

部分従属運用の平行滑走路の容量と 遅延時間の推計手法に関する考察

平田 輝満¹

¹正会員 茨城大学工学部都市システム工学科 准教授 (〒316-5811 茨城県日立市中成沢町4-12-1)
E-mail:hirata-t@mx.ibaraki.ac.jp

平行滑走路では滑走路間の離隔距離が短い場合や、距離が長くても離陸経路が一定角度以上分岐していない場合などは2本の滑走路が相互に従属運用となる。近年Wide Area Multilateration (WAM)などの新たな監視技術が実用化され、従来は従属関係になる運用条件であっても平行滑走路が独立に運用可能となるケースが出てきた。このような航空交通システムにおける各種施策については、その費用対効果分析が実施されており、そのためには対象施策による効率化等への効果を定量的に予測する必要がある。本研究では、従来の方法では容量および遅延時間の解析的な推計ができない、一部独立運用が可能な平行滑走路の容量算定手法を検討し、WAMによる容量拡大効果をケーススタディとしてその効果を定量評価した。

Key Words : Runway capacity, Delay, Dependent parallel runway, Wide Area Multilateration

1. はじめに

平行滑走路では滑走路間の離隔距離が短い場合や、距離が長くても離陸経路が一定角度以上分岐していない場合などは2本の滑走路が相互に従属運用となる。近年Wide Area Multilateration (WAM)などの新たな監視技術が実用化され、従来は従属関係になる運用条件であっても平行滑走路が独立に運用可能となるケースが出てきた（同時平行離陸など）。我が国ではCARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)の枠組みのもと、上記のような航空交通システムにおける各種近代化技術や施策が検討されているが、各施策の必要性、優先順位の検討や説明責任等のために費用対効果分析が実施されている。そのためには各施策の効果を極力定量的に評価し、定性的効果やその他総合的な評価と併せて施策実施の判断を行う必要がある。本研究では、施策の効果として容量拡大と遅延軽減（利便性、運航効率の向上）を念頭に置き、部分的に相互に従属運用（以後、部分従属）となる平行滑走路における監視能力向上をケーススタディとして、その効果を分析するための容量と遅延時間の推計手法に関して考察を行なった。なお、分析は成田空港を対象として行なったが、実際の運航状況や処理間隔等を精緻に反映させてはいないため、分析結果自体はあくまで参考の値である。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

滑走路処理能力（容量）の解析的手法は古くから検討され、そこでは航空機間の管制間隔、航空機の離着陸速度や滑走路占有時間（ROT: Runway Occupancy Time）、航空機ミックス等をもとにした航空機処理間隔の確率的期待値から平均的な処理能力を算出している¹⁾。平行滑走路についても多くのモデルがあり、近年では近接平行滑走路における後方乱気流間隔削減施策の効果分析を実施しているものも存在する²⁾。本研究で対象とする成田空港のようなオープンパラレルの滑走路では、通常、平行滑走路を独立で運用するが騒音問題を背景に離陸経路が分岐していないため同時離陸が実施されていない。そのため平行離陸時は従属運用、他の運用形態では独立運用といったやや特殊な条件となる。そのような条件に対しては従来型の解析手法が単純に適用できない。将来的には近接平行滑走路においても滑走路間で一部独立運用（逆に言えば部分従属）が可能となるような技術進展も予想されるが、そのような場合も今回対象とするような特殊な条件となりうる。容量算定の面では、複雑な滑走路レイアウトや運用条件では解析的手法ではなくシミュレーションで容量分析を行うことも多い。航空機の遅延分析においても待ち行列理論等による解析的手法とシミュレーション手法が存在する。解析的手法は分かりやすく厳密解も得られるが、一方で需要が定常で容量超過をしない仮定などが必要で、現実には生じる遅延とは乖離す

る要素も含む。その面ではシミュレーション手法が適している⁴⁾。本研究では、容量については従来型の解析的手法をベースにし滑走路間の干渉確率を考慮した新たなモデルを検討し、遅延については待ち行列理論により推計を行った。シミュレーション手法との比較分析については今後の課題としたい。

