

空港管制からみた空港容量拡大方法に関する基礎的研究*

Airport Capacity Enhancement Considering Terminal Air Traffic Flow Control*

平田輝満**・山田直樹***・屋井鉄雄****

By Terumitsu HIRATA, Naoki YAMADA, Tetsuo YAI

1. はじめに

我が国の首都東京への航空需要を一手に担う羽田空港の容量制約は長年の課題とされてきた。これまでも滑走路の拡張や管制運用上の改善により、その容量を拡大してきたが、成長する航空需要に十分には応えられていない状況である。これに対し、2009年に4本目の滑走路が完成予定であり、羽田空港の発着容量は現在の1.4倍程度の約40万回/年となり、国内航空市場に関しては容量制約がなくなり、エアラインによる機材の小型化、多頻度運航化などにより利便性の高い航空輸送サービスが達成されることや期待されている。一方で、将来的な国内・国際航空需要や機材構成変化の動向によっては再び空港容量が逼迫することも考えられ、中長期的な首都圏空港整備については引き続き検討が必要である。また一部の地方空港（福岡、那覇）においても容量の需給逼迫が生じており、滑走路処理能力に関する総合的な調査が行われている。滑走路の新設や拡張といったハード施策による容量増加のみならず、既存ストックの有効活用として管制運用方法の工夫などの大規模なインフラ整備を伴わない容量増加の可能性についても十分に検討する必要がある。

そこで本研究では、羽田空港を対象として、①単一滑走路に対する新たな管制運用方法と、それに対応した空港容量算定の方法論を、現在の我が国の空港容量算定方式¹⁾をベースに提案し、②空港に離着陸する航空機の挙動をマイクロに再現できるシミュレーションモデル²⁾を、実測の着陸機データを活用しながら開発を行い、複数滑走路間の相互影響を考慮した空港容量拡大方策を検討する。国土交通省においても、空港容量の算定方式に関する調査¹⁾において、諸外国との比較検討や国内空港の離着陸データの分析を通じて、空港処理容量の算定方式の妥当性を検証し、福岡や那覇空港における総合的調査³⁾においても、空港能力の見極めとして、滑走路処理容量に影響を与えている要因や容量増加方策の検討を行っている。これらの調査・研究においても指摘されているよ

うに、空港容量に対しては、滑走路自体の形状のみならず、誘導路やエプロンの形状・設置位置、離着陸機材サイズの構成、エアラインのターミナル使用方法、また管制方式や安全率・許容遅れ時間の考え方など、様々な要因が影響をしている。本研究では、これら既往の研究・調査によって得られている知見も活用しながら、上記の目的で研究を行った。

2. 統計的観点からみた滑走路処理容量算定方法に関する検討

2.1. 現在の滑走路処理容量の算定方法¹⁾

まず、国土交通省が公表している現状の空港容量算定方式を示す。なお、羽田空港を想定すると、再拡張前には滑走路ごとに離陸と着陸が分離されている。また、着陸の滑走路容量が離陸の滑走路容量より小さいため、着陸の滑走路容量がボトルネックとなる。そのため、着陸が連続する場合の滑走路容量を以下に示す。

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（ROT：Runway Occupancy Time）を元に算出されている（図-1参照）。ただし、ROT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・1)。

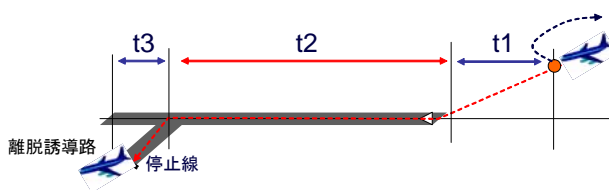


図-1 着陸機滑走路の占有時間の区分

- ① t1：滑走路末端から1NM（海里）の距離から滑走路末端（進入端）までの通過時間を着陸復行の指示とそのレスポンスに必要な時間と安全率として30秒の定数を設定；
- 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、バッファとして標準偏差の7.5秒（計算上は便宜的に平均の1/8）に着陸復行の確率が0.5%以下となる様に2.6倍をかかけた数値19.5秒を加えた79.5秒；

