

2.1 MSAS の状況と利用への期待

坂井 丈泰 (電子航法研究所)

sakai@enri.go.jp

2.1.1 はじめに

航空機の航法には地上に設置されている航行援助施設が一般に用いられているが、最近では衛星航法システムの導入が世界的に進められている。衛星航法システムのひとつである米国の GPS (global positioning system : 全地球測位システム) は周知のとおり社会基盤として広く利用されており、航空路上の航空機の航法に利用するのであれば十分な測位精度が得られる。ただし、信頼性の観点からは GPS を航空機の航法に直接に利用することができず、適切な補強システムが必要とされる^{1/ ~ 2/}。

このため、国際民間航空機関(ICAO : international civil aviation organization) は、GPS 補強システムの一つとして、静止衛星を介して補強情報を伝送する SBAS (satellite-based augmentation system : 静止衛星型衛星航法補強システム) の国際標準規格を定めた^{3/ ~ 4/}。我が国では国土交通省航空局が SBAS を整備し、MSAS (MTSAT satellite-based augmentation system : 運輸多目的衛星用航法補強システム) として 2007 年 9 月に供用を開始した^{5/ ~ 6/}。同様のシステムを米国も WAAS (wide area augmentation system) として整備しており、2003 年 7 月より航空用航行援助施設の一つとして運用している。欧州では EGNOS (European geostationary overlay service) と呼ばれるシステムが 2010 年 8 月より評価運用を開始したところである。

SBAS はいずれも航空用航法システムとして整備されているが、SBAS が放送する信号の様子は公開されていることから、航空以外のユーザも特に制約なく利用できる。すでにユーザ受信機の多くは SBAS 対応となっており、SBAS 信号が放送されている環境下ではこれを自動的に捕捉・利用するのが普通である。

以下、我が国が運用中の MSAS について、概要及び現在の状況を述べる。

2.1.2 MSAS の概要

国土交通省航空局が整備した MSAS は SBAS

規格による GPS 補強システムであり、静止衛星から補強信号を放送する。周波数は GPS L1 信号と同じ 1575.42MHz で、GPS と同様の変調方式による測距信号が放送されている。

冗長性を確保するため、MSAS は 2 機の静止衛星を用いて構成することとされた。我が国の静止衛星としてはすでに静止気象衛星 (ひまわり) があったことから、MSAS の機能をこれに追加することとして、MTSAT (multi-functional transport satellite : 運輸多目的衛星) が計画された。すなわち気象ミッションおよび航空ミッションという複数の目的に供される衛星であり、航空ミッションとしては MSAS 機能のほか航空衛星通信等の機能も有する。

運輸多目的衛星新 1 号 (MTSAT-1R) は、1999 年に打ち上げに失敗した初号機 MTSAT-1 の代替として製造された衛星である。衛星重量は 3.3 トンで、米国スペースシステムズ・ロラール社が製造した。太陽電池パネルの反対側にバランスを取るためのソーラーセイルが伸びている特徴的な形状は、気象観測機器の放熱処理の都合による。2005 年 2 月 26 日に H-IIA 7 号機により打ち上げられ、翌月には予定の静止軌道に投入された。愛称は「ひまわり 6 号」である。気象ミッションについてはすでに静止気象衛星 5 号機 (ひまわり 5 号) の運用を終えていたことから、軌道上試験ののち 6 月には運用が開始された。その後、7 月より MSAS 信号の試験放送を開始し、調整・試験が継続されている。引き続き、2006 年 2 月 18 日に運輸多目的衛星 2 号 (MTSAT-2) が H-IIA 9 号機により打ち上げられ、「ひまわり 7 号」と命名された。

MSAS の地上施設については、神戸・常陸太田の 2 局の MCS (master control station : 航法統制局) が整備されているほか、補強情報の生成に必要な GMS (ground monitor station : 監視局) が札幌・東京・福岡・那覇に設置されている。さらに MRS (monitor and ranging station : 標定局) がハワイ・オーストラリアに配置されており、MTSAT 衛星の軌道標定の精度を向上させている。GMS および MRS の測定データは MCS

