

2.4 準天頂衛星サブメータ級補強機能の性能評価

坂井 丈泰（電子航法研究所）

sakai@enri.go.jp

2.4.1 はじめに

日本全国規模の広い範囲にわたって GPS の性能を向上させるためには、たと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、さら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航空航法用に開発されている SBAS (satellite-based augmentation system : 静止衛星型衛星航法補強システム) がある。

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、測位機能の一部としてこうした GPS 補強情報を放送する計画である [1]。準天頂衛星はいわゆる 8 の字軌道を採用するため、ユーザに対する衛星の仰角を高くできることから都市部や山間部における通信・測位に有効とされる。すなわち、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、稼働率が高く、かつ測位精度および信頼性にすぐれた測位システムを構築することとしている。

この QZSS について、電子航法研究所では補強機能の一部であるサブメータ級補強信号 (L1-SAIF) の開発を担当している。これは広域ディファレンシャル補正方式によりユーザ測位精度および信頼性の向上を図るもので、サブメータ程度の測位精度を目標としている。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あわせて測位性能を評価したので、その概要と結果を報告する。250 bps のデータレートがあれば、水平・垂直とも測位誤差を 1 m 以内に抑えられる見通しを得た。

2.4.2 サブメータ級補強信号

準天頂衛星は、GPS と同一の L1 周波数 (1575.42 MHz) にて測位補完信号およびサブメータ級補強信号 (L1-SAIF : submeter-class augmentation with integrity function) を放送する計画である。L1-SAIF サブメータ級補強信号の目的は、移動体向けにサブメータ程度の測位精度の位置情報をリアルタイムに提供することであって、インテグリティ情報も含むこととされている。以下、このサブメータ級補強信号の内容について述べる。

2.4.2.1 信号形式

補強信号については GPS と同じ C/A コードによる拡散変調方式が採用される見込みであって、変調速度も GPS と同じ 1.023 Mcps が予定されている。GPS と同一の周波数および変調方式であることから、L1-SAIF 信号のユーザ側アンテナは GPS と同一のものでよい。また受信機についても、ディジタル信号処理回路の手前までは同一の回路で対応できる。出力される位置情報も、GPS に対して精度が向上しているほかは基本的に同一（時刻、経緯度および高度）であって、受信機出力を利用するアプリケーションも特に変更する必要があるわけではない。ただし、L1-SAIF 信号で付加されているインテグリティ情報を利用する場合は、これに対応する処理が必要となる。L1-SAIF 信号と GPS 信号の互換性を、図 1 に整理した。

L1-SAIF 信号に乘せられているインテグリティ情報およびディファレンシャル補正情報については、受信機内部のディジタル信号処理回路に復調機能を追加することで情報として取り出すことができる。これらの情報を適用すればインテグリティ情報付きのサブメータ級測位が可能となるわけであるが、その演算処理は受信機内部で行うか、あるいは外部の

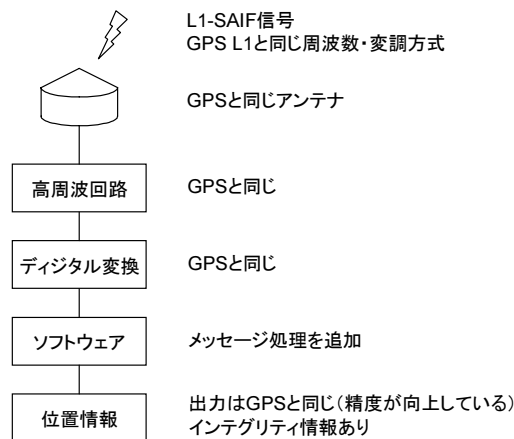


図 1: L1-SAIF 信号と GPS の互換性.

