

気象条件に着目した 滑走路処理容量の変動特性に関する研究

蒔田 良知¹・平田 輝満²・二見 康友³

¹学生会員 茨城大学大学院 理工学研究科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町四丁目12-1)

E-mail:16nm828a@vc.ibaraki.ac.jp

²正会員 茨城大学准教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町四丁目12-1)

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

³学生会員 茨城大学大学院 理工学研究科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町四丁目12-1)

E-mail:15nm8171@vc.ibaraki.ac.jp

近年、首都圏空港(羽田・成田)の航空需要は増加傾向にあり、将来的な容量超過が予想されることから両空港のさらなる容量拡大が必要とされている。そこで羽田空港では交通流制御がおこなわれているが、効率的な制御をおこなうためには気象条件を十分に考慮した滑走路処理容量の予測が課題となる。したがって本研究では、飛行軌跡データを用いた羽田空港到着機の抽出をおこない、最終進入経路上の風況条件と着陸処理容量の関係性を分析した。その結果、向かい風が強いとき、到着機間隔を意図的に短縮している可能性が考えられる。さらに、風況条件を考慮した着陸専用滑走路における処理容量の予測方法を提案した。そして、風況(風向・風速)変化に対して約1~2回/30分の容量変動が確認され、風況条件が容量変動の一つの要因であることを明らかにした。

Key Words : *runway capacity, impact of meteorological, wind conditions, haneda airport*

1. はじめに

近年、首都圏空港(羽田・成田)の航空需要は増加傾向にあり、現在の発着回数74.7万回/年から2032年には最大94.1万回/年に上ると予測されている¹⁾。将来的な容量超過が予想されるため、両空港のさらなる容量拡大が必要とされている。

限られた容量を最大限に活用するため、現在羽田空港では航空交通管理(ATM)の一環である交通流制御がおこなわれている。交通流制御は、空港・空域の将来交通量を予測し、それらが特定の容量を超えると予想されるとき、出発制御・経路延伸により空港への到着時間を遅らせることで、混雑時の容量(空域容量、滑走路処理容量等)を調整している。しかし、交通流制御の容量予測は気象条件等の状況を考慮するため、予測精度に応じて効果が変化する。効果を最大化するためには容量の正確な予測が必要であり、現在の容量予測の精度では特に滑走路処理容量の精度が低い²⁾。

したがって、滑走路処理容量は気象が与える影響を十分考慮して算出する必要があるが、現状では北風・南風別に滑走路運用方式の変更や好天・悪天別に着陸進入方式の変更等マクロな変動の考慮に留まる。

以上より、本研究では羽田空港を対象に気象条件による到着機間隔の影響を明らかにし、到着機間隔の変動特性から着陸処理容量を算出することで滑走路処理容量の予測精度を向上させ、ひいては滑走路使用効率を向上させることを目的とする。

2. 風況条件による着陸処理容量の変動特性

着陸処理容量は、向かい風が強い時に対地速度が減少することで低下する(図-1)。なぜなら、到着機相互の最低飛行間隔が管制方式上決まっており、これが気象条件によらず一定であることと、航空機の着陸速度は周りの空気に対する速度(対気速度)で制御され、機材ごとに安定して着陸する対気速度が決まっているため、向かい風が強いと地上に対する対地速度が低下すること、これらの理由から向かい風により時間当たりの着陸処理容量が低下する。すなわち、風況条件による着陸処理容量の変動が交通流制御における予測容量の誤差要因であることが考えられ、その影響を十分に考慮する必要がある。現状の交通流制御では、風況による滑走路運用方式(北風運用か南風運用か、ILSなどの着陸方式はなにか、等)

による容量変動といった比較的マクロな変動は考慮しているが、風況による着陸速度低下については厳密に考慮はされていない。そこで、本研究では羽田空港の34L滑走路（着陸専用）を対象に、飛行軌跡データより到着機の抽出と着陸時刻の推計をおこない、最終進入経路上の風況と着陸処理容量の関係性を分析する。

