

# マルチパスを利用した GPS 潮汐計

---

北海道大学理学部地球科学科 4 年宇宙測地学研究室

中島 悠貴

指導教官: 日置 幸介教授

2013/02/28

## 要約

海面高観測は、津波・地球温暖化の監視やジオイド高の推定において重要な役割を持つ。そのため、さまざまな行政・研究機関が験潮儀や海面高度計をもちいて観測をおこなっている。

岩盤に固定した験潮儀で海面高を観測すると、純粋な海面高変動だけでなく地殻上下変動の成分がふくまれる。験潮儀だけではその成分をのぞくことはできない。そのため純粋な海面高変動をはかる場合には、地殻変動を GPS などによって地殻変動を別に求める必要がある。GPS によって海面高観測ができれば、GPS 受信機ひとつで海面高変動と地殻変動を観測することができる。そのため、より空間的に密な海面高変動観測ができるようになるかもしれない。

GPS のマルチパスとは、衛星から送信されたマイクロ波と散乱したものが干渉することによっておこる現象をさす。マルチパスの影響は SNR (signal to noise ratio; 信号対雑音比) や L4 に顕著に現れることがわかっている (Ozeki and Heki2010)。これらのマルチパスによる SNR・L4 の時間変化を解析すると、GPS のアンテナ高を知ることができる。このマルチパスによるアンテナ高推定を応用して、いままでに積雪深(Larson et al 2009 ;Ozeki and Heki2010)・土壌水分(Larson et al.2008)などを観測した事例が報告されている。本研究では、海岸近くの GPS 局のデータに見られる SNR の時間変化をスペクトル解析してアンテナ高を求め、そこから海面高やその時間変化を推定した。

Larson et al. (2013)は GPS のマルチパスを利用して海面高変動が観測できることを示した。本研究は、同様の手法を用い、かつ日本にある既存 GPS 観測点をそのまま利用して、海面高観測が可能であるか検証したものである。そのために 2012 年 6 月から 7 月にかけて日本全国にある 39 ヶ所の GPS 観測点で得た SNR から海面高を推定し、験潮場の観測値と比較した。なお 39 ヶ所のうち 37 ヶ所は、国土地理院が験潮データの補正のために験潮場に設置した GPS 観測点 (GPS-P 点)である。

解析の結果、Larson et al.(2013)とくらべて精度は劣るものの、GPS のマルチパスによって潮汐による海面高変動を明瞭にとらえることができた。特に良好な結果を得ることのできた沖縄験潮場の GPS 点(P124)では標準偏差 31cm であった。本稿では、沖縄験潮場の事例を中心に紹介する。

## ABSTRACT

Sea level measurements are important for monitoring tsunami, sea level rise due to global warming, and estimation of the geoid height. Various government agencies or research institutes routinely observe the sea level with traditional tide gauges. Recently, satellite altimeters have also been used to monitor the sea level.

Tide gauges data include not only sea level information but also vertical crustal movements. It is impossible to isolate the former only with tide gauges, i.e. we need another instrument, e.g. GPS, to measure the latter. However, if we could measure sea level with GPS, we might be able to measure sea level free from vertical crustal movements. This new method may realize a denser network of sea level measurements.

Multipath implies interference of direct microwave signals from GPS satellites and those reflected by ground, sea surface, or buildings. Multipath causes cyclic changes in quantities such as SNR (signal-to-noise ratio) or L4 (geometry-free linear combination) phases. By analyzing these changes, we can infer heights of GPS antennas from reflecting surfaces. This has been applied for measurements of snow depths [Larson et al.,2009; Ozeki and Heki,2010] or soil moisture [Larson et al.,2008].Larson et al.[2013] recently reported that GPS can measure the sea level in the same way.

In this study we explore the possibility of measuring the sea level with GPS stations deployed for geodetic purposes. We compared results from the GPS tide gauges based on multipath observations and traditional tide gauges during the period from 2012/6/1 to 2012/7/31 at 39 coastal GPS stations. Among them, 37 GPS stations are called GPS-P stations, which are installed next to tide gauges in order to correct for vertical crustal movements by Geospatial Information Authority (GSI) of Japan. We will report that we can use some of these GPS stations as tide gauges although the measurement accuracies are less than those reported in Larson et al.[2013].

# 目次

要約.....	i
Abstract .....	ii
1. なぜ既存の GPS 観測網で海面高を測るのか.....	1
1-1. 日本の海面高観測の現状.....	1
1-2. GPS(Global Positioning System)とは何か.....	3
1-3. GPS による海面高観測の意義.....	4
2. マルチパスによるアンテナ高の推定方法.....	4
2-1.マルチパスとは何か.....	4
2-2.アンテナ高の推定方法の比較.....	6
2-3.マルチパスと衛星仰角.....	7
3. GPS と海面の関係.....	8
3-1.アンテナ高と海面の関係.....	8
3-2.予想した誤差の要因.....	10
4. GPS-P 点における観測データの解析.....	10
4-1.観測地域・期間.....	10
4-1-1.GPS-P 点と験潮場.....	10
4-1-2.波浪の観測.....	12
4-2.手順.....	13



4-3.結果—沖縄駿潮場(P124)の事例.....	15
4-3-1.使用した衛星.....	15
4-3-2.各衛星による結果.....	16
4-3-3.複数の衛星による結果.....	41
4-4.考察.....	47
5. 結論.....	47
5-1.今後の課題.....	48
謝辞.....	48
参考文献.....	49

# 1. なぜ既存の GPS 観測網で海面高を測るのか

本研究では、日本列島に測地目的で設置された既存 GPS 観測点を利用して、海面高を推定できるかどうかを検証した。本章では GPS をもちいた海面高推定の意義について述べる。

## 1-1. 日本の海面高観測の現状

日本には、行政機関が海面高を測るための施設が主に3種類ある。いずれも同じ原理の観測設備だが、目的が異なっている。

### 1. 気象庁の設置している“検潮所”

気象災害や津波の監視のために海面高を計測している。全国 74 か所にある。

### 2. 海上保安庁海洋情報部の設置している“験潮所”

水路の深さを確保するために海面高を計測している。全国 19 か所と南極の昭和基地にある。

### 3. 国土地理院の設置している“験潮場”

ジオイドを決めるために海面高を観測している。全国 25 か所にある。特に国土地理院の業務では地殻変動と海面高変動の差が重要になるので、24の“験潮場”と15の“検潮所”に GPS 受信機を設置している。この GPS 観測点は GPS-P 点と呼ばれている。

このように各々目的は違うが、どの施設も設置してある計器はほぼ同じだ。したがって本稿では混乱を避けるため、以下ではこれらの施設をすべて“験潮場”と呼ぶ。

験潮場の建物の中には井戸がある。井戸には導水管によって外部に通じた海水がみたされている。験潮場ではこの井戸の水面の高さで海面高を決めている。この水面の高さを測る道具を験潮儀とよぶ(図 1-1)。験潮儀を使わずに海面高を計測する方法には、衛星海面高度計による観測がある。これはマイクロ波が衛星と海面の間を往復する時間を計測することで海面高を計測するものである(図 1-2)。

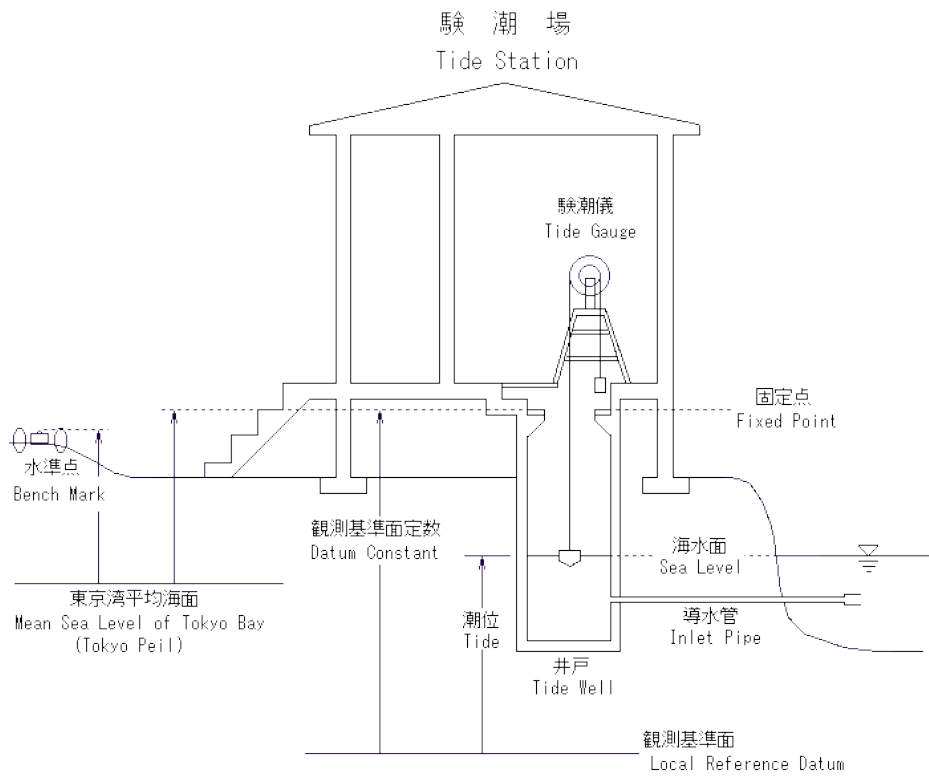


図1-1:験潮場(国土地理院ホームページより転載)

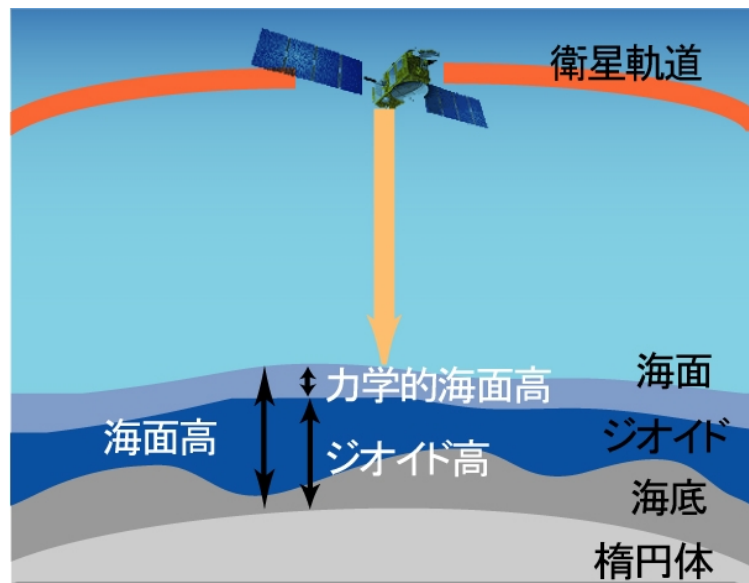


図1-2:海面高度計(測地学テキストより転載)

## 1-2. GPS(GLOBAL POSITIONING SYSTEM)とは何か

GPSは全地球衛星測位システム(GNSS; Global Navigation Satellite System)の一つであり、アメリカ合衆国が運用しているものだ。

GPSは衛星と衛星を制御する管制局、そして地上もしくは低軌道衛星に搭載されている受信機からなる。GPSを構成する衛星は一般にGPS衛星と呼ばれる。GPS衛星は常時約30個が、高度約20000km・周期12時間恒星時で運用されている(図1-3)。そして各々が自らの軌道の情報と時刻の情報をのせたマイクロ波を送信している。GPS衛星から送信されたマイクロ波を地上で受信し、マイクロ波の到達時間と送信時間の差をとることで衛星と受信機との距離を求めることができる。理論上、これを3つ以上の衛星について同時におこなうと、受信機の位置を決めることができる。

実際には、受信機の時刻誤差を補正する必要があるために、衛星は4つ以上必要になる。GPS衛星はルビジウムやセシウムをもちいた原子時計が搭載しているが、受信機はそれを持たないからだ。したがって、GPSは精密な時刻測定に利用されることもある。測位・測量や時刻測定のほかにも、GPSは地球大気によるマイクロ波の伝搬遅延を利用して、電離層の観測や可降水量の観測にも応用されている。

GPS衛星の送信するマイクロ波にはいくつかの種類がある。本研究ではその中のL1(1575.42MHz)とL2(1227.60MHz)を使用した。



GPS衛星の配置  
(Copyright 日本測量協会)

図1-3.:GPS衛星(測地学テキストより転載)

### 1-3. GPSによる海面高観測の意義

GPSは地殻変動を観測する装置である。そのGPSで海面高変動も観測できれば、GPSだけで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も可能だ。したがって既存のGPS観測網をもちいて、より簡便かつ緻密に海面高変動を観測することができるようになることが期待される。

## 2. マルチパスによるアンテナ高の推定方法

### 2-1. マルチパスとは何か

衛星から受信機に送信したマイクロ波は、アンテナへ直接届くとはかぎらない。一度地表で反射してからアンテナへ届くものもある(図 2-1)。直接アンテナに届いたマイクロ波と地表で反射して届いたマイクロ波が干渉して起こる現象をマルチパスと呼ぶ。

無限に続く反射面に鉛直方向に高さ  $H$  のアンテナが設置されていると仮定する。このとき Eloségui et al. (1995) によると、受信波は干渉のために直接波から位相が  $\delta\varphi$  だけずれる。この位相のずれは、衛星の仰角  $\varepsilon$ 、アンテナで受信する直接波と反射波の割合  $\alpha$ 、反射点から鉛直方向に測ったアンテナ高  $H$ 、マイクロ波の波長  $\lambda$  に依存する。

$$\delta\varphi(\varepsilon; \alpha, H, \lambda) = \frac{\alpha \sin \left[ 4\pi \frac{H}{\lambda} \sin \varepsilon \right]}{1 + \alpha \cos \left[ 4\pi \frac{H}{\lambda} \sin \varepsilon \right]} \quad (1)$$

この位相は仰角の変化によって変わる(図 2-2)が、それを解析すると、アンテナ高  $H$  を知ることができる。

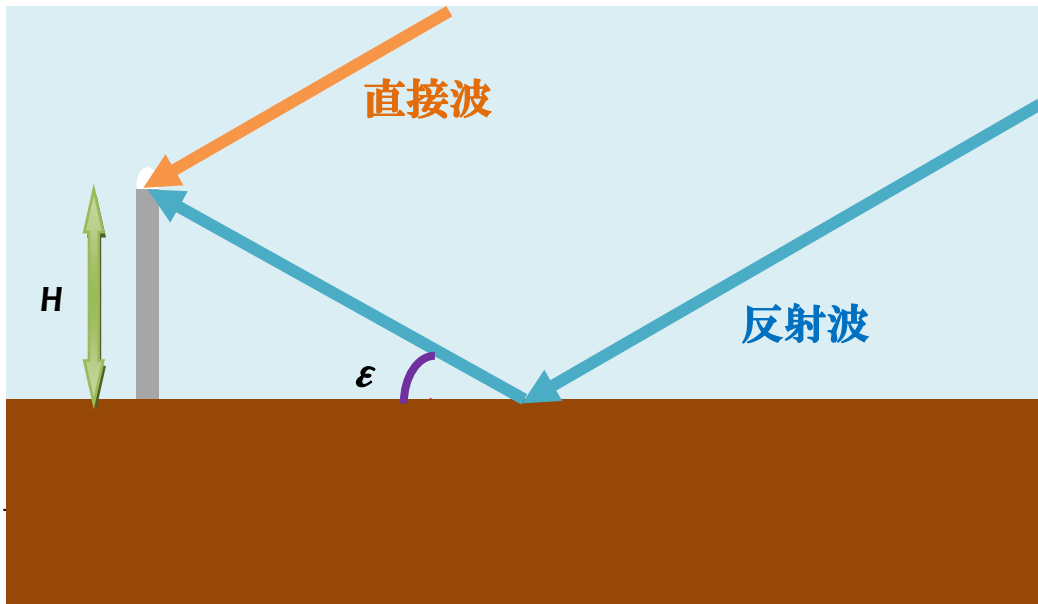


図2-1.マルチパスのイメージ図。 $\epsilon$ は衛星仰角、 $H$ はアンテナ高である。

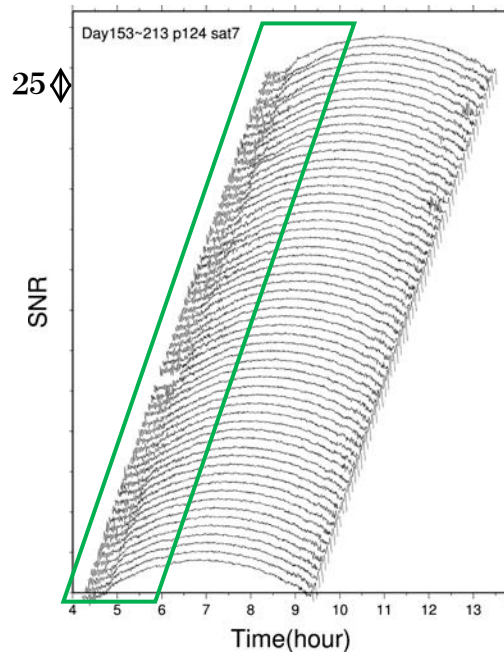


図2-2.GPS-P点 P124 で衛星7番を受信した際の SNR の時間変動。GPSの周期は23時間56分なので一日約4分ずつ昇る時刻が変化する。

## 2-2. アンテナ高の推定方法の比較

マルチパスの効果からアンテナ高を推定する方法には、SNR (signal to noise ratio; 信号対雑音比)を用いる方法と L4 (L1 と L2 の位相差)を用いる方法がある。

SNR はマイクロ波の信号強度と雑音の比であり、雑音を一定とすると信号強度に相当する。SNR は直接波と反射波との位相差 $\psi$ に式(2)のように依存する。

