

## GNSS-Rを用いた海面高の観測に関する研究

奥村, 立樹  
九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/2558957>

---

出版情報 : 九州大学, 2018, 修士, 修士  
バージョン :  
権利関係 :



平成30年度

九州大学大学院総合理工学府

大気海洋環境システム学専攻修士論文

GNSS-R を用いた  
海面高の観測に関する研究

氏名

奥村立樹

指導教員

市川香 准教授

# 目次

第1章	はじめに.....	3
第2章	データ.....	7
	2.1 白浜観測塔.....	7
	2.2 GNSS-R 観測.....	9
第3章	手法.....	14
	3.1 SNR における位相干渉.....	14
	3.1.1 地球周回衛星.....	14
	3.1.2 静止衛星.....	16
	3.2 SNR と白浜観測塔で観測された風速と海水位のデータ処理.....	17
	3.3 SNR と風速の関係.....	18
第4章	風速が弱くて安定している事例解析.....	20
	4.1 2016 年 9 月 3 日の SNR の事例解析.....	20
	4.2 2016 年 9 月 3 日以外的事例解析.....	27
第5章	議論.....	29
	5.1 風速が大きくて安定している場合.....	29
	5.2 風速による SNR 補正について.....	31
	5.3 4.1 の事例解析における上向きアンテナの SNR 変化.....	34
	5.5 実用化について.....	36
第6章	結論.....	37
	参考文献.....	38
	謝辞.....	39
	付録.....	40

## 第1章 はじめに

GPS(Global Positioning System)は全世界的な位置測位システムで、現在ではスマートフォンの地図アプリや自動車のカーナビゲーションシステムなどに活用されており、私たちの生活に密接に関わっている。GPSは、約2万km上空の6つの軌道に32基配備されているGPS衛星(図1.1)と、それらを監視・制御し衛星の時刻や軌道を保守する地上管制と、GPS衛星からの信号を受信するGPS受信機で構成されており、これらを用いて位置を測定することができる。GPSによる測位は、まずGPS衛星から時刻情報をのせた電波を発信し、受信機が電波を受信する。すると衛星が電波を発信した時刻と、その信号を受信した時刻との差が求まるので、衛星までの距離が求まる。同様に他の衛星3つの距離を計算する。図1.2のように3つのGPS衛星からの距離を測定することで受信機の場所を特定することができる。しかしながら受信機に搭載されている時計は、GPS衛星に搭載されている原子時計ほど正確ではないため、時間の誤差が生じる。そこで3つの衛星で求めた位置と、4つ目の衛星からの時刻で算出した位置を計算することで誤差を少なくする。以上の仕組みからGPSによって受信機の位置を測位することができる。

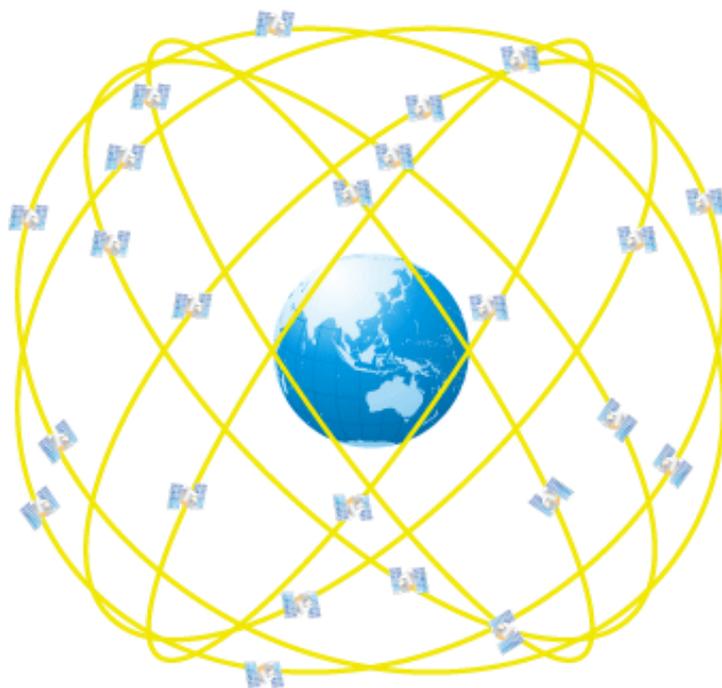


図 1.1 GPS のイメージ(フルノ HP より)

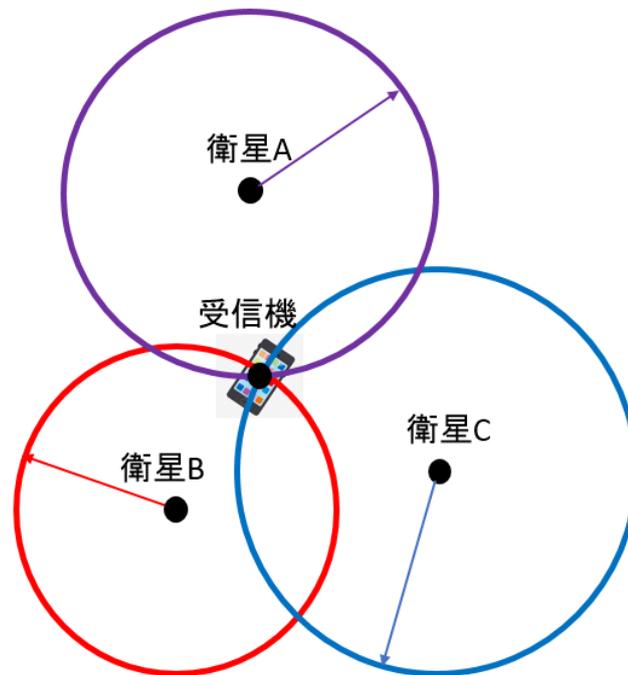


図 1.2 GPS 測位による位置決定の概念図。  
位置がわかっている各衛星からの距離を測定することで、それらの交点として位置が求まる

このように位置がわかっている複数の衛星と受信機を用いて位置を測定するシステムは、米国の GPS の他にロシアの GLONASS やヨーロッパ共同体の Galileo、中国の Beidou などがあり、これらの総称を GNSS(Global Navigation Satellite System)と呼ぶ。この GNSS による測位では、衛星からの直達信号を通常用いており、ビルなどで反射した反射信号は距離推定を行う上で経路の異なる情報が混在してしまうため、マルチパスと呼ばれるエラーとして知られている。このため GNSS では直達信号に右旋信号(Right-Handed Circular Polarization)を用いることで左旋信号(Left-Handed Circular Polarization)である反射信号をできるだけ受信しないようにするなど、マルチパスの影響が少なくなるような工夫が施されている。

しかしながら、この反射信号は信号が反射した時の反射体の情報を反映していることから、うまく使うことができれば逆に反射体の状態の観測などに利用することができる。このように通常マルチパスのエラーとして知られている GNSS 信号の反射信号を積極的に用いて行う新しいリモートセンシング手法のことを GNSS-R(GNSS-Reflectometry)と言う。海洋観測では、GNSS-R を用いて波浪や高度を計測することができる。本研究では、この GNSS-R 観測を用いて海面の情報、特に海面高度の推定について検討していく。

GNSS-R によって海面高度を観測するには、直達信号と反射信号の経路差  $d$  を求める方法が用いられる(図 1.3)。この経路差を求める方法には、直達信号に対する反射信号の遅延時間から疑似距離を求める方法と、直達信号と反射信号が位相干渉することによって反射強度(Signal-to-Noise Ratio;SNR)が変化することを利用して干渉計として用いる方法の 2 種類がある(Larson et al,2012)。このとき、前者の方法は海面高度  $h$  の推定が常時行える反面、直達信号と反射信号の正確な時間差を求める必要があるため直達信号用と反射信号用のアンテナ 2 つを用い、時計を完全に同期した受信機が必要になるので、その分の費用が大きくなる。一方、干渉計を用いる場合は直達信号と反射信号の干渉した結果を測定すればよいのでアンテナが 1 つの受信機を用いればよく、費用が抑えられるのがメリットとして挙げられる。この手法では一般的には GPS や GLONASS などの地球周回衛星を用いて行われていて、衛星の移動とともに仰角  $\theta$  が変化することで反射点が移動することを利用して海面高度の絶対値を求めることができる(第 3 章参照)。観測できる時間が 1 日のうち数時間しか観測できないことがデメリットである。

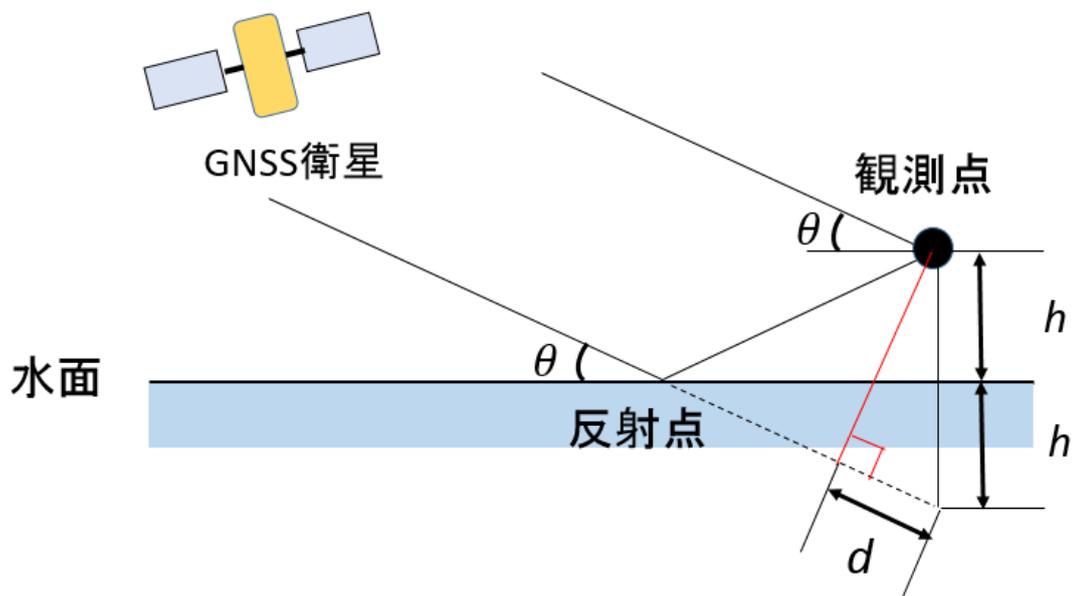


図 1.3 GNSS-R による海面高度観測のイメージ

これらを踏まえて、本研究では静止衛星を用いて干渉計で海水位を観測することを検討した。静止衛星を用いる場合でも、海水位が変化することで反射点が移動するための反射信号の経路が変化し、位相干渉による SNR が変化するため、周回衛星と同じく海水位の相対値を測定できる。この方法では周回衛星と違い時間が限定されずに一日中測定することができるのがメリットとして挙げられる(静止衛星と非静止衛星の観測の違いについては 3.1 節で詳しく述べる)。そこで今回は 2017 年に白浜にて観測が行われたデータ(李,2016)を利用して、そのなかで静止衛星である Beidou の 2 番衛星の GNSS-R 観測のデータを基に海面高度の推定を検討した。

2 章では李梓原が行った観測データの概要について述べ、3 章では上述した GNSS-R 観測の手法について関係式を用いながら詳しく説明する。また、SNR のデータに用いた処理も述べる。4 章では位相干渉による SNR の変化と海水位変位の関係について述べる。5 章では解析結果に関する議論を行い、6 章では結論を述べる。

## 第2章 データ

本研究は和歌山県にある京都大学の白浜観測塔で行われた観測のデータ提供を受け、それを基に解析を行った。2章では本研究で解析するために使用したデータの概要について述べる。2.1節では白浜観測塔について、2.2節ではGNSS-R観測について詳しく述べる。