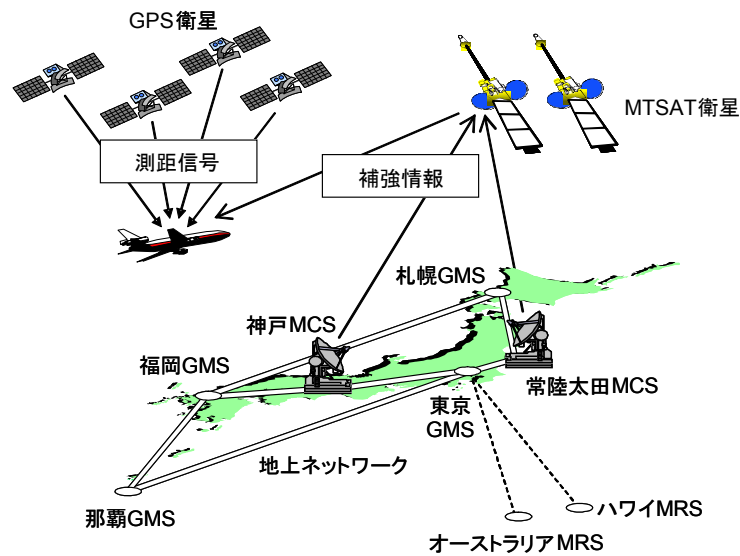


図1 MSASの全体構成

に集約され、補強情報の生成や補強信号放送状況のチェックに使用される。MSASの全体構成を図1に示す。

MSASは、SBAS規格に基づいて次の三種類の情報あるいは機能を提供する。

- (i) インテグリティ情報
- (ii) ディファレンシャル補正情報
- (iii) 測距機能

このうちもっとも重要視されるのは(i)であり、GPSだけでは欠けている航法システムとしての信頼性を補う情報である。(ii)は測位精度の改善のための情報であり、衛星位置誤差や電離層伝搬遅延といった誤差要因を補正するものである。(iii)はSBAS信号自体がGPSと同様の信号形式であることから距離を測定する機能を持つもので、我が国においては南方向の仰角30~50度付近にGPS衛星が一つ追加されるのと等価な働きをすることとなる。

MSASは航空機向けの航行援助施設であることから安全性について厳しい要件が課されており、また我が国で最初の航空用衛星航法システムとして、従前の航行援助施設では例がない体制で安全性審査が行われた。2007年3月までにこの審査を完了し、所要の法令改正を経て、2007年9月27日に航空用航行援助施設としての運用が開始された。

運用開始後は安定した動作が継続されており、

PRN129及びPRN137の両MSAS信号がともに途絶えた例は現在のところない。最近ではGMSについて機器の更新を進めており、十分な要員及び保守体制をもって運用されている。

なお、MSAS独自の機能であるが、いずれか片方の衛星が使用できない場合にはもう一方の衛星のみから両方のPRNコードの信号を放送することが可能である(デュアルPRN運用)。

2.1.3 MSASの信号

MSASが放送する信号の周波数及びRF特性はSBAS規格のとおりで、GPS L1周波数(1575.42MHz)にてGPSと同じC/Aコード(1.023Mcps)によるスペクトラム拡散信号として放送される^{3/}。C/AコードはGPSと同一のシフトレジスタで生成できるゴールドコードで、SBASのPRN番号としては表1のとおり120~138が定義されている。MTSAT-1RはPRN129、MTSAT-2にはPRN137が割り当てられている。

変調方式もGPSと同じBPSK(binary phase shift keying: 二値位相変調)であって、GPSと同様に擬似距離および搬送波位相による測距が可能である。補強情報は250bpsのデータ速度で重畳されているが、符号化率1/2の誤り訂正符号(forward error correction: FEC)が用いられていることから変調速度は500sps(symbols per second)である。

表 1 PRN 番号の割当て

PRN	衛星	位置	システム	PRN	衛星	位置	システム
120	Inmarsat AOR-E	16W	EGNOS	130	Inmarsat 4 F1	63E	
121	Inmarsat 4 F2	53W		131	Inmarsat IOR	64E	EGNOS
122	Inmarsat AOR-W	54W	WAAS	132	予約		
123	予約			133	Inmarsat 4 F3		
124	ESA Artemis	22E	EGNOS	134	Inmarsat POR	178E	WAAS
125	予約			135	PanAmSat Galaxy	133W	WAAS
126	Inmarsat IND-W	25E	EGNOS	136	Inmarsat	8E	
127	INSAT	未定	GAGAN	137	MTSAT-2	145E	MSAS
128	INSAT	未定	GAGAN	138	Telesat Anik	107W	WAAS
129	MTSAT-1	140E	MSAS				

以上の信号形式であることから、MSAS (SBAS) 信号を受信するために必要な GPS 受信機の改修は最小限ですむ。すなわち、GPS と MSAS (SBAS) は同一のアンテナおよび高周波回路を共用できる。現在の GPS 受信機は PRN コードをソフトウェアで発生するのが普通であるから、特にハードウェアの変更をすることなく MSAS (SBAS) 信号を受信することが可能である。

