

航空交通流管理の現状と空港容量に関する一考察*

Current Status of Air Traffic Flow Management and Related Issues on Runway Capacity*

平田輝満**

By Terumitsu HIRATA**

1. はじめに

これまで増加を続けてきた航空交通量に対応するために空港の整備、拡張が世界の主要都市で実施され、また空域の再編や管制運用の工夫による容量拡大、効率化も精力的に進められてきた。その中で、近年注目されているのが航空交通管理（Air Traffic Management : ATM）であり、その近代化が欧米を中心に進められている。米国では2025年を目標に航空交通システムの革新を目指すNextGen（Next Generation Air Transportation System）と呼ばれるプログラムを産官学のコンソーシアムを組み強力的に推進しており、欧州では2020年を目標に空域、管制システムの統合と再編を目指すSESAR（Single European Sky Air Traffic Management Research）と呼ばれるプログラムが推進されている。我が国では、2006年から福岡のATMセンターの本格運用が開始され、システムティックな交通流制御や協調的意思決定システムによる空域管理など、先進的な取り組みが実際に運用されており、今後さらに高度化が計画されている。また、電子航法研究所（ENRI）や宇宙航空研究開発機構（JAXA）を中心に我が国におけるATM研究が計画、実施されている。これら研究や技術開発は我が国の将来的、中長期的な航空交通システムの高度化、効率化にとって必要不可欠であり、大変重要である。一方で、我が国首都圏の空港発着容量不足が長年の課題となっている中で、2010年に羽田、成田の両空港で新滑走路の整備や滑走路延伸が完了し、首都圏の発着容量が大幅に増加する予定である。また併せて関東空域の再編も行われる。これら発着容量拡大により我が国における航空市場が大きく変化し、航空交通流の量および質も大きく変化することが予想される。前述のような国および研究機関における技術開発とともに、混雑空港における適切な空港発着枠（スロット）算定や設定方法、その配分方法、またエアラインのダイヤ設定や遅延問題への対処など社会制度面からみた課題も存在し、それら課題に対して、航空交通管理の方法やパフォ

ーマンスも直接または間接的に影響を及ぼす部分も存在すると考えられる。本稿では、それら社会制度面の課題にも着目しながら、海外空港での事例も踏まえ、2010年以降の我が国首都圏空域、空港における管制運用と空港容量について航空交通管理の視点から幾つかの考察を行った。

2. ATMにおけるフローコントロールと航空機遅延

(1) フローコントロールの概要

現在、福岡のATMセンターで実施されているATMの中核的機能として、交通流制御（以後、フローコントロール）が挙げられる。これは、ある空港や空域で将来的に過度の混雑の発生が予想される場合に、航空機の出発を遅らせたり、特定空域への入域間隔を調整したりすることで、空港や航空路セクタにおいて適切に管制処理可能な量の範囲内に交通量を調整し、安全性の確保、消費燃料の節約を達成する機能である（詳細は参考文献¹⁾などを参照）。図-1にフローコントロールのプロセスの概要を示す。

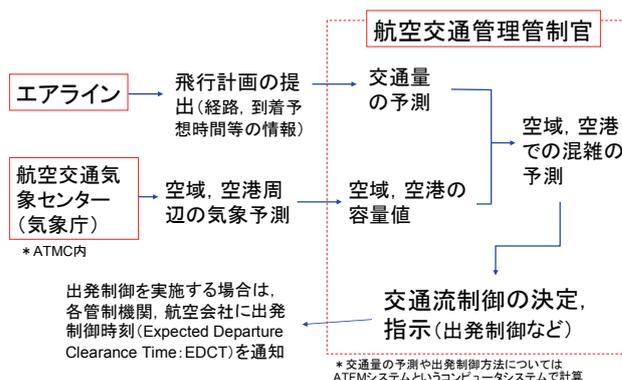


図-1 フローコントロールのプロセスの概要

フローコントロールを判断、実行する航空交通管理管制官は、エアラインから毎日提出、更新される飛行計画をもとに空港や空域の交通量を予測し（6時間先まで）、一方で気象庁等から提供される気象条件等をもとに時間帯別の滑走路容量を予測し、両者を比較しながら必要に応じてフローコントロールを行う。羽田到着の滑走路容量の設定値は、一定時間内（30分間）に滑走路に着陸可能な機数を北風時17～18機、南風時13～15機程度で設定

