

GPS 信号を用いた海洋波情報の計測 —波長計測のシミュレーション評価—

奥田成幸¹・新井康夫²・柳 潤子³
河口信義⁴

一般的に GPS は衛星からの直接波信号だけを利用し, 受信点の正確な位置を測定するために用いられる. 本研究は, この GPS 信号を海洋の波浪情報を観測するために用いることを目的とし, ここでは GPS 衛星からの直接信号と海面反射信号を用い, これら信号間の相関器出力波形のピーク間隔から, 海洋波の波長を推定する手法を提案する. 次に, 波長推定手法を数値シミュレーションにより評価し, 波長計測に十分な精度が得られたことから, GPS 信号を海洋波の波長計測に用いることができる可能性を示した.

1. はじめに

現在, 海洋の波浪情報を観測するには海底設置の超音波波高計やドップラー流速計による方法, 電磁波を用いた海洋レーダや人工衛星から発射されたマイクロ波を計測する方法, またはブイの動揺特性から推定する方法などの様々な方法を光易 (1955), 小林ら (2001) によって述べられている. 藤井ら (例えば 2003) は海洋上に適切な間隔でアレー配置したブイの動揺を K-GPS によって計測し, それら複数ブイの垂直位置変位に MUSIC 法を適用することで, 長周期波浪の波向きを精度よく計測できることを示した. しかしながら, GPS ブイアレーによる波向き計測は計測対象である波の波長が必要であり, 現在は波の周期と水深による線形波の分散関係式から推定する必要がある. また, この手法は MUSIC 法を用いていることから狭帯域と見なされる長周期波浪の波情報取得には向いているが, 広帯域である波浪の波向き計測には適していない.

本研究は, 計測対象海域付近における精度良い海洋波浪の波浪情報を得るために, 現在常時上空にある GPS 衛星から送信された信号を用い, 衛星から直接受信される信号と海面で反射される信号を比較することによって海面の海洋波浪情報を得ることである. そこで, 本論文では比較的海面から近い距離にある GPS アンテナによって直接受信される信号と海面にて反射される信号を比較することで波情報を計測するシステムを提案し, 海洋波の波長の計測に関してシミュレーション結果からその有効性を評価および検討する.

通常 GPS により位置測定を行う場合, 直接波を用い, 間接的に受信アンテナ近傍からの反射波であるマルチバ

ス波は直接波の測位精度を劣化させる一要因と考えられている. マルチパス波は送信点, 反射点および受信点の幾何学的配置より, 直接波に比べて反射経路長だけ遅延して受信点に到達する. さらに, これら送信点, 反射点および受信点の幾何学的な配置が正確にわかれば, マルチパス波の遅延時間はその経路差から求めることができる. そこで, 海面上に設置した二つの GPS アンテナによって直接波と海面で反射されたマルチパス波の遅延時間を計測すれば, その経路差である海面からアンテナまでの距離は一意に求まり, 海面からアンテナまでの距離から海面上のアンテナ高がわかる. Okuda ら (例えば 2004) は直接信号と海面反射によるマルチパス波を信号として用いアンテナ高さを求める手法を利用した喫水計測装置を提案した.

GPS の海面反射波を用いた研究として, Komjathy ら (1999), Liou ら (2003) による海面反射波の統計的特性から風力と波高を推定する試みがあるが, 航空機に搭載している比較的高い高度にあるアンテナで広い海面からの反射波を受信しているため, 詳細な波情報を収集することは困難であると考えられる.

そこで, 本研究では海面に比較的近い位置に RHCP (Right Hand Circular Polarization) アンテナを上方に向けて GPS 衛星からの直接波を, さらに比較的に広い受信ビーム幅を用いた LHCP (Left Hand Circular Polarization) アンテナを下方に向けて海面反射波を受ける. 次に, これら直接波と海面反射波を通常の受信機で処理する. ただし, 直接波と海面反射波用の GPS 受信機間の時間同期を行う必要がある. さらに, これら両方の波の相関出力を求め, その出力から海洋波の波長, 周期, 波高などの波情報を得るシステム概要および波長計測法を述べ, 次に簡易な波浪モデルを用いたシミュレーションによってその評価を行い, 波長計測の可能性を示した.

