

羽田空港における着陸順序と滑走路選択の最適化による 滑走路処理容量の拡大

齋藤 和哉^{*1} 鈴木 昌和^{*2}

Expanding Runway Capacity at Haneda Airport by Optimizing Landing Order and Runway Selection

by

Kazuya SAITO^{*1} and Masakazu SUZUKI^{*2}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Jun. 17, 2025)

Abstract : In this research, we propose a new operational method to alleviate the problem of runway capacity pressures at Haneda Airport caused by congested air traffic. We aim to improve runway capacity by optimizing the sequence of landing aircraft and runway selection while taking into account wake turbulence control separation, and by minimizing landing intervals. Tabu search was used as the optimization method. Simulation results showed that the optimization increased the landing runway capacity by approximately 19% to 37 aircraft per hour, and the maximum number of takeoffs increased by up to 22%. This showed that the number of takeoffs and landings per hour could be expanded from the current maximum of 90 to a minimum of 95 and a maximum of 99. As secondary effects, a reduction in fuel consumption due to shorter flight times and a reduction in delays due to airborne waiting are also expected.

Keywords : Air Traffic Management, Tokyo International Airport, Runway Capacity, Landing Order and Runway Selection Optimization

1. 緒論

1.1 背景

航空需要は年々増加が見込まれ、すでに現在ではコロナ禍前の2019年を上回る利用者数となり、日本のグローバル化に伴って今後さらに利用が増加することが予想される。そのためアジア地域の東端に位置する日本で、都心からほど近い羽田空港では、24時間運用可能な空港として世界各国から日本へのインバウンド需要、または北米とアジア各国への乗り継ぎ需要に対応し、国内線の要としても羽田空港の機能増強が必要である。

羽田空港では2026年度に第1ターミナルのサテライト新設が予定されており²⁾、駐機スポットの増設計画はあるものの、滑走路増設の議論は活発ではなく、このままでは離発着を増やすことはできず、発着枠の拡大は見込めない。発着枠を左右する要素の一つに滑走路処理容量があり、これは1時間あたりに1つの滑走路が処理可能な発着機数を指す。羽田空港においてこの滑走路処理容量は羽田容量算出方式と呼ばれる方法に基づき、航空機の滑走路占有時間（以下 ROT : Runway Occupancy Time）を基準として算出される。着陸機の ROT は、着陸機が滑走路端の1NM手前に到達してから滑走路を完全に離脱するまでの時間を指し、羽田空港では現在115秒と設定されている。この基準に基づき、着陸専用滑走路の滑走路処理容量は1時間あたり31機と算出される。滑走路処理

容量をさらに増加させるためには、ROTの短縮が有効である。しかし、ROTを短縮すると、後続機は先行機の発生させる後方乱気流の影響を受ける危険性が生じる。後方乱気流は大型航空機が発生させる渦状の空気の流れであり、後続機の操縦性に大きな影響を及ぼすため、航空機同士の安全な間隔を確保する必要がある。これを後方乱気流管制間隔と呼び、Table 1の航空機の重量や翼幅で定まる後方乱気流区分（ICAO (International Civil Aviation Organization, 国際民間航空機関) 航空機7区分）の、先行機と後続機の組み合わせによって決定される（Table 2）。羽田空港において滑走路処理容量の増加を実現するためには、後方乱気流の影響を考慮しつつ、ROTを短縮することが有効である。

羽田空港の滑走路運用は、風向きに応じた方面別滑走路運用が採用されている。航空機の離着陸は向かい風になるように滑走路を使用するのが基本である。風向きに応じた運用形態として、本研究では15:00から19:00のうち3時間に使用される北風新経路と南風新経路での滑走路運用（以下、北風/南風運用）を対象とし、簡単のため北風・南風に限らず15:00から18:00をピーク時間帯と仮定する。Fig.1, Fig.2に北風運用、南風運用の場合の滑走路運用の模式図を示す。北風運用では、着陸機は滑走路34L（以下 RWY34L）と滑走路34R（以下 RWY34R）を使用し、離陸機は滑走路05（以下 RWY05）と RWY34Rを使用する。北海道や東北、北米などの北方面からの着陸機は RWY34R を、東南アジアや西日本などの南西方面からの着陸機は RWY34L を使用する。一方、南風運用で

*1 工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻学士課程

*2 工学部航空宇宙学科航空操縦学専攻教授

は、北方面からの着陸機は滑走路 16R（以下 RWY16R）を、南西方面からの着陸機は滑走路 16L（以下 RWY16L）を使用し、離陸機は滑走路 22（以下 RWY22）と RWY16R を使用する。

このような羽田空港特有の事情を考慮しながら、制限のある滑走路運用においても滑走路を最大限に活用し、発着枠を拡大可能な方法を検討することが求められる。

Table 1 Wake turbulence category
(ICAO aircraft 7 categories)³⁾

Category	Maximum takeoff weight M [kg]	Wingspan s [m]
A	$136,000 \leq M$	$74.68 < s \leq 80$
B		$53.34 < s \leq 74.68$
C		$38.1 < s \leq 53.34$
D	$18,600 < M < 136,000$	$32 < s$
E		$27.43 < s \leq 32$
F		$s \leq 27.43$
G	$M \leq 18,600$	—

Table 2 Wake turbulence control separation [NM]³⁾

		Wake turbulence category for following aircraft						
		A	B	C	D	E	F	G
Wake turbulence category for leading aircraft	A	3	4	5	5	6	6	8
	B	3	3	4	4	5	5	7
	C	3	3	3	3	3.5	3.5	6
	D	3	3	3	3	3	3	4
	E	3	3	3	3	3	3	4
	F	3	3	3	3	3	3	3
	G	3	3	3	3	3	3	3

1.2 研究目的

本研究では羽田空港における発着枠の拡大方法を検討し、増加する航空需要に対応することを目的とする。そのために、現在羽田容量算出方式で定められている着陸機の最低間隔に着目し、間隔を短縮した場合の後方乱気流による影響を考慮した上で着陸順序と滑走路選択を最適化し、滑走路処理容量の増加を実現可能な運用方法を提案する。これにより、羽田空港の発着枠の拡大を図る。

