

# GPS 広域補正によるサブメータ級測位 試験評価結果

笠井 晶二

(有)笠井デザインオフィス 〒206-0801 東京都稲城市大丸33-7

E-mail: kasaido@tky.3web.ne.jp

あらまし GPS 広域補正による測位精度試験結果。地滑り検出への適用可能性。

キーワード GPS 広域補正, 補正測位, 電離層遅延, 衛星軌道・時計誤差, 磁気嵐, 地滑り

## Experimental Results of Sub-meter class WDGPS

Shoji KASAI

Kasai Design Office Ltd. 33-7 Oomaru, Inagi, Tokyo, 206-0801 Japan

E-mail: kasaido@tky.3web.ne.jp

**Abstract** Experimental results of WDGPS,

**Keyword** GPS, WADGPS, Ionospheric Delay, Satellite Orbit and Clock Error, Magnetic Storm

### 1. はじめに

我々が開発した GPS 広域補正システムは国土地理院の GPS 観測網（緯度・経度 1 度間隔に 1 観測点、全国で 90 点程度）を利用して電離層遅延量及び衛星軌道・時計誤差を推定し 1 擬似距離を使用する 1 周波ユーザ向けに補正情報をリアルタイムで配信するシステムである。補正情報を受信したユーザは概略位置及び受信遅れ時間に基づき補正情報を補完し、L1 擬似距離観測データを補正して測位を実施する。本発表では実証試験結果に基づいて我々の GPS 広域補正システムがサブメータ級（またはデシメータ級）の補正精度を有し、大規模な磁気嵐の際でもサブメータ級の補正精度を維持することを示す。

### 2. L1 擬似距離による測位

#### 2.1 L1 擬似距離の観測誤差

1 周波ユーザが使用する L1 擬似距離観測データは以下の式に示すように各種の誤差を含んでいる。

$$PR_r^s(t) = \rho_r^s(t) + c\{dT_r(t) - dT^s(t)\} + T_r^s(t) + I_r^s(t) + E_r^s(t)$$

$$\rho_r^s(t) = \sqrt{(x^s(t) - x_r(t))^2 + (y^s(t) - y_r(t))^2 + (z^s(t) - z_r(t))^2}$$

$$PR_r^s(t): \text{L1 擬似距離観測データ}(r: \text{受信機ID}, s: \text{衛星ID}, t: \text{時刻})$$

$$\begin{cases} x^s(t), y^s(t), z^s(t): \text{衛星位置} \\ x_r(t), y_r(t), z_r(t): \text{ユーザ位置} \\ dT^s(t): \text{衛星時計誤差} \\ dT_r(t): \text{受信機局時計誤差} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_r^s(t): \text{L1電離層遅延量} \\ T_r^s(t): \text{対流圏遅延量} \\ E_r^s(t): \text{擬似距離観測ノイズ} \\ c: \text{光速} \end{cases}$$

放送暦を適用し GPS 衛星の位置及び衛星時計誤差を求めた場合、L1 擬似距離観測データに含まれる誤差は次のように表される。

$$PR_r^s(t) + c \cdot d\bar{T}^s(t)$$

$$= \{\bar{\rho}_r^s(t) - \Delta\rho_r^s(t)\} + c\{dt_r(t) - \Delta dt^s(t)\} + T_r^s(t) + I_r^s(t) + E_r^s(t)$$

$$\begin{cases} \Delta\rho_r^s(t) = \bar{\rho}_r^s(t) - \rho_r^s(t) \\ \bar{\rho}_r^s(t) = \sqrt{(\bar{x}^s(t) - x_r(t))^2 + (\bar{y}^s(t) - y_r(t))^2 + (\bar{z}^s(t) - z_r(t))^2} \\ \Delta dT^s(t) = d\bar{T}^s(t) - dT^s(t) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{x}^s(t), \bar{y}^s(t), \bar{z}^s(t): \text{放送暦による衛星位置} \\ \bar{\rho}_r^s(t): \text{放送暦による衛星位置とユーザ間距離} \\ d\bar{T}^s(t): \text{放送暦による衛星時計誤差} \\ \Delta\rho_r^s(t): \text{放送暦による衛星位置誤差の視線方向射影成分} \\ \Delta dT^s(t): \text{放送暦による衛星時計誤差補正残差} \end{cases}$$

