

軌道予測の高精度化に向けた 悪天回避経路生成に関する検討



中村 陽一，瀬之口 敦，平林 博子
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
電子航法研究所 航空交通管理領域

発表内容

悪天回避経路の生成手法

- 研究背景
 - 気象現象および回避経路
- 計算手法
 - 航空機の飛行
 - 悪天域の設定
 - 回避経路の生成
- シミュレーション例
- まとめ

研究背景

- 将来に向け軌道予測の高度化が推進
 - 安全かつ効率的な航空交通システム

- 気象現象の考慮: 重要課題の一つ

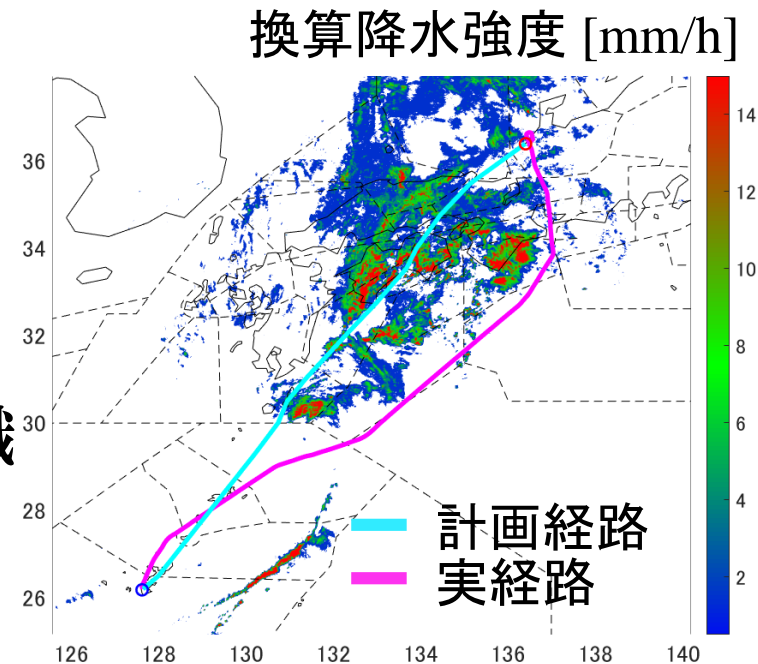
- 風→飛行時間のばらつき
- 悪天→経路変更等
- ✓ 不確定性の増大につながる

- 悪天に対する回避

- 回避すべき状況, 経路の認識
 - 人間の判断に基づく
- ✓ パイロットや管制官により
考え方は多岐にわたる

- 客観的かつ定量的な解析が不可欠

- 認識の共有, システム側での予測



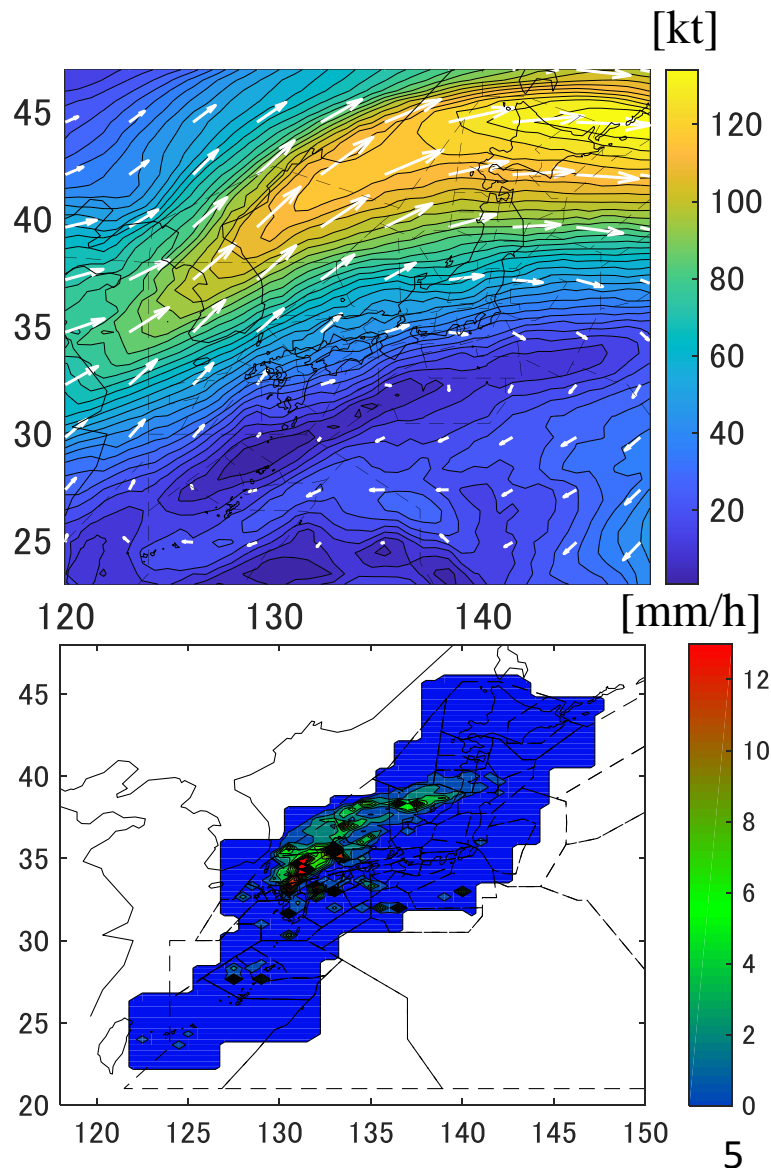
研究目的

- 悪天回避経路の提案
 - 実際の気象現象に対する推奨経路の候補
 - 運航者や管制機関にとって安全かつ効率的
 - 各経路の飛行に伴う情報の可視化
 - 悪天回避経路の生成手法の一例の紹介
 - 悪天域の設定
 - レーダーエコーに基づく
 - 回避経路の生成
 - 異なる悪天域に対する回避経路の変化
- ※航空機が避ける前提
- 通過の可否については今後の課題

