

航空交通システムにおける 交通流制御の現状と将来計画

平田 輝満¹・坂下 文規²

¹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

²正会員 社会システム株式会社 社会経済部 (〒153-0043 東京都渋谷区恵比寿1丁目20番22号)
E-mail: sakashita@crp.co.jp

航空交通では多数の航空機が安全に効率的に飛行するために、基本的に航空管制官の指示に従って飛行している。混雑空港や空域では交通需要が容量を超えることが予測される際には、出発時刻を調整することで、過度の混雑を回避している。このような交通流制御は、現状では、ある空港や空域における量的な制御の側面が強いが、将来は個々の航空機の4次元軌道(時間を含む)管理がベースとなり、そのような軌道ベース運用を前提とした交通流制御の在り方の検討が必要となっている。本報告では、我が国における航空交通システムの交通流制御の現状について実際の制御実績と遅延時間の分析とともに紹介し、その将来の計画についても考察を行う。

Key Words : Air Traffic Flow Management, Airport Capacity, CARATS

1. はじめに

世界的な航空交通量の増加、その中でも特に今後はアジア発着の航空交通量の増加が見込まれている。これまでも増加する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。さらに2010年には、我が国においても将来の航空交通システムの長期ビジョン(Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems : CARATS)^{1) 2)}が策定され、世界と協調しながらも我が国の特徴を踏まえた航空交通システムの革新に向けて動き出しているところである。その中でも、現状の固定的な航空経路をも

とに航空管制官がその場の交通流を見ながら針路等の指示を行う制御の方法から、より柔軟な航空経路の設定と交通流の将来予測から各経路ポイントの通過時刻を前もって積極的に制御して交通流の効率化を図る4次元軌道ベース運航(3次元の位置+時間)への移行を目指す点がCARATSのシステム革新の中核となっている。さらに、我が国の航空交通システムの最大のボトルネックである羽田空港等の混雑空港の処理容量についても、離着陸の戦略的な順序付けによる容量拡大方策の検討が重要とされており、上記の軌道ベース運航のシステム設計を行う上でも、混雑空港の容量への影響と効果についても十分に考慮する必要があると考えられる。

以上を背景に、本稿では、まず、航空交通システムの特徴を整理し、その後、我が国で実施されている初期的な交通流制御である出発時刻制御に関して紹介する。最後に、将来の航空交通流制御に関して、主に到着管理システムの観点から考察を行う。

2. 航空交通システムの特徴と航空交通流管理(ATFM)の現状

航空機が空域・航空路を飛行する際は、低高度を目視で飛行する有視界飛行方式(VFR: visual flight rules)などを除き、基本的に航空管制官の指示に従い、地上の航行援助無線施設や衛星からの電波を利用しながら飛行または走行を行う。これは、高速で飛行する多数の航空機を視界の悪い雲の中

などでも安全かつ効率的に飛行させるためであり、そのためのルール(航空機間の最低間隔など)が管制方式基準として国際的に決められている。国ごとにローカルルールも存在するが、国際的な運航であるため基本的なルールは国際標準として同一である。航空会社は管制機関から航行援助サービス(Air Navigation Service)を受けて航空機を運航することになる。旅客や貨物に対してはサービスプロバイダーである一方で、管制機関に対しては逆にユーザーの立場になる(図1)。