### 2.1 白浜観測塔

本研究は和歌山県にある京都大学の白浜観測塔で行われた観測のデータ提供を受け、それを基に解析を行った。白浜観測塔は海象観測を行う施設であり、普段は風速、風向、気温、湿度、日射、気圧などの気象データと水温、有義波高、有義波周期、平均波高などの海象データを観測している。本研究ではこのうちの風速と潮位データを使用した。図2.1に白浜観測塔の位置、図2.2に観測塔の外観と観測装置を示す。

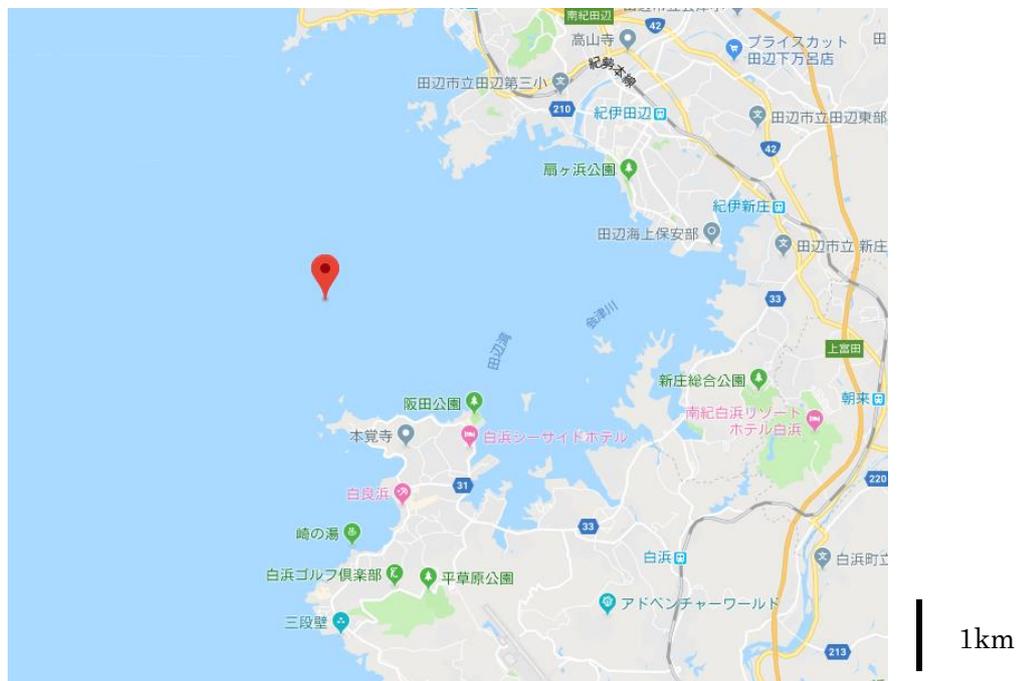


図2.1 白浜観測塔の位置(33.7087N 135.3327E)  
(googlemap より)



図 2.2 白浜観測塔の外観(白浜海象観測所 HP より)

## 2.2 GNSS-R 観測

本研究の GNSS-R 観測は 2016 年 9 月から 11 月に行われた観測(李,2016)からデータ提供を受けた。GNSS-R 観測は上述した白浜観測塔の高さ 20m の位置に上向きと下向きのアンテナを設置して行われ(図 2.3)、それぞれ 1 秒ごとに SNR を記録した。上向きのアンテナは全方位式の GNSS アンテナを使用し、下向きのアンテナは海面での二次散乱の影響を避けるために指向性の強いヘリカルアンテナを LHCP と RHCP 用で 2 種類使用した。ヘリカルアンテナの方位角は約  $240^\circ$ 、俯角は  $20^\circ$  である(図 2.4)。GNSS の信号は通常 RHCP であり、反射信号は直達信号の偏波を打ち消すようにしてできるので仰角が大きくなるにしたがって LHCP の割合が大きくなる。海水の場合仰角が  $20^\circ$  の場合は LHCP と RHCP の割合は約 2:1 となると考えられている(Lofgren,2011)。LHCP と RHCP のアンテナは、両方を同時に測定することによって割合の違いが SNR にどのような影響を与えているのか考察することを目的としているが、今回の解析では参照程度としたため、以下では下向きアンテナは LHCP に限定する。なお、上向きアンテナと下向きアンテナは図 2.5 に示すように受信位置が約 8cm 程度ずれている。

