

GPS 広域補強システムのプロトタイプ評価

坂井 文泰^{†a)} 福島 荘之介[†] 新井 直樹[†] 伊藤 憲[†]

Prototype Evaluation of GPS Wide-Area Augmentation System

Takeyasu SAKAI^{†a)}, Sonosuke FUKUSHIMA[†], Naoki ARAI[†], and Ken ITO[†]

あらまし 日本全国規模の広い範囲にわたってユーザ測位精度の向上を図る GPS 広域補強システムとしては、我が国では運輸多目的衛星（ひまわり 6 号）を用いる MSAS が構築されつつあり、また最近では準天頂衛星システム（QZSS）による方式も開発が進められている。いずれも GPS L1 信号と同一の周波数にて広域補強情報を放送するものであって、ユーザ受信機ハードウェアの負担を抑えながら測位性能を改善することができる。本論文では、GPS 広域補強システムにおける補強情報の具体的な内容及びその生成方法について述べる。また、日本付近で稼動する広域補強システムについて現実に期待できる性能を知るために、実際に補強メッセージを生成するプロトタイプシステムを実装し、ユーザ受信機シミュレータと併せて測位性能を評価したので、その結果を報告する。評価結果より、毎秒 250 ビット程度の情報量があればサブメータ級の測位精度が達成可能であるとの見通しを得た。

キーワード GPS, 衛星航法, 広域補強システム, 航行エレクトロニクス

1. ま え が き

日本全国規模の広い範囲にわたって GPS (global positioning system: 全地球測位システム) の性能を向上させるためには、例えば静止衛星による補強が有効である。静止衛星から測距信号を放送することにより不足しがちな衛星を補うものであるが、更にこの信号にディファレンシャル補正情報のような補強情報を重畳することで、システム全体としての測位性能を向上させる構成が考えられる。補強情報としては位置情報の信頼性に関する情報なども含めることができ、具体的なシステム例としては SBAS (satellite-based augmentation system: 静止衛星型衛星航法補強システム) がある [1]。SBAS は ICAO (international civil aviation organization: 国際民間航空機関) による国際標準規格の名称であって、我が国は本規格に基づく航法システムとして 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], [3]。

一方、現在我が国が計画している QZSS (quasi-zenith satellite system: 準天頂衛星システム) は、測位ミッションの一部として GPS の補強情報を放送する計画である [4]。提供する測位精度に応じていくつかの補強情報を放送することとしており、本論文ではこのうちサブメータ級の補強信号 (SAIF; submeter-class augmentation with integrity function) を対象とする。QZSS の特長の一つはユーザに対する衛星の仰角を高くできることで、都市部や山間部における通信・測位に有効と考えられている。この性質を利用して広い範囲にわたるユーザに対して高仰角から補強信号を放送することで、アベイラビリティが高く、かつ測位精度及び信頼性に優れた測位システムの構築を目指している。

SBAS 及び QZSS サブメータ級補強機能は、いずれも GPS L1 信号と同一の周波数にて広域補強情報を放送するものであって、アンテナや高周波回路を GPS と共用するなどユーザ受信機ハードウェアの負担を抑えながら測位性能を改善できる。本論文では、こうした GPS 広域補強システムにおける補強情報の具体的な内容に加えて、その生成方法について述べる。また、日本付近で稼動する広域補強システムについて現実に期待できる性能を知るために、実際に補強メッセージ

[†] 独立行政法人電子航法研究所, 調布市
Electronic Navigation Research Institute, 7-42-23 Jindaijii-
Higashi, Chofu-shi, 182-0012 Japan
a) E-mail: sakai@enri.go.jp

を生成するプロトタイプシステムを実装し、ユーザ受信機シミュレータと併せて測位性能を評価したので、その結果を報告する。以下、2. で SBAS 及び QZSS における広域補強システムの概要を述べ、具体的な広域補強情報の生成方法を 3. に与える。更にプロトタイプシステムによる評価について 4. で紹介し、5. をまとめとする。評価結果より、毎秒 250 ビット程度の情報量があればサブメータ級の測位精度が達成可能であるとの見通しを得た。

2. GPS の広域補強

航法システムに要求される測位精度あるいは信頼性はアプリケーションにより異なるが、これが GPS のみでは満足されない場合に、アプリケーションが必要とする水準に補うものを補強システム (augmentation system) という。広域補強システムとは、そのうちでも日本全国～大陸規模の広い地域をサービスエリアとするものである。

SBAS は ICAO が制定した国際標準規格であって、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], [5]。QZSS のサブメータ級補強機能も SBAS 方式をベースとして開発することとしていることから、まず SBAS の広域補強機能について述べることにする。