#### 2.2 広域補正システムによる補正測位

本 GPS 広域補正システムでは放送暦適用後の上記の誤差の内、対流圏遅延量は Saastamoinen モデルで補正し、電離層遅延量及び放送暦による衛星軌道・時計誤差は GPS 広域補正システムから配信された電離層遅延補正情報及び衛星誤差補正情報にて補正することにより L1 擬似距離のみで高精度の測位を実施する。

### 3. 広域補正情報生成

国土地理院の GPS 観測網の 30 秒観測データを利用して、電離層遅延量及び衛星軌道・時計誤差の補正情報を生成・配信する。

表 3.1 広域補正情報生成観測データ

基準観測点	国土地理院電子基準点から緯度・経度1度間隔に1観測点を選択、全国で90点程度。
観測周期	30秒
観測データ	L1/L2擬似距離・搬送波位相

表 3.2 広域補正情報生成

推定/配信状態量	電離層遅延補正值 衛星誤差補正值
推定/配信周期	30秒
推定方式	拡張カルマンフィルタ

図3に2004年11月6日の広域補正情報生成に使用したモニタ局配置を示す。

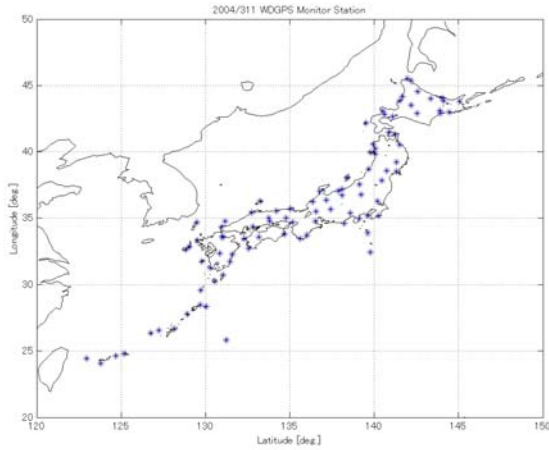


図 3. 2004年11月6日 基準観測点配置

#### 4. 通常時の広域補正測位精度

##### 4.1 誤差要因別補正測位精度解析結果

電離層遅延量及び衛星誤差の補正効果を示すため、東京を例に各種補正を実施した場合の測位精度を表1及び表2に示す。(補正情報配信遅延時間は1分とした。)

表 4.1-1 2004年11月6日 東京(3017)補正測位精度

東京(3017) 評価項目		測位方式		
		Trop	Trop +Iono	Trop +Sat
水平 位置誤差	平均値[m]	1.46	0.96	0.88
	標準偏差[m]	1.04	0.57	0.63
	RMS[m]	1.79	1.12	1.08
垂直 位置誤差	平均値[m]	-3.84	-0.45	-2.99
	標準偏差[m]	2.95	1.61	2.38
	RMS[m]	4.85	1.67	3.82
絶対 位置誤差	平均値[m]	4.33	1.79	3.16
	標準偏差[m]	2.82	0.91	2.40
	RMS[m]	5.17	2.01	3.97
UDRE	RMS[m]	2.49	1.17	1.44

表 4.1-2 2004年11月6日 東京(3017)補正測位精度

東京(3017) 評価項目		測位方式	
		Trop +Iono +Sat	Trop +Iono +Sat +Filt
水平 位置誤差	平均値[m]	0.23	0.06
	標準偏差[m]	0.13	0.03
	RMS[m]	0.26	0.06
垂直 位置誤差	平均値[m]	0.01	0.07
	標準偏差[m]	0.41	0.07
	RMS[m]	0.41	0.10
絶対 位置誤差	平均値[m]	0.42	0.10
	標準偏差[m]	0.24	0.05
	RMS[m]	0.49	0.12
UDRE	RMS[m]	0.27	0.27

測位方式の記号は以下の意味である。

Trop : Saastamoinen モデルによる対流圏遅延補正

Iono : 広域補正情報による電離層遅延補正

Sat : 広域補正情報による衛星誤差補正

Filt : カルマンフィルタによる測位

(位置プロセスノイズ 1cm/30sec)

以下に各測位方式の推定位置誤差グラフを示す。

(縦軸のスケールは測位方式毎に異なるので注意)

