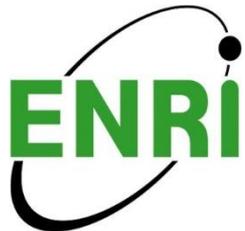


# 悪天域を考慮した 飛行経路の生成



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

---

## 航空機の悪天回避

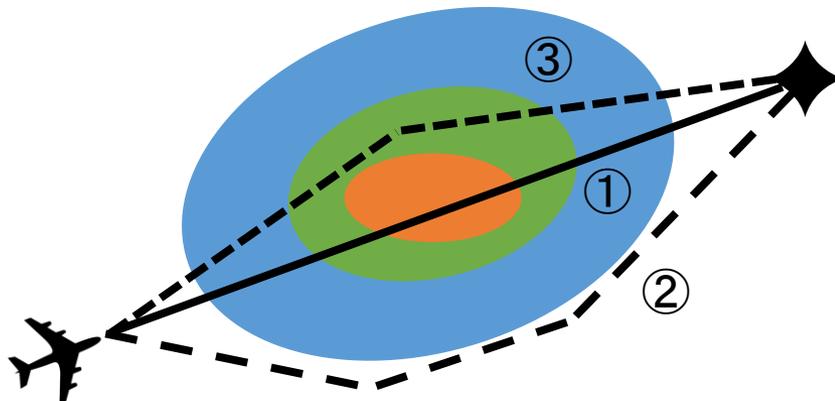
- 研究背景および目的
- 悪天回避経路の生成手法
  - 飛行困難空域の設定
  - 回避経路の算出
- 経路生成例の紹介
  - 水平回避経路, 回避軌道
- まとめ

# 研究背景

- 悪天回避に関連する要素
  - 運航効率
    - 飛行時間・燃料消費量
  - 交通流制御(出発時刻指定など)
    - 制御への影響・交通流予測精度
      - 航空機の通過セクタ・通過時間
- 将来のATMシステムに向けて
  - 高精度な予測に基づく効率的な管理
    - 長期ビジョン(CARATS)に基づき推進
    - 悪天を適切に考慮した予測が不可欠
  - 悪天現象に関する定量的な指標
    - 関係者間の認識・知見の共有

# 研究背景

- 悪天回避経路の生成
  - 知識・経験に基づく判断→定量的な判断基準
    - 悪天域との関係, 通過セクター, 時間・燃料等
    - 運用判断の検討材料
  - 定量的な指標に基づく経路生成
    - 予定通過時刻の高精度化への寄与
  - 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

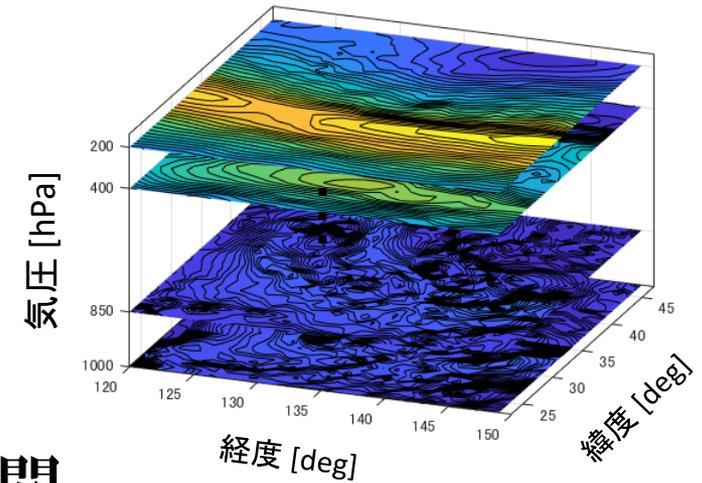
- ①: 効率を重視
- ②: 回避を重視
- ③: 効率と回避のバランス

# 研究目的

- 悪天現象の定量的な理解→支援システム
  - 悪天回避経路の生成・情報の可視化
    - 航空機への影響(時間・燃料等)
    - 管制機関への影響(通過セクタ・混雑状況)
  - 悪天現象に対する運用判断への寄与
    - 事前の計画段階, 軌道調整
- 悪天域を考慮した航空機の経路生成
  - 生成手法の紹介
    - パイロットによる判断基準のばらつきへの考慮
    - セクターによる制約の考慮