具体的には、羽田空港での北風新経路および南風新経路での運用において、15:00 から 18:00 の 3 時間に着陸する航空機について、後方乱気流管制間隔を考慮して着陸順序と使用滑走路を最適化することによって、着陸専用滑走路（北風運用での RWY34L と南風運用での RWY16L）の滑走路処理容量を増加させ、次節で詳述する相互従属運用で干渉し合う航空機を減らすことにより、羽田空港の発着枠を拡大する運用方法を提案する。その際、滑走路処理容量の増加のみを追及することにより特定機の遅延が拡大しないよう、東京進入管制区入域（Fig.3 の青枠）から滑走路端到達までの飛行時間の全機合計の短縮と上空待機等による遅延の抑制も考慮した最適化を行う。

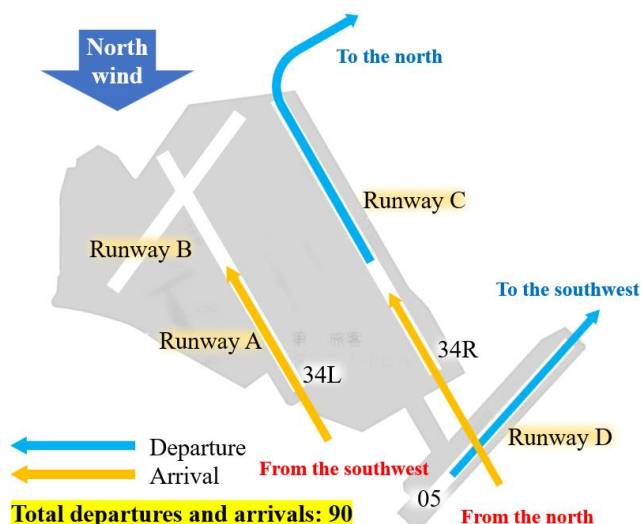


Fig.1 Runway operation for the new north wind route

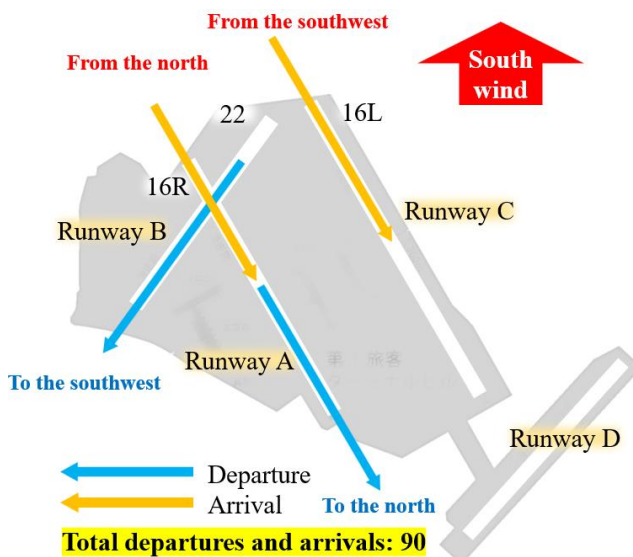


Fig.2 Runway operation for the new south wind route

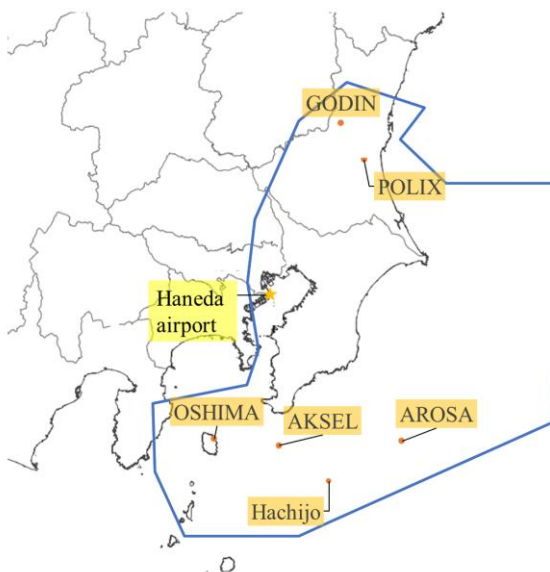


Fig.3 Tokyo approach control area⁴⁾ and entry points

1.3 論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。第2節では羽田空港の滑走路運用の現状と課題を説明する。第3節では本研究で提案する施策とそれにより目標とする増便数を明らかにする。第4節では問題設定と研究方法について述べる。第5節では離陸機の増便を目標とした滑走路の効率的な運用方法を提案し、増便可能な離陸機数を算出する。第6節では着陸機の増便を目標とした滑走路の効率的な運用方法を提案し、増便可能な着陸機数を算出する。これら増便可能な離着陸機数を明らかにすることにより、発着枠を拡大する運用方法を示す。

2. 羽田空港の滑走路運用と課題

2.1 方面別滑走路運用

羽田空港では、風向きや目的/出発地の方面、時間帯に応じて滑走路を使い分ける運用が行われている⁵⁾。2020年3月29日からは混雑時間帯における滑走路処理容量の向上を目的として、都心上空を通過する新経路が運用開始された。

北風運用では RWY34L は着陸専用、RWY34R は離着陸共用、RWY05 は離陸専用であるが、RWY05 離陸機は RWY34R 着陸機が RWY05 上空を通過するまで離陸できず、RWY34R 着陸機は RWY05 に離陸機がいる場合は着陸できない相互従属運用となっている。相互従属運用では離陸と着陸の処理可能機数がトレードオフの関係となるため、羽田空港では RWY34R の着陸機数によって RWY34R と RWY05 の離陸機数が変化する。最も効率の良い運用をした場合では発着枠は 90 回となる⁵⁾。

