

# 3D07 GPS 広域補正によるデシメータ級測位 実証試験結果

○笠井晶二（笠井デザインオフィス）、高須知二（技術コンサルタント）

## Experimental Results of Decimeter class WDGPS

Shoji Kasai (Kasai Design Office Ltd.), Tomoji Takasu (Technical Consultant)

Key Words: WADGPS, Ionospheric Delay, GPS satellite orbit and clock error, Magnetic Storm

### Abstract :

This paper shows experimental results of decimeter-class GPS positioning (10cm-30cm RMS horizontal accuracy) using our Wide Area Differential GPS system (WADGPS).

## 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 L1 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デシメータ級からサブ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。また、GPS 広域補正システムが地滑り検知に有効であることを示す。

## 2. L1 擬似距離による測位

### 2.1 L1 擬似距離の観測誤差

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。

$$PR_r^s(t) + c \cdot dT^s(t)$$

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

$$\Delta\rho_r^s(t) = \bar{\rho}_r^s(t) - \rho_r^s(t)$$

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

$$\Delta dt^s(t) = d\bar{T}^s(t) - dT^s(t)$$

$\bar{x}^s(t), \bar{y}^s(t), \bar{z}^s(t)$ : 放送暦による衛星位置

$\bar{\rho}_r^s(t)$ : 放送暦による衛星位置とユーザ間距離

$d\bar{T}^s(t)$ : 放送暦による衛星時計誤差

$\Delta\rho_r^s(t)$ : 放送暦による衛星位置誤差の視線方向射影成分

$\Delta dt^s(t)$ : 放送暦による衛星時計誤差補正残差

### 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、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(レンジ誤差)
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。

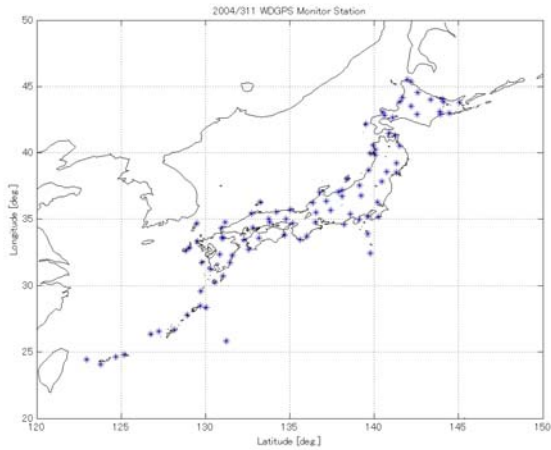


図 3. 2004 年 11 月 6 日 基準観測点配置

#### 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。広域補正情報の伝送遅延を考慮し補正值は 1 分前の値を適用した。

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 RMS[m]	1.79	1.12	1.08
垂直位置誤差 RMS[m]	4.85	1.67	3.82
絶対位置誤差 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 RMS[m]	0.26	0.06
垂直位置誤差 RMS[m]	0.41	0.10
絶対位置誤差 RMS[m]	0.49	0.12
UDRE RMS[m]	0.27	0.27

測位方式の記号の意味を以下に示す。

Trop : 対流圏遅延補正(Saastamoinen モデル)

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)

図 4.1-1 から図 4.1-5 に各測位方式の推定位置誤差グラフを示す。グラフより電離層遅延補正では昼間及び垂直位置、衛星誤差補正では夜間の改善効果が大きいことが判る。

電離層遅延+衛星誤差補正では測位誤差はほぼランダムとなり水平位置誤差 RMS20cm レベル、更に位置フィルタリングを実施した場合、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 レベルが実現可能であることを示している。

