

## マルチパスを用いた GPS 潮位計

中島悠貴・日置幸介

北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目

(2013 年 4 月 8 日受付, 2013 年 10 月 2 日改訂, 2013 年 10 月 2 日受理)

## GPS Tide Gauges Using Multipath Signatures

Yuki Nakashima and Kosuke Heki

Dept. Natural History Sci., Hokkaido Univ., Sapporo, Japan

N10 W8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

(Received, April 8, 2013; Revised, October 2, 2013; Accepted, October 3, 2013)

### Abstract

Multipath from flat reflecting surfaces causes cyclic changes in quantities such as signal-to-noise ratio (SNR) or L4 (difference between the two L-band phases) of microwave signals from Global Positioning System (GPS) satellites. By analyzing their temporal changes, we can infer heights of GPS antennas from such surfaces, e.g. ground or sea surface. In this study we explore the possibility of measuring the sea surface height (SSH) with GPS stations deployed for crustal deformation measurements. We compared results from the "GPS tide gauges" based on multipath observations and conventional tide gauges during the period from 2012/6/1 to 2012/7/31 at 34 coastal GPS stations, and showed that some of these GPS stations could be used for measuring SSH. For example, SSH measured with Satellite 7 at the Okinawa tide gauge station was accurate to ~27 cm. This is somewhat lower than those reported in previous works possibly reflecting the longer sampling interval.

### 1. はじめに: GPS による海面高観測

海面高観測は津波波高の計測, 地球温暖化による海面上昇の監視, ジオイド高の推定等に活用され, 地球を理解する上で最も基礎的な観測の一つである. 海岸で海面高を測るのには主に験潮儀を

用いるが、それらは岩盤に固定されているために観測値に地殻上下変動の成分が含まれてしまう。そのため、国土地理院の設置するすべての験潮場(25ヶ所)と気象庁の設置する一部の検潮所(13ヶ所)では全地球測位システム(Global Positioning System, GPS)を用いて独立に地殻変動を観測することによって補正を試みている(Figure 1)。

もしGPSで海面高変動も観測できれば、単一装置で地殻変動と海面高変動の両方を知ることができ、地殻変動の影響を除いた純粋な海面高変動を観測することができる。それが可能になれば、既存のGPS観測網を利用した、より簡便かつ緻密な海面高変動観測の実現が期待される。GPSのマルチパスを利用した海面高計測は、スウェーデンのグループによって最初に試みられた(Löfgren *et al.*, 2011)。そこでは、衛星からの直接波をとらえるアンテナと海面からの反射波をとらえるアンテナを背中合わせに設置して潮位の計測が行われた。その後、Larson *et al.* (2013)は、米国のPlate Boundary Observatory (PBO)の一環として地殻変動観測のために設置された米国西海岸沿岸のGPS局のアンテナをそのまま利用して、マルチパスを利用した潮位観測を行った。本研究は後者に倣って、日本にある既存の地殻変動観測用のGPS観測点をそのまま利用して海面高観測を行い、その精度や実用性を検証した。

## 2. マルチパスによる海面高の推定法

マルチパスの観測には信号対雑音比 (signal-to-noise ratio, SNR) を用いる方法とL4を用いる方法とがある。GPS衛星が送信するマイクロ波はL1(周波数 ~1.5 GHz)とL2(周波数 ~1.2 GHz)があり、L4はそれらの位相の差である。信号対雑音比はL4と違って公開データに含まれる場合が限られるが、より精度の高い測定が可能であることが、同じくマルチパスを利用したGPS積雪深度計の経験から確認されている(Ozeki and Heki, 2012)。そのため本研究では、信号対雑音比を利用してマルチパスによる海面高の測定を行った。信号対雑音比はL1とL2の双方が利用可能だが、本研究ではL2の信号対雑音比を用いた。多くのGPS点ではサンプリング間隔が30秒と比較的長いいため、波長が長くて仰角の変化に伴うマルチパスの位相変化がより緩慢な方が好都合だからである。