南風運用では一部の欧米方面への離陸機を除き RWY16L は着陸専用、RWY16R は離着陸共用、RWY22 は離陸専用であり、RWY16R と RWY22 は相互従属運用となっている。最も効率の良い運用をした場合、発着枠は 90 回となり、北風時と同数の発着枠を確保している⁵⁾。

2.2 管制間隔⁶⁾

管制官が航空機同士の安全な間隔を確保するために設定する最小間隔を管制間隔と呼ぶ。管制間隔は Fig.4 に示すように、航空機の飛行経路に対して前後（縦）方向、左右（横）方向、上下（垂直）方向の 3 次元で定義される。この間隔の基準は、ICAO が示す指針に基づき決定される。国内では、レーダーで監視可能な空域において、航空路管制では 5NM 以上、空港周辺のターミナル管制では 3NM 以上の縦横間隔を確保するというレーダー間隔が適用されている。

2.3 後方乱気流管制間隔⁶⁾

後方乱気流の影響を考慮し、航空機ごとの安全な間隔を確保するために、従来航空機をその最大離陸重量に合わせて 4 つの区分に分類し、飛行の順序によって後方乱気流管制間隔を規定していたが、近年ではこれまでの後

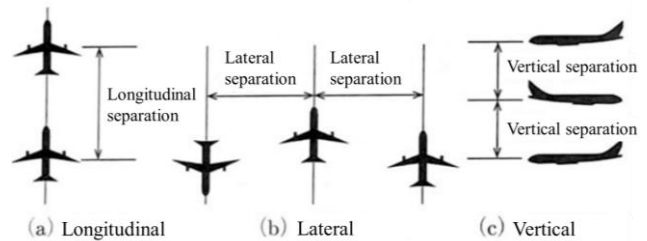


Fig.4 Types of separation⁶⁾

方乱気流管制間隔を短縮する新しい基準が適用されつつある。日本でも ICAO が新しく定める RECAT (wake turbulence re-categorization) の適用を進めている。Table 1 に示すように、ICAO の新基準では、航空機の最大離陸重量と翼幅によって 7 つの区分に細分化し、例えば A 区分の航空機の後に B 区分の航空機が飛行する場合は 4NM、C 区分の航空機が飛行する場合は 5NM というように管制間隔を定めている。数値の規定がない場合には、ターミナル管制におけるレーダー間隔である 3NM が適用される。

また実際の運用では、安全性を確保するために、定められた管制間隔に加えて一定のマージンを考慮する必要がある。日本のように管制支援システムが導入されていない場合は 18.0 秒のマージンを必要とする。

2.4 羽田容量算出方式⁷⁾

羽田空港における滑走路処理容量は、羽田容量算出方式に基づいて決定され、特に着陸専用滑走路の処理容量は着陸機の ROT を基に算出される。2007 年までは Fig.5 に示すように、ROT は滑走路を 3 つの区間に分割して定義され、以下の各区間の時間要素で構成されていた。

[1] t_1 : 滑走路進入端手前 1NM 地点の通過から滑走路進入端までの飛行時間。この区間では着陸復行の指示とその対応に要する時間が含まれ、実測値に安全率を加味して 27 秒と設定。

[2] t_2 : 滑走路進入端から滑走路縁を通過するまでの時間。実測値の平均は 57 秒であるが、着陸機の 99.5% が安全に着陸できるようバッファ値を加え、76 秒と設定。

[3] t_3 : 滑走路縁から停止線を超えるまでの時間。これは実測時間に安全率を考慮し、15 秒と設定。

これらの時間を合計すると、ROT は 118 秒となる。これを基に着陸専用滑走路の処理容量を算出すると、毎時 30 機となる。2007 年 9 月以降、 t_2 と t_3 の合計を 1 つの確率変数として扱う新たな考え方が導入され、着陸機 1 機あたりの ROT が 115 秒に短縮されたことで、着陸専用滑走路の処理容量は毎時 31 機に増加している。

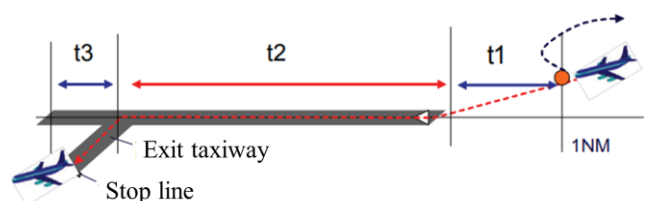


Fig.5 Landing aircraft handling time division⁷⁾

欧米の主要空港と比べて羽田空港の ROT は長く、ROT が飛行中の管制間隔よりも滑走路処理容量に大きな影響を及ぼしている。これは羽田空港において大型機の割合が高いことや、誘導路のレイアウトなどが要因とされる。

2003 年時点では ROT が 124.5 秒であり、後方乱気流管制間隔（最大 120 秒）を上回っていたため、ROT がボトルネックとなっていた。しかし 2007 年 9 月以降は ROT が 115 秒まで短縮され、120 秒を下回ったことで、今後の着陸機数の増加においては、ROT と後方乱気流管制間隔の両方の観点から滑走路処理容量を検討する必要があるとされている。

3. 効率的な滑走路運用を目指した施策

本研究では、羽田空港における着陸専用滑走路の着陸間隔に重点を置き、本節で示す施策により、着陸専用滑走路の滑走路処理容量を増加させることで羽田空港の発着枠を拡大することを目指している。着陸専用滑走路の滑走路処理容量を増加させることは、単に着陸機数を増加させるだけでなく、離陸機に干渉する離着陸共用滑走路への着陸機を減らすことで離陸機の増便も可能とし、結果として羽田空港の発着枠を拡大させる可能性がある。よって以下では、着陸専用滑走路の滑走路処理容量を増加することにより羽田空港発着枠の拡大を図る。

3.1 滑走路占有時間（ROT）の短縮

羽田容量算出方式では、着陸機の最小間隔が 115 秒で設定されているが、実際には間隔が 60 秒程度であった例や、着陸専用滑走路の着陸機数の実績値が毎時 34 機となった例もあるなど、間隔短縮に余地があることが議論されてきた⁸⁾。そこで本研究では、Fig.5 における t_1 、 t_2 および t_3 に関して、CARATS Open Data⁹⁾の空港面データで ROT の見直しをし、航空保安業務処理規程第 5 管制業務処理規程¹⁰⁾に従い、最小着陸間隔の緩和を検討した。短縮の考え方は以下のとおりである。

