

8. 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

航空交通管理領域 ※中村 陽一, 瀬之口 敦, 平林 博子

1 はじめに

近年、航空交通システムは、より安全かつ効率的など、多様化する社会的要求へ対応するために更なる高度化が推進されている。風の影響による速度の変化や、悪天による経路の変更など、気象現象により不確定性が増大するため、気象状況を考慮した高精度な軌道予測に関する検討が重要な課題の一つに挙げられている。

現在、悪天回避に関する手続きは主に人間の判断に基づき実施される。悪天発生時においては、管制官は気象情報等を利用し、各々の知識や経験に基づき飛行中の航空機が悪天を避ける前提で交通流を組み立てる。また、飛行中のパイロットは機上のレーダー等の情報をもとに、各々の知識や経験に基づき回避判断を行う。一方で、将来の軌道ベース運用をはじめ、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。

米国や欧州においては、雷雨を避ける場合に20NM離れて回避するといったガイドラインの例がある[1, 2]。また、飛行計画経路と実経路のデータを用いた悪天の航空機運航への影響評価、およびその回避経路の決定タイミングに関する検討[3]、飛行中のパイロットに対する悪天回避経路選択の支援に関する研究開発[4]、パイロットの悪天回避挙動のモデル化に関する検討[5]、悪天の航空交通流への影響および指標の研究[6]など、データに基づく様々な研究が進められている。しかしながら、実運航においては気象や周辺交通流などその時々で状況は大きく異なり、このような多様な状況に対してパイロットや管制官の考え方も多岐にわたることから、悪天回避に一律の閾値を適用することは困難であり、悪天の影響や回避に関する方法論などは未だ確立していない状況にある。さらに、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、我が国においても将来の航空交通システムの高度化に向け、悪天回避に関する客観的かつ定量的な解析が必要不可欠である。本稿では、悪天回避の客観的な解析のための一例として、悪天回避経路の生成に関する計算手法について簡単に報告する。

2 悪天域の設定

2.1 利用データ

気象庁により提供されている1kmメッシュ全国合成レーダーエコー強度 GPV のデータを利用する[7]。図1に示す日本全域を覆う範囲の格子点上における、気象レーダーにて観測された換算降水強度のデータが10分間隔で提供されている。併せて2.5kmメッシュ全国合成レーダーエコー頂高度 GPV により、エコーの高さも提供されるが、本稿では簡単のためエコー強度のみを利用した計算例を示す。

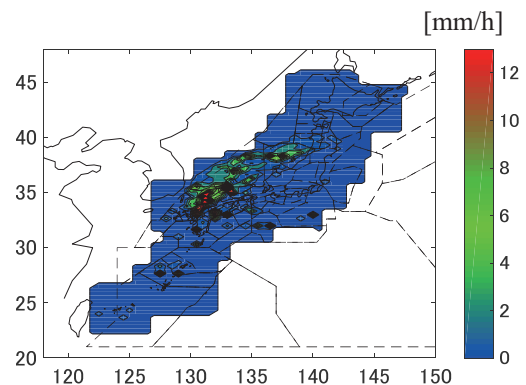


図1 レーダーエコー強度

2.2 飛行困難空域

レーダーエコーに基づき、エコー強度の強いエリアを飛行困難空域として設定する一手法を図2の概略図を用いて示す。まず、前節で示したレーダーエコーの元データ(a)に対して、パイロットが避けるべきエコー強度以上の点のみを抽出する(b)。その後、抽出した点のある距離閾値以内の集合に分割し、それぞれの点集合において、すべての点を包含する最小の凸多角

