

航空管制に関する研究レビューと今後の研究課題

Review of Research on Air Traffic Control and its Further Topics

清水吾妻介*・屋井鉄雄**・平田輝満***

By Azumanosuke SHIMIZU*・Tetsuo YAI**・Terumitsu HIRATA***

1. はじめに

近年の航空交通においては、需要の増大が続く一方で経済のグローバル化進展と地球環境意識の高まりによりニーズが多様化・高度化すると同時に制約条件がより厳しいものになっている。この課題は特に大都市主要空港において近年益々難しくなっており、その解決のためには、滑走路等のハード整備のみならず、航空管制における手法の運用方法の効率化・高度化といったソフト対策が極めて重要である。しかしながら、我が国における航空管制研究はこれまで欧米に比べて報告数が少なく活発であるとはいえない。今後我が国の航空交通の効率化、容量拡大を検討する上で、我が国独自の制約や文化を考慮した研究の蓄積も重要である。そこで本研究では、世界各国で進められている既存空港・空域運用の高度化や新たな新しい管制システム施設・システムの整備・構築などに関する研究、また空港容量や遅延の考え方についての基礎研究を含め、航空管制の視点からレビューし今後の研究課題について整理する。

2. 航空交通に影響を与える要因と研究対象

航空交通の効率性や離着陸容量に影響を与える要素としては、空港の施設（スポット、エプロン内経路、誘導路、滑走路など）の数と規模、形状、配置だけでなく、空港周辺の空域（ターミナル空域）内の到着・出発経路、待機経路の構成、さらにその外側の航空路ネットワークがある。これらに対しては空港周辺の土地利用や騒音影響に代表される環境制約、気象条件、また近接他空港・空域の影響などが大きな制約条件となる。また、離着陸する航空機の機種（後方乱気流区分）や速度、航法精度、またダイヤの設定や滑走路の使用法、離着陸順序や方面なども空港・空域容量に複雑に関係している。航空管制は、空港と空域を含めたこれらの要素内を移動する航空機同士の上下前後左右の距離的または時間的な間隔を規定し調整する役割を担っており、したがって航空管制

を効果的に実施することが全体の効率向上に大きく寄与する。また、各要素とその運用方法は航空管制を安全かつ円滑に実施することができるように計画・設計されることが必須であり、そのための管制官およびパイロットのヒューマンファクター研究も重要である。近年では技術革新も伴い航空交通管理（ATM）による高度な管制運用・空域管理による効率化や環境負荷低減が世界中で研究、実施されており、そのための管制支援システムの開発も精力的に行われている。このように様々な要因が航空交通や航空管制と密接に関連しており、その研究範囲も幅広いが、本稿では紙面の都合から空港・空域容量に関する基礎研究とATMに関する研究を主に紹介する。

3. 航空管制研究に関するレビュー

(1) 空港容量に関する研究

a) 空港（滑走路）処理能力の計算手法

欧米では滑走路処理能力に関する研究が古くは1950年代からあり、Blumstein¹⁾は解析的手法と処理能力影響要因について示している。その後、多くの研究者により航空機の進入速度の確率分布や各種のパラメータを取り入れたより詳細な処理能力モデルの研究が進められ、単一滑走路をはじめ一般的な複数滑走路システムとその運用に関する研究が進められて来た^{2) 3)}。FAA（米国連邦航空局）が作成した滑走路配置、航空機ミックス（機材構成比率）、管制方式等の諸条件を考慮した空港容量計算マニュアル⁴⁾は、米国内の長期的な空港計画実務に使用されてきた。同マニュアルは米国における空港容量の一般的概略値を得るためのもので、個別の空港容量を精度良く計算するにはその空港に特化した詳細な解析的モデルやシミュレーション・モデルを用いる必要がある。

b) 空港（滑走路）運用の最適化

空中にある先行機と後続機の間に保つべき主な間隔としてレーダー間隔と後方乱気流間隔があり、後者は両機の機種組合せにより異なる。また航空機の速度と滑走路占有時間は離着陸の別と機種で大きく異なる。これらの条件をパラメータとして滑走路運用を最適化するOR的な研究報告も多い。Gilbo⁵⁾は複雑なモデルを使用するのではなく離着陸実運用回数を用いて離着陸順序の最適化する手法を示している。

キーワード：航空管制、航空交通管理、空港計画

* 学生員，工修，東京工業大学大学院総合理工学研究科
(横浜市緑区長津田町4259-G3-14, TEL045-924-5675)