[1] t_1 の短縮：近年では航空機の性能向上に伴い、一定の着陸速度での進入が可能となっていることから、本研究では航空機の着陸速度(V_L)を航空機のサイズごとに設定し、後方乱気流区分が B の機体では 270km/h、D の機体では 260km/h、E の機体では 250km/h とする。 t_1 にあたる滑走路進入端 1NM 地点から滑走路進入端までの飛行時間は、対象機の 99%が時間内にこの区間を通過可能となるようカテゴリーD の機体の着陸速度を用いて 26 秒と設定し、従来よりも 1 秒の短縮を行う。

[2] t_2 の短縮：CARATS Open Data の空港面データから、2019 年 11 月 15 日の航空機の滑走路進入端から滑走路縁離脱までの平均時間を計算したところ、51 秒であった。この平均時間を 1.33 倍し、本研究では t_2 を 68 秒とする。従来よりも 8 秒の短縮となる。

[3] t_3 の削除：航空保安業務処理規程第 5 管制業務処理規程において、連続着陸の場合の後続到着機が滑走路に進

入できるのは「先行到着機が滑走路縁を離脱して停止位置標識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。ただし、当該機が滑走路縁を離脱後、停止位置標識を遅滞なく通過できると判断した場合は、当該機が滑走路縁を離脱したことを目視により確認したとき。」と定められている。よって後続機の着陸許可は、先行機が滑走路縁を離脱することで発出することができる。実際にはこの時点では後続機は最小間隔の場合においても滑走路端 1NM 手前に存在することになるため、本研究では t_3 を削除する。

以上より本研究では羽田容量算出方式を見直し、ROT を t_1 と t_2 のみで計算する。よって着陸機 1 機あたりの ROT は $26+68=94$ 秒となる。

3.2 着陸順序と使用滑走路の最適化

ROT を短縮すると、最終進入飛行中の安全間隔がボトルネックとなる。ICAO の基準では後方乱気流管制間隔は Table 2 のようになり、先行機と後続機の後方乱気流区分が同じである場合や、後続機の機体サイズが大きい場合の最低間隔は 3NM である。一方、先行機の後方乱気流区分が B で、後続機が D の場合は 4NM の間隔が必要となる。後続機が D の場合、着陸間隔は 3NM または 4NM が必要となり、D の着陸速度 260km/h を用いると 3NM は 77 秒、4NM は 103 秒となる。着陸間隔はこれに先述のマージン 18 秒を加えた 95 秒および 121 秒となる。後続機が E の場合、その着陸速度 250km/h を用いて 3.5NM は 112 秒、5NM は 152 秒の着陸間隔となる。これは、先行機と後続機の組み合わせによって、航空機同士の間隔に差があることを示し、この組み合わせを最適化し最小の間隔を維持することによって時間あたりの着陸機数が増え、滑走路処理容量の拡大につながる。

本研究では前項の ROT の短縮と着陸機の着陸順序と使用滑走路の最適化によって着陸間隔を 95 秒に維持することで、着陸専用滑走路の処理容量は毎時 $3600/95=37.89$ 機と計算できるので、現状の毎時 31 機から最大で毎時 37 機まで増加させることを目標とする。

4. 最適化問題の設定と最適化手法

4.1 着陸順序と滑走路選択最適化の対象

本研究では 15:00 から 18:00 の 3 時間において、着陸専用滑走路の処理容量向上の可能性を評価する。最適化の対象は 14:40 から 18:00 に東京進入管制区に入域する航空機であり、入域時刻で 20 分ごとに区切って 10 のグループに分け、各グループに対して最適化を行う。東京進入管制区は Fig.3 の青枠で定義され、青枠内に航空機が進入することを入域とする。最適化を行う時刻は、各グループの先頭機の入域時刻直前とし、シームレスな最適化が行えるよう、入域済の直前グループから着陸時刻が遅い 5 機も最適化対象として再最適化を行うものとする。各 20 分間の最適化対象機数を n と表す。

4.2 決定変数の定義と飛行時間の算出法

最適化における決定変数は、 n 機の着陸順序を示す順列 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ とそれぞれに対する使用滑走路 (0 または 1) の選択 $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ である。ここで、 $y_i = 0$ では航空機 i は着陸専用滑走路（北風時 RWY34L, 南風時 RWY16L）を使用することとし、 $y_i = 1$ では離着陸共用滑走路（北風時 RWY34R, 南風時 RWY16R）を使用することとする。すなわち決定変数とその選択肢は

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad x_i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \mathbf{y} &= (y_1, y_2, \dots, y_n), \quad y_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

本研究では、入域ポイント通過直後より初速度から等減速度で着陸速度まで減速して着陸する方式を線形減速アプローチと呼ぶ。ただし、入域直後からの減速で実運用時のアプローチ飛行時間より長くなる場合（北風運用時の GODIN, POLIX, 南風運用時の OSHIMA, AKSEL, POLIX, AROSA）は、入域後一定時間は初速度を継続する。以下では、最短経路長 $L_{P_i, y_i}^{\min}$ を線形減速アプローチにより着陸した場合の着陸時刻を最短着陸時刻 $T_{S,i}$ とする。 $T_{S,i}$ は各入域ポイント P_i から滑走路までの最短経路長 $L_{P_i, y_i}^{\min}$ (Table 3) を用いて式(1)で求める。

$$T_{S,i} = \frac{L_{P_i, y_i}^{\min}}{\frac{1}{2}(V_{0,i} + V_L)} + T_{E,i} \quad \dots (1)$$

$L_{P_i, y_i}^{\min}$ は必ず通過されるとされるウェイポイントを用いて算出した。 $V_{0,i}$ は航空機 i の入域速度、 V_L は航空機 i の着陸速度、 $T_{E,i}$ は航空機 i の東京進入管制区入域時刻である。