信号対雑音比は直接波と反射波との位相差 $\psi$ に依存して式(1)のように変化する(Larson *et al.*, 2008)。

$$SNR^2 = A_d^2 + A_m^2 + 2A_d A_m \cos \psi \quad (1)$$

ただし、 $A_d$ は直接波の振幅、 $A_m$ は反射波の振幅である。 $A_m$ は、マイクロ波を反射した表面の反射率と、アンテナの指向性パターンに依存する正負の仰角の利得差の分だけ $A_d$ より小さい値をとる。直接波と反射波の位相差 $\psi$ は、

$$\psi = 4\pi(H/\lambda) \sin \epsilon \quad (2)$$

と表すことができ、衛星の見かけの動きによって時々刻々変化する。その変化率は、式(2)の両辺を時間  $t$  で全微分して、

$$d\psi/dt = 4\pi(H/\lambda) \cos \varepsilon (d\varepsilon/dt) \quad (3)$$

となる。すなわち位相差は GPS 衛星の仰角  $\varepsilon$  とともに時間変化し、その結果、信号対雑音比も数分の周期で大きくなったり小さくなったりを繰り返す(Figure 2a)。なお反射率や指向性パターンの違いは信号対雑音比の変動幅に影響するが、変動の周期には影響しない。

実際の解析は以下の手順で行った。まず衛星仰角の変動にともなう信号対雑音比の時間変化をこれらの式から計算し、衛星の昇った後（または沈む前の）一時間分を取り出して Blackman-Tukey 法(日野, 1984) によってスペクトル解析した (Figure 2b)。このスペクトルのピークとアンテナ高との関係は、個々の衛星の仰角変化率に依存する。

GPS 観測局の RINEX (Receiver-Independent Exchange) 形式のデータから L2 の信号対雑音比 (S2) を読みだし、衛星が現れてから（または沈む前の）一時間の時間窓の信号対雑音比のデータをスペクトル解析した上で、Ozeki and Heki (2012) の方法に倣って周波数ピークの正確な位置を決めた。得られた信号対雑音比の時間変化のピーク周波数と式(3)から、アンテナ高を一意に推定できる。一方アンテナ位相中心の標高（平均海水面からの高さ）は国土地理院の取り付け水準測量の成果と験潮場の観測基準面標高、そしてアンテナ定数より求めることができる。潮位は一般に験潮場付近の海面高の平均海水面からの偏差を意味するが、実際の海面高は験潮場毎に異なった「観測基準面」からの高さとして公表されている。本研究における計測結果も同様の基準面からの高さに変換し、験潮儀による計測結果と比較した。なお本手法では、衛星の仰角がいちばん低い（つまりマルチパスによる信号対雑音比の変化の振幅がいちばん大きい）時刻の海面高を捉えたと仮定して、その時刻の験潮儀の結果と比較した。

### 3. 結果と議論

本研究では験潮場に設置された海岸付近にある 34 点で解析を行ったが、ここでは国土地理院が沖縄験潮場に設置した GPS 観測点 (P124) (Figure 1a) での 2012/6/1 から 7/31 (day 153-213) の二ヶ月分のデータを使用した結果を中心に紹介する。沖縄験潮場以外の局での結果は Table 1 に簡単にまとめてあるが、データの詳細はウェブで公開している

(URL:[http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/excel/Nakashima\\_Heki\\_JGSJ2013aux.xlsx](http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/excel/Nakashima_Heki_JGSJ2013aux.xlsx))

P124 での GPS 潮位計から求めた海面高を、沖縄験潮場の従来の験潮儀による海面高観測データと比較し、その精度を評価した。本稿では、そのなかでも特に良好な結果を得ることができた 7 番衛星の結果を中心に紹介する。

信号対雑音比は仰角の変化と共にゆっくり変化し、信号が強くなる高仰角で大きな値を示す。それに加え、昇った直後と沈む直前に、マルチパスによる周期数分の振動を見せる。GPS 衛星の公転は恒星日に同期しているため、同じ衛星が昇る時刻は、毎日約 4 分ずつ早くなる。一方、振幅

が最も大きい  $M2$  分潮の周期は 12 時間よりやや長い。これらの要因が重なり、昇る 7 番衛星で観測する潮位も日毎に変化する。それに伴って、信号対雑音比の時間変化をスペクトル解析して得られた周波数ピークも少しずつ変わってゆく (Figure 3c)。

P124 における 6 個の衛星から得られた潮位と沖縄験潮場の験潮儀による潮位の間には、明瞭な正の相関が確認できた (Figure 4)。最も良好な結果が得られた 7 番衛星については、相関係数は 0.86、RMS (Root-Mean-Square) は 27 cm となった (Figure 4b)。

