

航空管制・騒音を考慮した空港容量算定方式に関する研究

平松健志 理工学研究科土木工学専攻 修士課程

我が国の空港容量の拡大は滑走路を新設する等のハード面の対策が主に取られてきたが、今後は航空管制の柔軟な運用による容量増加等、ソフト面の対策も十分に検討することが必要である。航空機材によって、輸送能力、速度、安全間隔、騒音被害などの特徴がそれぞれ異なることから、これらの特徴を考慮した航空管制は空港容量の増加に効果的であると考えられる。本研究では、国内航空需要が集中する羽田空港を対象に、航空機材ごとの特徴を再現できるシミュレーションの開発を行い、管制運用上の工夫による空港容量の増加可能性及び容量増加に伴う利用者利便や航空機騒音を定量的に評価した。

キーワード：航空管制，空港容量，利用者利便，航空機騒音，シミュレーション

1 はじめに

日本国内における航空需要は羽田空港に一極集中している中、羽田空港は需要を満たすだけの容量を有しておらず、機材の大型化で需要に対応してきた歴史がある。その結果、わが国、特に羽田空港においては欧米の空港と比較して、機材の大型化が進んでおり、欧米においてはRJ等の活用により低需要路線においても頻度の高い運航が行われている一方で、わが国では低需要路線において、中型機による低頻度運航が行われている路線が数多く存在する^{1),2)}。

また、わが国の空港容量³⁾は、主に、滑走路新設などによる基盤整備（ハード面）によって拡大されてきたが、今後は、既存の空港施設を最大限活用するために、航空交通流をマネジメントすること（ソフト面）による空港容量の拡大についても、これまで以上に幅広く検討する必要がある。特に、航空機材はその規模によって特徴が大きく異なり、これらの特徴を考慮した航空管制による空港容量の増加可能性については、今後の管制技術の進展や管制官のワークロードも考慮しながら、十分に議論の余地があると考えられる。

なお、空港の発着枠（スロット）を考える際に、次の3つの異なる数値を整理する必要がある。第1の数値は空港の1日の総発着枠であり、エアラインが競って獲得する発着枠である。

第2の数値は、1時間の発着容量である。これは1日の総発着枠を確定する根拠になると同時に、安全に処理可能な最大限の発着回数を計算上与える数値であり、この数値に基づく空港運用がなされるため、空港容量といえばこの数値を指す。

そして、第3の数値は、管制官が離発着する機材を順次処理することによって、結果として実現する発着数である。それを1日で見るか、1時間で見ると等、集計の仕方によって数値は異なるが、管制方式に従った間隔を保持しつつ、1便ごとに管制業務を行った結果として実現される発

着数である。

たとえば、第2の容量を計算上大きくしても、第3の処理数の上限が変えられない限り、実際の容量は増えることが無い。それでも増やせば、発着便の上空や滑走路脇での待機が増し、遅れが増大することになる。空港容量を増すためには、第2の数値と共に、管制方法の変更や今後の発展を念頭におきつつ、第3の数値を上げることで容量増加が実現可能か検討することが必要になる。そのため、管制の一層の効率化や高密度化を実現するための技術・システム整備などが重要であり、管制業務の労働問題などに帰着することのない幅広い改善策の検討が重要とされている。

第2の空港容量は、天候、風向などに寄らず、どのような状況でも最低限確保できる発着数として定義されるが、空港によって自然環境、空港施設、機材構成など、様々な条件が異なることと、遅れをどの程度許容するかについて国や地域の意識も異なるため、一律の考え方は存在しない。そこで、本研究では、わが国最大の混雑空港である羽田空港を対象にして、空港容量を増加させることの社会的な意義の高さを背景に、第2の数値である空港容量を、第3の数値に直結する管制運用上の工夫によってどのように増加可能であるかに着目し、それを機材ごとの特徴を再現できるシミュレーションを開発・活用することによって分析することを目的にした。また、容量増加の効果と影響を示すために、従来の管制研究では明示的に検討されることのない利用者利便や航空機騒音などを同時に分析対象とした。

なお、本研究で開発するシミュレーションの分析対象エリアは羽田空港周辺であり、着陸機に関しては最終進入開始点から停止線通過まで、離陸機は滑走路横の誘導路待機から離陸滑走し、滑走路端を通過するまでを分析対象とする。そのため、En Route, STAR (Standard Terminal Arrival Route), SID (Standard Instrumental Departure) におけるコンフリクトは本シミュレーションでは考慮してい

ないが、シミュレーションを活用した政策分析を行う際の前提条件としては、それらのエリアについても考察の対象としている（東京内陸離陸ルートの使用，最終進入前における機材の並び順の柔軟化）．また，北風時のみを対象として分析をおこなっており，南風における分析には着手していない．これらの点は今後の課題である．

1.2 既往研究と本研究の位置付け

空港容量に関する研究は，古くは Hockaday and Kanafani³⁾ による理論上及び実務上の空港容量の定義や Newell⁴⁾ による空港容量と遅延の総合的考察などで空港容量に関する基礎的な考え方を示している．Gilbo⁵⁾ は単一滑走路における離陸機数と着陸機数のトレード・オフ関係を考慮した空港容量の算出を行っており，Pitfield and Jerrard⁶⁾ は機材ごとの特徴を考慮し，航空交通流シミュレーションを開発し，複数交差滑走路の空港容量の分析を行っているが，機材毎の速度や滑走路占有時間等に対する確率要因を考慮していない．Ignaccolo⁷⁾ は待ち行列理論を発展させたシミュレーション分析により単一滑走路を対象として機材構成の違いや管制に関わる新技術の導入による着陸容量・遅延の変化を分析している．わが国における空港容量・航空管制に関する研究としては，竹内ら^{8),9),10)}の研究において，滑走路処理能力の算出を分析しているが，運航機材を1機種としており，運航機材の特徴を考慮した分析は行われていない．また，喜多ら^{11),12),13),14)}，相原ら¹⁵⁾の研究では，空域処理能力を分析対象としており，空港容量の分析は行われていない．

我が国では，空港レイアウトや地理的制約により空港の処理容量が航空機の滑走路占有時間でほぼ決まっており，空港容量の算定にあたっては，既往研究で考慮されていない滑走路の詳細デザインや滑走路での航空機の挙動をミクロに分析する必要がある．また実際の空港容量，騒音被害などは各国，各地域の地理的要因，土地利用に大きく影響を受けるため，独自に研究を進める必要性も高い．また，空港空域の計画設計を行うための大規模なシミュレーションモデル（パッケージソフト）も世界中で開発され（TAAM, VTASIM, Total AirportSIM など），実務上でも使用されている．これらのソフトは，機材構成，滑走路の運用方法，タクシーパターン，天候など，非常に詳細な項目まで設定可能であり，ボーディングゲートや旅客ターミナル内の各施設の流動分析まで取り扱っている．これらソフトを活用することも不可能ではないが，本研究では，我が国特有の安全率の考え方や非常にミクロな滑走路上の航空機の挙動などを反映した容量計算を対象としており，それら既存のソフトでは部分的にブラックボックスになっている恐れがある設定要

因も柔軟に扱うために，必要最小限の機能を有する低コストシミュレーションモデルの開発を独自に行うこととした．以上より，本研究においては，

- ①機材ごとの特徴，滑走路通過時，最終進入時における確率要因，複数滑走路を有する空港周辺における航空機の挙動をミクロに表現できるシミュレーションを開発し，
- ②空港容量の増加可能性及びそれに伴う効果と影響（利用者便益，騒音被害）を総合的に評価しようとする点が新しい視点であると考えられる．

2 空港容量算定方式に関して

2.1 空港容量算定方式の基本概念

空港容量は基本的に，前後航空機の，①飛行中（空港への最終進入中・離陸直後）における安全間隔，②滑走路における安全間隔，のうち厳しい条件によって決定される．文献(16)によれば，航空路，進入管制区においては3次元で安全間隔をとることが出来る一方，到着機が計器飛行方式で空港に最終進入を行う際には，滑走路に向かって航空機が1列に並ぶことから，その安全間隔は一次元で考慮しなければならない．また，離着陸を行う航空機が滑走路を同時に2機占有することがないように運用することが前提となり，その場合の滑走路の処理能力は航空路や進入管制区よりも低いことが一般である．空港容量の算定方式に関しては，文献(17)が基本的なコンセプトをまとめており，空港容量を決める支配要因としては，①飛行中の前後機材の最低安全間隔，②滑走路占有時間，③それらに影響を与える機材構成，④安全率の4つである．

