

航空機処理間隔の実績と突発的インシデントの影響を考慮した滑走路容量と遅延に関する研究

木下 恵太¹・平田 輝満²

¹非会員 茨城大学工学部都市システム工学科(〒316- 8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail: 16t5017h@vc.ibaraki.ac.jp

²正会員 茨城大学大学院准教授 都市システム工学専攻(〒316- 8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

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

本研究では、混雑空港の滑走路処理容量の算定に使用されるパラメータについて、飛行場面を含む航空機の走行・飛行軌跡データを活用した航空機処理間隔の実績値の分析から再検証分析を行った。また、滑走路処理容量について、継続的需要を仮定した極限容量と、交通需要の時間的な粗密度と遅れ時間を考慮した実用容量の両面から評価するとともに、バードストライクなどの一時的な容量低下が生じる突発的インシデントの影響を考慮したバッファ容量の必要性についても考察を行った。また、バードストライクの発生実態に関して、WEB公開されている飛行軌跡データから、一定期間、調査を行い、その発生頻度や航空機遅延への影響を把握した。

Key Words : *runway capacity, actual inter-arrival/departure time, bird-strike*

1. はじめに

我が国では現在、空港の発着枠数（スロット数）は、滑走路システムに対して常に離着陸機が待機しているような継続的な需要を仮定した際の容量である極限容量（ultimate capacity, または飽和容量 saturation capacity, 最大処理容量 maximum throughput capacity などとも呼ばれる）を計算する方法に基づき決められている。そこには航空機の処理間隔に関わる多数のパラメータが用いられており、一部パラメータには仮定値が用いられている。一方で、国土交通省により 2018 年に我が国で初めて飛行場面のデータを含む飛行航跡データ CARATS Open Data が公開され、上記の一部パラメータの定量的把握が、最新の運用状況を考慮しつつ、可能となった。

また、実用上の交通容量（空港でいえば発着枠数）や海外空港における発着枠数の決め方としては、一般的に、極限容量と、許容する平均遅延量を考慮した実用容量（practical capacity）が使用される¹⁾。同じ極限容量であっても交通需要の時間的なバラつきや濃淡によって、実際に処理できる交通量は異なり、生じる遅延量も異なる。羽田空港のように複数の滑走路を有する場合は容量が滑走路ごとに分割されるため、分割された容量への交通需要配分の仕方によっても、滑走路システム全体の処理機数と遅延時間は異なる。したがって、周辺空域を含む滑走路シ

ステムの適正な容量値や需要管理を含む運用効率化策などを分析する上では、遅延時間を考慮した容量分析が必要と考える。

また、空港の滑走路運用においては、一時的に容量低下が生じるようなインシデントが発生する。インシデントの種類は大小様々である。大規模なものでは、地震等の自然災害による構造物への被害などが挙げられ、比較的長期に渡り容量に影響を与えるが、その発生頻度は低い。一方で、鳥が航空機に衝突する事故「バードストライク」やエンジンオイルの漏れ、着陸時の衝撃によるボルトの脱落といったインシデントは、容量に与える影響は比較的短時間ではあるが高頻度で発生する。その他にも風向などの気象条件変化により滑走路の運用方式が 1 日の中でも複数回変更されることがあるが（例えば、北風運用か南風運用か）、その変更の際に一定時間の容量低下が生じる可能性もある。これまでも空港の発着枠を決める際に、遅延の時間的波及を吸収・抑制するための枠として、ある時間帯の交通量を低く制限するための「ファイアブレイク枠」というものを設定することがある。このような枠は「バッファ容量」として機能し、航空システムの安定性や定時性に寄与する。このようなバッファ容量の効果・必要性を分析するためにも、遅延時間を考慮した「実用容量」の視点で容量評価を行う必要がある。特に、空港の発着枠を決定する際には、大規模・低頻度のインシデントは考慮できないと考えるが、定

時性へのニーズが比較的高い我が国においては、小規模・低頻度のインシデントの遅延に対する影響については一定程度考慮する必要があると考える。

空港容量や遅延に関する研究として、平田ら²⁾³⁾は最適な離着陸容量配分による遅延軽減効果や羽田空港を対象に井桁上の滑走路配置を考慮したモンテカルロシミュレーションによる容量算定の構築を行っている。国土交通省では、空港容量算定方式に関する調査⁴⁾において、諸外国との比較検討や離着陸データの分析により、空港容量算定方式の妥当性の検証をしている。しかし、いずれも上記の要素を考慮した研究は未だ行われていない。今後増加を続ける航空需要に対応するためにも総合的な視点から滑走路容量の評価手法について検討をする必要がある。

以上の背景を踏まえ、本研究では羽田空港における航空機処理間隔の実態を飛行軌跡データから統計的に分析するとともに、その実態をもとに既存の滑走路容量算出に使用されている各種パラメータの妥当性を検証することを目的とした。さらに、実用容量の観点では、新たにバードストライクの発生実態と航空機遅延に与える影響を調査し、それら突発的インシデントの影響を考慮したバッファ容量についても考察を行うことを目的とした。

