

2.4 広域補強システム MSAS の性能評価

坂井 丈泰 (電子航法研究所)

sakai@enri.go.jp

2.4.1 はじめに

衛星航法システム GPS (全地球測位システム) の性能を大陸規模の広い範囲にわたって向上させる広域補強システムとしては、国際民間航空機関 (ICAO; international civil aviation organization) が標準化した SBAS (satellite-based augmentation system: 静止衛星型衛星航法補強システム) の開発が進められている /1/. 米国はすでに WAAS (wide area augmentation system) を 2003 年 7 月より実用しており、欧州の EGNOS (European geostationary navigation overlay service) も 2005 年に初期運用を開始した。

我が国は、SBAS 規格に基づいて MSAS (MTSAT satellite-based augmentation system: 運輸多目的衛星用衛星航法補強システム) を整備中である /2/. MSAS に使用する静止衛星としては MTSAT (運輸多目的衛星) がひまわり 6/7 号として 2005 年から 2006 年にかけて打ち上げられており、現在のところ MSAS は正式運用に向けた試験を行っている。

我が国における初めての広域補強サービスである MSAS について、システムの概要および性能評価例を報告する。

2.4.2 SBAS 方式の概要

ICAO が規格化した SBAS は、人工衛星を利用する GPS 広域補強システムの現在のところ唯一の国際標準である /1, 2/. コアシステムも含めた全体は図 1 のような構成であり、基本的には地上で生成した補強情報を SBAS 規格の信号形式にて静止衛星から放送するものである。

補強情報の生成には少なくとも補強対象とする地理的範囲をカバーする監視ネットワークが必要で

あることから、MSAS では北海道から那覇まで国内に 6 局の監視局を設置しており、また海外に 2 局 (オーストラリアおよびハワイ) の標定局を置いて測位精度の向上を図っている。神戸および常陸太田には MCS (master control station: 航法統制局) が設置されており、監視局で集められた観測データはここに集められ、補強情報が生成される。

SBAS 信号は GPS と同一の L1 周波数 (1575.42 MHz) にて静止衛星より放送されることとされており、既存の GPS アンテナをそのまま使用できる。変調方式もやはり GPS と同じ C/A コードによる 1.023 Mcps の拡散変調であり、受信機の高周波回路についても GPS のそれと大差なく構成できる。データ速度は GPS より高速な 250 bps で、所要の補強情報を放送する容量を持たせてある。

SBAS の補強メッセージは現在のところ表 1 のとおり定義されており、各 SBAS 衛星はいずれか一つのメッセージを毎秒放送する。通常のいわゆるディファレンシャル GPS (differential GPS) 方式との大きな違いは補正情報が誤差要因別となっていることであり、衛星軌道誤差、クロック誤差、大気遅延誤差はそれぞれ個別の補正情報として放送される。たとえばメッセージタイプ 2~5 の高速補正は衛星クロック、タイプ 25 の長期補正は衛星軌道およびクロック、タイプ 26 は電離層遅延誤差の補正情報を収容する。

SBAS が提供する機能あるいは情報は 3 種類あり (i) インテグリティ (integrity: 完全性) 情報、(ii) 広域ディファレンシャル補正情報 (iii) 測距機能、である。このうち (i) は民間航空の航法用途に用いるうえで必須であり、航法システムが出力する位置情報の信頼性に関する情報を与えるものである (ii) は上に述べた広域ディファレンシャル補正情報を指し、これにより測位精度の改善を図る。

