

# 高密度航空交通流における自律間隔維持アルゴリズム

中村 陽一

博士学位論文

高密度航空交通流における自律間隔維持アルゴリズム

平成 27 年 2 月

名古屋大学大学院工学研究科  
航空宇宙工学専攻  
航空宇宙機運動システム工学研究グループ

中村 陽一

# 目次

1	序論	1
1.1	航空交通システムの概要	1
1.2	フローコリドの運用概念と課題	2
1.3	本論文の目的と構成	5
2	一方向航空交通流における自律間隔維持	7
2.1	自律的な間隔維持の考え方	7
2.2	想定する航空交通流	8
2.3	航空機の力学モデル	12
2.4	基本的な自律間隔維持アルゴリズムの検討	14
2.4.1	最適速度モデルによる間隔維持	14
2.4.2	横方向の運動による安全間隔の確保	15
2.4.3	旋回による間隔維持アルゴリズムの構築	19
2.4.4	航空機の合流の数値解析	21
2.4.5	数値解析結果	23
2.5	まとめ	24
3	経済的な運航のための経路構造	25
3.1	経済的な航空交通流	25
3.2	航空機の制御モデル	25
3.3	経路モデル	26
3.3.1	最適経路 (モデル 1)	26
3.3.2	帯状経路 (モデル 2)	27
3.3.3	相対速度基準副経路 (モデル 3)	28
3.3.4	経済速度基準副経路 (モデル 4)	30
3.4	数値解析	31
3.4.1	数値解析条件	31
3.4.2	評価指標	32
3.4.3	各経路モデルにおける航空機の振る舞い	33
3.4.4	評価結果	36
3.5	経路情報の利用による安全性改善の検討	38
3.5.1	経路情報を利用した制御モデル	38
3.5.2	数値解析結果	39
3.6	まとめ	41
4	航空機の挙動の変化が航空交通流へ与える影響	42

4.1	航空機の挙動のパラメータ .....	42
4.2	航空機の制御モデルおよびパラメータ .....	42
4.3	数値解析 .....	43
4.3.1	数値解析条件 .....	43
4.3.2	評価指標 .....	44
4.3.3	航空機のパラメータに対する交通流の振る舞いの変化 .....	45
4.3.4	基準間隔に対する交通流の振る舞いの変化 .....	49
4.4	まとめ .....	51
5	位置および速度情報を利用した自律間隔維持アルゴリズムの高度化 .....	52
5.1	ADS-Bにより取得可能な情報の利用 .....	52
5.2	航空機の制御モデル .....	52
5.3	相対ベクトル基準間隔維持アルゴリズム .....	53
5.4	数値解析 .....	55
5.4.1	数値解析条件 .....	55
5.4.2	評価指標 .....	56
5.4.3	解析結果 .....	56
5.5	フローコリドーにおける飛行意図の活用 .....	59
5.5.1	横位置基準間隔維持アルゴリズム .....	59
5.5.2	数値解析結果 .....	61
5.6	まとめ .....	62
6	速度情報を利用した運航効率改善の検討 .....	63
6.1	速度情報に基づく回避方向の判断 .....	63
6.2	速度差基準間隔維持アルゴリズム .....	63
6.3	数値解析 .....	66
6.3.1	数値解析条件および評価指標 .....	66
6.3.2	航空交通流における航空機の挙動の変化 .....	67
6.3.3	航空交通流における速度と操作量の関係性 .....	69
6.4	まとめ .....	71
7	空域制限を遵守する自律間隔維持 .....	73
7.1	空域の遵守の必要性 .....	73
7.2	空域の遵守を考慮した自律間隔維持アルゴリズム .....	73
7.3	数値解析 .....	79
7.3.1	数値解析条件 .....	79
7.3.2	評価指標 .....	80
7.3.3	数値解析結果 .....	81
7.4	運航効率改善の検討 .....	86

7.5	まとめ.....	92
8	結論 .....	93
	謝辞.....	95
付録	交通流の安定性の解析方法 .....	96
A.1	最適速度モデル.....	96
A.2	安定性解析.....	96
	参考文献 .....	98
	章と発表論文の関係 .....	100
	論文目録 .....	101

# 1 序論

## 1.1 航空交通システムの概要

現行の航空交通システムにおいては、地上からの管制に基づく航空機の運用が行われている。管制業務は、航空機相互間や、航空機と障害物との衝突を防ぎ、秩序ある流れの維持および促進のために行われる。増加する航空需要に対応し、航空機の安全な運航、定時性の確保、円滑な管制業務の実施等を目的として航空交通管制情報処理システムが構築された。飛行計画情報等を集中的に管理、処理するとともに、管制運用に必要な航空路監視レーダー等の各種情報を提供することにより、管制官は航空機の現在の位置を正確に把握することが可能である。また、運航情報、空域や気象に関連する情報を一元的に管理し、空港や航空路への航空交通の集中を未然に防ぐために航空交通流の予測、制御を行い、安全かつ効率的な交通流実現に向けた運航改善を進めてきた<sup>1)</sup>。

一方で航空需要はますます増加することが予想され、世界の航空旅客輸送量は今後 20 年間にわたり平均約 4.8% で伸び続け、2032 年には 2012 年に比べて約 2.6 倍になると予測されている<sup>2)</sup>。空港や空域における管制処理容量不足、遅延の発生、管制官の業務負荷の増大等が懸念される中、将来の航空需要の増加へ対応するために、ATM (Air Traffic Management) の改善が必要不可欠である。ATM は安全、経済的かつ効率的な航空交通の実現のために、関係者間の協力により、航空交通および空域を動的かつ統合的に管理することであると ICAO (International Civil Aviation Organization) の示すグローバル ATM 運用概念<sup>3)</sup>において定義され、その中で将来に向けた ATM の運航改善のための方向性が示されている。米国では NextGen (Next Generation Air Transportation System)<sup>4)</sup>、欧州では SESAR (Single European Sky ATM Research)<sup>5)</sup>、といった将来の航空交通システムのための長期ビジョンが策定されている。日本においても CARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)<sup>6)</sup>が策定され、ATM の性能向上に向けた取り組みが世界的に推し進められているところである。

将来の ATM 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。従来の航空交通システムにおいては、航空機間の衝突防止のために管制官が確保すべき最小間隔として管制間隔が設定され、管制間隔を下回り接近することはコンフリクトと呼ばれる。管制官は監視情報を利用して航空機の位置を把握し、管制指示により管制間隔の確保を行っている。一方で自律間隔維持とは、間隔維持の責任を管制官からパイロットへ委譲することに相当し、航空機側で周辺航空機の監視を行い、互いの間隔を維持することを意味する。各航空機が自律的に操作を行うことは、従来の管制官からパイロットへの指示において要する手順を省くこととなり、管制間隔を今日より短縮して各航空機がより希望に近い経路を飛行することを可能にするものと考えられる。また管制官の業務負荷を低減することにより交通容量の増加が期待される。自律間隔維持を実現するためのシステムとして、ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)<sup>7,8)</sup>、およびこれを利用した ASAS<sup>9)</sup>の研究が進められている。ADS-B の利用により、各航空機が周辺航空機の位置

や速度等の情報を取得することが可能であり、ASASを利用してパイロットに周辺航空機等の情報を提供することにより、将来的には航空機側で間隔の維持が可能になると考えられている。CARATSやNextGenにおいても自律的な間隔維持を行うことは言及されており、ASASを利用した運航方法の一つとしてフローコリドーと呼ばれるコンセプトが提案されている。図1-1にフローコリドーの概念図を示す。航空機の自律間隔維持には前述したASASのようにそれを行うための装備が必要となる。フローコリドーは自律間隔維持の機能を持つ航空機のみが飛行可能である筒状或いは帯状の空域であり、混雑都市間に配置したフローコリドー内部を航空機が同一方向へ飛行することが想定されている。CARATSにおいては2020年代に導入の意思決定が見込まれている。

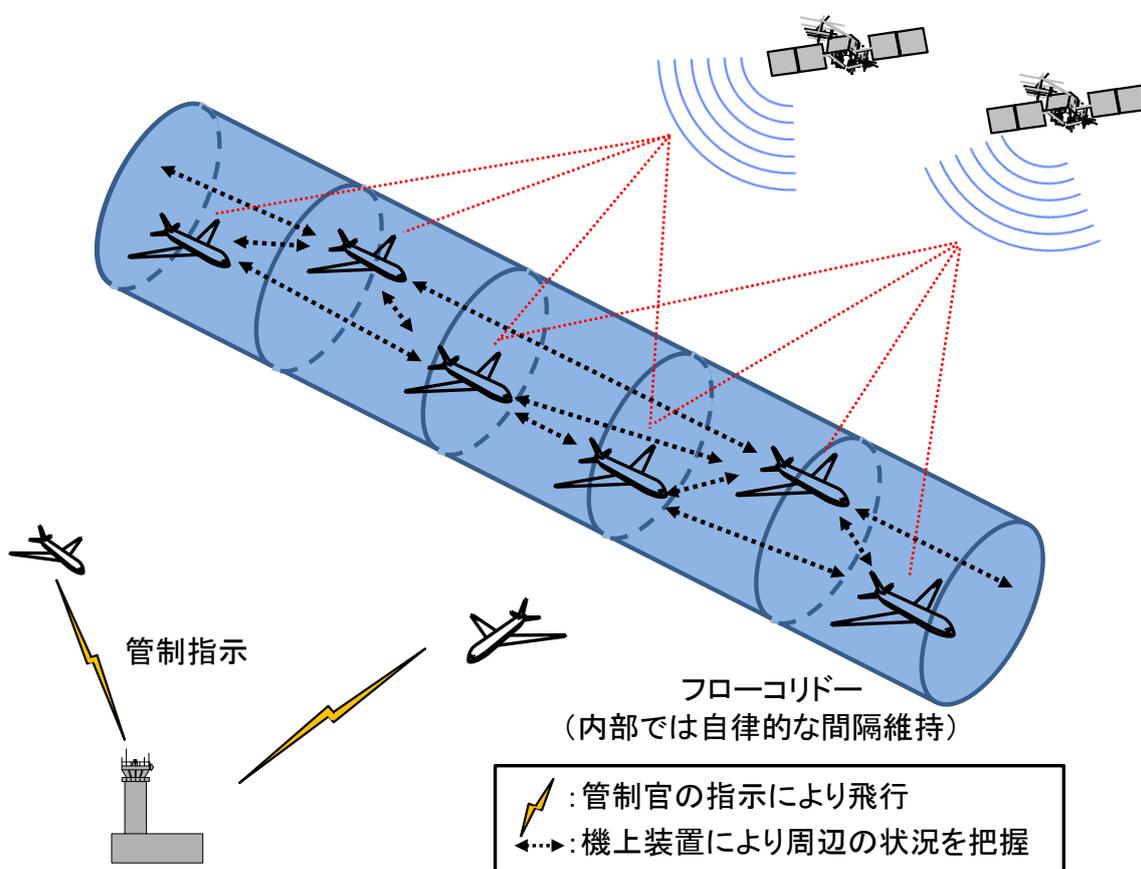


図 1-1 フローコリドーの概念図

## 1.2 フローコリドーの運用概念と課題

フローコリドーの導入背景およびその運用概念について述べる<sup>10,11)</sup>。現在の航空交通においては、特定の経路に需要が集中し、多数の航空機がほぼ同一の経路を同一方向へ飛行している。日本国内便の場合、羽田空港と福岡空港および新千歳空港を結ぶ幹線経路における交通流が非常に混雑している。空港周辺において到着機が集中する時間帯においては、滑走路へ向かう航空機の間隔を保つために航空機を遠回りに飛行させるレーダ

一誘導が頻繁に行われている<sup>12)</sup>。さらに、空港の混雑軽減のために、交通流の予測をもとに離陸時刻を予定より遅らせる出発制御が行われている<sup>13)</sup>。混雑空港においてはこうした調整が行われるほどに多くの航空機が集中している現状にあるが、空港周辺の航空機の飛行距離の延伸は騒音や消費燃料、管制官の作業負荷の増加へとつながり、出発前の過剰な調整は交通容量の低下につながる。そのため、このような混雑空域において安全性を確保しつつ交通容量を拡大し、効率的な交通流を実現することは重要な課題の一つである。また洋上経路においては、その日の気象条件に応じた航空機の最適な経路が存在する<sup>14)</sup>ため、すべての航空機がこうした最適経路を飛行することが望ましい。一方で洋上はレーダーの覆域範囲外であり、地上からのレーダー監視を行うことができないため、安全性の確保のためにレーダーの覆域範囲内と比較してより広い間隔を維持することが求められる。旅客の利便性を確保するために航空機は同じ時間帯に集中するため、現在は多くの航空機が最適な経路の近傍を飛行できず、離れた経路を低効率で飛行せざるを得ない状況にある<sup>15)</sup>。こうした洋上空域においても、すべての航空機が最適経路近傍を飛行することにより運航効率を改善することが期待される。また、航空機の現在の位置を正確に把握するだけでなく、将来の位置を正確に予測し、すべての航空機の定時性を確保することにより、円滑な交通流の実現が望まれている。

フローコリドーの導入により、前述した混雑空域において、安全性を損なうことなく運航効率を改善することが可能になるものと考えられる。フローコリドーの運用においては、内部を飛行する航空機は自律間隔維持を支援する機上装置により周辺の交通状況を把握し、各航空機が接近する航空機に対して速やかに回避操作を行うことが可能である。従来の航空交通システムにおいては、管制官がレーダー情報等により取得した航空機の位置や速度を把握し、これに基づき管制間隔の確保のための指示を行う。各航空機が自律的に操作を行うことは、従来において要する手順を省くこととなる。航空機が安全のために確保すべき間隔（安全間隔と呼ぶこととする）は、航空機の性能や運用に関連する様々な要素を考慮して定められる<sup>16)</sup>ものであるが、装備レベルの高い航空機のみが、各々の判断に基づき間隔維持を行いつつ同一方向に飛行するフローコリドーでは、安全間隔を今日より短縮することが可能になるものと考えられる。また、従来の間隔確保に利用されるレーダー誘導や速度の変更は飛行距離や速度の増減を伴い、到着時間に大きく影響を与えることから、このような運用において正確な時間管理を行うことは困難である。一方で、フローコリドーにおいては、最小限の操作で追い越しを行うことができるものと考えられる。これにより、飛行距離の増加や速度の変更を最小限にとどめ、航空機は計画通りに飛行することが可能になるものと期待される。すべての航空機が指定の時刻にフローコリドーの出口へと到達することが可能となれば航空機の管制が容易となる。フローコリドーの内部を飛行する航空機は管制指示を必要としないため、管制官の作業負荷を増加させることはない。また、フローコリドーの内部に高密度交通流を形成することにより、フローコリドーの外部を飛行する航空機の利用可能な空域を拡大でき、全体として交通容量が増加するものと期

待される。さらに、フローコリドーを航空機の最適な高度、経路に沿って配置することにより、航空機の運航効率を高めることが可能となる。

将来的には航空機が自律的に間隔維持を行うことが想定されるが、これを実現するにはすべての航空機が ADS-B の情報を利用でき、自律間隔維持のための機能を有していることが前提となり、自律間隔維持のための装備を搭載していない航空機は従来と同様に管制による指示が必要となる。すなわち、異なる装備が混在する環境において処理容量は地上からの管制により制限されることとなり、すべての航空機が自律間隔維持に対応しない限り、その性能を最大限に活かすことはできない。こうした環境において、最新のシステムを最大限に活用し、効率的な運航を行うためには装備による分離を行うことが望ましいと考えられる。現在の航空交通においては航空需要が一部の混雑空港間を結ぶ路線に集中しているため、こうした経路に沿って自律間隔維持の機能を有する航空機のみが飛行可能な専用空域としてフローコリドーが考案された。空域を分離して運用することにより、初期段階においては高高度の空域のようにその他の運航にあまり影響のない範囲で運用を行い、徐々に対応機の増加へとつなげていくことが可能であると考えられる。また、フローコリドーにおいては自律間隔維持のための装備が必須であるが、そのような装備を備えた航空機はフローコリドーの恩恵を受けることができるため、航空会社の投資を促すことができるものと考えられる。

フローコリドーの導入において想定される運用概念の変化を図 1-2 に示す。細長い筒状或いは帯状の専用空域内部において、航空機は同一方向へ飛行し、航空機は自律的に間隔維持を行うことが想定されている。NextGen においては、フローコリドーは巡航区間において利用され、入口、出口は空港から上昇、降下分離した位置に設定されることが想定される。また、各航空機の飛行速度は異なるため、フローコリドー内部において追い抜きを行うことが想定される。さらに、航空機は指定された時刻にフローコリドーの出口に到達することが求められる。自律間隔維持の機能を持たない航空機は、従来と同様に管制官の指示に従い、フローコリドーの外部を飛行することとなる。このように装備に対応して飛行可能な空域を分離しているため、フローコリドーの内部では最大限に機上装置を活用した自律間隔維持が可能になるものと考えられる。また、フローコリドーの配置を動的に変更することも想定される。航空機の運航は気象条件に大きく影響されるため、その日の気象を考慮して配置を変えることにより、悪天候を避け、柔軟かつ効率的な運航が実現できるものと期待される。

フローコリドーの実現には、航空機のフローコリドーへの進入から、内部における自律的な間隔維持、離脱までの一連の運用手順の検討が不可欠である。さらに、フローコリドーの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、経路に沿ったフローコリドーの配置が求められる。これまでに、米国を対象とし、多くの航空機が便益を得ることが可能なフローコリドーの配置に関する検討<sup>17-19)</sup>、フローコリドーへの進入から離脱までの運用手順の概念等<sup>20)</sup>の検討は進められているものの、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、フローコリドーの内部における間隔維持、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しなければならない課題である。

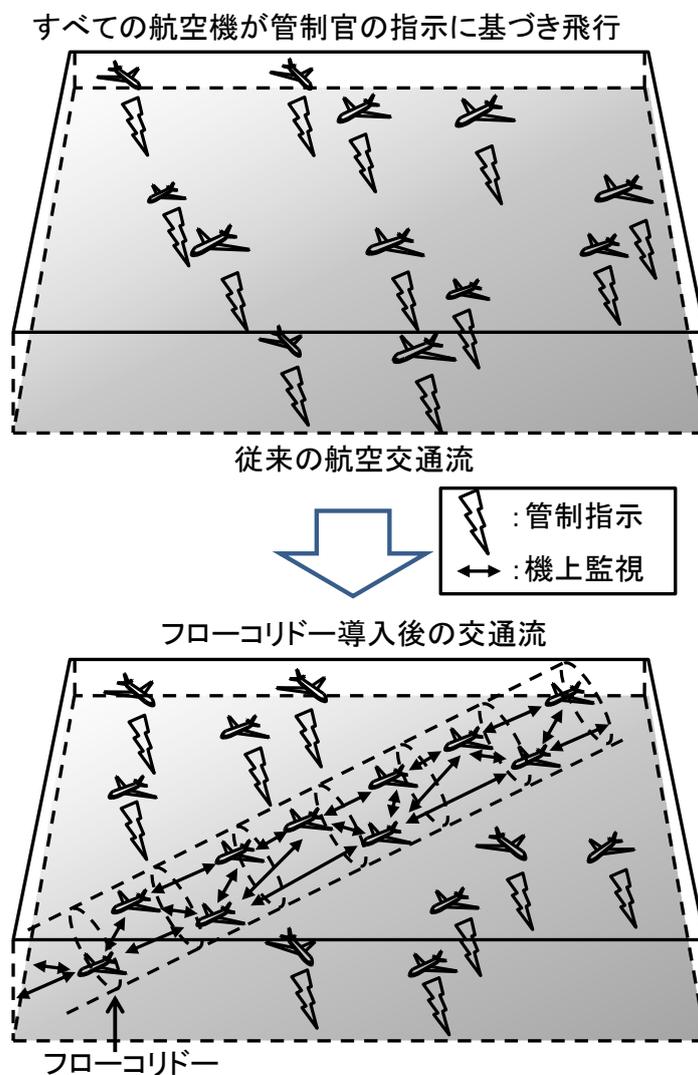


図 1-2 フローコリドーの導入による運用の変化

### 1.3 本論文の目的と構成

本研究ではフローコリドーの実現に向けて、特に重要となる航空機の自律間隔維持手法について検討する。フローコリドーは将来の新しい概念であり、すべての航空機が同一方向へ飛行する高密度な交通流において、自律的に互いの間隔の維持を行うことは従来の航空交通システムとは全く異なる運用となる。新しい課題のための初期の研究として、本研究では飽和状態の高密度な交通流を取り扱うことのできる理想的な運航方式を明らかにすることを目的とする<sup>21)</sup>。飽和状態の交通流を適切に取り扱うことのできる運航方式は現実

の交通流をより安全に取り扱うことができるものと考えられる。次第に現実的な要素を考慮していくことにより、実運航において適用可能な運航方式を見出すことを目指す。本研究においては、航空機の 2 次元平面のみの運動を考慮し、数値解析による交通流の評価を通してより良い間隔維持手法の検討を行う。

本論文の構成を示す。第 2 章では機上周辺監視により自律間隔維持を行う基本的な交通流の概念と、旋回により間隔を維持する一方向航空交通流の特徴について述べる。第 3 章では、航空機が各々異なる速度で飛行する交通流を想定し、最小限の位置情報に基づき間隔維持を行う航空機の飛行する経路構造の差異に着目し、交通流の振る舞いの変化について述べる。第 4 章では、航空機の間隔維持のための操作に関するパラメータの値を変化させ、このときの交通流の振る舞いの変化について調べ、航空機ごとの間隔維持の操作におけるばらつきが交通流へ与える影響について述べる。第 5 章では、ADS-B により取得可能な情報である航空機の位置、速度の情報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提案する。第 6 章では速度情報に基づく判断を行うことにより、安全性を損なうことなくわずかな操作のみにより間隔維持が実現可能であることを示す。第 7 章では、実運航において想定される空域の制限を考慮した有限の幅を持つ帯状空域を想定し、航空機が指定した範囲を逸脱することなく互いの間隔を維持するアルゴリズムについて述べ、空域幅の違いに基づく交通流の振る舞いの変化について述べる。最後に第 8 章にて本研究のまとめを行う。

## 2 一方向航空交通流における自律間隔維持

### 2.1 自律的な間隔維持の考え方

航空機は衝突を未然に防ぐために所要の間隔を維持することが求められる。このとき、ICAOにおいて定められた安全のレベルである Target Level of Safety (TLS)<sup>22)</sup> を満たすように間隔が設定されるが、これらは航空機の監視、航法性能などにより異なる。例えば、現在のレーダー監視に基づく管制においては、レーダーのアンテナサイトからの距離が 40 NM 未満、それ以遠の航空機に対して、安全のための最小間隔をそれぞれ 3 NM、5 NM と定めている<sup>1)</sup>。また洋上の空域においては、航空機の航法精度要件 (Required Navigation Performance: RNP) によりその最小間隔は異なり、RNP 4、RNP 10 の航空機の最小間隔はそれぞれ 30 NM、50 NM となる<sup>23)</sup>。ここで、RNP 4 とは、指定空域における位置誤差の 95% が ±4 NM に収まる精度であり、RNP 10 は ±10 NM に収まる精度のことを表す<sup>24)</sup>。また、航空交通においては一般に距離の表現に NM (=1852m) が利用されるため、本稿においても NM により表記する。このようにして定められた最小間隔を維持して飛行する限り安全であると捉えることができる。本研究においては、安全のために維持しなければならない最小限の間隔を安全間隔として定め、図 2-1(a)に示すように半径  $R_{MS}$  の円で表現する。同図 (b)に示すように、2 機の航空機  $i$ 、 $j$  の間隔を  $d_{i,j}$  と表記すると、 $d_{i,j} \geq R_{MS}$  のとき安全間隔が確保されていることとなる。一方、同図(c)に示すように 2 機の航空機が安全間隔を下回り接近したとき ( $d_{i,j} < R_{MS}$ )、これをコンフリクトとして扱う。航空交通流においては、安全性の観点よりコンフリクトは発生してはならないものとして考えられる。そこで、安全間隔を下回ることをないよう、安全間隔に対して余裕を持たせた間隔を基準に間隔制御を行うこととする。これを基準間隔と呼ぶこととし、図 2-2 に示すように半径  $R_{SC}$  の破線の円で表現する。基準間隔は安全間隔より大きく設定し ( $R_{SC} > R_{MS}$ )、航空機は基準間隔以上の間隔を保つように操作を行う。基準間隔を広く設定するほどコンフリクト発生の危険性が低下する一方で、交通容量は低下することとなる。

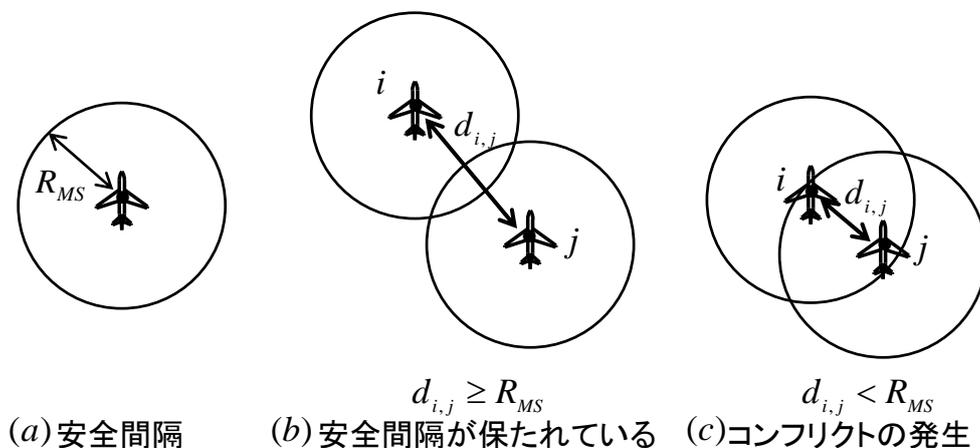
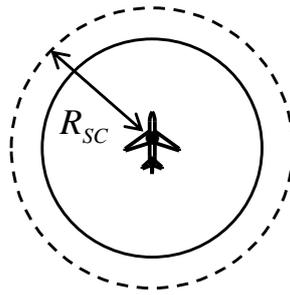


図 2-1 安全間隔



基準間隔

$$R_{SC} > R_{MS}$$

図 2-2 基準間隔

## 2.2 想定する航空交通流

ある航空機の出発空港から目的空港までの運航の概略図を図 2-3 に示す。一般に出発空港から離陸した航空機は巡航高度まで上昇し、巡航局面において同一高度を飛行、その後降下を開始し、目的空港へ着陸することとなる。1.2 において述べたように、フローコリドールは混雑空港間を結ぶ経路のように航空需要の高い経路において、巡航高度に配置されることが想定され、指定時刻にフローコリドールへ進入した航空機は自律的な間隔維持を行いつつ、指定時刻に出口に到達することが求められる。本研究においては、フローコリドールの内部における自律間隔維持手法を検討するため、巡航局面における航空交通流を対象とする。ここで、フローコリドールを配置する経路および高度はその運航効率を左右する重要な課題である。経済的な運航を目的とした場合、すべての航空機が燃料消費量を最小化する経路および高度を飛行することが望ましいと考えられる。このような経路はその日の気象条件等により変化するが、フローコリドールの対象となる同一の方向へと向かう航空機の最適な経路はほぼ同一となることが予想される。また、航空機は飛行する高度が高いほど燃費が良く、制約の範囲内で最も高い高度を飛行することが経済的である。したがって、すべての航空機がほぼ同一の経路および高度を飛行することが想定される。そこで本研究では、図 2-4 に示すように単純化した一方向航空交通流を扱うこととする。ここで、単純な直線経路を航空機の経済的に最適な経路と仮定し、航空機の運動を 2 次元平面内のみに限定する。多数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、互いが自律的に間隔維持を行うことは新しい概念であるため、まずはこのように単純化した航空交通流において、基本的なルールおよびそれに対する航空機の挙動を明らかにする。

すべての航空機が最適な経路および高度を飛行することが望ましい一方で、現在の航空交通流においては、安全な運用のための制限により多くの航空機は効率的に飛行することができていない。一例として、図 2-5 に羽田空港へ着陸する航空機の航跡例を示す。最終的に空港の一本の滑走路へと着陸するとき、同一滑走路へ着陸する航空機は一列に並んで飛行することとなる。前節で述べたように、航空機には運用上安全に取り扱うことのでき

る最小の間隔が定められており、それ以上に間隔を詰めて着陸することは不可能である。図においては、着陸機の間に必要な間隔を確保するために管制官によるレーダー誘導が行われ、これにより多くの航空機の飛行距離が増加している様子が示されている。もう一つの例として、日米間を結ぶ洋上経路における航跡例を図 2-6 に示す。航空機の効率の観点より最適な経路が存在する（例：橙色の線により示す経路）ため、すべての航空機が最適な経路を飛行することが望ましい。一方でレーダー監視が不可能であり、安全のために広い間隔を維持することが求められるため、すべての航空機が最適な経路近傍を飛行できないのが現状である。これら二つの例が示すように、混雑空域のピーク時には多くの航空機が集中し、安全の確保のために効率性が損なわれることとなる。

機上周辺監視を利用し、適切なルールに基づく自律間隔維持を行うことにより、高密度空域においても安全性を損なうことなく、効率的な運航が可能になるものと考えられる。すべての航空機が最適経路を飛行することが望ましいが、安全のために必要な間隔を維持しなければならない。このとき、同一の経路上において同時に飛行可能な航空機数を最大とする交通流は、運用上の最小の間隔ごとに航空機が密に並んで飛行する交通流であると考えられる。本研究では、このような交通流を“飽和状態の交通流”として扱うこととし、図 2-7 に飽和状態の交通流の様子を示す。ここでは、図 2-2 に示す基準間隔を運用上許容される最小の間隔とみなして図示している。飽和状態の交通流では最適経路を飛行する航空機数は最大である一方で、わずかな擾乱により交通が乱れることが予想される。本研究では、このような飽和状態の交通流と等しい交通量を基準とし、これと等しい交通量をもつ航空交通流を安全かつ効率的に取り扱うことのできる間隔維持手法を明らかにする。図 2-7 に示すように、すべての航空機が定時制を確保し、定められた間隔ごとに並んで飛行する航空交通流を自律間隔維持により実現できれば、すべての航空機が最適な経路を飛行することができるとともに、過剰なレーダー誘導を行う必要がないため、現在の航空交通流をより効率的に扱うことができるものと考えられる。

フローコリドーの概念は、空域に高速道路を新たに設置することに類似している。フローコリドーの内部では、すべての航空機が同一方向へ飛行し、各航空機は周辺航空機の情報に基づき操作を決定することが想定される。自動車交通においては、自動車は同一の車線上を同一の方向へ走行し、また各ドライバーが周辺車両との関係に基づき速度調整を行う。このように、同一方向へ互いの間隔を維持しながら移動するという点において同一の交通流であると考えられる。自動車交通において、特に交通渋滞は大きな社会的問題の一つであり、交通の流れをモデル化し、交通流の振る舞いを明らかにするための研究が行われている<sup>25-32)</sup>。自動車交通においては、車両の運動は物理的に制限され、各車両はいずれかの車線上を走行しなければならない。そのため、自動車交通を対象とした研究では、前後の運動に着目してモデル化が行われ、実データに基づく解析が行われる。

一方で、航空交通流においては空域の制限は存在するものの、車線のように物理的に固定された経路が存在しない。現在の運用においても、自動車交通における速度の変更によ

の間隔制御だけでなく、レーダー誘導による航空機の方位角の変更に基づく横方向の運動を利用した間隔制御が行われる。こうした横方向の運動による間隔制御は自動車交通においては行われていない。また、自動車の操作は各ドライバーに依存することから、交通流は完全に自律分散型であるのに対し、航空交通流においてはすべてのパイロットがルールに従い飛行することとなる。さらに、将来位置を正確に予測し、すべての航空機が定時制を確保することが求められ、指定時刻にフローコリドールの入口に到達した航空機は、指定時刻にフローコリドールの出口に到達することが必要となる。このようなフローコリドールと外部の空域の接続の条件は、導入する空域や空港の容量、それを扱う管制などにに基づき決定されることとなる。ADS-Bにより周辺を飛行する航空機の情報を取得することが可能であることも大きな特徴であると考えられる。こうした自動車交通とは異なる側面をもつため、航空機に適した間隔維持の研究が必要である。

実運航においては、水平面の運動による間隔維持だけではなく、高度方向に間隔を維持することも想定される。また、燃料の消費による重量の変化に伴い航空機の最適な高度も変化することとなる。したがって、これらの条件を考慮した3次元空間における位置および時間を含む最適軌道を想定した運用手順を検討すべきである。さらに、ほぼ同一の地域に存在する異なる出発空港から、同一の地域の目的空港へ飛行する航空機が同一のフローコリドールを利用することが想定されるため、フローコリドールへの合流や離脱を伴う交通流における手順が必要となる。その他、フローコリドールを導入する空域の条件や交通需要に基づくフローコリドールの配置や幅を含む形状の検討、定時制を確保するための検討が必要になる。これらのより実運航に即した条件を考慮した解析は今後の課題とし、本研究ではフローコリドールの内部における自律間隔維持を行う航空交通流に焦点を当てる。出発点として、自動車交通における現象をよく表すモデルの一つである最適速度モデル<sup>32)</sup>を活用し、一方向の航空交通流に適した自律間隔維持アルゴリズムについて検討する。

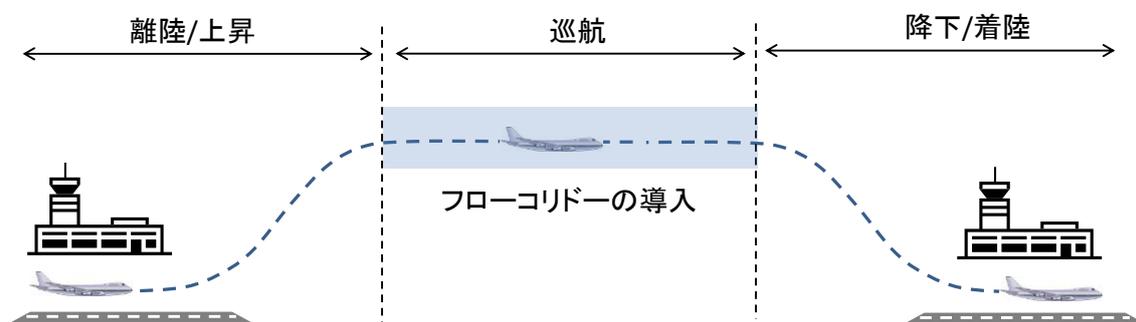


図 2-3 運航の局面の断面図

互いの情報を取得し、各航空機が自律的に間隔維持

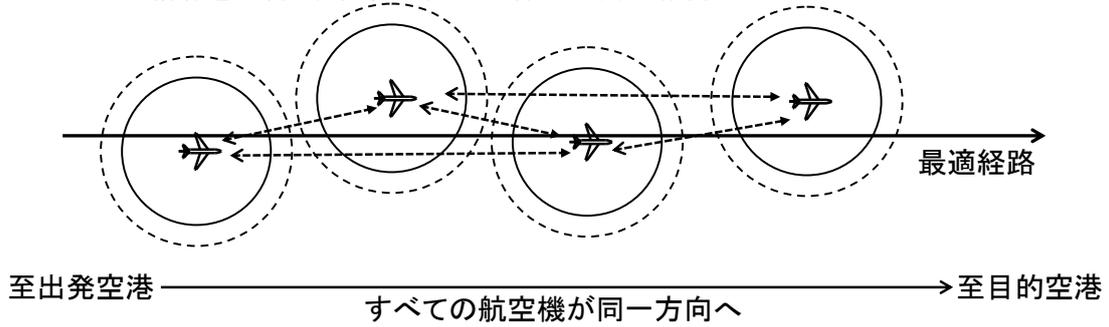


図 2-4 単純化した水平面における一方向航空交通流

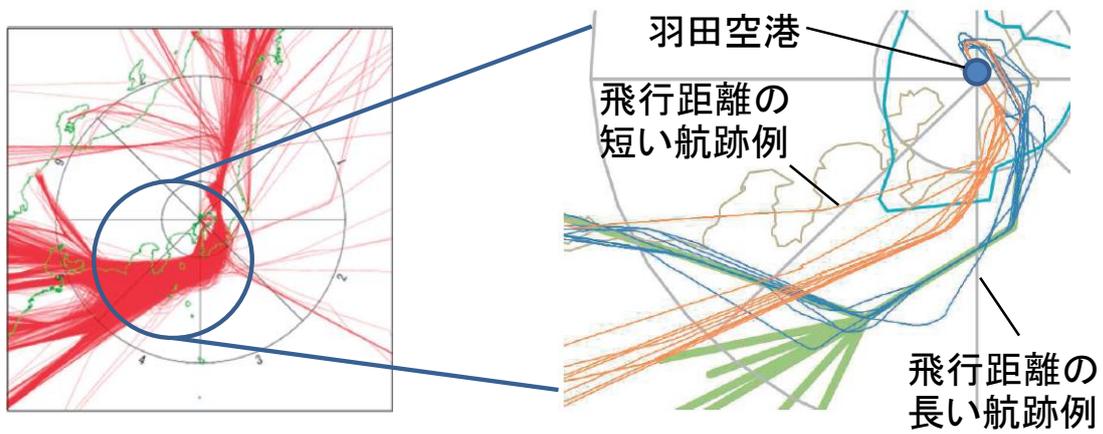


図 2-5 羽田空港への到着機の航跡例 <sup>12)</sup>

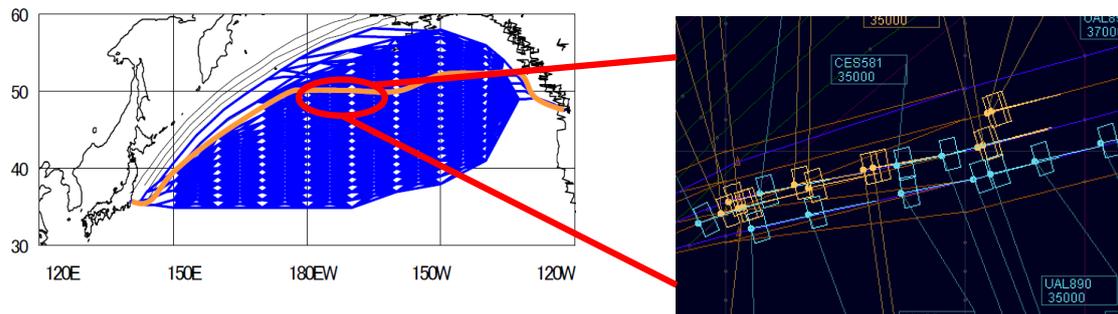


図 2-6 洋上経路における航跡例 <sup>14)</sup>

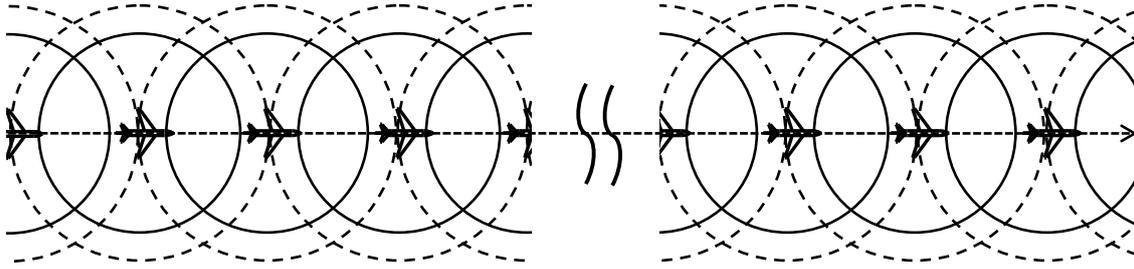


図 2-7 飽和状態の交通流

### 2.3 航空機の力学モデル

本研究では航空機を質点として扱い、2次元近似した運動方程式により航空機の運動を計算することとし、図 2-8 に示す座標系を利用する。ここで、 $x$  軸は図 2-4 に示す最適経路に沿う方向とし、これに対して垂直右側に  $y$  軸にとる。 $x$  軸を基準とした航空機の機首方向を方位角として扱い、これを  $\psi$  [rad] で表す。航空機には流れに垂直な方向に揚力が生じることとなるが、水平面において旋回する航空機には、図 2-9 に示すような力が作用することとなる。ここで、航空機が前後を軸として回転する角度はロール角と呼ばれ、これを  $\phi$  [rad] で表す。 $L$  [kgm/s<sup>2</sup>] は揚力、 $m$  [kg] は航空機の質量、 $g$  [m/s<sup>2</sup>] は重力加速度を表す。このとき、垂直方向の力のつり合いより、以下の式が成り立つ。

$$L \cos \phi = mg \quad (2-1)$$

また、航空機のを速度を  $V$  [m/s]、旋回半径を  $R$  [m]、向心加速度を  $a_r$  [m/s<sup>2</sup>] とおくと、以下の式が成り立つ。

$$a_r = \frac{V^2}{R} \quad (2-2)$$

水平方向の力を考慮すると、以下の方程式が導かれる。

$$m a_r = L \sin \phi \quad (2-3)$$

上式に式(2-2)を代入すると下記の式が得られる。

$$m \frac{V^2}{R} = m g \tan \phi \quad (2-4)$$

以上の式より、方位角の変化率は下記のように求められる。

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{V}{R} = \frac{g \tan \phi}{V} \quad (2-5)$$