2. 羽田空港における滑走路運用の概略

羽田空港は4本の滑走路があり、大きく分けると北風運用と南風運用の2つの方式で運用されており、南風運用時の方が容量制約が厳しい⁵⁾。図-1に示すとおり、南風運用時はB・D滑走路が到着専用、A・C滑走路が離陸機専用で運用され、限られた空域で離着陸機の輻輳を避け、安全に空中で誘導処理するために基本的に飛行方面別に使用滑走路が限定されている。また、D滑走路着陸機（以後D着陸）とA・C滑走路離陸機（以後、A・C離陸）が相互従属運用となっているため、D着陸の間にA・C離陸を処理することになるが、D着陸の間隔設定とA・C離陸の交通量に応じて、滑走路全体でみると処理効率上のロスが一定程度は発生してしまう。

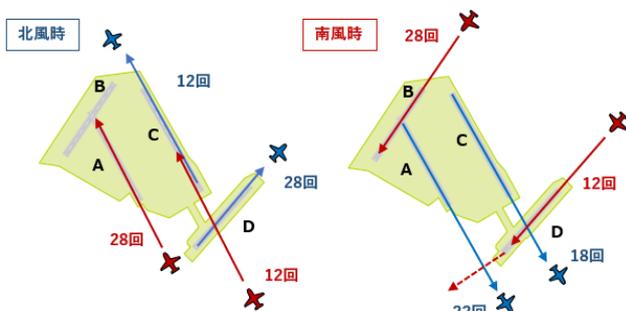


図-1 再拡張後の滑走路運用と時間容量

表-1 分析データの概要

【1】 期間	2017/04~2018/03 (各月1週間分)
【2】 機材	大型・中型の2機材とする。ただし、B76はANA国内線のみ中型とする。比率は、後方乱気流区分でHeavy:Mediumを5:5とした(現状と同じ)
【3】 分析 滑走路	【単一滑走路の連続離陸・連続着陸】 連続離陸: D05, 連続着陸: B22 【南風時A・C離陸とD着陸】 A/D: A16R/D23, C/D: C16L/D23
【3】 分析 時間	下記の混雑時間帯(需要が密な時間帯)を対象とした。 D05: 7時~13時, B22: 17時~19時 A/D: 8時~14時, 15時~21時 C/D: 7時~14時, 16時~19時, 20時

3. 既存の滑走路容量算定方法の概要

ここで、最も基本となる単一滑走路における着陸専用と離陸専用の処理容量について以下に述べる。我が国では着陸が連続する場合の滑走路容量は、図-1のように滑走路を3分割して定義されている処理時間をもとに算出されている⁶⁾。

- [1] t1: 滑走路進入端手前 1NM の通過時間であり、実測値をもとに 27 秒の定数を設定(ここで、1NM という区間は、前後機の安全間隔が不足しそうな場合に後続機に着陸のやり直し、つまり着陸復行を指示するために必要な余裕区間距離として仮定)
- [2] t2: 滑走路進入端から滑走路縁を横切るまでの時間であり、実測時間の平均値 57 秒にバッファ値 (2.6σ) を加えた 76 秒
- [3] t3: 滑走路縁から停止線を横切るまでの時間を、実測時間に安全率を加えた 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着陸機1機当たりの処理時間は118秒となり着陸容量は3600秒/118秒≒30.5機/時となる。また、2007年9月より、t2とt3の合計時間を1つの確率変数とする新たな考え方で到着容量が31回/時(1機当たり処理時間115秒)に増加している。その後、羽田再拡張時(D滑走路供用開始時)には最終進入経路の運用制約などを考慮して28回/時と設定されたが、2014年7月の国土交通省航空局「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」における滑走路処理能力の再検証によって30~31回/時であることが示されている⁵⁾。

次に、離陸が連続する場合の容量について、滑走路を以下のように3分割して考えている。

- [1] t1: 後続の離陸機が離陸許可を受け、離陸開始するまでに必要な時間を一律として15秒
- [2] t2: 離陸滑走を開始して離陸地点又は1800m点のいずれか遠い方を通過する時間として実

測値の平均の 35 秒

- [3] t3: 先行出発機が離陸位置から 2NM の区間を通過する時間（後続離陸機への出発待機解除に必要な時間として計算上仮定）を一律として 45 秒

以上より、1機当たりの処理時間は 95 秒となる。先行機が Heavy 機の場合は後方乱気流間隔の 120 秒を採用し、先行機が Medium 機の場合は上記処理時間を採用するため、羽田空港の以前の機材比率 Heavy : Medium=7 : 3 を仮定すると 1 機当たりの平均処理時間は、 $120 \times 0.7 + 95 \times 0.3 = 112.5$ 秒となり離陸処理容量は $3600 \text{ 秒} / 112.5 = 32$ 回/時となる。