Larson *et al.* (2013) は、スウェーデン (Onsala) での例と、通常の測地 GPS 局を用いた米国 (Friday Harbor) での海面高観測の精度を比較している。これらと本研究を Table.2 に比較する。

Table 2 から、サンプリング間隔が短いほど RMS が小さくなる傾向が見られる。数分の周期を持つ振動をとらえるためには、サンプリング間隔は 30 秒より 15 秒の方が有利なのだろう。また PBO の事例では、より精度の高い L2C という形式のマイクロ波を送信する衛星のみを用いている。本研究でも L2C を送信している 7 番衛星と 29 番衛星とが他の衛星と比較して精度が高い傾向がみられた。なお波浪データとの比較も行ったが、波浪の強さと GPS 験潮儀の精度との間に有意な相関は見られなかった。

Ozeki and Heki (2012) は、マルチパスを用いた積雪深度観測において、複数日のスペクトルを足し合わせることによって、計測精度が有意に改善されることを示した。本研究でもそれに倣い、その日と前後 1 日の合計三日間のスペクトルを足しあわせることによって、精度が改善されるかどうかを調べてみた (Figure.3b)。その結果、4 cm ほど精度が改善されることを確認した (Table 2)。

次に、沖縄の P124 以外の GPS 局でもマルチパスを利用した潮位の観測が可能であるかを議論する。陸奥湾最奥部 (青森県) に位置する浅虫験潮場 (P103) と、沖縄県的那覇験潮場 (P212) では P124 と同様に良好な結果が得られた。また、地殻変動観測のために国土地理院によって全国に約 1200 点展開された GEONET (GNSS Earth Observation Network) の点でも、一部に潮汐観測が可能な局があることがわかった。例えば、瀬戸内海の直島 (香川県) の海岸に位置する電子基準点直島 (960676) は、砂浜海岸にアンテナが設置されており、海面からの反射波を受信することができた (Figure 3a 右の図)。直島 (960676) のデータを解析して得られた潮位を、約 6 km 北にある宇野検潮所 (岡山県) の験潮データと比較した結果、相関係数 0.89、RMS 26 cm となり、P124 と遜色のない結果が得られた。なお、宇野検潮所では取り付け水準測量を行っていないので、日本のジオイド 2000

(Kuroishi *et al.*, 2002) に基づくジオイド高と GPS の測位解を用いてアンテナ高から海面高に変換したものと比較した。

いくつかの局では、海面反射波と直接波の干渉による信号対雑音比の周期的な変化そのものを観測することができなかった。Figure 3a の中央の図は、北海道の忍路験潮場 (P101) の GPS データから得られた、信号対雑音比の日々のスペクトルである。験潮データから示唆される周波数ピークの位置と実際の信号対雑音比を解析して得られた周波数ピークの位置はちぐはぐで、意味のあるデータには思われない。Figure 3c の信号対雑音比の時系列を見ても、P101 では、P124 や直島 (960676) のような顕著な周期変化が見られず、不規則な乱れしか見えない。これは忍路験潮場が、Figure 1b に示すように、山に囲まれた湾に位置しているため、低仰角における衛星からのマイクロ波が山によ

って遮蔽されるためだと考えられる（実際の地形は国土地理院の地理空間情報ライブラリー [<http://geolib.gsi.go.jp/list>] 等を参照のこと）。GEONET 点では、山形県の飛島にある電子基準点飛島(950194)が港湾施設内の海面近傍に設置されているが、忍路験潮場と同様に GPS 験潮儀としては使えないことがわかった。これも原因は忍路と同様に、GPS 局周囲の地形の条件が悪いためであろう。

#### 4. 結論

GPS 衛星からのマイクロ波信号は、海面反射波との干渉によって信号対雑音比の周期的に変動する。その周期から求めた海面高を、従来の験潮儀による海面高と比較した。沖縄験潮場において、衛星から来る電波の反射点が海上にある 6 個の衛星を用いて、海洋潮汐による海面高変動のシグナルを検出することができた。また、沖縄以外の験潮場に設置された GPS 点のうち、およそ半分の局で、験潮儀と相関係数 0.70 以上、RMS 40cm 以下の結果が得られた (Table 1)。GPS 験潮儀が機能しなかった局の多くでは、周囲の地形が急峻であり、低仰角衛星からの電波が遮蔽されるのだろう。また、波浪による GPS 験潮儀の精度への影響は確認できなかった。