2.2 考慮すべき安全間隔

2.2.1 飛行中の安全間隔¹⁸⁾

最終進入中の着陸機，及び，離陸上昇中の離陸機が考慮すべき安全間隔は大きく二つあり，①レーダー管制間隔，②後方乱気流間隔，である．離陸直後，最終進入中のレーダー管制間隔は，同航跡の航空機間の安全間隔として，3nm 以上の安全間隔をとる必要がある．

後方乱気流間隔については，先行機の機材規模が大きい程，後方の機材は先行機から発生する後方乱気流の影響を受け，その安全間隔は大きくなる．そのため，機材の組み合わせによってはレーダー管制間隔と合わせて，後方乱気流を考慮する必要がある．表-1 に後方乱気流の最低安全間隔を示す．

表-1：後方乱気流間隔¹⁸⁾

		後続機		
		heavy	medium	light
先行機	heavy	4nm	5nm	6nm
	medium	3nm	3nm	5nm
	light	3nm	3nm	3nm

2.2.2 滑走路上の安全間隔¹⁷⁾

滑走路における航空機の運航は一機のみである。表-2に単一滑走路において考慮すべき安全間隔を示す。

表-2：滑走路における安全間隔¹⁸⁾

先行機	後続機	安全間隔
離陸	離陸	先行機が滑走路の末端を通過するか(管制官が滑走路の距離を地上の目標等により確認できる場合は、先行機と後続機の間1800m(6000feet)の間隔が確保できた際に)、又は滑走路上空で変針して衝突の危険性がなくなったとき後続機は離陸滑走を開始できる
	着陸	先行機が滑走路の末端を通過するか(管制官が滑走路の距離を地上の目標等により確認できる場合は、先行機が離陸滑走開始後1800m(6000feet)の間隔が確保でき、且つ、滑走路の中央部を通過したことを確認した後)、又は滑走路上空で変針して衝突の危険性がなくなったことを確認した後に後続着陸機は滑走路進入端を通過できる
着陸	着陸	先行着陸機が滑走路から離れたことを目視、又は当該機からの通報により確認するまで後続着陸機は滑走路進入端を通過しないこと
	離陸	先行着陸機が滑走路から離れたことを目視、又は当該機からの通報により確認したとき後続機は離陸滑走を開始できる

2.3 羽田空港における空港容量算定方式

2.3.1 概要

本節では、国土交通省が公表している現状の羽田空港の空港容量算定方式を、文献(16)をまとめる形で示す。羽田空港は2002年現在、離陸専用の滑走路と着陸専用の滑走路が使い分けられているので、着陸が続く滑走路容量、離陸が続く滑走路容量の順に示す。

2.3.2 着陸が続く滑走路容量

現在の着陸が連続する場合の滑走路容量は、以下のように滑走路を3分割して定義されている滑走路占有時間を元に算出されている。ただし、滑走路占有時間が120秒未満の場合で、後方乱気流関連管制方式の規程に該当するもの(先行機がヘビー機の場合)については、その値を120秒とする¹⁶⁾。図-1において、

- ① t1：滑走路進入端から1NMの距離の通過時間を30秒の定数として設定(着陸復行の指示とそのレスポンスに必要な時間)；
- ② t2：滑走路進入端から滑走路縁を横切るまでの時間(t2)であり、実測時間の平均値60秒と、安全率として標準偏差(平均の1/8)の7.5秒に、着陸復行の確率が0.5%以下となる様に2.6倍をかけた数値19.5秒を加えた79.5秒を設定；
- ③ t3：滑走路縁から停止線を横切るまでの時間を、実測時間及び安全率としての標準偏差を考慮して15秒の定数として設定している。

以上の3つの時間を合計して現在着陸機1機当たりの滑走路占有時間は124.5秒となる。

以上より、現在の羽田空港においては、滑走路占有時間が120秒以上となるため、この滑走路占有時間により

滑走路の処理容量が算出されることとなり、1時間当たりの到着機の処理能力は、

$$3600 \text{ 秒} / 124.5 \text{ 秒} \approx 28 \text{ 機/時}$$

となる。なお、2003年7月以降はt2を新たな実測値77秒とし処理容量を29機時、2005年10月以降はt3を新たな実測値27秒としたため処理容量は30機時となっている。

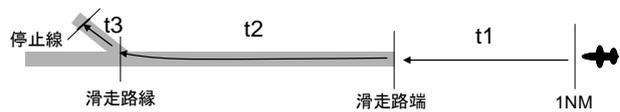


図-1：着陸機を処理するための時間の区分

2.3.3 離陸が続く滑走路容量

先行離陸機と後続離陸機の間隔は120秒とする。ただし、先行機が後方乱気流関連方式の規定に該当しない場合は、以下の時間の合計の値を適用する(図-2参照)¹⁶⁾。

- ① t1：離陸機に対する離陸許可の発出やレスポンス等に必要な時間：15秒
- ② t2：離陸滑走を開始して離陸、または、1800m地点を通過のいずれか遅いほうの時間：35秒(実測値；平均34.6秒、標準偏差5.1)
- ③ t3：先行機と後続機の間レーダー間隔(3nm)を設定するための、先行機のレーダー識別、及び、後続機への出発待機解除に必要な時間：45秒

以上の3つの時間を合計し、離陸機1機当たり処理時間は、95秒(45+15+35秒)となる。

以上から、羽田空港においては、先行機がHeavy区分の時は120秒、先行機がMedium区分の時は95秒が離陸機1機を処理する時間となる。現在、羽田空港におけるHeavy機材とMedium機材のシェアは、約0.7：0.3であるので、離陸機1機当たり処理時間の平均は、112.5秒(120秒×0.7+95秒×0.3)となり、1時間当たりの離陸機処理能力は、

$$3600 \text{ 秒} / 112.5 \text{ 秒} = 32 \text{ 回/h}$$

となる。

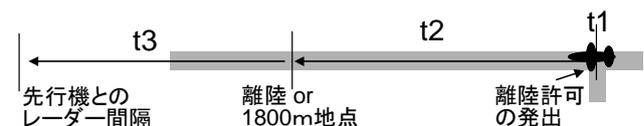


図-2：離陸機を処理するための時間の区分

以上から、羽田空港においては、先行機がHeavy区分の時は(a)の管制間隔を、先行機がMediumの時は(b)を考慮するということになる。現在、羽田空港におけるHeavy機材とMedium機材のシェアは、約0.7：0.3であるので、離陸

機一機当たり処理時間は、112.5秒($120\text{秒} \times 0.7 + 95\text{秒} \times 0.3$)となり、離陸機一時間当たり処理能力は次のようになる。

$$3600\text{秒} / 112.5\text{秒} = 32\text{回/h}$$

2.3.4 羽田空港の空港容量

一般的に、空港容量は離着陸数を同数とするため、前述の2.3.2, 2.3.3から、羽田空港の1時間当たりの空港容量(離着陸数)は、

- 2003年7月以前：28回/h $\times 2 = 56\text{回/h}$
- 2003年7月以降：29回/h $\times 2 = 58\text{回/h}$
- 2005年10月以降：30回/h $\times 2 = 60\text{回/h}$

となっている。また、再拡張後(2009年～)における空港容量は国土交通省航空局における報道資料²⁾から着陸40回/h、離陸40回/hであるため、

- 2009年以降；40回/h $\times 2 = 80\text{回/h}$ となっている。

2.4 羽田空港の空港容量の支配要因

羽田空港に特有の空港容量の支配要因としては、大きく以下の3つが挙げられる。

①滑走路処理能力

前述2.3で示したように羽田空港においては、最終進入飛行中の安全間隔より、滑走路上の安全間隔(滑走路占有時間)の方が空港容量のボトルネックになっている。

その要因としては、

- 滑走路とエプロンまでの距離が短い(誘導路として使われている面積が小さい)ためにエプロン・誘導路で航空機の渋滞が発生し、また、誘導路自体も一部で高速性を欠く形状となっている。そのため着陸機は誘導路手前の滑走路上で必要以上に速度を落とす結果となっている；