** 正員，工博，東京工業大学大学院総合理工学研究科

*** 正員，博(工)，運輸政策研究機構運輸政策研究所

c) 平行滑走路

前項のOR的手法とは別に、滑走路配置、滑走路占有時間等の処理能力影響要素を直接改善することを目的とした研究も多い。平行滑走路について、ILS進入（精密計器進入）を行う場合、滑走路の中心線間隔が1310m以上であれば（オープンパラレル）互いに独立に運用できるが、間隔がそれに満たない場合（クロスパラレル）は双方の進入機の間斜めに安全間隔を確保する必要が生じ、処理能力をフルに発揮できなくなる。できるだけ狭い滑走路間隔でも独立運用を可能にするための研究が主として米国を中心に積極的に行われた^{6) 7)}。独立運用に必要な条件を満たすため、従来より高性能なレーダーを使った不可侵区域監視システム（PRM）の導入が検討され⁸⁾、現在では実運用がなされている。同時進入を可能とすることで航空機数が増えるため、その際の管制官を支援するツールの研究も行われている⁹⁾。クロスパラレル滑走路を効率良く運用するためにJanic¹⁰⁾は、2本の滑走路の接地点位置をずらす方法と、片方の進入を急勾配にする方法を提案している。二つの方法とも先行機の後方乱気流の影響を避けて運用間隔を短縮するものであり、類似の手法は独逸フランクフルト空港で導入が検討されている。

d) 非平行滑走路

非平行滑走路、すなわち2本の滑走路が八の字に配置され進入経路の延長線が交差している場合についても、同時進入を可能にする研究が行われている。2機の航空機が収斂する形で進入するので管制官の負担が大きくなることが予想されるため、Mundra¹¹⁾は、収斂型進入への従属計器進入を行うために必要な条件と管制支援ツールのコンセプトを示している。

e) 滑走路占有時間

滑走路占有時間は、連続して滑走路を航空機が利用する場合の時間間隔に直接影響を及ぼす。着陸機の滑走路占有時間を短縮するには、着陸機が接地後減速して滑走路離脱が可能になる位置に脱出誘導路があることが望ましいが、滑走路を使用する航空機の性能や気象条件に依存するので航空機ミックスを考慮した最適化が必要になる。Goslingら¹²⁾は滑走路離脱位置を適切に配置することにより滑走路占有時間を短縮でき滑走路処理能力を改善することができることを示し、Sheraliら¹³⁾は、離脱誘導路の最適位置をシミュレーションで求める手法を示した。また Ruhl¹⁴⁾は、脱出位置を与件として滑走路占有時間が最小になるように、着陸機が減速率をコントロールする自動脱出ガイダンスシステムを提案している。我が国では、空港容量算定にあたって時間帯発着数（スロット）を決める過程で滑走路占有時間とそのバッファ値が使用されるが、屋井ら¹⁵⁾はバッファ値を統計的手法を用いて見直すことにより容量向上の可能性を示

している。

(2) 空域容量に関する研究

空域容量は、空域内の飛行経路の配置と、航空機間に設定される管制間隔によって物理的な上限があるが、むしろ管制官のワークロードとヒューマンファクターが上限となる場合が多い。空域容量に関しては我が国でも比較的研究報告が多く、喜多ら¹⁶⁾は管制作業の振り分けからみた最適セクタ分割法を示し、さらに最適セクタ分割の下で、待ち行列の考え方からモデル化し、管制交通容量の算定法を提案した。Tofukji¹⁷⁾は、東京国際空港の拡張計画に対応した新しい航空路構造の検討と評価に用いるため、リアルタイム・シミュレーションを行い、管制官役とパイロット役のワークロード限界から、既存の管制セクターの容量と新しい航空路構造でのセクターの容量を求めた。福島ら¹⁸⁾は関西空港開港時やその後の構想に対応したターミナル空域を検討するにあたって、管制処理の限界を調べるため管制官を含めたリアルタイム・シミュレーションを行い、同時管制機数の限界値と実効的な着陸容量を示した。

