

離陸機数予測と到着間隔制御による 航空機遅延の軽減方策に関する研究

平田 輝満¹・蒔田 良知²

¹正会員 茨城大学准教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511茨城県日立市中成沢町四丁目12-1)

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

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

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（スペーシング）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, Runway Capacity, Simulation*

1. はじめに

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なされている。例えば、PS数制約を考慮した最適化 (Trivizas, 1998¹⁾, Balakrishnan, et al. 2010²⁾, 相原ら, 2014³⁾, など) や、出発時刻等の不確実性を考慮した最適化 (Solving, et al., 2011⁴⁾, など) があるが、一方で、実運用では、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い。特に、同経路上のPSが困難であること (Balakrishnan, et al. 2006⁵⁾), 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., 2011⁴⁾) 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・スタックから着陸機を選択して最終進入に誘導する際に、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、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から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。羽田空港は大きく分けて北風運用と南風運用の2つで運用され、南風運用時の方が容量制約が厳しく、特にD滑走路着陸機とA・C滑走路離陸機の相互従属運用が課題である (図-1)。つまり、D滑走路着陸機の間を縫ってA・C離陸機を処理することになるが、D着陸の間隔設定とA・C離陸の需要に応じて、滑走路全体で見た時の処理効率上のロスが発生する。

本研究では、羽田空港の南風運用時を対象に、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し、特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手法について検討することを目的とした。

2. ターミナル空域の到着管理と滑走路処理の統合シミュレータの開発

筆者ら⁶⁾が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、ターミナル空域またはそれに接続するより広域な到着管理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タを開発した。

シミュレータの概要を図-2に示す。シミュレータでは、

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。具体的には、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（離陸滑走路端に到着しているか）の機数計算をしており、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）の予測は基本的に以下の情報をもとに行うことを仮定した（図-3）。

- ① スポットアウト前の出発機：出発予定時刻（SOBT）+平均走行時間
- ② スポットアウト後で地上走行中の出発機：出発時刻（AOBT）+平均走行時間
- ③ 滑走路脇で待機中の出発機：無条件で離陸機にカウント

実運用で離陸時刻を予測する際には、①の出発時刻と①、②の平均走行時間に不確実性を伴うが、出発スポット別の地上走行時間に関するデータサンプルが十分に確保できなかったこともあり、今回は便宜的に離陸時刻が確実に予測できるものと仮定して到着機の間隔制御を行った。離陸待機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が、離陸滑走路は複数存在するため、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かわかりづらく処理効率が変わる。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て設定しており、具体的な必要処理間隔は既存研究⁷⁾を参考に設定している。航空機の発生は、着陸機は毎正時間の1時間当たりの機数をダイヤから設定し、離陸機はダイヤの出発時刻を参考に発生させるようにしている。なお、今回の分析で使用したのは2017/01/30のダイヤである。1日分発生させた場合、図-4の機数が各時間に発生する。離陸機の走行時間は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求めた対数正規