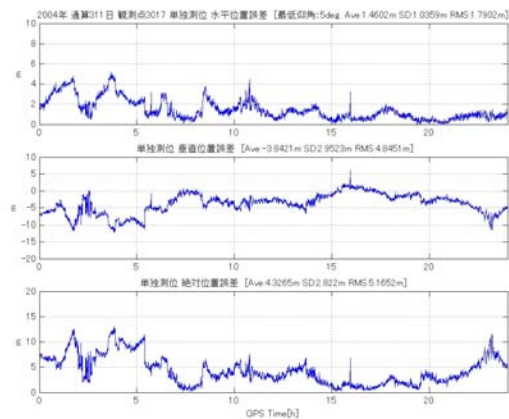


図 4.1-1 対流圏遅延補正

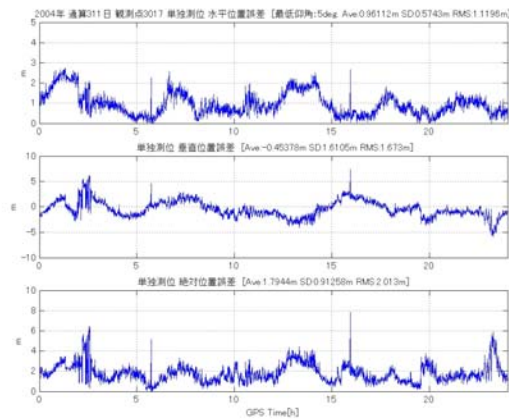


図 4.1-2 対流圏遅延+電離層遅延補正

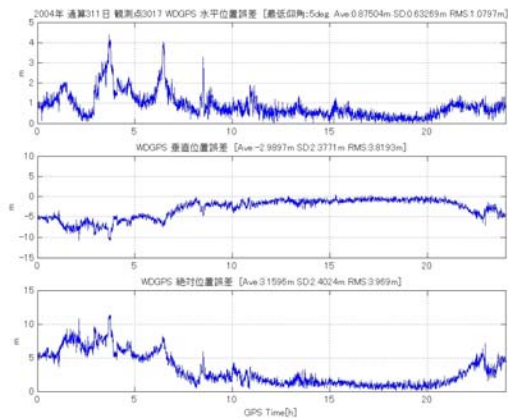


図 4.1-3 対流圏遅延+衛星誤差補正

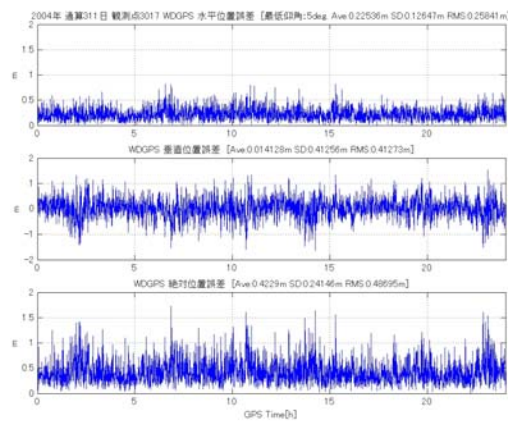


図 4.1-4 対流圏+電離層+衛星誤差補正

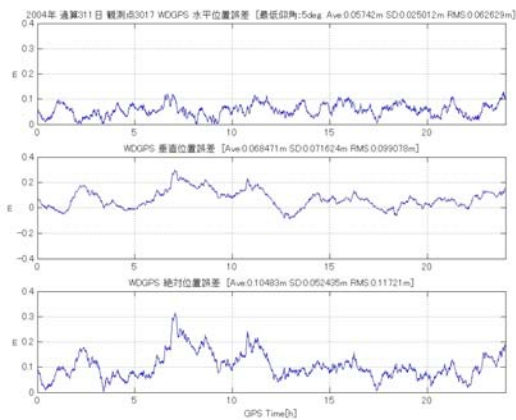


図 4.1-5 対流圏+電離層+衛星誤差補正+フィルタ

グラフより電離層遅延補正では電離層遅延量が大きい昼間の誤差及び垂直位置誤差が大幅に改善され、衛星誤差補正では電離層遅延の影響が少ない夜間の誤差が改善されることが判る。

電離層遅延+衛星誤差補正では UDRE が L1 擬似距離の受信機観測ノイズ+マルチパスの RMS とほぼ等しいことから、10cm オーダー以上の観測誤差はほとんど補正除去されていると考えられる。残る観測誤差は