MSAS 信号のメッセージは 250 ビットから構成されており、GPS のフレームエポックに同期して毎秒 1 メッセージが放送される。各メッセージには 8 ビットのプリアンブルおよび 6 ビットのメッセージタイプ ID、さらに 24 ビットの CRC パリティ符号が付されており、残りの 212 ビットがデータ領域である (図 2)。

SBAS メッセージの一覧を、表 2 に示す。メッセージタイプ 2~7、10、24、26~28 はインテグリティ情報、2~6、24~26 はディファレンシャル補正情報に関連する。各メッセージは少なくとも表中の更新間隔以下の時間間隔で放送されることとされており、インテグリティに関連した安全上重要な情報は更新頻度が高く設定されている。なお、タイプ 2~5 の高速補正メッセージについてはメッセージに含まれる情報により更新時間が異なり、高速補正值 (FC) については 60 秒、インテグリティ情報 (UDREI) は 6 秒と規定されている (インテグリティ情報についてはタイプ 6 で別途放送可能なため、このような規定ができる)。また、タイプ 24 は高速補正情報と長

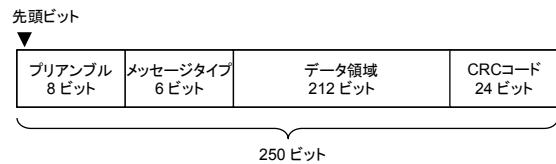


図 2 メッセージのフォーマット

期補正情報の両方を含んでおり、表中の上段は高速補正、下段は長期補正情報の更新間隔である。

2.1.4 ディファレンシャル補正

MSAS のディファレンシャル補正情報は、タイプ 25 の長期補正 (long-term correction)、タイプ 2~5 の高速補正 (fast correction)、タイプ 26 の電離層遅延補正に分けられており、それぞれ衛星軌道およびクロック (変化が遅い成分)、衛星クロック (SA などの速い変化を伴う成分)、電離層伝搬遅延の補正に用いる。タイプ 24 は高速補正 (6 衛星分) と長期補正 (1~2 衛星分) の両方を含んでいるが、これはメッセージタイプ 2~5 に 13 衛星分の補強情報を収容できるため、補強対象の衛星数がたとえば 32 の場合、26 衛星についてはタイプ 2 および 3 を、また残りの 6 衛星はタイプ 24 を使うことで、伝送効率の向上が図られる。なお、電離層伝搬遅延補正処理については、高い測位精度が要求される精密進入 (PA) モードでは必須であるが、測位精度に関する要求が厳しくない非精密進入 (NPA) モードでは任意とされている。

MSAS による測位誤差の一例を、図 3 に示す

表2 SBAS補強メッセージ

タイプ	内容	更新間隔 (s)	タイプ	内容	更新間隔 (s)
0	テストモード	6	18	IGP マスク	300
1	PRN マスク	120	24	高速 / 長期補正	60 / 6
2~5	高速補正	60 / 6			120
6	インテグリティ情報	6	25	長期補正	120
7	高速補正劣化係数	120	26	電離層補正情報	300
9	静止衛星エフェメリス	120	27	SBAS サービス情報	300
10	劣化係数	120	28	クロック - 軌道共分散	120
12	SBAS 時刻情報	300	63	ヌルメッセージ	
17	静止衛星アルマナック	300			

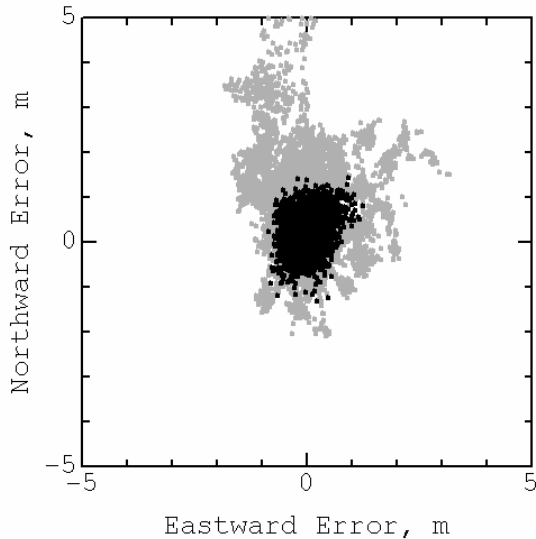


図3 MSASによる補正精度評価例(2008年1月17~19日、高山、PAモード)。(灰)GPS単独測位、(黒)MSASを利用した場合。

(PAモード)これは国土地理院 GEONET 高山局(基準点 ID=940058)の観測データによる測位結果の例であって、対象期間は2008年1月17~19日である。黒色のプロットはMSASメッセージを適用した場合、また灰色はGPSのみによる測位結果を示す。GPSのみによる測位精度は1.502m(水平)および2.681m(垂直)であったが、MSASメッセージの適用によりそれぞれ0.425mおよび0.607mに改善された(いずれもRMS値による)。

