

2. ADS-B 方式高度監視に係る ADS-B 幾何高度基準の判別

監視通信領域 ※松永 圭左, 金田 直樹, 宮崎 裕己

1 はじめに

航空交通においては、増大する航空交通量に対応するため、国際民間航空機関（ICAO）は1994年に、FL（フライトレベル）290からFL410までの空域において、垂直間隔を従来の2000 ftから1000 ftに短縮する短縮垂直間隔（Reduced Vertical Separation Minimum, RVSM）方式を制定した[1]。日本が航空交通業務を担当する福岡飛行情報区（福岡 Flight Information Region, 福岡 FIR）では、2000年から導入が開始され、2005年9月30日から福岡 FIR 全域においてRVSMが導入されている[2,3]。

RVSM 運用を導入した場合は、ICAOの承認を受けた地域監視機関（RMA; Regional Monitoring Agency）が、担当する空域を飛行する航空機の高度維持性能の監視を含む継続的な安全性評価を行うこととなっている[4]。日本においては、国土交通省航空局（以下、航空局）が福岡 FIR を担当する RMA として JASMA (Japan Airspace Safety Monitoring Agency)を設立した。JASMA では、航空局が設置・運用している高度監視装置（HMU; Height Monitoring Unit）を用いて、高度維持性能監視を実施している[5]。

航空機の高度維持および航空管制は、気圧高度に基づいているため、航空機高度維持性能監視では、航空機の気圧高度計の誤差を測定する必要がある。誤差の測定は、飛行中の航空機の気圧高度計の高度を、別途計測された幾何高度と比較することにより行う。HMU では、幾何高度の計測に、マルチラテレーション（MLAT; Multi-Lateration）方式が用いられている。一方、異なる方式の高度監視システム（HMS; Height Monitoring System）として、ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast; 放送型自動位置情報伝送・監視機能) データに含まれるGNSS 幾何高度情報を用いる高度監視システム（ADS-B 方式 HMS ; AHMS）が、豪州等によ

り開発・運用されている。AHMS は、マルチラテレーション方式に比べて広範囲の空域を飛行する航空機のデータを収集できる利点があり、また、受信局数の低減、および時刻を精密に同期するための装置が不要であることから、整備・運用コストが低くなることが見込まれる。

電子航法研究所においては、これまでに AHMS の測定誤差について、ADS-B で放送される幾何高度（ADS-B 幾何高度）の基準面が航空機毎に2種類存在することが主要な誤差要因であることを示した[6]。誤差が無視できない地域である我が国においては AHMS を導入した場合に、幾何高度基準の判別が必要となる。ADS-B 幾何高度の基準面を判別するため、AHMS の試験システムを整備し、飛行中の航空機から放送される ADS-B データを用いて解析した結果、解析に使用した気象データの誤差および飛行地点のジオイド高の影響により、幾何高度基準の判別が困難となる場合が多く存在した[7,8]。本報告では、判別困難な ADS-B 幾何高度基準について、運用中の HMU の幾何高度と比較し、ADS-B 幾何高度の2種類の基準面を判別する新たな手法とその結果を示す。

2 高度維持性能監視における幾何高度

2.1 高度誤差の測定

高度維持性能監視においては、機上装置で用いられる気圧高度と真の高度の差である気圧高度計誤差（ASE; Altimetry System Error）等の高度誤差を測定する[9]。気圧高度は、ICAO 標準大気モデル、気象データ、楕円体からジオイド面までの高さ（ジオイド高）データを用いて、幾何高度に変換される。高度誤差を測定するために、真の高度として別途計測された幾何高度を用いる（図1）。

2.2 幾何高度の測定方法

HMS で用いられる幾何高度測定手法としてマルチラレーションによる方法と ADS-B による方法がある。

2.2.1 マルチラレーションによる幾何高度

マルチラレーション方式 HMS では、航空機に搭載されたレーダ用応答装置(トランスポンダ)が発した電波を、地上に設置した4台以上の受信機で受信する。受信機に到達した電波の時刻差を測定し、この時刻差から幾何高度を測定する[10,11]。我が国では、航空局がマルチラレーション方式 HMS である HMU を瀬戸内、新潟、仙台の3箇所に設置し、測定した幾何高度(HMU 幾何高度)を用いて航空機の高高度維持性能評価を行っている[12]。今回の解析に用いた仙台 HMU は仙台空港付近の半径30NMの測定範囲を飛行した航空機を監視している。