利用データ

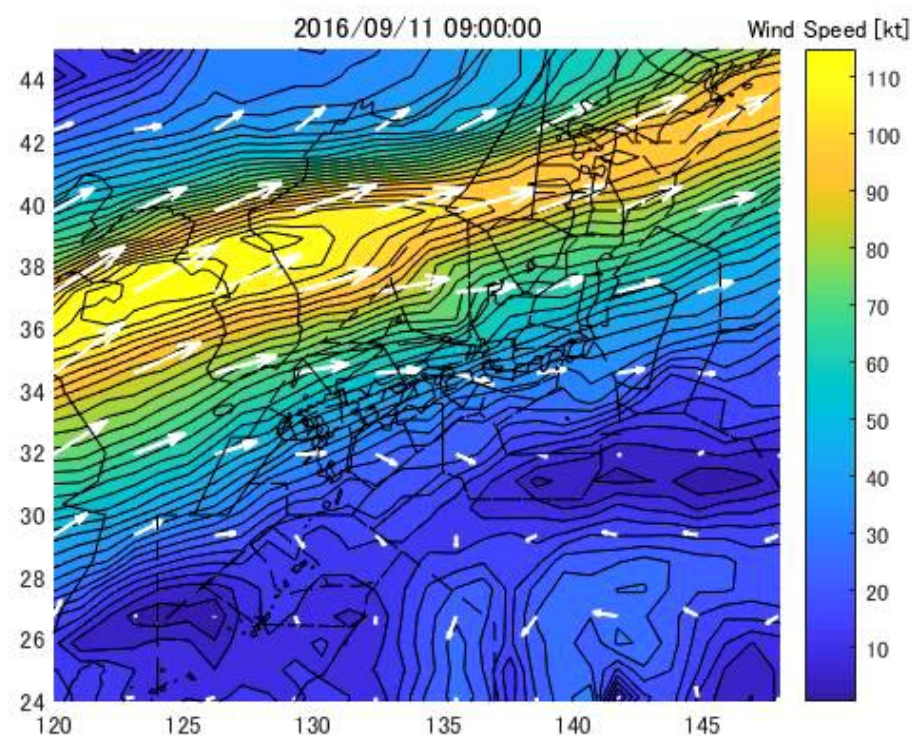
- 2種類の気象データ
 - GPV (格子点値)
 - 気象庁提供
- MSM (メソ数値予報モデル)
 - 風向, 風速, 気温等
 - 地上および16の気圧面
 - 3時間毎
- 合成レーダーエコー強度
 - 換算降水強度
 - 10分毎

(※エコー頂高度も提供されるが、
本発表では簡単のため用いない)

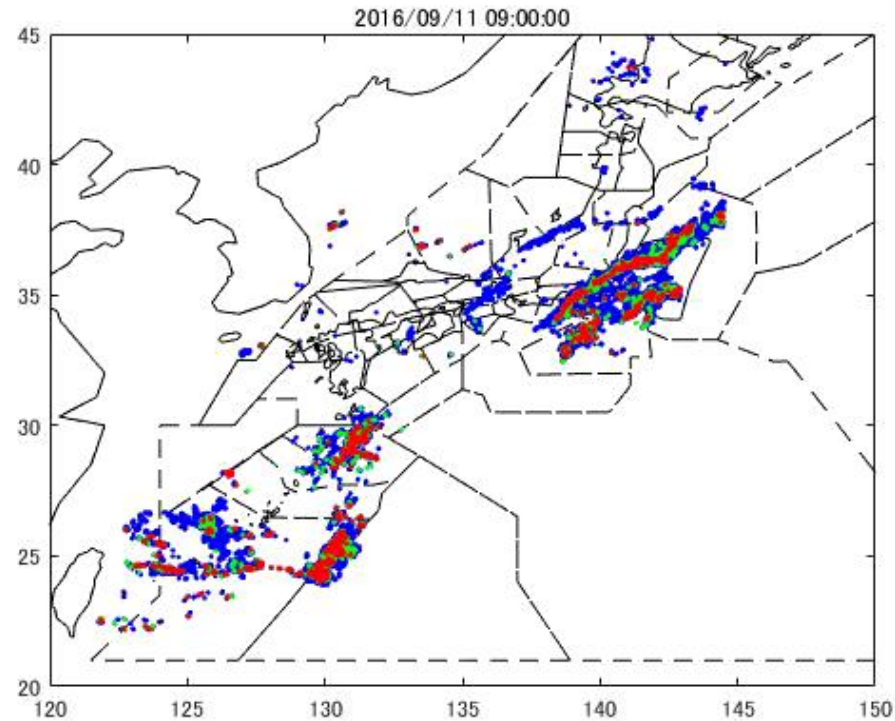


気象現象

- 風およびレーダーエコー分布の変化
(2016/09/11 9:00 ~ 09/19 09:00)
 - 風と比較してエコーの変化が大きい



風向, 風速
(気圧高度40,000ft)