4. 分析データの概要と航空機処理間隔の実態分析

本章では、極限量算定のための最低処理間隔の分析を行う。2017 年度各月計 12 週間分の羽田空港の飛行場面を走行する全航空機の軌跡データ CARATS OPEN DATA（約 1 秒ピッチの航跡位置と機材種別データ）から離着陸時刻、使用滑走路の推計を行い、それをもとに航空機処理間隔の分析を行った。従来の滑走路処理容量算定においては、前章で紹介した通り、後続着陸機への復行指示に必要な余裕距離や、後続離陸機に離陸許可を发出できる地点をあらかじめ仮定し、それに基づいて 1 機の占有する区間を決め、その区間を通過する時間を占有時間として計測・仮定することで滑走路処理容量を算定していた。本研究の分析では、あらかじめ 1 機が占有する区間を決めることなく、実際の航空機の処理間隔を直接計測することで、実際の処理能力に近い容量値を算定しようとするものである。これにより、従来の方法と本研究の方法で共通して使用する区間については最新の軌跡データからその占有時間を更新するとともに、前述のようなあらかじめ仮定していた幾つかの区間の妥当性について分析を行うことを狙いとしている。

分析に使用したデータの概要と、航空機処理間隔の分析にあたっての主要な条件設定について表-1 に示す。詳細を以下で述べる。

(1) 離着陸及び使用滑走路判別

離着陸の判別として、着陸機の接地前後の速度が約 135kt⁷⁾であることから、データの誤差を考慮して各便の冒頭の連続するデータが 130kt 以上の便を着陸とし、それ以外を離陸とした。また、使用滑走路の判別は各便の通過位置から行った。

(2) 航空機処理間隔の定義

航空機処理間隔の分析をするにあたり、平田ら³⁾による複数滑走路における航空機処理間隔の考え方を参考に分析を行った。羽田空港は井桁状の滑走路配置であるため、複数滑走路が従属関係となり、複数滑走路を 1 つの系として処理容量を考える必要が

ある。

具体的には連続 3 機の真ん中の機の占有時間を T_{ijk} とする（先行機から $i, j, k = \{A, C, D\}$ とし、A・C 滑走路離陸機を A・C、D 滑走路着陸機を D とする）。また、「A 離陸と D 着陸」と「C 離陸と D 着陸」をそれぞれ 1 つの系と考える（以下、AD 系、CD 系）。それぞれの系において、同時に 1 機のみしか使用が許されないため、どちらか一方の機（A または D、C または D）のみが使用している（占有している）と考える。この占有時間が最低処理間隔と同義であり、本研究ではこの占有時間・最低処理間隔を実際の処理間隔から同定することとした。なお、平田らと同様に、C 離陸機後の D 着陸機への占有権の移行は CD 交点で、D 着陸機あとの C 離陸機への占有権の移行は D 着陸の着陸確認時点とした（A 離陸と D 着陸も同様の考え方）。

以上の考え方をもとに、ある系を使用する連続する 3 機を仮定し、その真ん中の機（例えば C 離陸機 → D 着陸機 → C 離陸機の場合は D 着陸機）について、当該系の占有時間を算出する。また、基本的にはデータの精度も考慮し、個々の数値は切り上げている。

以下、代表的な組み合わせについて、占有時間の考え方について説明する。

(3) 航空機処理間隔の実態分析

a) 連続離陸の占有時間の考え方 T_{ccc}

C 離陸の占有時間（最低処理間隔）として基本的には前後の航空機を対象に滑走路進入端（以下、進入端）を通過した時刻差とする。また、図-2 は 2017/07/10 ~ 2017/07/14, 2017/08/14 ~ 2017/08/18 の CARATS DATA から作成した 1 時間あたりの平均発着回数を示している。本研究では、まずは極限量を算定するための最低処理間隔を同定するため、なるべく交通量が多く、需要が密な時間帯のデータを使用した。具体的には、離陸および着陸についての航空局計画容量値である 40 回/時を超過する時間帯を混雑時間帯と定義し、この混雑時間帯を対象に分析を行った。

