

10. ADS-B 方式高度維持性能監視の誤差要因

監視通信領域 ※松永 圭左, 宮崎 裕己

1 はじめに

国際民間航空機関（ICAO）において、高度 29,000 から 41,000 フィートの空域にて、航空機の垂直方向の管制間隔を従来の 2,000 フィートから 1,000 フィートに短縮する短縮垂直間隔（RVSM; Reduced Vertical Separation Minimum）方式が制定されており[1]、日本の管制空域では 2005 年から運用が始まっている[2]。

RVSM 運航の導入による効果として、使用フライトレベルが増えることによる空域容量の増加、使用高度の選択肢が増えることによる消費燃料・飛行時間の節減、航空路交差点で発生する高度変更クリアランスの減少等がある。

RVSM 運用を導入した場合は、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[3]。日本においては、地域監視機関として国土交通省航空局（以下、航空局）が地上設置型高度監視装置（HMU; Height Monitoring Unit）を整備し、高度維持性能監視を実施している。

航空機の高度維持および航空管制には、気圧高度計で計測される気圧高度が用いられる。このため、航空機高度維持性能監視では、気圧高度計の誤差を測定する必要があり、誤差測定のために、別途計測された幾何高度を用いる。現在、航空局が整備している HMU では、幾何高度の計測に、マルチラレーション（MLAT; Multi-Lateration）方式（航空機の応答装置からの信号を、地上に複数配置された受信局で受信し、各受信局間の受信時刻の差から幾何高度を計測）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）データに含まれる幾何高度情報を用いることにより、高度維持性能監視を行う

システム（ADS-B 方式 HMS）が、豪州等により開発・運用されている。ADS-B 方式 HMS は、マルチラ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、また整備・運用コストが低くなることが見込まれる。

HMS を運用するにあたっては、ICAO で規定された測定性能要件を満たす必要がある[4][5]。このため、電子航法研究所では、日本における ADS-B 方式高度監視システムの導入に向けた検討として、当該システムの測定性能に影響を与える誤差要因の調査を行った。

本稿では、第 2 節において高度維持性能監視の概要を述べ、第 3 節にて現在運用されている 3 種類の HMS の概略と特徴を説明する。第 4 節では ADS-B 方式 HMS の処理内容を説明する。第 5 節において ADS-B 方式 HMS の誤差要因の調査結果を記述し、第 6 節で誤差要因の特性を述べる。第 7 節にまとめを記す。

2 高度維持性能監視の概要

航空機の高度維持および航空管制は、気圧高度情報に基づいており、高度維持性能監視における誤差（高度誤差）は、図 1 のように分類される[4][5]。航空管制で割り当てられている気圧高度（割当高度）と実際に航空機が飛行している真の高度の差が、高度維持誤差（TVE; Total Vertical Error）である。TVE は飛行技術誤差（FTE; Flight Technical Error）と気圧高度計誤差（ASE; Altimetry System Error）から成る。FTE は機上の装置で用いられる気圧高度と割当高度の差である。ASE 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。

高度維持性能監視においては、RVSM 空域の運航承認を得た航空機（RVSM 承認機）に対し、高度誤差が以下の条件

- ・ TVE \geq 90[m] (300[ft])
- ・ ASE \geq 75 [m] (245[ft])

に該当する航空機を RVSM 非適合機として確認する必要があることが規定されている[4][5]。

RMA が高度維持性能監視を実施する際には、高度測定誤差の要件として、TVE の測定誤差の標準偏差を 15[m] (50[ft])以下とすることが規定されている[4][5]。

3 高度監視システムの種類

TVE および ASE を求めるためには、真の高度を測定する必要がある。真の高度を測定するために、HMS では、気圧高度計とは異なる方法で計測された幾何高度を用いる。現在、運用されている HMS には、以下の 3 種類の方法で収集した幾何高度情報を用いる方式がある。

(1) GMU 方式

GMU (GNSS Monitoring Unit)方式は、GPS 等の GNSS (Global Navigation Satellite System)受信機および航空機の応答装置から送信される気圧高度情報を受信する装置を用いて機上でデータを収集し、GNSS で計測された幾何高度を用いて TVE/ASE を算出する方式である。

測定するには、GMU 装置を航空機に持ち込み、技術者が操作する必要がある。また、航空機 1 機毎の測定となるため、運航者に負担がかかる方式である。

(2) マルチラレーション (MLAT) 方式

MLAT 方式は、航空機の応答装置から送信される信号を受信する装置を地上の複数箇所に配備し、各受信局間の受信時刻差から航空機の位置を求め、幾何高度を計測する方式である。

