

## 羽田空港における滑走路使用効率の実態と向上策に関する研究

交通・地域計画研究室 二見 康友  
指導教員 平田 輝満 准教授

## 【目次】

|   |  |
|---|--|
| 第1章 序論  | 第5章 ターミナル空域における到着機の<br>間隔設定方法の影響を考慮可能な<br>滑走路容量評価シミュレーションの<br>開発と滑走路使用効率の<br>向上策に関する検討 |
| 1-1 研究の背景   | 5-1 シミュレーション作成の目的と概要   |
| 1-2 研究の目的   | 5-2 シミュレーションを用いた遅延量の分析   |
| 1-3 研究の構成   | 5-3 シミュレーションの結果を踏まえた<br>効率的な運用方法の検討  |
| 1-4 用語の定義   |  |
| 第2章 既存研究の整理と本研究の位置づけ                                |  |
| 2-1 既存研究の整理   |  |
| 2-2 研究の位置づけ   |  |
| 第3章 分析対象空港の運用方法と運用実績の概要                             | 第6章 結論   |
| 3-1 首都圏空港の現状  | 6-1 結論   |
| 3-1-1 羽田空港  | 6-2 今後の課題  |
| 3-1-2 成田空港  |  |
| 3-2 使用データの概要  |  |
| 3-3 羽田空港に関する基礎的な集計                                  |  |
| 3-4 まとめ   |  |
| 第4章 飛行軌跡データを活用した羽田空港における<br>着陸機の間隔設定と離陸機の処理効率に関する分析 |  |
| 4-1 D滑走路着陸機を対象とした分析                                 |  |
| 4-1-1 分析の目的と選定理由                                    |  |
| 4-1-2 指標の設定及び分析方法の整理                                |  |
| 4-1-3 D滑走路着陸機の飛行経路                                  |  |
| 4-2 飛行フェーズによる着陸間隔の変化                                |  |
| 4-3 着陸間隔の調整方法の分析                                    |  |
| 4-3-1 STONE-DATUM間の飛行距離の算出                          |  |
| 4-3-2 STONE-DATUM間の着陸機間隔の調整                         |  |
| 4-3-3 DATUM-滑走路間の着陸機間隔の調整                           |  |
| 4-4 滑走路処理容量を考慮した現在の<br>D滑走路着陸機運用の評価                 |  |
| 4-4-1 着陸機が連続する場合                                    |  |
| 4-4-2 着陸機間に離陸機を挟む場合                                 |  |

## 1. 研究の背景

首都圏空港（羽田空港、成田空港）は日本の経済・社会活動を航空の面から支えるのに重要な社会基盤である。現状では首都圏空港の発着枠は約75万回/年を実現しているが、今後とも首都圏空港の航空需要は増加傾向にあり、特に国際線需要は大幅に増加することが見込まれている。また、機材の小型化・多頻度化も進んでおり、航空需要予測によると概ね2020年代前半には首都圏空港の航空需要は、現在の処理能力約75万回/年のほぼ限界に達するとされている<sup>1)</sup>。現況として成田空港では国際線が多いため朝・夕方に空港容量を超える発着枠の要望があるものの、それ以外では余裕のある時間帯も存在する。しかし、羽田空港については離着陸ともに混雑時間帯は発着枠一杯まで各エアラインに配分している。このように、現時点においても混雑する時間帯においては、処理能力の限度までダイヤが設定されていることから羽田空港、特にボトルネックとされている南風運用時の容量の拡大検討は重要な課題である。

羽田空港は複数の滑走路からの離着陸が複雑に相互従属関係で運用されており、離陸機と着陸機をどのような順序付けで処理するかによって滑走路処理容量が変化する。従来の研究<sup>2)</sup>で離着陸順序付けの最適化による容量拡大策が検討されているが、海外の混雑空港における研究事例も含めて、空域における到着機の処理方法（間隔設定など）の特性や制約を加味した滑走路処理容量に関する検討はほとんど行われていない。特に到着機の順序最適化については、そのための管制処理ワークロードに比して得られる効果が必ずしも大きくないことから、実運用はほとんどなされていない<sup>3)</sup>。一方で、離陸機と着陸機の順序付けは到着機の間隔設定の最適制御が問題となり、間隔設定自体は実運用上、さほど困難さはないものの、どのような間隔制御を行えば処理効率が最大化できるかは必ずしも明らかになっていない。

