

13. MSAS の性能向上について

通信・航法・監視領域 ※坂井 丈泰、松永 圭左、伊藤 実、
吉原 貴之、近藤 俊一郎、星野尾 一明

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。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 年夏頃より試験運用を実施している。

航空局は、SBAS 規格に基づいて MSAS（MTSAT satellite-based augmentation system：運輸多目的衛星用航法補強システム）を整備してきた[1][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、所要の試験および認証作業を経て昨年 9 月より MSAS の運用が開始されたところである[3]。

我が国における初めての広域補強サービスである MSAS は所期の性能を発揮しており、現在のところ航空路～非精密進入に至る航法モードで利用可能となっている。当所ではさらに MSAS を垂直誘導付進入モードに利用可能とするために必要な性能向上について検討を行っているところであるが、その一部について概要を報告する。

2. MSAS の概要

SBAS 方式では、GPS を補強することで全体として所要の性能の航法システムを実現する。GPS も含めた全体システムは図 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、監視局で得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[4]。変調方式もやはり GPS と同じ C/A コードによる拡散変調であり、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。

SBAS が提供する機能あるいは情報は三種類あり、(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。(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、航法衛星が一つ追加される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り、SBAS においては（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。この信頼限界は、保護レベル（PL：protection level）と呼ばれる。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、ユーザ受信機が保護レベルを計算するために必要なインテグリティ情報

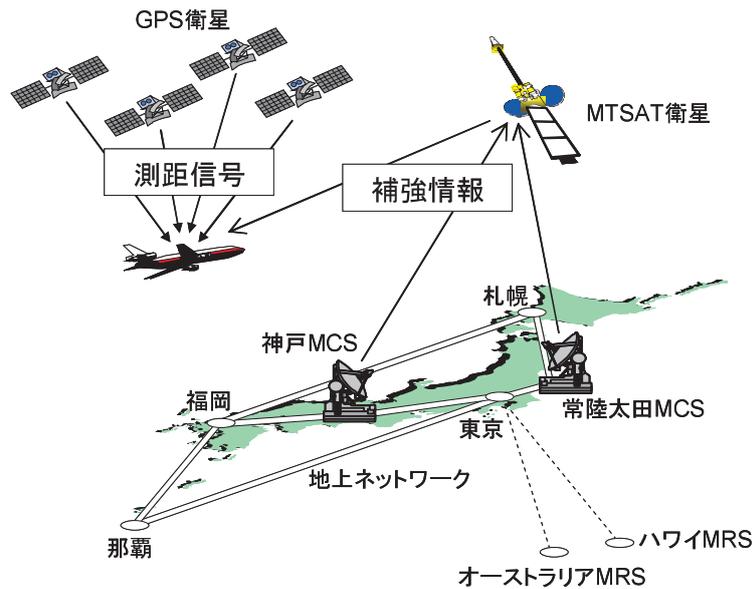


図1 MSASの全体構成

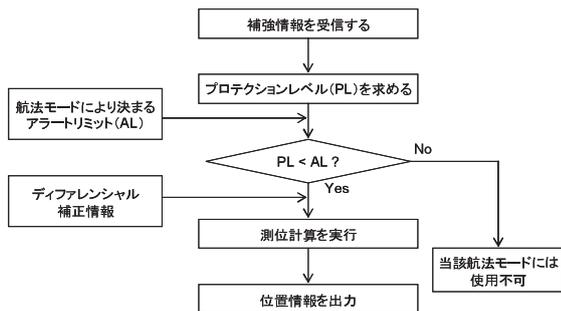


図2 インテグリティ機能による判断

を放送できるよう設計されている。

ユーザ受信機は、計算して求めた保護レベルが航空機の航法モードにより決まる上限値 (alert limit : 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 (図2)。したがってより小さな保護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、所要のインテグリティ要件を満たしながら可能な限り小さな保護レベルが得られるようなインテグリティ情報を作成・提供することが重要である。

それぞれの航法モードに応じて要求される航法性能の一覧を、表1に示す[4]。航空路～非精密進入 (NPA) の航法モードでは垂直方向の性能は規定されず、インテグリティについては単位時間あたりとされている。垂直誘導付進入

(APV)～CAT-I 精密進入では垂直方向について厳しい要件が課され、またインテグリティは着陸1回あたりとして規定される。垂直誘導がある航法モードでは、水平方向および垂直方向のそれぞれについて危険率 10^{-7} を適用することとして、インテグリティを着陸あたり $1-2 \times 10^{-7}$ と定めている。

