

15. 飛行検査データを活用したDMEの誤差解析

航法システム領域 ※毛塚 敦, 齊藤 真二, 麻生 貴広, 福島 荘之介

1. はじめに

航空航法ではGNSSが用いられており、RNP-AR等GNSSの装備が必須となるRNAV航路が増大している。また、その認証を持つ機体も増加し、使用実績も増えている。一方で、GNSS信号は高度約2万kmの衛星から到来するため、脆弱性を持っており、これまで様々な障害事例が報告されてきた[1]。そこで、GNSS障害が起こった場合でも航空機の安全と航空交通容量を維持できるよう、GNSSのバックアップシステム(APNT: Alternate Position Navigation and Timing)を構築する必要がある。

APNTはICAO NSP(航法システムパネル)での検討課題となっており、将来的に各国で整備されていくものと見込まれる。現在、Loran-Cの性能・機能を改良したeLoran(enhanced Loran)が英国[2]・韓国[3]・米国[4]で検証されている。DME/N(Distance Measuring Equipment /Normal)は、機上DME装置から地上DME局への質問・応答時間から測距を行う装置であり、2局との測距で測位を行うDME/DME測位が現在使用されているが、このDME/Nを改良したeDME(enhanced DME)による測位をAPNTとすることがFAAを中心に提案・検証されている[5]。

現在、我が国でもGNSSの装備が必須となるRNAV航路が数多く存在する。1マイルの航法精度が必要なRNAV1については、GNSS以外にもDME/DMEの使用が認められているが、0.3マイルの精度が必要なRNP-ARではGNSSの装備が必須となっている。GNSSの使用にあたっては、疑義が生じた場合にGNSSに依存しない航法(従来航法)に移行できる場合に限り認められている。すなわち、現状のGNSSのバックアップにはDME/DME等が用いられることになる。DMEは長い年月の運用により、開発当初の仕様と比べて高精度化されていることが知られている。そこで、日本国内の将来的なAPNT構築に向けて、まずは現状の

バックアップであるDME/Nの精度について明らかにし、RNAVに要求される精度に対してどの程度満足していないかを定量的に把握する。また、現状のDME/Nの誤差要因とその量を明らかにすることで、APNTの候補の一つであるeDMEの将来的な開発に向けた開発要件を明らかにする。本報告では、国土交通省が実施している飛行検査データを活用し、現状のDMEの性能把握のための一検討を行ったので報告する。

2. DMEによるAPNTの動向

2.1 NextGEN DME

米国FAAでは、2015年までに進められていたAPNTの計画[6]を修正し、GNSSが使用不可能になった際に測位を補完するものとして、PBS NAS Navigation Strategy 2016[7]にて新たな計画を発表している。この計画における”NextGen DME”では、GNSSサービスが中断した際、IRUを使用せずにPBN運航をサポートするためのレジリエントな補完システムを構築するため、エンルート・ターミナル空域においてDMEの覆域を拡張することである。Near term(2016~2020)ではクラスAの空域をDME/DMEでカバーする。また、Mid-term(2021~2025)終了までに、サイト固有の評価に基づき、NSG(Navigation Service Group)1, 2の空港[7]へDME/DMEのカバレッジを拡大することを計画している。

2.2 enhanced DME

PBS NAS Navigation Strategy 2016では、Far term(2026~2030)においてAPNTの研究を継続する計画となっている。将来的なAPNT方式の候補の一つであるeDMEでは、以下に示すような様々な要素技術の適用が提案されている。

- ① ビート信号の放送:DME/Nでのトランスポンダの応答やスキッタに時刻同期・または非同期のビート信号を加えて放送する。非同期の場合には2 way ranging(質問と応答)

によりトランスポンダの時刻オフセット量を得ることができる。

- ② 搬送波位相を利用：インテロゲータ受信機で受信された搬送波位相を利用し、測距精度を改善する。
- ③ データ放送の利用：例えば、2番目のパルス（又は全パルス）にパルス変調を加えることで、補正情報等を地上DME局から航空機に送信することができる。なお、データ転送にはビート信号も活用できる。

高性能な要求ほどシステムは複雑化する。GNSS障害時の時刻同期の課題を考える必要があるが、DMEの局が時刻同期することでeDMEの高精度化が期待できる。本研究にて国内に設置されたDME/Nの誤差量を把握することで、将来的なeDMEの開発における要件を明らかにすることが可能となる。