*キーワード：航空交通管理，航空管制，空港容量

**正員，博(工)，(財)運輸政策研究機構運輸政策研究所
(東京都港区虎の門3-18-19, TEL03-5470-8415)

されている（北風時は2本の滑走路を着陸に使用することも可能で、南風時は騒音問題等から困難）。この容量値をもとにさらに進入管制区内におけるスペーシング量（レーダー誘導で遠回り等をさせることが必要な量）を予測し、別途設定されているその許容量（羽田では10分に設定）を越える際にフローコントロールを発動する。空域セクタの容量は管制官の管制指示の回数や必要時間等から将来的なワークロードを予測し、別途設定している許容量と比較して実施している。技術的には将来的な交通量の予測精度の向上が現在および将来的課題の1つであり、大屋¹⁾で指摘されているものを挙げると、①エアラインの運航上の都合による出発時刻の遅延、②スポットから離陸滑走路までの走行時間の見積り誤差、③滑走路の運用状況に依存した離陸時刻の誤差、④飛行計画上の所要時間と実際の所要時間の誤差、などの課題が存在し、一部については既に対策が検討され実行されている。このような技術的な課題の解決やさらなる向上策は当然ながら重要であり、継続的な改善が必要である。

（2）フローコントロールの実績と羽田空港における航空機遅延の現状からの問題意識

大屋¹⁾によると、羽田到着便を対象とする出発制御が圧倒的多数であり（福岡空港発便、新千歳発便の順で多い）、H19年の実績では、全出発制御機数が31,646機/年（87機/日）、累積遅延時間が3,253時間/年（535分/日）、対象機1機あたり平均6.2分であった。つまり、ほぼ毎日、悪天候などのイレギュラー時以外でも常態的にフローコントロールが実施されており、航空局へのヒアリングからも特に夕方以降の到着ピークでフローコントロールが常態的に実施されているとのことであった。我が国の航空機遅延に関する調査や研究は数少なく、遅延の詳細な現状や原因、発生のメカニズムなどはほとんど明らかになっていない。実際の航空機の管制や運航データを使用した遅延分析をした例として蔭山ら²⁾が挙げられ、羽田では出発から到着の区間で、出発空港におけるスポットアウトまでの時間およびスポットアウトから離陸までの所要時間における遅延が全体の遅延の中で大きなシェアを占めており、また後者の遅延については、同時間帯にスポットアウトする機数が多い時に滑走路で離陸待ちの時間が発生することが原因の一つと分析されている。これも前述のとおり、時間帯ごとにスロット値の上限を制限しているものの、短時間でみるとそのダイヤに偏りが依然として存在することを意味する。局所的な発着機数の偏りは管制側のワークロードに対しても望ましくはない。つまり、ある一定時間に滑走路の離陸容量以上の出発機が同時にスポットアウトすると滑走路脇で離陸待ちの渋滞が発生し管制官に過度の負担がかかるとともに、羽田のような狭隘なタクシングスペースしかないところ

では誘導路上の地上管制も困難となる。蔭山らでは触れていないが、到着機数の偏りはアプローチ管制官に負担をかける。到着機数の集中は、空中でのレーダーベクターによる対応や空中待機（ホールディング：HLD）で対応する必要があり、出発便が地上で待つことが可能なことに比べて、その負担は大きく、安全性や効率性の観点からも問題がある。坂下³⁾はエアラインが公表している実際の各便の出発・到着時刻のデータを収集し、羽田における遅延の実態分析を詳細に行っている。その中で、羽田出発遅延割合は同時間帯の出発機数と高い相関関係にあり、つまり蔭山らで指摘されているように、同時間帯の出発機数が滑走路容量以上になることによる離陸待ち遅延が生じており、到着遅延では早朝から昼までは徐々に遅延割合が増加し、昼過ぎの到着便数が比較的少ない時間帯で横ばいもしくは遅延率の多少の減少があり、夕方以降は到着予定便数の増減に応じて遅延率も同様の変動を見せている。詳細な運航や管制データが不明なためははっきりとは言えないが、フローコントロールが夕方ピーク以降を中心に実行されているとすれば、時間帯ごとにスロット数の制限を行ってはいないものの、運航側の要因により午前中から昼、また夕方にかけて遅延が発生・累積し、もともと夕方の到着便が集中する時間帯で、それら遅延の累積の影響も相俟って、羽田の到着容量をオーバーし、結果、フローコントロールで出発制御が実行されていると想像される。

