

15. フローコリドールの運用方式の研究（その2）

名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 ※武市 昇, 福岡 敬介
航空交通管理領域 中村 陽一, 蔭山 康太

1. はじめに

ADS-B^[1]およびそれを用いて他機との安全間隔の確保を支援するASAS^[2]による自律間隔維持（Self-Separation）は、日本のCARATS^[3]、米国のNextGen^[4]、および欧州のSESAR^[5]といった航空交通システムの長期計画において、将来の航空交通管理の新たな概念を実現するための最も重要な機上機能の一つとして位置づけられている。一方、今日の航空交通においては、特定の混雑空港間の交通量の割合が高い。日本国内では、東京と札幌、大阪、福岡および沖縄間の航空便数だけで全体の20%以上を占め^[6]、米国では特定の10%の空港間の航空便が全体の33%を占める^[7]。このような特定の経路上では、多くの航空機がほぼ同一の経路上を同一の方位に向かって飛行する。フローコリドール（Flow Corridor）とは、このような特定の方位の交通量の多い経路に沿って配置される細長い空域として考案され、航空機が自律間隔維持の機能を用いて飛行すること想定されている。図1にその概念図を示す。フローコリドールは、CARATSおよびNextGenにおいてほぼ同様の概念が示され、2020年代半ばの導入が計画されている。

本稿では、まずフローコリドールの概要^[3,4,8,9]を紹介する。そしてその実現のための最も重要な課題である基本的な自律間隔維持方式を航空交通流の数値解析により明らかにする。自律間隔維持は、周辺の交通動態の監視、コンフリクトの可能性の検出、コンフリクト解決のための誘導、誘導に従った航空機の操縦、という一連の手順により運用されることが想定されている。著者らはこれまでに基本的な自律間隔維持方式として他機との幾何的条件を用いた自律間隔維持を提案している^[10,11]。この方式により、各航空機は他機との間隔を維持しながら最適な飛行速度を維持して飛行し続けることが可能となることを明らかにした。しかし、フローコリドールの空域からのわず

かな逸脱が生じてしまうことが課題となった。またこの方式は、航空機上に上記のすべての手順を自動的に実行しうる機上装置が搭載されていることを前提としている。つまり、すべての手順を自動的に実行することが可能な航空機しかフローコリドールを利用できない、ということを経験していることに対応する。一方、各々の手順を実行するためには個別の機上装置が必要となるため、実際には一部の手順をパイロットが手動で実行しなければならない航空機も存在する。このような航空機もフローコリドールを利用できるようにするためにはその条件を緩和しうる自律間隔維持方式が必要となる。そこで本研究では、フローコリドールの空域を厳守しながらも、より多くの航空機がフローコリドールを利用できるよう、機上装置に求められる要件を緩和することのできる自律間隔維持方式を導く。特に、自律間隔維持の手順の一部であるASASによる誘導情報に基づいて航空機を操縦する段階を、パイロットが手動で行うことを想定し、数値解析によりその実現可能性を明らかにする。

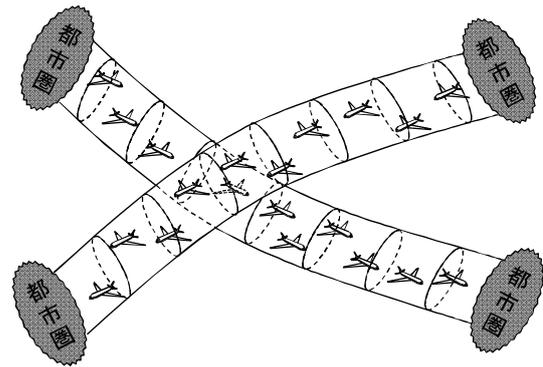


図1 フローコリドールの概念図^[9]

2. フローコリドールの概要

2.1 導入の背景

現在の航空交通では、混雑空港間など特定の空域における交通密度が高くなっており、航空交通システムの長期計画ではそのような空域における高密度運航の安全性および効率性の向上が目

標として挙げられている。そしてこの目標を達成するため、ADS-BおよびASASなど機上での飛行の意思決定を可能とする機上装置を活用した様々な運航方式が想定されている。しかし、ADS-BやASASを搭載しない航空機の動態を機上で把握することはできないため、異なる装備の航空機が混在する空域では地上からの管制を必要とし、その結果空域の交通容量は地上からの管制の処理容量によって制限されることになる。つまり、ADS-BやASASを装備し自律間隔維持の性能を有する航空機が増加したとしても、全ての航空機が装備するようになるまではその能力を十分に活用することができないということである。

したがって、安全かつ効率的な高密度運航を実現するためには、航空機の飛行するべき空域を自律間隔維持の装備により分離することが望ましいものと考えられ、また、現在の航空交通においては、一部の大都市あるいは都市圏間を結ぶ航空路線の交通量の占める割合が高い。そこで、自律間隔維持の機能を有する航空機だけが目的地まで同一方向に飛行する空域としてフローコリドーが考案された。