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

ただし $A_d$ は直接波の振幅、 $A_m$ は反射波の振幅で、 $\alpha = A_m/A_d$ である。

$\psi$ は直接波と反射波の位相差で、余剰光路長を波長で割って、

$$\psi = 4\pi \frac{H}{\lambda} \sin \varepsilon \quad (3)$$

と表すことができる。

(2)式から、直接波と反射波の位相差 $\psi$ を知ることができる。

また、(3)式の両辺を時間で全微分すると、

$$\frac{d\psi}{dt} = 4\pi \frac{H}{\lambda} \cos \varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4)$$

となり、GPS 衛星の仰角の時間変化と位相差の変化を関係づけることができる。

式(4)は、 $H$ が一定のときは、仰角の低い場合にはより位相変化が速く、仰角が高い場合にはより遅いことをしめしている。また位相変化の速さはアンテナ高  $H$  に比例する。この関係をもちいて、今までに積雪深(Larson et al.2009)や土壌水分(Larson et al. 2010)を測定した事例が報告されている。

Larson et al. (2013)は、 $\sin \varepsilon$  の関数として SNR をスペクトル解析することで海面高観測をこころみた。位相差 $\psi$ を  $\sin \varepsilon$  で両辺を微分すると、

$$\frac{d\psi}{dx} = 4\pi \frac{H}{\lambda} \quad x = \sin \varepsilon \quad (5)$$

このように位相差の変動が仰角  $\varepsilon$  に依存せず、 $H$  が一定のときにはある決まった周波数を持つようになる。

$L4$  は  $L1$  と  $L2$  の位相差を長さの単位で表したものである。

$$L4 \equiv L1 - L2 \quad (6)$$

$L4$  には幾何学的な情報が相殺されて電離層遅延の情報のみをふくむため、電離層擾乱の観測に利用される。Ozeki and Heki (2012) はこの  $L4$  の位相の振動を使って積雪深を観測した。

本研究では、データが常時存在するわけではないが、より高精度でマルチパスを観測できる SNR を利用することとし、衛星仰角の変動にともなう SNR の時間変化を利用してアンテナ高を推定した。

### 2-3. マルチパスと衛星仰角

式(1)の  $\alpha$  はアンテナにとどく直接波と反射波との割合である。 $\alpha$  は反射面の物性にもよるが、アンテナパターンにもよる。GPS アンテナは方位角方向には広い指向性を持つ。そして仰角方向には仰角の高い電波をよく受信する。したがって衛星の仰角が高くなるほどアンテナは直接波をより強く、反射波をより弱く受信するようになり、 $\alpha$  が極端に小さくなってしまう。そこで本研究では仰角の低い、昇った直後または沈む直前2時間の SNR を使用した。

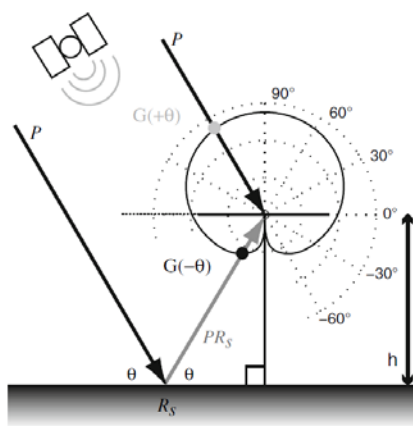


図2-3. アンテナパターンの模式図。 $\theta$  は衛星仰角である。(Larson et al., 2008 より引用)

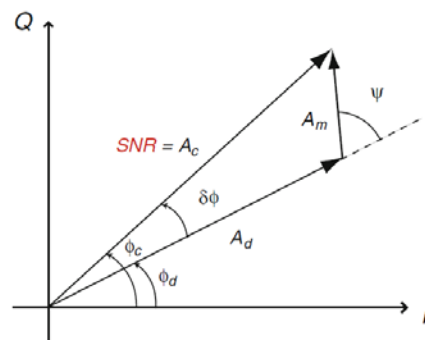


図2-4. SNR、直接波、反射波のベクトル図(Larson et al., 2008 より引用)



### 3. GPS と海面の関係

#### 3-1. アンテナ高と海面の関係

験潮場では、験潮場ごとに決められた標高原点より低いある面から海面高を計測している(図 3-1)。この面を観測基準面とよぶ。本研究では、各々の験潮場の観測基準面から測った海面の高さを海面高とした。また、アンテナ位相中心の標高は、国土地理院のジオイド高データ及びジオイド高内挿プログラム「日本のジオイド 2000 ver. 5」と国土地理院に提供していただいた各 GPS 観測点の F3 解 (測位解)の鉛直座標より求めた。

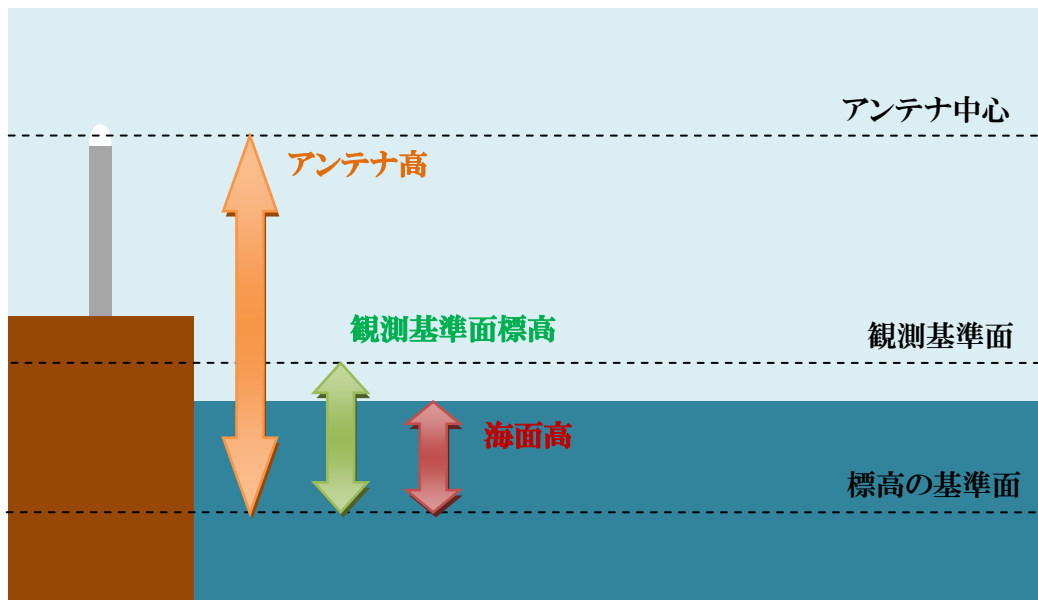


図 3-1 験潮場における様々な「高さ」の関係

表3-1.GPS-P点を設置している験潮場の所在地と観測基準面標高

GPS-P点	験潮場(検潮所)	験潮場の所管機関名	緯度	経度	観測基準面標高(cm)
P101	忍路験潮場	国土地理院	43° 13'	140° 52'	-130.94
P102	奥尻験潮場	国土地理院	42° 05'	139° 29'	-99.91
P103	浅虫験潮場	国土地理院	40° 54'	140° 52'	-93.54
P104	男鹿験潮場	国土地理院	39° 57'	139° 42'	-50.48
P105	鼠ヶ関験潮場	国土地理院	38° 34'	139° 33'	-89.44
P107	勝浦験潮場	国土地理院	35° 08'	140° 15'	-299.47
P108	油壺験潮場	国土地理院	35° 10'	139° 37'	-258.37
P109	小木験潮場	国土地理院	37° 49'	138° 17'	-148.60
P110	柏崎験潮場	国土地理院	37° 21'	138° 31'	-127.96
P111	輪島験潮場	国土地理院	37° 24'	136° 54'	-88.89
P112	三国験潮場	国土地理院	36° 15'	136° 09'	-180.09
P113	伊東験潮場	国土地理院	34° 54'	139° 08'	-226.08
P114	田子験潮場	国土地理院	34° 48'	138° 46'	-250.18
P115	焼津験潮場	国土地理院	34° 52'	138° 20'	-311.52
P116	鬼崎験潮場	国土地理院	34° 54'	136° 49'	-241.90
P117	海南験潮場	国土地理院	34° 09'	135° 12'	-218.07
P118	田後験潮場	国土地理院	35° 36'	134° 19'	-200.03
P119	須佐験潮場	国土地理院	34° 38'	131° 36'	-144.48
P120	久礼験潮場	国土地理院	33° 20'	133° 15'	-217.54
P121	狩屋験潮場	国土地理院	33° 28'	129° 51'	-247.80
P122	細島験潮場	国土地理院	32° 26'	131° 40'	-227.19
P123	阿久根験潮場	国土地理院	32° 01'	130° 11'	-321.10
P124	沖繩験潮場	国土地理院	26° 11'	127° 49'	-217.38
P201	稚内検潮所	気象庁	45° 24'	141° 41'	-165.6
P202	網走検潮所	気象庁	44° 01'	144° 17'	-150.5
P203	釧路検潮所	気象庁	42° 59'	144° 22'	-193.3
P204	函館検潮所	気象庁	41° 47'	140° 43'	-155.5
P206	布良検潮所	気象庁	34° 55'	139° 50'	-138.1
P207	富山検潮所	気象庁	36° 46'	137° 13'	-110.2
P208	串本検潮所	気象庁	33° 29'	135° 46'	-161.1
P209	浜田検潮所	気象庁	34° 54'	132° 04'	-91.9
P210	長崎検潮所	気象庁	32° 44'	129° 52'	-272.8
P211	油津検潮所	気象庁	31° 35'	131° 25'	-141.3
P212	那覇検潮所	気象庁	26° 13'	127° 40'	-257.5
950194	飛島験潮場	国土地理院	39° 11'	139° 33'	-209.79
960676	宇野検潮所	気象庁	34° 29'	133° 57'	-171.6

### 3-2. 予想した誤差の要因

験潮場では屋内にある井戸で海面高を計測している。それに対し、GPS による観測では屋外の海面で反射した電波を利用している。そのため GPS による観測では、験潮場での観測にくらべると外界の影響をうけやすいことが予想できる。外界の影響には以下のようなものがある。

1. アンテナが海面からの反射波をとらえているか。これは個々の GPS 衛星からのマイクロ波の反射点が海上にあることを地図上で確認すれば確認することができる。
2. 局舎自体をはじめとする様々な遮蔽物により、反射したマイクロ波がアンテナに届かない可能性がある。これは写真や地図を見ることである程度の推測が可能だが、どのような遮蔽があるのかは実際に現地でアンテナを見てみなければわからない。
3. 波浪によって海面での反射がアンテナへ届かなくなることも考えられる。これは、波浪の観測データを確認すればどの程度の影響を受けるか確認することができる。

## 4. GPS-P 点における観測データの解析

### 4-1. 観測地域・期間

#### 4-1-1. GPS-P 点と験潮場

GPS のデータは沖縄験潮場内に設置してある GPS-P 点(P124)の 2012 年 6 月から 2012 年 7 月の 2 ヶ月間のものを使用した。GPS-P 点での GPS の観測データの解析結果を沖縄験潮場の海面高観測データと比較し、評価した。

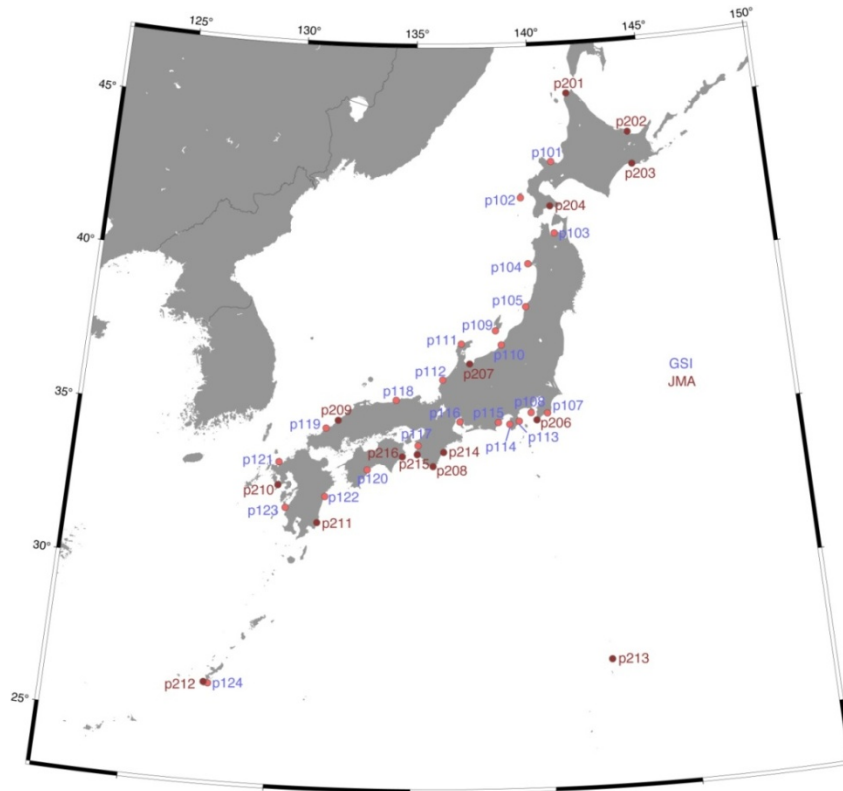


図4-1:全国のGPS-P点の分布。験潮場の管轄は国土地理院と気象庁の両者がある。

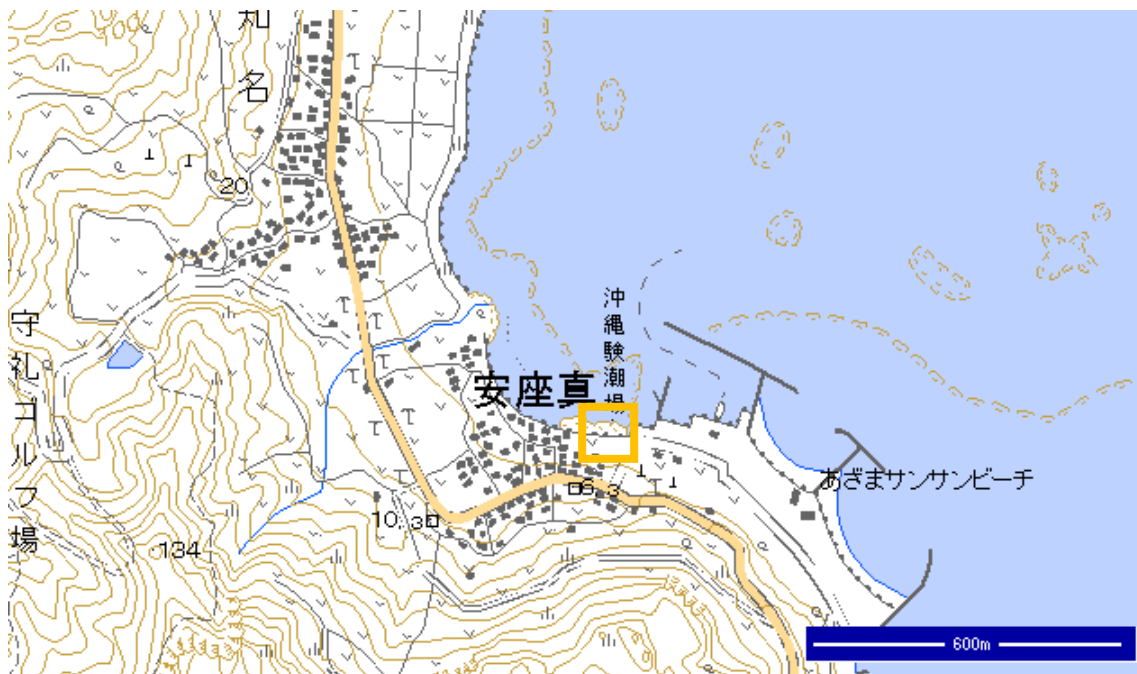


図4-2:沖繩験潮場周辺の地形図。だいたい色の四角は図4-7、図4-8の枠線である。

#### 4-1-2. 波浪の観測

GPSによる海面高観測への波浪の影響を調べるために、国土交通省港湾局により観測された那覇港の波浪観測データを使用した。

有義波高とは、ある一定の時間内に観測した連続する波の波高をはかり、波高の高い順に3分の1をとり、平均したものである。

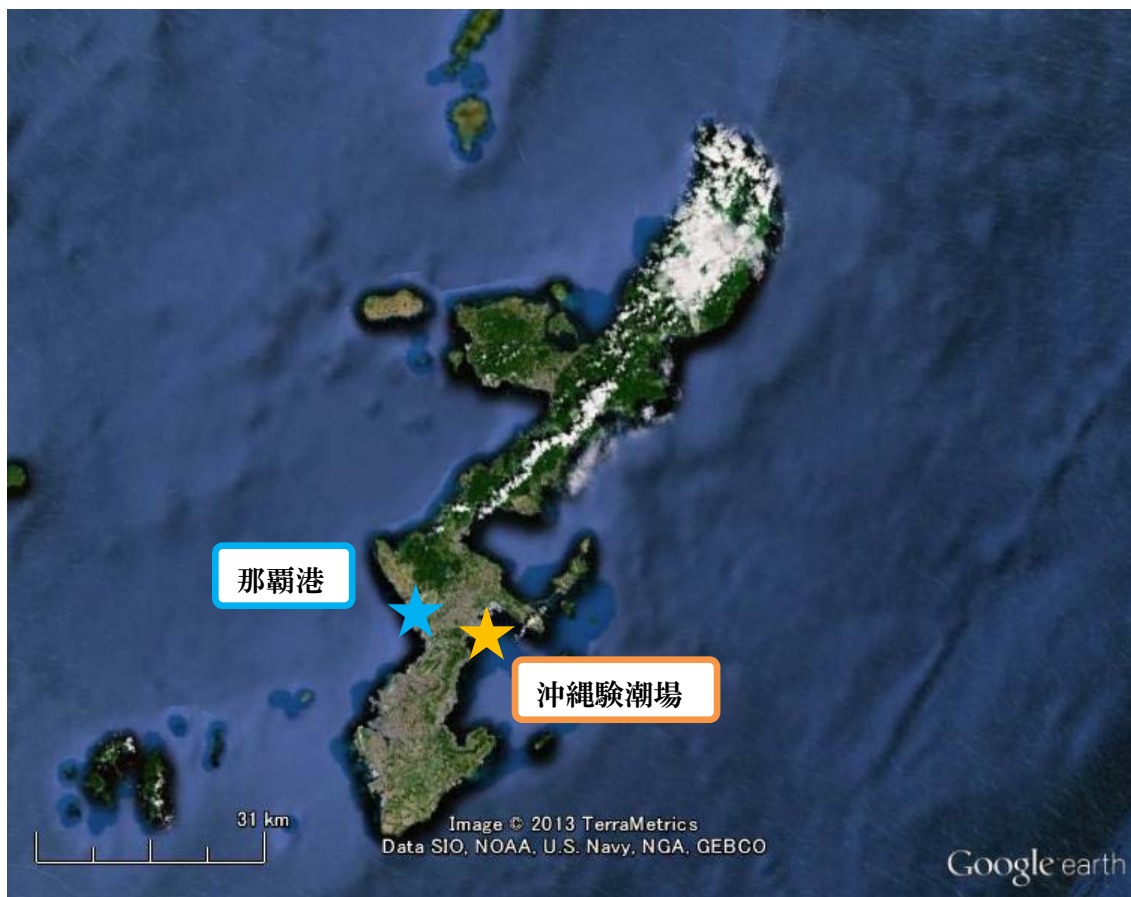


図4-3. 沖縄験潮場と那覇港の位置

## 4-2.手順

### 1. キャリブレーションカーブの計算

まずアンテナ高を 3m から 15m まで 1m きざみで変化させて、衛星仰角の変動にともなう SNR の時間変化を式(2)・式(3)を用いて計算した。 $\alpha$ は 0.06 で一定と仮定した。SNR の時間変化を Blackman-Tukey 法によってスペクトル解析した。スペクトルのピークとアンテナ高との関係は直線で近似した。