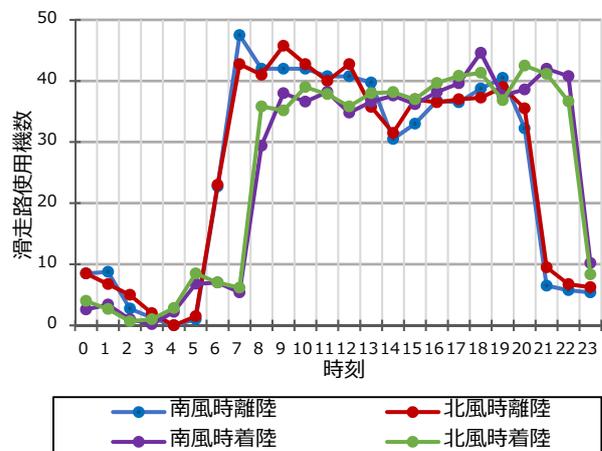


図-2 時間帯別の平均発着回数

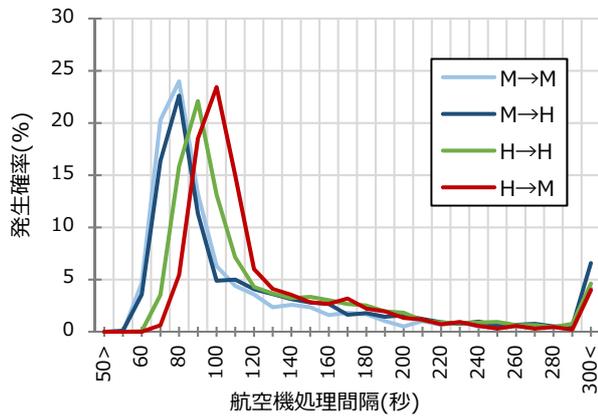


図-3 連続離陸時の処理時間の分布

表-2 連続離陸時の処理間隔時間の結果

先行機/当該機	処理時間 (当該機進入端通過時刻 - 先行機滑進入端通過時刻)			
	M→M	M→H	H→H	H→M
平均値 (秒)	86.1	86.6	95.4	102.2
最大値 (秒) : 仮定値	120	120	120	120
最小値 (秒)	60	55	67	72
中央値 (秒)	84	84	94	102
標準偏差 (秒)	12.3	12.8	10.7	9.6
サンプル数	2635	1963	1584	1950

表-3 飛行距離の算出結果

先行機/後続機	後続機に離陸許可を発出した時点の飛行距離(NM) : 推計値			
	M/M	M/H	H/H	H/M
平均値	1.6	1.5	1.9	2.2
最大値	3.2	3.3	3.3	3.7
最小値	0.2	0.3	0.8	0.7
標準偏差	0.6	0.6	0.5	0.5
サンプル数	1176	351	266	666

さらに、従来の考え方では後方乱気流間隔の時間間隔をもとに最大でも 120 秒間隔で航空機を処理すると仮定しており、図-3 より実績の離陸処理間隔でも 120 秒以下のデータが多数で、最大の後方乱気流間隔が適用される Heavy 機 (H) →Medium 機 (M) の処理順序においても最頻値が約 100 秒であることから、本研究では 120 秒以上のデータは需要が疎で間隔が間延びしていると仮定し、それらデータは分析から除外して集計した。この点についての考え方の妥当性については今後の課題としたい。

離陸機は地上で離陸待機することができることから、連続離陸の容量は処理間隔の平均値をもとに算定すればよい。表-2 は処理間隔の分析結果であり、従来の容量算定時の仮定 (先行機 Medium で 95 秒, 同 Heavy で 120 秒) よりも実際は処理間隔が短いことがわかる。一方で従来の手法により t1,t2,t3 区間のそれぞれについて占有時間の分析を行い、平均値で比較をしたところ、従来の仮定値と概ね同値となった。ここで後続機に対する離陸許可を発出した時点の離陸地点からの飛行距離に着目すると、従来の

設定距離 (2NM : 先行機 Medium の際) より短いことがわかる (表-3)。つまり、先行機が 2NM を飛行する以前に、実際には後続機に離陸許可を発出しており、それでも管制基準上の飛行中の最低距離間隔 (先行機 Medium では 3NM, H→H では 4NM, H→M では 5NM) が確保できていることが推測される。

b) 連続着陸の占有時間の考え方 T_{DD}

D 着陸の占有時間も連続離陸の考え方と同様に、前後の航空機を対象に進出端を通過した時刻差で計測し、図-2 の混雑時間帯を対象に分析を行った。

また、図-4 より実績の処理間隔では間延びしているデータがみられることから、データに含まれる誤差に起因した異常値や間延びした間隔データを除外するため、下位 2.5% および上位 2.5%、計 5% のサンプルデータについては集計から除外した。

表-4 連続着陸時の処理時間の結果

先行機/当該機	処理時間			
	M/M	M/H	H/H	H/M
平均値 (秒)	105.8	107.7	119.2	134.2
最大値 (秒)	146	155	178	169
最小値 (秒)	82	83	93	103
中央値 (秒)	105	105	117	133
標準偏差 (秒)	13.2	16.0	17.6	15.3
サンプル数	243	255	192	254
従来設定の所定区間の占有時間 ($t1+(t2 + t3 + 2.6\sigma)$)				
平均値 (秒)	100.2	101.8	107.9	108.9