3. DME 測距誤差の評価方法

3.1 RNAV 航法に要求される精度

RNAV運航に対応するためにDMEに要求される測距精度は式(1)により与えられる。

$$TSE = \sqrt{FTE^2 + (Ranging\ error \times HDOP)^2} \quad (1)$$

TSEはトータルのシステム誤差、FTEは飛行技術誤差であり、RNP-ARではTSE=0.3、FTE= 0.25となる。HDOPは幾何的配置を指数化したものであり、DME/DME測位では最悪値で2.8となる。これらより、DMEをRNP-ARに適用する場合の要求測距精度は108m(0.058NM)となる。

3.2 飛行検査データの活用

DME/Nの現状性能把握においては、国土交通省航空局が実施する飛行検査データを活用した。飛行検査業務では、全国各地に配置されている航空保安施設や空港及び航空路などに設定されている飛行方式等の検査を行っている。DMEも検査対象施設であり、平成27年度までは年2回、平成28年度以降は年1回の検査を行っている。

セスナCJ4、ボンバルディアDHC-8-300およびBD-700、SAAB2000、ガルフストリーム-IVの5機種で取得した検査データを活用することが可能であるが、データの再現性を確認することを考

慮すると、同一経路・同一高度を飛行した複数の検査データを入手することが望ましい。CJ-4は平成27年10月に就航し、検査データの蓄積がないため、複数データの取得が現時点では困難である。また、飛行高度については、気圧高度データのみ取得している機体は、真高度からの差が変動するため、同一高度でのデータ比較が困難である。そこで、MSAS補正されたGPS高度データが利用可能なDHC-8-300(図1)での検査データを活用することとした。本機体にはノルウェーのNSM社製の飛行検査システムが搭載されている。



図1 飛行検査機(Bombardier DHC-8-300)
(出典:国土交通省ホームページ[8]より抜粋)

3.3 デジタルフィルタの適用

DMEの誤差要因は、機上装置に関わる部分、地上局に関わる部分、マルチパス/対流圏遅延など伝搬に関わる部分に切り分けられ、マルチパスによる誤差が最も大きいことが知られている。これら各成分を抽出するためには、検査データに対してデジタルフィルタを使用することが有効である[9]。マルチパス成分はDMEからの距離に対して変動する場が多いため、ハイパスフィルタとして動作するCMNフィルタを用いる。また、バイアス成分を抽出する場合には、ローパスフィルタが有効であり、PFEフィルタが用いられている。CMNフィルタの伝達関数は式(2)で与えられる。

$$H(z) = \frac{\alpha(1 - z^{-1})}{\alpha + \omega_c + z^{-1}(\omega_c - \alpha)} \quad (2)$$

ω_c : CMN カットオフ周波数

α : エイリアジング係数

4. 解析結果

4.1 神戸局検査データ

検査データの一例として、神戸局(KCE)のラジアル 271 検査時の飛行高度(MSL)を図 2(a)に示し、DME の測距誤差を図 2(b)に示す。測距誤差

は、真位置と DME 局位置から求まる真の距離との差から求まる。図 2(a) (b) は 2012 年と 2014 年の 4 月に検査したデータであり、図 2(a) より 2 回の検査において、高度差約 50feet 程度で飛行していることが分かる。そして、図 2(b) より測距誤差は 0.07NM 程度であり、DME の測距精度の仕様 (0.2NM) よりも高精度で、RNAV 航法 (RNP-AR) で要求される精度に近いことが分かる。神戸 DME は神戸空港の滑走路脇に設置されているが、神戸空港が人工島であるため、海面を除いて周囲に建物や地形などのマルチパス環境がない。このような環境においては、RNPO.3 の航法性能要件を満足しないものの、それに近い精度を有していることが分かる。

