

14. フローコリドーにおける高密度航空交通流の形成

航空交通管理領域 ※中村 陽一, 蔭山 康太
名古屋大学 武市 昇

1. はじめに

通信・航法・監視システムの発展に伴い、ADS-B(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)^[1]の利用により機上において周辺航空機の動態情報を取得し、各航空機が自律的な間隔維持を行うことが可能となるものと考えられている。日本の CARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)^[2]や、米国の NextGen (Next Generation Air Transportation System)^[3]などの航空交通システムの長期計画においても、機上装置を活用した自律的な間隔維持を行うことが想定されており、フローコリドーの導入が検討されている。

フローコリドーとは、管制官の指示により航空機が飛行する従来の空域とは分離された、自律間隔維持の機能を有する航空機のみが飛行可能な空域である。細長い筒状あるいは帯状の空域が想定されており、コリドー内の航空機は同一方向へ飛行し、自律的な間隔維持が行われる。コリドー内を飛行する航空機は管制指示を必要としないため、管制官のワークロードの低減が期待され、またコリドー内に高密度交通流を形成することにより、コリドー外の航空機の利用可能な空域を拡大でき、全体として処理容量が増加するものと期待されている。

フローコリドーの実現には、航空機の自律間隔維持の運用手順の検討が不可欠である。これまでコリドーの形状や配置、運用手順等の概念は検討されている^[4]が、実現までの研究課題は多く残されている。機上装置により得られる周辺の航空機の動態情報を利用し、適切な手順に基づき、コリドー内における間隔維持、合流および離脱を安全かつ効率的に行わなければならない。また、緊急時の運用も検討すべき課題である。さらに、コリドー導入により大きな便益を得るためには、交通需要が高く、効率的な高度、経路に沿ったコリドーの配置が求められる。

本稿では、コリドー内を飛行する航空機の自律間隔維持における運用手順に焦点をあてる。

筆者らはこれまでにフローコリドー内における間隔維持アルゴリズムの検討を行っている^[5]。これは、互いの相対位置、相対速度に基づき各航空機の方位角を定めるアルゴリズムである。本稿ではさらに速度差による回避方向の判断を新たに導入したアルゴリズムを提案し、その効果を検証する。航空機がコリドー内を同一方向へ飛行する交通流を計算機上に模擬し、各航空機の挙動を調べる。安全性、ワークロードの観点より評価を行い、速度差に基づいた回避方向の判断を導入することにより大きな便益があることを明らかにする。

2. 数値解析モデル

2.1 交通流モデル

本稿では水平面の運動のみを考慮した単純な直線のフローコリドーを想定し、すべての航空機が同一方向へ飛行する交通流を対象とする。図1に示すように最適経路を中心として航空機の飛行すべきコリドーの幅を W_{cor} で与える。また、安全のために維持すべき間隔を安全間隔として設定し、安全間隔を維持するための間隔制御を行う目安として基準間隔を設定する。図1において、安全間隔を実線の円の半径、基準間隔を破線の円の半径で表し、それぞれ R_{MS} , R_{SC} と表記する。

すべての航空機は各々理想的な速度で飛行することが望ましいと考え、速度調整を行わずに方位角の操作のみにより間隔を維持するアルゴリズムを検討した。各航空機は間隔を維持するために必要な場合を除き、コリドー内を飛行するものとする。

本稿では、航空機の幾何学的条件より飛行方向を定める基準方式をもとに、速度差に基づき回避方向の左右判断を加えたアルゴリズムを提案する。

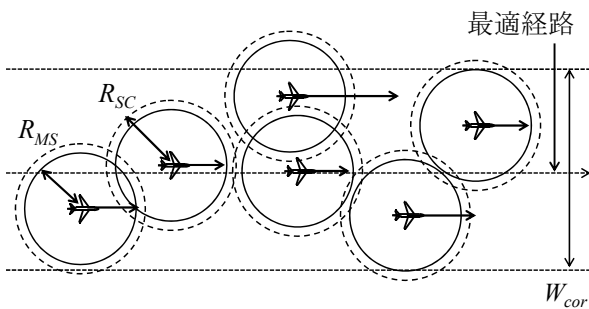


図1 対象とする交通流

2.2 基準方式

航空機の自律的な間隔維持の基本的な考え方を示す。すべての航空機が同一方向に飛行していることを前提とし、2機の航空機が互いに反対方向へ方位角を同じ角度変更することにより、間隔を確保する。