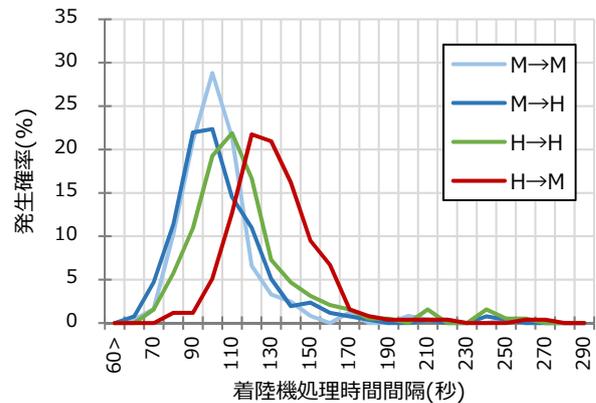


図-4 連続着陸時の処理時間間隔の分布

表-4 には、実績の着陸間隔の統計量および、従来の容量算定時に仮定していた所定区間の占有時間を今回のデータから算出した結果との比較を示している。ここから、従来の考え方における占有時間よりも、実際の処理間隔時間の方が大きい傾向があることが分かる。従来の容量算定では、先行機が滑走路の離脱地点である停止線を通じた時に、後続機は進入端から 1NM の距離にいることを仮定しているが、図-5 より実際には先行機が滑走路離脱時には後続機は 1NM 以上の距離にいることが多い。ま

た、その距離は Heavy, Medium 機の組み合わせによって大きく異なる。従来は、その組み合わせによる差異を考慮せず単一の占有時間から容量算定を行っていたが、当然ながら実際の管制は機材の組み合わせによって異なる後方乱気流間隔を適用して行われているため、滑走路の占有時間のみではなく、最終進入中の飛行間隔の基準についても考慮する必要がある。その考慮が不十分なため、結果として、従来仮定していた進入端手前 1NM 区間の仮定に乖離が生じる。以上のことから、本研究では、機材の組み合わせ別に処理時間間隔の実績値から容量算定を行い、その際に使用する値は平均の処理時間とした。従来の占有時間をもとにした考え方では、到着機が空中で停止待機できないため占有時間に一定のバッファを考慮していたが、今回は実際の処理間隔を直接観測しているため、処理容量としては平均値を用いることが妥当と考えた。

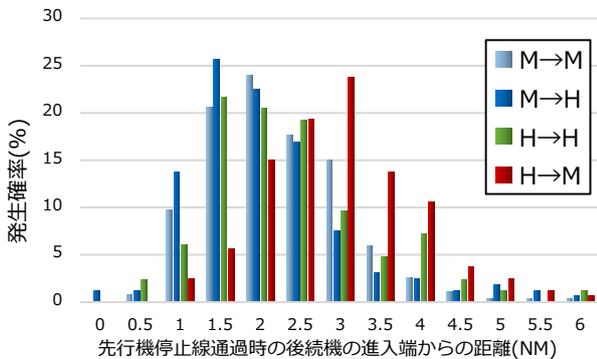


図-5 先行機が停止線通過時の、後続機の進入端からの距離

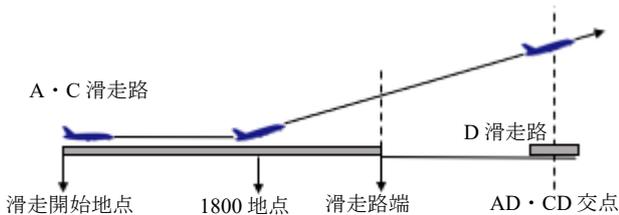


図-6 D着陸機に先行するA・C離陸機の占有時間の概要

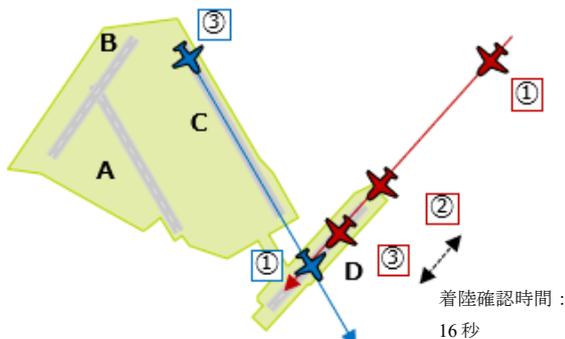


図-7 C離陸→D着陸→C離陸の場合の航空機処理間隔の分析概要

c) C 離陸と D 着陸間の占有時間の算出

(i) C 離陸 (前後は D 着陸) の占有時間 T_{DCD}

D 着陸に挟まれる C 離陸機の占有時間は T_{DCD} は、図-6 に示すように、その内訳の T_{DCD1} を「離陸許可～滑走開始」、 T_{DCD2} を「滑走開始～1800m 地点」、 T_{DCD3} を「1800m 地点～CD 交点」とする (A 離陸と D 着陸の場合は、 T_{DAD3} が「1800m 地点～AD 交点」となる)。このケースでは異なる滑走路間の処理間隔であるため、同一地点を通過する時間間隔で観測ができず、特定地点 (CD 交点) までの占有時間で処理間隔を定義した。また、C 離陸と D 着陸間の占有時間の算出をする場合、後続機が着陸機であるのでバッファを設定した占有時間を算出した (A 離陸と D 着陸も同様の考え方)。 T_{DCD1} を従来の容量算定と同様に 15 秒と仮定すると T_{DCD} は 100 秒となる。

