

運航制約条件を考慮した 悪天回避経路に関する研究



中村 陽一
瀬之口 敦

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

制約を考慮した悪天回避経路

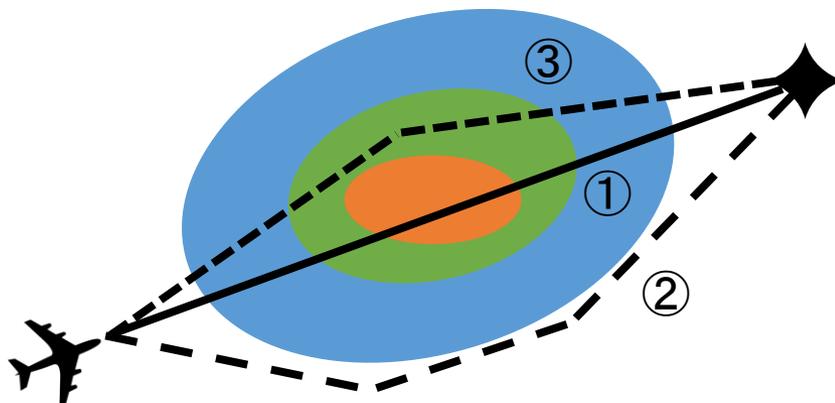
- 研究背景
 - 悪天回避のモデル化
- 利用データ・計算手法
 - 飛行困難空域の設定方法
 - レーダーエコーに基づく
 - 回避経路の算出手法
- 解析結果
- まとめ

研究背景

- 航空機運航における悪天域
 - 運航の安全性および快適性への影響
 - 回避は人の知識・経験に基づき実施
 - 類似した状況においても異なる判断
 - ✓ 航空機に影響を与える領域の正確な把握は困難
- 悪天域の与える影響
 - 計画経路の設定, 飛行中の経路の逸脱
 - 調整に係る負荷, 不確実性の増加等
 - 空域容量の低下
 - 交通流制御への影響
- 将来の協調的な運航前の軌道調整に向けて
 - 指標の確立→システムの高度化

研究背景

- 悪天回避経路の生成
 - 悪天現象に対応した回避経路候補の提示
 - 悪天域との関係, 通過セクター, 時間・燃料等
 - 運用の判断の検討材料
 - 予定通過時刻の高精度化
 - TBOをはじめとした将来施策への寄与
 - 混雑状況を考慮した軌道の管理
 - 航空機側・管制側共に考慮した運用



悪天域の回避イメージ

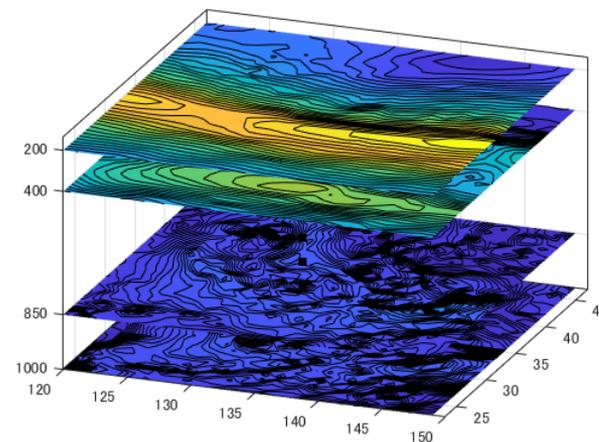
- ①: 効率を重視
- ②: 回避を重視
- ③: 効率と回避のバランス

研究目的

- 悪天回避経路のモデル化
 - 実運用に適用可能な回避経路の生成
 - 判断に資する情報の提供
 - 悪天状況・混雑状況・時間・燃料等
 - 悪天域を考慮した交通流管理
 - 空域容量や混雑状況を踏まえた経路・制御
- 悪天回避経路の生成
 - 飛行困難空域および回避経路の生成手法
 - ユーザによる悪天回避判断のばらつきの考慮
 - セクターによる制約の考慮
 - 回避経路や飛行時間等の変化