## 2. 既存研究の整理と本研究の目的

羽田空港の容量に関する研究として平田ら<sup>4)</sup>のものがあある。これらの研究では羽田空港の南風運用時を対象にA、C、D滑走路の従属関係を考慮し、連続する航空機の組み合わせに応じた滑走路占有時間を整理し、1機あたりの占有時間を求めることで容量計算を行っている。また、この容量算定モデルを用いて方面別滑走路の制約が到着機の遅延に与える影響について分析を行い方面別滑走路の

解消により大きな遅延軽減効果があることを明らかにしている。離着陸機数を最適に配分することで遅延時間の短縮を図っている。本研究では交通量を調整するのではなく、交通量を変えずに運用方法を変えることによって滑走路の使用効率を上げ遅延量を削減することを目的としている点異なる。

滑走路運用（飛行経路等）の実態に関する研究はCARATSの一環として軌跡データが公開されてから多く行われるようになった。例えば北詰ら<sup>5)</sup>や山内ら<sup>6)</sup>の研究がある。これらの研究では交通量の多い西方面から羽田空港に向かう便を対象とし、到着機についてのみ運航コストや遅延時間について分析している。その他にも西方面からの着陸機に着目した研究はあるが、空港のアプローチエリアにおける離陸機との従属関係を考慮した研究は見られない。

以上より、本研究では滑走路処理容量の観点から羽田空港D着陸機の運用方法を解析し、滑走路使用効率（時間）のロスを明らかにし、それを改善する着陸機の運用方法について検討することを目的とする。そのために以下の3点を行う。

- ① 飛行軌跡データの解析により、羽田空港のD滑走路着陸機の運用実態についてA・C滑走路離陸機の状況も踏まえて分析し、滑走路の処理容量に関わる運用上の特徴・処理効率の実態・課題点を明らかにする。
- ② ①で得られた知見をもとに離陸機の状況に応じた着陸機の間隔調整を行うことによる容量の変化を表現できるシミュレーションを開発する。
- ③ 開発したシミュレーションを活用して、ターミナル空域における到着機の間隔設定方法による滑走路処理容量変化を分析し、滑走路使用効率を向上させるための運用方法を検討する。

## 3. 軌跡データを用いた羽田便の抽出

### (1) 使用データ

分析に使用するデータは国土交通省より公開されたCARATS Open Dataと呼ばれる軌跡データである。このデータは日本上空を飛行した便について日付、時刻、仮想便名、緯度、経度、高度、型式が記載されており、航空路監視レーダーにより得られた情報である。現在では2012~2014年度のもものが公開されており、各年度で奇数月の1週間分、計42日分のデータが公開されている。本研究では最新のデータである2014年度のものを使用する。

## (2) 必要データの抽出

羽田空港の南風時の運用は図-1に示すようにA・C滑走路で離陸機、B・D滑走路で着陸機の処理を行う。本研究ではこの運用について分析するために、まず軌跡データから羽田空港便の抽出を行った。羽田空港便の抽出は筆者らの先行研究<sup>10)</sup>の方法を用いることで各便の離着陸時刻及び使用滑走路の判別を行った。

次に離着陸機の従属関係について分析するために、南風運用時のD滑走路に着陸機に着目した。A・C滑走路離陸機はD滑走路に着陸機の合間を縫って離陸するためD滑走路に着陸機の運用方法は離着陸機の従属関係について分析するためには重要である。