一方で、A 離陸機については B 滑走路到着機への離陸ブラスト (ジェット噴射) の影響を考慮する必要がある。つまり、B 着陸機が A 離陸機の後方の一定区間を通過している間は、A 離陸機に離陸許可が出せないという制約が加わる。ここで、A 離陸機に離陸許可を発出してから、そのブラストが影響しないと想定される地点 (誘導路 A13 付近) まで離陸滑走を行うまでの時間を軌跡データから計測したところ、約 30 秒であった (離陸許可から滑走開始までのレスポンス時間 15 秒を含む)。この約 30 秒間は B 着陸機が A 離陸機の後方を通過しないように運用を行うため、逆に考えると B 着陸機の接近位置に従って、最大 30 秒程度は A 滑走路への離陸許可時間が遅れることとなる。なお、B 着陸の進入端から AB 交点までの通過時間は平均して約 20 秒程度であったことから、30 秒であれば B 進入端から 0.5NM 弱の地点に B 着陸が接近していたら A 離陸許可が出せないこととなる。以上の考察から、本研究ではブラストの影響による A 離陸許可遅れ時間については、0~30 秒の間で一様分布すると仮定し、その期待値として 15 秒を設定した (実際には上記 30 秒区間に B 着陸機が存在しないこともあるため、若干、安全側で評価していると考えている)。以上から、 T_{DAD} は算出した 98 秒にブラスト確認時間を加えて 113 秒となる。

(ii) D 着陸機 (前後は C 離陸) の占有時間 T_{CDC}

D 着陸機 (前後は C 離陸) の占有時間 T_{CDC} の算出方法として、図-7 をもとに説明する。まず、先行 C 離陸機が CD 交点を通過した時、先行 C 離陸機が H 機の場合は後続 D 着陸機との間に後方乱気流間隔が必要となり、最大で 5NM の距離間隔が必要となる。したがって、管制運用の条件が異なるため、機材の組み合わせ別に D 着陸機の占有時間 (C 離陸と D 着陸の間の処理時間間隔) を算出する。一方で、A 離陸機に後続する D 着陸機の占有時間 T_{ADA} については T_{CDC} の場合とは異なり、先行 C 離陸機の機材規模にかかわらずレーダー最低間隔 2NM が保持されていればよいから、AD 系の場合は算出したそれぞれの

機材の組み合わせの占有時間で最も大きい数値を共通の値として T_{ADA} として使用する。また、本研究では T_{CDC} を 2 区間に分割し、 T_{CDC1} を「先行 C 離陸機が CD 交点を通じた時刻～D 着陸機の滑走路進入端通過時刻」、 T_{CDC2} を「D 着陸機の滑走路進入端通過時刻～着陸確認時刻」として、 T_{CDC} を算出する。

T_{CDC1} の算出

図-8 は先行機が M である場合の処理間隔である。図-8 からわかるように、需要のばらつきや、D 着陸機の需要は平均して 1 時間あたり 12 機であることから、その間隔は連続着陸の最低間隔より比較的時間伸びし、分布が連続離陸・連続着陸の場合と比較して広範囲に分布していることがわかる。ここで、本章では極限容量のためのパラメータ値を探索しているため、基本的には運用上の最低間隔にあたる値を同定しようとしているが、本研究では最低間隔にあたる値を、データの誤差に起因する異常値や容量の過大評価を極力避けるために、データサンプルの 10%tile 値を最低間隔と定義して値を決めることとした。なお、図-8 では T_{CDC1} は発生確率が急激に上昇し始める値が 10%tile 値に該当している。この最低間隔の決め方の妥当性や精緻化については今後の課題としたい。また CD 系、AD 系の T_{CDC1} の算出結果は表-5 の通りとなっている。

T_{CDC2} の算出

T_{CDC2} は、D 着陸の滑走路進入端通過時刻から、後続の C 離陸～離陸許可時刻までの時間で定義できるが、軌跡データからは離陸許可時刻は計測できない。そのため、連続離陸の際と同様、離陸許可から離陸滑走開始までのレスポンス時間を 15 秒と仮定し、軌跡データから計測した離陸滑走開始時刻から離陸許可時刻を推計した。なお、連続着陸の際と同様、データに含まれる誤差に起因した異常値や間伸びした間隔データを除外するため、下位 2.5% および上位 2.5%、計 5% のサンプルデータについては念のため集計から除外した。表-6 より T_{CDC2} は平均値を切り上げて 16 秒と設定した。