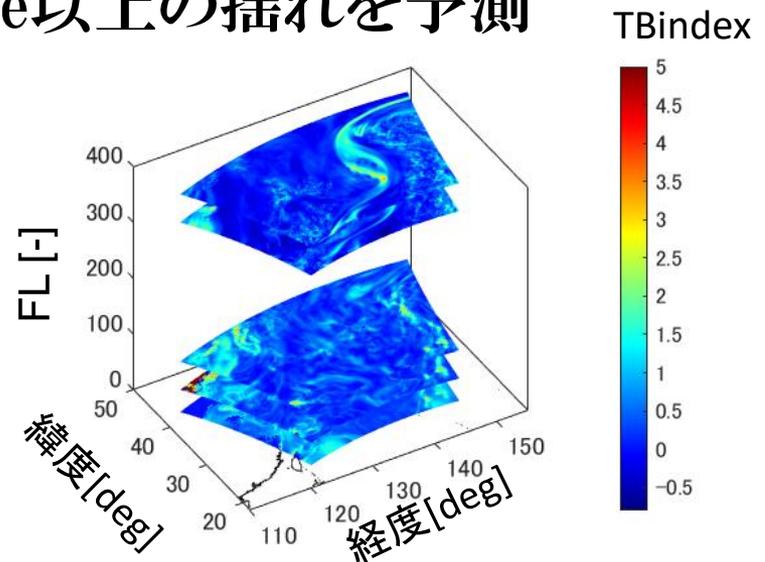
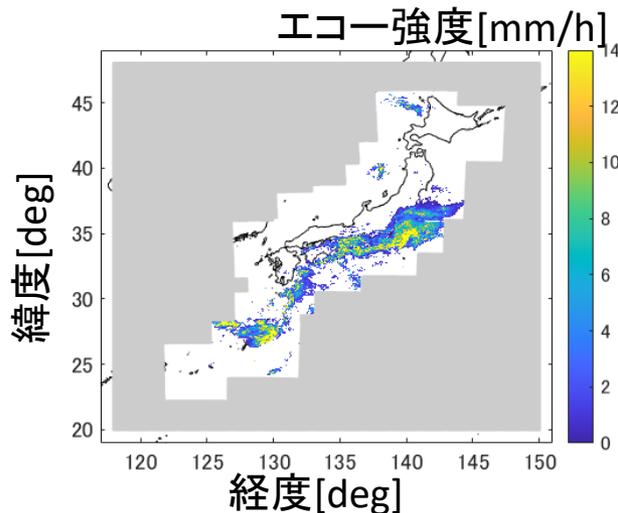
# 利用データ

- 航空機の飛行の模擬
  - 気象データ
    - メソ数値予報モデル (MSM)
      - 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