レーダーエコー強度

計算手法

- 航空機の飛行の模擬
 - BADA (Base of Aircraft Data) に基づく
 - EUROCONTROL 開発・維持
 - 40,000ft を一定速度で飛行
- 悪天域 (飛行困難空域) の設定
 - レーダーエコーに基づく
 - エコー強度, 集合間の距離の二つの閾値を導入
- 回避経路の算出
 - 動的計画法に基づく最適経路
 - 燃料最小を最適と仮定

航空機の飛行

- 航空機の性能モデル (BADA)
 - 計算式やパラメータが提供される

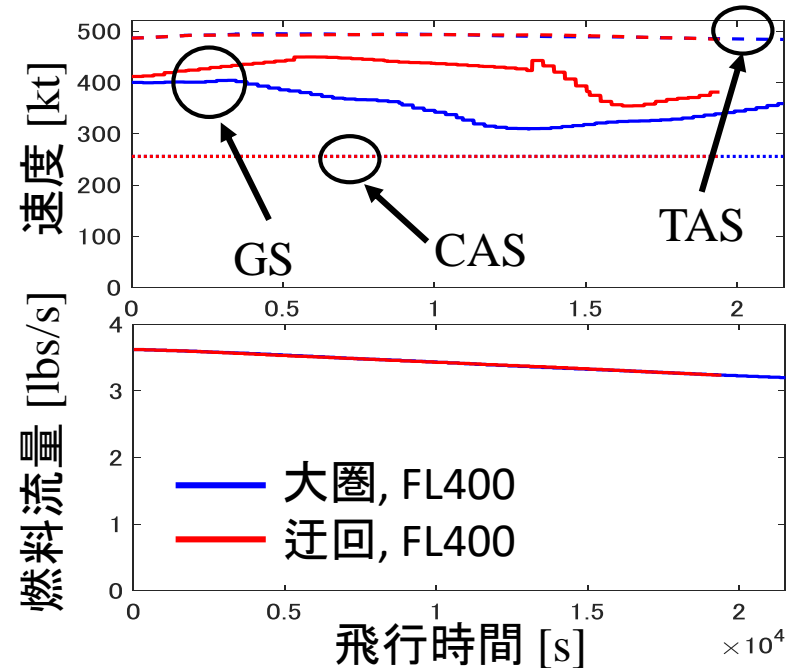
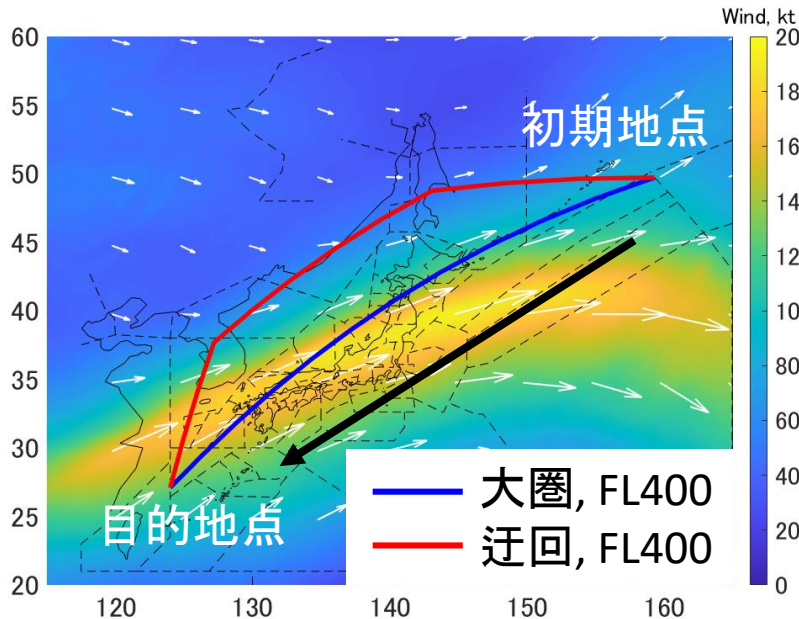
BADA
+
気象

“航空機の軌道”
(3次元位置・時間)

⇔

“飛行状態”
(速度/推力/燃料等)