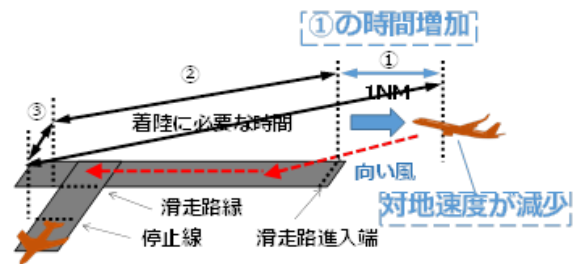


図-1 強い向かい風による着陸処理容量低下のイメージ

3. 羽田空港到着機の抽出

電子航法研究所が所有する2014年度のSSRモードSデータ（約10秒ピッチの飛行位置、機材、風況等）より羽田空港到着機の抽出を以下の方法で行った。

(1) 羽田空港便の抽出

はじめに、各便のデータの最終点の緯度・経度・高度から羽田空港の条件範囲（表-1）を満たす便を羽田空港便として抽出した。この際、低高度帯のデータ精度の問題や誤差を考慮して決めている。なお、着陸復行機は1機で滑走路を複数回占有するため、別途抽出をおこなった。具体的には表-1に示すように抽出高度条件を緩和し、一定時間（約90秒）の降下後に一定時間の上昇があった場合に復行機として抽出し、データを作成した。

表-1 羽田空港到着機の抽出条件

	最大値	最小値
緯度(°)	36.2	35.1
経度(°)	140.05	139.55
高度(feet)	18000	
復行条件高度(feet)	8000	

(2) 使用滑走路の判別

次に、各便の通過位置から使用滑走路端の判別をおこなった。複数滑走路の配置や滑走路直近のデータの欠損等を考慮し、各滑走路の着陸経路上に滑走路端から一定程度離れた位置・範囲を判別条件として設定した(図-2)。なお、34Lと34Rの判別条件区域は隣接しているため、両区域を通過する便が存在することを考慮し、両区域のうち通過した回数が多い区域を最終的な使用滑走路と判別した。

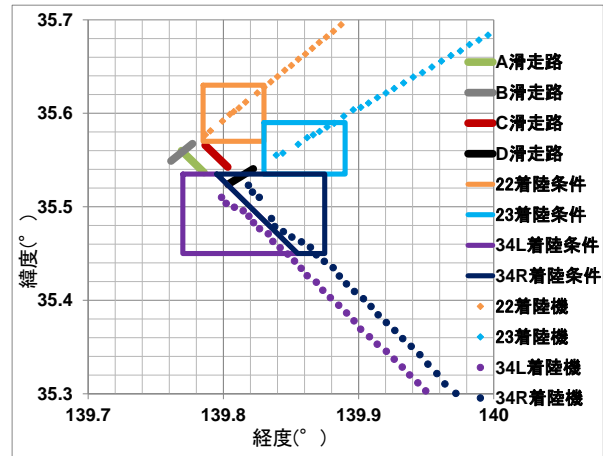


図-2 羽田空港周辺の飛行軌跡と判別条件区域

(3) 着陸時刻の推計

最後に、到着機間隔を分析するために各便の着陸時刻（滑走路端通過時刻）を推計した。使用データは低高度において誤差が大きく、便ごとにデータの存在する範囲にばらつきがあるため空港直近のデータは使用せず、一定程度離隔した位置からのデータを用いた。具体的には、滑走路端から滑走路方向に3NM地点（データがない場合は5NM地点）を基準地点（以下、閾値）とした。そして各便の閾値の通過時刻を求め、閾値と着陸時（滑走路端到達時）の標準的な速度より、閾値から滑走路端までの所要時間（等加速度運動と仮定）を算出（表-2）することで、着陸時刻を推計した。なお機材が不明の場合は、H機とM機の平均を所要時間としている。

表-2 閾値から滑走路端に到達するまでの設定所要時間

滑走路端からの距離 (NM)	所要時間(秒)		
	H	M	L
3	74.48	80	93.91
5	121.69	128.1	146.28

4. 着陸処理容量に対する風況の影響分析

羽田空港到着機の抽出データより、風況条件による到着機間隔の影響分析をおこない、着陸処理容量の予測モデルを以下の方法で検討した。

(1) 対地速度と風況の集計

まず、軌跡データから算出される対地速度（以下、実績対地速度）が記録されていないデータが存在するため、ヒュベニの公式を用いて2点の緯度経度座標間の直線距離を求め、2点間の時間差（約10秒）との除算で実績対