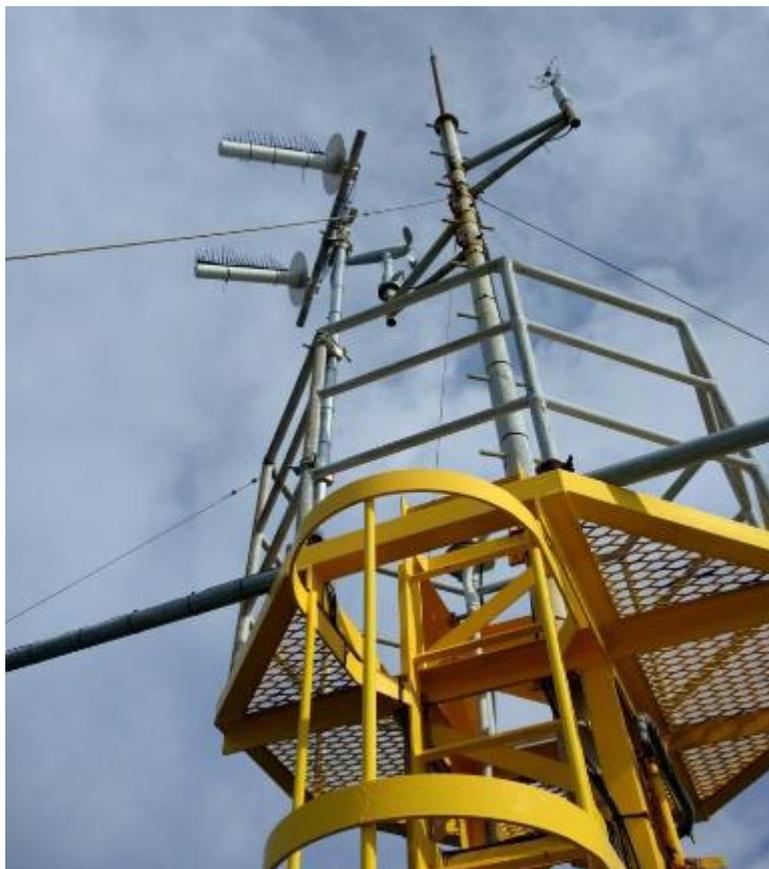


図 2.3 アンテナの取り付け位置

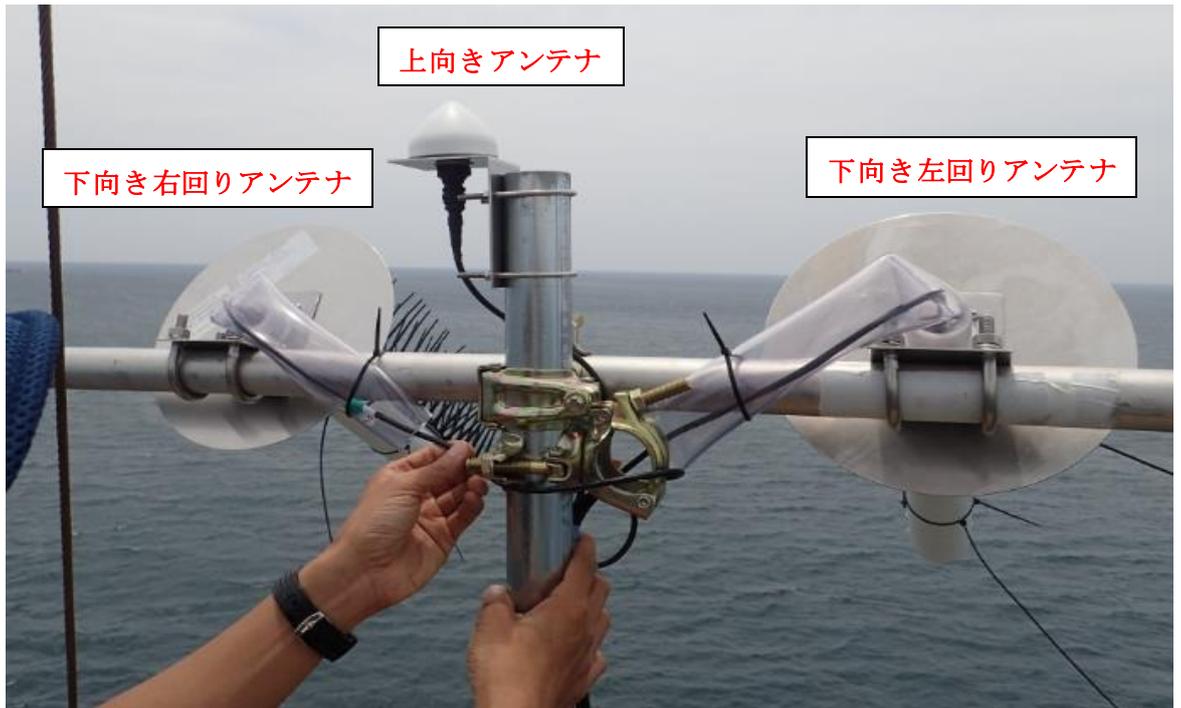


図 2.4 GNSS-R アンテナの外観

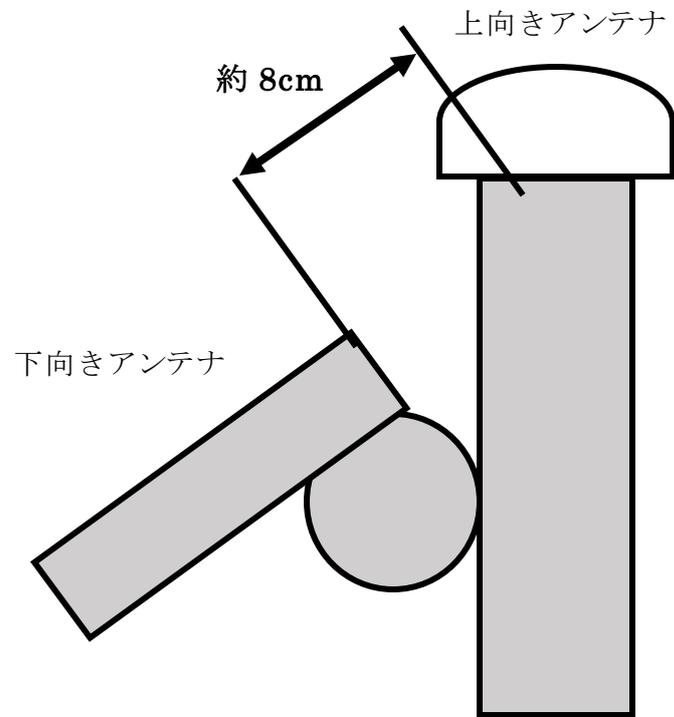


図 2.5 上向きアンテナと下向きアンテナの位置関係

ヘリカルアンテナの設定方向は Beidou 衛星 2 番（西南西 230° , 仰角 23° ）の方向とおよそ一致する(図 2.6)。

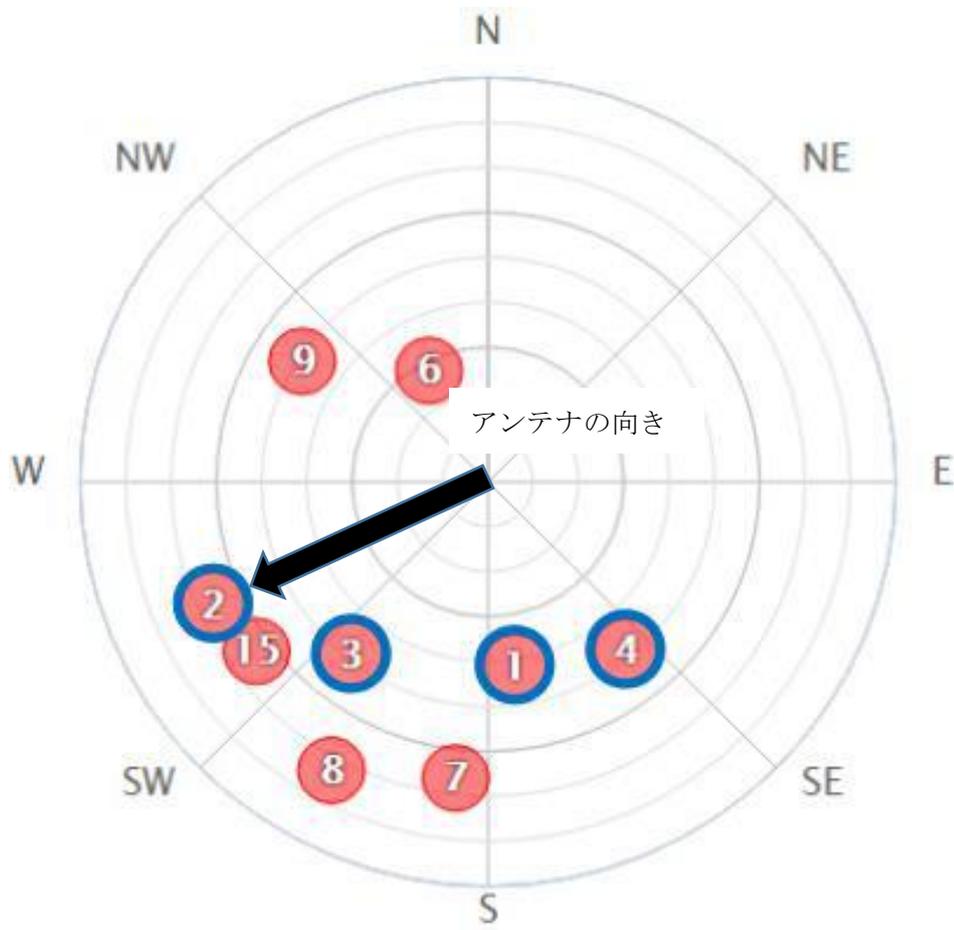


図 2.6 Beidou 衛星の配置（青丸は静止衛星）。  
中心からの距離は衛星の仰角を示しており、一番外側の円が 0° で中心が 90° となっている

各アンテナが受信する信号は、衛星からの直達信号(RHCP)、海面からの反射信号(RHCP と LHCP)、タワーからの反射信号(LHCP)の 4 つが混在していると考えられる。上向きの RHCP アンテナでは偏波分離が有効に行われているため、直達信号が最も強く受信されるが、海面からの RHCP 反射信号もわずかに受信される。LHCP アンテナで受信する場合、アンテナの方向には偏波分離が有効に行われるため信号は海面からの反射はほぼ LHCP のみを受信している。しかし、アンテナの横から入る直達信号とタワーからの反射波は偏波面の分離ができていないので、ともに受信される。ただし、位相干渉は RHCP どうし又は LHCP どうしでしか生じないため、上向きアンテナでは直達信号と海面からの RHCP の反射信号、LHCP アンテナでは LHCP の反射信号とタワーからの反射信号の間で生じている。

なお、これらの信号はすべて直達信号の強度に依存する。衛星からの電波の強度が電離層などの影響で変化する場合は、4 種類の信号全てが変動する。

## 3 章 手法

3 章では観測や解析に用いられた手法について述べる。3.1 節では、GNSS-R 観測において海水位に対し SNR がどのように変化するかを、静止衛星と非静止衛星の場合に分けて述べる。3.2 節では、SNR と白浜観測塔のデータの解析に用いた処理について説明する。

### 3.1 SNR における位相干渉

GNSS-R を用いた海面高の観測は、GNSS 衛星からの直接波と海面からの反射波の経路長の違いを計測して、アンテナと海面の距離を幾何学的に求める方法が用いられる。この経路長の違いを求める方法は、1 章で述べたように、疑似距離を用いる方法と、SNR を測定して干渉計として用いる方法がある。本研究では後者の方法を用いる。

干渉計を用いて海面高を観測するとき、静止衛星と地球周回衛星のどちらでも、反射点が増えることによって反射信号の経路長が変化するために位相干渉による SNR が変化するという原理にもとづいている。ここでは、GNSS-R 観測での海水位に対する SNR の応答について静止衛星と非静止衛星の違いを説明する。

#### 3.1.1 地球周回衛星

衛星が移動すると仰角が変化するのでそれに従って反射信号の反射点が増える。同時に仰角が増える。これによって直達波と反射波の経路差も変化していき、位相干渉による SNR の変化が起きる(図 3.1)。

この時の位相干渉による周期的な変動は衛星の移動で生じるため、潮汐などによる水位変化の時間スケールと比べると短いため、水位  $h$  は一定であるとみなされる。経路差  $d$  と仰角  $\theta$  は

$$2h \sin \theta = d \dots \textcircled{1}$$

の関係にある。GNSS の電波の波長が  $\lambda$  とすると SNR の変動周期とは、 $d$  が  $\lambda$  だけ変わる周期であるから、 $2h \sin \theta$  が  $\lambda$  だけ変わる時間を計測していることになる。 $\sin \theta$  の時間変化は既知なので、 $\lambda$  との信率から  $h$  を求めることができる。ただし、位相干渉が起きるには RHCP が LHCP の偏波が同じである必要があるため、一般には低仰角衛星の直達波と海面からの RHCP 反射波が用いられる。つまり衛星の仰角が低い時間に限定される。

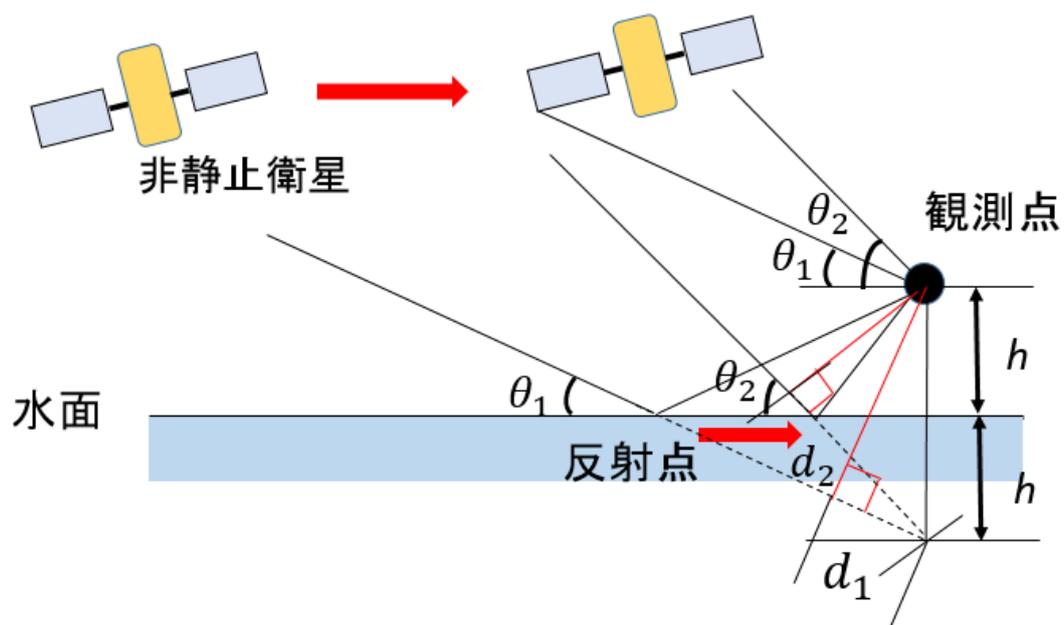


図 3.1 非静止衛星による GNSS-R 観測

### 3.1.2 静止衛星

静止衛星による SNR の観測の非静止衛星との大きな違いは、非静止衛星が観測できる時間は約 1 時間程度であるのに対し、静止衛星は一日中観測できる点にある。3.1 で述べたように下向きヘリカルアンテナで受信した SNR はタワーからの反射信号と海面からの LHCP の反射信号、直達信号と海面からの RHCP の反射信号で位相干渉を起こして変化する。この時、直達信号とタワーからの反射信号は電離層による減衰を除けば時間変化せず、反射信号は海水位が潮汐などの海象現象によって変化するに従いその経路も変化する(図 3.2)。したがって経路差の変化によって位相干渉も変化することから海水位変位の相対値を求めることができる。この時海水位の変位と経路差の関係式を次式②で示す。今回の観測で使用されている GNSS の L1-band 電波の波長は 19.2cm であり、ヘリカルアンテナの角度は  $23^\circ$  に向けていることから、式②にこれらを代入すると海水位  $h$  が 25cm 変化した時経路差  $d$  は 1 波長分変化することがわかる。

$$h_1 - h_2 = (d_1 - d_2) / 2 \sin \theta \dots \textcircled{2}$$

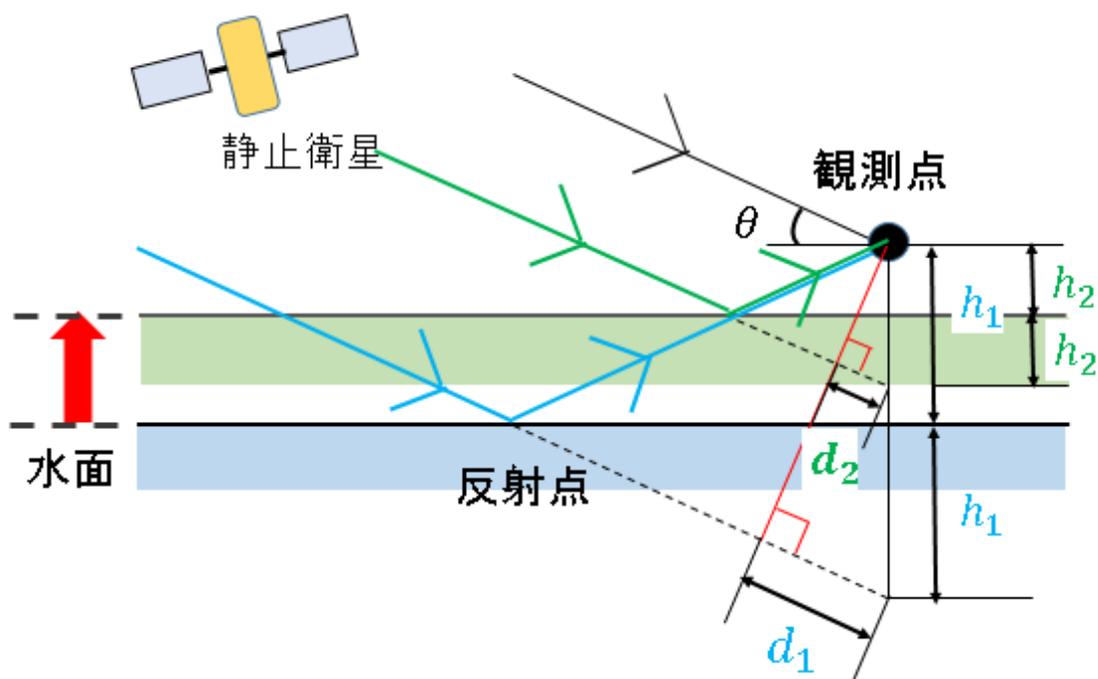


図 3.2 静止衛星の信号と海水位の関係

## 3.2 SNR と位相干渉以外の時間変動

3.1.2 で述べたように、SNR の変動が位相干渉にのみで生じていれば、変動周期から水位変化の推定が可能である。しかし、現実には SNR には様々な変動が含まれている。