2.2.2 ADS-B 幾何高度

AHMS は、ADS-B 受信機の覆域が半径約200NMと広く、1局でHMUより広い覆域の航空機を監視できるという利点があり、豪州等の高度維持性能監視に活用されている[6]。

航空機に搭載された ADS-B に対応するトランスポンダは自発的に位置情報等を放送する[13]。ADS-B で放送される高度情報には、航空機の気圧高度だけでなく、GPS に代表される全地球航法システム(Global Navigation Satellite

System, GNSS) により機上で測位された幾何高度(ADS-B 幾何高度)の情報も含まれており[13]、AHMS は ADS-B 幾何高度を用いて高度維持性能評価を行っている。

2.3 ADS-B 幾何高度基準

ADS-B 幾何高度は高度の基準面の違いにより2種類ある。平均海水面(≒ジオイド面)を基準面としたときの幾何高度 HAG (Height Above Geoid) と、GNSS (Global Navigation Satellite System) の座標系で使用されている地球回転楕円体(楕円体面)を基準面としたときの幾何高度 HAE (Height Above Ellipsoid)である。ADS-B 幾何高度は、航空機の装置により HAG か HAE のいずれかの値が放送される。しかしながら、HAG と HAE のどちらであるかを示す情報は ADS-B で放送される情報には含まれていない[14,15]。

日本付近において、地球楕円体面からジオイド面までの高度差は10から150ft程度あり[6]、高度維持性能監視システムの誤差としては無視できない[16]。将来的には ADS-B 幾何高度は HAE に統一される予定である[13]が、RVSM 空域を飛行する全ての航空機の ADS-B 幾何高度が HAE になるまでの状況において、AHMS による高度維持性能監視を行うためには ADS-B 幾何高度が HAE と HAG のどちらであるかを航空機毎に判別する必要がある。

3 HMU データを用いた ADS-B 幾何高度基準の判別方式

著者らはこれまでに、ADS-B データを用いた ADS-B 幾何高度基準の判別を行ってきた[7]。当該判別方式では、各航空機の ASE 値は一定であることを前提とし、地理的にジオイド高が異なる地点を飛行している時のデータを得ることにより、ASE 値が一定になる高度基準が正しいと判別する。この方式では、ジオイド高が大きく異なる地点における航空機の幾何高度が必要であり、また、ASE 値の算出には別の主要な誤差要因である気象データを用いるため、約8割の航空機の幾何高度基準が判別困難となる結果となった[8]。

この対処策として、ADS-B 幾何高度を、高

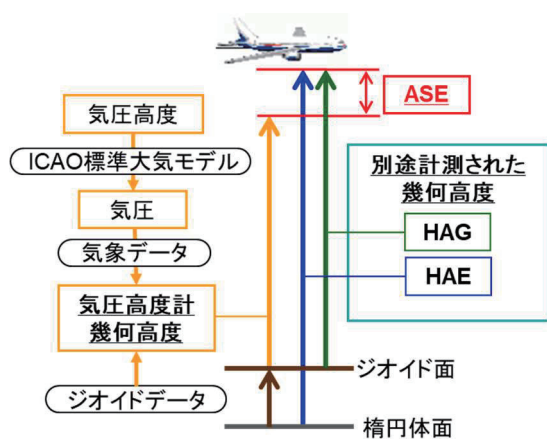


図 1. ASE 測定方法説明図

度基準が分かっている HMU 幾何高度と比較する方式により、ADS-B 幾何高度基準を判別した。

3.1 HMU と ADS-B の幾何高度差

HMU の幾何高度情報を解析に用いるため、仙台 HMU のデータを JASMA から提供いただいた。HMU は航空機から信号を受信するごとにモード S アドレス、日時、緯度経度、気圧高度、幾何高度等を収集している(受信データ)。また、HMU は、航空機が測定範囲内を同一 FL で 20NM 以上の距離を直線飛行した部分を 1 航跡として評価対象にし、各受信データを航跡毎に取りまとめて集計し、航跡の開始時刻と終了時刻の中央の日時(航跡中央日時)、開始時刻から終了時刻までの計測時間、FL などの情報を記録している(集計データ)。