上式が示すように、航空機のロール角を定めることにより方位角の変化率が決定される。航空機の加速度を  $a$  [m/s<sup>2</sup>] として与えるとき、水平面の航空機の運動は以下の式により記述される。

$$\frac{dx_i}{dt} = V_i \cos \psi_i \quad (2-6)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = V_i \sin \psi_i \quad (2-7)$$

$$\frac{dV_i}{dt} = a_i \quad (2-8)$$

$$\frac{d\psi_i}{dt} = \frac{g \tan\phi_i}{V_i} \quad (2-9)$$

ここで、航空機を添え字  $i$  で表す。本研究においては、周辺航空機の動態情報に基づき、加速度およびロール角を決定し、互いが均等に間隔維持を行うこととする。

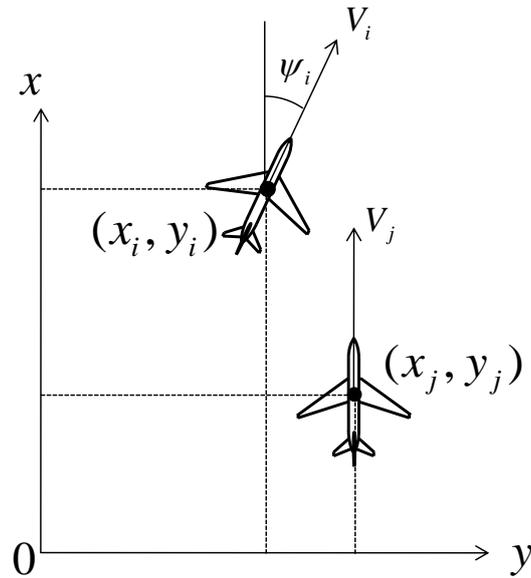


図 2-8 座標系

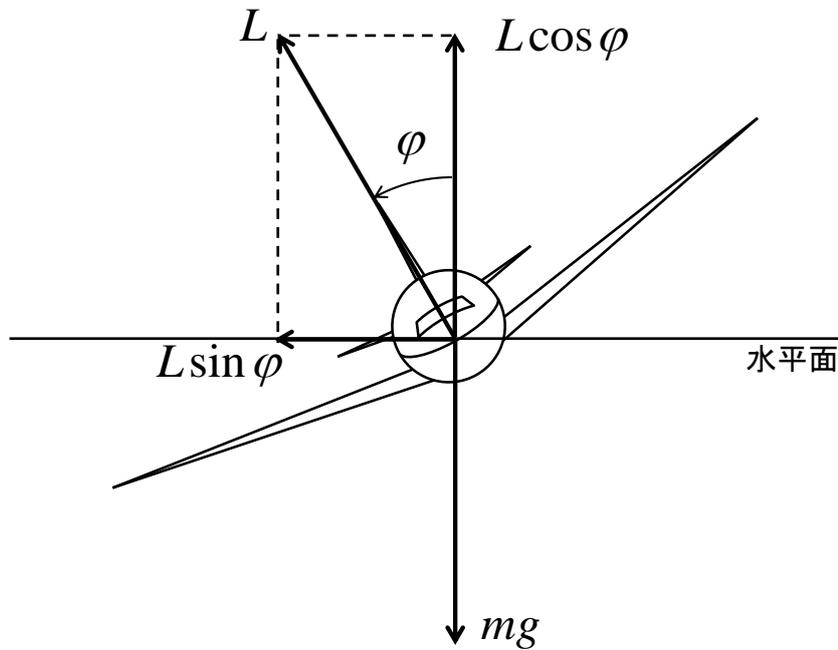


図 2-9 水平面における旋回を行う航空機に働く力 (正面図)

## 2.4 基本的な自律間隔維持アルゴリズムの検討

### 2.4.1 最適速度モデルによる間隔維持

自律間隔維持の検討にあたり、まず自動車の追従モデルである最適速度モデルの利用を試みる。最適速度モデルは1995年にBandoらによって提案された自動車の交通流を表すモデルである<sup>32)</sup>。このモデルでは直線上を走行する車両に対して前方の車両との間隔に基づく最適速度を設定し、ドライバーは最適速度で走行するように加速度を与える。最適速度モデルにおける各車両の加速度は以下の式によって表される。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = C \left\{ V(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt} \right\} \quad (2-10)$$

式中の $C$ は感度、 $x_i$ は $i$ 番目の車両の位置、 $\Delta x_i$ は前方車両との間隔を表す。 $V$ は最適速度であり、前方車両との距離の関数として表される。一般に前方車両の接近に伴い衝突を未然に防止するために減速しなければならない、他方で距離が離れていれば最高速度で走行可能である。これを表現するためには、 $V$ は距離に関して単調増加であり、上限のある関数とする必要がある。このような関数 $V$ を設定することにより、各車両は前方に他の車両がいなければ最高速度で走行し、前方の車両との距離が近づくほどその距離に応じて減速することとなる。このように、最適速度モデルは自動車交通をよく表現しているモデルである。

Bandoらの論文においては、最適速度モデルを利用した自動車交通流における定常状態からの微小な擾乱に対する安定性を解析的に求めている。ここで安定な交通流とは、時間の経過に伴い定常状態へと収束する交通流であり、他方で、擾乱が拡大する交通流は不安定な交通流である。詳細は付録にて示すが、等間隔かつ等速度で走行する自動車交通流を定常状態とし、このときの車両間隔を $dx_s$ とおくとき、交通流が安定であるための条件は以下の式により求められる。

$$f = V'(dx_s) < \frac{C}{2} \quad (2-11)$$

ここで、 $V'$ は式(2-10)における最適速度関数を前方車両との間隔により微分したものである。すなわち、微分値の定常車両間隔における値が、感度 $C$ の半分未満であれば擾乱が拡大せず、交通流は安定であることを示している。

以上のことから、安定条件を満たすように最適速度および感度 $C$ を設定することにより微小な擾乱に対して安定な交通流を実現することが可能である。一方で、安定な交通流であっても間隔の維持に伴う加減速が必要となる。一例として、図2-10に示すように、20機の航空機が等間隔( $R_{sc}$ )、等速度( $V_o$ )で一列に並んで飛行する交通流における微小な擾乱に対する航空機の振る舞いの様子を示す。ここで、周期境界条件を適用し、1番目の航空機の前方には20番目の航空機が位置することとする。初期擾乱として、1番目の航空機の位置を定常状態の位置からわずかに後方へずらし、最適速度モデルに従い飛行する航空機の挙動を計算した。図2-11に各航空機の速度の時間履歴を示す。航空機は前方との間隔を定常状態における間隔 $R_{sc}$ に保つように操作を行うため、まず2番目の航空機は減速、1番目の航空機は加速することとなる。時間の経過に伴い速度が一定値へと収束している様子

が示されている一方で、間隔の維持のための減速により後方の航空機との間隔が減少するため、すべての航空機が加減速を行うことが必要となる。すなわち、縦方向の運動のみを考慮したとき、安定な交通流であっても微小な擾乱に対する間隔維持のためにすべての航空機が操作を行うこととなる。加減速を行うことは燃料消費量の増加へつながる。そこで、本研究においては、航空交通流の特徴の一つである物理的な車線がないことに注目し、横方向の運動を活用した間隔の維持を検討する。



図 2-10 初期状態例

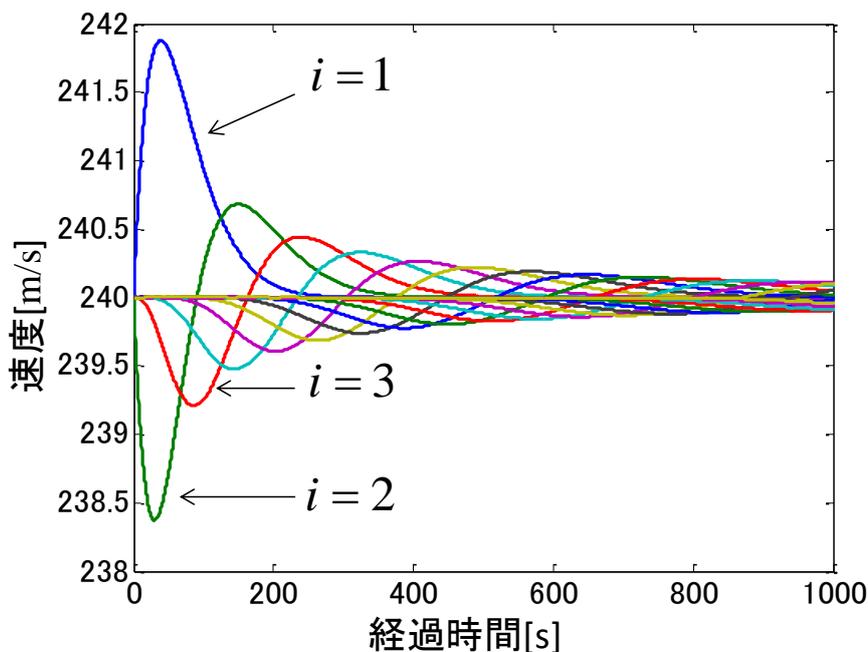


図 2-11 最適速度モデルに従う交通流の速度変更の様子

#### 2.4.2 横方向の運動による安全間隔の確保

航空交通流において安全間隔を確保する手法の一つにレーダー誘導が挙げられるが、これは安全間隔を下回り接近することが予想される航空機の方角角を変更することにより、他機との間隔を安全間隔以上に保つものである。航空機が同一直線上を飛行する航空交通流においても、前方の航空機との間隔が減少するとき、方角角を変更して横方向へ移動することにより、2次元平面における距離を広げ、コンフリクトを防止することが可能である。速度の変更を伴わずに方角角の変更のみを利用して間隔を広げることにより、縦方向のみ

の運動と比較して効率の良い交通流を実現できるものと考えられる。そこで、等間隔、等速度で飛行する航空交通流を対象とし、前方の航空機との間隔の減少に伴い方位角の変更により間隔を広げるとき、微小な擾乱に対する方位角の変更が同一直線上の他の航空機へ与える影響について調べる。

まず簡単のために前後方向の運動のみに着目する。2.4.1 に示す最適速度モデルに倣い、前方の航空機との間隔に基づく方位角を  $\Psi(\Delta x_i)$  として設定し、等間隔、等速度で飛行する航空交通流を定常状態として考える。定常状態における間隔を  $dx_s$ 、速度を  $V_o$  とおくと、航空機の位置は定常状態における位置とそこからの偏差に分けて以下の式により記述できる。

$$x_i = x_i^{(0)} + e_i \quad (2-12)$$

$$x_i^{(0)} = dx_s i + V_o t \quad (2-13)$$

ここで、 $x_i^{(0)}$  は  $i$  番目の航空機の定常状態における位置であり、そこからの偏差を  $e_i$  とする。定常状態付近の微小な挙動に着目し、 $e_i \ll 1$  について考える。ここで、最適速度モデルにおける微小な擾乱  $e_i$  に対する速度の変化量  $\Delta V_{ov}$  は、以下の式により近似できる。

$$\Delta V_{ov} = \left\{ V(dx_s) + V'(dx_s)e_i + \frac{V''(dx_s)}{2!}e_i^2 \right\} - V(dx_s) = V'(dx_s)e_i + \frac{V''(dx_s)}{2!}e_i^2 \quad (2-14)$$

一方で、速度変更を行わずに方位角の変更のみにより安全間隔を確保することを想定したとき、速度の前後方向の成分は  $V_o \cos \Psi(\Delta x_i)$  となる。擾乱  $e_i$  に対する前後方向の速度の変化量を  $\Delta V_{ov}^{\Psi}$  とおくと、以下の式で近似される。

$$\Delta V_{ov}^{\Psi} = V_o \cos \Psi(dx_s) - V_o \left\{ \cos \Psi(dx_s) - \sin \Psi(dx_s) \Psi'(dx_s) e_i - \frac{\cos \Psi(dx_s) \Psi''(dx_s) + \sin \Psi(dx_s) \Psi'''(dx_s)}{2!} e_i^2 \right\} \quad (2-15)$$

ここで、定常状態ではすべての航空機が直進することから  $\Psi(dx_s) = 0$  である。これにより、上式は以下の式に整理される。

$$\Delta V_{ov}^{\Psi} = V_o - V_o \left\{ 1 - \frac{\Psi''(dx_s)}{2!} e_i^2 \right\} = V_o \frac{\Psi''(dx_s)}{2!} e_i^2 \quad (2-16)$$

以上より、微小な擾乱  $e_i$  に対する速度変化は最適速度モデルにおいては定常状態からの変位を表す距離の微小量の 1 乗であるのに対し ( $\Delta V_{ov} = O(e)$ )、方位角の変化に伴う前後方向の速度の変化は微小量の 2 乗となる ( $\Delta V_{ov}^{\Psi} = O(e^2)$ ) ため、後方への影響を低減しつつ間隔を広げることが可能になるものと考えられる。

このように方位角の変更を行うとき、単純に前方の航空機との間隔が接近するときの挙動に着目すると、航空機の運動は以下に示すように最適速度モデルにおける最適速度を速度  $V_o$  の  $\cos$  成分に置き換えたものに相当すると考えられる。

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = C \left\{ V_o \cos \Psi(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt} \right\} \quad (\Delta x_i < d_s) \quad (2-17)$$

定常状態まわりの運動を考慮するため、上式に式(2-12)を代入すると以下の式が得られる。

$$\frac{d^2}{dt^2}(x_i^{(0)} + e_i) = C \left\{ V_o \cos \Psi(dx_s + \Delta e_i) - \frac{d}{dt}(x_i^{(0)} + e_i) \right\} \quad (2-18)$$

$e_i \ll 1$ として偏差の高次の項を無視して線形化を行うと、以下の式が導かれる。

$$\frac{d^2}{dt^2}(dx_s i + V_o t + e_i) = C \left\{ V_o \cos \Psi(dx_s) - V_o \sin \Psi(dx_s) \Psi'(dx_s) \Delta e_i - \frac{d}{dt}(dx_s i + V_o t + e_i) \right\} \quad (2-19)$$

$\Psi(dx_s) = 0$ であることを考慮すると、上式は下記のように整理できる。

$$\frac{d^2 e_i}{dt^2} = -C \frac{de_i}{dt} \quad (2-20)$$

上式では、前方の航空機との間隔に関する  $\Delta e_i$  の項が消えることとなる。これは、線形近似の範囲内においては、交通流としての振る舞いが表れないことを示す。したがって、前後の他の航空機への影響が生じないと解釈することができる。

以上より、間隔に応じて速度を変更することによる縦方向のみの運動と比較し、方位角の変更による横方向の運動は、前後方向の航空機に対する影響が著しく小さく、また速度を変更する必要がないため、より効率的に安全な間隔を保つことが可能になるものと考えられる。そこで、前方の航空機との2次元平面上の距離に基づく方位角を設定し、方位角の変更による安全間隔の確保を行う航空機の挙動を数値解析により調べる。航空機の運動を下記の式により記述する。

$$\varphi_i = C_h \{ \Psi(d_i) - \psi_i \} \quad (2-21)$$

$$\Psi = \begin{cases} 0 & (d_i \geq R_{sc}) \\ C_s (R_{sc} - d_i) & (d_i < R_{sc}, y_{i+1} \leq y_i) \\ -C_s (R_{sc} - d_i) & (d_i < R_{sc}, y_{i+1} > y_i) \end{cases} \quad (2-22)$$

ここで、 $\varphi_i$  は  $i$  番目の航空機のロール角であり、2次元平面における前方の航空機との間隔を  $d_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$  とする。 $C_h$ 、 $C_s$  はそれぞれロール角のフィードバックゲイン、および目標方位角を決定するパラメータである。一例として、図 2-10 に示すものと同一の初期状態より、方位角の操作により接近する他機との間隔を広げる航空機の挙動を計算した。20機の航空機が等間隔 ( $R_{sc}$ ) で飛行する定常状態から、初期擾乱として1番目の航空機の位置をわずかに後方へずらしている。すべての航空機は一定の同一速度で飛行するものとし、前方の航空機との距離が  $R_{sc}$  を下回る場合、その接近距離に基づき方位角を変更する。航空機の横位置である  $y$  座標、および方位角の変化の様子を図 2-12、図 2-13 にそれぞれ示す。初期擾乱により、2番目の航空機が間隔を広げるために方位角を変更する。この操作に伴い、3番目の航空機との間隔がわずかに減少するため、3番目の航空機は2番目とは反対方向へと方位角を変更することとなる。方位角の変更に伴う後方への影響が小さいため、4番目の航空機がわずかに操作を行うものの、それ以降の航空機は全く操作を行わない。このように、横方向の運動により間隔を広げることにより後方への影響を最小限に抑えることが可能となる。最適経路上に目的地が存在する場合、横方向の運動により目的地までの飛行距離が増加することとなるが、本解析における方位角の操作に伴う飛行距離の延伸は最大で 100m 程度であった。一般に航空機の巡航速度は 200m/s を超えることから、回避

操作による飛行時間の増加は 1 秒にも満たないこととなる．このように，効率の低下が微小であり，後方への影響がないことから，本研究においては方位角の変更による間隔維持を検討する．

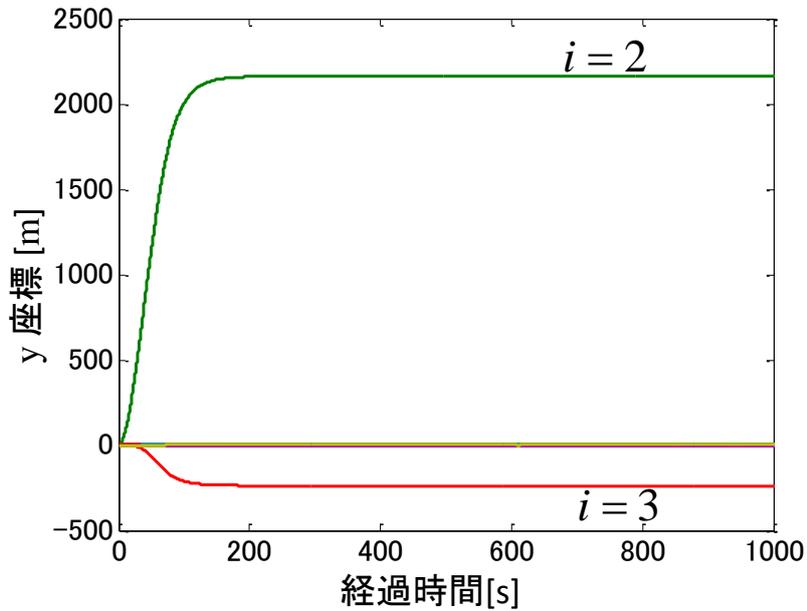


図 2-12 y 座標の変化

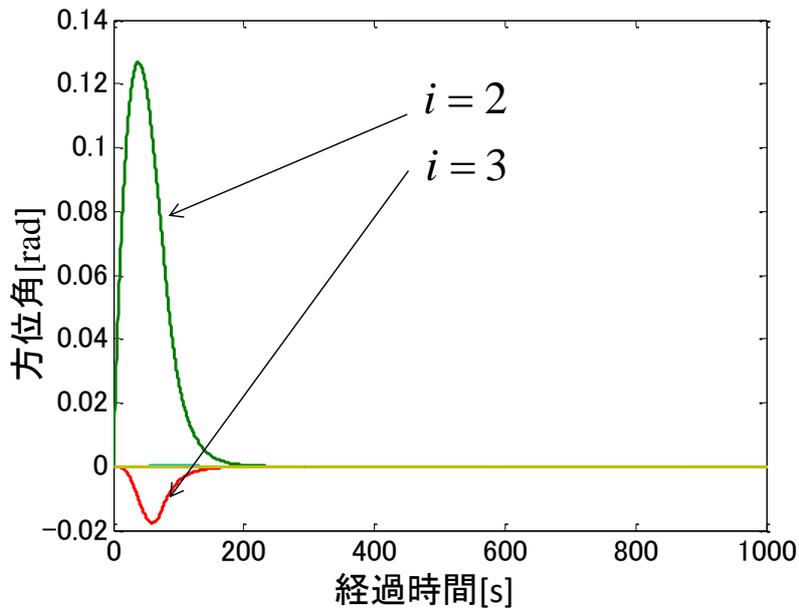


図 2-13 方位角の変化

### 2.4.3 旋回による間隔維持アルゴリズムの構築

これまでに方位角の変更による横方向への回避における有用性を示した．そこで，まず最小限の情報として位置情報のみを利用した旋回による間隔維持を行うアルゴリズムの構築を行う．まず，航空機は最適経路上を飛行することが望ましいため，経路上を飛行させるための方位角を導入する．図 2-14 に示すように航空機の最適経路からの  $y$  軸方向の距離の関数として設定する．航空機  $i$  の最適経路へ向かうための方位角を  $\Psi_i^r$  と表記し，以下の式により与える．

$$\Psi_i^r = C_r (y^r - y_i) \quad (2-23)$$

$C_r$  は最適経路からの距離に対する方位角の大きさを設定するパラメータ， $y_r$  は最適経路の  $y$  座標を表す．本解析においては  $y_r=0$  とし，また  $\Psi^r$  は  $-5\sim 5[\text{deg}]$  の範囲に限定した．

最適経路上へ向かう一方で，周辺航空機との間隔を維持することが求められるため，コンフリクト回避のための方位角を定める．一例として，図 2-15 に示すように 2 機の航空機  $i, j$  が安全間隔を維持して飛行することを考える．ここで，2 機の間隔を  $d_{i,j}$  と表記する．図 2-15 (a) に示すように互いの間隔が基準間隔 ( $R_{SC}$ ) 以上離れている航空機は十分な間隔が確保されているものとみなし，間隔維持のための操作は行わず，2 機は最適経路へ向けて飛行することとなる．一方で，図 2-15 (b) に示すように，基準間隔を下回り接近する航空機はコンフリクトの危険があると判断し，回避のための操作を行うこととする．このとき，図 2-15 (c) に示すように，接近した 2 機の航空機が互いに反対方向へ同角度方位角を変更するものとする．航空機  $i$  の航空機  $j$  に対するコンフリクト回避のための角度を  $\Psi_{i,j}^s$  と表記し，以下の式により表す．

$$\Psi_{i,j}^s = \begin{cases} 0 & (d_{i,j} \geq R_{SC}) \\ S_{i,j}^{dir} C_s (R_{SC} - d_{i,j}) & (d_{i,j} < R_{SC}) \end{cases} \quad (2-24)$$

ここで  $C_s$  は接近距離に対する方位角の大きさを設定するパラメータであり，値を大きく設定するほど素早く距離を広げることとなる． $S_{i,j}^{dir}$  は航空機  $i$  の航空機  $j$  に対する回避方向を表す符号 ( $\pm 1$ ) を表す．本解析においては，回避方向は前述した最適経路へ向かう方位角である  $\Psi^r$  を基準とし，この方向に対して回避対象が左右のどちらに位置するかによって決定する．図 2-15 に示す位置関係においては， $\Psi_i^r$  方向に対して航空機  $j$  は  $i$  の左側を飛行しているため，間隔を広げるために航空機  $i$  が右側へ ( $S_{i,j}^{dir} = 1$ )，同様の考えに基づき航空機  $j$  は左へ ( $S_{j,i}^{dir} = -1$ ) 方位角を同角度変更することとなる ( $\Psi_{i,j}^s > 0$ ,  $\Psi_{j,i}^s < 0$ ,  $|\Psi_{i,j}^s| = |\Psi_{j,i}^s|$ )．複数の航空機が基準間隔の内部に存在する場合，図 2-16 左図に示すように各航空機に対して式(2-24)に示す方位角を定め，右図に示すように和をとることによりコンフリクト回避のための方位角を定める．航空機  $i$  のコンフリクト回避のための方位角は下記のように表すことができる．

$$\Psi_i^{ss} = \sum_{j=1}^N \Psi_{i,j}^s \quad (2-25)$$

ここで  $N$  は交通流内部の航空機の総数を表す．

以上をまとめると、最適経路へと向かいつつ、他の航空機との間隔を基準間隔以上に保つように航空機の方角を定めることとし、これを目標方角として $\Psi^r$ と表記する。航空機*i*の目標方角は、以下の式に示すように間隔維持のための方角と最適経路へ向かうための方角の和として与える。

$$\Psi_i^r = \Psi_i^r + \Psi_i^{ss} \quad (2-26)$$

各航空機は上記に示す目標方角へ収束させるようにロール角を与える。ロール角は $C_h$ をフィードバックゲインとして以下の式により表される。

$$\phi_i = C_h (\Psi_i^r - \psi_i) \quad (2-27)$$

ここで、航空機が通常の運航ではありえないような危険な挙動をするのを防ぐためにロール角の上限を導入した。本研究においては、Required Navigation Performance Authorization Required (RNP AR) Procedure Design Manual において旋回時の標準ロール角として定義されている 18 度に設定する<sup>33)</sup>。航空機はロール角を範囲内で変更し、目標の方角へ針路を変更する。

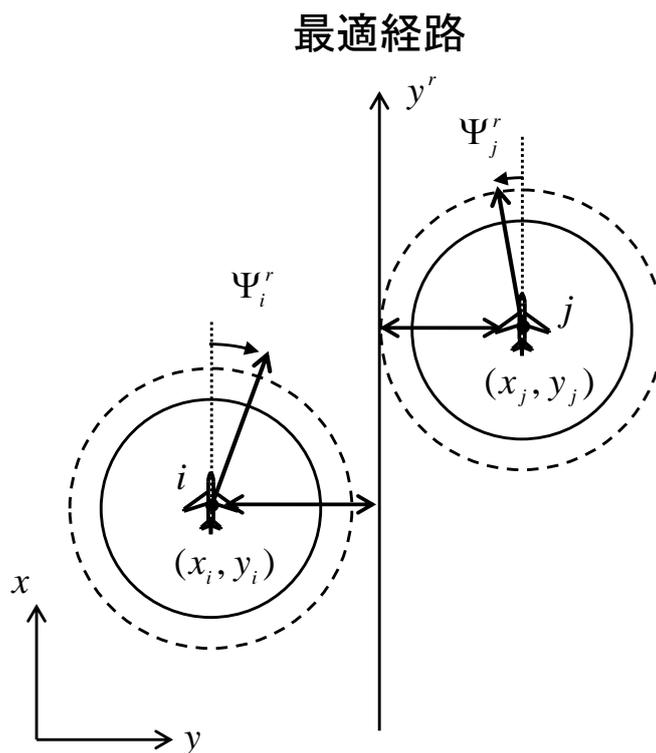


図 2-14 最適経路上を飛行するための方位角

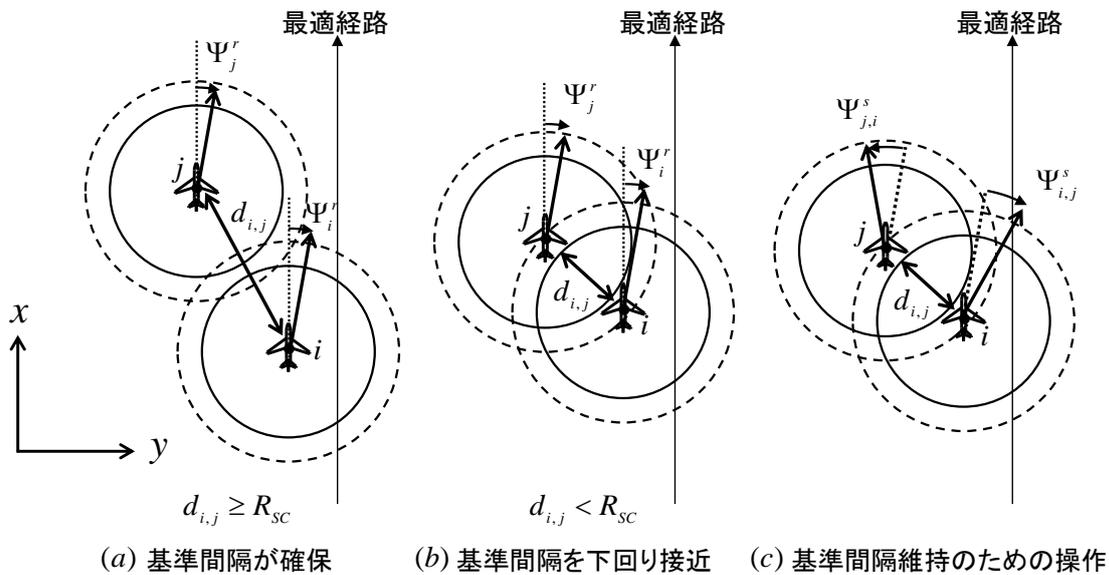


図 2-15 間隔維持のための操作

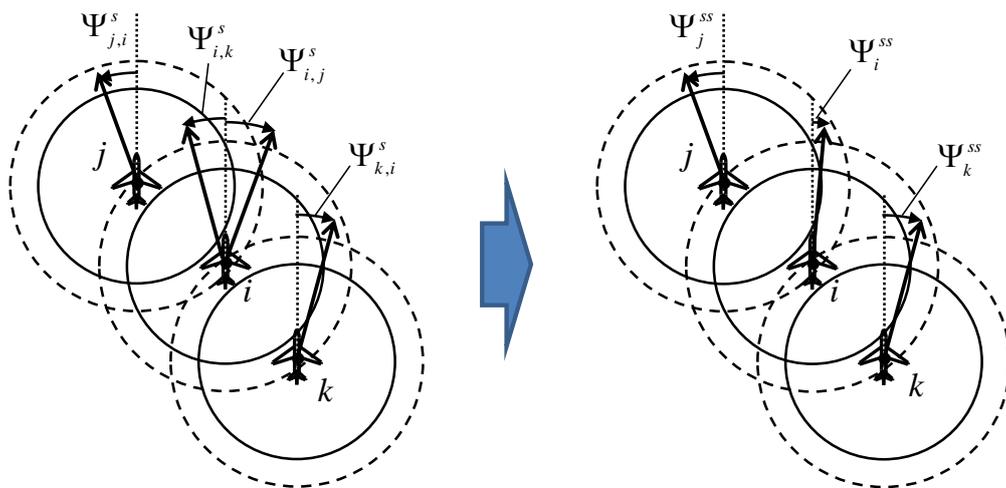


図 2-16 複数の航空機に対する方位角の与え方

#### 2.4.4 航空機の合流の数値解析

方位角の変更による間隔維持を行う航空機の運動の様子を調べるため、航空機が最適経路上を一定速度  $V_0$  で巡航している交通流に、1 機のみ合流する数値解析を行う。この数値解析を通して航空機の合流という擾乱が生じた場合の各航空機の挙動について調べる。ここで、図 2-17 に示すように航空機群が等間隔、等速度で最適経路上を飛行する状態を定常状態とし、このときすべての航空機がスケジュール通り飛行しているものとして扱う。本解析では、図 2-18 に示すように定常状態で飛行する航空機群に 1 機のみ合流するシナリオを想定する。ここですべての航空機が定常状態へと収束するために、スケジュールからの

ずれに応じて加速度を与えることとし、航空機  $i$  の目標速度を  $V_i^{sc}$  として以下の式により設定する。

$$V_i^{sc} = V_o + C_{sc} d_i^{sc} \quad (2-28)$$

ここで、 $d_i^{sc}$  はスケジュールからのずれを表し、 $C_{sc}$  はスケジュールへ戻るための速度の大きさを設定するパラメータである。これを用いて航空機の加速度を以下の式により与える。

$$a_i = C_a (V_i^{sc} - V_i) \quad (2-29)$$

航空機は各々のスケジュールに合わせて加減速を行い、接近する航空機に対しては旋回による間隔維持を行いつつ、定常状態へと収束する。本解析においては数値解析のパラメータを表 2-1 に示すように独自に設定して利用する。なお、数値解析は 20 機で行ったが、挙動に変化がみられる 5 機に限定して結果を示す。

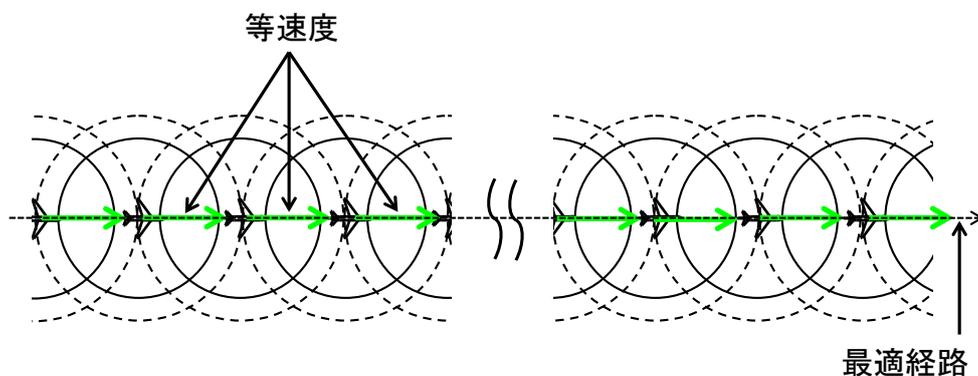


図 2-17 定常状態

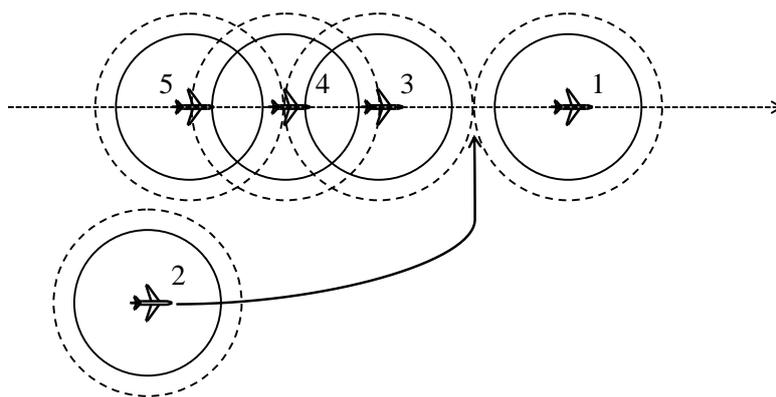


図 2-18 航空機の合流

表 2-1 数値解析パラメータ

構成機数	20	$C_a$	$5.0 \times 10^{-3}$
加速度域, $m^2/s$	-0.2~0.2	$C_{sc}, 1/s$	$1.0 \times 10^{-3}$
巡航速度, $m/s$	240	$C_h$	1.0
$R_{MS}, NM$	10	$C_s$	$1.0 \times 10^{-3}$
$R_{SC}, NM$	10.5	$C_r, rad/m$	$1.0 \times 10^{-6}$

#### 2.4.5 数値解析結果

解析結果として、各航空機の位置の変化を図 2-19 に示す。構築した自律間隔維持アルゴリズムにおいては、接近した航空機が互いに回避操作を行う。巡航中の航空機および合流機が互いに反対方向へ方位の変更を行うことにより、互いの間隔を基準間隔以上に保つこととなる。本解析は 20 機の航空機群から形成される交通流へ 1 機のみが合流するシナリオに対して行ったが、合流機による擾乱は後方へ拡大することではなく、5 機のみが回避操作を行い、後方を等速度で飛行する航空機群への影響は見られなかった。本解析における方位角の変更は最大で 0.04 rad 程度であり、このとき巡航速度として仮定した 240 m/s で巡航中の航空機の  $x$  軸方向の速度は 239.8 m/s である。すなわち、速度減少を 0.2 m/s に抑えつつ間隔を維持することとなる。以上より、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前後の航空機への影響が小さく、飛行距離の延伸や速度の変更に伴う効率の低下を最小限に抑えつつ間隔の維持が可能であることを示した。

