

## 15. SBAS性能向上のための電離圏補強方式

航法システム領域 ※坂井 丈泰, 北村 光教, 麻生 貴広, 星野尾 一明

### 1 まえがき

GPS に代表される衛星航法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、国際民間航空機関（ICAO）による標準規格 SBAS (satellite-based augmentation system：静止衛星型補強システム) がある。SBAS 規格による補強システムとしては、米国の WAAS (wide area augmentation system)、我が国の MSAS (MTSAT satellite-based augmentation system：運輸多目的衛星用航法補強システム) [1]、欧州の EGNOS (European geostationary navigation overlay service)、そしてインドの GAGAN (GPS Aided GEO Augmented Navigation) が実用化されており、ロシア・韓国・中国も整備を進めている。

これらの SBAS のうち、我が国の MSAS 以外は垂直誘導を伴う LPV 進入モードを供用している。MSAS が LPV 進入モードを供用しない原因は日本を含む低磁気緯度地域における活発な電離圏活動であり（インド GAGAN は LPV 進入モードを供用しているが、同様の理由によりそのアベイラビリティは高くない）、これを実現するためには、監視局の追加のみならず電離圏補強アルゴリズムの改良が必要であることがわかっている。

電子航法研究所では MSAS で LPV 進入モードを供用するための電離圏補強アルゴリズムの検討を行ったので、その概要を報告する。

### 2 インテグリティ

SBAS の機能のうち、もっとも重要なのがインテグリティの提供である。インテグリティとは、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機能要件であり、SBAS においては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、SBAS は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を放送する。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あらかじめ決められている上限値 (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 1)。

それぞれの航法モードに応じて要求される警報限界を、表 1 に示す。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ない一方、垂直誘導を伴う LPV 進入モードでは厳しい要件が課されている。なお、LPV 進入のうち DH=200FT まで許容されるモードを LPV200 と称する。

### 3 現行 MSAS の性能

日本付近の各地点において、LPV 進入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 2 のようになる。本州～九州地方では 95% 以上のアベイラビリティが得られているが、北海道及び先島諸島では 80% 以下であった。すなわち、現在においても性能面では MSAS により LPV 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。

LPV 進入が利用可能であるためには水平及び垂直のいずれも保護レベルが警報限界より小さいことが必要であるが、電離圏伝搬遅延の影響は主に垂直方向にあらわれるため、問題となるのは垂直方向の性能である。すなわち、LPV 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必要がある。

なお、現行 MSAS については 2020 年に使用衛星及び地上施設を更新する予定であり [2]、図 2 のアベイラビリティについては更新後の 13 監視局 (▲で図示) を想定して計算した。

### 4 MSAS 性能向上策の検討

MSAS は、経緯度で 5 度毎に設定された IGP (ionospheric grid point) における電離圏垂直遅

表 1 GNSS の航法性能要件

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 $1-10^{-7}$
ターミナル空域	740 m	1.85 km	—	—	
非精密進入 (NPA)、出発	220 m	556 m	—	—	
LPV (垂直誘導付進入)	16 m	40 m	20 m	50 m	着陸あたり $1-2 \times 10^{-7}$
LPV200 (DH=200FT)	16 m	40 m	4~6 m	10~35 m	

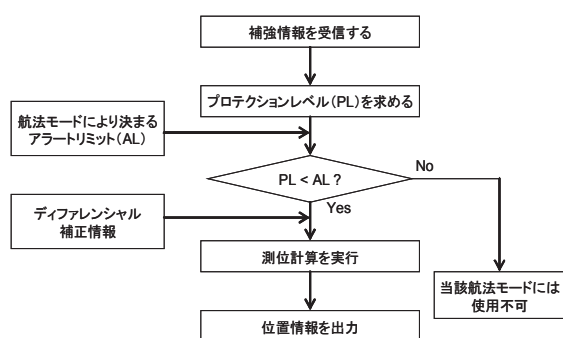


図 1 インテグリティ機能による判断

延量及びその不確実性を示す情報をユーザに向けて送信する。後者は GIVE 値と呼ばれ、保護レベルの算出に用いられる。LPV 進入モードのアベイラビリティを改善するためには、この GIVE 値を低減する必要がある [3][4]。