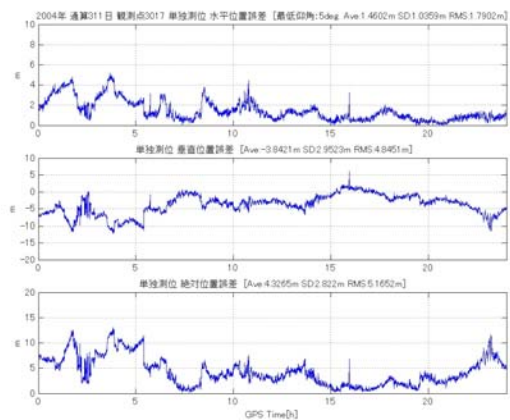


図 4.1-1 対流圏遅延補正

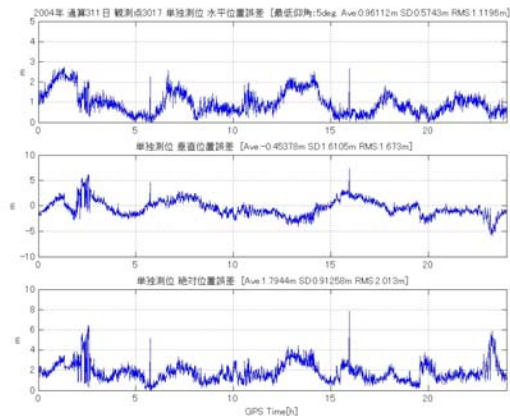


図 4.1-2 対流圏遅延+電離層遅延補正

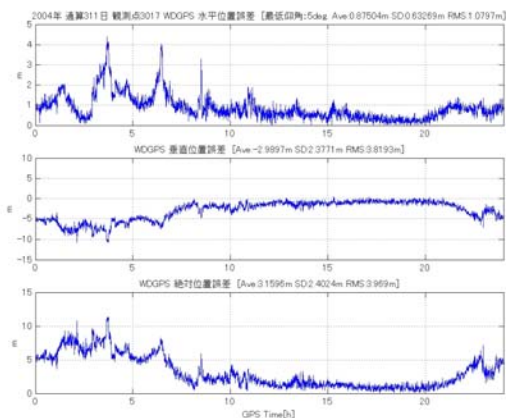


図 4.1-3 対流圏遅延+衛星誤差補正

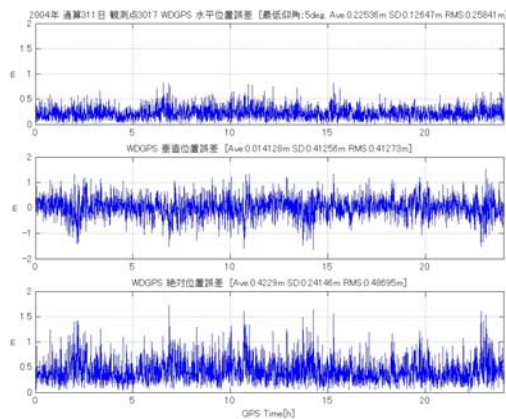


図 4.1-4 対流圏+電離層+衛星誤差補正

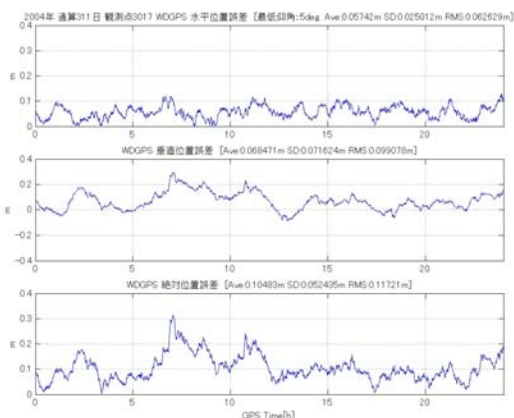


図 4.1-5 対流圏+電離層+衛星誤差補正+フィルタ

## 4.2 国内主要都市の広域補正測位精度

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表4.2-1及び表4.2-2に示す。

広域補正測位は観測点位置の南北による測位精度の差はなく全国ではほぼ一定である。位置フィルタリングを実施しない方式は 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固定ユーザの場合、擬似距離のみで水平位置誤差 RMS10cm レベルの測位精度が国内全域で達成可能であることを示している。

