

フローコリドールの運用方式の研究

武市 昇

名古屋大学 航空宇宙工学専攻

中村陽一、蔭山康太

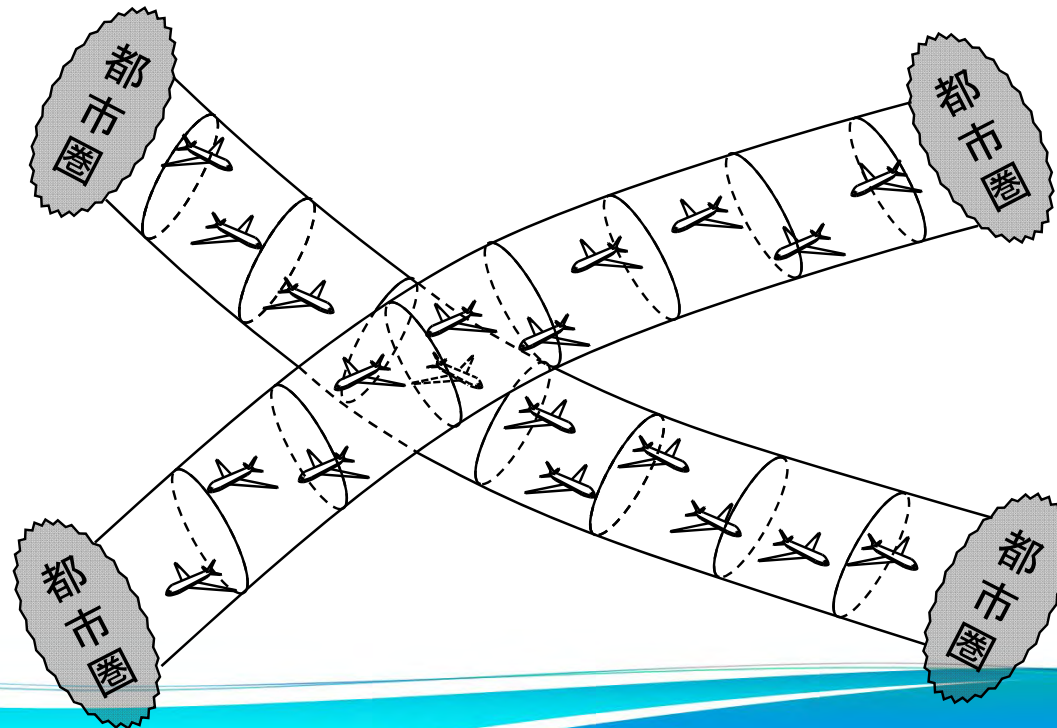
電子航法研究所 航空交通管理領域

平成25年度電子航法研究所研究発表会

平成25年6月7日

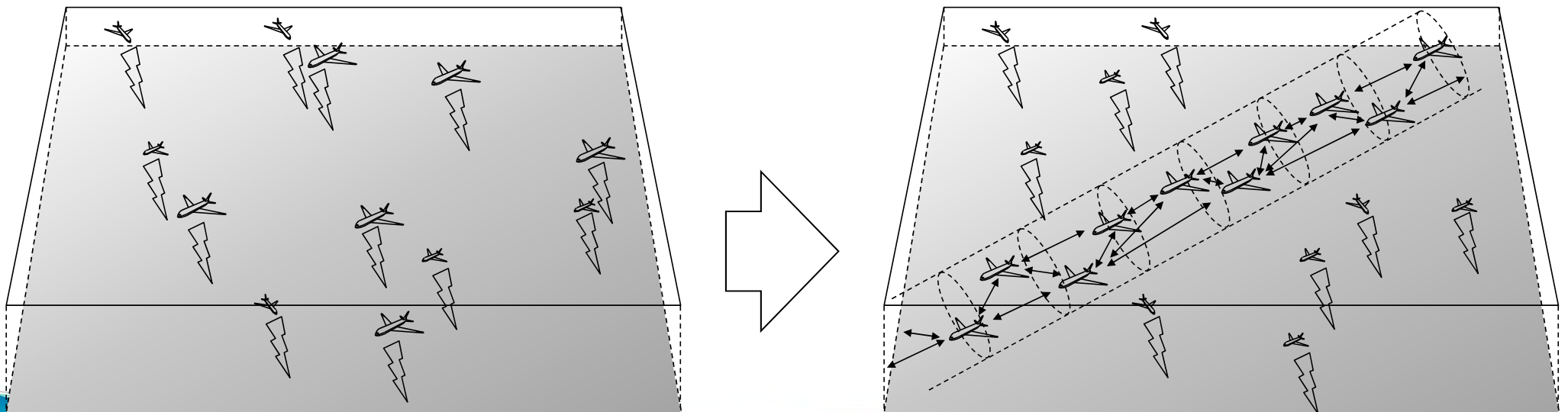
フローコリドールの背景

- CARATS & NextGenで計画されている運航方式
 - 長期的な計画：2020年代半ば以降
- “細長い空域”
 - 混雑空港および都市圏間を接続する



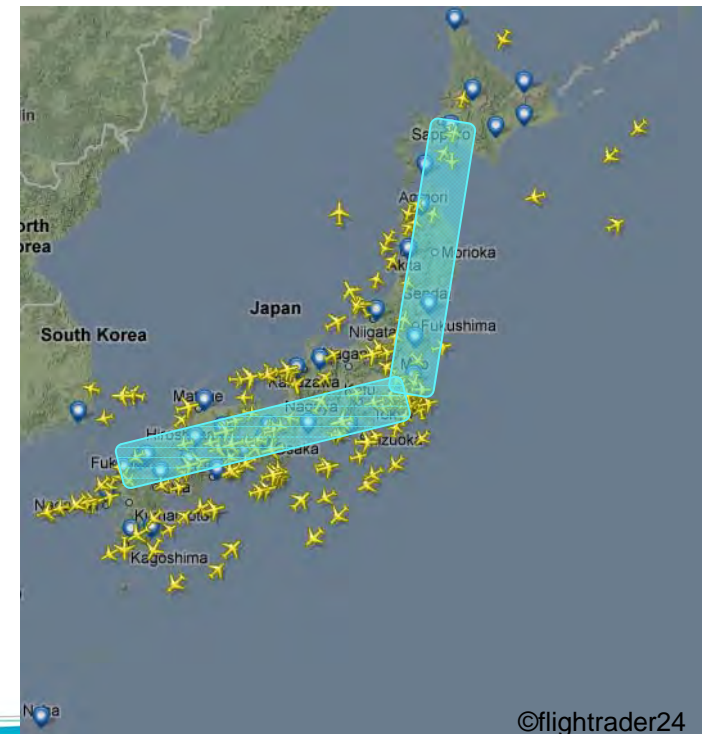
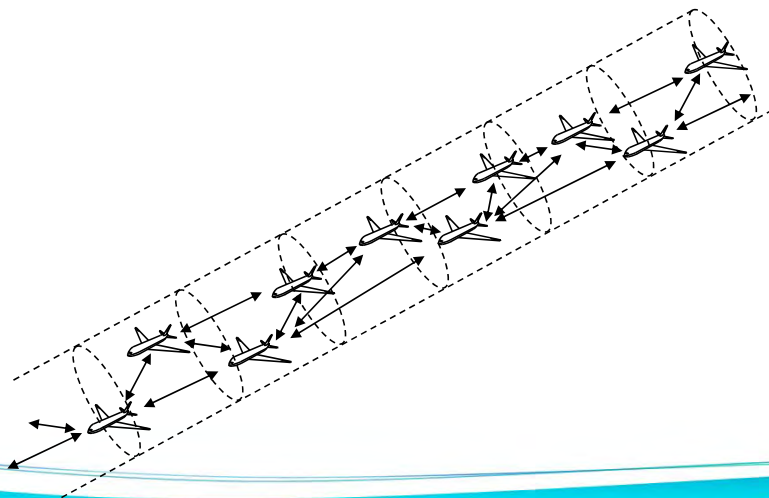
フローコリドールの効果