A・C滑走路離陸機を潤滑に処理するためには、D滑走路に着陸機の間隔をある程度広く確保する必要がある。また、羽田空港では基本的には方面別に滑走路を振り分けており、D滑走路は主に北方面から来る着陸機が使用する。そこで、D滑走路に着陸機の軌跡(図-2)を確認したところSTONEと呼ばれるFIXで一度合流し、その後DATUM方面に直線的に飛行する機体や一度西方面(DREAD)に飛行してから向かう機体など様々な経路を通る機体を確認されたことからこのSTONEを通過してからDATUMに着くまでに着陸機間の間隔調整が何らかの意図を持ってされていると考えた。この区間について分析するために各便のSTONE、DATUMの通過時刻及びSTONEからDATUMまでの飛行距離を算出した。飛行時間のヒストグラムをNMごとに示したものが図-3である。30NMはSTONE-DATUM、35NMはSTONE-DREAD-DATUMの直線距離が含まれる距離帯である。したがって、主に選択されている経路はFIXを直線的に結ぶものが多いが、ベクタリング(管制官からの指示で迂回)している便も一定程度存在する。そこで、この区間で離陸機の滞留状況に応じた間隔調整を行っているのではないかと考えた。

## 4. 飛行中の着陸機の間隔設定の実態

STONE通過後に着陸機同士の間隔調整が行われていると考え、STONE、DATUM、滑走路での先行機との間隔を集計した。この3点を選んだのは、間隔調整前、調整直後、滑走路では間隔が決定される制約が異なると考えたためである。STONE、DATUM、滑走路での先行機との間隔の分布をそれぞれ、図-4、図-5、図-6に示す。凡例に離陸機数を示しているが、この値は先行の着陸機との間に処理された離機数であり、A・C滑走路のうち多かつ

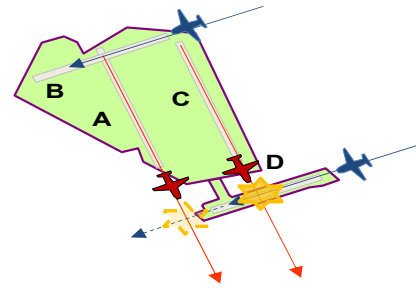


図-1 羽田空港の南風運用

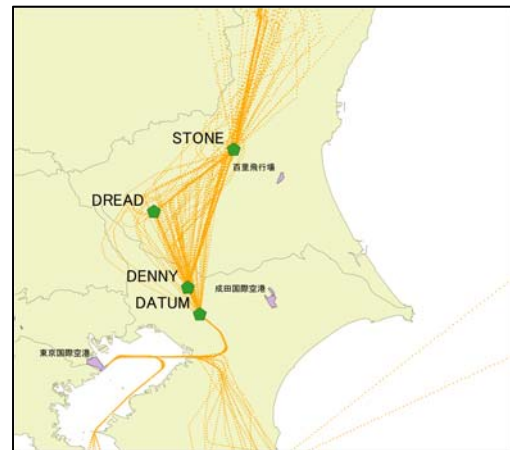


図-2 羽田周辺における北方面からの着陸機の飛行軌跡

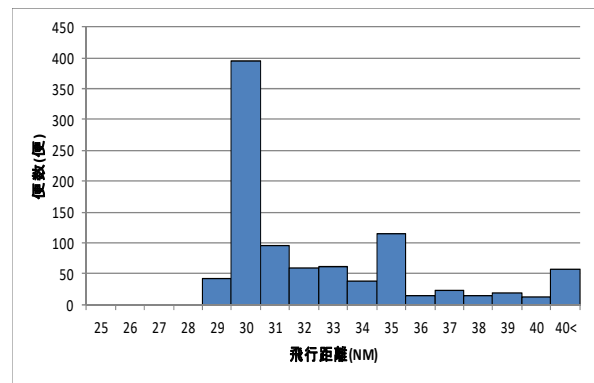


図-3 STONE-DATUM 間の飛行距離の分布

た方の離陸機数を示している。AもしくはC滑走路のどちらか一方でも離陸機が使っていた場合にはD滑走路には着陸できないためこのような集計方法となっている。

まずSTONEにおける着陸機の間隔(図-4)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を考慮したコントロールはされていないと言える。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滑走路に着陸機の交通量(目安は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(図-5)についてである。先ほどと比べ着陸機間に処理する離陸機数によって間隔の分布に差が出てきていることが見てわかる。離陸機数が0, 1, 2と増えるほど着陸機同士の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STONEでの間隔と同様の値となっていることが分かる。

