

2 1. GNSS 障害時の代替システムの動向

航法システム領域 ※毛塚 敦, 吉原貴之, 齋藤 享

1. はじめに

GNSSは、携帯電話、ネットワーク、交通、金融システム、農業など様々なシステムで活用され、社会のGNSSへの依存度が高まっている。しかし、GNSS信号は高度約2万kmから到来するため、微弱であり、干渉を受けやすいという脆弱性がある。このため、各システムがGNSSに集中して依存することに懸念が抱かれている[1][2]。航空機の航法においてもGNSSの利用が広がりつつあり、PBN(性能準拠型航法)に向け、高精度な規格であるRNP0.3では、主にGNSSが使用される。さらには、GNSSを利用したRNP AR進入の導入が開始されている。その一方で、図1に示すように、様々な要因がGNSSに障害を与え、測位精度の大幅な劣化や測位不能状態に陥る場合がある。人工要因としては、意図的な妨害電波を発するGPSジャマー（妨害器）は、例えばトラックやタクシー運転手が雇用会社による追跡を妨害するために使用され、空港付近のGNSSに障害を与えている。2009年ニューアーク空港において、ニュージャージーターンパイクを走行中の車両が使用していたGPSジャマーにより、GBASがサービス不能となった[3]。また、車や屋内などGNSS信号が届かない場所で用いられるリピータ（再放射器）も障害要因となる。軍による演習によってもGNSS障害が発生し、2007年1月にカリフォルニア州サンディエゴにて行われた演習により、GPSを使用した各種システムに障害が発生した[4]。さらに、衛星自体のシステム障害やメンテナンスもあり、2004年1月にはPRN23の異常[5]や2014年4月にはGLONASSのサービス不能[6]が報告されている。これら人工要因だけでなく、自然要因によっても障害が発生する。太陽フレアに伴って発生する強い電波放射（電波バースト）や、太陽フレアから放射されるX線・紫外線による電離圏の擾乱、プラズマバブルによる電子密度の空間的な非一様性によりシンチレーションが発生し、衛星追尾のロックが外れ、GNSS障害を引き起こす。

これらの要因が発生し、GNSSの精度が大幅に劣化した場合でも航空機を安全かつ効率的に運航させる必要があるため、GNSSに依存しないバックアップシステムを構築する必要がある。各国で検討が開始されているため、本稿ではその概要を説明する。

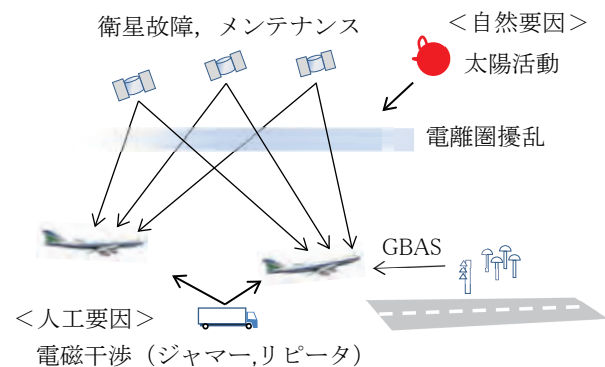


図1 GNSS障害要因

2. 各国の状況

GNSS障害時の代替をAPNT (Alternate Position Navigation Timing) と称し、各国でその必要性が認識されており、ICAOでもAPNTの必要性が唱えられている。NSP (Navigation System Panel : 航法システムパネル) では、上位委員会であるANC (Air Navigation Commission : 航空委員会) より依頼された検討課題（ジョブカード）の一つにAPNTが割り当てられている。

米国では、重要なインフラサービスの保護に関する国家の方針が制定され、2003年のHSPD-7 (Homeland Security Presidential Directive-7: 大統領指令第7号) によりAPNTの検討が開始された。FAA (米国連邦航空局) では、2025年までに交通量を倍増するために、GPSによりPBN, ADS-B, TBO, RNAV, RNP, CSPOを可能にすることを目標としているが、妨害や機能停止に際しても、航空の運航を維持し、経済的影響を最小にする検討も行っている。2012年にはFAAによりAPNT白書が公開され、代替システムのコンセプトが示されている[7]。FAAでは、マイルストーンを以下

のように設定し、進めている[8].

- Concept Requirements Definition in Fiscal Year (FY) 2011
- Initial Investment Analysis Approval by FY 2014
- Final Investment Analysis Approval by FY 2016
- Solution Implementation Starting in FY 2017
- Subsequent In-Service Management

FAAで検討されているAPNTの要求精度を表1に示す。APNTは、航法だけでなく、監視システムについても重要な課題となっている。表1での監視精度92.6 mはADS-Bへの要求に応じたものであり、3 NMのセパレーションを得るために厳しい要求となっている。92.6 mの監視精度には、WAMの性能要件である128 mを用いることも検討中である[9].