- フローコリドール内部
 - 自律間隔維持（セルフセパレーション）の性能を持つ機体のみ
 - 管制官の介入は不要
- その他の空域および管制
 - 自律間隔維持の性能を持たない機体
- 安全性を損なわずに空域全体としての交通容量を拡大
- 装備レベルの異なる機体の混在する航空交通の取り扱い



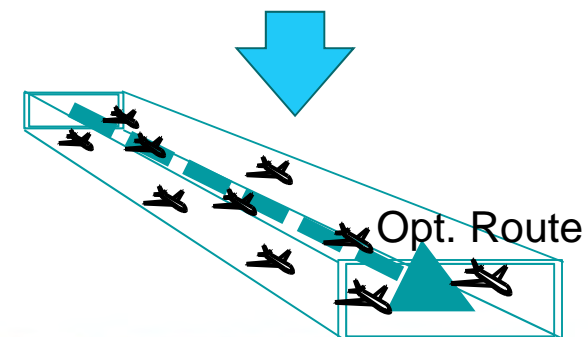
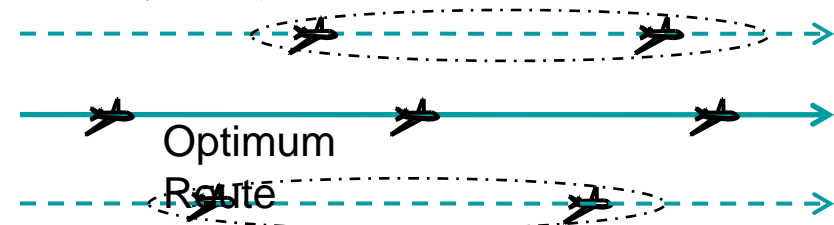
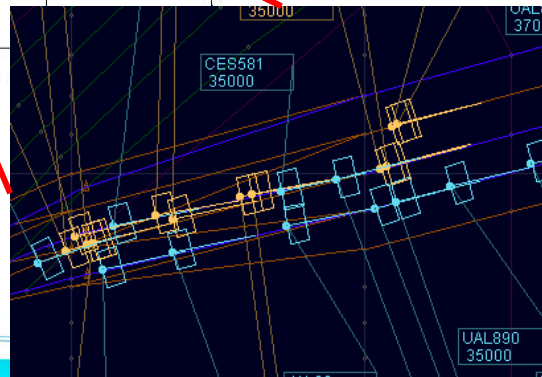
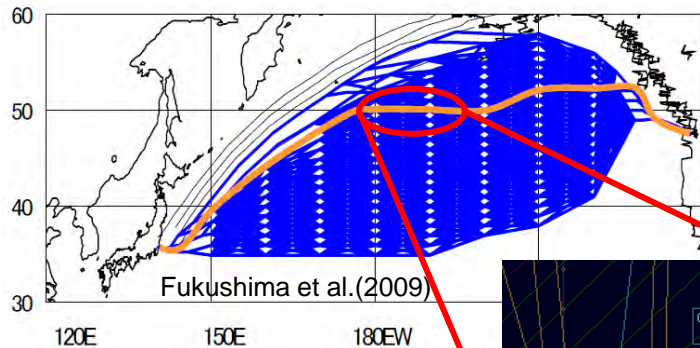
フローコリドー導入までの課題

- フローコリドー内部での運航手順
 - 自律間隔維持の手順
 - 定時性の確保方法
 - 安全性と効率性が同時に求められる
- フローコリドーの配置方法
 - 便益を決定する要素



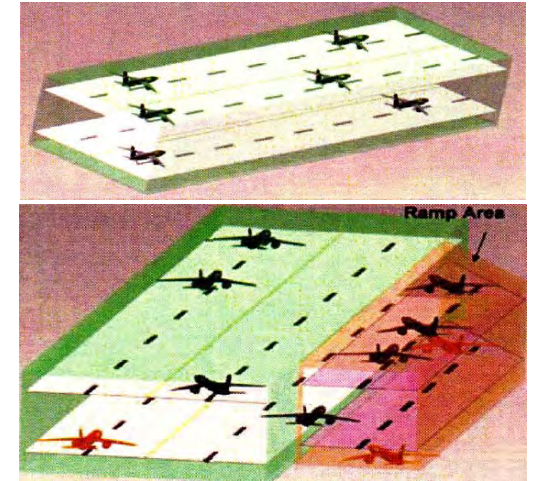
我々のこれまでの研究

- 洋上経路を対象とした自律間隔維持
 - 大きな管制間隔
 - 多くの機体が最適経路を飛行できない状況
 - 自律間隔維持の導入
 - ほぼすべての機体が最適経路近傍を飛行



従来の研究と本研究の目的

- フローコリドーの従来の研究
 - 基本概念の提案(Yousefi, et al., 2010)
 - 経路構造
 - 運航手順の概念 ⇒ 具体的な検討は無い
 - 追い越し・合流・“車線”変更