### 3.2.1 波浪の影響

観測された SNR のデータは 1 秒ごとに得られるが、そのデータは図 3.3 のように短い周期で大きく変動する。これは数秒周期で変化する波長の長い波浪の影響を受けているためであると考えられる。推定したい海水位の変位は約 12 時間で 1 周期であり、この波浪の周期よりも長いことから、その影響をなくすために SNR は 3 分間の時間平均を行った。白浜観測塔で観測されたデータも同様に 3 分間の時間平均を行った。

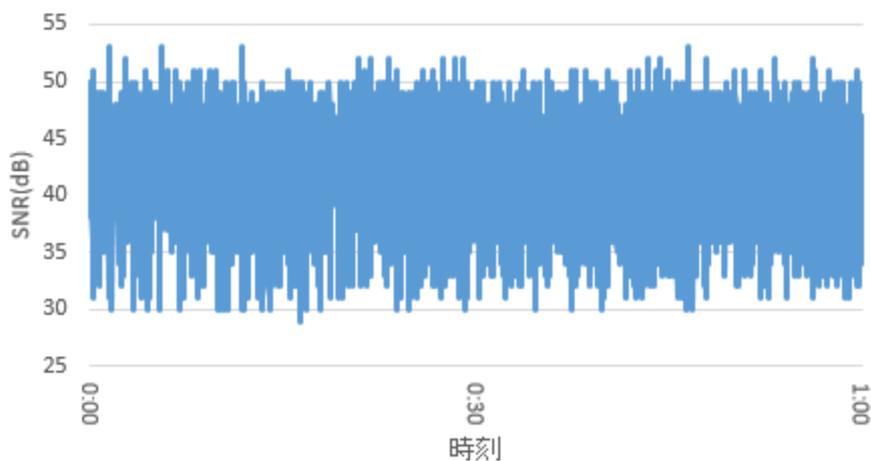


図 3.3 2016 年 9 月 16 日 0 時～1 時における 1 秒ごとに測定した LHCP アンテナで受信された SNR

### 3.2.2 電離層の影響

直達信号は電離層による減衰により SNR が日周期で変動する。図 3.4 は 9 月 2 日～11 月 15 日の直達信号の SNR をそれぞれの時刻で平均処理して 3 時間の移動平均をかけたものであるが、このように 1 日周期で変動しており、直達信号の変動は反射信号にも影響を与えている可能性が考えられる。このように反射信号には海水位の変位よりも周期が長い変動が合わさっていることがある。そこで位相干渉よりも長い周期の変動を取り除くために、反射信号を 3 時間で移動平均して長い周期の変動を求めて元の反射信号から引くことで補正を行った。

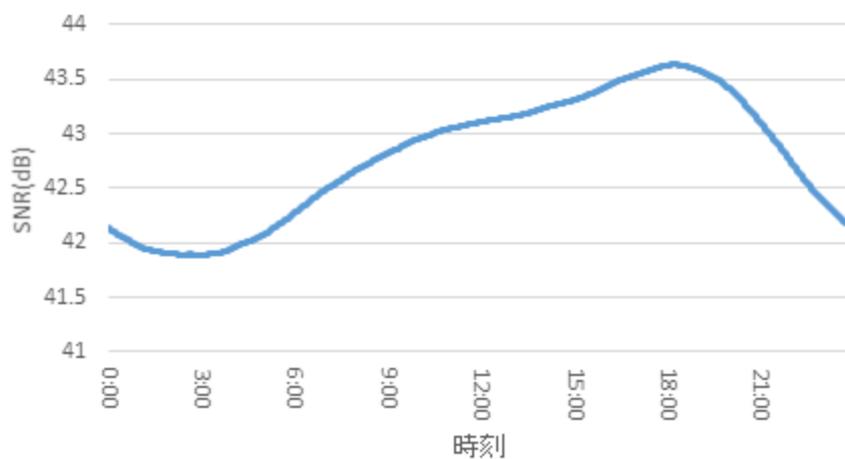


図 3.4 2016 年 9 月 2 日～11 月 15 日までの上向きアンテナで受信した SNR をそれぞれの時刻で平均して求めた日周期

### 3.2.3 風速の関係

SNR と風速との関係について説明する。

図 3.4 に示すように海面はフラットではないため、GNSS 信号が海面で反射をするとき、その反射信号は鏡面反射ではなく色々な方向に散乱する。この散乱の仕方によってアンテナで受信される SNR は変化する。反射信号の散乱は海面の平均傾斜 MSS(Mean Square Slope)と関係している海面粗度に依存しており、海面粗度は風から生じる風浪と対応している。したがって SNR を観測することで海上風の風速の観測が期待され、この風速と SNR の関係は逆相関の関係になることが一般的に知られている。

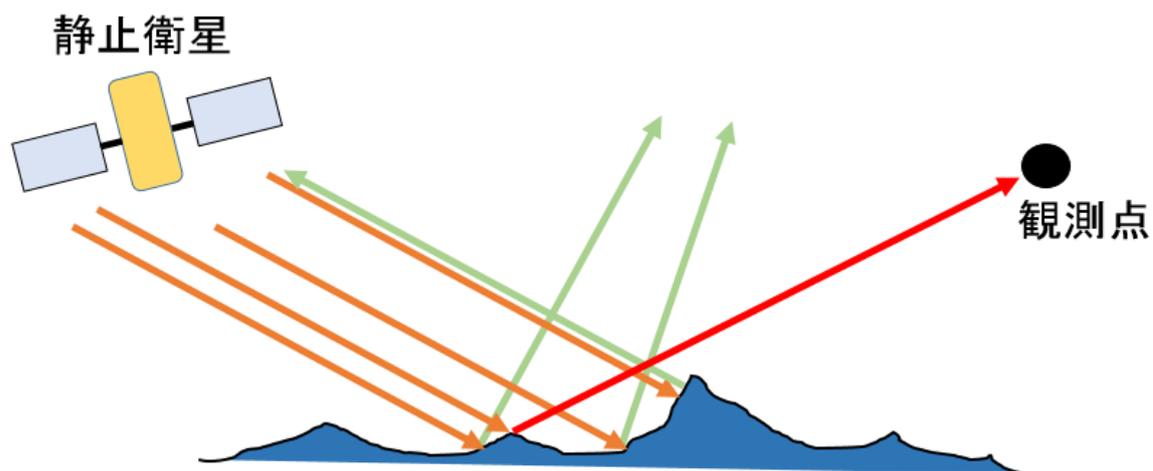


図 3.4 海面粗度と GNSS 信号の関係

ここで GNSS-R 観測による SNR と海上風の風速の関係の解析結果を示す。図 3.5 は 2016 年 9 月 11 日における白浜観測塔で観測された海上風の風速と LHCP アンテナで受信した SNR である。また図 3.6 は 2016 年 9 月 11 日における風速と LHCP で受信した SNR の散布図である。これらの結果はどちらも風速と SNR がおおむね逆相関の関係になっており、その理由は上述した通り、反射信号の SNR が風速によって変化する海面粗度に大きく依存しているためであると考えられる。このように SNR は海上風の風速の影響を大きく受けるため、位相干渉による海水位測定を行う場合、反射信号の SNR が強くなる風速が小さい時で且つ SNR との連動が少ない風速の変動が小さい時間帯の時相干渉による変化が顕著に現れる。そこで本研究ではそのような風速が小さく変動が少ない期間に絞り位相干渉の解析を行った。

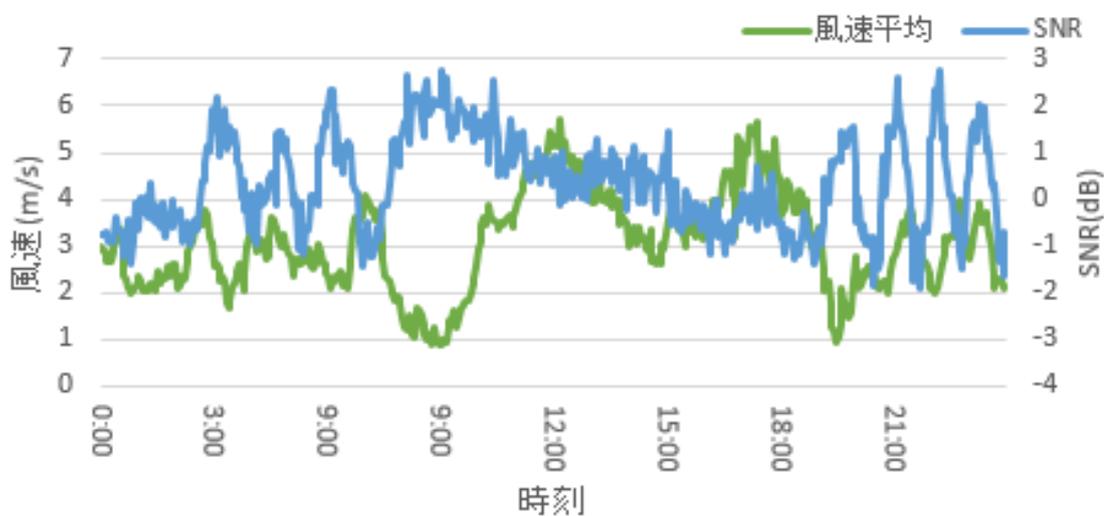


図 3.5 9 月 11 日における LHCP アンテナで受信した SNR(青色)と風速(緑色)

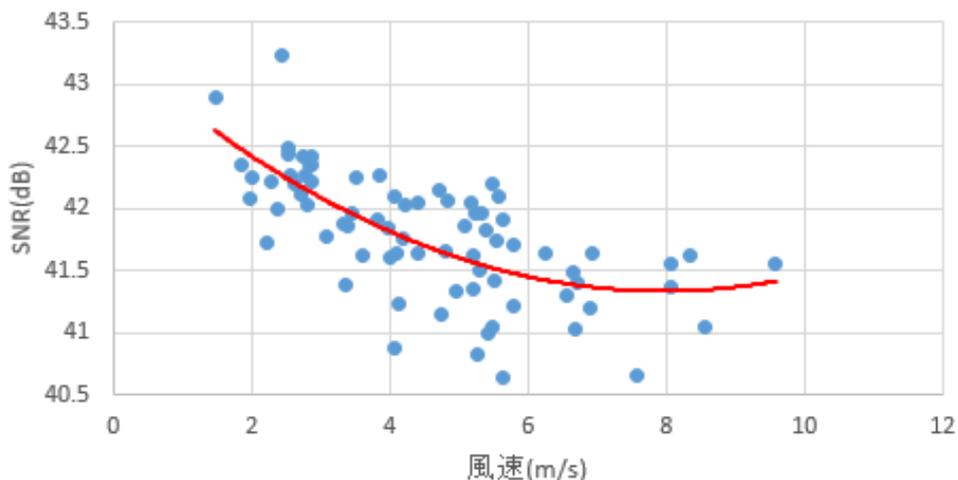


図 3.6 9 月 2 日～9 月 6 日における風速と LHCP の SNR の散布図

## 第4章 風速が弱くて安定している事例解析

3章で述べた通り GNSS-R 観測による SNR は海上風の風速の影響を大きく受ける。したがって風速が小さく変動が少ない期間で事例解析した。その期間は 2016 年 9 月 3 日～9 月 15 日の中で 9 月 3 日、9 月 4 日、9 月 6 日、9 月 7 日、9 月 8 日、9 月 9 日、9 月 10 日、9 月 11 日、9 月 12 日、9 月 13 日、9 月 14 日、9 月 15 日の 12 ケースであった。このうち 4.1 節では 2016 年 9 月 3 日の LHCP アンテナで受信した SNR からの海水位測定を検討した。4.2 節では 9 月 3 日の以外のデータ 11 ケースについて検討する。