2.2 想定されている運用概念

フローコリドーは、自律間隔維持の機能を持つ多数の航空機がほぼ同一の方向へ飛行する空域となる。一つのフローコリドーは筒状あるいは帯状の形状となり、航空機は機上の自律間隔維持の機能により、間隔維持だけでなくフローコリドーへの出入りおよびその内部での追い抜きを行う。さらに、フローコリドーを飛行する航空機は航空管制機関より与えられた時間にフローコリドーの出口に到達することが求められる。これにより、航空管制官はフローコリドー内部の航空機を監視する必要がなくなる。

フローコリドーの配置は、その便益を左右する最も重要な要素である。NextGenでは大都市圏の空港から上昇或は降下に必要な距離を離れた位置に出入り口を設けることが考えられており、またこれまでに都市間だけでなく地域間のフローコリドーの導入およびそのネットワーク化を視野に入れた検討も行われている^[12,13]。さらにNextGenでは動的フローコリドーの運用が提案さ

れている。フローコリドーの出入り口および経路を随時動的に変更することにより、悪天候の地域を避けたり、逆に好都合な風を利用したりすることができるものと期待されている。

2.3 期待される効果

フローコリドー内部を飛行する航空機は、自律間隔維持の機能により、近傍の交通状況の把握、他機の接近の判断および必要な間隔制御の一連の手順を速やかに行うことができる。そのため、管制官によるレーダ監視および指示による間隔維持という今日の手順に要する時間を省くことができ、さらに全ての航空機が同一方向に飛行し対向する機体が存在しないため接近の予測性が向上する。これらにより、安全間隔を今日より短縮し、交通容量を増加させることができるものと考えられる。これは、現在地上の管制官が担っている航空管制を機上のパイロットが分担することに相当する。また、自律間隔維持の機能を持つ航空機をフローコリドー内部に集中させることにより、それを持たない航空機が飛行できる空域を拡大することができる。さらに管制官はフローコリドー内部を飛行する航空機を監視する必要がなくなるため、フローコリドー外を飛行する航空機のみを管制することになり、空域全体として交通処理容量を増加させかつ安全性を向上させることができるものと期待される。以上のフローコリドー導入による監視および管制の変化の模式図を図 2 に示す。フローコリドーの導入により、その内部では自律間隔維持の機能を持つ機体が所要の間隔を維持しながら高密度で飛行し、一方でその他の機体が飛行できる空域が増加する。また、地上からの管制はフローコリドー外部の航空機のみを処理することとなるため、より多くの航空機が同じ空域を飛行することができるようになる。さらに、フローコリドー内を飛行する航空機の燃料消費量が最少となるように設定することにより、自律間隔維持の機能を有する航空機の運航効率を相乗的に高めることができる。

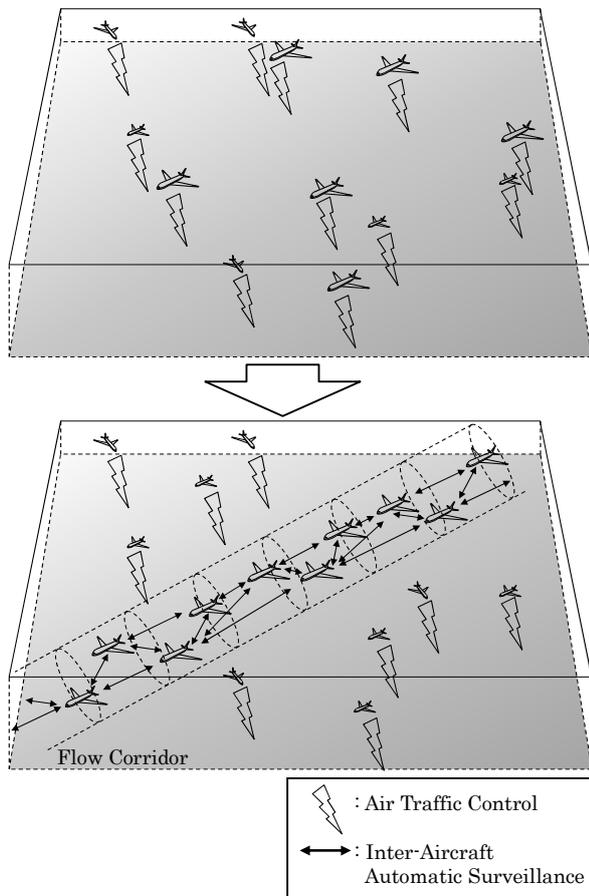


図 2 フローコリドー導入の模式図：管制・監視の変化，空域の高密度化^[9]

3. フローコリドーの運用方式の研究の考え方

3.1 基本的な間隔制御の考え方

通常，飛行中の航空機間の衝突を未然に防ぐために安全間隔が設けられており，各航空機は少なくともそれ以上の間隔を確保しながら飛行することが要求される。そこで本研究においても図 3に示すように安全間隔を設け，さらにそれより少し大きな基準間隔を設けた。航空機間の距離が安全間隔を下回った場合をコンフリクトと呼ぶこととする。また各航空機は，他機との間隔が基準間隔を下回った段階で間隔制御を行い，コンフリクトを回避する。