#### 4.1 現行の電離圏補強アルゴリズム

電離圏遅延推定アルゴリズムとして米国 WAAS 及び日本の MSAS が採用しているプレーナフィット (planar fit) 方式では、IGP 周辺における電離圏遅延観測データ (IPP) をもとにして、平面モデルにより IGP 位置における電離圏遅延量を推定する。このために MSAS 監視局には二周波型 GPS 受信機が設置されており、周波数の異なる GPS 信号を利用して周辺の電離圏による遅延量を観測している。観測された遅延量データを IPP といい、少なくとも 10 以上の IPP を用いて IGP 垂直遅延量を推定する。推定処理に入力される IPP 数が少ないと統計的に良好な推定はできないが、そのような影響はインフレーション係数 (*Rirreg*) により考慮されている。すなわち、IPP 数が少ない場合は *Rirreg* が大きくなり、これにより GIVE 値が大きき算出される。

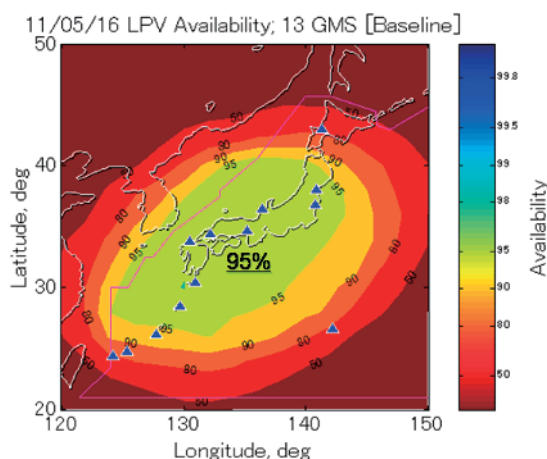


図 2 LPV 進入モードのアベイラビリティ (現行 MSAS, 2011 年 5 月 16 日)

プレーナフィット方式では、IGP 周辺の電離圏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。電離圏嵐等の影響により電離圏活動が活発な場合はこうした条件が満たされないから、そのような状況が嵐検出器 (storm detector) により検出された場合はその IGP については GIVE 値を最大に設定してユーザを保護する。嵐検出器はカイ二乗検定にもとづいて構成され、個々の IGP における推定処理に対してそれぞれ適用される。

従前の研究により、プレーナフィットは必ずしも MSAS に最適な方式とはいえず、改良の余地があることがわかっている[3][4]。すなわち、低磁気緯度地域に位置する我が国においては、特に南西諸島の南方に赤道異常があらわれることから、嵐検出器の誤検出が多く発生する。嵐検出器が作動すると当該 IGP では GIVE 値が最大に設定されてしまうため、ユーザ受信機側では保護レベルが大きくなり、アベイラビリティが低下するのである。