### 4.1 2016 年 9 月 3 日の SNR の事例解析

上述したように、風速が小さく風速の変動が少ない場合、位相干渉による SNR の変化が出やすいと考えられる。そこで風速が 4m/s 以下であり時間変化の平均である変動率が 0.53 と安定している 9 月 3 日の午前 2 時～5 時の期間の LHCP で受信した SNR を用いて事例解析を行った。この期間では図 4.1 に示すように風速と連動していない約 1 時間周期の周期的な変動が 3 時間にわたって見られた。また、この周期的な変動は上向きアンテナでも約 4 分の 1 波長ずれて観測された。この周期的変動は両者に共通している現象であることから直達信号と反射信号が位相干渉していることによって SNR が変化していると考えるとつじつまが合う(位相がずれていることについては 5 章の議論で述べる)。

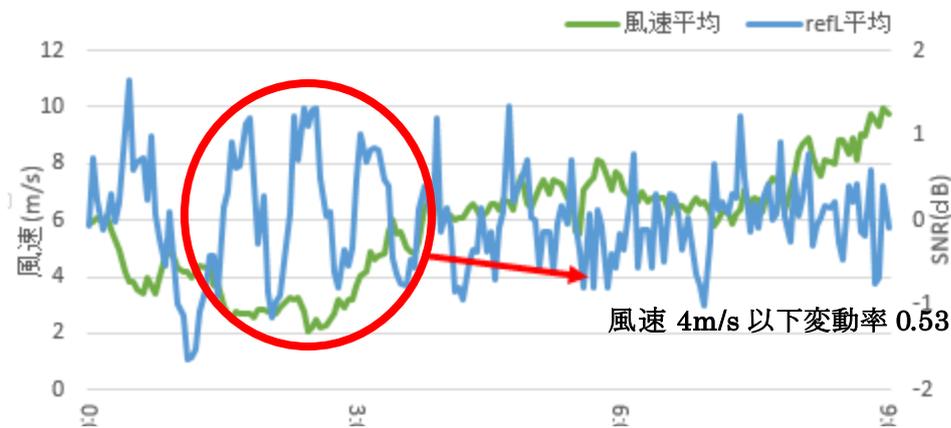


図 4.1 9 月 3 日の午前 0 時～9 時における LHCP で受信した SNR と風速が弱くて安定している期間(赤丸)

そこでこの期間の LHCP で受信された SNR と白浜観測塔で観測された海水位の変化を比較した。この期間は上げ潮時であり海水位は 1 時間に約 30cm 単調増加していたことがわかる。図 4.2 ではこの期間の LHCP で受信された SNR と白浜観測塔で観測された海水位のデータを示す。位相干渉によって SNR が変化する場合、位相干渉の周期は直達波と反射波の経路差  $d$  に依存しており、その周期は次式③によって決定される。

$$\cos 2\pi d/\lambda \dots \textcircled{3}$$

ここで図 4.2 において SNR を強め合う位相干渉が起きているとされる  $T = t_0$  を基準として実際の海水位が 28cm(赤線)とその半分の 14cm(青線)変化するごとに印をつけた。もし海水位の変化による位相干渉の変化に伴ってこの周期的な変動が生じているのであれば SNR は図の赤線の時刻で強め合い、青線の時刻で弱め合うと予想される。

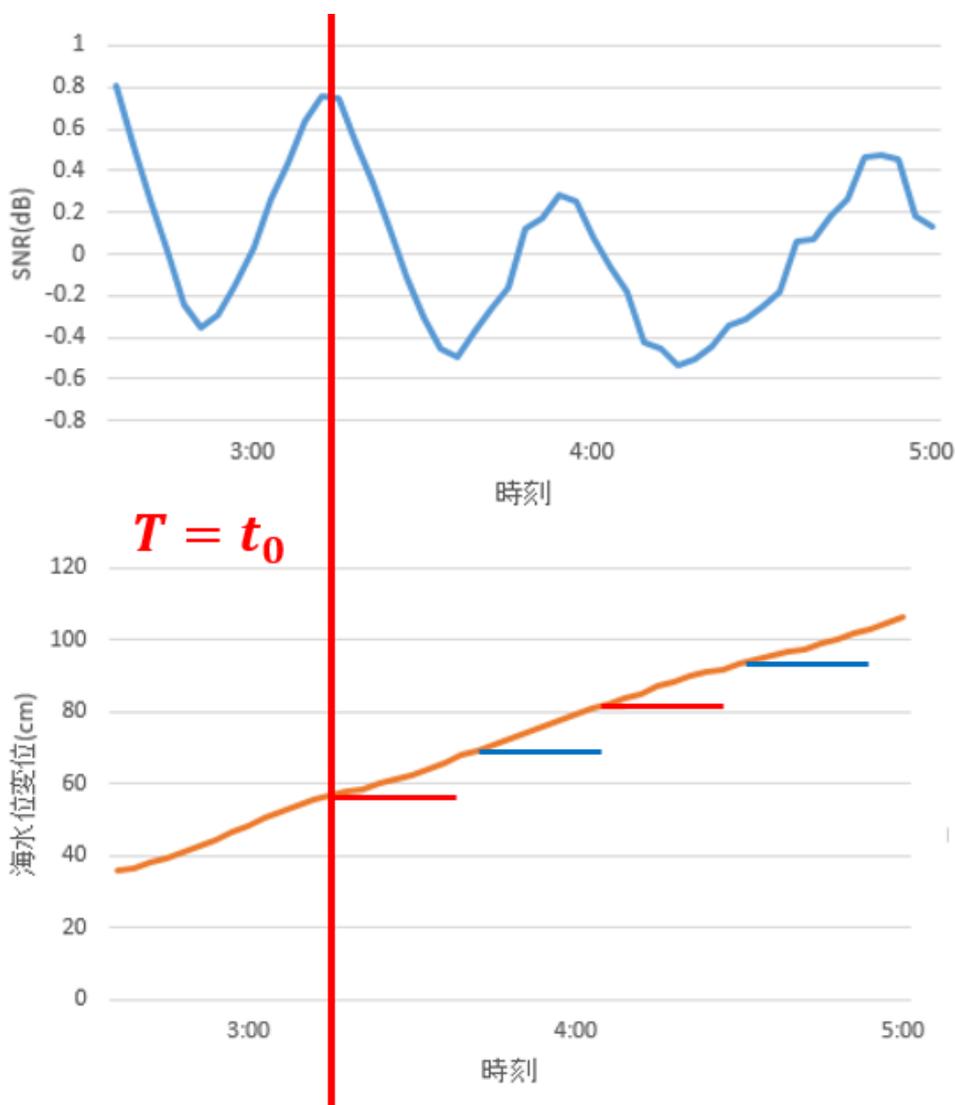


図 4.2 9月3日の午前2時～5時における LHCP で受信した SNR(上図) と白浜観測塔で観測された海水位変位(下図)

そこでこの期間の海水位を基に式①から経路差  $d$  を計算して式③で示す  $\cos 2\pi d/\lambda$  を求めて計測した SNR の周期的変動との差を求めてみた。この周期予測の関数の振幅と位相は任意性があるので表 4.1 に示すように振幅と位相を設定して RMS を調べ、最も小さい値を選択した。この時振幅は式③に対して 0.3 倍で、 $T = t_0$  の海水位を基準とした  $\cos 2\pi d/\lambda$  が強め合うときの海水位が -4cm であるとき RMS が最も小さくなった。関数とこの期間の SNR を比較したものを図 4.5 で示す。図 4.3 で示すように LHCP で受信された SNR は実際の海水位変位と比較すると似たような傾向を示したがわずかに周期は合わなかった。

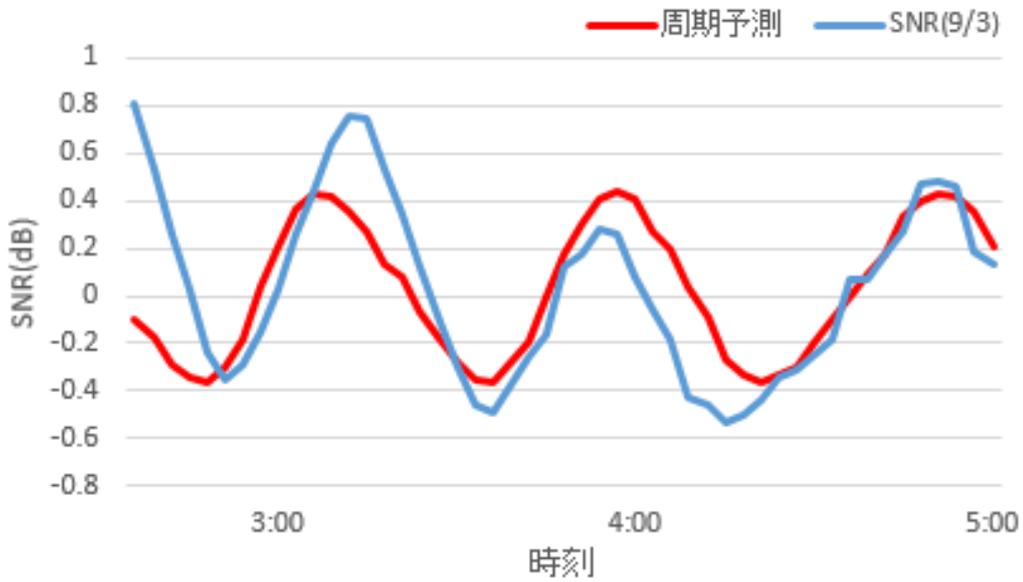


図 4.3 9 月 3 日の 2 時～5 時における LHCP で受信された SNR(青色) と位相干渉の周期予測(赤色)

表 4.1 海水位の倍率とそれを用いた周期予測と SNR の RMS

$T = t_0$  の海水位を基準とした  $\cos 2\pi d/\lambda$  が強め合う時の海水位(cm)

	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
0.2	0.080	0.070	0.065	0.066	0.072	0.083	0.097	0.116	0.136	0.157	0.177
0.3	0.070	0.055	0.048	0.049	0.059	0.075	0.097	0.124	0.159	0.185	0.215
0.4	0.069	0.049	<b>0.040</b>	0.043	0.056	0.078	0.108	0.143	0.182	0.223	0.263
0.5	0.077	0.053	0.043	0.047	0.064	0.092	0.129	0.173	0.221	0.271	0.320

式③の振幅の倍率

ここで、海水位は白浜観測塔で行われる観測によって測定しているのに対して Beidou の反射点は 20m の位置に  $20^\circ$  の方向に向けて設置している(図 4.4)。このため、観測点から約 55m 離れた位置で反射した反射信号が観測点では受信される。したがってこの観測点と反射点の位置の差から観測塔で観測された海水位と反射点での海水位ではその値が異なっている可能性がある。