航空機の幾何学的条件を利用し、基準間隔 (R_{SC}) を維持して飛行する方位角を定める。図2に示すように、 $d_{A,B}^y$ が基準間隔以下かつ航空機AがBより高速で飛行するとき、間隔維持のための操作が求められる。最小限の操作により追い越しを行うために、2機の相対速度ベクトルが、航空機Aの位置から航空機Bを中心とする半径 R_{SC} の円へ引いた接線方向（図2における V_R 方向）となるよう互いの方位角を変化させる。求める角度を μ_{SC} と表記すると、以下の式で与えられる。

$$\tan \mu_{SC} = \frac{(R_{SC} \cos \gamma - d_{A,B}^y)(V_A - V_B)}{(d_{A,B}^x - R_{SC} \sin \gamma)(V_A + V_B)} \quad (1)$$

また、基準間隔を下回るとき、間隔を確保するために以下の式で示す μ_a を加える。

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

安全間隔を下回る時、間隔の確保を最優先とし、方位角を μ_u とする。

$$\mu_u = \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

以上に示すように、2機の航空機の間隔 $d_{A,B}$ に応じて、間隔の維持のために適切な方位角 $\mu_{A,B}$ を以下に示すように設定した。

$$\mu_{A,B} = \begin{cases} \mu_{SC} & (d_{A,B} > R_{SC}) \\ \mu_{SC} + \mu_a & (R_{SC} \geq d_{A,B} > R_{MS}) \\ \mu_u & (R_{SC} \geq d_{A,B}) \end{cases} \quad (4)$$

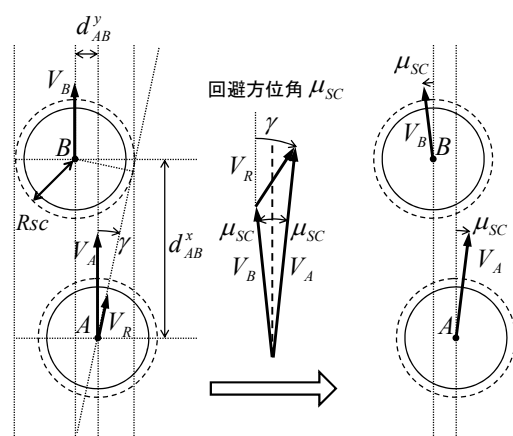


図2 基準方式

2.3 回避方向指定方式

本節では、速度に基づく方向へ回避を行うアルゴリズムを提案する。間隔を維持しつつ追い越しを行うとき、方向の違いにより方位角は2通りに表現できる。図2に示すように、回避対象と比較して、飛行方向に対して自機の側からの回避を達成する角度は式(1)により与えられる。一方、図3に示す反対方向からの回避を達成する角度を μ_{SC}^o とおくと、以下の式で与えられる。

$$\tan \mu_{SC}^o = \frac{(R_{SC} \cos \gamma^o - d_{A,B}^y)(V_A - V_B)}{(d_{A,B}^x - R_{SC} \sin \gamma^o)(V_A + V_B)} \quad (5)$$

ここで、 γ^o は航空機AからBを中心とする半径 R_{SC} の円の遠方側へ引いた接線方向とのなす角度である。本稿では速い航空機が左側より追い越しを行うものとし、互いの速度、位置関係に応じて求められる角度の変化を図4に示す。ここでは、 x 軸を飛行方向、 y 軸を垂直右側にとり、 dx および dy は各軸方向の航空機Bに対するAの相対的な位置を表す。また、 z 軸は相対的な位置において必要な角度であり、A、Bの速度をそれぞれ500、450[kt]、基準間隔 R_{SC} を5[NM]として算出している。図4の破線の円で示すように、位置関係により仮定した左側からの回避には著しく大きな方位角操作が求められる。高密度な空域において、多数の航空機が同一方向へ飛行していることを考慮したとき、飛行方向と著しく異なる方向へ方位角を向けることは、周辺の航空機と接近する危険性を高める要因になる。そのため、方位角はほぼ直進とみ

なせる範囲内に限定されるべきである。基準方式の解析（3章参照）において、最大の方位角は約14[deg]であった。そこで、より小さな角度で回避が行われるべきことから角度の閾値を10[deg]として設定し、その範囲内でのみ仮定した左側からの回避を行うこととした。

