

GPSによる精密単独測位 (PPP) 法の精度評価

高須 知二[†] 笠井 晶二[‡]

[†]技術コンサルタント 〒409-1501 山梨県北杜市大泉町西井出5776-1

[‡](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: [†] ttaka@gpspp.sakura.ne.jp, [‡] kasaido@tky.3web.ne.jp

あらまし 精密単独測位 (PPP) 法はGPS精密衛星軌道、時計及び搬送波位相観測値を使用し、基準点なしに独立に精密測位を行う手法である。本論文ではPPPに関する観測モデル及び推定手法を紹介した後、開発中のGPS精密解析ソフトウェアGpsToolsを使って実際にPPPにより測位を行いその精度を評価した結果を報告する。まず最初にIGS (International GPS Service) の基準座標局の座標をPPP測位により決定し、世界測地基準座標系(ITRF)に準拠した座標と比較することにより誤差やRepeatabilityを評価した。その結果主に垂直方向に1.5~2cmの系統誤差が見られたためその補正法につき検討し補正を行うことにより概ねグローバルな座標を水平3mm、垂直8mm程度の精度で決定できることが分かった。次に相対測位法との差を見るため国土地理院電子基準点の座標をPPP測位により決定し相対測位法で決定されている国土地理院F2解と比較した。その結果水平方向に明らかな系統誤差が見られることが分かった。これらの誤差の原因の詳細は不明だがPPPと相対測位法の測位法の違いに起因する可能性が高い。

キーワード GPS, PPP, 精密単独測位

Evaluation of GPS Precise Point Positioning (PPP) Accuracy

Tomoji TAKASU[†] and Shoji KASAI[‡]

[†] Technical Consultant 5776-1 Nishiide Oizumi-cho Hokuto-shi, Yamanashi, 409-1501 Japan

[‡] Kasai Design Office Ltd. 33-7 Daimaru Inagi-shi, Tokyo, 206-0801 Japan

E-mail: [†] ttaka@gpspp.sakura.ne.jp, [‡] kasaido@tky.3web.ne.jp

Abstract Precise Point Positioning (PPP) is an independent precise positioning scheme using GPS precise orbit/clock ephemerides and carrier-phase observables without reference stations. This paper introduces the PPP measurement model and the estimation strategy. After that, we report evaluation results of PPP accuracy using GPS precise analysis software GPS Tools (GT), that we are currently developing. At first, IGS reference frame stations' positions were determined using GT PPP and compared with the coordinates according to International Terrestrial Reference Frame (ITRF). There was apparent 1.5-2 cm range vertical error in PPP results. With this error correction, PPP is able to archive the accuracy of 3 mm horizontally and 8 mm vertically.

Keyword GPS, PPP, Precise Point Positioning

1. はじめに

精密単独測位 (PPP) 法はIGS (International GPS Service) 精密暦等の高精度GPS衛星軌道、時計推定値とGPS搬送波位相観測値を使用し、独立に精密測位を行う手法である。一般的な精密測位で使われる二重位相差による相対測位法と比較して以下の特徴がある。

- ・ 基線を組む必要がないため基準点が不要である。従って観測局単独の観測データのみを使って測位可能である。
- ・ 直接に世界測地基準座標系(ITRF)に従ったグローバルな座標値が得られる。
- ・ 座標値と同時に受信機時計バイアス、対流圏遅延推定値が得られる。
- ・ 計算量が少なく高速に推定値を得ることができる。

本研究では現在開発中のGPS精密解析ソフトウェアGpsTools(GT)を使用しPPPによる測位精度について評価を行った。

2. 観測モデル及び推定手法

GPS 2周波搬送波位相観測値の電離層フリー線形結合 Φ_{IF} は以下のモデルで表される。

$$\Phi_{IF} = c \frac{f_1 \Phi_1 - f_2 \Phi_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c(dt - dT) + T + N_{IF} + \Delta_{rel} + \Delta_{phw} + \varepsilon_{IF}$$

f_1, f_2 : L1, L2搬送波周波数 (Hz)

