

# 主論文の要約

論文題目 高密度航空交通流における自律間隔維持アルゴリズム

氏名 中村 陽一

## 論文内容の要約

本論文では、航空交通システムにおいて新しい概念である航空機の自律的な間隔維持のためのアルゴリズムについて検討した。安全かつ効率的な航空交通流を実現するためのアルゴリズムを明らかにすることを目的とし、数値解析による高密度航空交通流の評価を行った。以下に本論文の内容を示す。

序章では、現行の航空交通システムとその問題点、およびフローコリドーと呼ばれる新しい運航コンセプトの概要について述べた。現在は地上からの管制に基づく航空機の運用が行われているが、航空交通需要の増加が予測される中、交通容量不足や管制官の業務負荷の増大等様々な問題が懸念されている。こうした問題を解決し、より安全かつ効率的な航空交通を実現するために、航空交通システムの変革が世界的に推し進められている。将来の航空交通システムのための重要な概念の一つに自律間隔維持 (Self-Separation) が挙げられる。機上装置の発展により航空機側で周辺の航空機の監視を行い、航空機による自律的な間隔維持が可能になるものと考えられている。各航空機が互いに監視、間隔維持を行うことは、従来の管制官からパイロットへの指示に要する手順を省くこととなり、管制間隔の短縮、管制官の業務負荷の低減、交通容量の増加等の効果が期待される。将来に向けて、自律間隔維持を前提としたフローコリドーと呼ばれるコンセプトが提案されており、混雑空港間を細長い帯状或いは筒状の空域で結び、一方向の高密度な航空交通流を形成することが想定される。一方で航空機の自律的な間隔維持は新しい概念であり、そのアルゴリズムの検討が必要不可欠であることを述べた。

第2章では、自動車交通の研究において利用される最適速度モデルを応用し、方位角の変更による間隔維持アルゴリズムを提案した。運用上許容される最小の間隔ごとに密に並んで飛行する飽和状態の航空交通流を想定したとき、わずかな擾乱により交通に乱れが生じることが予想される。微小な擾乱に対し、速度を変更することにより一定の間隔を維持する場合、交通流を形成するすべての航空機が速度を微調整することが必要となる。一方で、一定速度で飛行しつつ方位角のみを変更する場合、前後の航空機への影響を最小限に抑えつつ間隔を広げることが可能であり、合流を模擬した数値解析により方位角の変更に

よる間隔維持を行う航空交通流においては擾乱が後方へ伝播しないことを示した。擾乱が伝播しないこと、速度を変更する必要のないことから効率の低下は最小限であり、航空交通流においては方位角の変更による間隔維持が有効であることを明らかにした。

第3章では、速度の異なる航空機が同一方向へ飛行する航空交通流を想定し、航空機の経路構造に着目した解析を行った。経済的な運航のためには、すべての航空機が最適経路上において、燃料消費量を最小化する経済速度で飛行することが望ましいと考えられる。一方で経済速度は航空機ごとに異なり、速度の異なる多数の航空機が最適経路上へ向かうことにより最適経路上に航空機が集中し、航空交通流全体としての安全性が低下することを示した。こうした交通流では、帯状の幅を持つ経路を飛行させることにより安全性を向上させ、さらに経済速度に基づき飛行位置を指定することにより、同一直線上の航空機の相対速度差を低減し、より安全かつ効率的な航空交通流を実現可能であることを示した。

第4章では、航空機の間隔維持に関するパラメータの変化に対する航空交通流の振る舞いの変化について述べた。各航空機の間隔維持の挙動に異なる基準を適用した航空交通流においてはコンフリクトが発生することが明らかとなった。接近した2機が共に等しく回避操作を行う場合と比較し、片方の航空機のみが回避操作を行う場合にはより大きな操作が必要となる。すべての航空機が同一方向へ飛行する高密度な航空交通流においては、方位角を大きく変更することは周辺の航空機とのコンフリクトの発生へとつながることとなる。また周辺には多数の航空機が存在し、常に回避すべき方位角へ速やかに変更できるとは限らないため、接近した航空機が互いに回避操作を行うことが重要となる。このように、安全な高密度運航を実現するためには、すべての航空機が等しい基準に基づき回避操作を行うことが必要不可欠であることを明らかにした。