### 2. SNR の時間変化のスペクトル解析

国土地理院より、GPS 電子基準点および GPS-P 点の RINEX 型式の観測データを取得した。RINEX(Receiver Independent Exchange Format)型式とは、干渉測位のための共通データ形式の名称である。最近の受信機はたいてい SNR を観測しているので、RINEX 型式の観測データにも決められたかたちで記載してある。そこでこのデータから SNR を読みとり、Blackman-Tukey 法をもちいて SNR をスペクトル解析し、周波数ピークの位置を決めた。

周波数ピークの位置は以下のようにしてもとめた。まず、験潮場の潮汐データの値から期待できるアンテナ高を求めた。そしてそのアンテナ高から100cmをひいた値と100cmをたした値とをキャリブレーションカーブによってそれぞれのアンテナ高から期待されるピークへと変換した。このピークをそれぞれ下限と上限とし、その範囲内で一番大きいパワースペクトルをもつ周波数をピークとした。

### 3. アンテナ高の推定と海面高への変換

SNR の時間変化のピークからキャリブレーションカーブをもちいることでアンテナ高を推定できる。3-1.で述べた海面高とアンテナ高の関係をもちいて、推定したアンテナ高を海面高へと変換した。

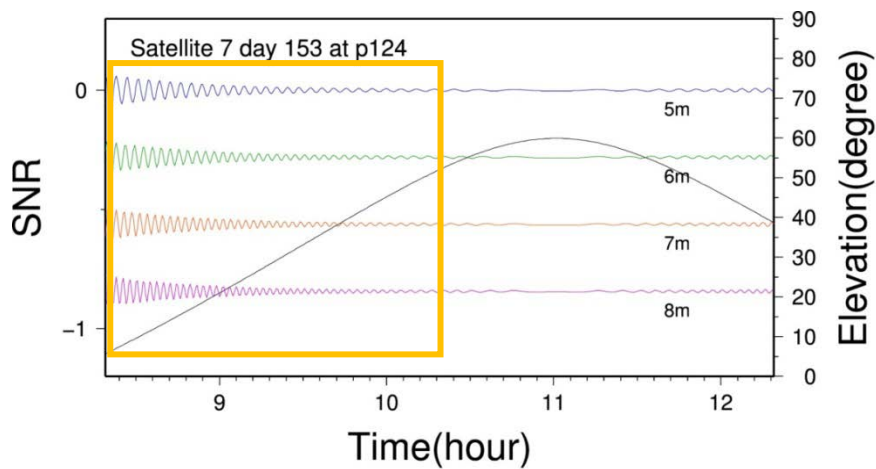


図4-4.2013年 day153 における衛星7番の衛星仰角の変動(11時に最大を持つ曲線)と、それともなう L2 の SNR の時間変化を計算したもの(アンテナ高は 5, 6, 7, 8m の四通りを仮定した)。

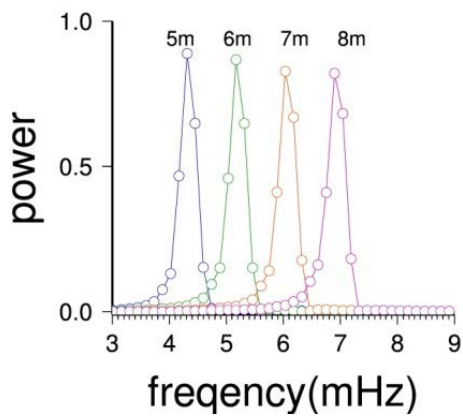


図4-5.昇り始め2時間の SNR の時間変化(上図の囲み)をスペクトル解析した結果。アンテナ高が高いほど SNR が変動する周波数が高いことがわかる。

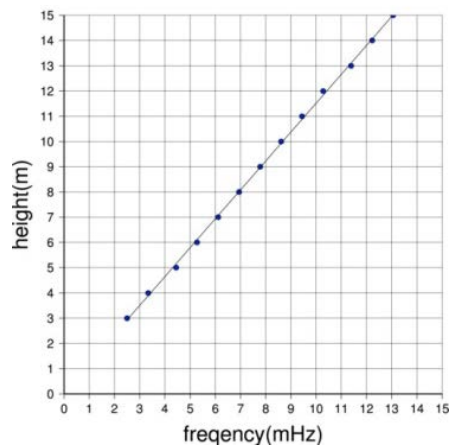


図4-6.左図についてスペクトルのピークとアンテナ高の関係を示したもの。横軸が SNR の周期変化のスペクトルのピーク的位置、縦軸がアンテナ高である。この範囲では両者はほぼ直線的な関係にある。

### 4-3.結果—沖縄駿潮場(P124)の事例

#### 4-3-1.使用した衛星

海上に反射点をもつ 3,7,10,20,22,29 番衛星を使用した。7,22,29 番は昇る衛星、3,10,20 番は沈む衛星である。

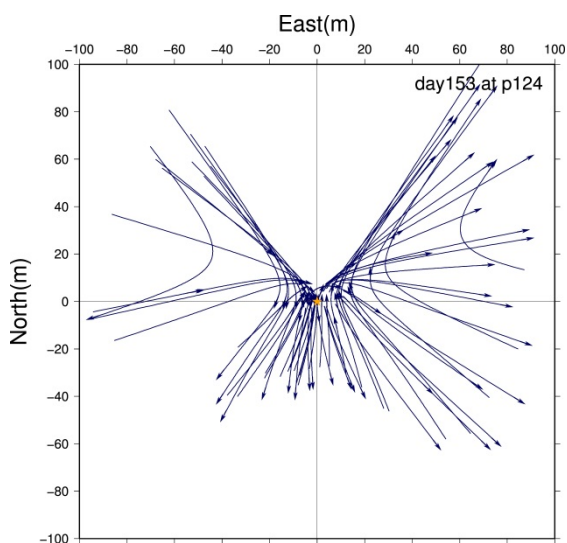


図4-7.2012年 Day153 の P124点でのすべての衛星の反射点の軌跡。なおアンテナ高は5mで一定としている。

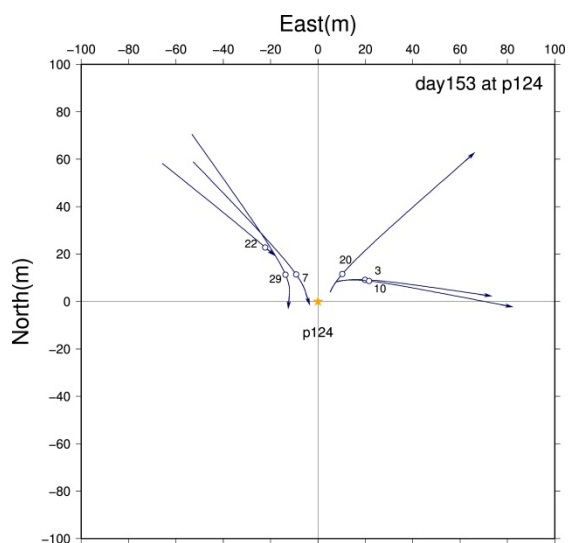


図4-8.前の図から、海洋潮汐の観測に使用した衛星の反射点の軌跡のみを取り出してプロットしたもの。

表4-1.使った衛星(時間は Day153 に衛星が昇り/沈みはじめた時間)

衛星	軌道	時間(hour)
3	descending	12.517
7	ascending	8.317
10	descending	21.3
20	descending	16.775
22	ascending	23.55
29	ascending	18.675



#### 4-3-2. 各衛星による結果

この節では、各衛星について解析した結果をしめす。

図4-9.~14., 図4-21.~26. はSNRの時間変化をスペクトル解析した結果である。青い星印で示した周波数をピークの位置とした。橙色の曲線は験潮儀による海面高変動から、個々の衛星の沈む(または昇る)時刻の値を読み取って、それらを結んだものである。図4-15.~20., 図4-27.~32. の上部に示した図はGPS、験潮儀でそれぞれ測定した海面高の時間変動をしめしたものだ。灰色が験潮儀で測った海面高変動、青色がGPSによって推定した海面高変動である。丸の色はピークの強さ、棒グラフは那覇港での有義波高をしめしている。図4-15.~20., 図4-27.~32. の下部に示す図はGPS、験潮場でそれぞれ測定した海面高を比較したものである。赤い直線は験潮儀とGPSのそれぞれで得られた測定値が同じである場合を示すものである。緑の直線は、両者の間に一定のバイアスがあると仮定して、各データの赤い直線からのずれを平均した量だけ、赤い直線を移動させたものである。

## L1の結果

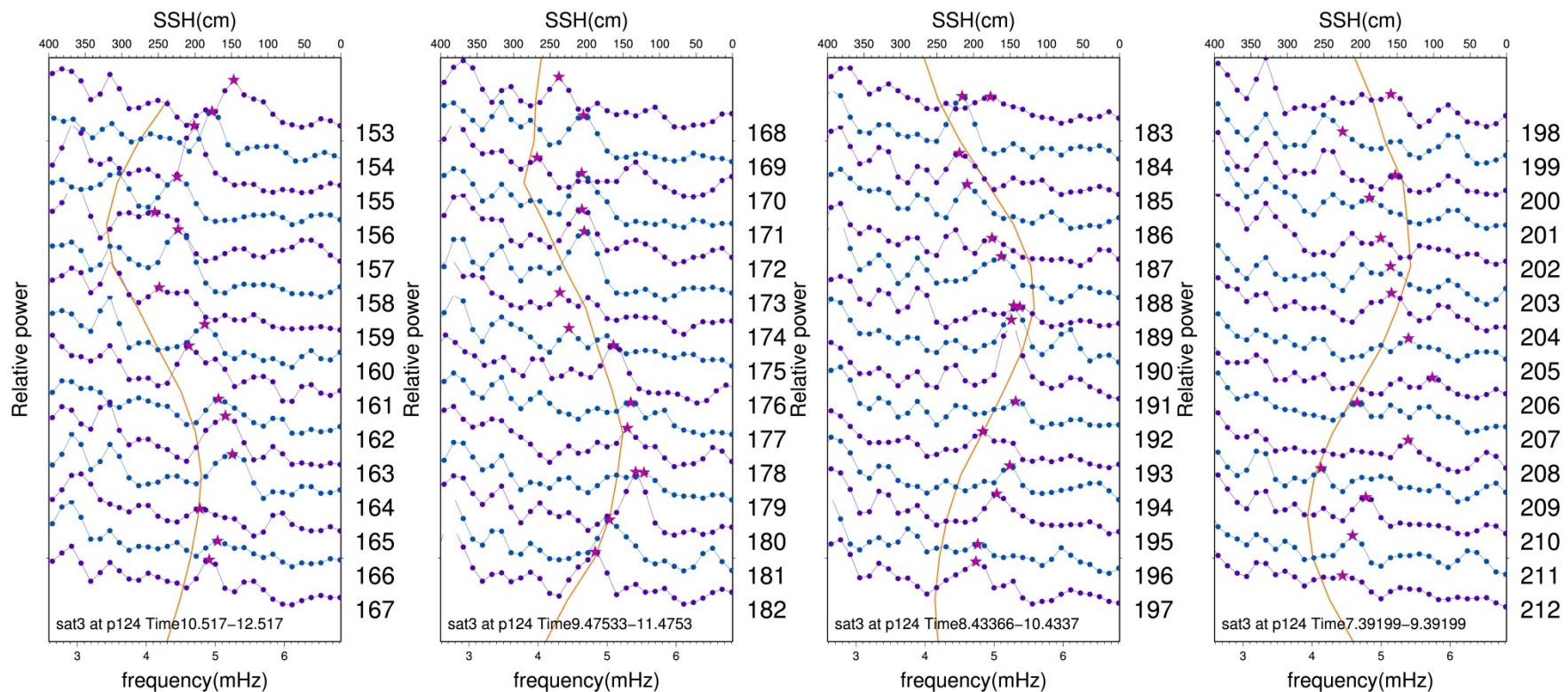


図4-9.P124での衛星3番の L1 の SNR 時間変動のスペクトルの変動。四つの図は右側の目盛で示す通算日によって二週間ごとに分けたものである。橙色の曲線は 験潮儀の測定値から、予測される周波数ピークの位置を予想したもの。実際に観測された周波数ピーク(青い星印)と一致していれば、GPS と験潮儀による潮位の測定値が一致していることを示す。