Φ_1, Φ_2 : L1, L2搬送波位相観測値(cycle)

ρ : 衛星-受信機幾何距離(m)

dt, dT : 受信機時計, 衛星時計バイアス(sec)

T : 対流圏遅延(m)

N_{IF} :搬送波位相バイアス(m)
 A_{rel}, A_{phw} :相対論効果, phase-windup効果(m)
 ε_{IF} :搬送波位相観測雑音(m)

このモデルのうち衛星-受信機幾何距離 ρ は光路差方程式と呼ぶ以下の方程式を解くことにより得られる。ここで $U(t)$ は地球中心慣性座標(ECI)から地球中心地球固定座標(ECEF)への変換行列であり歳差・章動モデル及び地球回転パラメータを使って計算することができる。

$$\rho = \left| U(t - \rho/c - dt)^T (r^s(t - \rho/c - dt) + A_{ants}) - U(t - dt)^T (r_r + A_{antnr} + A_{sdisp}) \right|$$

$U(t)$: ECI→ECEF座標変換行列
 $r^s(t), r_r$: 衛星・観測局座標(m) (ECEF)
 A_{ants}, A_{antnr} : 衛星・受信アンテナ位相中心(m)
 A_{sdisp} : 観測局位置変位(m)

PPPにおいては以上の観測モデル中の衛星位置及び衛星時計バイアスをIGS精密暦等から得られる値に固定し、観測局座標を未知パラメータとして推定する。ここでパラメータ推定手法としては一般的に最小二乗法またはカルマンフィルタが使われる。

これらの観測局座標を推定すると同時に観測モデル中の対流圏遅延、受信機時計バイアス及び搬送波位相バイアスの値も推定される。

対流圏遅延の推定に使用するモデルを以下に示す。

$T = M_{dry}(el)ZHD + M_{wet}(el)(1 + \cot az)(G_N \cos el + G_E \sin el)(ZTD - ZHD)$
 $M_{dry}(el), M_{wet}(el)$: Mapping関数(静水圧, 水蒸気)
 ZTD, ZHD : 天頂全遅延, 天頂静水圧遅延 (m)
 G_N, G_E : 対流圏遅延水平勾配 (m)
 az, el : 衛星方位角, 仰角(度)

対流圏遅延のうち静水圧遅延に関しては地表気圧が与えられればSaastamoinen等のA prioriモデルを使って精度良く計算することができるが水蒸気遅延に関しては一般にはモデルによる高精度補正が難しいため全天頂遅延(ZTD)を未知量パラメータとして推定する。この際対流圏遅延水平勾配を同時推定することにより測位誤差を低減することができると言われている。

搬送波位相バイアスについては、二重位相差と異なり初期位相及び受信機局発位相が加算されるため整数とならない。従って整数化による精度向上を行うことが出来ない。従って実数解として推定することになる。

以上以外の観測モデル中の相対論効果、Phase-Windup効果、衛星・受信アンテナ位相中心及び観測局位置変位等は精密補正モデルを使って補正することになる。この精密補正モデルについてはKuba^[2]に詳しい。

なお衛星位置はIGS精密暦等では15分間隔の値しか提供されないののでそれ以下の間隔で推定を行う場合適切な方法で補間を行う必要がある。衛星時計に

ついてはIGS精密暦では5分間隔が提供されているが高精度に補間する方法は現在ない。5分間隔の時計を単純な線形補間で補間する場合、衛星時計の安定度にも依存するが最大で0.1~0.6nsecの補間誤差が生ずる可能性がある。

3. 解析ソフトウェア

PPP精度評価には現在開発中のGPS精密解析ソフトウェアGpsTools(GT)を用いた。GpsToolsはPPPによる精密測位に対応する他に、衛星精密軌道決定、GPS気象学、時刻同期、準リアルタイム解析等にも使用することが出来る多機能解析パッケージである。^[1]