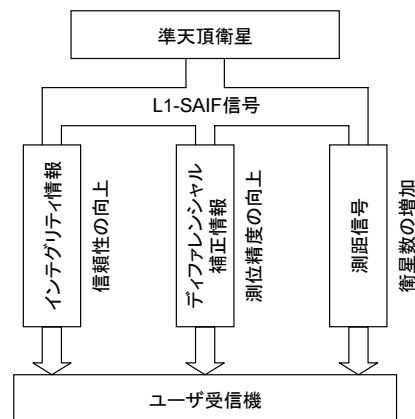


図 2: L1-SAIF 信号の三機能.

表 1: L1-SAIF の PRN コード.

QZSS 衛星 ID	PRN 番号	G2 遅れ	最初の 10 チップ
1	200	942	1110011000
2	201	173	0101111001
3	202	900	0111011010
4	176	846	1101011101
予備	189	87	1100111000
予備	190	572	0101011001
予備	196	189	0100111010
予備	197	263	1010011111
予備	204	54	0111010010
予備	209	652	1000010100

計算機にて実行することも可能である。

L1-SAIF 信号の拡散コードは GPS の C/A コードと同一（従って SBAS と同じ）の論理回路により生成されることとしており、現在のところの候補は表 1のとおりである。これらのコードの使用については日米間で調整中であり、今後変更される可能性がある。

2.4.2.2 補強信号の機能

L1-SAIF 信号は、図 2に示す三機能をユーザ受信機に提供する。インテグリティ情報とは後述する信頼性に関する情報であって、これを提供することはリアルタイムな安全性が重要視される交通機関等の分野においては不可欠な機能である。ディファレ

ンシャル補正情報は測位精度を向上させるための補正值で、広域ディファレンシャル補正方式を採用することにより大陸規模の広範囲で有効な補正情報とすることができる。さらに、GPS と同一の信号形式を採用していることにより、L1-SAIF 信号は測距機能をもあわせ持つ。すなわち、GPS 衛星と同様の測距源として機能することにより衛星数を増加させる効果があるわけで、都市部や山間部におけるアベイラビリティ向上に有効である。

広域補強システムである SBAS の基本的な目的は、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、すなわち、GPS 衛星の軌道情報誤差、クロック誤差、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。ユーザ受信機は自己の位置に基づいてディファレンシャル補正值を計算し、擬似距離に対して適用することで測位精度の改善を図る。

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が、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

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

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限界値 (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ことがアベイラビリティの向上につながるわけで、上の関係式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。

2.4.2.3 SBAS メッセージ

L1-SAIF 信号のソフトウェア的な内容としては、基本的には SBAS 方式を採用する方針である。これは国際民間航空機関 (ICAO : international civil aviation organization) が制定した規格であって、人工衛星を利用する GPS 補強システムの唯一の国際標準である /2/。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、ベースとしてはすで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 が未使用となっている。

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 2 に示す。メッセージタイプ 2~6 は高速補正 (fast correction)、25 は長期補正 (long-term correction)、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、補強対象の衛星がたとえば 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。

表中の $UDREI^j, GIVEI_k$ がインテグリティ情報であって、これら以外はすべてディファレンシャル補正情報である。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。たとえば、長期補正情報を適用するには航法メッセージにより求めた衛星位置およびクロック補正值 $\bar{x}^j, \Delta \bar{t}_{SV}^j$ に補正值を加えることとされており、したがって衛星位置としては

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

また補正後の衛星クロックは

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

を用いることとなる (j は衛星番号, GPS ICD /3/ も参照のこと)。同様に、擬似距離については

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

として補正することとなり、 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。

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。各メッセージには 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。

2.4.3 プロトタイプによる性能評価

サブメータ級補強機能により実際に得られる性能を評価するために、サブメータ級補強システムのプロトタイプを実装した。プロトタイプにより実際に補強情報を生成し、これ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評価できる。

2.4.3.1 プロトタイプシステムの概要

本プロトタイプはサブメータ級補強システム 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

表 2: SBAS 補正メッセージ (一部) .