地速度を算出し、補足した。この際、対地速度の急変を考慮し、全ての羽田空港到着機を対象に滑走路端から3～5NM以内を通過した時の実績対地速度を平均化した。

次に、瞬間的な強風を観測する可能性を考慮し、各便が閾値を通過した時刻から前後5分間に滑走路端から3～5NM以内を通過した着陸機の風速・風向（風速・風向は機体の現在位置のデータ）を単位ベクトル平均で算出した。

続いて、向い風5ktごとの着陸機に対する実績対地速度（最終進入であるため滑走路方向の速度となる）の平均と標準偏差をあらわしたものを図-3に示す。この時、データの対象は、①標準速度から風の影響を加味し、実績対地速度250 kt以下、②欠航が発生しない程度の風の強さを考慮し、風速48.6 kt 未満、横風-25~25 kt 以内としている。H機、M機ともに向かい風が強くなるほど、実績対地速度が減少しており、これは対気速度が一定であることを示している。

その後、電子航法研究所³⁾と同様の方法で、式(1a)と(1b)式より偏流角と理論対地速度を算出した（図-4）。

$$\phi_D = \sin^{-1} \left\{ \frac{W}{V_{TAS}} \sin(\phi_W - \phi_T) \right\} \quad (1a)$$

$$V_{GSr} = V_{TAS} \cos \phi_D + W \cos(\phi_W - \phi_T) \quad (1b)$$

ここで、 ϕ_D ：偏流角[°]、 V_{TAS} ：真対気速度[kt]（HM機の2種類で仮定）、 W ：風速[kt]、 ϕ_W ：風向[°]、 ϕ_T ：トラック角[°]（滑走路角度と仮定）、 V_{GSr} ：理論対地速度[kt]（滑走路方向）とする。そして理論対地速度と実績対地速度で比較をおこなった（図-5）。機材別の真対気速度を精緻に設定していないため精度は若干低い、両機材とも相関係数は高く（H：0.67、M：0.74）、風向・風速条件による対地速度の推計は概ねできている。

(2) 風況条件が到着機間隔に与える影響の分析

着陸専用滑走路（34L）の処理容量を算出するために、先行機が滑走路端から 3NM の時の到着機間隔（図-6）に対する風況条件の影響を統計的に推定した。34L 滑走路を分析対象としたのは、①基本的に着陸専用滑走路であること、②天候別の進入方式の違いによる経路変化が小さいことが理由である。なお、到着機間隔が制御されていない到着機（間隔が一定以上）を除いた到着機ペアをサンプルとするために、①到着機間隔が 7NM 以下、②時間帯が 9：00～20：00 以内、③前節の対地速度と同様の対象条件でデータを選定した。

風況条件によらず到着機間隔が不変であれば、向かい風等による対地速度の低下は滑走路処理容量の低下に繋がるが、仮に風況条件により間隔設定に変化があれば、それを考慮しなければ容量の予測精度が落ちる。また、