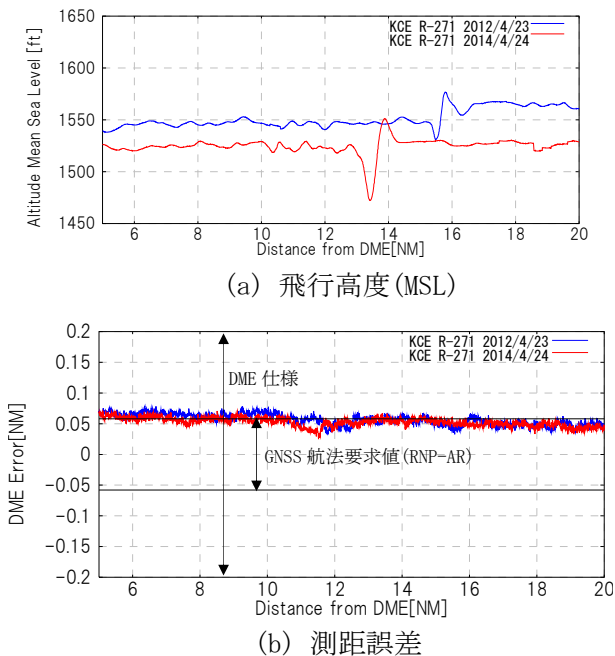


図 2 神戸局検査データ

4.2 隠岐局検査データ

隠岐局 (OIE) のラジアル 204 検査時の飛行高度 (MSL) を図 3(a) に示し、測距誤差の変動分を図 3(b) に示す。これらは 2011 年の 4 月と 12 月に検査したデータであり、図 3(a) より高度差は約 50feet 程度であることが分かる。隠岐 DME のラジアル 204 の検査データについては、今回の検討対象であるマルチパス誤差のみに着目し、変動成分の評価を行った。図 3(b) は測距誤差のうち、CMN フィルタによってバイアス分を除去し、変動分のみ抽出したものを示している。これより、4 月・12 月の双方の検査データにお

いて、10NM 以内に 2 つの大きな誤差のピークが生じていることが分かる。DME の仕様である 0.2NM は満足しているため、従来航法への適用は問題ないが、GNSS 航法で要求される精度からは大きく外れていることが分かる。また、図 3(b) より、4 月・12 月双方の誤差変動の傾向がよく一致していることから、現状の DME/N の精度評価に飛行検査データの活用が有効であることが分かった。

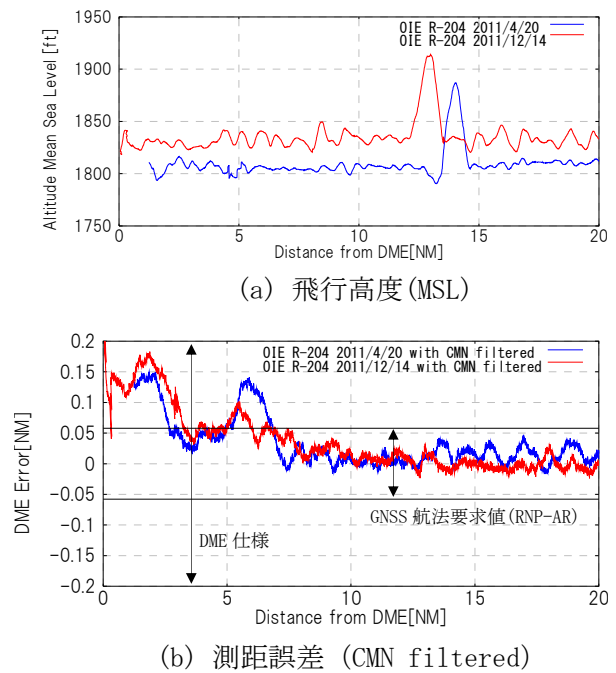
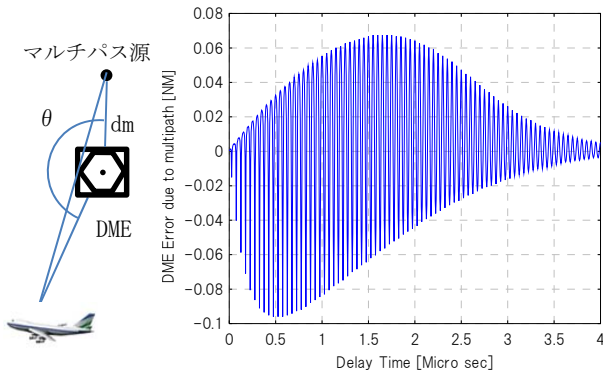