2.1 SBAS の補強機能

広域補強システムである SBAS の基本的な目的の一つは、サービスエリアの全域にわたって有効な広域ディファレンシャル補正情報を提供することである。このためディファレンシャル補正はベクトル方式 [6]、すなわち、GPS 衛星のクロック誤差、軌道情報誤差、電離層伝搬遅延、対流圏伝搬遅延のそれぞれについて補正情報を生成してユーザに伝送する方式とされている (SBAS では対流圏伝搬遅延については固定モデルを使用する)。

一方、航空機が利用するためには航法システムとしてのインテグリティ (integrity: 完全性) 要件を満たさなければならない [7]。すなわち誤った航法情報がユーザに提供されることを避けなければならない。SBAS の場合には (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} 以下で与えることによりこれを達成する。この信頼限界は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

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

を満たすことを常に保証しなければならない ($\Pr(\cdot)$ は確率を意味する)。すなわち、現実のユーザ測位誤差がプロテクションレベルを超える確率は、 10^{-7} 以下でなければならない。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 (ユーザ位置に応じて) 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に設計されている。

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。したがってより小さなプロテクションレベルを与える方が航法システムとしては利用しやすいわけであるが、一方ではインテグリティ要件により式 (1) は常に満足しなければならない。これらは相反する要求であるが、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ところである。

2.2 補強信号及びメッセージの内容

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、やはり GPS と同じ C/A コードによる拡散変調方式が採用されている (変調速度も GPS と同じ 1.023 Mcps)。ただし符号化速度は 500 sps であって、符号化率 1/2 の畳み込み符号が用いられているためデータ速度は 250 bit/s となる。

すべての SBAS メッセージは 250 ビットから構成されており、毎秒 1 メッセージが SBAS 衛星から放送される。メッセージには 24 ビットの CRC 符号が付されているが、これは 10^{-7} のインテグリティ要件には補強メッセージのビット誤りも含まれることによる。

SBAS で定義されている補強メッセージのうち、主要なものを表 1 に示す。メッセージタイプ 2~6 は高速補正 (fast correction; 衛星クロック誤差の速い成分)、25 は長期補正 (long-term correction; 衛星クロック誤差及び軌道誤差)、26 は電離層遅延補正であって、メッセージタイプ 24 は高速補正と長期補正の両方を含んでいる。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で、補強対象の衛星が例えば 32 の場合、26 衛星についてはタイプ 2 及び 3 を、また残りの 6 衛星はタイプ 24 を使うことで、

表 1 SBAS 補強メッセージ (一部)
Table 1 Augmentation messages for SBAS (part).

タイプ	データ数	内容	範囲	量子化 単位	最大 間隔
2-5	13 衛星	FC^j	±256 m	0.125 m	60 s
		$UDREI^j$	0-15	—	6
6	51 衛星	$UDREI^j$	0-15	—	6
24	6 衛星	FC^j	±256 m	0.125 m	60
		$UDREI^j$	0-15	—	6
	2 衛星	Δx^j	±32 m	0.125 m	120
		Δy^j	±32 m	0.125 m	120
		Δz^j	±32 m	0.125 m	120
	Δb^j	±2 ⁻²² s	2 ⁻³¹ s	120	
25	4 衛星	Δx^j	±32 m	0.125 m	120
		Δy^j	±32 m	0.125 m	120
		Δz^j	±32 m	0.125 m	120
		Δb^j	±2 ⁻²² s	2 ⁻³¹ s	120
26	15 IGP	I_k^V	0-64 m	0.125 m	300
		$GIVEI_k$	0-15	—	300
28	2 衛星	$\sqrt{P^j}$	±512	0.03125-4	120

伝送効率の向上が図られる。

表中の $UDREI^j$, $GIVEI_k$ はインテグリティ情報であって、これら及び P^j 以外がディファレンシャル補正情報に対応する ($UDREI$: user differential range error indicator, $GIVEI$: grid ionospheric vertical error indicator). $UDREI^j$, $GIVEI_k$ はそれぞれディファレンシャル補正適用後になお残る測距誤差及び電離層遅延誤差の大きさを示す指標値で、プロテクションレベルの計算に用いられる。特に $UDREI^j$ については最大放送間隔が 6 秒と短いため、51 衛星分をまとめて放送できるメッセージタイプ 6 が用意されている。メッセージタイプ 28 のクロック-エフェメリス共分散行列 (clock-ephemeris covariance matrix) は、ユーザ位置に応じて衛星クロック誤差及び軌道誤差の視線方向成分を計算するために用いられる。

