

GPSブイによる簡易波情報計測法と実験結果

SIMPLE MEASUREMENT METHOD FOR WAVE INFORMATION USING GPS BUOY AND IT'S EXPERIMENTAL RESULTS

侯 代金¹・柳 潤子¹・河口 信義²
Daijin HOU, Yun-ja YOO and Nobuyoshi KOUUGUCHI

¹非会員 修士 神戸大学大学院生 自然科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

²会員 博士 (工) 神戸大学 海事科学部教授 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

The velocity integration method was applied to measure a wave information using buoys, which can measure a precise velocity for movable body without a reference station on land. In this experiment buoys equipped with GPS were moored in the observational sea area. As 3D movements of the buoys depend on the movement of seawater particle, the velocity integration method to get the precise velocity information of the buoys was used and the measured velocity was applied to estimate the position of the buoys. As experimental result, the wave directions (wave period is 14 seconds) according to the horizontal displacement of the buoys with the 3D buoy movement analysis are measured precisely and reliably.

Key Words : Wave direction and height, GPS buoy, Velocity measurement

1. はじめに

著者らは既にアレー配置した複数ブイの位置変動量をキネマティックGPS (以下K-GPSと呼ぶ。)により計測し, さらにそれらブイの垂直位置変動量結果にMUSIC法を適応し精密な波向き推定手法を提案し, 数値計算ならびに実験的な検証を行なった結果, その手法が有効であることを示した^{1), 2)}. しかし, 提案手法は津波あるいは長周期波浪のような非常に長い周期の波浪を観測することに適しているが, 一般的な十秒程度の波浪を計測するには, K-GPSを用いているため陸上にあるリファレンス局からの距離に制限, MUSIC法を用いることから計測したい波の数以上の多くのブイを設置, また計測対象波の波長が必要などの実用する上で多くの制約がある. そこで本論文は, 十秒程度の比較的短い周期の波浪計測に適した単一ブイの移動速度をGPSにて計測し, 速度からブイの水平移動量, 波周期, 波高および波向きなどの波情報を簡易に求める手法 (以下VI-GPSと呼ぶ.) を提案する. さらに, 実験によりその手法の計測精度に関する評価結果を示し, 提案法の利用可能性を検討する.

2. 実験概要および解析方法

(1) 実験概要

実験は2005年9月3日, 午後1時より約30分間, 折しもその後九州地区に甚大なる被害をもたらす台風14号が接近中の, 鹿児島志布志港外にGPSブイ2個と実験海域付近の陸上にリファレンス局を設置した. 図1に実験当日の天気図を, 図2に実験実施海域を, 図3に実験に用いたGPSブイセットをそれぞれ示す.

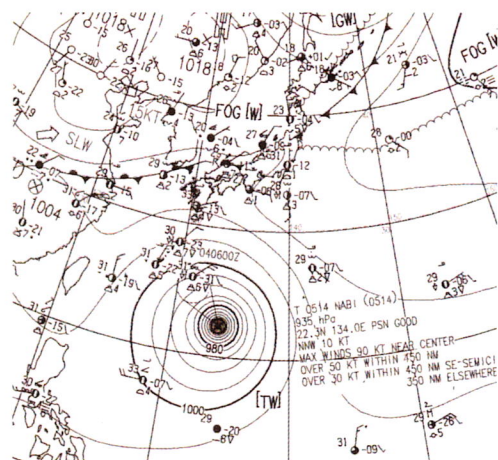


図1 実験当日の天気図



図2 実験実施海域

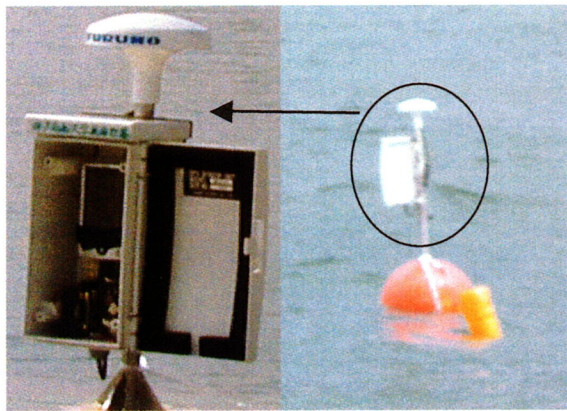


図3 GPSブイ

実験は洋上のGPSブイの3次元方向の位置変動量を速度積分法⁽³⁾およびK-GPSにより記録し、約40分間程度の実験結果から5分間について解析を行なった。

(2) 簡易波情報計測方法

本研究は波向きを簡易に得るため、求めたい波周期間隔におけるブイの水平位置変動量を計測する。波周期に比べて長い時間間隔ではブイの水平位置変動量が海面上にある水粒子の水平運動方向と強い相関のある動きをしていると考えられることから、ブイの水平位置変動量から波向きを推定する。