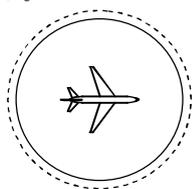


図 3 安全間隔（実線）と基準間隔（点線）

3.2 最大の交通量を持つ航空交通流

一本の巡航経路が実現し得る最大の航空交通量は，図 4に示すように航空機が基準間隔と等しい間隔で整列している状態に達成される。そこで本研究ではこの状態の交通量を交通容量と解釈する。次節以降，交通容量と一致する交通量の航空交通流を安全かつ効率的に実現するための間隔制御法を明らかにする。

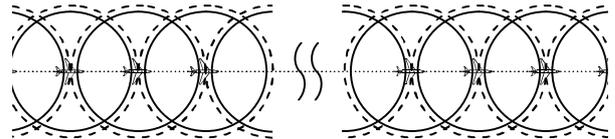


図 4 最大の交通量の航空交通流

4. フローコリドーにおける間隔制御方式

4.1 機上装置の要件を緩和する間隔制御方式

自律間隔維持は，周辺監視，コンフリクトの可能性の検出，コンフリクトを回避する誘導，および航空機の制御という機上での一連の手順により行われる。これらのうち，周辺監視に用いられるADS-Bはほぼ全ての航空機が搭載することが想定されている^[4]。一方，コンフリクトの検出および誘導を行うための機上装置であるASASに関しては，搭載機と非搭載機が混在する状況が生じることが避けられないものと考えられる。さらに航空機の機上装置によっては，ASASによる誘導の結果を航空機を制御するオートパイロットへ入力する際，パイロットを介さなければならない場合も想定される。

これまでに著者らは，周辺監視から得られる航空機の幾何的条件に基づいた自律間隔維持方式を明らかにしている^[10,11]。この方式では，周辺監視から航空機の制御に至るまでのすべての手順をパイロットが介在することなく実行できる機上装置を前提としていた。しかし，上述のように様々な機上装置の混在状況が生じることが避けられないと考えられる。より多くの航空機がフローコリドーを活用できるようにするためには，上記の機上装置の一部が搭載されていない航空機でも実行できるような運航方式が望ましい。そこで本研究では，航空機がADS-Bおよびその周辺監視情報からコンフリクトを検出しそれを回避する誘導を指示するASASを搭載し，ASASの誘

導に基づきパイロットが航空機を操縦することを想定する。そしてこのように自律間隔維持の一連の手順の一部にパイロットが介在しても、フローコリドーを安全に運用しうる間隔制御方式を明らかにする。パイロットの操作として、本研究ではMCP (Autopilot Mode Control Panel) と呼ばれる装置の操作を想定する。

4.2 MCPを用いた自律間隔維持

4.2.1 監視範囲

各航空機は図 5に示すような自機を中心とする長辺 $2l_1$ 、短辺 $2l_2$ の長方形の範囲内にある航空機を監視する。その監視範囲内において自機の前方向より低速で飛行する航空機が存在するか、或いは自機の後方向より高速で飛行する航空機が存在する場合に、コンフリクトを生じる可能性があるものと判断し、間隔制御を行う。本研究ではこの時の間隔制御の監視した航空機を間隔維持対象機と呼ぶ。また前方と後方に基準間隔以下に接近する可能性がある航空機が複数存在する場合、自機と水平方向の間隔が最も小さい航空機を間隔維持対象機として間隔維持を行う。監視範囲内の最も接近している航空機を間隔維持対象機とすることにより、その瞬間に安全間隔以下に最も接近する可能性が高い航空機と間隔維持を行うことになる。



図 5 監視範囲と間隔維持対象機

4.2.2 旋回方向の決定

各航空機は旋回により間隔維持対象機と安全間隔を維持することを試みる。本研究では自機と間隔維持対象機の最適速度を比べ速度が速い場合右へ、遅い場合左へ旋回する。このときの旋回方向を旋回順方向と定める。航空機が密集し旋回

順方向に旋回できない場合は逆方向に旋回し間隔を維持する。この向きを旋回逆方向と定める。最適速度の差により旋回方向を定めることで、速度差の大きな航空機間の間隔維持の必要性を低減し、安全性を損なうことなく各航空機のワークロードを均等に大幅に低減できるものと考えられる^[14,15]。

4.2.3 旋回による間隔維持

本研究ではパイロットがMCPにより操作可能な間隔維持手順にするために、旋回により間隔維持をする際、各機は常に進行方向に対して左右いずれかに $5deg$ だけ方位角を変更するものとする。旋回角を一定値に定めることにより複雑かつ精密な旋回角の操作を必要とせず、周辺の交通情報に基づいて計算される間隔維持の誘導にパイロットの手動の操作でも追従することができるものと考えられる。

各航空機は図 6で示す①から⑥の目標経路へ経路変更し間隔を維持する。この図では高速な航空機iが低速な航空機jを追い抜く状況を示している。経路を変更する場合に周辺航空機とのコンフリクトの発生可能性を①から順に評価し、安全に旋回できる場合はその目標経路へ旋回し間隔維持を行う。

①航空機iおよびjが共に旋回順方向に安全に旋回できる場合:横方向距離が d_c となるまで旋回順方向に移動する。(図 6a)