タイプ	データ数	内容	範囲	単位	最大間隔	説明
2-5	13 衛星	FC^j	± 256 m	0.125 m	60 s	高速補正值
		$UDREI^j$	0-15	—	6	インテグリティ情報
6	51 衛星	$UDREI^j$	0-15	—	6	インテグリティ情報
24	6 衛星	FC^j	± 256 m	0.125 m	60	高速補正值
		$UDREI^j$	0-15	—	6	インテグリティ情報
	2 衛星	Δx^j	± 32 m	0.125 m	120	衛星位置補正
		Δy^j	± 32 m	0.125 m	120	衛星位置補正
		Δz^j	± 32 m	0.125 m	120	衛星位置補正
		Δb^j	$\pm 2^{-22}$ s	2^{-31} s	120	衛星クロック補正
25	4 衛星	Δx^j	± 32 m	0.125 m	120	衛星位置補正
		Δy^j	± 32 m	0.125 m	120	衛星位置補正
		Δz^j	± 32 m	0.125 m	120	衛星位置補正
		Δb^j	$\pm 2^{-22}$ s	2^{-31} s	120	衛星クロック補正
26	15 IGP	I_k^V	0-63.875 m	0.125 m	300	電離層遅延補正
		$GIVEI_k$	0-15	—	300	インテグリティ情報

UNIX マシン上で動作する．モニタ局から収集した観測データに基づいて補強情報を生成し，これを SBAS メッセージに編集してバイナリデータと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 GEONET による観測データ（二周波，30 秒サンプルの RINEX ファイル）を利用した．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（キャリアスミージングも行わない）．GEONET の観測データは OBS ファイルしか提供されていないため，航法メッセージについては IGS サイト mtka（東京都調布市）によるログを利用した．

現在規定されている SBAS メッセージのみでどの程度までの補正が可能であるかを調べる必要があることから，本プロトタイプでは SBAS メッセージの拡張は特に行っていない（現在の規定 /2/ 通り）．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 が出力するログファイル（\$FRMA レコード）と互換な形式とした．メッセージがユーザ受信機に到達するまでの伝搬遅れは 0.13 秒（静止衛星と同じ）とした．

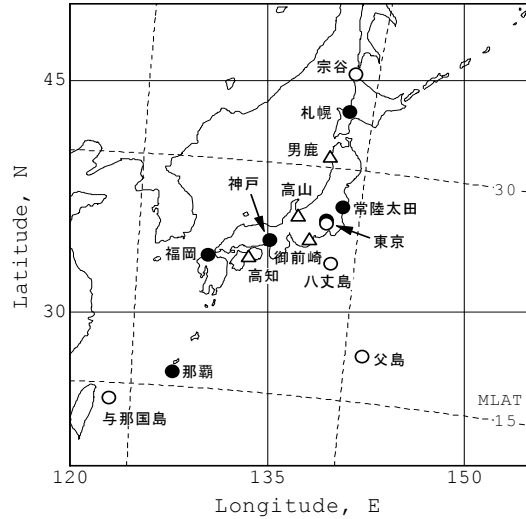


図 3: モニタ局の配置 (● : MSAS 局, ○ : QZSS 局, △ : ユーザ局) .

補強情報を生成するアルゴリズムは，広域ディファレンシャル補正システムで標準的と思われるものである /4/. 電離層補正方式については米国 WAAS で採用されている planar fit 方式 /5/ をそのまま実装してあるが，磁気嵐モニタ (storm detector) は省略した．このため，磁気嵐状態では補正精度の低下が予想される．

表 3: 使用した GEONET 局.

