

フローコリドーにおける 高密度航空交通流の形成

航空交通管理領域

※中村陽一, 武市昇*, 蔭山康太

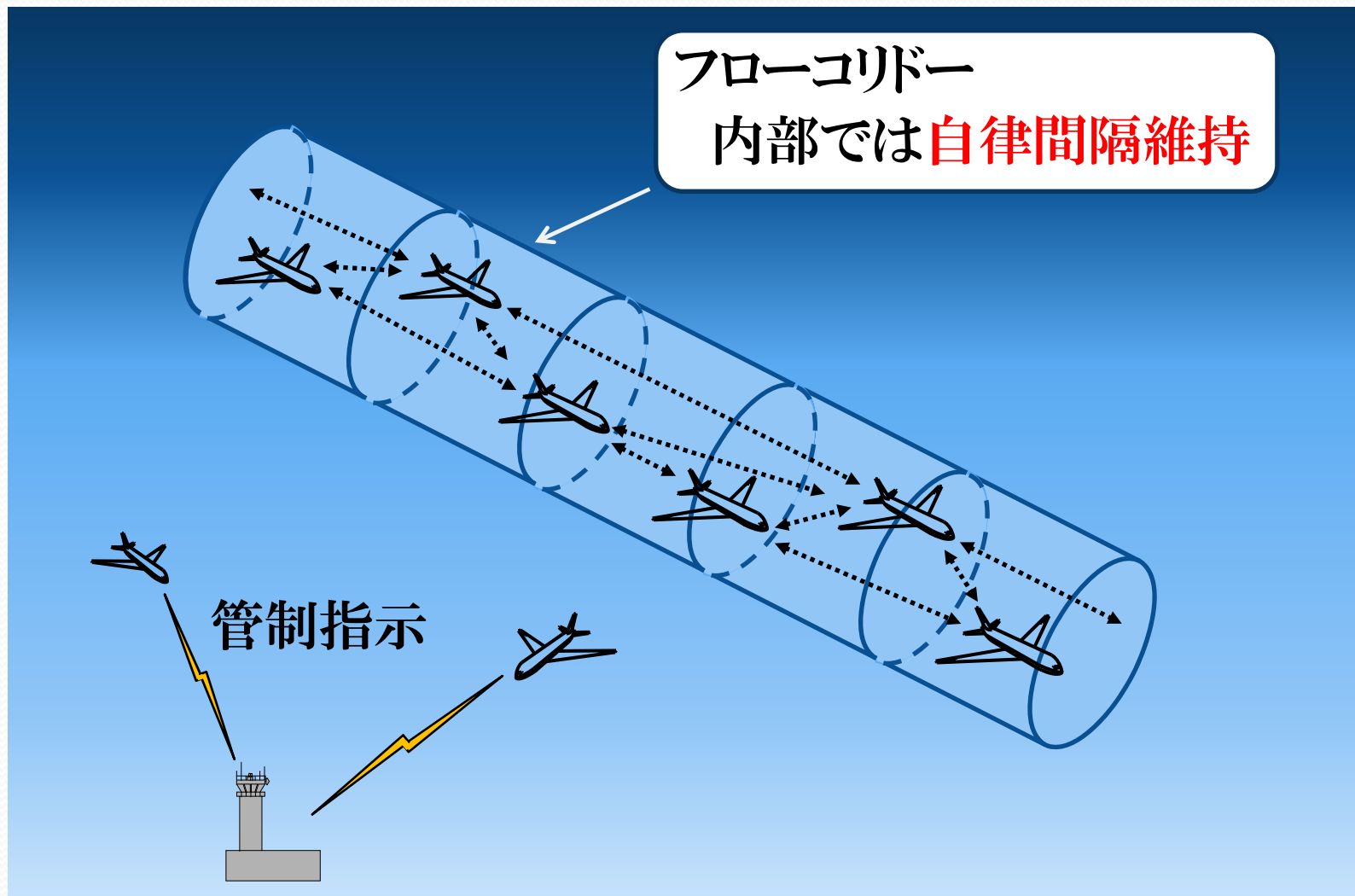
*名古屋大学・航空宇宙工学専攻

発表の内容

高密度な航空交通流における自律間隔維持

- フローコリドーにおける運用
 - 自律間隔維持
- 速度差に基づく付加的ルールを導入
- 数値解析による比較

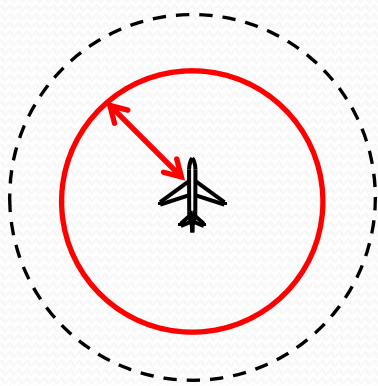
フローコリドーにおける運用



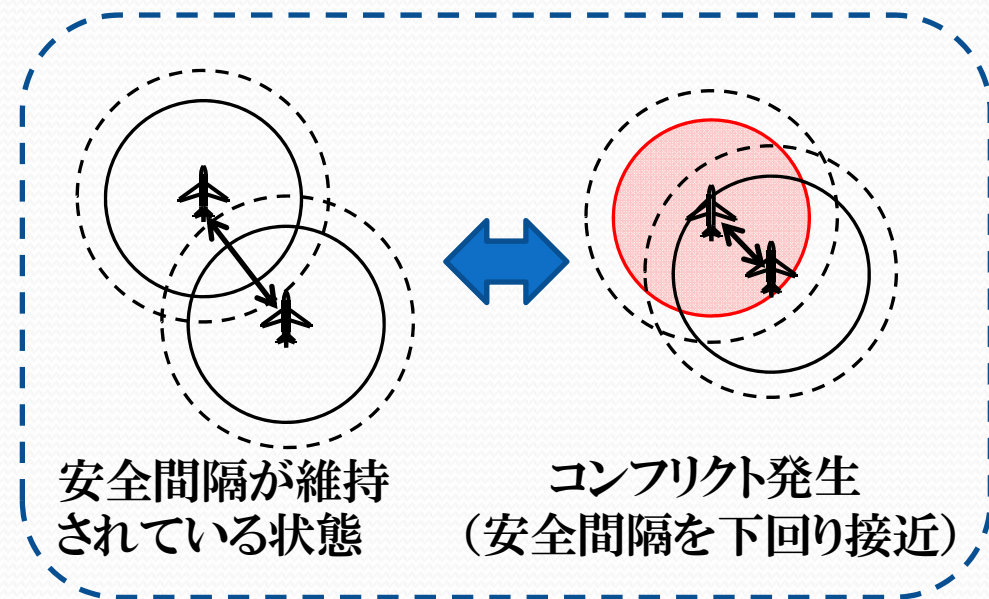
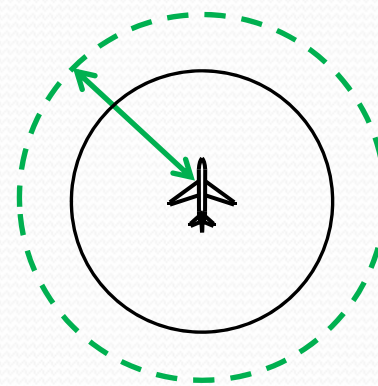
間隔維持の基本的な考え方

