2本の離陸滑走路が相互従属運用になっており、この離着陸の順序付けおよび到着機の間隔制御によって比較的大きく滑走路処理効率が変動する可能性がある。

そこで本研究では、羽田空港の南風運用時を対象に、(1)離陸機数の予測とそれに応じた到着機の間隔制御が空港全体で見た時の滑走路処理容量にどのように影響するのかを評価可能な新たなシミュレーションの開発、(2)到着間隔制御の方法の違いや離陸機数予測の不確実性が処理効率 (遅延時間) に与える影響の分析、(3)離陸機の動的滑走路指定による遅延軽減効果の分析、の3点を研究の目的とした。

2. 羽田空港の管制運用と到着間隔制御の実態解析

(1) 羽田空港における管制運用の概略

羽田空港は4本の滑走路があり、大きく分けて北風運用と南風運用の2つの方式で運用され、南風運用の方が容量制約が厳しい⁹⁾。図-1に示す通り、南風運用時はB・D滑走路が到着専用、A・C滑走路が離陸機専用で運用され、飛行方面別に使用滑走路が決まっている。これは方面別滑走路方式と呼ばれ、これにより空域での飛行経路の交錯を回避しているが、一部例外もある。ここで、D滑走路着陸機（以後D着陸）とA・C滑走路離陸機（以後、A・C離陸）が相互従属運用となっている。つまりD着陸の間を縫ってA・C離陸を処理することになるが、D着陸の間隔設定とA・C離陸の需要のバランス状況に応じて、滑走路全体で見た時の処理効率上のロスが一定程度は発生してしまう。以降、このロスの観点から分析を行った。なお、B滑走路到着機についてはA滑走路離陸機と一部従属関係になる場合もあるが、A滑走路の離陸滑走開始地点を調整することで独立運用されることも多く、本研究では簡略化のためB滑走路は独立運用と仮定して分析からは除外した。

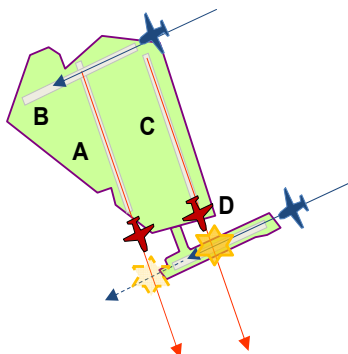


図-1 羽田空港の南風時の滑走路運用

(2) 到着飛行経路と間隔制御の実態解析

図-2は国土交通省から公表されている我が国の航空機の飛行軌跡データであるCARATS OPEN DATA (2014年度の42日分のデータ)から羽田空港南風運用時のD滑走路到着機を抽出し描いた軌跡図である。図中のローマ字5文字の点はFIXと呼ばれ航空機が飛行する標準的な経路を構成するための通過点であり、北から到着した航空機はSTONEと呼ばれるFIXから羽田のターミナル空域に進入する。ターミナル空域は羽田空港を離着陸する航空機の順序付けや間隔制御を行う空域である。それ以前はエンルート空域と呼ばれ比較的高い高度を巡行する航空機を管制する空域でターミナル空域とは別の管制機関が管制を行っている。図を見て分かる通り、STONE通過後に西方に旋回してDREADとDATUMを通過する経路や、STONEからDATUMに直行する経路など、これら3つのFIXに囲まれた空域で経路が様々変動している。航空局へのヒアリングから、前者の旋回経路が特に管制指示のない場合に飛行すべき他経路との競合を

避けた標準経路であるが成田空港発着機との経路競合が許せば後者の直行経路なども使用して飛行経路について管制指示を行うとともに、(明確な方式はないが)羽田空港の出発機数の大小をマクロに見ながら到着機の間隔をラフに調整することもあるとのことであった。なおこの範囲外は他の経路との関係でベクタリング(管制官が飛行方位を指示することで飛行経路を変更させること)は基本的に行わないが、稀に範囲外にも飛行させているケースも存在する。図-3はSTONE-DATUM間の飛行距離のヒストグラムであるが、実際にはSTONE-DATUM間の最短経路である30NM(海里:1MN=1852m)程度で飛行するケースが多く、次に標準経路であるDREAD経由の経路(35NM程度)やその間の経路も比較的使用されていることから、比較的自由度高くベクタリングができることも考えられるが、正確にはその時々周辺の条件にも依存するので精査が必要である。



図-2 D滑走路到着機の飛行軌跡の例

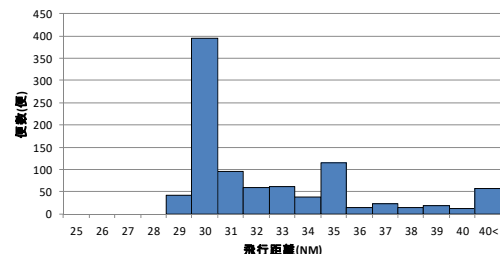


図-3 STONE-DATUM間の飛行距離の分布

次にSTONEとDATUMにおける到着機の通過時間間隔がその到着機間で挟んだA・C離陸機の数に応じてどのように変化しているかを示したものが図-4と図-5である。なお、離陸機数はA・Cの多い方を示している。まずSTONEにおける着陸機の間隔であるが、これをみると離陸機が0~2機の場合には同様の間隔となっていることが分かる。つまりSTONEを通過する際には離陸機の状態とは無関係に、手前のエンルート空域からSTONE以降のターミナル空域へ入域させる際の最低間隔を下回らないようにだけコントロールされている。これは、通常は運用ルールとして決まっていることが多く、高速道路のオンランプ部で交通量の制御を行うために流入間隔を調整するメータリングと同様の役割である。ただし、

