

13. フローコリドールの運用方式の研究

名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 ※武市 昇
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が想定されている。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制御方式^[10]を航空交通流の数値解析により明らかにする。

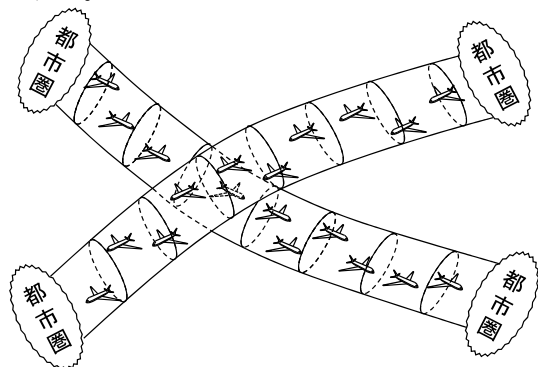


図1 フローコリドールの概念図^[9]

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ルが考案された。

2.2 想定されている運用概念

フローコリドールは、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ル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ルへの出入りおよびその内部での追い抜きを行う。さらに、フローコリドール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ル

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^[11,12]。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。

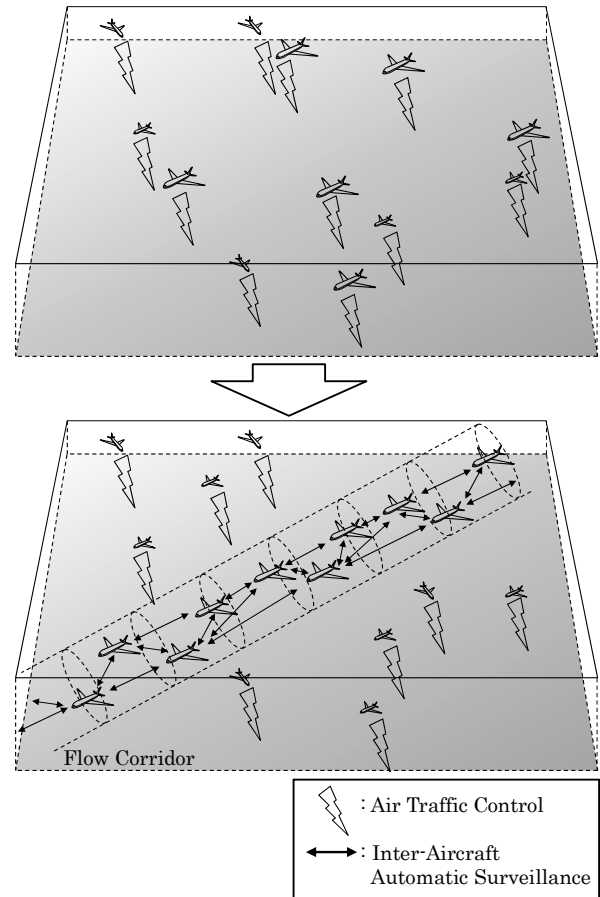


図2 フローコリドー導入の模式図：管制・監視の変化，空域の高密度化^[9]

3. フローコリドーの運用方式の研究の考え方

3.1新しい運航方式の研究の考え方

フローコリドーを実現するためには多くの課題が考えられるが、安全かつ効率的に運航するための最も重要な課題は自律間隔制御方式である。しかし、一方向の飛行経路における自律間隔制御方式は前例の無い研究課題である。このような課題に取り組むには大まかに以下の二通りの方針が挙げられる。一つは、何らかの現実的な運航方式に基づき、それを少しずつ改善するという方針である。改善を繰り返すことにより、やがて安全に運航しうるある交通量に収束する。この際に得られる交通量がこの研究方針で得られる最大の交通容量とみなすことができる。この方針は確実

に実用的な運航方式を見出すことのできる堅実なものであると解釈できるが、最終的に得られた最大の交通容量を実現する運航方式に改善の余地が無いことを保証することはできない。一方、最初に最大の交通容量を想定しそれを安全かつ効率的に扱うことのできる運航方式を見出すという方針も考えられる。航空交通の交通容量は、潜在的には航空機の航法や監視の性能によってのみ決定されるはずである。このように物理的に定まる交通容量と等しい交通量の理想的な航空交通流をあらかじめ想定し、これを安全かつ効率的に扱える運航方式を見出すことができれば、それを理想的な運航方式と解釈することができる。そして次第に現実的な要素を考慮することにより、現実の航空交通流を安全かつ効率的に運航しうる運航方式を見出すことができる。この場合、この運航方式は潜在的には最大の交通量を運航できるはずであるので実際の航空交通流を安全性に余裕をもって運航できるはずである。