1 商船修 (独法)海技教育機構 海技大学校教授
2 (独法)海技教育機構 海技大学校教授
3 工修 神戸大学大学院 自然科学研究科
4 正会員 工博 神戸大学教授 海事科学部

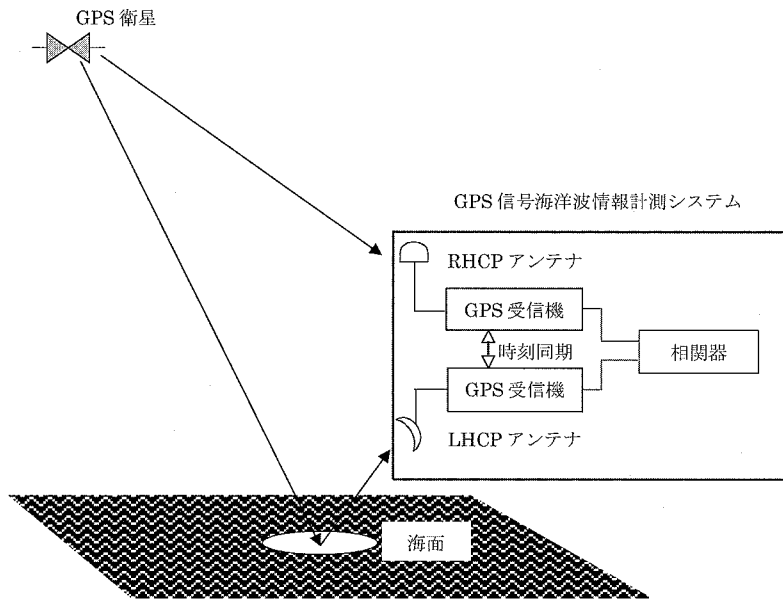


図-1 システム概要

2. 海洋波情報計測システム

(1) 装置概要

本研究で提案する簡単な計測システム概要を図-1に示す。本システムは比較的海面に近い位置に上下二個のアンテナを用い、一つはGPS衛星からの直接波を受信するため通常のRHCPアンテナを、もう一つは直接波用のRHCPアンテナのすぐ下に海面反射波を受信するためのLHCPアンテナを設置する。得られた直接波と海面反射波はそれぞれ異なる2台のGPS受信機で処理される。ただし、直接波と海面反射波間の時間差を求めることから、2台のGPS受信機は時間の同期を行う。なお、本システムの最終的な目標は全波浪情報の計測であるが、本論では全波浪情報の中から波長の計測に着目し、次に波長の計測の可能性を述べる。

(2) 波長計測

GPS受信機は複数衛星から送信された電波の伝搬時間を測定して受信地点の位置を計測する。この伝搬時間計測は、始めに衛星から送信され符号系列と受信機内で生成された同一の符号系間の相関を求め、次に相関出力のピーク時刻を電波到達時刻として求める。さらに、送信波に含まれている電波の送信時刻と到達時刻の差を伝搬時間として求める。

本システムで用いるGPS受信機も一般的に用いられるGPS受信機である。そこで、これら2台の一般的なGPS受信機からの出力は、衛星送信符号系列と受信機

内符号系間の相関をそのまま出力することとする。これら直接波のGPS相関出力と海面反射波のGPS相関出力波は相関器により時間相関処理を行う。

GPS直接波のGPS相関出力波形は波の雑音対信号強度(C.N.R.)に依存するが、その理想的な形状は計算により求められる。しかし、海面反射波の相関出力波形は海面状態に依存して変動し、その形状は複雑であると考えられる。それは、反射海域の海面の状態を反射海面の位置および角度などや、反射海面、衛星仰角やアンテナ位置などの幾何学的な位置関係によって簡易な予測は可能である。たとえば船舶に搭載されている船用レーダを用いた波浪観測実験においても波の波長が石田ら(1996)によって推定されている。そこで、海面反射波における相関出力波形は海洋波の波長、周期、波高などの波情報に依存して変化する可能性が有る。GPSの直接波と海面反射波の理想的なGPS相関器出力を図-2に示す。そこで、この直接波と海面反射波の理想的なGPS相関器出力をその後方に設置した相関器により処理することで波の波長に依存した波形が出力される可能性がある。