今回の解析に用いた ADS-B データは、仙台空港に隣接した電子航法研究所岩沼分室に設置した ADS-B 受信機で得られたデータを用いた。ADS-B 受信機には 1090MHz 受信アンテナと GPS 受信アンテナが接続されており、受信した ADS-B データを GPS 時刻と共に出力している(図 2)。ADS-B データには、モード S アドレス、気圧高度、幾何高度、緯度経度情報が含まれる。

図 3 に HMU と ADS-B で収集した一航跡の幾何高度を時系列プロットおよび航跡マップの例を示す。左側の図の縦軸は幾何高度で単位は ft、横軸は UTC で表した時刻である。水色の点

は HMU 幾何高度、山吹色の点は ADS-B 幾何高度である。青の水平線は HMU 幾何高度の平均、赤の水平線は ADS-B 幾何高度の平均を表す。この航跡の例では、HMU 幾何高度の平均は 34346.11 ft、ADS-B 幾何高度の平均は 34514.20 ft で、その差は 168.08 ft である。航跡毎の ADS-B 幾何高度の平均から HMU 幾何高度の平均を引いた差(以下、幾何高度差)を用いた幾何高度基準の判別方式について、以下に説明する。

3.2 幾何高度差を用いた ADS-B 幾何高度基準の判別

2020 年 1 月 20 日から 2020 年 2 月 20 日までの期間で、仙台 HMU データと岩沼分室に設置した ADS-B 受信機で収集したデータを用いて航跡毎の幾何高度差を求めた。対象となる航跡は、同一の航空機(モード S アドレスが同一)で、仙台 HMU の測定範囲(半径 30 NM)において、HMU 受信データおよび ADS-B データが双方 100 点以上収集された航跡とした。

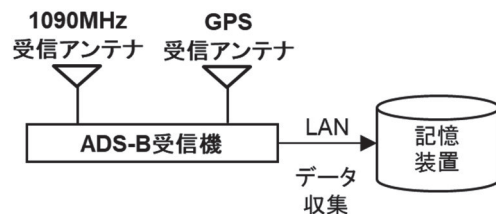


図 2. ADS-B データ収集概念図

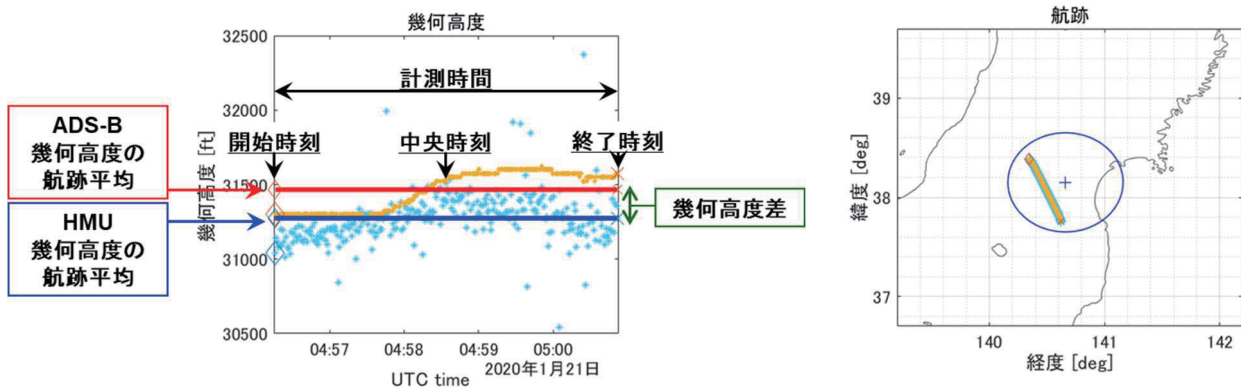


図 3. HMU/ADS-B で収集した一航跡の幾何高度の時系列プロット(左図)および航跡マップ(右図)の例
(評価対象データの開始点: ◇, 終了点: ×)

対象となった 3256 航跡についての幾何高度差の度数分布を図4に表す。横軸は幾何高度差、縦軸は航跡数である。ADS-B 幾何高度の量子化単位は 25 ft であることから[13], 階級幅は 25 ft とした。