最後に滑走路における着陸機の間隔(図-6)についてである。DATUMの時点ですでに生じていた離陸機数ごとの差がさらに開き、離陸機が1, 2機の場合には間隔のばらつきが減っている印象を受ける。

以上の3点における間隔の比較からSTONE通過時には着陸機の間隔に離陸機数は関係ないが、DATUMを通過するころには、着陸機間に処理をする離陸機数によって差が生じている。つまりSTONE-DATUM間では着陸機間に処理を行う予定の離陸機数によってベクタリングによって着陸間隔を広げる調整が行われている。

また、離陸機が0機の場合には滑走路に近づくにつれ多少間隔が縮まっている傾向が見て取れる。これは意図的に縮めている訳ではなく、先行機(離陸機が1 or 2)に対してベクタリングが行われた影響であると考えられる。

## 5. 現在のD滑走路着陸機運用の評価

次に現状で設定されている着陸機間隔について滑走路処理容量の観点から評価する。

### (1) 着陸機が連続する場合

D滑走路で着陸機が連続する場合は図-6において離陸機が0機の場合である。この着陸間隔と着陸専用滑走路であるB滑走路の着陸間隔を360秒以下の範囲で発生頻度を示したものが図-7となっている。これをみると明らかにD滑走路着陸機の間隔が広がっていることが分かる。これはD滑走路を使用する機材が少ないことも原因の一つとして考えられるが、それよりもSTONEでの通過間隔の影響が大きいと考えられる。前者は例えばD滑走路着陸機が居なくても、南風の場合に離陸機はA・Cのどちらかを必ず使用することから、着陸機が少ないような交通状況であれば間の離陸機が0機になることは起きにくい。したがって、滑走路において着陸機の間隔が広がってしまっているのはSTONE通過時に設定されている間隔が原因であると考えられる。