空域容量の考え方と予測手法は、世界的に統一された規準があるわけではなく、国ごとに大きく異なっていることがMajumdarら¹⁹⁾により示されている。

管制官のヒューマンファクターは空域容量および安全の面で非常に重要であるので研究報告数も多いが、紙面の制約から以上にとどめる。

(3) 航空交通管理（ATM）に関する研究

a) 航空交通流に関する研究

航空交通流とそれを扱うネットワークモデルの研究は1980年代半ばに米国および欧州で空域混雑により遅延が増加したことを受けて盛んになった。Odoni²⁰⁾は、ネットワークモデルとして、遅延やコストの概算が迅速にできる政策分析用モデル、空域計画や運用方式の長期研究に使用する詳細モデル、詳細でありかつリアルタイムでフローマネジメント実務に使用できる機能を持つ運用支援モデルの三つのレベルのモデルが必要であることを論じた。この考え方は、後の米国の航空システムが備えるシミュレーション機能の構成に組み込まれている。Bianco²¹⁾は、航空交通流を事前に計画して無駄のない運用をすることが、航空システムにかかるコストや安全性確保の上で重要であるとした上で、航空交通管理のマルチレベルモデルを提案し、フローコントロールの最適化アルゴリズムを示した。航空交通管理マルチレベルモデルは時間的に4つのレベルで構成されており、第1のレベルは空域構造や航空路や航空管制システムの全体的な計画をするレベルで、飛行の1年程度以上前。第2のレベルは予想される航空需要に応じてフライトスケジュー

ールの計画をするレベルで、飛行の数ヶ月程度前。第3のレベルは戦略的な交通流の制御や個々の航空機の経路変更等を行うレベルで、飛行の数十分から数時間前。第4のレベルは戦術的に個々の航空機に対するリアルタイムの管制指示を行うレベルで、航空機は飛行開始直前か飛行中である。このマルチレベル管理の考え方は現在の航空交通管理システムに広く使われている。

我が国において、航空交通流管理に関する研究は他分野に比べて多く行われており、東福寺²²⁾は東京国際空港機能拡張により増加する航空交通量に対応するための航空交通流管理手法を調べることを目的として、航空路セクタとターミナル空域のシミュレーションを行い平行経路の利用に出発規制を併用した手法を提案した。福島ら²³⁾は戦略的フェーズに相当する飛行計画段階での調整に関するシミュレーションを行っている。

b) 順序付け・スケジューリング、間隔調整

航空交通流に限らず航空管制は通常FCFS (First-Come First-Served) で行われるが、空港容量の項で述べたように、航空機の手遅れや後方乱気流の強さ、使用する飛行経路の特性や他経路との競合状況などを考慮すると、航空機の順序の入替え（シーケンシング）を行うことにより運用効率を向上させることができる場合が多い。特に到着機流が空港へ向かって集まり、最終的には限られた本数の最終進入経路に航空機が密に並ぶターミナル空域においては、順序付けの重要性が高い。Vandevenneら²⁴⁾は、到着機を滑走路運用に最も適したタイミングで滑走路に到達させるような機能を持つターミナル管制支援システムについて、システムの有効性や容量や遅延が、航空機のターミナル空域外縁到達時刻の確率的変動からどのような影響を受けるかを定量的に示した。同様のターミナル管制支援システムであるNASAの最終進入間隔設定ツールのシミュレーション実験結果がDavisら²⁵⁾により報告されている。このツールはNASAで開発が進められてきた管制自動化(管制支援)システムであるCTAS (Center/TRACON Automation System)の一部であり、McNallyら²⁶⁾によりCTASのコンフリクト予測とコンフリクト回避のための計画機能の運用試験結果が報告されている。

基本的にFCFSである航空機に単純に順序付けをすると、順番を遅らされた機にとってはその分だけ出発や到着が遅れるので、その便が一旦空港に着いた後のターンアラウンド便に影響が出る場合も考えられ、乗り継ぎ便を待たせる場合にはより大きな影響が出ることとなる。このような不具合を軽減するために、同一航空会社の便同士で順序を調整することが考えられている。Carrら²⁷⁾は乗り継ぎ便がある到着機に優先権を持たせたスケジューリングと順序付けを行う手法を提案し、シミュレーションによりその効果を示した。Soomerら²⁸⁾は単一滑走路への到着機に関して、コストを考慮したエアライン内順序付

けの解法を示し、欧州のハブ空港を対象にシミュレーションを行い、大きなコスト削減が得られることを示した。これらは航空会社や管制機関をはじめとする関連組織による協調的意思決定(CDM)の代表的な例ではいが、CDMは航空システムの効率や安全性向上等の様々な面で今後の発展が期待される。

c) 地上待機

航空交通管理の中で比較的多用されているのが航空機を出発させずに地上で待機させる手法である。地上待機は空中待機に比べて、空港のスポットやエプロンや誘導路などを占有してしまう欠点があるが、燃料節約や、待機空域を占有しないため管制負荷を増加させない等の利点がある。喬木ら²⁹⁾は空中待機による遅延とターミナル空域内での遅延を考慮した出発規制によるリアルタイムの航空交通流管理を提案しシミュレーションを行ってその有効性を示した。Richettaら³⁰⁾は確率的線形計画により単一空港の地上待機問題を扱った例を示し、Vranasら³¹⁾は整数計画により複数空港の地上待機問題を扱った例を示し、待機判断を時間の経過と共に変化させるアルゴリズムを示した。

d) 飛行経路管理

近年の技術革新により、航空機は管制から指示された経路や自機で選択した4次元経路（立体的経路に時間を指定したもの）を、従来より高精度に飛行することができるようになった。Haraldsdottirら³²⁾は機上のFMSと地上ベースの管制自動化システムを使用した三次元飛行経路と速度調整による到着機管理が、空港と空域の容量向上に有益であることを示している。