航空機AがBより高速かつ後方に位置するときの方位角および方向について表1にまとめる。ここでは、2機の間隔を $d_{A,B}$ 、飛行方向に対して横方向の座標を y とし、間隔、位置、速度に応じた角度および2機A、Bの回避方向を表している。基準間隔、安全間隔を下回るときは前節と同様に間隔確保のための操作を行う。

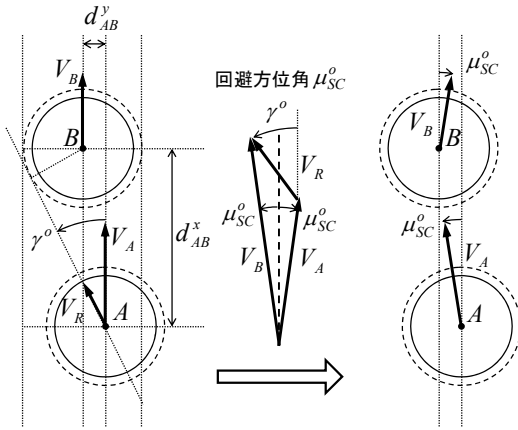


図3 回避方向指定方式

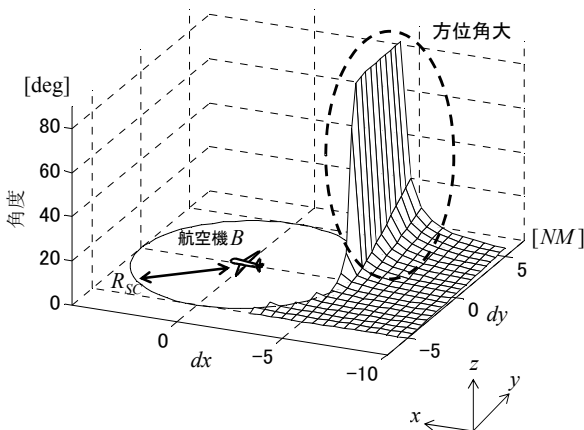


図4 指定方向からの回避に求められる角度

3. 数値解析

3.1 数値解析条件

数値解析に利用する各種パラメータを表2に示し、各航空機の初期状態例を図5に示す。ここで、矢印は速度ベクトルであり、各航空機を

表1 方位角および回避方向

間隔	条件	角度	A	B
$d_{A,B} > R_{SC}$	$y_A \leq y_B$	μ_{SC}	左	右
	$y_A > y_B$	μ_{SC}	右	左
	$\mu_{SC}^0 > 10$			
$R_{SC} \geq d_{A,B}$	$y_A \leq y_B$	μ_{SC}^0	左	右
	$y_A > y_B$	μ_{SC}^0	右	左
$d_{A,B} > R_{MS}$	$y_A \leq y_B$	$\mu_{SC} + \mu_a$	左	右
	$y_A > y_B$	$\mu_{SC} + \mu_a$	右	左
$R_{MS} \geq d_{A,B}$	$y_A \leq y_B$	μ_u	左	右
	$y_A > y_B$	μ_u	右	左

囲む円の半径は安全間隔を表す。解析結果において方位角の変化を強調するため、方位角は5倍の角度で表示しており、例として5[deg]の傾きを図5凡例に示す。初期位置として、 x 軸方向に等間隔、 y 軸方向には設定した範囲内の無作為な位置を与える。80機の航空機により構成される交通流を扱い、各航空機の飛行速度は450~500[kt]の範囲で無作為に与える。安全間隔、基準間隔をそれぞれ3[NM]、5[NM]、飛行すべきコリドーの幅を15[NM]とし、監視範囲を100[NM]に設定した。各航空機の初期位置、飛行速度により解析結果は異なるため、50通りの初期値に対して計算を行った。また、各アルゴリズムにより形成される交通流の特性を評価するため、長時間の数値解析が必要となり、それぞれの初期値に対して約100000秒間にわたる各航空機の挙動を計算した。これにより左右判断の導入による効果を調べた。

表2 数値解析パラメータ

構成機数	80
速度域	450~500 [kt]
安全間隔 R_{MS}	3 [NM]
基準間隔 R_{SC}	5 [NM]
コリドーの幅 W_{cor}	15 [NM]
監視範囲	100 [NM]

