

平成22年5月31日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19360405

研究課題名（和文） 海面で反射した測位衛星電波による海面高度計測と津波監視への応用

研究課題名（英文） Ocean Altimetry using Reflected GPS Signals for Tsunami Monitoring

研究代表者

安田 明生（YASUDA AKIO）

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・特任教授

研究者番号：00023250

研究成果の概要（和文）：本研究では、海面で反射した GPS 信号を利用した新しい海面高度計測センサを開発した。このセンサは、GPS 衛星を信号源として利用するパッシブなシステムであるため、小型・省電力である。また、一度に複数の GPS 反射波を観測できるため、広範囲な海洋観測が可能である。航空機からの観測実験では、数十 cm の精度で海面高度を観測できることが確認された。本研究成果の応用として、航空機や人工衛星からの津波監視などが考えられる。

研究成果の概要（英文）：An ocean altimetry sensor specially designed to process reflected GPS signals off the ocean surface has been developed. Unlike most radar-based ocean remote sensing systems, this newly developed sensor uses passive signals transmitted from the GPS satellites. This reduces the size and power consumption of the sensor. Moreover, the receiver can observe not a single but multiple signals at the same time. This provides a wider sensing area compared with the traditional active monostatic radars. The results of a set of airborne campaign showed that the receiver was capable of providing the altimetric measurement with decimeter level precision. A group of small aircraft or a constellation of small satellites carrying this device could be used for global monitoring of sea height in order to detect a tsunami.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2008年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学，地球・資源システム工学

キーワード：リモートセンシング

## 1. 研究開始当初の背景

近年，世界中で多くの自然災害が報告されて

いるが，中でも津波による被害は人的にも経済的にも壊滅的な結果をもたらしている。将来の津波による被害を最小限に食い止める

ためにも、地球規模の津波監視システムの実現が早急に望まれる。

津波の発生を検知するためには、何らかの形で海面高度を計測する必要がある。地球規模での海面高度計測には、これまでも人工衛星によるリモートセンシングが用いられている。しかし、これらマイクロ波レーダーやレーザーを用いた従来のシステムは、衛星自ら計測用の信号を照射する必要があるため、衛星が大型化し、高価になってしまう問題があった。さらに、このような大型衛星単機による観測では、図1に示すように一度に非常に狭い範囲の海面しか計測できないため、時間分解能が低いという問題もあった。

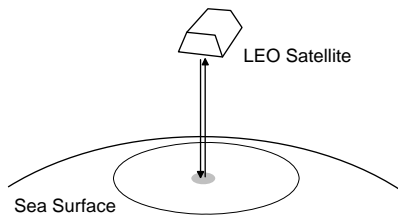


図1: 従来の衛星による海洋観測

そこで、本研究では、海面で反射した GPS (Global Positioning System) 信号を利用したリモートセンシング手法に注目した。これは、GPS 衛星を信号源として利用するパッシブなシステムであるため、小型化・省電力化が可能である。さらに、図2に示すように一度に複数の信号を観測できるため、広範囲な海洋観測が可能である。このようなセンサを複数の小型衛星や無人飛行機などに搭載することにより、時間分解能の高い海洋観測が期待できる。

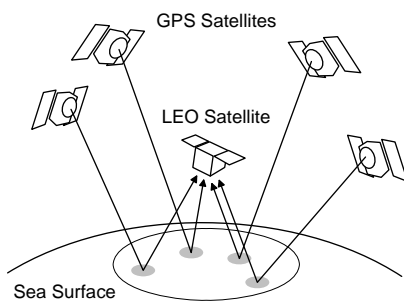


図2: GPS 反射波による海洋観測

## 2. 研究の目的

海面で反射した GPS 信号がリモートセンシングに応用できるのではないかというアイデアは、1996年にNASAのGarrisonらに

よって提案され、翌1997年には初歩的な観測実験が行われている。

GPS 海面反射波によるリモートセンシングでは、図3に示すようなコード相関波形を利用している。GPS 信号には、携帯電話などと同じスペクトル拡散技術が使われており、その拡散コードは1023チップから成るゴールド系列である。GPS 衛星から直接受信する直接波からは、図中左側の Direct Signal に示されるような三角形の自己相関波形が得られる。これに対して、海面で反射した GPS 信号は複数の反射点からの信号が合成されるため、図中右側の Reflected Signal にしめされるように、相関波形が時間軸方向に広がることになる。