- 衝突を未然に防ぐために所要の間隔を維持
 - 安全間隔: 安全のため維持すべき最小間隔
 - 基準間隔: 安全間隔を維持するための間隔制御を行う基準

安全間隔

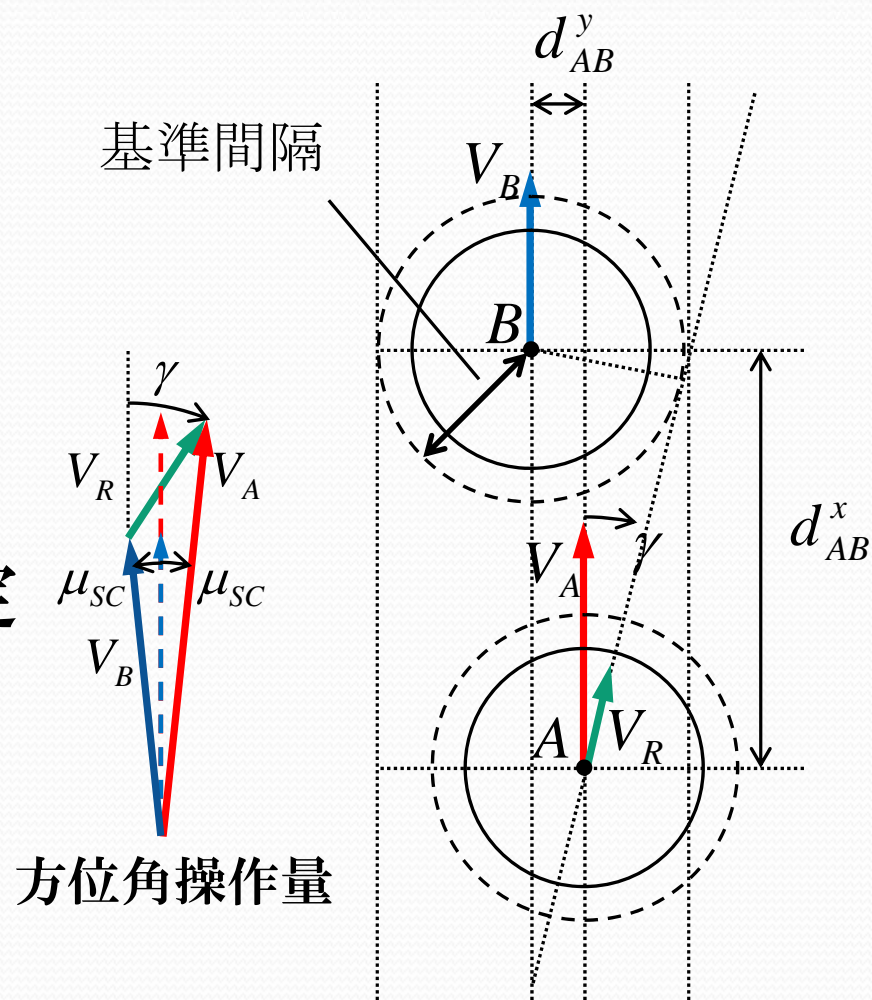


基準間隔



間隔制御方式

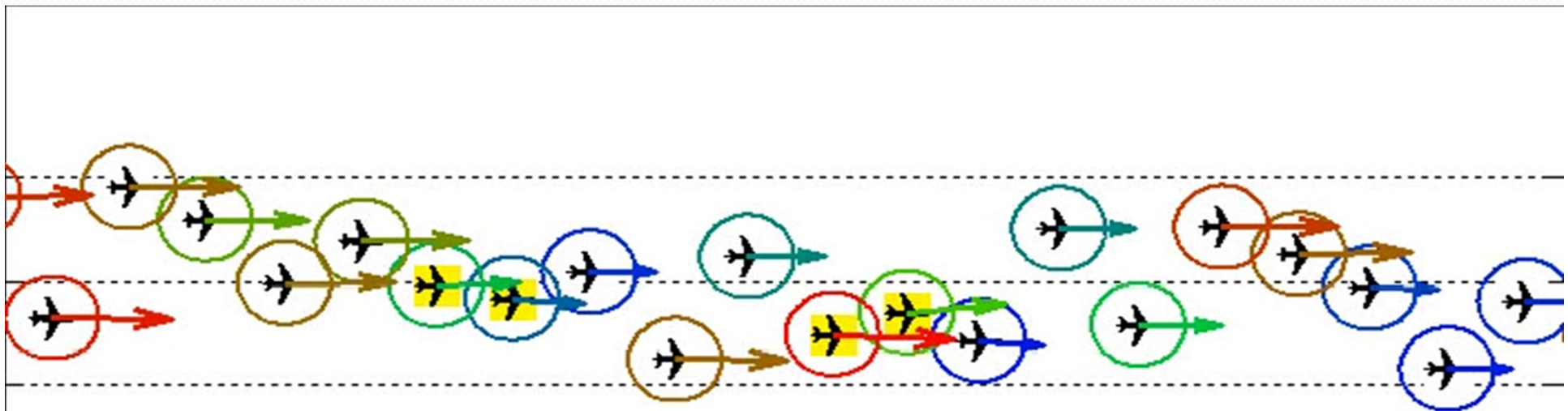
- 基準方式
 - 互いに方位角を操作
 - 基準間隔を維持するための方位角を設定
 - 基準間隔, 安全間隔を下回るとき, 間隔を確保するための操作