3. シミュレーション

これらのシステムによる有効性を検証するため基礎的な数値シミュレーションを行った。上向きのRHCPアンテナによって受信した直接波を基準とし、海面反射波はアンテナ直下からアンテナの指向方向に広い範囲から

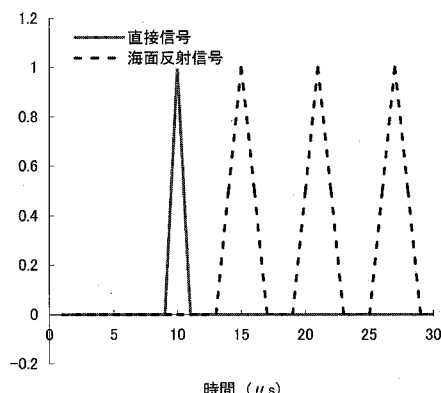


図-2 理想的な GPS 相関出力

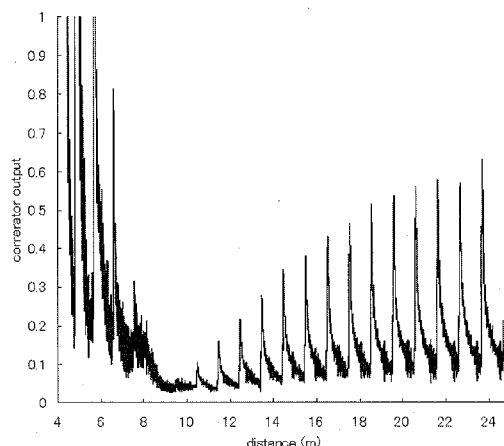


図-3(a) 相関器出力 (波長 1.0m)

表-1 シミュレーション条件

生成波浪	単一方向・正弦波
波長(m)	1.0, 2.5, 5.0, 6.0 7.0, 8.0, 9.0, 10.0
波高 (波長に対する波高比)	10 %
アンテナ高さ(m)	2.5
受信ビーム幅(°)	40
衛星仰角(°)	45, 60

反射が入力される。以下に本論文で行ったシミュレーションの条件および手法を示す。

(1) シミュレーション条件

システムの可能性を検証する目的で、生成波浪は単純な単一方向から伝搬する正弦波で波向きは反射海面から受信アンテナに向かう向きとし、波長に対する波高比は10%，アンテナ高さは2.5m、海面反射用アンテナのビームは海面の広い範囲からの情報を得るため、比較的広いビーム幅である40°とした。数値シミュレーションの条件を表-1に示す。

(2) シミュレーション手順

シミュレーションの手順を以下に箇条書きで示す。

1. 直接波のGPS相関出力を計算する。
2. 上記シミュレーション条件に従って反射海面および海面内の波を生成する。
3. 次に波を発生させた海面を1cm角のセルに分割する。セル内における反射は、セル面の角度によって散乱係数を決定し、衛星からアンテナに向かう前方散乱の反射係数を求める。
4. 海面反射波用アンテナのビーム幅に従って各セルからの受信信号レベルを決定する。
5. 幾何学的な関係から海面反射波の遅延時間を計算する。

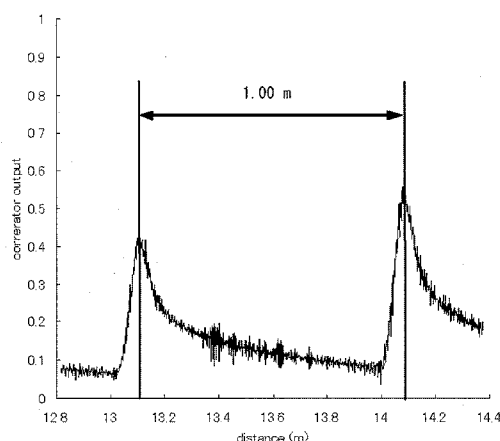


図-3(b) 相関器出力の一部 (波長 1.0m)