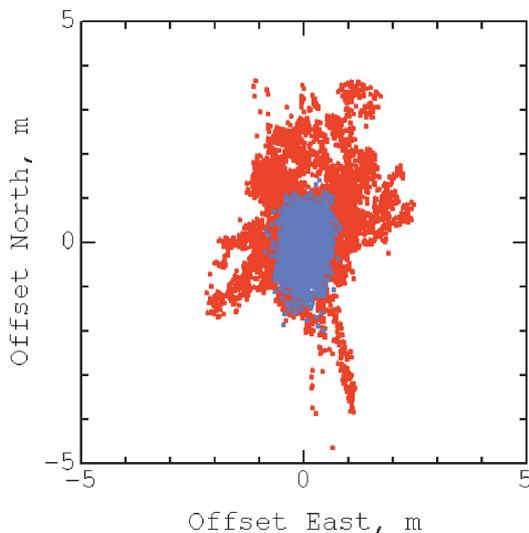
3. 現行 MSAS の性能

2005年夏から運用開始までの間、MSASは断続的に試験信号を放送してきた。試験信号を対象としてMSASの性能評価を行った例を、以下に紹介する。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、以下の評価では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。

図3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、青色のプロットはMSASメッセージを適用した場合、また赤色は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

表1 GNSSの航法性能要件[4]

航法モード	水平方向		垂直方向		インテグリティ
	95%精度	警報限界	95%精度	警報限界	
航空路	740 m	3.7 km	—	—	1時間あたり
ターミナル空域	740 m	1.85 km	—	—	$1-10^{-7}$
非精密進入 (NPA)、出発	220 m	556 m	—	—	
垂直誘導付進入 (APV-I)	16 m	40 m	20 m	50 m	
垂直誘導付進入 (APV-II)	16 m	40 m	8 m	20 m	$1-2 \times 10^{-7}$
CAT-I 精密進入	16 m	40 m	4~6 m	10~15 m	

図3 MSAS試験信号による測位誤差の例
(2005年11月14~16日、高山)

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)。水平保護レベルは常に 556 m より小さく、航空路~非精密進入 (NPA) モードについては MSAS のアベイラビリティは 100%であった。

垂直保護レベル (VPL) は、日本全国では典型的には図4のように分布している。保護レベルは北陸地方でもっとも小さく、この例では 30 m 程度であった。本州~九州では 40 m 前後、北海道および沖縄地方ではさらに大きな値となる。保護レベルの等しい地点を結ぶとやや右上がりの楕円となるが、これは MSAS における地上監視局の分布を反映している。

各地点において、垂直誘導付進入 (APV-I) 航法モードのアベイラビリティ、すなわち当該航法モードを利用可能な ($HPL < HAL$ かつ $VPL < VAL$ を満たす) 時間割合を図示すると、

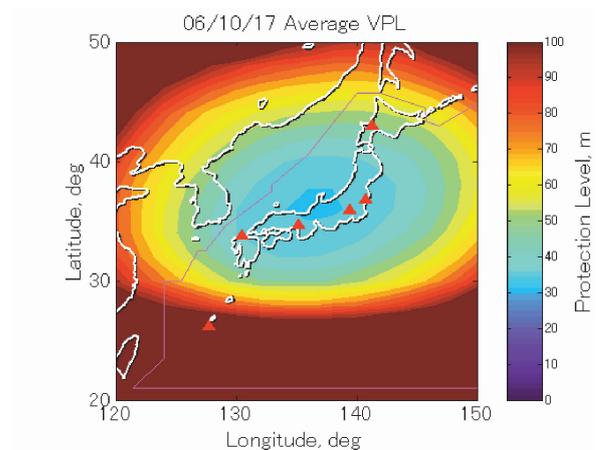
図4 垂直保護レベルの分布例
(現行 MSAS、2006年10月17日)

図5のようになる。これも北陸地方でもっとも高い性能を示し、98%以上が得られた。北陸地方から離れるにしたがいアベイラビリティは低下し、北海道および九州以遠では 50%以下であった。すなわち、北陸地方においては1日のうち98%の時間 (約23時間31分) は APV-I 航法モードを利用可能であるが、北海道および九州以遠では利用可能な時間は12時間以下でしかないことがわかる。

図5からわかるとおり、現在においても MSAS により垂直誘導付進入を提供できないわけではないが、そのアベイラビリティは十分とはいえない。垂直誘導付進入モードが利用可能であるためには水平および垂直のいずれも保護レベルが警報限界よりも小さくなくてはならないが、問題となるのは主に垂直方向の性能である。