図 3 隠岐局検査データ

4.3 マルチパス誤差解析

隠岐局の誤差データの変動分はマルチパスであると考えられるため、図 4(a) の解析モデルを用いてマルチパス誤差の解析を行った。マルチパス源を仮定し、その位置を変化させ、シミュレーションによる測距誤差が検査データと一致する場所をマルチパス発生源とした。なお、DME はパルスの半値となる時刻により到来時間を検出するため、シミュレーションにおいては、マルチパスによる到来時間の変化から測距誤差を算出している。まず、マルチパス遅延時間に対する DME の測距誤差を図 4(b) に示す。これより、遅延時間が $1\mu s \sim 3\mu s$ の場合に測距誤差が大きくなる傾向があり、電気長では 300m ~ 900m となる。よって、この範囲内でのマルチパス源探索を行った。



(a) 解析モデル (b) 遅延時間に対する DME 誤差
図 4 マルチパス誤差シミュレーション

図 5 に $dm=300m$, $\theta=171^\circ$ とした場合の測距誤差のシミュレーション結果を示す。これより、検査データと傾向が一致していることから、図 3(b)において 10NM 以内で観測された変動はマルチパスが原因であることが確認された。

また、マルチパス源の位置を図 6 に示す。同図の等高線が示すように、隠岐空港周辺の地形は極めて複雑である。シミュレーションにより得られたマルチパス発生源の位置を見ると、新滑走路と旧滑走路との間である。図 7 に示すように、この位置には 10m を超える大きな段差が存在しているため、これがマルチパスの発生源となっているものと考えられる。

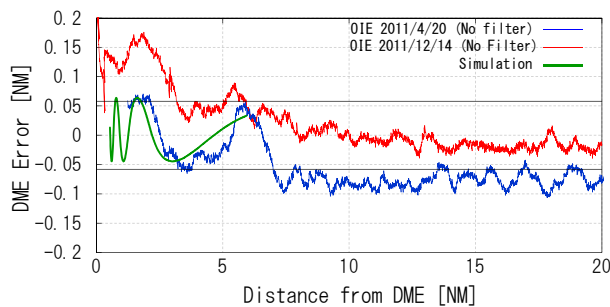


図 5 マルチパスシミュレーション結果

5. まとめ

GNSS障害時の現状のバックアップとなるDMEのRNAVへの適応性能評価及びeDME開発要件を明らかにすることを目的として、現状のDME/Nの性能を調査した。国土交通省が行っている飛行検査のデータを活用し、幾つかのDME局について解析した結果、マルチパス環境でない場合には測距誤差は0.07NM程度であり、RNP0.3の航法性能要件には満たないものの、高性能であることが分かった。しかし、マルチパス環境において誤差は大きく、将

来的なeDME開発においては特にマルチパス対策技術の開発が重要であることが明らかになった。

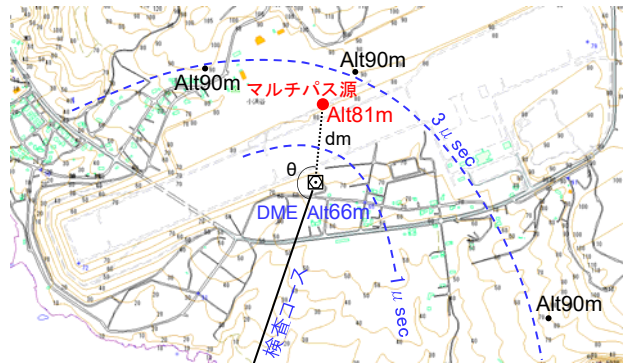


図 6 周辺地形



図 7 新旧滑走路間のマルチパス源(段差)

参考文献

- [1] 毛塚 他, 平成26年度電子研発表会資料
- [2] <http://www.insidegnss.com/node/4539>
- [3] Jiwon Seo, et al., Resilient PNT Forum II, Dana point CA, Jan. 2015
- [4] <http://www.insidegnss.com/node/4539>
- [5] K.Li, et al., Journal of the Institute of Navigation, vol.60, no.3, pp.209-220, 2013
- [6] Dean Bunce, 54th Meeting of the CGSIC, pp.14-17, Sep.2014.
- [7] http://www.faa.gov/nextgen/media/pbn_nas_n_av.pdf
- [8] http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000351.html
- [9] Sherman Lo, et al., Proceedings of ION 2013, pp. 711-721, 2013

謝辞

本研究を進めるにあたり、データをご提供頂きました国土交通省航空局 交通管制部運用課 飛行検査センターの関係各位に深く感謝致します。