*キーワード：空港計画、空港管理、容量拡大、管制

**正員、博士（工学）、運輸政策研究所（港区虎ノ門3-18-19、

TEL: 03-5470-8415, E-mail: hirata@iterc.or.jp)

***非会員、修士（工学）、札幌市環境局

****正員、工博、東京工業大学大学院総合理工学研究科

- ③ t_3 : 滑走路縁から停止線を横切るまでの時間を、実測時間とバッファーとしての標準偏差より 15秒の定数を設定している。

以上の3つの時間を合計して現在着陸機1機当たりのROTは 124.5秒となる。

以上より、現在の羽田空港においては、ROTが120秒以上となるため、このROT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、03年7月以降は t_2 を新たな実測値77秒とし処理容量を29機時、05年10月以降は t_3 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。

2.2. 使用する離脱誘導路の位置に着目した容量算定方法

本節では、前節で紹介した空港容量算定方式において、現在ボトルネックとなっているROTの統計的な観点からの短縮の可能性として、離脱誘導路別セパレーションコントロールを想定した場合のROTの算定方法について検討を行った。

具体的には、羽田空港A滑走路(Aラン)で主に使用されている離脱誘導路A6(進入端寄り)とA8(奥寄り)について、当該滑走路への着陸機がどちらの誘導路を使用するのかが概ね事前に把握可能であることから(機材サイズやエアライン種別により)、管制上、先行機にA6を使わせることが可能な場合には、後続機との間隔を短めに設定し、先行機にA8を使わせる可能性が高い場合には、後続機との間隔を長めに設定するという方式を想定してみた。

このような運用を前提とすると、図-1の②で考慮しているバッファー時間の計算のもととなっている標準偏差に関して、現在想定している全分散(図-2①)を基にした標準偏差による信頼区間ではなくて、A6、A8それぞれの利用群の級内分散(図-2②)をもとに標準偏差を算出し、群毎に時間間隔を求め、群の重み平均でスロット数を計算することができる。すなわち、従来のA6とA8間の級間分散(図-2②)を考慮する必要がなくなるのである。

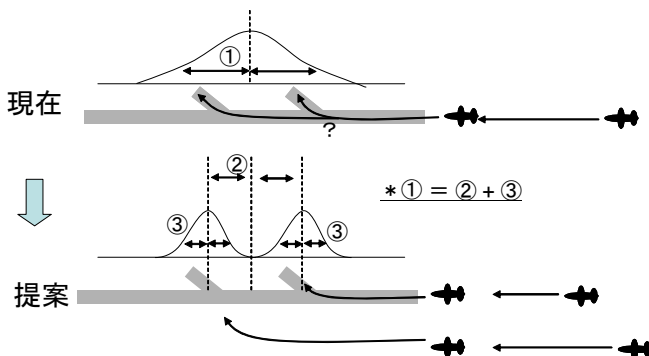


図-2 誘導路別セパレーションとバッファー計算の概念図

以上をもとに、国土交通省航空局より提供された2005年1月の着陸機の滑走路占有時間に関するデータ(羽田空港A滑走路34L着陸機の滑走路路上各地点の通過時刻を管制塔から調査員が目視で計測したデータ)を用い、実際に滑走路占有時間、処理容量を算出した結果を表-1に示す。従来ケースと比べて、誘導路別セパレーション設定を前提とした容量計算方式では、1時間当たり1機の処理容量の増加が認められた。

本方法以外にも、図-1に示した3区間の時間に関して、現行のように分離せず、合計時間を1つの確率変数として扱い、その全分散をもとに信頼区間を算出する方法も検討したが、紙面の都合上割愛する。

表-1 新たな算定方式による処理容量の試算結果(国土交通省航空局計測データ(04, 05年)を元に算出)