例えば長期補正情報を適用するには、GPS 航法メッセージにより求めた衛星位置 \hat{x}^j 及びクロック補正值 $\Delta \bar{t}_{SV}^j$ に長期補正值 Δx^j , Δb^j を加えることとされている。したがって、衛星位置としては

$$\begin{bmatrix} \hat{x}^j \\ \hat{y}^j \\ \hat{z}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}^j + \Delta x^j \\ \bar{y}^j + \Delta y^j \\ \bar{z}^j + \Delta z^j \end{bmatrix} \quad (2)$$

また補正後の衛星クロックは

$$\bar{t}^j = t_{SV}^j - (\Delta \bar{t}_{SV}^j + \Delta b^j) \quad (3)$$

を用いることとなる (j は衛星番号, GPS ICD [8] も参照のこと)。同様に、受信機が測定した擬似距離に

ついては

$$\hat{\rho}^j = \rho^j + FC^j + IC^j + TC^j \quad (4)$$

として補正する。 FC^j , IC^j , TC^j はそれぞれ高速補正, 電離層遅延補正, 対流圏遅延補正である。

2.3 QZSS のサブメータ級補強

QZSS のサブメータ級補強信号についても、GPS L1 周波数により、GPS と同一の変調方式により放送される方針である。具体的な信号フォーマットは決定されていないが、SBAS 方式をベースとして開発を進めることとされている。

SBAS 方式では補強情報はメッセージ単位で放送されるため、ベースとしては既に規格化されたメッセージを使用し、機能的あるいは精度的に不足がある場合はメッセージタイプを追加することで対応できる。現在のところ 0-63 のメッセージ ID のうち 29-61 が未使用となっており、追加定義の余地は十分にある。後述の評価結果によれば現状の SBAS フォーマットでもサブメータ級の補強機能が実現できる見通しであり、受信機ソフトウェアの負担も抑えられることから現実的な案といえる。

3. 補強情報の生成

SBAS あるいは QZSS の広域補強機能においては、サービスエリア全域に対して有効な広域ディファレンシャル補正情報をベクトル方式により与える必要がある。SBAS 標準が定めているのは補強メッセージの信号形式とデータ内容、及びその適用手順のみであって [1], 具体的なメッセージの生成方法については各サービスプロバイダが開発することとなる。

広域ディファレンシャル補正情報の生成に関する文献は多くないが、原理的な説明は [6] にある。ここでは広域補強情報の生成方法を整理して述べるが、MSAS や米国の WAAS (wide area augmentation system; 米国が運用中の SBAS) といった現実のシステムにおけるアルゴリズムは公開されておらず、必ずしも以下に示す手順で補強情報を生成しているとは限らない。

3.1 長期補正情報

まず、地上モニタ局 $i = 1, \dots, N$ が測定した GPS 衛星 $j = 1, \dots, M$ に関する擬似距離 (pseudorange) を

$$\rho_i^j = R_i^j - b^j + B_i + I_i^j + T_i^j + M_i^j \quad (5)$$

と表すことにする。ここで、 ρ_i^j : 擬似距離, R_i^j : 真距離 ($R_i^j = |x^j - x_i|$), b^j : 衛星クロック誤差, B_i : 受

信機クロック誤差, I_i^j : 電離層伝搬遅延, T_i^j : 対流圏伝搬遅延, M_i^j : マルチパス誤差, である.

対流圏伝搬遅延については適当なモデル式により十分な精度で補正でき, また電離層伝搬遅延量は二周波による測定データを利用して直接知ることができる. こうして大気伝搬遅延を除き, 衛星クロック誤差については航法メッセージに含まれる補正パラメータを適用すると, 補正済みの擬似距離として

$$\bar{\rho}_i^j = R_i^j - \Delta b^j + \Delta B_i + M_i^j \quad (6)$$

が得られる. 受信機クロック誤差 B_i は各モニタ局の位置が既知であることを利用して解くことができるが, その際の残差が ΔB_i である. また, Δb^j は衛星クロック補正パラメータ Δt_{SV}^j に含まれる誤差成分であって, 広域ディファレンシャル補正情報の衛星クロック補正量に対応する.

さて, ベクトル方式による補正情報を得るには, 擬似距離 $\bar{\rho}_i^j$ に含まれる衛星位置誤差とクロック誤差を分離する必要がある. 航法メッセージ (エフェメリス) による衛星位置を $\bar{x}^j = x^j - \Delta x^j$, モニタ局 i の位置を x_i と表すと, 擬似距離 $\bar{\rho}_i^j$ の近似的な誤差成分を

$$\Delta \rho_i^j = \bar{\rho}_i^j - |\bar{x}^j - x_i| \quad (7)$$

と書けるから, これを観測データとして次の観測方程式を作る.

$$H \cdot \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta B \end{bmatrix} = [\Delta \rho_1^1 \ \Delta \rho_1^2 \ \dots \ \Delta \rho_N^M]^T \quad (8)$$

未知数ベクトルは, $\Delta X = [\Delta x^1 \ \Delta y^1 \ \Delta z^1 \ \Delta b^1 \ \dots \ \Delta x^M \ \Delta y^M \ \Delta z^M \ \Delta b^M]^T$, $\Delta B = [\Delta B_1 \ \dots \ \Delta B_N]^T$ であって, $\Delta x^j = [\Delta x^j \ \Delta y^j \ \Delta z^j]^T$ はエフェメリスに含まれる衛星位置誤差である.