- 大型機材の運航割合が大きい(一般的に、滑走路占有時間は機材規模に比例して長くなるため)；

などが、管制官へのヒアリング調査の結果、分かっている。

②飛行経路の制約

羽田空港は東京湾沿岸(大田区の沖合い)に位置し、古くから航空機騒音が大きな問題となっている。航空機騒音を東京湾内に閉じ込めるというコンセプトの下に飛行経路が設定されており、空港容量に大きな影響を与えている。例えば、A滑走路(以後Aラン。図9参照)からの北向き左旋回離陸(ハミングバード)は一日5便のみといった制約を受けているが、このような制約が無くなれば更なる容量拡大が可能になることは明らかである。

③離着陸時の安全間隔・航空交通流マネジメント

離着陸時の安全間隔は、後方乱気流の影響から前後する航空機の組み合わせによって決定される。航空機の組

み合わせ(sequencing)は、一般に「first come, first service」の原則で、到着してきた航空機を順番に単純に捌くように行われており、空港容量を最大にするための航空交通流マネジメントは明示的には実施されていないと考えられる。そこで、「first come, first service」ではなく、空港容量を最大にする空港管制を導入することによって更なる空港容量の拡大が可能になるのではないかと考えられる。

3 空港容量算定シミュレーションの開発

3.1 シミュレーションの概要

本章では、前述2章において示した空港容量の支配要因に対する施策を定量評価するために開発したシミュレーションについて述べていく。本シミュレーションは、複数滑走路において離着陸を行う個々の航空機の挙動を、機材別の特徴を考慮し、マイクロに再現できる。本研究における空港容量算定のための羽田空港周辺の航空交通流シミュレーションは、Microsoft Visual C++ 6.0により開発し、スキャンタイムごとに航空機の位置やプログラムの計算過程をリアルタイムに表示し、その挙動の様子を視覚的にチェックできる。

3.2 開発したシミュレーションのアルゴリズム

3.2.1 着陸機の挙動アルゴリズム

図-3に着陸機のメイン・ルーチンを示す。以下、各サブ・ルーチンについて説明をする。

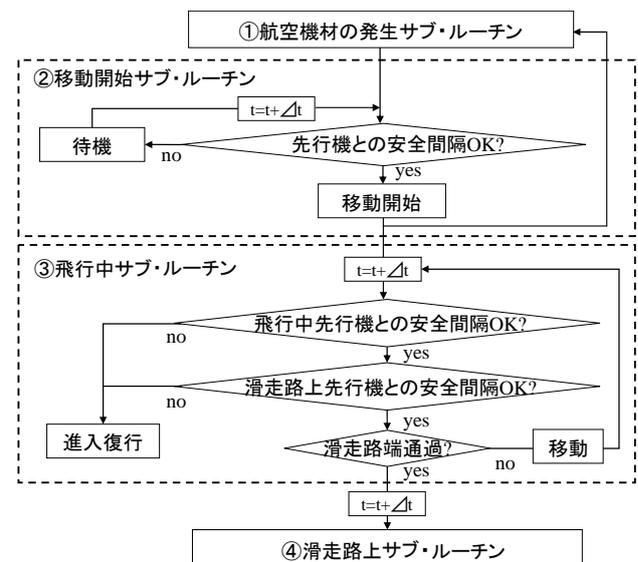


図-3：到着機のメイン・ルーチン

図-3に示した①着陸機の発生サブ・ルーチンにおいて、発生する航空機種は、乱数を用いて確率的に設定する。

②移動開始サブ・ルーチンでは、最終進入開始点において、移動開始前の先行着陸機に対する安全間隔(先行機と

の(後方乱気流)安全間隔,及び,平行進入する航空機との(ILS 進入)安全間隔)の計算をスキャンタイム毎に行い,条件(飛行中に最も先行機との間隔が小さくなる地点で最低安全間隔が維持できる間隔)を満たした段階で移動開始するようになっている。ただし,現実の管制では最低安全間隔に,ある程度の安全率を加えた間隔で運用していると考えられ,さらに管制指示に対するレスポンス遅れによるバラツキやその他自然発生的なバラツキも存在する。従って,本シミュレーションでは,この安全率及びバラツキを考慮して移動開始時刻を決定している(安全率の大きさ,バラツキを表現する偏差の算出については3.4.2 参照)。

③飛行中サブ・ルーチンでは,飛行中における先行機,及び,平行進入する航空機との ILS 進入安全間隔をスキャンタイム毎に計算しながら,3.3 で示す機材別の設定速度で飛行する。また,滑走路進入端から 1nm 地点に到達した時点で,着陸予定の滑走路に他の航空機が存在する場合には,進入復行を行うようになっている。さらに,(再拡張後の羽田空港に対する分析において)Cラン着陸機は,Dラン離陸機との安全間隔を常時計算し,Dラン離陸機との安全間隔を確保できない危険性が生じた場合には,進入復行を行うように設定してある。

④滑走路進入端通過後の航空機の挙動サブ・ルーチンにおいて,滑走路占有時間のバラツキ及び,使用する離脱誘導路は,乱数を用いて確率的に設定される(3.4.1 参照)。

3.2.2 離陸機の挙動アルゴリズム

図4は離陸機のメイン・ルーチンを示している。以下,各サブ・ルーチンについて説明をする。

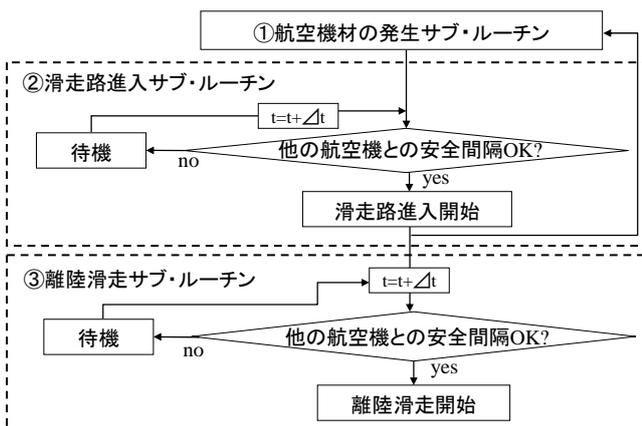


図4: 離陸機のメイン・ルーチン

①航空機材の発生サブ・ルーチンは,着陸機と同様,乱数を用いて確率的に設定するようになっている。

②滑走路進入サブ・ルーチンにおいて,離陸機は先行の離陸機の滑走路開始を確認し,また,最終進入中の着陸機が有る場合には,着陸機との安全間隔を計算し,安全間隔が

満たされている状況において移動を開始するように設定してある。

③Cラン, Aラン離陸滑走サブ・ルーチンでは,先行離陸機に対する安全間隔を計算し,所定の安全間隔が満たされた上で,着陸機がある場合には着陸機の停止線通過を確認した後に離陸滑走を開始するように設定されている。また,Dラン離陸滑走サブ・ルーチンでは,Cラン着陸機がDラン上空を通過するため,Dラン離陸機は,先行離陸機とCラン着陸機との安全間隔を満たした時点で離陸滑走を開始するように設定されている。着陸機の移動開始時刻と同様に,滑走開始時刻にも安全率及びバラツキを考慮している(安全率の大きさ及びバラツキについては3.4.3 参照)。

3.2.3 航空機間の最低安全間隔

表3はシミュレーションにおいて各航空機が取るべき最低安全間隔を示している¹⁸⁾。開発したシミュレーションにおいては,表に示している安全間隔を制約条件として航空機の挙動が行われるようになっている。ただし,前述の通り確率的な移動時間のバラツキが生じ,安全間隔が満たされない状況においては進入復行を行うように設定されている。