本研究はフローコリドの運航方式に関する初期の研究として位置づけられる。したがって、まず交通容量と等しい交通量の航空交通流を安全に運航しうる理想的な運航方式を明らかにすることを目的とする。

3.2 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。

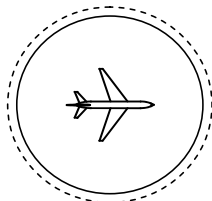


図3 安全間隔（実線）と基準間隔（点線）

3.3 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。

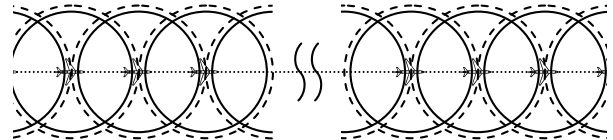


図4 最大の交通量の航空交通流

4. フローコリドにおける間隔制御方式

本研究では、フローコリドを安全に運航しうる間隔制御方式を見出す。航空機の代表的な自律間隔制御方式としてフリーフライト^[13]が挙げられる。そこで本研究では、まずフリーフライトの間隔制御方式のフローコリド運航における有効性を明らかにする。次に、フローコリド内では全ての航空機が同一方向に飛行することを前提とした間隔制御方式を考案し、その有効性を明らかにする。

4.1 相対ベクトル基準方式

まず、水平面内での代表的なフリーフライトの間隔制御方式^[14]を示す。この方式では、二機間の相対速度ベクトルおよび相対位置ベクトルを用いてコンフリクトの可能性を判断する。この方式を本研究では相対ベクトル基準方式と呼ぶ。図5に示すように位置 \mathbf{P}_A および \mathbf{P}_B にある二機の航空機AおよびBが同一高度を速度ベクトル \mathbf{V}_A および \mathbf{V}_B で飛行しているものとする。この時、相対速度ベクトル \mathbf{V}_R が基準間隔以内を通過する場合に、コンフリクトの可能性があると判断する。つまり、図中の相対速度ベクトルが相対位置ベクトルに対してなす角 α が、一方の航空機から基準間隔の円の円周がなす角 β よりも小さい場合に相当する。これらの角および条件は次式により与えられる。ただし、 R_{SC} は基準間隔の円の半径、 $d_{A,B}$ は航空機AおよびB間の距離である。

$$|\alpha| < \beta \quad (1)$$

$$\cos \alpha = \frac{(\mathbf{P}_B - \mathbf{P}_A) \cdot (\mathbf{V}_A - \mathbf{V}_B)}{\|\mathbf{P}_B - \mathbf{P}_A\| \|\mathbf{V}_A - \mathbf{V}_B\|} \quad (2)$$

$$\sin \beta = \frac{R_{SC}}{d_{A,B}} \quad (3)$$

そしてこの相対速度ベクトルを $\gamma \equiv \beta - \alpha$ だけ回転させることによりコンフリクトを回避することができる。本研究では、図6に示すように航空機AおよびBが協調して方位角を等しく μ_{sc} だけ変化させ相対速度ベクトルを回転させるものとする。この時、回転後の相対速度ベクトルは $V'_A = \|\mathbf{V}'_A\|$ および $V'_B = \|\mathbf{V}'_B\|$ として次式のように表される。

$$\mathbf{V}'_R = \begin{pmatrix} V_A \cos(\psi_A - \mu_{sc}) - V_B \cos(\psi_B + \mu_{sc}) \\ V_A \sin(\psi_A - \mu_{sc}) - V_B \sin(\psi_B + \mu_{sc}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

ただし、 ψ_A および ψ_B は航空機AおよびBの方位角を表す。このベクトルが、次式のように元の相対速度ベクトル \mathbf{V}_R を γ 回転させたものと平行となる条件より、

$$\mathbf{V}'_R \propto \begin{pmatrix} V_A \cos(\psi_A - \gamma) - V_B \cos(\psi_B - \gamma) \\ V_A \sin(\psi_A - \gamma) - V_B \sin(\psi_B - \gamma) \end{pmatrix} \quad (5)$$