観測行列 H は

$$H = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \rho_1^1}{\partial \Delta x^1}\right)^T & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{\partial \rho_1^2}{\partial \Delta x^2}\right)^T & -1 \\ \vdots & & & & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \left| \begin{array}{ccc} 1 & \dots & 0 \\ 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \end{array} \right. \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \left| \begin{array}{ccc} 1 & \dots & 0 \\ 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \end{array} \right. \\ \dots & \left(\frac{\partial \rho_N^M}{\partial \Delta x^M}\right)^T & -1 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

であって, 衛星位置誤差と擬似距離の関係は

$$\frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta x^j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta x^j} \\ \frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta y^j} \\ \frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta z^j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{x}^j - x_i}{|\bar{x}^j - x_i|} \\ \frac{\bar{y}^j - y_i}{|\bar{x}^j - x_i|} \\ \frac{\bar{z}^j - z_i}{|\bar{x}^j - x_i|} \end{bmatrix} \quad (10)$$

から得られる.

式 (8) はカルマンフィルタにより解くことになるが, 状態変数はいずれも軌道情報及びクロック誤差を意味するので, 時定数は比較的長く (数時間程度) してよい. 衛星軌道・クロックの補正情報としては, 状態変数 ΔX がそのまま対応する.

カルマンフィルタにより得られる共分散行列 P は, 衛星クロック誤差と軌道誤差の関係を表している. これらの誤差は衛星間では相関がないものと考えてよいから, 衛星 j のみに関する要素を取り出して P^j と書くことにする (4×4 行列). 軌道誤差は視線方向成分しか測距誤差として寄与しないことからサービスエリア内におけるユーザ位置によってこれらの誤差の現れ方が異なることになるが, メッセージタイプ 28 でこの共分散関係 P^j が放送されることにより, ユーザ位置に応じた視線方向成分の算出が可能となる.

実際に補正情報としてユーザに放送するにあたっては, エフェメリス情報の変更に対応する必要がある. GPS 航法メッセージには IODE (issue of data, ephemeris) が含まれており, エフェメリス情報が変更された場合には IODE も変わるようになってくる. このため, メッセージタイプ 24 及び 25 の軌道補正情報には適用すべきエフェメリスの IODE 番号を併記し, ユーザ側で正しく対応づけられるようになっている.

3.2 高速補正情報

長期補正情報は比較的時定数の長い (数十分以上) 誤差成分を表しており, SA (selective availability) に代表されるような周期の短い誤差要因には対応できない. これを補正するために用いられるのが高速補正情報であり, 長期補正適用後になお残る衛星ごとの擬似距離誤差を, すべてのモニタ局について加重平均することで求める.

$$FC^j = - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} (\bar{\rho}_i^j - |\bar{x}^j + \Delta x^j - x_i| + \Delta b^j - \Delta B_i) \bigg/ \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (11)$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\rho_i^j}^2 + \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta x^j} \\ -1 \end{bmatrix}^T P^j \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_i^j}{\partial \Delta x^j} \\ -1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

実際にはカルマンフィルタで処理することとなり、 FC^j の共分散行列からインテグリティ情報 $UDREI^j$ を生成する。

軌道及びクロックの補正情報 $\Delta x^j, \Delta b^j$ については、ユーザ側の処理と同様に、 $IODE$ 番号を介して正しくエフェメリスに対応づけられている必要がある。すなわち、エフェメリスが変更された場合にあっても、高速補正值に不連続な変化を生じないように配慮しなければならない。

3.3 電離層伝搬遅延補正

SBAS 方式では、電離層伝搬遅延補正情報は経緯度で 5 度ごとに設定された IGP (ionospheric grid point) における垂直遅延量としてユーザに放送される。ユーザ側では目的とするピアスポイント位置における垂直遅延量 $I^V(\lambda, \phi)$ を周囲の IGP における垂直遅延量 I_k^V の双一次補間 (bilinear interpolation)

$$I^V(\lambda, \phi) = \sum_k I_k^V \cdot \left| \frac{\lambda - \lambda_k}{5} \right| \cdot \left| \frac{\phi - \phi_k}{5} \right| \quad (13)$$