離陸機が3機の場合には明らかに間隔が広いサンプルが多いことから、D滑走路着陸機の交通量（平均的には12機/時）の関係から着陸機の間隔が自然と空いた時に3機、もしくはそれ以上の離陸機数を着陸機の間で処理していると考えられる。次にSTONE通過後に様々な経路を通り再び合流するDATUMにおける着陸機の間隔は、着陸機間に処理する離陸機数が増えると間隔も広がっていることが分かる。また、離陸機が0機の場合は図-4に示したSTONEでの間隔と近い分布となっていることが分かる。これらから、(1)当該到着機と関連する離陸機の状況を考慮して積極的な到着機間隔のコントロールがある程度なされている、または、(2)状況に応じてSTONEからDATUMへの最短直行経路（飛行時間・距離の短縮）を許可したことで到着間隔が変化し、その結果として到着機の間隔に応じて離陸機数が増えた、の両者の可能性が示唆される。

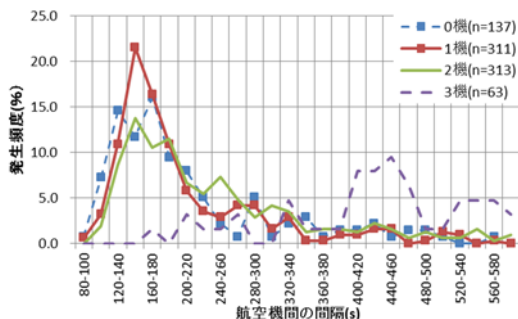


図-4 STONEにおける到着機の間隔の分布

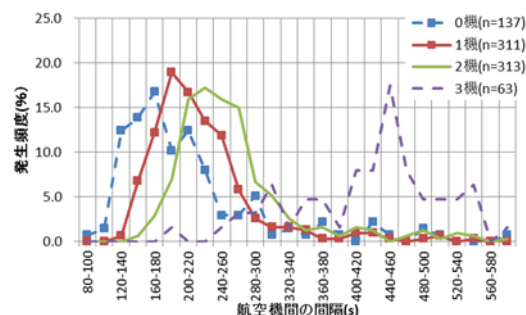


図-5 DATUMにおける到着機の間隔の分布

(3) 滑走路使用効率の実態解析

次に、D着陸の間に挟まれるA離陸とC離陸に関して、当然ながらその離陸機数がアンバランスになったり、必要な管制間隔が滑走路間で若干異なることが影響したりして、D着陸間で離陸できた機数にも差異が生じる。例えばA離陸が2機、C離陸が1機だとしたら、C滑走路で本来利用可能だった離陸容量（約1機分）を損失していると考えられる。そこで、前述のCARATS OPEN DATAから単純にD着陸間のA離陸とC離陸の数の差異を集計し、その差分だけ離陸機数が少なかった滑走路で損失があったと仮定して集計し、日平均をとった結果を図-6に示す。図から両滑走路で平均2~6機程度/時、夕方ピーク時には8~10機程度/時という損失数が観測された。単純な仮定で計算しているため、この損失数が正確

な容量損失とは言えないが、一定程度の損失が生じていることは明らかである。また、多くの時間帯でA滑走路離陸機の損失が小さい傾向があるが、これは管制方式基準上、C滑走路離陸機が大型機（Heavy機）の場合はD滑走路着陸機との間に比較的大きな後方乱気流間隔が必要である一方で、A滑走路離陸機にはそれが不要であるため、A滑走路離陸機の方が出発させやすいことが影響している可能性もあるが、それぞれの滑走路の需要も影響するため明確には分からない。到着間隔を離陸機数を予測し、より積極的に制御したり、逆に離陸機自体の使用滑走路をより柔軟に変更することで、どの程度このような損失を最小化し、滑走路全体の遅延を軽減または容量を増加させることができるか、次章以降でシミュレーション分析を行う。

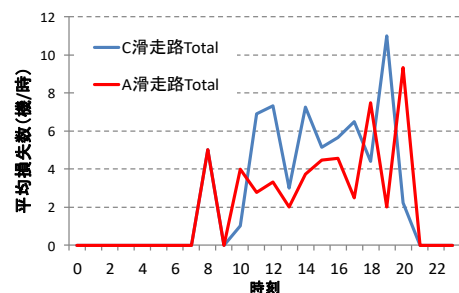


図-6 離陸機数の差によって生じた損失機数の実績

3. 離陸機数予測と到着間隔制御を考慮した滑走路運用シミュレーションの開発

(1) シミュレーションの概要

前章で解析した現状の羽田空港南風時の滑走路運用と処理効率の実態をもとに、ターミナル空域における着陸間隔設定が滑走路処理効率に与える影響を評価するための新たなシミュレーションを開発した。シミュレーションの概要を図-7に示す。主な特徴は実際の管制運用における管制官の意思決定を想定し、時々刻々と変化する出発機の状況を考慮して到着機の間隔制御を模擬する点である。より具体的には、到着機がターミナル空域に入るSTONE通過時を意思決定のタイミングとし、その時点で使用可能な確定情報と予定情報により、当該到着機が着陸するであろう時刻に離陸待機状態にある離陸機数を予測し、到着間隔を決定する、という点が最大の特徴となる。シミュレーションでは、到着管理空域をエンルート部（空域Ⅰ）とターミナル部（空域Ⅱ）に分割しつつ、その境界を変更できるようにし、着陸間隔調整の自由度の影響を評価できるようにした。空域Ⅱにおける着陸間隔調整はA・C滑走路で関連するであろう離陸機数と離陸に必要な最低到着間隔を予測するモジュールを内包させ、その数に応じて着陸間隔を任意に調整するアルゴリズムを開発した。以下、モジュールごとに詳細に説明する。