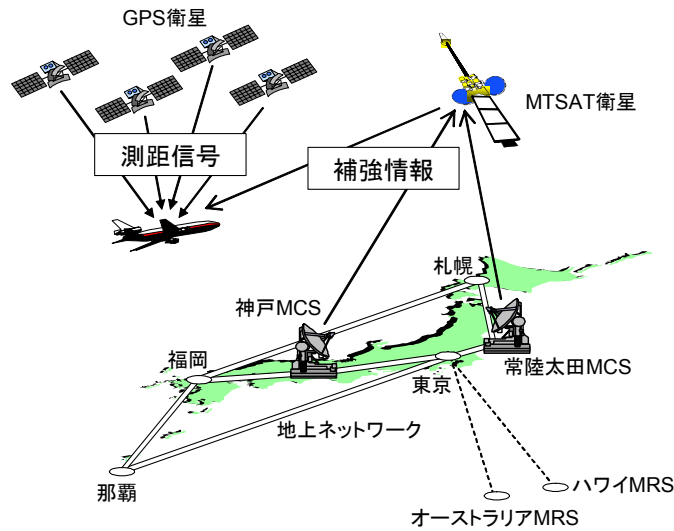


図 1. MSAS の全体構成 .

表 1: SBAS 補強メッセージ .

タイプ	内容	タイプ	内容
0	テストモード	17	GEO アルマナック
1	PRN マスク情報	18	IGP マスク情報
2-5	高速補正	24	高速/長期補正
6	インテグリティ情報	25	長期補正
7	高速補正劣化係数	26	電離層補正
9	GEO エフェメリス	27	SBAS サービス情報
10	劣化パラメータ	28	クロック-エフェメリス共分散
12	SBAS 時刻	63	ヌルメッセージ

(iii) は SBAS 信号自体が GPS と同様の信号形式であることから測距機能を持つもので、我が国においては南方向の仰角 30 ~ 50 度付近に航法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。

インテグリティとは、端的には航法システムの出力が異常となることによる危険を防止するために必要とされる要件であるが、実際に GPS が異常となった例を図 2 に示す。これは 2004 年 1 月 2 日に発生した PRN23 衛星の故障による影響を表示したもので、IGS (国際 GNSS 事業) が提供している GPS 観測データベースを用いて tskb (つくば市) および kgn0 (小金井市) の 2 地点における受信機位置を計算した結果である。受信機はいずれも固定されているから一定値が出力されるのが正常な状態であるが、当日は 18:30UT 頃から数十 km 以上に

及ぶ大きな測位誤差が現れた。右図は PRN23 衛星を除いて計算した結果であり、異常はみられない。このような異常出力のほかにも小さな測位誤差を招く 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、インテグリティとして求められる機能要件である。

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。この信頼限界がプロテクションレベル (protection level; PL) と呼ばれ、各 SBAS サービスプロバイダは、サービスエリア内のすべてのユーザに対して

$$\Pr(|\text{Actual Error}| > PL) \leq 10^{-7} \quad (1)$$

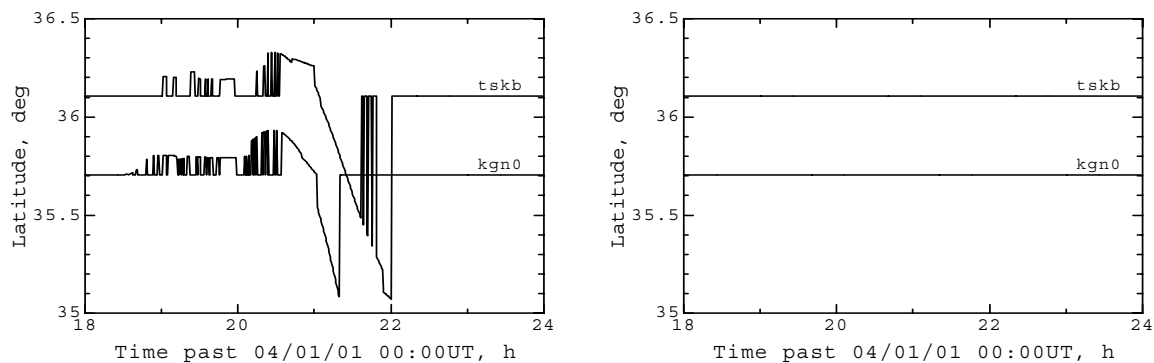


図 2. 2004 年 1 月 2 日に発生した GPS 受信機の異常出力（左）18:30UT 頃から緯度が異常となっている．（右）PRN23 衛星を除くと異常はみられない．tskb および kgn0 の 2 地点における計算結果．