航空機AおよびBの方位角変化量 μ_{sc} が次式のように得られる。

$$\tan \mu_{sc} = \frac{(V_A^2 + V_B^2 - 2V_A V_B \cos(\psi_A - \psi_B)) \sin \gamma}{(V_A^2 - V_B^2) \cos \gamma + 2V_A V_B \sin \gamma \sin(\psi_A - \psi_B)} \quad (6)$$

さらに、航空機間の距離が基準間隔を下回った場合に次式に従う方位角変化を追加して行う。

$$\mu_a = \frac{R_{SC} - d_{A,B}}{R_{MS} - R_{MS}} \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

この方位角変化は、航空機間隔が安全間隔に等しくなる場合に90度になるように基準間隔を下回った距離に比例するように与えられる。ただし、 R_{MS} は安全間隔である。さらに、航空機間隔が安全間隔を下回った場合には緊急に衝突を回避するため次式のように常に90度を与える。

$$\mu_u = \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

以上の方位角変化は次式のようにまとめられる。

$$\mu_{A,B} = \begin{cases} \mu_{sc} & (d_{A,B} > R_{SC}) \\ \mu_{sc} + \mu_a & (R_{SC} \geq d_{A,B} > R_{MS}) \\ \mu_u & (R_{MS} \geq d_{A,B}) \end{cases} \quad (9)$$

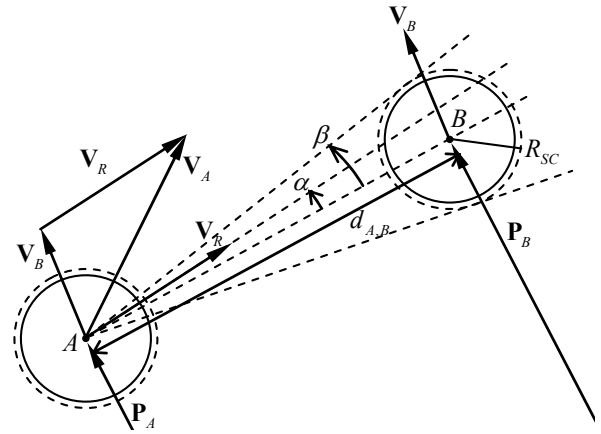


図5 相対ベクトル方式

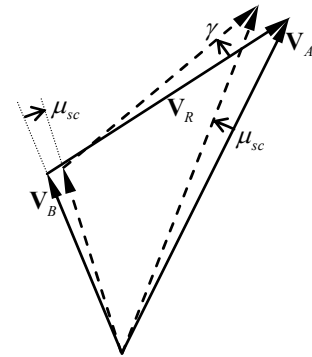


図6 相対ベクトル基準における方位角変化

4.2 横位置基準方式

フローコリドー内部では全ての航空機が同一方向に向かって飛行している。そのため、ある一組の航空機がある瞬間に横方向に接近しつつあったとしても、横方向の間隔が十分あれば過剰な接近は回避できるものと考えられる。また、飛行速度に差のある航空機間の追い越しが生じる場合にも、横方向の間隔さえ確保できていれば良いものと考えられる。そこで、横位置の差に注目したコンフリクト検出および回避が有効であるものと考えられる。この方式を横位置基準方式と呼ぶこととする。

図7に示すように、ある高速の航空機Aが低速の航空機Bを追い越す状況においては、航空機の横位置の飛行方向の延長線が、相手の航空機の基準間隔内を通過することが予測される場合にコンフリクトの可能性があると判断する。そしてコンフリクトを回避するためには、相対位置および速度に基づいた間隔制御と同様、図8に示す

ように互いの機体が等しく μ_{sc} だけ方位角を変化させることにより、相対速度ベクトルを基準間隔を半径とする円の接線となるように回転させる。相対速度ベクトルを γ 回転させた時に基準間隔を半径とする円の接線と一致する条件は次式となる。

$$R_{SC} = d_{A,B}^x \sin \gamma + d_{A,B}^y \cos \gamma \quad (10)$$

ただし、 $d_{A,B}^x$ および $d_{A,B}^y$ は、航空機AおよびBの飛行方向および横方向の位置の差である。そして方位角変化 μ_{sc} は次式を満たさなければならない。

$$\frac{R_{SC} \cos \gamma - d_{A,B}^y}{(V_A + V_B) \sin \mu_{sc}} = \frac{d_{A,B}^x - R_{SC} \sin \gamma}{(V_A - V_B) \cos \mu_{sc}} \quad (11)$$