(2) 航空機の発生と飛行および地上走行時間

まず、航空機の発生は実績のダイヤを参考に設定している(図-8)。まず、出発機は2017年1月30日のダイヤの出発時刻と実際の出発時刻(実際の遅延時間)を入力し、シミュレーション上では実際の出発時刻にスポットアウトするよう設定した。予定時刻データは予測行為の際に使用している。各フライトには使用ターミナルや飛行方面をもとに使用滑走路データを割り当て、後述の滑走路占有時間の算出に必要な後方乱気流区分(Heavy機, Medium機)も付与している。出発機の地上走行時間は使用する旅客ターミナル別にFlight Radar24で収集したサンプルデータから地上走行時間の実際の分布を求め、非負で実際の分布形と適合度が高かった対数正規分布で近似してランダムに与えた(正確には観測最小時間6分の基準時間からの増分を対数正規分布で与えている)。

到着機の発生は空域Ⅰの始点で発生し、発生時刻はダイヤ上の時間帯別1時間機数をもとに、発生間隔は指数分布でランダムに与えた。空域Ⅰの大きさは具体的に規定しておらず、空域Ⅱに入る前のエンルート区間全体を含む概念であるため、その空域Ⅰ上に発生する間隔は北方面から羽田空港に到着する航空機全体の出発間隔に近似できると考えられるため、その間隔は極めてランダムに近い、つまり指数分布で表すことが合理的であると考えた。STONEからターミナル空域に入域する際には、現状の運用ルールと同様に先行機との最低入域間隔を設定できるようにし、現状を参考に180秒と設定した。つまりそれ以下の間隔で発生した場合は180秒間隔になるようにSTONE手前の空域Ⅰで遅延が生じることとなる。STONE到着時に離陸機情報をもとにベクタリング量(飛行経路変更による遅延量)を決定するが、ベクタリング完了後(遅延時間分を飛行後)は、実績飛行時間をもとに、すべての機が20分で着陸することを仮定した。

(3) 離陸可能機数の予測

到着機がSTONEを通過した際に当該到着機が着陸する時刻までに、どの出発機が離陸可能になっているか、つまり離陸滑走路端に到着している機数を計算しており、その機数をもとにSTONE以降のターミナル空域における到着間隔を調整できるように設定している。ここで、到着機がSTONEから着陸するまで約20分弱程度必要であるため、関連する離陸機数については一定程度の予測行為が必要となる。そこでSTONE到着時の関連離陸機数(離陸待機機数)の予測のための各出発機の離陸可能時刻の予測は、各出発機のその時点の状態別に、基本的に以下の情報をもとに行うことを仮定した(図-9)。

- ① スポットアウト前の出発機：出発予定時刻(SOBT: Scheduled off-block time) + 平均走行時間
- ② スポットアウト後で地上走行中に出発機：出発時刻(AOBT: Actual off-block time) + 平均走行時間

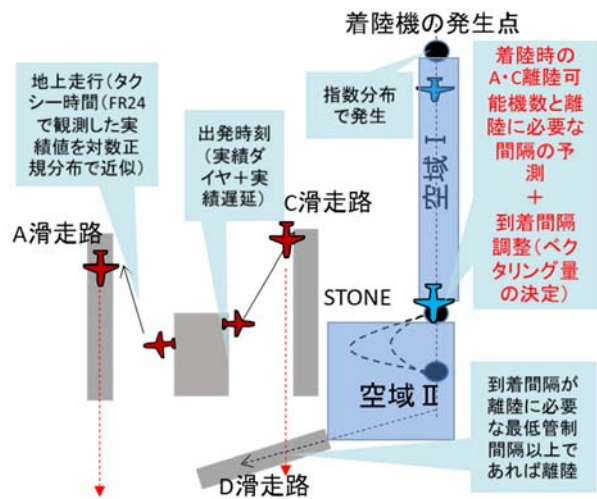


図-7 シミュレーションの概要

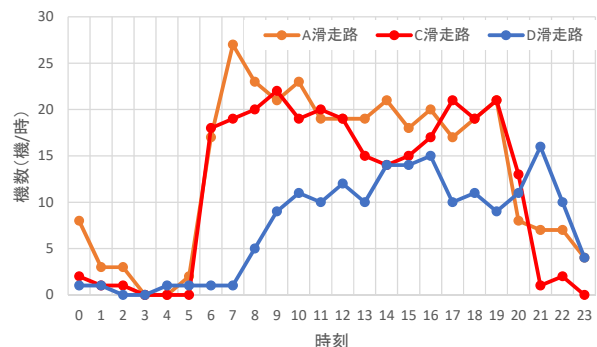


図-8 時間帯別発生機数(A・C滑走: 出発, D滑走路: 到着)