基準方式概要図

基準方式による高密度交通流

- 航空機の挙動の一例
 - 周辺航空機との相対位置，速度に応じた針路
 - 最適な一定速度で飛行



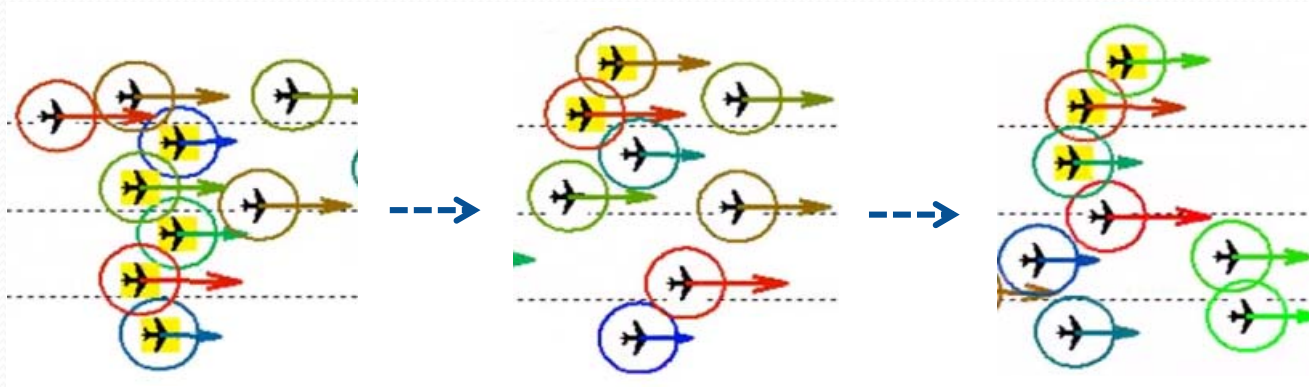
発表の内容

高密度な航空交通流における自律間隔維持

- フローコリドーにおける運用
 - 自律間隔維持
- 速度差に基づく付加的ルールを導入
- 数値解析による比較

付加的ルールを導入

- 基準方式による高密度交通流
 - 周辺航空機との間隔を維持するため
追い越しに伴う頻繁な回避操作



- ➡ 基準方式に付加的ルールを導入
 - より安全かつ効率的な交通流を目指して
- 回避方向指定方式
 - 速度差に基づいた回避方向を指定

回避方向

進行方向 

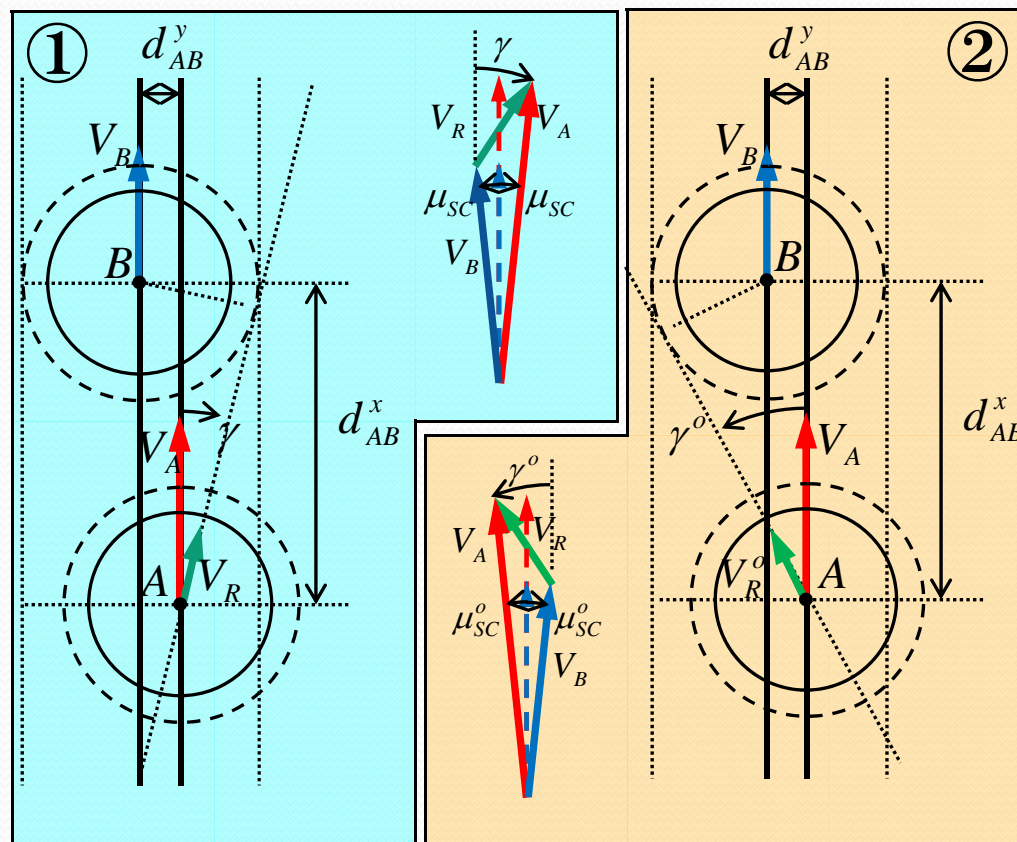
- 2通りの回避が可能

✓ 速度差に基づいた回避方向を指定

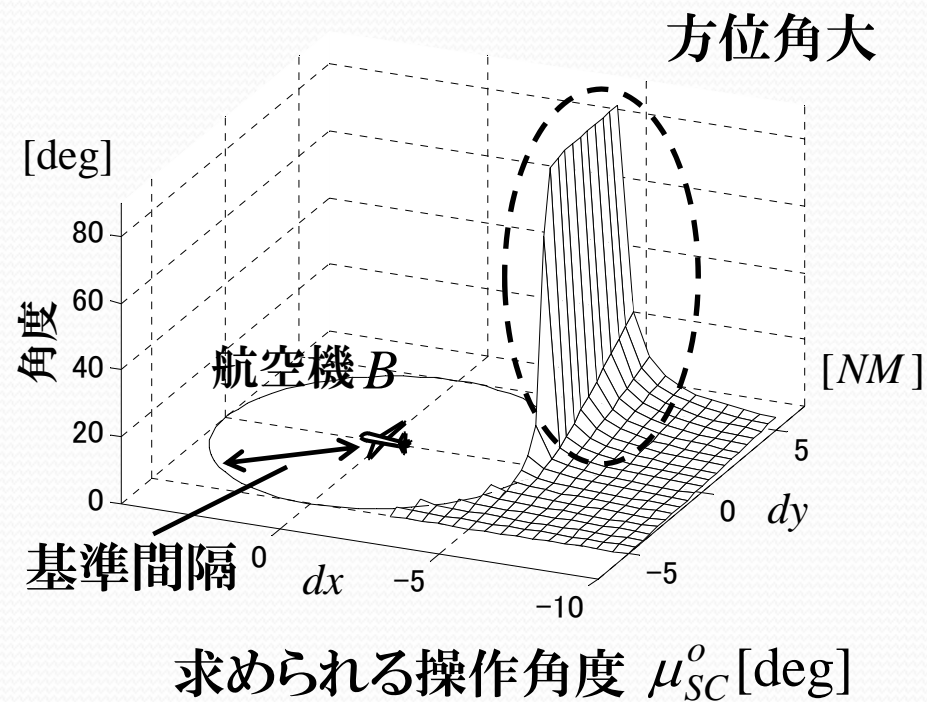
一例として:
左から追い越し

① 方位角変化量: 小
(基準方式)