この式の両辺は、いずれも航空機間隔が基準距離と一致するまでの所要時間を表している。左辺は、横位置の差を方位角を μ_{sc} 変化させた場合の横方向の相対速度で割った値であり、右辺は、飛行方

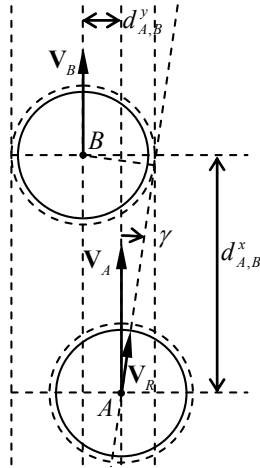


図 7 横位置基準方式

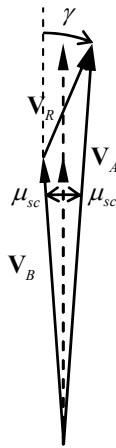


図 8 横位置基準方式における方位角変化

向の位置差を μ_{sc} 変化させた場合の飛行方向の相対速度で割った値である。これらより、所要の方位角変化 μ_{sc} は次式で得られる。

$$\tan \mu_{sc} = \frac{(R_{SC} \cos \gamma - d_{A,B}^y)(V_A - V_B)}{(-R_{SC} \sin \gamma + d_{A,B}^x)(V_A + V_B)} \quad (12)$$

また相対位置および速度に基づいた間隔制御と同様、航空機間隔が基準間隔以下の場合には、以下の方位角変化量を与える。

$$\mu_{A,B} = \begin{cases} \mu_{sc} & (d_{A,B} > R_{SC}) \\ \mu_{sc} + \mu_a & (R_{SC} \geq d_{A,B} > R_{MS}) \\ \mu_u & (R_{MS} \geq d_{A,B}) \end{cases} \quad (13)$$

ただし、 μ_a および μ_u は以下の通りである。

$$\mu_a = \frac{R_{SC} - d_{A,B}}{R_{SC} - R_{MS}} \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

$$\mu_u = \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

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 9 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 $a_i [m/s^2]$ 、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_i 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。

$$\dot{x}_i = v_i \cos \psi_i \quad (16)$$

$$\dot{y}_i = v_i \sin \psi_i \quad (17)$$

$$\dot{v}_i = a_i \quad (18)$$

$$\dot{\psi}_i = \frac{g}{v_i} \tan \phi_i \quad (19)$$

5.2 フローコリドー内での航空機の制御モデル

航空機の方位角はロール角を次式に従い与えることにより制御する。

$$\phi_i = a(\Psi_i - \psi_i) \quad (20)$$

ただし、 a は正の定数、 Ψ_i は i 番の航空機の目標方位角である。本研究では、この目標方位角 Ψ_i を次式に従い与える。

$$\Psi_i = \psi_r(y_i) + \sum_{j \neq i} \mu_{i,j} \quad (21)$$

複数の航空機との間隔制御が必要となる場合には、各々の航空機に対して得られる方位角変化量

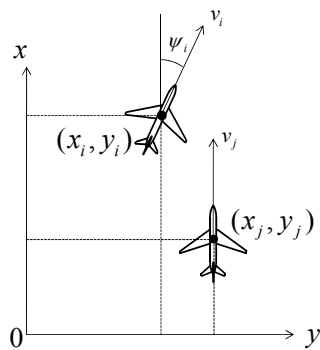


図 9 航空機の力学モデル

$\mu_{i,j}$ の和を与える。また $\psi_r(y_i)$ は、間隔制御に伴いフローコリドーから横に逸脱した航空機を内部へ戻すために与える方位角であり、 b を正の定数として次式により与えられる。

$$\psi_r(y_i) = \begin{cases} -b(y_i - y_{edge}^+) & (y_i > y_{edge}^+) \\ 0 & (y_{edge}^- < y_i < y_{edge}^+) \\ -b(y_i - y_{edge}^-) & (y_i < y_{edge}^-) \end{cases} \quad (22)$$

ただし、 y_{edge}^+ および y_{edge}^- はそれぞれフローコリドーの左右の端部の位置である。また、航空機は加減速を行わずにそれぞれの最適な飛行速度を保ち続けるものとした。