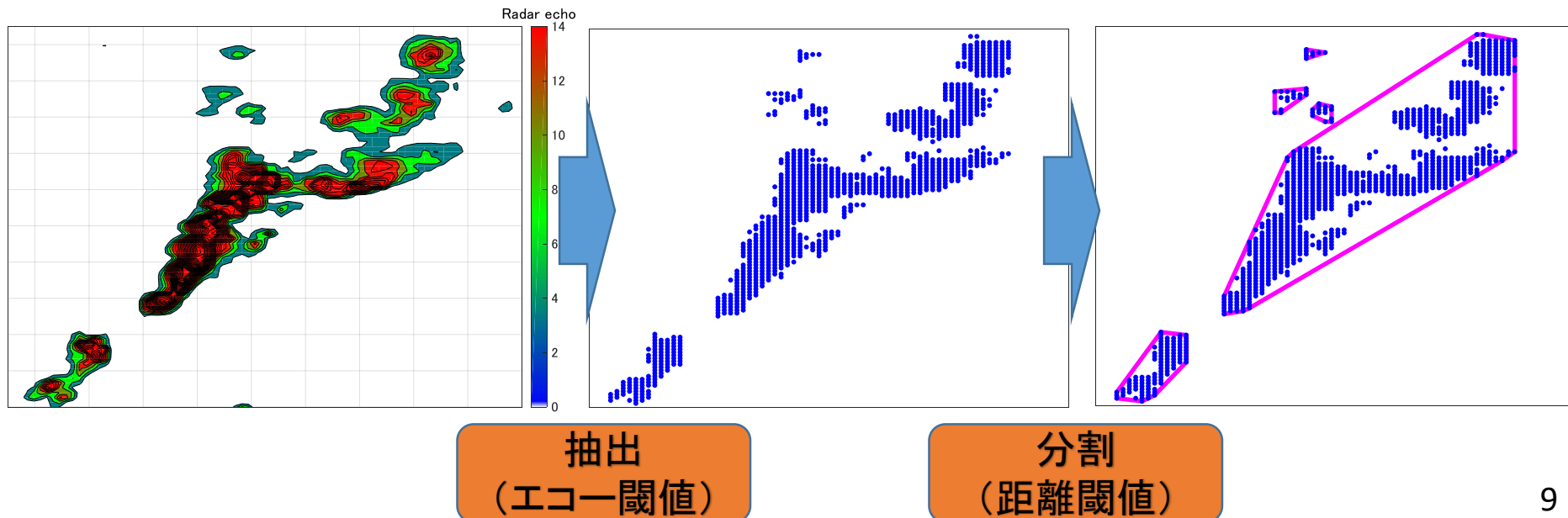
➤ 飛行速度を仮定 → 航空機の軌道を計算



一定高度を飛行する航空機の速度, 燃料のイメージ図

悪天域の設定

- データの抽出
 - レーダーエコー強度の閾値 (避けるべき強度)
- ポリゴンの作成
 - データ点を距離閾値に基づき集合に分割
 - 全ての点を包含する最小の凸多角形 (凸包)



悪天回避経路

- 最適経路

- 評価関数を最小化する経路

- 例：飛行時間，燃料消費，コストインデックス

- 動的計画法

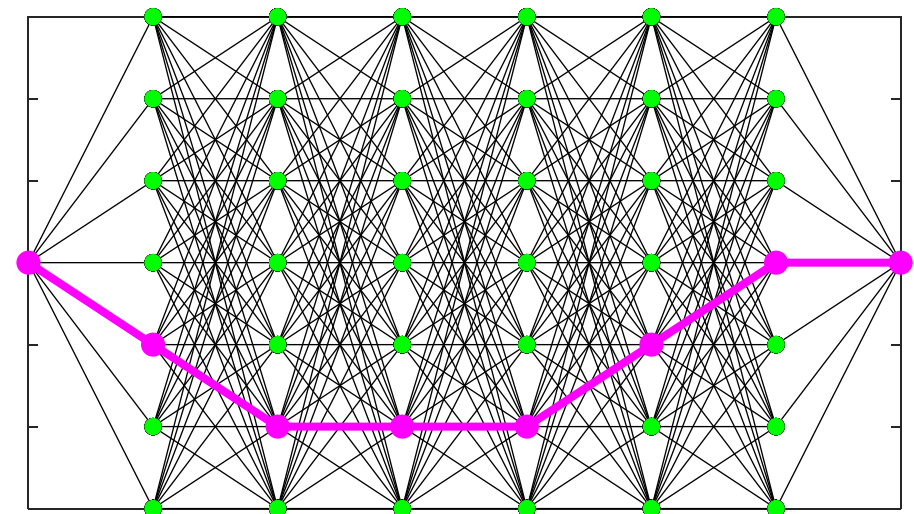
- 格子点を配置

- 各接続を計算→最小評価値および接続元を記録

- 冗長な計算を避ける

- 117,649通りの経路

- →259回の計算

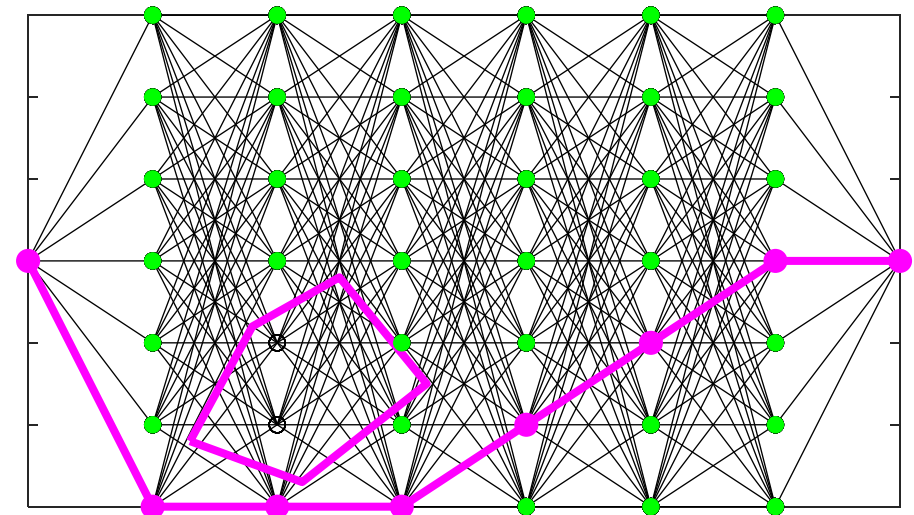


計算方向 →

悪天回避経路

- 悪天域：ポリゴン
 - レーダーエコーを元に作成
- 回避経路：ポリゴンを除外した最適経路
 - 各接続計算時にポリゴンとの通過判定
 - ポリゴン内部の点および通過する接続→計算しない