受信機観測ノイズ+マルチパスとなり測位誤差はほとんどランダムとなる。そこで電離層遅延+衛星誤差補正に位置フィルタリングを実施した場合が最後のケースであり、搬送波位相を使用しない L1 擬似距離のみで水平位置誤差 RMS10cm 以下が実現可能であることを示している。

#### 4.2 国内主要都市の広域補正測位精度

表 4.2-1 及び表 4.2-2 に 2004 年 11 月 6 日の国内主要都市の広域補正による測位精度評価結果を以下に示す。

表 4.2-1 2004 年 11 月 6 日主要都市補正測位精度

観測点	対流圏+電離層+衛星誤差補正				
	水平位置誤差		垂直位置誤差		UDRE RMS [m]
	平均 [m]	偏差 RMS [m]	平均 [m]	偏差 RMS [m]	
札幌 (0128)	0.23	0.14 0.27	0.13	0.38 0.40	0.25
仙台 (0037)	0.20	0.11 0.23	0.11	0.33 0.35	0.23
東京 (3017)	0.23	0.13 0.26	0.01	0.41 0.41	0.27
大阪 (0353)	0.21	0.12 0.25	0.05	0.37 0.37	0.25
福岡 (1062)	0.22	0.13 0.26	0.00	0.41 0.41	0.24
那覇 (0740)	0.21	0.12 0.24	0.00	0.39 0.39	0.26

表 4.2-2 2004 年 11 月 6 日主要都市補正測位精度

観測点	対流圏+電離層+衛星誤差補正+フィルタ				
	水平位置誤差		垂直位置誤差		UDRE RMS [m]
	平均 [m]	偏差 RMS [m]	平均 [m]	偏差 RMS [m]	
札幌 (0128)	0.08	0.04 0.08	0.07	0.07 0.10	—
仙台 (0037)	0.04	0.02 0.05	-0.05	0.04 0.06	—
東京 (3017)	0.06	0.03 0.06	0.07	0.07 0.10	—
大阪 (0353)	0.06	0.04 0.07	0.08	0.07 0.11	—
福岡 (1062)	0.08	0.03 0.08	0.00	0.08 0.08	—
那覇 (0740)	0.09	0.05 0.10	0.07	0.11 0.13	—

位置フィルタリングを併用しない広域補正測位では観測点位置の南北による測位精度の差はなく全国でほぼ一定である。この測位方式は Epoch by epoch であることから移動体の測位に適用可能であり、この結果は広域補正システムが本システムより基準観測点網が

密な移動体向け VRS と同等の能力を持つことを示している。

位置フィルタリングを併用した場合、那覇の測位精度が若干劣化するものの全国でほぼ一定である。この結果は固定ユーザの場合、位置フィルタリングを実施すれば搬送波位相を使用せずに 10cm 以下の測位精度が達成可能であることを示している。

### 4.3 覆域周縁部の広域補正測位精度

広域補正を含むネットワーク補正システムでは一般に基準観測点ネットワークに囲まれた内部の測位精度は安定するがネットワーク外部及びネットワーク周縁部の測位精度が著しく劣化する場合がある。そこで基準点ネットワーク周縁部における広域補正測位精度の評価を実施した。図 4.3 に評価に使用した観測点位置を示す。紙数の関係から本報告では各観測点の位置フィルタリングを使用しない Epoch by epoch の広域補正測位による水平/垂直位置誤差 RMS 及び UDRE RMS を表 4.3 に示す。

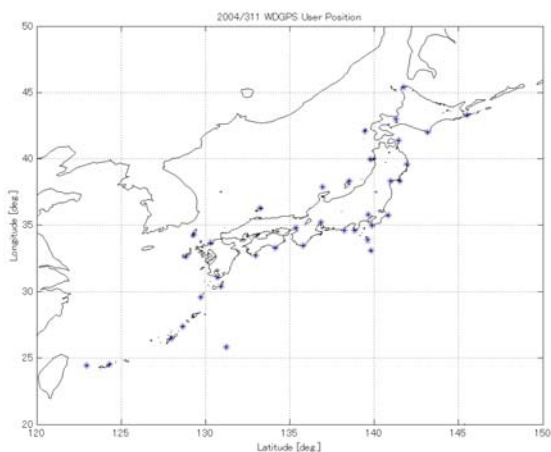


図 4.3 覆域周縁部の補正測位精度評価観測点配置

表 4.3 2004 年 11 月 6 日覆域周縁部補正測位精度

観測点	測位方式：対流圏＋電離層＋衛星誤差補正				
	観測点位置		位置誤差		UDRE RMS [m]
	緯度 [deg]	経度 [deg]	水平 RMS [m]	垂直 RMS [m]	
稚内 (0001)	45.4	141.8	0.22	0.32	0.21
根室 1 (0006)	43.3	145.5	0.39	0.59	0.32
奥尻 2 (0527)	42.1	139.4	0.27	0.39	0.27
襟裳 1 (0019)	42.0	143.2	0.30	0.43	0.26