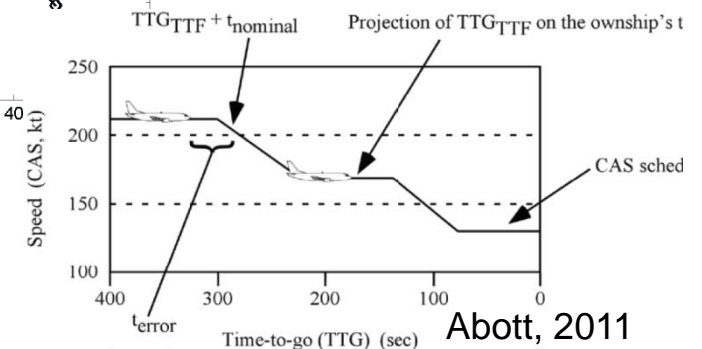
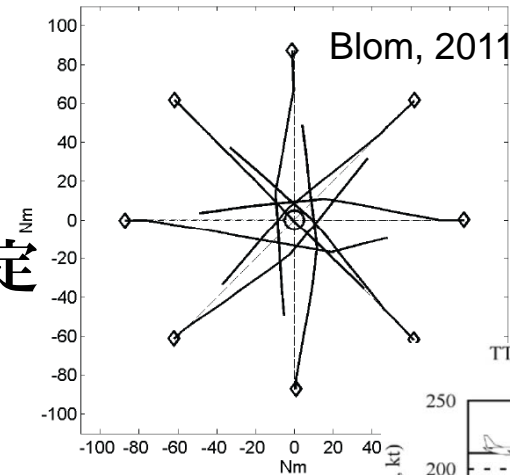


Yousefi et al. (2010)

- 本研究の目的
 - フローコリドー内の自律間隔維持の手順
 - “最大交通量”を安全に扱うことができる
 - 現実の交通量に対しては十分安全なはず
 - 出来るだけ小さな乗員のワークロード
 - 全ての航空機が最適な速度&最適経路近傍を飛行

他の自律間隔維持

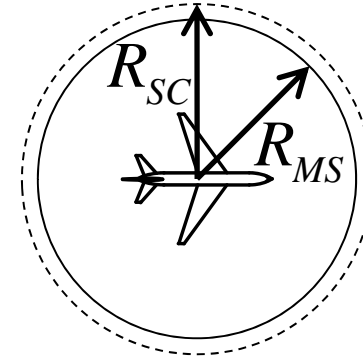
- フリーフライト
 - コンフリクト検出と解消
 - あらゆる方位の航空機を想定
- 降下交通流
 - 同じ速度履歴を達成
- フローコリドー
 - 全ての航空機が各々の最適速度を保つ
- フリーフライトの自律間隔維持
 - フローコリドーにも適用できるのではないかな？
 - その適用可能性の解析から始める



自律間隔維持の基本的な考え方

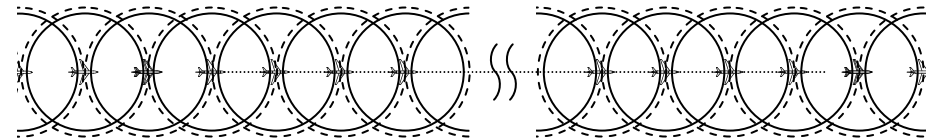
- 航空機の間隔

- 安全間隔: R_{MS}
- 基準間隔: R_{SC}



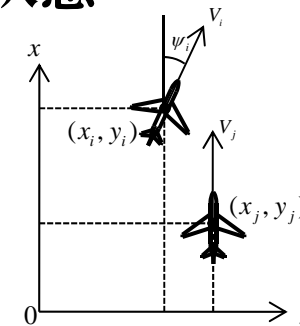
- 交通流モデル

- 最大の交通量
 - 基準間隔 R_{SC} で航空機が連なっている状態



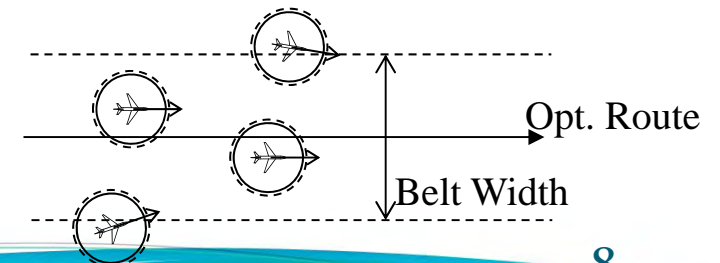
- 水平面内の運動のみ

- 方位角の変更による間隔維持
 - 最適飛行速度を維持する



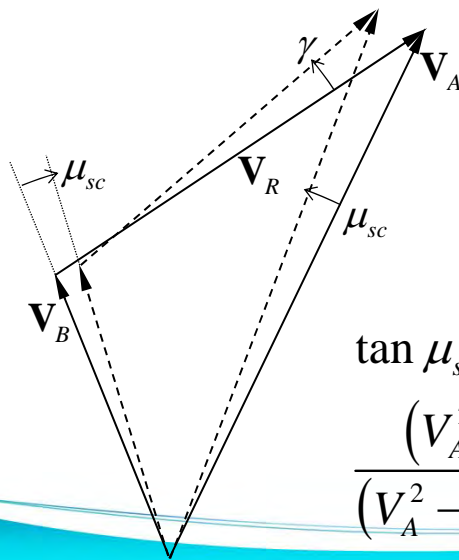
- ベルト状のコリドー

- コリドー外の機体は中心に向かう



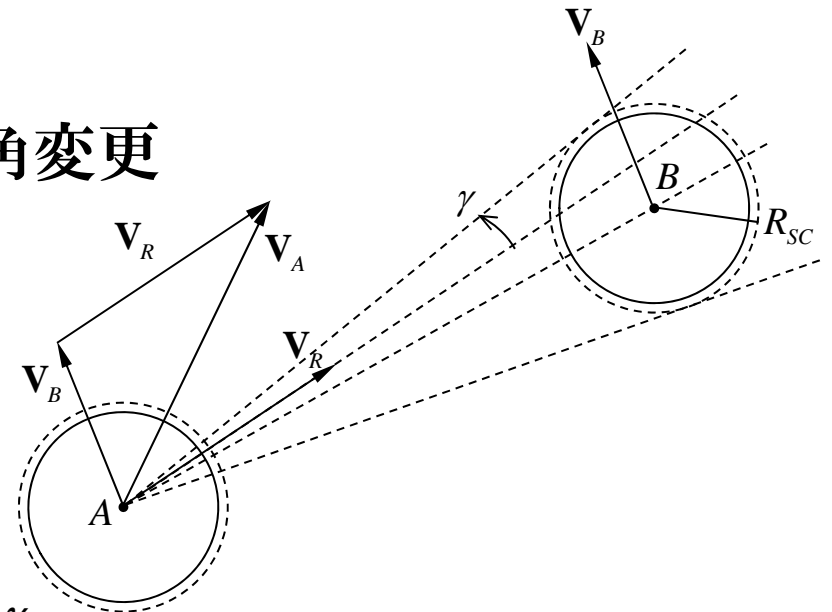
間隔制御方式

- 相対ベクトル基準方式
 - フリーフライトの間隔制御の一つ(Bach et al., 2009)
 - コンフリクト検出
 - 相対速度ベクトルが基準間隔の円内を通過
 - コンフリクト回避
 - 両方の機体が同時に 最小の方位角変更



