

## 運航制約条件を考慮した悪天回避経路に関する研究

航空交通管理領域 ※中村 陽一，瀬之口 敦

### 1 まえがき

将来の軌道ベース運用を目指して、航空交通システムの高度化が推進されている。その中でも、気象状況を考慮した軌道予測の高度化は重要課題の一つに挙げられる。風の状況により飛行時間は異なり、悪天候が要因による経路の逸脱など、気象現象は不確定性を増大させる。悪天発生時において、飛行中のパイロットは機上のレーダー等の情報や、各々の知識や経験に基づき回避判断を行う。また、管制官からの指示に基づき、必要に応じて計画経路から逸脱しながら飛行を行うこととなる。これらの手続きは人間の判断に基づき実施されるため、同程度の悪天現象であっても回避判断や回避経路は必ずしも一致しない。一方で、高精度な予測を利用した航空交通システムの更なる高度化を実現するためには、客観的かつ定量的な指標に基づく解析や評価が必要不可欠である。

雷雨を20NM離れて回避するガイドライン[1]があり、悪天の航空交通流への影響および指標に関するデータに基づく研究[2]などが進められている一方で、気象状況、周辺交通流は地域によって大きく異なる。さらに、パイロットや管制官の考え方も多岐にわたるため、悪天の回避に関する基準は未だ確立されていない。加えて、気象現象や交通流などは地域ごとに特性も異なることから、それぞれの特性に応じた検討が求められる。そこで本稿では、我が国における悪天回避に関する解析の一例として、悪天回避経路の生成および飛行時間や燃料消費量の変化に関する検討結果について報告する。

### 2 利用データおよび解析手法

#### 2.1 気象データ

航空機の飛行を模擬するための風情報として、メソ数値予報モデル GPV (MSM: Meso-Scale Model) [3]を利用した。MSM により、日本周辺における風向、風速、気温等の気象データとして、3 時間ごとの数値予報の初期値および各初期値に対する予報データが利用できる。本稿

では、最も精度が高いと考えられる初期値のデータを利用した。

また、悪天による飛行困難空域の設定のため、全国合成レーダーエコーGPV (Grid Point Value) として、10 分毎に提供される 1km メッシュのエコー強度および 2.5km メッシュのエコー頂高度[4]を利用した。図 1 にエコー強度およびエコー頂高度の分布例を示す。留意点は灰色で示した気象レーダーの範囲外のエリアのエコーデータは利用できない点である。エコー頂高度のデータに基づき航空機に影響を与える範囲のエコーを抽出し、飛行困難空域の設定に利用した。