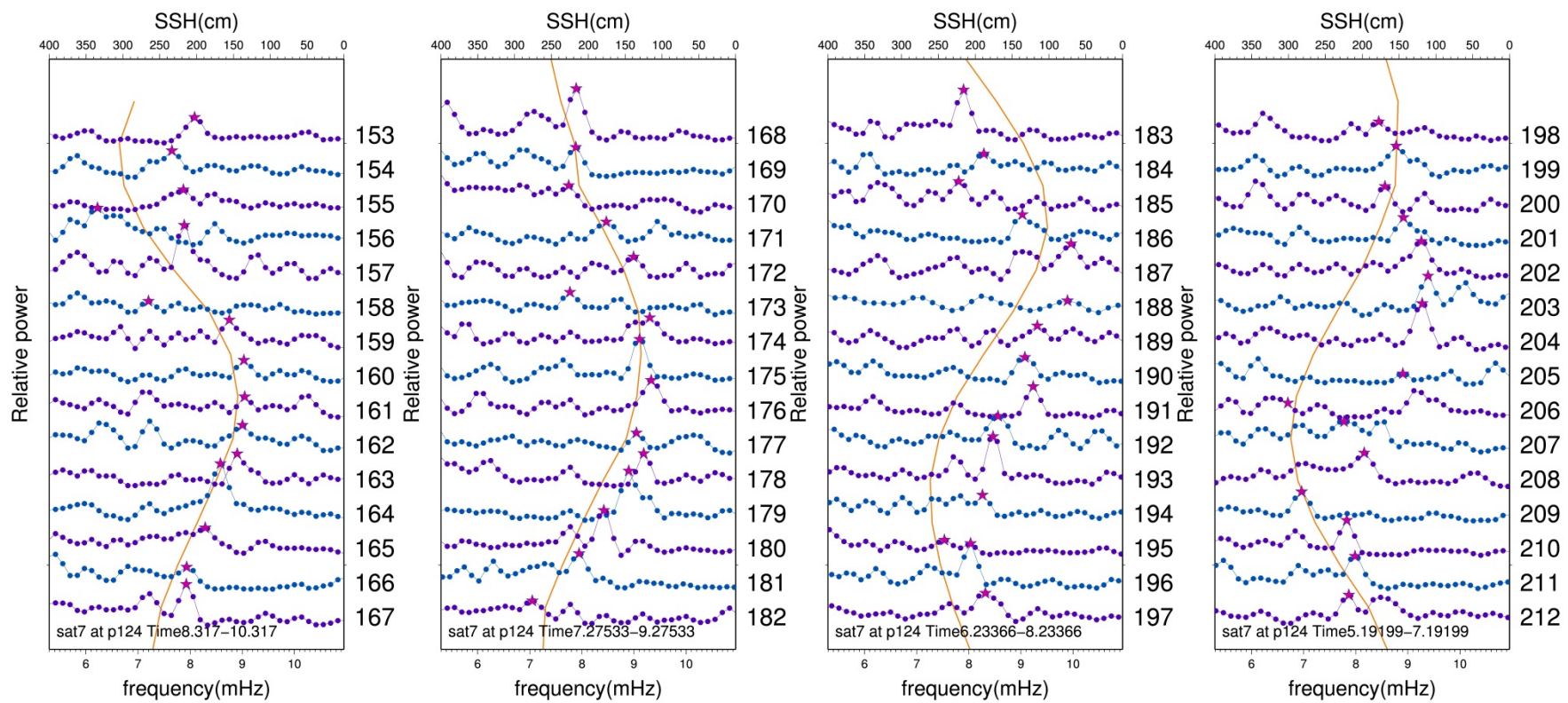


図4-10.P124での衛星7番の L1 の SNR 時間変動のスペクトルの変動

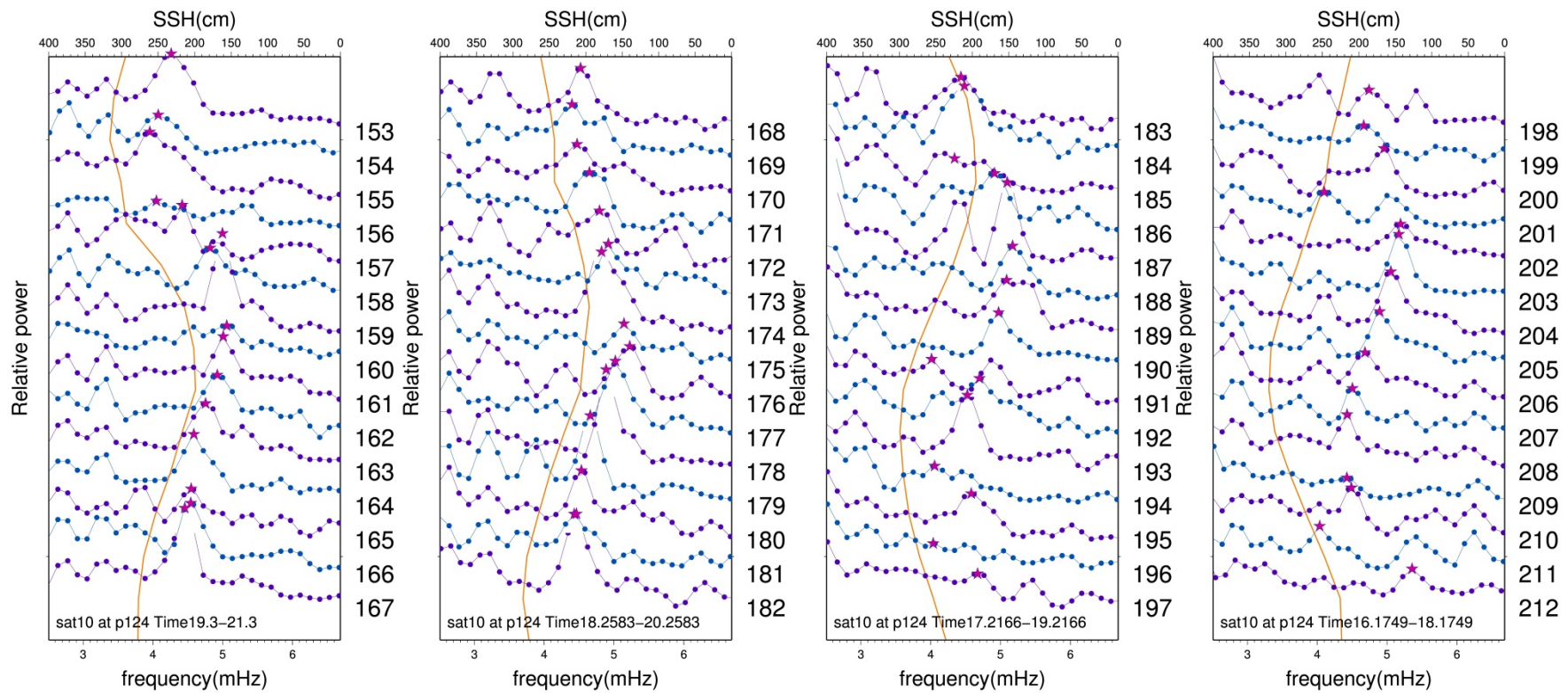


図4-11.P124での衛星10番のL1のSNR時間変動のスペクトルの変動



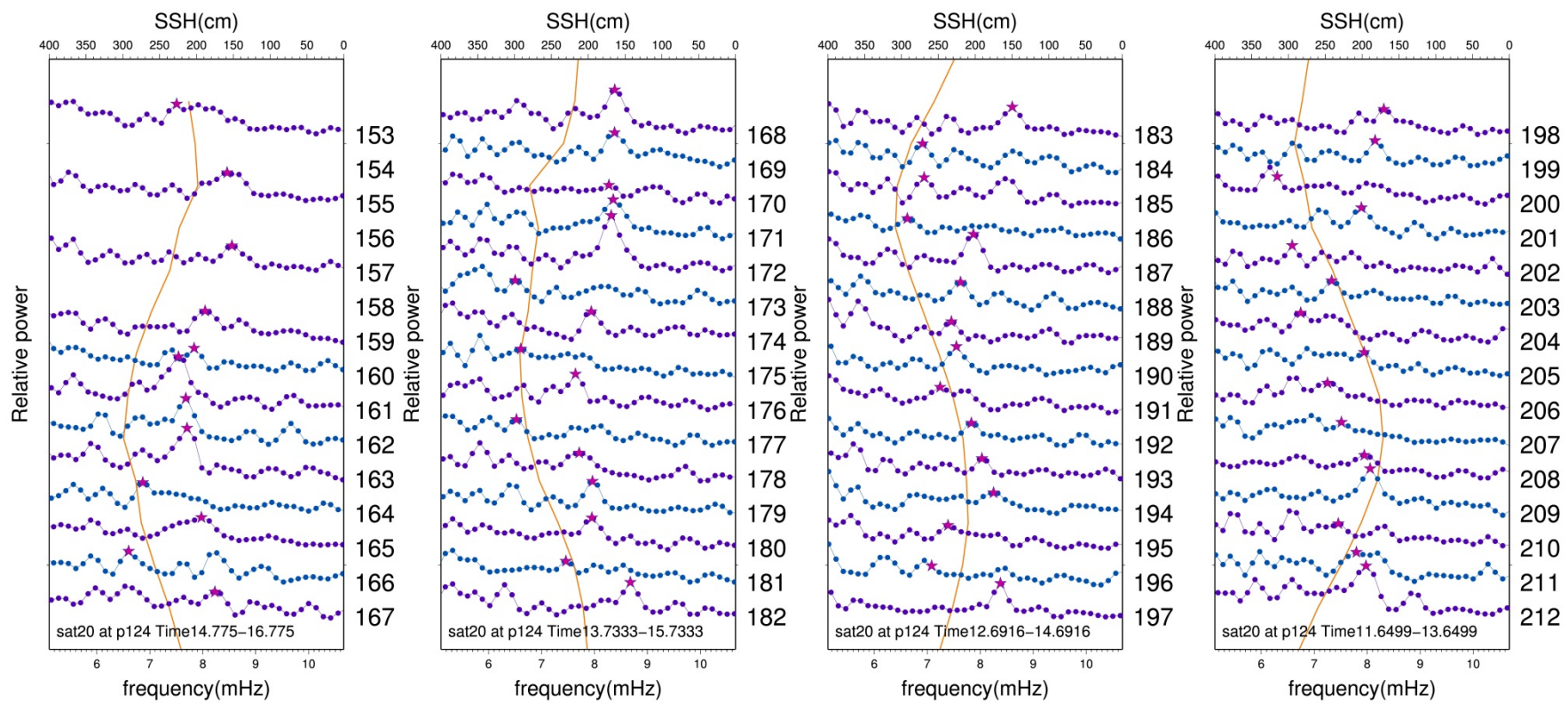


図4-12.P124での衛星20番の L1 の SNR 時間変動のスペクトルの変動

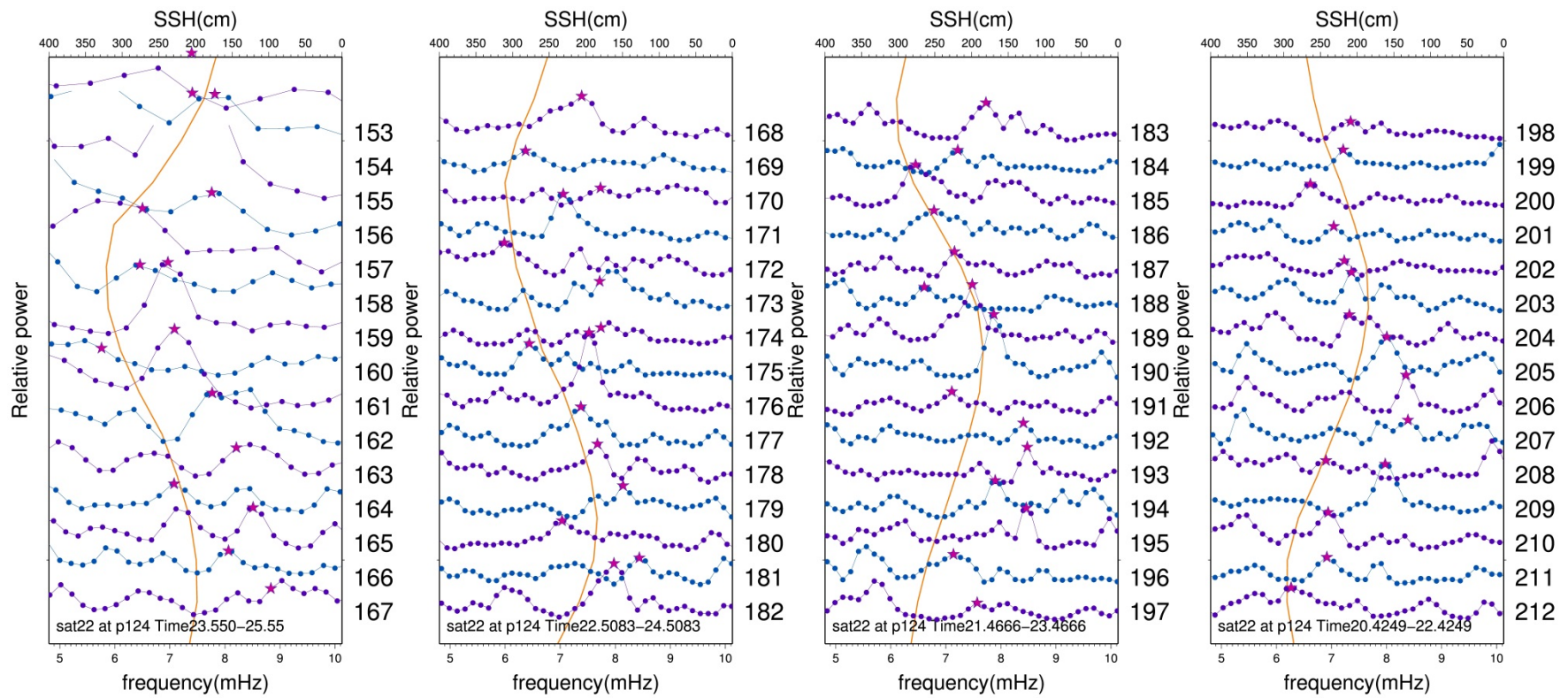


図4-13.P124での衛星22番の L1 の SNR 時間変動のスペクトルの変動

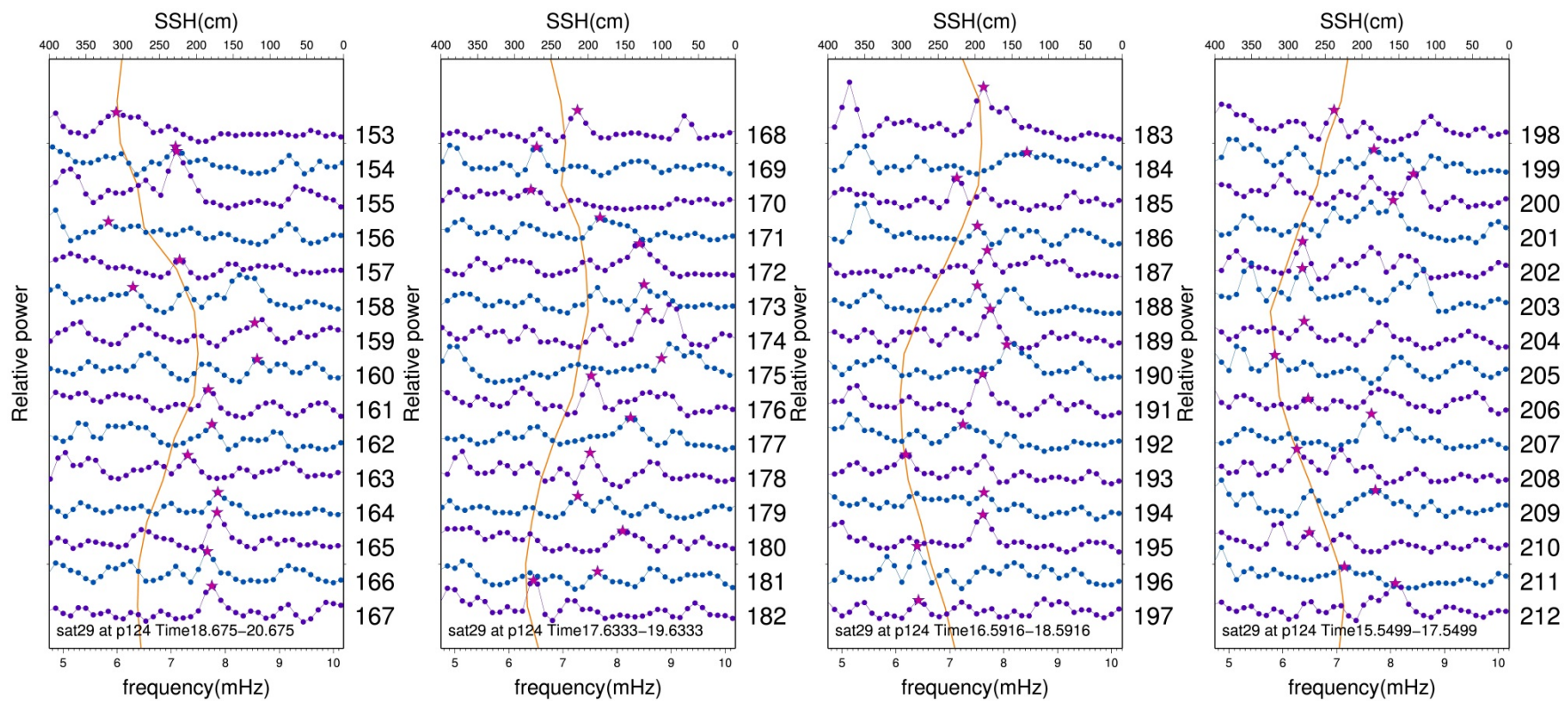


図4-14.P124での衛星29番のL1のSNR時間変動のスペクトルの変動



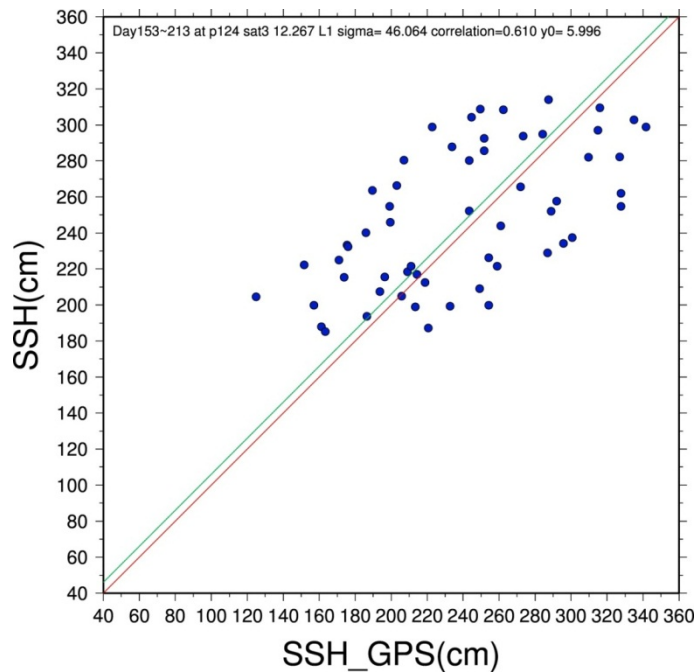
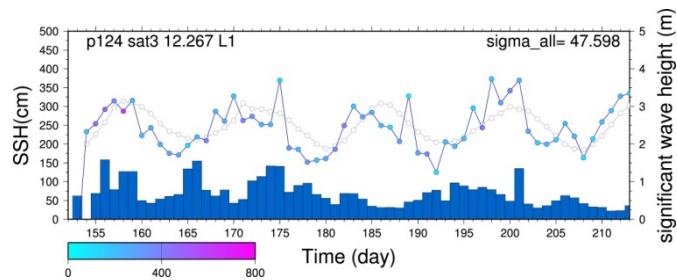


図4-15.(上)灰色の曲線は、沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色の折れ線がGPSによって計測された海面高で、図4-9の星印を海面高に変換したものである。棒グラフは那覇港での有義波高。(下)横軸が3番衛星の観測から推定された海面高、縦軸が験潮儀で観測された海面高である。両者が一致すると赤い直線上に分布するはずである。青い直線は、両者に一定値のバイアスがあると仮定して、もっとも両者が一致するように引いた直線である。