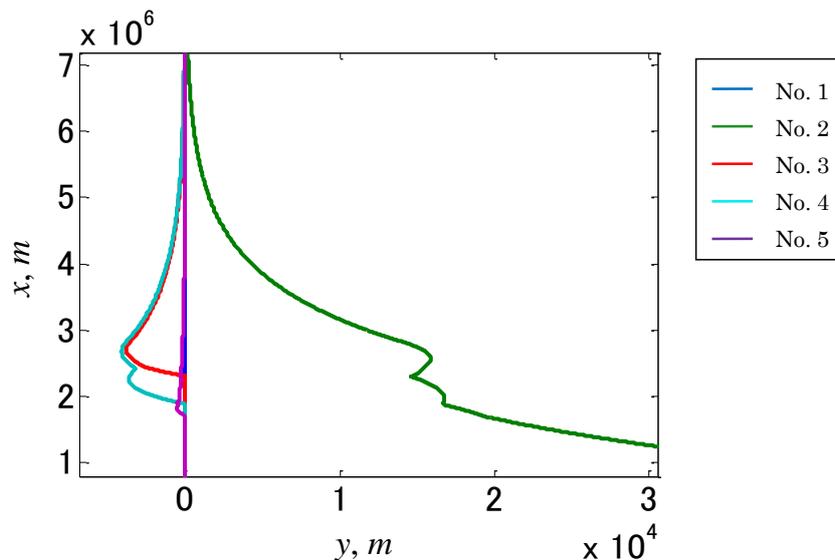


図 2-19 合流時の航跡

## 2.5 まとめ

本章において，最小限の位置情報のみを利用し，方位角の変更による間隔維持アルゴリズムを構築した．自動車交通のように前方のみ監視，加減速による間隔制御を行うとき，前方車両との間隔を広げるための減速により，後方車両との間隔が接近する．その結果，安定な交通流においてもすべての車両が間隔維持のための加減速を行うこととなる．これに対して，横方向への運動による間隔維持を行う場合，微小な擾乱に対しては交通流としての振る舞いが見られないことを示した．方位角を変更することによる前後方向への影響はわずかであるため，方位角を変更して横方向へ移動することにより，他の航空機への影響を最小限に抑えつつ間隔の維持が可能となる．また，構築した旋回による間隔維持のアルゴリズムを適用した簡易な合流の数値解析により航空機の挙動を確認した．後方への影響がないことは，交通流全体の効率の低下を最小限に抑えることとなるため，航空交通流においては旋回による間隔維持が有効であるといえる．

### 3 経済的な運航のための経路構造

#### 3.1 経済的な航空交通流

前章において、最小限の位置情報のみを利用し、互いの間隔に基づき方位角を変更することにより間隔維持を行う航空機の挙動について解析を行った。このとき、同一経路上を等速度で飛行する基本的な航空交通流を対象としたが、実運航においてはより経済的な運航を行うことが求められる。燃料効率の良い運航を考えると、一般に航空機は高高度を飛行するほど燃費が良く、またその日の気象条件に基づく消費燃料を最小化する経済的に最適な経路<sup>34)</sup>を飛行することが望ましい。このとき、フローコリドの対象となる同一の方向へと向かう航空機の最適な経路、高度はほぼ同一となることが予想される。一方で、航空機の型式や重量により燃料効率が最も良い経済速度は航空機ごとに異なるため、すべての航空機が各々の経済速度で飛行することが望ましいといえる。以上より、経済的な運航には同一の経路かつ同一の高度を異なる速度の航空機が飛行することが想定される。

そこで、自律間隔維持を行う航空機が各々異なる速度で飛行する交通流の振る舞いを数値解析により評価する。このとき、図 3-1 に示すように、高速の航空機は低速の航空機を追い越しつつ、複数の航空機が並行して飛行することとなり、完全に同一の経路を飛行することはできない。そのため、各航空機の飛行経路に対する考え方により交通流の振る舞いは大きく変化するものと考えられる。そこで、複数の経路モデルを構築し、各モデルに基づく交通流の変化について調べる。

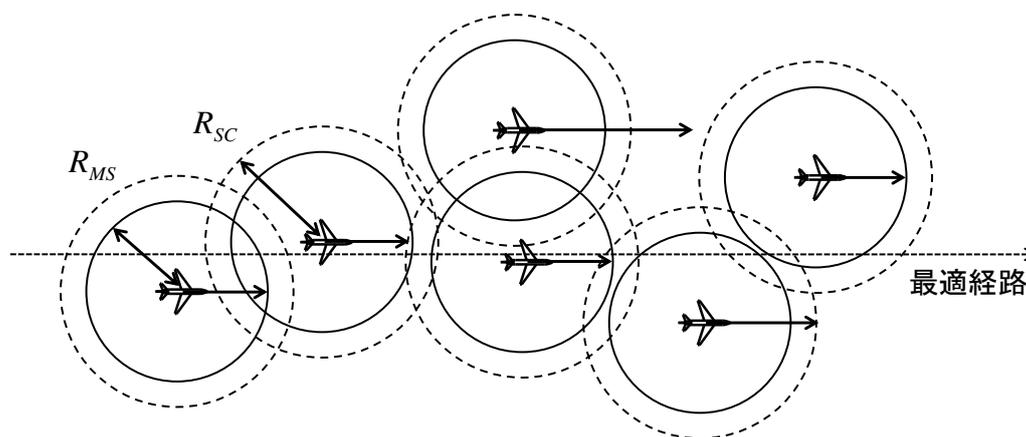


図 3-1 経済速度の異なる航空機による交通流

#### 3.2 航空機の制御モデル

航空機の運動方程式は第 2 章において述べたように 2 次元近似したものを利用する。ここで、すべての航空機の最適な経路は同一と仮定する。また、航空機は各々の経済速度で

巡航することをスケジュールとみなし、これに沿って加減速を行うものとする。航空機の間隔維持には方位の変更を用いることとする。加速度およびロール角は以下の式により与えるものとする。

$$a_i = C_a (V_i^{sc} - V_i) \quad (3-1)$$

$$V_i^{sc} = V_i^o + C_{sc} d_i^{sc} \quad (3-2)$$

$$\varphi_i = C_h (\Psi_i^r - \psi_i) \quad (3-3)$$

ここで、式(3-2)における $V^{sc}$ はスケジュール通りに飛行するための速度として定めており、回避操作による遅れを取り戻すための加速度を与えることとなる。航空機 $i$ の経済速度は $V_i^o$ と表記する。本解析では航空機の経済速度が異なることを想定しているため、スケジュールも航空機ごとに異なることとなる。航空機の方位角の変更については式(3-3)に示すように目標方位角と現在の方位角の差に比例する角度をロール角として与える。目標方位角は他機との間隔維持のための方位角 ( $\Psi^{ss}$ ) と経路へ向かうための方位角 ( $\Psi^r$ ) の和として以下の式により与える。

$$\Psi_i^r = \Psi_i^r + \Psi_i^{ss} \quad (3-4)$$

$$\Psi_i^{ss} = \sum_{j=1}^N \Psi_{i,j}^s \quad (3-5)$$

$$\Psi_{i,j}^s = \begin{cases} 0 & (d_{i,j} \geq R_{sc}) \\ S_{i,j}^{dir} C_s (R_{sc} - d_{i,j}) & (d_{i,j} < R_{sc}) \end{cases} \quad (3-6)$$

$\Psi^{ss}$ は前章にて示したものと同様に周辺航空機との間隔に基づき方位角を算出する。本章では各航空機の飛行すべき経路を変化させ、飛行経路の違いによる交通流の振る舞いの変化について調べる。そこで、経路へ向かうための方位角を表す $\Psi^r$ が異なる複数のモデルを構築する。ここで、 $\Psi^r$ の値は前章と同様に-5~5 degの範囲に限定して与えることとする。各モデルに従い飛行する航空機の振る舞いの変化について数値解析により明らかにする。

### 3.3 経路モデル

#### 3.3.1 最適経路 (モデル1)

最も基本的なモデルとして、すべての航空機が同一の経路へ向かう交通流を模擬する。図 3-2 に示すように、航空機は最適経路上へ向かって飛行することとし、航空機 $i$ の経路に対する方位角を下記のように与える。

$$\Psi_i^r = C_r (y^o - y_i) \quad (3-7)$$

ここで $y^o$ は最適経路の $y$ 座標とし、本解析では $y^o=0$ として設定する。経路に対して右側を飛行する航空機 ( $y > 0$ ) は左側へ ( $\Psi^r < 0$ )、左側の航空機 ( $y < 0$ ) は右側へ ( $\Psi^r > 0$ ) 方位角を変更し、すべての航空機は同一の経路上へ向かい飛行することとなる。

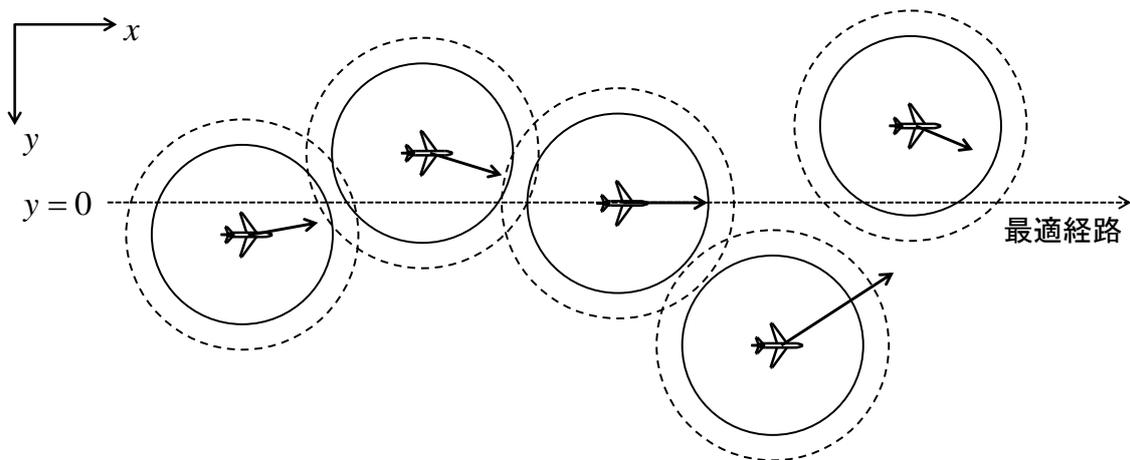


図 3-2 最適経路へ向かう航空機

### 3.3.2 帯状経路（モデル 2）

最適経路上を飛行することが望ましい一方で、安全のために所要の間隔を維持する必要があることから、異なる速度で飛行する航空機すべてが常に同一経路上を飛行することはできない。すべての航空機が同一経路に向かうことにより航空機が集中し、過剰な回避操作を行うことが懸念される。そこで、同一経路への航空機の集中を緩和することを目的とし、図 3-3 に示すように最適経路を中心とした幅を持つ帯状の経路を設定する。ここでは一例として、経路の幅を基準間隔の 3 倍として設定した。航空機  $i$  の経路に対する方位角は以下の式により与える。

$$\Psi_i^r = \begin{cases} C_r(y_{edge}^+ - y_i) & (y_i > y_{edge}^+) \\ 0 & (y_{edge}^+ \geq y_i \geq y_{edge}^-) \\ C_r(y_{edge}^- - y_i) & (y_i < y_{edge}^-) \end{cases} \quad (3-8)$$

ここで、 $y_{edge}^+$ 、 $y_{edge}^-$  は設定した帯状の範囲の上端と下端の  $y$  座標である。これにより、設定した帯状経路の外側の航空機は内部へ向かって飛行し、帯状経路の内部を飛行する航空機は直進する。

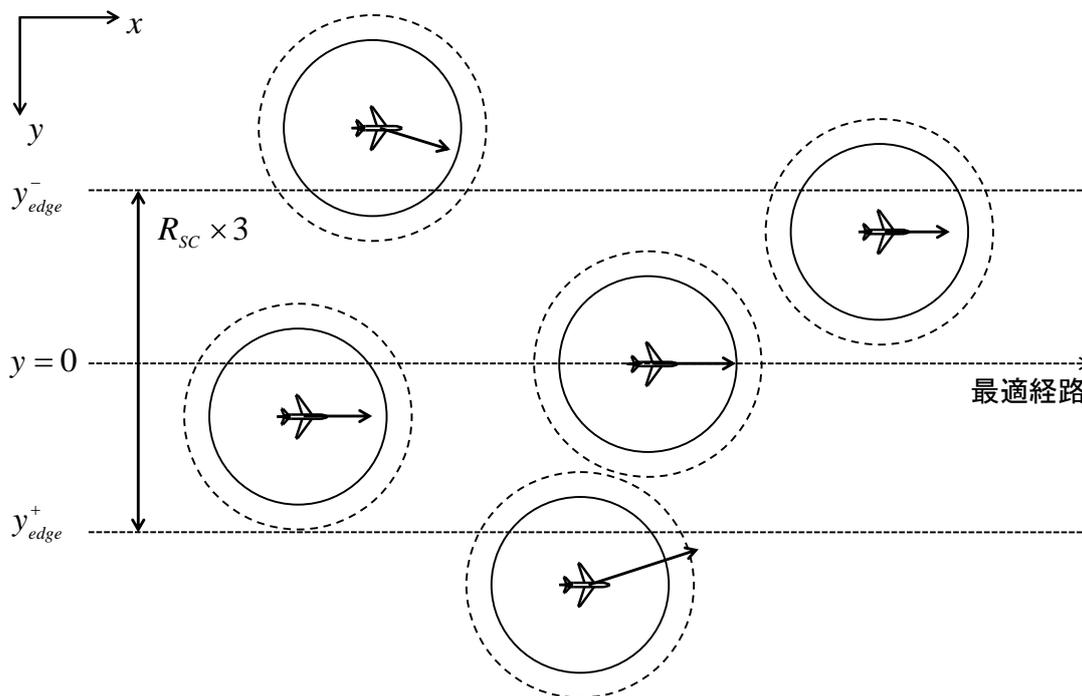


図 3-3 带状経路

### 3.3.3 相対速度基準副経路（モデル 3）

同一直線上を飛行する航空機の色にばらつきが大きい場合、速度差の大きな航空機同士が接近するため危険性が増加し、また他機の追い越しが頻繁に生じることによる操作量の増加も懸念される。同一直線上を飛行する航空機の色差が小さいほど、少ない操作量でより安全な交通流を実現できるものと考えられる。そこで、図 3-3 に示す带状経路内部に副経路を導入し、周辺の他の航空機に対する自機の相対的な速度に基づき飛行すべき副経路を動的に変化させることとした。航空機  $i$  の方位角は下記に示す式により与える。

$$\Psi_i^r = C_r (y_i^r - y_i) \quad (3-9)$$

ここで、 $y_i^r$  は航空機  $i$  の飛行すべき経路の  $y$  座標を表し、これを動的に変化させる。本解析では、一例として図 3-4 に示すように 7 本の副経路を設定し、速い航空機ほど右側の副経路を飛行することとする。飛行経路は①~⑦の 7 本より選択するものとし、周辺航空機との相対的な速度に基づきこれを動的に変化させる。飛行経路の変更の流れの一例を図 3-5 に示す。上図には、2 機の航空機 A、B が最適経路（④）へ向けて飛行する様子を示す。A が B より高速で飛行しているため、B に追いつくこととなり、互いが間隔維持のために方位の変更による回避を行う。航空機 A は B を追い越したことにより、同一直線上において自機より低速の航空機が飛行していることを認識し、同時に B は自機より高速の航空機が飛行していることを認識する。ここで、航空機 A は飛行経路を④から右の⑤へと変更する。同時に、B は③へ変更する。このように、他の航空機と回避操作を伴う追い越しが発生するとき、追い越した航空機は右側へ、追い越された航空機が左側へ経路を変更する。これを

繰り返すことにより，交通流における自機の相対的な速度が速い航空機ほど右側，遅い航空機ほど左側の副経路を飛行することとなる．結果として，帯状経路内で相対速度に基づき整列された流れが形成されることとなる．

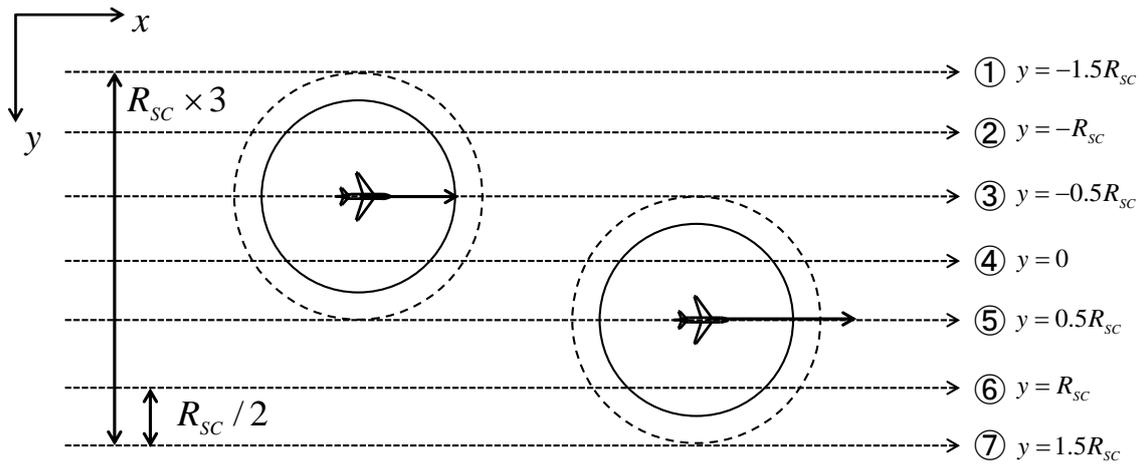


図 3-4 副経路の導入

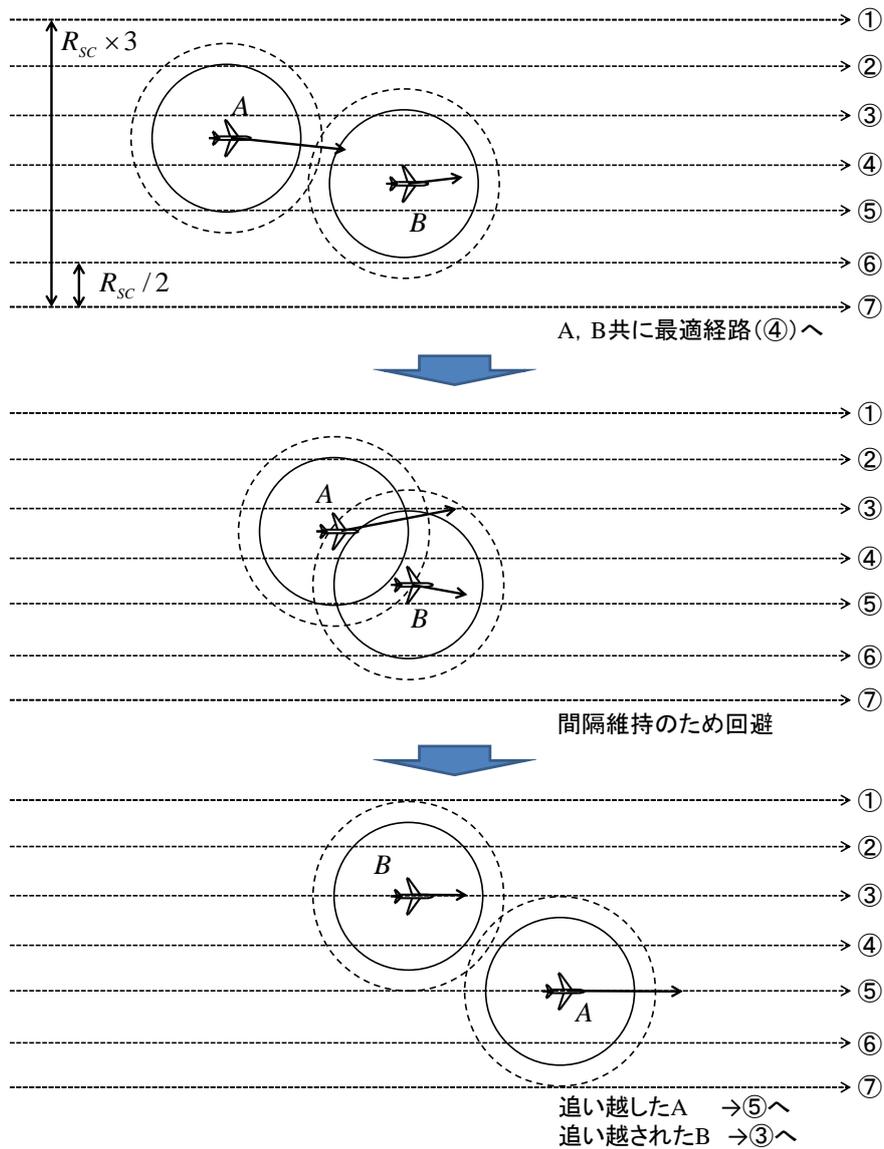


図 3-5 副経路変更の概要図

### 3.3.4 経済速度基準副経路 (モデル 4)

モデル 3 においては、飛行中の回避操作に伴い飛行経路を動的に変化させることを試みたが、航空機が各々の経済速度に適した経路上を飛行するまでに時間を要するものと考えられる。そこで、モデル 4 では、図 3-4 と同様の副経路を設定し、各航空機の経済速度に基づき飛行すべき副経路をあらかじめ定める。本解析では一例として、図 3-6 に示すように①～⑦の副経路に対して速度域を設定した。各航空機は自機の経済速度に割り当てられた経路を飛行し、航空機  $i$  に対する経路へ向かう方位角は以下のように定める。

$$\Psi_i^r = C_r (y_i^{or} - y_i) \quad (3-10)$$

$$y_i^{or} = \begin{cases} -1.5R_{sc} & (220 \leq V_i^o < 224[m/s]) \\ -R_{sc} & (224 \leq V_i^o < 226[m/s]) \\ -0.5R_{sc} & (226 \leq V_i^o < 228[m/s]) \\ 0 & (228 \leq V_i^o < 232[m/s]) \\ 0.5R_{sc} & (232 \leq V_i^o < 234[m/s]) \\ R_{sc} & (234 \leq V_i^o < 236[m/s]) \\ 1.5R_{sc} & (236 \leq V_i^o < 240[m/s]) \end{cases} \quad (3-11)$$

ここで、 $y_i^{or}$  は航空機  $i$  の経済速度に基づき決定される副経路の  $y$  座標を表す。モデル 4 においては、経済速度により定められた航空機ごとに異なる経路を目標経路とし、他機との間隔を維持しつつ目標経路へと向かって飛行することとなる。

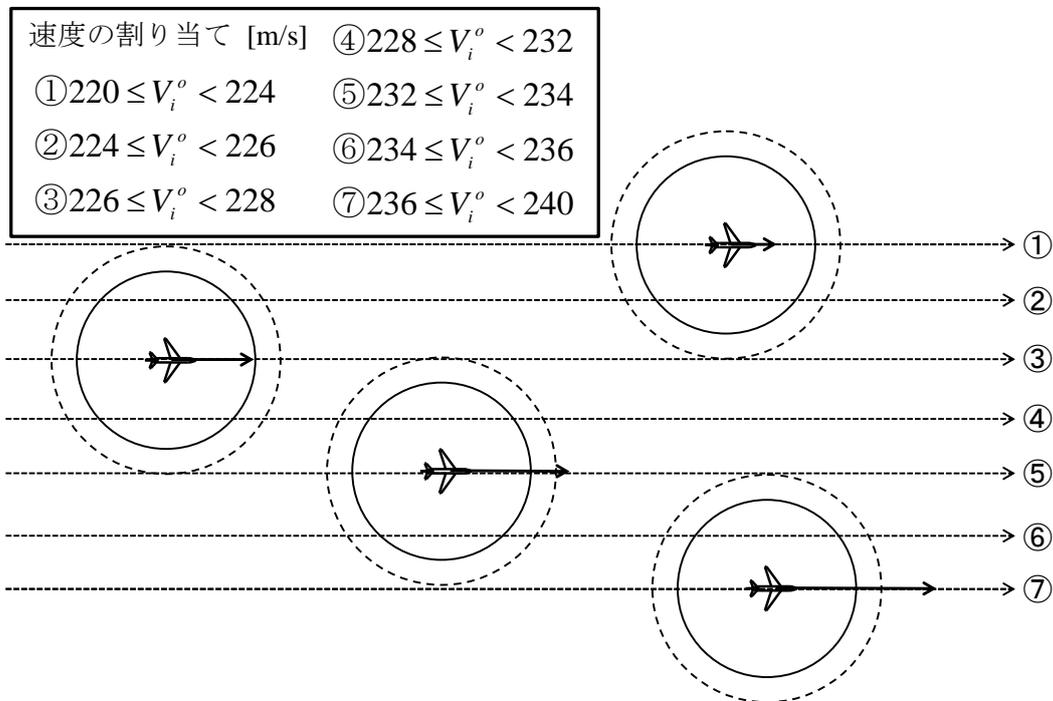


図 3-6 経済速度に応じた副経路

### 3.4 数値解析

#### 3.4.1 数値解析条件

本解析において利用した数値解析パラメータを表 3-1 に示す。航空機の初期位置として、 $x$  方向には等間隔、 $y$  方向には設定した帯状経路内部の無作為な位置を与える。また、各航空機の経済速度は  $220 \sim 240$  m/s の範囲で無作為に与え、最高(最低)速度は経済速度+10(-10) m/s とする。初期状態の一例を図 3-7 に示す。ここで、円の直径は安全間隔を表し、矢印の長さは各航空機の経済速度の大きさ、矢印の向きは航空機の進行方向を表している。それらの凡例を同図中に示す。この状態から、各航空機は経済速度で飛行するものとする。3.3.1 ~ 3.3.4 で示した 4 種類の異なる経路モデルに対して数値解析を行う。交通流の振る舞いを

明らかにするためには、十分長い時間にわたる航空機の挙動を解析する必要がある。そこで本解析では周期境界条件を利用し、無限長の交通流を模擬した。すなわち、図 3-7 に示す帯状経路の右端と左端はつながっており、右端の航空機の前方には左端の航空機が飛行しており、互いに監視していることとなる。初期状態により結果が異なるため、50 通りの異なる初期状態より数値解析を行い、経路モデルごとに 50 通りの交通流を評価した。

表 3-1 数値解析パラメータ

構成機数	20	$C_a$	$5.0 \times 10^{-3}$
加速度域, $m^2/s$	-0.2~0.2	$C_{sc}, 1/s$	$1.0 \times 10^{-3}$
経済速度域, $m/s$	220~240	$C_h$	1.0
$R_{MS}, NM$	10	$C_s$	$1.0 \times 10^{-3}$
$R_{SC}, NM$	10.5	$C_r, rad/m$	$1.0 \times 10^{-6}$

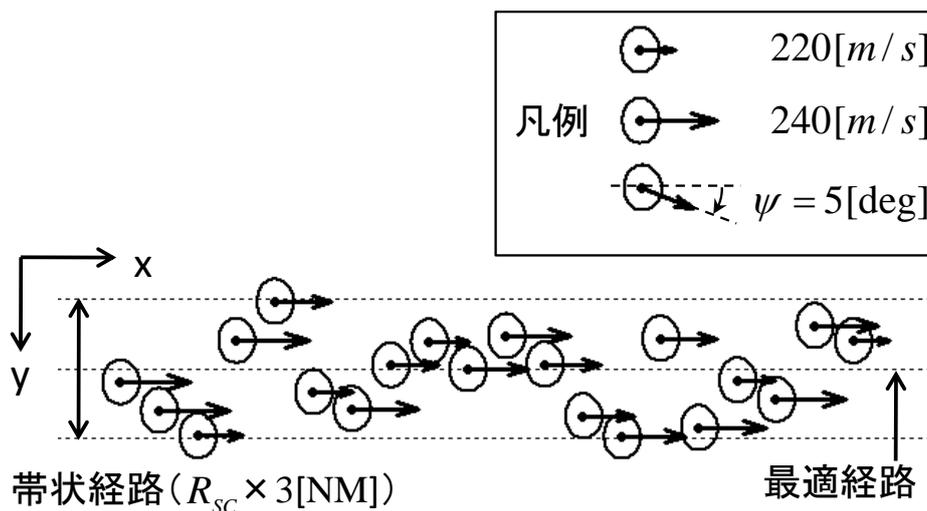


図 3-7 初期状態例

### 3.4.2 評価指標

航空交通流の安全性、及び航空機の操作量について評価を行った。安全性の観点より、すべての航空機は常に安全間隔を確保し、コンフリクトは未然に防がなければならない。そこで、交通流全体のコンフリクトについて調べる。一般に航空機の距離が近づくほど、接近時間が長いほど衝突の危険性は高いと考えられ、またコンフリクトの頻度が高いほど危険性は高いと考えられる。解析時間にわたる交通流全体のコンフリクトの発生について評価するため、式(3-12)により安全間隔を下回り接近した距離を求め、それを式(3-13)に示すように数値解析時間にわたり積分し、危険性の程度について評価した。

$$d_{i,j}^{MS} = \begin{cases} R_{MS} - d_{i,j} & (d_{i,j} < R_{MS}) \\ 0 & (d_{i,j} \geq R_{MS}) \end{cases} \quad (3-12)$$

$$E_{MS} = \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{MS} dt \quad (i < j) \quad (3-13)$$

コンフリクトは発生してはならないため、評価値を 0 にすることが重要である。また、コンフリクトが発生した場合においても、評価値が高いほど交通流全体の危険性が高いものとして評価した。

また、航空機の操作量はより少ないことが望ましいと考えられるため、方位角の変化を操作量とみなし、数値解析時間にわたり積分した値を各航空機の操作量として定め、これを式(3-14)により表す。そして、式(3-15)に示すように、操作量の合計値を評価値とした

$$h_i^c = \int |\dot{\psi}_i| dt \quad (3-14)$$

$$E_h = \sum_i h_i^c \quad (3-15)$$

### 3.4.3 各経路モデルにおける航空機の振る舞い

解析結果の一例として、図 3-7 に示す初期状態から、各モデルに従いそれぞれ 2700, 8100, 16200, 22100 秒間飛行した後の航空機の状態を示す。まず、モデル 1 における航空機の振る舞いを図 3-8 に示す。このモデルにおいては、すべての航空機が中央の最適経路へ向かって飛行するため、多くの航空機が中央付近に集中することとなる。各航空機は接近する航空機に対して回避操作を行いつつ中央の最適経路へ向かうこととなるが、すぐに別の航空機と接近し、再度回避操作を行う。このように、すべての航空機が操作を頻繁に行いつつ飛行することとなった。

モデル 2 における航空機の振る舞いを図 3-9 に示す。带状経路として幅を持たせ、範囲内の航空機は中央の最適経路へと向かうことなく直進する。その結果、モデル 1 と比較して航空機の最適経路近傍の集中は緩和される。しかし、同一直線上を飛行する航空機の間には速度のばらつきがあるため、他の航空機の追い越しが頻繁に生じる。

モデル 3 における航空機の振る舞いを図 3-10 に示す。飛行開始からある程度飛行した状態 ( $t=2700, 8100$  s) と比較して、その後しばらく飛行を続けた状態 ( $t=16200, 22100$  s) では高速(低速)で飛行する航空機ほど進行方向に向かって右(左)側を飛行している様子が示される。周囲の航空機に対する自機の相対的な速度を利用した副経路を設定し、速度に応じた経路を飛行することにより、追い越しの発生回数を低減した。

モデル 4 における航空機の振る舞いを図 3-11 に示す。こちらのモデルにおいても、飛行開始からある程度飛行した状態 ( $t=2700$  s) と比較して、その後しばらく飛行を続けた状態 ( $t=8100, 16200, 22100$  s) では高速(低速)で飛行する航空機ほど進行方向に向かって右(左)側を飛行している様子が示される。モデル 4 では、 $t=8100$  s の段階ですでに多くの航空機が経済速度に応じた経路を飛行している点がモデル 3 との相違点である。あらかじめ飛行経路が固定されているため、モデル 3 と比較して素早く自機の速度に応じた飛行経路を飛行することが可能である。

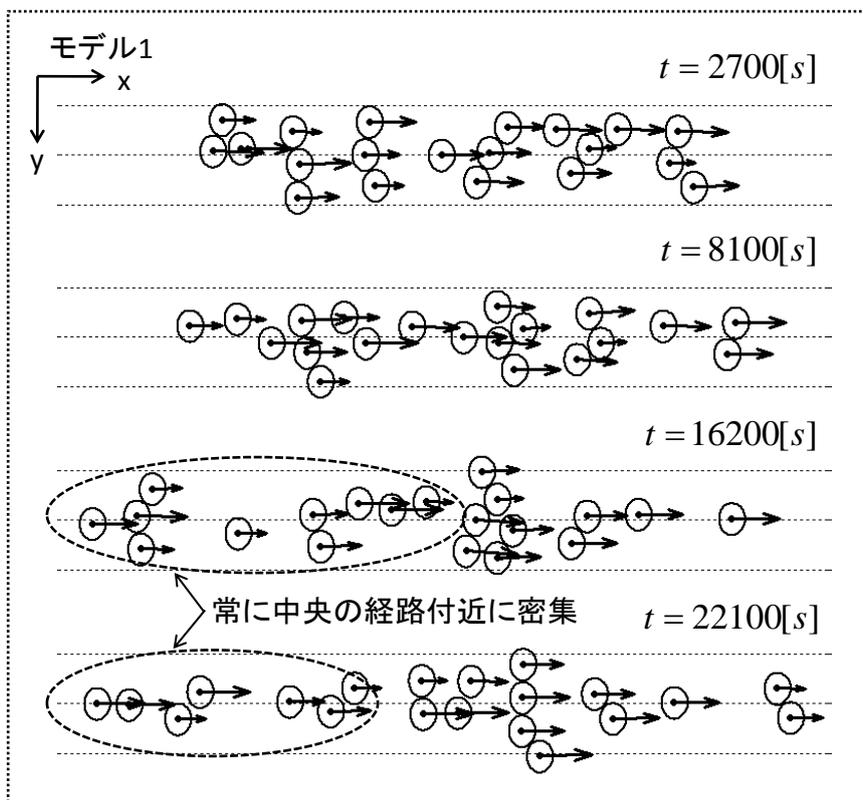


図 3-8 航空機の振る舞い (モデル 1)

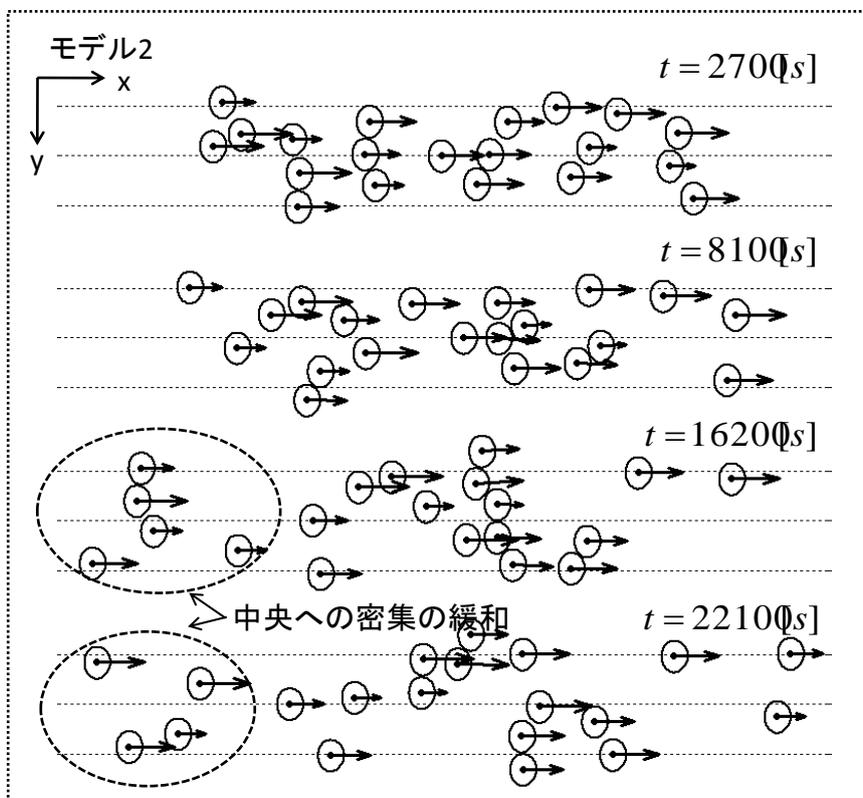


図 3-9 航空機の振る舞い (モデル 2)

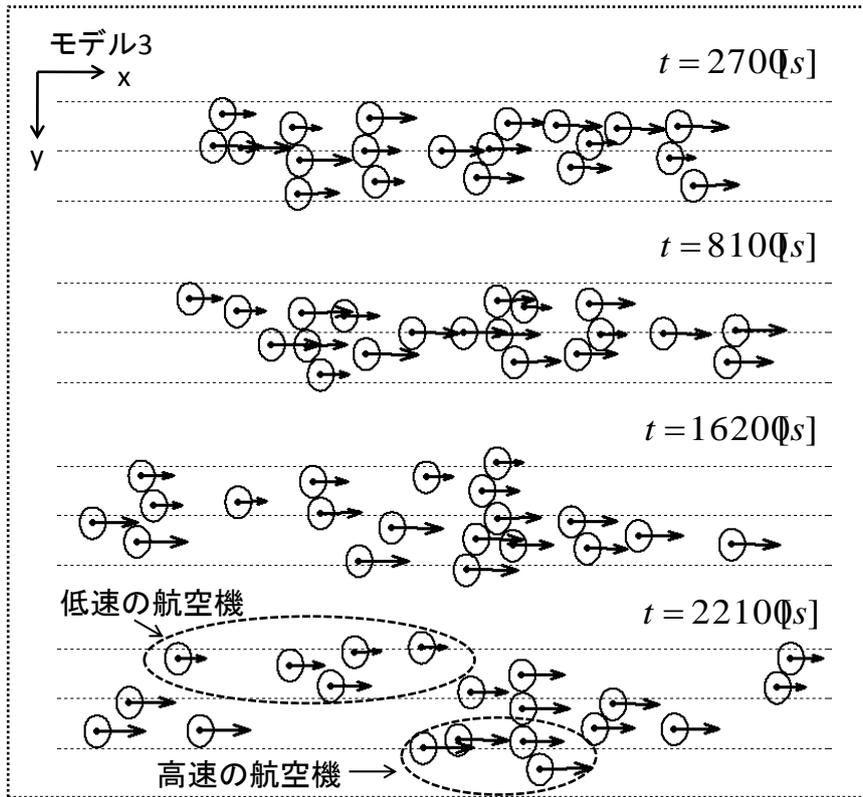


図 3-10 航空機の振る舞い (モデル 3)