d) その他の組み合わせにおける占有時間・処理時間間隔

連続する 3 機のその他の組み合わせにおける占有時間については、紙面の都合上、詳細は割愛するが、基本的な考え方は同様となる。例えば CD 系において「C 離陸→C 離陸→D 着陸： T_{CCD} 」の場合は前述の T_{DCD} と同じであり、「D 着陸→C 離陸→C 離陸： T_{DCC} 」の場合は離陸が連続する場合と同様となる。また、D 着陸が連続する場合、滑走路を離脱するまで占有時間となるので、例えば「C 離陸→D 着陸→D 着陸： T_{CDD} 」では T_{CDC1} に、滑走路進入端から滑走路（停止線）離脱までに要する時間として、分析により算出した 83 秒（2 機目が C 離陸（M 機）の場合は 75 秒）を足した値となる。全機材の組み合わせで、H 機と M 機も区別すると、各系での組み合わせはそれぞれ 64 通りとなる。詳細は割愛するが、

すべての組み合わせについて算出した占有時間の結果と先行研究との占有時間の差を比較すると、占有時間（処理間隔）が大きいもの、小さいものが混ざっているが、平均的には本研究で算出した値の方が小さい傾向にあることが分かった。詳細は学会発表時に報告したい。

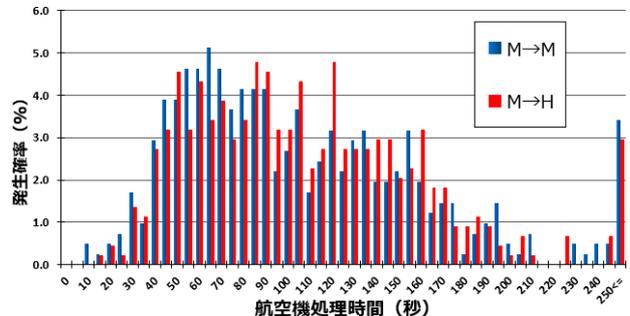


図-8 先行 C 離陸機が M の場合の T_{CDC1} 分布

表-5 T_{CDC1} の算出結果

先行機/後続機		処理時間 (当該機滑走路進入端通過時刻 -先行機 CD(AD)交点通過時刻)			
		M/M	M/H	H/H	H/M
CD 系	10%tile 値(秒)	40	37	58	70
	サンプル数	410	439	211	320
AD 系	10%tile 値(秒)	38	31	36	36
	サンプル数	374	230	101	228

表-6 T_{CDC2} の算出結果

先行機/後続機	T_{CDC2} : 着陸確認時間 (C 離陸機管制指示時刻-D 着陸機滑走路侵入端通過時刻)			
	M/M	M/H	H/H	H/M
平均値 (秒)	14.7	11.9	15.0	15.3
最大値 (秒)	40	29	31	37
最小値 (秒)	2	2	2	2
中央値 (秒)	14	12	14	15
標準偏差 (秒)	6.61	6.04	6.19	6.50

5. 突発的インシデント（バードストライク）の発生実態と航空機遅延への影響分析

次に突発的インシデントの発生による波及遅延の分析を行った。本分析では突発的インシデントとして、鳥が航空機に衝突するバードストライク（以下、BS）をケーススタディとした。BS の分析概要は以下の通りである。

(1) BS の分析概要

本研究では、航空機軌跡の公開サイトである「Flightradar24(以下 FR24)」を用いた。FR24 は航空機から送信された ADS-B 信号を収集・再公開 Web サイトである¹⁰⁾。FR24 は座標データのみならず便名や発着空港、高度、速度といったフライトに関する

る情報を複合的に表示する能力を有している。FR24にはBSの発生情報はないが、着陸機の飛行航跡や滑走路状況から概ね推測することは可能である。そこで本研究では、フライトに関する情報の中で時刻と軌跡の情報に着目した。

図-9は2019/08/14の11時台にB滑走路着陸機にBSが発生したと思われる以降の複数の着陸機の軌跡図である。具体的には、BSが発生したと思われる着陸機から後続の着陸機は、図に示す通り、B滑走路着陸直前で着陸復行を行いD滑走路に着陸（赤線）、ホールディング（円状に旋回）で空中待機を行い、着陸時間を調整してD滑走路または運用再開後のB滑走路に着陸（緑線）、ベクタリング（進路変更）により着陸時間を調整して再開後のB滑走路に着陸、といったパターンが観測された。この間、FR24画面上には、滑走路上に四角い車両（CABの点検車両と推測）が表示され、滑走路点検を行っている様子が推測された。このようなケースが毎日のように観測でき、BS後の到着機には上述のように到着遅延が玉突きで生じ、一定時間は遅延が継続し、BSが発生する滑走路によっては離陸機へも影響が生じていた。そこで、本研究では羽田空港を対象として表-7の条件をもとにBSの発生状況と遅延への影響について、限られたサンプルではあるが、FR24を活用して分析を行った。