FAA以外では、欧州のDLR（ドイツ航空宇宙センター）や韓国において研究開発が進められている[10][11].

表1 FAAにおけるAPNTの性能要件

	Navigation		Surveillance		
	Accuracy (95%)	Containment (10 ⁷)	Separation	NAC _p (95%)	NIC (10 ⁷)
En Route	4 NM	8 NM	5 NM	92.6 m	0.2 NM
	2 NM	4 NM			
Terminal	1 NM	2 NM	3 NM	92.6 m	0.2 NM
LNAV	0.3 NM	0.6 NM			

NAC_p: Navigation Accuracy Category for Position
 NIC : Navigation Integrity Category

3. 航法用途のAPNTとして検討されている方式

3.1 DMEによるAPNT

FAAでは、GNSSの普及により今後縮退されるDME (Distance Measuring Equipment: 測距装置)の精度を改善し、DME/DME測位をAPNTとしてサービスすることを検討している。測距の原理は図2(a)に示すように、機上のインテロゲータ（質問機）から送信された質問信号に対し、トランスポンダ（応答機）が50 μ sec後に応答信号を送信し、質問信号送信から応答信号受信までの時間差から距離を算出する。そして、図4(b)に示すように、2局以上のDMEを用いることで、距離情報から航空機の位置が決定される。DMEが既に搭載されているエアライン機にとっては、代替システムとしてDMEが活用されることは有利と

なるが、DMEが装備されていない小型機などのGA (General Aviation: 一般航空) にとっては不利となる。我が国では、エアライン機が中心であり、かつ、地上DME局が既に多数設置されていることから、DMEの再利用は適していると考えられる。

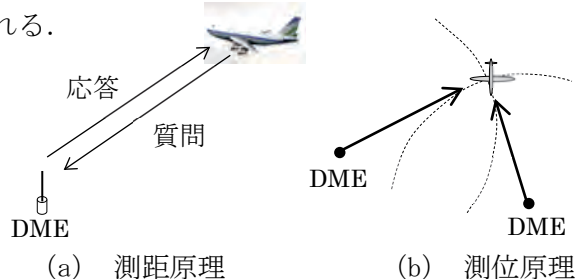


図2 DMEによる測距原理

3.2 WAMによるAPNT

FAAでは、監視情報を航空機に伝達することで、APNTを構築する方法が検討されている[12]. その方法の概略を図3に示す。WAM (広域マルチラレーション) による監視で得られた航空機の位置情報を、TIS-B (Traffic Information Service Broadcast: 放送型交通情報サービス)の放送設備が設置されたGBT (Ground Based Transceiver: 地上送信設備)を用いて航空機に送信することで、航空機は自機位置を知ることができる。TIS-Bの航法への利用は、GAの比率が大きい米国には導入しやすいが、日本国内はGAの比率が小さいため、監視情報を航空機へ伝達する他の手段を検討する必要があると考えられる。

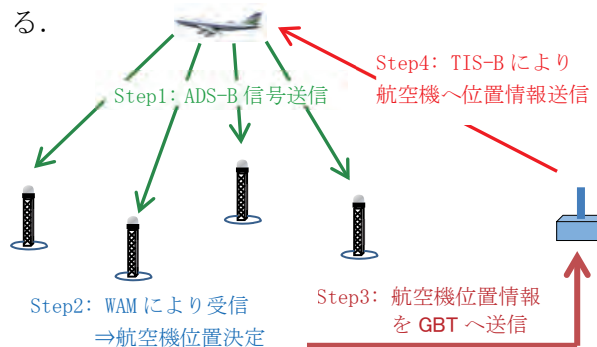


図3 WAMによるAPNT

3.3 PsuedoliteによるAPNT

FAAが検討している代替システムは他にもあり、その一つがPsuedolite (疑似衛星) である[13]. 地上に設置される疑似的な (Pseudo) 衛星を用いて測位を行う。航空機の位置を算出するためには、最低3サイトの疑似衛星が必要となる。航空機数に制限なくAPNTのサービスを行うことが