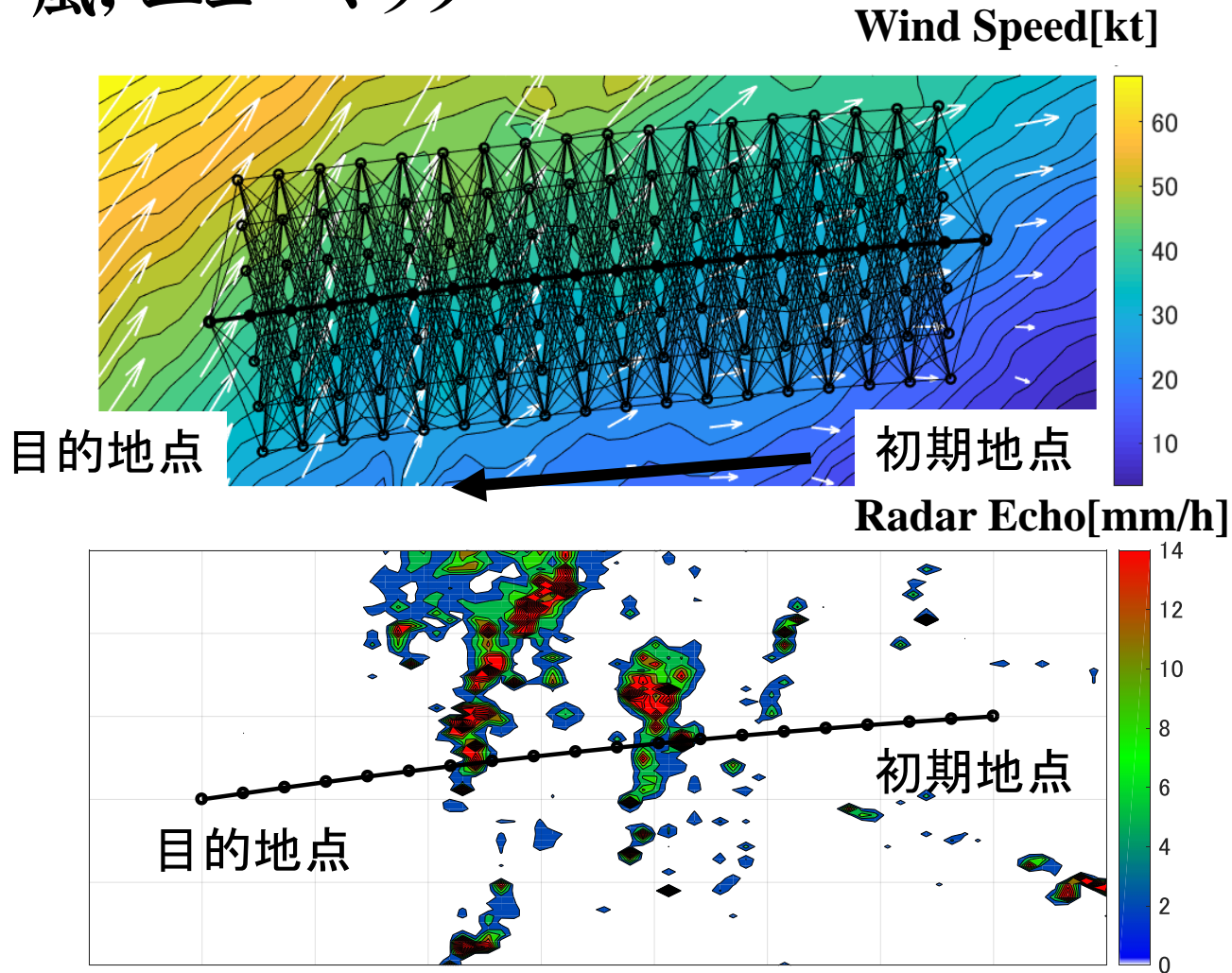
➤ 計算範囲内での最適解
→ 回避経路



計算方向 →

計算例

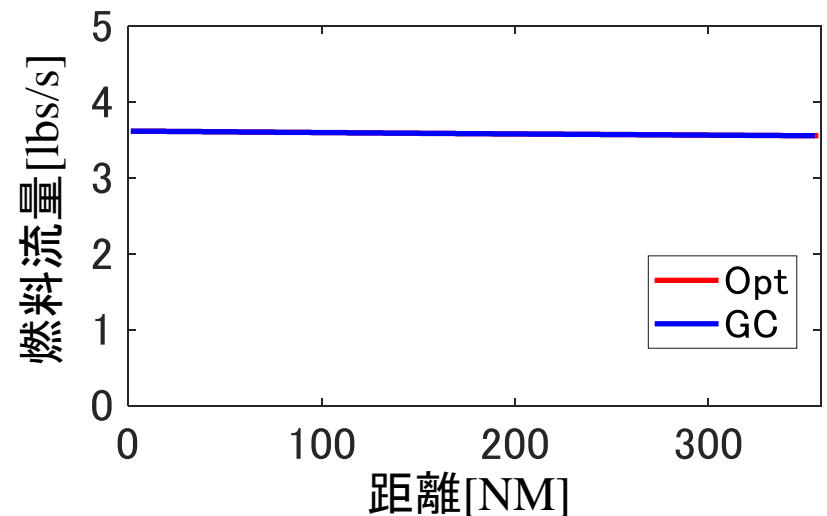