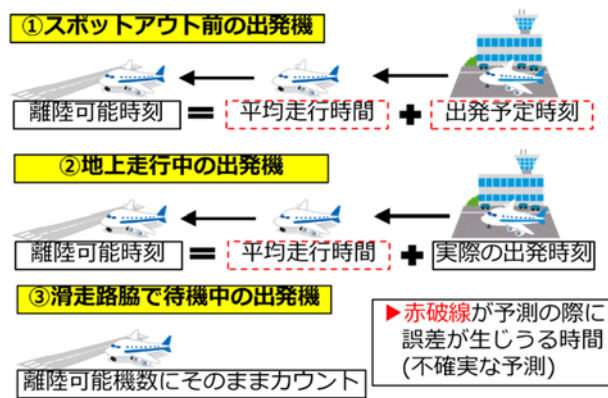


図-9 離陸待機機数の予測方法

- ③ 滑走路脇で待機中に出発機：そのまま離陸可能機にカウント

実運用で離陸時刻を予測する際には、出発時刻と地上走行時間(出発から滑走路到着までの時間)に不確実性を伴う。出発時刻で言えば、必ずしも出発予定時刻で出発するとは限らず、例えば一部旅客の搭乗遅れや機材繰り遅延(前便の到着遅れの波及)、機材トラブルによる点検などで出発が遅延することがしばしばある。地上走行時間についても、駐機場周辺や誘導路の混雑等により変化する。これらの時

間を確実に予測することは困難であり、そこには一定程度の確率的変動が伴い、予測した時間とは誤差が生じ得るため、本研究ではこれら誤差を不確実性として扱い、以降の分析を進める。ここで、特に出発時刻の遅延が比較的大きいため、その遅延時間による予測誤差が滑走路の使用効率に影響することとなる。例えば、出発遅延のために、予測した離陸可能機数より実際の離陸可能機数が小さくなれば、余分な到着間隔制御を行う結果となり、その結果遅延が悪化することとなる。なお、出発時刻予測における不確実性の低減方法については4(3)にて考察する。

(4) 予測離陸機数に応じた到着間隔制御と滑走路処理

次に、離陸可能機数を上述の方法で予測した後は、その機数に応じて到着間隔の調整量を決定することとなる。離陸滑走路はA・C滑走路の2つが存在するため、間隔調整量の判断時にどの滑走路の離陸待機機数を参照するので滑走路処理効率に変化する。このため、到着間隔制御時の予測離陸待機機数の参照方法を以下の3ケースにした。

- ① 少ない滑走路：予測離陸待機機数が少ない滑走路
- ② 両滑走路（平均）：両滑走路の予測離陸待機機数の平均値
- ③ 多い滑走路：予測離陸待機機数が多い滑走路

次に、離着陸処理の最低間隔（滑走路占有時間）については管制方式基準や離着陸速度のバラつきを考慮した間隔を既存研究¹⁰をもとに設定している（図-10）。計算のアルゴリズムとしては、「制御後の到着機間隔」と「地上で待機している離陸機が離陸するのに必要な最低間隔」を比較し、条件を満たせば離陸させている。前述の通り、到着間隔制御は間に挟む離陸機を予測し、その機数に合わせている。正確にはそれらの機が離陸できるための間隔を後方乱気流区分を考慮した順序付けも考えて間隔を制御しているが、前述の予測誤差のため、実際に挟めた離陸機数とは乖離が生じ、挟めなかった離陸機は次の到着機の後に回され、その後の機材も玉突きで遅延する可能性がある。その場合は、各到着機がSTONEに到着する時点ごとに、予測段階で設定される離陸機の挟まれる予定位置を逐次更新するアルゴリズムとしている。また、空域Ⅱにおけるベクタリング量の上限を設定できるようにしており、以降の分析では前章で紹介したSTONE以降の最短経路と遠回り経路の差に相当する150秒と、上限制約を緩和した900秒の2種類で分析を行っている。

以上のシミュレーションから、アウトプットとしては各航空機の遅延時間やベクター量などが算出され、それらが時間帯ごとで評価可能である。各シナリオでのシミュレーションを100回試行し、遅延時間などの指標はその平均値で評価する。