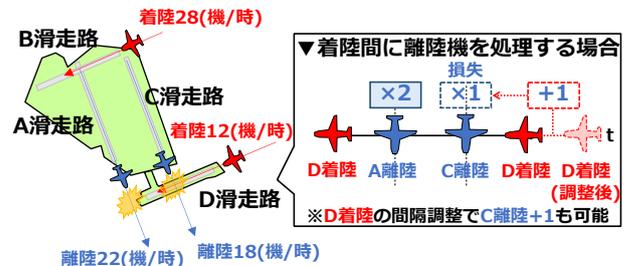


図-1 羽田空港の南風運用と損失容量のイメージ

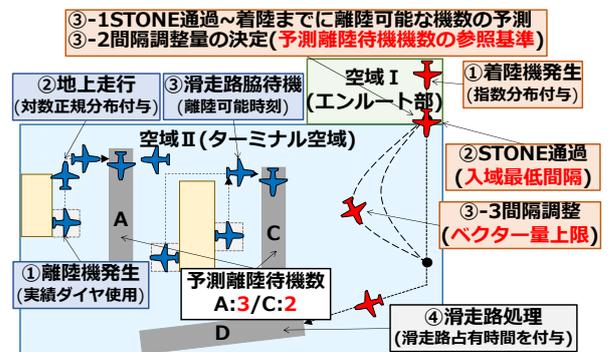


図-2 シミュレータの概要

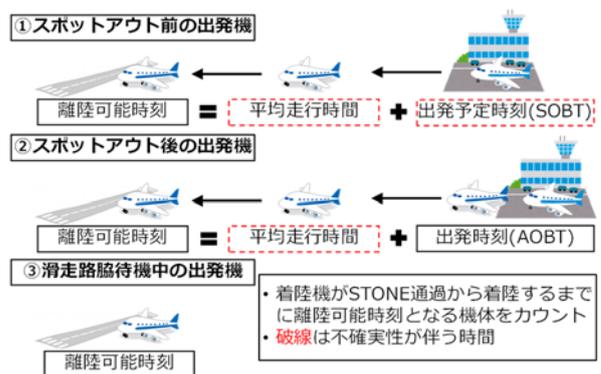


図-3 離陸待機機数の予測方法

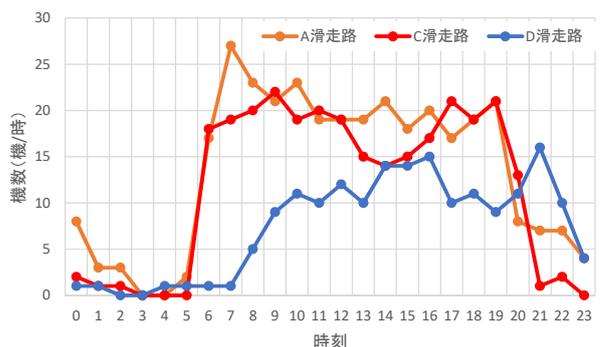


図-4 時間帯別発生機数（A・C滑走路：出発，D滑走路：到着）

分布で与えている。着陸機の発生時刻は上記の平均発生機数をもとに指数分布で与えているが、着陸機の空域Ⅱでのベクター後の飛行時間（DATUMから滑走路まで）は固定値で与えている。これらの情報を付与することで各機体が滑走路に到着する予定時刻が決定するので、予

定時刻をもとに滑走路で各機体が滑走路占有時間を満たすように処理をする。滑走路占有時間の具体的な数値は既存研究⁷⁾をもとに設定している。滑走路における処理としてはFCFS (first-come-first-served) や着陸機優先など、任意のシナリオを設定でき、設定可能な運用条件やパラメータの主要なものは以下の通りである。

- ① ターミナル空域（空域Ⅱ）への入域最低間隔（現状：160-180秒程度）
- ② ターミナル空域（空域Ⅱ）内の到着ベクター量上限（現状：90秒程度）
- ③ STONE通過時における関連離陸機数の予測と間隔調整（現状：ラフに考慮）

シミュレーションから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などで評価可能である。各シナリオでのシミュレーションを1000回試行し、その平均で評価している。

3. 方面別滑走路制約の緩和を前提とした動的離陸滑走路指定の効果分析

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（図-5）。図-5より、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=55:45）に必ずしも適合していない時間帯も多いことが分かる。離陸機の方面別滑走路は、空域における離陸経路の交錯を避け、運用の複雑性を低下させることが可能であるが、方面別に滑走路容量を分割使用することで方面別の需要比率によっては滑走路容量全体の使用効率が低下することも考えられる。そこで、離陸機の方面別滑走路の制約の緩和が可能になった状況を仮定し、リアルタイムの各滑走路の混雑状況をもとに柔軟に離陸機を異なる滑走路に配分する「動的離陸滑走路指定」を検討した。動的離陸滑走路指定の方法として、

- (a)航空局が設定している滑走路別（AとC滑走路）の容量比率に合わせる方法（以降「容量」）
- (b)A・C滑走路を均等の機数に調整する方法（以降「均等」）

の2種類を試行した。これらの方法が処理効率（遅延量）に与える影響のシミュレーション結果を図-6に示す。離陸時刻の予測精度が確実ならば、平均遅延量は、無調整（方面別滑走路=非動的離陸滑走路指定）に比べて「容量」や「均等」が減少している。例えば、ベクター150

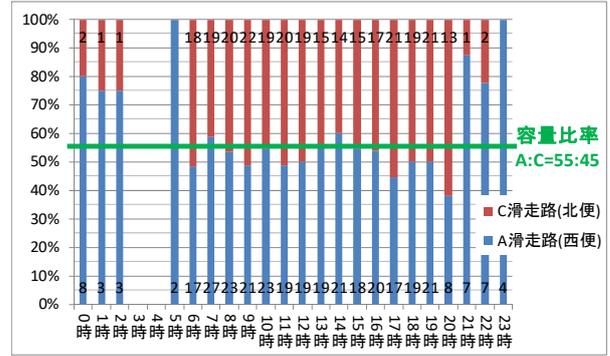


図-5 シミュレーションの離陸発生数（2017/1/31 ダイヤ）

| 空域Ⅱにおけるベクター上限(s) | 到着間隔制御で参照する予測離陸待機機数 | 無調整 | 動的離陸容量配分の設定比率 | |
|------------------|---------------------|------|---------------|------------|
| | | | 容量 (55:45) | 均等 (50:50) |
| 150 | 少ない滑走路 | 4.71 | 4.32 | 4.33 |
| | 両滑走路(平均) | 4.85 | 4.27 | 4.25 |
| | 多い滑走路 | 4.87 | 4.31 | 4.31 |
| 900 | 少ない滑走路 | 4.61 | 4.27 | 4.22 |
| | 両滑走路(平均) | 4.60 | 4.16 | 4.06 |
| | 多い滑走路 | 4.69 | 4.31 | 4.20 |