表3: シミュレーション内の航空機が取るべき安全間隔

対象航空機	最低安全間隔
Cラン着陸機とDラン離陸機	Dラン離陸機が1800m通過地点において,レーダー管制間隔3nmをとっていること (Cラン着陸機がDランを横切る危険性がなくなったとき)
Cラン着陸機とCラン離陸機 Aラン着陸機とAラン離陸機	先行着陸機がストップラインを通過した後,離陸機は離陸滑走開始 離陸機が1800m通過時に,後続着陸機は滑走路進入端から1nm以上離れていること
離陸機同士	先行機がMedium区分の場合,後続機が滑走開始点から1800m地点のときに先行機とレーダー管制間隔3nmが取れていること 先行機がヘビーの場合は,先行機が離陸上昇した120秒後に後続機が離陸上昇を行うように安全間隔をとること
着陸機同士	進入中:後方乱気流安全間隔を取ること 先行着陸機がストップライン通過時に後続着陸機は滑走路進入端から1nm以上離れていること
平行する着陸機同士	同時平行ILS間隔として,平行して最終進入する着陸機間で最低間隔2nmを取ることに

3.3 システムの入力データ

開発したシミュレーションに対する入力データとしては,航空機の種類,羽田空港の滑走路・誘導路の地理データがあるが,前者は関連企業によるデータ提供を,後者は文献(20)を参考とした。

関連企業による航空機材の速度データを基に本研究で仮定する航空機材の速度を示す。本研究ではデータ制約の問題からシミュレーションにおいて運航される航空機材をB747, B767, B737, RJ(70人乗り)とした。下記の表4は着陸機の速度を,表5は離陸機の速度を示している。着陸機に関しては,ILS 進入を仮定しており,文献(20)を参考に,グライドパスから9.1nm, 5nm 地点で速度規制が行われると仮定した。滑走路離脱時間に関しては高速離

脱速度 40kt を仮定した時間から、前述の通り確率的に遅れ時間を発生させている。

表-4：着陸機の種類データ

航空機	発生ポイント→最終進入開始点	5nm	高度1000ft地点	滑走路進入端	接地点	タンジェントポイント→ストップライン
B747	10⇒9.1	5	-	-	0	-
B767	速度 (kt)	180	160	146	146	142
B737				134	134	130
仮想RJ				127	127	123
				116	116	112

表-5：離陸機の種類データ

航空機		滑走路開始点	安全離陸速度点	飛行中		
B747	高度 (ft)	0.00	35	3000	4350	7000
	滑走路開始点からの距離 (nm)	0.00	0.89	5.36	10.79	15.09
	速度 (kt)	0.00	160	160	250	250
B767	高度 (ft)	0.00	35	3000	3835	7000
	滑走路開始点からの距離 (nm)	0.00	0.80	3.90	6.98	10.87
	速度 (kt)	0.00	154	154	250	250
B737	高度 (ft)	0.00	35	3000	3570	6000
	滑走路開始点からの距離 (nm)	0.00	0.65	3.77	5.48	9.67
	速度 (kt)	0.00	147	147	250	250
仮想RJ	高度 (ft)	0.00	35	3000	3570	6000
	滑走路開始点からの距離 (nm)	0.00	0.78	3.77	5.48	9.67
	速度 (kt)	0.00	127	147	250	250

下記の表-6に、管制官へのヒアリング調査を基に仮定した各航空機の滑走路離脱誘導路の選択確率、及び、東京空港事務所から提供して頂いた滑走路データを示す。シミュレーションにおいては、表に示す確率分布に従い航空機が滑走路を離脱するように設定した。そのため、航空機の接地点からタンジェントポイント（以下TP、離脱誘導路に向けて旋回し始めるポイント）までの減速率は、使用誘導路によって変化することになる。

表-6：航空機の滑走路離脱誘導路の選択確率

滑走路	誘導路	滑走路端からタンジェントポイントまでの距離 (m)	タンジェントポイントから滑走路縁までの距離 (m)	タンジェントポイントからストップラインまでの距離 (m)	航空機の誘導路選択確率			
					B747	B767	B737	RJ
Aラン	A-5	1000.00	238.94	362.00	0	0	0	0.7
	A-6	1500.00	236.83	364.00	0.3	0.8	0.8	0.3
	A-8	2000.00	235.75	362.00	0.7	0.2	0.2	0
Cラン	C-6	1290.00	237.41	393.00	0	0	0	0.7
	C-7	1670.00	211.14	380.00	0.3	0.8	0.8	0.3
	C-8	2120.00	216.51	373.00	0.7	0.2	0.2	0

3.4 確率要因の分布に関して

3.4.1 着陸機の滑走路占有時間のランダム要因の分布

滑走路占有時間は空港容量を算出する際に最も重要な要因となるため、そのバラツキも極力現実の値に近づける必要がある。文献(16)によれば、羽田空港におけるAラン着陸機の①滑走路占有時間（滑走路進入端から滑走路縁）、及び、②滑走路縁から停止線を通るまでの時間の平均と標準偏差は、下記に示す通りとなっている（分布はほぼ正規分布）。

①：平均 58.8 秒，偏差 9.2 秒

②：平均 12 秒，偏差 4.5 秒

ここで、シミュレーション内では離脱する誘導路ごとにバラツキを与える必要がある。本シミュレーションでは異なる誘導路で滑走路占有時間のバラツキは等しいと仮定し、

その大きさ（偏差）を算出した。上記①のデータは全航空機の平均・偏差、つまり離脱誘導路の異なる航空機の滑走路占有時間を全てプールした平均・偏差となっており、離脱誘導路別の偏差を求めるには、この値から、異なる離脱誘導路間の級間偏差を差し引けばよい。以下で離脱誘導路別の偏差の算出について述べる。

文献(16)によればTPにおける速度は各機材 40kt でほぼ一定であり、滑走路進入端での速度は機材によって決定される確定要素であるとするれば、滑走路進入端からTPまでの占有時間は確定的となり、占有時間のバラツキはTP以降に発生すると仮定できる。TPと滑走路縁の間の通過時間に関しては、TP通過時の速度が一定であることに加え、表7より「TPから滑走路縁までの距離」、「滑走路縁から停止線までの距離」は離脱誘導路間で差が小さく、また、その後の減速度を機材間で不変と仮定すると、この通過時間において、異なる離脱誘導路・航空機材の間の級間分散は無視できる。従って、①の偏差から差し引く級間分散は滑走路進入端からTPまでの時間に関してのみ考慮する。

本研究では、羽田空港発着の航空機材を、最大離陸重量を参考にして表7のようにB747、B767、B737、及びRJ（現状では発着はない）の4機種に集約できると仮定した。各機材のシェア（表7）、誘導路選択確率（表6）、各機材の滑走路進入端からTPを通過するまでの時間（表8）を基に、羽田空港における滑走路進入端からTP通過までの平均所要時間を求めると、

$$\sum_i \sum_j share_i \times (possibility\ of\ taxiway)_{ij} \times (occupy\ time)_{ij} = 29.92 \quad (1)$$

i : 機材区分*i*

$share_i$: 各機材のシェア

$possibility\ of\ taxiway_{ij}$: 機材*i*が誘導路*j*を選択する確率

$occupy\ time_{ij}$: 機材*i*が誘導路*j*を選択した場合の

タンジェントポイント通過時間

秒となる。

表-7：羽田空港における運航機材（2004年現在）と本研究での取り扱い

機種	最大離陸重量(t)	運航機数	分析機材区分	シェア
MD-87	56.7	11	737	0.279
B737	63	15		
B737-400	63	19		
MD-81	63.5	7		
MD-90	65.8	19		
A320	67	29		
A321	80	12		
A300	137	9		
A300-600R	144	52		
B767	152	97		
DC-10	201.8	1		
B777	202.9	57	747	0.335
B777-300	240	35		
B747	394.6	39		
B747-SR	394.6	5		
総計	-	409	-	1.000

文献 (21) を基に筆者が作成

表-8：航空機材のTP通過時間（秒）

離脱誘導路	B747	B767	B737
A8	34.18	36.59	38.16
A6	25.98	26.11	28.12

表-6, 表-7から算出

以上より、滑走路端からTPまでの級間偏差を求めると4.23秒となり、①の全偏差9.2からこの値を差し引くことで、TPから滑走路縁までの級内偏差は8.15と求まる。また、①と②の共分散はゼロと仮定できるため、TPから停止線の通過時間の級内偏差は、9.31秒となり、その平均通過時間は、①+②から式1で求めた時間を差し引き、40.8秒となる。