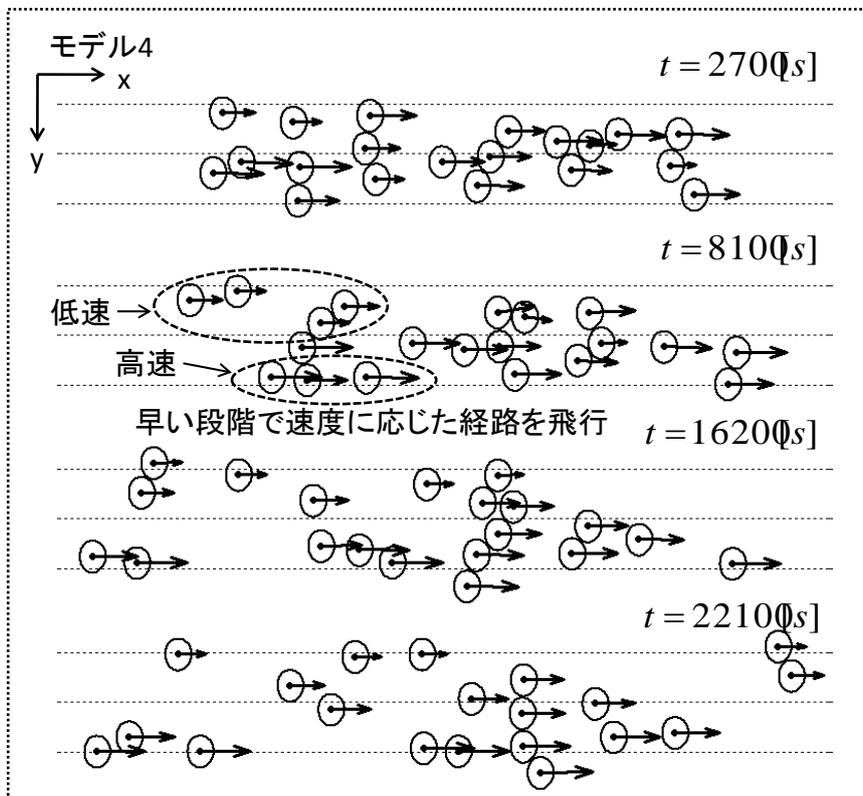


図 3-11 航空機の振る舞い (モデル 4)

#### 3.4.4 評価結果

3.4.2 に示す評価指標に従い、交通流を評価した結果について述べる。本解析では 4 種類の各経路モデルに対して、50 通りの異なる初期値より 30 時間の航空機の挙動について計算を行った。まず、評価値の時間に対する変化の一例として、評価値  $E_p$  の 1 機 1 時間あたりの平均値について、計算時間に対する変化を図 3-12 に示す。モデル 1 が最も収束が速く、モデル 2、モデル 4、モデル 3 の順に収束に要する時間が延びることが示される。本解析では 30 時間である程度収束しているとみなし、30 時間分の計算結果に対する統計値の比較を行った。

30 時間分の数値解析結果に対して、各モデルの交通流における評価値の平均値を表 3-2 に示す。すべての航空機が中央の最適経路へ向かうモデル 1 では、航空機が集中することにより回避操作が制限されることとなり、コンフリクトが発生することが示された。これに対して、モデル 2 では帯状の幅を持たせた経路を設定することにより安全性及び操作量の評価値を低減した。モデル 3 では、自機の周囲の航空機に対する相対的な速度を利用し、その速度に応じた副経路を飛行する。各航空機は複数回の接近および回避を行った後に各々の速度に応じた副経路を飛行するようになる。このため、回避のための操作を継続的に行う必要のあるモデル 1 およびモデル 2 と比較して操作量を低減することが可能である。さらに、モデル 4 ではあらかじめ自機の経済速度に応じた副経路を固定しているため、素早く速度に応じた副経路へ向かう。そのためモデル 3 のような動的な飛行経路の変更に伴う操作も必要なく、操作量をさらに低減した。

一方、モデル 3 及び 4 では安全性の評価値の増加が示された。本来互いに反対方向へ方位角を変更して間隔を広げるべき航空機が同一方向へ方位角を変更してしまい、コンフリクトが発生するケースが頻繁にみられた。接近した 2 機の航空機の回避方向が同一となるケースの一例を図 3-13 に示す。図に示す例では、前方を飛行する低速の航空機が左方向へ、後方の高速で飛行する航空機が右方向の経路へ向かって飛行する状況を示している。第 2 章において示したように、本解析においては目標経路へと向かう方位角を基準に回避の左右を定めている。図に示す状況においては、高速の航空機は低速で飛行する航空機の目標経路方向に対して左側の斜線で表す領域に存在することから、低速機は間隔維持のために右へ方位角を変更する。一方高速の航空機からみた場合、低速の航空機は左側に存在するため、高速機も右へと方位角を変更することとなる。このようにして同一の方向へ方位角を変更することとなり、これらの航空機の間隔は安全間隔を大きく下回ることとなる。このように、目標経路の異なる航空機間のコンフリクトの発生により、モデル 3 及び 4 では評価値  $E_{MS}$  が増加する結果となった。本解析においては、すべてのモデルでコンフリクトの発生が確認されたが、コンフリクトは発生してはならないものであり、これを未然に防ぐためにアルゴリズムの改善が必要である。

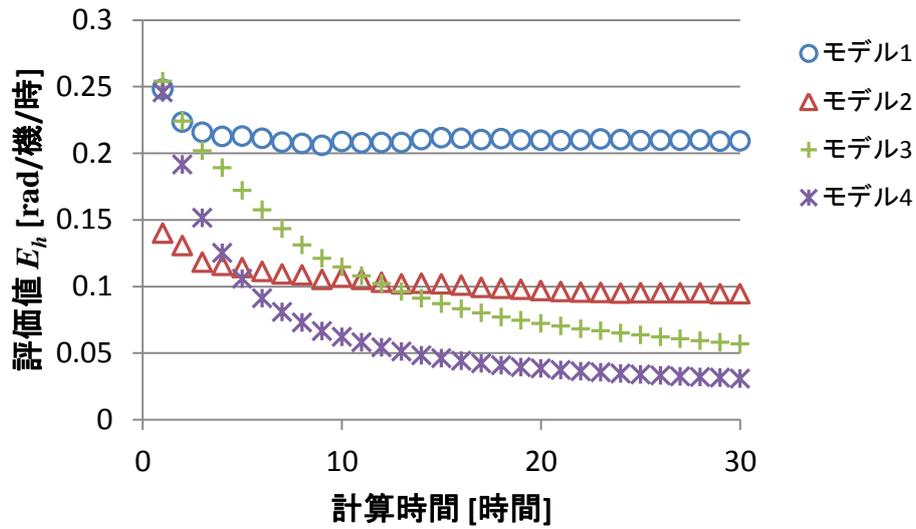


図 3-12 評価値  $E_h$  の計算時間に対する変化

表 3-2 経路モデルごとの評価結果

	モデル 1	モデル 2	モデル 3	モデル 4
$E_{MS}, 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}$	0.16	0.10	0.99	0.83
$E_h, \text{ rad}$	125.56	56.70	34.09	18.51

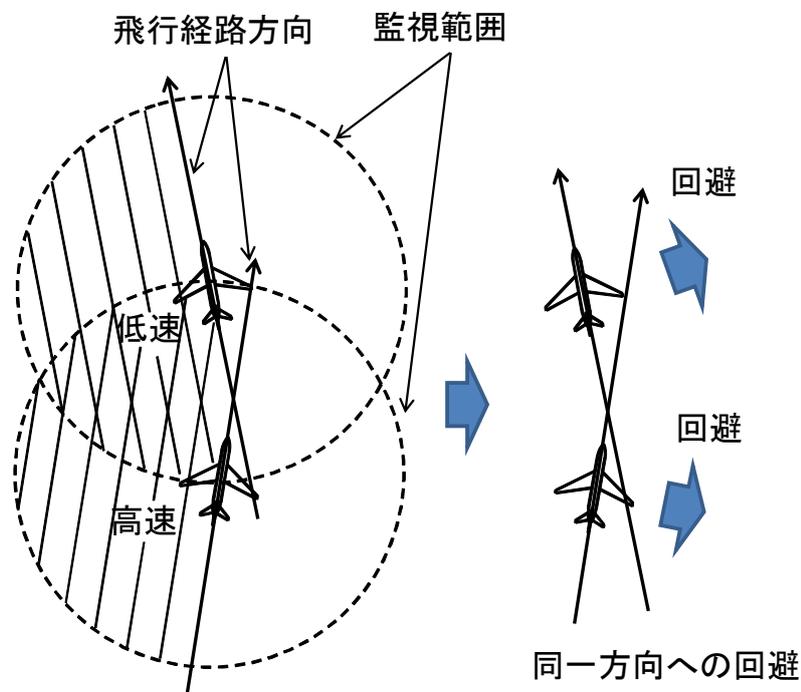


図 3-13 回避方向の重複

### 3.5 経路情報の利用による安全性改善の検討

#### 3.5.1 経路情報を利用した制御モデル

各航空機が飛行速度に基づく経路を飛行することにより，操作量の低減効果はみられたものの，安全性の著しい低下が示された．コンフリクトは未然に防がなければならないため，経路モデル 3，4 の問題点の改善策の一例として，航空機の目標飛行経路情報を用いることを検討する．これまで位置情報のみを利用した判断を行ってきたが，各航空機の目標飛行経路情報を新たに判断基準に加えることにより，状況の改善を試みる．本解析において目標飛行経路方向へ向かう方位角を最大 5 deg と定めているが，このとき 2 機の航空機  $i$ ， $j$  の位置関係が下記の式に示す範囲にあるとき回避方向が同一と成り得る．

$$|y_i - y_j| \leq \tan\left(\frac{5\pi}{180}\right) |x_i - x_j| \quad (3-16)$$

上式の示す範囲を図示すると，図 3-14 左図の斜線の示す範囲となる．各航空機はモデル 3 では相対速度，モデル 4 では経済速度に基づき決定される経路へ向かって飛行し，本解析では速い航空機ほど右側へ向かうこととした．そのため，図 3-13 に示すように，式(3-16)に示す範囲内の航空機と接近し，航空機の目標経路が異なるとき，回避方向が同一となることが予想される．そこで，こうした回避方向が同一となりうる範囲内の航空機に対しては，図 3-14 右図に示すように互いの目標経路を比較し，目標飛行経路がより右（左）の航空機が右（左）へ回避することとする．この方向修正を加えてこれまでと同様の数値解析を行い，解析結果の比較を行う．

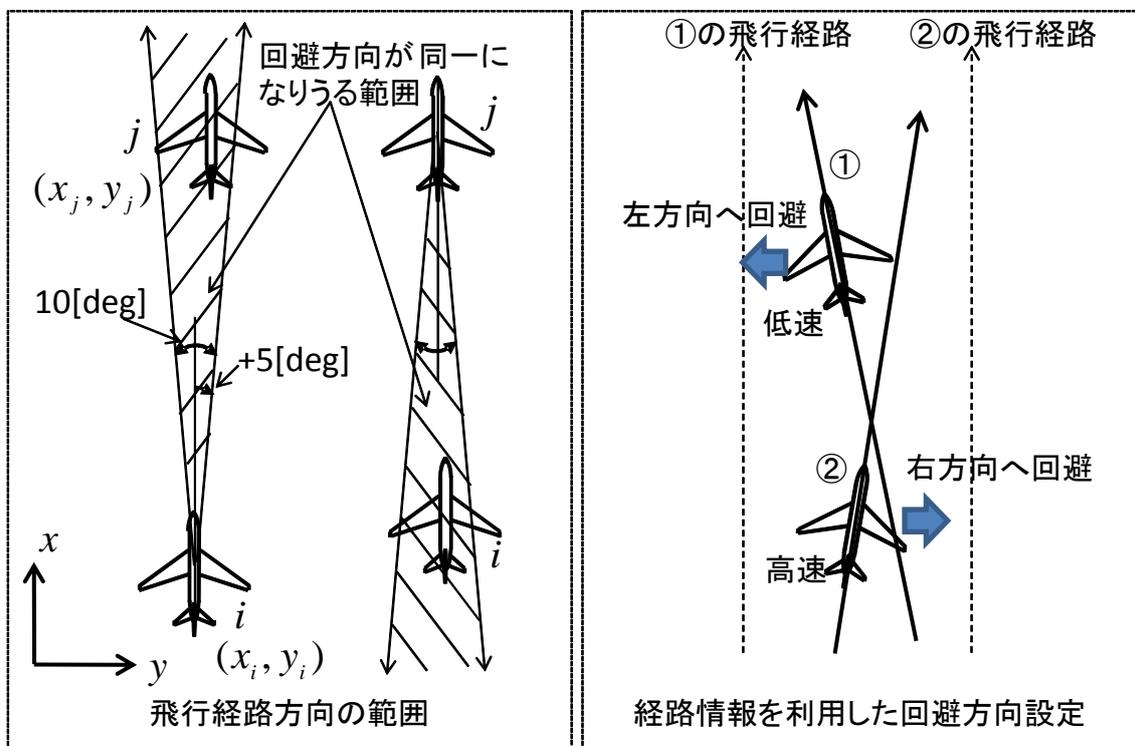


図 3-14 経路情報を利用する範囲および回避方向

### 3.5.2 数値解析結果

まず、経路情報の利用による航空機の挙動の変化の一例を図 3-15 に示す。図に示すように、経路情報無しの場合、前後方向で接近した航空機が同一方向へ回避することにより、コンフリクトが発生する。経路情報の利用により、このような同一方向への回避を防ぎ、互いが反対方向へ飛行することとなり、コンフリクトを防ぐことが可能となる。

評価指標に従い計算した結果を表 3-3 に示す。ここで、経路情報による方向の修正を行ったモデル 3 およびモデル 4 をそれぞれモデル 3'、モデル 4' と表記する。表 3-2 の結果と比較して、モデル 3' およびモデル 4' の安全性の評価値を大きく低減した。飛行速度に基づく副経路を飛行し、同一直線上の航空機との速度差を低減したことにより操作量は低減され、安全性を向上させることができるものと考えられる。そして、モデル 4' において最も少ない操作量でコンフリクトのない交通流を実現した。一方で、モデル 3' においてはコンフリクトの評価値が未だにモデル 2 と比較して大きい。ここで、コンフリクトの評価値の計算時間に対する変化を図 3-16 に示す。モデル 1 およびモデル 2 では、計算時間の増加に伴いコンフリクトの評価値が増加している様子が示される。一方で、モデル 3' においては、初期状態より 5 時間以内にコンフリクトの発生がみられるものの、それ以降はコンフリクトが発生していないことが読み取れる。モデル 3' においては、他機との間隔維持操作に伴い目標経路を動的に変更させ、高速の航空機は右側、低速の航空機は左側の経路へと移ることとなる。そのため、無作為に航空機を配置した交通流の初期の段階においては、右側へと飛行する高速機と左側へ飛行する低速機が接近することとなり、速度差の大きさに加え、互いが異なる方向へ向かうことが危険性を増加させる要因となる。その結果、同一の経路へと向かうモデル 2 と比較し、モデル 3' の初期段階ではコンフリクトの評価値が増加したと考えられる。

モデル 3' において、計算開始後から 5 時間以上経過した後にコンフリクトが発生していないこと、モデル 4' においてもコンフリクトが発生していないことから、同一直線上の航空機との速度差を低減することにより操作量だけでなく、安全性を向上することが可能であるといえる。一方で、異なる経路へと向かう航空機の接近は危険性を高める要因となりうるため、モデル 4' においてあらかじめ航空機の飛行経路を設定したように、速度差の大きな航空機間の接近を避けつつ速度に応じた交通流を形成することが重要である。

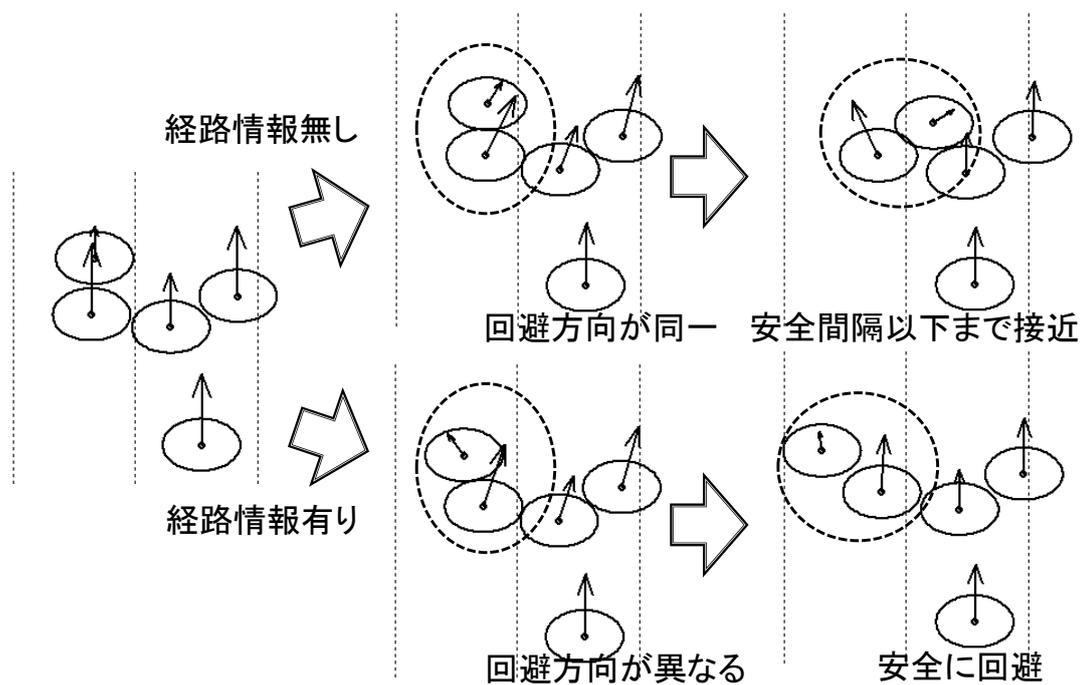


図 3-15 経路情報による航空機の振る舞いの変化

表 3-3 数値解析結果 (経路情報利用)

	モデル 1	モデル 2	モデル 3'	モデル 4'
$E_{MS}, 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}$	0.16	0.10	0.15	発生せず
$E_h, \text{ rad}$	125.56	56.70	33.31	17.36

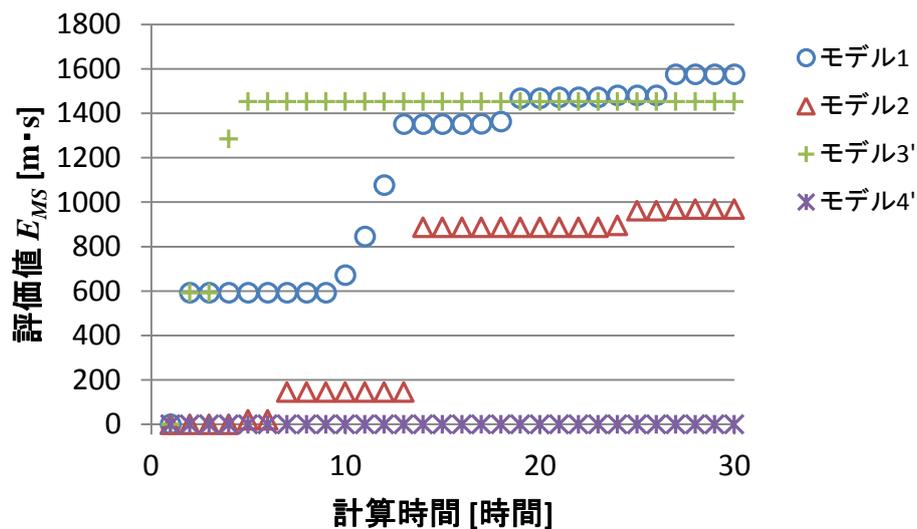


図 3-16 評価値  $E_{MS}$  の計算時間に対する変化

### 3.6 まとめ

最小限の位置情報のみを利用し、経済速度の異なる航空機が飛行する一方向航空交通流における自律間隔維持モデルについて検討した。経路モデルとして、すべての航空機の飛行経路を最適経路とするモデル 1、最適経路を中心として幅を持たせた帯状経路を設定したモデル 2、相対速度に応じた副経路を設定したモデル 3、経済速度に応じた副経路を設定したモデル 4 の 4 つのモデルについて数値解析を行い、航空交通流の振る舞いの差異を明らかにした。モデル 1 においてはすべての航空機が最適経路上へ向かうため、頻繁に回避操作を行うことが必要となり、操作量の増加に加えて安全性の低下が示された。モデル 2 ではある程度の幅を持つ経路を設けることにより安全性を向上させたが、頻繁に追い越しを行うことが要求される。モデル 3 では帯状経路内に副経路を設け、周囲の航空機に対する自機の相対速度により飛行する副経路を変更した。モデル 4 では各航空機の経済速度に基づきあらかじめ副経路を設定した。モデル 3 および 4 はともに同一経路上を飛行する航空機の色度差を低減させることを目的としており、航空機ごとに目標経路が異なる。このような交通流において、位置のみに基づく左右の判断により適切な間隔維持ができないことを示し、解決方法の一例として新たに経路情報を活用することにより適切に回避方向を定めることが可能であることを示した。また、同一経路を飛行する航空機の色度差を低減させることにより追い越しの発生回数を減らし、操作量を大幅に低減可能であることを示した。以上の結果から、速度のばらつきのある交通流に対しては、航空機がその飛行速度に基づく経路を飛行することが有効であることを明らかにした。

一方で、本解析で示すモデル 4 においては、フローコリドーを利用する航空機の色度速度の分布をあらかじめ正確に把握していなければ、適切な副経路を設定することはできない。モデル 3 では経済速度の分布が不明確な場合であっても、各航空機は相対速度に基づき飛行すべき副経路を判断することが可能である。しかし、経済速度に応じた交通流を形成するまでの過程において危険性が高まることが示された。これらを踏まえ、周辺の状況に応じて、各航空機が安全性を損なうことなく経済速度に応じた経路を飛行することのできる間隔維持手法を明らかにする必要がある。

## 4 航空機の挙動の変化が航空交通流へ与える影響

### 4.1 航空機の挙動のパラメータ

前章においては経済速度の異なる航空機が飛行する航空交通流を対象とし、飛行する経路の差異による航空交通流の振る舞いの変化について調べた。このとき、航空機の方位角は周辺航空機や目標経路との位置関係に基づき定め、すべての航空機が同一の基準に基づき操作を行うものとして数値解析を行った。一方で、接近距離に対して変更すべき方位角の大きさや、目標とする方位角へ追従する速さにより航空交通流の振る舞いは変化することが予想される。さらに、自動車交通においては、前方の車両との間隔が接近したら減速する、前方に車両が存在しなければ好きな速度で走行する、といった共通のルールは存在するもの、加減速を開始する距離や、その加速度などはドライバーごとに異なる。航空交通流においても、方位角の操作により間隔を維持することや、回避すべき方向など最低限のルールのみを設定し、その他を完全に自律性に任せることも選択肢の一つとして考えられる。このような交通流においては、航空機ごとに回避操作の挙動に差異が生じることとなる。そこで本章においては、航空機の間隔維持のための操作に関するパラメータの変化が与える影響について調べる。第3章にて示した副経路を導入したモデルを対象とし、航空機の挙動に関して異なるパラメータを適用した解析を行い、その挙動の変化を観察する。

### 4.2 航空機の制御モデルおよびパラメータ

本解析では前章において示した経済速度基準副経路を導入した交通流を対象とし、図4-1に示すように経路を設定した。また、航空機は各々の経済速度で飛行するものとする。航空機のロール角は下記に示す式により与える。

$$\varphi_i = \alpha(\Psi_i^r - \psi_i) \quad (4-1)$$

$$\Psi_i^r = \Psi_i^r + \Psi_i^{ss} \quad (4-2)$$

$$\Psi_i^r = \beta_r(y_i^r - y_i) \quad (4-3)$$

$$\Psi_i^{ss} = \sum_{j=1}^N \Psi_{i,j}^s \quad (4-4)$$

$$\Psi_{i,j}^s = \begin{cases} 0 & (d_{i,j} > R_{sc}) \\ \beta_a(R_{sc} - d_{i,j}) & (d_{i,j} < R_{sc} \text{ and } y_i > y_j) \\ -\beta_a(R_{sc} - d_{i,j}) & (d_{i,j} < R_{sc} \text{ and } y_i < y_j) \end{cases} \quad (4-5)$$

ここで、 $y^r$  は航空機の目標経路を表し、図4-1に示すように各航空機にその経済速度に応じて割り当てられた経路のy座標とする。 $\alpha$  は目標方位角への追従性に関するパラメータであり、 $\beta_r, \beta_a$  はそれぞれ目標経路、接近した航空機に対する回避に対するパラメータである。本章では、各パラメータの値を変化させたときの交通流の振る舞いの変化を調べる。

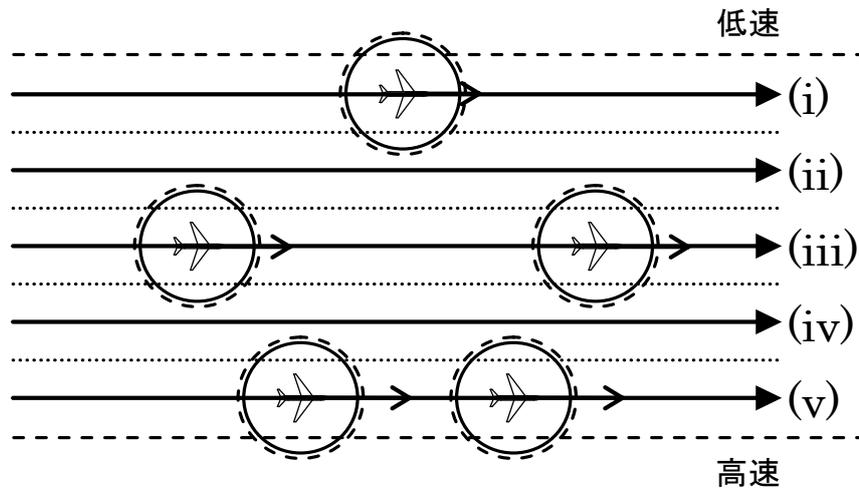


図 4-1 経済速度に応じた副経路

### 4.3 数値解析

#### 4.3.1 数値解析条件

数値解析に用いるパラメータを表 4-1 に示す. ここで,  $\alpha^{sd}$ ,  $\beta_r^{sd}$ ,  $\beta_a^{sd}$  は各パラメータの基準値を示す. 本解析においては, パラメータごとの変化を調べるために, まず基準値の値を利用し, 航空交通流の挙動を計算する. そして, 一つのパラメータの値のみを変化させ, 同一の初期条件を利用して同様の計算を行い, これを基準の交通流と比較する. 各パラメータは同表に示す範囲内で変化させる. さらに, 航空機ごとにパラメータの値が異なるケースについても計算を行った. それぞれのケースにおいて, 50 通りの異なる初期値より計算を行い, その傾向を調べる. 解析の初期状態例を図 4-2 に示す. 図において, 航空機の経済速度を色により表現し, 円の直径は安全間隔, 矢印は速度ベクトルを表す. 航空機の初期位置として,  $x$  方向には等間隔,  $y$  方向には設定した帯状経路内部の無作為な位置を与える. 各航空機の経済速度は 230~250 [m/s] の範囲で無作為に与える. また, 図 4-1 に示す副経路の速度の割り当ては, (i) 230~234 [m/s], (ii) 234~238 [m/s], (iii) 238~242 [m/s], (iv) 242~246 [m/s], (v) 246~250 [m/s] とし, 航空機は各々の経済速度に対応した経路上へ向かって飛行するものとする. 前章の解析と同様に, 図 4-2 に示す経路の右端と左端はつながっており, 高密度な交通流における航空機の挙動を長時間にわたり計算した.

表 4-1 数値解析パラメータ

構成機数	20	$\alpha^{sd}$	1.0
経済速度域, m/s	230~250	$\beta_r^{sd}$ , rad/m	$1.0 \times 10^{-6}$
$R_{MS}$ , NM	10	$\beta_a^{sd}$ , rad/m	$1.0 \times 10^{-3}$
$R_{SC}$ , NM	10.5	$\alpha$ 範囲	0.5~1.5
		$\beta_r$ 範囲	$0.5 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6}$
		$\beta_a$ 範囲	$0.5 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3}$

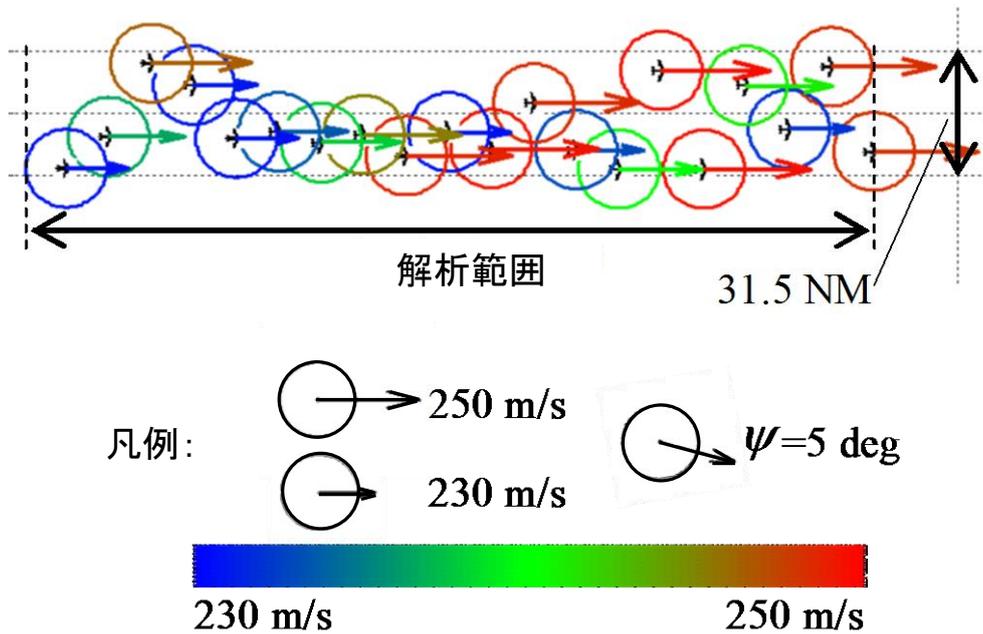


図 4-2 初期状態例

#### 4.3.2 評価指標

前章と同様に航空交通流の安全性、および操作量について評価を行う。コンフリクトの有無を確認するため、式(4-6)により安全間隔を下回り接近した量を求め、それを式(4-7)に示すように数値解析時間にわたり積分し、コンフリクトの評価値として求める。

$$d_{i,j}^{MS} = \begin{cases} R_{MS} - d_{i,j} & (d_{i,j} < R_{MS}) \\ 0 & (d_{i,j} \geq R_{MS}) \end{cases} \quad (4-6)$$

$$E_{MS} = \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{MS} dt \quad (i < j) \quad (4-7)$$

さらにコンフリクトのない交通流であっても、航空機が接近するほど、またその時間が長いほど危険性は高いと考えられる。そこで、もう一つの安全性の簡易的な指標として、基準間隔を下回る接近量の時間積分についても評価した。

$$d_{i,j}^{SC} = \begin{cases} R_{SC} - d_{i,j} & (d_{i,j} < R_{SC}) \\ 0 & (d_{i,j} \geq R_{SC}) \end{cases} \quad (4-8)$$

$$E_{SC} = \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{SC} dt \quad (i < j) \quad (4-9)$$

最後に、式(4-10)に示す方位角の変化量を数値解析時間にわたり積分した値を式(4-11)に示すように合計した値を操作量の評価値とした

$$h_i^c = \int |\dot{\psi}_i| dt \quad (4-10)$$

$$E_h = \sum_i h_i^c \quad (4-11)$$

### 4.3.3 航空機のパラメータに対する交通流の振る舞いの変化

標準的な航空機の挙動として、すべての航空機に対して表 4-1 に示す基準値のパラメータを与えた時の交通流の振る舞いの一例を図 4-3 に示す。ここで、黄色い影は航空機の間隔が基準間隔を下回っている状態であることを示している。第 3 章において示したように、航空機は速度に応じた経路を飛行することとなる。

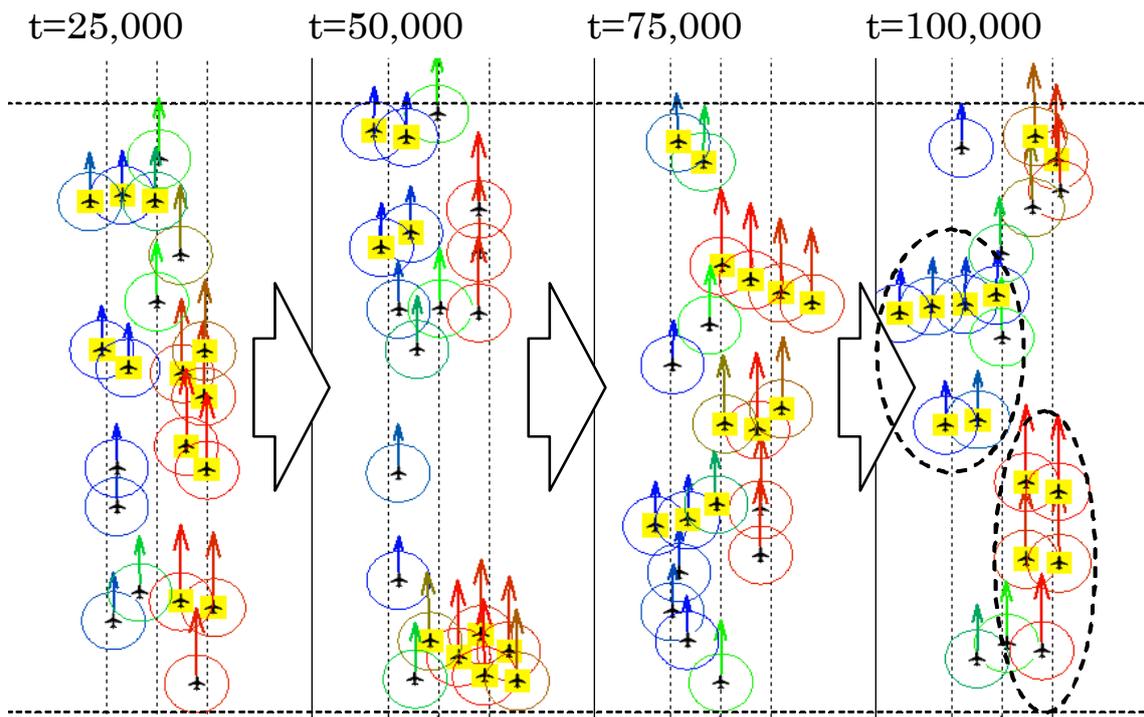


図 4-3 標準的な航空機の振る舞い

本解析では、4.2 に示す 3 種類のパラメータそれぞれに対して、その値を変化させた時の航空機の振る舞いの様子を調べた。さらに、航空機ごとにパラメータが異なる場合として、無作為に与えたケースについても検討した。パラメータに対する評価値の変化として、各ケースに対して計算した 50 通り交通流の評価値の平均値を図 4-4 にまとめる。ここで、表 4-1 に示すパラメータ基準値を  $std$  と表記し、また係数の値は  $std$  を 1 としたときの割合を示しており、例として  $beta_r=0.5$  は係数  $\beta_r$  が  $0.5 \times 10^{-6}$  であるケースを示している。また、 $rand$  は航空機ごとに異なる値を適用したケースに相当する。

航空交通流において、コンフリクトを未然に防ぐことは最も重要であると考えられる。評価結果より、共通の係数  $\alpha$  の値を設定した場合においても、その値によりコンフリクトが発生することが示されている。係数  $\alpha$  は互いの間隔に基づき定められた目標方位角への追従性に関するパラメータであるが、これを小さくしすぎる場合、回避すべき方位角へ変更するまでに時間を要し、回避操作が間に合わないこととなる。一方で、大きな値に設定

した場合、速やかに回避すべき方向へ向かうこととなる。本解析で扱うような高密度な交通流においては、周辺に多数の航空機が飛行している。そのため、ある航空機を回避するための方位角の操作が別の航空機とコンフリクトへとつながることとなる。さらに、係数  $\alpha$ 、 $\beta_a$  に関して、航空機ごとに異なるパラメータを適用した交通流におけるコンフリクトの評価値が特に大きいことが示されている。ここで、コンフリクトが発生するときの典型的な航空機の挙動を図 4-5 に示す。図において、赤い影によりコンフリクトの発生を示している。図 4-5(a)において、航空機 A および B が接近することにより 2 機は回避操作を開始する。このとき、パラメータ  $\alpha$  の大きさは A が std より大きく、B は std よりも小さい値である。その結果、同図(b)に示すように航空機 A は B より大きく方位を変更することとなる。その後同図(c)に示すように航空機 A は C と接近することとなるが、このとき航空機 C のパラメータ  $\alpha$  も std より小さい値であり、接近距離に対して素早い回避操作を行わない。その結果航空機 A および C の間の間隔を速やかに広げることができず、コンフリクトが発生した。

以上に示したように、航空機ごとのパラメータの違いはコンフリクト回避に対する航空機の挙動に大きく影響する。パラメータが異なることは、コンフリクトが予想されたとき、2 機の航空機が異なる基準に基づき間隔維持を行うことに相当する。このような交通流においては、接近する 2 機の航空機のうち、片方の航空機のみが大きな操作を行うこととなるが、高密度な交通流においては、方位角の大きな変化はコンフリクトを引き起こす要因となる。一方で、互いの航空機が等しく操作を行うことにより、安全に間隔維持が可能となる。本解析では、目標経路までの位置関係や、他機との距離に基づき航空機の飛行すべき目標方位角を設定し、この目標方位角に追従させるようにロール角を与える。係数  $\beta_a$  は目標方位角の設定において、他機との距離に対する操作角度を決定するパラメータであり、係数  $\alpha$  は、設定した目標方位角への追従性を表すパラメータである。自動車交通のように各ドライバーがそれぞれの基準で間隔維持を行う交通流と異なり、航空交通流においては、すべての航空機が同一のルールに基づき飛行することとなる。そのため、間隔維持に同一の基準を設定することが可能である。そして、本解析において示したように、接近した航空機が同一の基準で互いに間隔維持を行うことによりコンフリクトの発生を防ぎ、より安全な交通流の実現に寄与することとなる。