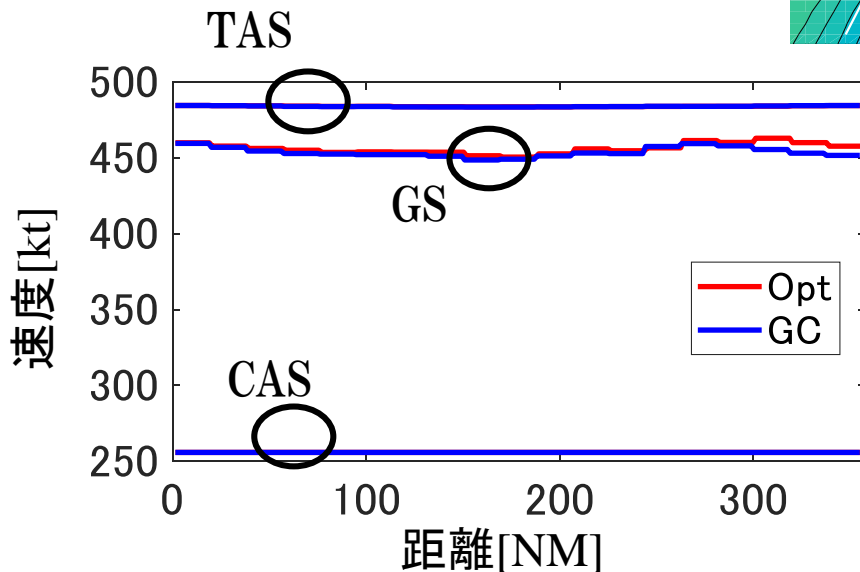
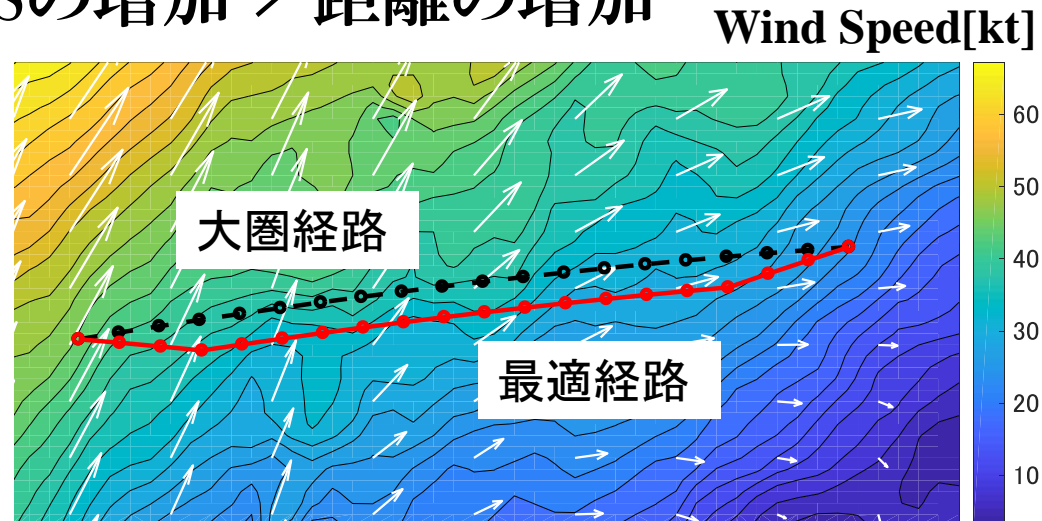
- 初期条件
 - 風, エコーマップ