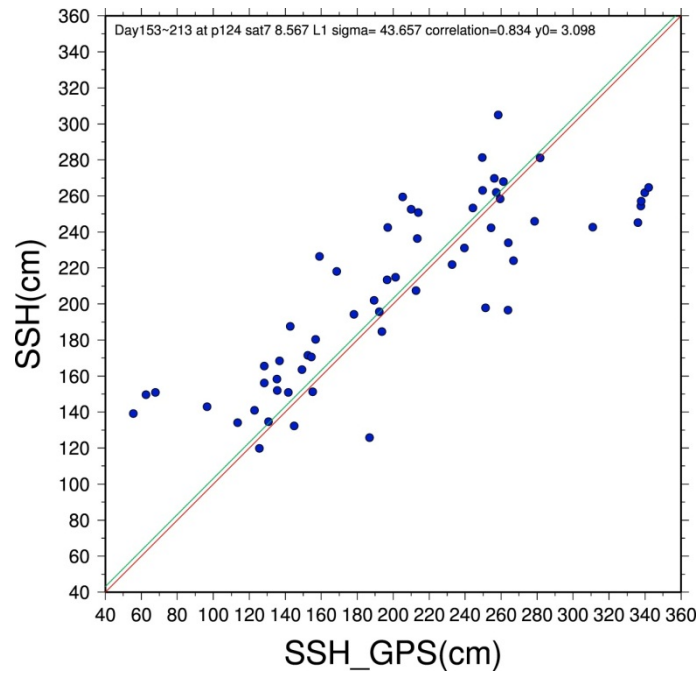
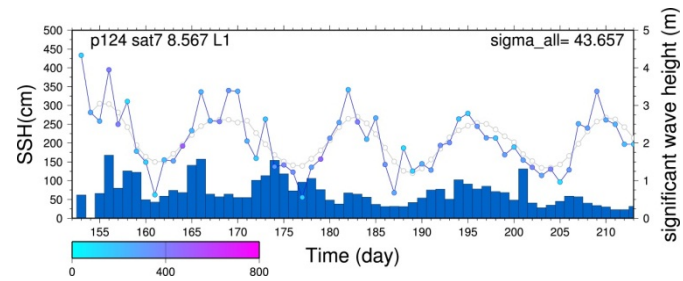


図4-16.(上)灰色が沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色が図4-10の星印を海面高に変換したものである。下の棒グラフは那覇港での有義波高。(下)横軸が7番衛星で得た海面高、縦軸が験潮儀で得た海面高である。

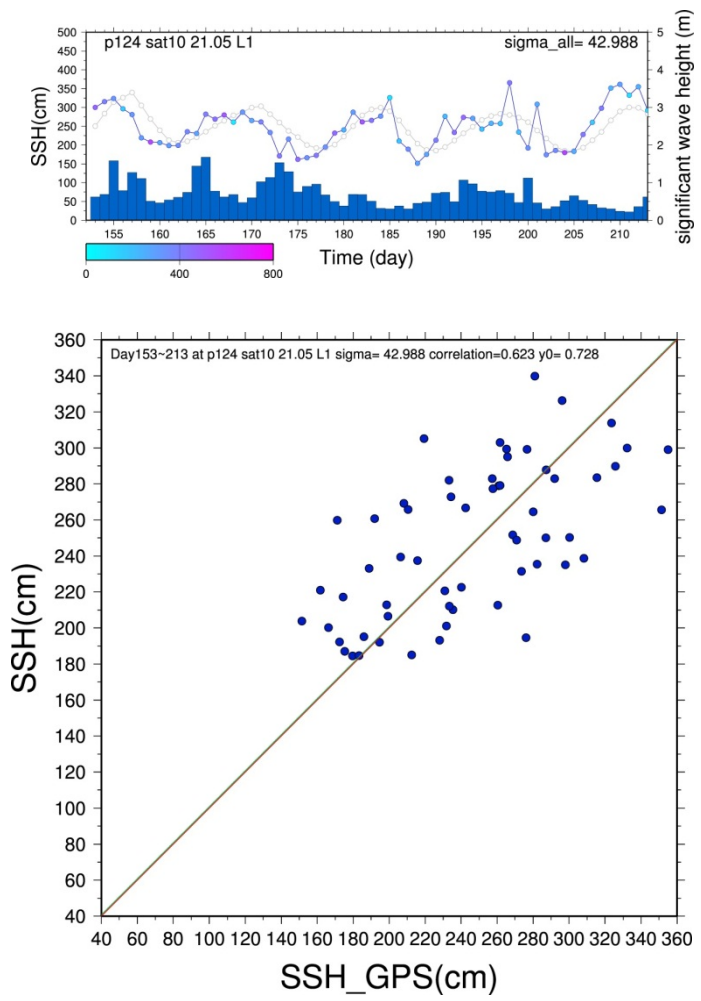


図4-17.(上)灰色が沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色が図4-11の星印を海面高に変換したものである。下の棒グラフは那覇港での有義波高。(下)横軸が10番衛星で得た海面高、縦軸が験潮儀で得た海面高である。

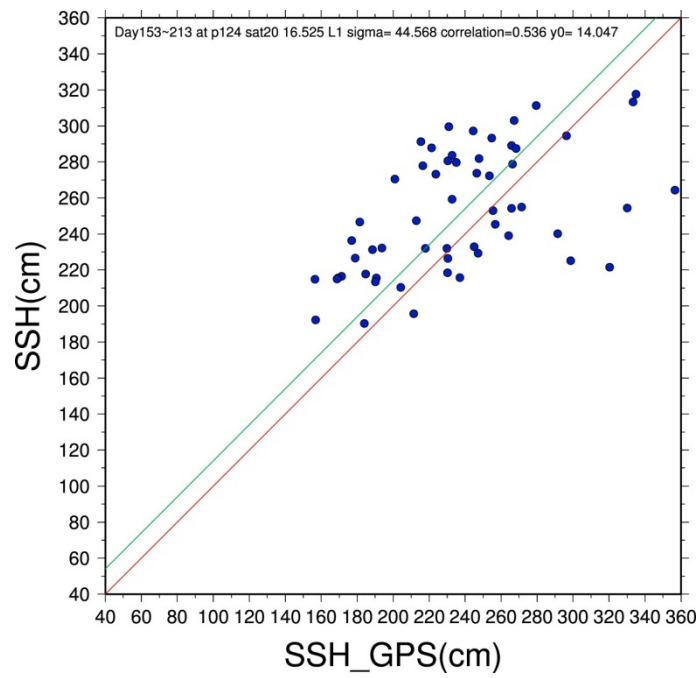
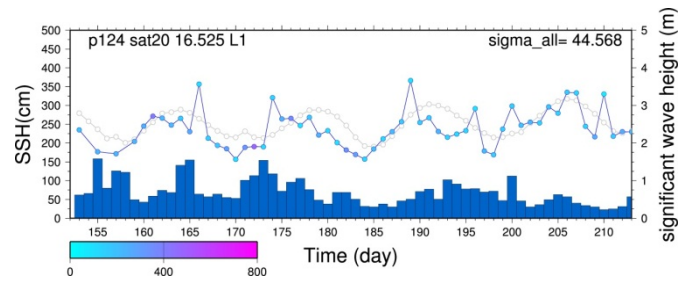


図4-18.(上)灰色が沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色が図4-12の星印を海面高に変換したものである。下の棒グラフ是那覇港での有義波高。(下)横軸が20番衛星で得た海面高、縦軸が験潮儀で得た海面高である。

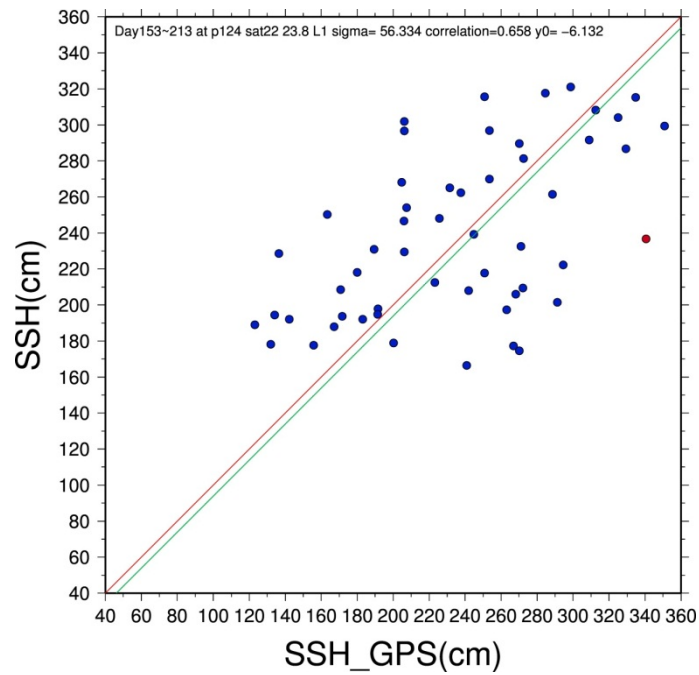
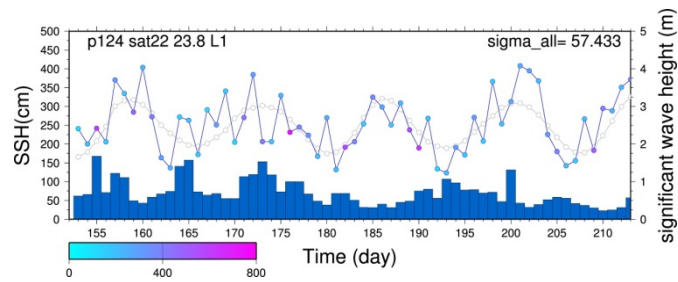


図4-19.(上)灰色が沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色が図4-13の星印を海面高に変換したものである。下の棒グラフは那覇港での有義波高。(下)横軸が22番衛星で得た海面高、縦軸が験潮儀で得た海面高である。

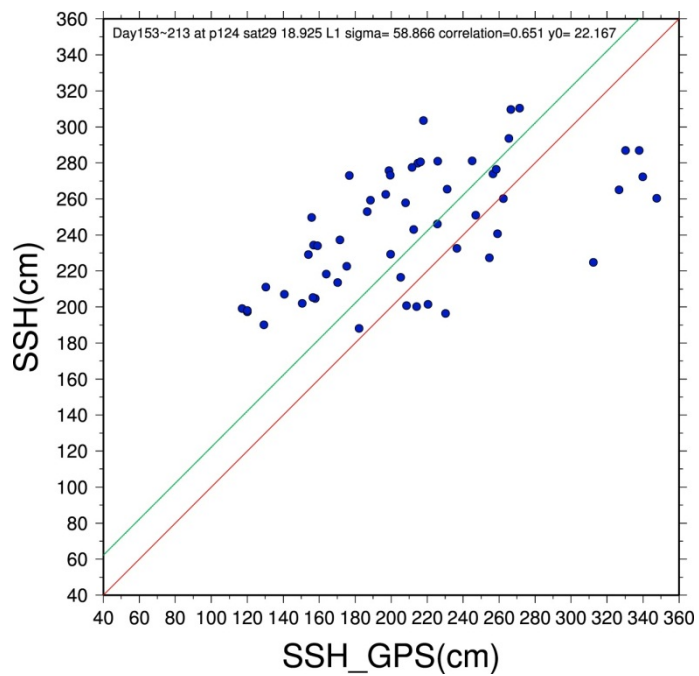
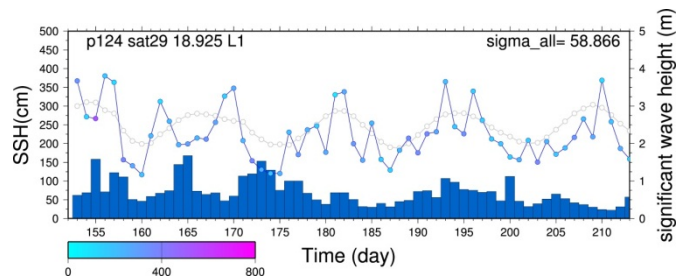


図4-20.(上)灰色が沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色が図4-14の星印を海面高に変換したものである。下の棒グラフは那覇港での有義波高。(下)横軸が29番衛星で得た海面高、縦軸が験潮儀で得た海面高である。