図-9 BS発生時の着陸機の挙動の例

(2) BSの分析結果

BSの分析結果より、分析対象とした機関においては羽田空港では少なくとも1回/日程度のBSが発生し、平均約20分間程度の滑走路閉鎖が行われていた。到着機の遅延時間への影響をみると、平均で20分強、最小でも約15分、最大で約35分の遅延時間が発生していた。また、図-10はBSの発生回数を時間帯別に集計したものであり、朝方から夕方にかけてBSが発生していることがわかる。9時台が最もBS発生確率が高かったことが分かる。

さらに、滑走路別に遅延時間を算出した結果が表-8となる。沖合に最も位置しているD滑走路が最も発生頻度が高く、他の滑走路より遅延時間が大きいことがわかる。D滑走路でBSが発生するとB着陸はD着陸を追加的に処理するためにベクタリング等を行う必要があり、全体の着陸の遅延は増加する。一方でA・C滑走路からの離陸の観点からみると、南風時にD着陸がないことで、D着陸との管制間隔の制約を考えずにオペレーションが行えるため、離陸の遅延は減ることが予測される。このように離着陸の双方から見た滑走路別の影響分析に関しては今後の課題としたい。いずれにしても、今回の簡易な分析からBSの発生頻度や遅延への影響の概略が想像できるが、発着枠数や容量設定においては、このような多頻度のインシデントの影響を考慮する必要性も一定程度あると考える。

表-7 BS分析の条件設定

【1】 期間	2019/08/04~2019/08/31
【2】 定義	着陸機が上記の航空機挙動後に滑走路にCABの点検車両が現れ、かつCABの点検車両が現れてからその滑走路が10分以上使用されていない
【3】 滑走路停止時間	BS発生後、後続の着陸機が滑走路手前で着陸復行をはじめに行った時間から発生滑走路に再び着陸機が着陸するまでの時間
【4】 遅延時間	BS発生後、対象の着陸機が滑走路手前で着陸復行を行った時間から対象の着陸機がいつれかの滑走路に再び着陸するまでの時間

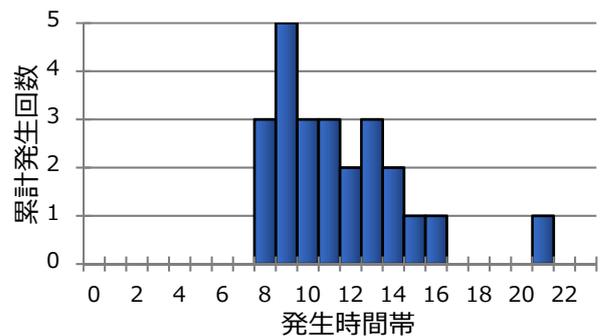


図-10 時間帯別のBS発生回数

表-8 BSの発生による遅延時間の分析結果

滑走路	BSによる遅延時間				TOTAL
	A	B	C	D	
BS発生回数	2	9	3	11	25
平均値(分)	15.0	21.2	21.3	23.2	22.1
最大値(分)	15	27	23	34	34
最小値(分)	15	16	20	17	15
標準偏差(分)	0.00	3.37	1.30	5.34	3.97

6. おわりに

本研究では、既存の容量算定に用いられるパラメータの一部の仮定値について、飛行場面を含む軌跡データを活用して航空機処理間隔の実態について分析を行い、容量算定で設定すべきパラメータ値に関して考察を行った。また、容量低下に影響を与える小規模多頻度のインシデントの事例としてバードストライクの事例に関して分析を行い、BS による滑走路閉鎖、到着遅延時間への影響について定量的に把握した。新たに得られたパラメータによる極限容量および、シミュレーションを活用した実用容量の評価、さらに BS による一時的容量低下の影響を考慮したバッファ容量についての評価は学会発表時に報告したい。

参考文献

- 1) deNeufville & Odoni, Airport Systems : Planning, Design and Management, 2003.
- 2) 平田輝満：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 , Vol.69, No.5,2013.
- 3) 平田輝満, 清水吾妻介, 屋井鉄雄：羽田空港再拡張後を対象とした滑走路処理容量算定方法と容量拡大方策に関する研究, 運輸政策研究所 第31回研究報告会, 2012.
- 4) 運輸省航空局, 財団法人航空保安研究センター：空港処理容量に関する調査報告書, 1999.
- 5) 国土交通省航空局：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> (2020/2/27閲覧)
- 6) 屋井鉄雄, 平田輝満, 山田直樹：飛行場管制からみた空港容量拡大方策に関する研究土木学会論文集, Vol64, No1, 2008.
- 7) 園山耕司. “管制処理回数を決める要素”. よくわかる航空管制第 2 版. 秀和システム, 2018, 231-239.
- 8) RE-CATEU-Wake Knowledge Hub, <http://recat-project.eu/solutions/recat-eu>, (2020/1/12 閲覧) .
- 9) 平田輝満, 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要領に関する研究, 土木学会論文集 D3 , Vol.72, No.5, 2016.
- 10) Flightradar24.com:<https://www.flightradar24.com/>