現状の既存 GPS 局による海面高計測では、従来型の験潮儀に匹敵する計測精度と頻度を実現することは難しい。計測頻度については、複数の測位衛星システム(Global Navigation Satellite System, GNSS) を用いることで改善することができる。計測精度の改善に関しては、サンプリング間隔を通常の 30 秒より短くすることが効果的であろう。

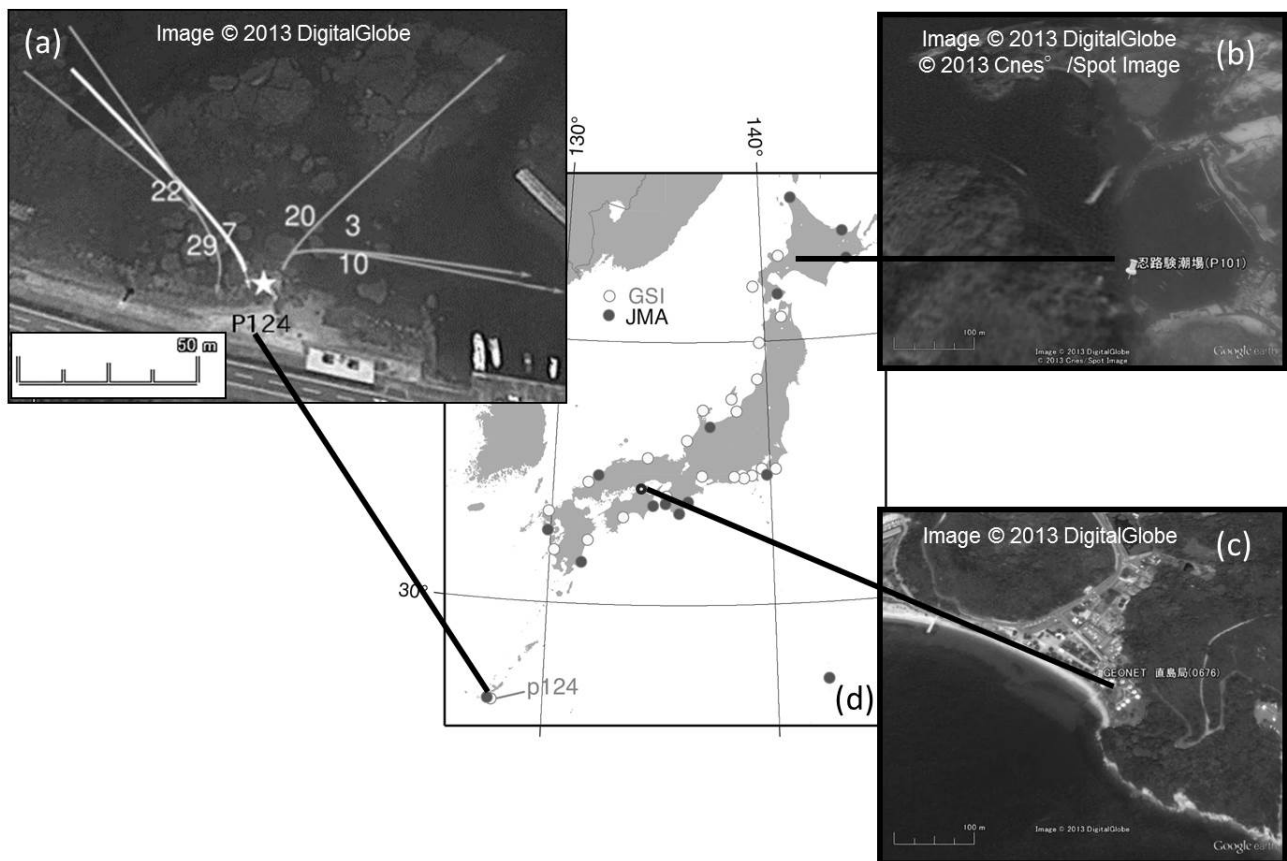
#### 謝辞

GPS-P 点の RINEX 形式の観測データと取り付け水準の成果および験潮場での験潮データは国土地理院に提供していただいた。検潮所での験潮データは気象庁に提供していただいた。また宗包浩志編集委員による建設的な査読は、論文の質の向上に役立った。ここに記して感謝する。