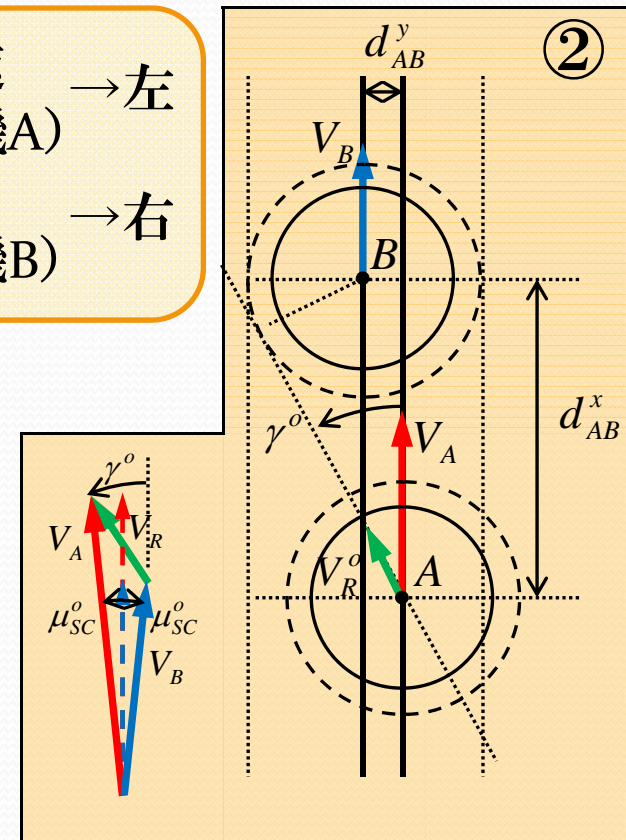
② 方位角変化量: 大



求められる操作角度



高速 (航空機A) → 左
 低速 (航空機B) → 右

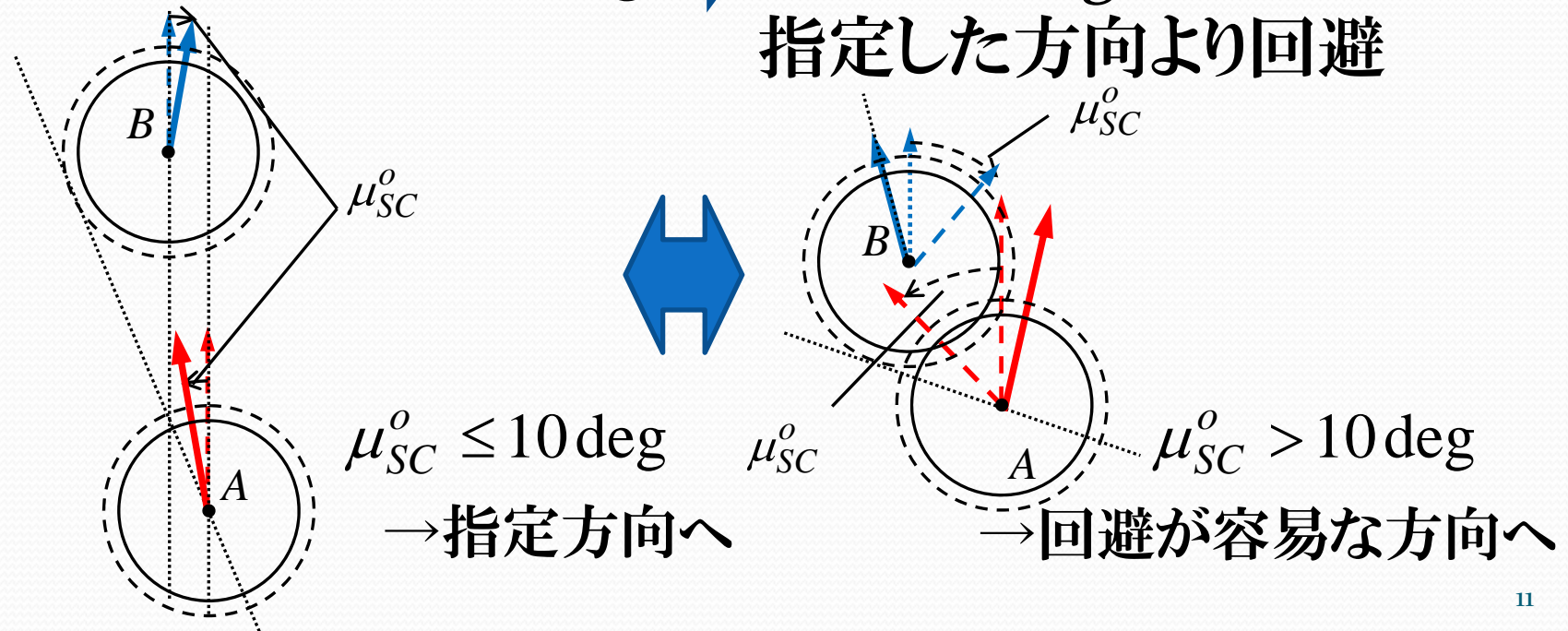


✓ 位置, 速度の関係により指定した方向からの回避は困難

➡ 状況に応じて回避方向を決定: 閾値を導入する

回避方向の変化

- 周辺の機体への影響を最小化
 - 少ない操作角度が望ましい
- 基準方式における解析結果より
 - 最大方位角: 14deg ➡ 閾値 (10deg) 以下の時のみ指定した方向より回避