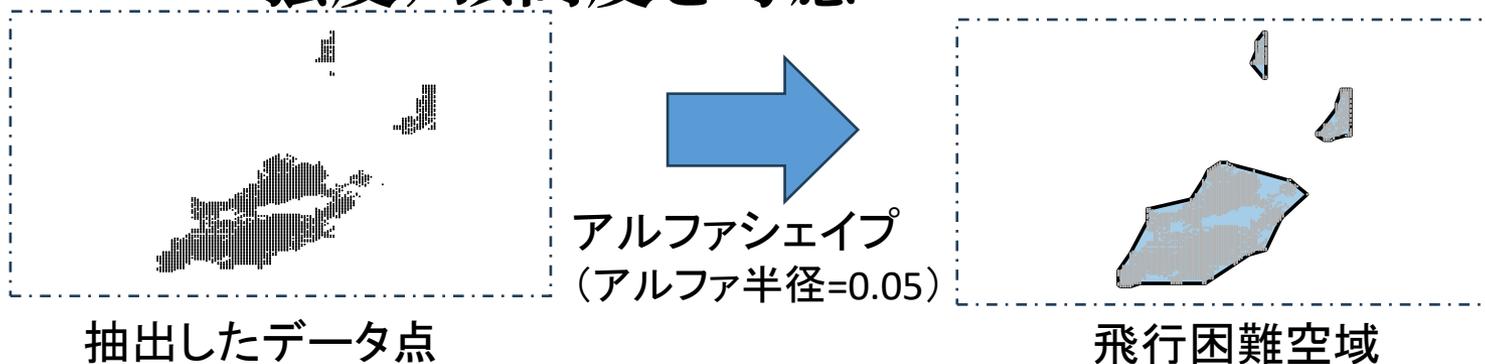
# 利用データ

- 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)
  - LFM航空悪天GPV (予報値) (CARATSの取組内で気象庁より提供)
    - Tindex: 乱気流予測のための指標値
    - “3.0”を基準にModerate以上の揺れを予測

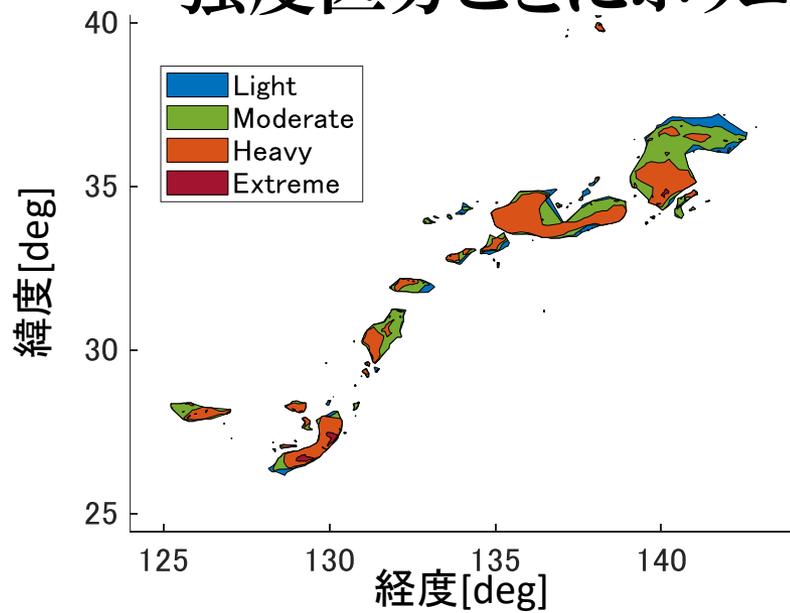


# 飛行困難空域の設定

- データ点を抽出→ポリゴンを作成
  - エコー強度, 頂高度を考慮



- 強度区分ごとにポリゴンを作成



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")