	占有時間+バッファー(秒)			処理容量(回/h)	
	計算式	04年11月データ	05年1月データ	04年11月データ	05年1月データ
従来ケース(全変動)	$t_1+t_3+E(t_2)+c\sigma(t_2)$	120.89	119.66	29.78	30.08
新ケース(級間変動なし)	$t_1+t_3+E(t_2)+c(w_6\sigma_{A6}(t_2)+w_8\sigma_{A8}(t_2))$	113.65	115.84	31.68	31.08

*式中記号の定義は表-2を参照

表-2 誘導路別基礎統計量(国土交通省航空局計測データ(04, 05)を元に算出)

基礎統計量	記号	観測値	
		04年11月データ	05年1月データ
A6誘導路利用率	W6	0.54	0.59
A8誘導路利用率	W8	0.46	0.41
A6の t_2 平均(秒)	$E_{A6}(t_2)$	50.54	53.13
A6の t_2 標準偏差(秒)	$\sigma_{A6}(t_2)$	5.30	6.05
A8の t_2 平均(秒)	$E_{A8}(t_2)$	62.70	62.44
A8の t_2 標準偏差(秒)	$\sigma_{A8}(t_2)$	6.77	7.13
全サンプルの t_2 平均(秒)	$E(t_2)$	56.11	56.96
全サンプルの t_2 標準偏差(秒)	$\sigma(t_2)$	8.76	7.96
信頼区間を与える係数	c	2.60	2.60

3. 複数滑走路を対象とした空港容量拡大方法に関する分析(羽田再拡張後を対象として)

3.1. 空港容量算定シミュレーションの概要

まず、筆者らの先行研究²⁾で開発を行った空港容量算定シミュレーションの概要と本研究における改良点を述べる。

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、ミクロに再現し、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。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。シミュレーション内の離着陸航空機は、基本的に表-3に示す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、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。詳細なアルゴリズムについては文献2)を参照されたい。本研究での主な改良点は、滑走路占有時間や誘導路選択確率等の航空機挙動に関して、航空局提供データ(2005)を活用し、機材や誘導路別の占有時間を詳細に再現し、また、現状の着陸容量30回/時をもとにシステムのキャリブレーションを行った。

表-3 シミュレーション内の航空機が取るべき安全間隔(出典:「管制方式基準⁴⁾」国交省航空局を元に作成)

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

3.2. 容量拡大のための滑走路運用方法の検討

2.2における単一滑走路の新たな運用方法を踏まえ、複数滑走路の特徴を考慮し、滑走路間のインタラクション、エアラインによるターミナル使用、機材の特徴を考慮した滑走路運用に着目した新たな空港運用方式として以下の4つの運用方式について提案し、それぞれを組み合わせた4つのシナリオについて分析する。その際、Aラン、CランにおいてはILS、PRMによる独立運用がなされているものと仮定した。

a)滑走路運用方法

[運用方式0]:誘導路別管制による滑走路運用

2.2で述べた、先行機の使用誘導路別に、後続機のセパレーションを設定する。

[運用方式1]:Cラン離着陸交互運用

羽田空港の再拡張後は、Cランが離着陸共用になり、またCラン着陸機はDラン離陸機とも依存関係になる(図-3参照)。国交省で公表している本運用方法において、どの程度まで離着陸回数が上げられるかを分析する。基本的に1本の滑走路を離着陸共用にした場合、離着陸を交互に繰り返した方が容量が大きくなるため、本ケースでは、Cランへの着陸と着陸の間に、Cランからの離陸とDランからの離陸が行えるようにCラン着陸のセパレーションを機材別に制御する。

[運用方式2]:使用ターミナル別着陸滑走路運用(図4)

前述の通り、滑走路占有時間を短縮することで滑走路容量が増加できる。占有時間を短縮する一つの方法は、なるべく手前の誘導路を使用して滑走路から離脱させることである。この観点からみると、着陸後にスポットインするターミナルの位置が重要な要素となる。羽田空港第2ターミナル供用前後のAラン離脱誘導路の使用比率をみると、Aランと反対側にある第2ターミナルに向かう着陸機が機材に関係なくA8誘導路を使う傾向が強くなった(A8の方がスムーズに反対側に移動できるため)。現状では基本的に着陸滑走路が1本しかないため無理であるが、再拡張後は、AランとCランによる着陸が行われるため、第1ターミナル使用エアラインの機材はAラン着陸、第2ターミナル使用エアラインの機材はCランに着陸させることを仮定することにより、着陸滑走路と逆サイドへのタキシングを極力抑え、滑走路占有時間の低減及び、空港容量の増加が図れると考えられる。