MLAT 方式では、配置された地上受信局付近の上空を飛行する航空機の TVE/ASE を測定で

きる。測定できる覆域は、MLAT の高度測定が要求される精度で得られる範囲となる。現在、航空局が整備している瀬戸内 HMU では、受信局を 5 箇所配備し、半径 40NM の範囲が測定覆域となっている。

この方式では、航空機が測定覆域内を飛行することで高度誤差の計測が可能となる。

(3) ADS-B 方式

ADS-B 方式は、航空機から放送される ADS-B データに含まれる機上の GNSS 受信機で計測された幾何高度を、地上に設置した ADS-B 受信機で収集する方式である。

ADS-B 方式では、ADS-B 信号が受信できる範囲（受信機から最大約 200NM の範囲）を飛行する航空機のデータを収集できる。MLAT 方式と比べて、広範囲の覆域があるため運航者への負担が少なく、1 箇所の受信局で測定でき時刻同期用の装置も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。

4 ADS-B 方式 HMS の処理内容

ADS-B 方式 HMS では、航空機から周期的に放送される ADS-B データ、気象データ、およびジオイド高データを用いて、各航空機の高度誤差の算出処理を行う。

ADS-B データには、航空機の緯度・経度、気圧高度、および幾何高度（正確には幾何高度と気圧高度の差）が含まれている（表 1）[6]。

気圧高度は、気圧高度計で計測した気圧値を ICAO の標準大気モデル（平均海面≡ジオイドでの気圧=1,013.25[hPa]、気温=15[°C]）[7]で変換した高度値である。ICAO 標準大気モデルを用いて、気圧高度値は気圧値に一意的に変換される。この気圧値を幾何高度に変換するために気象データを用いる。気象データは、観測値に基づき 3 次元モデルで生成されており、緯度経度格子点における気圧と幾何高度の対応を示すものである。変換された幾何高度は、ジオイド面からの高度 (HAG; Height Above Geoid) である。これを、GNSS の座標系で使用されている回転楕円体 (楕円体面) からの高度 (楕円体高; HAE; Height Above Ellipsoid) に変換するために、ジオイド高データ (経緯度点での楕円体面からジオイド面までの幾何高度データ) を

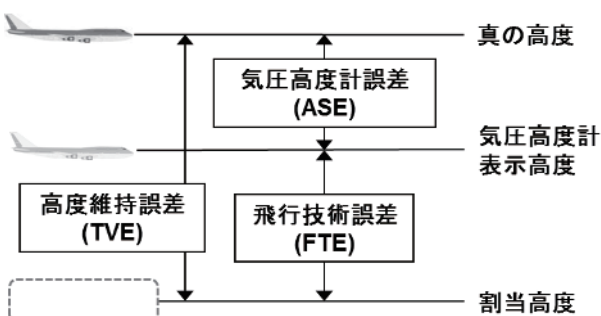


図 1 高度維持性能誤差分類

用いる。これらの処理により、気圧高度計幾何高度が求まる。

GNSS 幾何高度と、気圧高度計幾何高度の差が ASE となる（図 2）。

なお、気圧高度の計測誤差、幾何高度の計測誤差、およびその他の誤差の影響を軽減するため、割当高度が一定となる飛行（レベルフライト）区間のデータの ASE の平均値を ASE 値とする。算出に用いる ADS-B データの収集期間において ASE 値は一定であることが、前提条件となっている。

5 ADS-B 方式 HMS の誤差要因

ADS-B 方式 HMS は、豪州が主体となって開発されており、開発時および運用開始後の高度維持性能監視結果および誤差要因についての評価結果が、ICAO の管制間隔・空域安全パネル（SASP; Separation and Airspace Safety Panel）作

表 1 ADS-B データフォーマット（抜粋）

Extended squitter airborne position	
ビット番号	内容
01:05	Format Type Code
06:07	Surveillance Status
08	Single Antenna Flag
09:20	Altitude
21	Time (T)
22	COR Format (F)
23:39	Encoded Latitude
40:56	Encoded Longitude

Extended squitter airborne velocity	
ビット番号	内容
01:05	Format Type Code
06:08	SubType
09:13	...
14:35	Velocity Information
36:46	Vertical Rate Information
47:48	reserved
49	Sign of Diff. Alt.
50:56	Geometric Height Difference From Baro. Alt.