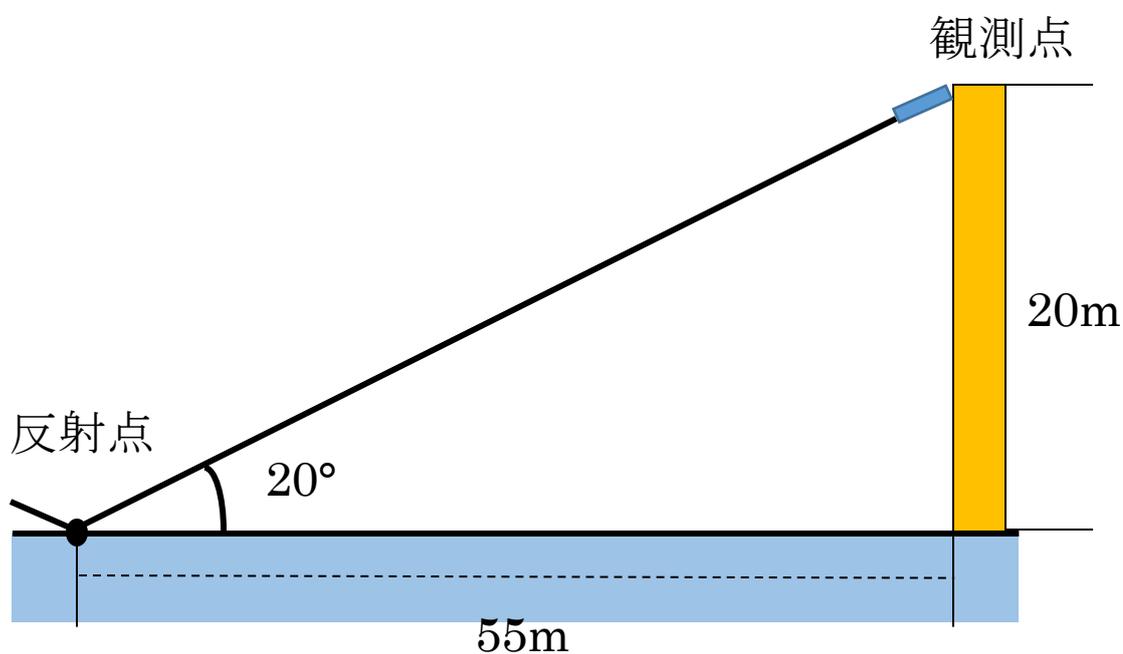


図 4.4 観測点と反射点の位置関係

そこで先程の関数を位相と振幅を同じにしたまま白浜観測塔で観測された海水位変位を 0.9~1.1 倍にして周期予測の検証を行った。海水位の倍率と RMS の関係は表 4.2 のようになり、海水位が 1.05 倍の時に最も小さくなった。その時の周期予測と SNR の検証結果を図 4.5 に示す。先程の結果と比べると周期が合っていることがわかる。

海水位倍率	RMS
0.9	0.100
0.95	0.062
1	0.040
1.05	0.033
1.1	0.050

表 4.2 海水位の倍率と RMS

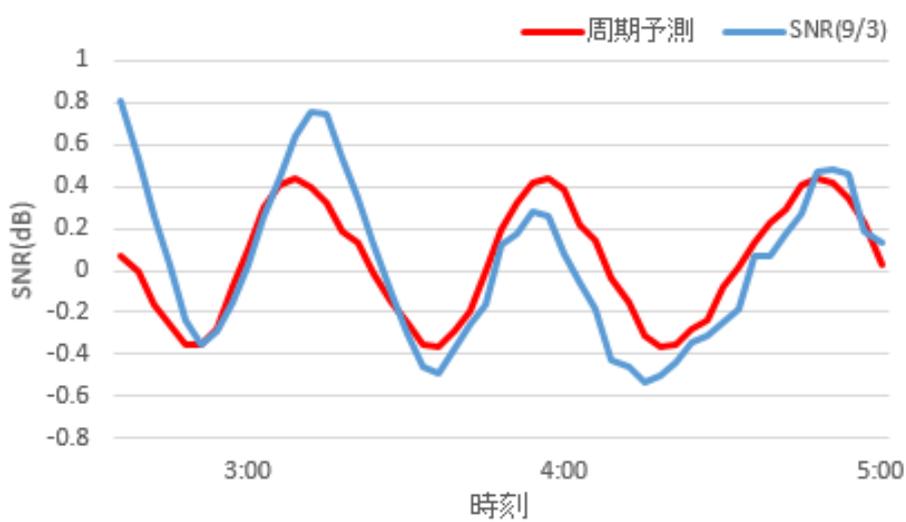


図 4.5 海水位を 1.05 倍にした時の周期予測(赤色)と LHCP で受信した SNR(青色)

図 4.3 と 4.5 では実際に観測された海水位の変位から SNR を予測することを試みた。ここでは逆に位相干渉によって変化する SNR から海面高度の推定を試みた。SNR の位相干渉による変動は海水位が 25cm 変化するごとに 1 周期となる。そこで SNR が 1 周期となる時間を測定し、図 4.6 のようにその時間に海水位が 25cm 変動し、半周期で 12.5cm 変動しているとして海水位の推定を行った。このとき求めることができる海水位の推定は相対値のみであるため、本来水位が上昇しているか下降しているかの区別はできないが、この時間帯は上げ潮時であるということを考慮して推定する。図 4.7 は 9 月 3 日の 3 時～5 時における SNR から推定を行った海水位予測と実際の海水位である。

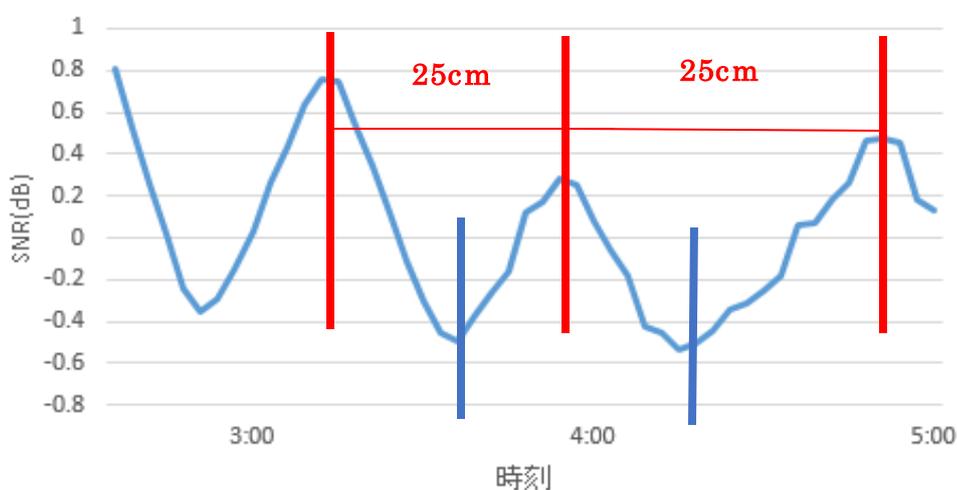


図 4.6 9 月 3 日における 3 時～5 時の SNR と海水位変位の関係  
(赤棒が 1 周期で 25cm、青棒が半周期で 12.5cm)

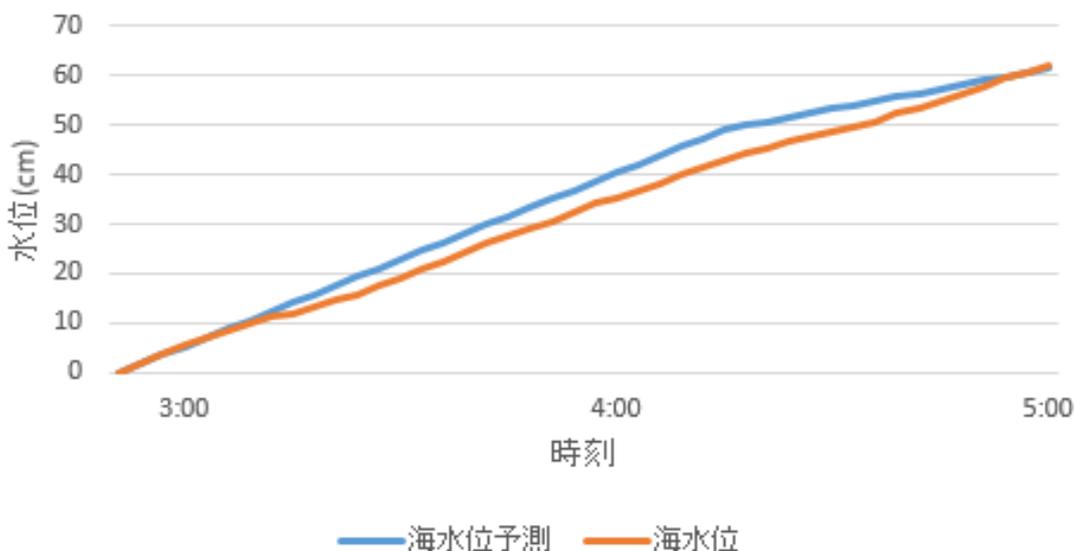


図 4.7 SNR の周期を用いた海水位の予測(青色)と海水位変位(オレンジ色)の関係

また上述したように観測点と反射点の水位変動幅が異なっている場合を考慮するため同様に海水位変位を 0.9~1.15 倍にして海水位推定と比較した。この時、RMS を取ったところ、1.1 倍の倍率の時に 2.14cm となり最も小さくなった。この結果は周期予測による検証の結果と比較すると似た傾向となった。ここで図 4.8 に変動幅を 1.1 倍にした時の海水位変位と海水位の推定、表 4.2 に倍率と RMS を示す。

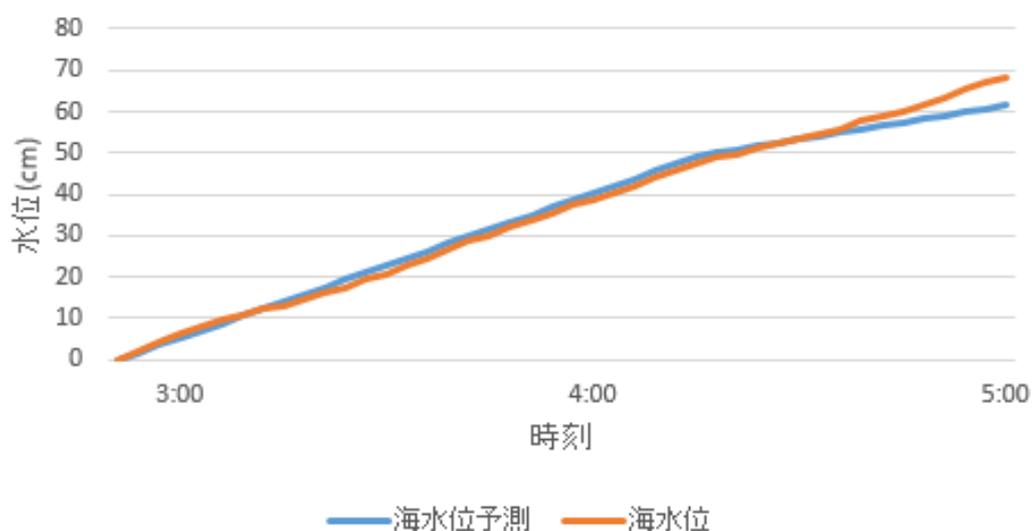


図 4.8 変動幅を 1.1 倍にした時の海水位(オレンジ色)と海水位予測(青色)

倍率	RMS
0.9	3.03
0.95	2.25
1	1.48
1.05	0.80
1.1	0.63
1.15	1.12

## 4.2 2016年9月3日以外の事例解析

風速が弱く変動が少ない期間のうち、4.1節で解析した2016年9月3日以外の11件のデータについて事例解析を行った。図4.9は条件にあてはまる11件の期間のうちの1つである9月9日のLHCPで受信したSNRと風速であり抽出した箇所を示す。9月9日は19時50分～24時の期間で風速が4m/sであり変化率が0.32となり条件に当てはまる。このとき抽出箇所では図からわかるようにSNRは9月3日のように約1時間で周期的に変動している部分は9月9日には見られなかった。