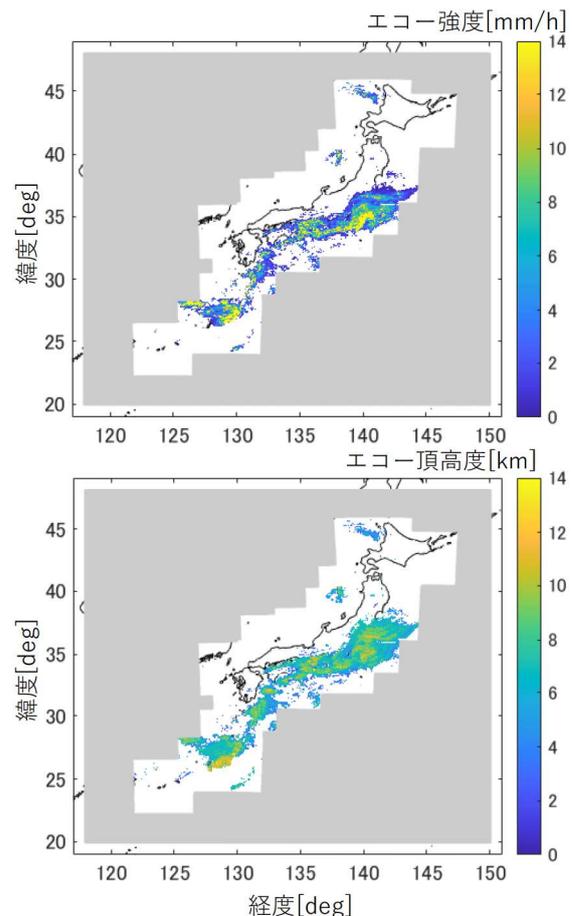


図 1 エコー強度および頂高度の分布例

## 2.2 飛行困難空域の生成

前節で示すレーダーエコーGPVのデータを利用し、航空機が回避すべき空域を飛行困難空域として設定した。飛行困難空域はポリゴンで表現することとし、アルファシェイプ[5]を利用した。アルファシェイプはアルファ半径をパラメータとし、与えられた点群を囲む境界領域を設定するものである。図2にパラメータの違いによるポリゴンの変化例を示す。アルファ半径を無限大とすると与えられた点をすべて包含する凸包となり、小さくするほど細かく、複数の領域に分割されたポリゴンとなる。本稿におけるアルファ半径は0.05に設定した。

図3にアルファシェイプを利用し、図1に示すエコーデータから飛行困難空域をポリゴンで表現した例を示す。なお、実運用においては気象現象の程度は複数の区分で利用されており[6]、今回の飛行困難空域生成においては表1に示す4段階の区分を作成した[7]。また、航空機の高度と比較して、エコー頂高度が低いデータは影響を与えないと考えられる。そこで、エコー頂高度の閾値を設定し、元データのうち閾値以上のデータ点を抽出し、飛行困難空域をポリゴンとして表現した。頂高度閾値は気象現象やパイロットにより異なることが想定されるが、本稿では一例として飛行高度から3km(9,843ft)低い頂高度までのエコー強度を考慮して解析を行った。

## 2.3 セクターを考慮した経路探索

実運航においては、セクター単位で管制が実施されることとなる。そこで本稿では、動的計画法[8]と呼ばれる手法により、設定したセクター内部における最適な経路の探索を試みた。図4に経路探索例を示す。緑で示す多角形は設定したセクターである。動的計画法では、初期地点と目的地点の間に計算格子を設定し、設定した格子点を接続する最適な経路を取得する。初期地点から進行方向に向かい各点間の接続を計算するにあたって、設定したセクターの外部の計算格子を含む接続や、格子点自体はセクター内部であっても点間の線分がセクター外を通過する接続については計算を実施せず、それ以外の接続のみを対象として経路探索した。こ

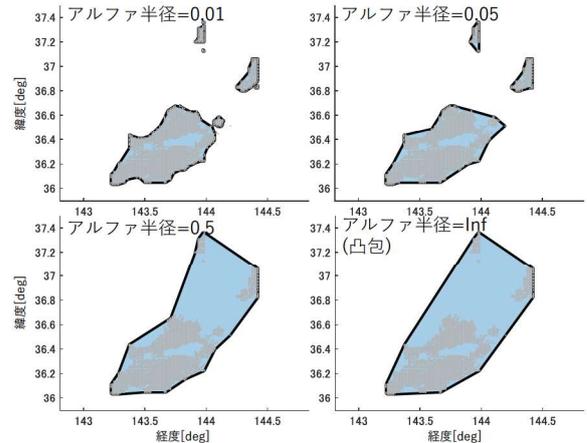


図2 アルファシェイプによるポリゴン例

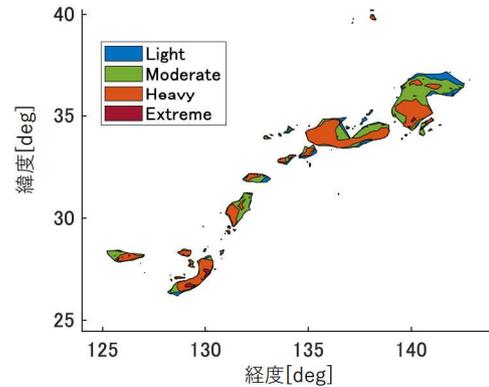


図3 強度ごとの飛行困難空域例

表1 区分ごとのエコー強度 [7]