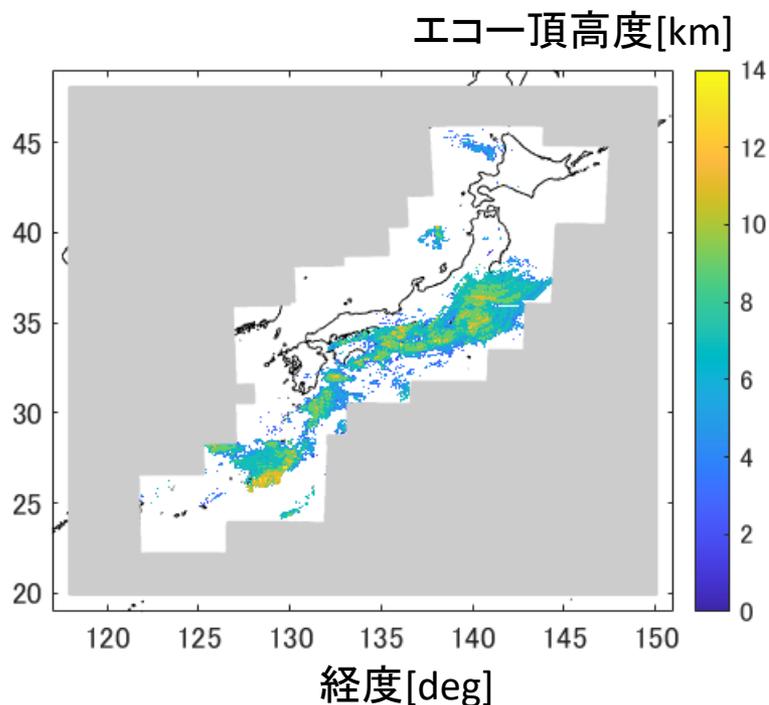
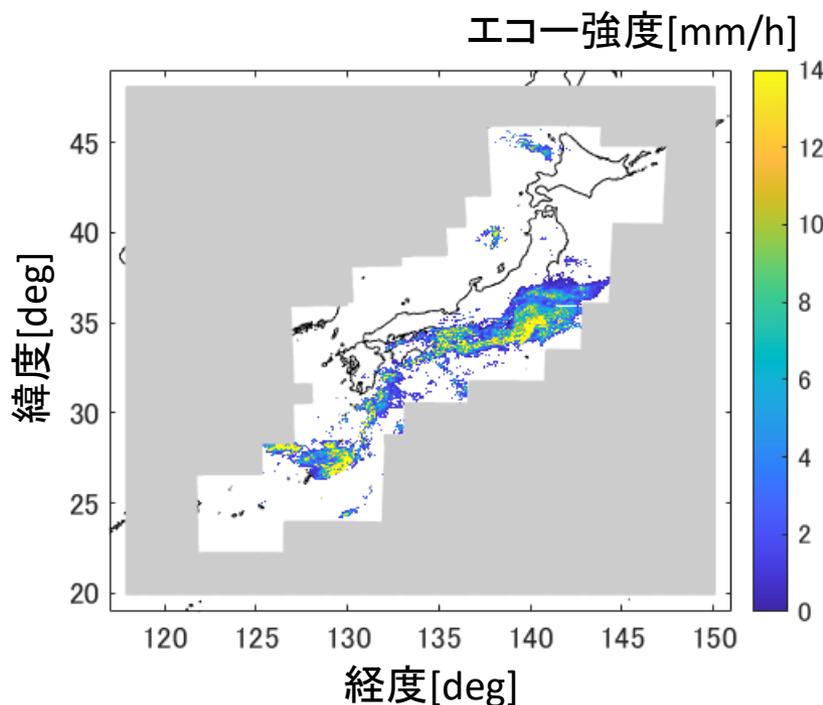
利用データ

- 航空機の飛行の模擬
 - 気象データ
 - MSM (Mesoscale Model)
 - 風向, 風速, 気温等
 - 地上および16の気圧面
 - 3時間毎の初期値
 - ✓ 空間・時間方向に線形補間
 - 航空機の性能モデル
 - BADA (Base of Aircraft Data)
 - 航空機の軌道 ⇔ 飛行状態 (推力 / 燃料等)
 - 各高度帯の標準的な運航速度
 - ✓ 一定の巡航マッハ数を仮定



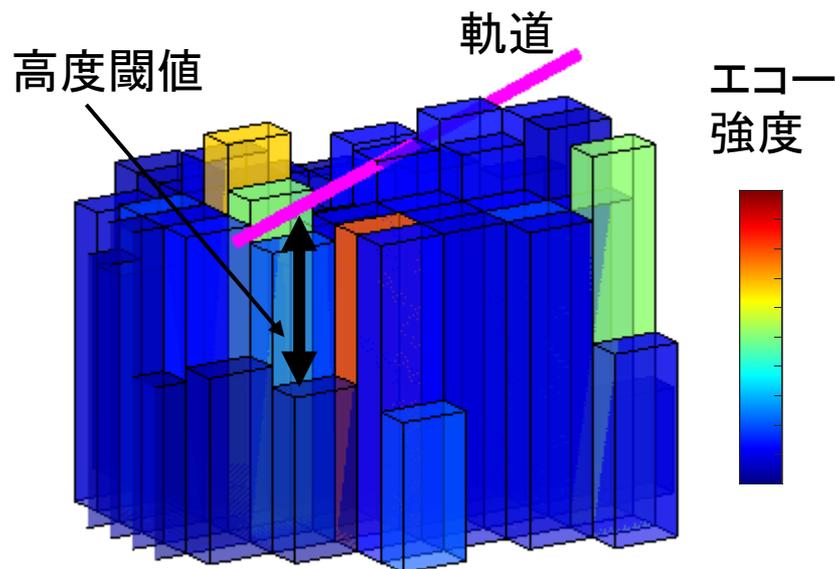
利用データ

- 飛行困難空域の設定
 - 全国合成レーダーエコーGPV (観測値, 10分毎)
 - 1kmメッシュエコー強度(mm/h):換算降水強度
 - 2.5kmメッシュエコー頂高度(km):降水エコーの高さ
 - 高度分解能:2 km(約6,561 ft)