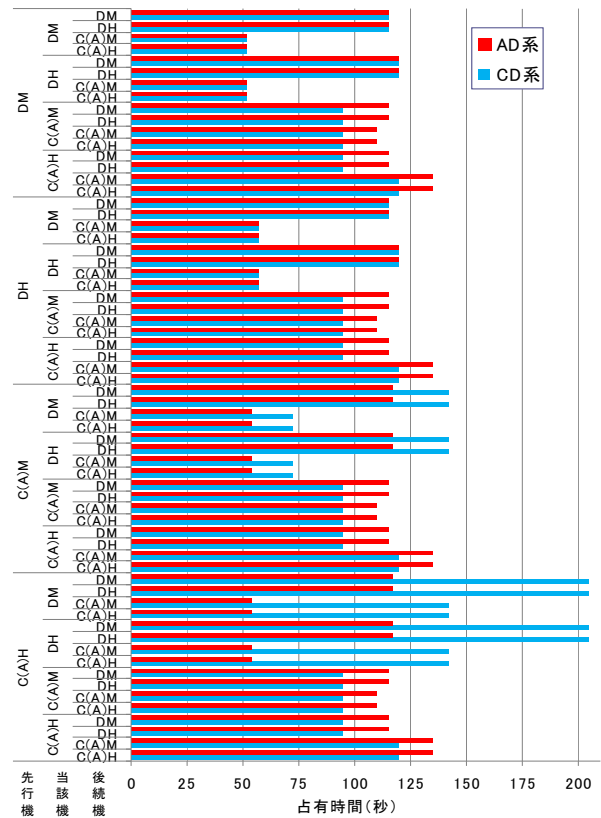


図-10 C-D滑走路系・A-D滑走路系における全組み合わせの占有時間（連続3機の2機目の占有時間で、図中の記号は使用滑走路（A・C・D滑走路）および機材の後方乱気流区分（Heavy・Medium）を示す）¹⁰

4 シミュレーション結果

(1) 到着間隔制御方法と予測の不確実性の影響

図-11と図-12は、到着間隔制御を行わない場合、つまり、STONEに到着したままの間隔で処理した場合と比較して、離陸機数の予測をもとに到着間隔制御を行った場合にどの程度遅延時間に変化があるか分析した結果を示している。ここで離陸機予測において不確実性がない場合、つまり、離陸可能時刻が完全に分かっていると仮定して予測を行った場合の結果も比較のため示している（図中の「間隔制御あり（确实）」）。なお、ベクタリングの上限は150秒で、到着間隔制御で参照する離陸機数はA・C離陸機数の平均とした場合の結果を一例として示している。まず、「間隔調整なし」条件では空域Ⅱに入域する際の最低間隔調整のためのみで間隔調整を行うため空域Ⅰでのみ遅延が発生しており、「間隔調整あり（不确实・确实）」条件では予測した離陸機数に応じて空域Ⅱにおいても間隔調整を行うため、それに応じて空域Ⅱでも遅延が生じている。また、離陸機数予測をもとにした到着間隔制御による離着陸順序付けにより、離陸機数に応じた効率的な到着間隔が生成されトータルの平均遅延が一定程度軽減することが分かる一方で、予測の不確実性により遅延軽減効果が低下していることも分かる。これは、

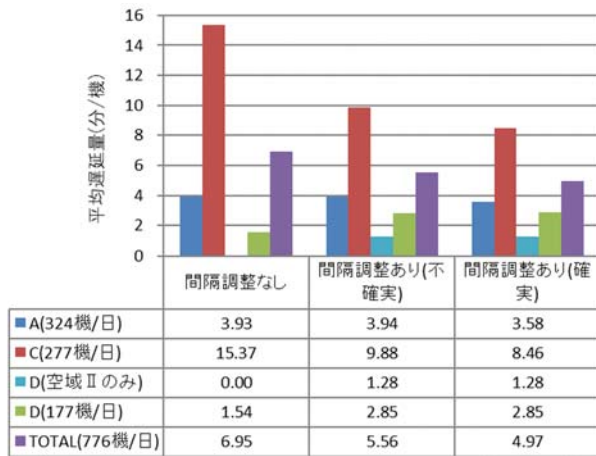


図-11 到着間隔制御の有無・離陸機予測精度による滑走路別の航空機遅延結果の差（ベクタリング上限：150秒，参照離陸滑走路：平均機数）

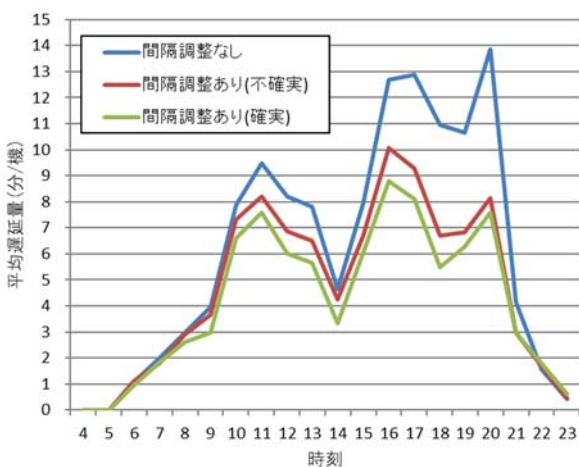


図-12 到着間隔制御の有無・離陸機予測精度による時間帯別の平均航空機遅延結果の差（ベクタリング上限：150秒，参照離陸滑走路：平均機数）

表-1 様々な条件下での平均遅延の結果の比較

ベクタリ ング上限	予測精 度	参照離陸滑走路	平均遅延 (分/機)
150	確実	多い滑走路	4.91
		両滑走路の平均	4.97
		少ない滑走路	4.99
	不確実	多い滑走路	6.02
		両滑走路の平均	5.56
		少ない滑走路	5.49
900	確実	多い滑走路	7.10
		両滑走路の平均	4.71
		少ない滑走路	4.48
	不確実	多い滑走路	7.59
		両滑走路の平均	6.24
		少ない滑走路	5.61
到着間隔制御無し			6.95

前述の通り，出発時刻等の不確実性により，STONE 到着時点での予測段階で想定した離陸可能機数と実際の離陸可能機数に乖離が生じ，結果として離陸機処理にロスが生じることが原因である。