区分	エコー強度[mm/h]
Light	0.5-3.0
Moderate	3.0-10.0
Heavy	10.0-50.0
Extreme	> 50.0

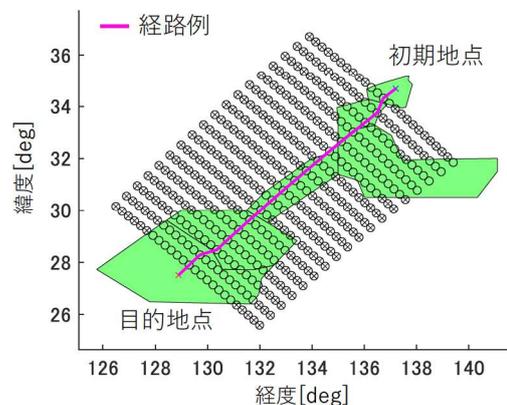


図4 セクターを考慮した経路探索例

れにより、図4のマゼンタで示す経路のように、セクターの内部のみを飛行する経路が取得できる。

## 2.4 最適経路の算出

2.2で示す飛行困難空域に対して、2.3で示す計算格子を利用して最適経路を算出した。各計算格子点間の接続に対して、Base of Aircraft Data (BADA) family 3[9]を用いて航空機の飛行を模擬した。BADAに定義される性能データや標準的な巡航速度に加えて、2.1で示すMSMによる風データを利用することにより、航空機の飛行時間、燃料消費量を計算することが可能である。

本稿では、下記の式(1)で示す評価関数を最小化する経路を最適経路として算出した。

$$f = \sum(F_{seg} + C_{pi} \cdot PI_{rep} \cdot T_{echo}) \quad (1)$$

ここで、 $F_{seg}$ は燃料消費量、 $C_{pi}$ は悪天回避のための係数、 $T_{echo}$ は飛行困難空域内の飛行時間を表す。 $PI_{rep}$ は遭遇した飛行困難域のエコー強度の代表値であり、表1の0.5、3.0、10.0、50.0の4種類を用いた。

図5に悪天回避経路の算出例を示す。式(1)の係数 $C_{pi}$ が0であれば悪天域を考慮しない燃料最小の経路が算出され、係数を大きくするほど、飛行困難空域を避ける経路が算出されることとなる。設定したセクター内において、設定した係数に応じた最適経路が算出される。

## 3 解析結果

### 3.1 計算条件

本稿の計算条件として、図6に示す初期地点から目的地点への飛行を模擬した。ここで、初期および目的地点は羽田空港から那覇空港への飛行する航空機の航跡の巡航区間を参考に設定し、巡航高度は40,000ft、型式はA359、初期時刻は2021/7/1 9:00と設定した。図6は当該時刻の風向・風速を示し、マゼンタで示す基準経路は、初期地点と目的地点間を一般的な計画経路で接続した経路である。表2には基準経路を飛行した場合の距離、時間、燃料消費量を示している。また、巡航高度から3 km (9,843 ft) 低い頂高度のエコーまで考慮して飛行困難空域を生成した。

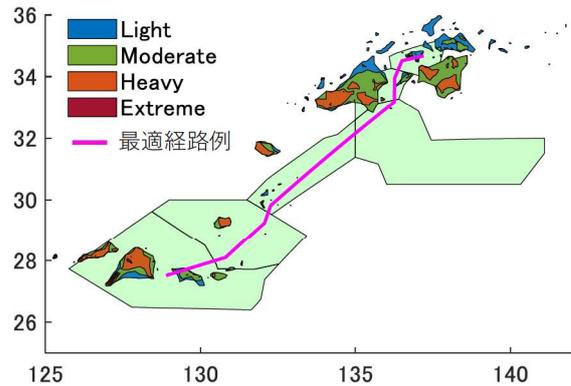


図5 悪天回避経路の算出例

さらに、図7に示す2種類のセクター構成を本稿における制約条件に設定して計算することにより、セクターの制約による変化を調査した。セクター構成1は基準経路を飛行する場合に通過する際のセクターと同じ構成であり、セクター構成2は周辺セクターを含めてより広い範囲を飛行可能とした構成である。セクターについては、今回想定する初期時刻における構成としているため、現在の構成とは異なる点に留意が必要である。