ID	基準点名	北緯 (度)	東経 (度)	楕円体高 (m)	備考
MSAS 対応局					
950128	札幌	43.0	141.3	204.7	札幌 GMS
950214	北茨城	36.8	140.8	75.9	常陸太田 MCS
93011	川越	35.9	139.5	62.9	東京 GMS
950356	神戸中央	34.7	135.2	84.8	神戸 MCS
940087	古賀	33.7	130.5	49.0	福岡 GMS
940100	玉城	26.1	127.8	127.5	那覇 GMS
QZSS 対応局					
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

2.4.3.2 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 OBS 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ものである。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 メッセージを解読したうえでこれを適用し、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（米国が運用中の SBAS）が放送した補強情報を米国内の IGS サイト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。

ユーザ局データについても、GEONET による観測データ（30 秒サンプルの RINEX ファイル）を利用した。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、200 秒程度の時定数によるキャリアスモーキングを施してある。航法メッセージについては、MCS プロトタイプと同

様に IGS サイト mtka を利用した。

2.4.3.3 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。ただし南鳥島については、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 3 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 4 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する。

補強システムを用いない場合の GPS 単独測位方式による測位誤差の例を、図 4 に示す。これは時期 II の御前崎局における測位誤差で、水平誤差は 1.8 m、垂直誤差は 3 m 程度（いずれも RMS 値）であった。各ユーザ局の測位精度は表 5 上段のとお

表 4: 評価対象とした時期.

時期	状況	日付	Kp 指数 最大値
I	静穏	2004 年 6 月 22～24 日	2
II	磁気嵐	2004 年 7 月 22～24 日	7
III	強い磁気嵐	2004 年 11 月 8～10 日	9-

りであって、時期 I および II では大きな差がなく、コサインモデルによる電離層伝搬遅延補正がある程度は機能していることがうかがえる。

サブメータ級補強システムプロトタイプにより 5 モニタ局の観測データから補強情報を生成し、ユーザ局にて適用した結果は、表 5 中段のとおりであった。強い磁気嵐が発生していない限り水平・垂直とも 1 m 以内に収まっており、単独測位の場合と比べると $1/2 \sim 1/4$ 程度に抑えられている。ユーザ局によっては、水平方向では 50 cm 以下の測位精度を達成している。強い磁気嵐のもとでは測位性能が劣化していることから、システム全体の性能向上を図るためには電離層遅延補正方式の改善が有効と思われる。

御前崎局における測位誤差の様子を、図 5 に示す。図 4 と比較すると、数分以上の周期の誤差成分はよく補正されていることがわかる。短周期の誤差が大きいの今回は使用している（ユーザ局）データが 30 秒サンプルのためであり、実際に用いられる 1 秒サンプルデータではキャリアスムージングにより効果的に働き、測位誤差の高周波成分を抑制できるものと考ええる。

水平方向の測位誤差について、単独測位との比較を図 6 に示す。補強情報の適用により測位結果が原点付近に集められており、ディファレンシャル補正が有効に機能していることがわかる。

衛星位置およびクロックの補正量（長期補正）の例を、図 7 に示す。いずれも数 m 以内に収まっており、カ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考ええる。

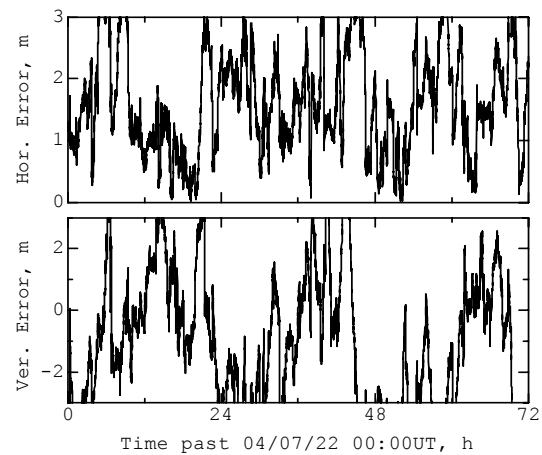


図 4: ユーザ局（御前崎）における測位誤差（単独測位，一周波）。

2.4.3.4 MSAS モニタ局配置による評価

次に、参考のために我が国が運輸多目的衛星（MTSAT=ひまわり 6 号）を用いて開発中の SBAS である MSAS と同じ 6 モニタ局の場合の性能評価を試みた。結果は表 5 下段のとおりで総じて QZSS の局配置に比べて良好な性能が得られたが、これはモニタ局が日本本土を中心に（QZSS に比べて）コンパクトに配置されているためである。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ほうが有利であることがわかった。

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さらに検証を要する。また、たとえば MSAS 局配置のほうが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。

表 5: 測位精度の比較 (RMS 値, 単位 [m]) .