3.2 評価指標

本稿では、航空交通流の安全性、およびパイロットのワークロードを評価指標とした。航空機間の距離が安全間隔を下回り接近することをコンフリクトと呼ぶこととすると、安全のため

にはコンフリクトが発生してはならない。また、他の航空機との接近量および接近時間に比例して危険性は高まるといえる。そこで、式(6)、および(7)により安全間隔、基準間隔を下回り接近した量を求め、それを式(8)、(9)に示すように数値解析時間にわたり積分し、全機組み合わせの合計値を安全性の評価値として求めた。

$$d_{i,j}^{conf} = \begin{cases} 3NM - d_{i,j} & (d_{i,j} < 3NM) \\ 0 & (d_{i,j} \geq 3NM) \end{cases} \quad (6)$$

$$d_{i,j}^{ctrl} = \begin{cases} 5NM - d_{i,j} & (d_{i,j} < 5NM) \\ 0 & (d_{i,j} \geq 5NM) \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{conf} = \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{conf} dt \quad (i < j) \quad (8)$$

$$E_{ctrl} = \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{ctrl} dt \quad (i < j) \quad (9)$$

また、パイロットのワークロードはより少ないことが望ましいため、方位角の変化をパイロ

ットの操縦量とみなし、数値解析時間にわたり積分した値を各航空機のワークロードとして定め、これを式(10)により表す。そして、式(11)に示すように、全航空機のワークロードの合計値を評価値とした。

$$WL_i = \int |\dot{\psi}_i| dt \quad (10)$$

$$E_{work} = \sum_i WL_i \quad (11)$$

3.3 解析結果

3.3.1 交通流全体の評価

解析結果の1例として、各アルゴリズムに従い飛行する航空機より形成された交通流の様子を図6、および図7に示す。各航空機は各々が最適な飛行速度で飛行するため、図中破線の円で示すように多数の航空機が密集する時間帯が存在し、このとき最も危険性が高いといえる。