発表の内容

高密度な航空交通流における自律間隔維持

- フローコリドーにおける運用
 - 自律間隔維持
- 速度差に基づく付加的ルールを導入
- 数値解析による比較

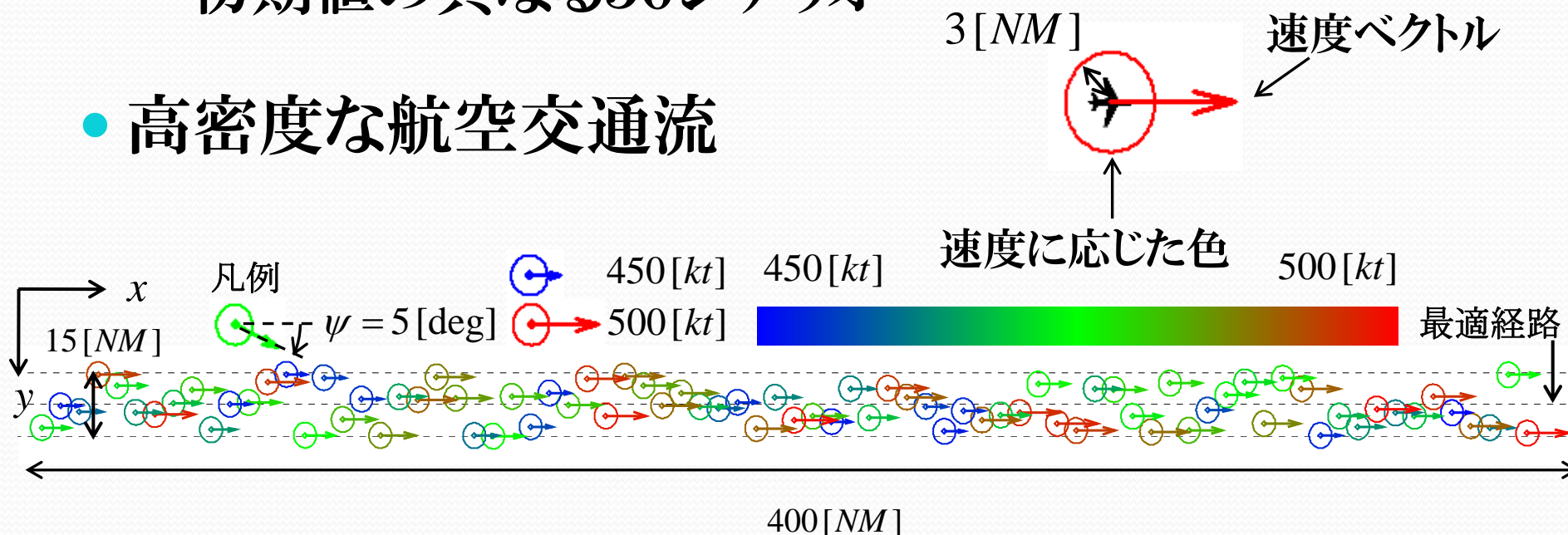
数値解析の概要

- 解析対象の交通流
 - 解析範囲: 400NM
 - 交通量最大
 - 初期値の異なる50シナリオ
- 高密度な航空交通流

数値解析パラメータ

構成機数: 80 監視範囲: 100NM

安全間隔: 3NM 基準間隔: 5NM



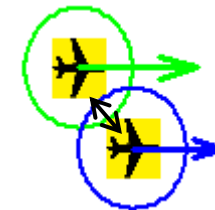
各航空機の挙動

- 同一方向へ
- 各々最適な一定速度
- 接近する航空機
に対して回避すべき
方位角を設定

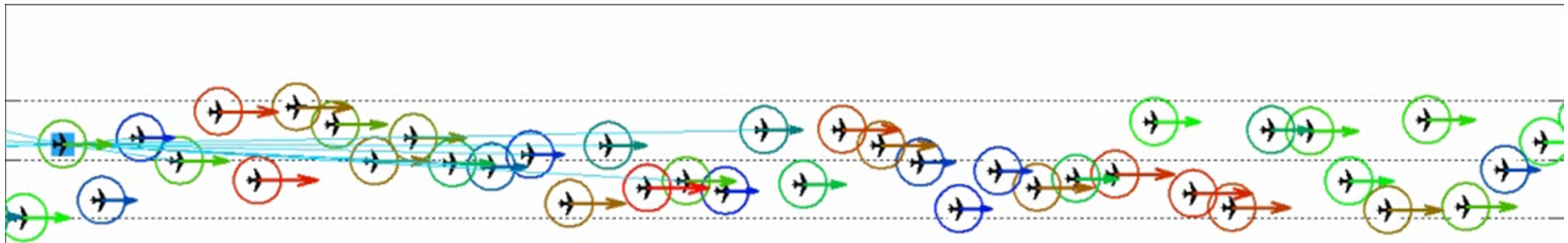
安全間隔



基準間隔以下



前方の遅い航空機,あるいは
後方の速い航空機



間隔維持方式間の比較

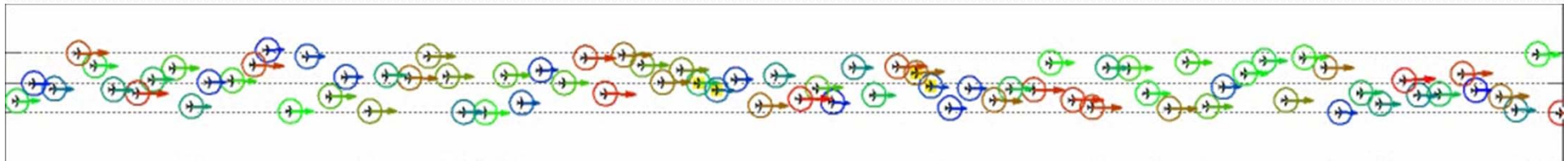
- 速度差に基づく回避方向指定の効果
 - コリドーに速度勾配が形成される
 - 周辺の機体との速度差を低減