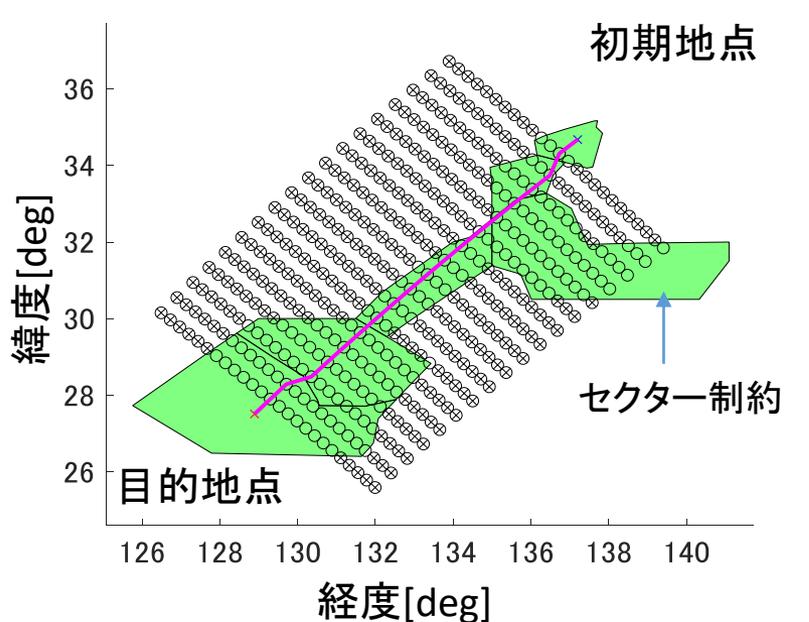
# 回避経路の生成手法

- 動的計画法による回避経路
  - 評価関数を最小化する経路

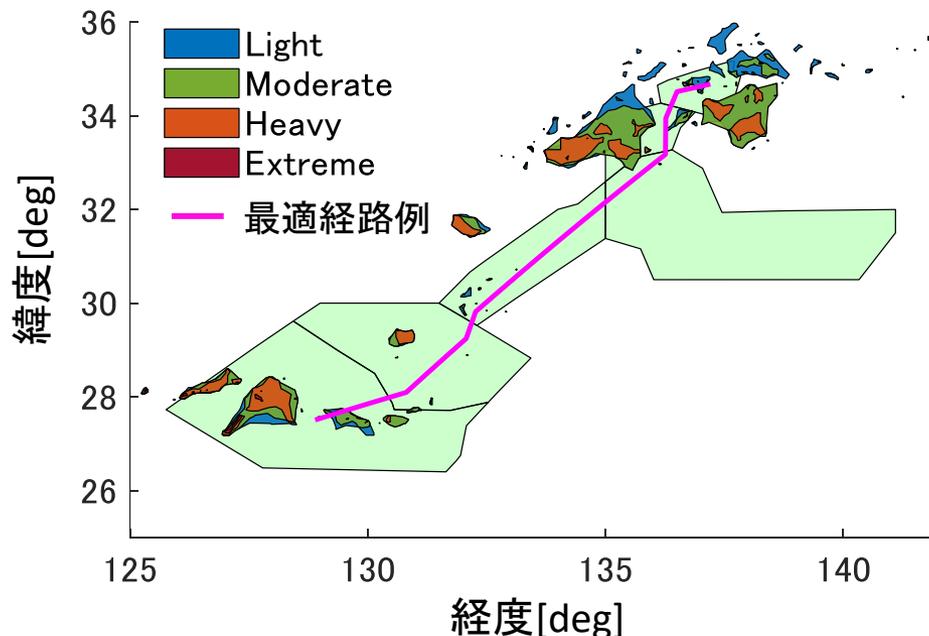
$$f = \sum (F_{seg} + C_{pi} \cdot PI_{rep} \cdot T_{echo})$$