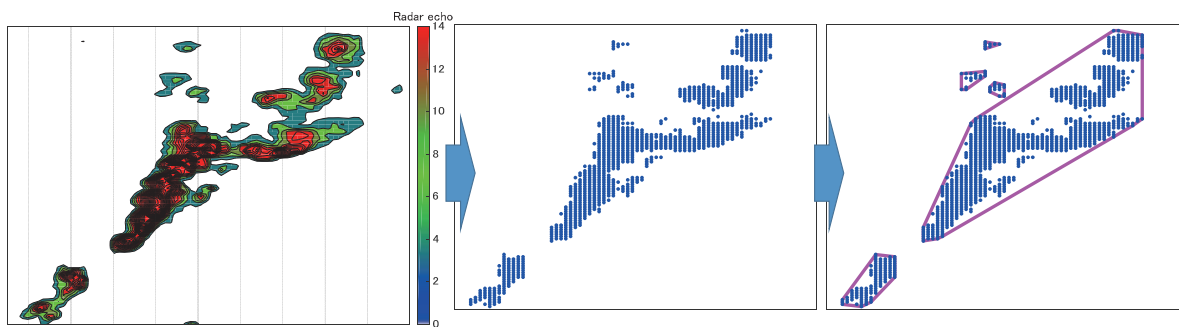


図2 (a)エコーマップ (b)閾値に基づきデータ抽出 (c)ポリゴン作成

形（凸包）を作成する (c)。

パイロットが避けるべきレーダーエコーの強度の閾値や、また凸包の作成時点での集合分割時の距離閾値に応じて、飛行困難空域も大きく変化することとなる。実運航における運航者の判断と管制官の状況認識との乖離のない閾値をいかに定めるかといったことが大きな課題の一つである。

3 航空機の飛行

3.1 飛行の模擬

航空機の飛行は巡行高度、速度、気象など様々な要素により影響を受け、その飛行時間や消費燃料などはそれに伴い変化する。本稿では、ユーロコントロールにより開発・維持されている Base of Aircraft Data (BADA) と呼ばれるモデルを用いて航空機の飛行を模擬する[8]。BADA では型式に応じた質量や推力などの性能データが与えられるとともに、航空機の上昇、巡航、降下の局面ごとに、高度に応じた標準的な飛行速度が定義されている。加えて、気象庁により提供されるメソ数値予報モデル GPV (MSM) [9]を利用する。MSM により、3 時間ごとの高度面ごとの気温や風データが取得可能となる。これらを組み合わせることにより、異なる経路を飛行した場合の航空機の飛行時間や燃料等を計算し、それらの定量的な比較が可能となる。

3.2 最適経路の計算

航空機の最適な軌道については多くの研究が進められているが[10]、本稿では動的計画法と呼ばれる手法を用いた最適経路の導出について概要を示す。最適化の計算では任意に定めた

評価関数を最小化する解を求めるが、航空機軌道の最適化としては、飛行時間最小や燃料最小、あるいはそれらのバランスを考慮した特定のコストインデックスを指定した最適化などが挙げられる。本稿では、一例として消費燃料を最小化する飛行を最適として扱う。

最適経路計算の概略図を図3に示す。図中の初期地点から目的地点まで飛行することを仮定したとき、2点間に格子点を配置し、最適な経路を探索する。進行方向をx軸、垂直方向をy軸としたとき、図中緑線で示すように、 $x=i-1$ の位置から赤い点 $([x, y] = [i, j])$ に至る経路は格子点の数だけ存在する。それらすべての飛行を計算、比較することによりその点に至る最適な接続が求められる。同様に $x=i$ におけるその他のすべての格子点に至る最適な経路を求めることにより、 $x=i$ の位置における各格子点に至る最適な接続が既知となる。これを用いて、次の $x=i+1$ の位置の各格子点に至る経路を計算する。これを初期地点から目的地点まで繰り返し、最終的に評価関数が最小の最適解が得られる。

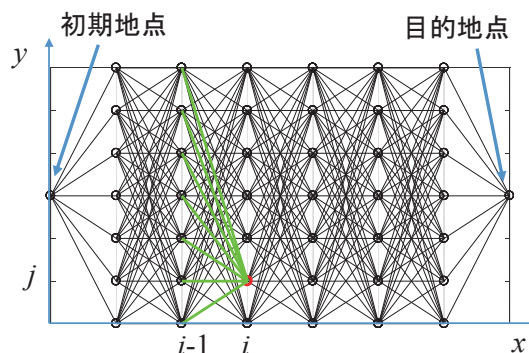


図3 最適経路探索

4. 解析例

4.1 計算条件

前章までに悪天域の生成および航空機の飛行について述べたが、ここでは異なる閾値に基づく悪天域の生成および回避経路の変化について示す。計算条件として、図4に示す初期地点から目的地点への飛行を模擬する。ここで、上図に示す風状況にあり、また下図に示すレーダーエコーの状況にあるものと仮定し、計算を実施した。