業部会、地域空域安全監視諮問グループ（RASMAG; Regional Airspace Safety Monitoring Advisory Group）作業部会、地域監視機関調整グループ（RMACG; Regional Monitoring Agencies Coordination Group）会議等で報告されている。

これまでの評価において、

- ・ GNSS 幾何高度基準の誤り
- ・ 気象データ誤差
- ・ 量子化誤差

が主要な誤差要因として指摘されている。

さらに、3 年間のデータを用いた分析により、ASE 算出に問題となる以下の誤差要因および影響を与える事項が報告されている。

- ・ データ数の不足
- ・ ASE 値の変化
- ・ HAG 生成方法
- ・ 幾何高度基準の変更
- ・ 左右のシステムにおける幾何高度基準の相違
- ・ 左右の気圧高度計の気圧高度差（ASE 値差）

報告された誤差要因の内容を以下に示す。

(1) GNSS 幾何高度基準の誤り

ADS-B データに含まれる GNSS 幾何高度は、



図 2 ASE 算出処理説明図

航空機の装置により HAG または HAE のいずれかの値が送信されている。しかしながら、ADS-B データにはどちらの高度基準（ジオイド面または楕円体面）が用いられているかを示す情報は含まれていない。このため、HMS において幾何高度基準を判別する必要がある。判別できない場合、一般的には ASE の算出は不可能である。

判別には、地理的にジオイド高が異なる場所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する手法を用いる（図3）。

判別に必要なジオイド高の地理的な高度差は、気圧高度、幾何高度等の誤差の特性（標準偏差、時間相関等）、およびデータ数に依存する。

（2） 気象データ誤差

前節で記したように、気圧高度を幾何高度に変換するために、実際の気象観測値に基づきモデルにより算出された気象データを用いる。観測点の配置や、気象モデルの特性等により、誤差が生じる可能性がある。このため、季節・時刻・場所、気象データの生成／予報時刻から時間経過による劣化、および気象条件等による誤差の影響を分析する必要がある。

豪州の報告でも、多数の航空機の ASE が同様の偏差を持つ地域があり、気象データにバイアスがあることが原因と推測されている例がある。

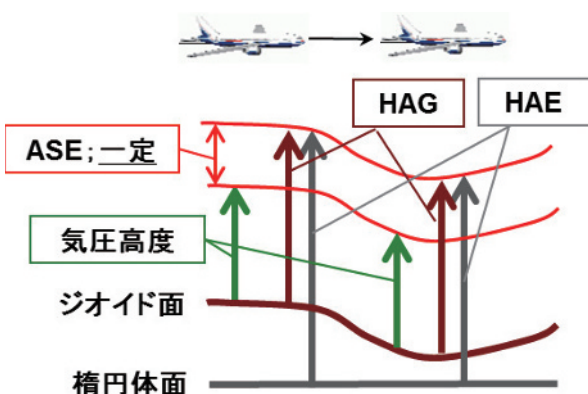


図3 ジオイド高が異なる場所での ASE 算出（幾何高度基準の判別）

（3） 量子化誤差

ADS-B データに含まれる気圧高度および幾何高度と気圧高度の誤差の値は、25[ft]単位の値となっている。量子化誤差は一様に分布していると仮定した場合、十分なデータ数を平均化することにより除去できる。

（4） データ数の不足

一定期間の ASE の平均化処理を行うことにより、ASE 値の算出に用いるデータの誤差の影響を排除することの必要性は、上記の誤差要因に対しても当てはまる。

しかしながら、実際の計測においては、十分なデータ数が得られない場合も生じる。データ数が少ない場合の分析結果の例も報告されているが、推定した ASE 値を RVSM 適合判定に用いるには、統計的な分析が必要である。

（5） ASE 値の変化

ASE 値の算出処理では、ASE 値は一定であることが前提条件としている。

しかしながら、ASE 値が変化している 2 種類の事象が報告されている。1つは、算出に用いる ADS-B データの収集期間（報告例では数か月間）において ASE 値が徐々に変化している事象である。他方は、気圧高度計の保守前後で ASE 値が変化する事象である。