Table 3 The shortest route length $L_{P_i, y_i}^{\min}$ [km]

		Runway in use y_i			
		34L	34R	16L	16R
Entry point P_i	OSHIMA	141.2	154.1	295.9	318.1
	AKSEL	178.3	180.5	341.2	363.3
	GODIN	226.8	208.4	211.2	197.8
	POLIX	317.8	299.4	328.1	314.7
	AROSA	231.6	221.5	385.2	407.3
	Hachijo	154.3	165.1	317.2	347.9

4.3 決定変数と着陸時刻の関係

各航空機の着陸時刻は、直前に同じ滑走路を使用する航空機の着陸時刻に必要な時間間隔を加えた時刻である。決定変数 $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ と航空機 i の着陸時刻 $T_i(x_i, y_i)$ との関係は式(2)で表される。

$$T_i(x_i, y_i) = T_{x_i-k}(x_i - k, y_{x_i-k}) + I_i \quad \dots (2)$$

ここで I_i は着陸間隔を表し、先行機 $(x_i - 1)$ の後方乱気流区分が自機(i)よりも大きい場合、Table 2 に示す着陸間隔を適用する。具体的には 3.2 項で算出した、3.5NM では 112 秒、4NM では 121 秒、4.5NM では 152 秒の着陸間隔を空けるものとする。一方、先行機の後方乱気流区分が自機と同じか小さい場合は、レーダー管制間隔である 3NM の 95 秒の着陸間隔を適用する。ただし、式(2)の計

算によって得られる時刻よりも最短着陸時刻 $T_{S,i}$ の方が遅い場合は、 $T_{S,i}$ を着陸時刻とする。また、各滑走路に最初に着陸する航空機の着陸時刻は、最短着陸時刻 $T_{S,i}$ とする。すなわち $y_i = y_{x_i-k}$, $T_{S,i} < T_{x_i-k}(x_i - k, y_{x_i-k}) + I_i$, $x_i \geq 2$ を同時に満たす最も小さな k を用いて $T_i(x_i, y_i)$ を算出する。

4.4 評価関数の定義

本研究では、(1) 着陸専用滑走路のすべての着陸機が 95 秒間隔で着陸して着陸機数が最大となる毎時 37 機となり、(2) 各機の入域後平均飛行時間が 18 分 40 秒となり、(3) 各機の平均遅延時間が 2 分となるという 3 条件を同時に実現する状態を理想状態とする。この理想状態にどれだけ近いかを評価するための各グループに対する最適化問題における最小化すべき評価関数を式(3)で定義する。

$$\begin{aligned} J(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= 50 \left\{ \frac{T_{L1}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - T_{L2}}{C_1(n - n_1 - 1)} - 1 \right\} \\ &+ 10 \left[\frac{1}{C_2 n} \sum_{i=1}^n \{T_i(x_i, y_i) - T_{E,i}\} - 1 \right] \\ &+ \left[\frac{1}{C_3 n} \sum_{i=1}^n \{T_i(x_i, y_i) - T_{S,i}(y_i)\} - 1 \right] \quad \dots (3) \end{aligned}$$

式(3)右辺の第 1 項は評価関数の主要項となる着陸専用滑走路を使用する着陸機 1 機あたりの使用時間であり、これを最小にすることで滑走路処理容量を拡大させる。理想状態の条件(1)が満たされるとき、第 1 項は 0 の値となる。第 2 項では航空機の入域後の飛行時間が過度に長くないように調整している。航空機 i の入域後の飛行時間は、算出された着陸時刻 T_i から設定値として与えた入域時刻 $T_{E,i}$ を差し引いて求める。理想状態の条件(2)が満たされるとき、第 2 項の値は 0 となる。第 3 項では航空機の遅延時間が過度に大きくならないように調整している。航空機 i の遅延時間は、算出された着陸時刻 T_i から、最短着陸時刻 $T_{S,i}$ を差し引いて求める。理想状態の条件(3)が満たされるとき、第 3 項の値は 0 となる。

各項の重み係数は、評価関数各項のスケールが同等となるように調整し、 $\{50, 10, 1\}$ とした。 $C_1 = 1.273 \times 10^{-3}$, $C_2 = 1.296 \times 10^{-2}$, $C_3 = 1.389 \times 10^{-3}$ は、各項が理想状態で 1 となるように値を定め、更に理想状態で各項が 0 になるように 1 を引いている。

T_{L1} は着陸専用滑走路に最後に着陸する航空機の着陸時刻で、 T_{L2} は着陸専用滑走路が使用可能となる時刻とする。 T_{L2} は第 1 グループの最適化では 15:00 と設定し、第 2 グループ以降では前グループの最適化で着陸順序が決定した最後の航空機の着陸時刻の 95 秒後とする。 n_1 は 20 分間の対象機数 n のうち離着陸共用滑走路を使用する機体数であり、残りの $n - n_1$ 機が着陸専用滑走路を使用する。これを制約条件として課して着陸滑走路選択の最適化を行う。 n , n_1 , $T_{E,i}$ は設定値として与えるものとする。

4.5 タブーサーチ

本研究ではメタヒューリスティクスの一つであるタブ

一サーチを最適化手法として用い¹¹⁾、決定変数 (x, y) の最適化を行う。タブーサーチは近傍解の探索を繰り返し、探索履歴をタブーリストに一定期間記憶する。このタブーリストに含まれる解は選択しないことで局所最適解に陥ることを避け、探索の停滞を防ぎながら広範囲の探索を実現する。本研究では終了判定条件として最大反復回数を 100 回とし、タブーリストのサイズを 100 とする。