したがって、垂直誘導付進入のアベイラビリティを改善するには垂直保護レベルを低減する

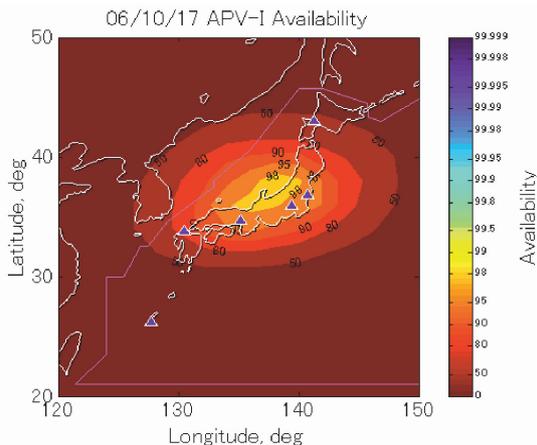


図5 APV-Iモードのアベイラビリティ
(現行MSAS、2006年10月17日)

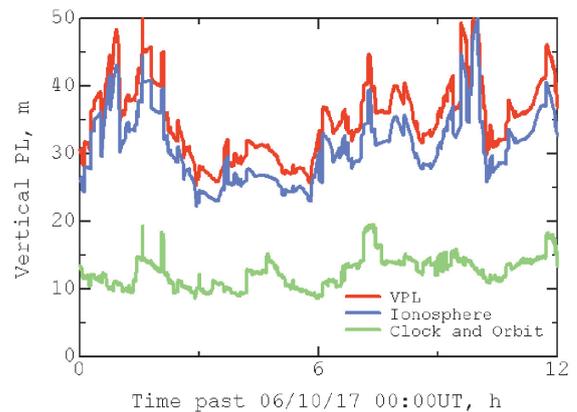


図6 垂直保護レベルの内訳
(現行MSAS、2006年10月17日)

必要があるが、このために垂直保護レベルの内訳を調べた例を図6に示す。この図の赤線は垂直保護レベル、青線はそのうちの電離層に起因する成分、また緑線は衛星クロック・軌道誤差に関係する成分である。電離層に起因する成分は保護レベルそのものと大きな差がないことから、保護レベルを決める支配的要因は電離層遅延補正であり、アベイラビリティを改善するためには電離層遅延補正の不確実性を抑制することが不可欠であるといえる。なお、保護レベルの計算においてはいくつかの誤差要因に関する不確実性の二乗和が用いられることから、図6における青線と緑線の和が保護レベルに対応するわけではない。

4. MSAS 性能向上策の検討

SBASにおける電離層遅延補正方式は、経緯度で5度毎に設定されたIGP(ionospheric grid point)における電離層垂直遅延量(およびその不確実性を示す情報)をユーザに向けて放送することとされている[4]。測距信号が電離層を通過する位置はIPP(ionospheric pierce point)と呼ばれ、ユーザ受信機は各IPPにおける垂直遅延量をIGP垂直遅延量から内挿により求めて利用する。この際の内挿処理やIPP位置計算の手順も規格により定められており、SBAS準拠の受信機であれば同一の処理を実行することとなる。

ユーザ受信機側の処理手順が定められているのに対して、SBASサービスプロバイダがIGP

垂直遅延量を推定する方法には特に制約はない。すなわち、SBASが規定された航法性能を提供する限り、サービスプロバイダの裁量で任意の推定アルゴリズムを採用してよい。各サービスプロバイダにとっては、サービスエリア内なるべく推定精度の良いアルゴリズムを採用することが、測位精度の向上につながることになる。電離層遅延推定アルゴリズムとして米国WAASおよび日本のMSASが採用しているプレーナフィット(planar fit)方式では、IGP周辺における電離層遅延観測データをもとにして、平面モデルによりIGP位置における電離層遅延量を推定する[5]。このためにモニタ局には二周波型受信機が設置されており、周辺の電離層による遅延量を観測している。平面モデルでは電離層垂直遅延量を経緯度に関する一次式として表現し、モニタ局における観測データを利用してその係数を推定することでIGP位置における垂直遅延量を得る。

プレーナフィット方式では、サービスエリア上空の電離層の様相が平面モデルに適合している場合に限り正常な推定が行われる。電離層嵐等の影響により電離層活動が活発な場合はこうした条件が満たされないことがあり、平面モデルにより推定されたパラメータを信頼して補正情報を生成してはならない。このような状況を検出するのが電離層嵐検出器(storm detector)であって、平面モデルにより推定された電離層遅延量と実際のモニタ局における観測結果との残差二乗和がカイ二乗統計量になることを利用