これらの事象に対しては、誤差要因としてではなく、ASE 値の変化として検出すべきである。

また、長期間のデータを用いた分析を行う場合は、ASE 値の変化を考慮する必要がある。

（6） HAG 算出方法

ADS-B データの幾何高度が HAG である場合は、機上の ADS-B 装置にて、GNSS で計測された HAE を ADS-B 装置内のジオイド高データを用いて HAG を算出している。

機上 ADS-B 装置で使用されるジオイド高データの内容（精度、経緯度分解能、等）および処理手法（線形補間等）に応じて、HAG は算出される。

HMS で使用されるジオイド高データおよび処理手法と、機上 ADS-B 装置におけるデータ

および処理手法が異なる場合は、ASE 算出時の誤差要因となる。

（7）幾何高度基準の変更

ADS-B データの幾何高度の基準が、機上 ADS-B 装置の改修前後で変更されている事象が報告されている。

これは、上記の高度基準の判別処理に影響を与える。このため、長期間のデータを用いた分析を行う場合は、幾何高度基準の変更を検出すべきである。

（8）航空機の左右 ADS-B 装置における幾何高度基準の相違（HAG/HAE の混在）

機上の左右の ADS-B 装置において、異なる ADS-B データの幾何高度の基準が使用されている航空機の存在が報告されている。

この場合、上記の高度基準の判別処理に影響を与えるため、この事象は検出すべきである。

（9）航空機の左右の気圧高度計の気圧高度差（ASE 値差）

機上の左右の気圧高度計の計測値に差がある場合、ASE 値も同一の差が生じる。これは、ASE 値の算出処理において ASE 値は一定であ

るという前提条件に反し、誤差要因となる。このため、この事象は検出すべきである。

6 誤差要因の特性

前節で記述した誤差要因の特性（前提条件）、基本的な対処方法、および ASE 値の算出に影響を与える劣化要因を表 2 に示す。

ASE 値は一定とする前提条件であり、平均化処理によって誤差の影響を軽減しているため、誤差要因の平均が 0 ではなくなる原因が劣化要因となる。

また、HMS の高度測定誤差の要件を満足するように、誤差の影響を軽減する必要がある。必要なデータ数を求めるには、誤差要因の統計分布の推定が必要である。

7 まとめ

ADS-B 方式 HMS の高度誤差測定性能の誤差要因の調査を行った。ADS-B データに含まれる GNSS 幾何高度基準（ジオイド面／楕円体面）の判別誤り、および気象データ誤差が、主要な誤差要因となる。

ICAO で規定されている HMS の高度誤差測定精度を満たすためのデータ数を求めるには、実際の誤差要因の統計分布が必要である。統計

表 2 誤差要因の特性

要素	特性（前提条件）	劣化要因
ASE	一定	データ数の不足 漸次変化 保守による変化 機上気圧高度計の ASE 差
気象高度計の計測誤差	ランダム	時間相関
GNSS 受信機の計測誤差	ランダム	時間相関 HAG 算出手法
幾何高度基準の誤り	ジオイド高が地理的に変動	ジオイド高の高低差（飛行経路） 改修による変更 HAG/HAE の混在
気象データ誤差	ランダム	季節・時刻・場所による変動 生成／予報時刻からの時間経過 気象状況
量子化誤差	一様分布	

分布を求めるためには、実データを用いた解析が有効である。

さらに、想定している統計分布以外の ASE 値の算出に影響を与える事項が存在している。これらの事項に対しては、検出処理等の対処が別途必要である。

日本における ADS-B 方式 HMS の導入に向けた検討としては、特に幾何高度基準および気象データに関しては地域性があるため、実データを収集した誤差評価を行うべきである。また、ASE の算出に影響を与える事項に対する対応策を導出し、HMS の測定性能の評価を実施する必要がある。

参考文献

- [1] ICAO Annex 6 “Operation of Aircraft”, Ninth Edition, July 2010.
- [2] http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/12/120930_.html（参照, 2015 年 4 月）
- [3] ICAO Annex 11 “Air Traffic Services”, Thirteenth Edition, July 2001.
- [4] ICAO Doc 9574 AN/934 “Manual on Implementation of a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive”, Second Edition, 2002.
- [5] ICAO Doc 9937 AN/477 “Operating Procedures and Practices for Regional Monitoring Agencies in Relation to the Use of a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive”, First Edition, 2010.
- [6] ICAO Doc 9871, “Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter”, Second edition, 2012.
- [7] ICAO Doc 7488, “Manual of the ICAO Standard Atmosphere”, Third edition, 1993.