飛行困難空域の設定

- 対象となるレーダーエコーデータを抽出
 - エコー頂高度閾値
 - どの程度の高さまで考慮するか(本発表:3 km)
 - エコー強度: 4段階の区分で表現



レーダーエコー及び軌道イメージ
(3次元)

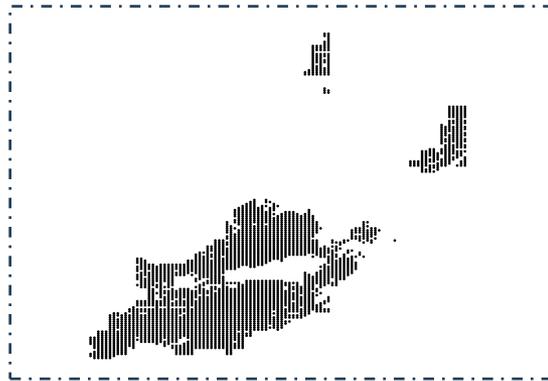
エコー強度の4区分*

	レーダー反射因子 [dBZ]	降水強度閾値 [mm/h]
Light	18 - 29	0.5 - 3
Moderate	30 - 40	3 - 10
Heavy	40 - 50	10 - 50
Extreme	> 50	> 50

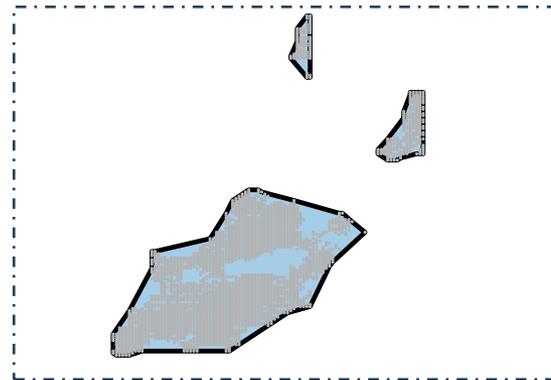
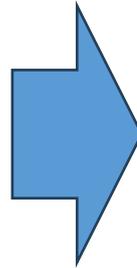
(* FAA, "ATC Weather Radar Echo Terms & Definitions)

飛行困難空域の設定

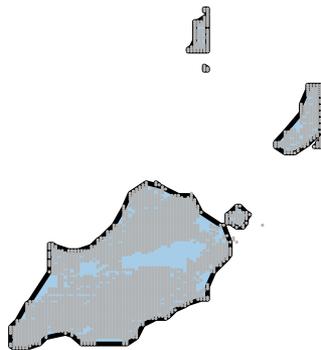
- 抽出データ点の集合からポリゴンを作成
 - アルファシェイプを利用した表現
 - アルファ半径: 分割する細かさのパラメータ



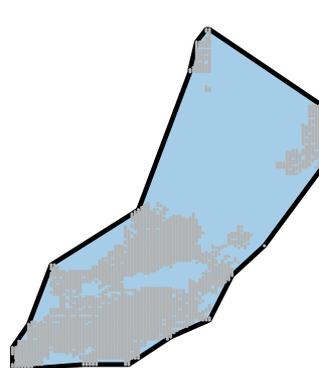
抽出したデータ点



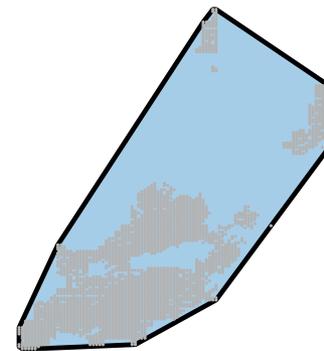
飛行困難空域 (アルファ半径=0.05)