表-1には，ベクタリング量の上限，予測精度，到着間隔制御で参照する離陸滑走路，を変更した場合の結果一覧である（全滑走路の平均遅延のみ）。この結果から分かる通り，概して，ベクタリング量の上限は短い方が，予測精度は確実な方が，また参照する離陸滑走路は離陸機数が少ない方に合わせた方が，遅延時間が小さい傾向にある。一方で，ベクタリング上限の制約を緩和した方がより柔軟に離陸機数を処理するための間隔調整ができるので処理効率が高そうであるが，より柔軟に，より多くの離陸機数を扱おうとすると，予測誤差の影響の感度が上がり，逆に遅延が悪化していると考えられる。つまり，予測誤差がある程度以上想定される場合には，なるべく離陸機を滑走路脇に一定程度滞留させ，処理効率上のロスが発生しないような到着間隔制御が望ましいことを示唆している。

次に，この不確実性の程度が仮に変化した場合の感度分析を行った結果を図-13に示す。ここでは，3(3)で述べた離陸可能時刻の予測において生じる誤差が75%，50%，25%に減少した場合の結果を示している（ベクタリング上限150秒，参照離陸滑走路は多い方の滑走路のケース）。このように不確実性の程度が減少するほど，不確実性のない確実な予測の場合の結果に近づくことが確認されることから，到着間隔制御の遅延軽減効果を確保するにあたっては，離陸機予測の不確実性を極力低減することが必要となることが分かる。この方法については後述する。

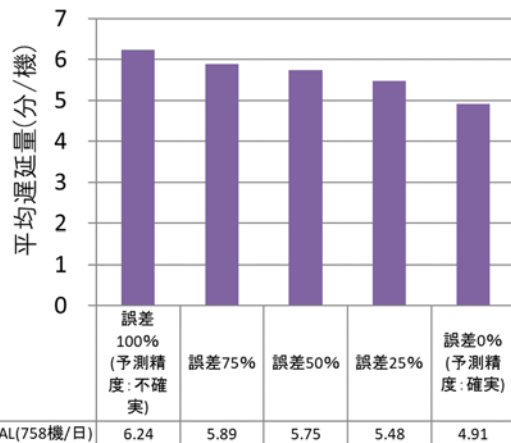


図-13 離陸機数の不確実性の程度が変化した際の遅延結果

(2) 離陸滑走路の動的指定の効果

前述の通り，現在の羽田空港では空域での飛行経路の交錯を避けるため，到着空港への飛行方面別に使用する滑走路を限定する「方面別滑走路」を採用している。南風運用時には，主に西方面の離陸機をA滑走路，北方面の離陸機をC滑走路としているため，シミュレーション上の離陸機の発生も実績のダイヤをもとに飛行方面別に使用滑走路割り当てている。飛行方面別に使用滑走路を振り分けると，離陸比率は航空局が設定する容量比率（A:C=22:18）¹¹⁾

に必ずしも適合していない時間帯も多い。また、時々刻々の遅延の状況に応じて離陸滑走路間で需要のアンバランスが生じ、到着機間に挟む離陸機数にも差異が生じる結果として、処理効率上のロスが発生し、遅延が悪化することが考えられる。そこで、本研究では、離陸機数をリアルタイムに予測するアルゴリズムを援用して、時々刻々のA・C滑走路の離陸機数バランスを取れるように、動的に離陸滑走路を指定・変更したら、どの程度の遅延軽減効果があるか分析を行った。なお、動的に離陸滑走路指定する際には、出発機が出発する際に滑走路で待機している機と待機が予定されている地上走行機を足した機数を比較し、空いている方の滑走路を指定することでバランスをとるようにした。分析結果を表-2に示す。この結果から、動的離陸滑走路指定により遅延が大きく低減できていることが分かるとともに、予測の不確実性の負の影響も低減されていることが分かる。離陸交通量が2本の滑走路でバランスすることで、予測の不確実性のためにロスが生じる機会が減ることが示されている。なお、動的滑走路指定の目標として均等な需要バランスになるケースの他に、航空局で空港計画段階で公表している滑走路別の容量比率（ここではA:C=3:2と仮定）で分析した結果も併記しているが、均等の場合とほぼ差はないが、均等にした方が平均的に遅延が小さいことが分かる。A滑走路とC滑走路を比較した場合、C滑走路離陸機の方がD滑走路着陸機との管制間隔上、後方乱気流間隔のペナルティが必要となるため、容量を減じているが、到着間隔制御を適切に行えば、均等に需要を配分した方が処理効率が高い可能性も示唆される。なお、現在、関東ターミナル空域の広域化とともにポイントマージシステムと呼ばれる到着機の効率的な処理のための管制方式の導入設計が進められており¹³⁾、これにより到着機の方面別需要をより柔軟に管理運用できるとともに、現在検討されている羽田空港機能強化のための新たな飛行経路設定では出発機の方面別需要も従来の方面別比率から変更されることが検討されているため¹⁴⁾、今後は方面別滑走路制約についても一部緩和できる可能性も示唆され、もし空域における飛行経路の交錯を安全に処理できることを前提に方面別滑走路制約の緩和が可能となれば、本研究で示した動的滑走路指定の実現可能性も一定程度あると考えられる。一方で、動的に使用滑走路を変更することは、航空会社側においても事前に複数の離陸滑走路に対応した飛行計画を準備する必要があると考えられ、その追加的な作業負荷があるとすれば、その負荷に対して遅延軽減もしくは容量増加の効果が十分大きい必要がある。