により得て (ここでは周囲の 4 IGP を用いているものとし、各 IGP の位置を (λ_k, ϕ_k) と表した)、更に

$$\hat{I}(\lambda, \phi) = f(e)I^V(\lambda, \phi) \quad (14)$$

として視線方向の遅延量に変換する。この変換に用いられる傾斜係数 (obliquity factor) は衛星の仰角 e の関数で、

$$f(e) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_E \cos e}{R_E + H_{iono}} \right)^2}} \quad (15)$$

と定められている。 R_E は地球半径、また H_{iono} は電離層高度であって SBAS では 350 km を用いる。

この電離層伝搬遅延補正情報を作成する方法はいくつか考えられるが、今回作成したプロトタイプにおいては WAAS や MSAS で採用されているプレーナフィット (planar fit) 方式を採用した [9]。この方式では、IGP k の周辺における電離層垂直遅延量 $I_k^V(\lambda, \phi)$ を経緯度に関する一次式でモデル化する。

$$I_k^V(\lambda, \phi) = a_0 + a_1(\lambda - \lambda_k) + a_2(\phi - \phi_k) \quad (16)$$

λ_k, ϕ_k は IGP k の経緯度である。係数 $\{a_0, a_1, a_2\}$ は、モニタ局により観測された IGP 周辺の電離層遅

延量 I_i^j を用いて、

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \end{bmatrix} = (G^T W G)^{-1} G^T W \begin{bmatrix} I_1^1/f(e_1^1) \\ I_1^2/f(e_1^2) \\ \vdots \\ I_i^j/f(e_i^j) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (17)$$

より定める。行列 G は電離層遅延量の測定値が得られたピアスポイント (経緯度 λ_i^j, ϕ_i^j とする) の IGP 位置に対する幾何学的関係を表し、

$$G = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_1^1 - \lambda_k & \phi_1^1 - \phi_k \\ 1 & \lambda_1^2 - \lambda_k & \phi_1^2 - \phi_k \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \lambda_i^j - \lambda_k & \phi_i^j - \phi_k \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (18)$$

である。IGP k における電離層垂直遅延量としては \hat{a}_0 が対応し、またその分散から $GIVEI_k$ を得る。

モニタ局では、二周波の観測データを利用して

$$I_i^j = \frac{\rho_i^{j,(L1)} - \rho_i^{j,(L2)}}{1 - \gamma} + \frac{1}{1 - \gamma} (\eta_i + \tau^j) \quad (19)$$

より電離層遅延量を直接測定する。ここで、 $\gamma = (f_{L1}/f_{L2})^2$ 、また η_i, τ^j はそれぞれ衛星側及び受信機側の周波数間バイアス (interfrequency bias, ハードウェアバイアスあるいは L1/L2 バイアスなどとも呼ばれる) である [10], [11]。これらのバイアスは定数として与えてもよいが、実際にはリアルタイムに推定処理を実行して補正系に入力する構成とする。

4. プロトタイプによる性能評価

広域補強システムにおける最大の誤差要因が電離層伝搬遅延であることは比較的最近に知られた事実であり、WAAS の開発が遅れた一因でもある。電離層伝搬遅延の様相は地域により異なり、低磁気緯度地方に位置する日本付近ではその影響が大きいものと考えられている [12]。

このため、日本付近で稼動する広域補強システムについて現実に期待できる性能を知ることを目的とし、併せて 3. に述べた補強情報生成方法の確認も兼ね、補強情報を SBAS メッセージとして実際に生成するプ

表 2 使用した GEONET 局
Table 2 GEONET stations used in the evaluation.

ID	基準点名	北緯 (度)	東経 (度)	楕円体高 (m)	備考
MSAS 相当局					
950128	札幌	43.0	141.3	204.7	札幌局
950214	北茨城	36.8	140.8	75.9	常陸太田局
93011	川越	35.9	139.5	62.9	東京局
950356	神戸中央	34.7	135.2	84.8	神戸局
940087	古賀	33.7	130.5	49.0	福岡局
940100	玉城	26.1	127.8	127.5	那覇局
QZSS 相当局					
940001	稚内	45.4	141.8	74.5	宗谷局
93011	川越	35.9	139.5	62.9	東京局
95113	八丈島	33.1	139.8	112.2	八丈島局
942003	父島	27.1	142.2	208.8	南鳥島局
950499	与那国	24.5	122.9	47.3	与那国島局
ユーザ局					
940030	男鹿	40.0	139.8	69.4	ユーザ局
93101	御前崎	34.6	138.2	93.8	ユーザ局
940058	高山	36.1	137.3	812.9	ユーザ局
940083	高知	33.5	133.6	70.7	ユーザ局