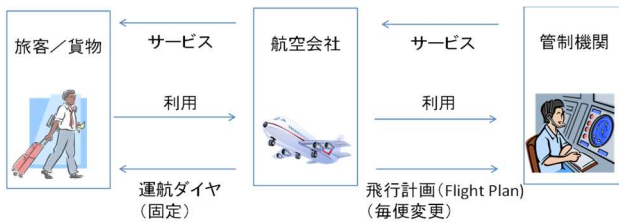


図-1 航空交通システムにおけるサービスプロバイダーとユーザー

例えば、遅延について考えると、旅客にとっては、サービスプロバイダーである航空会社が提供する固定的な時刻表からの遅延時間が問題となる。しかし、航空会社と管制機関の関係でみれば、航空会社が毎日管制機関に提出する各便の飛行計画(Flight Plan)からの遅延が問題となる。飛行計画はその日の気象条件や機材繰りに応じて毎日変更されるため、そこに記載される出発予定時刻や飛行予定経路が毎日同一とは限らない。管制機関はこの飛行計画をもとに管制業務を行うが、単にレーダー等を見ながら飛行方法を指示するだけでなく、1990年代から米国を中心に航空交通流管理(ATFM: Air Traffic Flow Management)という需要と容量のバランス管理業務も行うようになってきた。これは、飛行計画等をもとに数時間先までの各空港や空域における需要(航空機の交通量)を予測し、気象条件等によって変化する空港・空域容量に照らして需要超過が予測された場合に、需要をあるレベルまで制限する方法である。例えば、到着空港上空での空中待機時間の軽減を目的に、出発空港で離陸時刻を遅らせる方法が代表的である(出発時刻制御)。その他にも、特定空域への入域間隔を調整したりする方法もあり、それらの交通流制御により、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。図-2に交通流制御のプロセスの概要を示している。交通流制御を判断、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)、気象条件等により変化する容量値と比較しながら必要に応じて交通流制御を行う。技術的には将来的な交通量の予測精度の向上が課題の1つであり、大屋³⁾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スロットから離陸滑走路までの走行時間の見積もり誤差、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。

ATFMの実施に際しては、需要予測の情報源となる飛行計画の正確性や最新の状況への更新が重要であり、航空会社に正確な飛行計画を提出・更新させるためのインセンティブがATFMシステムの制度に組み込まれていることがある。米国の例では、従来、航空会社がリアルタイムのフライト情報(遅延など)をFAA(連邦航空局:管制を実施)に提供し、出発制御が実行されると、2重に遅延を被り、遅延報告をしない方が個々のフライトでは得をする可能性があったため(Double Penalty問題)、航空会社からリアルタイムの飛行計画情報が集まらず、交通量予測精度が落ち、結果、不必要な出発制御を実行したり、逆に必要な出発制御が実行されなかったりする問題点が生じていた。これを解決するために、元々のスケジュールの到着時刻で到着の優先権を決める「RBS(Ration-by-schedule)」と、フライトのキャンセルや遅延により空いたスロット(Open Slot)は元々スロットを保有していたエアラインの便が優先的に使えるという「Compression」という2つのアルゴリズムで出発制御を行うように変更された。また、出発制御時刻(EDCT: Expected Departure Clearance time)を遵守させるため、EDCTの割り当てられた航空機は、EDCTから「-5分~+5分」の範囲内で離陸するよう義務付けられており、もしその時間内に離陸できないと予想されたら、新たなEDCTをリクエストすることになっている。我が国ではRBSやEDCT遵守といった考え方は採用されていない。詳細は別稿⁴⁾を参照されたい。

出発制御は空港(滑走路)や空域が混雑した際に発動されるが、我が国ではやはり羽田空港の滑走路容量不足に起因する制御が多い⁵⁾。羽田空港の現状の滑走路運用を図-3に示しているが、基本的に出発・到着が2本ずつの滑走路(経路)を使用している。ここで周辺空域での分合流による輻輳を避けるため、方面別滑走路方式を採用している。例えば、南風時は南方面からの到着機はすべてB滑走路に着陸させ、北からの便はD滑走路に着陸させることになる。一方で図中に示すように滑走路ごとの容量が決まっているので、南北の需要バランスが崩れると、どちらかの滑走路のみが混雑することになる。最近の詳細な統計は不明だが、2016年2月~4月半ばまでの間の43日間を対象にJALとANAのHPで公表されている到着遅延情報を分析すると、管制指示による遅延(出発制御が含まれると考えられる)の記載があった便は99%以上が南(西)方面からの到着便であった。すべての出発制御便にこの記載があるわけではないので、正確な統計ではないが、同じ空港到着ではあるが、方面別滑走路により