$$\tan \mu_{sc} =$$

$$\frac{(V_A^2 + V_B^2 - 2V_A V_B \cos(\psi_A - \psi_B)) \sin \gamma}{(V_A^2 - V_B^2) \cos \gamma + 2V_A V_B \sin \gamma \sin(\psi_A - \psi_B)}$$



間隔制御方式

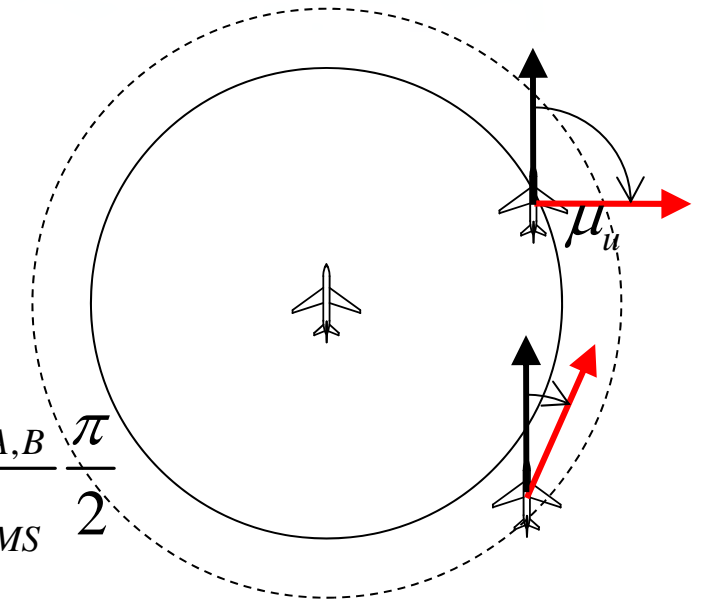
- 基準間隔を下回った場合
 - 距離に基づいた方位角変更
 - 基準間隔を下回った場合
 - 安全間隔を下回った場合

$$\mu_u = \frac{R_{SC} - d_{A,B}}{R_{SC} - R_{MS}} \frac{\pi}{2}$$

$$\mu_u = \frac{\pi}{2}$$

- 間隔制御のための方位角の与え方

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



航空機の制御則

- 航空機の方位角 $\Psi_A = \mu_A + \mu_A^r$

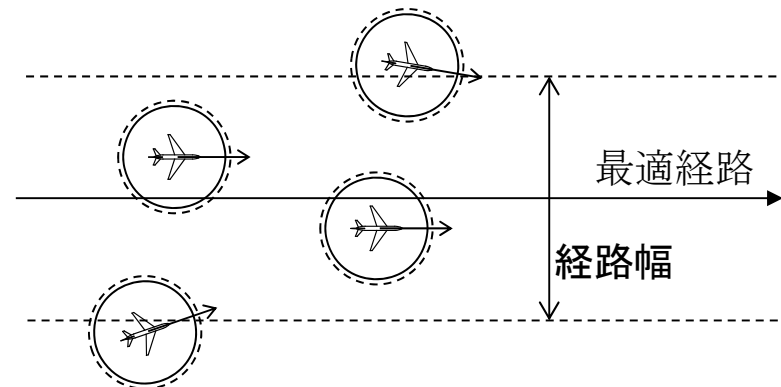
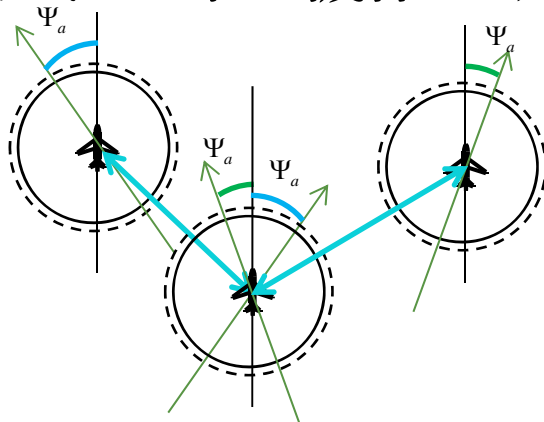
- 複数の機体との間隔制御

$$\mu_A = \mu_{A,B} + \mu_{A,C} + \mu_{A,D} \dots$$

- 最適経路に向かう方位角

$$\mu_A^r$$

- コリドー外の機体のみ

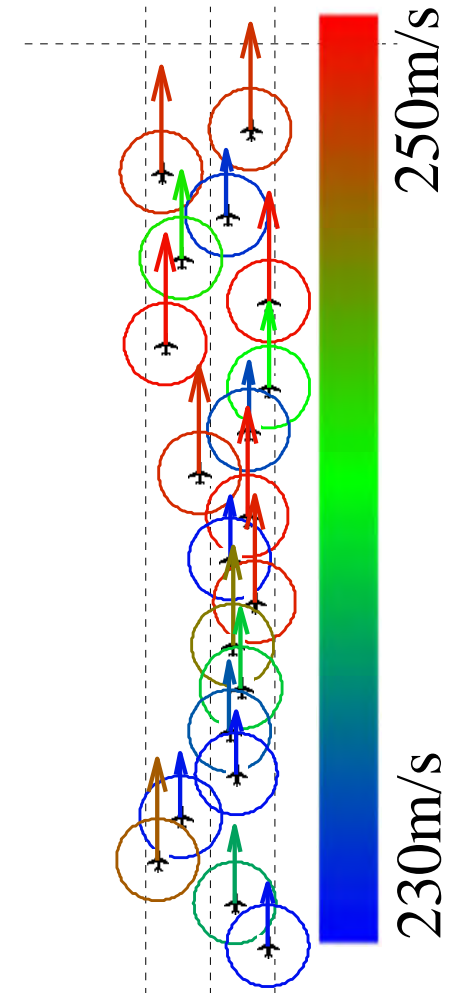
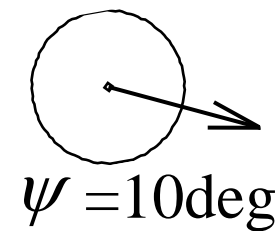