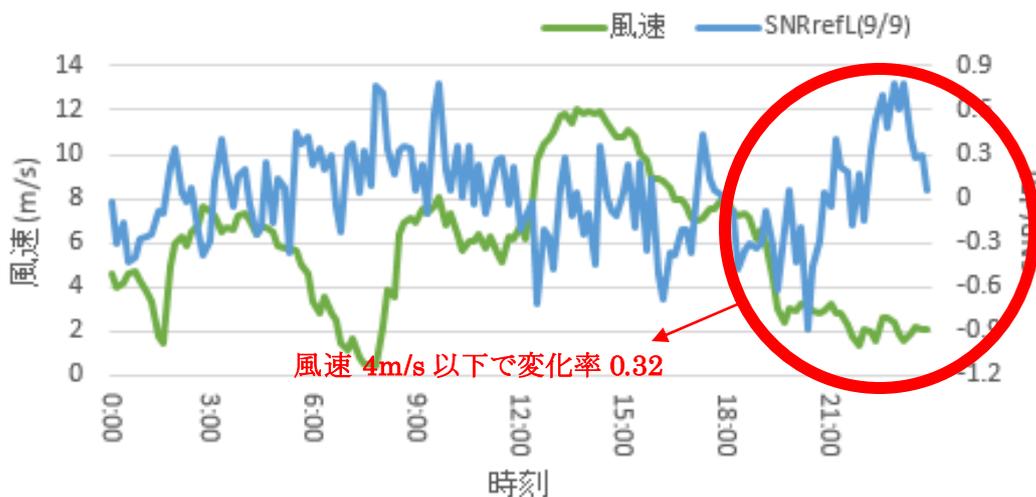


図 4.9 2016年9月9日のLHCPで受信されたSNR(青色)と風速(緑色)と抽出箇所(赤色)

次にこの抽出期間の9月9日の19時50分～24時の海水位変位について図5.3に示す。この期間は図4.10に示すように満潮時の時間帯であり、海水位の変位は12cmまでしか変化しなかった。SNRの位相干渉による周期の変化は25cm海水位が変化すごとに1周期変化することからこの期間にSNRの周期的な変動が見られないことにもつじつまが合う。他の9件も同様にSNRの位相干渉によって変化したとされるSNRの周期的な変動は見られず、さらにその期間は満潮時と干潮時であり海水位の変動が25cm以下の少ない時間帯であった。

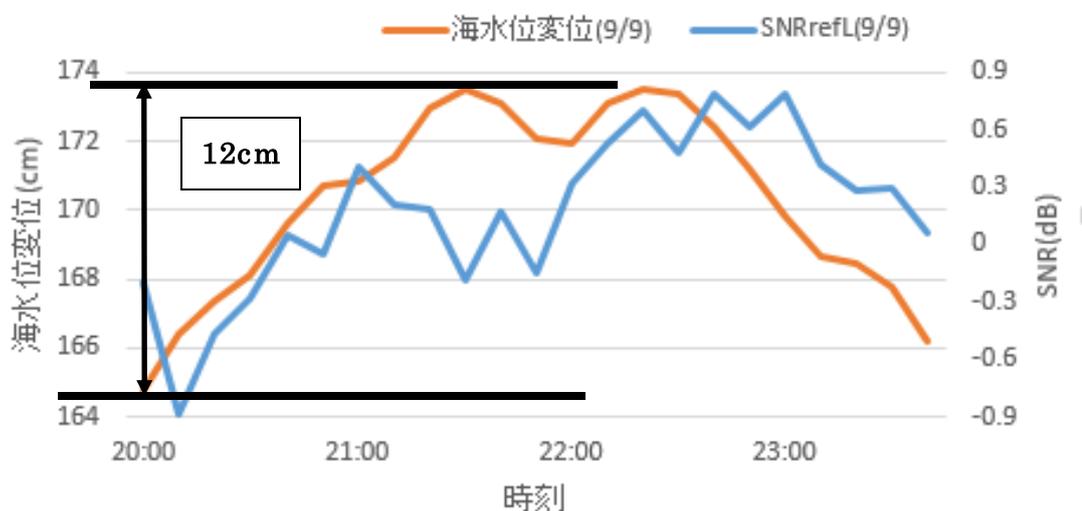


図 4.11 9月9日の19時50分～24時までの海水位変位(オレンジ色)と LHCP で受信された SNR(青色)

## 第5章 議論

### 5.1 風速が大きくて安定している場合

4章で述べたようにGNSS-R観測によるLHCPのSNRは風速と逆相関の関係になる。風速が大きい場合、LHCPアンテナで受信する反射信号強度は小さくなり、結果として位相干渉する変動幅も小さくなると考えられる。ただし、風速の変動率が十分に小さい場合、SNRが風速に連動される影響を受けないため、変動幅は小さいもののSNRの位相干渉による変動が確認できる可能性がある。そこで海水位の変化が大きい上げ潮もしくは下げ潮の時に限定し、風速の変化率のみを条件としてSNRの抽出を試みた。観測塔で計測された海水位の変化が10分間で3cm以上変化してそれが3時間以上続く時間で、風速の変化率が0.53m/s以下の時を抽出した。9月2日～9月15日の14日間で抽出したところ、該当する期間は9月4日と9月15日の2件であった。この節では9月4日を取り上げる。図5.1で9月4日における風速と海水位変位を示す。図の赤丸で示す21時～24時において下げ潮時で水位の変化が大きく風速の変化率が0.445で0.53以下であった。この日のLHCPで受信されたSNRと風速を図5.2に示す。



図 5.1 2016 年 9 月 4 日における風速(緑色)と海水位変位(オレンジ色)と抽出箇所(赤丸)

図 5.1 の赤丸で示した時間帯の SNR と 4 章同様に海水位変位を基に予測した周期を図 5.3 に示す。この図のように振幅は小さいが周期が合っており、小さい振幅ではあるが位相干渉によって SNR が変化していると考えられる。

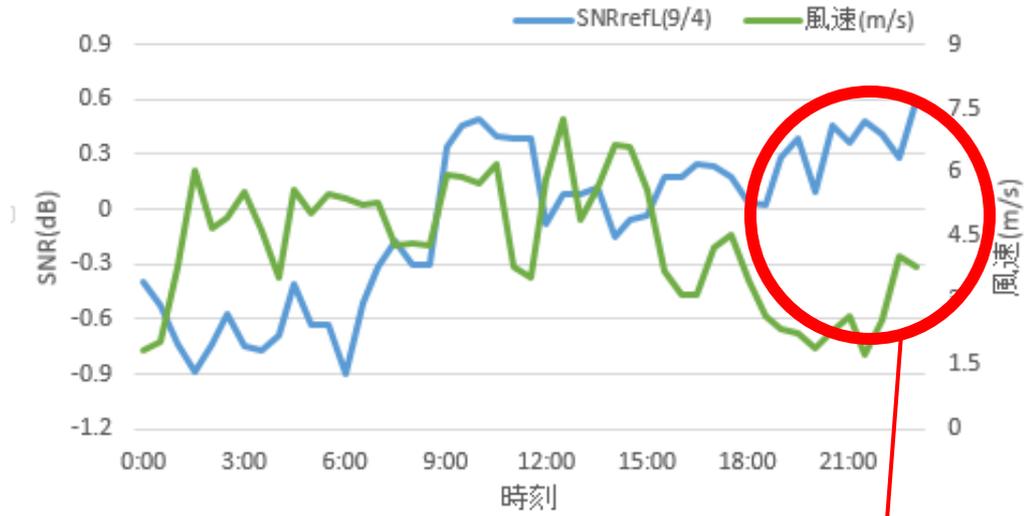


図 5.2 9月4日における風速(緑色)と LHCP で受信された SNR(青色)と抽出箇所(赤丸)

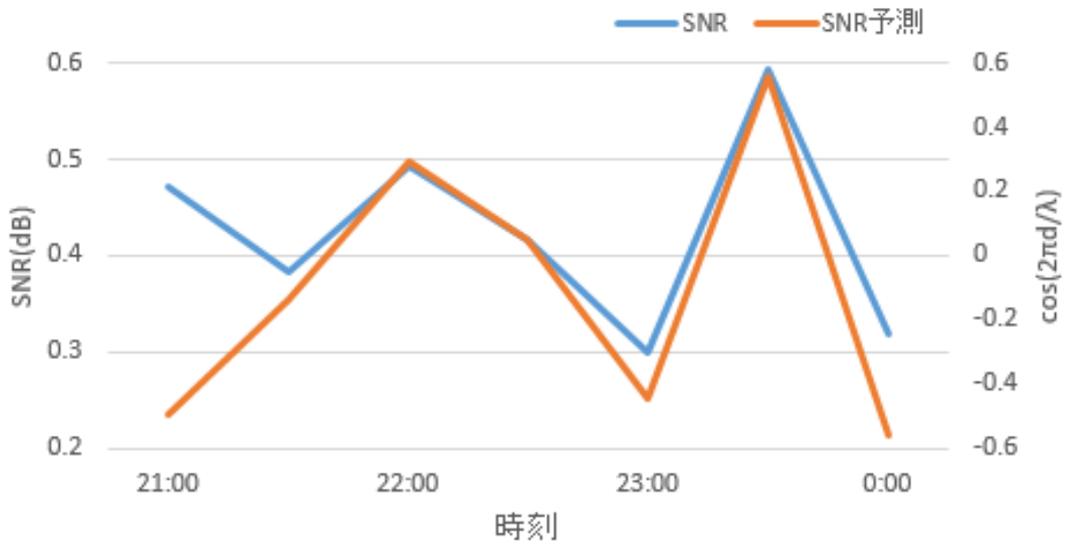


図 5.3 9月4日の21時~24時における LHCP で受信した SNR(青色)と周期予測(オレンジ色)

## 5.2 風速による SNR 補正について

本研究では海水位が変化することによって起きる位相干渉による SNR の変化を解析するために、その他の SNR 変動要因を除くべく、①風速が弱く変動が少ない穏やかな時間帯②風速は強いが変動が少ない時間帯に分けて解析を行った。しかしながら、これらの風速の条件によって使用できる時間帯が大幅に制限されるため、本来は風速に連動した LHCP で受信される SNR の関数を求めて測定される SNR を補正するのが望ましい。そこでここではその風速に連動する関数を出すために行った解析を述べる。

風速と LHCP で受信した SNR との関係は 4 章で述べた通り逆相関の関係であるが LHCP の SNR を位相干渉で変動する関数と風速に連動する関数に分離するためには図 3.6 の散布図よりも正確に関係式を求める必要がある。ここで、海水位が高くなるとアンテナと反射点の距離が近くなることから、海水位が高いと LHCP の SNR が大きくなり、海水位が低いと小さくなると予想できる。そこで今回は海水位を 0-40、40-80、80-120、120-160cm の 4 グループに色分けして海水位と LHCP の散布図を作った。図 5.4 に海水位と SNR それぞれ 3 時間平均したその散布図を示す。また表 5.1 にそれぞれの近似式を示す。

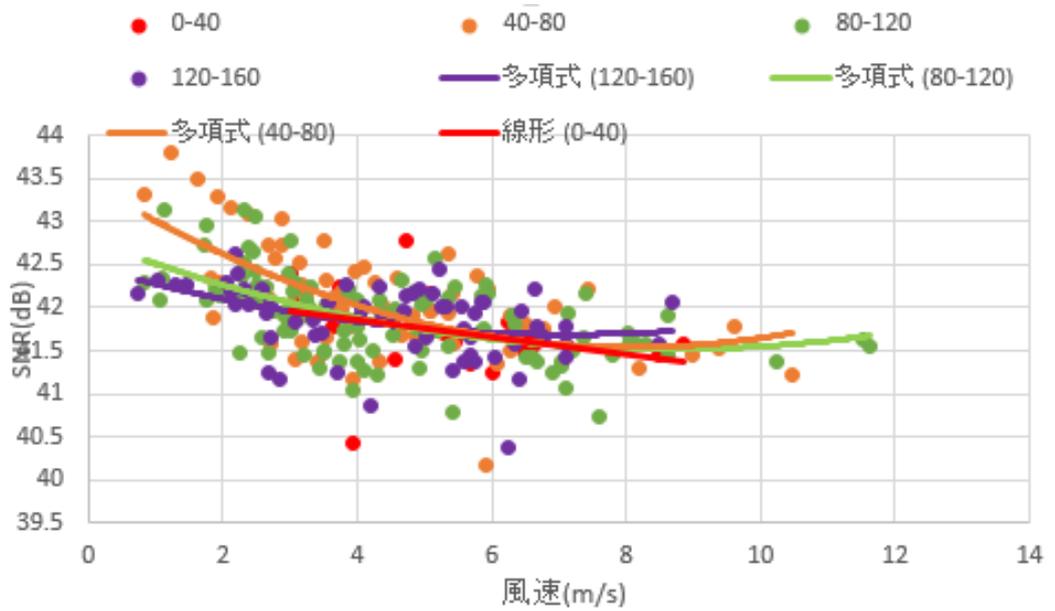


図 5.4 9月2日～12日の風速と海水位別の SNR の散布図  
 (赤色 0-40cm、オレンジ色 40-80cm、黄緑色 80-120cm、紫色 120-160cm)