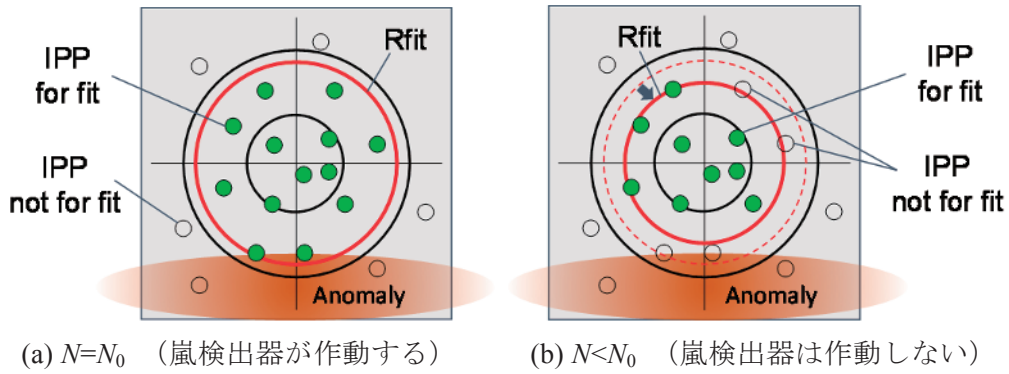


図3 赤道異常の影響

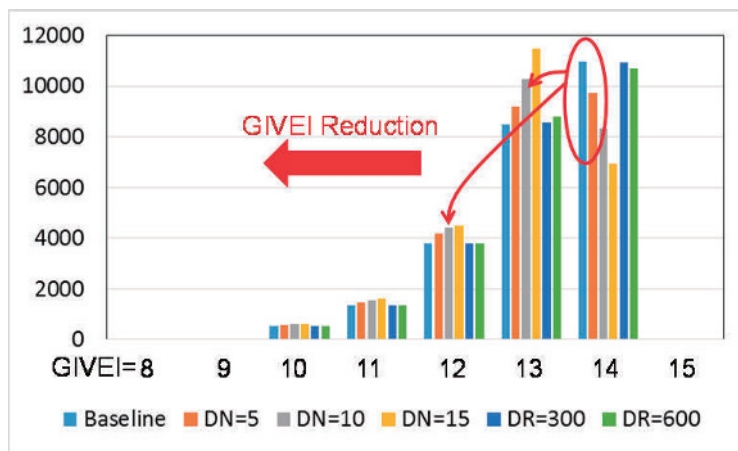


図4 改良アルゴリズムによる GIVEI の減少効果 (方法 1)

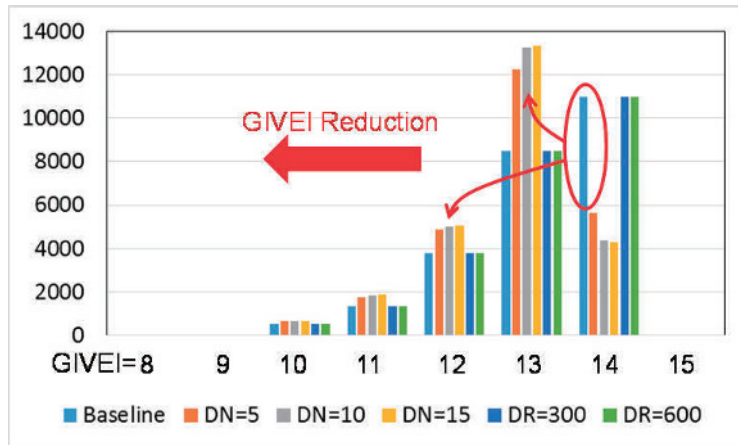


図5 改良アルゴリズムによる GIVEI の減少効果 (方法 2)

#### 4.2 改良アルゴリズム

LPV 進入モードにおける MSAS の性能を改善するために、当所では、嵐検出器により活発な電離圏活動が検出された際にプレーナフィットのフィッティング次数を変更する適応ゼロ次フィット方式を考えた[3][4]。今回は、フィッ

ティングの次数を変更しない方式を検討した。

南方に赤道異常がある場合のプレーナフィットの動作は、図3のように説明できる。図3は IGP 周辺を上空から見た位置関係を示しており、(a)(b)のいずれも IGP が原点である。緑色のプロットは推定に使用される IPP、白抜

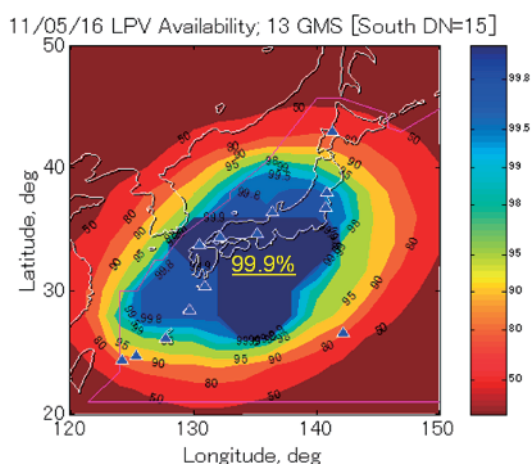


図6 LPV 進入モードのアベイラビリティ  
(改良アルゴリズム, 2011年5月16日)