- 回避係数により回避判断のばらつきを表現
  - 複数の値に対して計算→複数の候補を生成

$F_{seg}$  : 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



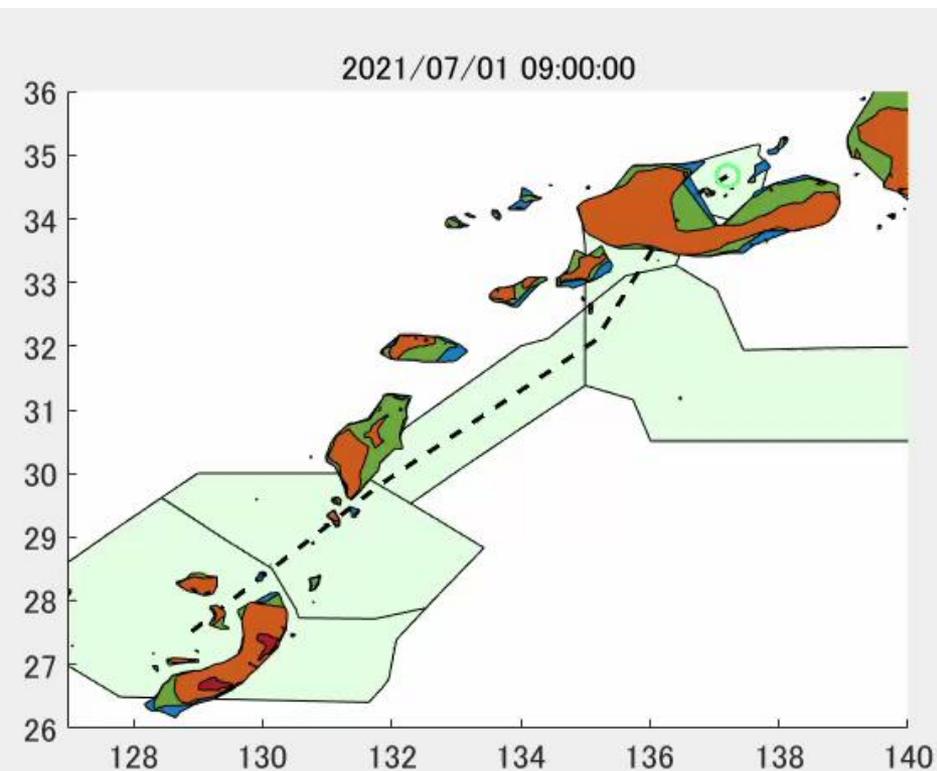
セクタを考慮した計算格子設定例



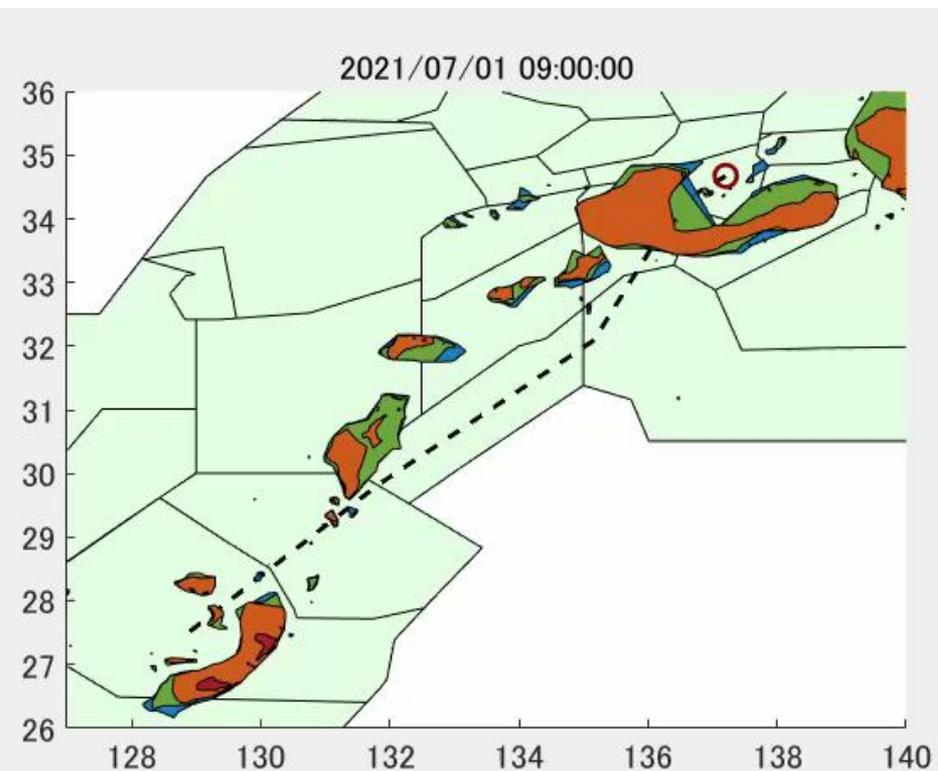