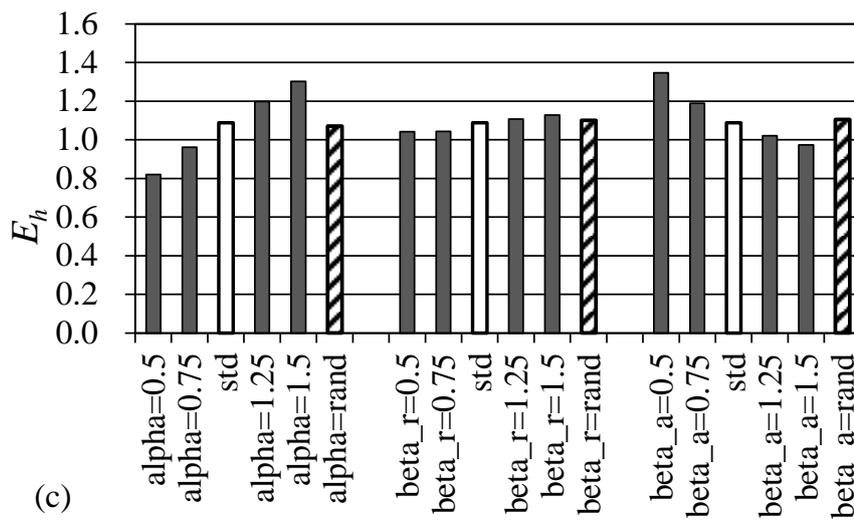
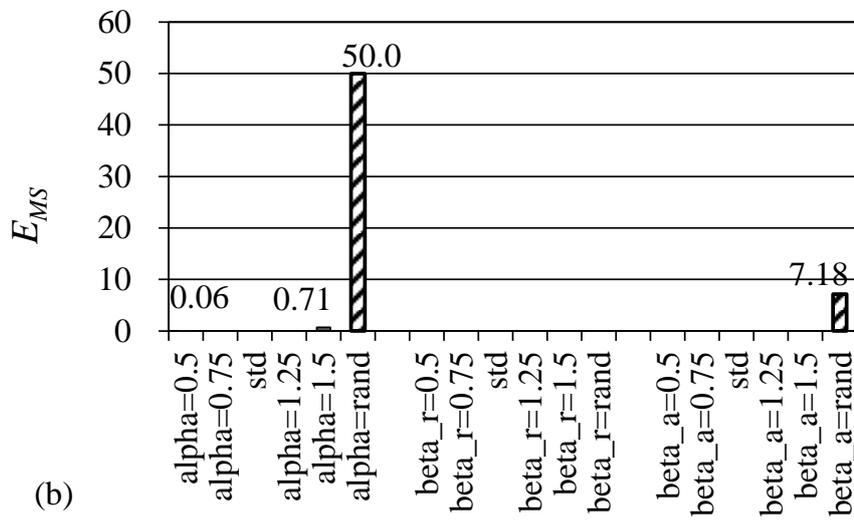
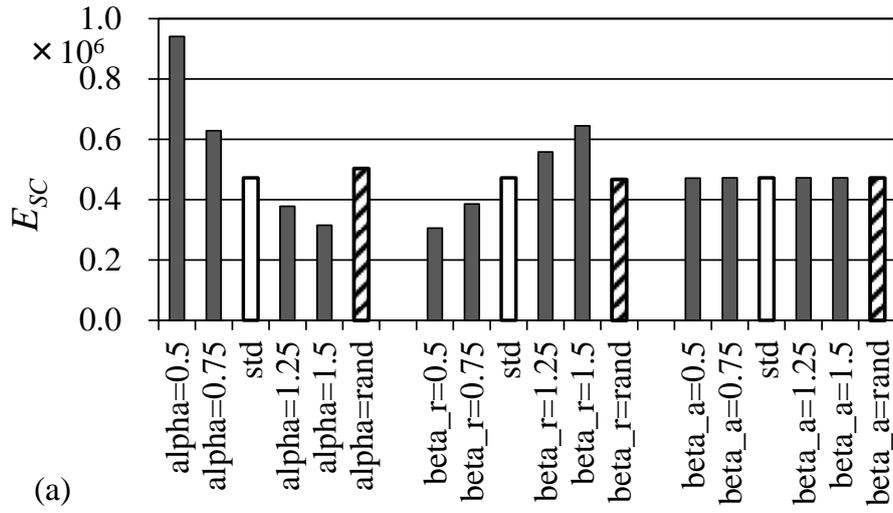


図 4-4 評価指標の平均値のパラメータの変化に対する比較

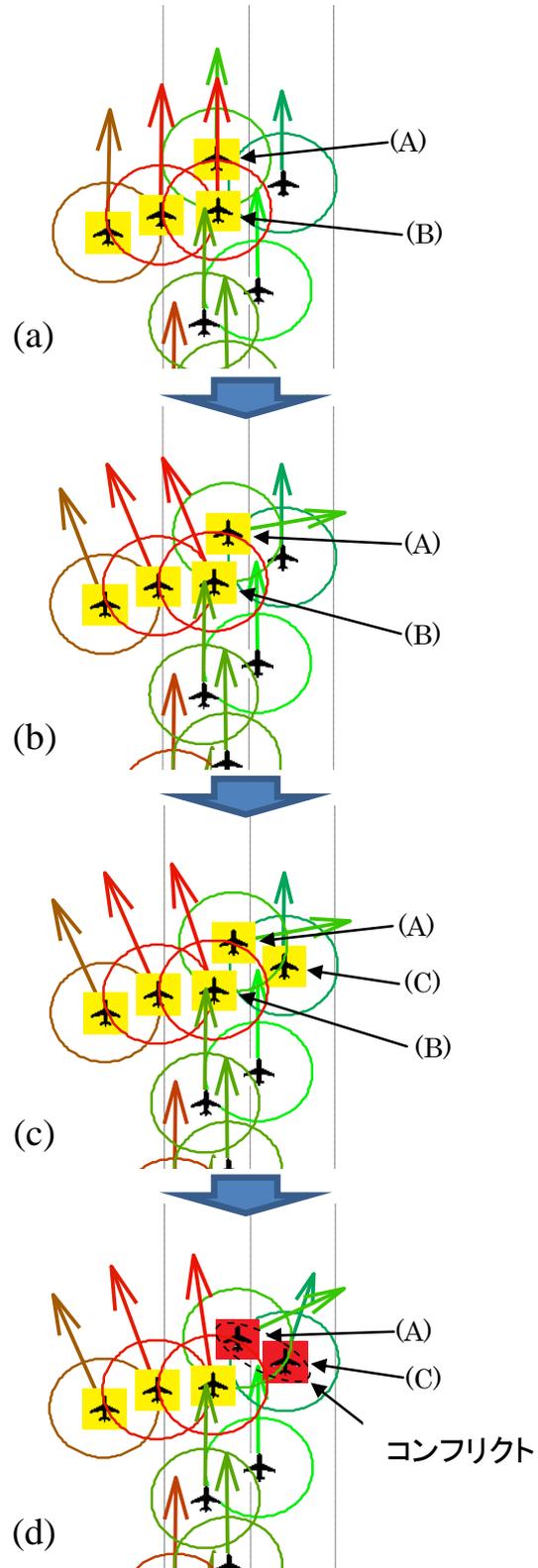


図 4-5 典型的なコンフリクトの発生までの流れ

#### 4.3.4 基準間隔に対する交通流の振る舞いの変化

航空機の回避操作を行う基準として定めた基準間隔も一つのパラメータであるといえる。そこで、10.5NM から 12.5NM まで基準間隔を変化させた時の交通流の振る舞いの変化を数値解析により調べる。また、各航空機に異なる基準間隔を設定したときの交通流の振る舞いについても同様に明らかにする。ここで、航空機ごとに異なる間隔を設定する際には、10.5 から 12.5NM までの範囲で一様乱数を用いて無作為に設定することとした。係数の変化の解析と同様に、それぞれの基準間隔に対して 50 通りの初期状態より解析を行った。

解析結果を図 4-6 にまとめる。図 4-6(b)に示す操作量の評価値  $E_h$  については、基準間隔を 11NM に設定した場合に最小値となることが示されており、基準を広く設定しても、また安全間隔に近い値に設定しても操作量が増加することから、最適な値が存在することが読み取れる。また、航空機ごとに異なる基準間隔を適用した場合においてのみコンフリクトが確認された。典型的なコンフリクトまでの流れを図 4-7 に示す。同図(a)では航空機 A の後方からより高速の B が飛行する様子が図示されている。ここで、航空機 A の基準間隔は B よりも広く、A がまずコンフリクト回避のための操作を開始して右方向へと方位を変える。このとき、航空機 A は B の基準間隔の外側に存在するため、航空機 B は回避操作を行わずに直進することとなるため、同図(b)に示すように航空機 A のみがコンフリクト回避のために大きく方位を変更する。その結果、同図(c)に示すように航空機 C および D に大きく接近することとなり、コンフリクトが発生する。

以上に示したように、航空機ごと異なる基準間隔を適用し、その基準間隔内部の航空機に対して回避操作を行う場合、より遠方の航空機に対して回避を行う航空機のみが操作を開始する。片方の航空機のみが回避操作を行う場合、互いが操作を行う場合と比較し、より大きな方位の変更が求められる。進行方向と大きく異なる方位で飛行することにより周辺航空機に対して接近する危険性が増加し、高密度な交通流においては、速やかな回避操作が不可能になる。このように異なる基準間隔で回避操作を行うことは、その差がわずかであれ、コンフリクトの発生に寄与することとなる。回避操作に関する係数の解析においても示されたように、安全な運航のためにはすべての航空機が同一の基準に基づき回避操作を行うことが不可欠である。

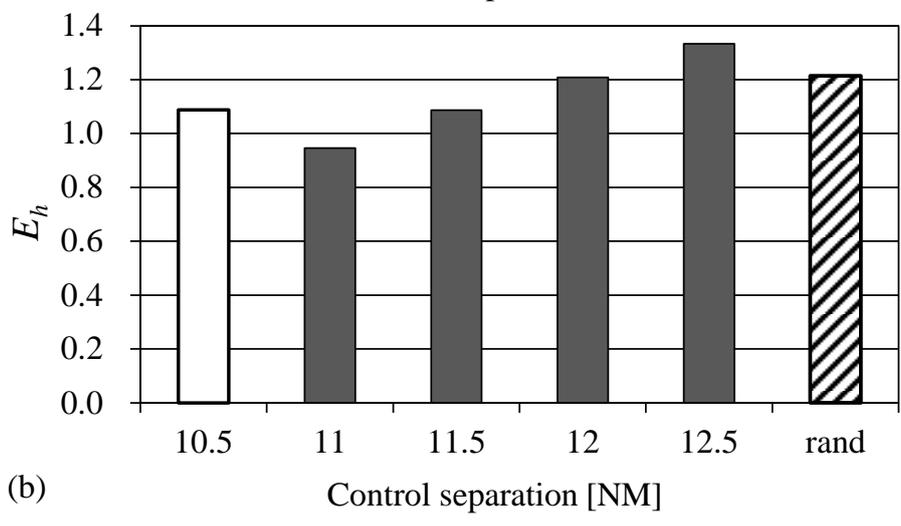
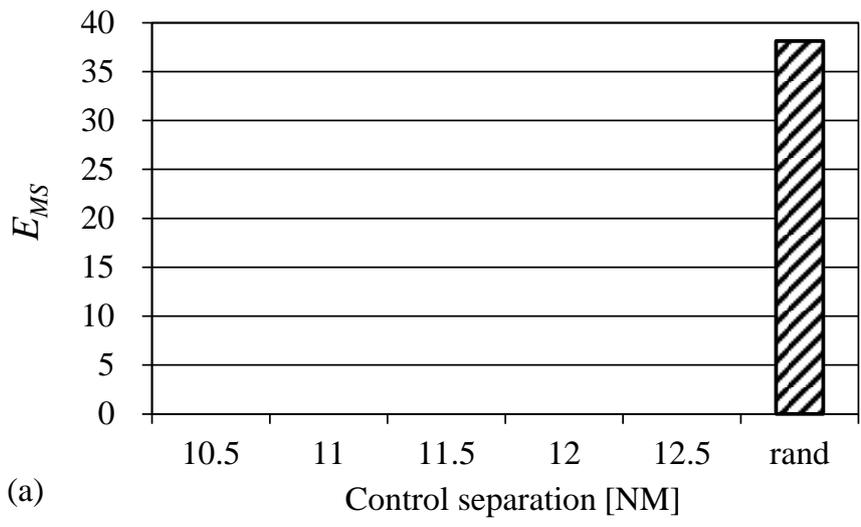


図 4-6 評価指標の平均値の基準間隔の変化に対する比較

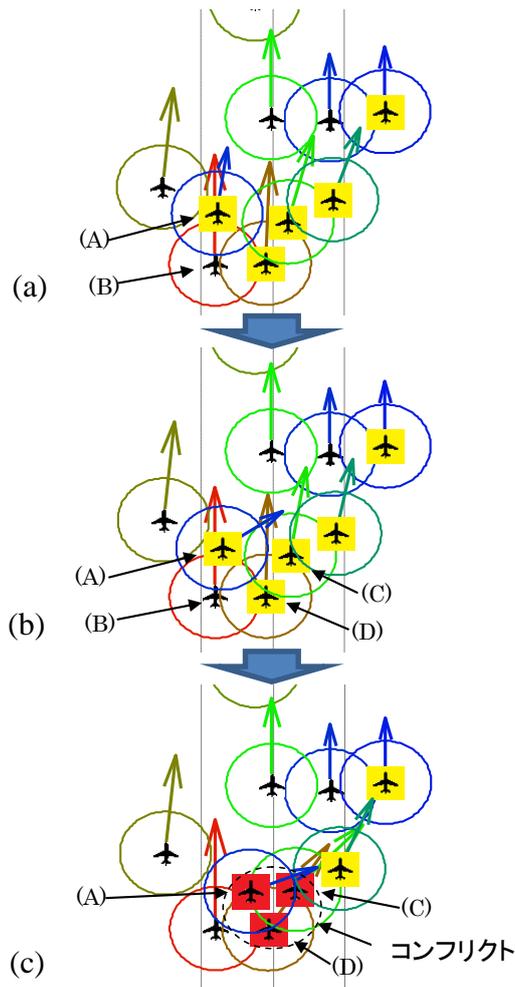


図 4-7 典型的なコンフリクト例

#### 4.4 まとめ

本章において、航空機や基準間隔のパラメータの変化に対する交通流の振る舞いの変化を数値解析により調べた。特に、航空機ごとに異なるパラメータや異なる基準間隔を設定した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。このような交通流では、パラメータや基準間隔の違いから、接近する2機の航空機の回避操作量に違いが発生することが特徴であり、片方の航空機のみが操作を行う場合にはより大きな操作量が必要になる。高密度な交通流においては、周辺航空機の存在により速やかに間隔維持を行うことができるとは限らず、こうした状況において進行方向と著しく異なる方位への変更することは周辺航空機とのコンフリクトへとつながる。これらの結果より、すべての航空機が同一の基準に基づき、互いに等しく操作を行うことが安全性の向上に大きく寄与することとなる。そしてこのような間隔維持は、すべての航空機がルールを遵守して飛行する航空交通流であるからこそ実現可能になるものと考えられる。

## 5 位置および速度情報を利用した自律間隔維持アルゴリズムの高度化

### 5.1 ADS-B により取得可能な情報の利用

第 4 章までの解析において、最小限の情報として位置情報に基づく自律間隔維持を行う交通流について解析を行った。これにより、高密度な一方向航空交通流における航空機の挙動について、基本的な性質を明らかにした。実際には ADS-B によりさらに広範囲の航空機の情報を取得でき、また位置だけでなく速度情報を利用することが可能となる見込みであるため<sup>7,8)</sup>、本章では位置および速度の情報を利用したより実用的な自律間隔維持アルゴリズムの構築を試みる。

航空機の自律間隔維持を想定する運航コンセプトの一つにフリーフライトと呼ばれるものがある。航空交通流においては、各航空機が希望する経路、高度を希望する速度で自由に飛行することが最も望ましいと考えられる。一方で、混雑空域においては、安全のために制限が加えられることとなる。フリーフライトとは、より柔軟な運航を行い、可能な限り航空機が各々の希望する通りに飛行することを目的としたコンセプトである<sup>35)</sup>。異なる目的地へ向かう航空機群が様々な方向より飛行する状況において安全性を確保するために、各航空機が周辺航空機を監視することによりコンフリクトを検出し、これを回避することが求められる。そこで、本章ではまずフリーフライトの代表的な自律間隔維持アルゴリズムの一つ<sup>36)</sup>の適用を検討する。

### 5.2 航空機の制御モデル

航空機の運動方程式は第 2 章に示したように 2 次元近似したものを利用する。加減速は行わずに航空機は各々の経済速度で飛行するものとし、方位角の変更により間隔維持を行う。航空機のロール角は以下の式により与える。

$$\varphi_i = C_h(\Psi_i' - \psi_i) \quad (5-1)$$

ここで、 $\Psi_i'$  は航空機  $i$  の目標方位角を表し、これに収束させるようにロール角を与える。本解析においては、第 3 章において利用した図 3-3 に示す最適経路を中心として幅を持つ帯状の経路を想定し、各航空機は他機との間隔を維持しつつ設定した帯状経路の内部を飛行するものとする。航空機の目標方位角は以下の式により与える。

$$\Psi_i' = \Psi^r + \sum_{i \neq j} \mu_{i,j} \quad (5-2)$$

$$\Psi^r = \begin{cases} -C_r(y_i - y_{edge}^+) & (y_{edge}^+ < y_i) \\ 0 & (y_{edge}^- \leq y_i \leq y_{edge}^+) \\ -C_r(y_i - y_{edge}^-) & (y_i < y_{edge}^-) \end{cases} \quad (5-3)$$

ここで、 $\Psi^r$  は帯状経路内部を飛行させるための方位角であり、 $y_{edge}^+$ 、 $y_{edge}^-$  は帯状経路端の  $y$  座標を示す。式(5-2)に示す  $\mu_{i,j}$  は航空機  $i$  の航空機  $j$  に対する間隔維持のための方位角を表

す。ADS-B の情報の利用により周辺航空機との相対位置，相対速度に基づき  $\mu_{i,j}$  を定めることとし， $\mu_{i,j}$  をすべての航空機に対して計算し，その和を最終的な間隔維持のための方位角として扱う。次節において方位角の与え方について詳しく述べる。

### 5.3 相対ベクトル基準間隔維持アルゴリズム

コンフリクトの検出および回避を相対位置および相対速度ベクトルを利用して行う。コンフリクト検出の一例として，同一高度を2機の航空機 A, B が飛行する様子を図 5-1 に示す。ここで， $\mathbf{P}_A$ ， $\mathbf{P}_B$  は航空機 A, B の位置ベクトル， $\mathbf{V}_A$ ， $\mathbf{V}_B$  は速度ベクトルを表し， $\mathbf{V}_R$  は相対速度ベクトル， $d_{A,B}$  は2機の間隔である。本研究ではコンフリクトを未然に防ぐために航空機は基準間隔 ( $R_{SC}$ ) 以上の間隔を保つように操作を行うものとし，図に示すように航空機 A の位置から相対速度ベクトルを延長した直線が航空機 B を中心とした半径  $R_{SC}$  の円の内部を通過する場合にコンフリクトの危険性があると判断し，回避のための操作を行うこととする。これは相対位置ベクトルに対して，相対速度ベクトルのなす角  $\alpha$  が航空機 A の位置から引いた航空機 B を中心とした半径  $R_{SC}$  の円の接線となす角  $\beta$  よりも小さい場合であり，下記の式により表現される。

$$|\alpha| < \beta \quad (5-4)$$

$$\cos \alpha = \frac{(\mathbf{P}_B - \mathbf{P}_A) \cdot (\mathbf{V}_A - \mathbf{V}_B)}{\|\mathbf{P}_B - \mathbf{P}_A\| \cdot \|\mathbf{V}_A - \mathbf{V}_B\|} \quad (5-5)$$

$$\cos \beta = \frac{R_{SC}}{d_{A,B}} \quad (5-6)$$

相対速度ベクトル  $\mathbf{V}_R$  を  $\gamma \equiv \beta - \alpha$  だけ回転させるように操作を行うことにより，2機の間隔に基準間隔以上の間隔を維持して回避することが可能である。本研究では図 5-2 に示すように，コンフリクトの危険性がある2機の航空機 A, B が共に同じ角度  $\mu_{SC}$  だけ操作を行うこととする。航空機 A および B の操作量は， $V_A = \|\mathbf{V}_A\|$ ， $V_B = \|\mathbf{V}_B\|$  として下記の式により求められる。

$$\tan \mu_{SC} = \frac{(V_A^2 + V_B^2 - 2V_A V_B \cos(\psi_A - \psi_B)) \sin \gamma}{(V_A^2 - V_B^2) \cos \gamma + 2V_A V_B \sin \gamma \sin(\psi_A - \psi_B)} \quad (5-7)$$

また，互いの間隔が基準間隔を下回るとき，基準間隔を確保するための操作を行うこととし，下記の式に示す角度を加えた方位角へと針路を変更する。

$$\mu_a = \frac{R_{SC} - d_{A,B}}{R_{SC} - R_{MS}} \frac{\pi}{2} \quad (5-8)$$

上式に示す角度は，航空機の間隔が安全間隔に等しくなる場合に方位角が 90 deg 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。さらに，航空機の間隔が安全間隔を下回った場合には速やかに衝突を回避するように方位角を 90 deg の方向へ向ける。

$$\mu_u = \frac{\pi}{2} \quad (5-9)$$

以上に述べたように，航空機の方位を相手機との間隔に応じて決定し，互いの間隔を維持する。航空機 A の航空機 B に対する間隔維持のための方位角を  $\mu_{A,B}$  とおくと，下記の式の

ようにまとめられる.

$$\mu_{A,B} = \begin{cases} \mu_{sc} & (d_{A,B} > R_{SC}) \\ \mu_{sc} + \mu_a & (R_{SC} \geq d_{A,B} > R_{MS}) \\ \mu_u & (R_{MS} \geq d_{A,B}) \end{cases} \quad (5-10)$$

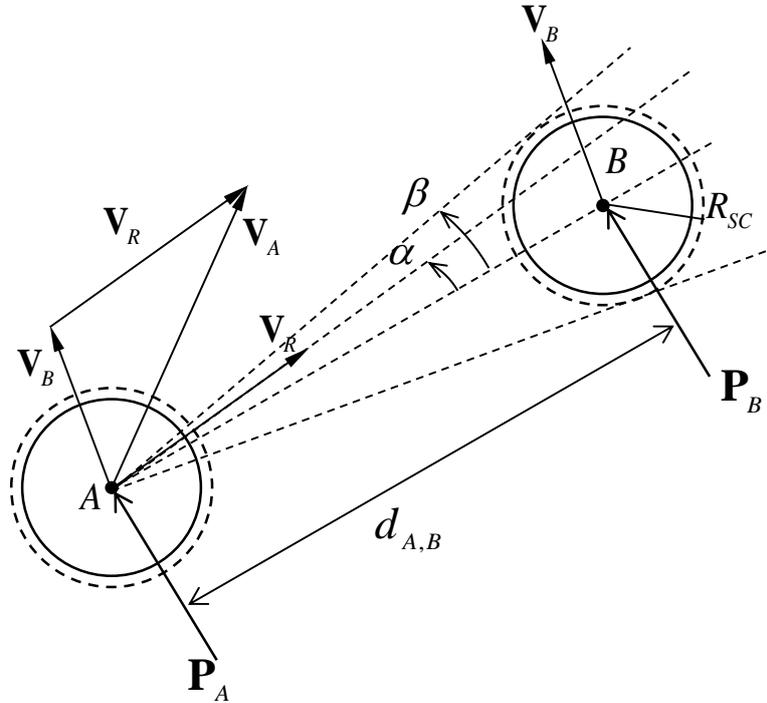


図 5-1 相対速度ベクトルに基づくコンフリクト検出

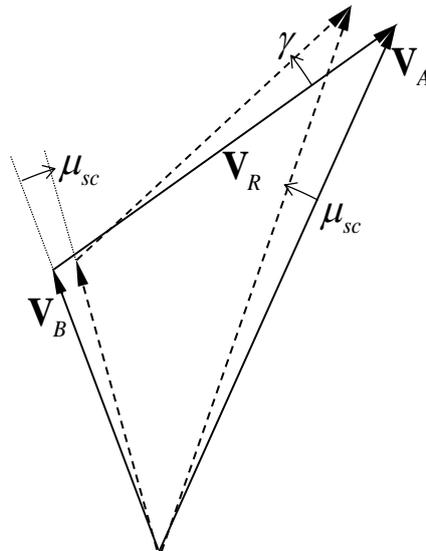


図 5-2 相対速度ベクトルに基づくコンフリクト回避

## 5.4 数値解析

### 5.4.1 数値解析条件

数値解析に利用する各種パラメータを表 5-1 に示す。また、各航空機の初期状態例を図 5-3 に示す。ここで、矢印は速度ベクトルであり、各航空機を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帯状経路内の無作為な位置を与える。20 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 230~250 m/s の範囲で無作為に与える。安全間隔、基準間隔をそれぞれ 10 NM, 10.5 NM, 経路幅を 31.5 NM とした。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、初期値の異なる 50 ケースの計算を行った。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、長時間の数値解析を行った。これまでの解析と同様に周期境界条件を適用して無限長の交通流を模擬し、それぞれの初期値に対して約 100,000 秒間にわたる各航空機の挙動を計算した。

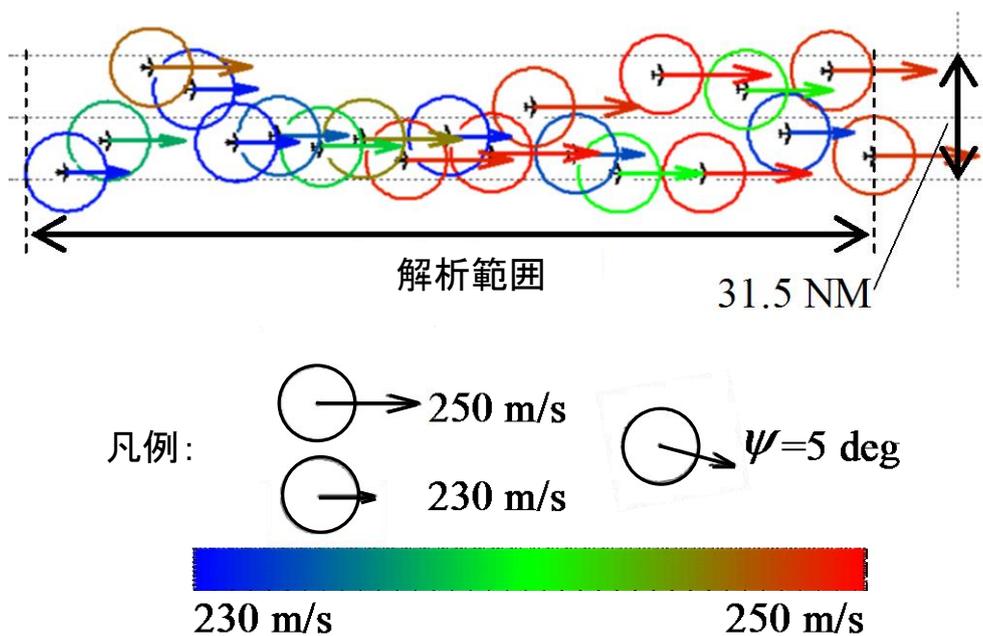


図 5-3 数値解析の初期状態

表 5-1 数値解析パラメータ

構成機数	20	$R_{MS}, \text{NM}$	10
経済速度域, $m/s$	230-250	$R_{SC}, \text{NM}$	10.5
経路幅, $\text{NM}$	31.5	$C_h$	1.0
		$C_r, \text{rad/m}$	$1.0 \times 10^{-6}$

#### 5.4.2 評価指標

航空交通流の安全性および航空機の操作量を評価指標として比較を行う．交通流の安全性を保つためには，すべての航空機が常に安全間隔を保ちつつ飛行しなければならない．また，他の航空機との接近量及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(5-11)，および式(5-12)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(5-13)，式(5-14)に示すように数値解析時間にわたり積分し，その平均値を安全性の評価値として求めた．

$$d_{i,j}^{MS} = \begin{cases} R_{MS} - d_{i,j} & (d_{i,j} < R_{MS}) \\ 0 & (d_{i,j} \geq R_{MS}) \end{cases} \quad (5-11)$$

$$d_{i,j}^{SC} = \begin{cases} R_{SC} - d_{i,j} & (d_{i,j} < R_{SC}) \\ 0 & (d_{i,j} \geq R_{SC}) \end{cases} \quad (5-12)$$

$$E_{MS} = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{MS} dt \quad (i < j) \quad (5-13)$$

$$E_{SC} = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{SC} dt \quad (i < j) \quad (5-14)$$

また，航空機の操作量はより少ないことが望ましいため，式(5-15)に示すように方位角の変化を数値解析時間にわたり積分した値を操作量とみなして算出した．そして，式(5-16)に示すように，全航空機の操作量の合計値を評価値とした．

$$h_i^c = \int |\dot{\psi}_i| dt \quad (5-15)$$

$$E_c = \frac{1}{N} \sum_i h_i^c \quad (5-16)$$

#### 5.4.3 解析結果

解析結果の一例として，図 5-3 に示す初期値より計算した航空機の挙動を図 5-4 に示す．ここで，黄色い影は間隔が基準間隔を下回っていることを示す．本アルゴリズムにおいて，航空機の間隔に応じた操作を加えたことにより，接近した航空機は速やかに間隔を広げることとなる．異なる 50 通りの初期値より計算した評価指標の平均値を表 5-2 に示す．評価結果においてコンフリクトの発生が示されおり，50 ケースの計算例のうち，32 ケースでコンフリクトの発生を確認した．典型的なコンフリクトの発生の様子を図 5-5 に示す．ここで，青い影は間隔維持の操作中であることを示し，赤い影は安全間隔を下回り接近し，コンフリクトが発生していることを示す．図に示す例においては，航空機 A および D の間隔維持のための操作がきっかけとなり，航空機 A, B, C の間でコンフリクトが発生する．図 5-5(a)では，航空機 D が前方の B, 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 5-5(b)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，基準間隔を確保するために互いに反対方向に大きく方位角を変更することとなる．図 5-5(c)に示すように，航空機 D のこのような大きな方位角変更により航空機

A および C まだが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 5-5(d)に示すように横方向にコンフリクトが生じることとなる。なお、このようにコンフリクトが生じた場合でも、図 5-5(e)に示すように基準間隔を下回った際の追加操作により速やかにコンフリクトは解消される。

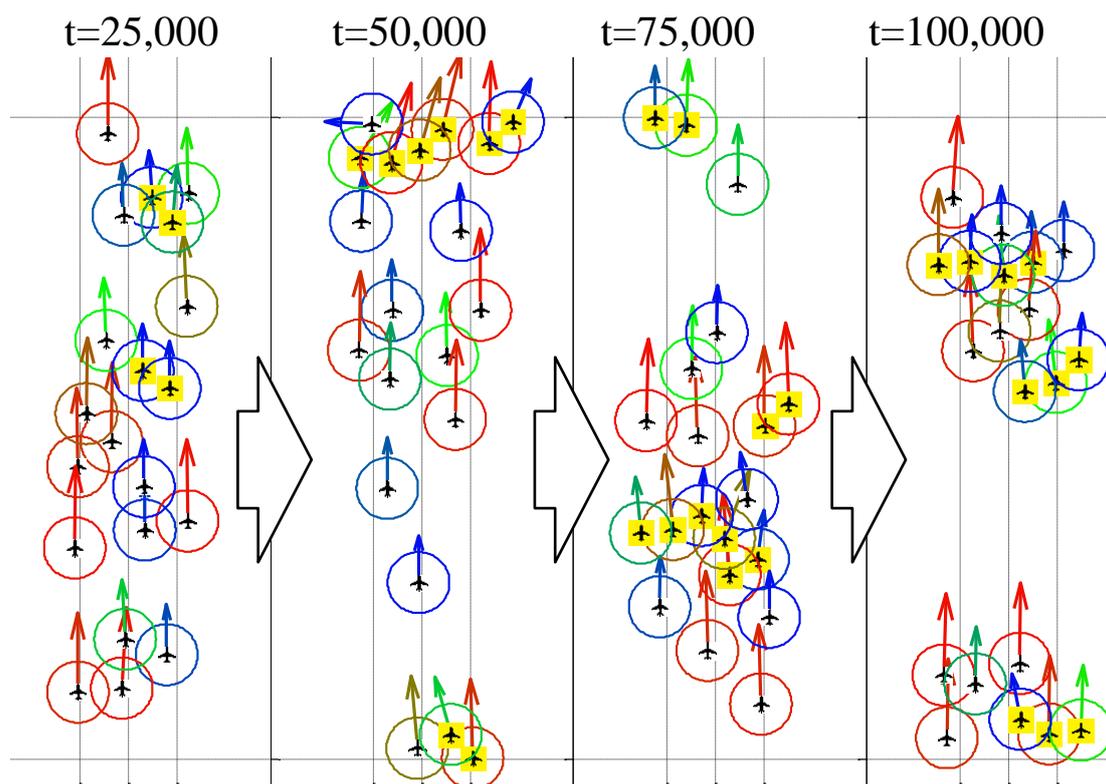


図 5-4 航空機の挙動

表 5-2 相対ベクトル基準自律間隔維持における評価指標の計算結果

$E_{SC}, m \cdot s$	$7.9 \times 10^5$
$E_{MS}, m \cdot s$	$5.9 \times 10^2$
$E_C, rad$	6.4

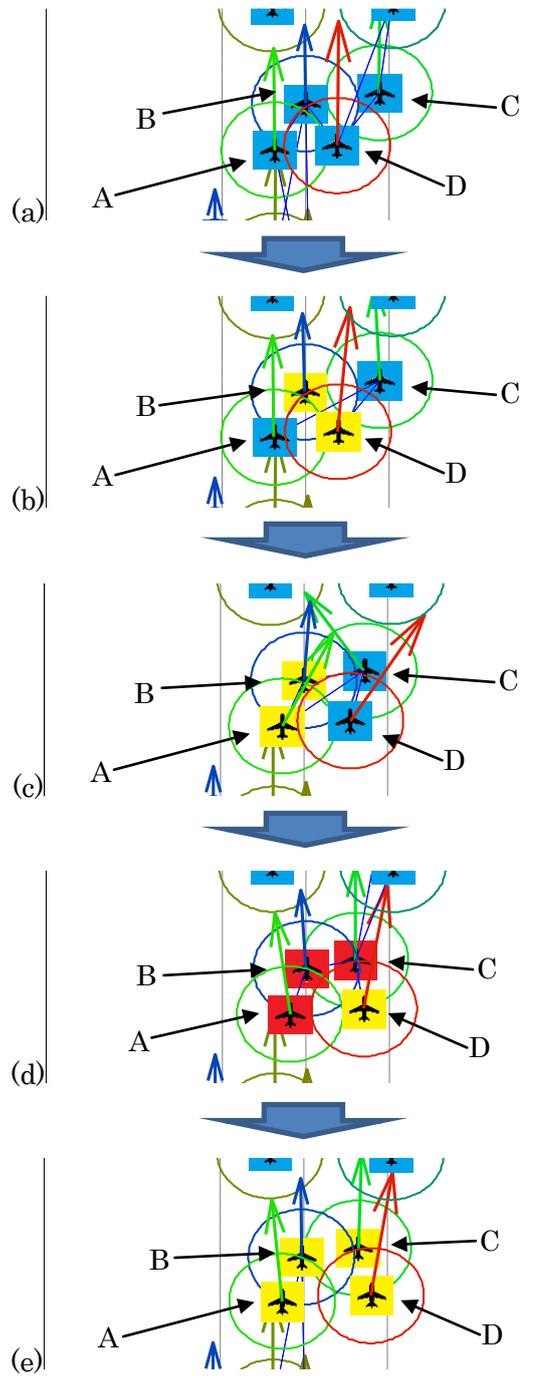


図 5-5 コンフリクトの様子

## 5.5 フローコリドーにおける飛行意図の活用

### 5.5.1 横位置基準間隔維持アルゴリズム

フリーフライトに基づく相対ベクトル基準間隔維持アルゴリズムでは、2機の航空機にコンフリクトが予想される時、方位角、位置、速度の情報に基づき回避すべき方位角を決定した。しかし、ある航空機から回避するために定めた方位角への変更が周辺を飛行する他の航空機とのコンフリクトを引き起こすことが示された。そこで、コンフリクトを未然に防ぐためにアルゴリズムの改良を試みる。本研究で対象とする交通流は高密度であり、すべての航空機が同一方向へ飛行していることが大きな特徴である。このような交通流では、飛行方向から著しく異なる方向への方位角の変更がコンフリクトを引き起こすものと考えられる。したがって、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て間隔維持の方位角を定めることが有効であると考え、航空機の横位置を基準とする自律間隔維持を構築する。

2機の航空機 A, B が同一方向へ飛行する図 5-6 に示す状況を例にとり、横位置基準自律間隔維持アルゴリズムの概要を述べる。ここで、 $d_{A,B}^x$  および  $d_{A,B}^y$  はそれぞれ  $x, y$  方向の間隔である。 $d_{A,B}^y$  が基準間隔以上、あるいは前方の航空機 B が航空機 A より高速で飛行するとき、互いの間隔は十分に確保されているため、間隔維持のための操作は必要ない。一方で、 $d_{A,B}^y$  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、基準間隔を保つための操作が求められる。このとき、航空機 A および B が同じ角度 ( $\mu_{A,B}$  と表記する) だけ反対方向へ方位を変更するものとし、互いの位置および速度に基づき角度を決定する。相対ベクトル基準のアルゴリズムにおいて示したように、遠方の航空機に対して間隔を維持するための操作角度を  $\mu_{SC}$ 、基準間隔を下回り接近する航空機から間隔を維持するための操作角度を  $\mu_a$ 、安全間隔を下回り接近した航空機から速やかに離れるための角度を  $\mu_u$  とし、航空機 A, B の操作角度  $\mu_{A,B}$  は互いの間隔に応じてこれらの3種類の角度を利用して決定する。

図 5-6 に示すように基準間隔以上離れている航空機に対する操作角度を求める。最小限の操作により、基準間隔を保ちつつ航空機 A が航空機 B を追い越すことが望ましいと考え、図 5-6 に示す例では左側を飛行する航空機 A は左側へ、右側を飛行する航空機 B は右側へ同じ角度だけ方位を変更して回避を行う。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、すなわち、図 5-6 に示す  $x$  方向となす角  $\gamma$  となるよう互いの方位角を変化させる。ここで、以下の関係式が成り立つ。

$$\frac{R_{SC} \cos \gamma - d_{A,B}^y}{(V_A + V_B) \sin \mu_{SC}} = \frac{d_{A,B}^x - R_{SC} \sin \gamma}{(V_A - V_B) \cos \mu_{SC}} \quad (5-17)$$

上式は、航空機 A が、航空機 B を中心とした半径  $R_{SC}$  の円と、円へ引いた接線との接点に到達するのに要する時間を表している。左辺は左右方向に関して距離を相対速度により除して算出した時間、右辺は前後方向に関する時間を表し、両者が等しいことを示している。式(5-17)を変形することにより以下の式を得る。

$$\tan \mu_{SC} = \frac{(R_{SC} \cos \gamma - d_{A,B}^y)(V_A - V_B)}{(d_{A,B}^x - R_{SC} \sin \gamma)(V_A + V_B)} \quad (5-18)$$

2機の航空機が、互いに反対へ方位角を $\mu_{SC}$ 変更することにより、2機は基準間隔を維持しつつ回避を行うこととなる。また、互いの間隔が基準間隔を下回るとき、基準間隔を確保するための操作を行うことが求められる。相対ベクトル基準のアルゴリズムで示したように、基準間隔を下回り接近した距離に比例して回避のための操作を行うこととし、このときの追加操作角度は以下の式により表される。

$$\mu_a = \frac{R_{SC} - d_{A,B}}{R_{SC} - R_{MS}} \frac{\pi}{2} \quad (5-19)$$

最後に、安全間隔を下回りコンフリクトが発生した場合には、速やかに相手の航空機から離れるために下記に示すように角度を反対側へ向けることとする。

$$\mu_u = \frac{\pi}{2} \quad (5-20)$$

以上に述べたように、航空機の方位角を相手機との間隔に応じて決定し、互いの間隔を維持する。航空機AのBに対する操作角度をまとめると、下記の式のとおりとなる。

$$\mu_{A,B} = \begin{cases} \mu_{SC} & (d_{A,B} > R_{SC}) \\ \mu_{SC} + \mu_a & (R_{SC} \geq d_{A,B} > R_{MS}) \\ \mu_u & (R_{MS} \geq d_{A,B}) \end{cases} \quad (5-21)$$