可能となるメリットがあるが、新たな機上装備が必要となることから、標準化や認証を考えるとサービス開始まで時間がかかり、さらにコスト面においてもデメリットがある。

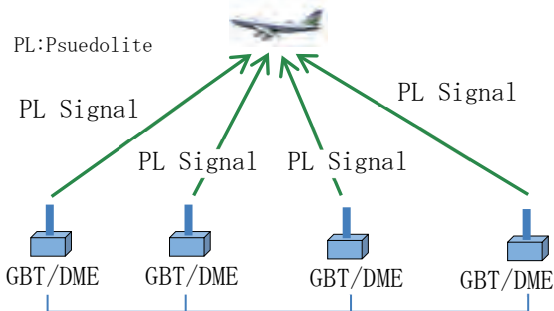


図4 PseudoliteによるAPNT

3.4 LDACS-NAVによるAPNT

FAA以外が提案する方式としては、LDACS-NAVがある[10]。LDACSとは、ドイツのDLR（ドイツ宇宙航空センター）を中心に研究されている1GHz帯の航空用のデジタル通信システムであり、陸域のエンルートでの使用が想定されている。LDACSを航法に使用するLDACS-NAVにより航空機が自機位置を算出するためには、ルビジウム原子時計等を使ってTOA（信号到達時間）から測距を行う。LDACS-NAVは、2章で示しているFAAの時間軸には対応できないものの[13]、APNTの候補の一つとされている。

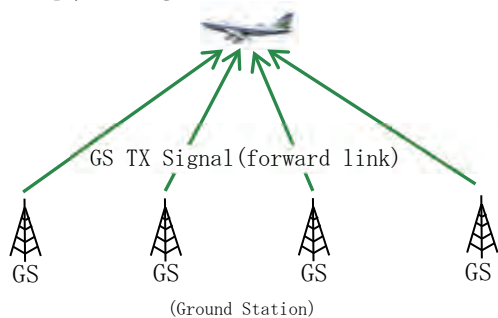


図5 LDACS-NAVによるAPNT

4. DMEによるAPNTの精度に関するシミュレーション調査

DME/DMEによる測位は既に運航で使用されているが、ICAOのPBNマニュアルによると、DME/DMEベースの方法にはRNP0.3の性能を備える能力がないとされている。RNP0.3で使用されるGNSSの代替システムにDME/DMEを再利用するためには、現状のままでは適用できず、精度の改善が必要である。FAAの性能要件では92.6 mの測位精度が

要求されているが、航空機と2局のDME間の角度が大きい(120°)又は小さい(60°)場合には、DOPが悪くなることから、33.3 mの測距精度が要求される。現行のDMEの精度は、0.07 NM (129.6 m)程度であることが推測されているが、その内訳は、インテロゲータが0.05 NM (92.6 m)、トランスポンダが0.02 NM (37.0 m)、伝搬によるものが0.04NM (74.1 m)と見積られている[14]。FAAを中心とした各機関で精度の改善が検討されており、インテロゲータの改善や、飛行実験による性能把握が行われている。しかし、伝搬に関する検討は未だ着手されていない。そこで、我々は伝搬に着目し、システムトータルの測距誤差33.3 mを目指すにあたり、伝搬遅延により発生する測距誤差量をシミュレーションにより調査した。対流圏の伝搬遅延による測距誤差は、気温・気圧・湿度などを仮定した「補正モデル」を用いることである程度の補正が可能であるが、気象現象や地形による測距誤差の変動分までを補正モデルに与えることはできない。すなわち、測距誤差の変動分が除去しきれない測距誤差量となる。そこで、気象現象による測距誤差の変動量を電波伝搬解析で用いられるレイトレーシング法により定量的に算出した。気象現象として、まずは図6に示すように、寒気・暖気での測距誤差の変動量を調査した。前線前後の対流圏の屈折率(誘電率)をラジオゾンデによる観測データを用いて算出したものを図7に示す。寒気よりも暖気の方が屈折率が大きくなっているが、これは暖気の方が高温・高湿であるためである。レイトレーシング解析による光線の様子を図8に示す。光線が屈曲しながら進んでいるが、高度が高くなるに従い、屈折率が徐々に変化するためである。レイトレーシングにより算出した伝搬遅延による測距誤差を図9に示す。これより、DMEの最大レンジである370 km (200 NM) で使用した場合、伝搬遅延による測距誤差は150 mを超え、補正できない誤差変動量は25.8 mに及ぶことが分かった。25.8 mは、システムトータルの許容誤差33.3 mと比べると大きな値であることから、DMEによりAPNT構築にあたっては、気象現象による測距誤差変動を詳細に検討する必要があると考えられる。