ここでは初めにブイの垂直変動量から必要とする計測対象波の周期を決める。次に、その計測対象波一周分におけるブイの計測水平位置データから最小二乗法を用いることで対象波の回帰直線を求め、

最後に回帰直線方位から波向きを得る。そこで、本手法は著者らが提案しているアレー配置された複数ブイに垂直位置変動量とMUSIC法による精密波向き計測と比べて簡易で単独ブイの三次元位置変動量から波向きが求まることとなる。

(3) GPSによる速度計測

本研究の目的は、陸上からの距離制限が無く、精度良く洋上のブイ位置変動計測が可能な速度積分法によりブイ水平位置変動量を計測し、その結果から簡易に波向き推定法を提案し、それを評価することにある。そこで、ここではGPSによる速度計測法を以下に説明する。

速度積分法とはGPS衛星から送信された信号搬送波のエポック間(0.2秒)における平均位相変化量を計測し、軌道情報から求められる衛星の移動による平均位相変化量を差し引くことで、GPSアンテナを設置した移動体の速度を求め、求めた移動速度を時間積分することで高精度な位置変動量を得る方法である⁽³⁾。そこで、この方法を用いると従来のK-GPSによる高精度測位の条件である陸上リファレンス局からの距離制限が生じない。GPSによる速度計測は搬送波位相計測差をエポック間で平滑処理することから得られる。

GPSにおいて一般的な搬送波位相値を得るための観測方程式は次式で与えられる。

$$\Phi = \rho + c\delta^s - c\delta_R + N_R^s \lambda + d_i - d_j + d_m + \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 Φ は搬送波位相観測値、 ρ は衛星と受信機間の距離(m)、 c は真空中の光の速度(m/s)、 δ^s は衛星時計誤差(s)、 δ_R は受信機時計誤差(s)、 N_R^s は搬送波位相の整数値バイアス、 λ は搬送波の波長(m)、 d_i は対流圏伝搬遅延誤差(m)、 d_j は電離層伝搬遅延誤差(m)、 d_m はマルチパス誤差(m)、 ε は残差である。

さらに、搬送波位相観測値の時間差分はエポック t の搬送波位相観測値から一時点前のエポック $t - \Delta t$ の観測値との差をとることによって(2)式が得られる。

$$\Delta\Phi = \Phi_t - \Phi_{t-\Delta t} \quad (2)$$

そこで、観測の間隔が短い場合、電離層および対流圏における伝搬誤差は無視できる程度に小さな値となり、この搬送波位相観測値の時間差分を行うことで整数バイアスが除かれ、搬送波位相の時間差分方程式は次式となる。

$$\Delta\Phi = \Delta\rho + c \cdot (\Delta\delta^s - \Delta\delta_R) + \varepsilon_{\Delta\Phi} \quad (3)$$

ここで、 Δ は時刻差分演算子、 $\Delta\Phi$ はエポック間の搬送波位相差、 $\Delta\rho$ は時間差 Δt における衛星と受信機間の平均速度情報を含む距離差、 $\Delta\delta^s$ は衛星時計のエポック間の誤差、 $\Delta\delta_R$ は受信機時計のエポック間誤差、 $\varepsilon_{\Delta\Phi}$ は観測雑音と残差である。

次に

$$l = (\Delta\Phi_1, \dots, \Delta\Phi_N)^T$$

$$X = \Delta\rho_1 + c \cdot (\Delta\delta^s - \Delta\delta_R) + \varepsilon_{\Delta\Phi}$$

と置くことによって搬送波位相に対する観測方程式は次式となる。

$$l = f(X) + V \quad (4)$$

ここで、 l は観測ベクトル、 $f(*)$ は変数 X を l に変換するための関数、 V は残差ベクトルである。また、添字 N は衛星番号を、 T は転置ベクトルを意味する。