ロトタイプを実装し、実証的な評価を試みた。生成された補強情報を、ユーザ受信機を模擬するシミュレータプログラムに渡して測位処理を実行させることで、ユーザ位置における測位精度を直接的に評価する。なお、本評価では現在規定されている SBAS メッセージを用いて得られる測位性能を知ることが目的の一つとし、拡張メッセージ等は特に定義しないこととした。

4.1 プロトタイプシステムの概要

本プロトタイプは広域補強システム MCS (master control station, 主統制局) の機能を模擬する計算機プログラムであり、PC あるいは UNIX マシン上で動作する。複数のモニタ局における観測データに基づいて補強情報を生成し、これを毎秒 1 レコードの SBAS メッセージに編集して出力するのが主な機能である。

モニタ局データとしては、今回は国土地理院の GEONET が提供している観測データ (二周波, 30 秒サンプルの RINEX 形式ファイル) を利用した [13]。使用した観測局は表 2 のとおりで、受信機はすべて Trimble 社製 5700 型である。データ収集には 3 秒の遅れを想定しており、仰角マスクは 5 度とした。観測データは擬似距離のみを利用し、搬送波位相は利用しない (キャリアスムージングも行わない)。補強情報生成処理、電離層遅延量推定、バイアス推定処理の実行周期は、それぞれ 30 秒, 2.5 分, 10 分である。

GEONET では RINEX 形式の観測データファイルしか事後配布されていないため、航法メッセージにつ

いては IGS 局 mtka (東京都調布市) によるログを利用した (IGS: international GNSS service)。SBAS メッセージには時刻を表す情報がないことから、ユーザ受信機シミュレータに渡すデータファイルとしては、NovAtel 社の GPS 受信機 MiLLennium-STD が出力するログ (\$FRMA レコード) と互換な形式とした。

4.2 ユーザ受信機シミュレータ

ユーザ受信機シミュレータもやはり PC あるいは UNIX マシン上で動作する計算機プログラムであり、RINEX 形式の観測データファイルを入力として測位計算を実行し、その結果を出力する。RINEX ファイルとともに SBAS メッセージファイル (\$FRMA 形式) が与えられると、SBAS メッセージを解釈した上でこれを適用し、広域ディファレンシャル補正後の測位結果とプロテクションレベルを出力する。本シミュレータの動作については、WAAS が放送した補強情報を米国内の IGS 局における観測データに対して適用したところ、正常に測位結果が出力されることを確認してある。例えば、IGS 局 gold (米国カリフォルニア州 Goldstone) の 2004 年 5 月 7~9 日の観測データに対して WAAS メッセージを適用したところ、水平方向で 0.73 m、垂直方向では 0.83 m の測位精度が得られた (いずれも RMS 値)。

本研究においては、ユーザ局データについても GEONET による観測データを利用した。使用されている受信機は、やはり Trimble 社製 5700 型である。ユーザ受信機については一周波の観測データのみを利用し、仰角マスクは 5 度とした。基本的には擬似距離のみを利用するが、100 秒程度の時定数によるキャリアスムージングを施してある。航法メッセージについては、MCS プロトタイプと同様に IGS 局 mtka を利用した。

4.3 QZSS モニタ局配置による評価

まず、QZSS で提案されている 5 モニタ局 (宗谷, 東京, 八丈島, 南鳥島, 与那国島) による補正性能を評価した。南鳥島については、データが入手できないことから父島で代用してある。5 局の観測データにより補強情報を生成し、これを評価用のユーザ局 (男鹿, 御前崎, 高山, 高知) において適用して測位誤差を求めた。モニタ局とユーザ局の位置関係を図 1 に示す。

評価対象の時期としては、衛星航法システムに対する影響が大きい電離層の状態を変えることを目的として、表 3 のように選んだ。Kp 指数は地磁気活動の程度を表し、大きな値ほど強い擾乱があることを意味

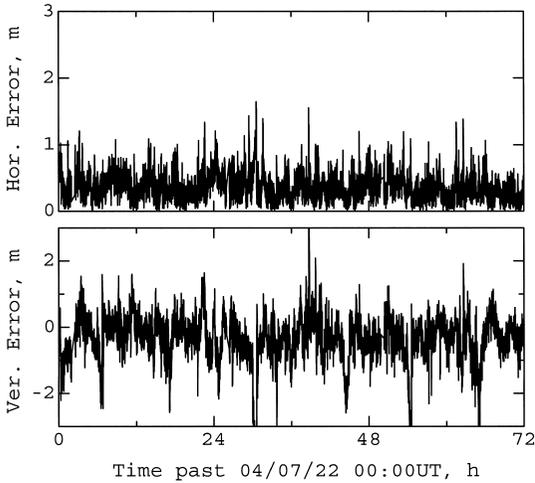


図3 ユーザ局(御前崎)における測位誤差(QZSS 5局, 一周波)
Fig. 3 Position error at Omaezaki (QZSS 5 stations, single frequency).