5.3 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 10NM ($=18520\text{m}$) および 10.5NM ($=19446\text{m}$) とした。また、各航空機は自機から 50NM 以下の距離にある航空機に対して間隔制御を行うこととした。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、フローコリドーの経路幅を基準間隔の 3 倍とした。初期状態の一例および速度ベクトルの凡例を図 10 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ている。また各矢印は各航空機の

飛行速度と方位角を誇張して示している。さらに、各航空機の間隔制御、コンフリクトの状態を分かりやすく表示するため、間隔制御を行っている航空機は間隔制御対象の航空機と直線で結びさらに背後に青色の四角形を付けて表示する。また、他の航空機との間隔が基準間隔以下になっている場合には黄色の四角形、安全間隔以下になっている場合には赤色の四角形をつけて表示する。

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、 50 通りの初期状態を与えそれぞれ 10000 秒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。

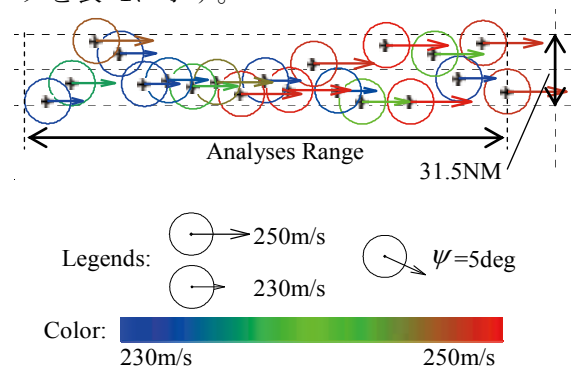


図 10 数値解析の初期状態と経路の解析範囲

表 1 数値解析のパラメータ

航空機数	20
飛行速度範囲	230~250[m/s]
基準間隔	10.5[NM]
安全間隔	10.0[NM]
フローコリドー経路幅	31.5[NM]
a	1.0
b	1.0[rad/km]

5.4 評価指標

本研究では航空交通流の安全性とパイロットのワークロードを比較することによりそれぞれの間隔制御方式を評価する。まず安全性を定量的に評価するため、評価指標として航空機間距離が安全間隔および基準間隔を下回った距離の時間

積分の平均値を用いる。具体的にはそれぞれ次式における E_{conf} および E_{ctrl} として計算される。

$$E_{conf} = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{conf} dt \quad (i < j) \quad (23)$$

$$E_{ctrl} = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{ctrl} dt \quad (i < j)$$

ただし、 N は航空交通流内の航空機の総数である。また、 $d_{i,j}^{conf}$ および $d_{i,j}^{ctrl}$ はそれぞれ安全間隔および基準間隔を下回った距離であり、以下の式で定義される。

$$d_{i,j}^{conf} = \begin{cases} 10NM - d_{i,j} & (d_{i,j} < 10NM) \\ 0 & (d_{i,j} \geq 10NM) \end{cases} \quad (24)$$

$$d_{i,j}^{ctrl} = \begin{cases} 10.5NM - d_{i,j} & (d_{i,j} < 10.5NM) \\ 0 & (d_{i,j} \geq 10.5NM) \end{cases}$$

いかなる状況でもコンフリクトを回避するためには、 $E_{conf} = 0$ となるような間隔制御方式が必須である。さらに、 E_{ctrl} の小さい間隔制御方式においてはコンフリクトの可能性が小さいと解釈できる。

さらに、間隔制御方式の実現可能性を評価する指標としてワークロードが挙げられる。本研究では方位角の変化量をワークロードの目安とし、その評価指標 E_{work} を次式のように与えた。

$$E_{work} = \frac{1}{N} \sum_i \int |\dot{\psi}_i| dt \quad (25)$$

なお、初期状態によっては数値解析の開始直後にコンフリクトが生じる場合もある。そこで初期状態による影響を最小化して適切な評価を行うため、数値解析の当初の20000秒間を評価対象から除外した。

5. 数値解析とその評価

5. 5. 1 相対ベクトル基準方式の結果

まず間隔制御の基本的な挙動を明らかにするため、大きな飛行速度差を持つ2機の航空機間の追い越しの数値解析を行った。図12にその際各航空機の挙動を示す。航空機Aは250m/sでフローコリドーの中心を飛行し、40NM前方かつ5NM右側を230m/sで飛行する航空機Bを追い越す。この時、図に示すように航空機Aは左側、航空機Bは右側にそれぞれ方位を変更することにより安全間隔以上の間隔を保ちながら追い越しを完了する。一方、初期状態で航空機が経路の進行方