②航空機iが旋回順方向に安全に旋回でき、他の航空機が存在する等の理由で航空機jが旋回順方向に安全に旋回できない場合:航空機iが旋回順方向へ航空機jとの横方向距離が d_c となるまで移動し、航空機jは直進する。(図 6b)

③他の航空機が存在する等の理由で航空機iが旋回順方向に旋回できず、航空機jが旋回順方向に安全に旋回できる場合:航空機jが旋回順方向に航空機iとの横方向距離が d_c となるまで移動し、航空機iは直進する。(図 6c)

④航空機iおよびjが共に旋回逆方向に安全に旋回できる場合:横方向距離が d_c となるまで旋回逆方向に移動する。(図 6d)

⑤航空機iが旋回逆方向に安全に旋回でき、他の航空機が存在する等の理由で航空機jが旋回逆方

向に旋回できない場合：航空機iが旋回逆方向に航空機jとの横方向距離が d_c となるまで移動し、航空機iは直進する。（図 6e）

⑥他の航空機が存在する等の理由で航空機iが旋回逆方向に旋回できず、航空機jが旋回逆方向に安全に旋回できる場合：航空機jが旋回逆方向に航空機iとの横方向距離が d_c となるまで移動し、航空機jは直進する。（図 6f）

また、コンフリクトの発生可能性は以下の考え方に基づいて判断する。旋回を開始する航空機をi、周辺を航行するある航空機をjとする。評価開始時間を時刻 $t=0$ として、その時の航空機i, jの位置を (x_i^{mi}, y_i^{mi}) および (x_j^{mi}, y_j^{mi}) とする。航空機i, jの速度 V_i, V_j および方位角 ψ_i, ψ_j からある時刻 t での航空機i, jの位置は次の式で予測できる。

$$\mathbf{r}_i = (x_i^{mi} + V_i \cos \psi_i t, y_i^{mi} + V_i \sin \psi_i t)^T \quad (1)$$

$$\mathbf{r}_j = (x_j^{mi} + V_j \cos \psi_j t, y_j^{mi} + V_j \sin \psi_j t)^T \quad (2)$$

これよりある時刻 t での航空機 i, jの距離を次のように予測できる。

$$d_{i,j} = \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\| \quad (3)$$

また航空機iが目標とする横位置 y_i^{fm} まで移動する所要時間 t_f は以下のように近似的に得られる。

$$t_f = \frac{|y_i^{fm} - y_i^{mi}|}{V_i \sin \psi_i} \quad (4)$$

上式より $0 \leq t \leq t_f$ の範囲で最小値を求め、予測される航空機i, jの最小間隔 $d_{i,j}^{min}$ を求めると航空機iが航空機jと基準間隔以下に接近することなく安全に旋回できる条件は次のようになる。

$$d_{i,j}^{min} > d_c \quad (5)$$

このように航空機iの周辺を航行する航空機全てに対し、目標経路へ移動する際の最小間隔を計算し、上式を全ての航空機で満たした場合のみ安全に旋回できると判断する。また各航空機は旋回中も常に全ての航空機に対して上式を計算し、満たさなかった場合は旋回を中止し上述の間隔維持アルゴリズムに従い新たに間隔維持を行う。なお、間隔維持アルゴリズムにおいては、フローコリドの左右いずれかの端部に近い航空機は、その反対側へのみ移動できるものと判断することにより、コリドーからの逸脱を未然に防ぐ。