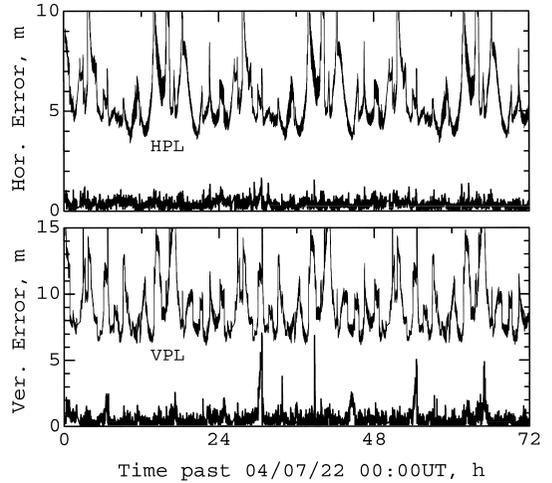


図5 測位誤差とプロテクションレベルの比較例(御前崎, QZSS 5局)
Fig. 5 Protection levels bounding the actual user errors (at Omaezaki, QZSS 5 stations).

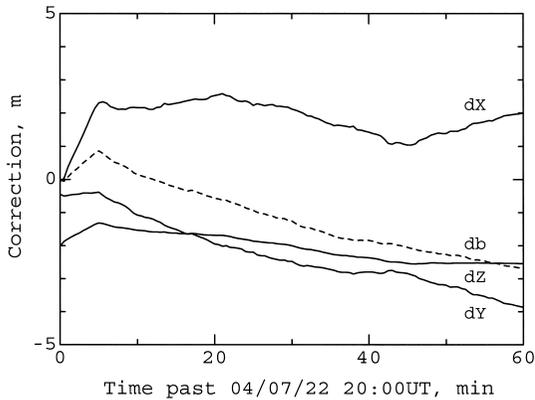


図4 衛星軌道及びクロックの補正量 (PRN01)
Fig. 4 Orbit and clock corrections (PRN01).

ルマンフィルタによる推定処理は正常に実行されているものとする。

4.4 MSAS モニタ局配置による評価

次に、我が国が開発中の MSAS (の国内局) に近い 6 モニタ局の場合の性能評価を試みた。モニタ局は日本本土を中心に (QZSS に比べて) コンパクトに配置されているが、結果としては表 4 下段のとおり QZSS の局配置に比べておおむね良好な性能が得られた。すなわち、サービスエリア内のユーザに対して有効な広域ディファレンシャル補強情報を得るには、サービスエリアをカバーしてさえいれば衛星軌道を必ずしも正確に補正する必要はないわけで、むしろコンパクトな

モニタ局配置の方が有利であることが分かった。

ただし、サービスエリア端部における測位精度については更に検証を要する。また、例えば MSAS 局配置の方が (モニタ局配置がコンパクトなため) 補強対象衛星数が多めになるものと考えたが、実際には大きな差はなかった。

4.5 インテグリティ性能の評価

航空機の航法に用いられる SBAS の最大の目的は、測位精度向上よりもむしろインテグリティ情報の提供にあるともいえる。SBAS ではプロテクションレベル方式によりインテグリティ機能を実現している旨を 2.1 に述べたが、今回作成したプロトタイプでもこのために必要な情報を出力しており、ユーザ側でプロテクションレベルを求めることができる。

実際にプロテクションレベルを計算した結果の例を、図 5 に示す。上段は水平方向、下段には垂直方向について、測位誤差 (絶対値) 及びプロテクションレベル (水平方向: HPL, 垂直方向: VPL) を表示してある。いずれも、測位誤差がプロテクションレベルを超えるような事象は発生しておらず、式 (1) の条件は満たされていることを確認した。

5. むすび

GPS 広域補強システムの唯一の国際標準である SBAS 方式を具体例として、広域補強情報の内容とその生成方法について述べるとともに、プロトタイプに

よる性能評価結果を報告した。現在我が国が開発中の QZSS (準天頂衛星システム) が放送するサブメータ級補強信号は SBAS 方式をベースに開発することとされており、本論文の検討結果をそのまま利用できる。

プロトタイプを用いて性能評価を実施した結果、5 モニタ局の観測データから生成した補強情報により、強い磁気嵐が発生していない限り水平・垂直とも測位誤差を 1 m 以内 (単独測位の 1/2 ~ 1/4 程度) に抑えられることを確認した。広域補強情報の情報は、SBAS と同じ毎秒 250 ビットである。ユーザ局の位置によっては、水平方向では 50 cm 以下の測位精度を達成している。ただし、強い磁気嵐のもとでは測位性能が劣化しており、この対策は今後の課題である。