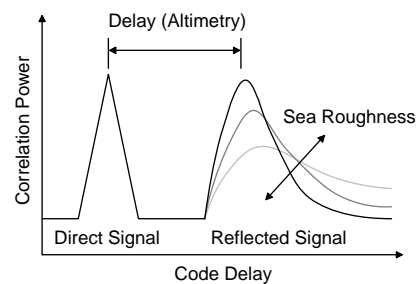


図3: GPS 信号の相関波形

この相関波形の広がり、反射面の状態に係っているため、GPS 反射波の相関波形から、海面での波浪や、海面付近の風速などを推定することが可能となる。Garrisonらによる初期の研究では、この反射波の相関波形から海面の状態を推定することに焦点をあてている。

さらに、図3に示す相関波形において、直接波と反射波の伝搬遅延を求めることで、これらの距離差から海面高度が測定できる可能性を示している。本研究では、特にこの海面高度計測への応用に注目し、高精度な高度推定手法の検討と観測装置の開発、および航空機による実証実験を目的としている。

## 3. 研究の方法

GPS 反射波の相関波形から高精度な海面高度推定を行うためには、海面反射によって拡散してしまった反射波の相関波形を正確に推定する必要がある。反射で減衰して微弱となった信号から、より正確な相関波形を復元するために、本研究では直接波の観測情報から反射波の遅延や周波数誤差などを推定するオープンループの信号追尾アルゴリズムの開発を行う。また、このアルゴリズムを実行するための観測装置として、直接波と反射

波の受信をそれぞれ独立したアンテナで同時に行うことのできる GPS 受信機を開発する。

初年度は、主に GPS 反射波の信号処理ある後リズムの開発と、観測データの後処理による動作確認を実施する。観測データの取得には、専用の受信機が必要となるが、本研究では設計の困難な高周波回路部には、GPS 専用のフロントエンド IC を利用している。これらフロントエンドは、大手半導体メーカーから携帯機器向けに販売されており、受信した GPS 信号をマイコン等による信号処理のためにデジタル化してくれる。

これらデジタル信号は USB などの汎用的な高速デジタルインターフェイスを通じて、ハードディスクなどの大容量記録媒体に一時保存される。この保存された GPS 反射波信号データを PC 上でデジタル信号処理することにより、反射波相関波形の算出や反射波のオープンループ追尾などの海面高度計測の核となるアルゴリズムの開発と検証を行う。

このような PC 上での後処理による GPS 反射波の観測は、柔軟なアルゴリズム開発が可能であるという利点があるが、処理負荷が大きいという問題がある。そこで、次年度からは、FPGA を用いた反射波観測専用受信機の開発と、信号処理アルゴリズムのリアルタイム化を進める。

さらに、専用受信機の開発と並行して、初年度の研究成果で得られた GPS 反射波データの収集装置を航空機に搭載し、GPS 海面反射波のデータ取得と、海面高度計測の性能評価を実施する。

#### 4. 研究成果

##### (1) GPS 反射波データ収集装置

GPS 反射波を利用したリモートセンシングでは、直接波と反射波を同時に観測する必要があるため、同期した二つのフロントエンドを持つ受信機が必要となる。このような GPS 受信機は市販品として存在しないため、独自に開発を行った。

本研究で開発した受信機のフロントエンド部には、MAXIM 社製のフロントエンド IC である MAX2741 を二台使用している。さらに、これらフロントエンドでデジタル化された中間周波数 (Intermediate Frequency: IF) 信号が同期するように、フロントエンド間で基準クロック (TCXO) を共有している。

フロントエンドでデジタル化された IF 信号は、高速デジタルインターフェイスによって PC に転送され、ハードディスクなどの記録媒体に保存される。今回開発した受信機では、この高速インターフェイスを汎用的な USB 2.0 で実現している。フロントエンド部と PC 側の USB ポートの中継するトランシーバ IC には、Cypress 社の EZ-USB FX2 を使用している。