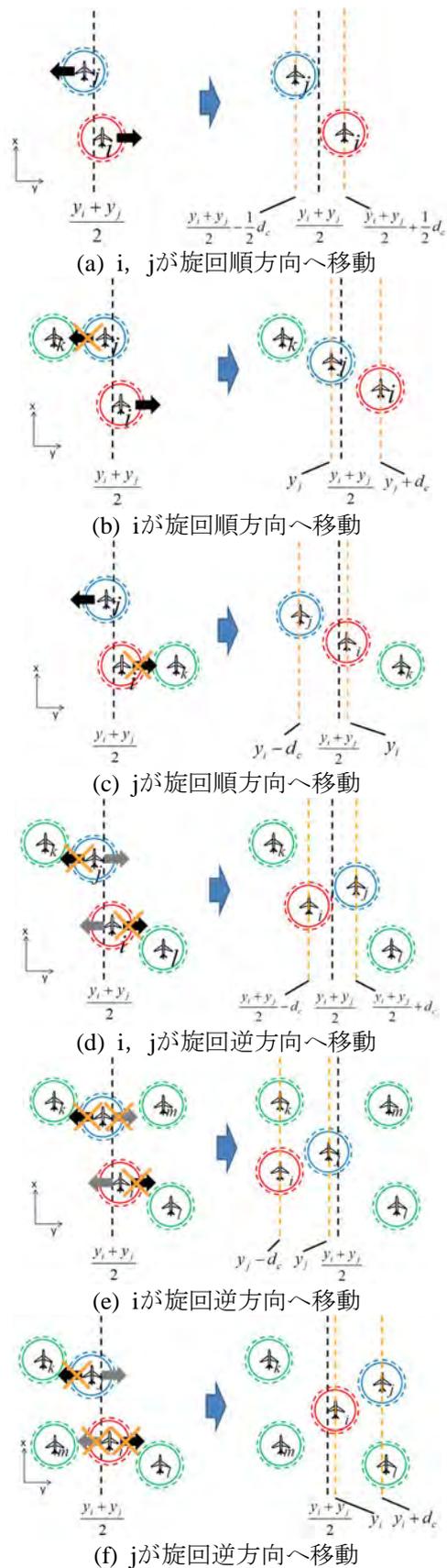


図 6 間隔維持の目標経路

4.2.4 速度調整による間隔維持

前項の①から⑥のいずれの目標経路へも安全に経路変更できないと判断した場合は航空機*i*と航空機*j*は速度調整を行う。この時、これらの航空機は最適速度の平均の速度を目標速度 V_c とすることとし、次式に従い加減速を行うこととした。この状況を図 7aに示す。

$$a_{ci} = c_1(V_c - V_i) \quad (6)$$

なお、加速度の制限を $-0.2[m/s^2] \leq a_{ci} \leq 0.2[m/s^2]$ とした。速度調整中に①から⑥のいずれかの移動が可能となった場合には、横方向へ移動した後速度調整を解消し自機の最適速度で飛行する。また図 7bのように3機以上で速度調整が必要な場合、速度調整が必要な航空機は、それら全ての航空機の最適速度の平均値で飛行することとする。

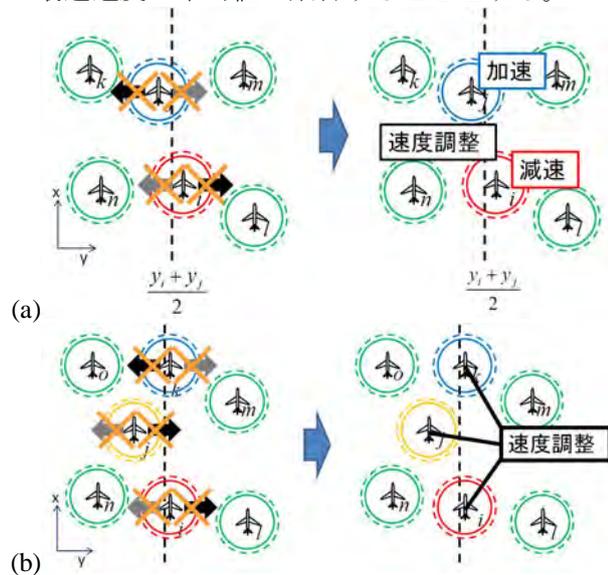


図 7 速度調整(a: 2機の場合, b:3機以上の場合)

5. 数値解析

5.1 航空機の力学モデル

本研究では、航空機の質点モデルの平面内の運動のみを扱う。図 8に示すように飛行方向に x 軸、飛行方向に対して右側に y 軸をとる。各々の航空機を添え字 i で表し、速度を $v_i[m/s]$ 、方位角を $\psi_i[rad]$ 、機首方向の加速度を $a_{ci}[m/s^2]$ 、ロール角を $\phi_i[rad]$ 、重力加速度を $g[m/s^2]$ とする。航空機の制御入力として加速度 a_{ci} 及びロール角 ϕ_i を用いる。各航空機の運動方程式は以下のように得られる。

$$\dot{x}_i = v_i \cos \psi_i \quad (7)$$

$$\dot{y}_i = v_i \sin \psi_i \quad (8)$$

$$\dot{v}_i = a_{ci} \quad (9)$$

$$\dot{\psi}_i = \frac{g}{v_i} \tan \phi_i \quad (10)$$

航空機の方位角はバンク角を入力として次式に従い制御される。

$$\phi_i = c_2(\Psi_i - \psi_i) \quad (11)$$

ただし、 Ψ_i は前章に示した手順①~⑥で定まる5 deg, -5deg, あるいは0degの値となる。

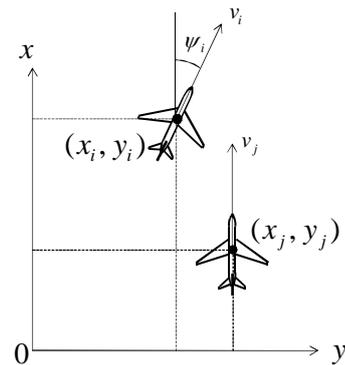


図 8 航空機の力学モデル

5.2 仮定と各パラメータ

数値解析においては、安全間隔 R_{MS} および基準間隔 R_{SC} をそれぞれ10NM (=18520m) および10.5NM (=19446m) とした。監視範囲は $a = 2d_c$, $b = d_c$ とする。数値解析では20機の航空機からなる航空交通流を扱い、初期状態として飛行方向には基準間隔で等間隔に、横方向には一様分布の乱数に従い不規則に並んだ状態を与えた。数値解析の経路は固定し、その先端が後端に接続されているものとして無限長の経路を模擬している。この時、ある航空機の監視範囲が経路の先端を超える場合には、経路の後端の領域が監視範囲に入ることになる。各航空機の飛行速度は230m/sから250m/sまでの範囲の一様分布の乱数に従い与えている。また、フローコリドの経路幅は、基準間隔の3倍とした。初期状態の一例および凡例を図 9に示す。図中、各円は安全間隔を半径としており各航空機の安全間隔の範囲を示し、その色で飛行速度を示している。