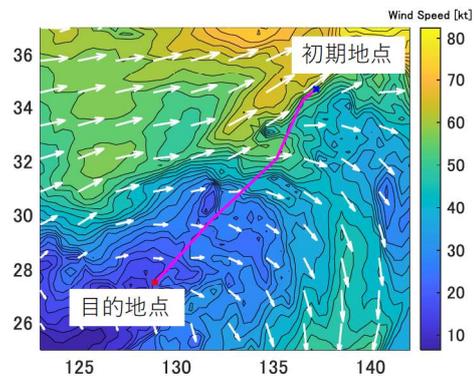


図6 基準経路および風速（高度40,000ft）

表2 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

### 3.2 異なる条件による回避経路

図7に示す二つのセクター構成に対して最適経路を計算した結果をそれぞれ図8、図9に示す。ここで、表示されている飛行困難空域は初

期時刻のものであるが、実際の計算に際しては、飛行中の各点における時刻の直前のデータを利用した。式(1)の悪天回避のための係数を変化させることにより、それぞれ5本の回避経路が求められた。図の凡例に示す括弧内の数値がそれぞれの経路に対応した係数である。また、各経路を飛行した場合の飛行距離、飛行時間、燃料消費量について表3にまとめた。

図8には、通過するセクターを変更せずに悪天回避経路を生成した結果を示す。経路1では悪天域を考慮しない最適経路であるため、表2に示す基準経路より短い距離を飛行している。初期地点直後に広い範囲の飛行困難空域が存在するため、セクターを変更せずに回避することができないが、係数の変更により、可能な限り強いエコー強度を持つエリアを飛行する時間を短くする経路が求められた。目的地点周辺はセクターが広く、係数の変更による回避の様子が顕著に示された。このように悪天域の回避を優先するほど、距離、時間、燃料が増加する結果が得られた。

図9では、セクターの制約を緩和し、比較的広い範囲で経路設定が可能とした場合の計算結果である。悪天を考慮しない経路1においても、セクターの制約がない場合には大圏経路を飛行できる。セクターの制約を緩和したことにより、

飛行時間や燃料消費量は増加するものの、初期地点付近のエコーの範囲を避けて大きく迂回する経路も含めて算出された。

本稿で示す一連のアルゴリズムにより、悪天回避のための異なる係数を設定でき、異なる判断基準を有するパイロットによる回避経路の模擬が可能であることを示した。表3の計算結果から、セクターを限定したセクター構成1の場合には飛行時間に7分程度、セクター制約を緩和したセクター構成2の場合には10分弱の飛行時間のばらつきが生じることがわかる。

本稿では解析結果の一例を示したが、風や悪天域の状態により、これらのばらつきは大きくなることが想定される。また、悪天を回避しつつ時間・燃料の増加を抑制することが可能な状況も考えられる。なお、本アルゴリズムは、セクターの指定のみならず、飛行禁止空域の指定など、飛行範囲を限定する場合にも応用可能である。