3.2.1 最尤推定による混合分布の推定

全航跡の幾何高度差の度数分布(図4)から、幾何高度差が 125 ft 以上 150 ft 未満となる航跡が最も多く、25 ft 以上 50 ft 未満の階級に二つ目のピークがある。度数分布が2つのピークを持つので2つの独立な正規分布を混合した混合正規分布により与えられると考え、そのときに最もよくあてはまるパラメータについて期待値最大化(expectation Maximization, EM)アルゴリズムを用いた最尤推定をおこなった[17]。なお、最尤推定においては、全航跡の幾何高度差について平均 $\mu_{all,0}$ および標準偏差 $\sigma_{all,0}$ を求め、 $\mu_{all,0} \pm 3\sigma_{all,0}$ の範囲外のデータを外れ値として推定には使用していない。

最尤推定により、正規分布1の平均 $\mu_{all,1}$ 、標準偏差 $\sigma_{all,1}$ 、正規分布2の平均 $\mu_{all,2}$ 、標準偏差 $\sigma_{all,2}$ 、および正規分布1と2の構成比 $r_{all,1}$ 、 $r_{all,2}$ のパラメータを求めた結果、平均 $\mu_{all,1}=160.80$ ft、標準偏差 $\sigma_{all,1}=51.45$ ftの正規分布1を $r_{all,1}=73.1\%$ 、平均 $\mu_{all,2}=29.37$ ft、標準偏差 $\sigma_{all,2}=25.35$ ftの正規分布2を $r_{all,2}=26.9\%$ の割合で混合した混合正規分布が得られた。推定した分布を図4に度数分布と重ねて示した。

2つの正規分布の平均の差 131.42 ft は、仙台 HMU 付近における地球楕円体面からジオイ

ド面までの高度差である 131.17 ft に近い。これは、ADS-B 幾何高度として、正規分布1が HAE を放送している航空機の航跡の分布、正規分布2が HAG を放送している航空機の航跡の分布と考えられる。

3.2.2 航空機タイプグループ毎の分布推定

前項では評価対象となる全航跡に対して2つの正規分布を混合した混合正規分布により ADS-B と HMU の幾何高度差の分布を推定した。次に、高度維持性能の精度が同一であるとみなせる機種集合である航空機タイプグループ毎に幾何高度差の分布を推定する。航空機タイプグループは、ICAO 文書[16]で規定されており、RMA における高度維持性能監視では、航空機タイプグループ毎に評価を行っている。

ADS-B 幾何高度として HAE と HAG が混在している場合の分布数は2つ、HAE または HAG のみの分布数は1つであると考え、分布数を統計的に選択するために、ベイズ情報量規準(BIC)を用いた[18]。

具体的には、まず、独立な d ($=1$ または 2) 個の正規分布を混合した混合正規分布に対し、最尤推定により確率密度関数を推定し、BIC を計算する。分布数 d に応じた BIC がより小さい統計モデルが、より適合度の高い近似を与えることから分布数を選択し、分布を推定した。なお、最尤推定においては、前項と同様に、各航空機タイプグループの全航跡の幾何高度差について平均 μ_0 および標準偏差 σ_0 を求め、 $\mu_0 \pm 3\sigma_0$ の範囲外のデータを外れ値として推定には使用していない。

全航跡および航空機タイプグループ毎の航跡数、BIC により選択した分布数 d 、各分布の平均 μ 、標準偏差 σ 、それぞれの分布の構成比 r を表1に示す。なお、統計処理により評価するため、航跡数が 32 未満の航空機タイプグループである A340, B744-5, MD11 等の 18 種および航空機タイプグループが不明の航空機については、本報告では分布推定を行っていない。

推定した各分布において、ADS-B 幾何高度が HAE または HAG による分布かを判定するため、以下の式を用いた。各分布の平均 μ が、前項で求めた全航跡の HAE/HAG の分布の平均と