フローコントロールは到着便の集中が予想されると出発空港で出発時刻の調整を行い、交通量を適正值に維持するために大変重要な役割を担っていることは確かであるが、そもそもの交通量の集中の原因の1つに運航側の要因があり、さらにそれが常態化しているとすれば、それらを改善することにより、ATMのフローコントロール作業における過度の（無駄な）負荷を軽減し、より付加価値の高い作業を実施可能になるとも考えられる。運航側の要因があると、時間当たりの発着スロットを制限しても、ある時間帯ではスロット配分時に想定している機数以上の発着機数が実現し、結果、航空機全体の遅延が発生してしまう。現状のフローコントロールのやり方では、ある時間帯で出発制御が実施されると、それ以降に後続する全ての航空機が玉突き式に遅れを強いられることになる。つまり、運航側として、遅延の原因となっていない便が、遅延の原因となっている他の便のために遅れてしまっている、ということである。交通流全体を考慮し、夕方ピーク前に一度それまでの遅延を吸収可能なバッファをある時間帯で設定するなどの運航側の対策を検討する価値はあるかもしれない。それら運航側の対策とともに、管制側や空港側の要因による遅延に対して、フローコントロールの方法などを検討すべきであろう。特定の航空機が原因で遅延が生じていることが事

実であれば、その遅延の影響を全航空機が受ける現在のフローコントロールの方法の妥当性も議論すべき課題であると考えられる。

また容量と遅延については、容量（スロット数）を増加させれば当然ながら遅れ時間が増加するというトレードオフ関係があるが、欧米空港では通常、想定される遅れ時間をもとに容量を決定している。我が国においても遅れ時間を考慮した容量設定方法について議論、検討すべきである^{4) 5)}。それら議論の中には、発着需要が非常に大きな混雑空港では一定の遅延時間を許容して、その分発着容量（スロット値）を上げる選択（例えばロンドンヒースローなど⁵⁷⁾）や、逆に遅延を極力なくし、エアラインが希望する時刻に離着陸が可能となる容量の設定（ゆとりある空港⁴⁾）など、その国、その空港ごとの状況、目的、価値観により様々な議論がありうると考えられる。我が国の首都圏空港においては常に需給が逼迫しており、どちらかといえば一定の遅延を許容し発着容量を上げることに係る議論が必要であり、他国と比べ鉄道との競合による定時性確保の命題があるものの、上記の遅延対策とともにこれらについても検討に値すると考えている。

3. ATMパフォーマンスと滑走路容量、ターミナル空域の管制運用

(1) 管制運用と滑走路容量

本章では、フローコントロールのパフォーマンスが、滑走路の容量自体に与える影響、また、ターミナル空域での管制運用との関係について考察を行う。

連続する航空機間の管制間隔はレーダー管制間隔（3NMや5NM）、また大型機に後続する場合などにより大きな安全間隔として必要となる後方乱気流間隔（4～6NM、2分など）などが存在する。これら最低間隔を確保し、他にも飛行場管制業務（滑走路や最終進入、地上の管制を実施）における安全間隔（滑走路には同時に1機のみ存在など）の確保などを条件に、滑走路の単位時間あたりの容量が算出されている。

ここで1つ重要となるのが後方乱気流間隔区分からみた機材の連続性である。我が国は首都圏空港の容量制約により、欧米に比べて異常な大型化（低頻度運航）が進んでおり、この後方乱気流間隔の存在が滑走路容量を上げるネックの1つとなっている。2010年の羽田再拡張後を機に首都圏の容量制約が緩和し、機材の小型化が進展する可能性もあり、そうすると後方乱気流間隔区分からみた機材の連続性を考慮した管制運用による滑走路処理容量の最大化がより重要になってくる。例えば、ヒースロー空港では、複数の空中待機経路（ホールディング：HLD）を積極的に活用し、到着機の継続的需要の創出や後方乱気流間隔の観点からみた機材サイズの連続性を