簡易的に図-7の着陸間隔の平均値で容量を算出するとD滑走路は18.5機/時、B滑走路は27.8機/時となり、もし常

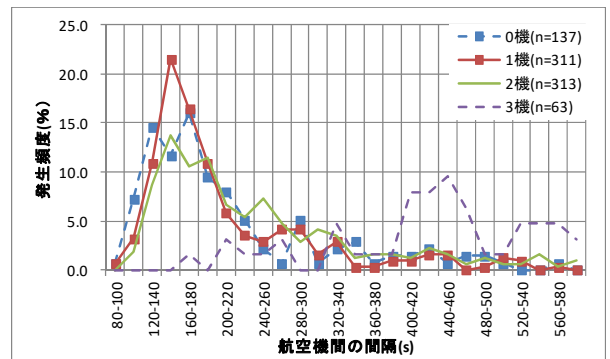


図-4 STONE における到着機の間隔の分布

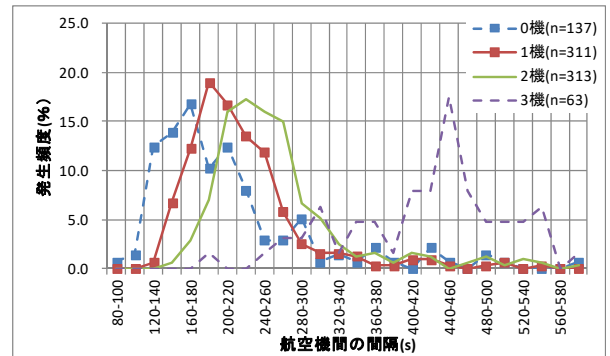


図-5 DATUM における到着機の間隔の分布

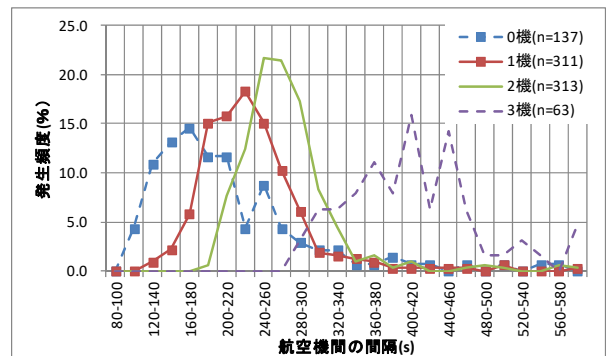


図-6 D 滑走路における到着機の間隔の分布

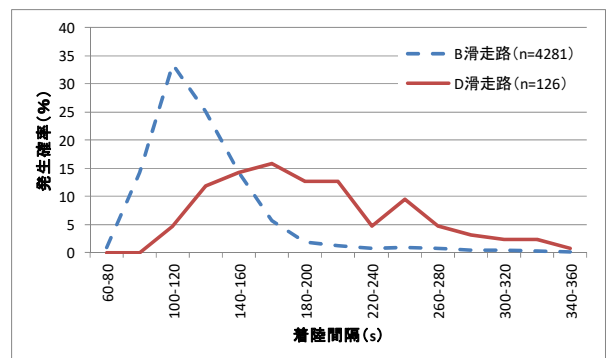


図-7 着陸専用滑走路 (B 滑走路) の着陸間隔との比較

に着陸機が続く状況が続いた場合にはB滑走路の約0.67倍しか処理することができない。また、現状の0機の発生確率をサンプル数から算出すると約17%であるので決して無視できるような組み合わせではない。

## (2) 離陸機を挟む場合

次にD滑走路着陸機の間離陸機を挟む場合である。この場合の集計では、A滑走路とC滑走路の離陸機数に差があった場合に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する。また、Medium機とHeavy機は別にカウントしているためH機の損失分はM機を代わりにできるが、逆はできない仮定となっている。時間帯別に集計したもののA滑走路、C滑走路それぞれ図-8、図-9に示す。D着陸機同士の間隔が1回発生した時の期待値を示したものとなっている。したがって、たとえば14時台に着陸機が11機いた場合にはA滑走路の損失はM機 $0.1 \times 10 = 1$ 機/時、H機は $0.3 \times 10 = 3$ 機/時という風に計算を行う。元から発着枠がA滑走路機数 > C滑走路機数となっているためC滑走路における損失の方が大きくなるのは仕方ないことではあるが、全体的に両滑走路の離陸機数は合っておらず損失が多く発生していることが分かる。

## 6. シミュレーションの開発及び分析結果

### (1) シミュレーションの概要

着陸機の間隔調整が処理容量に与える影響を分析することを目的にシミュレーションを開発することとした。目的から羽田空港のように離陸滑走路2本、着陸滑走路1本のような複雑な従属関係にある滑走路の必要はなく、離着陸が1:1の滑走路を想定した場合には汎用性があると考え、比較的簡易的な離陸機1本、着陸機1本の滑走路のみのシミュレーションを開発することとした。

シミュレーションのフローを図-10に示す。発生の際にはダイヤから着陸機は1時間当たりの機数、離陸機は出発時刻を参考として発生させるようにしている、また、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-11の機数が各時間に発生する。次に離陸機の走行時間と着陸機の発生時刻を確率分布で与えるが着陸機の飛行時間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<sup>9)</sup>を参考に設定している滑走路における処理としてFCFS (first-come-first-served) と着陸機優先の2つを作成した。また、着陸機がSTONEを通過した際に自身が着陸する時刻までに離陸が可能になっている機数の計算を取り入れており、その機数をもとに着陸機の間隔を調整できるように設定している。