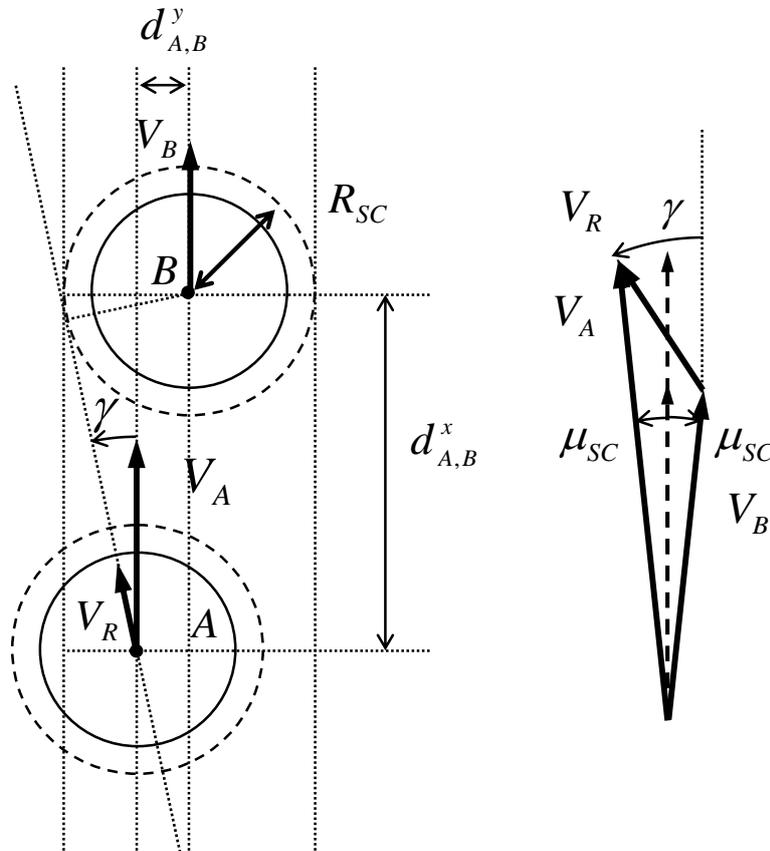


図 5-6 横位置基準アルゴリズムの概要図

### 5.5.2 数値解析結果

解析結果の一例として、図 5-3 に示す初期状態より計算した航空機の挙動について図 5-7 に示す。相対ベクトル基準の間隔維持と比較し、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。さらに、横位置基準の間隔維持アルゴリズムを用いた解析において、50 通りの数値解析のいずれにおいてもコンフリクトは発生しなかった。

2つのアルゴリズムの評価指標の比較を表 5-3 に示す。相対ベクトル基準の間隔維持と比較し、横位置基準の間隔維持アルゴリズムを適用した交通流におけるすべての指標値が大幅に低減されている。これは、フローコリドーの内部においてはすべ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 1/6 程度の操作量で、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。

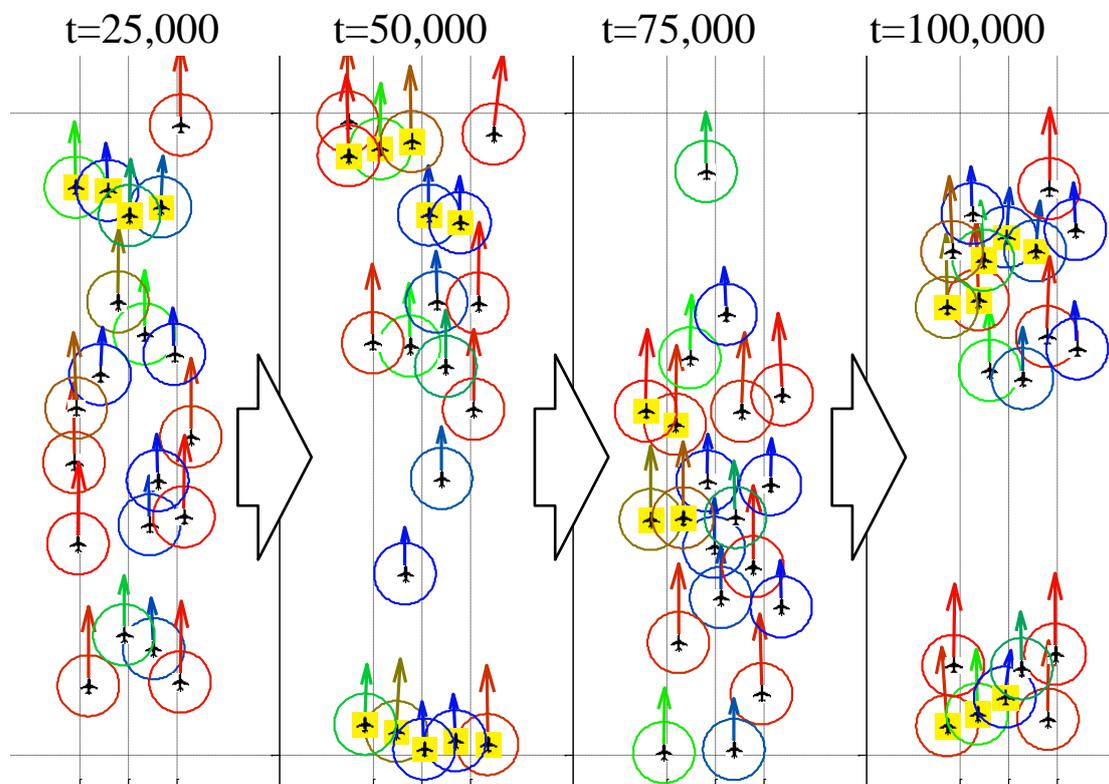


図 5-7 横位置基準の航空機の挙動の比較

表 5-3 各アルゴリズムにおける評価指標の比較

	$E_{SC}, m$	$E_{MS}, m$	$E_C, rad$
相対ベクトル基準	$7.9 \times 10^5$	$5.9 \times 10^2$	6.4
横位置基準	$9.7 \times 10^4$	0	1.1

## 5.6 まとめ

ADS-B から得られる情報を利用し，より実用的な自律間隔維持アルゴリズムについて検討した．フリーフライトの考え方に基づく相対ベクトル基準の間隔維持，およびフローコリドーの内部ではすべ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の間隔維持について，数値解析により比較を行った．数値解析の結果，相対ベクトル基準の間隔維持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，横位置基準の間隔維持では方位角の操作量が相対ベクトル基準のわずか 1/6 程度にも関わらず，コンフリクトは全く発生しなかった．つまり，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，すべての航空機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ということを明らかにした．

## 6 速度情報を利用した運航効率改善の検討

### 6.1 速度情報に基づく回避方向の判断

第 3 章において、最小限の位置情報のみを利用して航空機の経済速度に基づく飛行経路を設定し、同一直線上を飛行する航空機の色度差を低減させ、安全性、効率性の改善を試みた。そして、接近する航空機の色度差の低減により、安全かつ少ない操作により間隔の維持が可能になることを示した。一方で各航空機の色度速度に応じた適切な経路を設定するためには、あらかじめフローコリドーを利用する航空機の色度速度を把握していることが前提であり、また周辺の相対速度に基づき動的な経路変更を試みた交通流においては、すべての航空機が各々の経済速度に適した経路へ到達するまでの過程において危険性が増加することが問題であった。そこで、ADS-B に基づく速度情報を新たに判断に利用することにより、安全性を損なうことなく、自然と速度に応じた位置を飛行することが可能になるものと考え、これを達成するアルゴリズムについて検討する。

また、本章においてはより多くの航空機より形成される交通流に対して解析を行うこととする。現在のレーダー監視に基づく管制においては、レーダーのアンテナサイトからの距離が 40NM 未満、それ以遠の航空機に対して、安全のための最小間隔をそれぞれ 3NM、5NM と定めている<sup>1)</sup>。一方で、ADS-B の覆域は 100NM を超える。情報の取得可能範囲を仮に 100NM と仮定したとき、100NM 以内を飛行するすべての航空機の色度を取得することが可能である。基準間隔を現在の運用に倣い 5NM と仮定したとき、基準間隔ごとに一列に並ぶ飽和状態の交通流においては 20 機先の航空機が監視範囲内に入ることとなる。このとき、前章のように 20 機の交通流を想定した場合、すべての航空機の色度が利用可能であることとなる。実運航では範囲外を飛行する航空機が存在することから、本章においては 80 機より構成される交通流（経路長 400NM）を扱い、航空機は 100NM 以内の航空機の色度のみを利用して間隔維持を行うものとして解析を行う。なお、航空機の色度の単位には一般に kt (=0.51444 m/s) が用いられることから、本章では kt により速度を表記する。

### 6.2 速度差基準間隔維持アルゴリズム

第 5 章において横位置基準の間隔維持アルゴリズムを構築し、航空機は互いの横位置に基づき回避方向を設定した。本アルゴリズムにおいては、2 機の航空機が回避を試みるとき、速度差に基づき回避すべき方向を指定する。本研究では、速い航空機が右へ回避し、右側より追い越しを行うこととした。航空機 A が航空機 B より速く、かつ後方右側に位置する図 6-1 に示す状況を例にとり、方位角の定め方について述べる。横位置基準のアルゴリズムにおいては、最小限の操作角度で回避を行うこととし、図に示す状況においては左側を飛行する航空機 A が左側へ、航空機 B が右側へ回避を行うこととした。これに対して、本アルゴリズムにおいては速度差に基づき回避方向を指定することとし、高速の航空機 A が右側へ、低速の航空機 B が左側へ方位角を変更する。第 5 章に示したものと同様の考え方

に基づき、航空機 B を中心とする半径  $R_{SC}$  の円と接線との接点への到達時間により式(6-1)が成り立ち、式(6-2)により、航空機の操作角度が求められる。

$$\frac{R_{SC} \cos \gamma^* + d_{A,B}^y}{(V_A + V_B) \sin \mu_{SC}^*} = \frac{d_{A,B}^x - R_{SC} \sin \gamma^*}{(V_A - V_B) \cos \mu_{SC}^*} \quad (6-1)$$

$$\tan \mu_{SC}^* = \frac{(R_{SC} \cos \gamma^* - d_{A,B}^y)(V_A - V_B)}{(-R_{SC} \sin \gamma^* + d_{A,B}^x)(V_A + V_B)} \quad (6-2)$$

ここで、速度差に基づき指定した方向からの回避を達成する角度は互いの位置、速度の関係により変化する。ここで一例として、航空機 A が 500 kt、B が 450 kt で飛行し、基準間隔を 5 NM としたとき、航空機 A が B の右側から回避を行う際に求められる角度を図 6-2 に示す。航空機 A が B の左側後方に位置し、また前後方向の間隔が小さいとき、航空機 A が右側からの回避を達成するためには著しく大きな方位角の変更が求められる。すべての航空機が同一方向へ飛行している交通流において、方位角の大きな変更はコンフリクトの危険性を高める要因となる。そこで、本研究においては、方位角の上限として閾値  $\mu_{th}$  を導入し、この範囲内においてのみ指定した方向から回避を行うこととした。すなわち、指定した方向から回避を行うための角度が閾値以下であれば、式(6-2)に示す角度に基づき回避を行い、指定方向からの回避を行うための角度が閾値を超えると、横位置基準のアルゴリズムにおいて示した式(5-18)により計算される方位角を利用して回避を行うこととした。つまり、互いの位置、速度の関係により回避すべき方向を変化させ、閾値以内の範囲の方位角変化のみにより回避を行うものとする。このときの操作角度は以下の式により表される。

$$\mu_{SC}^d = \begin{cases} \mu_{SC}^* (y_A \leq y_B \text{ and } \mu_{SC}^d \leq \mu_{th}) \\ \mu_{SC} (y_A > y_B \text{ or } \mu_{SC}^d > \mu_{th}) \end{cases} \quad (6-3)$$

ここで、 $\mu_{SC}$  は式(5-18)により計算される値とする。また、航空機の間隔が基準間隔、安全間隔を下回るとき、前章の横位置基準アルゴリズムと同様に追加操作を行うこととし、以下の式で与える。

$$\mu_a = \frac{R_{SC} - d_{A,B}}{R_{SC} - R_{MS}} \frac{\pi}{2} \quad (6-4)$$

$$\mu_u = \frac{\pi}{2} \quad (6-5)$$

以上をまとめると、速度差に基づく左右の判断を導入した回避アルゴリズムにおける航空機の方位角は以下の式により与える。

$$\mu_{A,B} = \begin{cases} \mu_{SC}^d & (d_{A,B} > R_{SC}) \\ \mu_{SC}^d + \mu_a & (R_{SC} \geq d_{A,B} > R_{MS}) \\ \mu_u & (R_{MS} \geq d_{A,B}) \end{cases} \quad (6-6)$$

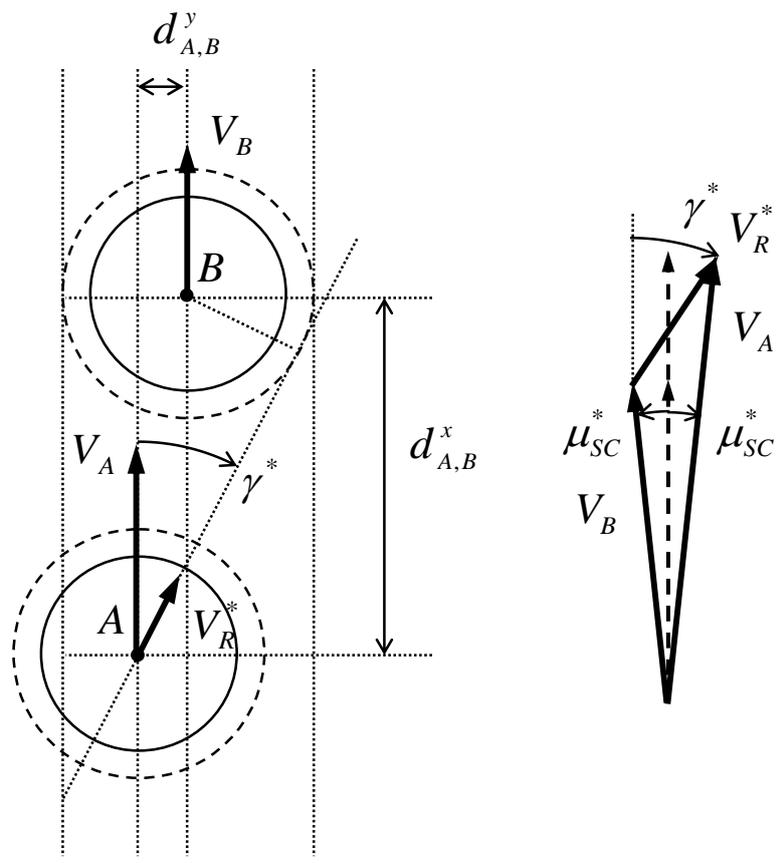


図 6-1 速度差基準アルゴリズム

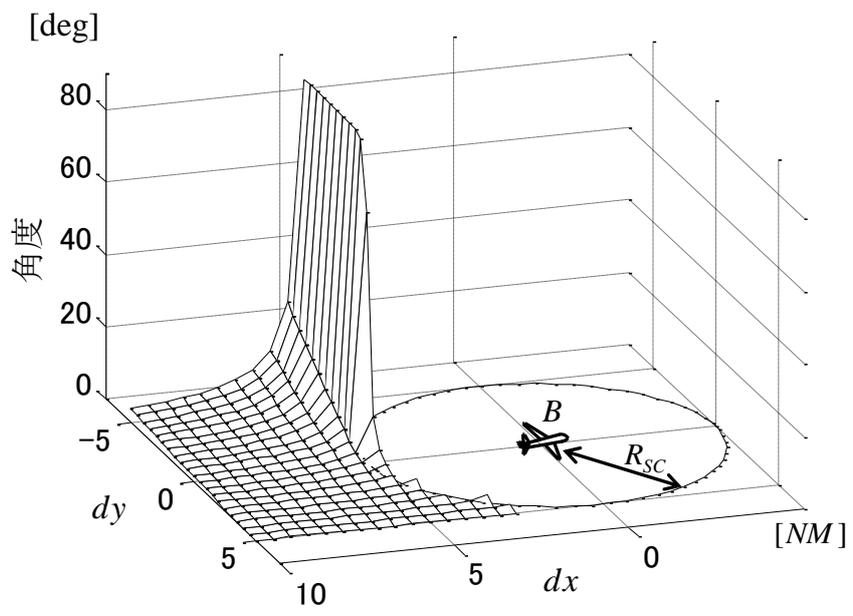


図 6-2 右側からの追い越しのための方位角

### 6.3 数値解析

#### 6.3.1 数値解析条件および評価指標

数値解析に利用する各種パラメータを表 6-1 に示す。また、各航空機の初期状態例を図 6-3 に示す。ここで、矢印は速度ベクトルであり、各航空機を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、一例として 5 deg の傾きを図 6-3 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経路幅の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、各航空機の経済速度は 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, 経路幅を 15 NM とし、100 NM 以内の航空機の情報を利用することとした。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、初期値の異なる 50 ケースの計算を行った。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、前章における解析と同様にそれぞれの初期値に対して約 100,000 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。

交通流の評価として、コンフリクトの有無を確認した。式(6-7)に示すように安全間隔を下回り接近した距離を算出し、これを式(6-8)に示すように数値解析時間にわたり積分した値を  $E_{MS}$  とし、コンフリクトの発生の有無を確認した。

$$d_{i,j}^{MS} = \begin{cases} R_{MS} - d_{i,j} & (d_{i,j} < R_{MS}) \\ 0 & (d_{i,j} \geq R_{MS}) \end{cases} \quad (6-7)$$

$$E_{MS} = \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{MS} dt \quad (i < j) \quad (6-8)$$

また、航空機の方角の変化を操作量とみなし、式(6-9)に示すように方位角の変化量を数値解析時間にわたり積分した値を航空機  $i$  の操作量として計算した。そして、式(6-10)に示すように、航空機の操作量の 1 機 1 時間あたりの平均値を評価値  $E_c$  とした。

$$h_i^c = \int |\dot{\psi}_i| dt \quad (6-9)$$

$$E_c = \frac{1}{Nt} \sum_i h_i^c \quad (6-10)$$

ここで、 $N$  は航空機の総数であり、 $t$  は数値解析時間を表す。

表 6-1 数値解析パラメータ

構成機数	80	$R_{SC}$ NM	5
経済速度域, kt	450-500	経路幅, NM	15
$R_{MS}$ , NM	3	監視範囲, NM	100

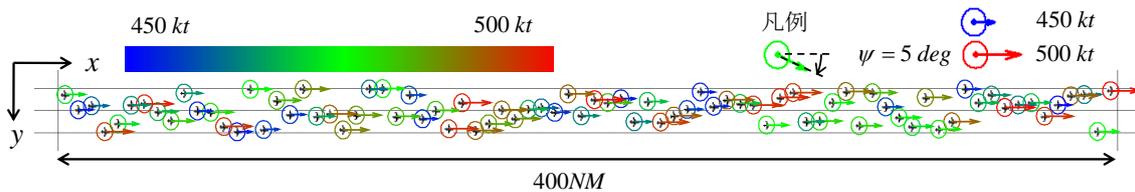


図 6-3 初期状態例

### 6.3.2 航空交通流における航空機の挙動の変化

解析結果の一例として、第 5 章に示す横位置基準の自律間隔維持アルゴリズムおよび本章において示す速度差基準の自律間隔維持アルゴリズムのそれぞれ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 6-4、図 6-5 に示す。これらは、ともに図 6-3 に示す同一の初期値より計算した結果について示している。航空機は各々の経済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。横位置基準アルゴリズムにおいては、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示される。本解析において、間隔維持による方位角の大きさを調べたところ、最大値は 13 deg であったものの、すべての航空機がほぼ 10 deg 以内の範囲で間隔の維持を行っていることを確認した。そこで、速度差基準アルゴリズムにおける操作角度の閾値は 10 deg として設定し、左右の判断を導入したアルゴリズムに対して同様の解析を行っている。左右の判断を導入した交通流では、進行方向からみて右側を高速、左側を低速の航空機が飛行している様子が示される。また、密集状況下においても、各航空機は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航空機の挙動の一例として、図 6-6 に横位置基準アルゴリズム、図 6-7 に速度差基準アルゴリズムを適用した同一時刻における各機の位置、速度を示す。図 6-6 左図に示すように、横位置基準アルゴリズムでは前方 3 機と後方 3 機の速度差が大きいことが示される。多数の航空機が左右方向に並ぶため、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 6-7 に示すように、速度差に基づく左右の判断を導入したことにより、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低減した。相対速度差が小さいことは、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のみにより間隔維持を行うことが可能となる。図 6-7 に示すように多くの航空機が集中している状況においても、すべ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ないことが示された。

評価指標に従い、50 ケースの各交通流に対して計算した評価値の平均値を表 6-2 に示す。互いの相対位置、相対速度に基づき方位角を定め、基準間隔を下回るとき、コンフリクト回避のための方位角を導入したことにより、初期値の異なる 50 ケースの解析において、安

全間隔を下回るコンフリクトは 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することにより回避対象の航空機との速度差を低減し、わずかな方位角の変化のみによる回避を行うため、方位角の操作量の評価値は 5 分の 1 程度まで大きく低減した。本解析により、安全性を損なうことなく、1 時間あたりの平均で 1 deg に満たないほど少ない操作で間隔維持を達成可能であることが示された。

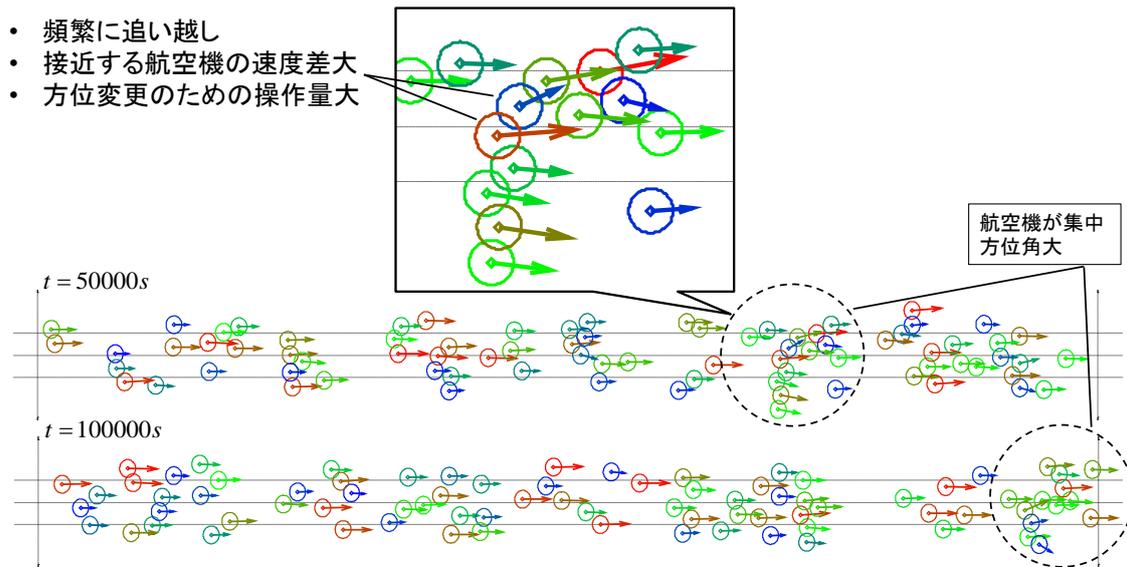


図 6-4 横位置基準アルゴリズムにおける交通流の様子

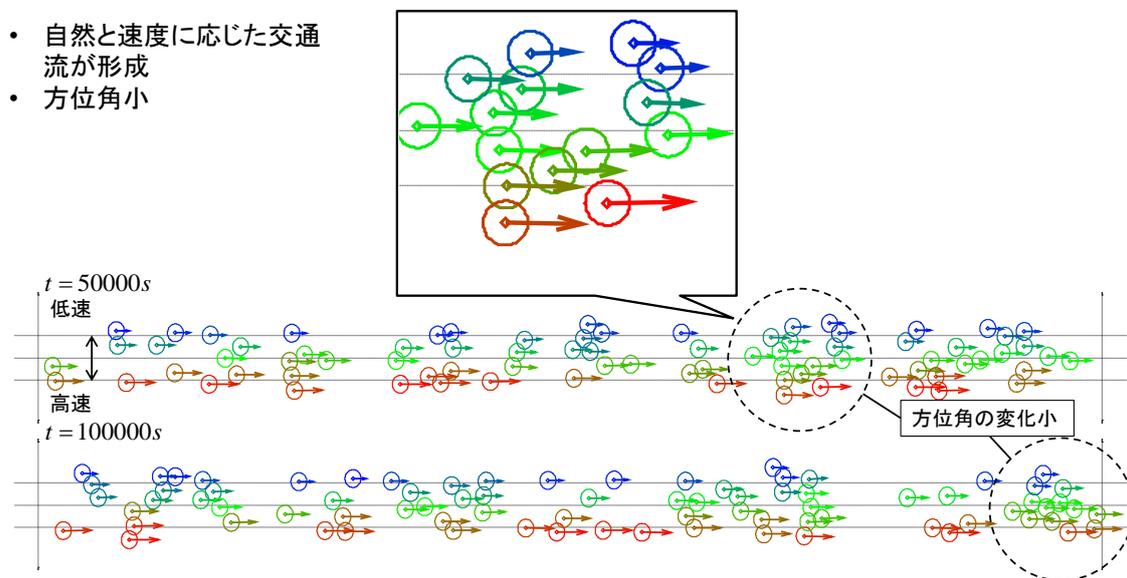


図 6-5 速度差基準アルゴリズムにおける交通流の様子

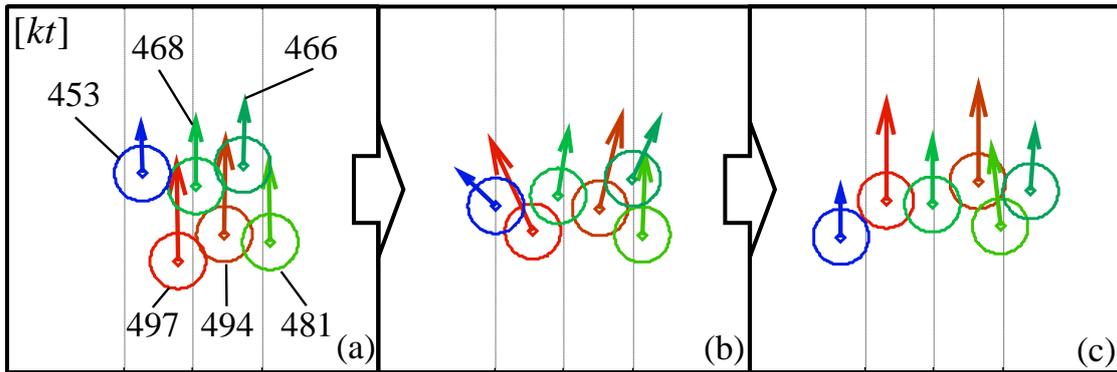


図 6-6 横位置基準アルゴリズムにおける航空機の挙動

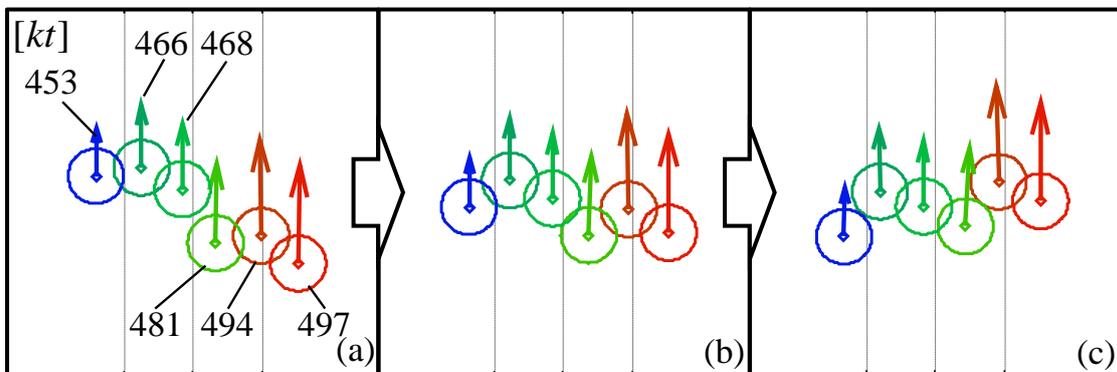


図 6-7 速度差基準アルゴリズムにおける航空機の挙動

表 6-2 50 シナリオの交通流の評価値の平均値の比較

	$E_{MS}$ , m/hour	$E_c$ , deg/hour
横位置基準アルゴリズム	0	4.51
速度差基準アルゴリズム	0	0.90

### 6.3.3 航空交通流における速度と操作量の関係性

航空機の操作量の大きな低減効果には接近する航空機間の速度差の与える影響が大きいと考えられる。そこで、計算した交通流ごとの速度のばらつきとの関係性を調べた。交通流を構成する 80 機の航空機の速度のばらつきを表す標準偏差、及び操作量の評価値の関係を図 6-8 に示す。横位置基準アルゴリズムでは、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、全体として操作量が増加する傾向がみられる。交通流を形成する航空機の速度のばらつきが大きい場合、接近する航空機の速度差が大きくなるため、これが操作量の増加につながる。速度差に基づき左右の方向を判断することにより、左から右へと速度に応じた流れが形成され、各航空機の速度に応じた位置を飛行する。これにより、航

空機の回避対象は速度の近い航空機に限定されることとなる。その結果、操作量は交通流における航空機の速度のばらつきによらずほぼ一定の値となった。このように、操作量の低減に加え、平滑化の効果も見られることを示した。

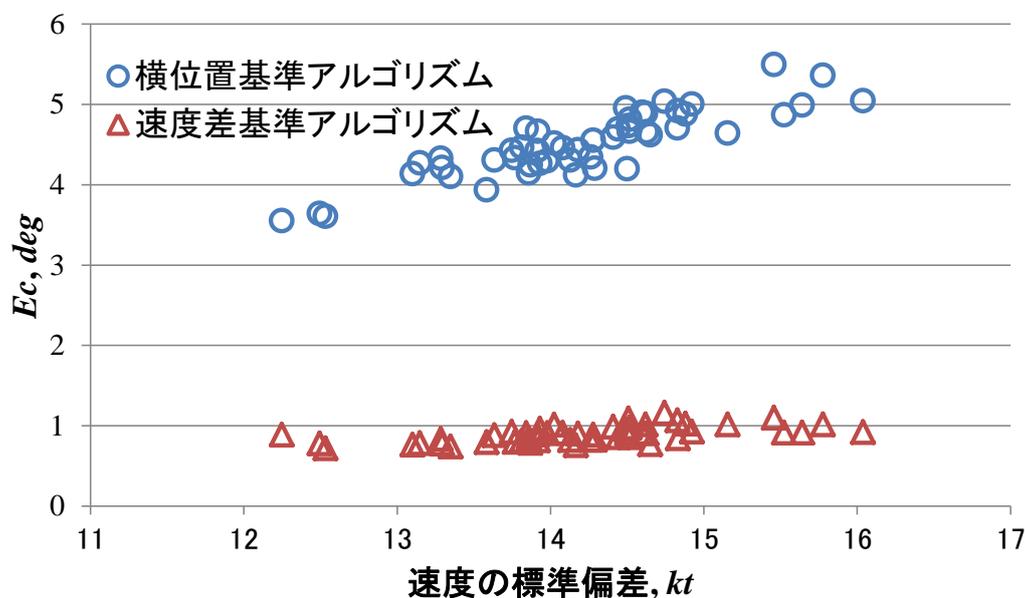


図 6-8 操作量の評価値および速度の標準偏差の関係

さらに、交通流を構成する 80 機の航空機ごとの速度と操作量の関係について比較した。ある 1 ケースの交通流を例にとり、各航空機の速度と操作量について、平均値および標準偏差を比較した結果を図 6-9 に示す。また、選択した交通流における速度の平均値、ばらつき、および評価値を表 6-3 に示す。横位置基準アルゴリズムでは、平均速度近傍で飛行する航空機の操作量が低く、平均速度から離れた速度で飛行するほど操作量が増加する傾向が見られた。これまでに示したように、接近する航空機間の速度差が航空機の操作量に大きく影響する。本解析では、最高、あるいは最低速度で飛行する航空機とその回避対象の航空機との速度差は最大で約 50 kt となる。これに対し、平均速度で飛行する航空機と、回避対象となる航空機との速度差は最大でも 25 kt である。そのため、平均から外れた速度で飛行するほど操作量が増加し、危険性も増加する傾向にある。これに対し、速度差に基づく左右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、操作量は低減し、そのばらつきも抑え、自機の飛行速度によらず、ほぼ一定値に抑えた。

表 6-3 サンプルシナリオにおける評価値

	速度, kt		操作量, deg/hour	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
横位置基準 アルゴリズム	475.25	14.83	4.92	1.36
速度差基準 アルゴリズム			0.85	0.23

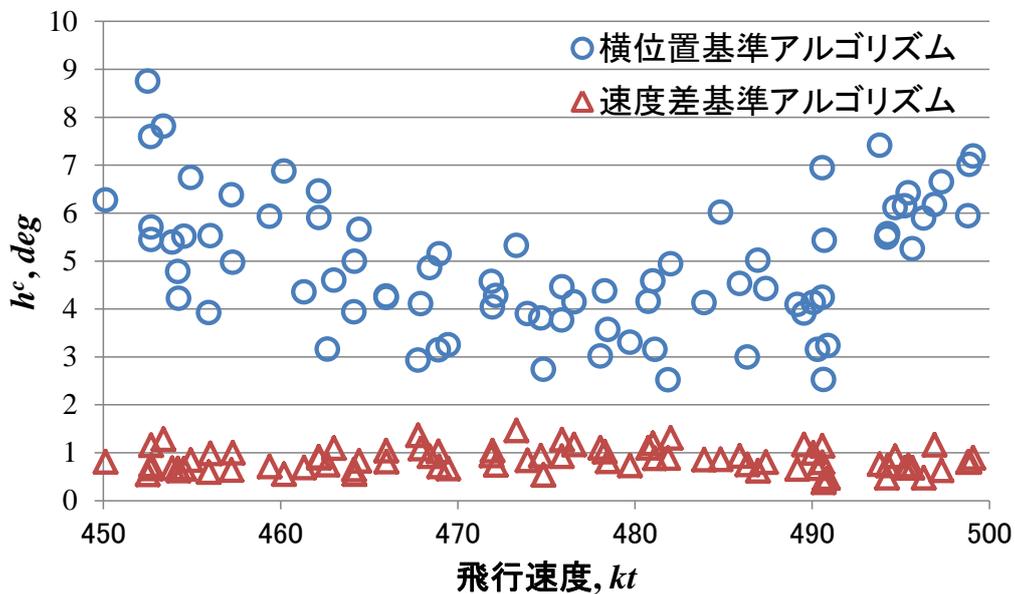


図 6-9 操作量の評価値および飛行速度の関係

#### 6.4 まとめ

速度差に基づく自律間隔維持アルゴリズムによる交通流の評価を行った。航空機の横位置に基づき各航空機の方角を定める横位置基準アルゴリズム、および速度差に基づき回避方向を定める速度差基準アルゴリズムの2種類のアルゴリズムに対して数値解析を行い、各アルゴリズムに従う航空機により形成される交通流の様子を調べた。接近する航空機と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ため、横位置基準アルゴリズムにおいては、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間隔維持に多くの操作が必要であることを示した。一方で、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、安全性を損なうことなく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、操作量の大幅な低減に加え、飛行速度やそのばらつきによらず操作量を平滑化する

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、すべての航空機が等しく公平にその便益を享受することが望ましい。横位置基準アルゴリズムを適用した交通流においては、航空機の飛行速度により操作量に差が生じることが示され、このようなアルゴリズムでは、航空機の経済速度の違いにより一部の航空機が多く、この操作を必要とする結果となる。一方で、フローコリドー内部の交通流に類似する速度ごとのグループを形成することにより、航空機の操作量が低減され、かつ平滑化された。これは、フローコリドー内部の航空機がより少ない操作のみにより間隔維持を達成するだけでなく、経済速度の差異によらずに等しくその便益を享受することが可能であることを示すものであり、公平な交通流の実現に寄与するものと考えられる。

## 7 空域制限を遵守する自律間隔維持

### 7.1 空域の遵守の必要性

冒頭で述べたように、フローコリドーでは交通需要の高い経路に沿って専用空域を設定し、その内部をすべての航空機が同一方向へ飛行することが想定される。前章では、高密度一方向交通流における自律間隔維持アルゴリズムとして、航空機が各々の経済速度で飛行することを仮定し、相対位置、相対速度に基づき方位角を定めるアルゴリズムを構築した。さらに、速度差に基づき回避方向を指定することにより、類似した速度の航空機がほぼ同一の経路上を飛行する交通流が形成され、操作量の低減かつ平滑化の効果がみられることを示した。これらは空域の制限を考慮していないが、実運航において空域は有限であり、フローコリドーのために割り当てられた一部の空域内部で運航することが必要不可欠である。そのため、限られた空域の範囲を逸脱することなく、航空機は互いの間隔維持を行うことが必要である。そこで、空域の制限として定めた有限の幅のコリドーを逸脱することなく、間隔維持を達成するためのアルゴリズムを新たに検討する。図 7-1 に示すように、専用空域として単純な直線の帯状空域を仮定し、各航空機は周辺の航空機の動態情報に基づき自律的な間隔維持を行うこととする。間隔の維持には、これまでの解析と同様に方位角の変更を利用する。一方で、限られた空域の内部では、方位角の変更では間隔の維持が不可能となることが容易に想像できるが、航空機の色度を調整することにより、空域制限の遵守と間隔維持が同時に可能になるものと考えられる。次節において、方位角、および速度のアルゴリズムについて述べる。