遅延割り当ての配分に地域的な偏りがあることが示唆される。方面別滑走路の遅延への影響については別稿⁹⁾を参照されたい。

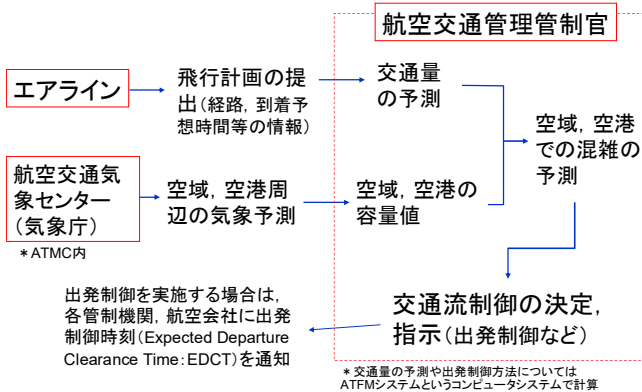


図2 航空交通流制御のプロセス概要

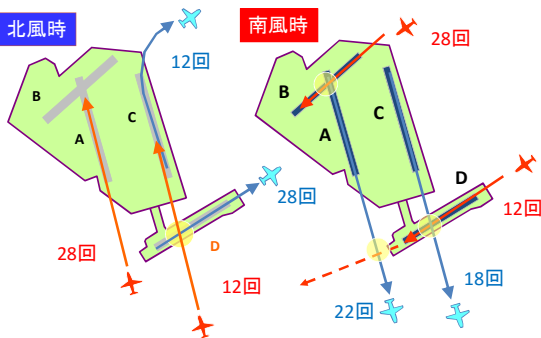


図3 羽田空港再拡張後の滑走路運用と発着容量

3. 航空交通流制御の将来計画について

前述のとおり、欧米や我が国において、航空交通システムの近代化計画が策定され、様々な施策が段階的に実行されている。背景となる技術的な革新としては、主に航空機の航法性能や監視技術が挙げられる。例えば、航空機に搭載されたGNSS(GPSなど)機能により地上からの無線電波を頼らずに精度が高く、かつ柔軟に、決められた飛行経路を飛行することができるようになったこと、航空機のFMS(Flight Management System)によりある地点の通過時刻を精度高く制御できるようになってきたこと、航空機相互で位置情報を通信し、安全な間隔を自動で保ち飛行できるようになってきたこと、航空機の発するGNSS位置情報を地上で集めてレーダーを代替できるようになってきたこと、などがある。これら航空機の能力を最大限に活用し、性能の良い航空機はその能力に見合った効率の良い飛行を極力させるというPBO(Performance-based Operation)というコンセプトも謳われている。これら要素技術を活用した運用コンセプトの一つが前述の4次元軌道ベース運航(TBO: Trajectory-based Operation または4DT)である。従来は、全国の空域をセクターと呼ばれる細かい空域に分割し、各セクターを一人の管制官が担当し、そのセクター内の交

通状況をレーダーでみながら航空機に針路や速度を指示する(レーダーベクターという)。これを我が国では「空域ベース運用」と呼び、TBOを対比させているが、要は、各セクターで個別最適な管制を行っている、空域全体では最適になっていないことを回避することを狙っている。また現在位置の情報のみで管制をせず、交通流全体を予測し、あらかじめコンフリクトフリーな軌道(4次元軌道)を各航空機に与え、それを遵守させることで、全航空機の運航効率になるべく最適になる軌道を達成するとともに、管制指示を最小限にし、管制ワークロードも低減させることが目的となっている。

このTBOに関しては、コンセプトはあるものの、具体のシステム設計はまだ研究開発途上である。我が国でもTBOの初期運用として初期的CFDT(Controlled Fix Departure Time)がここ数年試験運用された。これは出発制御のように離陸時刻のみを制御するのではなく、飛行経路途中においても、その先の空域混雑が予測されたら、決められた飛行地点を通過する時刻を制御する方法である。TBOはすべての飛行位置の通過時刻を制御する概念であるが、その一部を制御するイメージである。しかしながら、試験運用では効果が想定通りに発揮されず、今後、その改善が検討されているところである(詳細はCARATS推進協議会資料²⁾を参照)。

また、TBOでの大きな課題の一つは、最大のボトルネックである混雑空港の滑走路容量であり、例えば、飛行機の運航効率を最大化しながらその容量に合わせた到着機間隔を如何に形成するかが重要な検討課題になっている。筆者も参画して電子航法研究所を中心に「航空機の到着管理システム」に関して研究を実施しているが(交通運輸技術開発推進制度H26-)、到着空港(滑走路)に到着すべき時刻が決まれば(たとえば、2分間隔の一定間隔で到着させる、など)、それに応じた到着軌道生成と運航管理がある程度行える方法論の開発が進んでいる。しかしながら、一方で、羽田空港は複数の滑走路において離着陸が複雑に交差しており、着陸機の間隔設定が離陸の処理効率に大きく影響を与える。従って、離陸機の状況や、戦略的な離着陸順序付けによる処理容量拡大の側面も考慮した到着管理システムの検討も必要と考えている。国土交通省においても到着管理(Arrival Manager: AMAN)と出発管理(Departure Manager: DMAN)、地上管理(Surface Manager: SMAN)を相互に連携させて、離着陸の順序付けを効率よく実施する方法を検討している²⁾。ここでは、航空機材の機材繰りによる遅延の伝播・波及も考慮しようとしている。当然ながら、航空輸送は同じ機材を別の路線・便に使いまわし、運航されるため、ある1便が到着遅延すると、後続の出発機も遅れる可能性がある。近年では、LCC(Low Cost Carrier)の参入もあり、各航空会社は、航空機の固定費用の観点から、極力機材の稼働率を上げるため、到着から出発までの折り返し時間(ターンアラウンドタイム)を可能な限り短くしてきている。そのため、全便の遅延が後続便にも波及しやすくなっており、このような現象も到着管理システム