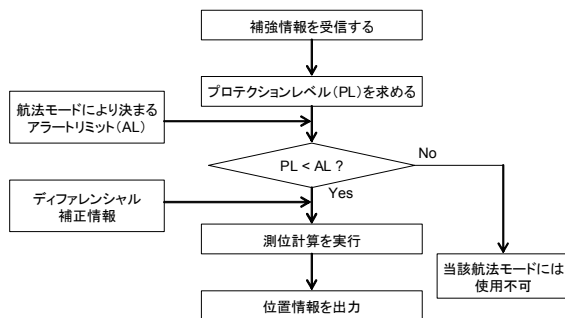


図 3. インテグリティ機能による判断．

を満たすことを保証しなければならない．SBAS 補強メッセージは、広域ディファレンシャル補正情報に加え、ユーザ受信機がプロテクションレベルを計算するために必要なインテグリティ情報を放送できるよう設計されている．

ユーザ受信機は、計算して求めたプロテクションレベルが航空機の航法モードにより決まる上限値 (alert limit) より大きければ、その航法モードを利用不可とする (図 3)．したがってより小さなプロテクションレベルを与えることがアベイラビリティの向上につながるわけで、式 (1) を満たしながら可能な限り小さなプロテクションレベルが得られるようなインテグリティ情報の作成に各サービスプロバイダの努力が傾けられている．

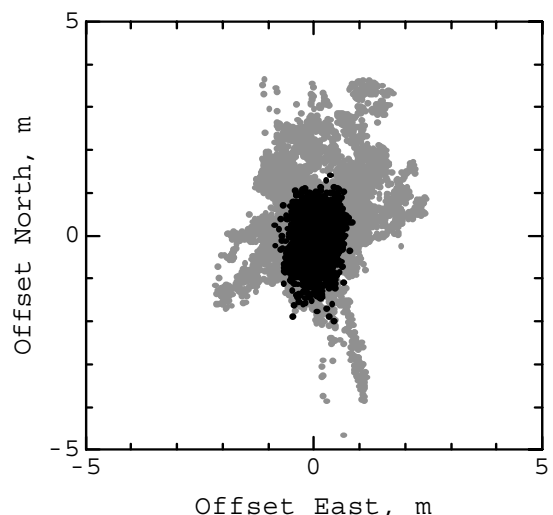


図 4. MSAS 試験信号による測位誤差の例 (2005 年 11 月 14～16 日, 高山)．

2.4.3 MSAS の性能評価

MSAS は現在運用開始に向けて試験中であり、試験信号が放送されている．電子航法研究所では MSAS の評価活動を行っているところであるが、基本的な性能を知るために試験信号により放送されている補強情報の初期的な評価を行った結果を紹介する．

試験信号の放送が開始されてからしばらくは機器類の動作試験や調整作業が行われていたことを考

表 2: 測位精度の比較 .

地点名	GPS 単独		MSAS 補強	
	水平	垂直	水平	垂直
男鹿	1.30	3.58	0.38	0.63
御前崎	1.37	3.63	0.43	0.67
高山	1.39	3.63	0.50	0.73
高知	1.50	3.72	0.64	0.88
佐多	1.77	3.40	0.64	0.73
父島	2.44	3.09	0.98	1.01

(RMS 値, 単位 [m])