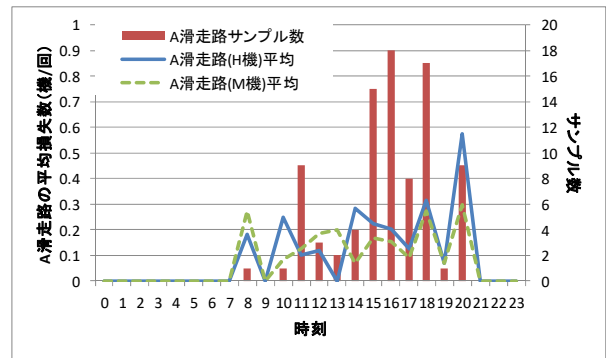


図-8 A滑走路における平均損失機数

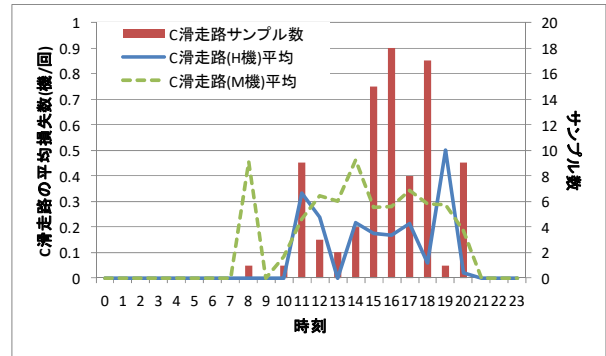


図-9 C滑走路における平均損失機数

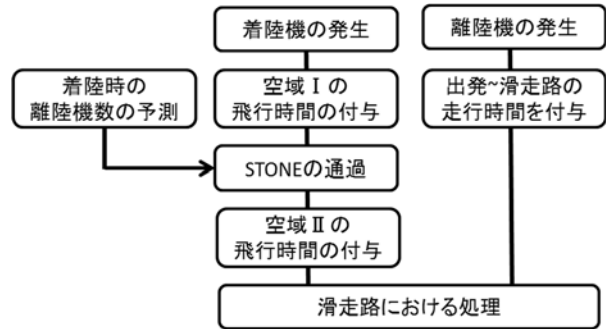


図-10 シミュレーションのフロー

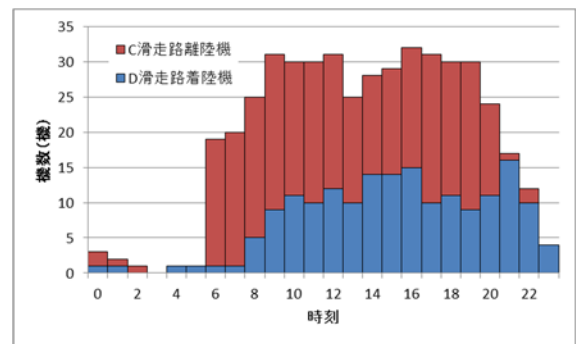


図-11 時間帯別発生機数

### (2) シミュレーションの分析結果

各パターン1000回試行した平均値を結果として出力している。まずFCFSを仮定したケースの滑走路待ちのための離陸機の遅延を図-12に着陸機の遅延を図-13に示す。



FCFSの仮定の場合処理効率は最大になる，したがって理想的な運用を行った場合には，最大でもこの値までしか削減することができないため，遅延量の基準として使用する．FCFSは着陸機の遅延が高くなりすぎるため現実的な運用ではない．

次に着陸機優先のアルゴリズムでSTONEを想定した点で着陸機間に最低120秒の間隔を確保するように設定した場合の離陸機の遅延，着陸機の遅延を図-14，図-15に示す．紙面の都合上省略するが現状を想定した運用の場合の結果も図-14と同様の結果だった．H機とM機を挟む際の必要な間隔にギャップがありすぎるため想定した結果が現れなかったと考えられる．

## 7. 結論

- D滑走路着陸機は離陸機を間に処理する場合には，着陸機間隔を調整していることを明らかにした．また，現状の運用でD滑走路着陸機の間隔やA・C滑走路間のアンバランスさによってロスが生じていることを定量的に明らかにした．
- 離陸時刻の予測精度と着陸機の間隔調整の関係が処理容量(遅延)に与える影響を明らかにするために，離陸滑走路1本，着陸滑走路1本を対象としたシミュレーションを開発した．
- 滑走路の使用効率を良くするためにはWTCまで予測し，それに合った着陸機間隔のコントロールをする必要があることが示唆された．
- 