図 4 に GPS 反射波データ収集装置の外観を、図 5 にその構成を示す。二つのフロントエンドは、それぞれ直接波、反射波を観測するためにアンテナに接続される。

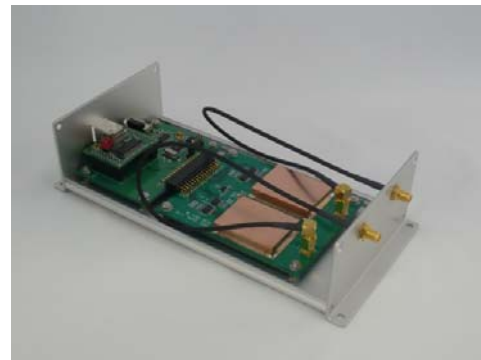


図 4: GPS 反射波データ収集装置の外観

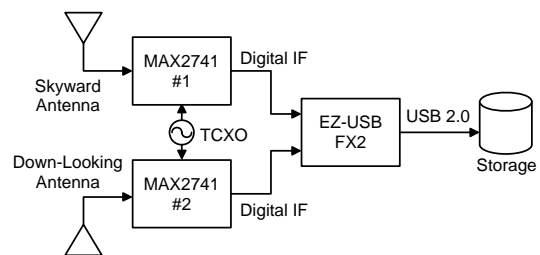


図 5: 受信機ハードウェアの構成図

##### (2) 信号処理ソフトウェア

GPS 反射波データ収集装置で取得された IF データは、PC 上で反射波観測用ソフトウェアによって後処理される。GPS 信号を処理するソフトウェアに関しては、これまでも多くの成果が報告されている。しかし、これらソフトウェアは、信号対雑音比 (SNR) の良好な一般的な GPS 信号を仮定しており、海面での反射で拡散し SNR の低下した反射波を処理することは困難である。

一方、直接波は十分な信号強度を持っており、従来通りの手法で信号の追尾、さらには測位演算まで可能である。また、衛星位置も受信

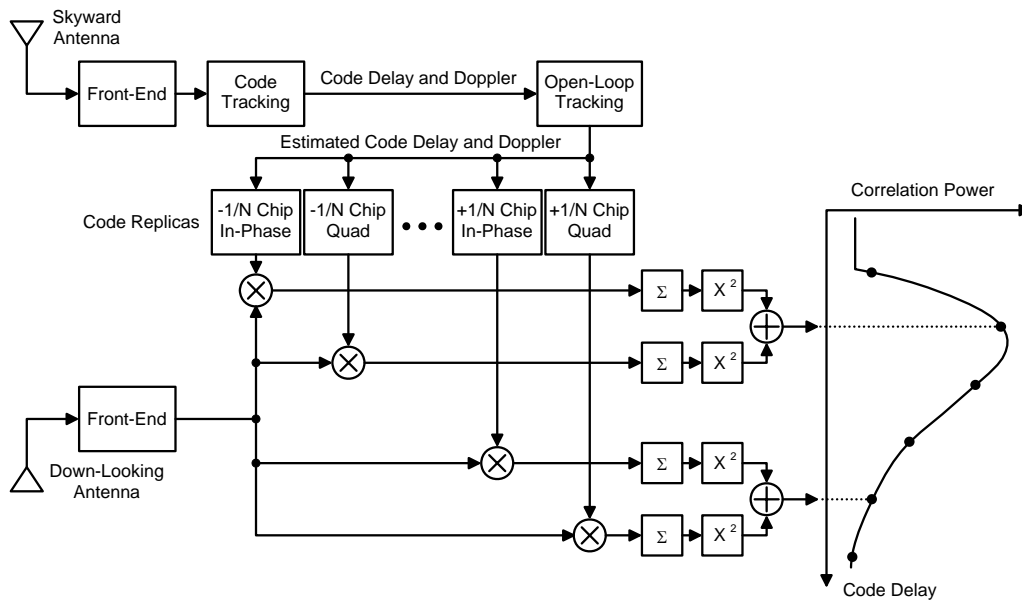


図 6: GPS 反射波信号のオープンループ追尾

した直接波に含まれる航法メッセージから算出することができる。アンテナと衛星の位置が既知であり、海面からアンテナまでの大雑把な高度が測位結果から推測されると、GPS 反射波の反射点位置およびドップラの予測が可能となる。