最後に、(4)式に最小二乗法を適用するため、変数 X について観測方程式を線形化する。 X の初期値を X^0 として、 X^0 近傍で次式を用いて線形近似すると次のようになる。

$$l - f(X^0) = \frac{\partial f}{\partial X} dX + V \quad (5)$$

$$\text{又は} \quad W = AX + V \quad (6)$$

ここで、 W は初期残差ベクトル $l - f(X^0)$ 、 A は近傍の編微分係数行列、 X は X_0 の修正ベクトルを示す。

(4) GPS速度計測値の補正法

GPSで得られた速度計測値はその後位置変位量を求めるために積分操作を伴う。従って、計測された速度自体に誤差を含んでいれば、位置変位量に積分誤差として影響を及ぼす。計測された速度に含まれる誤差は計測後可能であれば補正を要する場合も多く考えられる。そこで、ここでは計測された速度を事後にオフラインにて補正する方法⁴⁾を以下に述べる。

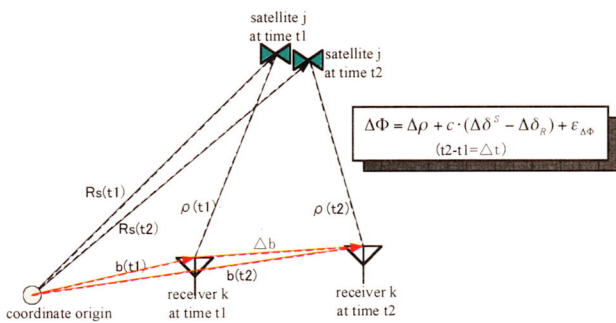


図4 時間差分搬送波位相観測

図4に異なる一連する時刻 t_1 と t_2 における移動体上の受信アンテナ k と衛星の送信アンテナ j の幾何学的な位置関係を示す。時間差 Δt ($\Delta t = t_2 - t_1$)間における平均速度 $\bar{V}$ で移動する受信アンテナの位置変化量 Δb は次式で与えられる。

$$\Delta b = (t_2 - t_1) \cdot \bar{V} \quad (7)$$

また、ある座標 $a: (a_x, a_y, a_z)$ から別のある座標 $b: (b_x, b_y, b_z)$ までの距離演算を

$$\{a, b\} = \sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2 + (a_z - b_z)^2}$$

で表し、 $Rs(t_i)$ 、 $b(t_i)$ 、 $\rho(t_i)$ ($i=1, 2$)を時刻 t_1 と t_2 間における衛星の位置ベクトル、受信アンテナの位置ベクトル、衛星—受信アンテナ間の距離、 $e(t_i) = \{Rs(t_i) - b(t_i)\} / \{ |Rs(t_i) - b(t_i)| \}$, $i=1, 2$ を移動体から衛星への単位方向ベクトルとすると、それぞれの時刻における衛星—受信アンテナ間の距離 $\rho(t_i)$ は次式となる。

$$\rho(t_i) = \{e(t_i), Rs(t_i) - b(t_i)\}, i=1, 2 \quad (8)$$

次に、一連する時刻 t_1 と t_2 における衛星—受信アンテナ間の距離変位量 $\Delta\rho$ は次式で与えられる。

$$\Delta\rho = [\{e(t_2), Rs(t_2)\} - \{e(t_1), Rs(t_1)\}] - [\{e(t_2), b(t_1)\} - \{e(t_1), b(t_1)\}] - \{e(t_2), \Delta b\} \quad (9)$$

ここで、上式における右辺第一項は衛星の位置ベクトルに依存する衛星—受信アンテナ間距離変化量、第二項は受信アンテナ位置ベクトルに伴う衛星—受信アンテナ間距離変化量、第三項は受信アンテナの相対的な位置変化量の伴う衛星—受信アンテナ間距離変化量をそれぞれ表している。これらの項の中で右辺第一項にある衛星位置ベクトルは衛星精密軌道歴あるいは衛星時計誤差補正值などを入手することで事後補正可能であることから、今後はこれら補正を実験後のオフライン処理として実行することで積分誤差が小さくなることが考えられる。

3. 結果および考察

本研究では、洋上ブイにGPS受信機を設置し、K-GPSと速度積分法によるブイの3次元位置変動を求めた。図5にK-GPSを用いて本実験から得られた一つのブイの水平方向変位を、また図6に垂直方向変位を示す。実験時のブイは緯度および経度方向に約7 m程度移動し、垂直方向に約4 mの上下動を繰り返していたことがわかる。さらに、本実験および解析の概要を表1に示す。K-GPSによるブイの垂直位置変動から卓越した波浪の周期を14秒と推定した。

次に、K-GPSと速度積分法から得られたブイ変位量を比較するために、図7に速度積分法により得られたブイの垂直方向変位、図8にK-GPSと速度積分法により得られたブイの垂直方向変動誤差〔(速度積分法) - (K-GPS)〕を示した。これらの結果より、実験中のブイ垂直変位量はK-GPSと速度積分法とも