本研究では滑走路進入端からTPまでの通過時間は機材ごとにシミュレーション上で決定され、TPから停止線までの通過時間は平均40.8、標準偏差9.31の正規分布で与えることで、到着機の滑走路通過時間の分布を表すこととする。滑走路における管制官の指示に対する航空機のレスポンス遅れに関しては、ここで使用した観測データに含まれるため考慮できている。

3.4.2 着陸機の発生時刻の確率要因の分布

前述の着陸機の移動開始時刻に関する安全率及びバラツキに関しては、観測データ等がないため、本研究ではシミュレーションによる着陸数が、国土交通省が提示している一時間当たりスロット配分枠と等しくなるように、これら値をキャリブレーションした。ここで「安全率+バラツキ」は、安全率を平均、その平均の1/3を偏差とした正規分布で与えることとした（最低安全間隔を下回る確率が約0.3%となる）。スロット配分枠は滑走路占有時間との整合性を取るために、文献(16)が出された2000年現在の値、28回/hとし、機材シェアは表-7を参考にB747, B767, B737に集約することとした。キャリブレーションの結果、平均18.6秒（偏差6.2秒）となった。

3.4.3 離陸滑走開始時刻の確率要因の分布

離陸機材における離陸滑走開始時刻の安全率及びバラツキに関しても観測データ等がないため、国土交通省が提示している一時間当たりスロット配分枠（離陸32回/h）に対するキャリブレーションを、到着機と同様の方法で行った。その結果、平均7.5秒（偏差2.5秒）となった。

3.5 開発した空港容量算定シミュレーションのまとめ

本研究で開発したシミュレーションの特徴としては、

- 複数滑走路に離着陸する航空機の挙動をミクロに表現できる；
 - 機材ごとの特徴を考慮している；
 - 航空交通流における確率要因を考慮している；
- という3点である。また、航空機の挙動に関しては管制

方式基準から、滑走路上の着陸機の通過時間に関しては国土交通省公表の実測データから再現しており、また離着陸機の発生時間間隔をキャリブレーションすることで、シミュレーションで算出される発着機数と実際の羽田空港の発着機数（公表されている1時間容量）を等しくした。以上より、本シミュレーションは、入手可能なデータをできる限り使用して開発を行い、限られた範囲内で一定の再現性を有していると考えられる。なお、本シミュレーションは羽田空港の諸データを使用して開発しているため羽田空港のみへ適用可能である。

4 空港容量の増加可能性及び容量増加に伴う効果と影響のシミュレーション分析

4.1 はじめに

本章では、開発したシミュレーションを活用し、空港容量の増加可能性、及びそれに伴う利用者便益、航空機騒音の定量分析を行う。

シミュレーション分析①では、再拡張前の、容量制約が厳しい状態における容量の拡大方策を分析する。「2.4」で示したようにハミングバード運航を拡大することで、空港容量が増加することは明らかである。そこで、ハミングバード運航を拡大した際の空港容量の増加を定量評価し、それに伴う社会便益（利用者便益、騒音被害）を算出する。具体的には、低騒音機材であるRJをハミングバード運航に使用することで、騒音被害を抑えつつ、かつ容量も増加させる。その上で増加容量を戦略的に活用して、地方及び国際線の新規路線の開設、増便の社会的便益を分析する。

シミュレーション分析②では、再拡張後を対象として、様々な航空管制運用上の工夫（滑走路占有時間の短縮、運用機材の時間帯固定など）による空港容量の増加可能性について分析を行う。

4.2 シミュレーション分析① -RJハミングバード-

4.2.1 分析①の概要

本分析では、再拡張前、現状の羽田空港において騒音暴露レベルの小さいRJを東京内陸部へのAラン離陸（ハミングバード）に活用することで、飛行経路の制約を緩和した際の空港容量の増加可能性、騒音被害、並びに利用者便益を定量的に評価するものである。

現状では、東京内陸部への騒音被害を避けるために、ハミングバードは一日5便の制限が有り、朝の離陸ラッシュ時においてもCラン離陸の最大処理容量32回+Aラン離陸5回の37回/hのみしか運航されていない（図-5参照）。しかし、騒音暴露レベルの小さいRJであれば、一日5便

以上の A ラン離陸が行える可能性はあると考えられる。そこで、本分析では現状の中型機以上の離着陸機数を減らすこと無く、RJ によるハミングバード運航の頻度増加がどの程度可能かを定量的に分析することとする。なお、地方空港の運用時間の関係から、朝（7～8 時台）は離陸機（ハミングバード）、夜（20～21 時台）は着陸機（A・C ラン着陸）、それ以外の日中は離着陸機（離陸：ハミングバード、着陸：C ラン着陸）の増加可能性のみを分析した。本章の各分析は、シミュレーション時間 3600 秒の間に離着陸した機数をカウントし、これを 10 回繰り返した平均の値を分析結果とした。

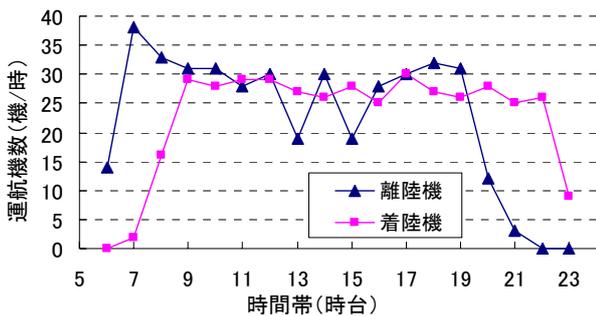


図-5：羽田空港の時間帯別離着陸機数（2004）

文献（21）を参考に筆者が作成

4.2.2 空港容量算定の分析結果

表-9 に分析結果を示す。分析の結果、仮に RJ によるハミングバード運航が可能であれば、現状の運航機数を減らすことなく 1 日当たり 150 機程度（離着陸数同数とすれば 75×2 機）の離着陸容量の増加可能性があることが示された。日中の時間帯においても、着陸機（離陸機）間に RJ 離陸機（着陸機）を運航させることで、現状の中・大型機の運航機数を減らす事無く、運航機数を増加できる可能性が示された。続いて、この RJ ハミングバードによる増便の影響と効果について、航空機騒音と利用者便益の観点から定量評価を行った。

表-9：RJ 運航可能機数

時刻	離陸機数	着陸機数
7時台	41	-
8時台	22	-
日中(9-19時台)	(3~5) × 11 = 33~55	-
20時台	-	20
21時台	-	22
計	96~118	75~97

4.2.3 航空機騒音の定量評価

1) 概要

本節では、前節で計算された RJ ハミングバードによる容量増加の航空機騒音への影響を分析するため、現状における B767 クラスのハミングバード時と、前節で示した RJ

によるハミングバード時の騒音影響を既存の騒音評価指標により定量的に比較した。

騒音予測は 1km 四方メッシュを 1 つの観測点と仮定し、各点における騒音被害は、日本において現在用いられている騒音評価指標 $WECPNL_j$ を用いて算定した。また、使用データに関して、進出距離とエンジン出力の関係、RJ のフットプリントは関連企業によるデータ提供を、観測点からの距離と騒音レベルの関係は INM(Integrated Noise Model)²³⁾ を、飛行経路は文献(2)(20)を参考とした。 $WECPNL_j$ の予測式は文献(22)(23)(24)を参考に以下の通りとする。

$$WECPNL_j = \bar{L}_A + 10 \log_{10} \bar{N} - 27 \quad (2)$$

$$\bar{L}_A = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N 10^{L_{Amax,ij,k}/10} \right] \quad (3)$$