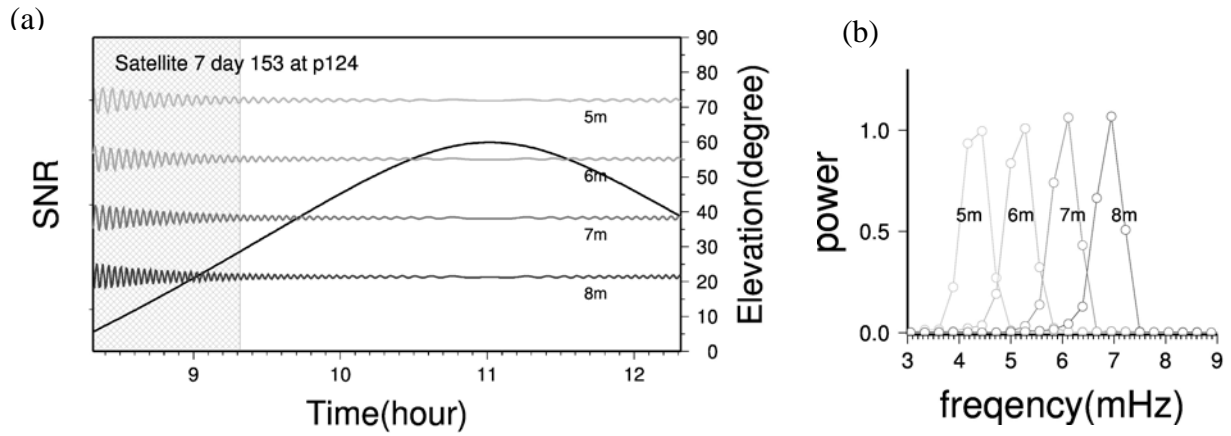
#### 参考文献

- 日野幹雄 (1984) : スペクトル解析, 朝倉書店, 191-193.
- 国土地理院: 験潮場のデータ, <<http://tide.gsi.go.jp/furnish.html>>, (参照 June 15, 2012).
- Larson, K.M., E. Small, E. Gutmann, A. Bilich, P. Axelrad, and J. Braun (2008) : Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results, *GPS Solutions*, **12**, 173-177.
- Larson, K.M., J. Löfgren, and R. Haas (2013): Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver, *Adv. Space Res.*, **51**, 1301-1310.
- Löfgren, J.S., R. Haas, and H.-G. Scherneck (2011): Three months of local sea level derived from reflected GNSS signals. *Radio Science*, **46**, art.RS0C05.
- Ozeki, M. and K. Heki (2012): GPS snow depth meter with geometry-free linear combinations of carrier phases, *J. Geodesy*, **86**, 209-219.