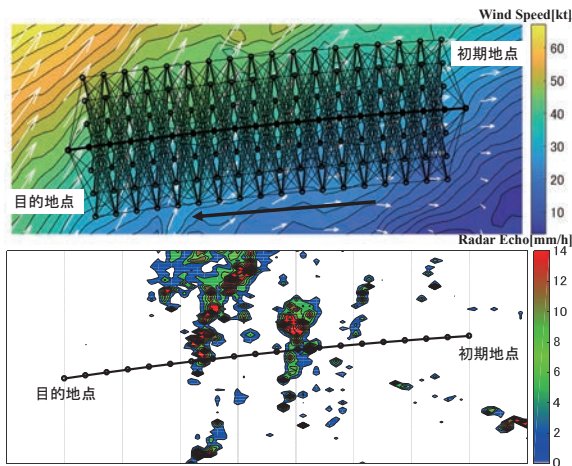


図4 風およびレーダーエコー

4.2 最適経路

図4の条件にて計算した最適経路および大圏経路に沿った飛行の結果として、図5に経路、図6に速度(TAS:真対気速度, CAS:校正対気速度, GS:対地速度), および燃料流量(FF)の履歴、表1に時間, 距離, 燃料消費量をまとめる。本解析例では大圏経路上の向かい風はそこまで大きなものではないため、最適経路を飛行することにより向かい風が減少, 対地速度が増加した分が、わずかに飛行距離の増加分を上回り、若干飛行時間および燃料消費量が低減される。今回の例はほとんど差異の無いケースだが、与えられた気象条件に対応した最適経路や時間, 燃料等の算出および比較が可能となる。

4.3 悪天回避経路

悪天回避経路について、異なる閾値を用いて飛行困難空域を生成し、飛行困難空域を避けた最適経路を回避経路として算出した結果を図7に、またそれぞれの飛行時間, 距離, 燃料を表2にまとめる。ここで、上図の経路(Rte1)は避けるべきエコー強度を強い範囲に限定し、

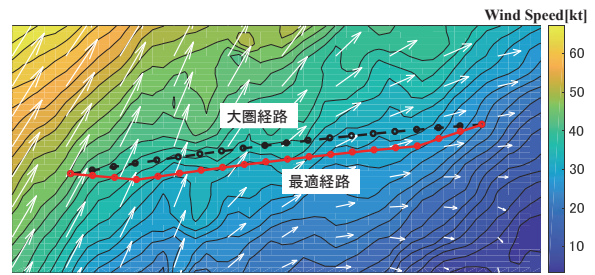


図5 大圏経路および最適経路

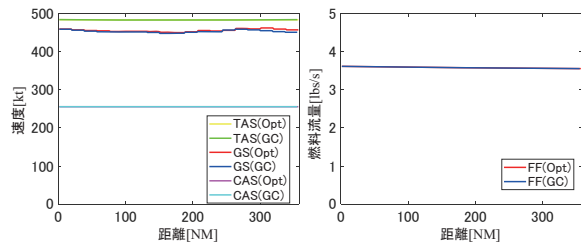


図6 速度および燃料流量

表1 飛行時間/距離/燃料消費量(最適経路)

	時間(min)	距離(NM)	燃料(lbs)
大圏	47.0	355	10,104
最適	46.9	357	10,100

強いエコーのエリア近傍まで飛行可能であると想定した場合の結果であり、下図の経路(Rte2)は避けるべきエコー強度の閾値を下げ、弱めのエコー強度まで余裕をもって避けることを想定して飛行困難空域を設定した結果である(黒の破線は前節の最適経路を示す)。Rte1のように、避けるべき空域をエコーの強い空域のみに限定した場合には、最適経路と近い経路を飛行することが可能である。一方で、Rte2のように、余裕をもって回避する安全側の判断を想定した場合には、最適経路と比較して2分程度遅れ、消費燃料は400lbs程度余分に消費することとなる。