$L_{Amax,ij,k}$: 機種 i , エンジン出力 j ,

k 番目の航空機の単発最大騒音レベル

N : 暗騒音よりも 10dB(A) 以上大きい L_{Amax} を暴露する航空機数

$\bar{N} = N_2 + 3N_3 + 10(N_1 + N_4)$

N_1 : 24:00-7:00 の航空機数

N_2 : 7:00-19:00 の航空機数

N_3 : 19:00-22:00 の航空機数

N_4 : 22:00-24:00 の航空機数



図-6：B767 による 65+dB(A) 騒音暴露地域



図-7：RJ による 65+dB(A) 騒音暴露地域

2) 分析結果

図-6、図-7 にそれぞれ B767 クラス、RJ によるハミングバード実行時の単発最大騒音暴露レベルが 65dBA を越

える観測点を示している。RJの導入により単発最大騒音暴露レベルが65dBAを超える地域は減少することが分かる。ただし、羽田空港に非常に近い地域においては、単発での最大騒音暴露レベルはRJの導入により減少するが、WECPNL_J指標で評価した場合には、運航頻度の増加により、現状よりも騒音被害が増加する結果となった。しかし、その場合においても環境基準のWECPNL_J:70dBAを超える地域は存在しないため、本計算によれば、騒音影響の観点からみても、RJ導入による空港容量の増加可能性は十分にあるものと考えられる。

4.2.4 利用者便益の算出

本節では、RJハミングバードによる容量増加の効果として利用者便益の観点から定量的に分析する。利用者便益を算出するにあたり、RJが導入される路線、及び、羽田空港に及ぼす影響に関してシナリオ・ライティングを行った。まず、RJは国内線において現在運航頻度の小さい路線に導入されると仮定する。具体的には2便/日以下の路線である。ここで、もしRJがこのような路線に運航されるならば、現在、中型機によって運航されているこれらの路線の発着枠は他の路線に転用できることになる。ここで、その転用先が新たに国際線へ導入されると仮定すれば、RJの導入により、地方路線のサービス水準の向上のみならず、空港基盤を拡張することなく羽田空港の国際化が進展可能なことになる。その結果、RJが導入される地方路線において運航頻度の増加による利用者便益が増加するばかりか、羽田空港における国際化が関東地方、特に東京居住者の利用者便益を増加させるものとする(図-8参照)。

以上のシナリオ・ライティングの基、本節では利用者便益の算出を試みた。国内地方路線においては、データ制約上の問題から表-10に示す前提条件の基、式(4)に示すように時間短縮効果等は考慮せず、頻度増加による便益の増加分のみを計測した。今回の分析では、パラメータに関しては文献(25)に示されている国内航空旅客を対象とした航空経路選択モデル内の観光・私用等目的のパラメータを引用し、年間の旅客需要は文献(26)の値を引用した。表-11に算定結果を示しているが、これより年間の総利用者便益は約65億円になることが分かる。

国際線においてはデータ制約上の問題から、東京在住の利用者(出国のみ)に対する便益計算を行った。便益は式(5)に示すように、国際航空旅客を対象とした航空経路選択モデルに対するログサム変数を、RJ導入前後で算出し、その増分を航空費用パラメータで除すことで算出した(航空経路選択モデルでは、成田(陸上or航空アクセス)、関西(陸上or航空アクセス)、羽田空港の計5経路からの選択を仮定した。詳細は文献(25)を参照)。導

入される国際線便数は、前述の表11における13路線(計19便/日)から、現行の中型機によるハミングバード枠を差し引いた14便/日とし、北京、上海、ソウルに新たに配分すると仮定した。パラメータに関しては文献(25)を、東京居住者の年間旅客需要は文献(27)の値を引用した。

表12に国際線導入路線に対する空港容量拡大の利用者便益の算出結果を示す。計算の結果、国際線においては年間の総利用者便益は約49億円になることが分かる。

表-10: 便益算出の前提条件(国内地方路線)

RJ導入路線	運航頻度4便以下の13路線
RJの提供座席数	50 or 70席
増加便数の設定	ロードファクター70%を目途に設定(最低限1往復(2便/日)は現状より増加)
便益受益者	航空モードを利用する移動者
移転需要・派生需要	考慮せず
計測便益	運航頻度の増加分のみ

$$\Delta C_{M,f} = -\frac{\beta_1}{\beta_2} \ln\left(\frac{f+\Delta f}{f}\right) \quad (4)$$

$\Delta C_{M,f}$: 利用者便益(円), f : 現行の運航頻度(便/日)

Δf : 増便数(便/日), β_1 : 頻度^hパラメータ(0.93)

β_2 : 費用^hパラメータ(-1.44×10⁻⁴)

表-11: 羽田発着国内地方路線の利用者便益試算結果

対象地方空港	①年間旅客数:往復合計(人)	頻度(現状) f (便/日)	頻度(増加後) f+Δf (便/日)	RJの座席数(席)	年間平均ロードファクター(%)	②一人当たり利用者便益(円)	年間の総利用者便益(億円) (=①×②)
奄美大島	93,766	1	3	50	85.8	7,048	6.61
宮古	93,536	1	3	50	85.4	7,048	6.59
根室中標津	90,681	1	3	50	82.8	7,048	6.39
山形	59,633	1	2	50	81.7	4,447	2.65
稚内	146,637	1	4	70	71.7	8,893	13.04
萩・石見	59,986	1	2	50	82.2	4,447	2.67
紋別	49,540	1	2	50	67.9	4,447	2.20
佐賀	162,605	2	4	70	79.6	4,447	7.23
三宅島	-(運休)	2	-	-	-	-	-
大館能代	116,521	2	4	50	79.8	4,447	5.18
大島	59,381	2	3	50	54.2	2,601	1.54
南紀白浜	135,134	2	4	70	66.1	4,447	6.01
能登	111,571	2	4	50	76.4	4,447	4.96
総計	1,179,196						65.09

$$\Delta C_{Tokyo,k} = \frac{\ln\left\{\sum_i \exp(V_{with,ik})\right\} - \ln\left\{\sum_i \exp(V_{without,ik})\right\}}{-\beta_{cost,k}} \quad (5)$$

where, $\Delta C_{Tokyo,k}$: 東京在住者の利用者便益(旅行目的_k)

$V_{with,ik}$: RJハミングバード導入後の効用(経路_i,旅行目的_k)

$V_{without,ik}$: RJハミングバード導入前の効用(U)

$\beta_{cost,k}$: 航空費用パラメータ(旅行目的_k)

表-12: 国際線の利用者便益

	目的地		
	北京	上海	ソウル
羽田空港からの運航頻度(便/日) (便益計算ではモデルに合わせて「便/週」に変換)	0 ⇒ 6 (現状⇒増加後)	0 ⇒ 6	4 ⇒ 6
目的地別の東京居住者年間旅客需要(人)	119,246	62,725	131,308
目的地別の東京居住者1人当たり利用者便益(円)	62,725	131,308	131,308
目的地別の東京居住者年間利用者便益(億円)	9.373	11,271	881
目的地別の東京居住者年間利用者便益(億円)	15,332	12,025	2,810
目的地別の東京居住者年間利用者便益(億円)	11.2	7.0	2.3
目的地別の東京居住者年間利用者便益(億円)	9.6	15.8	3.7
東京居住者年間利用者便益:計(億円)	49.6		

4.2.5 シミュレーション分析①のまとめ

分析①においては、RJの騒音暴露レベルが低いことを考慮することで、空港容量の観点から増加可能な運航機数を、容量増加の影響の観点からAラン離陸後の航空機騒音を、容量増加の効果の観点から利用者便益を、それぞれ定量的に評価した。分析の結果から、分析①においては、現状の中型・大型機材の運航機数を減らすことなく、新たにRJ導入による空港容量の増加可能性を定量的に示すことができた。

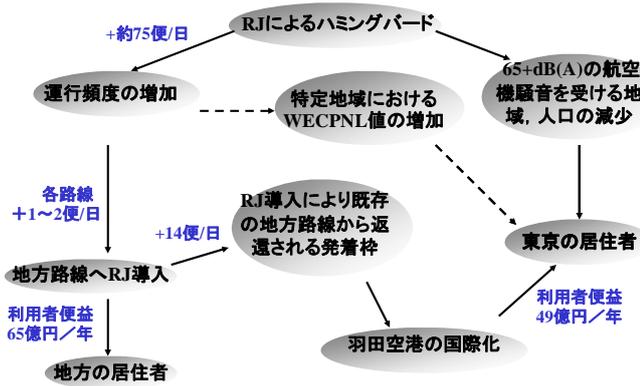


図-8 シミュレーション分析①のまとめ

4.3 シミュレーション分析② - 管制運用上の工夫による容量増加の可能性-

4.3.1 分析②の概要

分析②では、再拡張後の羽田空港において管制運用上の工夫による空港容量の増加可能性を分析する。最初に国土交通省の示す再拡張後の滑走路運用方法と離着陸容量の案を再現した後、幾つかの管制運用上の容量増加方策による増加可能性をシミュレーションで分析していく。



