

GPS 単独測位による電子基準点位置の解析 - - 電子基準点位置変動の比較 -

河合雅司 (富山商船高等専門学校)

On the Positions of GPS Stations Determined by Point Positioning - -Comparison among movement of GPS stations-

Kawai Masashi (Toyama National College of Maritime Technology)

Abstract

It is clear that GPS stations move several meters with about 12-hour period as result of spectrum analysis and average processing of GPS stations coordinates determined by point positioning using GPS pseudo ranges observed by Geographical Survey Institute(GSI). Verification on GPS stations movements was carried out using GPS station positions determined every 30 seconds during four years from 2001 to 2004 at Toyama, Tateyama, Wakkanai, Chinen, Yonaguni, Shimonoseki, Kochi and Oshika GPS station.

As result of the verification, it became clear that GPS stations at Toyama, Tateyama, Shimonoseki, Kochi and Oshika move similarly each other, but these GPS stations in Honsyu, GPS station at Wakkanai and GPS stations in Okinawa move differently from each other. These results shows possibility that Honsyu, Hokkaido and Okinawa are on different plates. The results of the verification are reported in this paper.

Keywords: GPS, GPS stations, Earth's plates

キーワード: GPS, 電子基準点, プレート運動

1 . 緒言

静止衛星の軌道解析において、軌道決定後の観測距離と計算距離の残差に、振幅約 1m、周期約 12 時間の周期変動が存在する (Masashi KAWAI, 1992)。又、国土地理院の電子基準点で観測された GPS 擬似距離データを用いて電子基準点の位置を求め、この位置をフーリエ解析すると電子基準点位置が恒星に対する地球自転周期の 1/2 で変動していることが確認できる。更に、地球自転周期の 1/2 を 12 の位相に分割し、各位相毎にこの電子基準点位置を平均すると、電子基準点位置が 5 メートル程度周期的に変動している様子が確認できる。つまり、地面が約 12 時間周期で数メートル程度動いていると考えることができるのである (Kawai Masashi, 2003)。

そこで、2001 年～2004 年までの 4 年間の GPS 擬似距離データを用いて、本州 (富山・館山・下関・高知・牡鹿)、北海道 (稚内) 及び沖縄 (知念・

与那国) の電子基準点位置を求め、その位置変動について調べた。これらの結果について以下に報告する。

2 . 電子基準点位置の計算

本研究では、国土地理院の電子基準点で観測された GPS 衛星擬似距離データを用いて、電子基準点の位置を求めた。ここでは、擬似距離データ、GPS 衛星位置、電波伝搬補正、測位計算等について述べる。

(1) 観測データ

国土地理院の電子基準点富山・館山・下関・高知・牡鹿・稚内・知念・与那国で 2001 年 1 月 1 日～2004 年 12 月 31 日までの 4 年間に観測された 30 秒毎の GPS 擬似距離データ (L1 波 C/A コード) を用いて電子基準点位置を求めた。国土地理院により公表されている各電子基準点位置 (地球固定座標系) を Table 1 に示す。

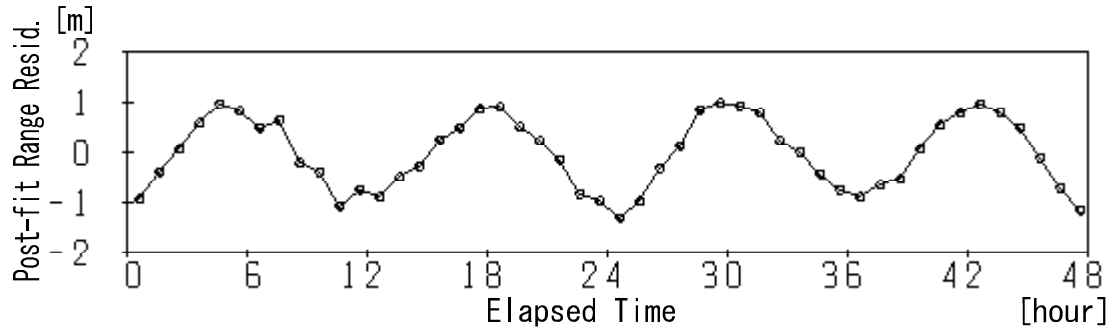


Fig. 1: An example of 12-hour period fluctuations in post-fit range residuals in orbital analysis of geosynchronous satellites.