第5章では、機上装置の活用により取得可能な航空機の位置、速度を利用した、より実用的な間隔維持アルゴリズムについて述べた。本解析では、まずフリーフライトに利用される代表的な間隔維持アルゴリズムの一つの適用を検討した。これは、航空機の相対的な位置、速度、および方位角を利用し、航空機の飛行すべき方位角を定めるアルゴリズムである。しかし、本研究において想定するすべての航空機が同一方向へ飛行する航空交通流においては、航空機が回避を行うために過剰に方位角を変更してしまい、コンフリクトが頻繁に発生することが明らかとなった。そこで、すべての航空機が同一方向へ飛行している、という飛行意図を活用し、航空機の横位置を基準として方位角を定めるアルゴリズムを新たに構築した。これにより、互いの位置、速度のみを利用して安全かつ効率的な航空交通流が実現可能であることを示した。フローコリドーのように航空機の進行方向があらかじめ決まっている航空交通流においては、こうした前提を活用することにより、少ない情報量でより効率的な運用が可能であることを明らかにした。

第6章では、各航空機が速度差に基づき回避方向の判断を行うことにより、フローコリドーの内部において、同一の直線上をほぼ同一の速度の航空機群が飛行する航空交通流が形成されることを示した。第5章において構築したアルゴリズムでは、各航空機は互いの横位置に基づき回避が容易な方向へと回避を行う。このような航空交通流においては、飛行する航空機の速度のばらつきが大きいほど、また航空交通流の平均速度からはなれた速度で飛行する航空機ほどより大きい回避操作が必要となる傾向を示した。速度に応じた流れを形成することにより、回避すべき対象となる航空機との速度差を低減し、安全性の向

上および操作量の大幅な低減効果があることを示した。さらに、飛行速度やそのばらつきによらず、航空機の操作量を平滑化する効果もみられることを明らかにした。フローコリドーでは様々な航空会社の異なる速度の航空機が飛行することが想定されることから、経済速度の差異によらずに等しくその便益を享受できるアルゴリズムが必要であり、平滑化の効果は公平な航空交通流の実現に寄与するものといえる。

第7章においては、実運航における空域の有限性を考慮し、帯状空域内部において空域を順守する自律間隔維持アルゴリズムの検討を行った。本解析においては、方位角に加えて速度の変更による間隔維持を行うアルゴリズムを構築し、コンフリクトのない航空交通流を実現可能であることを示した。空域幅が広いほど航空機の左右の空間に余裕が生まれるため、わずかな操作により追い越しが可能となる。一方で、狭い幅の帯状空域において現在の互いの位置、速度を利用した間隔維持を行う場合、方位角や速度の調整が不可能となり、また時間の経過により解除されない状態（デッドロックと呼ぶこととする）が発生することが示された。そこで、デッドロックを未然に防ぐために、構築した間隔維持アルゴリズムを基に、新たに副経路および経済速度情報の活用を検討した。航空機が帯状空域内部における指定された経路上を飛行し、かつ経済速度情報を参照することにより、狭い幅の空域内部においてもデッドロックの発生を未然に防ぎ、円滑な航空交通流を実現可能であることを明らかにした。

第8章では、本研究のまとめとして各章の成果について述べた。これまでに述べたように、本研究では航空機の自律間隔維持という新しい概念に対する検討を試みた。2次元平面内の単純な直線経路を想定し、航空機の自律間隔維持アルゴリズムの構築した。また、自律間隔維持を行う航空交通流を可視化するとともに、航空交通流における航空機の振る舞いについて評価を行った。一方で、実運航においては、高度の変更を含む3次元の運動に加え、各航空機が指定された時刻通りにフローコリドーの出口に到達するための時刻を加えた4次元の制御を行うことが求められる。また、航空機の合流や離脱を伴う航空交通流における適切な運用手順の検討、異常時の対応も必要となる。さらに、実際の交通量や空域の条件に基づき、フローコリドーの幅、形状、配置の検討に加え、フローコリドーと従来空域との接続を考慮した解析も必要不可欠である。このように、フローコリドーの実現には多くの研究課題が残されているが、本研究において得られた知見は、将来の高密度航空交通流における自律間隔維持の実現のために大きく貢献できるものと考えられる。