3. 分析対象とした平行滑走路の概要と設定条件

(1) 成田空港の滑走路運用条件

成田空港は2本の平行滑走路を有し、2012年夏時点では、航空機の発着需要特性に応じて、離着陸を分離してそれぞれを専用滑走路方式や、離着陸共用方式による同時平行離着陸での運用などを、管制官の判断等で選択している。前述のとおり騒音影響を背景として平行滑走路からの離陸経路が分岐していないため、同時平行離陸（つまり2本の滑走路から独立に離陸させる）については有視界気象状態（VMC）の場合のみ実施しており、WAMを活用したPRM（Precision Runway Monitoring）により計器気象状態（IMC）でも同時離陸が可能となる。同時着陸については通常 No Transgression Zone（NTZ）を監視しIMCでも実施している。オープンパラレルであるため滑走路間の従属関係は他にはなく、従って、WAMの有無により同時離陸時の制約のみが変化する。WAMがない現状を考えると、2本の平行滑走路から同時に離陸しようとするときのみ部分的に従属性が発生することになる。

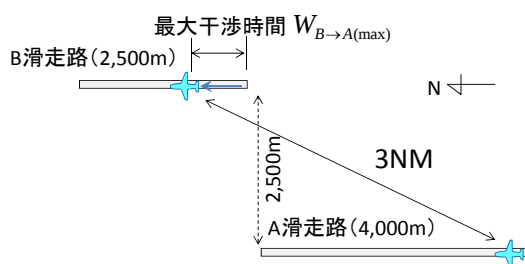


図-1 平行離陸時の処理間隔（B離陸→A離陸）

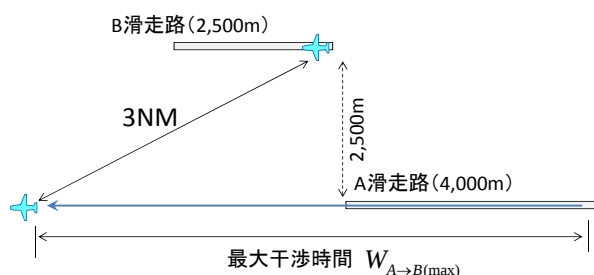


図-2 平行離陸時の処理間隔（A離陸→B離陸）

(2) 航空機最低処理間隔の設定条件

まず本研究では北風運用時のみを対象とした。航空機の機種は後方乱気流区分によりHeavyとMediumの2機種に限定し、離着陸速度についてもその2機種を対象に標準的な値^{注1)}を仮定した。Heavy比率は0.5としている（実際はより高い）。滑走路占有時間（Runway Occupancy Time: ROT）については筆者らの先行研究⁵⁾で使用した羽田空港のデータを代用し、A・B滑走路で共通の値とした。なお、管制間隔については基本的に最低基準を使用しているが、連続離陸の際は先行離陸機と後続離陸開始地点に最低間隔が空いた時点で後続機に離陸許可を出すことや、着陸機に対しては滑走路進入端から2NM区間を最低間隔に考慮していることから、それらがバッファ時間として加味されていると考えられる。ROTについては正規分布の99.5%値を仮定している。

ここで、本研究で重要となる、異なる滑走路からの平行離陸時の処理間隔について例として示す。図-1は先行B離陸・後続A離陸の際の処理間隔（＝干渉時間 $W_{B \rightarrow A}$ ：後述）、図-2はその逆を示している。図に示す通り、平行離陸時の3NM間隔が空いた時点で後続機に離陸許可を与える前提で処理時間を算定しており、成田空港の滑走路レイアウト上、平行離陸の場合A離陸が先行すると処理間隔が大きくなる。

4. 平行滑走路の処理容量と平均遅延時間の推計方法

(1) 平行滑走路間の干渉確率を考慮した解析的手法

前述の通り、連続する離着陸の一部の組み合わせ条件で従属運用（同時離陸時のみ）となる平行滑走路では、連続2機の処理間隔の期待値から容量算定を行う従来型の処理容量算定方法がそのまま適用できない（独立運用となる組み合わせの処理間隔をゼロと仮定すると当該2機以外の前後機との管制間隔を満足できないことがある）。そこで、基本的には平行の2本の滑走路を独立に容量計算しながらも、他滑走路と従属関係となることで生じる処理間隔上のロス時間（以後、干渉時間）の期待値を容量計算に反映させ、繰り返し収束計算により最終的な処理容量を求めた。具体的には以下のとおりである。まず、A、B滑走路それぞれの単位時間あたりの処理容量は1機当たりの平均処理間隔 $E[T]$ の逆数で与えられる。各滑走路の $E[T]$ を下記の式で求める。

$$E[T_A] = \sum_{i,j \in \text{rwyA}} (T_{ij} + \delta_i E[W_{B \rightarrow A}]) P_i P_j \quad (1)$$

$$E[T_B] = \sum_{i,j \in \text{rwyB}} (T_{ij} + \delta_i E[W_{A \rightarrow B}]) P_i P_j \quad (2)$$