※ 構成機数 80機
同一方向へ飛行
2000倍速

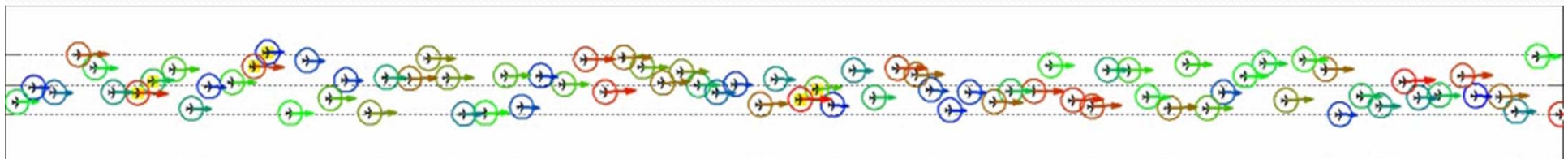
※ 視点: 450ktで飛行



基準方式



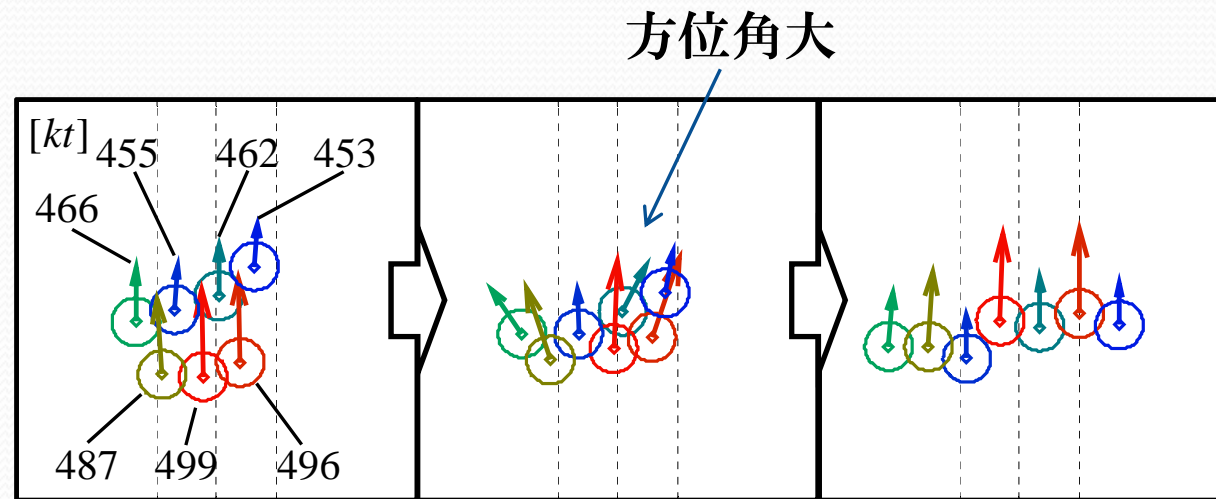
回避方向指定方式



航空機の振る舞いの差異

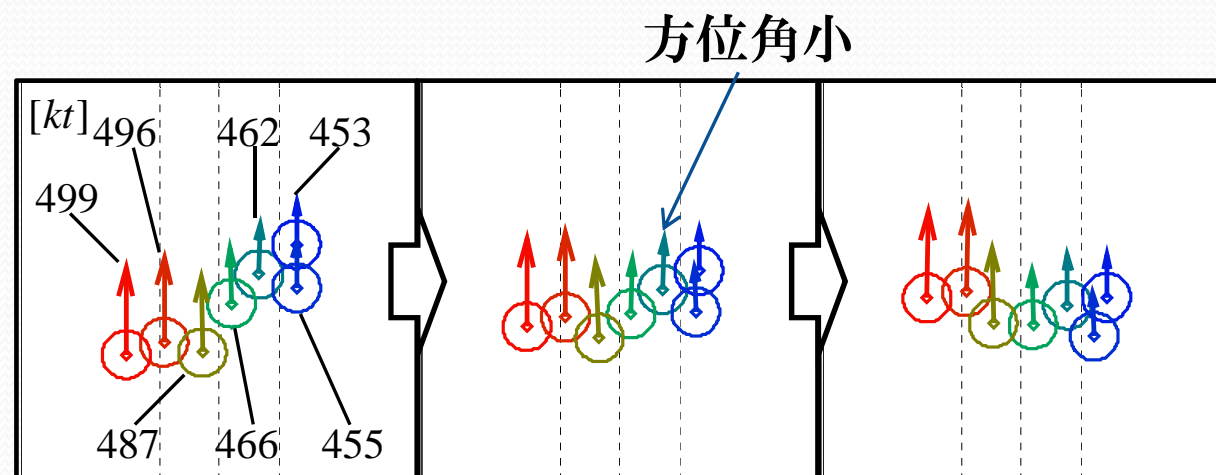
➤ 基準方式

- 近接する航空機
の速度差大
- 間隔の維持に
大きな操作



➤ 方向指定

- 近接する航空機
の速度差小
- 直進とみなせる
操作のみ



評価指標

50シナリオの平均値 (1シナリオあたりの交通流全体の評価値)

	E_{ctrl} 10 ⁷ [m·s]	E_{conf} [m·s]	E_{work} 10 ³ [deg]	1機, 1時間あたりの 操作角度
基準方式	2.96	発生せず	8.85	→ 4.43 [deg]