我が国では、航空機に自動間隔確保機能を持たせた分散型間隔管制システムにより管制のワークロードを軽減し、高精度の衛星航法により航空機自身が飛行経路の最適化を行い騒音軽減と乱気流回避を行うことを可能にするシステムの研究が張替³³⁾により報告されている。

(4) 環境を考慮した空港容量・航空管制研究

航空機騒音による空港周辺への環境影響は、空港容量を向上させようとする際の大きな課題の一つである。Ignaccolo³⁴⁾はFAAの騒音影響評価ソフトであるINMを用いて、騒音の大きさ、機種構成、運用回数および騒音影響面積の4つの要素の関係を調べ、空港計画実務での使用を意図して要素間の変化の関係が容易に分かるような早見表を作成した。前項で述べたように航空機の性能が向上したため、騒音影響を最小にするような3次元飛行経路を飛ぶことも可能になった。Clarke³⁵⁾は到着機について、衛星を用いたRNAVにより従来よりさらに静かな騒音軽減飛行方式が可能であり、そのためには管制官が適切な順序付けと間隔設定を行うことが必要であることを示した。

4. 空港・空域容量研究における今後の課題について

我が国における空港・空域容量研究を航空管制の視点から考えた場合に、今後の課題の例として以下のものが挙げられよう。空港・空域容量に関しては、管制運用に関わる実績データの解析や新技術を活用した多様な容量拡大・効率化方策の検討、平行滑走路や収斂滑走路の運用方法、高精度な進入出発経路設定、滑走路占有時間の短縮、複雑な滑走路運用での容量計算方法、容量（スロット）設定と遅延への影響の分析などが挙げられる。航空交通管理に関しては、空港や空域における交通量の予測システムや精度向上に関する検討、容量超過の原因分析と制御対象機の選定や制御時間設定のあり方に関する分析、ターミナル空域内での出発・到着機の適切な順序付けや航空機間隔の最適化と高精度な間隔調整、ターミナル空域到着時刻の高精度化などの効果・影響分析や実現方法の検討、航空機間隔の最適化と高精度な間隔調整、ターミナル空域到着時刻の高精度化などが挙げられる。また、容量拡大や効率化の制約となる騒音影響についても、先進的騒音軽減飛行方式、滑走路運用の高度化による騒音影響分散といった技術的検討とともに、低騒音機材の有効活用や騒音負担の在り方などについても検討が必要である。またヒューマンファクターに関しては、ATMのサブシステムともなる管制官のワークロード評価方法やその軽減のための管制支援システムの開発に関する研究が挙げられる。

5. おわりに

本稿では航空管制に関する研究について主に空港・空域容量および航空交通管理の視点からレビューを行い、我が国における今後の研究課題について簡単に考察を行った。前述のような検討にあたっては航空管制関連のデータが現状では不足しており、今後、基礎データの公開が進み、広く研究者が詳細な分析検討や手法の開発を行うことができるようになれば、我が国の航空管制研究も活発化し、ひいては航空システム全体の効率向上につながる事が期待される。