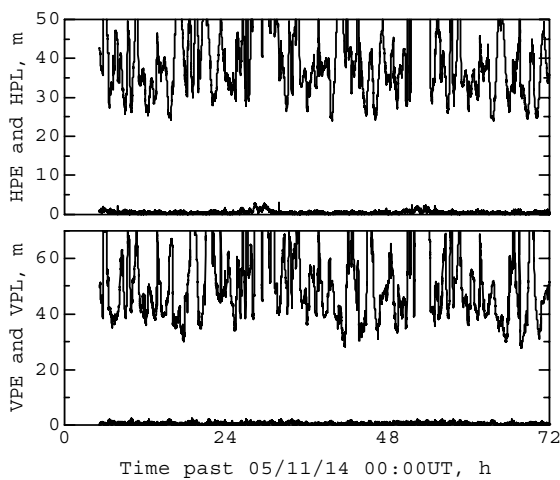


図 5. 測位誤差とプロテクションレベルの比較 (2005 年 11 月 14~16 日, 佐多) .

慮して, 2005 年 11 月に 3 日間にわたり連続して放送された試験信号を評価対象とした. 11 月 14 日 05:12:25 (以下, 時刻はすべて GPS 時刻) に放送が開始された試験信号は, 17 日 00:40:23 まで連続して送出された. 本試験中は, 神戸航空衛星センターから MTSAT-1R 衛星を経由して PRN129 として補強信号が放送された. 試験信号は, 電子航法研究所 (東京都調布市) の 5 号棟屋上に設置したアンテナにて, NovAtel 社製 MiLLennium-STD 受信機を使用して受信した. なお, 本受信機は MTSAT の擬似距離も測定可能であるが, 今回の評価では MSAS の補強情報のみを評価対象とし, MTSAT の擬似距離は測位に使用しないこととした.

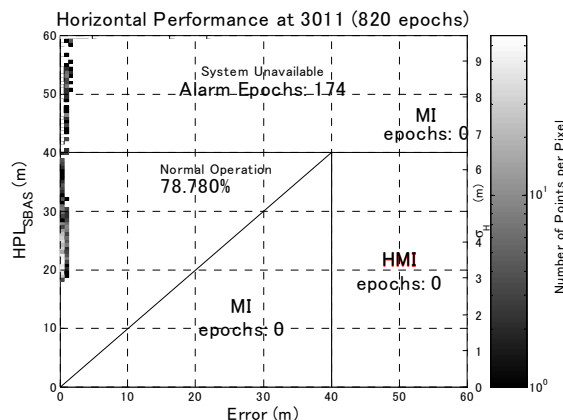
ユーザ局としては, 国土地理院の電子基準点ネットワーク (GEONET) を利用した. GEONET に

は MSAS の補強情報を処理する機能はないので, SBAS 受信機の測位計算を実行するユーザ受信機シミュレータを作成し, これに GEONET の観測データ (RINEX 形式ファイル) を入力・処理した. MSAS の補強情報は日本全国どこでも同じであるから, 電子航法研究所にて受信した MSAS メッセージを任意の GEONET 局の観測データに適用することが可能である. さらに, 測位処理の際に MSAS メッセージの適用の有無を切り替えることで, MSAS を使用した場合と GPS のみの場合の測位精度を, 同一の RINEX 観測ファイルについて直接比較できる.

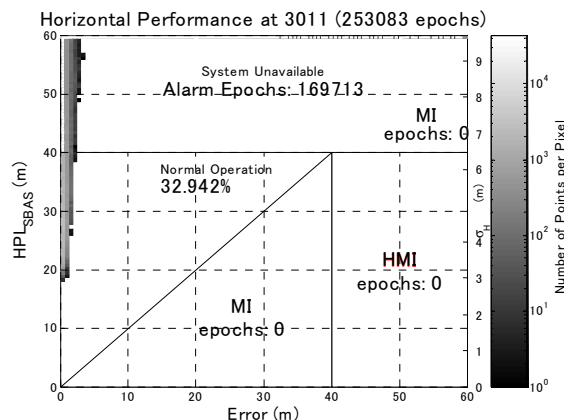
図 4 は GEONET 高山局 (940058) の観測データによる測位結果の例であって, 黒色のプロットは MSAS メッセージを適用した場合, また灰色は GPS のみによる測位結果を示す. GPS のみによる測位精度は 1.39m (水平) および 3.63m (垂直) であったが, MSAS メッセージの適用によりそれぞれ 0.50m および 0.73m に改善された (いずれも RMS 値による). 男鹿・御前崎・高山・高知・佐多・父島の 6 地点について測位精度を評価した結果を, 表 2 にまとめた. 水平・垂直とも 1 m 程度以下の良好な測位精度が達成されている. 我が国周辺では南方ほど電離層活動の影響を受けやすいことが知られているが, 表中の測位精度は実際にそのような傾向をみせている.