アルファ半径=0.01



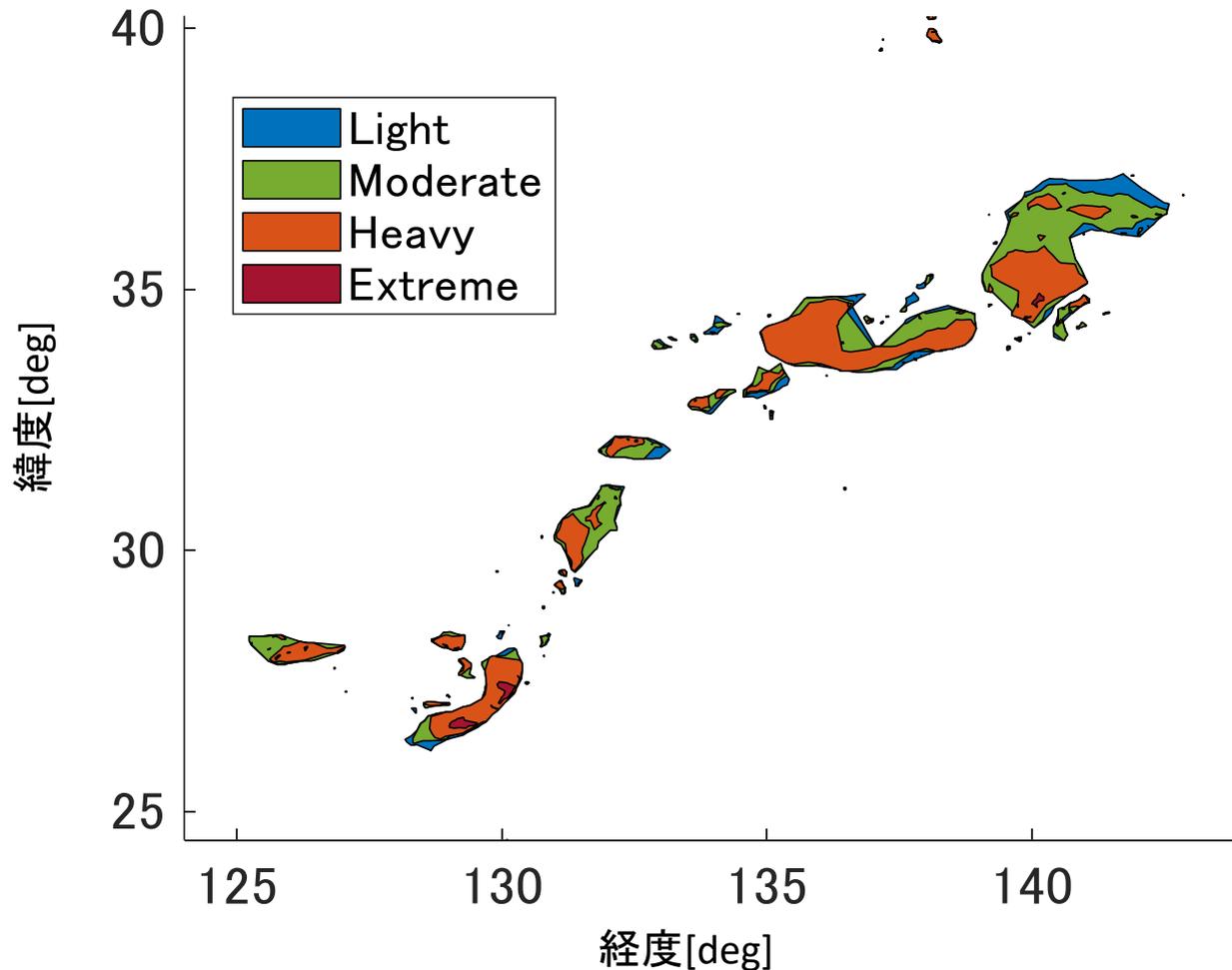
アルファ半径=0.5



アルファ半径=Inf(凸包)