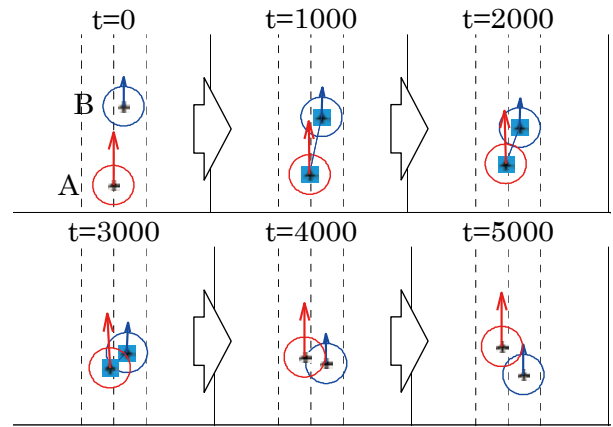


図12 相対ベクトル基準方式の基本的な挙動

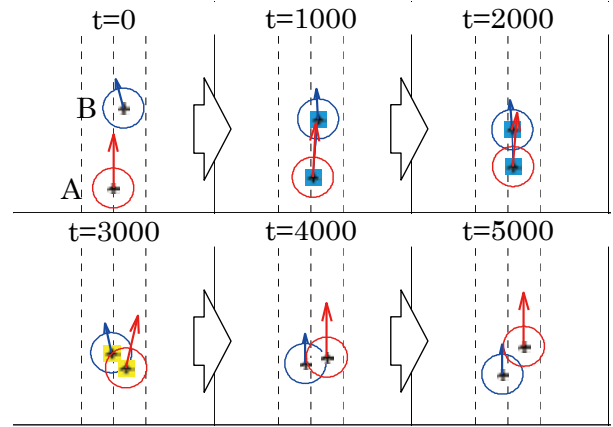


図13 相対ベクトル基準方式の基本的な挙動（初期方位角がある場合）

向に対して方位角を持っていると異なる挙動を示す。図13に航空機Bが初期に左側に0.05radの方位角を持っている場合の挙動を示す。この場合、より小さな方位角の変更により間隔を確保するため、航空機AおよびBが共に逆の方向に方位を変更する。20機の航空機からなる航空交通流の、図10に示した初期状態を用いた場合の振り舞いを25000秒ごとに図14に示す。50通りの数値解析の結果、32回の数値解析においてコンフリクトが生じた。典型的なコンフリクトの状況を図15に示す。なお、この図では方位角は一切誇張していない。この場合、コンフリクトは航空機BおよびDの間隔制御をきっかけとして航空機A、BおよびCの間で生じる。図15aでは、航空機DがBおよびCを追い越そうとしているが、これらの航空機間の距離が不十分であり基準間隔を確保することができない状況にある。このため、この間

隔制御アルゴリズムでは図15bに示すように航空機BおよびDが基準間隔以下まで接近してしまうこととなり、大きく方位角を変更することになる。そして航空機Dのこのような大きな方位角変更に伴い、図15cに示すように航空機AおよびCまで大きく方位角を変更することとなる。航空機CはDとのコンフリクトを避けるため左へ方位角を変更するが、これに伴い航空機Aは右へ大きく方位角を変更する。これらの方位角の大きな変更が連続して生じる結果、図15dに示すように横方向にコンフリクトが生じる。なお、このようにコンフリクトが生じた場合でも、図15eに示すように μ_u により速やかにコンフリクトは解消される。