表 4.3-2 2004 年 11 月 6 日覆域周縁部補正測位精度

観測点	測位方式：対流圏＋電離層＋衛星誤差補正				
	観測点位置		位置誤差		UDRE RMS [m]
	緯度 [deg]	経度 [deg]	水平 RMS [m]	垂直 RMS [m]	
東通 (0533)	41.1	141.4	0.34	0.53	0.30
男鹿 1 (0030)	40.0	139.8	0.25	0.35	0.24
宮古 (0028)	39.6	141.9	0.36	0.52	0.36
両津 1 (0232)	38.3	138.5	0.28	0.41	0.26
大山 (0550)	38.3	141.5	0.28	0.38	0.26
倉島 (0252)	37.9	136.9	0.25	0.36	0.26
五箇 (0382)	36.3	133.2	0.29	0.41	0.26
銚子 (3022)	35.7	140.8	0.25	0.36	0.25
館山 (3047)	35.0	139.9	0.29	0.42	0.28
美津島 (0457)	34.3	129.3	0.26	0.39	0.24
南伊豆 (3086)	34.6	138.8	0.23	0.35	0.23
御前崎 (3101)	34.6	138.2	0.22	0.33	0.22
串本 (0070)	33.5	135.8	0.28	0.45	0.28
室戸 (0082)	33.3	134.1	0.25	0.34	0.24
八丈 (5113)	31.1	139.8	0.25	0.41	0.26
土佐 (0085)	32.8	133.0	0.23	0.36	0.24
福江 (0462)	32.7	128.8	0.22	0.33	0.23
佐多 (0491)	31.1	130.7	0.21	0.33	0.22
南種子 (0726)	30.4	130.9	0.23	0.35	0.25
十島 (0729)	29.6	129.7	0.25	0.38	0.24
和泊 (0735)	27.4	128.7	0.22	0.38	0.23
南大東 (0497)	25.8	131.2	0.24	0.45	0.26
石垣 1 (0749)	24.5	124.3	0.29	0.51	0.27
与那国 (0499)	24.5	122.9	0.23	0.45	0.25

数箇所精度劣化が見られるが極端な精度劣化は発生していない。周縁部での精度劣化は主に本解析に使用した基準点配置が必ずしも周縁部に対しては最適ではない部分があることによる。

## 5. 大規模な磁気嵐の際の広域補正測位精度

2004年11月7日から8日に掛け大規模な磁気嵐が発生し8日20時頃(LT)に北海道で大幅な電子密度変動が記録された。図5-1に2004年11月8日の札幌、東京、那覇のVTEC、図5-2に2004年11月8日20時30分(LT)のVTECマップを示す。