に類似した値を示し、ゆっくりと変動する誤差が生じていることがわかる。

表 1 実験・解析概要

時間 [s]	300
Sampling周波数 [Hz]	5
データ数	1470
水深 [m]	13
波周期 [s]	14.0
有義波高 [m]	3.9
波向き (目視)	SE

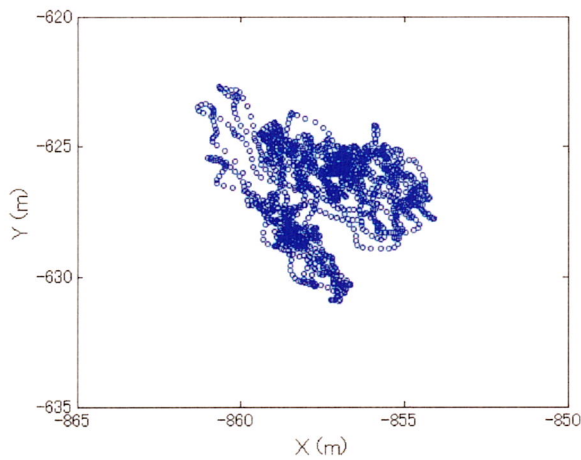


図 5 ブイの水平方向変位 (K-GPS)

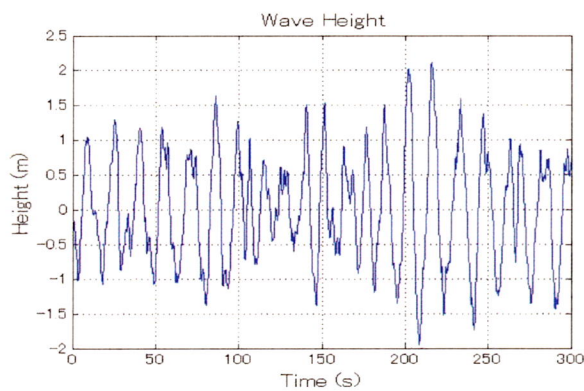


図 6 ブイの垂直方向変位 (K-GPS)

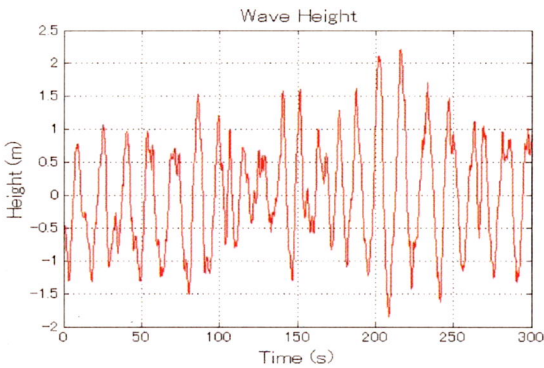


図 7 ブイの垂直方向変位 (速度積分法)

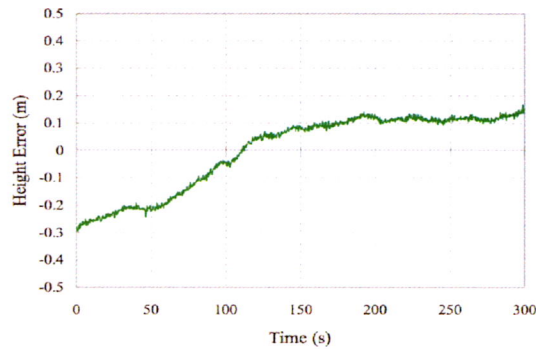


図 8 ブイの垂直方向変位誤差 (速度積分法) - (K-GPS)

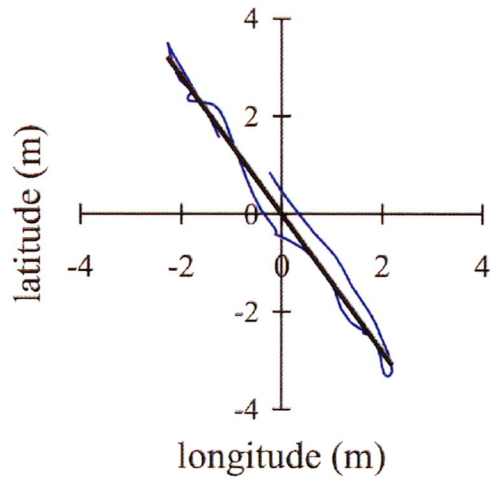


図 9 ブイの水平変動量 (K-GPS)