タブーサーチの近傍解は、決定変数 x または y のいずれか一方の要素を入れ替えることによって生成する。着陸順序 x については、異なる 2 便を選択しその順序を入れ替える。 n 機に対して着陸順序に関する nC_2 個の近傍解が生成される。使用滑走路 y については、着陸専用滑走路と離着陸共用滑走路に振り分けられた航空機の中から 1 機ずつ選び、その要素を入れ替える。離着陸共用滑走路に着陸する n_1 機に対して使用滑走路に関する $n_1(n-n_1)$ 個の近傍解が生成される。したがって近傍解の個数は合わせて $nC_2 + n_1(n-n_1)$ 個である。具体的な n_1 の値は、5 節および 6 節で詳述するように目的に応じて設定される。

5. 実データに基づく最大離陸機数

本節では 2019 年および 2022 年に実際に羽田空港に着陸した航空機のデータを用いて、着陸専用滑走路を最大限に活用した際の離陸機の増便可能性を検討する。ここでは離陸機と従属関係のある着陸機数 n_1 を 1 時間あたり 6 機に制限し、最適化によって着陸専用滑走路を効率的に運用する。この結果、着陸機数を維持しつつ離陸機と干渉する着陸機数を削減できるため、その際の増便可能な離陸機数を明らかにする。

5.1 評価対象とする着陸機の設定値

対象とする着陸機の設定値（便名、後方乱気流区分、 P_i, TE_i, V_{Qi} ）は CARATS Open Data から取得し、コロナ禍前に発着枠が最大限に活用されていた時期（2019 年）とコロナ禍後に需要が回復した時期（2022 年）の設定値を選定した。また実際の運用（北風・南風）、および天候等を考慮し、8 日分の設定値を対象とした。対象とした日付と条件を Table 4 に示す。本研究では特定の日付と運用条件（北風・南風）を考慮し、与えられた設定値（便名、後方乱気流区分、 P_i, TE_i, V_{Qi} ）に基づいて評価をおこなう単位をシナリオと表現する。各シナリオ（No.1 から No.8）について設定値を取得し、それぞれ 3 時間の着陸機数を算出した。設定値と解(x, y)を式(2)に代入することで各航空機 i の着陸時刻が順に決定され、各時間帯に着陸する航空機をカウントして着陸機数を算出する。

5.2 着陸機数の算出結果

Table 4 に、対象とする各シナリオにおける実運航時の着陸機数(A)、羽田容量算出方式に基づく着陸機数(B)、ROT 短縮による着陸機数(C)、および ROT 短縮と最適化

を組み合わせた着陸機数(D)を示す。

Table 4 Comparison of the data and the calculated number of landing aircraft for each scenario

No.	Date	WD	(A)	(B)	(C)	(D)
			L_O/L_S	L_O/L_S	L_O/L_S	L_O/L_S
1	2019/8/17	S	87/34	87/36	102/18	106/19
2	2019/8/13	S	79/33	74/33	86/18	93/13
3	2019/12/12	N	84/37	85/37	100/18	105/19
4	2019/12/9	N	88/32	87/32	100/18	106/16
5	2022/8/19	S	87/34	85/35	99/18	106/20
6	2022/8/20	S	79/35	79/36	95/18	102/13
7	2022/12/7	N	87/29	86/29	96/18	102/15
8	2022/12/11	N	83/38	82/38	96/18	103/18
Average			84/34	83/35	97/18	103/17

WD(Wind Direction)は風向きによる滑走路の運用状況（N：北風運用，S：南風運用）を表す。 L_O は着陸専用滑走路の着陸機数を、 L_S は離着陸共用滑走路の着陸機数を示す。(A)は実運航時の着陸機数、(B)は羽田容量算出方式に基づいて算出した着陸機数、(C)は ROT を短縮した時の着陸機数、(D)は ROT 短縮と着陸順序と滑走路選択を最適化した時の着陸機数である。

5.2.1 実運航時および羽田容量算出方式の場合

3 時間に着陸した航空機数を実運航時の着陸時刻から算出し (Table 4 (A))、その場合と同じ設定値を用いて、着陸間隔を 115 秒以上とする羽田容量算出方式に基づき着陸機数を算出した (Table 4 (B))。両者の間に大きな差異はないことが確認された。

5.2.2 滑走路占有時間 (ROT) を短縮した場合

$n_1 = 6$ と制限し、ROT を 94 秒に短縮したことによって得られた結果を Table 4 の(C)で示す。具体的には、着陸順序 x は入域時刻順とし、遅延の大きい順に毎時 6 機の着陸機を選択して離着陸共用滑走路に着陸させ、それ以外の着陸機を着陸専用滑走路に着陸させるものとした。着陸間隔は 4.3 項に示した通りである。

従来の羽田容量算出方式と比較すると、最大で管制間隔が 20 秒短縮されるため、着陸専用滑走路の処理機数は増加した。しかし、この制限下では ROT を短縮しても、実運航時の着陸機数(A)および羽田容量算出方式(B)における合計着陸機数には達せず、着陸に使用する 2 本の滑走路の合計処理容量は減少することが分かった。

5.2.3 着陸順序と使用滑走路を最適化した場合

ROT 短縮に加え、着陸機の順序と使用滑走路の最適化を行い、5.2.2 と同様の制限下で離着陸共用滑走路の着陸機数を抑えたときの着陸専用滑走路の着陸機数を算出した。その結果を Table 4 の(D)に示す。 $n_1 = 6$ の場合でも、ROT 短縮と着陸順序と使用滑走路の最適化を組み合わせることで、実運航時や羽田容量算出方式と同程度、また

はそれ以上の着陸機数を確保できることが分かった。

また、羽田容量算出方式に基づいて決定した着陸時刻における着陸機の平均飛行時間は 28 分 08 秒であり、ROT 短縮と着陸順序と使用滑走路の最適化により決定した着陸時刻での着陸機の平均飛行時間は 27 分 00 秒であった。したがって、飛行時間は約 4.3%短縮した。

Table 4(D)の離着陸共用滑走路着陸機数において、18 時以降に着陸した航空機は着陸機数としてカウントしていない。 $n_1 = 6$ としたので 1 回の最適化対象 20 分間では 2 機であり、よって本来 10 回の最適化で離着陸共用滑走路の着陸機数は 20 機となるが、離着陸共用滑走路の着陸機が最大 5 機、再最適化の対象となるため、離着陸共用滑走路着陸機数の 3 時間の合計は 20 機以下となり、最小で 13 機の場合もある。