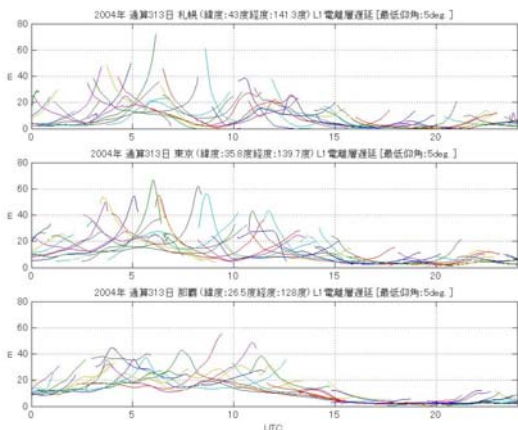


図 5-1 2004年11月8日 札幌、東京、那覇 VTEC

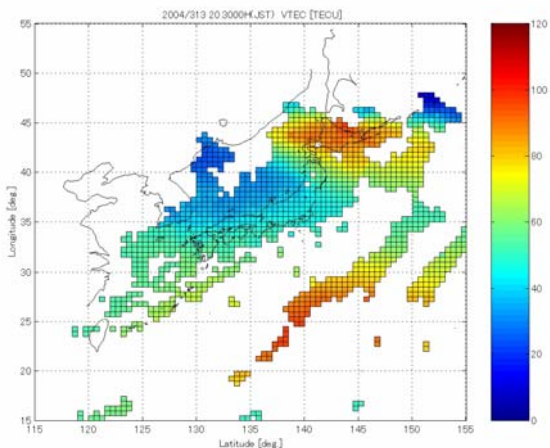


図 5-2 2004年11月8日20.5時(LT) VTEC マップ

### 5.1 主要都市の広域補正測位精度

表 5.1-1 及び表 5.1-2 に 2004 年 11 月 8 日の国内主要都市の広域補正による測位精度評価結果を以下に示す。電離層擾乱による電離層遅延補正精度劣化は避けられないがフィルタを併用しない場合、電離層平穩期の 11 月 6 日に比べ、若干の精度劣化はあるものの大幅な精度低下には至っていない。フィルタを併用した場合、全国で測位精度劣化が見られる。cm レベルでは電離層遅延補正精度劣化の影響が現れていると考えられる。

表 5.1-1 2004 年 11 月 8 日 主要都市補正測位精度

観測点	対流圏+電離層+衛星誤差補正				UDRE [m]
	水平位置誤差		垂直位置誤差		
	平均 [m]	偏差 RMS [m]	平均 [m]	偏差 RMS [m]	
札幌 (0128)	0.26	0.15 0.30	0.11	0.43 0.44	0.29
仙台 (0037)	0.22	0.13 0.25	0.11	0.37 0.38	0.25
東京 (3017)	0.25	0.14 0.28	0.05	0.45 0.45	0.29
大阪 (0353)	0.23	0.14 0.27	0.15	0.41 0.43	0.28
福岡 (1062)	0.24	0.14 0.28	0.07	0.43 0.44	0.26
那覇 (0740)	0.23	0.13 0.26	-0.02	0.40 0.40	0.27

表 5.1-2 2004 年 11 月 8 日 主要都市補正測位精度

観測点	対流圏+電離層+衛星誤差補正+フィルタ				UDRE [m]
	水平位置誤差		垂直位置誤差		
	平均 [m]	偏差 RMS [m]	平均 [m]	偏差 RMS [m]	
札幌 (0128)	0.12	0.02 0.12	0.00	0.01 0.02	—
仙台 (0037)	0.03	0.01 0.03	-0.12	0.02 0.12	—
東京 (3017)	0.08	0.01 0.08	0.01	0.02 0.02	—
大阪 (0353)	0.12	0.01 0.13	0.13	0.02 0.13	—
福岡 (1062)	0.11	0.01 0.11	-0.04	0.03 0.05	—
那覇 (0740)	0.10	0.03 0.10	0.00	0.02 0.02	—

### 5.2 覆域周縁部の広域補正測位精度

覆域周縁部では離島の覆域損失及び関東以北で明らかな精度劣化が見られるもののサブメータ級の精度は維持している。

表 5.2-1 2004 年 11 月 8 日 覆域周縁部補正測位精度

観測点	測位方式：対流圏+電離層+衛星誤差補正				
	観測点位置		位置誤差		UDRE RMS [m]
	緯度 [deg]	経度 [deg]	水平 RMS [m]	垂直 RMS [m]	
稚内 (0001)	45.4	141.8	0.31	0.45	0.30
根室 1 (0006)	43.3	145.5	0.39	0.63	0.38
奥尻 2 (0527)	42.1	139.4	0.33	0.50	0.32
襟裳 1 (0019)	42.0	143.2	0.44	0.61	0.36