- ロール角： $\phi_A = a(\Psi_A - \psi_A)$

- 指示される方位角と実際の方位角の差に比例

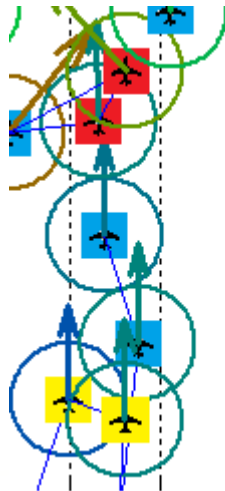
数値解析の概要

- 20機の交通流 • $R_{SC} = 10.5NM$, $R_{MS} = 10NM$
- 50通りの初期状態
 - 進行方向：基準間隔をあけて並ぶ
 - 横方向：コリドー内で不規則に与える
 - 最適速度：230~250m/sの範囲で不規則
 - 無限延長の経路
- 凡例
 - 円の半径：安全間隔
 - ベクトル：飛行速度と方位
 - 色：飛行速度



数値解析結果の表示

- 各航空機の状態の表示
 - 色で区別して示す
 - ✈ 他機と十分な間隔・間隔制御無し
 - ✈ 他機と十分な間隔・間隔制御有り
 - ✈ 基準間隔以下まで接近
 - ✈ 安全間隔以下まで接近：コンフリクト



青い実線：間隔制御が行われていることを示す

数値解析結果

- 典型的な結果の例

- 飛行速度範囲：230m/s~250m/s



230m/s

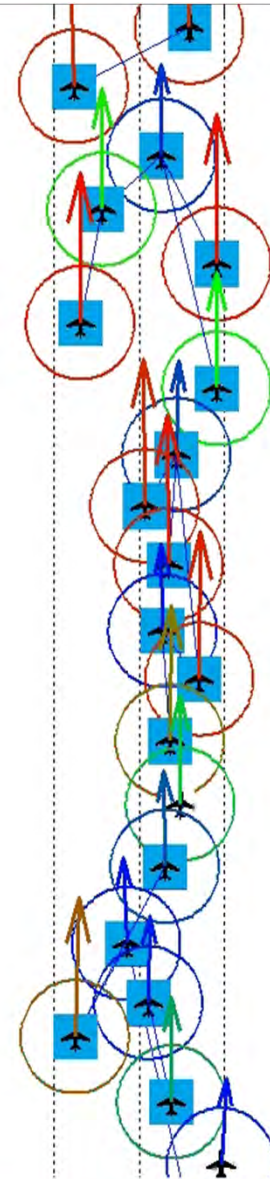
250m/s

- 視点：240m/sで飛行

- 3000倍速

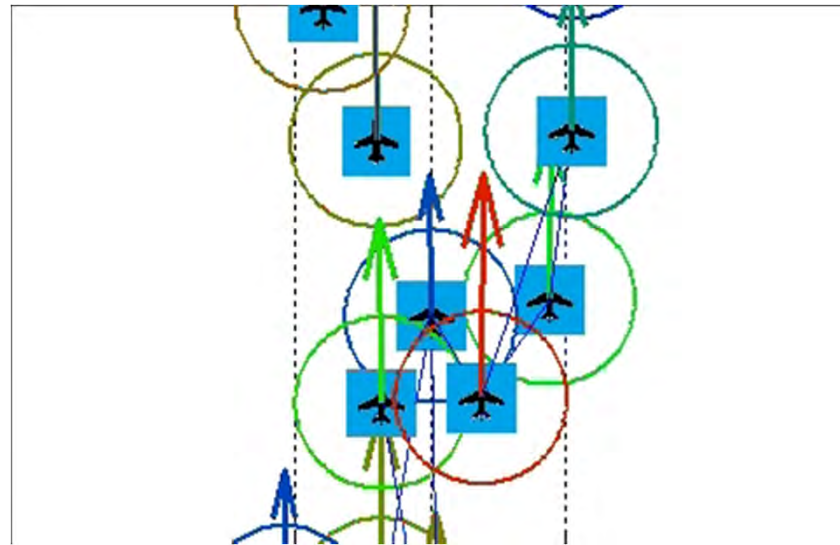
$$R_{SC} = 10.5NM$$

$$R_{MS} = 10NM$$



数値解析結果

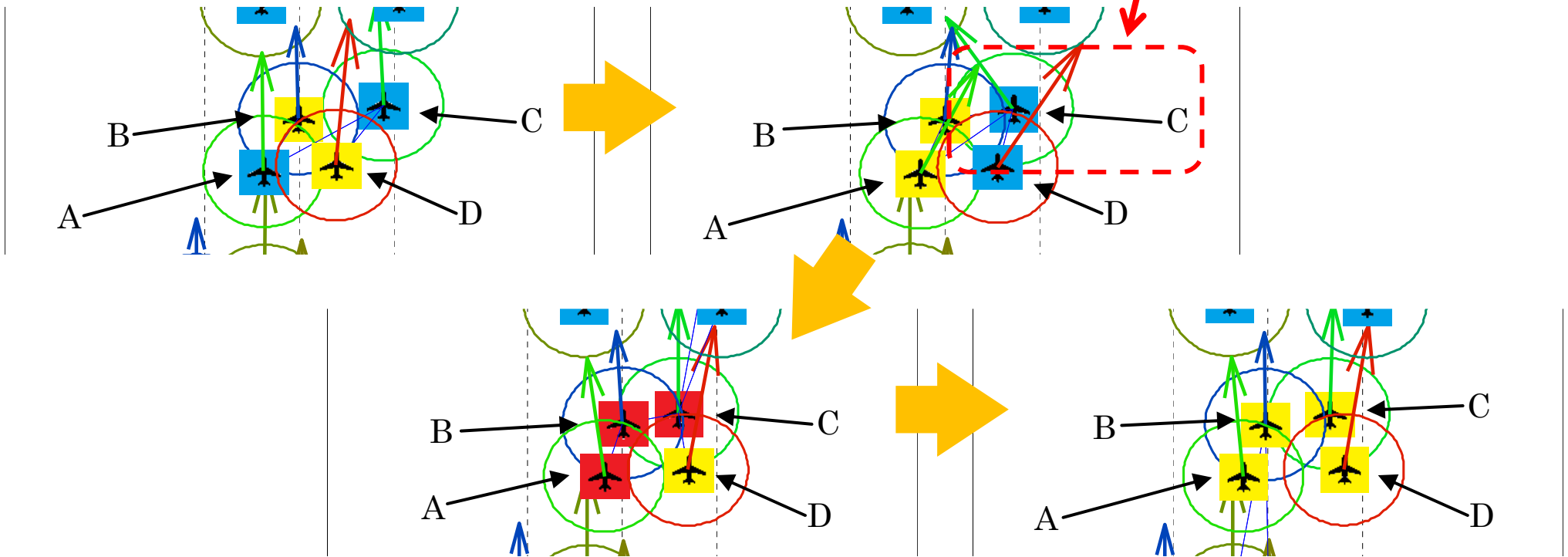
- 相対ベクトル基準方式
 - コンフリクトの発生：32通り（全50通り）
- コンフリクトの具体的な状況