セクター制約をもとに経路の生成範囲を限定した本解析とは異なり、実際の経路生成にはセ

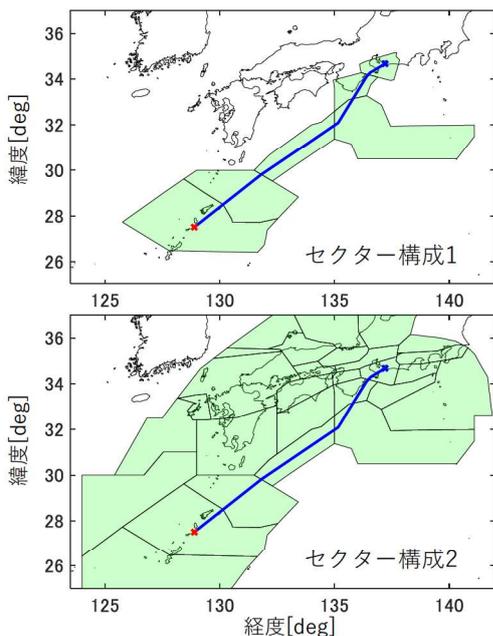


図7 解析に用いたセクター構成

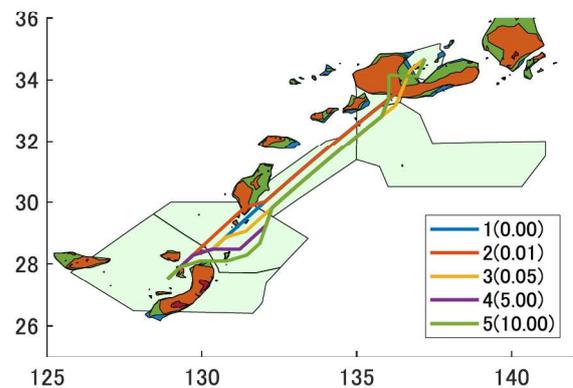


図8 セクター構成1における回避経路

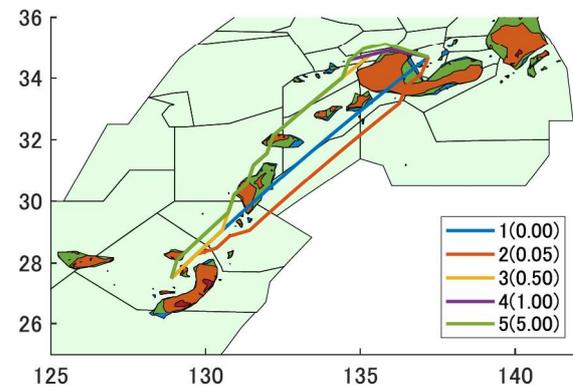


図9 セクター構成2における回避経路

表3 距離，時間，燃料の比較

	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

クターを移る際の移管手続きも制約に含めて考慮する必要がある。さらに今後、他の気象状況、都市間の経路に対する解析や実経路との比較により、気象現象の定量化に資する検討を進めることが不可欠である。加えて、航空機の通過セクターの変更は、各セクターの管制作業量の変化につながるため、航空交通流制御の観点を含めた経路生成を行うことが重要である。

#### 4 むすび

本稿では、運航制約条件を考慮した悪天回避経路生成および飛行時間や燃料消費量の変化に関する検討結果について報告した。レーダーエコーの情報を基に飛行困難空域を生成し、セクターを考慮した最適な回避経路を算出するまでの一連の方法について提案した。この結果、悪天回避に伴う経路、飛行時間、燃料消費量を比較し、セクターの制約との関係を示した。今後は、本稿で提案したアルゴリズムを改良し、レーダーエコーだけでなく他の情報も考慮し、垂直方向も含めた悪天回避軌道の予測について検討を進めていきたい。

#### 参考文献

- [1] U.S. Department of Transportation, “Thunderstorms,” Advisory Circular 00-24C, Washington, D.C., Feb. 2013.
- [2] Michael Matthews, et al, “Translating Convective Weather Forecasts into Strategic Traffic Management Decision Aids,” 12th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2017.
- [3] 気象庁情報基盤部, “配信資料に関する技術情報第 575 号 メソ数値予報モデル GPV および MSM ガイダンスの予報時間延長について,” 令和 3 年 12 月.
- [4] 気象庁観測部, “配信資料に関する技術情報（気象編）第 162 号 ～1km メッシュ全国合成レーダーGPV の提供等について～,” 平成 16 年 4 月 22 日.
- [5] H. Edelsbrunner, D. Kirkpatrick, and R. Seidel, “On the Shape of a Set of Points in the Plane,” IEEE Transactions on Information Theory, Volume: 29, Issue: 4, July 1983.
- [6] Federal Aviation Administration (FAA). Atc weather radarecho terms & definitions. [https://www.faa.gov/files/events/EA/EA21/2023/EA21121498/ATC\\_wx\\_radar\\_echo\\_brochure\\_v4\\_Jul5\\_06.pdf](https://www.faa.gov/files/events/EA/EA21/2023/EA21121498/ATC_wx_radar_echo_brochure_v4_Jul5_06.pdf).
- [7] Yoichi Nakamura and Atsushi Senoguchi, “Modeling of aircraft routes under severe weather conditions”, AIAA SCITECH 2022 Forum, 2022.
- [8] Navinda Kithmal Wickramasinghe, et al, “Flight Trajectory Optimization for Modern Jet Passenger Aircraft with Dynamic Programming,” Volume 290 of the series Lecture Notes in Electrical Engineering, pp. 87-104, Feb. 2014.
- [9] Eurocontrol Experimental Centre, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.15,” EEC Technical/Scientific Report No. 19/03/18-45, May 2019.