回避方向指定方式	2.73	発生せず	1.75	→ 0.90 [deg]

➡ 安全性の向上,
ワークロードの大幅な低減効果

- 安全性
 - 基準間隔を下回る接近量[m·s]
 - 安全間隔を下回る接近量[m·s]
- ワークロード(パイロットの操作量)
 - 方位角変化量[deg]

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

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

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

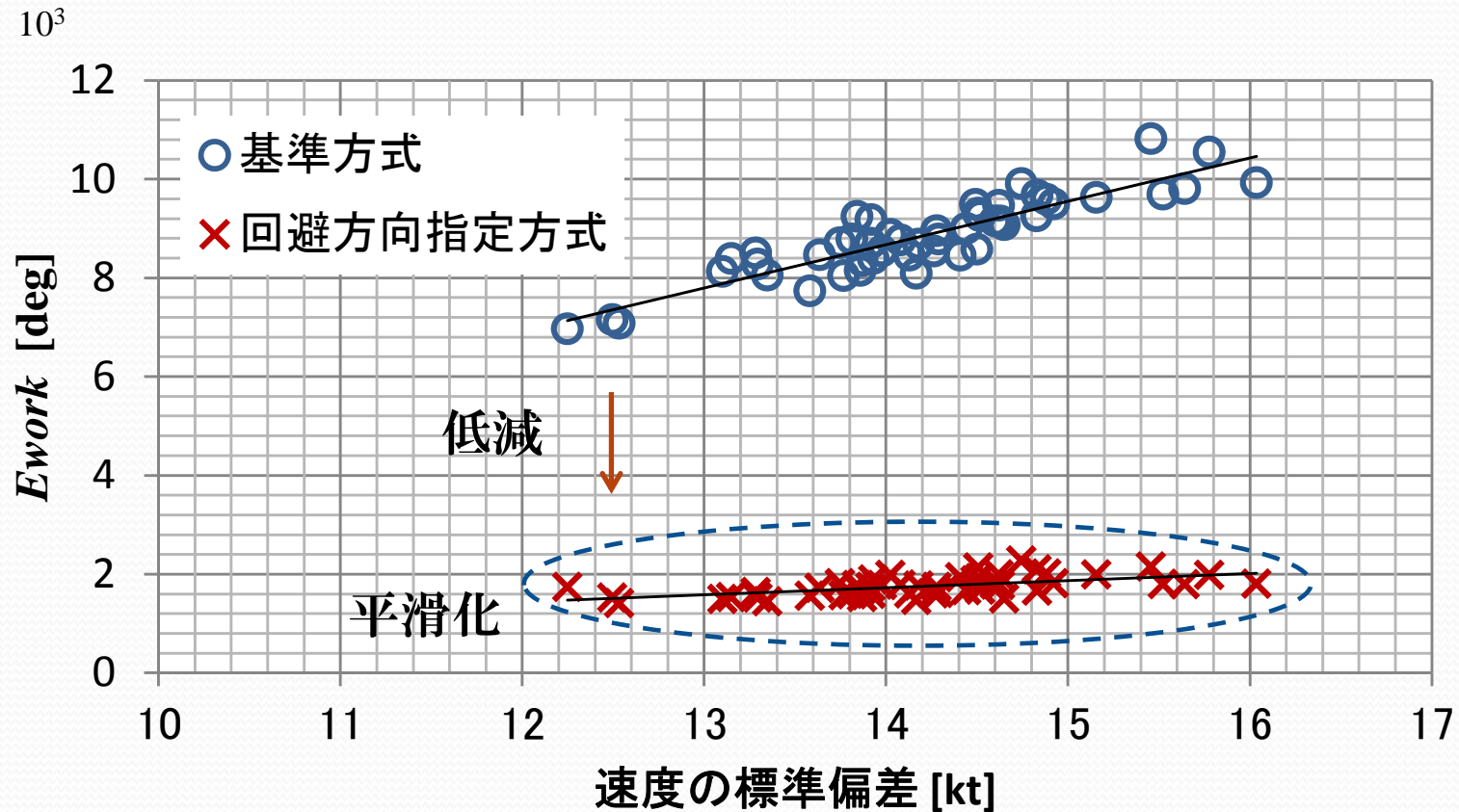
$$E_{conf} = \sum_{i,j} \int d_{i,j}^{conf} dt \quad (i < j)$$