本稿では、仮定したレーダーエコーに対して2通りの飛行困難空域およびその回避経路の計算例を示したが、実運航での判断に近い回避経路をシステム側で計算可能となれば、Lewisらが検討しているように[4]、飛行中のパイロットへの回避経路の判断に資する提案を図8に示すようなイメージで行うことや、飛行前の段階で現実的な回避経路を予測できれば、より精度の高い交通流制御へと適用することも可能になるものと考えられる。

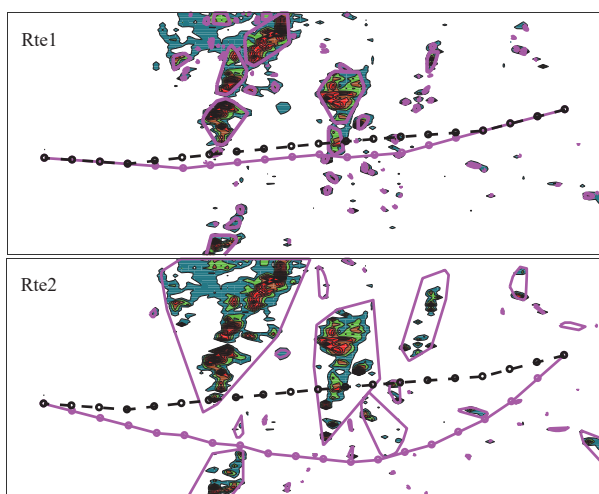


図7 閾値の異なる回避経路

表2 飛行時間/距離/燃料消費量（回避経路）

	時間(min)	距離(NM)	燃料(lbs)
最適	46.9	357	10,100
Rte1	47.0	359	10,120
Rte2	48.8	377	10,508



図8 パイロットへの情報提供イメージ

5 終わりに

本稿では、悪天回避に関する客観的な解析の一例として、悪天回避経路生成手法および異なる閾値に基づく悪天回避経路とそれに伴う飛行時間や燃料消費量の変化について報告した。悪天回避に関して客観的なデータに基づく様々な研究が行われている一方で、パイロットや管制官の考え方にも差異があり、未だその方法論は確立していない状況にある。将来の航空交通システムの更なる高度化に向け、悪天回避に関する定量的な評価が必要不可欠である。今後、レーダーエコーだけでなく、雲画像など他の情報と組み合わせた解析が必要である。また、過去から将来にわたる多くのデータに基づき我が国における状況を解析し、それに基づく提案をしていくことが重要である。さらに、悪

天回避の経路やその影響について可視化し、運航者、管制官をはじめ、関係者間での認識を共有し、実態に即した研究開発を進めていくことが肝要である。

参考文献

- [1] U.S. Department of Transportation, “Thunderstorms,” Advisory Circular 00-24C, Washington, D.C., Feb. 2013.
- [2] NATS Ltd, “The Effect of Thunderstorms and Associated Turbulence on Aircraft Operations,” Aeronautical Information Circular, P 056/2010, Aug. 2010.
- [3] Manuela Sauer, et al, “Tradeoffs for Routing Flights in View of Multiple Weather Hazards,” Journal of Air Transportation, Vol. 27, No.2, April 2019.
- [4] Timothy A. Lewis, et al, “Weather Design Considerations for the TASAR Traffic Aware Planner,” AIAA AVIATION Forum, June 2019.
- [5] Michael P Matthews and Rich DeLaura, “Assessment and Interpretation of En Route Weather Avoidance Fields from the Convective Weather Avoidance Model,” AIAA ATIO Conference, Sept. 2010.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] EUROCONTROL Experimental Centre, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.8,” EEC Technical/Scientific Report No. 2010-003, April 2010.
- [9] 気象庁予報部, “配信資料に関する技術情報第500号 メソ・局地数値予報モデルGPV及びMSMガイダンスの予報時間延長について,” 平成31年2月.
- [10] 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.