回避経路イメージ

# 回避経路生成例

- 異なる条件下における回避経路
  - 判断基準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



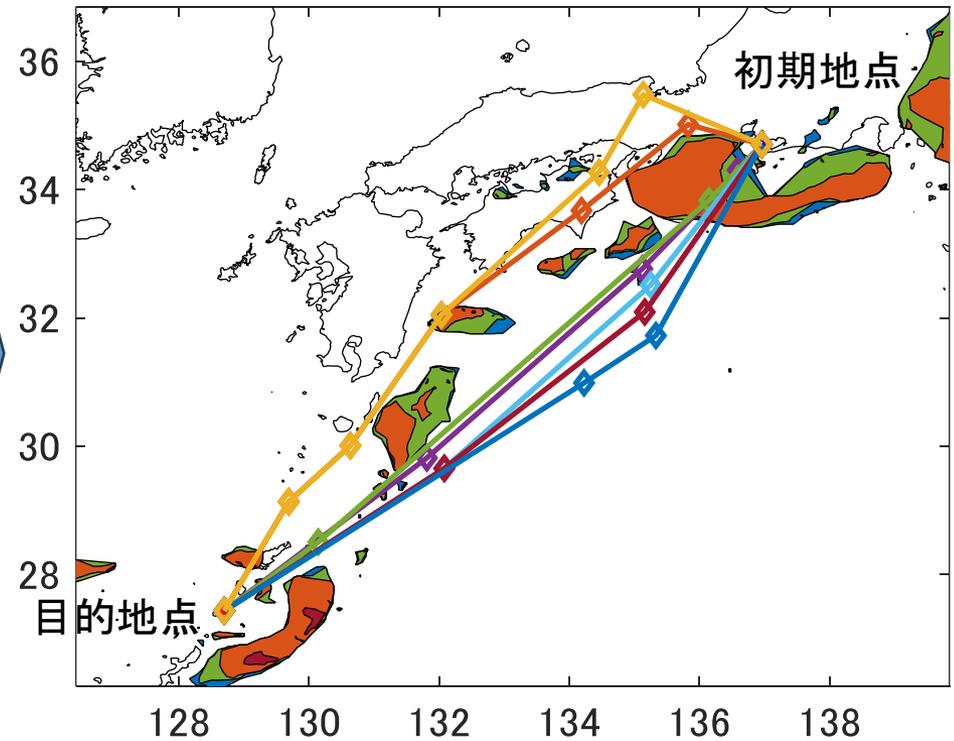
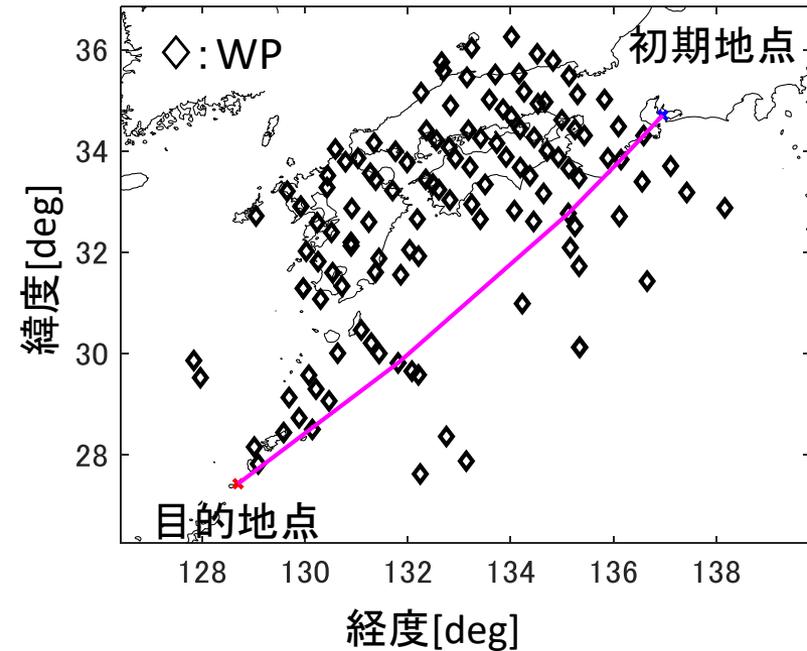
セクター構成1