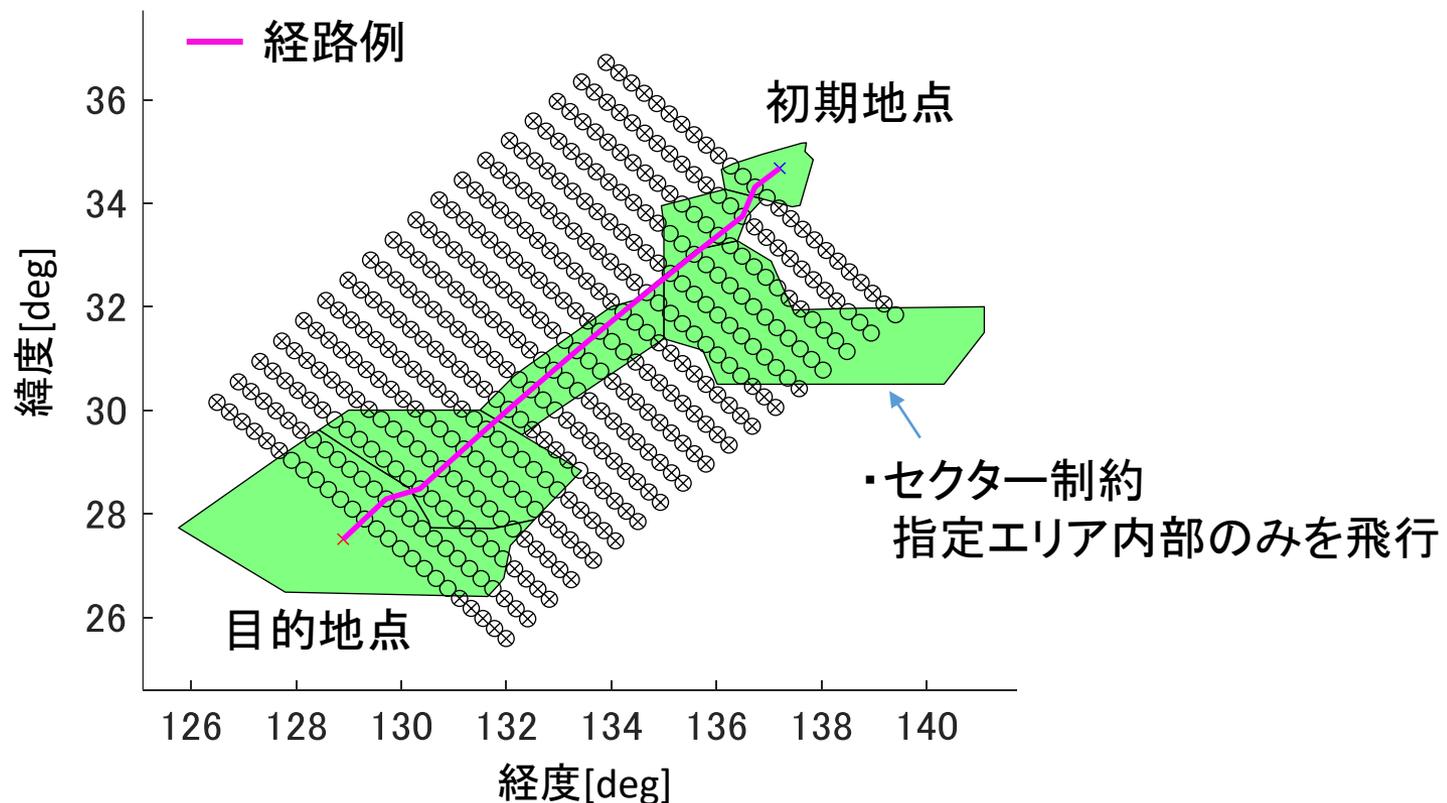
飛行困難空域の設定

- 飛行困難空域の作成例
 - 強度区分ごとにポリゴンを作成



回避経路の算出手法

- 制約を考慮した経路探索
 - 動的計画法に基づく
 - 初期地点から目的地点の間に計算格子を設定
 - セクターによる制約の考慮



回避経路の算出手法

- 回避経路の算出

- 評価関数を最小化する経路

$$f = \sum (F_{seg} + C_{pi} \cdot PI_{rep} \cdot T_{echo})$$

F_{seg} : 燃料消費量

C_{pi} : 回避係数

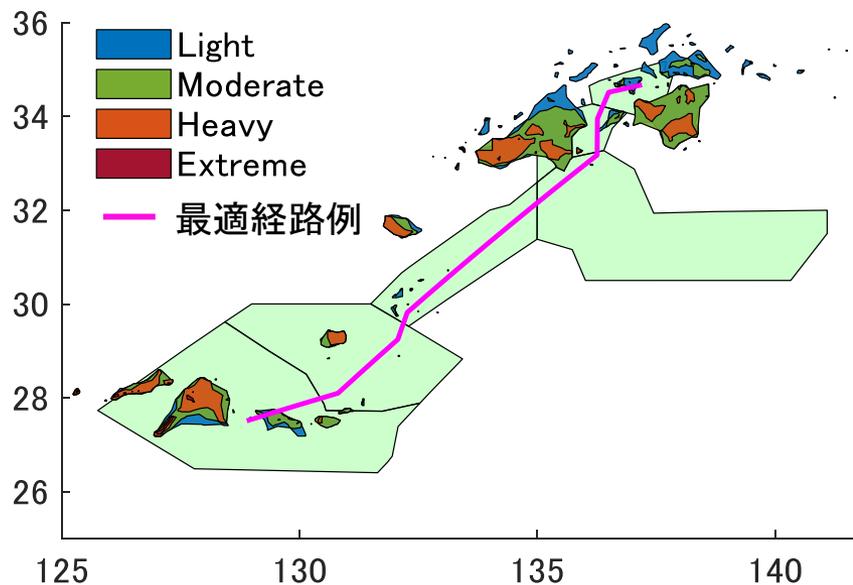
PI_{rep} : 代表エコー強度