高める戦略的到着順序付けにより、滑走路の着陸容量の最大化を達成している⁷⁸⁾。具体的には、空港周辺にある4つのHLDから1本の着陸滑走路の最終進入経路に向けて誘導する際に、後方乱気流間隔の原因となるHeavy機を4～5機まとめて連続して着陸させる、といったことを実施している。これら柔軟で高度な管制運用に対しては意思決定支援システムを活用している。

このような後方乱気流間隔からみた機材の連続性については1本の滑走路を離陸もしくは着陸専用を使用する場合（Segregated-Mode）に特に重要となる。一方、1本の滑走路を離着陸共用で使用する場合（Mixed-Mode）、後方乱気流間隔に加え、離陸と着陸の順序付けが滑走路の処理容量に大きく影響する。例えば、1本の滑走路をMixed-Modeで処理するとき、完全に離着陸を交互に運用した場合には42機/時を処理できるのに対し、その順序を完全ランダムにした場合には36機/時しか処理できない（離着陸数を同数と仮定。羽田の滑走路占有時間を元に筆者が算定した例）。離着陸数の比率が変化しても当然ながら処理容量が変化し（図-2参照。スライディングスケールと呼ばれる表）、福岡や那覇の総合的調査ではこれら比率の変化による滑走路容量変化を考慮し、スロット値を決めている。

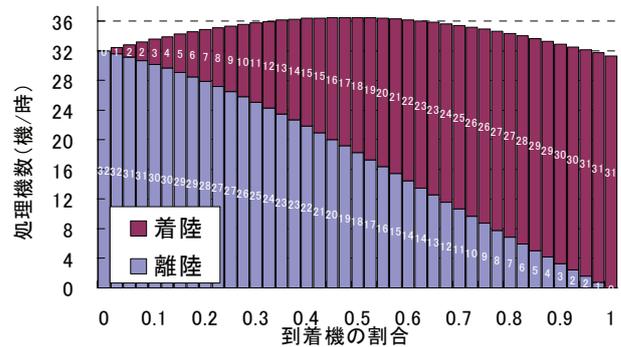


図-2 Mixed-Modeの場合の離着陸処理容量の例

(2) ATMパフォーマンスと羽田再拡張後の管制運用

羽田に関して言えば、現在は2本の滑走路を離陸および着陸専用で使用しており、基本的には離着陸の順序付けは考慮する必要はない。しかし2010年の再拡張後はMixed-Modeの運用や離着陸経路の交錯による複数滑走路の従属運用が生じ、離着陸順序付け如何で離着陸容量が大きく変化する。特に南風運用時にはDラン着陸機の着陸間隔やA・Cラン離陸機の後方乱気流区分からみた離陸順序が容量確保に対して大変重要な意味を持つ（図-3）。それら詳細については紙面の都合上割愛するが、ここでの問題意識としては、これら離着陸の順序付けの高度化に対してATMのパフォーマンスが大きく影響するという点である。つまり滑走路の容量を最大化するための離着陸の順序、タイミングをATMにより高度に

制御することで遅延の解消や安全な運航が可能となるのである。一方で、これらATMシステムの高度化には時間を要し、さらには到着空港における滑走路進入順序付けや間隔設定のような細かい制御を完全に達成可能なATMは近未来では不可能かもしれない。つまり、上位のシステムとしてATMシステムにより比較的大局的な制御を実施し、比較的局所的・詳細な制御はターミナルエリアで実施するといった、階層的な運用による効率化が、ATM高度化の過渡期には特に必要だと考えられる。