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				
	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]	
札幌(0128)	43.0	141.3	0.27	0.40	0.25
仙台(0037)	38.3	141.0	0.23	0.35	0.23
東京(3017)	35.8	139.6	0.26	0.41	0.27
大阪(0353)	34.8	135.3	0.25	0.37	0.25
福岡(1062)	33.7	130.3	0.26	0.41	0.24
那覇(0740)	26.5	128.0	0.24	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				
	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]	
札幌(0128)	43.0	141.3	0.08	0.10	—
仙台(0037)	38.3	141.0	0.05	0.06	—
東京(3017)	35.8	139.6	0.06	0.10	—
大阪(0353)	34.8	135.3	0.07	0.11	—
福岡(1062)	33.7	130.3	0.08	0.08	—
那覇(0740)	26.5	128.0	0.10	0.13	—

## 4.3 覆域周縁部の広域補正測位精度

ネットワーク補正システムでは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、ネットワーク周縁部及び外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。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。

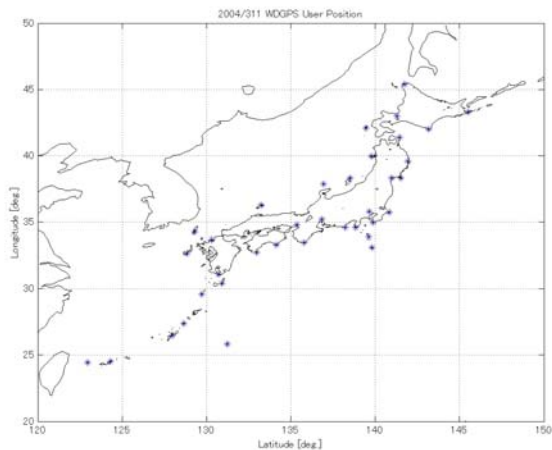


図 4.3 覆域周縁部の補正測位精度評価観測点配置

表 4.3 2004 年 11 月 6 日 覆域周縁部補正測位精度

観測点	対流圏 + 電離層 + 衛星誤差補正				UDRE RMS [m]
	観測点位置		位置誤差		
	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
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