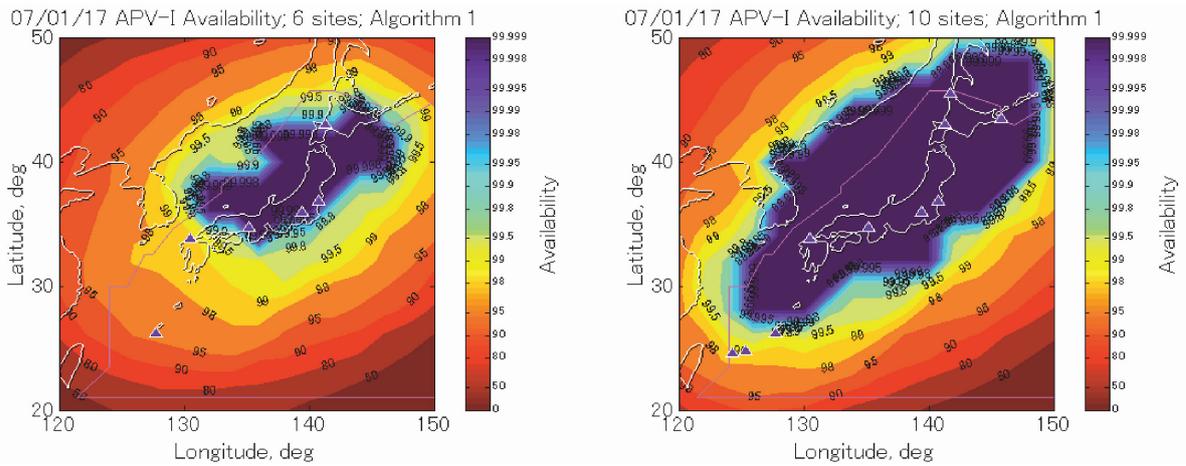


図7 FOC WAAS アルゴリズムによる APV-I モードのアベイラビリティ

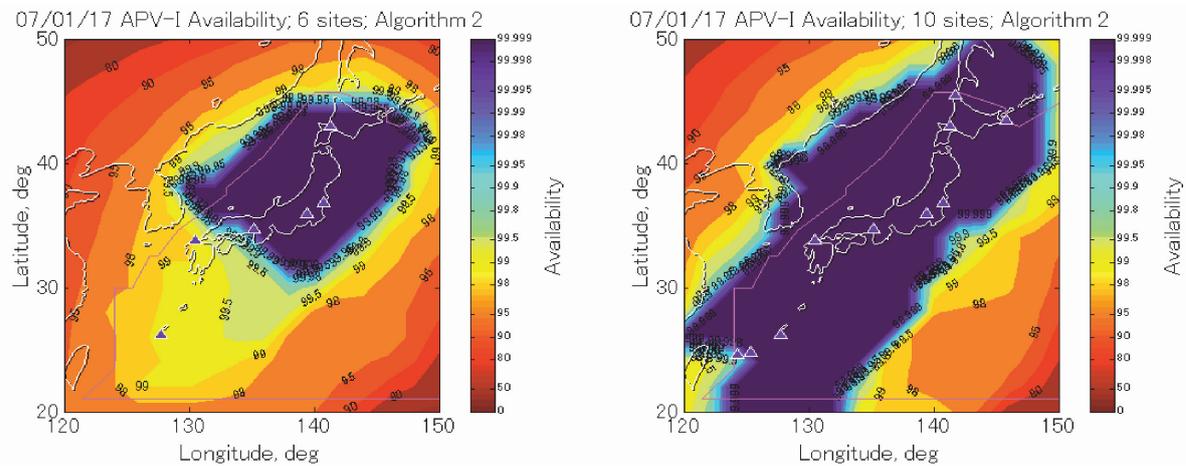


図8 適応ゼロ次フィットアルゴリズムによる APV-I モードのアベイラビリティ

してモデル適合性を検定するものである。電離層嵐モニタにより平面モデルが実際の電離層に適合しないと判断された場合、その IGP については補正值の分散（不確実性を示す情報）が最大値に設定される。