数値解析が進行するに従い、航空交通流の振る舞いはある一定の状態に収束する。この時、間隔制御方式の違いによる航空交通流の振る舞いの差異を明確にするためには、航空交通流を構成す

る航空機が様々な飛行速度を持つ場合を想定した長時間の数値解析が必要になる。そのため本研究では、20通りの初期状態を与えそれぞれ20時間の数値解析を行った。数値解析の各パラメータを表 1 に示す。

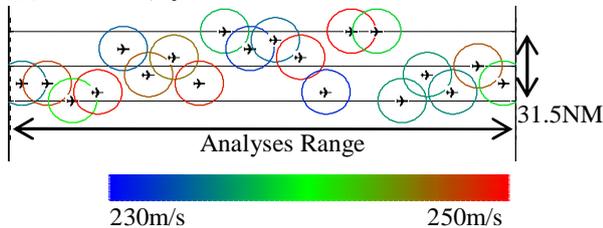


図 9 数値解析の初期状態と経路の解析範囲

表 1 交通流パラメータ

構成機数	20	経路幅	31.5[NM]
最適速度	230~250[m/s]	i_1	$1.0 \times 10^{11} [s^{-1}]$
安全間隔	10[NM]	i_1	1.0[-]
基準間隔	10.5[NM]		

5.3 評価指標

本研究では航空交通流の安全性と実現性を、コンフリクトの発生回数およびパイロットの操作回数を指標として評価する。また、効率性を各航空機の最適速度からの速度変化量を指標として評価する。速度変化量は次式で定義する。

$$E_v = \sum \int |V_i^o - V_i| dt \quad (12)$$

ここで V_i^o は航空機 i の最適速度を示す。速度変化量が大きいほど、より多くの燃料を消費しかつ飛行スケジュールからのずれも大きくなることを表す。なお、初期状態によっては数値計算の開始直後にコンフリクトが生じる場合もある。そこで適切な評価を行うため、数値解析の当初の12000秒間を評価対象から除外することにより初期状態による影響を最小化した。

5.4 数値解析とその評価

5.4.1 速度調整の効果

まず速度調整の効果を明らかにするため、速度調整を行う場合および行わない場合の数値解析を行った。以下の数値解析結果例では、各航空機の状態を明確に表示するため、他の航空機と速度調整を行っている航空機はその周囲を灰色で示し、コンフリクトが生じている場合には黒色で示す。凡例を図10に示す。また図 11にある1機の航空機の方位角の時間変化の様子を示す。図より

航空機は常に $\pm 5\text{deg}$ の方位角で旋回を行っていることが確認できる。

図 12に速度調整を行わない場合、および図 13に速度調整を行う場合のそれぞれの初期状態およびその後の24000秒ごとの振る舞いの一例を示す。速度調整を行わない図 12ではコンフリクトが生じているのに対し、速度調整を行う図 13ではコンフリクトが生じず各航空機は周辺の航空機と安全間隔を維持できていることがわかる。また前節より各航空機は間隔制御対象機との最適速度差に応じて、速い場合は右に、遅い場合は左に旋回することを優先して間隔制御をするため、時間経過に伴いコリドーの右側に高速な航空機が飛行する交通流が形成される。表 2に評価結果をまとめる。コンフリクト回数、方位角変更回数、速度調整回数、速度変化量は1機あたり1時間あたりの平均の値を示す。この結果から、速度調整を行うことによりコンフリクトを防ぐことができることが明らかとなった。またパイロットのワークロードを示す方位角変更回数と速度調整回数の値の合計より、各航空機のパイロットは1時間あたり平均3回未満の操作で間隔制御をすることが可能である。これらの結果より自律間隔維持を行う際、パイロットによるマニュアル操作が介在してもフローコリドーの安全な運航が可能であることが明らかとなった。しかし同時に、多くの航空機が密集するとそれらが同時に速度調整を行い、その状況が長時間継続してしまうような状況が生じることも明らかとなった。このような状況はデッドロックと呼ばれる。数値計算の範囲では、速度調整を行った場合の3ケースでデッドロックが生じていた。デッドロックが生じている間は、多くの航空機が最適速度とは異なる速度で長時間飛行することになるため、効率が大幅に低下するものと考えられる。

5.4.2 副経路の導入

速度調整は、わずかでもコンフリクトの可能性のある航空機と行う。この結果、航空機が密集するような状況では前後にある複数の航空機と速度調整を行うこととなり、結果としてそれらすべての航空機の飛行速度が等しくなる。この結果多数の航空機が等速度で飛行することとなり、デッ