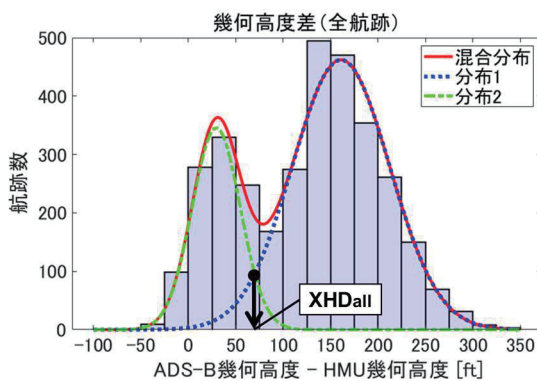


図4. ADS-B と HMU の幾何高度差および推定した混合正規分布

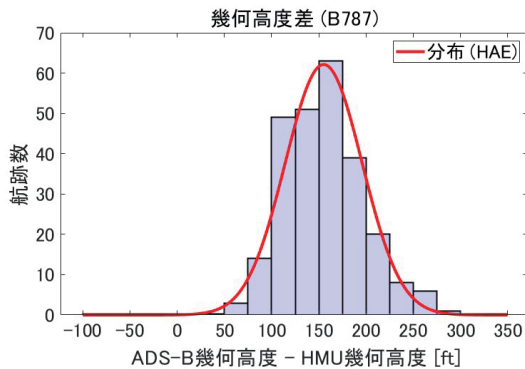
標準偏差を用いた条件 (1)式を満たせば ADS-B 幾何高度が HAE である分布, (2)を満たせば HAG である分布と判定した。結果を表 1 の最終列に記した。

$$XHD_{all} \leq \mu < \mu_{all,1} + 2\sigma_{all,1} \quad \cdots(1)$$

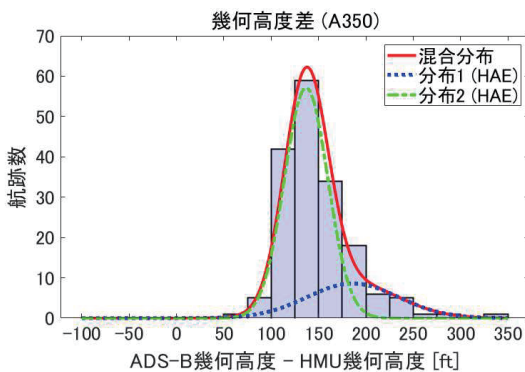
$$\mu_{all,2} - 2\sigma_{all,2} < \mu < XHD_{all} \quad \cdots(2)$$

HAG と HAE の境界である $XHD_{all}=70.07$ ft は

(a-1) HAE 分布のみ (分布数=1)



(a-2) HAE 分布のみ (分布数=2)



(b) HAE/HAG 混在分布

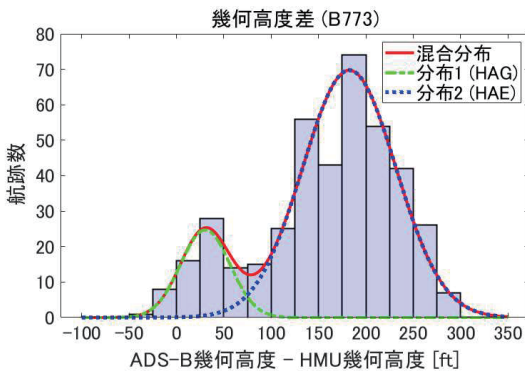


図 5. 航空機タイプグループ毎の幾何高度差の度数分布と推定した分布の例

図 4 の青線と緑線の交点, すなわち 2 つの正規分布の確率密度関数が同じ値になる幾何高度差とした。

判定を行った結果, ADS-B 幾何高度が HAE である分布のみの場合と HAE と HAG の分布が混在する場合の 2 種類の航空機タイプグループが存在した。HAE の分布のみと推定した航空機タイプグループの確率密度関数と度数分布をプロットした結果の例を図 5(a-1)(a-2)に, HAE と HAG の分布が混在していると推定した航空機タイプグループの結果の例を図 5(b)に示す。

HAE の分布のみと推定した航空機タイプグループは B744-10, B748, B787, A330, A350, A380 であった。B744-10 と A350 は $d=1$ より $d=2$ の混合正規分布の適合度が高かったが, 2 つの分布の平均値が両方とも(1)式を満たす