## L2 の結果

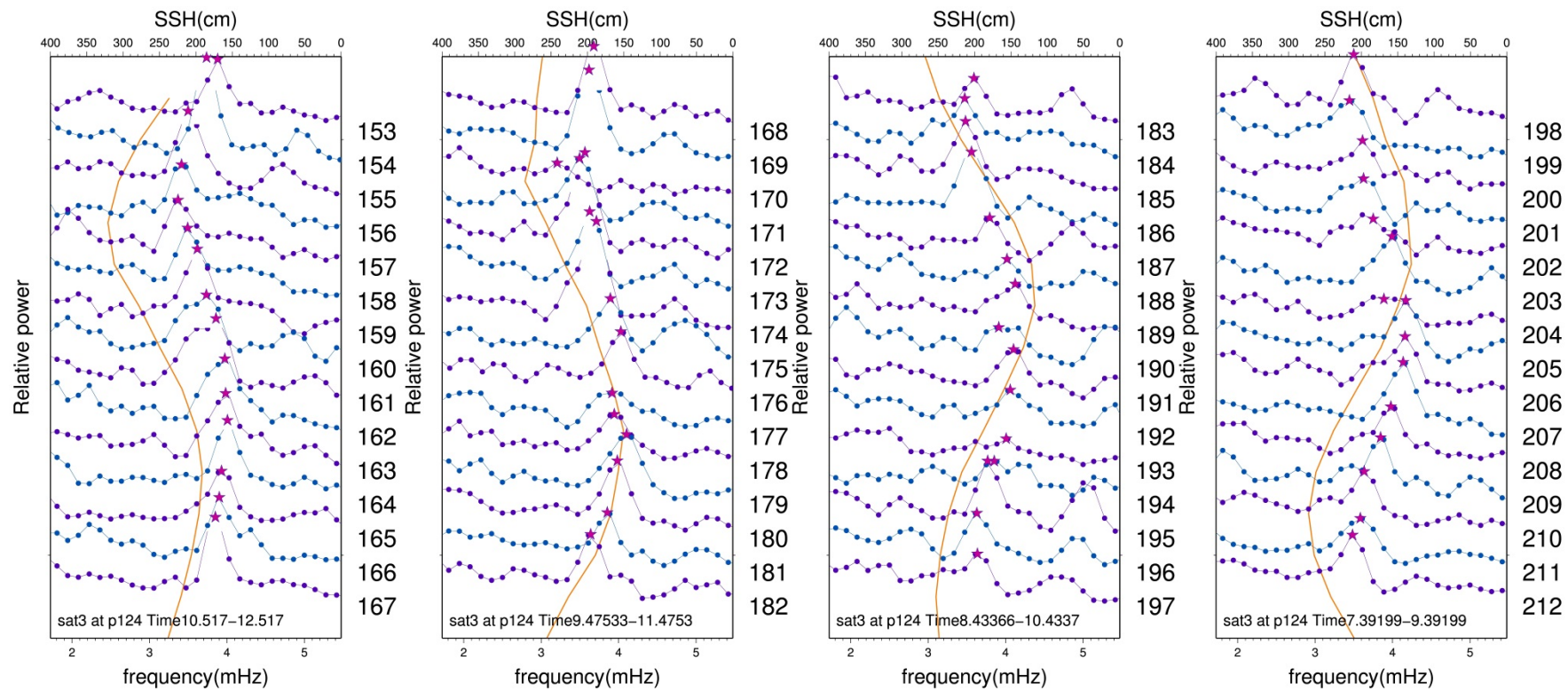


図4-21.P124での衛星3番のL2のSNR時間変動のスペクトルの変動。詳細は図4-9の説明を参照のこと。



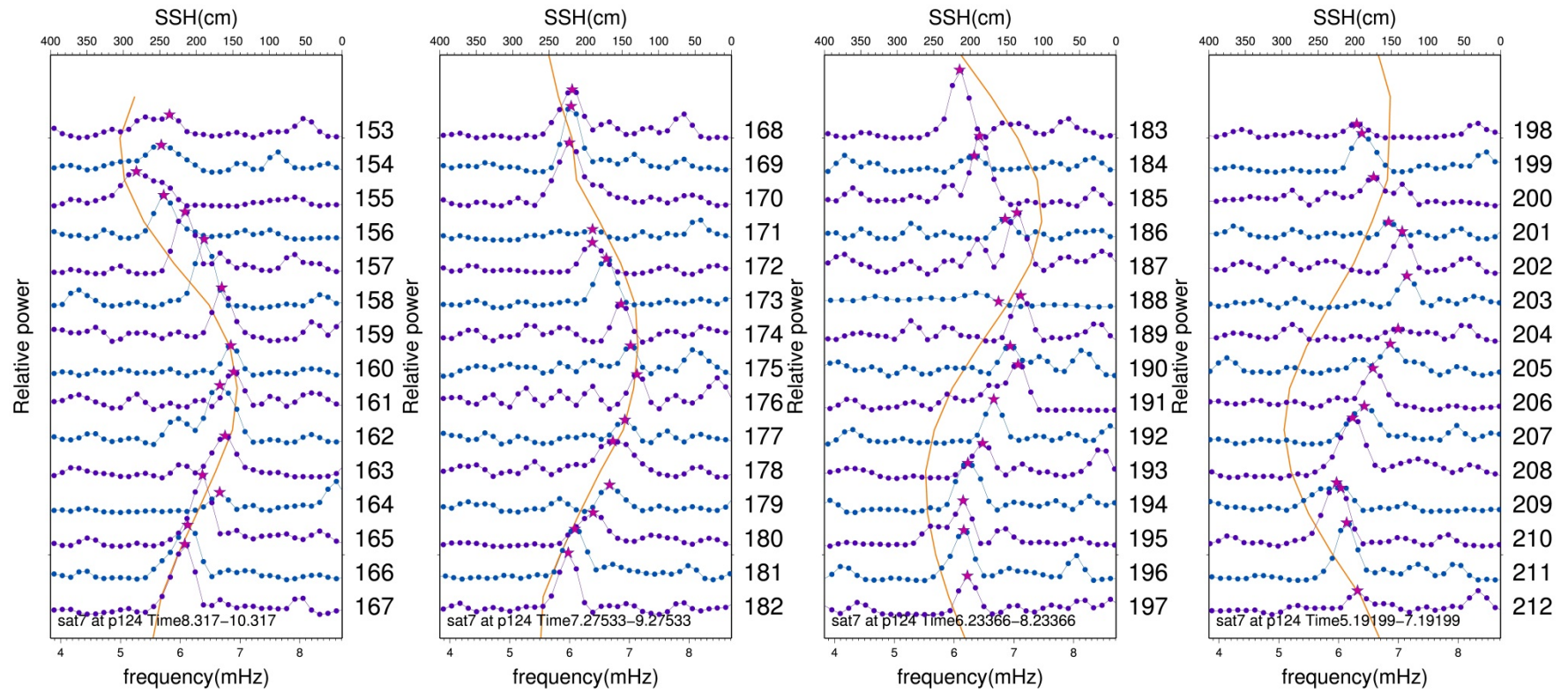


図4-22.P124での衛星7番のL2のSNR 時間変動のスペクトルの変動

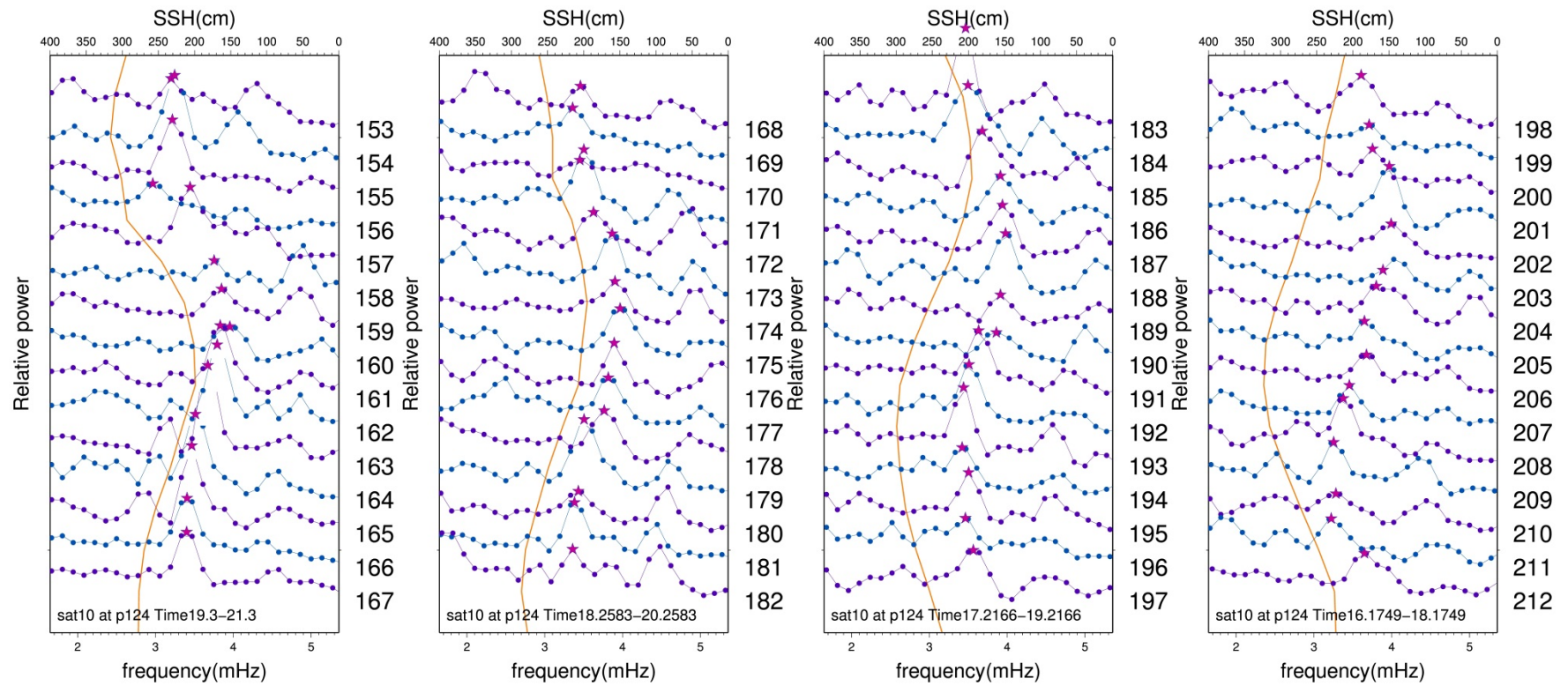


図4-23.P124での衛星10番の L2の SNR 時間変動のスペクトルの変動



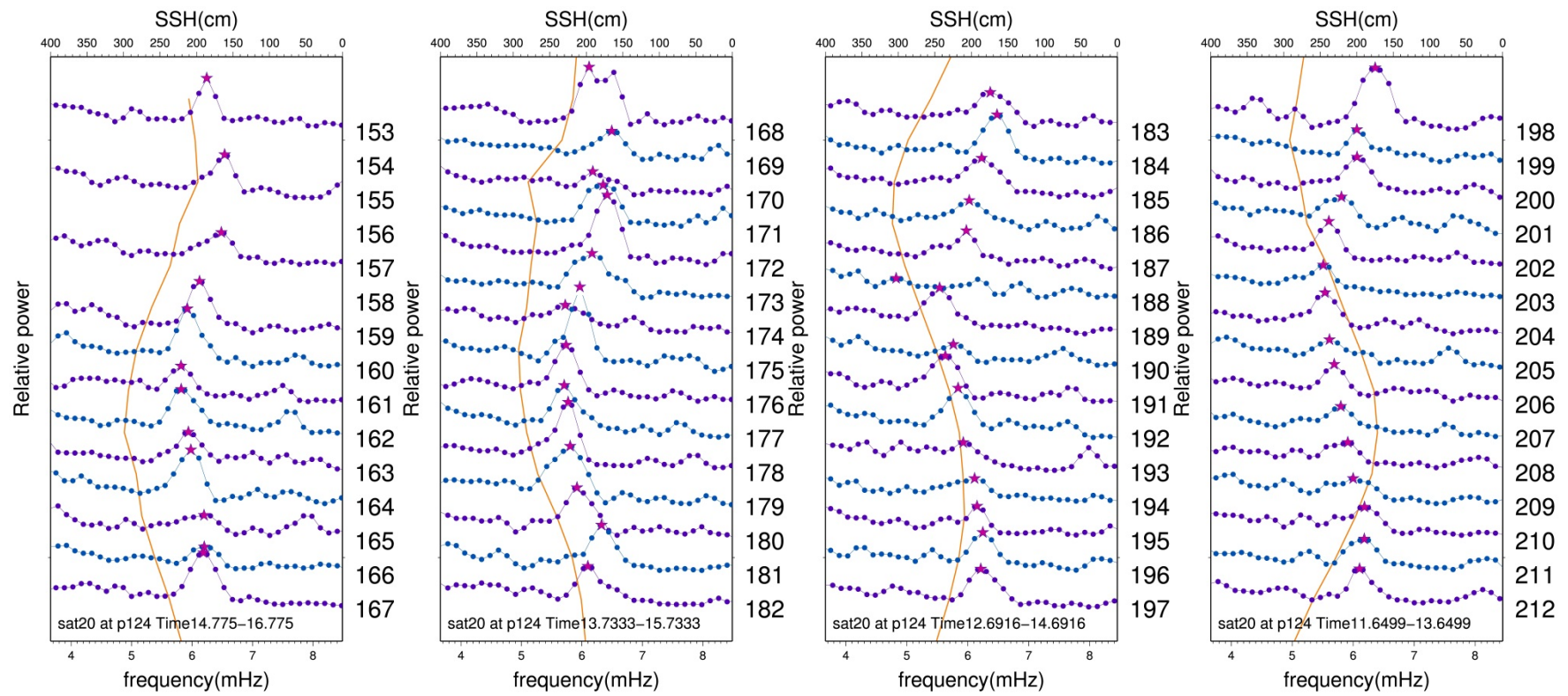


図4-24.P124での衛星20番の L2の SNR 時間変動のスペクトルの変動

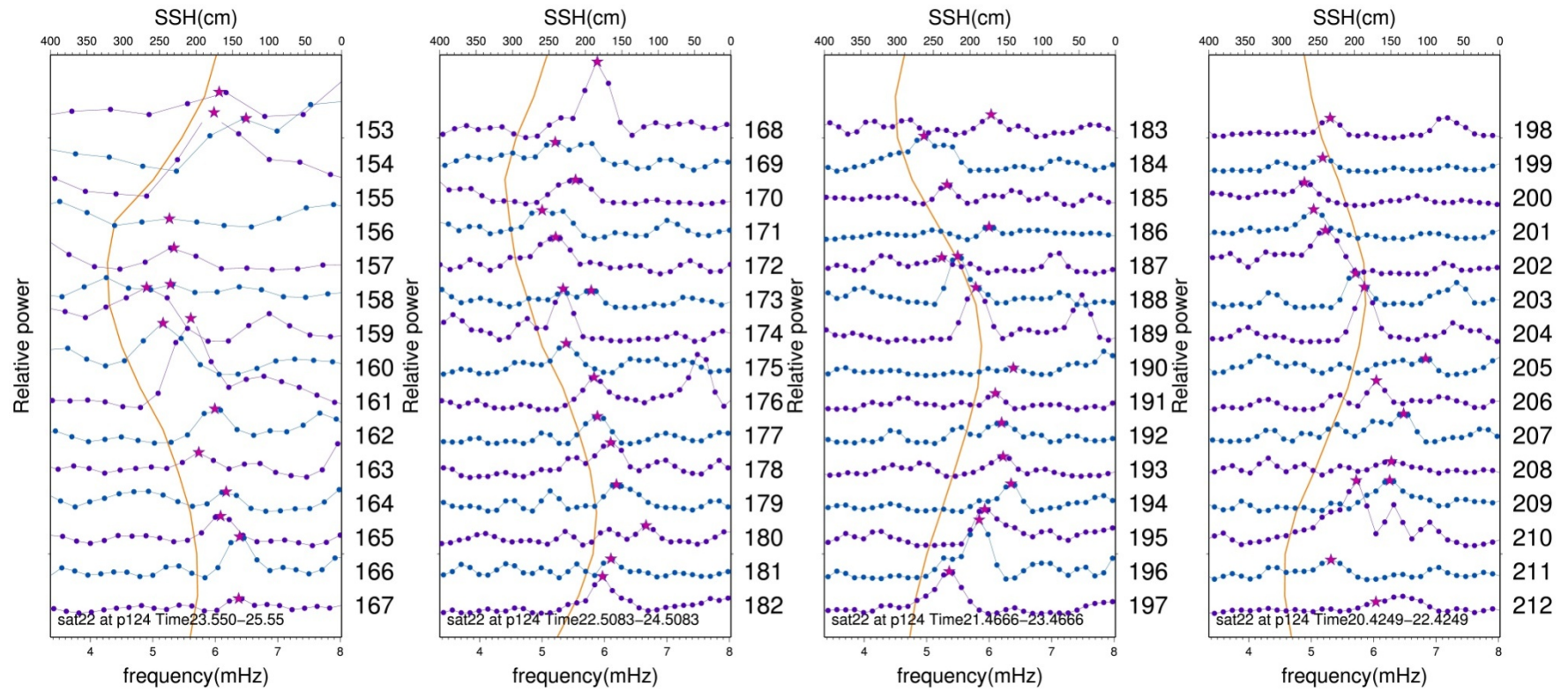


図4-25.P124での衛星22番の L2の SNR 時間変動のスペクトルの変動

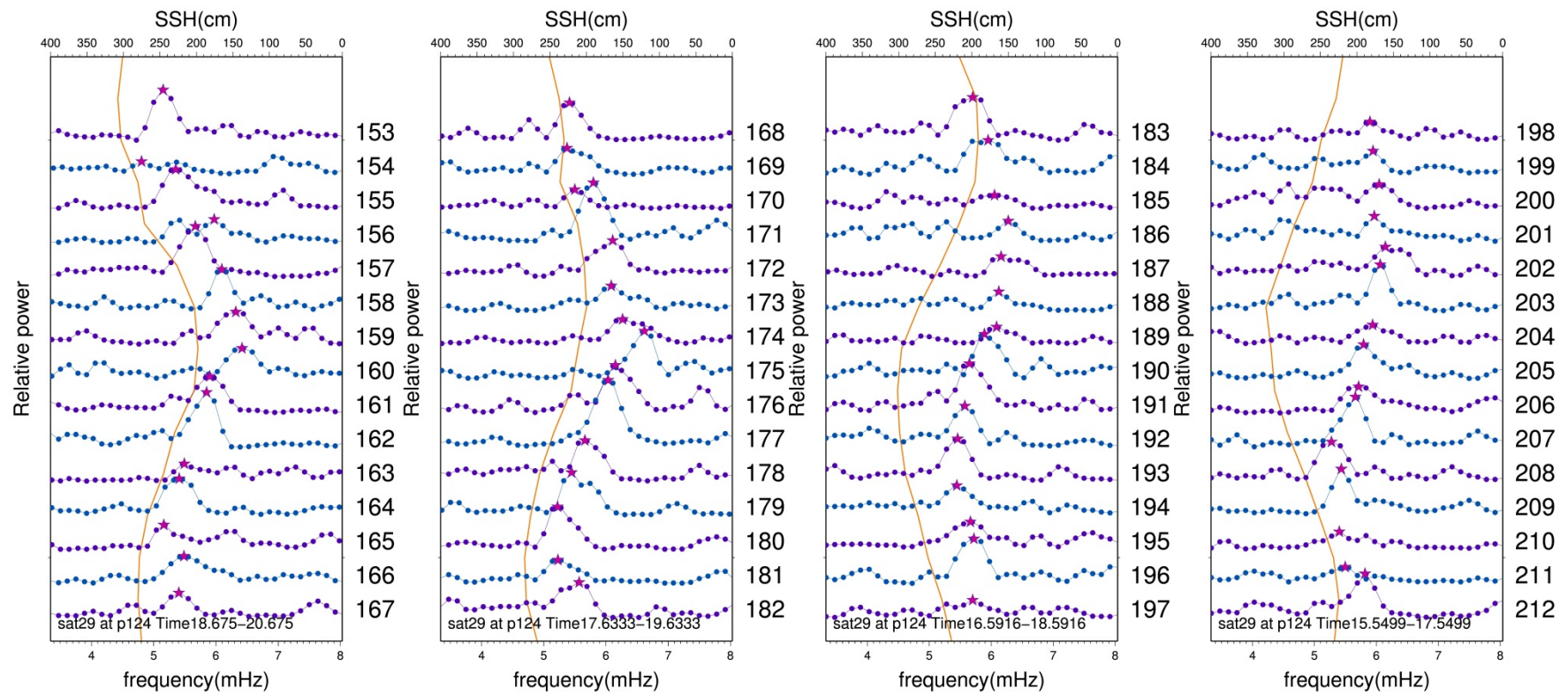


図4-26.P124での衛星29番の L2の SNR 時間変動のスペクトルの変動

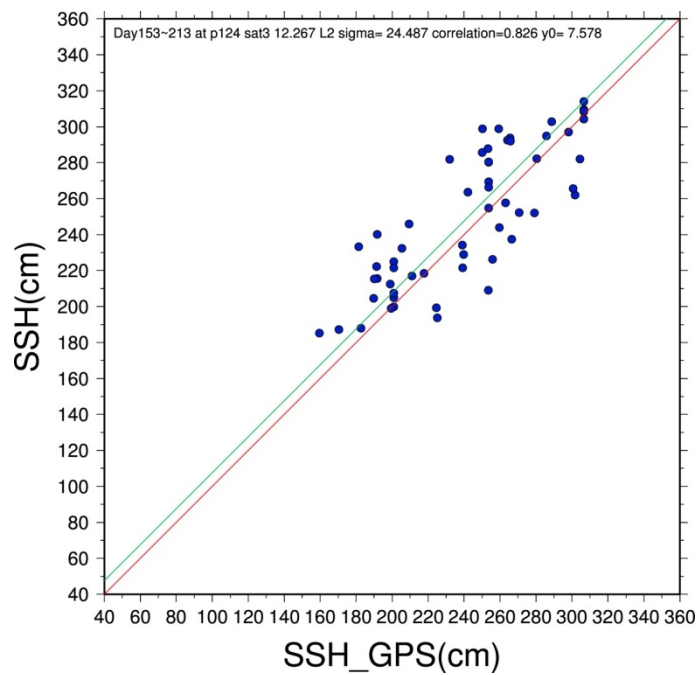
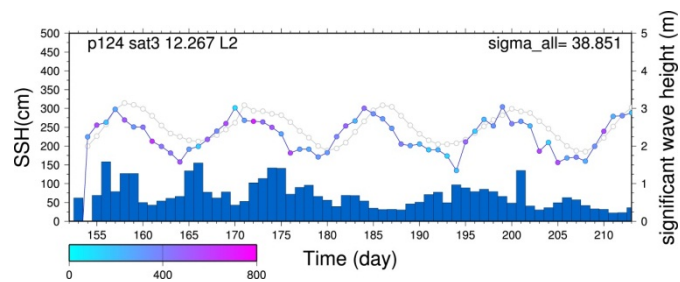


図4-27.(上)灰色が沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色が図4-21の星印を海面高に変換したものである。下の棒グラフは那覇港での有義波高。(下)横軸が3番衛星で得た海面高、縦軸が験潮儀で得た海面高である。詳細は図4-15の説明を参照のこと。