インテグリティ機能の確認のためにユーザ測位誤差とプロテクションレベルを比較したのが図 5 である. 上段は水平方向, 下段には垂直方向の測位誤差とプロテクションレベルを表示してある. いずれも横軸付近に張り付いているのが測位誤差, また両図の上半分に分布しているのがプロテクションレベルである. プロテクションレベルは常にユーザ測位誤差よりも大きく, プロテクションレベルは大きな余裕をもってユーザ測位誤差を抑えているといえる. すなわち, MSAS においてはインテグリティ機能は正常に作用しているものと考えられる. なお, 先に述べたとおり我が国周辺では南方ほど電離層活動の影響を受けやすいことから, 図 5 は GEONET 佐多局 (鹿児島県) における比較とした.

ところで, 図 5 の例では擬似距離が測定された



(a) all-in-view 方式に対応



(b) すべての組合せを評価

図 6. 測位誤差とプロテクションレベルの比較 (2006 年 5 月 20 日, 川越) .

すべての可視衛星を利用してプロテクションレベルを計算しており, all-in-view 方式の測位に対応していることに注意しなければならない. 実際にはユーザ受信機が測位に利用する衛星の組合せを指定することはできないから, インテグリティの評価にあたっては 4 衛星以上のすべての組合せを考慮する必要がある. これを実行した例が図 6 で (a) はすべての可視衛星を使用した場合, また (b) は 4 衛星以上のすべての組合せについて, 測位誤差とプロテクションレベルを計算して描いたものである. 両図では同一の観測データファイルを使用している. 観測時間は 820 エポック (7 時間弱) であるから (a) では 820 しかサンプルがないが, これに対して (b) では 25 万以上の組合せが評価されており, 各エポックにおいて 8 衛星強が観測されたものと解釈できる. 図 6 においてもプロテクションレベルは依然として測位誤差を大きく上回っており, ユーザ受信機が実際に使用する衛星の組合せのすべてについてインテグリティは確保されていることがわかる.

2.4.4 むすび

航空航法用衛星航法システムの国際標準である SBAS 規格の概要を述べるとともに, 我が国が整備中の MSAS について性能評価例を紹介した. MSAS の試験信号では水平・垂直方向とも 1 m 以内 (単

独測位の 1/2 ~ 1/4 程度) の良好な測位精度が達成されており, インテグリティ機能を備えた航法システムとして基本的な機能を確認したところである.

現在, MSAS は実用に向けた試験を継続しており, 早ければ 2007 年春頃からの正式運用を予定している.

参考文献

- /1/ International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, vol. I, ICAO, Nov. 2002.
- /2/ 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.
- /3/ 真鍋英記, “運輸多目的衛星用衛星航法補強システム (MSAS) の整備状況”, 日本航海学会 GPS/GNSS シンポジウム, pp. 59 ~ 63, Nov. 2005.
- /4/ 真鍋英記, “運輸多目的衛星用衛星航法補強システム - MSAS の整備状況について -”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 105, No. 574, pp. 43 ~ 47, SANE2005-95, Jan. 2006.
- /5/ 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.
- /6/ 坂井丈泰, SBAS 広域ディファレンシャル補正情報の品質評価, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 105, No. 574, pp. 31 ~ 36, SANE2005-93, Jan. 2006.