数値解析結果

● コンフリクトの発生メカニズム

“直感”に反した運動



● コンフリクトの生じうる状況

- 高密度の交通流では避けられない ⇒ 頻繁に発生

間隔制御方式(2)

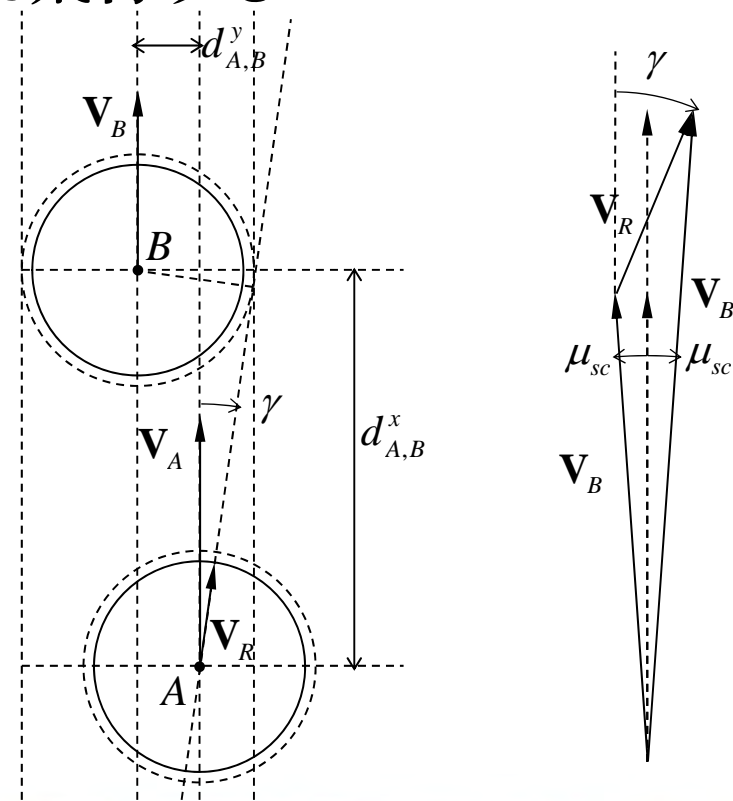
- 横位置基準方式

- フローコリドーにおける飛行意図 (Flight Intent)

- “全ての航空機が経路に沿って飛行する”