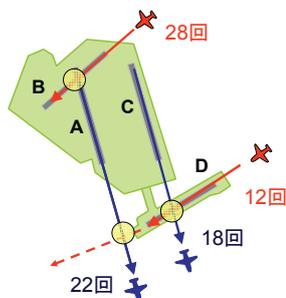


図-3 羽田再拡張後の滑走路運用と発着回数（南風時）

また、羽田空港再拡張後は羽田にも国際便が多数就航することになるが、そのことが関東ターミナル空域の管制運用に与える影響の1つとして、到着便数の偏りや集中、遅延の増加の可能性が考えられる。これまで一部の例外を除き国内線専用であった羽田空港に一定程度の国際便が就航すると、就航路線長や便数にも因るが、国際便の性格上到着遅延（もしくは早着）が生じやすいと想像される。また、国際便はフローコントロールが国内線と比して困難であることも影響し、到着便数の偏りによる混雑の発生頻度や混雑の度合い、遅延が増加する可能性がある。その結果、フローコントロールで制御しきれない到着便を、ターミナル空域におけるHLD（進入管制区入域前）で待機させる頻度が増すことが考えられる。この際、一度HLDに入れると、HLD離脱指示のタイミングの問題で間隔設定にロスが生じ易く（航空路管制が管理していると特に）、結果、滑走路処理容量の低下に繋がることも考えられる（関東空域再編後は羽田進入管制区が縮小されるため、その影響をより受けやすい可能性がある）。この問題への対応としてNYの例を紹介する。現在NYでは大規模な空域再編が実施中である（詳細についてはFAA⁹⁾や筆者の報告¹⁰⁾を参照）。現在TRACON（進入管制区）内のTraffic Management Unit（TMU）で各空港の滑走路容量（気象条件等により変化）と予定到着機数を比較し、必要に応じて、TRACONへの入域直前でHLDをさせている（コマンドセンター（米国のATMセンター）で制御しきれないターミナルへの入域機をTRACONのTMUにて制御を実施）。ここで、HLDの管理は現在航空路管制で行っているが、TRACONで管理した方がHLDからの誘導が効率化される

ため、HLDのTRACON内移設も検討されている（航空機のヘディングをみながら、任意の層からのHLD離脱を可能とし、さらに、複数の層のHLD機をそれぞれ15度以上分岐して離脱させることで、複数層から同時に離脱と降下指示が可能とすることで、間隔設定のロスを最小化できる等）。羽田の滑走路運用方法や出発到着経路の設定にも大きく影響を受けると考えられるが、NYで実施しているようなHLD機の処理の効率化のためにターミナル空域外縁部のHLDのTRACON管理と柔軟な離脱処理方法も参考にしながら、関東空域においてもHLDや到着経路等の戦略的設計による到着便混雑への対応方法の検討が、ATMのパフォーマンス向上とともに必要だと考える。

4. おわりに

本報告では、ATMによるフローコントロールのパフォーマンスとターミナル空域における管制運用方法といった技術的側面についての考察を、羽田再拡張や関東空域再編という直近の環境変化を念頭に行った。また、併せて、空港発着容量の算定・設定方法や航空機遅延の実態および対策といった社会制度面とフローコントロールの関係についても考察を行った。断片的、定性的な考察が多く含まれるため、今後、客観的なデータに基づく分析や体系的な考察などが必要である。

謝辞：

本報告における考察にあたっては、政策研究大学院大学森地茂教授、東京工業大学大学院屋井鉄雄教授との議論を参考にさせていただいた。また本研究は科研費（若手研究（B）20760352）を受けて実施した研究成果の一部である。

参考文献：

- 1) 大屋文人：The Flow Control, 「航空管制」, No.4, pp.18-31, 2008.
- 2) 蔭山康太, 福田豊：出発空港での地上走行におけるATMパフォーマンス評価, 第46回飛行機シンポジウム講演集, CD-ROM, 2008.
- 3) 坂下文規：羽田空港における航空遅延に関する研究, 政策研究大学院大学開発政策プログラム修士論文（中間報告）, 2009（2月）.
- 4) 飯沼忠康, 竹内伝史：単一滑走路における離着陸分布比較と日滑走路容量の算出—ゆとりある空港を考慮して—, 土木計画学研究・講演集, No.16(2), pp.243-246, 1993.
- 5) 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法に関する研究, 土木学会論文集D, Vol.64, No.1, pp.122-133, 2008.
- 6) 市村修一：「空港処理容量についての考え方」について, [航空の安全及び経済に関する研究会40], 財団法人航空保安協会, 2000.
- 7) EUROCONTROL: Report on Punctuality Drivers at Major European Airports, 2005.
- 8) Tether, B. S. and Metcalfe, J. S.: Horndal at Heathrow? Capacity creation through co-operation and system evolution, Industrial and Corporate Change, Vol. 12, No. 3, pp.437-476, 2003.
- 9) FAA: New York/New Jersey/Philadelphia Airspace Redesign - Final Environmental Impact Statement (FEIS), 2007.
- 10) 平田輝満：ニューヨーク空域における航空管制の現状と空域再編, 第46回飛行機シンポジウム講演集, CD-ROM, 2008.