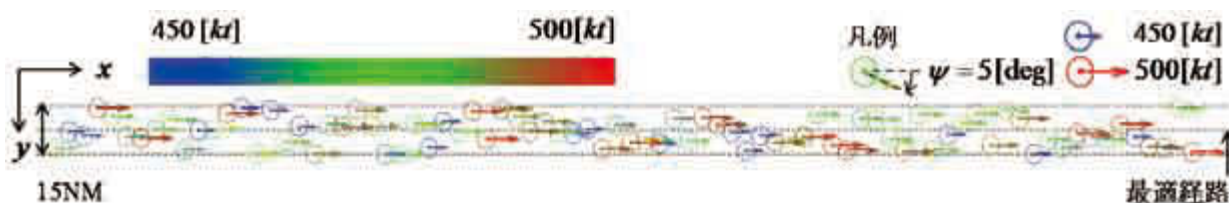


図5 初期状態例

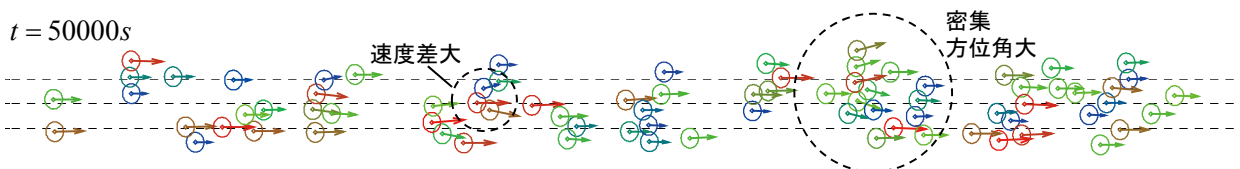


図6 解析結果（基準方式）

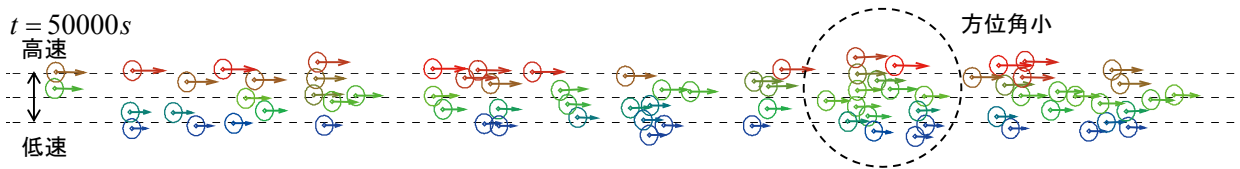


図7 解析結果（回避方向指定方式）

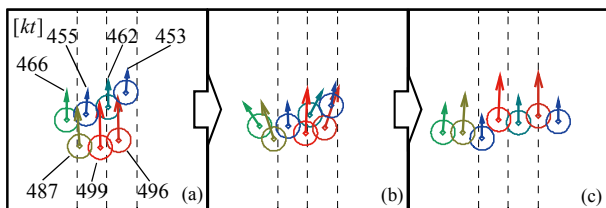


図8 基準方式における回避

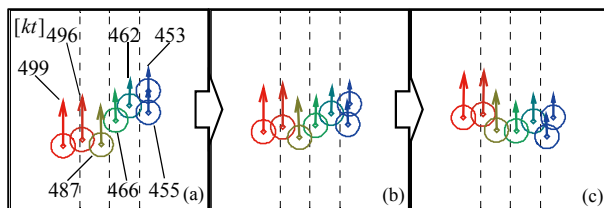


図9 回避方向指定方式における回避

基準方式においては、密集し、接近する航空機間の速度差が大きいとき、回避のためにより大きな方位角操作が必要なことが見て取れる。これに対し、左右の判断を導入した交通流では進行方向からみて左側を高速、右側を低速の航空機が飛行している様子がわかる。密集状況下においても直進とみなせる方位角で飛行している。

密集状況下における回避の1例として、図8に基準方式、図9に左右判断を導入した回避方向指定方式を適用した同一時刻における各機の位置、速度を示す。図8(a)に示すように、基準方式では前方4機と後方3機の速度差が大きいことがわかる。多数の航空機が左右方向に並び、回避行動が制限される。さらに、接近する航空機間の速度差が大きいため、互いに大きく接近してしまい、より大きな方位角操作を求められる。図9(a)に示すように、左右の判断の導入により、自然と速度に応じた流れが形成され、回避すべき対象となる前後、左右の航空機間の速度差を抑えた。相対速度が小さいことは、互いの前後方向の間隔が接近するまでの時間に余裕があることを意味する。そのため、わずかな方位角の操作により回避することが可能となる。図9においても、全ての航空機が直進しているとみなせるほどわずかな方位角の変化しか見られず、安定した交通流が形成された。なお、基準方式において、最大方位角は約14[deg]であったのに対し、回避方向指定方式では10[deg]以内の操作のみにより間隔の維持が行われた。

3.2節に示す評価指標に従い、50通りの各交通流に対して計算した評価値の平均値を表3に示す。本解析においてコンフリクトは1度もみられなかった。また、互いの速度差を利用した左右の判断を導入し、回避対象の航空機との速度差を抑え、わずかな方位角の変化のみによる回避を実現した。安全性の評価値 E_{ctrl} は低減し、ワークロードの評価値 E_{work} も5分の1程度まで大きく低減し、ともに改善がみられた。

3.3.2 交通流ごとの評価

各交通流における速度のばらつきとワークロードの関係性を調べた。50通りの初期値ごとに計算した速度の標準偏差、およびワークロードの評価値 E_{work} の関係を図10に示す。基準方式

表3 評価結果

	E_{ctrl} 10 ⁷ [m·s]	E_{conf} [m·s]	E_{work} 10 ³ [deg]
基準方式	2.97	発生せず	8.85
回避方向指定方式	2.73	発生せず	1.75

では、交通流を構成する航空機間の速度のばらつきが大きいほど、全体としてのワークロードが増加する傾向がみられる。速度のばらつきが大きい交通流ほど接近する航空機間の速度差が大きくなる傾向にあり、速度差の増加は回避に要する方位角の増加につながる。したがって、速度のばらつきの増加はワークロードを増加させる要因といえる。

一方、速度差に基づく左右の判断を加えることにより、左から右へと速度に応じた流れが形成され、各機が速度に応じた位置を飛行する。この結果、各航空機とその近傍を飛行する航空機との相対速度はばらつきによらず常に小さくなるため、ワークロードを低減し、かつ速度のばらつきの増加によるワークロードの増加を抑制した。