で考慮しないと、全体の遅延を想定通りコントロールできなくなる可能性もある。

参考までに、航空機の波及遅延を観測した結果を紹介する。データはエアラインの公式サイトにて運航情報として公開されている情報を収集し、特定機材を追うために航空機を追跡可能な Web サイト(Flightradar24)を使用し、各便に充当された機材の登録番号を調査した。それら 2 つの情報を収集・統合し、機材ごとの運航実績データベースを構築した。データは 2016 年の 1/7 から 2/25 までの全国の空港の発着データ (計 18681 便) を使用している。遅延波及現象について、遅延の「空港波及率」を定義し、分析を行った。

$$\text{空港波及率} = \frac{\sum_i O_{Ati} + \sum_i P_{Ati}}{\sum_i O_{Ati}}$$

ただし

O_{At} : 駐機時間 t のフライトのオリジナルの到着遅延
 P_{At} : 出発に波及した O_{At} , i : フライト

である。つまり、空港 A に到着した航空機のオリジナルの到着遅延が、折り返し時間 t においてどの程度出発遅延に波及したかという指標である。これを折り返し時間との関係でみたものが図-4 である。結果としては、駐機時間が短いほど、そのまま後続便に遅延が波及する傾向が明確に示されている。このような傾向は坂下⁷⁾でも確認されている。

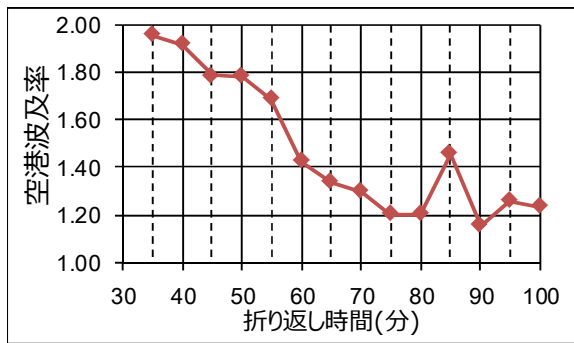


図4 折り返し時間と遅延波及の関係

このように、到着管理システムは将来の航空交通システムを設計する上で重要な要素となると考えられる。航空機の能力にもまだ差異があり、高性能の機材普及を図るためには、そのような装置を義務化するか(米国で ADS-B の義務化といった例がある)、高性能の航空機を優先的に着陸させるといったインセンティブを与える方策 (Best-Equipped Best Served : BEBS⇒Fisrt-Come First - Served : FCFS) も検討されている。TBO では各航空機の時間管理で効率的な交通流の形成を達成しようとしているが、短中期的には、その時間管理の精度が十分ではな

いため、別の方法も様々検討されている。例えば、到着機の合流作業を効率化するため、Point-Merge system というシステムが多く空港で実行されている(図-5)。これは合流点から等距離のアーク上を飛行させ、先行機との間隔がとれたら合流点へ直行指示するというもので、従来からのリニアホールディングという方式に近い。合流作業は管制官にとって比較的大きなワークロードであるが、これは高効率で混雑時にも適用可能なシステムとして実用化されている。これは時間管理というよりは、飛行経路を幾何学的に戦略的に設計し、従来型の管制官による誘導技術を最大活用した方法であり、軌道ベース運用による間隔設定の精度の低さを補うシステムとしても位置付けられるかもしれない。