Table 1 Earth-centered, Earth-fixed coordinates of GPS stations operated by GSI (ITRF97)

GPS Station	Station No.	Station Code	Latitude	Longitude	Height above ellipsoid
Toyama	950249	5437715501	36 ° 38' 3.62"N	137 ° 11' 42.70"E	75.30m
Tateyama	93047	5239364901	34 ° 57' 14.70"N	139 ° 51' 50.69"E	141.79m
Shimonoseki	940079	5030779302	33 ° 59' 47.61"N	130 ° 54' 49.05"E	75.52m
Kochi	940083	5033243601	33 ° 31' 44.94"N	133 ° 34' 41.75"E	70.75m
Oshika	960550	5741345001	38 ° 18' 4.27"N	141 ° 30' 2.47"E	116.55m
Wakkanai	940001	6841068001	45 ° 24' 10.78"N	141 ° 45' 1.56"E	74.62m
Chinen	960745	3927169601	26 ° 10' 7.00"N	127 ° 49' 34.24"E	97.19m
Yonaguni	950499	3622574501	24 ° 27' 15.03"N	122 ° 56' 34.22"E	47.34m

(2) GPS 衛星の位置

ITRF97 系地球固定座標における GPS 衛星の位置及び GPS 衛星原子時計の時刻補正值については、IGS 暦を使用し多項式補間により求めた。

IGS 暦の補間において、衛星位置については 17 次、原子時計補正值については、3 次の多項式補間を用いた (Benjamin W. Remondi, 1989)。

(3) 電波伝搬補正

対流圏電波伝搬遅延については、NASA の軌道解析プログラム GEODYN で使用されているモデルを用いて補正した (William F. Eddy, Despina E. Pavlis, John J. McCarthy, et al., 1989)。対流圏補正モデルには様々なモデルが存在するが、本研究に関してはどのモデルを用いても得られる結果は同じである。

電離層電波伝搬遅延については、L1 波 C/A コード及び L2 波 P コードによる擬似距離データを用いて (1) 式により補正した (The Geodetic Society of Japan, 1989)。

(1) 式におけるディファレンシャルコードバイアスは、欧州軌道決定センターのウェブサイトからダウンロードした。

$$\Delta\rho_{IL1} = \frac{r_{CAL1} - r_{PL2} - (C_{P1P2} - C_{P1C1})}{\left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

$L_1 = 1.57542 \text{GHz}$, $L_2 = 1.2276 \text{GHz}$

$\Delta\rho_{IL1}$: r_{CAL1} に対する電離層補正值

r_{CAL1} : L1 波 C/A コードの擬似距離

r_{PL2} : L2 波 P コードの擬似距離

L_1, L_2 : L1 波及び L2 波の周波数

C_{P1P2} : ディファレンシャルコードバイアス ($P1 - P2$)

C_{P1C1} : ディファレンシャルコードバイアス ($P1 - C1$)

(4) 地球潮汐による観測局位置変動の補正

Wahr の理論によるモデル (2 次の潮汐まで考慮) を用いて補正を行った (Dennis D. McCarthy, 1996)。

(5) プレート運動による観測局位置変動の補正

地球上の全ての地点は、プレート運動によって 1 年に 5cm 程度移動していると考えられている。ここでは、日本列島が Eurasia プレートに乗っているとして、プレートモデル NNR-NUVEL1A を用いて、電子基準点位置の補正を行った (Dennis D. McCarthy, 1996)。