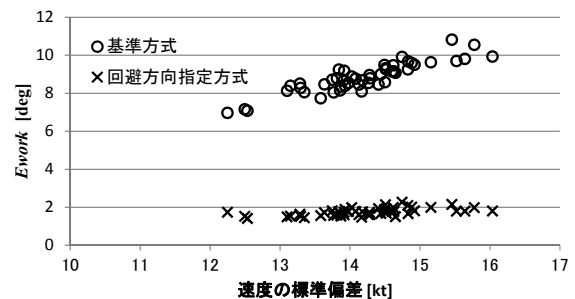


図10 各交通流の速度のばらつきと E_{work}

3.3.3 航空機ごとの評価

50通りの交通流の内の1つを例にとり、その交通流を構成する各航空機の色とワークロードの関係について比較した。航空機の色、および式(10)で示されるワークロード WL について、平均値および標準偏差を表4に示す。また、図11に速度と WL の関係を示す。基準方式では、平均速度近傍で飛行する航空機の色が最も低く、平均速度から離れた速度で飛行するほどワークロードが増加する傾向が見られた。平均から離れた速度で飛行する航空機は

ど速度差の大きな航空機と接近する可能性があり、危険性も高くなる恐れがある。最高あるいは最低速度で飛行する航空機は平均速度の航空機と比較して約2倍のワークロードが求められることとなった。

一方、速度差に基づく回避方向の判断を導入したことにより、回避対象となる航空機は自機の飛行速度と近い速度で飛行する航空機に限定される。これにより、飛行速度に関わらずすべての航空機の回避すべき対象との速度差は抑制されることとなる。この結果、ワークロードの低減に加え、その飛行速度による差異を解消した。

表4 航空機ごとの速度とWL

	速度[kt]		WL [deg]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
基準方式	475.25	14.83	121.00	33.61
回避方向指定方式			20.81	5.71

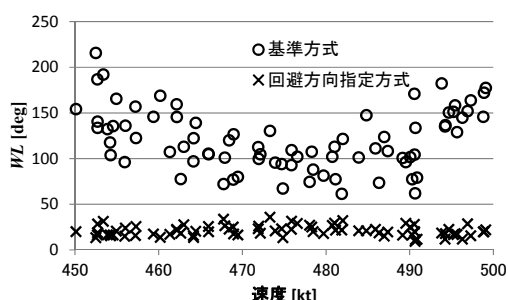


図11 航空機の速度とWL

4. おわりに

フローコリドーにおいては、各航空機が各々の最適速度を維持しながら飛行することが望ましい。そこで本研究では、フローコリドーにおける自律間隔維持に飛行速度差に応じた回避方向の指定を加えたアルゴリズムを構築し、その効果を調べた。

基準方式の解析により、多様な速度の航空機が同一方向に飛行する交通流においては航空機の速度差が大きいほど、より大きな回避操作が求められることを示した。また、交通流を構成する航空機の速度のばらつきが大きいほど、また交通流の平均速度からはなれた速度で飛行す

るほど操作量が増加する傾向がみられた。

速度差に基づく回避方向の左右の判断を加えることにより、速度に応じた流れが形成され、回避すべき対象となる航空機との速度差を低減した。これにより、安全性の向上およびワークロードの大幅な低減に加え、飛行速度やそのばらつきによらずワークロードを平滑化する効果もみられた。したがって速度差に応じた回避方向を指定することにより、少ないワークロードにより高い安全性を達成できるだけでなく、その便益をあらゆる飛行速度の航空機が等しく享受できることを明らかにした。

本解析により、高密度な交通流において安全かつ効率的に運航を行うための自律間隔制御方式の見通しが得られた。今後はより詳細な交通流の評価手法の検討や、高度方向を考慮した制御モデル、合流、離脱を含む交通流等、より現実的な交通流に対する検討を行うことが不可欠である。

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] Japan Civil Aviation Bureau: Long-term Vision for the Future Air Traffic Systems(CARATS), 2010, http://www.mlit.go.jp/koku/koku_CARATS.html.
- [3] 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.
- [4] Arash Yousefi, Jerome Lard, and John Timmerman: NextGen Flow Corridors Initial Design, Procedures, and Display Functionalities, Digital Avionics Systems Conference(DASC), IEEE/AIAA, 2010.
- [5] 武市昇, 中村陽一, 蔭山康太: フローコリドーの運用方式の研究, 第13回電子航法研究所研究発表会, 2013年6月.