(3) 出発時刻予測による不確実性低減方策

前章で、離陸機に関わる予測の不確実性により滑走路の使用効率が低下、遅延が悪化することを示した。そこで、特に不確実性の大きい出発時刻（旅客ターミナルのスポットから出発する時刻）について、前便の到着遅延からの波及遅延を考慮した出発遅延

表-2 方面別滑走路制約の緩和による動的離陸滑走路指定の効果

ベクトリング上限	予測精度	参照離陸滑走路	平均遅延 (分/機)		
			方面別滑走路	動的指定 (均等)	動的指定 (計画容量比率)
150	确实	多い滑走路	4.91	4.18	4.14
		両滑走路の平均	4.97	3.98	4.21
		少ない滑走路	4.99	4.10	4.21
	不确实	多い滑走路	6.02	4.09	4.42
		両滑走路の平均	5.56	4.26	4.14
		少ない滑走路	5.49	4.14	4.18
900	确实	多い滑走路	7.10	5.20	5.27
		両滑走路の平均	4.71	3.85	3.96
		少ない滑走路	4.48	4.00	4.02
	不确实	多い滑走路	7.59	6.16	6.30
		両滑走路の平均	6.24	4.91	5.03
		少ない滑走路	5.61	4.69	4.59
到着間隔制御無し			6.95	4.55	

予測モデルを検討した。筆者ら¹²⁾の先行研究にて国内航空ネットワークにおける波及遅延解析を行うために独自に収集した実績遅延データベースを活用した。データベースには航空機材IDが含まれ機材繰りによる遅延波及を追うことができる。ここでは、前便到着時の到着遅延時間と到着から出発までの予定折り返し時間を主に活用し出発時刻の遅延を予測する統計モデルを推定した。今回の到着間隔制御でSTONE到着時を意思決定タイミングとしているが、その時点で予測対象となる出発機は時間的にはほぼ確実に前便到着遅延が判明している時点となる。当然ながら前便到着遅延が大きいほど、また折り返し時間が短いほど（遅延吸収のためのバッファ時間が短いほど）出発遅延が大きくなることが予想される。統計モデルとしては遅延時間が負の値を取らず、また0であることも多々あることから以下の打ち切り回帰モデル（Type I-Tobitモデル）を適用した。

$$y_i = \begin{cases} y_i^* & y_i^* > 0 \\ 0 & y_i^* \leq 0 \end{cases} \dots (1)$$

$$y_i^* = \beta_0 + x_i \beta_i \dots (2)$$

y_i : 目的変数(出発遅延), y_i^* : 潜在変数

β_i : パラメータ, x_i : 変数

また、各パラメータ β の推定はTobitモデルから導出される対数尤度関数から最尤法により行った。推定したパラメータを表-3に示す。推定結果から、事前に想定した通り前便到着遅延と予定駐機時間は有意な影響を示しており、パラメータの符号も合っている。また、旅客等の混雑の影響を表すと考えられる繁忙期・ピーク期・日曜ダミーや空港利用者数も遅延を増加させる影響が有意に出ている。その他、LCCの遅延波及のしやすさ、機材の大きさの影響、またleg数（当該機材の便として1日の何便目か。なんらかの累積的な遅延への影響が想定される）も有意な影響が出ている。この予測モデルを用いて予測をした場合の出発時刻の誤差（実績の出発遅延量－予測した遅延量）と予測をしなかった場合の出発時刻の誤差（出発時刻－予定出発時刻）について

RMSE (Root Mean Squared Error) を指標とした精度評価を行った (サンプルは羽田出発便29722便)。結果、予測モデルなしだとRMSEが13.2分、予測モデルを用いると6.8分となり、予測モデルを用いることで出発遅延に関する誤差の49%を減少できる結果となった。

また滑走路までの地上走行時間についても簡易に検討した。今回は地上走行データが含まれる2016年度のCARATS Open Dataを使った分析を行った。羽田空港を離陸する機材を抽出した後、緯度経度の情報からどのスポットから出発したのかの判断を行った。その後、ターミナル毎での誤差 (地上走行時間の実績-ターミナル毎の地上走行時間の平均) とスポット毎での誤差 (地上走行時間の実績-スポット毎の地上走行時間の平均) についてRMSEを指標として精度評価を行った結果、10秒ほどの改善が見られた。これら出発時刻予測モデルとスポット別地上走行時間予測を組み合わせて離陸可能時刻の予測を行うと、誤差の約45%を減少できる結果となった。つまり、前述の予測誤差の影響分析における50%程度の予測誤差までは軽減の可能性があると言える。

表-3 出発遅延予測モデルの推定結果

説明変数	係数	p 値
定数項	4.039	***
前便の到着遅延 (分)	0.924	***
予定駐機時間 (分)	-0.268	***
LCC ダミー	4.673	***
出発時レグ数	0.054	**
繁忙期ダミー	0.655	***
ピーク期ダミー	0.723	***
航空機座席数 (席)	0.019	***
日曜ダミー	1.826	***
空港利用者数 (人)	1.9E-0.5	***
p 値 : *** <0.001, ** <0.01, Log-likelihood: -333894.175 R ² : 0.69 (予測値と観測値の相関係数の二乗)		