プレーナフィット方式は以上のような仕組みにより誤った電離層補正情報を放送しないことを保証しているのであるが、実際には必ずしも MSAS に最適な方式とはいえない。すなわち、日本付近の電離層については平面モデルが適合しない状況が比較的多く発生するため、電離層嵐検出器の働きにより補正值の分散が最大値に設定される IGP が少なくないのである。これが、MSAS において図5のように垂直誘導付進入モードのアベイラビリティが十分でない主要な原因である。

このような状況を改善するために、当所では

ゼロ次フィット方式を採用することを考えた [6]。すなわち、電離層嵐検出器が反応しない場合はプレーナフィットが有効であるからその結果を採用するが、電離層嵐検出器が反応した場合は推定の次数を下げることで、1 次に代えてゼロ次の推定処理を実行することとするのである。本方式をここでは適応ゼロ次フィットと呼ぶことにするが、具体的には次の手順となる。

- (1) プレーナフィットを実行する。
- (2) 電離層嵐検出器が反応しない場合は、プレーナフィットの結果を採用する。
- (3) 電離層嵐と判定された場合は、ゼロ次フィットを実行してその結果を採用する。

この改良方式により計算される垂直保護レベルは、特に電離層嵐状態では現行方式の 1/3 程度となることがわかっている [6][7]。電離層嵐の期間についてもシミュレーションを行っており、

保護レベルは依然として十分な余裕をもってユーザ測位誤差を上回り、インテグリティは保たれることを確認している。

適応ゼロ次フィット方式ではあくまでプレーナフィットの結果をベースとしており、電離層嵐と判定された場合のみゼロ次フィットを行うこととしている。このようにした理由は、電離層嵐状態ではない限り最初からゼロ次フィットとするよりも1次のフィッティングを実行するほうが若干良い精度が得られることと、現行アルゴリズムからの変更点が少ないほうが安全性認証における作業量を抑制できることによる。

一方、米国 WAAS はすでに性能向上の作業を行っており、2008年までに一周波システムの FOC (full operational capability) を達成する計画である。WAAS で開発された電離層補正アルゴリズムは MSAS でも比較的容易に採用可能であることから、WAAS FOC アルゴリズムが採用されている状況を想定して適応ゼロ次フィットの性能評価を実施した例を示すこととする。

図7は FOC アルゴリズムを採用した場合の APV-I モードのアベイラビリティを示しており、現行 MSAS と同じ6監視局構成では道南～近畿地方において 100%のアベイラビリティを確保できることがわかる。さらに4監視局（稚内、根室、石垣島、宮古島）を追加すると、北海道～奄美大島まで 100%のアベイラビリティを提供できる見込みである。

さらに適応ゼロ次フィットを追加導入すると、図8のようなシミュレーション結果が得られた。FOC アルゴリズムのみの場合よりも全体的に広い範囲で 100%のアベイラビリティを達成でき、特に4監視局を追加した場合には南西諸島全域をカバーできる可能性がある。

4. まとめ

我が国の広域補強システムである MSAS は昨年9月に運用を開始したが、その利用は非精密進入 (NPA) モードまでに限られている。さらに垂直誘導付進入 (APV) モードでも利用可能とするために必要となる性能向上策について、電子航法研究所における検討の概要を報告した。

APV モードを利用可能とするためには垂直

保護レベルを低減する必要があるが、このためには電離層補正アルゴリズムの改善が欠かせない。米国 WAAS のアルゴリズムに加えて当所で開発した適応ゼロ次フィット方式を採用することにより、北海道～南西諸島を含む全国で APV-I 航法モードを提供できる可能性がある。

現在、米国は LPV200 と呼ばれる新しい航法モードの導入を進めており、垂直警報限界 VAL=35 m にて決心高 200FT までの進入が可能とされている。MSAS についても、APV-I モードにとどまらずさらに垂直保護レベルを低減することが有用と考えられることから、適応ゼロ次フィットをさらに改良し、ユーザのより高い要求に応えられるよう検討を続けている。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications, Convention on Int'l Civil Aviation, Annex 10, vol. I, ICAO, Nov. 2002.
- [5] T. Walter, et. al., Robust Detection of Ionospheric Irregularities, ION GPS, pp.209~218, Salt Lake City, UT, Sept. 2000.
- [6] T. Sakai, K. Matsunaga, K. Hoshinoo, and T. Walter, Improving Availability of Ionospheric Corrections in the Low Magnetic Latitude Region, ION NTM, pp. 569~579, San Diego, CA, Jan. 2005.
- [7] 坂井丈泰, MSAS のアベイラビリティ向上, 第6回電子航法研究所研究発表会, June 2006.