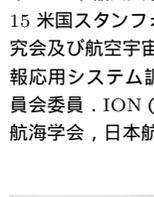
本評価においては現在規定されている SBAS フォーマットを用いて得られる測位精度の程度を知ingことを目的としており、性能向上のために拡張メッセージの追加のような工夫をしているわけではない。電離層遅延推定アルゴリズムについても、現在の SBAS が採用している手法をそのまま実装してある。本評価結果をベースとして、日本付近に適した補正アルゴリズムを検討し、また性能向上が可能となる QZSS 向け拡張メッセージの仕様について検討・提案することが当面の課題である。

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,” 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,” GPS/GNSS シンポジウム, pp.59–63, Nov. 2005.
- [4] 宮野智行, 沢辺幹夫, 福島荘之介, 森川容雄, 岸本 仁, 柴崎亮介, 飯島 淳, “QZSS の可能性,” 日本航海学会 GPS/GNSS シンポジウム, pp.75–110, Nov. 2004.
- [5] Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, DO-229C, RTCA, Nov. 2001.
- [6] C. Kee, “Wide area differential GPS,” Global Positioning System: Theory and Applications, vol. II, pp.81–115, AIAA, 1996.
- [7] 坂井文泰, “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.
- [8] Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, Interface Control Document, ICD-GPS-200, Rev. C, Jan. 2003.
- [9] T. Walter, A. Hansen, J. Blanch, P. Enge, T. Manucci, X. Pi, L. Sparks, B. Iijima, B. El-Arini, R. Lejeune, M. Hagen, E. Altshuler, R. Fries, and A. Chu, “Robust detection of ionospheric irregularities,” Proc. 13th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS), pp.209–218, Salt Lake City, UT, Sept. 2000.
- [10] 坂井文泰, “GPS による電離層全電子数観測のためのバイアス誤差推定法,” 信学論 (B), vol.J88-B, no.12, pp.2382–2389, Dec. 2005.
- [11] B. Wilson, C. Yinger, W. Feess, and C. Shank, “New and improved: The broadcast interfrequency biases,” GPS World, pp.56–66, Sept. 1999.
- [12] J. Klobuchar, P. Doherty, M. Bakry El-Arini, R. Lejeune, T. Dehel, E.R. dePaula, and F.S. Rodrigues, “Ionospheric issues for a SBAS in the equatorial region,” Proc. 10th Int. Ionospheric Effects Symposium, 2A7, Alexandria, VA, May 2002.
- [13] 国土地理院: 電子基準点とは
(http://mekira.gsi.go.jp/inet_NEW/kijun_1.html)
(平成 17 年 8 月 3 日受付, 11 月 8 日再受付)



坂井 文泰 (正員)



平 6 早大・理工・電気卒。平 8 同大学院修士課程了。同年運輸省電子航法研究所入所。GPS による航空航法システムの研究に従事。平 10 本会第 10 回回路とシステム軽井沢ワークショップ奨励賞, 平 17 IEEE AES Japan Chapter 優秀論文賞。平 13 ~ 早稲田大学理工学総合研究センター客員研究員, 平 14 ~ 15 米国スタンフォード大学客員研究員。日本航海学会 GPS 研究会及び航空宇宙研究会運営委員, 電気学会通信・高度位置情報応用システム調査専門委員会委員, MSAS 技術評価検討委員会委員。ION (米国航法学会), RIN (英国航法学会), 日本航海学会, 日本航空宇宙学会各会員。博士 (工学)。



福島荘之介 (正員)

昭 60 航空保安大・航空電子卒, 平 4 電通大・電子情報卒, 平 6 同大学院前期博士課程・情報ネットワーク学専攻了。現在, 独立行政法人電子航法研究所主任研究員, GPS による航空機の進入着陸システムの研究, 準天頂衛星による GPS 補強システムの研究に従事。東京海洋大学博士後期課程在学中。



新井 直樹 (正員)

平 2 東海大・工・電子卒．平 4 同大大学院修士課程了．同年 NEC (株) 入社．高周波回路及びレーザ応用機器の開発に従事．平 6 運輸省電子航法研究所入所．以来，GPS，GLONASS 等の航法衛星システムに関する研究に従事．平 17 東京商船大学大学院博士課程了．日本測地学会，日本航海学会各会員．博士 (工学)．



伊藤 憲 (正員)

東工大大学院修了後，運輸省電子航法研究所 (現独立行政法人電子航法研究所) 入所．衛星航法システムの研究に従事．現在，準天頂衛星を用いる高精度測位補正システムの開発を担当．