(6) 測位計算

L1 波 C/A コード擬似距離を用いて、単独測位

により、電子基準点位置を求める。測位計算には C/A コードを送信した時刻 t_r での ITRF97 系地球固定座標における GPS 衛星位置が必要である。分かっているのは、コードを受信した時刻 t_r であり、まず IGS 暦より時刻 t_r での地球固定座標における衛星位置と速度を求め、これを慣性座標系 (J2000.0 平均赤道面座標系) に変換した後、

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(X_J - X_0)^2 + (Y_J - Y_0)^2 + (Z_J - Z_0)^2}}{V_c} + \Delta D \quad (2)$$

$$X_J(t_r) = X_J(t_r) - V_{XJ}(t_r) \cdot \Delta t$$

$$Y_J(t_r) = Y_J(t_r) - V_{YJ}(t_r) \cdot \Delta t$$

$$Z_J(t_r) = Z_J(t_r) - V_{ZJ}(t_r) \cdot \Delta t$$

X_0, Y_0, Z_0 : J2000.0 平均赤道面座標系における

時刻 t_r での受信点位置

X_J, Y_J, Z_J : J2000.0 平均赤道面座標系における

時刻 t_r での衛星位置

V_c : 電波伝搬速度(光速)

ΔD : 電波伝搬遅延(電離層遅延+対流圏遅延)

(2)式を用いて繰り返し計算により時刻 t_r における衛星位置を求める。ただし、 X_J, Y_J, Z_J の初期値は、 $X_J(t_r), Y_J(t_r), Z_J(t_r)$ とする。

このようにして求めた J2000.0 平均赤道面座標系における衛星位置を地球固定座標系に変換し、観測擬似距離に電波伝搬補正、衛星原子時計の補正を行い最小自乗法により 30 秒毎の電子基準点位置を計算する。本研究では、電離層電波伝搬補正における受信機のインターフレクエンシーバイアスによる誤差は定誤差として受信機時計の同期誤差に含めて処理されている。

更に、このようにして求めた地球固定座標系における電子基準点位置を、地表面座標系に変換する。この地表面座標系は、原点における測地学的接平面の法線を Z 軸(上方が正)、接平面内において北へ Y 軸(北方が正)、東へ X 軸(東方が正)をとった 3 次元直交座標系であり、座標原点は Table 1 に示された電子基準点位置である。