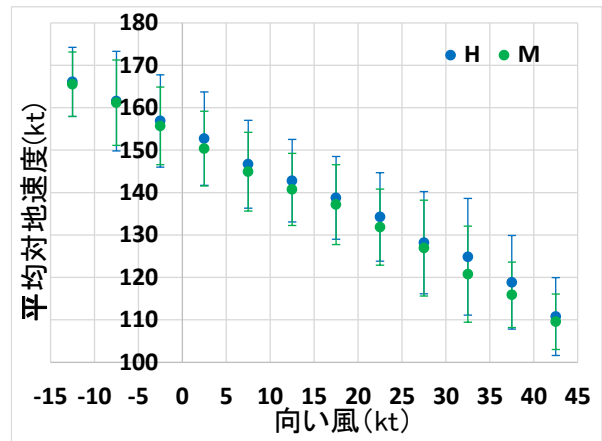


図-3 向い風 5kt ごとの着陸機に対する実績対地速度の平均と標準偏差

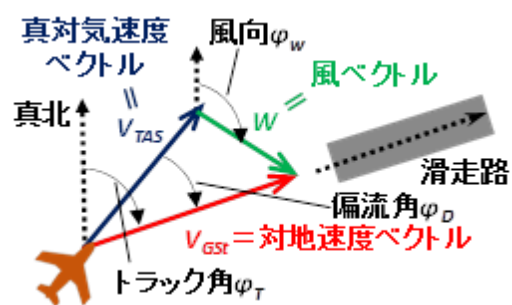


図-4 偏流角と理論対地速度の概要

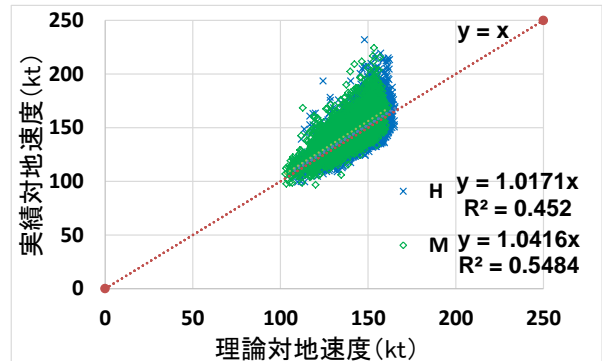


図-5 理論対地速度と実績対地速度の比較

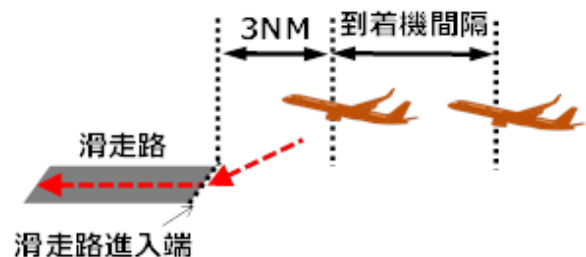


図-6 到着機間隔のイメージ

究極的な処理容量という意味では実績の処理機数から処理容量を統計的に分析するのではなく、到着機間隔の変動特性から容量を予測する方法も有益と考えられる。

そこで、今回は到着機間隔を目的変数に重回帰分析を適用した。説明変数は風況データを直接用いず、その影響を加味した対地速度とした。また実際の到着機間隔は混雑度が低いと間延びするため、その影響を除くために混雑度（着陸処理機数）も加えた。さらに連続する機材の組み合わせ別に後方乱気流間隔のルールが異なるため、組み合わせを示すダミー変数も加えている。回帰式を算出した結果は表-3 となり、 $F=0$ の有意性が示された。混雑度が上がるほど間隔は小さくなり、対地速度が減少するほど間隔は小さくなる傾向が見られた。また、M-M（最低間隔 3NM）を基準とし、H-H（最低間隔 4NM）と M-H（最低間隔 5NM）が多くなるほど、間隔が広がる傾向も挙げられる。加えて、各機材の組み合わせごとに回帰式を算出した結果でも同様の傾向が見られた。

後方乱気流間隔の観点からみた間隔の短縮は管制方式基準の範囲内となる一方で、滑走路処理容量に影響する滑走路占有時間は、仮に対地速度低下による滑走路離脱が早くなる等の効果があれば、その分を加味した間隔短縮がしやすいとも思われたため、機材の組み合わせ別の回帰式でそのような傾向（つまり後方乱気流の影響がない先行 M の場合は滑走路占有時間短縮を考慮して間隔を短縮する傾向）があるという仮説を立てたが、今回の結果からはそのような傾向は見られず、すべての組み合わせで対地速度低下が間隔短縮に有意に影響している結果となった。

以上より、向い風が強いとき、到着機間隔を意図的に短縮している可能性が考えられる。通常、向い風が強くなるほど対地速度が減少するため、到着機間隔の距離だけ飛行時間は増加し、着陸時刻は遅れる。しかし、到着機間隔を距離ベースではなく時間ベースで維持すると、最終的な着陸時刻は遅れない。したがって、強風時に到着機間隔を意図的に短縮するのは、ヒースロー空港で 2015 年から試行されている Time-based Separation (TBS) の考えに近い。

(3) 風況を考慮した着陸専用滑走路の処理容量の算出

風況条件を考慮した到着機間隔の予測モデルを用いて、34L 着陸機を対象に処理容量の予測方法を検討した。その方法として、(1a)~(1e)式を用いて、図-7の流れより風況を考慮した34L滑走路の処理容量を算出した。ただし、予測モデルには混雑度（着陸処理機数、つまり処理容量と同じ概念）が含まれているため、この混雑度と予測する処理容量が一致するという制約条件を加味して、(1c)~(1f)式の連立方程式を解いて、容量算出をおこなった。

表-3 到着機間隔に影響を与える要因（重回帰結果）

説明変数	係数	t
切片	2.832	20.717
対地速度[kt]	0.022	28.780
混雑度 (着陸処理機数[回/30分])	-0.090	-17.549
H-H(ダミー)	0.265	10.714
H-M(ダミー)	0.577	23.245
重決定 R ²	0.246	