そこで、今回開発した反射波観測用のソフトウェアでは、直接波から得られた情報から予測した反射波のコード遅延およびドップラを用いて、反射波を追尾するオープンループシステムを構成した。このような手法は、一般に遅延マッピング受信機と呼ばれている。

遅延マッピング受信機の構成を図 6 に示す。本手法では、直接波から予測されたコード遅延を中心に、一定のチップ間隔の遅延をもつレプリカ信号を生成し、それらと反射波との相関演算を複数の相関器によって実施することで、反射波の相関波形を算出している。

### (3) 航空機による観測実験

本研究で開発した遅延マッピング受信機による海面高度計測の性能を評価するために、小型航空機による GPS 反射波データの取得とその解析を行った。

この観測実験では、GPS 反射波データ収集装置を小型航空機に搭載し、高知県室戸岬沖の約 13 km の地点に東京大学地震研究所によって設置された GPS 津波ブイの上空を飛行し、高度 300 m から観測を実施した。このブイには高精度測位用の GPS 受信機が設置されており、津波監視を目的としたリアルタイムで

の海面高度計測が行われている。今回は、この GPS 津波ブイによって観測された海面高度を真値とし、遅延マッピング受信機による海面高度推定の性能評価を行った。

海面からの GPS 反射波を捕捉するために、航空機の下面に設置された GPS アンテナを図 8 に示す。GPS 信号は右旋円偏波であるため、反射波用のアンテナには、通常の GPS アンテナとは異なる左旋円偏波のアンテナを使用している。



図 8: GPS 反射波観測用アンテナ

航空機による観測実験で取得された反射波データは、遅延マッピング受信機で後処理された。そのときの観測誤差を衛星ごとに図 9 に示す。また、表 1 にその結果をまとめる。

今回のフライトでは、PRN08, PRN11, PRN20 の 3 機の GPS 衛星からの反射波が観測されている。仰角の高い PRN11 において、平均値で約 10 cm の精度で GPS 反射波の伝搬遅延距離を観測できていることが確認された。しかし、仰角の低い PRN08 および PRN20 では、数 m

のオフセット誤差が観測されている。これは、GPS 信号が航空機の翼や着陸用の車輪などの突起物に反射して生じるマルチパスが原因と考えられる。このようなマルチパスを低減するために、これら障害物のないアンテナ直下のみを観測できる指向性の高いアンテナの開発が望まれる。

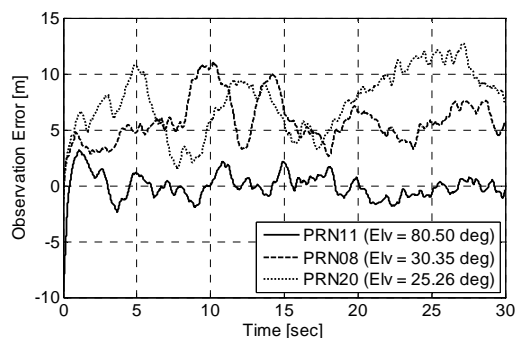


図 9: 遅延マッピング受信機の観測誤差

表 1: 観測誤差のまとめ

衛星番号	仰角[deg]	平均[m]	偏差[m]
PRN11	80.50	-0.11	0.88
PRN08	30.35	6.21	1.92
PRN20	25.26	7.74	2.85

#### (4) FPGA による受信機開発

ソフトウェアによる GPS 反射波データの解析は、柔軟性が高く、アルゴリズムの開発に有効であるが、処理能力に限界があり、リアルタイムでの信号処理は困難である。そこで、処理負荷の高い相関処理部を FPGA に実装することで、GPS 反射波信号による海面高度計測がリアルタイムで可能な専用受信機を開発した。

開発プラットフォームとしては、オーストラリアの University of New South Wales によって研究用に開発された FPGA ベースの GPS 受信機である NAMURU 受信機を採用した。この受信機は、FPGA の verilog HDL コードがオープンソースで公開されており、ユーザーが自由に独自の信号処理機能を追加することができる。

NAMURU 受信機は、二周波対応の受信機として開発されており、二つのフロントエンドを装備している。本研究では、本来は二周波対応の受信機を改修することで、一方のアンテナを直接波の観測に、もう一方のアンテナ