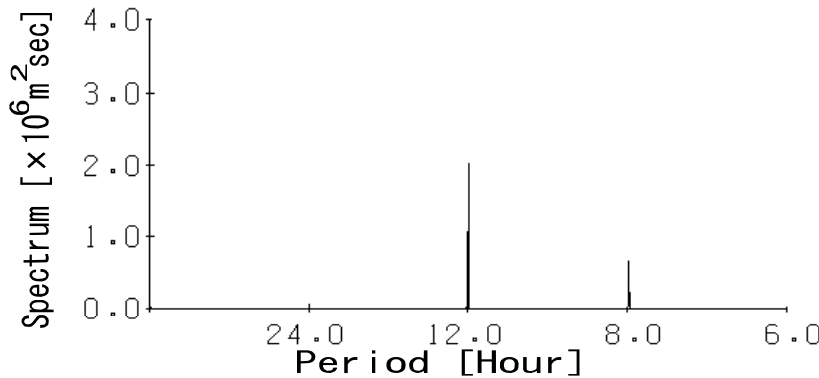


Fig.2 The Spectrum of x-coordinates of Toyama station in 2003

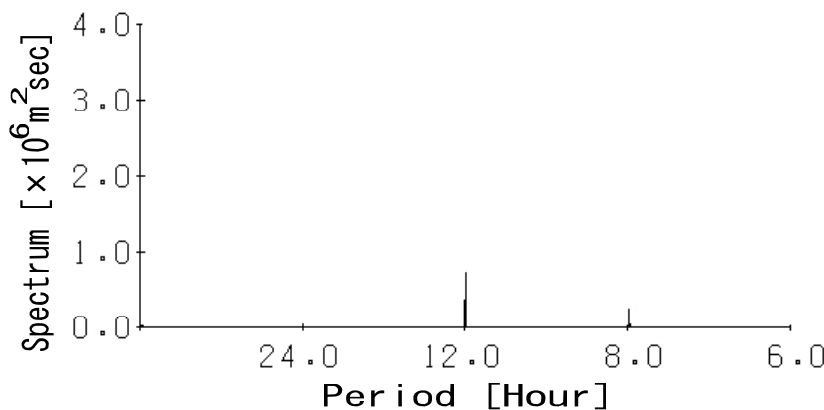


Fig.3 The Spectrum of y-coordinates of Toyama station in 2003

3．解析結果

L1 波 C/A コード GPS 衛星擬似距離より求めた 30 秒毎 1 年間分の地表面座標系における電子基準点位置の X, Y 座標値をフーリエ解析した。例として、電子基準点富山の位置をフーリエ解析した結果を Fig.2 ~ Fig.3 に示す。

これらの図から、電子基準点位置が約 12 時間周期（恒星に対する地球自転周期の半分）で変動していることが分かる。又、約 12 時間周期以外の周期の変動も存在していることが分かる。

次に、恒星に対する地球自転周期の半分で電子基準点がどの様に変動しているのかを調べるために地表面座標系における 30 秒毎の電子基準点位置に、(3)式に示す位相番号を付ける。

$$n = \text{int}\left[\frac{t - \text{int}(t/T) \cdot T}{T/12}\right] \quad (3)$$

n : 位相番号

t : 2003 年 1 月 1 日 0 時 (GPS 時) から

位置決定時刻までの経過時間

T : 位置変動周期 ($T=11.97$ 時間)

この位相番号毎に電子基準点位置を平均した結果を Fig.4 ~ Fig.11 に示す。

これらの図における座標原点は、Table 1 に示された電子基準点位置である。そして、これらの図から GPS 疑似距離データを用いて単独測位により求めた電子基準点位置が、約 12 時間周期で 5m 程度変動していることが分かる。

又、Fig.4, Fig.7, Fig.10, Fig.11 によく表れているように電子基準点位置は一様に変動するのではなく、大きく変動する時とほとんど変動しない時があることが分かる。そして、本州の電子基準点 (Fig.4 ~ Fig.8) をみると、富山 (Fig.4)・高知 (Fig.5)・下関 (Fig.6) は、富山の位相番号 5 の位置が少しずつれているが、これを除くとほぼ同じ様に動いており、館山 (Fig.7) と牡鹿 (Fig.8) の変動の様子もほぼ同じであることが分かる。更に、平均位置の精度が 1m 程度であることを考えると、本州内の電子基準点の位置変動の様子は、よく似ていると考えることができる。

次に、北海道の稚内 (Fig.9) と沖縄方面の与那国 (Fig.10)・知念 (Fig.11) を比較すると、知念と与那国はほぼ同じように動いているが、これらと北海道の稚内の位置変動の様子は全く異なっていることが確認できる。参考までに日本測地学会が公表している日本周辺のプレート境界図を Fig.12 に