T_{echo} : エコー通過時間

- 回避係数により回避判断のばらつきを表現

- 小さいほど効率重視, 大きいほど回避重視

- 複数の値に対して計算 → 複数の候補を生成



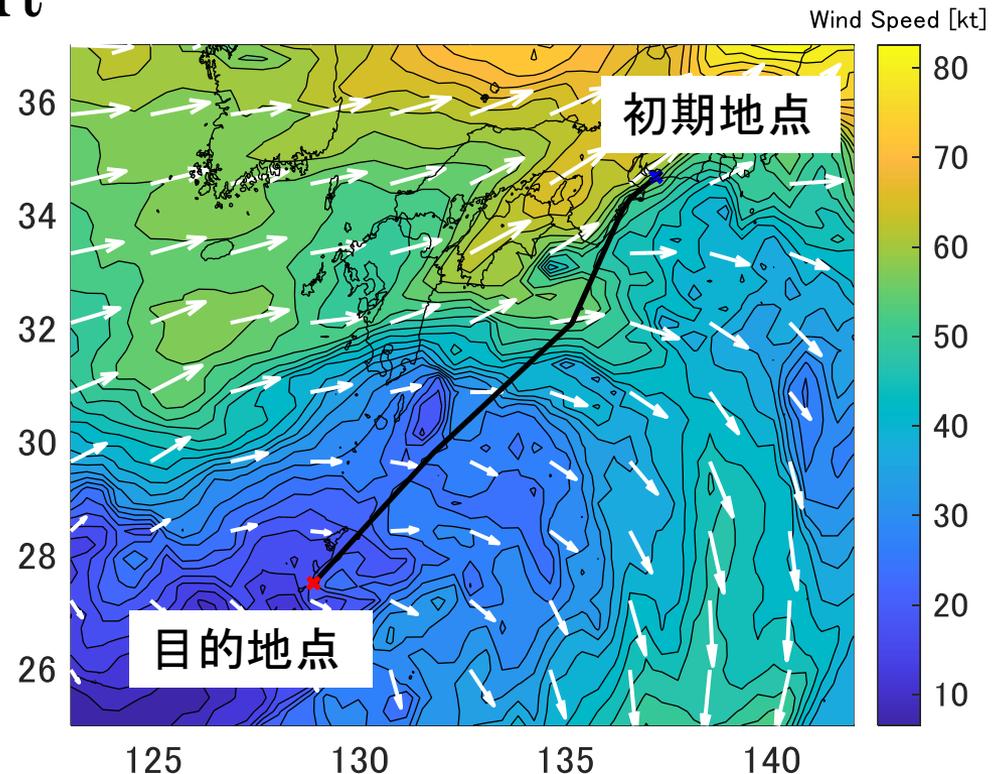
解析例

- 計算条件

- 羽田空港→那覇空港における巡航区間
- 初期時刻：2021年7月1日 9:00
- 巡航高度：40,000 ft
- 型式：A359

基準経路の距離・時間・燃料

距離[NM]	時間[min]	燃料[lbs]
615.48	80.82	16967.08



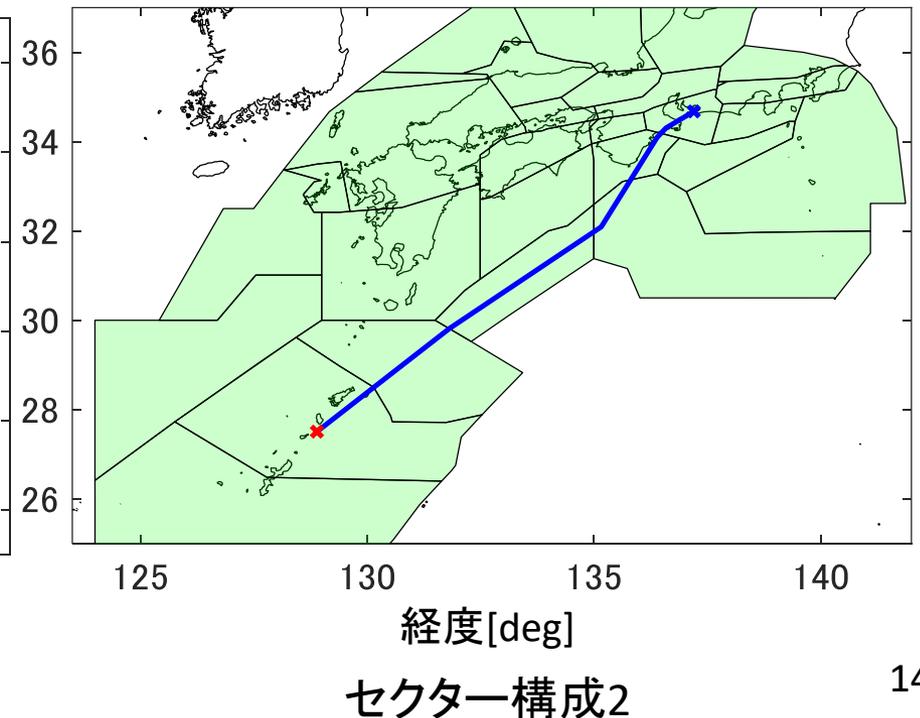
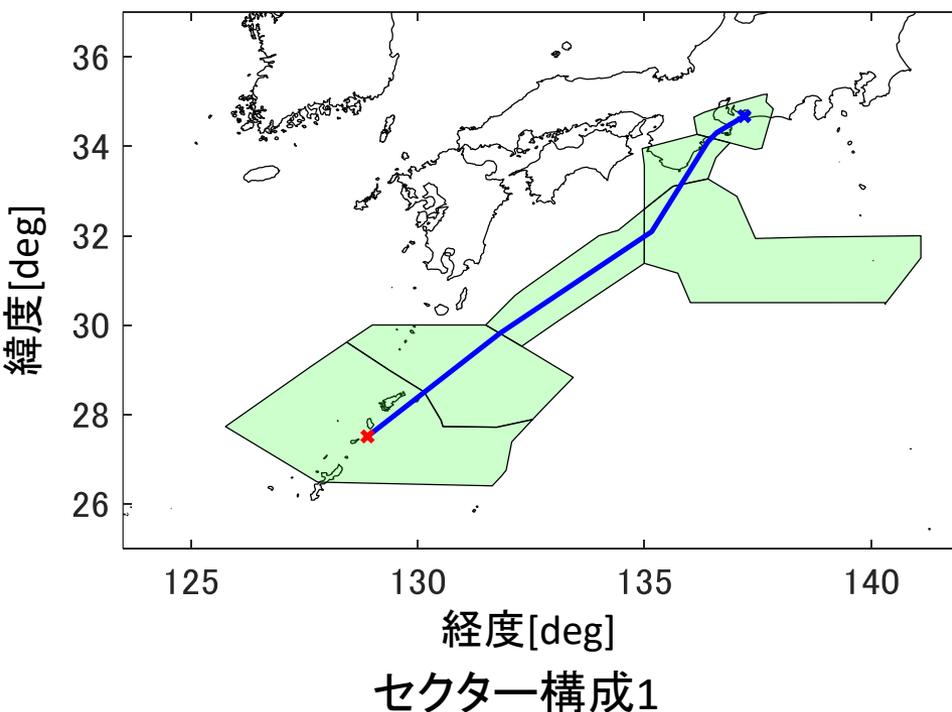
解析区間における基準経路