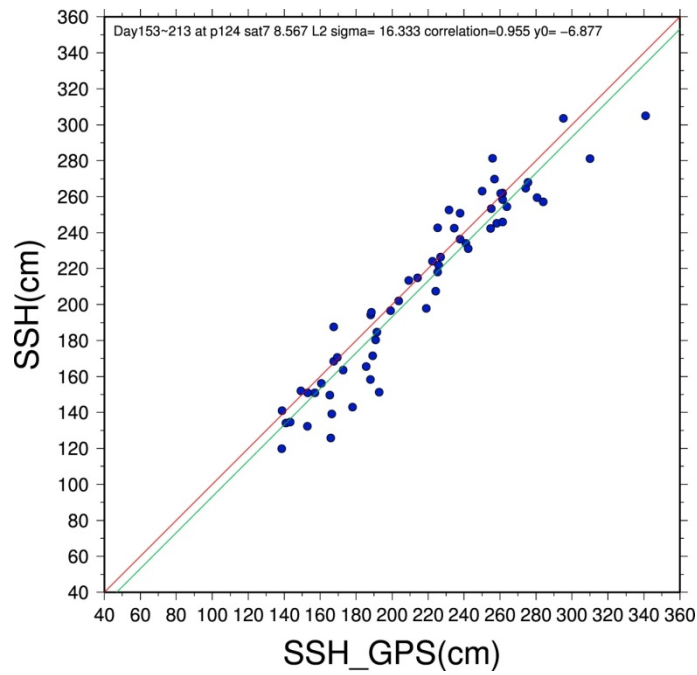
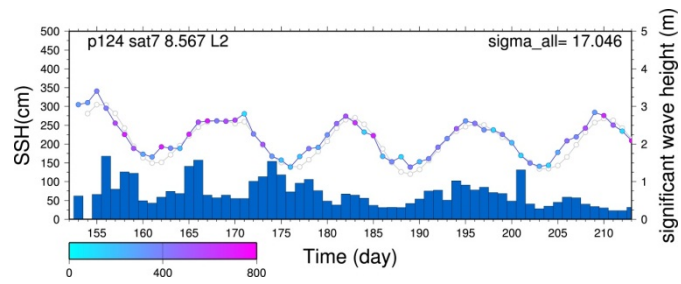


図4-28.(上)灰色が沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色が図4-22の星印を海面高に変換したものである。下の棒グラフは那覇港での有義波高。(下)横軸が7番衛星で得た海面高、縦軸が験潮儀で得た海面高である。

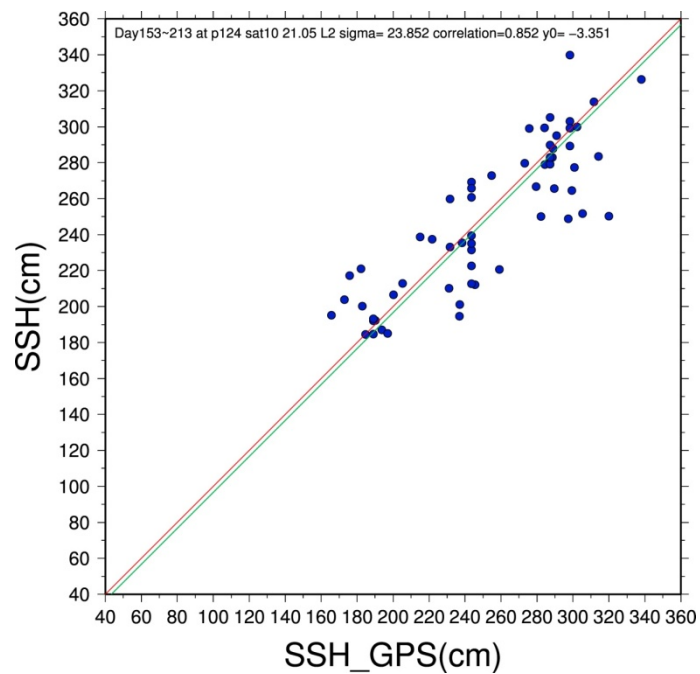
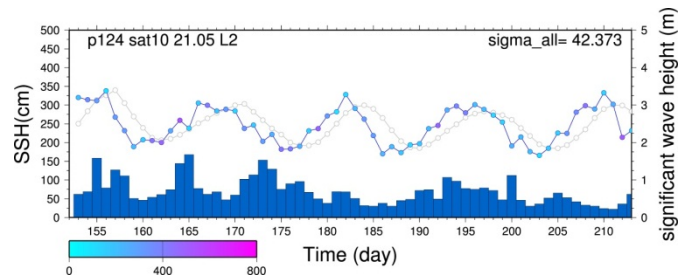


図4-29.(上)灰色が沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色が図4-23の星印を海面高に変換したものである。下の棒グラフは那覇港での有義波高。(下)横軸が10番衛星で得た海面高、縦軸が験潮儀で得た海面高である。

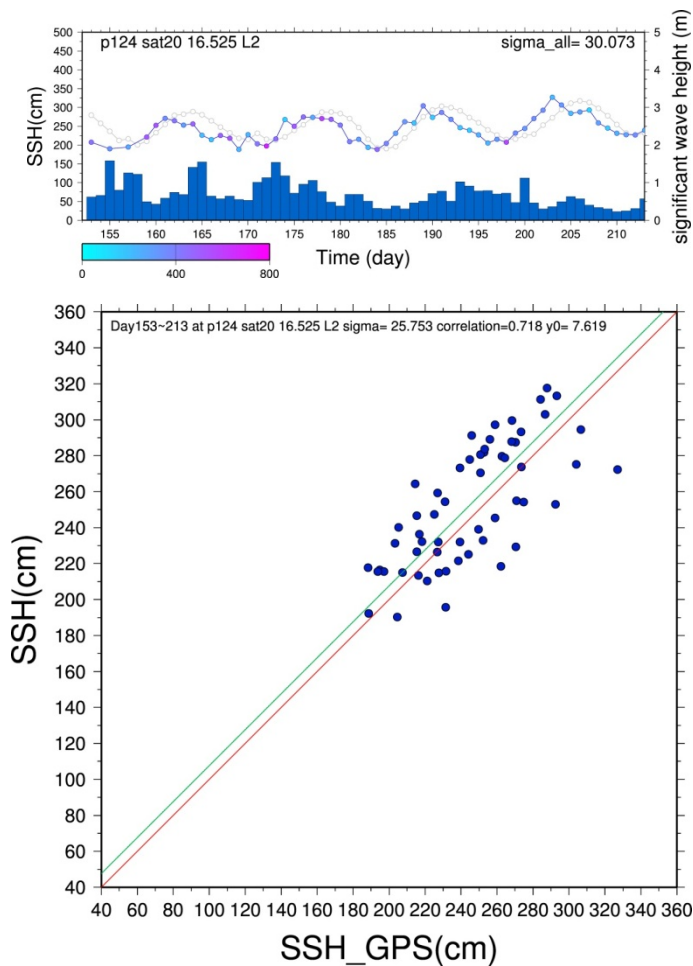


図4-30.(上)灰色が沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色が図4-24の星印を海面高に変換したものである。下の棒グラフは那覇港での有義波高。(下)横軸が20番衛星で得た海面高、縦軸が験潮儀で得た海面高である。



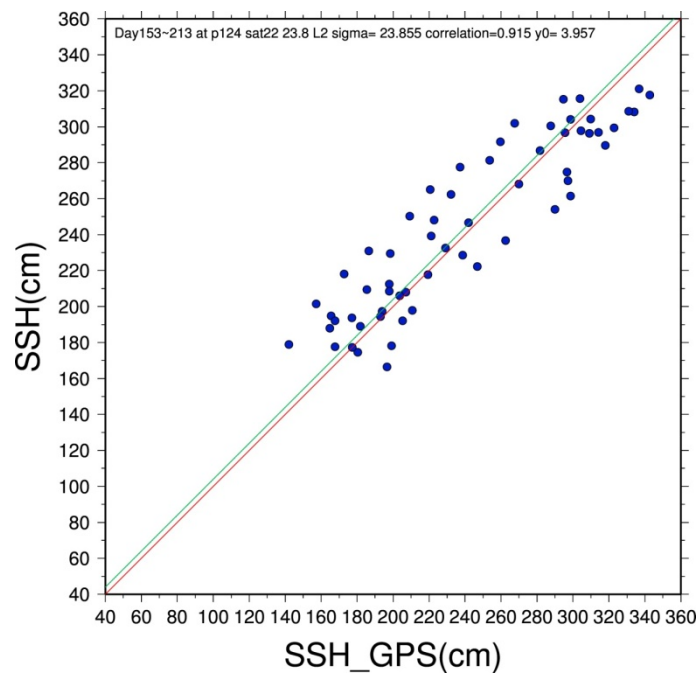
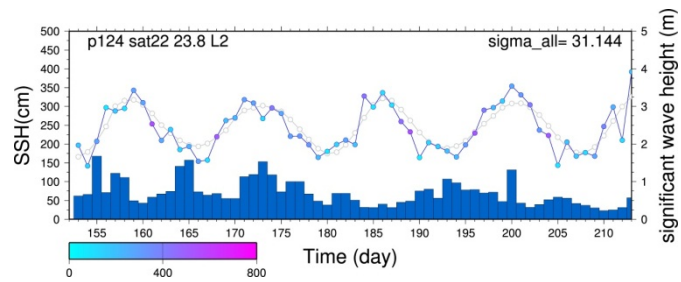


図4-31.(上)灰色が沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色が図4-25の星印を海面高に変換したものである。下の棒グラフは那覇港での有義波高。(下)横軸が22番衛星で得た海面高、縦軸が験潮儀で得た海面高である。

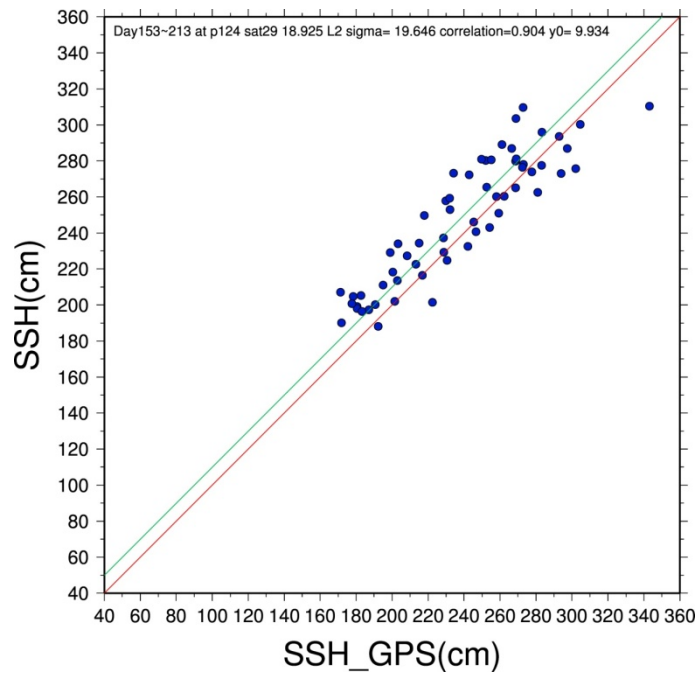
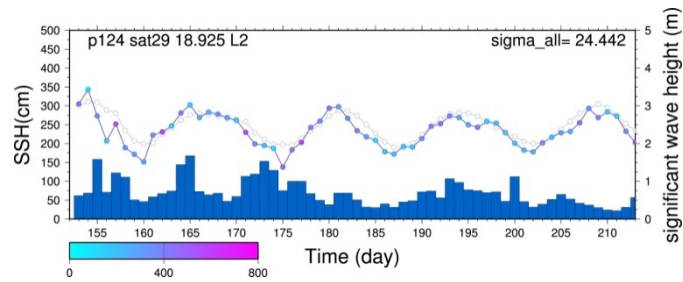


図4-32.(上)灰色が沖縄験潮場の験潮儀による潮汐データ、青色が図4-26の星印を海面高に変換したものである。下の棒グラフは那覇港での有義波高。(下)横軸が29番衛星で得た海面高、縦軸が験潮儀で得た海面高である。

### 4-3-3. 複数の衛星による結果

図4-15から図4-20で、個々のGPS衛星と験潮儀のそれぞれで測定した海面高を比較した。両者が一致すれば赤い直線上にデータが乗るはずだ。図4-9から図4-14は個々のGPS、験潮儀でそれぞれ測定した海面高の時間変動を比較したものだ。青色が験潮場の験潮儀で測った海面高変動、丸印がGPSによって推定した海面高である。この節では、複数のGPS衛星を組み合わせたものを験潮儀による測定結果と比較してみたい。

L1のSNRを用いた場合とL2のSNRを用いた結果をまとめて図4-33と図4-35で示す。SNRの周波数ピークが強く出た日と出なかった日のデータの質を議論するために、丸印の大きさでピークの高さを比較している。またすべてのL1とL2のSNRによる海面高データを、使用した全期間において、験潮儀による海面高と時系列上で比較したものを図4-34と図4-36に示す。

## L1の結果

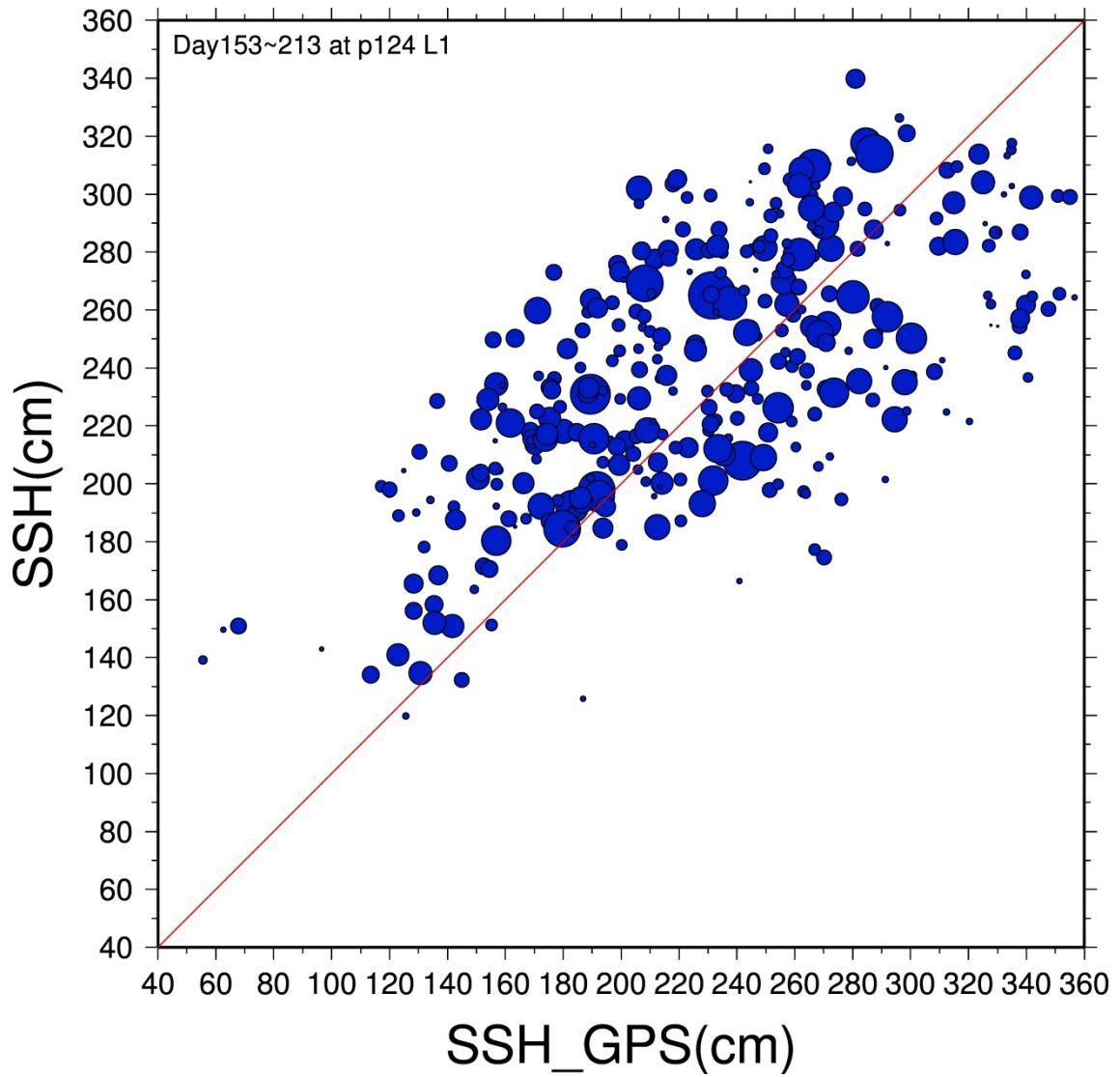


図4-33. 使用したすべてのGPS衛星で、L1のSNRを用いて推定した海面高推定をまとめ、験潮場の験潮機による海面高データと比較したもの。横軸はGPSによる海面高、縦軸は験潮機による海面高、丸印の大きさは周波数ビークの相対的な強さを表している。