示す (日本測地学会 2004)。

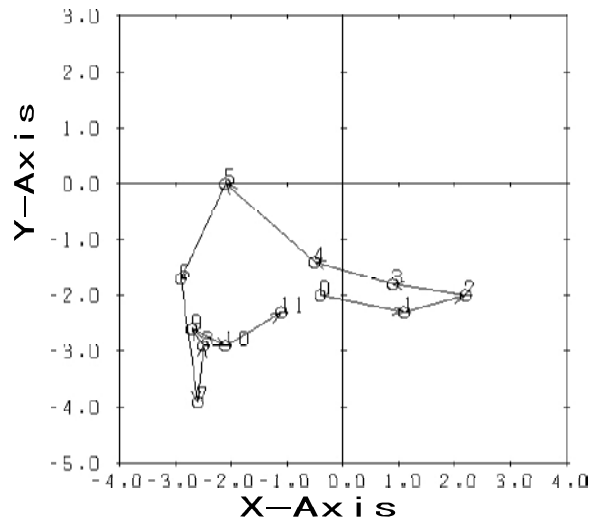


Fig.4 The positions of Toyama station averaged every phase number from 2001 to 2004.

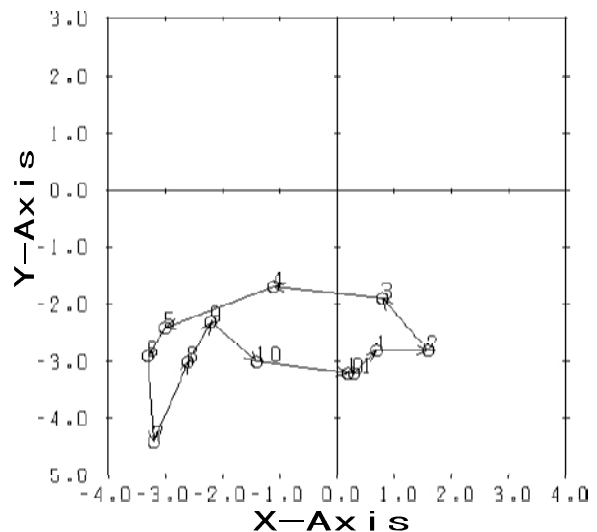


Fig.5 The positions of Kochi station averaged every phase number from 2001 to 2003.

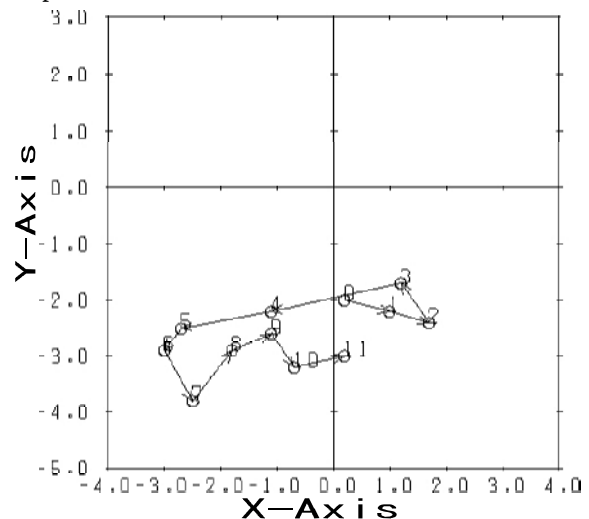


Fig.6 The positions of Shimonoseki station averaged every phase number from 2001 to 2004.

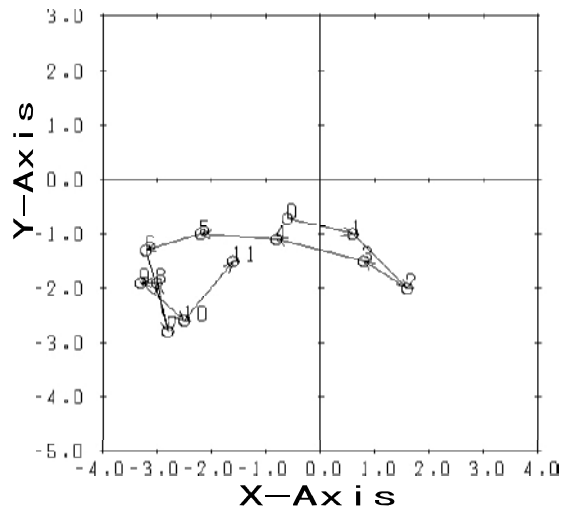


Fig.7 The positions of Tateyama station averaged every phase number from 2001 to 2004.