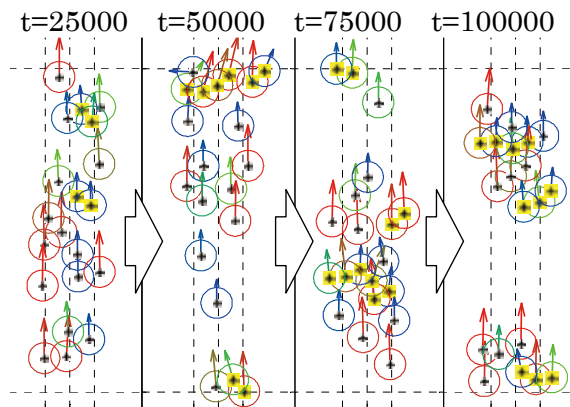


図14 相対ベクトル基準方式の交通流の挙動

5.5.2横位置に基づいた間隔制御方式の結果

まず基本的な間隔制御時の挙動を明らかにするため、2機の航空機の追い越しの数値解析を図16に示した初期状態と等しい初期状態を用いて行った。結果を図16および図17に示す。この場合も相対ベクトル方式と同等の挙動を示すが、この方式では方位角を用いないため初期の方位角がある場合には逆方向に方位角を変更することになる。50機の航空機からなる航空交通流の数値解析を図10に示す初期状態を用いて行った結果を図18に示す。図14の相対ベクトル方式の結果と比較すると、航空機の大きな方位角の変更がほとんど見られなくなっている。また、50通りの数値解析のいずれにおいてもコンフリクトは生じなかった。

二つの方式の評価指標を表2に示す。いずれの

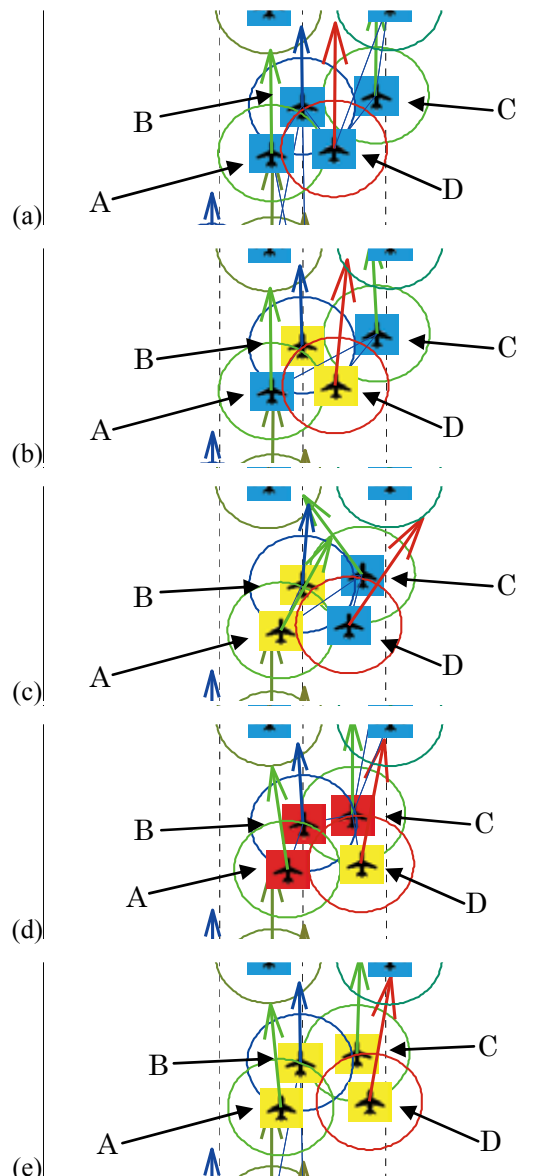


図15 相対ベクトル基準方式におけるコンフリクトの様子

指標も横位置基準方式の方が大幅に低減されている。この結果は、フローコリドー内部では全ての航空機が同一方向に飛行しているということを前提として間隔制御を行うことにより、わずか約1/6の操作量で、安全性を大幅に向上することができることを示している。