図-9：再拡張後の羽田空港の飛行経路

4.3.2 平行 ILS 間隔を考慮した国土交通省案の再現

本節の分析では、平行進入する着陸機の ILS 間隔 2nm を考慮した上で、国土交通省案をシミュレーション上に再現した。表-13に、分析結果を示す。分析結果から一時

間当たりの離着陸数は76機（通常、離着陸数は同数と設定されるため、少ない方の機数によって容量を算出）となった。これは、平行 ILS 間隔を考慮しているために、Aラン着陸機の着陸容量が単一滑走路の着陸容量28機/hよりも小さくなったためと考えられる。Cラン着陸機数は12機に固定して分析を行ったのだが、その結果、Cラン離陸機は、平均22機となり、国土交通省公表の12機を上回る結果となった。このことから、再拡張後においてCランの処理容量にはまだ余裕がある可能性が示唆された。

表-13：再拡張後容量（国土交通省案）の再現結果

	離着陸機数(回/h)
Aラン着陸	26.70
Cラン着陸	12.00
Dラン離陸	28.10
Cラン離陸	22.10
着陸計	38.70
離陸計	50.20
離陸数を着陸数と同数とした場合の空港容量(小数点以下切捨)	76

4.3.3 管制運用上の容量増加方策の概要

(1)ベースシナリオ A：ILS・PRM 方式による運用

文献(28)によれば、米国においては平行する滑走路の中心線が3400feet-4300feet離れている場合、PRM(Precision Runway Monitor)を用いた管制を行うことにより平行する着陸機を独立に扱うことができるとしている。羽田空港のAランとCランにおいては、その中心線が1700m(約5100feet)離れているため、着陸機同士の独立運用は十分に可能であると考えられる。そこで、本シナリオでは、ILS・PRM方式を用いた際の空港容量を分析する。

また、以下に示すベースシナリオ B、サブシナリオ 1~3 は全て ILS・PRM 方式による運用を前提として分析を行った。

(2)ベースシナリオ B：Cラン余剰容量の有効活用

「4.3.2」の分析結果から、Cランの処理能力には余裕があると想定される。そこで、この余剰容量を離着陸機数同数とするように配分することで、最大増加可能容量が算出可能である。ただし、Cラン着陸機は、Dランからの離陸タイミングにも影響を与えているため(Cラン着陸機数の増加はDラン離陸機数を減少させる)、このC・Dラン全体の最大処理容量をシミュレーションで分析する必要があると考えた。なお、以下に示すサブシナリオ 1~3 は全てベースシナリオ B を考慮した上での分析である。

(3)サブシナリオ 1：Aラン着陸機高速離脱

前述「2.4」より、羽田空港においては滑走路と平行誘導路、エプロンまでの距離が短いため滑走路占有時間が長くなっている。そこで、サブシナリオ 1 では、Aラン

ターミナルの逆側、滑走路進入端から 1650m の位置に新たな高速離脱誘導路を整備した上で (図-10 参照: 現在工事中の A7 とは別), A ラン運航機材を B737 と B767, C ラン運航機材を B747 のみとすることによって, A ラン着陸機が平行誘導路, エプロン等での渋滞の影響を受けずに高速離脱が可能になると仮定し, その滑走路占有時間を 50 秒以下と仮定する (TP から停止線までの通過時間の偏差; 0, 40kt の定速離脱を仮定する). 文献(29), (30) によれば, 滑走路占有時間の平均が 50 秒以下である場合, レーダー管制間隔を 2.5nm に短縮できるとしており, サブシナリオ 1 では, 新たな高速離脱誘導路の整備に伴う滑走路占有時間の短縮から可能となるレーダー管制間隔の短縮を定量的に評価することを目的とする. 離陸機に関しては, 現状の運航シェアを参考にランダムに発生させた.

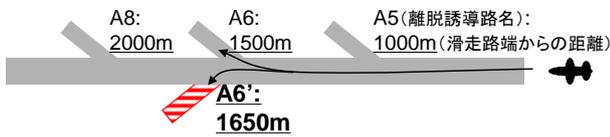


図-10: 本研究で仮定した A ラン高速離脱誘導路の設置

(4)サブシナリオ 2 : 時間帯ごとに運用機材を固定

サブシナリオ 2 では, C ラン着陸機を B747, A ラン着陸機を 1 時間のうち 30 分は B737 のみ, 30 分は B767 のみとすることで, 機材ごとの速度のバラツキ, 後方乱気流間隔のバラツキをなくすことによる空港容量増加の可能性を定量的に評価することを目的とする. サブシナリオ 2 では, 前述「サブシナリオ 1」における高速離脱は仮定せず, 滑走路占有時間には分布があるものとした.

(5)サブシナリオ 3 : サブシナリオ 1+サブシナリオ 2

サブシナリオ 3 では, サブシナリオ 1 における A ラン高速離脱によるレーダー管制間隔の短縮, 及び, サブシナリオ 2 における速度, 後方乱気流間隔のバラツキを共に考慮した際の空港容量の定量的に評価することを目的とする.

4.3.4 分析結果

表-14 に, 分析結果を示す. ベースシナリオ A においては, 着陸機同士が独立運用となることから, A ラン着陸機数が 2 機/h 増え, その結果, 全体の空港容量としても離着陸数が 4 機/h 増加することが分かった.

ベースシナリオ B においては, C ラン着陸機数が 16 機/h となる際に, C ラン離陸機数が 20 機/h, D ラン離陸機数が 24 機/h となり, 総離着陸数が 88 機/h で最大となることが分かった.

サブシナリオ 1 においては, 滑走路において高速離脱を仮定した場合, 最終進入中のレーダー管制間隔が短縮

されるため, A ランにおける着陸容量が, ベースシナリオ B と比較して約 2 機/h 増加しており, C ラン着陸機数が 15 機/h となる際に, 離着陸数が 90 機/h で最大となることが分かった.

サブシナリオ 2 においては, 時間帯ごとに A ランの運航機材を固定しても A ランの着陸機数はシナリオ 1 と比較して増加しない結果となった. これは, 最終進入中の後方乱気流間隔のばらつきが解消されても, 滑走路占有時間のばらつきが解消されていないためである. その結果, 全体の離着陸数は C ラン着陸機数が 16 機/h の際にベースシナリオ B と同様 88 機/h で最大となることが分かった.

サブシナリオ 3 においては, A ランにおける着陸容量が 32 機/h となり, その結果, C ラン着陸機数が 14 機/h となる際に, 全体の離着陸数が 92 機/h で最大となることが分かった.

表-14: シミュレーション分析②のまとめ

	Aラン着陸 (機/h)	Cラン着陸 (機/h)	Dラン離陸 (機/h)	Cラン離陸 (機/h)	着陸計 (機/h)	離陸計 (機/h)	離着陸数を同数 とした空港容量 (機/h)
国土交通省案	26.70	12.00	28.10	22.10	38	50	76
ベースシナリオA	28.15	12.00	27.90	22.16	40	49	80
ベースシナリオB	28.48	16.00	24.80	20.62	44	44	88
サブシナリオ1	30.27	16.00	26.30	19.67	46	45	90
サブシナリオ2	28.95	16.00	26.90	18.43	44	44	88
サブシナリオ3	32.88	14.00	27.40	20.74	46	47	92

4.3.5 シミュレーション分析②のまとめ

シミュレーション分析②の分析結果から, 管制運用上の工夫を行うことにより大規模な基盤整備を行うことなく空港容量の増加可能性があることを定量的に評価することが出来た. 空港容量は C ランの離着陸数を均衡させていく (ベースシナリオ B) 時に, その効果が特に大きいことが分かったが, 同一滑走路で離着陸数を均衡させる場合, 離陸機が滑走路横で着陸機の滑走路離脱を待たなければならないことから, 待機中の燃料消費, 定時性, 旅客の時間損失, 着陸機の進入復行の増加等の問題点も考えられる. また, サブシナリオ 2, 3 においては, 時間帯ごとに着陸機を固定することでエアラインのスケジューリングの自由度が低下するといった問題も予想される. これら空港容量の増加に関するトレード・オフは今後の課題である.