時期	男鹿		御前崎		高山		高知	
	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
単独測位 (補強なし)								
I	1.566	3.003	1.909	3.083	1.813	3.300	1.627	3.020
II	1.863	3.349	1.842	2.958	1.929	3.305	1.837	3.058
III	3.151	4.867	3.585	5.624	3.125	5.342	3.171	5.143
QZSS 5 局								
I	0.688	0.854	0.471	0.822	0.510	0.775	0.627	0.920
II	0.657	0.744	0.423	0.833	0.470	0.719	0.709	0.885
III	2.958	2.561	1.641	2.046	1.756	2.119	1.552	2.455
MSAS 6 局								
I	0.674	0.744	0.437	0.746	0.462	0.693	0.450	0.727
II	0.691	0.748	0.423	0.692	0.453	0.640	0.479	0.653
III	2.008	2.561	1.375	1.659	1.257	1.624	1.265	1.815

(一周波, 30 秒サンプル, キャリアスムージングあり)

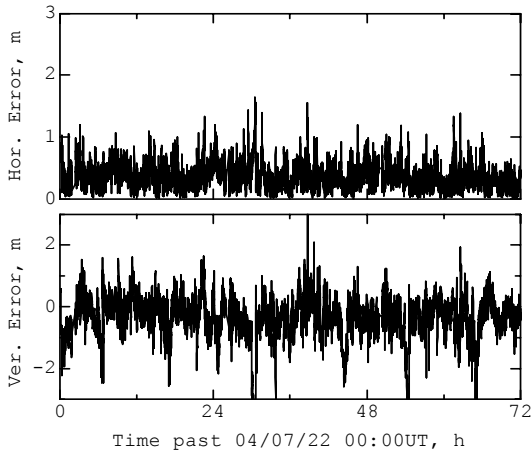


図 5: ユーザ局 (御前崎) における測位誤差 (QZSS 5 局, 一周波) .

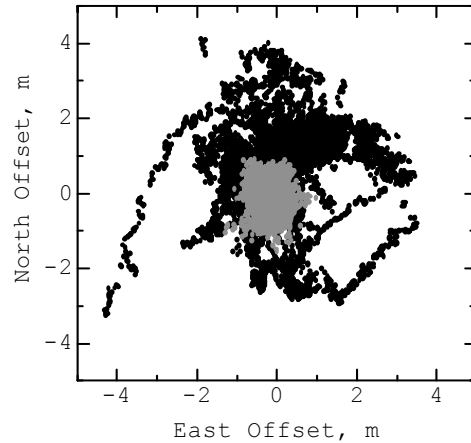


図 6: 測位誤差の比較 (黒: 単独測位, 灰: 補強情報適用後).

2.4.3.5 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. 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先に述べたが, 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 8 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) およびプロテク

ションレベルを表示してある. 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. たとえば, $VPL < 20$ m となる割合 (垂直誘導付進入 APV-II モードのアベイラビリティに相当) は, 4 ユーザ局の平均で 99.3% 程度 (時期 II) であった.

2.4.4 むすび

現在我が国が開発中の準天頂衛星システム (QZSS) が放送する計画であるサブメータ級補強

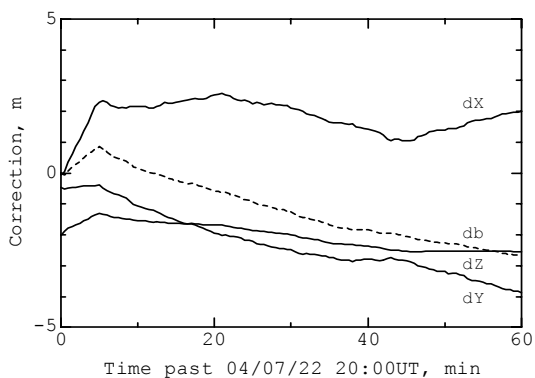


図 7: 衛星軌道およびクロックの補正量 (PRN01) .