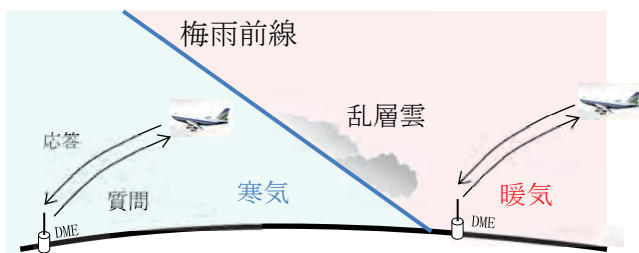


図6 寒気と暖气における測距誤差の解析モデル

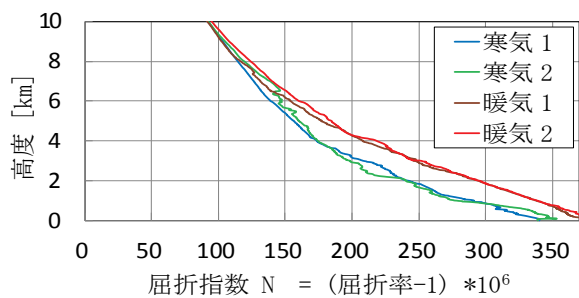


図7 寒気および暖气における屈折率

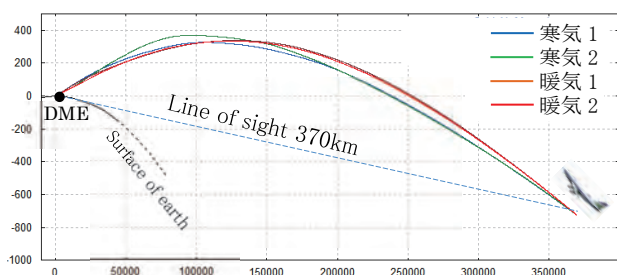


図8 レイトレーシングによる光線群

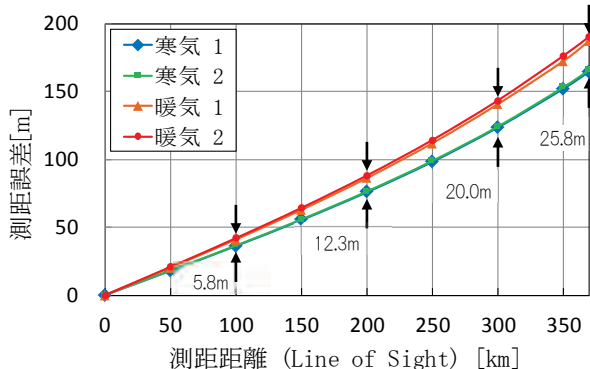


図9 寒気・暖气の違いによる測距誤差の変動量

5. まとめ

本稿では、GNSS障害時の代替システム構築に関する諸外国での状況および提案されている方式を紹介し、国内に適用する際のメリット・デメリットに関して考察した。さらに、DMEによるAPNTを構築する際の伝搬遅延による誤差量を定量的に見積もった。今後は、国内における航法・監視の状況から国内におけるAPNTの性能要件を

抽出し、それらを実現するために、各国が提案する方式の適用性の精査し、さらには新規のAPNTコンセプトを提案する予定である。

謝辞 ラジオゾンデデータは京都大学生存圏研究所にご提供頂きました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] ”GPSはじめ他国の測位衛星が使用不可能になるケースに関する考え方”，内閣官房宇宙開発戦略本部，2010年12月27日
- [2] Global Navigation Space Systems: reliance and vulnerabilities, The Royal Academy of Engineering, London, 2011
- [3] Sam Pullen and Grace Gao, Inside GNSS Vol.7 No.2, pp.34-43, MARCH/APRIL2012
- [4] Logan Scott, Inside GNSS Vol.7 No.5, pp.42-63, September/October2012.
- [5] Thomas Nagle, et al. Inside GNSS Vol.5 No.1, pp.38-44, January/February2010.
- [6] Glen Gibbons, Inside GNSS News, April 2, 2014
- [7] Concept of Operation for NextGen Alternative Positioning, Navigation, and Timing (APNT),0020APNT White Paper, March 1, 2012
- [8] http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/library/factsheets/media/APNT_draft8.pdf
- [9] Robert W. Lilley, et al. ”DME/DME for Alternative Position, Navigation, and Timing (APNT)”, APNT White Paper, Mar. 1, 2012
- [10] N. Schneckenburger, et al., ICNS 2012, Herndon, VA , April 2012
- [11] O-Jong Kim, ION ITM, Newport Beach, 2012
- [12] F. A. Niles, et al. ”Wide Area Multilateration for Alternate Position, Navigation, and Timing (APNT)”, APNT White Paper, Aug. 2012
- [13] S. Lo, ”Pseudolite Alternatives for Alternate Positioning, Navigation, and Timing (APNT)”, APNT White Paper, Aug. 2012
- [14] W. Pelgrum, et al, ”DME Enhancements in Support of NextGen Performance Based Navigation and Surveillance,”FAA APNT Documents, Industry Presentations, May 2012