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) Lebron,J.E. : Estimates of Potential Increases in Airport Capacity Through ATC System Improvements in the Airport and Terminal Areas, FAA-DL-5-87-1, 1987.
- 4) FAA : Airport Capacity and Delay, Advisory Circular 150/5060-5, 1985.
- 5) Gilbo,E.P. : Airport Capacity: Representation, Estimation, Optimization, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.1, No.3, pp.144-154, 1993.
- 6) Haines,A.L. et al. : Operational Techniques for Increasing Airport Capacity, 27th Annual ATCA Fall Conference Proceedings, 79-84,1982.
- 7) Lyons,B.J. : Maximum Runway Capacity Obtainable for Dependent Parallel Approaches, 36th Annual ATCA Fall Conference Proceedings, 611-617,1991.
- 8) Lind, A.T. : Results of Simulation Studies of Precision Runway Monitoring of Independent Approaches to Closely-Spaced Parallel Runways, 36th Annual ATCA Fall Conference Proceedings, 677-683,1991.
- 9) Slattery,R et al. : Effects of ATC Automation on Precision Approaches to Closely Space Parallel Runways, AIAA-95-3367, 1995.
- 10) Janic,M. : Modelling the capacity of closely-spaced parallel runways using innovative approach procedures, Transportation Research, Part C, Vol.16, pp.704-730, 2008.
- 11) Mundra,A.D. et al. : Capacity enhancements in IMC for converging configurations with down-link of aircraft expected final approach speeds, 20th Digital Avionics Systems Conference Proceedings, vol.2 pp.7E7/1-7E7/13, 2001.
- 12) Gosling,G.D. et al. : Measures to Increase Airfield Capacity by Changing Aircraft Runway Occupancy Characteristics, Research Report, Institute of Transportation Studies, University of California, 1981.
- 13) Sherali,H.D. et al. : An Integrated Simulation and Dynamic Programming Approach for Determining Optimal Runway Exit Locations, Management Science, Vol.38, No.7, 1992.
- 14) Ruhl,T.A. : Empirical Analysis of Runway Occupancy with Applications to Exit Taxiway Location and Automated Exit Guidance, Transportation Research Record 1257.
- 15) 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, Vol.64, No.1, pp.122-133, 2008.
- 16) 喜多秀行, 信原伸司, 本間一 : 広域管制空域の交通容量に関するモデル分析, 土木計画学研究・講演集, No.15, pp.603-608, 1992.
- 17) Tofukuji,N. : An Enroute ATC Simulation Experiment for Sector Capacity Estimation, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.1, No.3, pp.138-143, 1993.
- 18) 福島幸子ほか : 関西ターミナル空域モデルにおける到着機の管制処理について, 電子航法研究所報告, No.83, 1995.
- 19) Majumdar,A. et al. : En-route sector capacity estimation methodologies: An international survey, Journal of Air Transport Management, Vol.11, No.6, pp.375-387, 2005.
- 20) Odoni,A.R. : Issues in Modeling a National Network of Airports, Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference, pp.756-761
- 21) Bianco,L. : Air Traffic Management: Optimization Models and Algorithms, Journal of Advanced Transportation, Vol.26, No.2, pp131-167,1992
- 22) 東福寺則保 : 実時間ダイナミックシミュレーション実験による航空交通流管理手法の一検討, 電子情報通信学会論文誌, B-II, Vol.J79-B-2, No.1, pp.78-85,1996
- 23) 福島幸子ほか : 飛行計画時調整のシミュレーション概要, 電子情報通信学会技術報告 SANE2000-41, pp.67-72, 2000
- 24) Vandevenne, H.F. et al. : Planning Horizon Requirements for Automated Terminal Scheduling, 35th Annual ATCA Fall Conference Proceedings, 440-451,1990
- 25) Davis,T.J. et al. : H.Erzberger, S.M.Green, Design and Evaluation of an Air Traffic Control Final Approach Spacing Tool, Journal of Guidance, Vol.14, No.4, pp.848-854, 1991
- 26) McNally,B.D. et al. : Field Test Evaluation of the CTAS Conflict Prediction and Trial Planning Capability, AIAA-98-4480, 1998
- 27) Carr,G.C. et al. : Airline Arrival Prioritization in Sequencing and Scheduling, 2nd USA/Europe ATM R&D Seminar Proceedings, 1998
- 28) M.J.Soomer, et al. : Scheduling aircraft landings using airlines' preferences, European Journal of Operational Research 190, pp.277-291, 2008
- 29) 喬木, 森川博之, 水町守志 : 航空交通流管理のダイナミック出発規制に関する考察, 電子情報通信学会技術報告 SANE95-65, 1995
- 30) Richetta,O. et al. : Solving Optimally the Static Ground-Holding Policy Problem in Air Traffic Control, Transportation Science, Vol.27, No.3, pp.228-237, 1993
- 31) M.Vranas,P.B. et al. : Dynamic Ground-Holding Policies for a Network of Airports, Transportation Science, Vol.28, No.4, pp.275-291, 1994
- 32) Haraldsdottir,A. et al. : Performance analysis of arrival management with 3D paths and speed control, 26th Digital Avionics Systems Conference Proceedings, pp.1.B.5-1, 2007
- 33) 張替正敏 : JAXA DREAMS 研究計画について, 第46回飛行機シンポジウム講演集, pp.479-485, 2008
- 34) Ignaccolo,M. : Environmental capacity: noise pollution at Catania-Fontanarossa international airport, Journal of Air Transport Management, Vol.6, 191-199, 2000
- 35) Clarke,J.P. : The role of advanced air traffic management in reducing the impact of aircraft noise and enabling aviation growth, Journal of Air Transport Management Vol.9, pp.161-165, 2003