5. おわりに

本研究では、羽田空港の南風時の A・C・D 滑走路を対象とし、ターミナル空域における到着機の処理方法の特性や制約、さらに離陸機数の予測を加味した滑走路運用シミュレーションを開発し、到着間隔制御による離着陸順序付けの効果および、予測の不確実性の影響について定量的に評価を行った。その結果、離陸機数予測をもとに到着間隔制御を行うことで、到着間隔制御をおこなわないケースと比べて航空機遅延が有意に低減される可能性を示した。一方で、離陸機の予測精度が低下すると間隔制御による離着陸順序付けの効果も低下することを示し、予測精度向上の必要性を示した。また、動的離陸滑走路指定による遅延軽減効果も確認するとともに、そのことによる離陸機予測の不確実性の影響を軽減

できることも示した。最後に、離陸機予測の不確実性低減のための出発遅延予測モデルについて検討し、50%程度の予測誤差を低減できる可能性を示した。また、実務的には、羽田空港を対象として、航空ダイヤや交通量、間隔制御の制約条件、滑走路配分などの運用条件を変更した際の遅延を詳細に評価可能なツールとして、本研究で開発したシミュレーションは活用可能であり、羽田空港の容量評価に対して有益なツールとして活用可能と考えられる。

今後の課題としては、時系列でみた際の離着陸の需要動向バランスを考慮した離着陸の優先度の評価と、それをもとにした最適化を考慮すること、また飛行時間や処理間隔のバラつきを加味することなどが挙げられる。

謝辞

本研究の成果の一部は、交通運輸技術開発推進制度「航空機の到着管理システムに関する研究」における支援を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 国土交通省航空局：平成 29 年度の主要な成果について (第 8 回将来の航空交通システムに関する推進協議会、資料 2-3)、2018。
- 2) Trivizas, D. A., : Optimal Scheduling With Maximum Position Shift (MPS) Constraints: A Runway Scheduling Application, *Journal of Navigation*, Vol.51, No.2, pp.250-266, 1998.
- 3) Balakrishnan, H., and Chandran, B., "Algorithms for Scheduling Runway Operations Under Constrained Position Shifting," *Operations Research*, Vol. 58, No. 6, pp. 1650-1665, 2010.
- 4) 相原磨世, 総宜史, 又吉直樹: 数理計画手法を用いた空港離着陸容量検討ツールの開発, 第 52 回飛行機シンポジウム, 2014.
- 5) Gustaf Solveling, Senay Solak, John-Paul Clarke, and Ellis Johnson. "Runway Operations Optimization in the Presence of Uncertainties", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 34, No. 5, pp. 1373-1382, 2011.
- 6) Balakrishnan, H., and Chandran, B., : Scheduling Aircraft Landings under Constrained Position Shifting, *Proceedings of AIAA Guidance, Control, and Navigation*, 2006.
- 7) Bruce S. Tether J. Stan Metcalfe: Horndal at Heathrow? Capacity creation through co-operation and system evolution, *Industrial and Corporate Change*, Volume 12, Issue 3, 1 June 2003, Pages 437-476,2003.
- 8) JE Beasley, J Sonander, P Havelock: Scheduling aircraft landings at London Heathrow using a population heuristic, *Journal of the Operational Research Society*, Vol.52, pp.483-493, 2001.
- 9) 国土交通省航空局：首都圏空港機能強化技術検討小委員会 の 中 間 取 り ま と め , 2014 , <http://www.mlit.go.jp/common/001047134.pdf> (2019/2/22 閲覧)。
- 10) 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, No.3, p.295-308, 2013.
- 11) 国土交通省航空局：首都圏空港機能強化技術検討小委員会の中間取りまとめ（参考資料），2014，<http://www.mlit.go.jp/common/001047127.pdf>（2019/2/22 閲覧）。
 - 12) 平田輝満・古田土渉・又吉直樹：国内航空ネットワークにおける波及遅延の解析モデルと費用対効果分析への活用手法，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.74, No.5, p. I 959-I 970, 2018.
 - 13) 国土交通省航空局：国内空域再編に向けて～管制運用の視点から～，平成 28 年度 ATS シンポジウム講演資料，2016，http://atcaj.or.jp/wordpress/wp-content/uploads/2016/11/H28_ATS_Symposium_paper.pdf（2019/2/22 閲覧）。
 - 14) 国土交通省航空局：最近の航空行政の方向について，平成 30 年度 航空管制セミナー講演資料，2018，http://atcaj.or.jp/wordpress/wp-content/uploads/2018/10/H30_ATCAJ_Seminar_2.pdf（2019/2/22 閲覧）
- (2019. 2. 22 受付)

DEVELOPMENT OF RUNWAY OPERATION SIMULATION SYSTEM CONSIDERING DEPARTURE TRAFFIC PREDICTION AND ARRIVAL SPACING

Terumitsu HIRATA, Shion KUBO, Yoshitomo MAKITA and Yasutomo Futami

The purpose of this research is to develop a prediction model of take-off time of departure aircrafts and to integrate it to the arrival spacing support tool for enhancing the efficiency of runway utilization at a congested airport where departures and arrivals are operated inter-dependently. By using the integrated model for the case of Haneda airport with south-wind configuration, the effect of the dynamic departure runway assignment is analyzed and the importance of prediction accuracy of take-off time is discussed based on the simulation results.