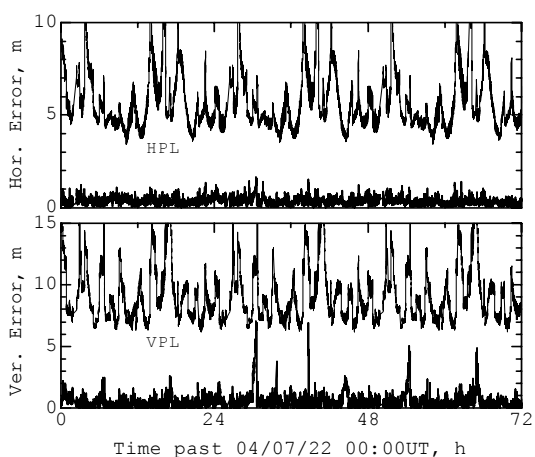


図 8: 測位誤差とプロテクションレベルの比較例 (QZSS 5 局) .

信号 (L1-SAIF 信号) について, 補強情報の内容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. このサブメータ級補強機能は広域ディファレンシャル補正方式によりユーザ測位精度の向上を図るものであり, SBAS 方式に基づいて補強メッセージを設計する方針である.

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 $1/2 \sim 1/4$ 程度) に抑えられることを確認した. 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おり, 250 bps のデータレートがあればサブメータ級の広域補強情報を十分に伝送可能との見通しを得た. 強い磁気嵐のもとでは測位性能が劣

化していることから, システム全体の性能向上を図るためには電離層遅延補正方式の改善が有効と思われる.

今回作成したプロトタイプの目的は SBAS 方式 (および 250 bps のデータレート) で所要の補正性能が得られることを確認することであって, 現在の SBAS と比較して特別に性能向上のための工夫をしているわけではない. 特に, 電離層遅延推定アルゴリズムについては米国 WAAS が採用している手法をそのまま実装しただけで, 磁気嵐モニタは省略してある. したがって, 本プロトタイプによる評価結果についてはさらなる性能向上の余地があり, たとえば電離層遅延補正の改良方式 /6/ を評価する必要がある.

また, ユーザ受信機側の処理についても, 1 秒サンプルのデータを用いていないことから雑音が多く含まれており, 実際にはキャリアスミージングにより効果的に作用するものと考ええる. これらの点について改良し, プロトタイプシステムのリアルタイム化を図ることが当面の課題である.

参考文献

- /1/ 宮野他, “QZSS の可能性”, 日本航海学会 GPS/GNSS シンポジウム 2004, pp. 75–110, Nov. 2004.
- /2/ *International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications*, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, vol. I, ICAO, Nov. 2002.
- /3/ *Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces*, Interface Control Document, ICD-GPS-200, rev. C, Jan. 2003. (<http://www.navcen.uscg.gov/> で入手可能)
- /4/ 坂井, 福島, 新井, 伊藤, “準天頂衛星サブメータ級補強機能の性能評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 105, no. 208, pp. 25–30 (SANE2005-44), July 2005.
- /5/ T. Walter, et.al., “Robust Detection of Ionospheric Irregularities,” *Proc. ION GPS*, pp. 209–218, Salt Lake City, UT, Sept. 2000.
- /6/ T. Sakai, K. Matsunaga, K. Hoshinoo, and T. Walter, “Modified Ionospheric Correction Algorithms for the SBAS Based on Geometry Monitor Concept,” *Proc. ION GNSS*, Long Beach, CA, Sept. 2005.