解析例

- セクターによる制約

- 構成1: 標準的な計画経路と同一のセクターに限定
- 構成2: 周辺セクター含むより広い空域に緩和
(※2021年7月時点のセクター構成)

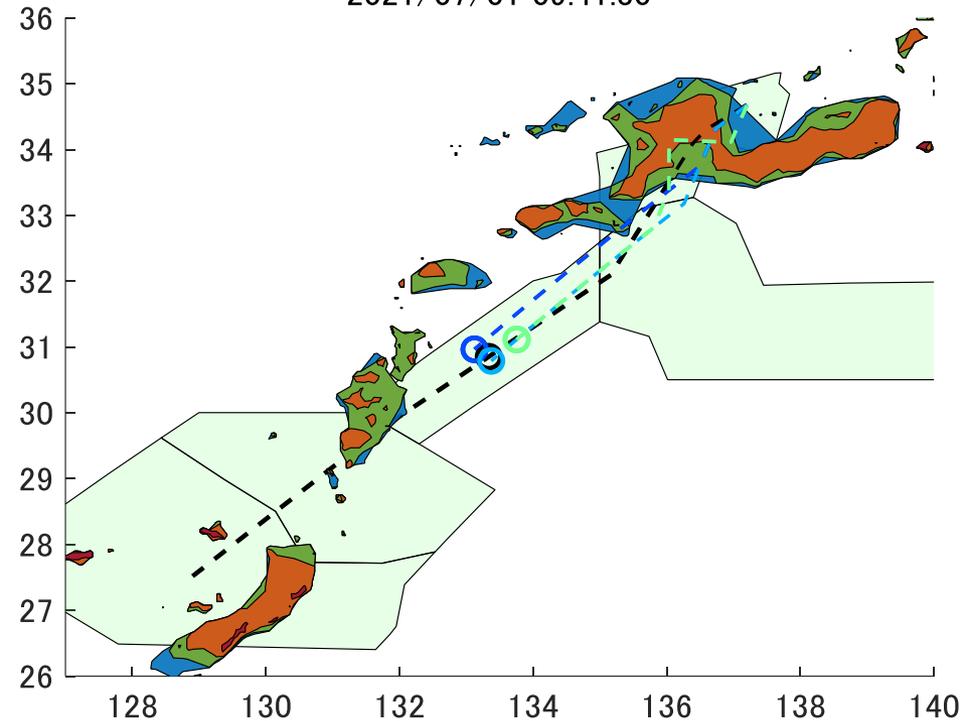
➤ 異なる条件における経路の差異を確認



解析例

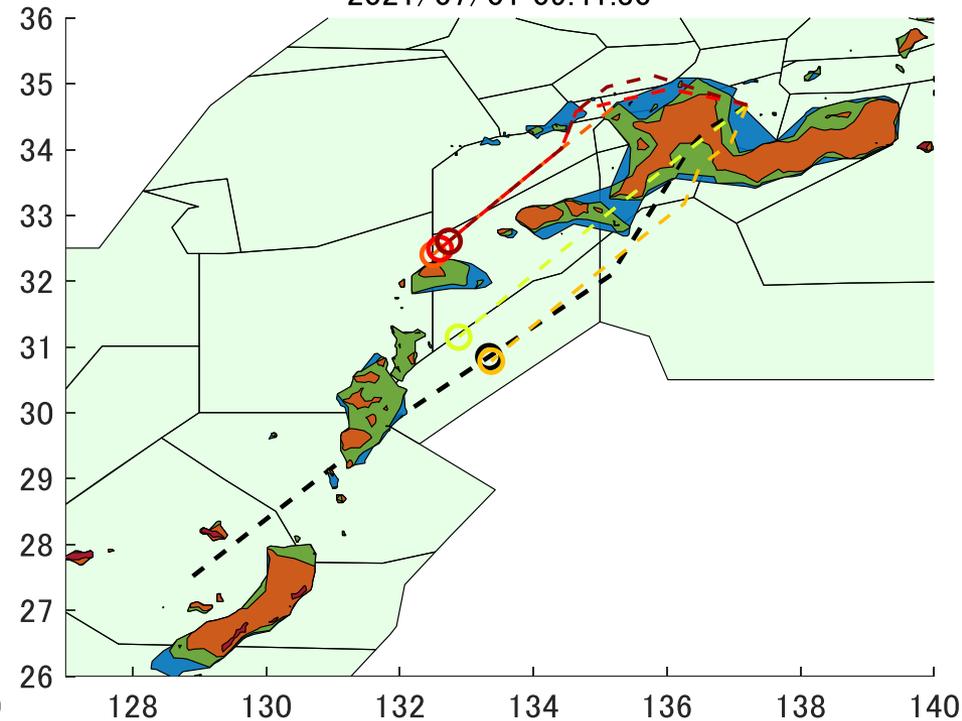
- 条件の異なる回避経路の飛行
 - 悪天回避の程度の異なる複数経路が生成
 - セクター制約の緩和→多様な経路候補