表 5.1 海水位ごとの近似式

海水位(cm)	近似式
0-40	$y = -0.1015x + 42.274 (R^2 = 0.1132)$
40-80	$y = 0.0294x^2 - 0.4747x + 43.456$ ( $R^2 = 0.3213$ )
80-120	$y = 0.0171x^2 - 0.2948x + 42.788$ ( $R^2 = 0.3855$ )
120-160	$y = 0.0158x^2 - 0.2245x + 42.488$ ( $R^2 = 0.1633$ )

図 5.5 で示す海水位が 80-120cm の範囲の 9 月 7 日の 5:00~7:00 において表 6.1 の近似式と風速を用いて LHCP の SNR に補正をかけた。しかし、ノイズが大きすぎて周期的な変動は取り出せなかった(図 6.3)。しかし、例えば湾内や島かげのように風の影響を受けにくい場合であれば、風速による SNR 変化が比較的抽出できるかもしれない。これは将来的にはデータ数を増やして海水位を細かく区分していきそれぞれの海水位の区分の中での風速と SNR の関係式を求める今後の課題としていく。

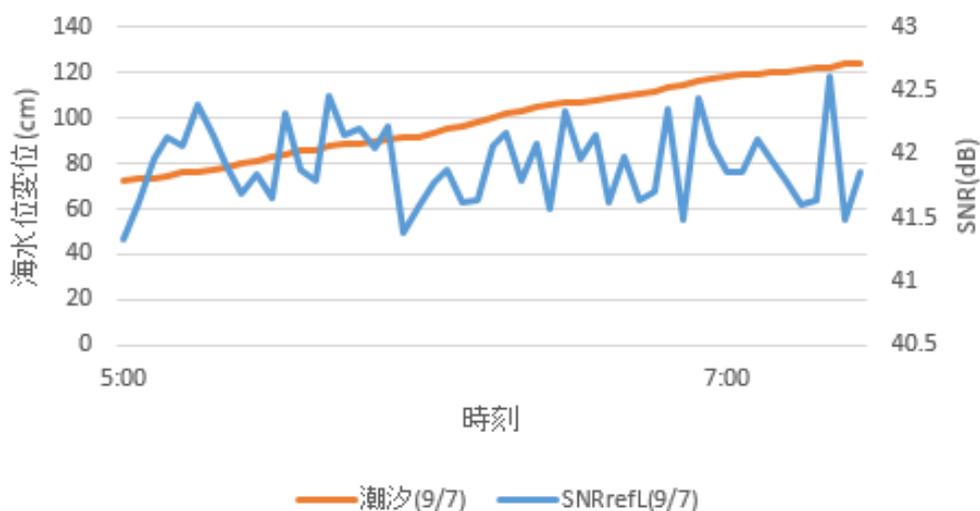


図 5.5 9 月 7 日 5 時~7 時における LHCP で受信された SNR と海水位変位

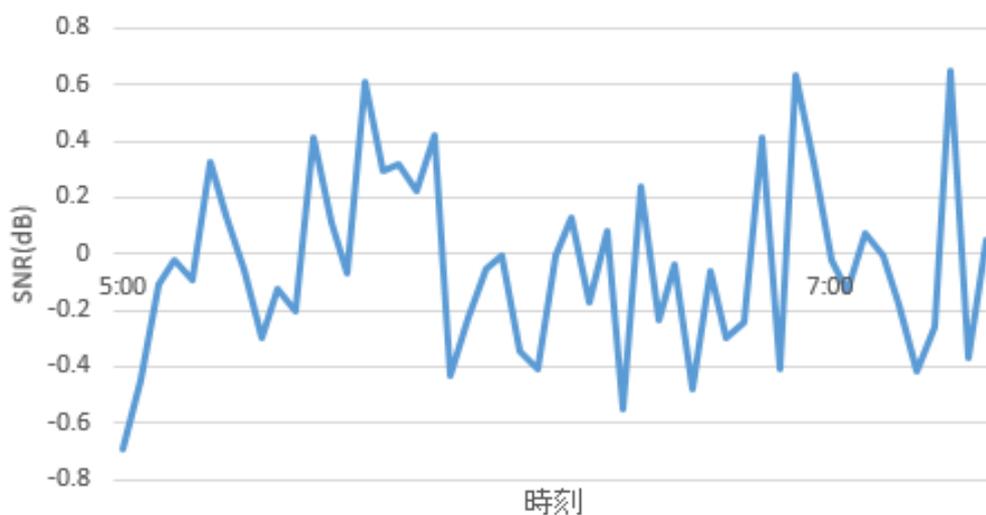


図 5.6 表 6.1 の近似式を用いて風補正をかけた 9 月 7 日 5:00 ~7:00 の LHCP で受信された SNR

### 5.3 4.1 の事例解析における上向きアンテナの SNR 変化

位相干渉によって起きたとされる 9 月 3 日の事例では、下向きアンテナで受信された SNR の周期的な変動が上向きアンテナでも測定された(図 5.7)。しかしながらその周期的な変動は図 5.8 のようにいずれも約 4 分の 1 波長ずれていた。この理由としては上向きアンテナと下向きアンテナの設置位置のずれが原因であると考えられる。位相干渉は上向きアンテナの場合直達信号と RHCP の反射信号、下向きアンテナの場合タワーからの反射信号と LHCP の反射信号もしくは直達信号と RHCP の反射信号で起きている。したがって反射信号の受信位置が異なる場合そのずれが位相のずれとして生じる可能性は高い。

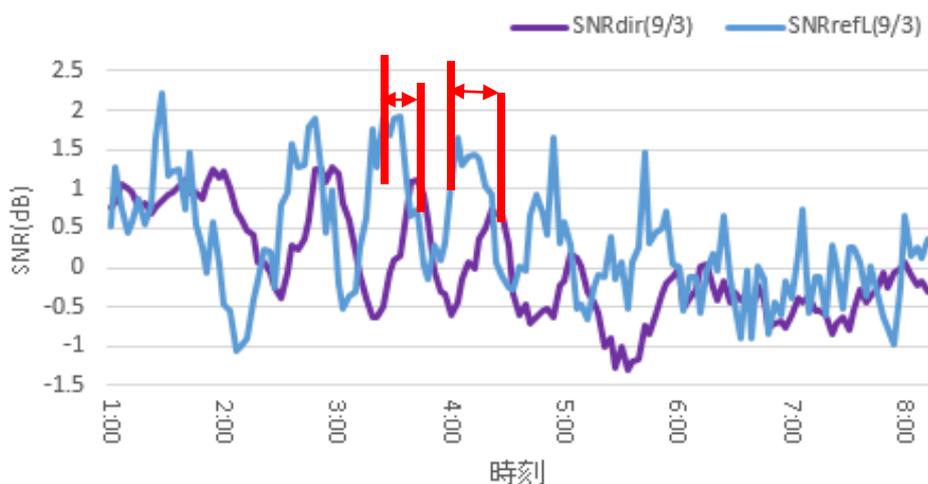


図 5.7 9 月 3 日の 1:00~6:00 における上向きアンテナ(紫)と LHCP(青)で受信された SNR

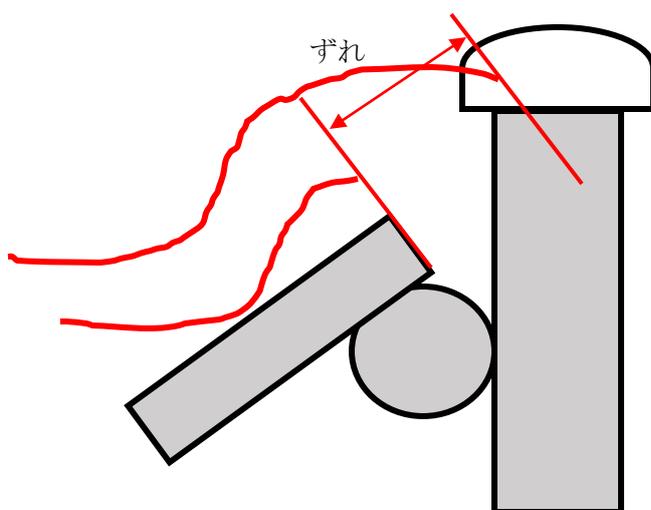


図 5.8 上向きアンテナと下向きアンテナの設置位置

## 5.4 実用化について

LHCP での SNR 測定では現在の設置条件だと海面高の影響よりも風速の影響の方が大きくなってしまったため、海面高による SNR の変化は風速のものに比べ、相対的に小さくなる。したがって、実用化には設置場所を低くするなどの工夫が必要である。設置場所を低くすると反射強度が大きくなるため、風速よりも海面高の変化による影響が強くなると予想される。

## 第 6 章 結論

本研究では 2016 年 9 月から 11 月に行われた観測(李,2016)からデータ提供を受け、静止衛星を用いた位相干渉による海面高度の推定を検討した。この手法は受信電波の強度(SNR)の周期的な変動を GNSS-R 電波の波長での干渉計として用いるため、他の要因による SNR 変動を分離する必要がある。SNR は特に風速の影響を受けることから、データの中から風速が弱くて変動が少ない期間を抽出して位相干渉による高度推定の解析を行った。風速の条件に合うケースは 12 件あり、上げ潮で実際の水位変化が大きかった 9 月 3 日のケースで事例解析を行った。実際の海水位のデータを用いて位相干渉の周期の予測を求めて SNR と検討するとその変動は実際の海水位変化とほぼ矛盾が生じないものとなった。さらに逆に SNR から海面高度の推定を行ったが、その検証と似た傾向の結果となった。9 月 3 日以外の 10 件では周期的変動は見られなかったが、実際の海水位変位と比較してみるといずれも満潮時と干潮時であり、周期的変動がおきる 25cm に満たなかったことから、これに関してもつじつまが合う。このことから風速が弱く変動が少ない時間帯であれば海水位の観測が可能であると考えられる。

さらに、風速が大きい場合でも、時間変化していなければ振幅が小さいながら矛盾しない SNR の周期的変動が確認できた。ただし、実用上は風速変化の影響が大きいため、これを補正する方法を今後検討する必要がある。

## 参考文献

- [1] GNSS Rader, <http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html>
- [2] Kristine M. Larson, Johan S. Lofgren, Rudiger Haas.”Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver”,2012
- [3] Lofgren, Haas, Schmeck and Bos,” Three months of local sea level derived from reflected GNSS signals”2011
- [4] 九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻編『地球環境を学ぶための流体力学』成山堂書店
- [5] フルノ製品情報. <https://www.ida-japan.co.jp/gpsknowledge/gpsknowledge1.html>
- [6] 李梓原,”GNSS 手法による海面計測に関する研究”2016

## 謝辞

本研究を行うにあたり、九州大学応用力学研究所の市川香准教授には、研究の全体的な方向性、研究の進め方、論文の書き方など、ひとかたならぬご指導とご助言を賜りました。心より感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

また、同研究室の和方吉信教授には、研究を進めるにあたり、様々なご助言を頂きました。研究室の秘書の高田典子氏には、日常生活の様々なことでお世話をして頂きました。

同研究室で同期の松山靖典君、水江謙二郎君、研究や勉強に関して沢山相談にのって頂き、大学院生としての学校生活を充実させて頂きました。私がお世話になった皆様全員に対し、厚く御礼申し上げます。本当にありがとうございました。