## 8. 今後の課題

実際の運用ではH機とM機で実際にどの程度必要な間隔に差があるのか，運用上両者の区別はしていないのかなど実態の調査が必要であると考えている．

羽田空港の滑走路は井桁上の特殊な形状となっており，羽田空港でのみ効率が良くなる運用方法なども存在する可能性があるため，C滑走路のみでなくA滑走路についても実装する必要があると考えている．

### 【参考文献】

- 1) 首都圏空港機能強化技術検討小委員会: 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>.
- 2) 相原磨世， 総直史， 又吉直樹: 数理計画手法を用いた空港離着陸容量検討ソールの開発， 第52回飛行機シンポジウム， 2014
- 3) Dear, R. G. and Sherif, Y. S.: An Algorithm for computer assisted sequencing and scheduling of terminal area operations, *Transportation Research Part A: General*, Vol. 25, Issues 2-3, pp. 129-139, 1991.

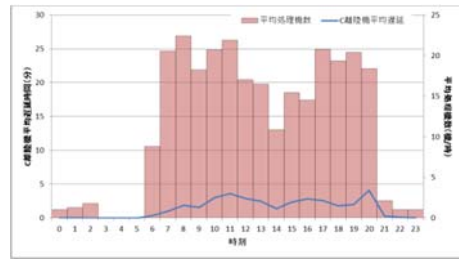


図-12 離陸機の滑走路待ちによる平均遅延量



図-13 着陸機の滑走路待ちによる平均遅延量

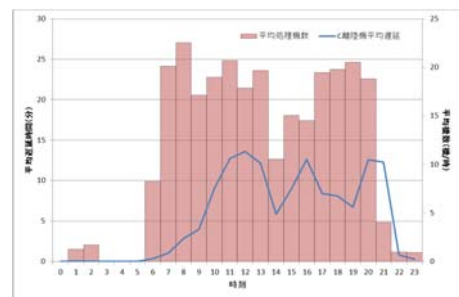


図-14 離陸機の滑走路待ちによる平均遅延量

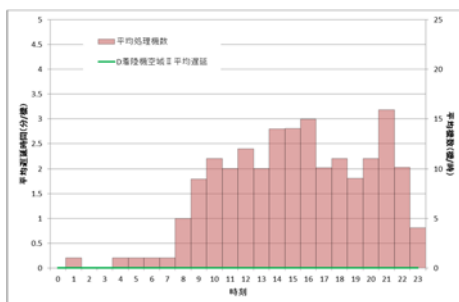


図-15 着陸機の滑走路待ちによる平均遅延量

- 4) Lee, H. and Balakrishnan, H.: A study of tradeoffs in scheduling terminal-area operations, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 96, No. 12, pp. 2081-2095, 2008.
- 5) Balakrishnan, H. and Chandran, B.: Scheduling aircraft Landings under constrained position shifting, *Proceedings of AIAA Guidance, Control, and Navigation*, 2006.
- 6) 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.
- 7) 平田輝尚: 羽田空港の滑走路運用特性に起因した航空機遅延の軽減方策に関する研究， 土木学会論文集D3 (土木計画学)， Vol.69, No.5 (土木計画学研究・論文集第30巻)， 869-I 880, 2013.
- 8) 北詰有人， 田村恵一， 宮沢与和: CARATSオープンデータを用いた羽田空港到着便のベクタリング制御に関する一考察， 第54回飛行機シンポジウム， CD-ROM, 2016.
- 9) 山内貴弘， 武市昇: 混雑空港へ向かう巡航航空交通流の時間管理の効果， 第54回飛行機シンポジウム， CD-ROM, 2016.
- 10) 平田輝尚， 二見康友， 蒔田良知: 混雑空港における離着陸順序付けの実態と滑走路処理容量に関する研究， 土木学会論文集D3 (土木計画学) Vol.72 No.5, pI\_1037-I\_1045, 2016.