きは使用されない IPP, また下方 (南方) の赤い領域は赤道異常をあらわす。プレーナフィットでは最大半径  $R_{fit}$  以内の  $N$  個の IPP を入力として推定処理を実行するが, 南方の IPP が赤道異常にかかると, 平面モデルから逸脱し嵐検出器が作動する。これは図 3(a) の状況である。

このとき, 次のいずれかの措置を施したうえで再度推定処理を実行することにすれば, 赤道異常を避けたいうえで IGP 位置における電離圏遅延量を得ることができる。

(方法 1)  $R_{fit}$  を小さくして IPP 数を減らす

(方法 2) 赤道異常は南方にあるので, 最も南方の IPP から順に除外して IPP 数を減らす

例えば, 方法 1 による場合を図 3(b) があらわしている。いずれの方法も, データ数の減少による推定精度の劣化はインフレーション係数により考慮される (前述のとおり入力データ数に応じて適切な  $R_{irreg}$  が設定される)。また, 最大半径  $R_{fit}$  の減少幅 ( $\Delta R_{fit}$ ) あるいは IPP 数の減少幅 ( $\Delta N$ ) には上限を設けることができる。

#### 4.3 改良アルゴリズムの性能

改良アルゴリズムの性能を評価するために, 計算機によるシミュレーションを実施した。対象とした期間は 2011 年 5 月 16 日の 24 時間で, 2020 年以降の 13 監視局を想定している。

まず, すべての IGP を対象として, GIVEI (GIVE 値を示すインデックスで, この値が大きいほど GIVE 値も大きく, 最大値は 14 である) の分布を調べた結果を図 4 (方法 1) 及び

図 5 (方法 2) に示す。「Baseline」は現行 MSAS の場合, 「DN=x」は  $\Delta N$  の上限を  $x$  に, 「DR=x」は  $\Delta R_{fit}$  の上限を  $x$  km にそれぞれ設定して改良アルゴリズムを適用した場合の結果である。

DN の設定により GIVEI が矢印の示すように減少しており, GIVE 値を減らす効果のあることがわかる。一方, DR を設定した場合は効果は大きくない。また, 方法 1 よりも方法 2 のほうが大きな効果を期待でき, GIVEI=14 となるケースを半減できる。

方法 2 で DN=15 とした場合について, 日本付近におけるアベイラビリティを試算した結果は, 図 6 のとおりであった。図 2 と比べて本州～沖縄にかけてアベイラビリティが改善されており, 本州中央部では 99.9% が達成されている。

## 5 むすび

SBAS の性能向上のための電離圏補強アルゴリズムを検討し, 嵐検出器が作動した場合に入力データ数を調整するアルゴリズムを導入することで電離圏遅延量の不確実性をあらわす GIVE 値を抑制し, アベイラビリティを改善できることを示した。入力データ数の調整方法としては, IGP からの距離にもとづくより, 南方のデータから順に減らすとよいことがわかった。

本アルゴリズムを適用した場合でも, 北海道地方及び那覇以西では依然として十分なアベイラビリティが得られていない。既存の他の改良アルゴリズムとの組合せにより, 当該地域におけるアベイラビリティを改善する必要がある。

## 参考文献

- [1] 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,” GPS/GNSS シンポジウム, 2007.
- [2] 田代英明, “QZSS を利用した SBAS サービス,” GPS/GNSS シンポジウム, 2017.
- [3] 坂井丈泰 他, “MSAS の性能向上について,” 第 8 回電子航法研究所研究発表会, June 2008.
- [4] 坂井丈泰 他, “MSAS の性能向上について (その 2),” 第 9 回電子航法研究所研究発表会, June 2009.