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & (i \in \text{dep}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

ここで、 $E[W_{B \rightarrow A}]$ は他滑走路（B）の離陸機との干渉による自滑走路（A）離陸機の処理間隔の増加時間（遅延）の期待値で下記の式で求める。

$$E[W_{B \rightarrow A}] = \left(\frac{E[T_{ij} | i \in \text{depB}, j \in \text{depA}]}{2} \right) \times \left(\frac{\text{Cap}_{B_dep} \cdot E[T_{ij} | i \in \text{depB}, j \in \text{depA}]}{3600} \right) \quad (3)$$

$$E[W_{A \rightarrow B}] = \left(\frac{E[T_{ij} | i \in \text{depA}, j \in \text{depB}]}{2} \right) \times \left(\frac{\text{Cap}_{A_dep} \cdot E[T_{ij} | i \in \text{depA}, j \in \text{depB}]}{3600} \right) \quad (4)$$

$$\text{Cap}_{A_dep} = 3600 / E[T_A] \times P_{\text{dep_A}} \quad (5)$$

$$\text{Cap}_{B_dep} = 3600 / E[T_B] \times P_{\text{dep_B}} \quad (6)$$

(3)(4)式で示すとおり、ある離陸機が他滑走路との干渉で待たされる場合、待たされる時間の発生確率が一様分布であれば、その待ち時間の期待値は同時離陸した際の最低処理間隔（3(2)参照）の1/2であり、その待ち時間の期待値に干渉する確率を乗じて $E[W]$ を求めている（この一様分布の仮定が少し強い仮定である可能性がある）。ここで、 $E[W]$ が他滑走路の離陸数（離陸容量）の関数になるため、両滑走路の容量が収束するまで上記の計算を繰り返し計算し最終的な容量を求めた。

収束計算した結果を図-3に示す。WAMありの場合は $E[W]$ がゼロで計算（つまり滑走路ごとに独立に計算）した結果である。前述の通り、成田空港のレイアウト上、A滑走路離陸機に後続するB滑走路離陸機の干渉時間が大きく、逆に短いので（ $E[W_{B \rightarrow A}] > E[W_{A \rightarrow B}]$ ）、WAM導入による効果は主にB滑走路の処理容量に出てくる。本研究ではROTなどの前提条件はA・B滑走路で同一と仮定しているためWAMありの場合にはそれぞれ独立運用となり容量も同一となる（実際は滑走路長や誘導路デザイン、使用機材などの条件が変われば滑走路間で差が出る）。離着陸同比率の条件ではWAMによりB滑走路で26.7回から30.9回／時に、A滑走路では30.3回から30.9回／時に容量増加が見られる。