シミュレーションの設定では、本シナリオを模擬した場合は、誘導路A6とA8及び誘導路C7とC8の使用割合を、現状(2005年)のAラン着陸データのうち第1ターミナル使用エアラインのみを抽出した場合の使用割合とした(A6、C7の使用確率が約10%向上する仮定)。

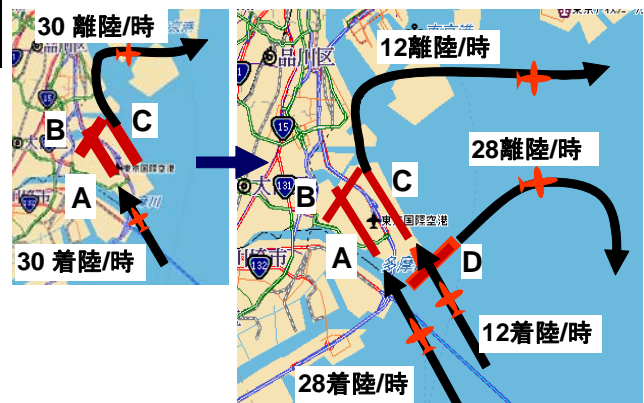


図-3 羽田空港の現在(左)と再拡張後(右)の運用方法と離着陸回数(再拡張後は国交省公表の予定回数)

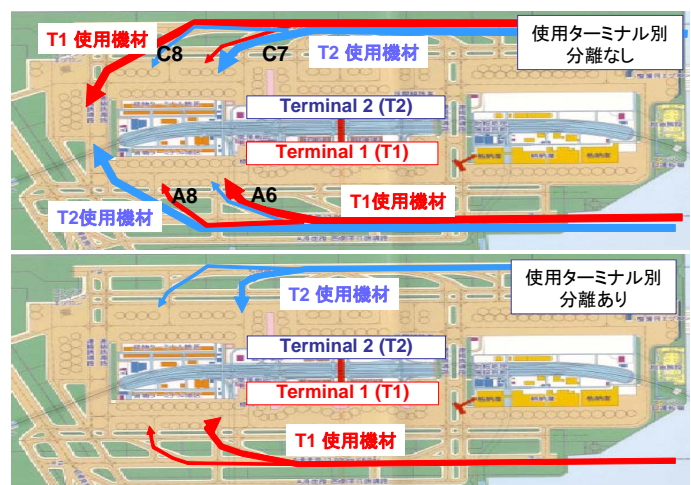


図-4 着陸滑走路の使用ターミナル別分離運用の概念図

表-4 シナリオ別空港容量のシミュレーション結果

Scenario		MLIT	Base	1	2	3
(運用方式0):誘導路, 機材別管制		—	○(A)	○(A)	○(A)	○(A)
(運用方式1):Cラン離着陸交互運用		—	—	○	○	○
(運用方式2):滑走路のエアライン別運用		—	—	—	○	○
(運用方式3):滑走路の機材別運用		—	—	—	—	○
空港容量 (回 / 時)	Aラン着陸	28.0	30.0	30.1	30.2	32.1
	Cラン着陸	12.0	10.8	19.0	19.0	18.2
	Cラン離陸	12.0	20.0	24.9	24.8	25.4
	Dラン離陸	28.0	20.4	24.9	25.1	25.4
	着陸TOTAL	40.0	40.9	49.1	49.2	50.3
	離陸TOTAL	40.0	40.4	49.8	49.8	50.7