を反射波の観測に利用している。さらに、遅延マッピング受信機のアルゴリズムを実装することで、リアルタイムでの海面高度観測を実現している。NAMURU 受信機で実現した GPS 反射波観測受信機の外観を図 10 に示す。



図 10: GPS 反射波観測用受信機

GPS 反射波観測用受信機のリアルタイム信号処理機能を検証するために、GPS 信号シミュレータによる動作実験を実施した。今回利用した GSS7700 GPS 信号シミュレータは、二つの信号出力ポートを持っており、一方で直接波、もう一方で反射波を模擬することが可能である。実験の様子を図 11 に示す。この動作試験では、航空機による反射波観測を模擬するために、アンテナの高度を 300 m とした。また、海面での反射による信号強度の低下を模擬するために、反射波の信号強度は直接波に対して 5 dB 低く設定している。さらに、反射波の観測には指向性の高いアンテナを利用することを想定し、反射波のアンテナゲインパターンのビーム幅を 60 度に設定している。



図 11: GPS 信号シミュレータによる動作試験

本動作試験におけるリアルタイムでの海面高度推定結果を図 12 に示す。このときに観測された反射波の数は 4 つであり、これら観



測値から最小二乗法で海面高度を推定することで、雑音の影響を低減し、精度の向上を図っている。この実験結果より、マルチパスのない理想的な観測環境であれば、約 10 cm の精度で海面高度をリアルタイム観測することが可能であることが確認できた。

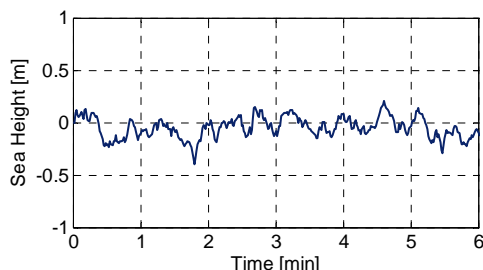


図 12: リアルタイムでの海面高度推定結果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Takuji Ebinuma, GPS Ocean Altimetry from Low Altitude Aircraft, Proceedings of Asian Navigation Conference 2009, 査読有, 2009, 23-30.
- ② 海老沼拓史, 安田明生, GPS反射波を利用した海面高度の計測, 日本航海学会論文集, Vol. 19, 査読有, 2008, 199-204.
- ③ Takuji Ebinuma, Akio Yasuda, and Shinichi Kondo, A Software-Defined GNSS Receiver for Ocean Remote Sensing, Proceedings of Asian Navigation Conference 2007, 査読有, 2007, 20-26.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 海老沼拓史, FPGAによるオープンコアGPS受信機の開発, GPS/GNSSシンポジウム 2009, 2009年12月1日, 江東区文化センター.
- ② 安田明生, FPGA-based GPS Reflectometry Receiver Development, International Symposium on GPS/GNSS 2009, 2009年11月5日, Jeju (韓国).
- ③ 海老沼拓史, FPGA-based Reconfigurable GPS Receiver Development for Space Applications, WSANE2009, 2009年11月3日, Fudan University (中国).
- ④ 海老沼拓史, Airborne GPS Reflectometry from Low Altitude Aircraft, ICROS-SICE International Joint Conference, 2009年8月18日, 福岡国際会議場.
- ⑤ 海老沼拓史, 測位衛星信号を利用した海洋リモートセンシング技術の開発, 第11回環境リモートセンシングシンポジウム,

2009年2月23日, 千葉大学けやき会館.

- ⑥ 海老沼拓史, GPS反射波を利用した海面高度計, 電子情報通信学会2008年総合大会, 2008年3月18日, 北九州市立大学.
- ⑦ 海老沼拓史, GPS海洋反射観測用受信機の開発, 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 2007年11月30日, JAXA (相模原).

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

安田 明生 (YASUDA AKIO)  
東京海洋大学・海洋科学技術研究科・特任教授  
研究者番号: 00023250

### (2)研究分担者

北條 晴正 (HOJO HARUMASA)  
東京海洋大学・産学地域連携推進機構・客員教授  
研究者番号: 20377071  
樊 春明 (FAN CHUNMING)  
東京海洋大学・海洋科学部・助教  
研究者番号: 10311664  
海老沼 拓史 (EBINUMA TAKUJI)  
東京海洋大学・海洋科学技術研究科・特任准教授  
研究者番号: 40456314