- 横位置にのみ着目

- コンフリクト検出
 - 横方向の基準間隔の範囲
- コンフリクト回避
 - 互いに方位角を変更



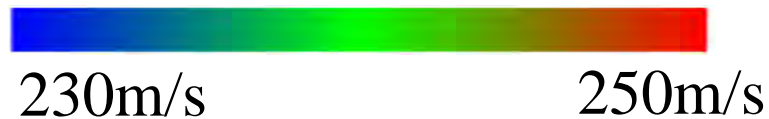
数值解析結果

- 横位置基準方式

- コンフリクト発生：無し

- 全50通り

- 飛行速度範囲：230m/s~250m/s

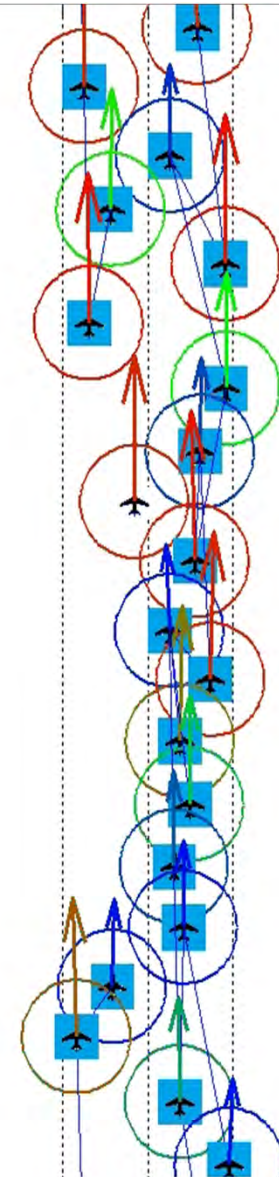


- 視点：240m/sで飛行

- 3000倍速

$$R_{SC} = 10.5NM$$

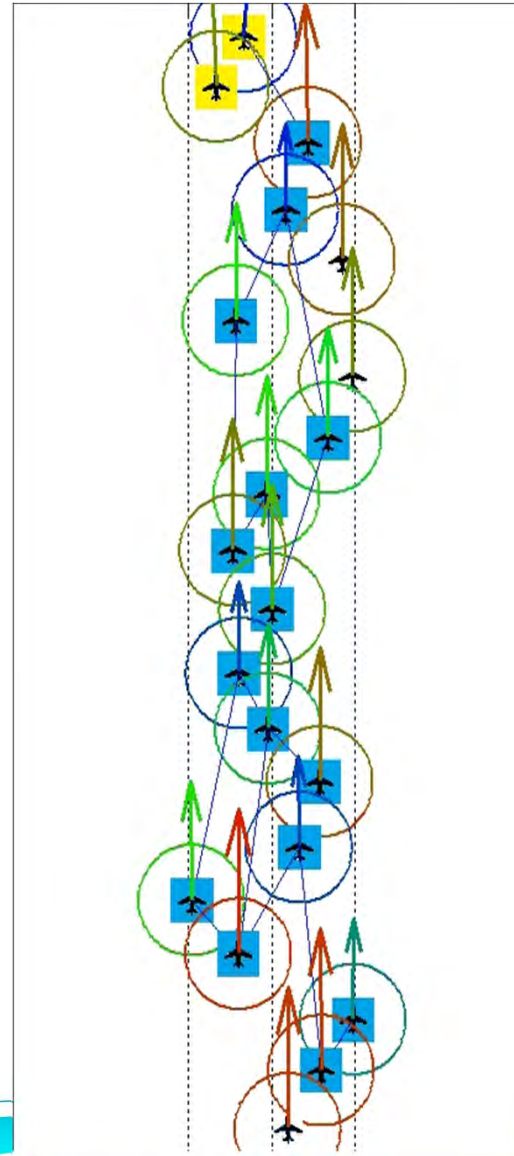
$$R_{MS} = 10NM$$



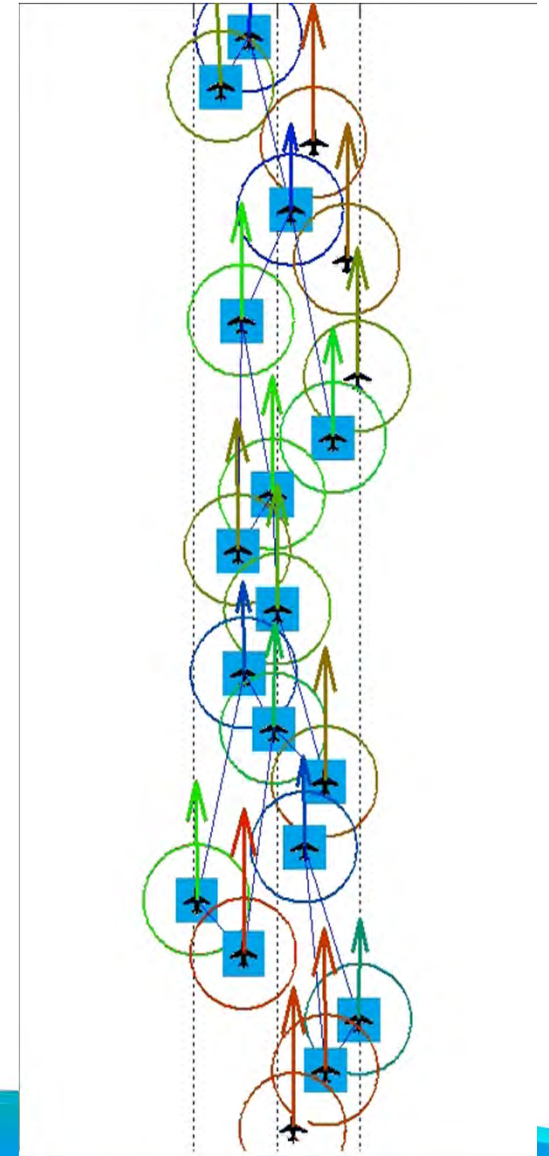
数値解析結果の比較

- 典型的な一例
- 横方向の動きに差異

相対ベクトル基準



横位置基準



評価指標

	E_{conf}	E_{work} [deg/hour]
相対ベクトル基準	5.9×10^2	15.1
横位置基準	<u>0</u>	<u>2.5</u>

わずか1/6の方位角変更
⇒ 十分な安全性を達成

- 安全性

- 安全間隔を下回った距離の積分

$$E_{conf} = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{conf} dt \quad (i < j) \quad d_{i,j}^{conf} = \begin{cases} 10NM - d_{i,j} & (d_{i,j} < 10NM) \\ 0 & (d_{i,j} \geq 10NM) \end{cases}$$

- ワークロード

- 方位角変更量を目安とした

$$E_{work} = \frac{1}{N \cdot T_{TOTAL}} \sum_i \int |\dot{\psi}_i| dt$$

まとめ

- フローコリドーにおける自律間隔維持
 - フリーフライトの間隔制御方式：不適
 - 横方向の間隔制御：過剰 ⇒ コンフリクトを起こす
 - フローコリドーにおける飛行意図の導入
 - “全ての航空機は経路に沿って飛行する”
 - コンフリクトの生じ無い運航が可能
 - 横方向の間隔制御：最小かつ十分
- 飛行意図の導入 = 方位角の情報を使用しない
 - 互いの航空機を信頼した協調的な制御
 - “経路に沿って飛行するはず”
 - “より少ない情報量でより良い成果”
- フローコリドー運用の実現可能性を示した
 - ただし理想的環境下で

実用化までの課題

- フローコリドー内の運用手順
 - 定時性の確保
 - フローコリドー内：管制官は不介入
 - パイロットによる操作が可能な手順
 - 様々な航空機および状態の考慮
 - 間隔制御の不均一な振る舞い
 - 緊急時の手順
 - 評価基準
- フローコリドーの設定方法
 - 日本国内における便益を最適化する配置

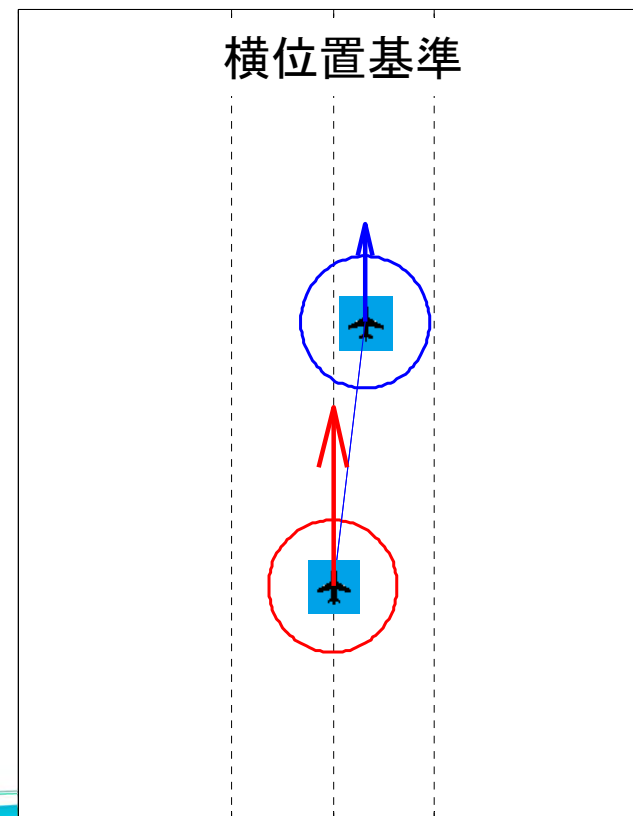
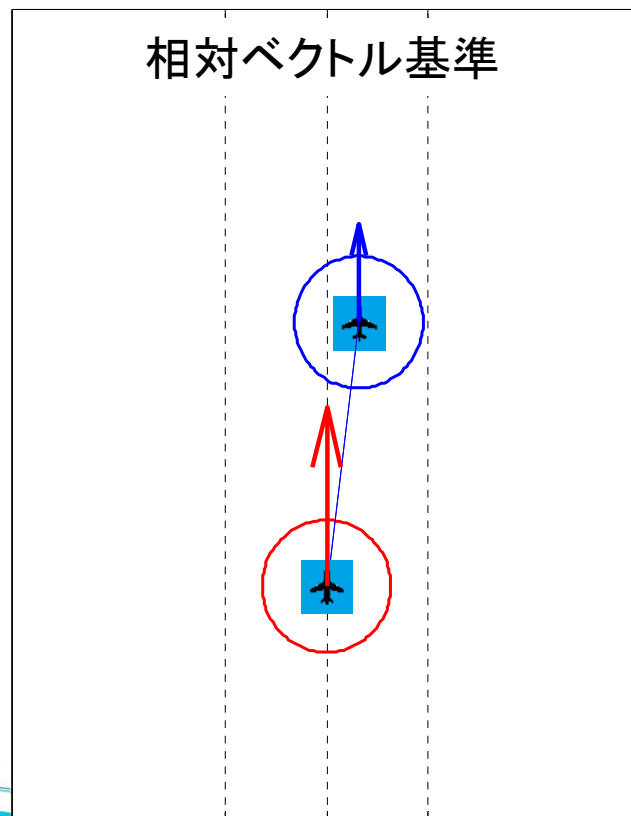