GpsTools ver.0.5.5の主な仕様を表1に示す。

表1 GpsTools ver.0.5.5の主な仕様

項目	仕様	
サイクルスリップ検出	Melbourne-Wubben Wide-Lane及びGeometry-Free変化率による	
推定方式	Backward Smoother付拡張カルマンフィルタ	
衛星軌道補間	精密衛星運動モデルによる	
測位モード	StaticまたはKinematicモード	
電離層遅延	電離層フリー線形結合で除去	
対流圏遅延	A prioriモデル	SaastamoinenまたはModified Hopfield
	Mapping関数	NMF (Niell Mapping Function) またはCOSZ
衛星アンテナ位相中心	Block II/IIA: (0.279, 0, 1.023) m, Block IIR: (0, 0, 0) m PCV推定及び補正	
受信アンテナ位相中心	IGS_01.PCV	
phase-windup効果	アンテナ相対位置回転に伴う位相進行補正	
相対論効果	衛星時計 + Bending Effect	
観測局位置変位	固体地球潮汐	IERS Conventions 1996 Ch.7 Step 1: in-phase degree 2-3, out-of-phase, latitude dependence Step 2: contribution from the diurnal band : K1 only
	海洋荷重	IERS Conventions 1996 Ch.7, 11 分潮モデル(M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, Ssa) 海洋潮汐NAO.99b (GOTIC2)
	極運動潮汐	IERS Conventions 1996 Ch.7
歳差・章動モデル	IAU1976歳差, IAU1980章動 +deps, dps補正, または IERS1996章動	
地球回転パラメータ	IERS Bulletin B, C04またはIGS ERP	
地球回転パラメータ変動	Sub-daily Variation by Ray Model	
状態遷移モデル	受信機時計	White Noiseモデル
	対流圏遅延	Random-Walk過程

4. PPPによる測位精度の評価

4.1. IGS基準座標局の座標決定

IGSではITRF2000測地基準座標系に準拠したGPS観測による基準座標系を構築しており最新のものはIGb00と呼ばれる。それらの座標の長期安定度は他の宇宙測地技術との比較から1mm以下と言われている^[3]。

今回この基準座標系を構成するGPS観測局から78局を選びPPPにより測位を行いIGb00座標との比較によりその精度評価を行った。

PPP測位にあたって衛星軌道及び時計としてはIGS最終暦を使用した。軌道に関してはIGS精密暦による15分間隔の衛星位置を衛星精密運動モデルを使って5分間隔に補間した値を用いた。

観測局座標初期値は擬似距離観測値を使った単独測位により求め、初期値各座標成分の標準偏差は100mとした。その他主な測位条件を表2に示す。

表2 主なPPP測位条件

項目	条件
観測局	IGS基準座標局78局
測位期間	GPS Week 1291 (2004/10/3~9)
測位時間単位	24時間
測位間隔	5分
測位モード	Static
フィルタパス	2pass (Forward+Backward)
衛星軌道	IGS最終暦(15分間隔)+補間
衛星時計	IGS最終暦(5分間隔)
観測雑音	1cm (天頂)

表3にPPP測位結果をIGb00座標と比較した誤差を示す。また図1に観測局位置及びPPP測位誤差平均の水平成分、垂直成分を示す。

表3 PPP測位誤差(補正無)

RMS誤差			Repeatability		
East	North	Up	East	North	Up
3.9	3.3	17.2	2.4	1.6	4.9

(IGb00座標比較,単位:mm)

PPP測位結果には図1下段に見られるように垂直方向に-1.5~-2cmの明らかな系統誤差が認められる。

GPSによる測位結果がVLBIやSLRといった他の宇宙測地技術と比較し垂直方向のオフセットが見られることは幾つかの論文で指摘されている。またIGSでは精密暦の品質監視のため継続的にPPPによりGPS観測局の座標決定を行いその結果を公開している^[4]がそこでも同様の系統誤差が見られる。これらの系統誤差の原因として考えられているのは解析に使用している衛星及び受信アンテナ位相中心オフセットの問題である。^[3]