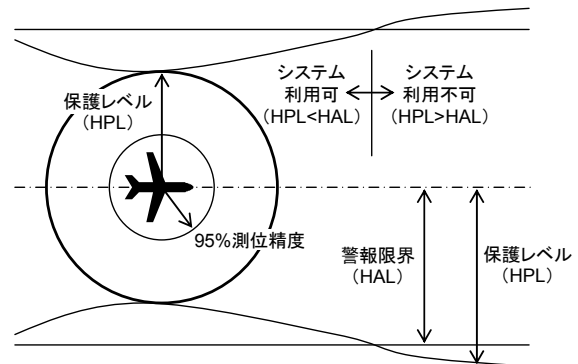
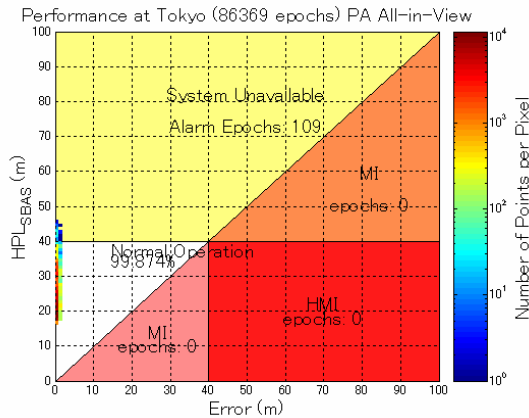


図4 保護レベルと警報限界

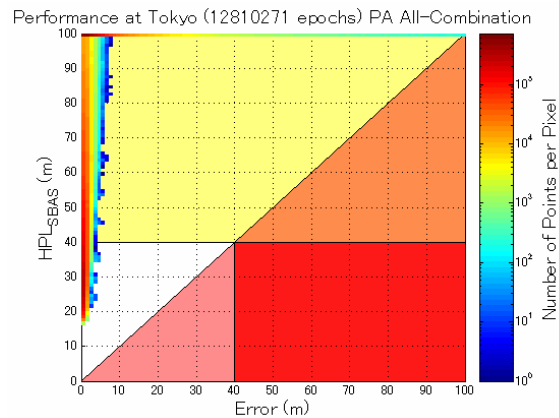
2.1.5 インテグリティ機能

インテグリティ(integrity:完全性)とは、航法システム出力の異常による危険を防止するために必要とされる航法性能要件である。ユーザ受信機において測位誤差を招くGPS衛星の故障あるいは誤動作はしばしば発生しており、そのような状況をリアルタイムに検出してユーザ受信機に伝達することが、インテグリティ機能として求められる。

具体的なインテグリティ要件としては、航法システムが出力する位置情報に含まれる誤差(測位誤差)が、パイロットへの警報を伴うことなく警報限界を超える確率として定められる。警報限界は航空機の飛行フェーズに対応した航法モードによって、水平及び垂直それぞれの方向について決められている。例えば、非精密進入モードでは



(a) 全衛星を使用した測位



(b) すべての組合せを評価

図5 測位誤差と保護レベルの比較例

水平警報限界 556m とされ、垂直警報限界は適用されない。また、APV-I と呼ばれる精密進入モードでは、水平・垂直警報限界はそれぞれ 40m 及び 50m とされ、条件にもよるが航空機を高度 76m 付近まで誘導できる。

インテグリティ要件は、SBAS 規格では $1-10^{-7}$ (1 時間あたり、航空路～非精密進入モード)あるいは $1-2 \times 10^{-7}$ (着陸あたり、精密進入モード)と定められている。パイロットへの警報については、航空路では 5 分、非精密進入モードあるいは APV-I モードでは 10 秒以内に発出することとされ、これもインテグリティ要件に含まれている。

さて、SBAS のインテグリティ機能については、具体的には(サービスエリア内の)ユーザ位置における測位誤差の信頼限界を危険率 10^{-7} 以下で与えることで実装されている。この信頼限界が保護レベル (protection level) と呼ばれ、SBAS が放送するインテグリティ情報には保護レベルを計算するために必要なパラメータが含まれている。