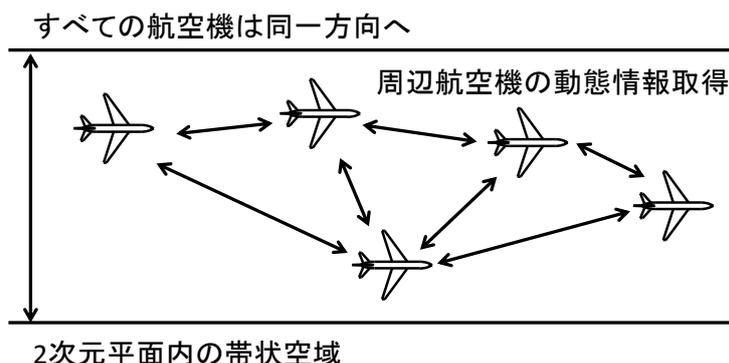


図 7-1 帯状空域内部における自律間隔維持

### 7.2 空域の遵守を考慮した自律間隔維持アルゴリズム

高密度なコリドー内部の交通流においては、航空機の色度に基づいて回避方向を指定することにより、自然と飛行速度の近い航空機群がほぼ同一の経路を飛行することとなり、その結果として操作量の低減効果が見られた。そこで本アルゴリズムにおいても、速い航

空機は右側から追い越しを行い、遅い航空機は左側に寄ることとする。すべての航空機が同一方向へ飛行する交通流においては、自機との横間隔が基準間隔を下回り、前方かつ低速、あるいは後方かつ高速の航空機に対して、間隔維持のための操作が求められる。航空機のロール角および加速度は以下の式で表現する。

$$\varphi_i = \alpha_1 (\Psi_i' - \psi_i) \quad (7-1)$$

$$a_i = \alpha_2 (V_i' - V_i) \quad (7-2)$$

ここで、 $\Psi_i'$  および  $V_i'$  は目標方位角及び目標速度を表しており、これらの値に追従させるようにロール角および加速度を与えることとする。目標値は周辺航空機の情報を利用してこれらを定めるものとする。

本アルゴリズムでは、接近までの時間が最も短い航空機を回避対象として回避操作を行う。これまでのアルゴリズムと同様の考えに基づき、図 7-2(a)に示すように、接近した 2機の航空機が互いに方位を変更することにより間隔維持を行うものとする。一方で、指定された空域を遵守する場合、同図(b)に示す位置関係においては、航空機 C は指定空域端の間際を飛行しており、左方向への回避は不可能である。このような状況において、航空機 B が航空機 A とのコンフリクトを回避するために左方向へ方位角を変更すると、航空機 B と C の間でコンフリクトが発生することとなる。そのため、航空機 B は左側への回避を行うべきではなく、航空機 A のみが方位角を変更することにより回避すべきである。このように空域の遵守を考慮した場合には、方位角の変更に伴うコンフリクトが生じない範囲のみで方位角を変更すべきであると考え、制限角度を導入し、その範囲内で間隔維持を試みる。

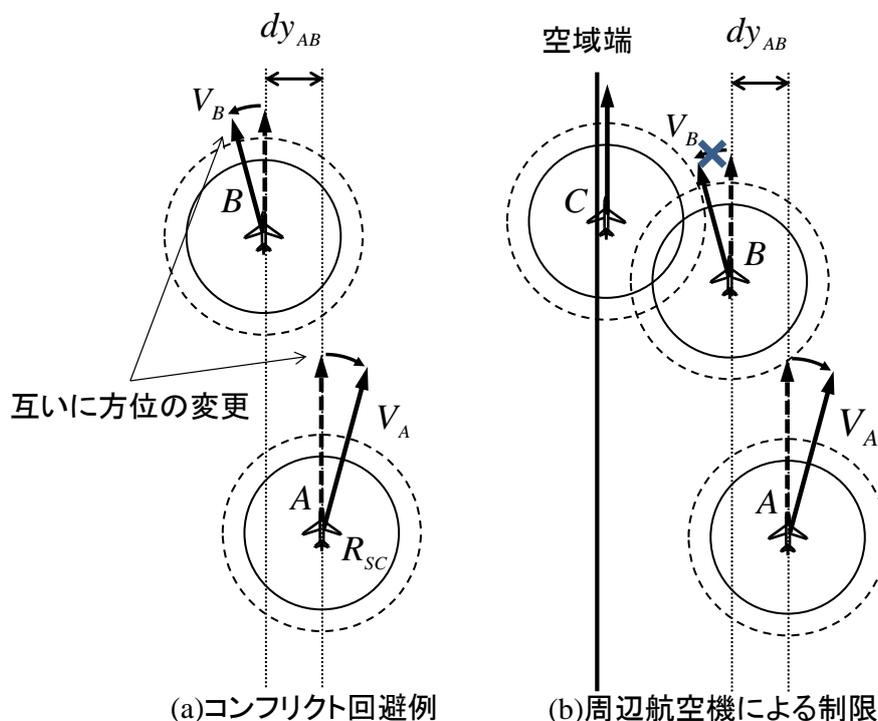


図 7-2 コンフリクトの回避例

まず、図 7-3 に示す位置関係の 2 機の航空機 A、B が飛行している状況を例にとり、最小限の操作による回避を達成する操作角度を算出する。この時の角度を  $\mu$  とおくと、以下の式により求められる。

$$\frac{dy_{A,B}^{tp}}{V_A \sin \mu} = \frac{dx_{A,B}^{tp}}{V_A \cos \mu - V_B} \quad (7-3)$$

$$\mu = \sin^{-1} \left( \frac{dy_{A,B}^{tp}}{\sqrt{dy_{A,B}^{tp\ 2} + dx_{A,B}^{tp\ 2}}} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{dx_{A,B}^{tp}}{\sqrt{dy_{A,B}^{tp\ 2} + dx_{A,B}^{tp\ 2}}} \frac{V_B}{V_A} \right) \quad (7-4)$$

ここで、 $dx_{A,B}^{tp}$ 、 $dy_{A,B}^{tp}$  はそれぞれ航空機 A から B を中心とした半径  $R_{SC}$  の円へ引いた接線の接点までの x 軸、y 軸に沿った距離を表す。式(7-3)は航空機 A が接点に到達するまでの時間についての関係式であり、左辺は左右、右辺は前後方向の距離を相対速度で除したものである。これを角度  $\mu$  により整理すると式(7-4)が得られる。航空機 A が方位角を  $\mu$  に変更することにより、基準間隔を維持しつつ追い越しを行うことが可能となる。

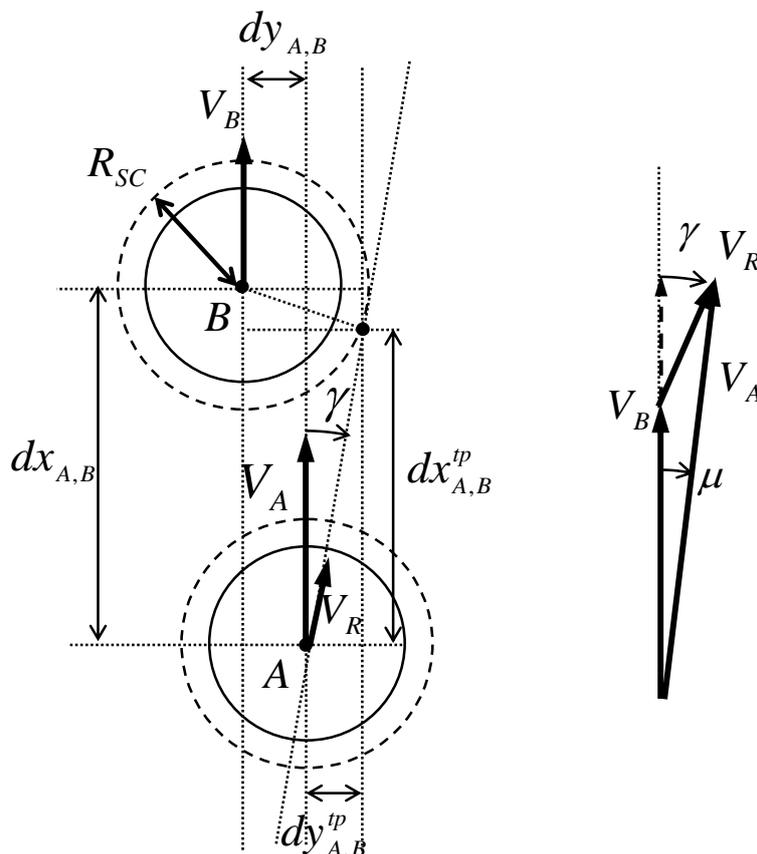


図 7-3 最小限の操作による回避を達成する方位角

一方で、図 7-3 に示す航空機 A に対する航空機 B のように、回避を行うべき対象となる航空機との横間隔を確保するためには最大で基準間隔分の左右への移動が伴うため、これにより横間隔が基準間隔の 2 倍の範囲内を飛行する別の航空機と接近する可能性が生じる。

図 7-4 に一例として、航空機 A の右側前方に航空機 C が飛行する状況を示す。ここでは、航空機 A および C の間の横間隔は確保されているため、互いが直進すれば安全に追い抜くことが可能である。しかし、A が他の航空機からの回避のために右方向へ方位の変更を行えば A と C が接近することとなり、C が急な回避操作を強いられることとなる。方位角の変更に伴い他機に操作を強いることは更なる危険の要因となり、また図 7-2 に示すように航空機 C が方位角の変更ができない状況であればコンフリクトが避けられないこととなるため、本研究では他の航空機の飛行を妨げない操作範囲を指定する制限角度を導入する。基準間隔を維持しつつ C の左側から追い越しを達成する角度を  $H_{ulim}$  とおくと、上記と同様の考えに基づき以下の式で与えられる。

$$\frac{dy_{A,C}^{up}}{V_A \sin H_{ulim}} = \frac{dx_{A,C}^{up}}{V_A \cos H_{ulim} - V_C} \quad (7-5)$$

$$H_{ulim} = \sin^{-1} \left( \frac{dy_{A,C}^{up}}{\sqrt{dy_{A,C}^{up^2} + dx_{A,C}^{up^2}}} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{dx_{A,C}^{up}}{\sqrt{dy_{A,C}^{up^2} + dx_{A,C}^{up^2}}} \frac{V_C}{V_A} \right) \quad (7-6)$$

A が  $H_{ulim}$  以内の角度で操作を行う限り、C の交通を乱すことはないと考えられる。範囲内に複数の航空機が飛行する場合、すべての航空機に対して  $H_{ulim}$  を算出し、その最小値を制限角度として採用する。

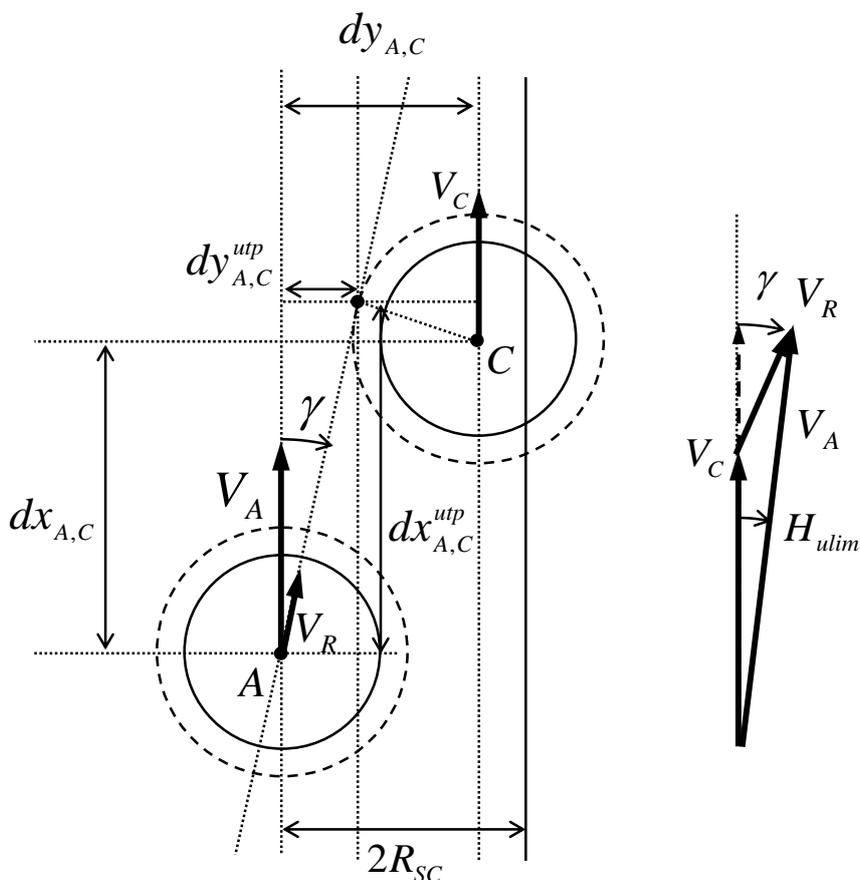


図 7-4 左からの追い越しのための制限角度

また、図 7-5 に示すように、航空機 C の右側から追い越しを行う角度も同様に計算可能である。これを  $H_{olim}$  とおき、これまでと同様の考えに基づき計算すると、以下の式により記述できる。

$$\frac{dy_{A,C}^{otp}}{V_A \sin H_{olim}} = \frac{dx_{A,C}^{otp}}{V_A \cos H_{olim} - V_C} \quad (7-7)$$

$$H_{olim} = \sin^{-1} \left( \frac{dy_{A,C}^{otp}}{\sqrt{dy_{A,C}^{otp^2} + dx_{A,C}^{otp^2}}} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{dx_{A,C}^{otp}}{\sqrt{dy_{A,C}^{otp^2} + dx_{A,C}^{otp^2}}} \frac{V_C}{V_A} \right) \quad (7-8)$$

航空機 A が  $H_{olim}$  以上の方位角で飛行するとき、C と基準間隔以上の間隔を維持しつつ安全に追い越しが可能であると考えられる。複数の航空機に対しては、それぞれの航空機に対して  $H_{olim}$  を算出し、その最大値を制限角度として採用することとする。航空機 A は  $H_{olim}$  以内または  $H_{olim}$  以上の範囲の方位角で飛行することにより、現時点において横間隔が確保されている周辺航空機との間隔を基準間隔以上に維持することが可能となる。

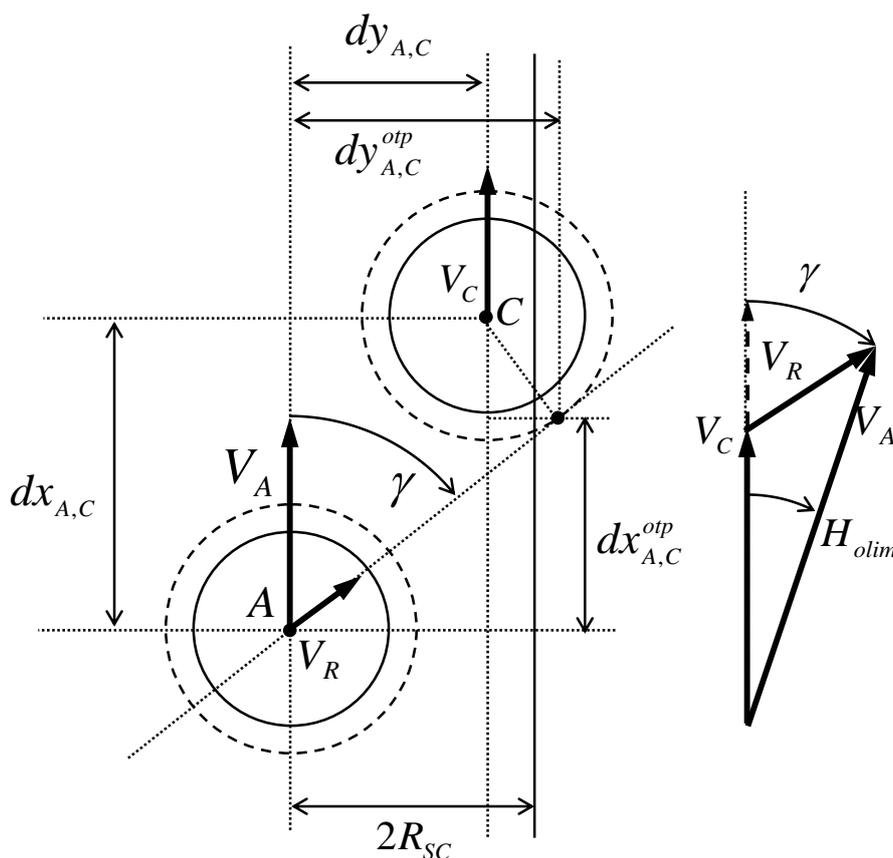


図 7-5 右側からの追い越しのための制限角度

これまでに、周辺航空機に対する間隔維持における制限角度を導入したが、方位角の変更は限定された空域の内部で達成されなければならない。そこで、空域を逸脱しないため

の制限角度  $H_w$  を導入する. 第 5 章で示した自律間隔維持の数値解析では, すべての航空機は 10 deg 以内の操作により間隔維持を達成した. そこで, 10 deg を上限とし, 空域の端からの距離による関数として制限角度  $H_w$  を定義した. 概要図を図 7-6 に示し,  $H_w$  は以下の式で与える.

$$H_w = \min(10, \alpha_3(dy_{edge} - y_i)) \quad (7-9)$$

すべての航空機は,  $H_w$  以内で方位角を設定することとする.

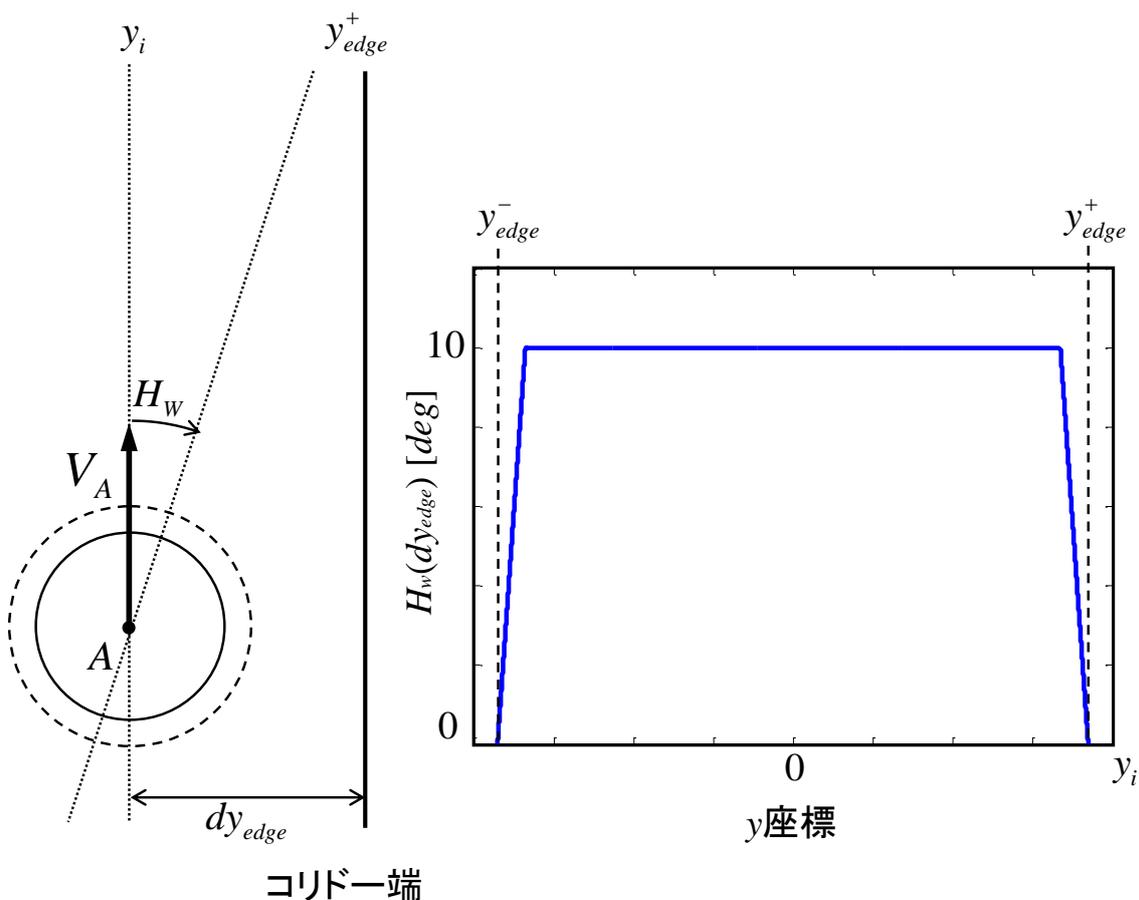


図 7-6 空域を逸脱しないための制限角度

以上に示したように, 横間隔が基準間隔以内の接近する航空機に対して予想されるコンフリクトの回避を達成するための方位角, 自機周辺 (横間隔  $dy < 2R_{sc}$ ) を飛行する航空機の飛行を妨げないための制限角度, および空域を逸脱しないための制限角度を導入した. これらの角度から, 方位の変更による回避が可能である条件は以下の式により与えられる.

$$H_{olim} \leq \mu \leq H_w \quad (7-10)$$

$$\mu \leq \min(H_{ulim}, H_w) \quad (7-11)$$

コンフリクト回避のための方位角  $\mu$  が上式のいずれかを満たす場合, 航空機は方位角の変

更により回避を行う。このとき可能な最大方位角を航空機  $i$  の目標方位角  $\Psi'_i$  として設定する。一方で、式(7-10), (7-11)のいずれも満たさないときは方位の変更による追い越しが不可能であるとみなし、速度の変更により前後方向の間隔を維持するものとする。回避対象機を航空機  $j$  としたとき、航空機  $i$  の目標速度  $V'_i$  を以下の式により設定した。

$$V'_i = \frac{\sum_{k=1}^N V_k}{N} \quad (7-12)$$

ここで、 $N$  はコンフリクトが予想される航空機の数である。コンフリクトが予想される航空機とは、横間隔が基準間隔に満たない航空機のうち、前方かつ低速、あるいは後方かつ高速の航空機である。つまり、回避対象が前方の低速機であり、追い越しが困難であるときは減速、後方の高速機に対しては加速することとなる。また、前後ともに基準間隔を下回り接近した航空機が存在する場合には、コンフリクト回避のために前方の航空機の速度に合わせることにした。

以上をまとめると、空域を逸脱せず、左右を飛行する航空機を乱さない範囲で方位の変更による間隔維持を試み、不可能な場合にのみ速度の調整による間隔の維持を行うこととする。また、基準間隔を下回る航空機に対してはそれ以上の接近を防止するための操作を行う。すべての航空機が同様の判断基準に基づいて操作を行うこととなる。

## 7.3 数値解析

### 7.3.1 数値解析条件

数値解析に利用する各種パラメータを表 7-1 に、解析による航空機の表示例を図 7-7 に示す。ここで、各航空機を囲む円の半径は基準間隔を表し、円の色により航空機の経済速度を表す。また、減速して経済速度未満の速度で飛行している航空機は太い点線、加速して高速で飛行している航空機は太い実線で表現する。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帯状空域内部の無作為な位置を与える。20 機の航空機により構成される交通流を扱い、各航空機の経済速度を 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 とした。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、初期値の異なる 30 ケースの計算を行った。また、10, 20, 30 NM の 3 種類の異なる幅の帯状空域を設定し、それぞれに対して同一の初期条件より計算を行った。本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に長時間の数値解析を行い、それぞれの初期値に対して約 100,000 秒間にわたる各航空機の挙動を計算した。

表 7-1 数値解析パラメータ

構成機数	20
経済速度域, kt	450-500
安全間隔, NM	3
基準間隔, NM	5
$\alpha_1$	1
$\alpha_2, 1/s$	$1 \times 10^{-2}$
$\alpha_3, rad/m$	$1 \times 10^{-4}$

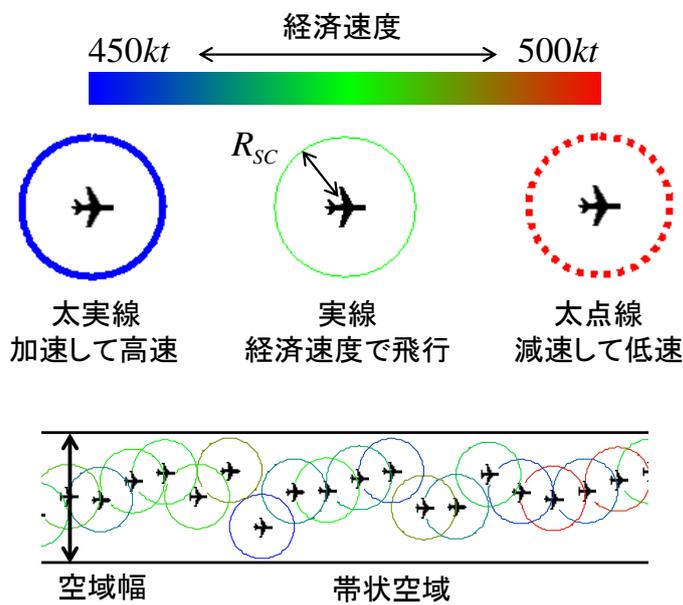


図 7-7 数値解析における航空機の表現

### 7.3.2 評価指標

交通流の評価として、経済速度からのずれ、速度および方位角の操作量を比較した。経済速度で飛行することが最も望ましいと考えられ、速度調整による影響としてはスケジュールからの時間のずれや、異なる速度で飛行することによる燃費の悪化等が考えられる。ここでは簡易的な指標の一つとして、航空機  $i$  の経済速度を  $V_i^o$  とし、経済速度からのずれを  $E_{vi}$  と定義し、以下の式により計算した。

$$E_{vi} = \int |V_i^o - V_i| dt \quad (7-13)$$

また、より少ない操作による間隔維持が望ましいといえる。そこで、操作量の指標として、航空機  $i$  の方位角の変化量、速度の変化量をそれぞれ  $E_{whi}$ 、 $E_{wvi}$  と定義し、以下の式により計算した。

$$E_{whi} = \int |\dot{\psi}_i| dt \quad (7-14)$$

$$E_{wvi} = \int |\dot{V}_i| dt \quad (7-15)$$

### 7.3.3 数値解析結果

解析結果の一例として、空域幅が 10~30 NM のそれぞれの帯状空域における交通流の挙動を図 7-8 に示す。ここに示すすべての交通流は同一の初期条件より計算しており、初期位置から 18,000, 36,000 秒間飛行した航空機の位置関係を表している。

空域幅が 10 NM の帯状空域内部の高密度な交通流においては、航空機が並走し、後続の航空機が追い越しを行うことができず、時間の経過により解除されない状態（これをデッドロックと呼ぶこととする）となっている。デッドロックの発生により、航空機は本来飛行したい速度で飛行することができず、デッドロックの発生地点を飛行する航空機群と同じ速度で飛行することとなる。図 7-9 に 1 機 1 時間あたりの速度ずれ  $E_V$  の平均値の比較結果を示す。コリドー幅が狭い場合、一度デッドロックが発生すると、そこがボトルネックとなるため追い越しを行うことができず、経済速度と異なる速度で飛行せざるを得ない状況となる。これにより、10NM 幅のコリドーでは評価値が最も大きくなっている。図 7-10 には操作量の評価値の平均値を示すが、デッドロックの発生により操作が不可能となるため、操作量は低くなる。20NM 幅の空域においても、間隔維持のための加減速を行うことにより密度が高い箇所が示されている。本解析の条件においては、20NM 幅のコリドー内部では並行して 5 機まで飛行可能であり、図 7-8 に示す 20NM 幅の交通流の例においてデッドロックは発生しておらず、時間の経過により後続機が追い越しを達成している。デッドロックが発生していないために速度ずれの評価値  $E_V$  は 10NM 幅の 1/10 程度にまで低減された。一方で、図 7-10 に示す操作量は 3 種類の経路幅の解析において、方位、速度ともに最大の値となった。限られた幅でデッドロックに陥らずに追い越しを行うためには、接近する航空機が互いに操作を行うことにより横間隔を確保することが必要である。30NM 幅の空域においては、20NM 幅の結果と比較すると、図 7-9 に示す速度ずれの評価値はさらに 7 割程度低減され、図 7-10 に示す操作量も共に低減した。30NM 幅では、追い越し操作に伴い若干の加減速操作が求められるものの、速やかに横間隔を確保し、経済速度で飛行することが可能となった。

デッドロックの発生における航空機の速度との関係を調べるために、10NM 幅コリドーにおける交通流のうち (a), (b), (c) の 3 例における経済速度と評価値の関係を図 7-11 に示す。ボトルネックとなる航空機の速度は交通流の初期条件により異なり、(a)ではほぼ経済速度の航空機がボトルネックとなっているが、(c)のように平均速度で飛行する航空機群によるデッドロックの発生も確認された。特に、(a)のように最低速度の航空機がボトルネックとなるケースにおいては、ほぼすべての航空機が希望する速度と異なる速度で飛行せざるを得ない状況になる。その結果、より速い速度で飛行したい航空機ほど大きな速度ずれが生

まれることとなり, (a)の例においては, 単純に1時間あたりの時間遅れとして計算すると, 最高速度(約500kt)で飛行予定の航空機は約5分半遅れてしまうこととなる. 以上のことから, デッドロックの発生は回避すべきものであるとともに, 互いが適切に加減速を行うことが必要である.

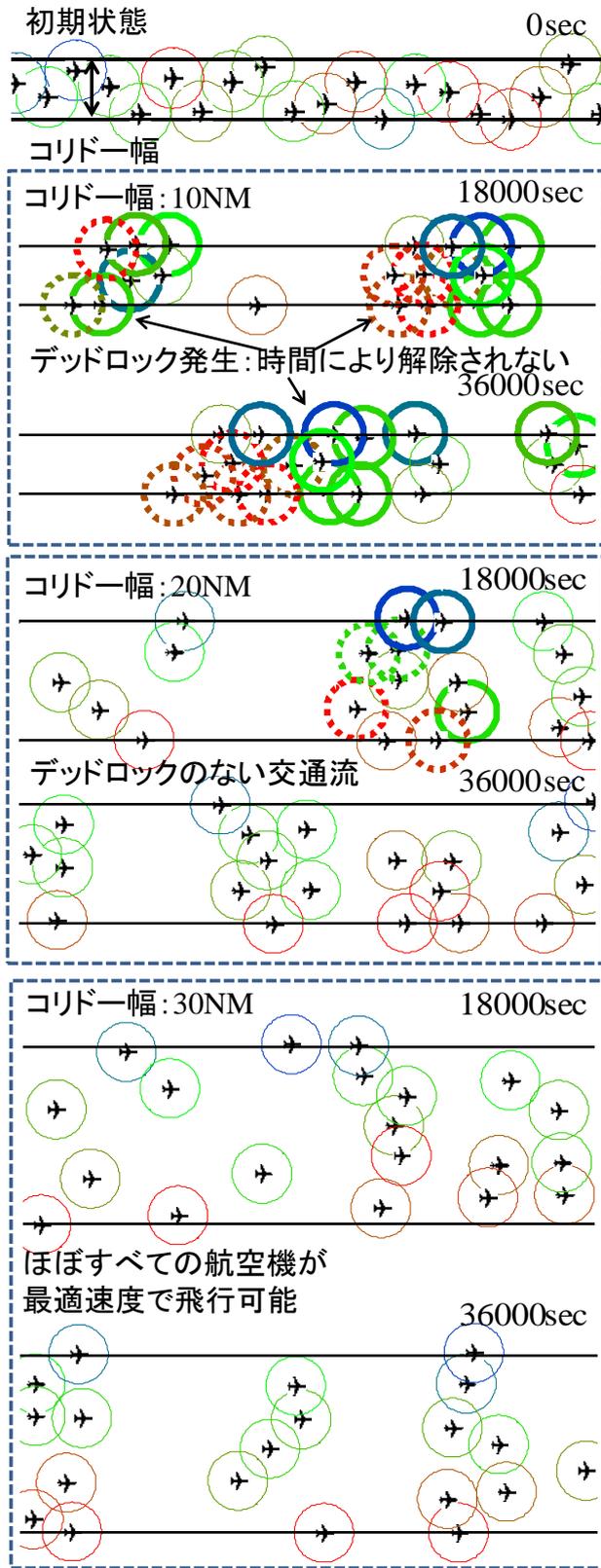


図 7-8 幅の異なる带状空域における高密度交通流

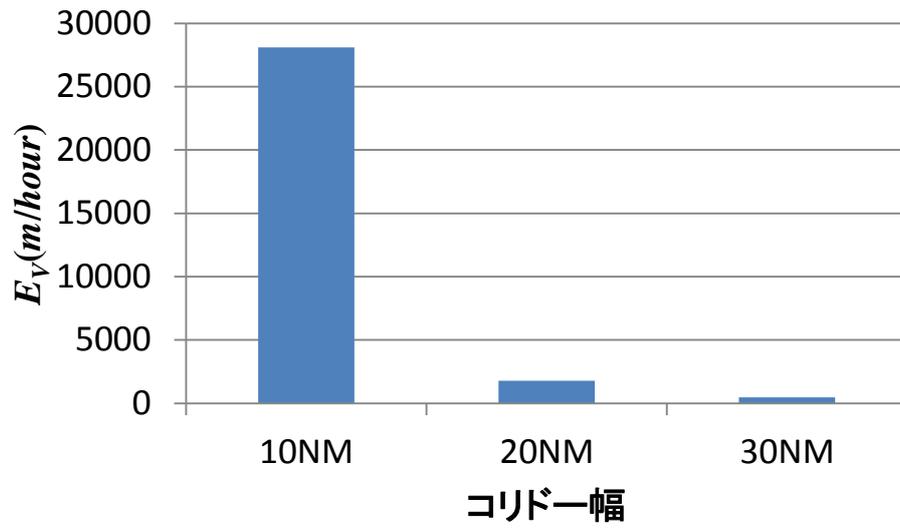


図 7-9 速度ずれの比較

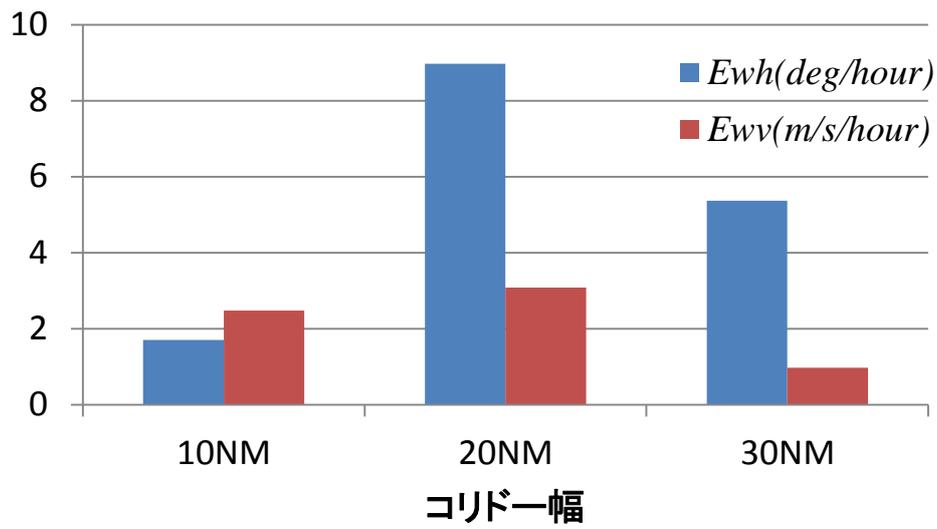


図 7-10 平均操作量の比較

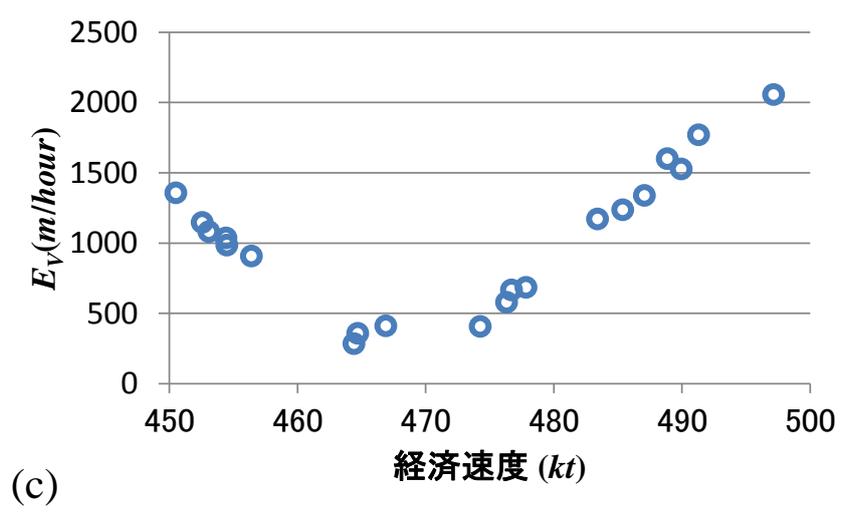
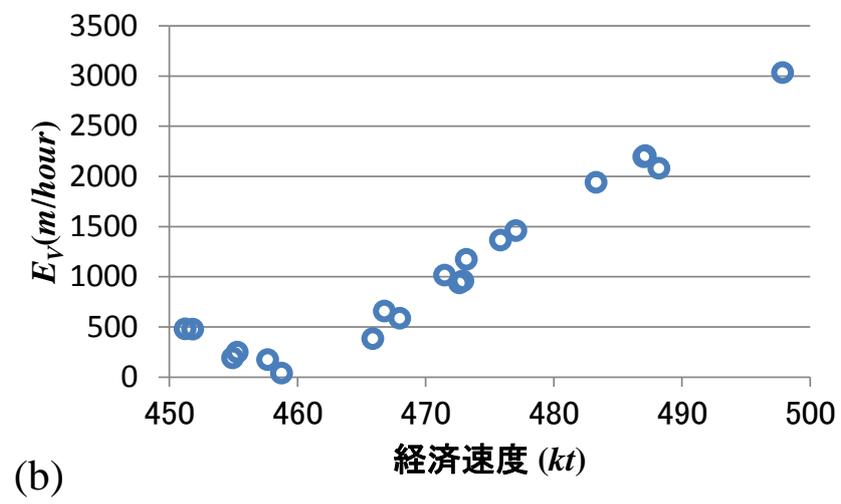
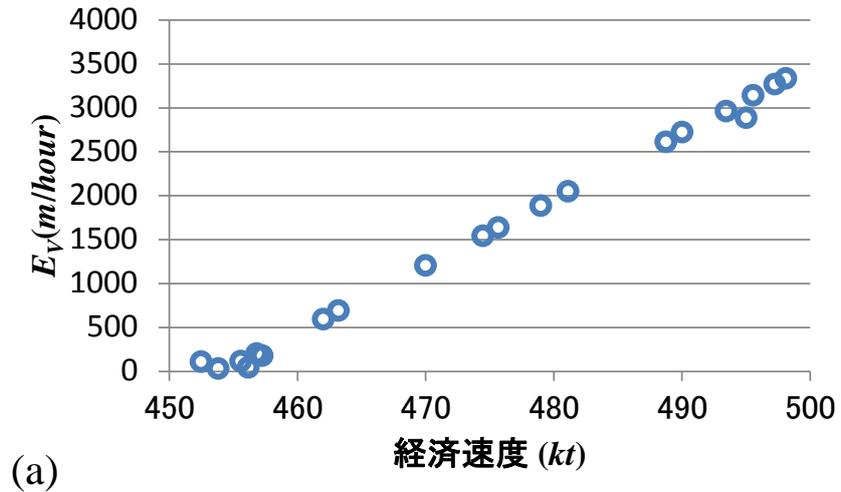