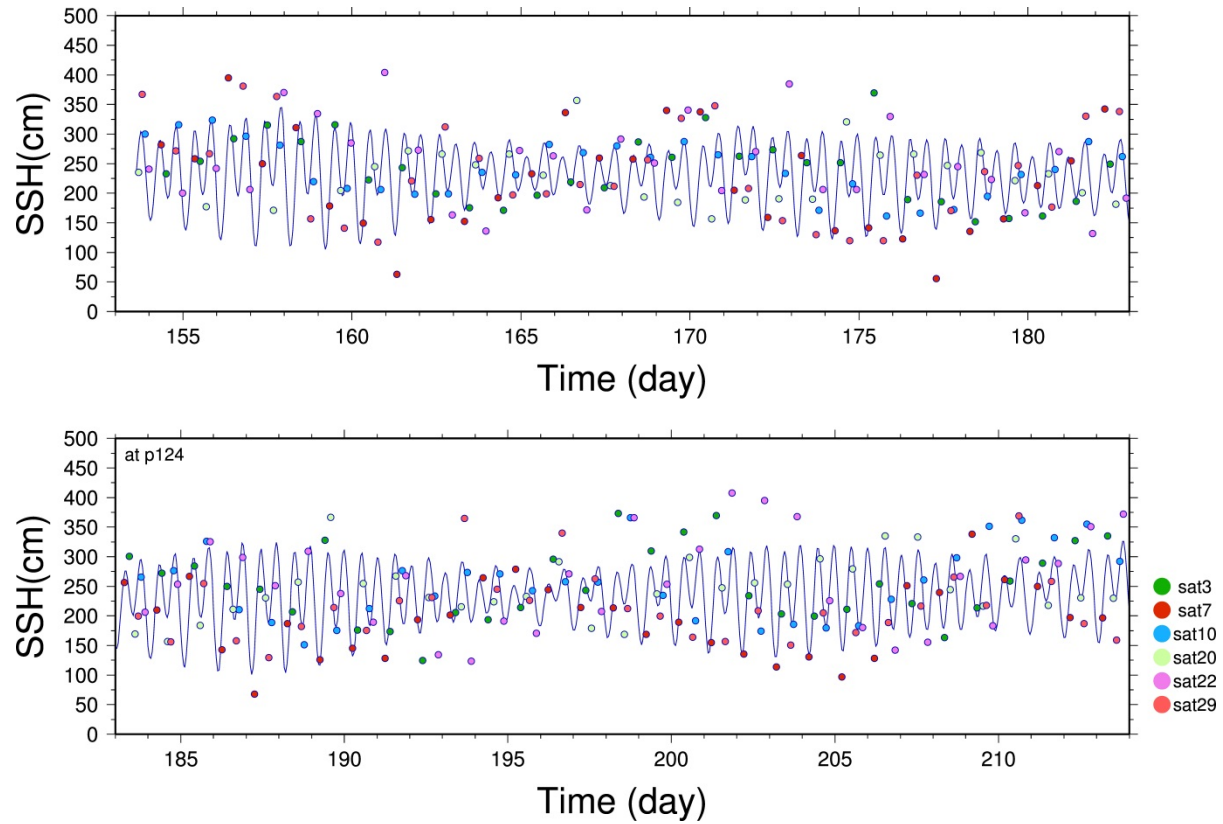


図4-34.青色の曲線が験潮儀で計測された海面高の変動、丸印がGPS(L1)で推定した海面高である。全期間を二つにわけて上下の図で示す。

## L2の結果

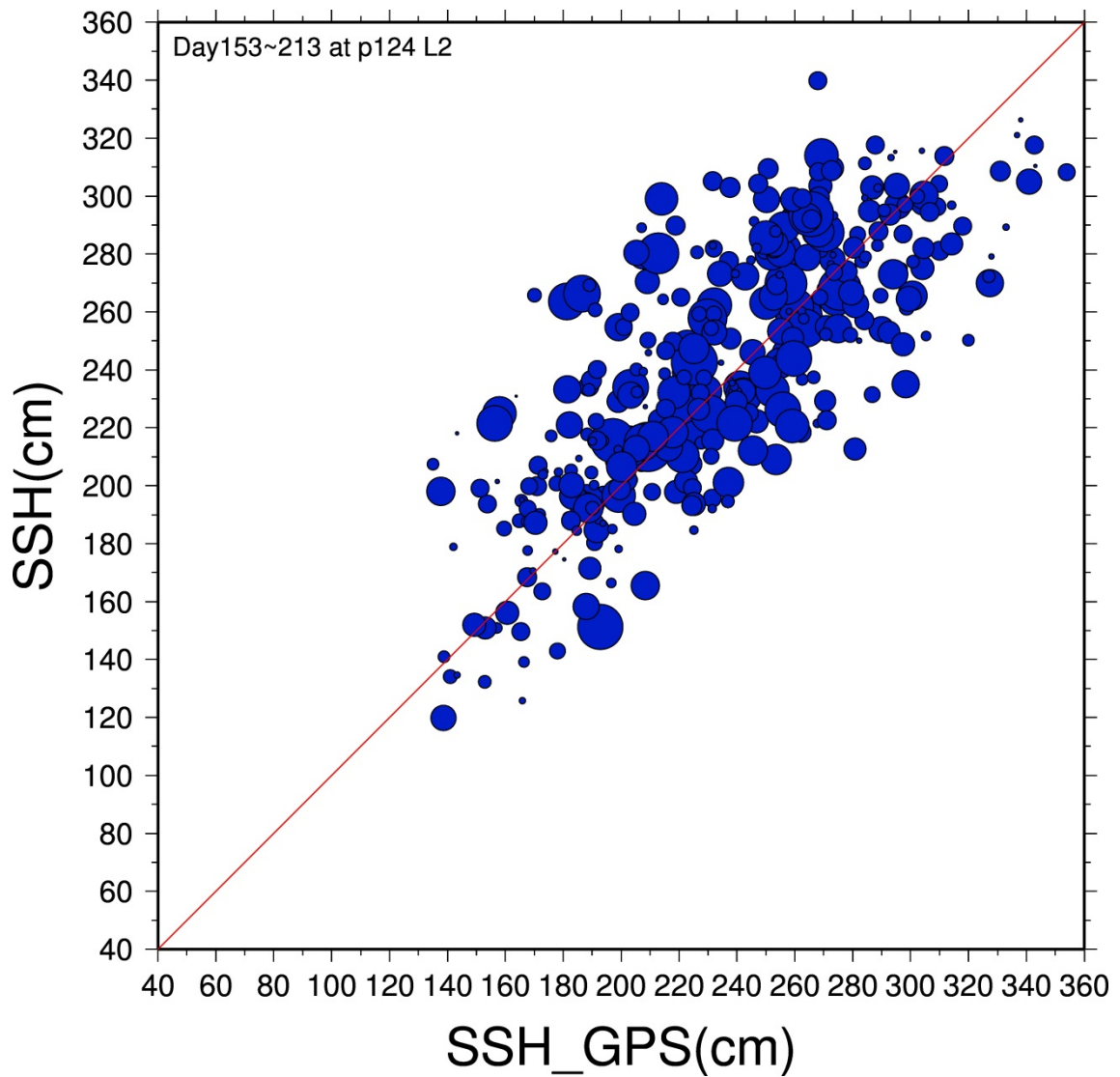


図4-35.使用したすべてのGPS衛星で、L2のSNRを用いて推定した海面高推定をまとめ、験潮場の験潮儀による海面高データと比較したもの。横軸はGPSによる海面高、縦軸は験潮儀による海面高、丸印の大きさは周波数ビークの相対的な強さを表している。

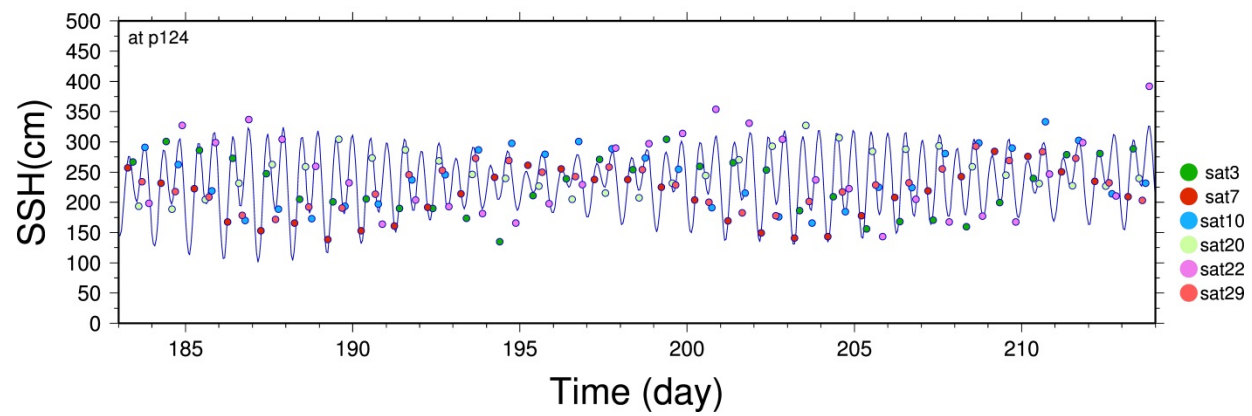
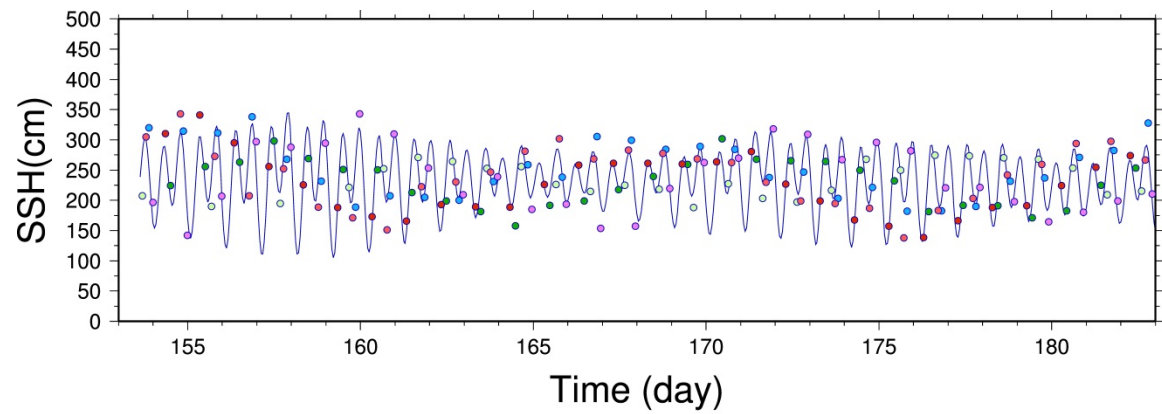


図4-36. 図4-34. 青色の曲線が験潮儀で計測された海面高の変動、丸印がGPS(L2)で推定した海面高である。全期間を二つにわけて上下の図で示す。



## 波浪の影響

海が荒れると、マイクロ波が反射する海面の凹凸が増大し、直接波と反射波の干渉が理論通りに生じない可能性がある。そこで、波浪と測定精度の関係について調べてみた。

左の図が那覇港で観測された有義波高と、験潮儀と GPS から得られた海面高の差の関係を表したもので、右の図が有義波高と SNR の時間変化の周波数スペクトルのピークの高さの関係を表したものである。いずれの図もはっきりとした相関は示しておらず、験潮儀が存在する港湾内部では外海の波浪によって GPS 潮汐計の精度は影響を受けないことがわかる。

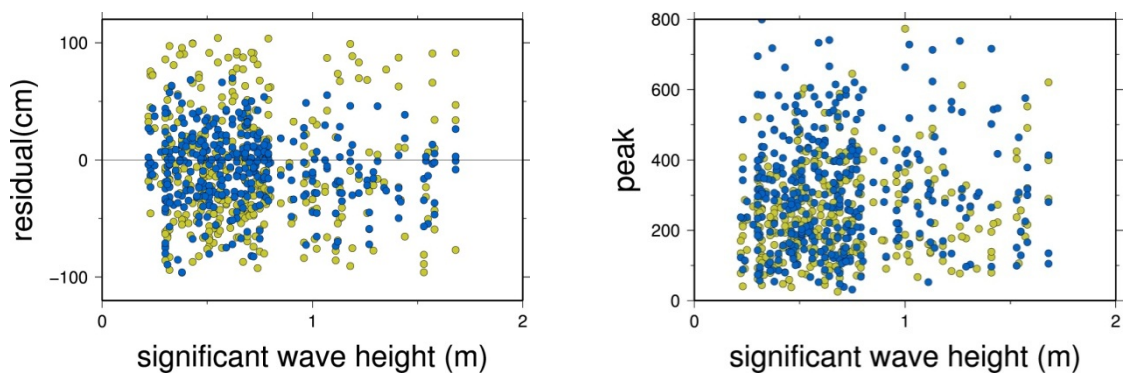


図4-37.(左)横軸が有義波高、縦軸が(験潮儀で測定した海面高から GPS で推定した海面高を引いた値)である。(右)横軸が有義波高、縦軸がピークの強さを表している。どちらにも有意な相関は見られない。

#### 4-4. 考察

沖縄の験潮場で、験潮儀による海面高と、海面で反射したマイクロ波と直接波の干渉による GPS 点(P 点)の SNR の変動周期から求めた海面高を比較した。マイクロ波が反射する点が海上にあるいくつかの衛星を用いて、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。

4-3-2.でとりあげたすべての衛星について験潮儀と GPS の結果を比較してその差を統計的に解析した。その結果、L1では標準偏差50cm、L2では標準偏差31cmで両者は一致した。衛星ごとにみて標準偏差が最も小さくなったのは、衛星7番のL2による結果で、16cmであった。なお、同じ衛星でL1を用いて比較したときの標準偏差は44cmとなり、海面の反射点の軌跡が同じでも結果が大きく違うことがわかった。通常のGPSデータのサンプリング間隔は30秒と長いため、数分という周期をもつマルチパスによるSNRの変動から高精度で変動周波数を求めることには限界がある。その際に、波長の長い(周波数の低い)L2のほうがSNRの時間変動がゆっくりしているため、より精度の高いSNR変動周波数の同定、さらにはより良い験潮儀との海面高の一致につながったのだろう。

図4-37.からはほとんど有義波高と誤差については相関が見いだせなかった。図4-7.の反射点の軌跡をみると、測定精度は波浪より海面以外の大地や人工構造物による反射・遮蔽の影響をより強く受けるのではないかと思われる。

以上の考察から、精度に関する問題は残っているものの、全体としてみると既存のGPS観測網で海洋潮汐による海面高変動をとらえることができたと言って差支えないだろう。

## 5. 結論

本研究では、日本にある既存のGPS観測網で潮汐による海面高変動をとらえることに成功した。GPSだけでは験潮儀に匹敵する計測の精度と頻度で海面高を測ることはできない。しかし、ロシアのGLONASSや日本の準天頂衛星システム(QZSS)等の、GPS以外のGNSSを用いることができれば、将来的にはGNSSだけで(験潮儀に依らずに)海洋潮汐を計測することも可能かもしれない。GNSSによる海面高観測では、利用者はGNSS受信機さえ持っていれば海面高の変動と地殻変動の両方を知ることができる。したがって、この手法が高精度化されれば、測地GPS観測網をもちいることで、地殻変動の影響を排してより稠密に地球温暖化によるゆっくりとした海面高の変化等を観測することができるかも知れない。

## 5-1. 今後の課題

本研究は得られたマルチパスを利用した GPS による海面高の計測精度は、Larson et al.(2013)が報告している結果(験潮儀と同等の計測精度)と比べ、精度が劣っている。これは観測に使える衛星の数に代表される幾何学的な要因にもある程度あるのだろうが、2-2.で述べたデータ解析の手法の違いの要因もあるかも知れない(彼女らは SNR を衛星仰角の正弦の関数として周波数解析している)。解析手法を改善すれば、本研究で用いた日本にある既存の測地 GPS 観測点であっても、より高い精度を達成することができる可能性がある。

## 謝辞

本研究で使用した GPS の観測データは国土地理院より提供していただいた。また験潮データは国土地理院および気象庁より提供していただいた。波浪データは、国土交通省港湾局によって観測され、港湾空港技術研究所で処理されたものを提供していただいた。これらの機関に対して、ここに感謝の意を表す。

指導教官の日置幸介教授には、お忙しい中ぶしつけな訪問にもこころよく対応していただき、卒業研究に関するあらゆることを教わりました。深く御礼申し上げます。ゼミでの中間発表では、同研究室の古屋正人教授と固体系ゼミの先生方・先輩方に有意義な助言を多数いただきました。ありがとうございます。普段の研究生活においては、同研究室の諸先輩方に多方面で助けていただきました。感謝しております。

## 参考文献

ELOSEGUI, P., J. DAVIS, R. JALDEHAG, J. JOHANSSON, A. NIELL, and I. SHAPIRO (1995), GEODESY USING THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM - THE EFFECTS OF SIGNAL SCATTERING ON ESTIMATES OF SITE POSITION, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 100(B6), 9921-9934, doi:10.1029/95JB00868.

GPS マイクロ波の散乱を SNR から推定した最初の論文

Larson, K., E. Gutmann, V. Zavorotny, J. Braun, M. Williams, and F. Nievinski (2009), Can we measure snow depth with GPS receivers?, *Geophysical Research Letters*, 36, doi:10.1029/2009GL039430.

GPS マルチパスをもちいて積雪深を推定。SNR を利用している。

Larson, K., 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(3), 173-177, doi:10.1007/s10291-007-0076-6.

GPS マルチパスによる土壌水分の推定。SNR を利用している。

Ozeki, M., and K. Heki (2012), GPS snow depth meter with geometry-free linear combinations of carrier phases, *Journal of Geodesy*, 86(3), 209-219, doi:10.1007/s00190-011-0511-x.

GPS マルチパスをもちいて積雪深を推定。L4 を利用している。

大関優(2010),GPS 衛星の L バンド二周波位相差を利用した積雪深度観測,平成22年度北海道大学大学院理学院自然史科学専攻地球ダイナミクス講座修士論文,

URL:[http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~geodesy/pdf/Ozeki\\_Msc\\_Thesis.pdf](http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~geodesy/pdf/Ozeki_Msc_Thesis.pdf)

Ozeki and Heki(2012)とほぼ同じ内容である。こちらのほうが詳細な情報が記載されている。

日野幹雄(1984) ,スペクトル解析,朝倉書店,pp.191-193

Blackman-Tukey 法の原理やプログラムのソースがのっている

。

土屋淳,辻宏道 (2008),GNSS 測定の基礎,社団法人日本測量協会  
GPSをはじめとするGNSSに関する基本的な知識について紹介されている

測地学テキスト URL; <http://www.geod.jpn.org/web-text/index.html>,2013年1月取得

国土地理院ホームページ URL; <http://www.gsi.go.jp/>,2013年1月取得

気象庁ホームページ URL; <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>,2013年1月取得

海上保安庁海洋情報部ホームページ URL; <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>,2013年1月取得

国土地理院 験潮場のデータ[<http://tide.gsi.go.jp/furnish.html>]2012年取得

気象庁 験潮所のデータ[<http://www.data.kishou.go.jp/db/tide/genbo/index.php>]2012年取得

港湾局 波浪のデータ[<http://nowphas.mlit.go.jp/nowphasdata/sub300.htm>]2012年取得