表 1 幾何高度差分布の推定結果

グループ (航跡数*)	d	平均 μ [ft]	偏差 σ [ft]	構成比 $r(\%)$	ADS-B 幾何高度
全航跡 (3256 / 3246)	2	160.95	51.31	73.0	HAE
		29.47	25.39	27.0	HAG
B737NX (1031 / 1030)	2	158.09	45.39	65.0	HAE
		31.22	27.12	35.0	HAG
B744-10 (108 / 104)	2	225.50	44.98	50.8	HAE
		153.94	22.52	49.2	HAE
B748 (90 / 89)	1	189.92	46.30	100	HAE
B767 (371 / 370)	2	36.38	26.64	80.4	HAG
		129.11	56.04	19.6	HAE
B772 (380 / 379)	2	169.58	52.95	69.2	HAE
		29.21	31.56	30.8	HAG
B773 (409 / 409)	2	182.51	49.22	84.2	HAE
		30.43	26.13	15.8	HAG
B787 (254 / 254)	1	155.18	40.77	100	HAE
A320 (171 / 170)	2	35.96	22.39	62.3	HAG
		158.80	39.22	37.7	HAE
A330 (37 / 36)	1	128.55	34.40	100	HAE
A350 (173 / 173)	2	136.91	22.95	75.9	HAE
		186.22	48.37	24.1	HAE
A380 (36 / 36)	1	164.70	38.63	100	HAE

*航跡数: 全航跡数/最尤推定で使用した航跡数

め HAE のみの分布と推定した。また、A330 については、ADS-B 幾何高度が HAE と HAG の航空機が混在していることが Airbus 社より報告されている[19]が、今回の評価対象となったデータにおいては HAE を放送する航空機の航跡のみが含まれていた可能性が高い。

HAE と HAG の分布が混在していると推定した航空機タイプグループは、B737NX, B767, B772, B773, A320 であった。

3.2.3 航空機の ADS-B 幾何高度基準の判別

前項までに、航跡の幾何高度差の度数分布から、航空機タイプグループ毎に ADS-B 幾何高度が HAG の場合と HAE の場合の幾何高度差の分布を推定できた。この分布の確率密度関数を用い、各航空機の幾何高度差における確率密度を求め、航空機が放送している ADS-B 幾何高度が HAG か HAE を判別する手法を開発した。なお、今回の評価期間中、複数の航跡の幾何高度差が得られている航空機については、航跡毎の確率密度の相乗平均を用いた。

判別対象となる航空機が属する航空機タイプグループにおける推定分布の確率密度関数を $pdf_i(x)$ (i は分布の番号または HAE/HAG と記述。), $pdf_i(x)$ の平均, 標準偏差を μ_i, σ_i , 航跡の幾何高度差を $dH(j)$ (j は当該航空機の航跡の番号。航跡数= n の場合, $j=1, \dots, n$) とすると、当該航空機の分布 i における確率密度の相乗平均 pd_i は、