実用化までの課題

- 機上装置のパイロット支援レベル
 - パイロットはどこまで“手動”か？
 - 今回の発表は全て機上装置が自動で行う場合を想定
 - 監視：周辺状況を把握する
 - 判断：コンフリクトの可能性を判断する
 - 誘導：コンフリクトを回避する
 - 制御：航空機を操縦する
- 段階的導入に対応する運用方式が不可欠

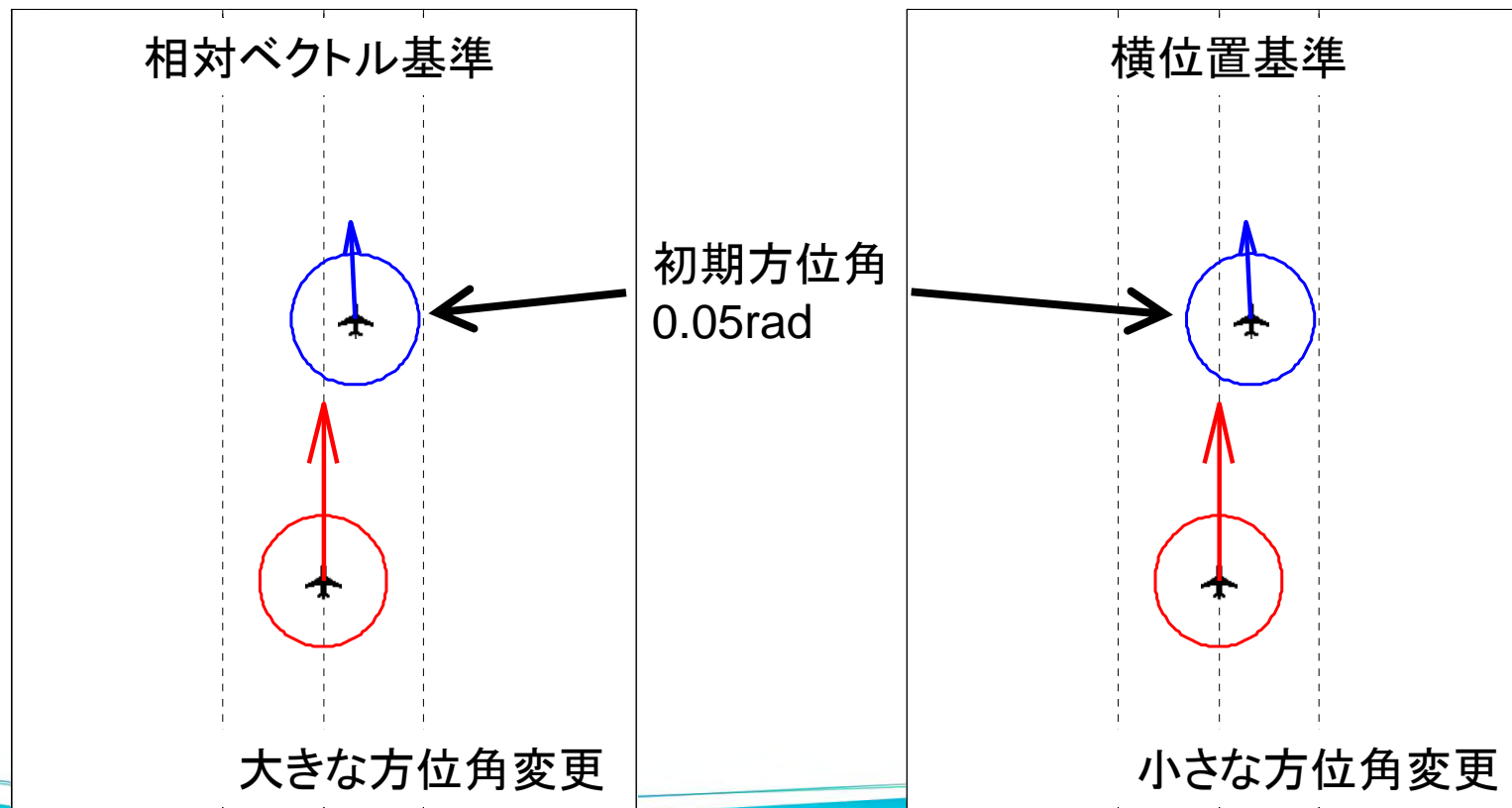
間隔制御方式の差異

- コンフリクト検出と回避の基本的な振る舞い
 - 2航空機間の追い越し
 - 初期に横位置にのみ差がある場合：ほぼ同じ



間隔制御方式の差異

- コンフリクト検出と回避の基本的な振る舞い
 - 初期に横位置および方位角の差がある場合
 - 回避の方向が逆になる ⇒ より少ない方位角変更



新規運航方式の研究方針

- 一般的には：現行の運航方式を少しずつ改善
 - “運航手順を想定⇒現状分析⇒改善”の繰り返し
 - 堅実な手法 ⇒ 実現可能な運航手順
 - 交通容量：安全性の下限で決まる
- 基礎研究では：最初から理想的な状態を想定することが可能
 - 最大の交通量を想定 ⇒ 安全に運航できるルールを探す
 - 理想的な状態に現実的な条件を追加 ⇒ 実現可能な運航手順
 - 現実的な交通量を安全性に余裕を持って対応出来る
 - “理想的な姿を示す”