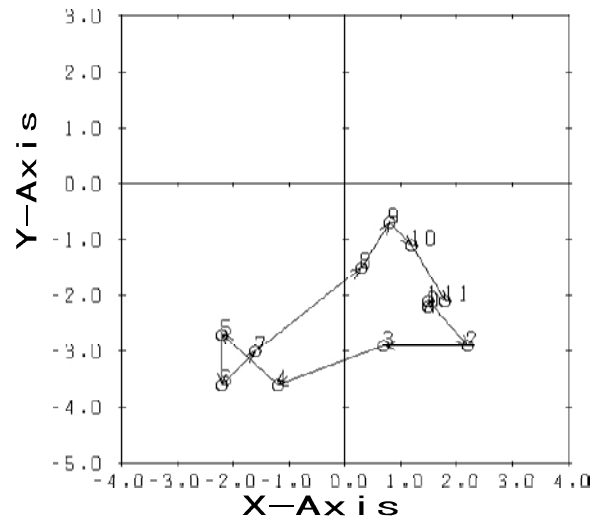


Fig.10 The positions of Yonaguni station averaged every phase number from 2001 to 2004.

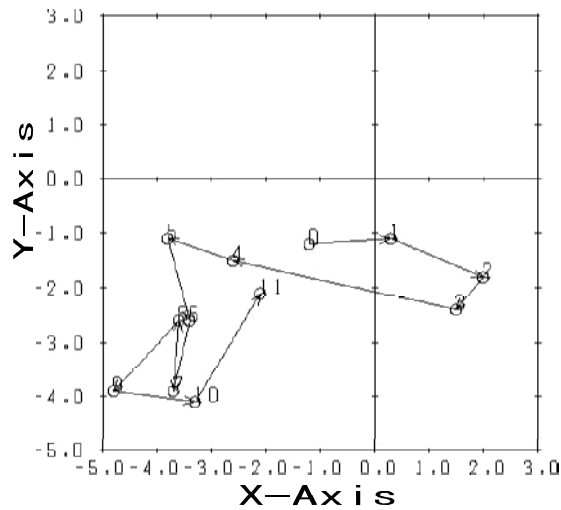


Fig.8 The positions of Oshika station averaged every phase number from 2001 to 2004.

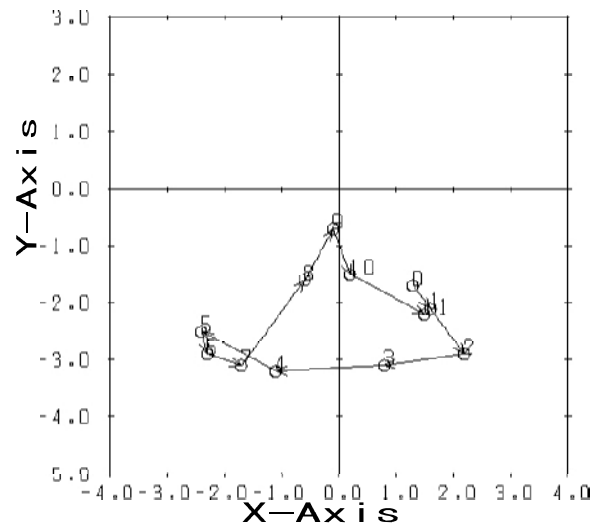


Fig.11 The positions of Chinen station averaged every phase number from 2001 to 2004.