5.3 ROT 短縮と最適化による離陸機数の評価

本節では離陸機に干渉する着陸機数を減らすことで離陸機の増便数を検討することを目的としたので、5.2.3 で示した最適化結果を基に各シナリオにおける離陸枠の変化を評価した。まず、羽田容量算出方式に従い、離着陸共用滑走路着陸機の着陸時刻から、2 本の離陸滑走路での最大離陸可能機数を算出した。最大離陸可能機数は、離着陸共用滑走路着陸機の着陸時刻 $t_{L,i}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n_1$) を基に、1 機の離陸時間（離陸許可から離陸地点まで）を 62 秒、連続離陸の間隔を 95 秒とする羽田容量算出方式に従って求めた。最大離陸可能機数は、2 機の着陸時刻の間隔 $t_{L,i+1} - t_{L,i}$ を 95 秒で割った商、すなわち何機分の ROT を確保できるかをカウントして算出する。ただし、最後の時間枠が 62 秒以上の場合、次の着陸機が接近する前に離陸が完了するため、その時間枠は最大離陸可能機数としてカウントする。

Table 5 の(A)には、各シナリオの実運航時の着陸時刻から算出した最大離陸可能機数を示している。また、ROT 短縮と最適化により着陸専用滑走路に着陸する航空機を増加させた場合の最大離陸可能機数を(B)に示している。最も効率の良い滑走路運用を行った場合、羽田容量算出方式によると離着陸共用滑走路に着陸する航空機は毎時 13 回、離陸枠は 46 回であった⁵⁾。実運航時の離着陸共用滑走路着陸機の着陸時刻から算出した最大離陸可能機数 (Table 5 の(A)に示した 3 時間あたり 164 機から 178 機) と、実際の離陸機数の毎時 46 回を比べると、最大離陸可能機数の約 8 割が離陸枠として使用されていることが分かる。さらに、ROT 短縮と最適化により算出された離着陸共用滑走路着陸機の着陸時刻を基に最大離陸可能機数を算出したところ、最も増加数の少ない No.5 のシナリオでは 3 時間の最大離陸可能機数が従来の 172 機から最適化後には 194 機へと増加し、3 時間で 22 機 (1 時間あたり 7.3 機) の増加となった (13%増加)。また、最も増加数の多い No.8 のシナリオでは、従来の 164 機から最適化後には 200 機へと増加し、3 時間で 36 機 (1 時間で 12 機) の増機となった (22%増加) (Table 5 の No.5 および No.8

の(D))。

増加が最小で毎時 7.3 機、最大で 12 機であることから、最大離陸可能機数の約 8 割が実際に使用されると仮定すると、毎時 6 回から 10 回の離陸枠の増加が可能である (Table 5 の(E))。したがって、現状の離陸枠 46 回にこれを加えることで、離陸枠は最小 52 回、最大 56 回まで増加可能であることが分かった。また ROT の短縮により、理論上の着陸専用滑走路の着陸機数は 37 機となり、 $n_1=6$ としたため、着陸機数の合計は 43 機となる。これにより、発着枠は現状の 90 回から少なくとも 95 回、最大 99 回まで増加可能であることが示された。以上より、離陸機のピーク時間帯において、ROT 短縮と着陸順序および使用滑走路の最適化が発着枠を増加させることが明らかとなった。

Table 5 Changes in number of takeoff slots

No.	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
1	171	207	36	12	9.6
2	170	201	31	10.3	8.24
3	175	202	27	9.0	7.2
4	166	195	29	9.7	7.76
5	172	194	22	7.3	5.84
6	173	208	35	11.7	9.36
7	178	207	29	9.7	7.76
8	164	200	36	12	9.6
Average	171	202	31	10.2	8.2

(A)は実運航時の着陸時刻から算出した最大離陸可能機数、(B)は最適化後の着陸時刻から算出した最大離陸可能機数、(C)は(A)と(B)の差によって得られる 3 時間の増加機数、(D)は(C)を 3 で割った 1 時間あたりの増加機数、(E)は(D)に 0.8 を乗じた増便可能な離陸機数を示している。

6. 増便時の最大着陸機数

本節では従来 1 時間あたり 35 便程度であった到着機数を 1 時間あたり 50 便に増便した仮想の時刻表に対応した設定値リストを作成し、この時刻表を用いて、離陸機に影響を与えない着陸専用滑走路を最大限に活用した場合の着陸機の増便可能性について検討する。ここでは ROT を 94 秒に設定し、離陸機と従属関係のある着陸機数 n_1 を、1 時間あたり 12 機に設定する。

6.1 作成した設定値

増便に伴う設定値（便名、後方乱気流区分、 P_i 、 $T_{E,i}$ 、 $V_{0,i}$ ）のリストを、2 つのパターンで作成した。パターン 1 では、後方乱気流区分“B”の機体数を全体の 40%，“D”の機体数を 60%と設定した。この比率は、第 5 節で取得した 2022 年のデータに基づく機体サイズ構成比率をほぼ維持しつつ、1 時間あたり 50 便に増便した場合を模擬するものである。一方、パターン 2 では後方乱気流区分“B”の機体数を 40%，“D”の機体数を 40%，“E”の機体数を 20%

と設定した。この比率は、人口減少や国内のビジネス需要の縮小に伴い航空機の小型化が進んだ 2040 年代を想定し¹²⁾、1 時間あたり 50 便に増便した場合を模擬するものである。

6.2 着陸順序と使用滑走路を最適化した時の着陸機数

増便パターン 1 のシナリオにおける最適化結果を Table 6 に示す。最適化の結果、RWY34L での着陸機数は理論上の最大値である毎時 37 機となった。 $n_1=12$ と設定したので、2 本の着陸滑走路の合計着陸機数は 1 時間あたり 49 機となった。これは、羽田容量算出方式と比較して、最大着陸機数が 5 機増加可能であることを示しており、着陸順序と滑走路選択の最適化によって着陸機数を増便可能なことが確認できた。