セクター構成2

# 回避経路生成例

- 実運航に向けて
  - 実際のウェイポイント(WP)を利用した経路探索

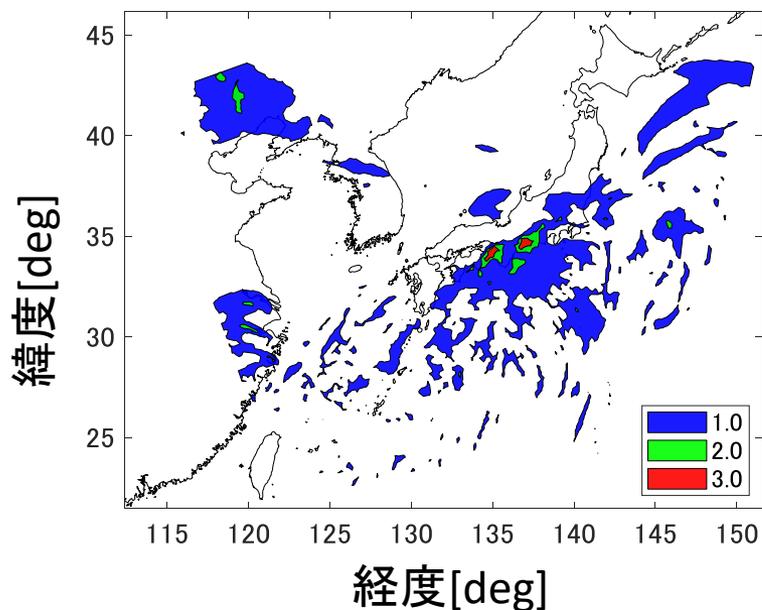


実際のWPに基づく計算格子設定

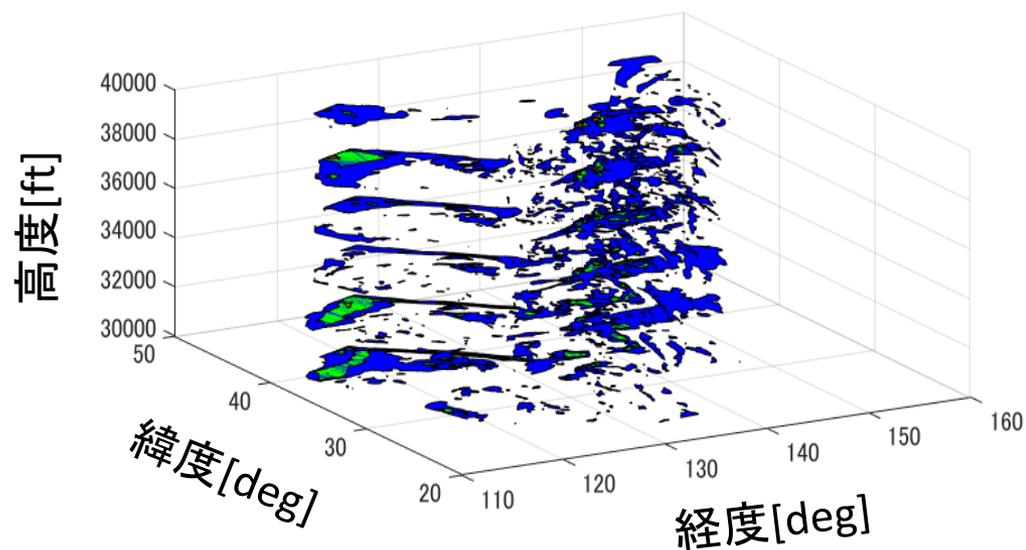
WPを結ぶ回避経路の生成例

# 回避軌道の生成例\*

- 3次元空間・複数段階の飛行困難空域例
  - Tindex (乱気流予測のための指標値) の利用
  - ✓ 3次元におけるポリゴンの作成
    - 2,000ftごとに作成



3段階のポリゴン(2021/7/1 14:00, FL400)