ドロックの状況が生じるものと考えられる。一方、速度調整が直前或いは直後の航空機のみと行われる場合には、航空機の列が形成されデッドロックが生じない場合も見られた。

そこで、フローコリドの端から基準間隔の整数倍の経路に副経路を定め、各航空機がそれらのうちのいずれかを飛行することとした。各航空機が副経路上を飛行することにより、直前或いは直後の航空機のみと速度調整を行うこととなり、デッドロックを未然に防ぎより効率的な交通流を形成できることが期待できる。各航空機が他機との間隔維持のために旋回を行う際、近接する副経路のいずれかに移動することとする。副経路への移動を加えた間隔制御方式で数値解析を行った結果を図 14に示す。図中鎖線が副経路を示す。各航空機が密集した場合でも、基準間隔の整数倍の経路へ移動することで同一経路を同一速度で飛行する航空機群が生じ、時間経過で航空機の密集が緩和されるようになる。また表 2より、デッドロックが生じなくなるだけでなく、パイロットの操作回数が大幅に減少することも明らかとなった。以上の結果よりフローコリドの端から基準間隔の整数倍の位置に副経路を設定し、航空機が能動的に副経路へ移動することで航空効率を大幅に改善できることを明らかにした。

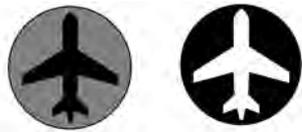


図 10 各航空機の状態（左：速度調整中，右：コンフリクト）

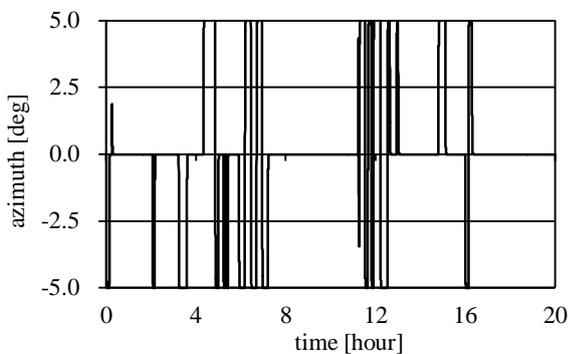


図 11 方位角の時間変化の様子

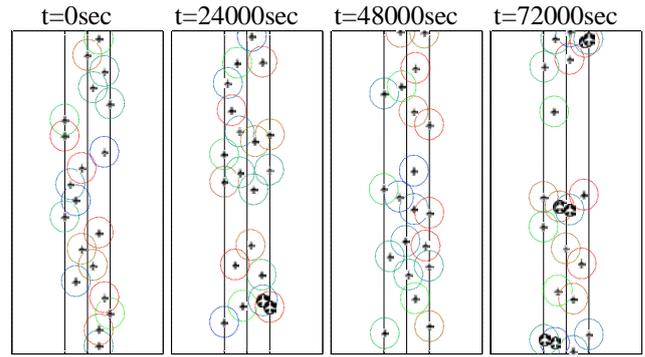


図 12 交通流の振る舞い（速度調整なし）

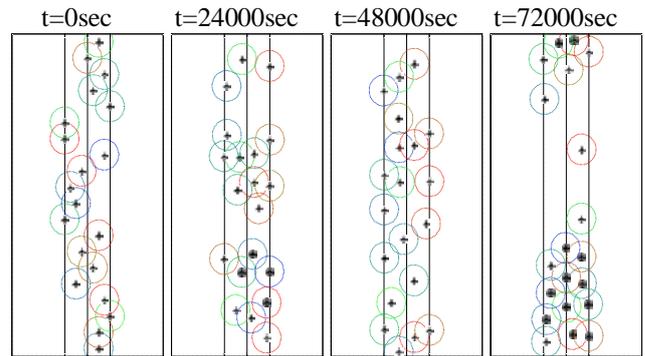


図 13 交通流の振る舞い（速度調整あり）

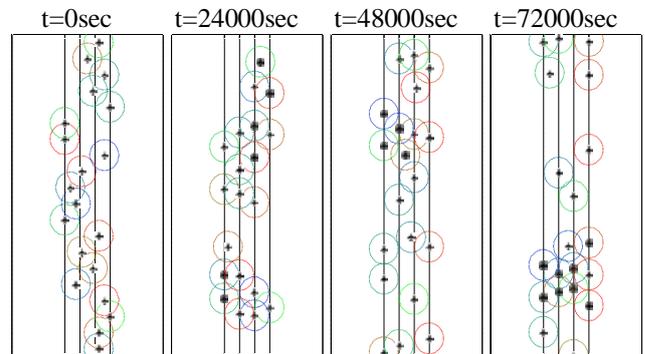


図 14 交通流の振る舞い（副経路）

表 2 交通流評価結果

速度調整	無し	有り	有り＋副経路
コンフリクト回数 [1/hour/機]	0.09	0	0
方位角変更回数 [1/hour/機]	0.89	0.74	0.62
速度調整回数 [1/hour/機]	0	1.93	0.50
最適速度ずれ [m/hour/機]	0.00	6164.3	4844.1
デッドロック回数 [1/計算回数]	0	0.15	0

6. 結論と今後の課題

本研究では、自律間隔維持の一連の手順の一部である、ASASによる誘導情報に基づいて航空機を操縦する段階をパイロットが手動で行うことを想定し、数値解析によりその実現可能性を明らかにした。その過程で、間隔維持に速度調整を導入することにより、パイロットの手動の操作による安全な自律間隔維持が可能となり、さらにフローコリドールの経路幅を厳守することも可能となることも明らかにした。つまり、速度調整が有効な自律間隔維持方式となることを明らかにしたことになる。