## 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 及び図 5-2 に 2004 年 11 月 8 日 20 時 30 分(LT)の VTEC マップ示す。

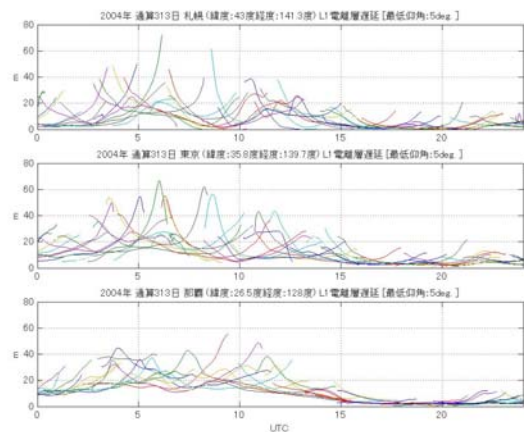


図 5-1 2004 年 11 月 8 日 札幌、東京、那覇 VTEC

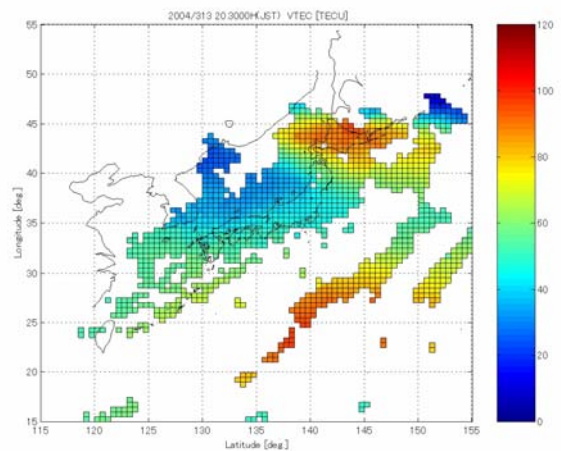


図 5-2 2004 年 11 月 8 日 20.5 時(LT) VTEC マップ

### 5.1 主要都市の広域補正測位精度

2004 年 11 月 8 日電離層大擾乱期の国内主要都市の広域補正による測位精度評価結果を表 5.1-1 及び表 5.1-2 に示す。電離層擾乱による電離層遅延補正精度の劣化は避けられないがフィルタを使用しない場合、電離層平穏期の 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				
	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]	
札幌(0128)	43.0	141.3	0.30	0.44	0.29
仙台(0037)	38.3	141.0	0.25	0.38	0.25
東京(3017)	35.8	139.6	0.28	0.45	0.29
大阪(0353)	34.8	135.3	0.27	0.43	0.28
福岡(1062)	33.7	130.3	0.28	0.44	0.26
那覇(0740)	26.5	128.0	0.26	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				
	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]	
札幌(0128)	43.0	141.3	0.15	0.22	—
仙台(0037)	38.3	141.0	0.11	0.16	—
東京(3017)	35.8	139.6	0.15	0.20	—
大阪(0353)	34.8	135.3	0.14	0.17	—
福岡(1062)	33.7	130.3	0.12	0.18	—
那覇(0740)	26.5	128.0	0.15	0.06	—

## 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、擾乱の影響が最も大きかった北海道を含め国内全域で水平位置誤差 RMS50cm 以下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	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
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

表 5.2-2 2004 年 11 月 8 日 覆域周縁部補正測位精度

観測点	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]	
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の可能性

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 となる。

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。

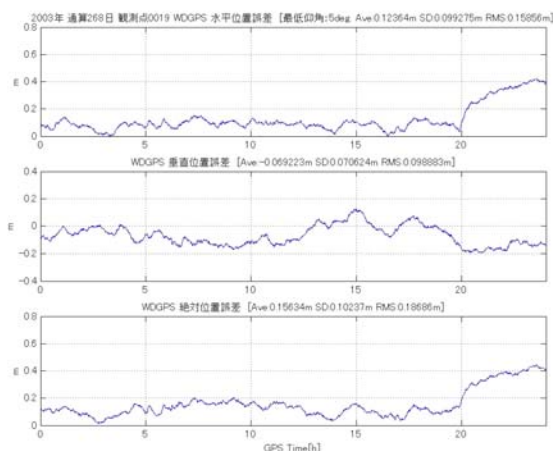


図 6-1 2003 年 9 月 25 日 襟裳 1 測位結果

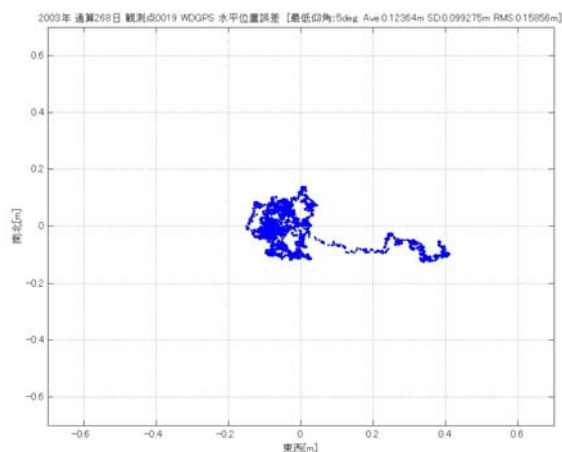


図 6-2 2003 年 9 月 25 日 襟裳 1 水平位置誤差

## 参考文献

- [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, Annales of Geophysicae 2003(21) 2083-2093

この結果は 10cm 以上の地滑りならば位置フィルタを併用した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を示している。

## 7. まとめと今後の課題

緯度・経度 1 度間隔に 1 観測点程度、全国で約 100 点の基準観測点網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、L1 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 GPS 広域補正システムで以下の測位精度を実現できることを示した。

- ・移動体ユーザ：水平位置誤差 RMS20cm 級
- ・固定ユーザ：水平位置誤差 RMS10cm 級

また本 GPS 広域補正システムが大規模な磁気嵐の際でも都市部での精度劣化はほとんどなく、国内全域でサブメータ級の補正精度を維持することを示した。更に広域補正により L1 擬似距離のみでも地滑り検出が可能であることを明らかにした。

今後の課題としては以下の試験・評価により補正精度及び測位精度の特性を把握し、ユーザの利用環境に対するシステム最適化の手順を確立することである。

- ・移動体での実証試験
- ・電離層遅延が大きい東南アジアでの実証試験
- ・搬送波位相利用による測位精度向上
- ・基準観測点網の配置による精度特性評価
- ・IGS 精密暦との比較による精度特性評価