Table 6 Number of landing aircraft in Increased Flight Pattern 1

	34L	34R	Total
Number of landings in 3 hours	111	36	147
In the 15:00 hour	37	11	48
In the 16:00 hour	37	14	51
In the 17:00 hour	37	11	48

増便パターン 2 のシナリオにおける最適化結果を Table 7 に示す。さまざまな機体サイズの航空機が着陸する場合、組み合わせによっては最大 152 秒の間隔を必要とする (3.2 項)。しかし、このような場合でも、RWY34L での着陸機数は理論上の最大値である毎時 37 機となり、今後航空機の小型化が進んだ場合でも、1 時間あたりの最大着陸機数が羽田容量算出方式に比べて 5 機増加可能なことが確認できた。

Table 7 Number of landing aircraft in Increased Flight Pattern 2

	34L	34R	Total
Number of landings in 3 hours	111	36	147
In the 15:00 hour	37	14	51
In the 16:00 hour	37	14	51
In the 17:00 hour	37	8	45

6.3 ROT 短縮と最適化による着陸機数の評価

本節では ROT の短縮と着陸順序と滑走路選択の最適化によって、着陸専用滑走路の 1 時間あたりの着陸機数が 37 機に増加可能であることを確認した。 $n_1=12$ としたため、着陸機数の合計は 49 機に増加可能である。離陸機数の 46 機に変化はないので、発着枠は 95 回に増加可能であることが示された。また、パターン 1 およびパターン 2 の両方で、着陸機の機体サイズ構成比率に関わらず、着陸専用滑走路では最大の滑走路処理容量を達成した。これにより、ROT 短縮と着陸順序と滑走路選択の最適化が、着陸機数を増加させることが明らかとなった。

7. 結言

7.1 まとめ

本研究では羽田空港における航空機需要の増加に対応するため、可能な滑走路占有時間の短縮を想定した上で着陸機の順序と使用滑走路を最適化することで、滑走路処理容量の向上を図った。その結果、5 節、6 節に示したように、発着枠は現状の 90 回から 95 回、ないし 99 回に増加可能なことが示された。また、到着機の進入管制区入域後の飛行時間は約 4.3% 短縮された。これにより消費燃料の削減や遅延低減といった効果も期待できる。

7.2 今後の展望

本研究では離陸機のピーク時間帯と着陸機のピーク時間帯を想定し、5 節では離着陸共用滑走路の着陸機数を従来の約半数に制限した場合の離陸機の増便可能性を、6 節では離陸機数に影響を与えずに着陸機の増便可能性を検討した。ただし、5 節で示した離陸機の最大機数や 6 節で示した着陸機の最大機数は、着陸機のための最適化結果に過ぎず、離陸機と着陸機のバランスを考慮した最も効率的な滑走路運用を実現するには、さらに複雑な計算と膨大なデータ解析が必要となる。また、東京進入管制区入域後の限られた空域で着陸順序と使用滑走路を入れ替えることを想定しているため、実運用では管制業務がさらに煩雑化する可能性や飛行ルート設計に課題が生じることが懸念される。さらに、着陸間隔を現行よりも短縮する提案を含むことから、実機を用いた安全性の検証が最優先課題となる。

今後は、提案手法の安全性や運用上の実現可能性を詳細に検証し、管制官の負担軽減を図るとともに、柔軟かつ効率的な運用を実現するための仕組みの構築が求められる。本研究の知見が羽田空港における運用改善や発着枠の拡大に貢献することが期待される。

参考文献

- 1) 日本空港ビルディング：旅客ターミナル利用実績 <http://www.tokyo-airport-bldg.co.jp/result/index.html> (2024 年 9 月 19 日閲覧)
- 2) Aviation Wire：第 1 ターミナル北側サテライトが 26 年夏開業 <https://www.aviationwire.jp/archives/300162> (2024 年 9 月 19 日閲覧)
- 3) ICAO, Procedures for Air Navigation Services – Air Traffic Management, Doc 4444, 16th Edition, November 2020. https://www.enri.go.jp/jp/event/enri_seminar/doc/2023/g9.pdf (2025 年 3 月 30 日閲覧)
- 4) 国土交通省航空局：AIS JAPAN (Japan Aeronautical Information Service Center), 東京進入管制区 <https://ais.japan.mlit.go.jp/Login.do> (2024 年 10 月 3 日閲覧)
- 5) 国土交通省航空局：羽田空港のこれから <https://www.>

- mlit.go.jp/common/001088928.pdf (2025 年 3 月 14 日閲覧)
- 6) 伊藤恵理：航空交通管理システム概論，コロナ社（2023）
- 7) 平田輝満ほか：羽田空港再拡張後を対象とした滑走路容量算定方法と容量拡大方策に関する研究 https://trans.civil.ibaraki.ac.jp/hirata/ip2009aki_haneda.pdf (2025 年 3 月 14 日閲覧)
- 8) 国土交通省航空局：羽田空港発着容量の考え方について，<https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/12/120613/10.pdf> (2025 年 3 月 14 日閲覧)
- 9) 電子航法研究所：CARATS Open Data 関連情報 https://www.enri.go.jp/jp/research/organization/atm/carats_open_data.html (2025 年 3 月 10 日閲覧)
- 10) 航空保安業務処理規程第 5 管制業務処理規程 https://www.japa.or.jp/wp-content/uploads/2022/02/japa_cab20220203_3.pdf (2025 年 3 月 14 日閲覧)
- 11) 最適化アルゴリズムを実装していくぞ(タブーサーチ) <https://qiita.com/pocokhc/items/7f2fb4ee8d83e08e842b> (2024 年 6 月 23 日閲覧)
- 12) JAL, A321neo 初導入 赤坂社長「人口減少は止めようがない」特集・767 国内線後継をなぜ小型化するのか <https://www.aviationwire.jp/archives/296971> (2025 年 1 月 3 日閲覧)