次に、上記干渉確率モデルから求めた平均処理容量を

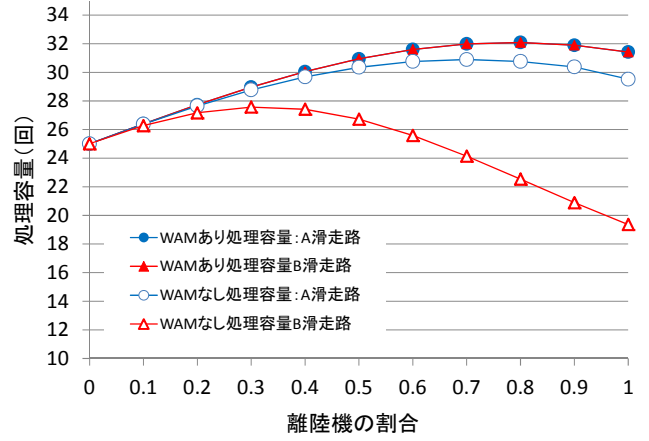


図-3 干渉確率モデルによる容量推計結果

前提に、待ち行列理論により平均遅延時間を推計する。

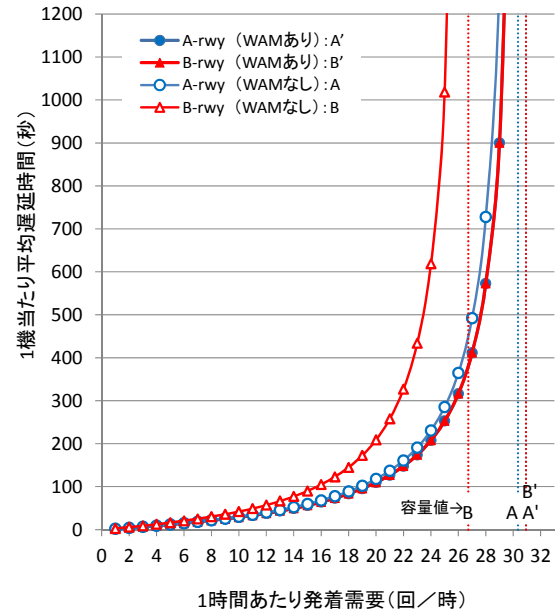


図-4 干渉確率モデルと待ち行列理論による平均遅延時間の推計値（A・B滑走路共に離陸比率は0.5。縦軸平行線は平均処理容量値）

離着陸機の滑走路への到着時間間隔は通常の数分布、処理間隔（サービス率）については上記容量を平均値とした一般分布を前提（M/G/1モデル）とし、下記のPollaczek-Khintchineの公式により1機当たり平均遅延時間 W を求める。

$$W = \frac{\rho^2 + \lambda^2 \sigma^2}{2\lambda(1-\rho)} = \lambda \frac{[(1/\mu)^2 + \sigma^2]}{2(1-\rho)} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{1}{E[T]}, \rho = \lambda / \mu \quad (8)$$

ここで、 μ は平均処理容量、 λ は平均到着率、 ρ は利用率である。

$$\sigma^2 = E[T^2] - (E[T])^2 \quad (9)$$

であるから上式は

$$W = \frac{E[T^2]}{2(1/\lambda - E[T])} \quad (10)$$

と変形できる。 $E[T]$ と $E[T^2]$ は干渉確率モデルから算出した値を代入する。図-4にA・B滑走路共に離着陸同比率で使用したケースを対象に、WAMの有無で平均遅延時間を算出した結果を示す。横軸は各滑走路への平均到着機数であり、容量値に近づくほど指数的に遅延時間が増加することが分かる。当然ながら、同時離陸時の干渉の影響が大きいB滑走路においてWAMによる遅延軽減効果が大きく、例えば24機/時の需要では約400秒の遅延時間削減となる。遅延削減効果ではなく容量拡大効果という視点からみれば、平均遅延時間（＝サービスレベル）を一定以内（例えば300秒＝5分程度）に抑えることを前提とするとB滑走路の容量はWAMにより約22回/時から約26回/時に増加が可能という解釈もできる。

5. おわりに

本研究では部分従属運用となる平行滑走路の容量と遅延に関する解析的手法を検討し、成田空港を対象にWAM導入効果を試算した。今後は干渉確率モデルにおける待ち時間の発生確率の仮定の精査やシミュレーション手法との比較分析などを行う必要がある。

注：

注 1) 航空機速度は ICAO IFSET を参考に、Heavy (B777) と Medium (B737) の速度で代表させ、滑走路からの飛行距離と飛行高度の関係から下表の通り仮定した。

速度関連のパラメータ(kt)		到着2NM	出発3NM	出発4NM	出発5NM
Heavy	平均速度	140	163	186	205
Medium	平均速度	119	158	182	201

参考文献

- 1) Blumstein, A.: The Landing Capacity of a Runway, Operations Research, Vol.7, pp.752-763, 1959.
- 2) Newell, G.F.: Airport Capacity and Delays, Transportation Science, Vol.13, No.3, 1979.
- 3) Janic, M.: Modelling the capacity of closely-spaced parallel runways using innovative approach procedures, Transportation Research, Part C, Vol.16, pp.704-730, 2008.
- 4) Ignaccolo, M.: A Simulation model for airport capacity and delay analysis, Transportation Planning and Technology, Vol. 26, No. 2, pp. 135-170, 2003.
- 5) 平田輝満, 清水吾妻介, 屋井鉄雄: 羽田空港再拡張後の新規滑走路整備による容量拡大方策と騒音影響に関する研究, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.5, I_1011-I_1022, 2011.

(2013.8.2 受付)

ESTIMATION OF CAPACITY EXPANSION AND DELAY REDUCTION BY UPGRADING SURVEILLANCE ABILITY FOR PARALLEL RUNWAYS

Terumitsu HIRATA

This study focuses on the development of the estimation method for capacity and delay of dependent parallel runways. Recently the upgrading surveillance ability such as by Multilateration is enabling parallel runways to be operated independently in IFR conditions without diversion of the parallel flight paths. The developed method is applied to estimate the effect of such a new surveillance technology on capacity expansion and delay reduction in the parallel runways that are now dependently operated with current conventional technologies.