本研究の範囲では、最大の交通量の航空交通流を安全に運航するための間隔制御方式を明らかにした。実際の交通量はこの最大交通量よりは小さくなるはずであるので、より安全に取り扱うことができるはずである。一方、実際の航空交通流では、各航空機の最適な飛行速度、方位角変更の早さ、および間隔制御を開始する条件が異なっていることが想定される。また3次元の運動を考慮した間隔制御方式により、さらに安全かつ効率的な運航が可能となる可能性がある。また、現実的な経路長や経路構造に適した間隔制御方式の可能性もある。これらが今後のフローコリドールの間隔制御方式の課題となる。さらに、機体や機上システムの不具合が生じた際に速やかにフローコリドールから離脱するための緊急時の手順、およびフローコリドールの中間点からの離脱と合流、およびフローコリドール同士の合流を可能とするための航空機の運航手順の研究および開発が必要である。

また、フローコリドールの潜在的に高い便益を実現するためには、航空需要の高い経路に沿って配置することが不可欠である。また、複数のフローコリドールによりネットワークを構成することにより航空交通全体の交通容量を増加させることができるものと考えられている^[8]。前述の通り、日本国内での高需要路線として、東京と札幌、大阪、福岡および沖縄を結ぶ路線が挙げられる。したがって日本国内においては東京から北方面および西方面にフローコリドールを設けることが大きな便益をもたらすものと考えられる。そのため

には、各フローコリドールの開始および終了地点とその間の巡航経路を適切に配置するとともに、例えば東京－福岡間のフローコリドールへの大阪からの合流や、羽田空港付近での各フローコリドールの合流に適応した配置方法などを明らかにする必要がある。また、動的フローコリドールを導入することにより気象条件の変化などに対応できるようになりさらに大きな便益を得ることができると考えられるが、その運用を可能とするための設定の手順および各航空機が遅滞無くその情報を得る手順が不可欠である。

参考文献

- [1] 小瀬木滋: ASAS関連機器の研究の動向と要件追加の提案, 第6回電子航法研究所研究発表会, 2006年6月2日.
- [2] FAA/Eurocontrol, Cooperative R&D Committee, "Principles of Operation for the Use of Airborne Separation Assurance Systems (version: 7.1), 2001, <http://adsb.tc.faa.gov/RFG/po-asas71.pdf>, cited Apr. 27, 2012.
- [3] Japan Civil Aviation Bureau, "Long-term Vision for the Future Air Traffic Systems (CARATS)," 2010, http://www.mlit.go.jp/koku/koku_CARATS.html, cited Apr. 27, 2012.
- [4] Joint Planning and Development Office: Concept of Operation for the Next Generation Air Transportation System Ver.3.2. Sep. 30, 2010, http://jpe.jpdo.gov/ee/docs/conops/NextGen_ConOps_v3_2.pdf, cited Apr. 27, 2012.
- [5] SESAR (Single European Sky ATM Research) Joint Undertaking, <http://www.sesarju.eu/>, cited Apr. 27, 2012.
- [6] 財団法人 日本航空機開発協会: 平成22年度版 民間航空機関連データ集, 2011年3月より著者集計.
- [7] Yousefi, A. et al.: High volume tube shaped sectors (HTS): A network of high-capacity ribbons connecting congested city pairs, IEEE/AIAA 23rd Digital Avionics Systems Conference, Salt Lake City, UT, 2004.
- [8] Yousefi, A., et al.: Nextgen flow corridor

s initial design, procedures, and display functionalities, IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference, Oct. 3-7, 2010.

[9] 武市昇, 中村陽一, 蔭山康太: フローコリドールの概念と実用化への課題, 日本航空宇宙学会誌, Vol.60, No. 12, 2012年12月, pp. 449-454.

[10] Takeichi, N., Nakamura, Y. and Kageyama, K.: Aircraft Self-Separation Algorithm for High Density Air Corridor Operation Based on Flight Intent, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 57, Num. 3, May 2014, pp.179-185.

[11] 武市昇, 中村陽一, 蔭山康太: フローコリドールの運用方式の研究, 第13回電子航法研究所研究発表会, 2013年6月7日.

[12] Yousefi, A., et al.: Dynamic Allocation and Benefit Assessment of NextGen Flow Corridors, 10th AIAA ATIO Conference, Fort Worth, Texas, 2010.

[13] Xue, M.: Design Analysis of Corridors-in-the-sky, AIAA 2009-5859, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, Aug. 10-13, 2009.

[14] Nakamura, Y., Takeichi, N. and Kageyama, K.: A Self-Separation Algorithm using Relative Speed for High Density Air Corridor, AIAA-2013-5069, AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, Boston, Aug. 19-22, 2013.

[15] 中村陽一, 蔭山康太, 武市昇: フローコリドールにおける高密度航空交通流の形成, 第13回電子航法研究所研究発表会, 2013年6月7日.