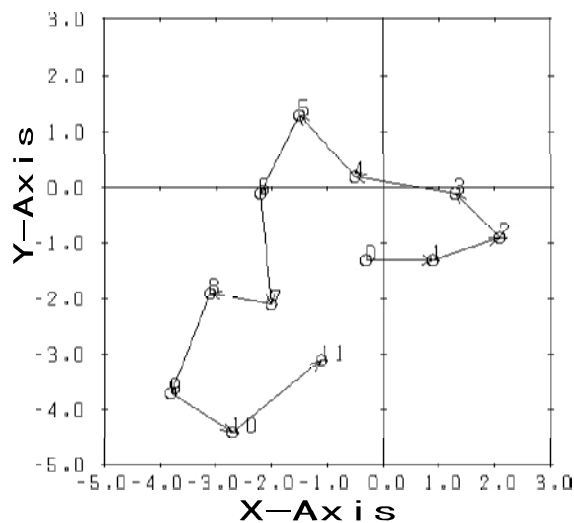


Fig.9 The positions of Wakkanai station averaged every phase number from 2001 to 2004.



Fig.12 Tectonic plates around Japan

4 . 結 言

国土地理院の電子基準点で観測された数年間分の GPS 衛星擬似距離データを用いて、単独測位により電子基準点位置を求めると、その位置が約 12 時間周期で 5m 程度変動していることが確認できる。この周期変動の様子を調べるために北海道から沖縄までの日本各地の電子基準点位置について調べたところ、次のことが確認できた。

- (1)電子基準点位置の変動周期は、恒星に対する地球自転周期の 1/2 であり、その変動幅は 5m 程度である。
- (2)電子基準点位置は、大きく変動する時と、ほとんど変動しない時がある。
- (3)本州内の電子基準点位置の変動は、傾向として似ており、特に富山・下関・高知及び、館山・牡鹿はそれぞれほぼ同じように動いている。ただし、富山・下関・高知と館山・牡鹿の位置変動は若干異なっているように思われる。
- (4)沖縄方面の電子基準点(知念・与那国)は、ほぼ同じように動いている。
- (5)本州・沖縄・北海道(稚内)の電子基準点位置の変動は互いに異なっており、時に北海道と沖縄は、位置変動の様子が大きく異なっている。

これらの結果から、北海道・本州・沖縄は、それぞれ異なったプレートの上に乗っているように思われる。また、富山・下関・高知と館山・牡鹿の位置変動が若干異なっているのは、Fig.12 に示されるように、これらの地点が異なったプレートの上に乗っているためであると思われる。

更に、電子基準点位置の変動の原因は、月や太陽の潮汐力によって地球のマントル内部に海洋における海流や潮流のような流れが存在していることであり、この上に浮いているプレートが、マントル内部の流動と共に約 12 時間周期で 5m 程度動いていると考えることができる。

本研究では、4 年間分の GPS 擬似距離データを用いて、北海道から沖縄まで 8 地点の電子基準点についてその位置変動を調べたが、更に多くの地点における位置変動の様子を詳しく調べることは、今後の課題である。

参考文献

- Masashi KAWAI(1992):A Study on the Orbita l Analysis of Geosynchronous Satellites- , The Journal of Japan Institute of Navigation, Vol.101,7-14.
- Kawai Masashi(2003):A Study on Positions of GPS Stations Determined by Point Positioning Using GPS Pseudo Ranges, Proceedings of 2003 International Symposium on GPS/GNSS, 509-514.
- Benjamin W. Remondi(1989):Extending the National Geodetic Survey Standard GPS Orbit Formats, NOAA Technical Report NOS 133 NGS 46, NOAA.
- William F. Eddy, Despina E. Pavlis, John J. McCarthy, et al.(1989):GEODYN -Systems Description, Vol.1, NASA Goddard Space Flight Center.
- The Geodetic Society of Japan(1989):新訂版 GPS -人工衛星による精密測位システム-, Japan Association of Surveyors.
- Dennis D. McCarthy(1996):IERS Conventions(1996), IERS TECHNICAL NOTE 21,Central Bureau of IERS.
- The Geodetic Society of Japan(2004):CD-ROM テキスト測地学 WEB 版