ユーザ受信機は、計算して求めた保護レベルが警報限界より大きければ、その航法モードを利用不可とする。すなわち、指定された航法モードが利用可能であるか否かは、その航法モードに対応する警報限界と、計算により求められた保護レベルの関係のみにより決まる(図4)。これにより、ユーザ受信機が警報を発出していない限り、測位誤差は警報限界以下に(危険率 10^{-7} で)保たれるという仕組みでなのである。航空路～非精密進入モードでは(垂直警報限界が定められていないから)水平方向のみが問題であるが、精密進入モ

ードでは垂直方向についても保護レベルが警報限界以下でなければならない。こうした仕組みが採用されている理由は、ユーザ受信機にとっては自己の測位誤差が常に未知であることによる。

インテグリティ機能の確認のために、ユーザ測位誤差と保護レベルを比較した例を図5に示す(2009年1月16日、東京都調布市、PAモード)。この図の横軸は水平測位誤差(HPE)、縦軸は水平保護レベル(HPL)であり、色は頻度の高低を表している。保護レベルは常に測位誤差よりも大きくなくてはならないから、安全な航法システムであるためには、この図の斜線よりも右側にプロットがあってはならない。

図5(a)はすべての可視衛星を使用した場合(いわゆる All-in-View 方式)で、現在の市販受信機はほぼすべてがこの方式である。プロットは原点付近にあるが、斜線を超えるものはない。同図では参考までに保護レベルを垂直誘導付進入(APV-I)モードの警報限界である 40m と比較しており、ほとんどの場合についてこれを満たしていることがわかる。

図5(b)は4衛星以上のすべての組合せについて同様の処理をしたもので、これによりユーザ受信機がいかなる衛星の組合せを用いたとしてもインテグリティ要件が満たされていることを確認することができる。図5(a)(b)ともに多くのプロットが縦軸付近に集中しているが、これは測位誤差に比べて十分に大きな保護レベルが与えられていることを示しており、MSAS は安全な航法システムであることがわかる。

2.1.5 研究開発用データ

電子航法研究所では、MSAS の放送メッセージを運用開始以前から常時受信・収集し、すべてを保存している。収集したメッセージについては研究開発用データとしてインターネット上に提供している(所内ネットワーク環境の制約により現在は一時的に中断している)。

- ・提供サービス URL
<http://www.enri.go.jp/sat/>
- ・受信地点
東京都調布市 (IGS mtka の付近)
- ・使用受信機
NovAtel 社製 Millennium-STD

今後は、MSAS 擬似距離測定値 (RINEX ファイル) MTSAT 衛星位置 (SP3 形式など) 電離層遅延量情報 (GEONET 全点) といったデータについても提供していく予定である。

2.1.6 おわりに

我が国が運用中の MSAS について、概要及び現在の状況を述べた。運用開始以来安定したサービスが継続されており、放送されるメッセージにも安全上の問題はないことを確認している。

MSAS は国際標準規格 SBAS に基づいて整備された航空用航法システムであるが、航空以外のユーザも特に制約なく利用できる。すでに市販受信機の多くは SBAS 対応となっており、SBAS は今後とも標準補強システムとして普及が進むものと思われる。本論文が広くユーザの利用の一助となれば幸いである。

参考文献

- /1/ 坂井丈泰、航空用衛星航法システムの信頼性、信頼性(日本信頼性学会誌) vol. 28, no. 1, pp. 23 ~ 32, Jan 2006
- /2/ 坂井丈泰、衛星航法システム MSAS の安全性設計、信頼性(日本信頼性学会誌) vol. 30, no. 5, pp. 392 ~ 397, July 2008
- /3/ ICAO、International Standards and Recommended Practices、Aeronautical Telecommunications、Convention on Int'l Civil Aviation、Annex 10, vol. I, Nov. 2006
- /4/ 坂井丈泰、9.1 広域補強システム MSAS/SBAS、GPS ハンドブック、pp. 222 ~ 235、朝倉書店、Sept. 2010

/5/ 今村純、運輸多目的衛星用衛星航法補強システム (MSAS) の概要、日本航海学会 GPS シンポジウム、pp. 81 ~ 85、Nov. 2002

/6/ 真鍋英記、運輸多目的衛星用航法補強システム (MSAS) の供用開始、日本航海学会 GPS/GNSS シンポジウム、pp. 35 ~ 39、Nov. 2007