$$WL_i = \int |\dot{\psi}_i| dt$$

$$E_{work} = \sum_i \int WL_i dt$$

シナリオ間の比較

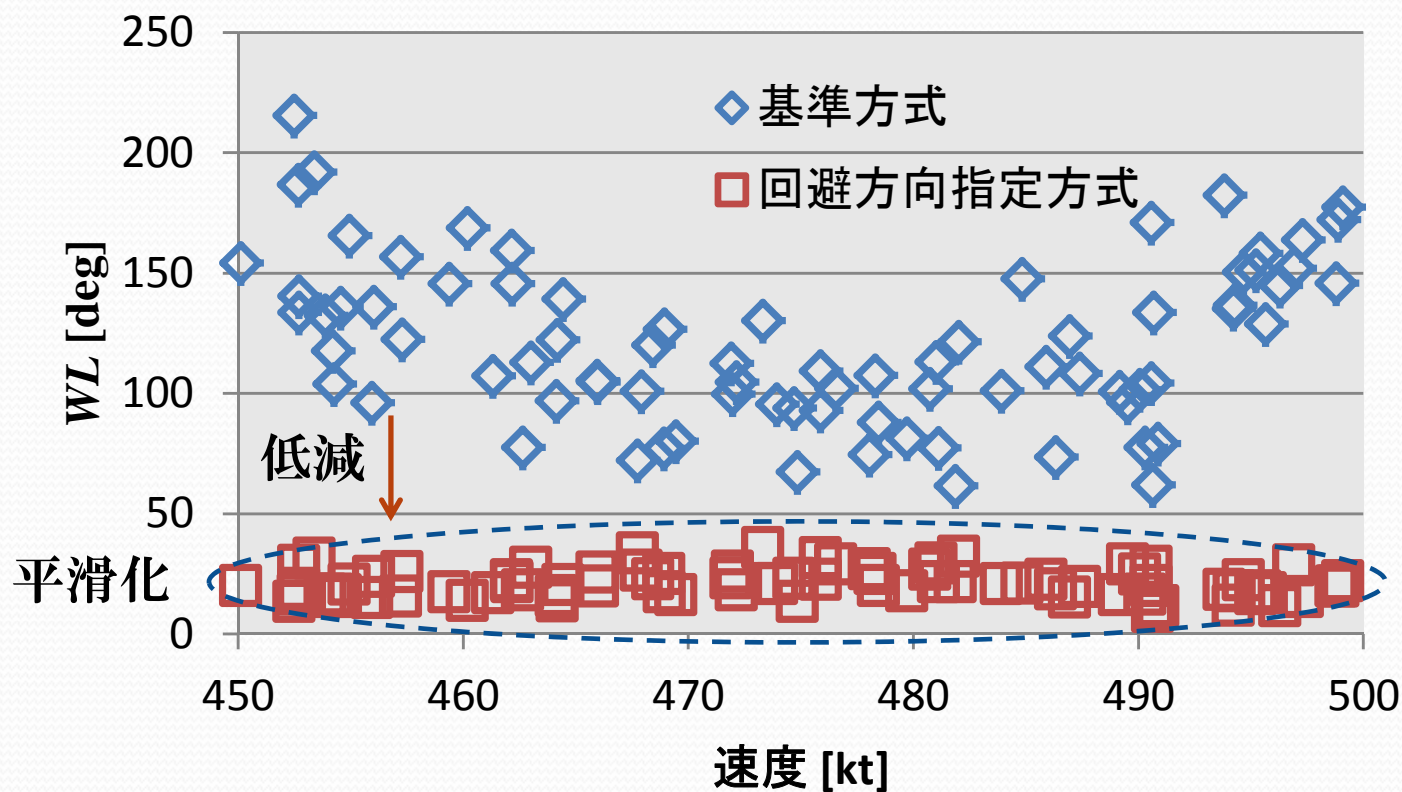
- ワークロードと速度のばらつきとの関係 (50シナリオ)



- 基準方式 — ばらつきの増加に伴いワークロード増加
- 回避方向指定方式 — ワークロードの低減および平滑化

航空機間の比較

● ワークロードと速度の関係 (80機)



基準方式

— 平均速度から離れるほどワークロード増加

回避方向指定方式

— 飛行速度に依らず一定値

まとめと今後の課題

- 付加的ルールを導入
 - 速度差に基づいた回避方向の指定
 - 周辺の航空機との速度差を低減
 - ワークロード
 - 大幅に低減かつ平滑化
 - 今後の課題
 - 現実的なシナリオの考慮
 - 合流, 離脱を含む交通流への適用
 - 交通量
 - 経路長
- ※日本の空域への適用