次に、K-GPSと速度積分法によるブイの水平位置変動量の一波分から回帰直線を求めた結果を図 9 および図 10 に示す。また、この時のブイの垂直位置変動量を図 11 に示し、これが水粒子の動きに近い楕円運動をしていることがわかる。

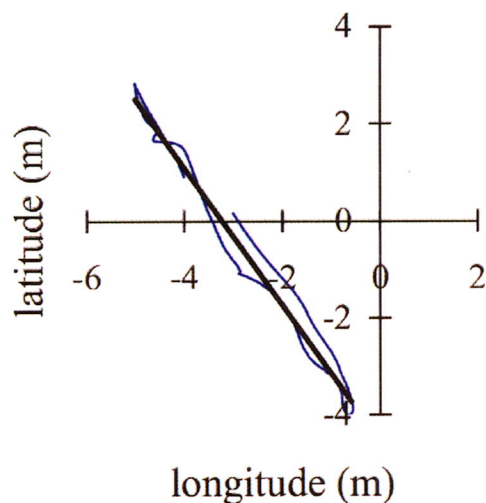


図 1 0 ブイの水平変動量 (速度積分法)

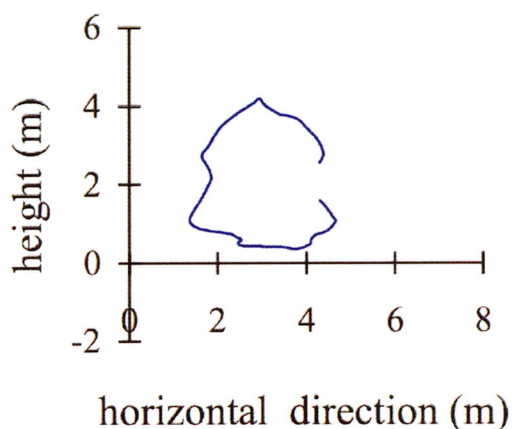


図 1 1 ブイ垂直変動量

最後に、図 9 および図 1 0 の回帰直線の傾きから、波周期14秒、21波毎の波向き の平均値および標準偏差を表 2 に示す。

表 2 解析結果

ブイ位置計測法	K-GPS	速度積分法
波数 [個]	21	21
波向き 平均 [度]	137	137
標準偏差 [度]	15	15

以上の結果から、周期14秒程度の比較的短い周期の波浪の波情報は、簡易法を用いたK-GPSと速度積分法による波向き計測で両手法ともほぼ差がなく、単一ブイによる速度積分法による簡易法により標準偏差15度程度の精度で利用可能であることがわかった。

4. まとめ

本論文はGPS衛星からの電波を計測して速度を求める速度積分法により洋上のブイ位置変位量を計測し、加えて簡易波向き推定法を用いて波向きの推定を試み、速度積分法固有の積分誤差³⁾に対処する補正法を示した。また実験結果から、周期14秒程度の波を対象として速度積分法を用いた場合、K-GPSと同程度のブイ位置変位の計測が可能であることを示した。最後に、提案する簡易波向き推定手法を用いて、K-GPSおよび速度積分法による波向き推定を行った結果、標準偏差で15度程度の精度で波向き推定が可能であった。

本手法は洋上において、陸上からの距離制限が無く、移動体の位置変位量を精密に計測することができる非常に有効な手法であると考えられることから、今後はGPS速度計測値の補正法の効果および他の計測手段（例えば慣性航法装置）などと組み合わせることなど、洋上の移動体位置計測手法を検討することで、海洋関連の計測精度向上に寄与してゆきたい。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省研究費補助金（課題番号15360466）の補助を受けて行ったことを付記する。

参考文献

- 1) 藤井英信，河口信義，石田廣史，出口一郎，“アレー配置ブイによるGPS波浪観測システムの提案と波の到来方位推定精度”，土木学会海洋開発論文集，第19巻，pp857-862，2003。
- 2) 柳潤子，河口信義，石田廣史，出口一郎，“GPS ブイアレーによる波浪情報観測システム”，土木学会海洋開発論文集，第20巻，pp.635-639，2004。
- 3) 柳潤子，候代金，河口信義，石田廣史，出口一郎，井潤建二，“GPS 速度積分法による垂直ブイ位置変位特性と波向推定”，土木学会海洋開発論文集，第21巻，pp.295-300，2005。
- 4) Frank Van Grass and Andrey Soloviev, "Precise Velocity Estimation Using a Stand-Alone GPS Receiver", Journal of the Institute of Navigation, Vol.51, No.4, pp.283-292, 2004.