最適経路

- 時間, 燃料の削減
 - 向かい風の減少=GSの増加 > 距離の増加

	距離 [NM]	時間 [min]	燃料 [lbs]
大圏	335.1	46.94	10,103
最適	336.8	46.92	10,099



計算結果

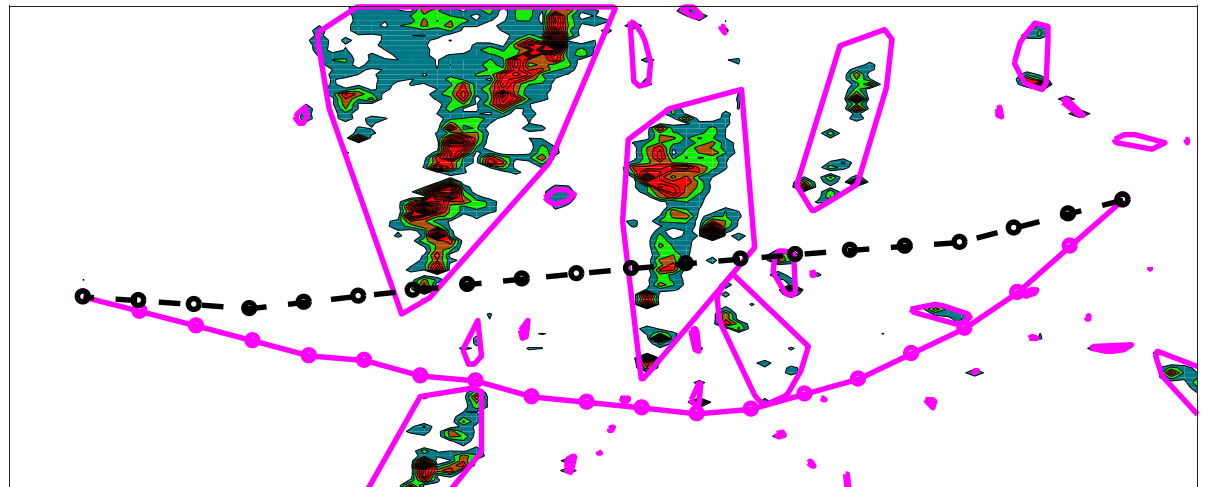
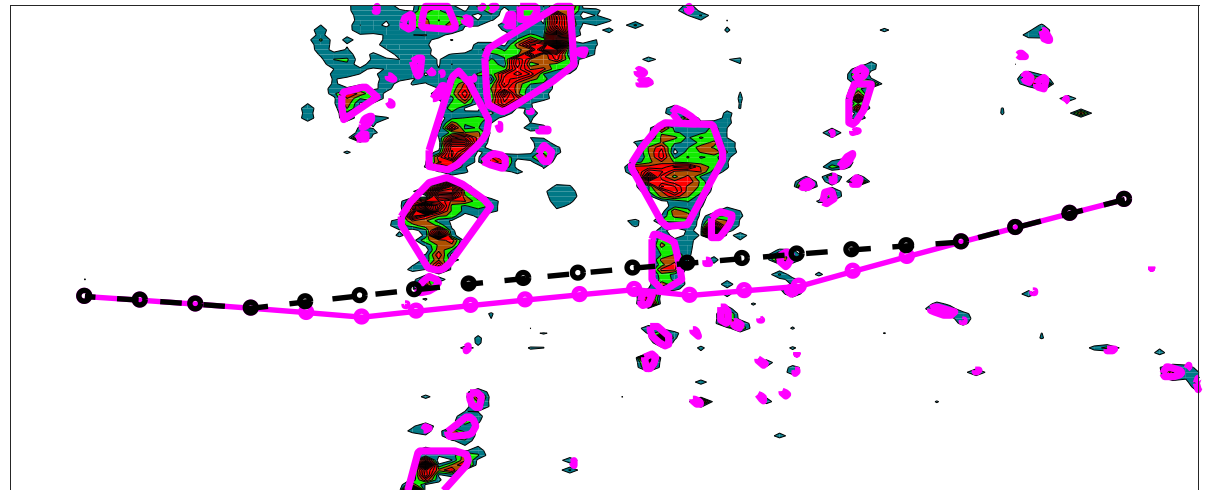
- 異なる悪天域に対する経路

RTE1

エコー閾値[mm/h]	10
距離閾値[NM]	2
距離[NM]	358
時間[min]	47.0
燃料[lbs]	10,120

RTE2

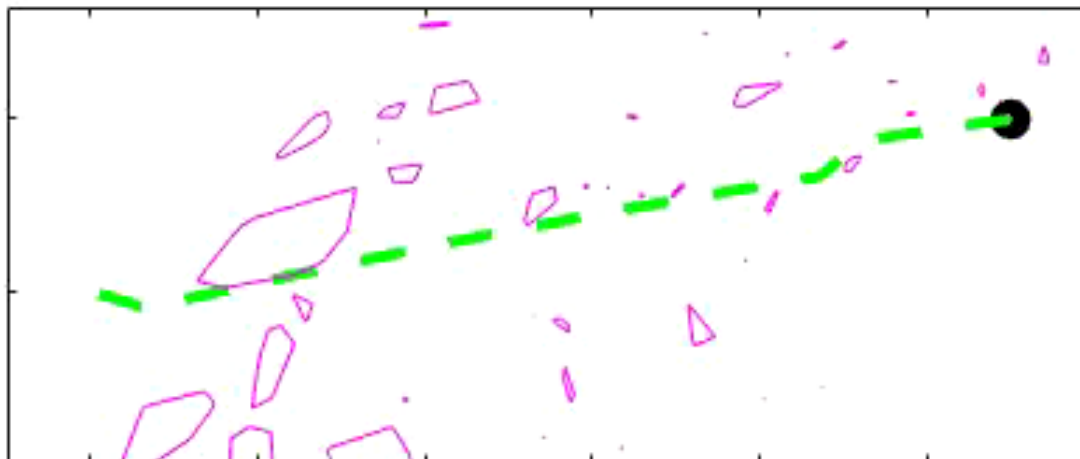
エコー閾値[mm/h]	5
距離閾値[NM]	7
距離[NM]	377
時間[min]	48.8
燃料[lbs]	10,507