表 5.2-2 2004 年 11 月 8 日覆域周縁部補正測位精度

観測点	測位方式：対流圏＋電離層＋衛星誤差補正				
	観測点位置		位置誤差		UDRE RMS [m]
	緯度 [deg]	経度 [deg]	水平 RMS [m]	垂直 RMS [m]	
東通 (0533)	41.1	141.4	0.39	0.60	0.35
男鹿 1 (0030)	40.0	139.8	0.29	0.49	0.30
宮古 (0028)	39.6	141.9	0.42	0.62	0.40
両津 1 (0232)	38.3	138.5	0.35	0.48	0.31
大山 (0550)	38.3	141.5	0.31	0.40	0.29
倉島 (0252)	37.9	136.9	0.33	0.46	0.33
五箇 (0382)	36.3	133.2	0.36	0.53	0.34
銚子 (3022)	35.7	140.8	0.33	0.49	0.34
館山 (3047)	35.0	139.9	0.36	0.51	0.34
美津島 (0457)	34.3	129.3	0.29	0.41	0.27
南伊豆 (3086)	34.6	138.8	0.29	0.40	0.27
御前崎 (3101)	34.6	138.2	0.27	0.37	0.27
串本 (0070)	33.5	135.8	0.36	0.52	0.33
室戸 (0082)	33.3	134.1	0.32	0.60	0.34
八丈 (5113)	31.1	139.8	—	—	—
土佐 (0085)	32.8	133.0	0.28	0.43	0.29
福江 (0462)	32.7	128.8	0.24	0.33	0.25
佐多 (0491)	31.1	130.7	0.26	0.57	0.31
南種子 (0726)	30.4	130.9	0.27	0.43	0.28
十島 (0729)	29.6	129.7	0.27	0.41	0.26
和泊 (0735)	27.4	128.7	0.23	0.40	0.24
南大東 (0497)	25.8	131.2	0.27	0.54	0.27
石垣 1 (0749)	24.5	124.3	0.28	0.44	0.26
与那国 (0499)	24.5	122.9	0.25	0.41	0.26

## 6. 広域補正測位による地滑り検出

最後に広域補正測位によるリアルタイム地滑り検出の可能性を検証する試験結果を示す。2003年9月25日 19時58分(UT)に発生した十勝沖地震により襟裳

1(0019)が70cm程度移動した。襟裳1に最も近い基準観測点 音別(0112)も同方向に30cm移動しており、相対移動量は約40cmとなり、広域補正測位で検出した移動量に等しい。図6-1及び図6-2に襟裳1の地震による移動を広域補正測位により捉えた結果を示す。

この結果より10cm以上の地滑りならば広域補正測位によりリアルタイムに検出可能であることが期待される。

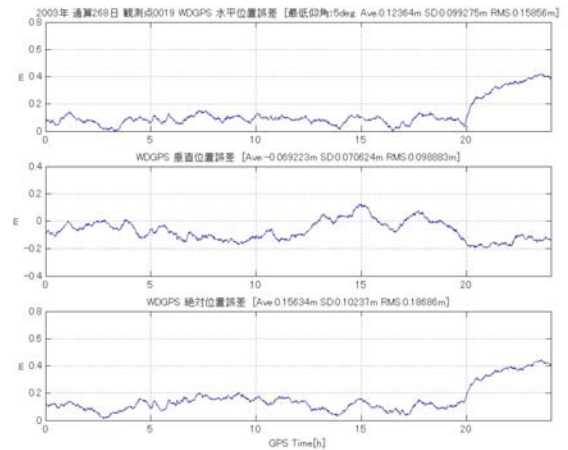


図 6-1 2003 年 9 月 25 日 襟裳 1 測位結果

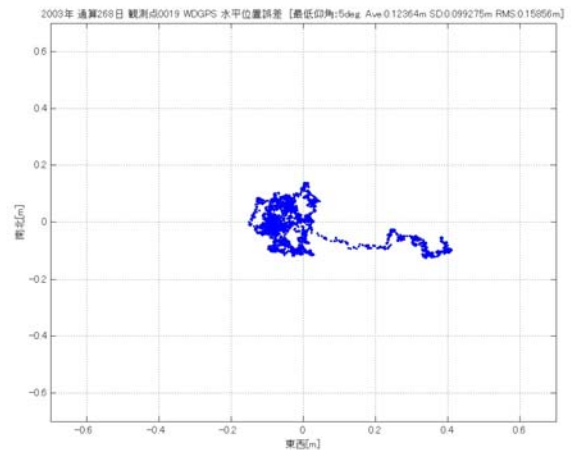


図 6-2 2003 年 9 月 25 日 襟裳 1 水平位置誤差

## 文 献

- [1] B.Parkinson et al., Global Positioning system: Theory and Applications, AIAA 1996.
- [2] K.Hoshinoo, T.Sato, Initial Results of GPS Orbit and Clock Estimation by Japanese GNSS Test System
- [3] G.Ma, T.Maruyama, Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan, 第1回電離圏の利用と影響に関するシンポジウム, 東京 2003年3月