高度ごとに作成したポリゴン

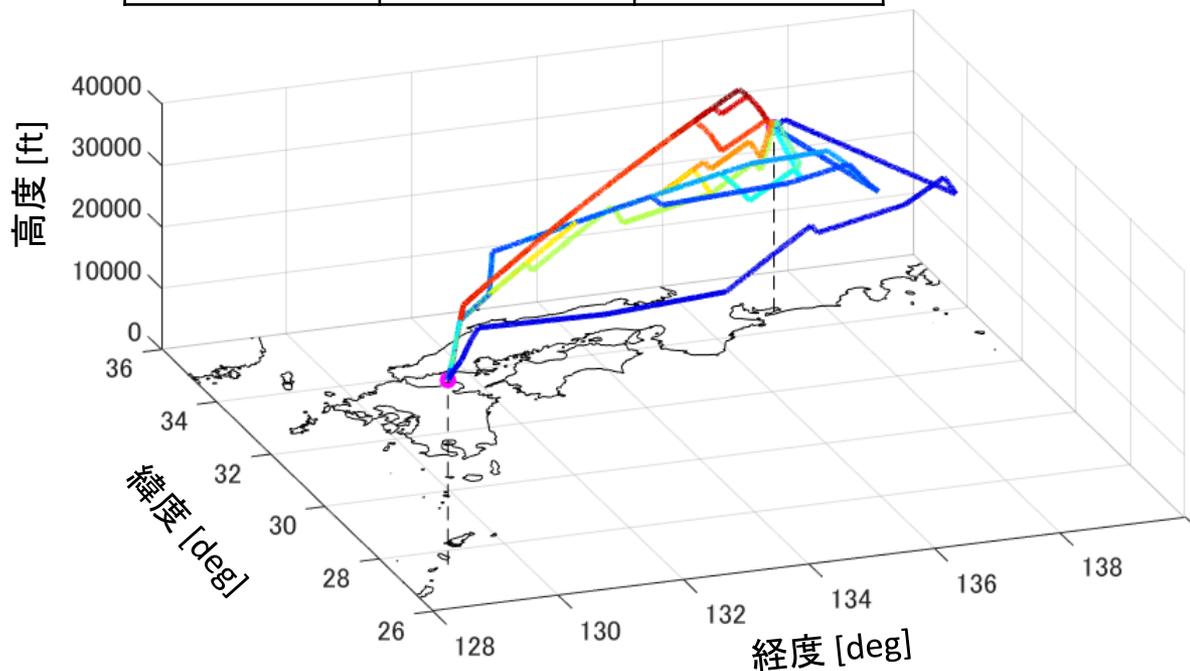
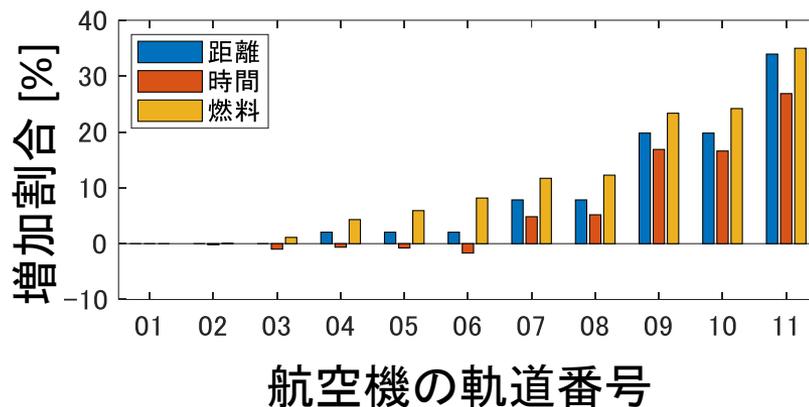
(\*中村, 瀬之口, “乱気流指数に基づく悪天域の回避軌道に関する基礎的検討”, 第62回飛行機シンポジウム)

# 回避軌道の生成例

- 回避軌道例
  - 回避パラメータの変更
    - 高度変更～水平回避

悪天を考慮しない基準の軌道

距離[NM]	時間 [min]	燃料 [lbs]
606	78	17,079



- No. 01 (0.00) 効率重視
  - No. 02 (0.02)
  - No. 03 (0.10)
  - No. 04 (0.40)
  - No. 05 (0.60)
  - No. 06 (1.50)
  - No. 07 (3.00)
  - No. 08 (5.00)
  - No. 09 (20.00)
  - No. 10 (25.00)
  - No. 11 (60.00) 回避重視
- ↑ 回避重視 ↓ 効率重視

# まとめ

- 悪天域を考慮した航空機の回避経路
  - 水平回避経路や回避軌道の生成
    - 飛行困難空域の設定
    - 実運航への適用に向けた制約の考慮
  - 異なるデータに対して適用可能
    - 目的に応じたデータ選択・組み合わせ
- 今後の課題
  - 生成経路・軌道の検証・改善
    - 各種パラメータの検討
      - 実運航に適合する経路生成
  - 軌道に基づく評価
    - 混雑・交通流制御を考慮した悪天候の影響評価