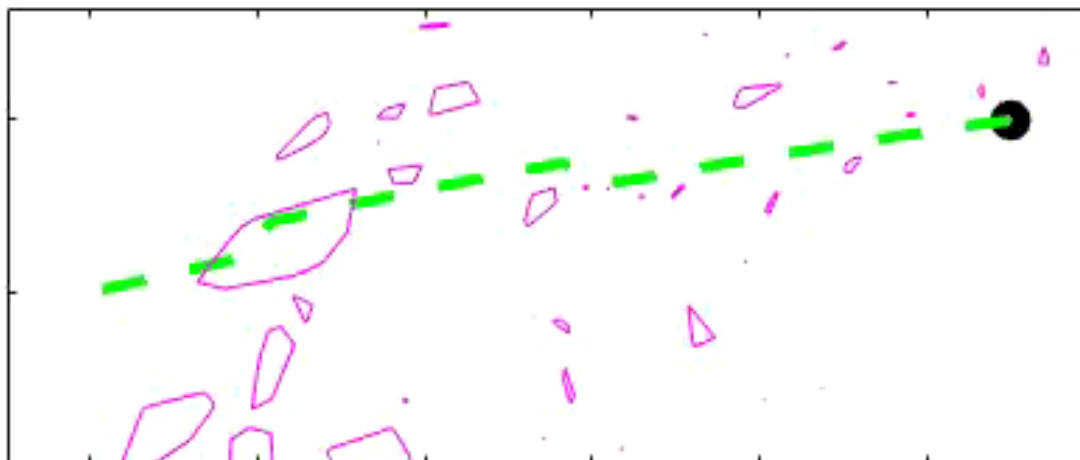
➤ 飛行困難空域の生成方法で経路が大きく異なる

移動する悪天域に対する経路

- 初期時刻の飛行困難空域で計算



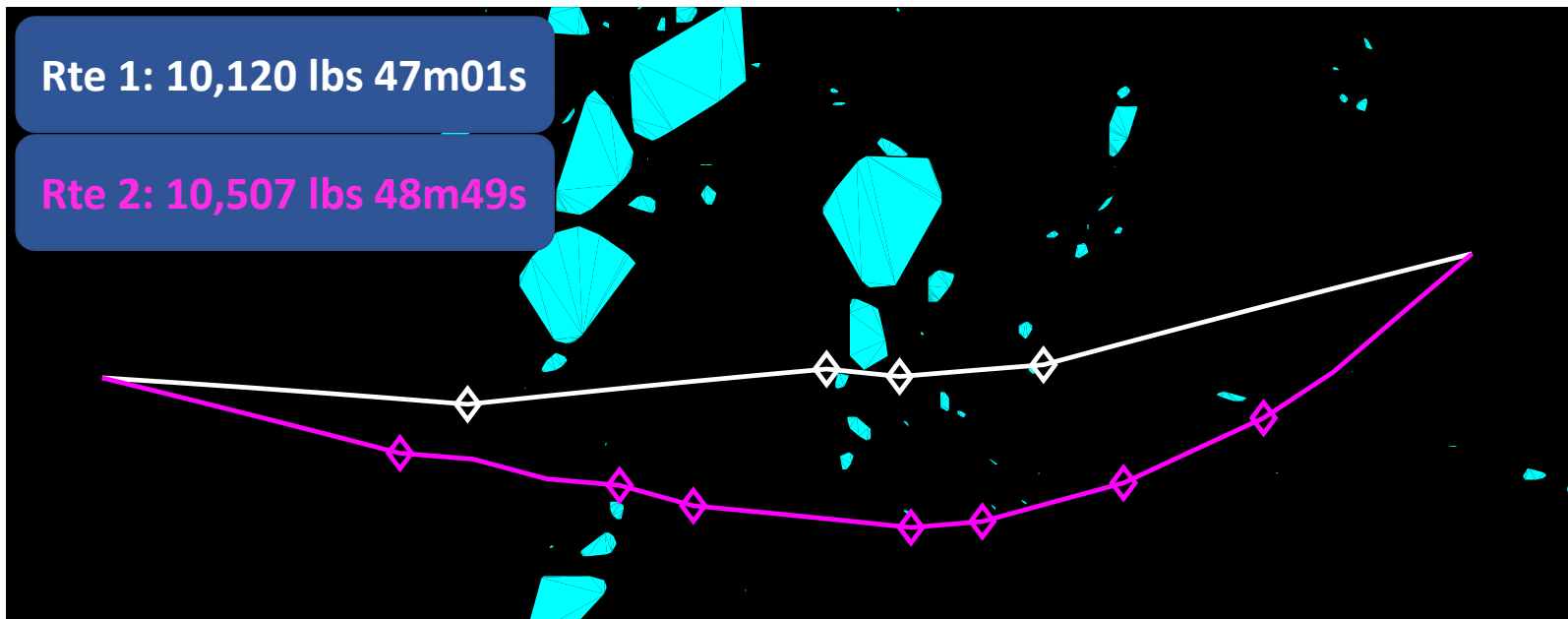
- 10分毎に飛行困難空域を更新



➤ 飛行困難空域の予測, その精度により経路が異なる

将来に向けて

- 実運航に近い経路算出が可能となれば...
 - 飛行中のパイロットへの回避判断に資する支援
 - 経路と悪天域の関係, 定量的な値の変化
 - より精度の高い交通流制御への適用
 - 飛行前の段階におけるデータ, 予測が必要
- ✓ どこまで可能か明確にすることが不可欠



まとめ

- 悪天回避経路の生成手法の紹介
 - 飛行困難空域およびその回避経路の生成例
 - 閾値に基づくポリゴン形状の変化
 - ポリゴン変化に伴う回避経路の変化
- 今後の課題
 - 実運航時の認識・判断と乖離の少ない経路
 - 関係者間の共通認識を深める
 - 気象現象の実運航への影響
 - レーダーエコー, エコー頂高度, 雲画像等
 - 他の交通流との関係
 - 予測に基づく経路生成
 - 飛行計画時点で利用可能なデータ, 精度検証