現在IGSの解析で標準として使われている受信アンテナPCVパラメータIGS_01.PCVは特定のアンテナに対する相対値として計測され決定されたものである。また衛星アンテナPCVについては衛星Block毎に固定の値を使用しており両者とも現実の値と合致していない可能性がある。これらの影響で主に垂直方

向の測位結果に系統誤差をもたらしていると考えられている。

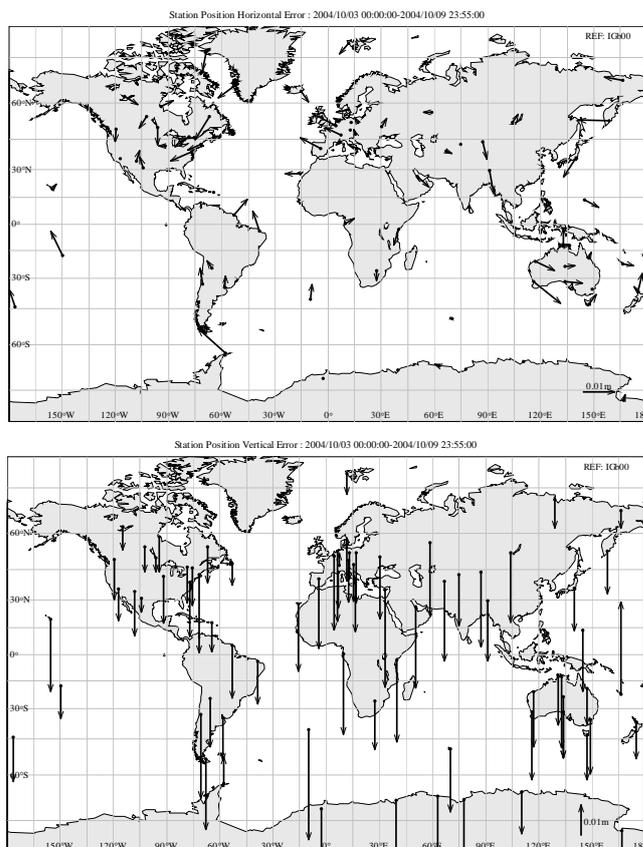


図1 PPP測位誤差平均(上:水平,下:垂直)(座標補正無)

これらの系統誤差を補正するために一般に行われているのは7パラメータを使ったHelmert変換により推定座標を世界測地基準座標(ITRF)にFittingすることによりこれらの系統誤差を吸収する手法である。

この手法は垂直方向の系統誤差だけでなく同時に衛星軌道に含まれる地球中心オフセット及び地球回転パラメータ誤差を吸収する効果も併せ持つ。

Helmert変換は以下の形式であらわされる。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = (1 + \Delta S) \begin{pmatrix} 1 & -R_z & R_y \\ R_z & 1 & R_x \\ -R_y & R_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}$$

x, y, z : 変換前座標, x', y', z' : 変換後座標

$$X = (\Delta x, \Delta y, \Delta z, R_x, R_y, R_z, \Delta S)^T \text{ Helmert変換係数}$$