5 結論と今後の課題

本研究においては, 複数滑走路を有する空港周辺における航空機の挙動を再現できるシミュレーションシステムを開発し, その上で, 航空機に関わる特性 (航空機騒音, 安全間隔等) を考慮した空港運用を行うことによって, 空港容量の増加可能性があることを, 多くの仮定を

含んではいるが、定量的に評価することが出来た。さらに、容量増加の影響と効果についても、航空機騒音と利用者便益の視点から分析を行った。ただし、基礎統計データの収集、シミュレーションの精緻化、空港容量増加とそれに派生する諸問題のトレード・オフ関係など、多くの課題を本研究は含んでおり、これらは今後の課題として分析する必要がある。

また、現在の羽田空港の空港容量は、「2.3」、「3.4.1」に示したように、使用離脱誘導路、航空機材に関係なく、全航空機の滑走路占有時間の全平均、全分散を用いて計算されているが、実際には使用する離脱誘導路、或いは、機材ごとに、滑走路占有時間の分散が異なると直感的に考えることが出来る。即ち、現在の滑走路占有時間の分散は、級内分散（例えば、同じ離脱誘導路を使用した機材間の分散）と級間分散（例えば、異なる離脱誘導路間の分散）を足し合わせた、「全分散＝級内分散+級間分散」を採用しているが、空港容量を算定するために考慮しなければならない分散として全分散をとる必要があるかどうか、管制方法によっては級内分散のみを考慮すれば良いのではないかと、といった議論・分析は行われておらず、本研究でもデータ制約の関係から、このような分析は行っていない。また、一連の着陸行為を3つのセクションに分割して空港容量を算定する現行の方式では、セクション間の共変動が考慮されていないことや、羽田空港を通常利用しない少数の飛行機の占有時間が相対的に他と比べ大きいことを統計上どのように処理すべきかなど、今後も容量計算上、検討すべき課題はある。統計的な基礎データを用いて、空港容量の算定基準を抜本的に見直すことも今後の課題として特に重要であると考えられる。

最後に、わが国における航空管制に関する研究は、まだ少ないのが現状であり、今後は学術研究に留まること無く、産官学が一体となって、この分野に関する研究・議論が広範囲に推進されることを期待したい。

なお、本研究は筆者が東京工業大学在学中に行ったものであり、分析結果や政策提言の内容に関する一切の責任は筆者個人に帰する。

注1)「空港容量」というと、旅客ターミナルやボーディングゲートなどの容量までを指す場合があるが、本研究ではそこまです含まず、「単一もしくは複数の滑走路において処理可能な離着陸航空機数」とする。「滑走路容量」とも表現できるが、この表現は単一滑走路の理論的離着陸機数を指す印象があり、複数滑走路の運用方法や飛行経路などの制約を考慮した空港全体としての離着陸容量という意味を含めるために「空港容量」とした。

謝辞

本研究を進めるにあたって、航空管制に関して有益なアドバイスを頂いた国土交通省の岩瀬正典氏、西澤宏員氏をはじめ、多くの方々に大変御世話になりました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) (財)日本民間航空機協会ホームページ, <http://www.jadc.or.jp/jadcddata.htm>.
- 2) 国土交通省航空局ホームページ, <http://www.mlit.go.jp/koku/koku.html>.
- 3) Stephen L. M. Hockaday and Adib K. Kanafani [1974], "Developments in Airport Capacity Analysis", *Transportation Research*, Vol. 8, pp. 171-180.
- 4) G. F. Newell [1979], "Airport Capacity and Delay", *Transportation Science*, Vol. 13, No. 3, pp. 201-241.
- 5) Eugene P. GILBO [1993], "Airport Capacity: Representation, Estimation, Optimization", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.1, No.3, pp. 144-154.
- 6) D.E.Pitfield, E.A.Jerrard [1999], "Monte Carlo comes to Rome : a note on the estimation of unconstrained runway capacity at Rome Fiumicino International Airport", *Journal of Air Transport Management*, Vol.5, Issue.4, pp.185-192.
- 7) Matteo Ignaccolo [2003], "A Simulation Model for Airport Capacity and Delay Analysis", *Transportation Planning and Technology*, Vol.26, No.2, pp.135-170.
- 8) 藤原啓史, 竹内伝史 [1991], "ゆとりある空港における離着陸分布と経済的容量算出の試み", 「土木計画学研究・講演集」, No14(1), pp.91-96.
- 9) 飯沼忠康, 竹内伝史 [1993], "単一滑走路における離着陸分布比較と日滑走路容量の算出-ゆとりある空港を考慮して-", 「土木計画学研究・講演集」, No.16(2), pp.243-246.
- 10) 飯沼忠康, 竹内伝史, 梅村一美 [1994], "クローズドパラレルの滑走路配置とその経済的容量", 「土木学会年次学術講演会講演集IV」, pp202-203
- 11) 喜多秀行, 舟木正明, 大江一馬 [1991], "空港周辺空域の最大交通容量に関する一考察", 「土木計画学研究・講演集」, No.14, pp.97-104.
- 12) 喜多秀行, 信原伸司, 本間一 [1992], "広域管制空域の交通容量に関するモデル分析", 「土木計画学研究・講演集」, No.15, pp.603-608.
- 13) 信原伸司, 喜多秀行, 本間一 [1992], "空港周辺空域の航空交通容量に関する基礎的研究", 「土木学会年次学術講演会講演集IV」, pp714-715.
- 14) 薄井稔弘, 喜多秀行 [1995], "管制空域の交通容量と動的セクタ分割に関する基礎的研究", 「土木学会年次学術講演会講演集IV」, pp778-779.
- 15) 相原磨世, 嶋一男, 塩見格一, 佐藤祐喜 [1995], "首都圏における進入管制区の効率的な再構築に関する一考察", 「日本航海学会論文集」, 98号.
- 16) 市村修一 [2000], 「「空港処理容量についての考え方」について」.
- 17) Milan Janic [2000], *Air Transport System Analysis and Modelling –Capacity, Quality of Services and Economics-*, Gordon and Breach Science Publishers.

- 18) 国土交通省航空局, 「管制方式基準」, 鳳文書林出版販売 (株).
- 19) 国土交通省航空局 航空管制の安全に関する研究会 [2005], “羽田空港の発着枠の見直しについて—「安全確保を大前提に」—”.
- 20) 国土交通省航空局, 「AIP—JAPAN」.
- 21) JTB 時刻表 2004 年 11 月号.
- 22) International Civil Aviation Organization [1988], “ICAO CIRCULAR 205: Recommended Method for Computing Noise Contours around Airports”.
- 23) Federal Aviation Administration Office of Environment and Energy, INM Ver.6, User's Guide
- 24) 日本騒音制御学会 [2001], 「騒音制御ハンドブック」, 技報堂出版.
- 25) (財) 運輸政策研究機構 [2000], “航空需要予測手法に関する調査 報告書”.
- 26) (社) 全日本航空事業連合会 [2003], “航空輸送統計年報”.
- 27) 国土交通省航空局 [2001], “国際航空旅客動態調査”.
- 28) Federal Aviation Administration Office of System Capacity and Requirements [1992], “Near Term Capacity Initiatives”.
- 29) International Civil Aviation Organization [2001], “Air traffic management: procedures for air navigation services. -- 14th edition”.
- 30) Department of Transportation, Federal Aviation Administration [2003], “Aeronautical Information Publication, United States of America”.

Development of a simulation model for evaluating airport capacity enhancement measures

By Takeshi HIRAMATSU, Terumitsu HIRATA and Tetsuo YAI

The flexible operation of terminal air traffic was analyzed to enhance runway capacity at HANEDA airport. The airport capacity determined by landing aircrafts was estimated using a simple microscopic air traffic simulation system developed in the study. Using this simulation system, it is possible to reproduce the aircraft movements considering the size-depended characteristics of each aircraft such as separation minima, runway occupancy time and noise level. The results showed the significant increase of airport capacity and the consequent changes of user's benefit and noise pollution by proposed aircraft control patterns.

Key words: air traffic control, airport capacity, user's benefit, aircraft's noise, simulation