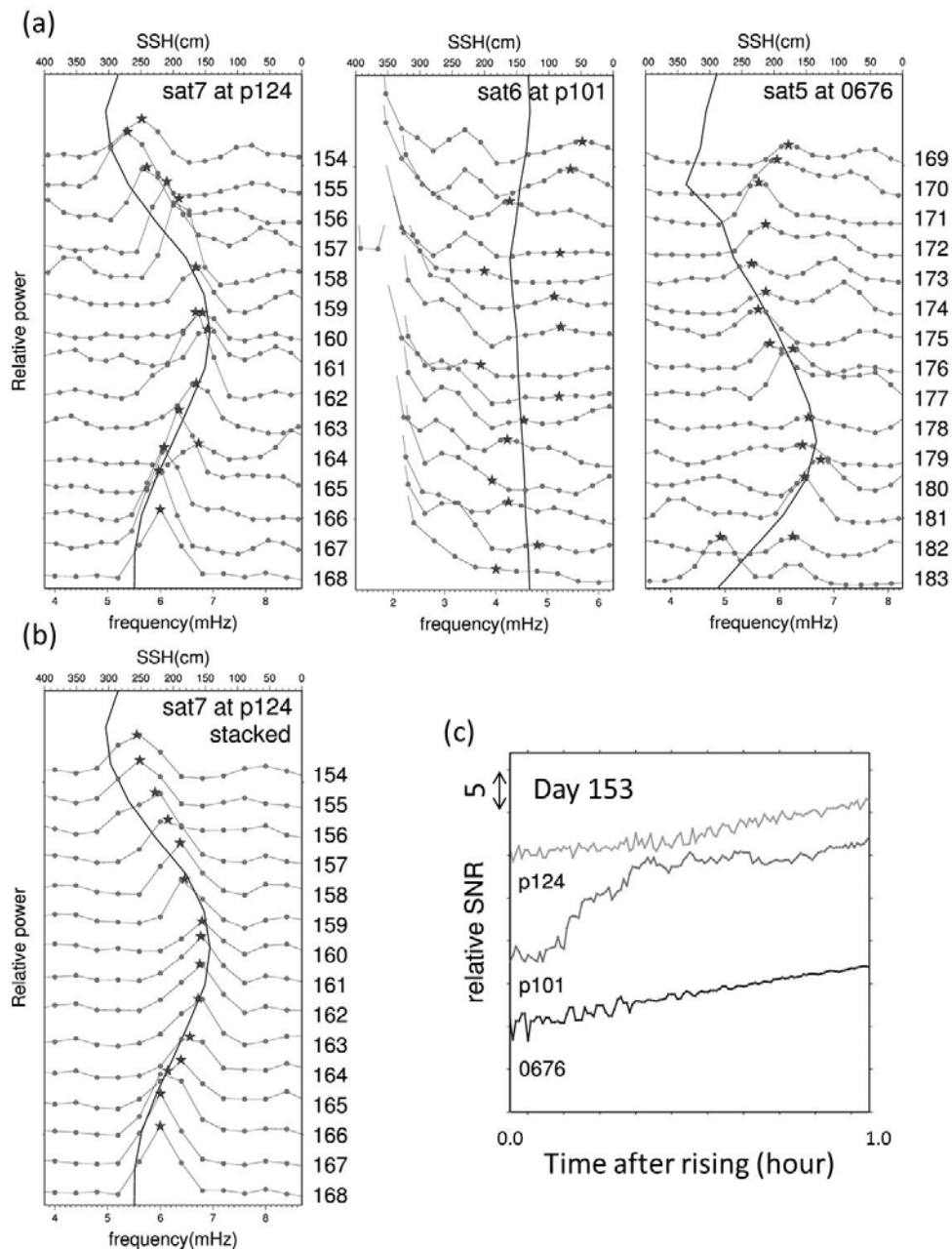
## Figures and Tables



**Figure 1** (a) The Okinawa tide-gauge station (white star) and the trajectory of the reflection points at the sea surface for six GPS satellites (white curves). In this paper we mainly used Satellite 7 indicated with the thicker curve. (b) and (c) are the maps around the GEONET 960676 station (Naoshima) and the Oshoro tide-gauge station, respectively. (d) Distribution of the GPS P-stations deployed by Geospatial Information Authority (GSI) of Japan, at the tide gauge stations of GSI (open circle) and Japan Meteorological Agency (JMA) (solid circle). They are usually installed on the roof of tide gauges stations, and are used to correct for vertical crustal movements.