従って以下最小二乗法により推定座標からITRF座標へのHelmert変換係数を推定することができる。

$$Y = Y_0 + A(X - X_0) + \varepsilon$$

$$X = X_0 + (A^T A)^{-1} A^T (Y - Y_0)$$

$$X_0 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$$

$$Y_0 = (r_1^T, r_2^T, \dots, r_n^T)^T = (x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_n, y_n, z_n)^T$$

$$Y = (r_1^T, r_2^T, \dots, r_n^T)^T = (x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_n, y_n, z_n)^T$$

$$A = \frac{\partial Y}{\partial X} \Big|_{X=X_0} = \begin{pmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial X} \\ \frac{\partial r_2}{\partial X} \\ \vdots \\ \frac{\partial r_n}{\partial X} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial r_i}{\partial X} = \begin{pmatrix} \frac{\partial r_i}{\partial \Delta x} & \frac{\partial r_i}{\partial \Delta y} & \frac{\partial r_i}{\partial \Delta z} & \frac{\partial r_i}{\partial R_x} & \frac{\partial r_i}{\partial R_y} & \frac{\partial r_i}{\partial R_z} & \frac{\partial r_i}{\partial \Delta S} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_i & -y_i & x_i \\ 0 & 1 & 0 & -z_i & 0 & x_i & y_i \\ 0 & 0 & 1 & x_i & -x_i & 0 & z_i \end{pmatrix}$$

以上で推定したHelmert変換係数を使って座標補正を行った後のPPP測位誤差を表4及び図2に示す。

概ね水平方向RMS誤差で3cm強、垂直方向RMS誤差で8mmの精度が得られることが分かった。

表4 PPP測位誤差(座標補正有)

RMS誤差			Repeatability		
East	North	Up	East	North	Up
3.5	3.2	8.1	2.1	1.5	4.7

(IGb00座標比較,単位:mm)

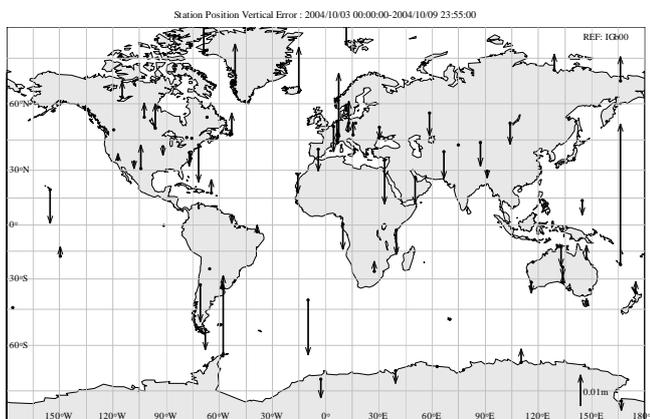
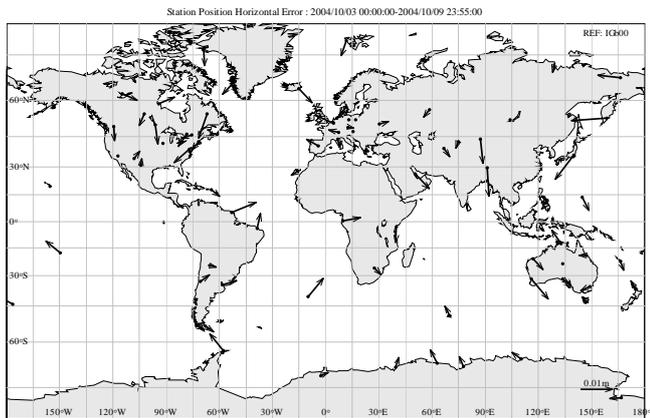


図2 PPP測位誤差平均(上:水平,下:垂直)(座標補正有)

4.2. 収束時間の評価

PPPは二重位相差を使った相対測位と違って搬送波位相バイアスの整数化が難しいため一般に収束時間が長い傾向がある。これらの特性はKinematic測位や高速Static測位の際に問題になる可能性がある。