$$pd_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n pdf_i(dH(j))}$$

である。

図 6 に、HAG/HAE 混合分布における確率密度の概念図を示す。

(1) 推定分布数=1 (i =HAE) の場合

$$pd_{HAE} \geq pdf_{HAE}(\mu_{HAE} + 1.96 \sigma_{HAE})$$

の場合、判定結果は HAE, それ以外の場合は判別不能とした。すなわち、推定分布の 95% 以内に入っている場合に HAE と判別した。

(2) 推定分布数=2 ($i=1,2$) で両方の分布が HAE の場合

$$pd_1 \geq pdf_1(\mu_1 + 1.96 \sigma_1) \text{ または}$$

$$pd_2 \geq pdf_2(\mu_2 + 1.96 \sigma_2)$$

の場合、判定結果は HAE, それ以外の場合は判別不能とした。すなわち、いずれかの推定分布の 95% 以内に入っている場合に HAE とした。

(3) 推定分布数=2 (i =HAG,HAE) で HAG/HAE が混在している場合

まず、

$$pd_{HAE} < pdf_{HAE}(\mu_{HAE} + 1.96 \sigma_{HAE})$$

かつ

$$pd_{HAG} < pdf_{HAG}(\mu_{HAG} + 1.96 \sigma_{HAG})$$

の場合、すなわち、いずれの推定分布の 95% 以内に入っていない場合は、判定結果は判別不能とした。

上記以外の場合、当該航空機の幾何高度差について、HAG と HAE の双方の分布における確率密度の比

$$P_{HAG} = pd_{HAG} / (pd_{HAG} + pd_{HAE})$$

$$P_{HAE} = pd_{HAE} / (pd_{HAG} + pd_{HAE})$$

$$(P_{HAG} + P_{HAE} = 1)$$

を求め、

$$P_{HAG} \geq 95\% \text{ の場合、判定結果は HAG,}$$

$$P_{HAE} \geq 95\% \text{ の場合、判定結果は HAE,}$$

それ以外の場合は判別不能とした。

なお、 $dH(j)$ が $pdf_i(x)$ の $\mu_i \pm 3\sigma_i$ の範囲外 (分布数=2 の場合は、両方の分布に対して範囲外の場合) の航跡については、外れ値として確率密度の相乗平均の算出には用いていない。また、外れ値の航跡のみの航空機の判別結果は、判別不能とした。

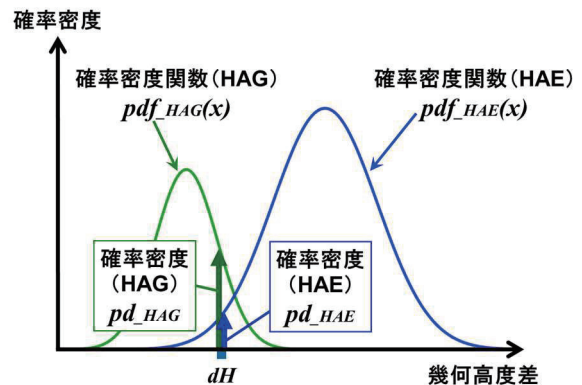


図 6. HAG/HAE 混合分布における確率密度の概念図

3.2.4 判別結果および考察

上記の手法を用いて、航空機の ADS-B 幾何高度基準を判別した結果を、表 2 に示す。

今回の評価対象となったデータにおいて、航跡数不足により分布が推定できなかった航空機タイプグループの 71 機および航空機タイプグループが不明だった 35 機を判別不能として、全航空機 967 機の判別結果は、HAG が 17 機、HAE が 659 機、判別不能が 291 機であり、約 7 割の機体の判別結果が得られた。従前の、ASE 値が一定となることを用い、ADS-B 幾何高度と飛行地点のジオイド高から基準面を判別する手法[7,8]では、判別不能となる航空機の割合が約 8 割だったため、判別可能となる航空機の割合が飛躍的に向上した。

但し、航跡の幾何高度差の度数分布から HAG/HAG が混在していると推定した航空機タ

イプグループに関しては、分布の構成比と比べると特に HAG と判別された機数が少なく判別不能の機数が多い結果となっている問題がある。今回は、統計処理上のサンプル数を確保するため、航跡毎の幾何高度差の度数分布から推定した分布を用いて、航空機毎の幾何高度基準の判別を行った。今後、航空機毎の幾何高度差を用いた判別手法等の検討が課題である。

4 まとめ

本報告では、気象データや飛行地点のジオイド高の範囲の影響を受ける従前の AHMS のデータのみを用いた手法に対して、ADS-B 幾何高度と HMU 幾何高度の差を用いた ADS-B 幾何高度基準の新しい判別手法を開発し、その判別結果を示した。解析には、2020 年 1 月 20 日から 2020 年 2 月 20 日までの期間の仙台 HMU データと岩沼分室に設置した ADS-B 受信機で収集したデータを用い、航跡毎の幾何高度差の度数分布から、BIC および最尤推定により HAG または HAE による最適な分布を求めた。この分布を用いて、全航空機 967 機の ADS-B 幾何高度の基準の判別を行った結果、HAG が 17 機、HAE が 659 機、判別不能が 291 機であった。従前の手法では判別可能な航空機は約 2 割であったが、今回の手法では約 7 割の機体が判別可能となり、判別可能な割合が飛躍的に向上した。

今後、判別可能な航空機の割合を向上させるためには、HAG/HAE 混在時の判別手法のさらなる検討が必要である。

謝辞

ADS-B 受信システムの設置、HMU データの提供に御協力頂いた、高松空港事務所、航空交通管理センター、技術管理センター、並びに国土交通省航空局の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- [1] ICAO Annex 6 “Operation of Aircraft”, Ninth Edition, July 2010.
- [2] 国土交通省航空局, "短縮垂直間隔(RVSM)の国内空域への導入について", 平成 17 年 9 月 30 日