6. 全てのセルからの受信波を積算して、これを海面反射波のGPS相関出力とする。
 7. 直接波と海面反射波の相関を求め、相関器出力とする。
 8. 波を波長の1/10ずつアンテナ方向に進行させることで異なる10回の状態におけるシミュレーションを行う。(ここでは、雑音を考慮していないため。)
- 以上の手法により得られた結果および考察を次に述べる。

4. 結果および考察

図-3(a)に波長1.0m、波高0.1mの波浪において得られた相関器における出力波形を、また、図-3(b)に図-3(a)の横軸を拡大した結果を示す。横軸はアンテナ直下を原点としてアンテナ指向方向に向けた海面上距離である。縦軸は相関器出力を相対値で示す。図-3(a)お

よび(b)において、直接波と海面反射波との相関操作を行うことで海面からの反射波のピークからピークが生成波の波長に等しい結果が得られた。ここで、アンテナに近い距離におけるピークは、波長によって1から数波のピークおよび近辺からの他の海面反射波が相当数受信されており、複雑な波形が形成され単一のピークを取り出すことはできない。これをまとめて第1ピークとすると、実際に使用できるピークは第2ピーク以降であり、各隣同士のピークの距離差が波長に相当する。

さらに、図-4に波長2.5 m、波高0.25 m、図-5に波長10.0 m、波高1.0 mにおける相関器出力波形の一部を示す。これらの結果からも同様に波長に等しい距離に相関器出力のピークが現れている。

各波長において波高比10%の波について10回ずつのシミュレーションを統計処理した結果を表-2に示す。

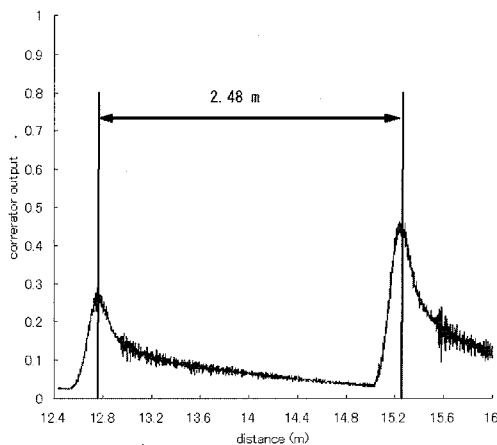


図-4 相関器出力の一部（波長 2.5m）

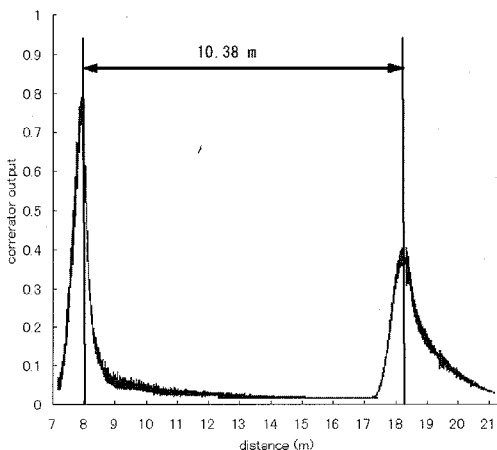


図-5 相関器出力の一部（波長 10.0m）

波長が9、10 mでは第2ピークが反射点近辺の海域からによるマルチパスの影響によってピークの識別が難しくなり、精度が劣化した結果も2例ほどあったが、波長の平均値および標準偏差からは波長計測に十分な精度と云える。

表-2 波長の測定精度（シミュレーション結果）

波長(m)	平均値(m)	標準偏差(m)
1.0	1.00	0.01
2.5	2.50	0.02
5.0	4.98	0.05
6.0	5.99	0.05
7.0	6.95	0.09
8.0	7.90	0.11
9.0	9.01	0.23
10.0	9.98	0.34

最後に、反射点海域近傍における他の海面反射波の混入の影響により出力波形が大きくひずんで相関波形のピーク値を検出しにくくなる場合の対処法を考える。これは、反射点近傍海域とアンテナ間の幾何学的な関係を変えることで対処可能となることが考えられ、一つの対処法として受信アンテナの俯角を変える方法がある。海面反射アンテナのアンテナ俯角の違いによる相関器出力波形の差を調べるために図-6および図-7に同一衛星仰角60°波長10 mの場合、異なるアンテナ俯角60°と45°における相関器出力波形を示す。図-6において相関器出力の第2ピークに反射点海域近傍からの他の海面反射波の混入の影響により出力波形が大きくひずんでピークの識別が困難となっているが、図-7のようにアンテナ俯角を45°に変えることで反射点近傍海域からの他の海面反射波との幾何学的な関係が崩れて、計測可能なピークが現れている。これにより、他の海面反射波が多く