図-6 動的離陸滑走路指定の平均遅延量（分/機）の比較（条件：離陸時刻の確実予測，STONE入域最低間隔 180s）

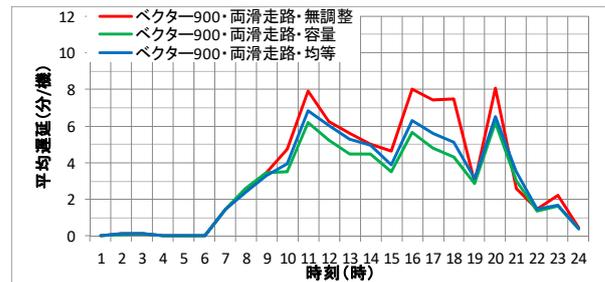


図-7 A滑走路の時間帯別平均遅延量の比較

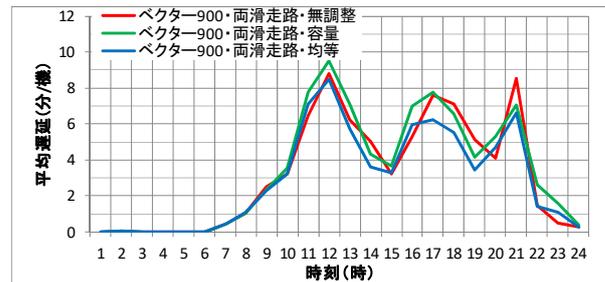


図-8 C滑走路の時間帯別平均遅延量の比較

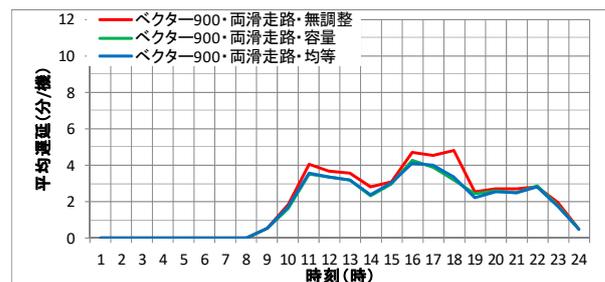


図-9 D滑走路の時間帯別平均遅延量の比較

(s) ・両滑走路・均等の条件で動的離陸滑走路指定を行うと、無調整に比べて平均遅延量456(分/日)が減少し、ベクター900(s) ・両滑走路・均等の条件で動的離陸滑走路指定を行うと、無調整に比べて平均遅延量409(分/日)が減少する。各滑走路で時間帯別の平均遅延量を見ると、図-7のA滑走路では無調整に比べて動的離陸滑走路指定の平均遅延が減少しており、図-8のC滑走路では動的離陸滑走路指定はA滑走路での平均遅延の減少分ほど増加していないことが分かる。他方、図-9のD滑走路では無調整に比べて動的離陸滑走路指定の平均遅延量が減少している。すなわち、離陸比率を「容量」や「均等」に調整することで、離陸処理の偏りの分散による到着間隔制御ロスの削減が要因として考えられる。さらに、「容量」と「均等」を比較すると、ベクター150(s)においては平均遅延量がほぼ同値であるが、ベクター900(s)においては、容量よりも均等の平均遅延量が低い結果となっている。つまり、間隔を比較的柔軟に設定できる条件下では出来る限り離陸遅延を均等にすることが良く、既存の容量設定が必ずしも最適ではない可能性が示唆される。なお、動的離陸滑走路指定を行うには、離陸比率を調整する際に一定の予測が必要となるため、実運用を想定した場合(離陸時刻が不確実予測の場合)は離陸時刻の予測誤差が遅延量に影響を及ぼすことが考えられる。そのため、今後は離陸時刻の不確実予測を検討する必要もあり、その際には、出発時刻や地上走行時間の予測精度を向上させることも重要である。

4. おわりに

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を加味した滑走路処理効率の評価シミュレータを開発し、動的離陸滑走路指定による遅延軽減方策を検討した。その結果、精緻な離陸時刻の予測が可能であれば、滑走路処理効率が向上することが分かった。今後、筆者らの先行研究⁸⁾における波及遅延モデルを援用した離陸時刻の

予測手法を開発し、そのモデルを本研究で開発したシミュレータに統合することで、離陸時刻予測と到着間隔制御による遅延軽減方策を、より実運用上の環境に近い状況で検討する予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Balakrishan, H., and Chandran, B., "Algorithms for Scheduling Runway Operations Under Constrained Position Shifting," *Operations Research*, Vol. 58, No. 6, pp. 1650-1665, 2010.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Balakrishnan, H., and Chandran, B., : Scheduling Aircraft Landings under Constrained Position Shifting, *Proceedings of AIAA Guidance, Control, and Navigation*, 2006.
- 6) 平田輝満, 二見康友, 蒔田良知: 到着間隔制御と離着陸従属滑走路の処理容量に関する研究, 第55回飛行機シンポジウム, 2017.
- 7) 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.
- 8) 古田土渉, 平田輝満, 二見康友, 又吉直樹: 航空ネットワーク上の波及遅延の解析と費用対効果分析・管制運用への活用に関する研究, 第55回土木計画学研究・講演集, 2017.

(2018.4.27 受付)

FLIGHT DELAY MITIGATION MEASURES BY DEPARTURE TRAFFIC VOLUME PREDICTION AND ARRIVAL SPACING

Terumitsu HIRATA, Yoshitomo MAKITA

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.