表 2 航空機の ADS-B 幾何高度基準判別結果

グループ 機数計	分布	判別結果 機数 (%)		
		HAG	HAE	判別不能
B744-10 47 機	HAE (2 分布)	0	46	1
		0.0%	97.9%	2.1%
B748 52 機	HAE (1 分布)	0	52	0
		0.00%	100.00%	0.00%
B787 110 機	HAE (1 分布)	0	103	7
		0.00%	93.64%	6.36%
A330 26 機	HAE (1 分布)	0	24	2
		0.00%	92.31%	7.69%
A350 62 機	HAE (2 分布)	0	62	0
		0.00%	100.00%	0.00%
A380 15 機	HAE (1 分布)	0	15	0
		0.00%	100.00%	0.00%
B737NX 131 機	HAG/ HAE 混在	6	84	41
		4.58%	64.12%	31.30%
B767 50 機	HAG/ HAE 混在	1	0	49
		2.00%	0.00%	98.00%
B772 127 機	HAG/ HAE 混在	2	90	35
		1.57%	70.87%	27.56%
B773 160 機	HAG/ HAE 混在	0	153	7
		0.00%	95.63%	4.38%
A320 81 機	HAG/ HAE 混在	8	30	43
		9.88%	37.04%	53.09%
その他*				71
不明				35
合計 967 機		17	659	291
		1.76%	68.15%	30.09%

*その他：航跡数不足(32航跡未満)の航空機タイプグループの計

- https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/12/120930_.html (参照, 2021年4月)
- [3] 国土交通省航空局, "RVSM 航行の許可基準及び審査要領", 平成17年8月4日 国空航第312号, 国空機第466号
- [4] ICAO Annex 11 "Air Traffic Services", Thirteenth Edition, July 2001.
- [5] <https://www.jasma.jp/hmu/monitoring-process/> (参照, 2021年4月)
- [6] 松永, 宮崎, "ADS-B 方式高度維持性能監視の誤差要因", 第15回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp.55-60, Jun. 2015.
- [7] 松永, 宮崎, "ADS-B データを用いた航空機高度維持性能監視の評価", 日本航海学会誌 NAVIGATION, Vol. 204, pp. 31-36, Apr. 2018.
- [8] "ADS-B GNSS Geometric Height Reference Determination", RASMAG MAWG/5-IP/05, 29/01-01/02/2018.
- [9] ICAO, "Manual on a 300 m (1000 ft) Vertical Separation Minimum between FL 290 and FL 410 Inclusive," ICAO Document 9574 3rd Edition, 2012.
- [10] ICAO, "Aeronautical Telecommunications," Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Vol. 4, "Surveillance and Collision Avoidance Systems," Jul. 2014.
- [11] ICAO, "Aeronautical Surveillance Manual," Document 9924 2nd Edition, 2017.
- [12] 国土交通省航空局, "福岡 FIR における RVSM," 航空路誌, ENR 3.9.3, Mar 2016.
- [13] ICAO, "Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter," ICAO Document 9871 2nd Edition, Amendment 1," Sep 2017.
- [14] RTCA, "Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services - Broadcast (TIS-B) with Corrigendum 1," RTCA Document 260B (DO-260B), Dec 2009.
- [15] European Organisation for Civil Aviation Equipment, "Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services - Broadcast (TIS-B) with Corrigendum 1," EUROCAE Document 102A (ED-102A), Dec 2009.
- [16] ICAO, "Manual of Operating Procedures and Practices for Regional Monitoring Agencies in relation to the use of a 300 m (1000 ft) Vertical Separation Minimum above FL 290," Document 9937 Second Edition, 2019.
- [17] C. M. ビショップ著, 元田, 栗田, 樋口, 松本, 村田監訳, "パターン認識と機械学習," 丸善出版, 2012年
- [18] 小西, 北川, 情報量規準, 朝倉書店, 2004年
- [19] François Tranchet and Nicolas Bordenave, "GNSS Height on Airbus," Altimetry System Error (ASE) Workshop, Oct 2017. https://www.faa.gov/air_traffic/separation_standards/rvsm/documents/ASE/2.5_GNSS_Height_on_Airbus.pdf (参照, 2021年4月)