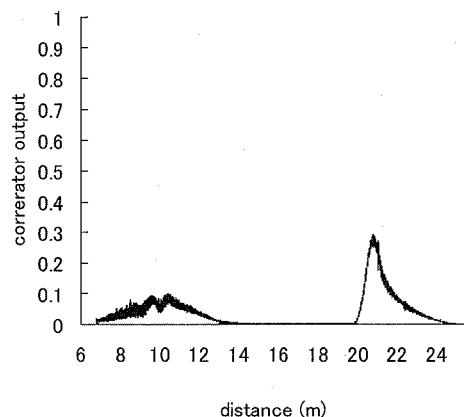


図-6 相関器出力の一部
（波長 10.0m、衛星仰角 60°、アンテナ俯角 60°）

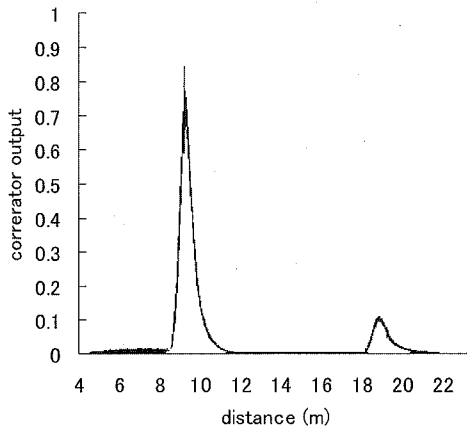


図-7 相関器出力の一部
(波長 10.0m, 衛星仰角 60°, アンテナ俯角 45°)

発生する幾何学的関係を解消することでピーク計測が可能となる。

5. ま と め

本論文は GPS 海面反射波を利用して海洋波の波長を計測するためのシステムを提案し、さらに基礎的なシミュレーションによる評価を行うことで、GPS 信号を海洋波の波長計測に用いることができる可能性を示した。ただ、実際の海洋波は正弦波とは異なり複雑で波向きも一定でなく時間的に不規則な変化をする。また、GPS

受信信号には様々な雑音あるいは複数衛星からの信号などを含んでいる。これらの問題に対処し解決しなければならない課題も多くあるが、本手法は波長計測のための有効な手法の一つであることから、一つ一つ解決することで役立つシステムにしたい。

参 考 文 献

- 石田廣史・井上篤次郎・塩谷茂明・市川義文・細田竜介(1996): 船用レーダによる波浪観測と解析Ⅱ—実船実験—, 日本航海学会論文集, 第 96 号, pp. 47-52.
- 小林智尚・河合篤司・小塚将之・安田孝志(2001): X バンドレーダによる沿岸域の観測, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1431-1435.
- 藤井英信・河口信義・石田廣史・出口一郎(2003): GPS プリアレー波浪観測システムを用いた大阪湾内うねり伝搬方向の計測, 土木学会海岸工学論文集, 第 50 号, pp. 1416-1420.
- 光易亘(1955): 海洋波の物理, 岩波書店, pp. 129-144.
- Komjathy, A., J. L. Garrison and V. Zavorotny (1999): GPS: A new tool for ocean science, GPS world.
- Liou, L. L., J. B. Tsui, D. M. Lin and J. Schamus (2003): Passive altimeter study using GPS flight data, Proceedings of ION GPS/GNSS-2003, Portland, OR.
- Okuda, S. and Y. Arai (2004): Study on GPS Application to Draught Measuring System on Board, Proceedings of National Technical Meeting 2004, The Institute of Navigation, pp. 740-745.
- Stephen J. Katzberg, James L. Garrison and Charles T. Howell (1999): Simple Over-Water Altimeter Using GPS Reflections, Proceedings of ION GPS-99.