図 7-11 デッドロック発生時における速度ずれの分布

## 7.4 運航効率改善の検討

### 7.4.1 副経路および経済速度情報の活用

前節に示す解析では、10NM幅のコリドーにおいてデッドロックが発生することが示された。図 7-12 に主なデッドロック要因を示す。幅 10 NM かつ基準間隔が 5 NM であれば、最大 3 機まで並行して飛行することが可能である。しかし、本解析では、各航空機が周辺を監視しつつ基準間隔を維持するように飛行する。このとき、要因 I に示す位置関係のように、航空機が密に並ぶケースがあり、左右、前後ともに調整不可能となる。一方、要因 II に示す位置関係では横間隔が確保できているため、追い抜きが可能である。ここで空域内部に 3 本の経路を仮定したとき、同一の経路を飛行する航空機群の速度は上から  $V_{line}^1$  (A, B の平均速度),  $V_{line}^2$  (C の速度),  $V_{line}^3$  (D, E の平均速度) となる。互いの速度差が大きいとき、追い抜きを達成することとなり、デッドロックは発生しないが、速度差が同一であれば時間の経過によって位置関係が変化しないためデッドロックとなる。また航空機が経済速度で飛行し続けるためには、コンフリクトが予想される航空機が互いに操作を行い、横間隔を確保しなければならず、そのための空間が必要となる。要因 II のケースでは、C が離れば 1 機分の余裕が生まれるが、A や E との前後間隔が広がった場合でも、B や E が存在する限り方位の変更は不可能である。互いの速度差が小さい場合、追い抜きを達成する前に前方或いは後続の航空機が集団に吸収され長い列となる。多くの航空機が集中する状況においては要因 I のケースに陥ることとなる。

そこで、デッドロックの防止のために、図 7-13 に示すようにコリドー内部へ副経路の導入を試みた。ここで、副経路間の間隔は基準間隔とした。航空機は副経路上を飛行するものとし、コンフリクトが検出された場合には他の副経路へと経路を変更するものとする。副経路上を飛行する限り、異なる副経路上を飛行する航空機との横間隔は確保されることとなり、図 7-13 の要因 I に示す状況へ陥ることを防止する。さらに、経済速度情報を新たに活用する。前節までに示したアルゴリズムにおいては、周辺航空機の現時点での速度のみを利用して回避操作を行っている。つまり、ある航空機の監視範囲内に速度調整中の航空機が入り、その航空機に対して回避操作を行う場合、その時点の互いの速度に基づき回避操作が決定されることとなる。これにより、本来飛行したい速度と著しく異なる速度で飛行するケースや、経路の変更により互いが経済速度で飛行することが可能であるにもかかわらず、現時点の変更中の速度ではコンフリクトが予想されないために回避操作が行われないといったケースがみられた。互いの最適速度情報を利用することにより、より適切に回避操作を決定することができ、接近した航空機が互いに操作を行い、より円滑な交通流を実現可能になるものと考えられる。

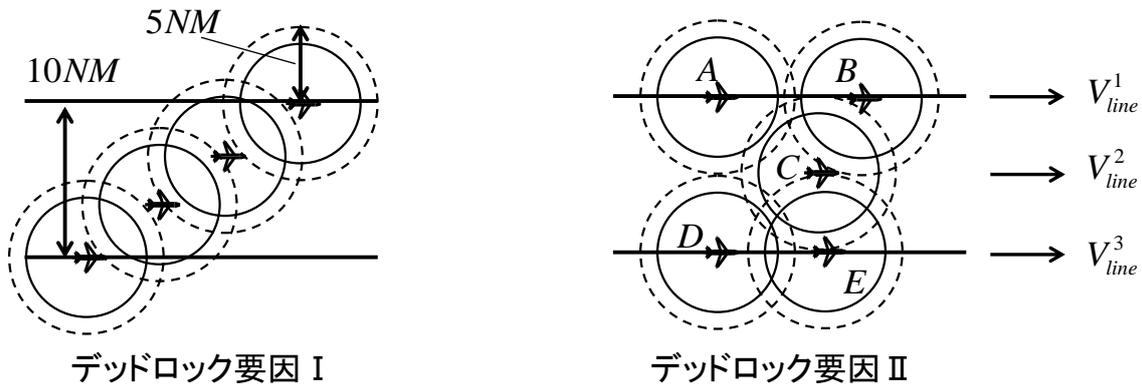


図 7-12 主なデッドロック要因

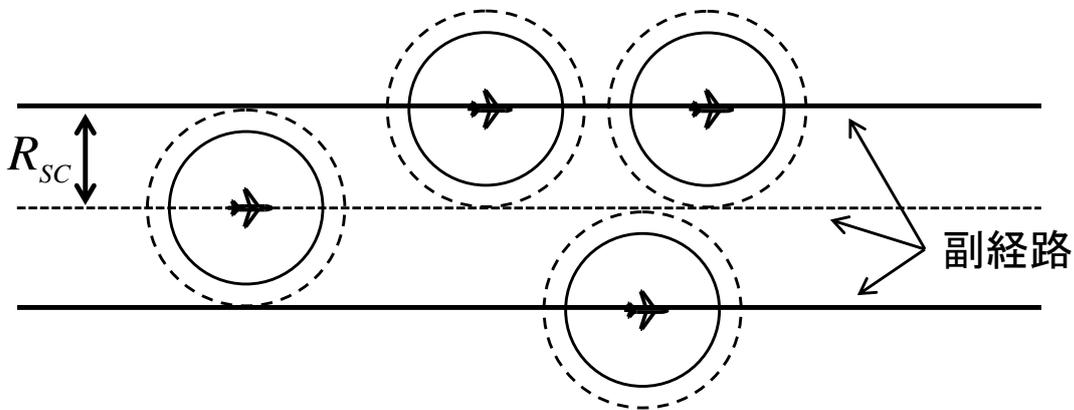


図 7-13 副経路の導入

#### 7.4.2 数値解析結果

解析結果の一例として、図 7-8 に示した交通流と同様の初期値より計算した航空機の挙動を図 7-14 に示す。本解析の結果において、航空機は経済速度情報を参照しつつ副経路上を飛行することとなる。結果として、10NM 幅のコリドーの内部においてもデッドロックが発生せず、追い越し操作を完了することが可能となった。より幅の広いコリドーに対しては、前節における解析と同様に多くの航空機が経済速度で飛行することが可能である。図 7-15、図 7-16 に評価値の計算結果を示す。比較のため、前節に示す解析結果もあわせて表示している。ここで、original は前節のアルゴリズム、revised は副経路および経済速度情報を適用したアルゴリズムにおける解析結果を表す。10NM 幅のコリドーの解析結果から、副経路および経済速度の利用によりデッドロックが解消され、速度ずれは大幅に低減し、また操作量が増加したことが示される。さらに、20NM、30NM 幅のコリドーの解析結果より、速度ずれ、操作量の評価値がいずれも低減されていることが示されている。指定された空域幅の内部を各航空機が自由に飛行する場合、ある航空機対がコンフリクトを回避するために最小限の操作で互いの横間隔を広げることが可能である。一方で、追い越しを行うた

めには横間隔を基準間隔以上に広げる必要があるため、高密度な交通流においては頻繁に横間隔の確保のための操作が求められる。副経路を定めることにより、コンフリクトの検出は同一の経路を飛行する航空機のみ限定されるため、操作量が低減すると考えられる。

また、図 7-11 に示したデッドロックが発生した交通流と同様の 3 ケースの初期値より計算した経済速度と速度ずれの評価値の関係を示す。現在の速度のみを参照した間隔維持においてはデッドロックが発生し、このとき本来の速度と大きく異なる速度で飛行しなければならない。一方で、副経路および経済速度の利用により、10NM 幅のコリドーにおいても、デッドロックの発生の防ぐことが可能であることを示した。さらに、経済速度情報を利用することにより、速度調整により本来飛行したい速度と異なる速度で飛行している航空機と接近した航空機が適切に加減速を行うことが可能となり、評価値の大幅な低減効果に加え、操作量の偏りを低減した。

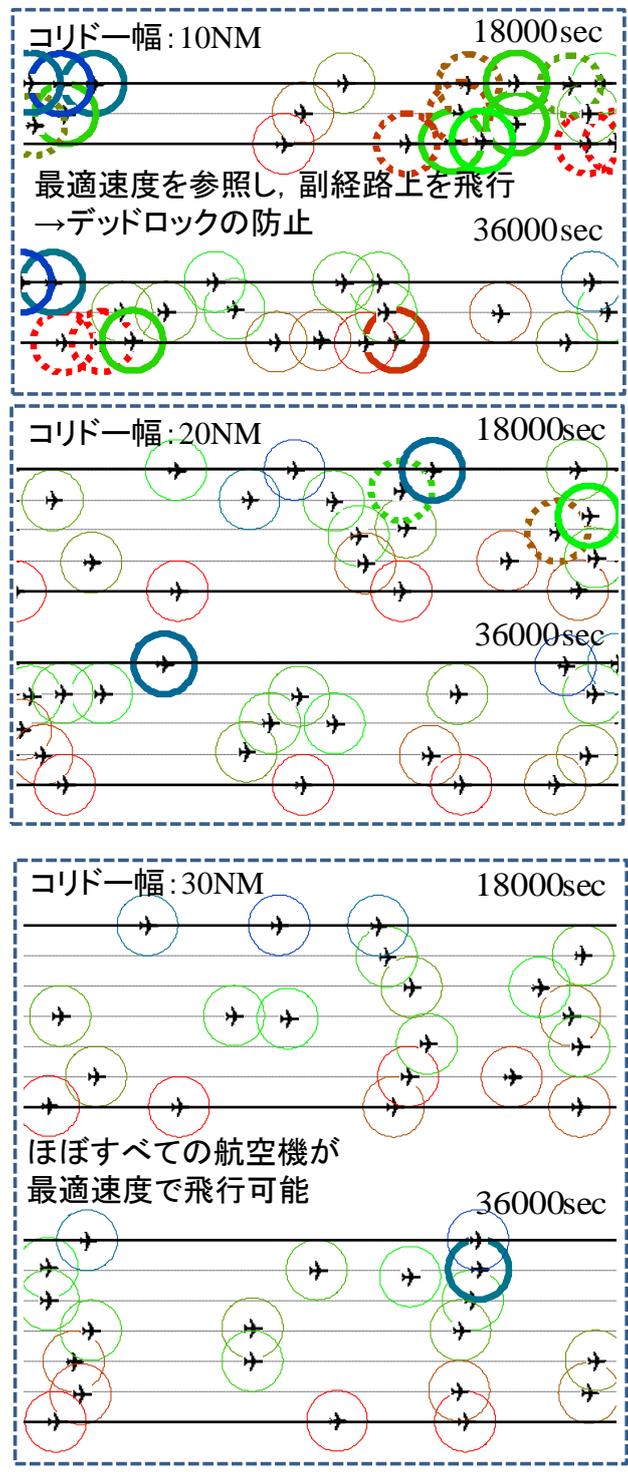


図 7-14 副経路および最適速度を導入した交通流

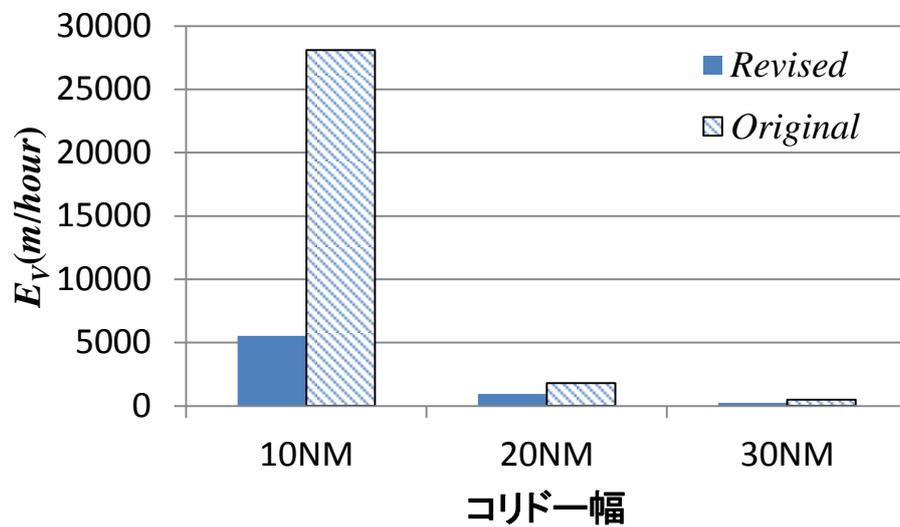


図 7-15 速度ずれの比較

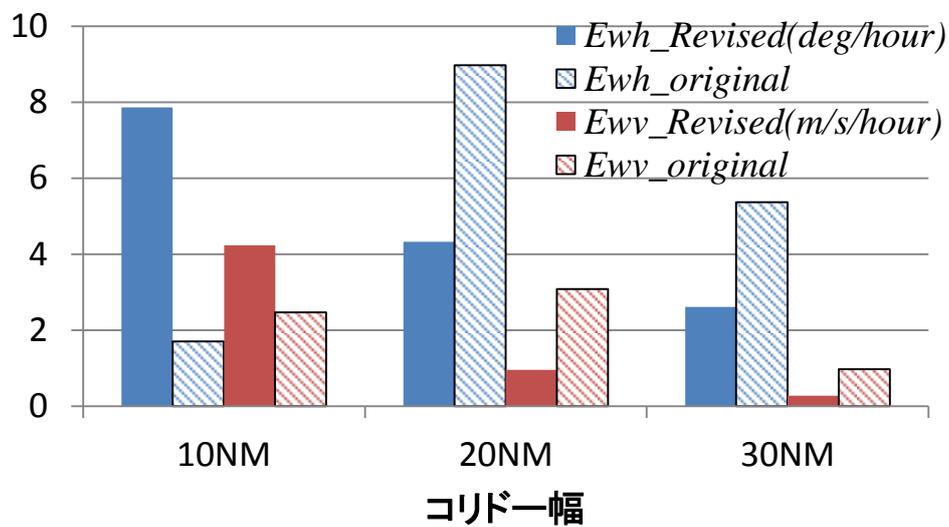


図 7-16 操作量の比較

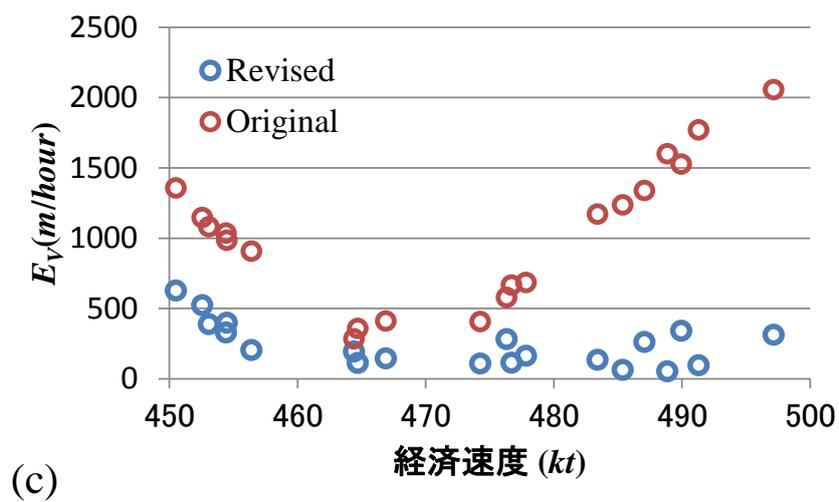
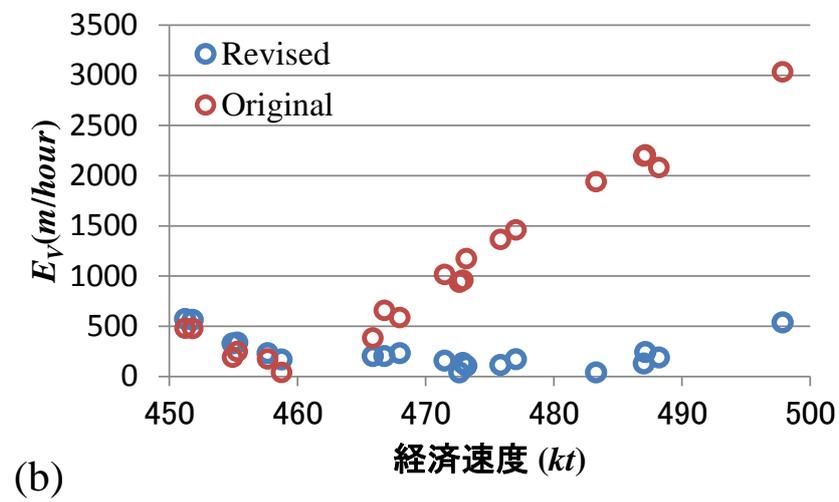
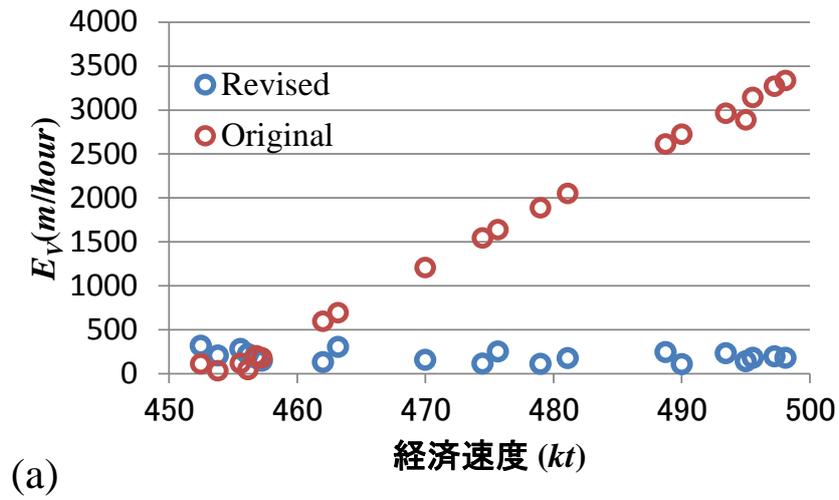


図 7-17 最適速度と評価値  $E_V$  の関係

## 7.5 まとめ

有限幅の空域を持つコリドー内の自律間隔維持アルゴリズムの検討を行った。本研究では互いの位置，速度情報に基づき，方位および速度の変更による間隔維持アルゴリズムを構築し，コンフリクトのない交通流を実現した。一方で利用可能な空域幅が狭い場合はデッドロックが発生することが示された。デッドロック発生時には方位角，速度の調整が不可能となり，航空機は経済速度とは異なる速度で飛行しなければならない。幅を広げることにより並行して飛行可能な航空機数が増加し，互いの航空機が空いている空間を最大限に利用して回避操作を行うことにより追い越しが可能となるが，方位角，速度ともに頻繁に操作を行うことが必要となる。空域幅が広がるほど航空機の左右の空間に余裕が生まれるためデッドロックは発生せず，わずかな操作により追い越しが可能となるため操作量も低減される。

また，デッドロックの防止のために，副経路及び経済速度の導入を検討した。航空機がコリドー内部の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，狭い幅のコリドーにおいてもデッドロックを防ぎ，円滑な交通流を実現可能であることを示した。

本解析では2次元平面内における有限幅の帯状空域における間隔維持について基礎的な検討を行ったが，各種パラメータをはじめ，実運航に基づく検討が必要である。また，高度方向の間隔維持を行うことも考えられるため，高度方向を含む交通流モデルの検討も不可欠である。

## 8 結論

本研究ではフローコリドーの実現に向けて、従来の航空交通システムとは異なる全く新しい概念である航空機の自律間隔維持手法について検討した。すべての航空機が同一方向へ飛行し、また飽和状態の交通量を持つ交通流を想定し、基礎的な航空機の自律的な間隔維持アルゴリズムを構築し、数値解析により評価を行った。

航空機が方位角の変更による間隔維持を行うことにより、交通流は線形近似の範囲内においては交通流としての振る舞いが見られないことを示し、航空交通流の間隔維持には方位の変更が適していることを示した。また、一般にすべての航空機が最適経路上を飛行することが望ましいと考えられるが、速度の異なる航空機が多数飛行する環境においては、すべての航空機が最適経路上へ向かうことは経路上に航空機を集中させ、交通流全体として効率を低下させることを示した。こうした交通流では、ある程度のバッファとして幅を持たせた経路を飛行させることにより、安全性を向上させることが可能となる。さらに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交通流を実現可能であることを示した。また、航空機の間隔維持の操作にばらつきがあることを想定した解析を行い、操作の挙動のばらつきが交通流に与える影響を調べた。航空機間の間隔維持操作における挙動のばらつきにより一部の航空機のみが操作を行うこととなり、間隔維持の達成のために大きな操作量が必要となることが示された。こうした操作はコンフリクトへとつながるため、高密度な交通流においては、接近する航空機が互いに等しく間隔維持を行うことが必要であり、すべての航空機がルールを順守する航空交通流においては、同一の基準に基づき操作を行うことが可能になるものと考えられる。

次に、ADS-Bにより取得可能な位置および速度の情報を利用した間隔維持のアルゴリズムの構築を行った。本解析により、幾何学的条件に基づき航空機の方位を設定することにより、様々な速度の航空機が飛行する高密度な交通流においてもコンフリクトの発生を未然に防止することが可能であることを示した。さらに、速度差に基づき回避方向の判断を行うことにより、自然とほぼ同一の速度の航空機が同一直線上を飛行する交通流が形成されることを示した。これにより、安全性を損なうことなく操作量を大幅に低減し、飛行速度の違いによらず、すべての航空機が等しくわずかな操作のみにより間隔の維持が可能であることを明らかにした。

最後に、有限の幅を持つ帯状空域内部における速度、方位を利用した間隔維持のアルゴリズムの検討を行った。周辺航空機の位置、速度の情報に基づき、速度調整を行うことにより、コンフリクトのない交通流が実現可能であることを示した。また、交通量に対して利用可能な空域幅が狭い場合はデッドロックが発生すること、空域幅を広げることによりデッドロックの発生頻度が低減する一方で、デッドロック防止のための頻繁な操作が必要であること、さらに広い空域幅が利用可能とすることにより操作量は低減されるといった

空域幅の違いに基づく交通流の傾向の変化を明らかにした。さらに、副経路及び経済速度情報の利用により、デッドロックの防止が可能となることを示した。

本解析では自律間隔維持を行う航空交通流に対する初期の研究として、2次元平面内の単純な直線経路を想定し、仮定した安全間隔、基準間隔に基づき、旋回による間隔維持アルゴリズムを構築した。安全を確保するために定められる安全間隔に対し、基準間隔を大きく設定するほど安全に運航することが可能となるが、過剰に間隔を大きく設定することにより交通容量が低下することとなる。一方で、基準間隔を安全間隔に近い値に設定するほど、コンフリクトを回避するために迅速かつ大きな操作が必要になることが予想される。高密度な交通流においては、回避操作が大きいほど周辺の他の航空機へ与える影響が増加することが懸念される。今後、基準間隔をどの程度まで短縮することが可能であるのか、現実的にどの程度の基準間隔が最適であるのかについて解析を行う必要がある。また、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ル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。さらに、航空機の合流や離脱を伴う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。実際の交通量や空域の条件に基づきフローコリドールの幅、形状、配置の検討に加え、フローコリドール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。以上に示したようにフローコリドールの実現のための課題は多く残されているため、本研究において得られた知見を活用し、より実運航に近い条件を考慮した解析を進めることが必要となる。

## 謝辞

本研究を進め、本論文を執筆するにあたり、指導教員の武市昇准教授には丁寧かつ熱心なご指導を賜りましたこと心より深く御礼申し上げます。研究内容、方針をはじめ、研究への取り組み方、研究成果の発表に対する姿勢まで多大なご助言をいただき、また航空交通管理の分野へと導いていただいたことに感謝申し上げます。

独立行政法人電子航法研究所の蔭山康太上席研究員には、多くのご助言を頂くとともに、ご支援を賜りましたことを深く感謝申し上げます。また、同研究所の皆さまにも数多くのご助言を頂きましたことを心より感謝申し上げます。

学位論文審査にあたり、貴重なご助言を頂きました、吉川典彦教授、佐宗章弘教授、坂本登准教授、杉山雄規教授に心より感謝申し上げます。

最後に、温かく見守り、支え続けてくれた家族に心から感謝の意を表して謝辞といたします。

## 付録 交通流の安定性の解析方法

### A.1 最適速度モデル

最適速度モデルを適用した自動車交通流における安定性の解析について述べる。最適速度モデルにおいては、各車両は前方の車両との間隔に基づき加速度を決定する。車両の運動は以下の方程式により表現される。

$$\ddot{x}_n = C\{V(\Delta x_n) - \dot{x}_n\} \quad (\text{A.1})$$

$$\Delta x_n = x_{n+1} - x_n \quad (\text{A.2})$$

ここで添え字  $n$  は車両の番号を示しており、交通流を構成するすべての車両 ( $n=0,1,2,\dots,N-1$ ) が同一の方程式に従い運動することとなる。 $N$  は交通流における車両の総数を表し、 $C$  はドライバーの感度を表す。 $x_n$  は  $n$  番目の車両の位置を示す。 $V(\Delta x_n)$  は前方車両との間隔に応じて定められる最適速度関数である。各車両は間隔が短くなるにつれ衝突を避けるために減速しなければならないが、一方で十分に間隔が離れている場合には最高速度で走行する。したがって、最適速度関数は前方車両の間隔に対して単調増加であり、かつ上限を持つ関数として設定する必要がある。

### A.2 安定性解析

車両が最適速度モデルに従い走行する交通流における安定性について述べる。本解析では各車両は式 (A.1), (A.2) に示す方程式に従い運動するものとし、等間隔、等速度で走行する交通流を定常状態として扱う。定常状態における車両の位置及び速度は以下の式で与えられる。

$$x_n^{(0)} = d_s n + v_s t \quad (\text{A.3})$$

$$d_s = L/N \quad (\text{A.4})$$

$$v_s = V(d_s) \quad (\text{A.5})$$

ここで、 $d_s$  は定常状態における車両の間隔であり、 $v_s$  は定常状態の間隔における速度を示す。また、 $N$  台の車両が周長  $L$  の周回走路を走行することを想定し、周期境界条件を適用する。すなわち、 $n+N$  台目の車両は  $n$  番目の車両と同一であり、以下の式が満たされる。

$$x_n(t) = x_{n+N}(t) \quad (\text{A.6})$$

$$\dot{x}_n(t) = \dot{x}_{n+N}(t) \quad (\text{A.7})$$

明らかに、定常状態の交通流は(A.1)を満たす解の一つである。ここで、定常状態の交通流に微小な擾乱が与えられたときの交通流の安定性を調べる。まず、車両の位置  $x_n$  を定常状態における位置とそこからの微小な偏差  $y_n$  に分けて下記のように表す。

$$x_n = x_n^{(0)} + y_n \quad (\text{A.8})$$

このとき、交通流の安定性について以下のように定義する。

すべての  $n$  ( $n=0,1,2,\dots,N-1$ ) に対して、 $\lim_{t \rightarrow \infty} y_n = 0$  であるとき、交通流は安定である。偏差が微小であるものとし ( $y_n \ll 1$ )、式 (A.8) を式(A.1)に代入し、微小量の高次の項を無視すると下記の式が得られる。

$$\ddot{y}_n = C(f\Delta y_n - \dot{y}_n) \quad (\text{A.9})$$

$$f = V'(d_s) \quad (\text{A.10})$$

$$\Delta y_n = y_{n+1} - y_n \quad (\text{A.11})$$

ここで、 $V'(d_s)$ は最適速度関数の定常状態における微分値を表す。安定性について調べるために上式の微分方程式の解をフーリエ級数により下記の式で表す。

$$y(n,t) = \sum_{k=0}^{N-1} y_k(n,t) = \sum_{k=0}^{N-1} \exp(i\alpha_k n + z_k t) \quad (\text{A.12})$$

$$\alpha_k = \frac{2\pi}{N} k \quad (k=0,1,2,\dots,N-1) \quad (\text{A.13})$$

ここで、 $\alpha_k$ の値は車両が周期境界条件を満たす ( $y(n,t) = y(n+N,t)$ ) ことから設定している。モード  $k$  における偏差  $y_k$  を式 (A.9) に代入することにより、 $z_k$  が満たすべき以下の方程式が得られる。

$$z_k^2 + Cz_k - Cf\{\exp(i\alpha_k) - 1\} = 0 \quad (\text{A.14})$$

$z_k$  は複素数であり、実数  $u_k$  および  $v_k$  を用いて  $z_k = u_k + iv_k$  と表す。上式を解くことにより、実部  $u_k$  は以下の式で与えられる。

$$u_k = -\frac{1}{2}C \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C^2 - 8Cf \sin^2 \frac{\alpha_k}{2} + \sqrt{C^4 + 16Cf \sin^2 \frac{\alpha_k}{2} (4Cf - C^2)}}{2}} \quad (\text{A.15})$$

式 (A.12) より、 $\lim_{t \rightarrow \infty} y_k = 0$  となる条件は  $\text{Re}(z_k) = u_k < 0$  であり、以下の式により与えられる。

$$f < \frac{C}{2\cos^2 \frac{\alpha_k}{2}} \quad (\text{A.16})$$

交通流が安定であるためには、すべてのモード ( $k=0,1,2,\dots,N-1$ ) に対して  $u_k$  が負でなければならない。したがって、これを達成する条件は以下の式で与えられる。

$$f < \frac{C}{2} \quad (\text{A.17})$$

以上に示したように、交通流の安定性はドライバーの感度  $C$  および最適速度関数の定常状態の車両間隔における微分値の関係により決定されることとなる。

## 参考文献

- 1) 財団法人航空交通管制協会, “航空管制入門”, 2010年7月.
- 2) 財団法人日本航空機開発協会, “民間航空機に関する市場予測 2013-2032”, 2013年3月.
- 3) ICAO, “Global Air Traffic Management Operational Concept”, ICAO Doc 9854 AN/458, 2005.
- 4) Joint Planning and Development Office, “Concept of Operations for the Next Generation Air Transportation System,” Version 3.2, Sep. 30, 2010.
- 5) SESAR (Single European Sky ATM Research) Joint Undertaking, <http://www.sesarju.eu/>, cited May. 20, 2014.
- 6) Japan Civil Aviation Bureau, “Long-term Vision for the Future Air Traffic Systems (CARATS)”, 2010.
- 7) U.S. Department of Transportation, “Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Out Performance Requirements to Support Air Traffic Control (ATC) Service”, Federal Register, 14 CFR Part 91, May. 28, 2010.
- 8) U.S. Department of Transportation, “Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Operations”, AC No. 90-114, Sep. 21, 2012.
- 9) FAA/Eurocontrol, Cooperative R&D Committee, “Principles of Operation for the Use of Airborne Separation Assurance Systems”, 2001, <http://www.eurocontrol.int/care-asas/gallery/content/public/docs/po-asas71.pdf>.
- 10) Arash Yousefi, Jerome Lard, and John Timmerman, “NextGen Flow Corridors Initial Design, Procedures, and Display Functionalities,” IEEE/AIAA 29th Digital Avionics System Conference, Oct. 3-7, 2010.
- 11) 武市昇, 中村陽一, 蔭山康太, ”フローコリドー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.
- 12) 岡恵, 蔭山康太, 中村陽一, “混雑空港周辺における飛行距離分布の解析”, 第51回飛行機シンポジウム, 2013年11月.
- 13) 平田輝満, “混雑空港を対象とした航空交通流管理に関する研究”, 運輸政策研究所, 第29回研究報告会, 2011年.
- 14) 福島幸子, 福田豊, 住谷美登里, “北太平洋の東行き最適経路の傾向について”, 第9回電子航法研究所研究発表会, 2009年.
- 15) Hiroko Hirabayashi, Sachiko Fukushima, Megumi Oka, “Easing of Restrictions on the North Pacific Ocean User Preferred Route Operation of East-Bound Flights”, The 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Nov. 20-22, 2013.
- 16) International Civil Aviation Organization, “Air Traffic Services Planning Manual”, Doc 9426-AN/924, First (Provisional) Edition, 1984.
- 17) Arash Yousefi, Ali N. Zadeh, and Ali Tafazzoli, “Dynamic Allocation and Benefit Assessment of NextGen Flow Corridors,” 10th AIAA ATIO Conference, Fort Worth, Texas, 2010.
- 18) Xue, M, “Design Analysis of Corridors-in-the-sky,” AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, Aug. 10-13, 2009.
- 19) Xue, M., Zelinski, S., “Complexity Analysis of Traffic in Corridors-in-the-sky”, 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operation (ATIO) Conference, Sep. 13-15, 2010.
- 20) Anand Mundra, Elliott Simons, “Self-Separation Corridors”, Dallas, Digital Avionics Systems Conference, 2009.
- 21) 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回電子航法研究所発表会, 2013年6月7日.

- 22) International Civil Aviation Organization, “Doc 9613-AN/937, Performance-based Navigation (PBN) Manual,” Fourth edition, 2013.
- 23) International Civil Aviation Organization, “Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima,” first edition, 1998.
- 24) International Civil Aviation Organization, “Doc 9613-AN/937, Manual on Required Navigation Performance (RNP),” Second edition, 1999.
- 25) Akihiro Nakayama, Minoru Fukui, Macoto Kikuchi, Katsuya Hasebe, Katsuhiko Nishinari, Yuki Sugiyama, Shin-ichi Tadaki, Satoshi Yukawa, “Metastability in the formation of an experimental traffic jam”, New Journal of Physics, Vol. 11, August 2009.
- 26) Yuki Sugiyama, Minoru Fukui, Macoto Kikuchi, Katsuya Hasebe, Akihiro Nakayama, Katsuhiko Nishinari, Shin-ichi Tadaki, Satoshi Yukawa, “Traffic jams without bottlenecks – experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam”, New Journal of Physics, Vol.10, March 2008.
- 27) 只木進一, “高速道路交通流の実測データと二車線模型”, Bulletin of the Japan Society for Industrial and applied Mathematics, Vol. 12, 2002.
- 28) 只木進一, 菊池誠, 杉山雄規, 湯川諭, “交通流の科学”, 日本物理学会誌, Vol. 55, No.3, 2000.
- 29) 杉山雄規, “交通流の物理”, 日本流体学会誌「ながれ」, Vol. 22, No. 2, 2003.
- 30) 小松輝久, “交通渋滞と紛体の渋滞”, 日本流体学会誌「ながれ」, Vol. 22, No. 2, 2003.
- 31) 佐宗章弘, “交通流における圧縮性流体力学,” 日本流体学会誌「ながれ」, Vol. 22, No. 2, 2003.
- 32) M.Bando, K.Hasebe, A.Nakayama, A.Shibata, Y.Sugiyama, “Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation,” Physical Review E, Volume 51, Number 2, 1995.
- 33) International Civil Aviation Organization, “Doc 9905, Required Navigation Performance Authorization Required (RNP-AR) Procedure Design Manual,” 2009.
- 34) 宮本 侑斗, 原田 明德, ナヴィンダ キトマル ビクラマシンハ, 重富 貞成, 宮沢 与和, 船曳 孝三, “4次元軌道最適化による旅客機の運航性能の評価解析,” 第51回飛行機シンポジウム, 2013年11月.
- 35) J.M. Hoekstra, R.C.J. Ruijgrok, R.N.H.W. van Gent, “Free Flight in a Crowded Airspace?,” 3<sup>rd</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, 2000.
- 36) Bach R., Farrell C., and Erzberger H., “An algorithm for level-aircraft conflict resolution,” NASA/CR-2009-214573, 2009.

## 章と発表論文の関係

### 2章

中村陽一, 武市昇, “機上周辺監視による一方向航空交通流の制御,” 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 59, No. 686, pp. 76-82, 2011.

### 3章

中村陽一, 武市昇, “飛行速度のばらつきによる一方向航空交通流の機上周辺監視による分散制御,” 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 60, No. 1, pp. 17-23, 2012.

### 4章

Takeichi, N., Nakamura, Y., Fukuoka, K., “Decentralized Air Traffic Control in a High Density Corridor Subject to Separation Control Non-Uniformity,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 56, No. 3, pp. 153-158, 2013.

### 5章

Takeichi, N., Nakamura, Y., 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, No. 3, pp. 179-185, 2014.

### 6章

Nakamura, Y., Takeichi, N., Kageyama, K., “A Self-Separation Algorithm using Relative Speed for High Density Air Corridor,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 掲載決定.

### 7章の一部

福岡敬介, 武市昇, 中村陽一, “高密度交通流における速度調整によるコンフリクト回避,” 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 61, No. 5, pp. 119-124, 2013.

## 論文目録

論文題目	公表の方法及び時期	著者
I. 学会誌等		
1 機上周辺監視による一方向航空交通流の制御	日本航空宇宙学会論文集, Vol. 59, No.686, pp. 76-82 (2011).	中村陽一、武市昇
2 飛行速度のばらつきによる一方向航空交通流の機上周辺監視による分散制御	日本航空宇宙学会論文集, Vol. 60, No.1, pp. 17-23 (2012).	中村陽一、武市昇
3 Decentralized Air Traffic Control in a High Density Corridor Subject to Separation Control Non-Uniformity	Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 56, No. 3, pp. 153-158 (2013).	Takeichi, N., Nakamura, Y., Fukuoka, K.
4 高密度交通流における速度調整によるコンフリクト回避	日本航空宇宙学会論文集, Vol. 61, No. 5, pp. 119-124 (2013).	福岡敬介、武市昇、中村陽一
5 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, No. 3, pp. 179-185 (2014).	Takeichi, N., Nakamura, Y., Kageyama, K.
6 A Self-Separation Algorithm using Relative Speed for High Density Air Corridor	Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 掲載決定.	Nakamura, Y., Takeichi, N., Kageyama, K.
II. 国際会議		
1 Fundamental Characteristics of Decentralized Air Traffic Flow Control in High Density Corridor	28 <sup>th</sup> International Congress of the Aeronautical Sciences, Brisbane, Australia, Sep. 26, 2012.	Takeichi, N., Nakamura, Y., Fukuoka, K.
2 A Self-Separation Algorithm using Relative Speed for High Density Air Corridor	AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, Boston, Aug. 19-22, 2013	Nakamura, Y., Takeichi, N., Kageyama, K.
III. その他		
1 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.	武市昇、中村陽一、蔭山康太
2 フローコリドールの運用方式の研究	航空無線, 第77号, 2013年9月, pp. 7-17.	武市昇、中村陽一、蔭山康太
3 フローコリドールの概念と運用方式の研究	航空管制, 2014年第2号, 2014年3月, pp. 56-67.	武市昇、中村陽一、蔭山康太
4 フローコリドールにおける飛行速度に基づく高密度交通流の形成	航空管制, 2014年第3号, 2014年5月, pp. 44-50.	中村陽一、武市昇、蔭山康太