図-7 風況を考慮した着陸処理容量の予測方法

$$y_{ij} = 0.022V_{GSpi} - 0.09N_A + 0.265D_{HH} + 0.58D_{HM} + 2.834 \quad (1c)$$

$$T_{ij} = \frac{y_{ij}}{V_{GSij}} \quad (1d)$$

$$CAP = \frac{1800}{\sum_{i,j=H,M} P_i P_j T_{ij}} \quad (1e)$$

$$CAP = N_A \quad (1f)$$

ここで、 i : 先行機, j : 後続機, T_{ij} : 1機あたりの処理時間[秒], y_{ij} : 到着機間隔 [NM], V_{GSij} : 理論対地速度 [kt], CAP : 滑走路処理容量[回/30分], P : 機材の発生確率, N_A : 混雑度(着陸処理機数)[回/30分]とする。

上述の方法より算出した結果、風向が0°（向い風成分100%）のときの変動幅が最大であり、風況変化に対して約1~2回/30分の容量変動が確認された（図-8）。

5. 結論

以上より、羽田空港を対象に飛行軌跡データを用いた到着機の抽出をおこない、着陸専用滑走路の処理容量に対する風況条件の影響分析をおこなった。結果として、風況条件が容量変動の一つの要因であることを明らかに

し、風況条件を考慮した着陸専用滑走路における処理容量の予測方法を提案した。このことは、到着管理システム等で容量予測を行う際の精度向上に対して有益な知見である。さらに、機材データ等を精緻化すれば、気象条件の容量変換や気象予測誤差の影響も定量評価可能である。

謝辞：本研究は、国土交通省の平成27年度交通運輸技術開発推進制度「航空機の到着管理システムに関する研究」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 国土交通省：首都圏空港の機能強化策について、
<http://www.mlit.go.jp/common/001047128.pdf>
- 2) 平田輝満，屋井鉄雄：空中待機時間からみた羽田空港到着機に対する出発制御の有効性分析，第 44 回土木計画学研究発表会・講演集，CD-ROM，2011.
- 3) 福田豊，瀬之口敦，ブラウンマーク，藤田雅人，井上諭，伊藤恵理，平林博子，狩川大輔，白川昌之，

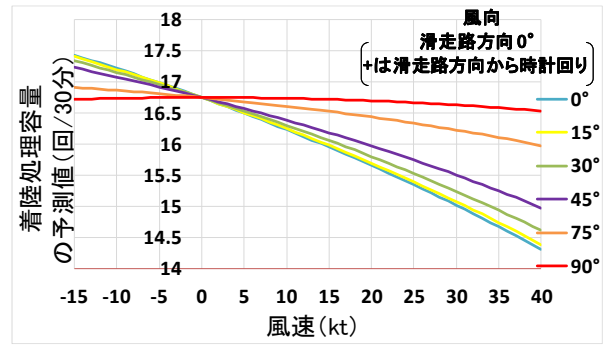


図-8 風況を考慮した着陸処理容量予測結果の例

- 4) 長岡栄，李金珍，グウィグナークラウド：トラジェクトリモデルに関する研究，電子航法研究所報告 No.132，2015.
- 4) 二見康友，平田輝満：混雑空港における離着陸順序付けの実態と容量算定に関する分析，第 52 回土木計画学研究発表会・講演集，CD-ROM，2015.

(2016.?.? 受付)

ANALYSIS OF THE IMPACT OF METEOROLOGICAL CONDITION ON RUNWAY CAPACITY

Yoshitomo MAKITA, Terumitsu HIRATA and Yasutomo FUTAMI

Air Traffic Flow Control has been carried out especially for the arrival traffic to congested airports like Haneda Airport for maintain the balance between traffic volume and airport/airspace capacity, but a prediction of the runway capacity considering meteorological condition is one of the problems for more efficient flow control. Therefore, in this study, the impact of the wind conditions on the arrival runway capacity in Haneda airport is analyzed by using aircraft trajectory data. The results indicates that wind conditions have significant affect on the landing separations and landing ground speed is reduced due to strong head wind. By developing the landing runway capacity considering wind condition, the capacity fluctuation of approximately 1 or 2 times during 30 minutes is estimated.