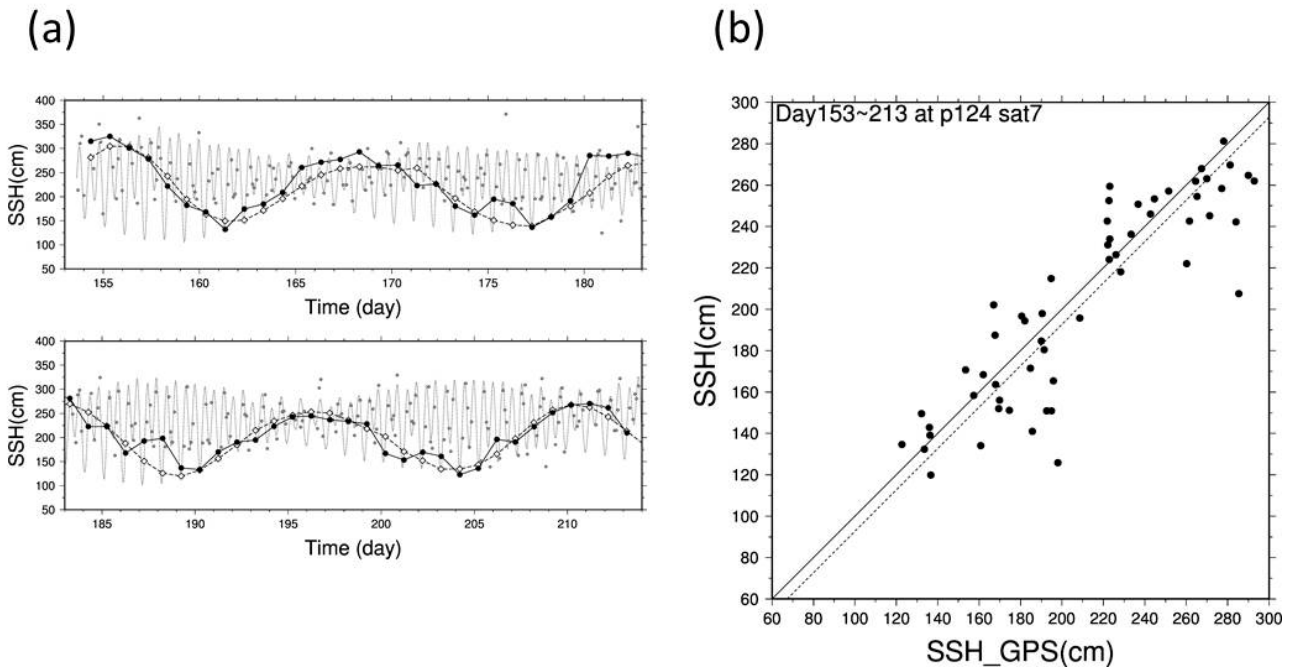


**Figure 2** (a) Time series of SNR (Satellite 7, day 153) calculated from the actual elevation change of the GPS satellite. (b) Spectrum analyses of the first two hours (shaded part in a) of the synthesized SNR data. Numbers shown in the figure indicate the vertical distances between the reflecting surface and the antenna phase center. Unit of the vertical axis is arbitrary.



**Figure 3** (a) Results of the spectrum analyses of the SNR data for days 154-168 (P124, P101) and 169-183 (960676). Stars show the positions of the spectral peaks. The solid black curve was drawn connecting the SSH measured by the conventional tide gauge when the GPS satellites (satellite numbers are shown at the top) appeared on these days. The left, middle, and right figures are those for the p124 (Okinawa), p101 (Oshoro), and the 960676 (Naoshima) GPS stations. (b) Spectrograms at p124 after stacking the spectra with those on the next and the previous days. (c) Time series of the SNR of satellites on the day 153 at the three GPS stations shown in (a).





**Figure 4** (a) Time series of the sea level measurements (day 153~213) at the Okinawa tide gauge station. The thin gray curve shows the SSH by the conventional tide gauge. Black circles are the SSH by the GPS tide gauge using Satellite 7. They are consistent with the white diamonds indicating the SSH that the conventional tide gauge recorded when Satellite 7 appeared. Small dots denote the SSH measurements by the GPS tide gauge using other satellites. (b) Comparison of the sea level measured at the Okinawa tide-gauge station by the conventional tide gauge (vertical axis) and by the GPS tide gauge (horizontal axis) derived by Satellite 7. The correlation coefficient is 0.90. If the two data coincide, they will align on the solid line. The dotted line (the best-fit line) is shifted from the solid line by  $\sim 7$  cm.

Table.1 Evaluation of all the GPS tide gauges analyzed in this study

Score	Site
3	P107, P114, P117, P119, P122, P124,
2	P102, P103, P105, P111, P115, P116, P118, P120, P121, P123, P201, P203, P207, P208, P209, P210, P211, P213
1	P101, P104, P109, P110, P112, P113, P202, P204, 0194
0	P106, P108, P205, P206, P214

3: 5 or more satellites showed good results.

(correlation higher than 0.70 and RMS less than 40 cm)

2: Only satellites less than 5 showed good results.

1: No satellites showed good results.

0: Data not available.

Table.2 Comparison with earlier works (Larson *et al.*, 2013)

Site	RMS	correlation	sampling interval	number of satellites
Onsala	4.8 cm	0.97	1 sec	24
Friday Harbor	~ 10 cm	0.98	15 sec	4 (L2C)
P124	27 cm	0.86	30 sec	1
P124 (stacked)	23 cm	0.89	30 sec	1