2021/07/01 09:41:30



セクター構成1

2021/07/01 09:41:30

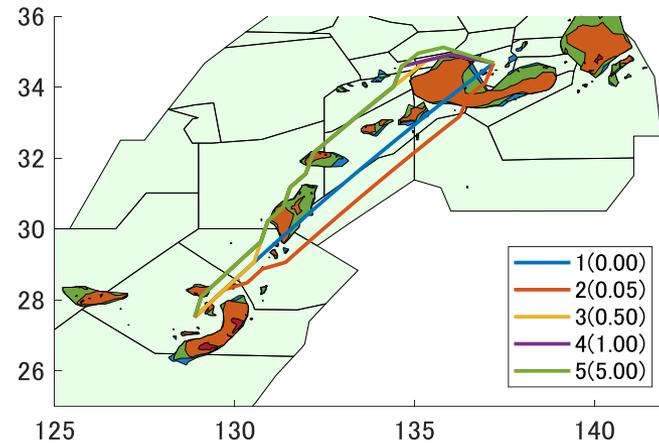
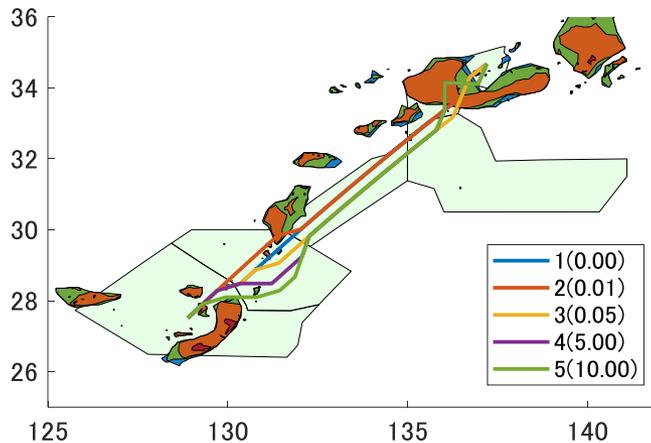


セクター構成2

解析例

- 多様な生成経路

- セクターのエリアと悪天域との関係が大きく影響
 - 回避方法により、時間、燃料に影響
 - 構成1でも7分、緩和で10分弱のばらつきが生じる



	セクター構成1			セクター構成2		
	距離 [NM]	時間 [min]	燃料 [lbs]	距離 [NM]	時間 [min]	燃料 [lbs]
1	613.74	80.73	16948.24	605.55	80.14	16823.65
2	613.74	80.75	16952.25	621.92	81.42	17090.20
3	621.92	81.46	17098.01	653.35	87.57	18367.86
4	664.66	86.78	18200.94	661.54	88.60	18580.66
5	672.84	87.72	18395.05	672.03	89.91	18851.72

考察

- 気象状況による影響
 - 一般に悪天域回避により距離増加, 燃料増加
⇔ 風状況次第では回避しつつ燃料削減のケース有
- 回避経路算出における制約
 - セクターだけでなく, 制限空域等も適用可能
 - 交通状況を考慮したより現実的な制約が必要
- 航空交通流制御の観点からの解析
 - 混雑状況を考慮した適切な回避経路の検討
 - 経路変更による通過セクターの変化
 - 当該エリアにおける混雑状況との関係性

まとめ

- 気象データを用いた水平回避経路の生成手法
 - 飛行困難空域をポリゴンにより表現
 - 全国合成レーダーエコーを利用
 - 予測データ含む他データにも適用可能
 - エコー強度区分による表現
 - 制約を考慮した回避経路を生成
 - 回避基準の差異を考慮した複数経路
- 今後の課題
 - 垂直方向含む回避軌道の検討
 - 乱気流指数等, 他の気象データの考慮
 - 混雑状況等を考慮した実用的な軌道の提案