[運用方式3]: 着陸滑走路の機材別分離運用

運用方式1においてCラン着陸機の間にはCランからの離陸とDランからの離陸を行うためには、Cランのセパレーションを広げる必要がある。そのため、セパレーションが後方乱気流や滑走路占有時間だけでなくCラン着陸機とCラン離陸機、Cラン着陸機とDラン離陸機のインタラクションによって決まる。その結果、機材別管制によるセパレーションの短縮が行い難くなる。これらを踏まえ、Cランには後方乱気流間隔の大きい大型機を着陸させ、Aランには後方乱気流間隔の小さい小型機を着陸させることにより、Aラン着陸機の容量拡大を図る。

b)分析シナリオ

シミュレーションでは、前述の運用方式を下記のように組み合わせた場合の容量について分析した。

シナリオ0: 運用方式0を想定 (BASE)

シナリオ1: 運用方式0+運用方式1を想定

シナリオ2: 運用方式0+運用方式1+運用方式2を想定

シナリオ3: 運用方式0+運用方式1+運用方式2+運用方式3を想定

3.3. 分析結果

それぞれのシナリオを実施した場合の空港容量のシミュレーション結果を図8に示す。なお、シミュレーションの前提として、離陸機と着陸機の数と同数となるようにしている。シミュレーション結果より、シナリオ1の場合の容量の増加が大きいことがわかる。通常、1本の滑走路で離着陸機を同時に扱う場合には離着陸機を交互に入れた場合に容量が最大化できる。Baseシナリオでは、Cランの離着陸機は交互に入っておらず、着陸機が何機も続くといったような非効率な運用を想定した場合である。国土交通省が公表している羽田再拡張後の容量は、このBaseシナリオとほぼ同程度となっている。実際には、到着・出発機の発生時間間隔には時間帯によって濃淡があり、離着陸を完全に交互に入れることは困難であり、さらに、これまでの羽田空港では基本的には存在しなかった、1滑走路の離着陸共用運用にするとともに、その滑走路への着陸機と交差する形でDランから離陸させる

という、若干高度な管制業務となるなど、将来的な様々な不確実性を考慮して、ある程度の安全率を設けて容量設定をしているものと思われる。本シミュレーションで推定される容量の値は、あくまで理想的な状況を想定しているため、現実世界で達成可能な容量よりも過大推計をしていることもあり得る。また、

その他のシナリオについてはシナリオによる空港容量増加の効果はシナリオ1に比べると大きくはなかった。しかしながら、将来の需要の逼迫の状態を考えると1時間当たり1機の容量の増加は大きな意味を持つてくると考えられる。そのため、今後空港運用の工夫による積極的な空港容量の増加を模索していく必要があると考えられる。

4. おわりに

本研究では羽田空港を対象とし空港容量拡大方法に関して基礎的な分析を行った。まず、単一滑走路を対象として、機材サイズの特徴を考慮した最終進入中のセパレーションコントロールによる容量拡大を、統計的な空港容量算定方法により算出した。その結果、1時間当たり1回の容量を増加することが可能であることを示した。続いて、複数滑走路間の離着陸機のインタラクションなどを考慮した容量拡大方策について分析を行い、特に離着陸共用滑走路の運用の効率化による容量拡大の可能性を示した。

今後の課題としては、機材別の滑走路運用などを行うために必要となる空域における対応やエアラインのスケジューリングに関する検討、離着陸機の発生間隔に濃淡をつけた場合や時間帯別の離着陸比率を考慮した容量分析などが挙げられる。

末筆ではあるが、本研究を遂行するにあたり、国土交通省航空局管制保安部管制課より基礎的データの提供を頂いた。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 運輸省航空局他: 空港処理容量に関する調査報告書, 1999.
- 2) 平松健志, 平田輝満, 屋井鉄雄: 空港容量算定シミュレーションの開発と容量拡大効果に関する研究, 運輸政策研究, 2006 (登載決定).
- 3) 福岡空港の総合的な調査 PI レポートステップ 1<詳細版> <http://www.fukuokakuko-chosa.org/> (福岡空港調査連絡調整会議 WebPage).
- 4) 国土交通省航空局, 「管制方式基準」, 鳳文書林出版販売.
- 5) 国土交通省航空局, 「AIP-JAPAN」.