前項で実施したIGS基準座標局78局のPPP結果のうちForward Filterによる測位精度と推定時間との関係を図3に示す。実線が全推定値の平均を示す。

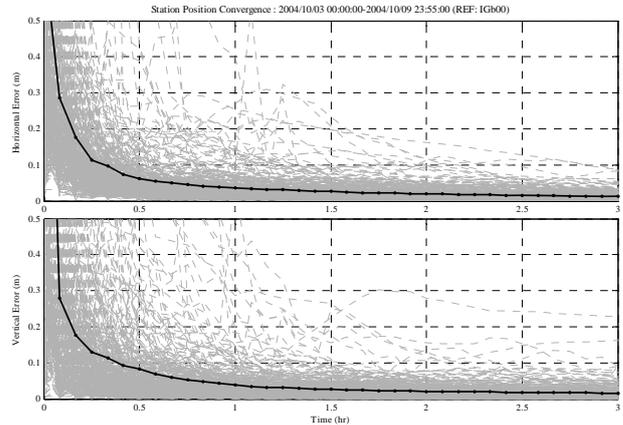


図3 PPP収束時間(上:水平,下:垂直)

30分後の水平・垂直測位誤差がそれぞれ7cm、9cm、1時間後の水平・垂直測位誤差がそれぞれ3cm、5cmと相対測位に比較し若干悪いきらいがある。

地殻変動監視の様な連続固定点測位では通常収束時間は問題にはならないと思われるが測量等に使用するには測定時間がかかる点は不利になる場合があり得る。

4.3. 相対測位結果との比較

PPPと相対測位の比較のために国土地理院電子基準点網(GEONET)の観測データを使用しPPP測位を行って評価した。

電子基準点は観測データが公開されているだけでなく国土地理院が相対測位法により決定した電子基準点座標値が公開されている。これらの座標値のうち最も精度が良いと考えられるのはF2解と呼ばれる最終座標推定値である。F2解は精密基線解析ソフトウェアBerneseを使って相対測位法により1日に一回座標値を決定している。解析に使用している精密暦はIGS最終暦であり全局をいくつかのクラスタに分割しクラスタ毎に各局の座標を求めている。絶対座標を決めるため電子基準点のうち1局(つくば1局)を固定局としており決定座標はITRF2000に準拠しているとしている。^[5]

表5に国土地理院F2解と比較したPPP測位誤差を示す。また図4に地図上に平均誤差水平成分をプロットしたものを示す。なお電子基準点のPPP測位条件はIGS基準座標局のPPP測位条件と同一である。

表5 PPP測位誤差(座標補正有)

RMS誤差			Repeatability		
East	North	Up	East	North	Up
6.4	5.0	11.9	2.2	1.9	4.3

(国土地理院F2解比較,単位:mm)

図から明らかなようにPPP測位解と相対測位法で求めた国土地理院F2解とは日本列島の端近くで最大

2cmに及ぶ系統誤差が見られる。また良く見ると同じ様な誤差傾向を示す局のグループが見られる。

前々項で評価したようにGT PPPは世界測地基準座標系ITRF2000に対し水平3mm,垂直8mm程度の精度を持っていると考えられるため、これらの系統誤差はPPPと相対測位法の測位法の差に起因するものである可能性が高いが詳細な原因は不明である。