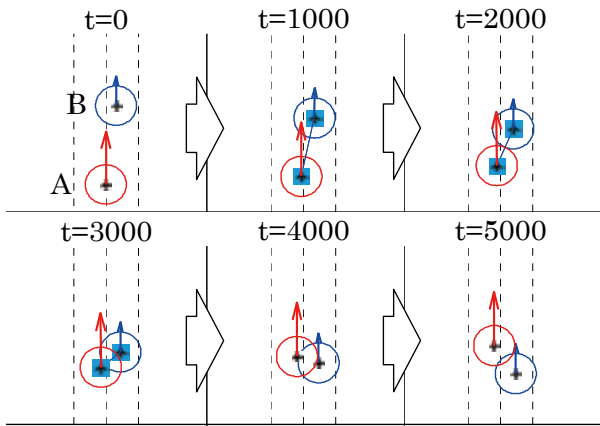


図 16 横位置基準方式の基本的な挙動

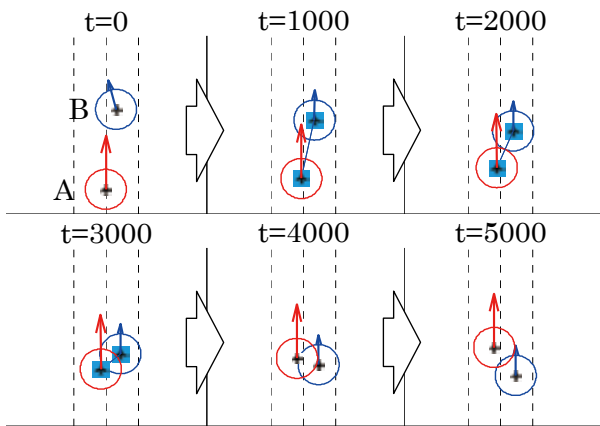


図 17 横位置基準方式の基本的な挙動(初期方位角がある場合)

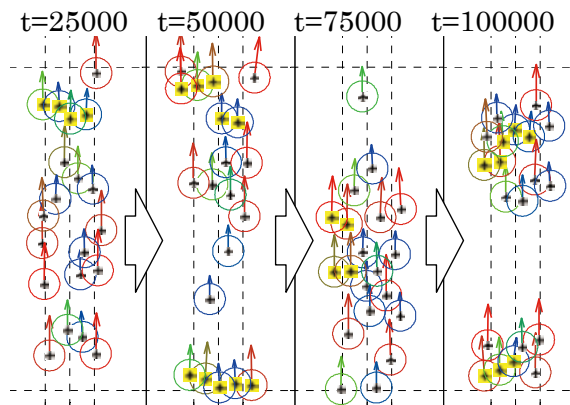


図 18 横位置基準方式の交通流の挙動

表 2 評価指標 (50通りの数値解析の平均値)

	E_{ctrl}	E_{conf}	E_{work}
相対ベクトル基準方式	7.9×10^5	5.9×10^2	6.4
横位置基準方式	9.7×10^4	0	1.1

6. 結論と今後の課題

本研究では、フローコリドーにおける適切な間隔制御方式を明らかにした。間隔制御方式として、従来のフリーフライトの考え方に基づいた相対ベクトル基準方式、およびフローコリドー内では全ての航空機が同一方向に飛行することを前提として独自に考案した横位置基準方式の比較を数値解析により行った。数値解析の結果、相対ベクトル基準方式では横方向の運動に対して過剰に方位角を変更してしまいコンフリクトが頻繁に生じることが明らかとなった。一方、横位置基準方式では間隔制御のための方位角変更が相対ベクトル方式の1/6程度あるにも関わらず、コンフリクトは全く発生しなかった。フリーフライトの間隔制御をそのまま適用することは不適切であり、全機体が同一方向に飛行するという前提条件を付加することにより安全性および効率性をいずれも大幅に向上できることを明らかにした。

本研究では、最大の交通量の航空交通流を安全に運航するための基本的な間隔制御方式を明らかにした。実際の交通量はこの最大の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などが均等では無いことが想定される。また高度の変化を考慮した検討も不可欠である。ASAS導入の初期段階では、ADS-Bの情報を元にパイロットが自ら判断して操縦することも想定される。このような場合でもフローコリドーを安全かつ効率的に運航するためには、パイロットが実現できるような簡潔な判断方法および間隔制御方法が望ましい。これらが今後のフローコリドーの間隔制御の研究課題となる。さらに、航空機は管制側から指定された時刻にフローコリドーの終着点から出域することが要求される。このような時刻指定の運航と両立する間隔制御が望まれることになる。また、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の中間点からの離脱と合流、およびフローコリドー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、例えば東京ー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ものと考えられるが、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 corridors 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 Fukuoaka, K.: Fundamental Characteristics of Decentralized Air Traffic Flow Control in High Density Corridor, 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, Brisbane, Australia, Sep. 26, 2012.

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

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

[13] 例えばBlom, H.A.P. and Bakker, G.J.: Safety of advanced airborne self separation under very high en-route traffic demand, Proc. SESAR Innovation Days, ENAC, Toulouse, Nov. 29-Dec. 1, 2011.

[14] Bach R., Farrell C., and Erzberger H. An algorithm for level-aircraft conflict resolution. NASA/CR-2009-214573, 2009.