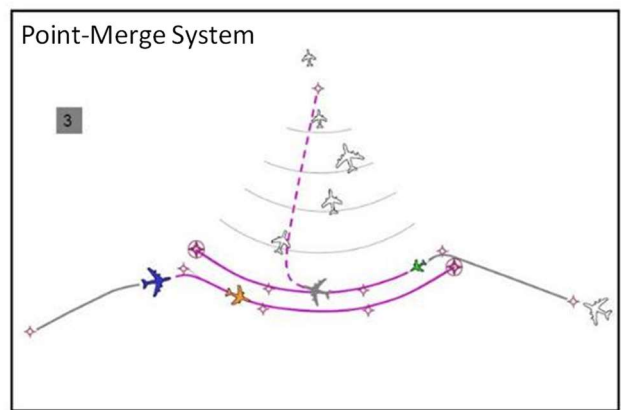


図-5 Point-Merge System のイメージ図 (出典 : Eurocontrol)

4. おわりに

本稿では、航空交通システムにおける交通流制御に焦点をあて、その現状と将来計画について簡単に紹介した。最後に土木計画学研究発表会の発表セッションが他の交通機関との比較が一つの趣旨であるため、ここでは道路交通システムと航空交通システム(現在と将来)の特徴を簡単に比較した表も掲載する(表-1)。正確な情報に基づく表ではないため、あくまで参考であるが、道路交通と比較することで航空交通システムの特徴も理解がしやすくなるかもしれないし、今後の道路交通システムの革新計画の参考になる点もあるかもしれない。

表-1 航空交通システムと道路交通システムの特徴の比較

	道路交通システム	航空交通システム(現在)	航空交通システム(将来)
移動空間	地上・地下(道路面)を走る →2次元空間の移動, 止まれる	空を飛ぶ →3次元空間の移動, 速度が速い, 止まらない	止まれる?(今でもヘリやオスプレイは空中で止まれる:ホバリング)
視認性	周りが見えることが大半(死角はあるが) →目視で運転	周りが見えないことが普通(雲の中など) →目視で操縦できない, 地上無線施設などを利用して飛ぶ	飛行機相互間通信により, 疑似的に周囲が見えるようになる →目視と同じ状況で飛行が可能に?
天候の影響	気象の影響は比較的小さい →走行方法は天候に因らず同じ	気象(特に風と視程)の影響を受けやすい →離着陸の向きや方法, 飛行時間(対地速度)が変わる	飛行機の性能向上で変化?
移動の自由度	多数の自動車自由に走っても比較的安全 →個々のドライバーが自由に走行(自律分散型システム)	多数の飛行機自由に飛ぶと危ない →航空管制官の指示に従って飛ぶ(中央集権型システム) →交通流制御はやりやすい	飛行機の能力を最大活用した自律分散型システムへ移行 究極はフリーフライト
監視能力	リンク交通量や速度, プローブデータによる現在位置・旅行時間等	管制官は, ほぼ全ての飛行機の現在位置・動態情報が分かる	飛行機の将来位置を精度高く予測(コンフリクトフリーな軌道生成と遵守)
運転技能	運転者は皆免許を持っているが, 運転技能はまちまち	操縦者は皆プロで数も限られる	?
自動運転	自動運転はこれから	既に, ほぼ自動操縦(オートパイロット)が可能. 間隔制御はまだ.	間隔制御・自動追従も可能に
責任	車間距離は運転者責任	飛行機間の間隔設定は管制官の責任	間隔の自動制御により責任もパイロットへ移譲

参考文献

- 1) 国土交通省：将来の航空交通システムに関する研究会 http://www.mlit.go.jp/koku/koku_CARATS.html
- 2) 国土交通省：将来の航空交通システムに関する推進協議会 http://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr13_000006.html
- 3) 大屋文人：The Flow Control, 「航空管制」, No.4, pp.18-31, 2008.
- 4) 平田輝満：米国における航空交通流管理の現状－Ground Delay Programに焦点をあてて－, 第42回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2010.
- 5) 国土交通省：第6回「将来の航空交通システムに関する研究会」参考資料

<http://www.mlit.go.jp/common/000055982.pdf>

- 6) 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(土木計画学), Vol.69, No.5(土木計画学研究・論文集第30巻),I_869-I_880, 2013.
- 7) 坂下文規,森地茂,日比野直彦：羽田空港における航空遅延に関する研究,第39回土木計画学研究発表会講演集 CD-ROM,2009.
- 8) Eurocontrol：Point Merge Integration of Arrival Flows Enabling Extensive RNAV Application and Continuous Descent, <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/sesar/point-merge-osed-v2.0-2010.pdf>

(20???.?? 受付)

Current Situation and Future Plan of Air Traffic Flow Management

Terumitsu HIRATA and Ayanori SAKASHITA