Station Position Horizontal Error : 2004/10/03 00:00:00-2004/10/09 23:55:00

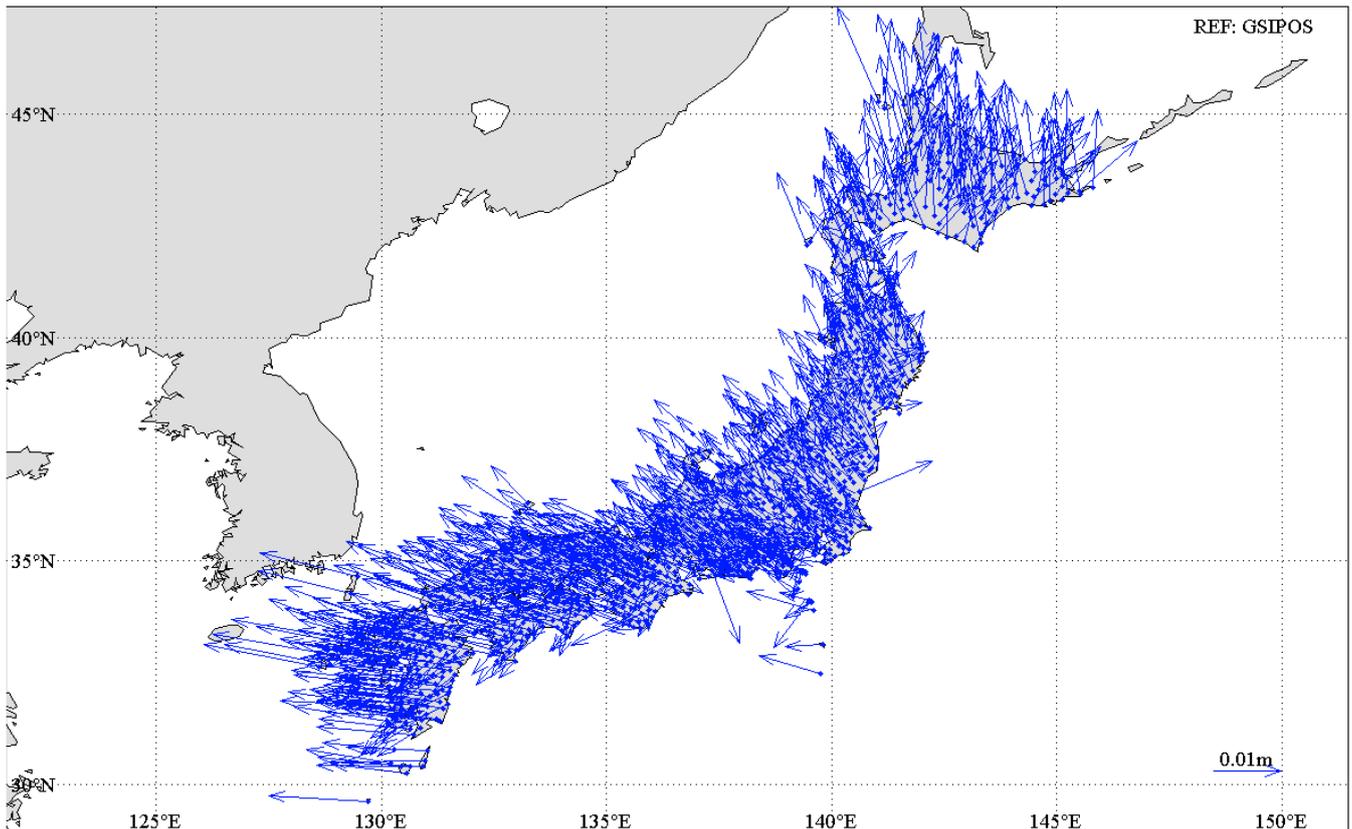


図4 国土地理院電子基準点PPP結果F2解比較水平差

5. おわりに

本論文ではGPSによる精密単独測位(PPP)法の精度評価を行った。

今後はより長期の安定性や季節変動に対する評価を行いより高精度のPPP手法を確立していく所存である。

なお本解析にあたっては国土地理院の電子基準点データを使用させて頂きました。

文 献

- [1] 高須知二, 笠井晶二, "GPS 衛星及び時計準リアルタイム推定アルゴリズムの開発及びその評価" 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会
- [2] J. Kouba, "A Guide To Using International GPS Service (IGS) Products", Feb 2003
- [3] R.Fernand, G.Gendt and T.Schone, "IGS Reference Frame Maintenance", Celebrating A Decade of The International GPS Service Workshop & Symposium 2004 Proceedings, March 1-5, 2004
- [4] http://www.gfz-potsdam.de/pb1/igsacc/index_igsacc_ppp.html
- [5] 測地観測センター, "電子基準点 1,200 点の全国整備について", 国土地理院時報 103 集, 2004