

GPS速度積分法による 垂直ブイ位置変位特性と波向推定

BUOY MOVEMENTS AND WAVE DIRECTION BY VELOCITY INTEGRATION METHOD

柳潤子¹・侯代金¹・河口信義²・石田廣史³・出口一郎⁴・井潤健二⁵

Yunja YOO, Daijin HOU, Nobuyoshi KOUUCHI, Hiroshi ISHIDA,
Ichiro DEGUCHI and Kenji ITANI

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

²正会員 博(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)

³非会員 理博 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)

⁴正会員 工博 大阪大学大学院工学研究科教授 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

⁵非会員 修(工) 古野電気株式会社システム機器事業部 (〒662-8580 西宮市芦原町9-52)

The Kinematic GPS has cm level precision to estimate three-dimensional position of the moving target, but its observable distance is restricted to 20 km from the reference station on land. In the case to estimate the long period gravity wave by using several buoys, there are some troubles to observe the buoy's position owing to its distance restriction. Therefore, we used the velocity integration method which has no distance restriction from the reference station on land to observe the buoy movements (that is latitude, longitude and height of each buoy) as a integration of the velocity component of three dimensional direction by measuring the phase deviation.

In this paper, we compared the buoy movement result of the kinematic GPS and the velocity integration method, and verified the effectiveness of the velocity integration method from the results of position error of each buoy used that. And also using the velocity integration method data, we applied the MUSIC method to estimate the propagating wave direction, especially the long period gravity wave giving many troubles for entering and departing ships in the harbor, and showed the MUSIC spectrum results of three waves.

Key Words : kinematic GPS, velocity integration method, MUSIC method, wave direction

1. はじめに

キネマティックGPSを用いて精密な位置計測を行う場合、衛星—計測点間の電離層および対流圏伝搬路が異なるため、基準となる陸上リファレンス局から計測可能な移動局までの距離が制限される。例えば、海上に設置されたブイの位置変位をキネマティックGPSにより計測する場合、海岸付近に設置されたリファレンス局から約20km以内の海域が精密な計測が可能な海域となる。その際、長周期波の波向などをアレー配置した複数のブイを用いて計測する場合に、ブイ間の距離を波長に伴って長くする必要があり¹⁾、陸上のリファレンス局から遠く離れた海域における精密なブイ位置計測が困難になる。そこで、リファレンス局からの距離が制限されない一つの手法として、衛星から送信された信号周波数の位相変化量を計測し、3次元方向の速度成分を求め、

さらにそれら速度成分を積分することでブイの位置変動を得る速度積分法がある^{2),3)}。

本論文では、はじめに速度積分法により移動体の位置変位量を求める方法を述べ、次に2003年9月和歌山御坊沖で行ったブイによる実験結果から、速度積分法による位置変位とキネマティックGPSによる位置変位を比較し、その特性を解析する。速度積分法とキネマティックGPSの両手法によるブイ垂直変位量のスペクトル解析から、両手法によるスペクトルは約0.07Hz付近に境界があり、これより低い周波数域では両手法により得られたスペクトル成分が異なり、ブイ位置変位量に積分誤差が影響していることがわかった。そこで、これら両手法によるブイの垂直方向変位スペクトルの一致領域、不一致領域および境界領域の3領域内にある波をそれぞれ1つずつ選び、それら3波の波向推定をMUSIC法^{1),4)}により行った。その結果、一致領域および境界領域では、

両手法から得られた波向はほぼ一致し、不一致領域では積分誤差の影響により両手法による波向が一致しなかったことを以下に述べる。

2. 速度積分法

(1) 速度算出法

エポック (GPSデータを取得する時間) k における搬送波位相の変化速度は、連続エポック間の搬送波位相値を用いて近似的に次式で得られる。

$$\Phi_k^j \approx \frac{\Phi_{k+\Delta t}^j - \Phi_{k-\Delta t}^j}{2 \cdot \Delta t} \quad (1)$$

ここで、 Φ は搬送波位相観測値、添字 j は衛星番号を表す。添字 k と Δt はそれぞれ観測エポック番号と観測時間間隔である。

また、一般的なGPS搬送波位相を求めるための観測方程式は次式で与えられる。

$$\Phi = \rho + c \cdot (dt - dT) + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_\Phi \quad (2)$$

ここで、 ρ は衛星と受信機間の距離、 c は真空中で光の速度(m/s)、 dt は衛星時計誤差(s)、 dT は受信機時計誤差(s)、 λ は搬送波の波長(m)、 N は搬送波位相の整数値バイアス、 d_{ion} は電離層伝搬遅延誤差(m)、 d_{trop} は対流圏伝搬遅延誤差(m)、 $\varepsilon(*)$ は観測雑音と残差である。この搬送波位相観測値の時間差分は、エポック k の搬送波位相観測値から一時点前のエポック $k-1$ のその観測値との差となる。ただし、観測の間隔が短い場合は、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みなせる。そこで、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観測方程式は次式となる。

$$\delta\Phi = \delta\rho + c \cdot (\delta dt - \delta dT) + \varepsilon_{\delta\Phi} \quad (3)$$

ここで、 $\delta\Phi$ はエポック間の搬送波位相差、 δdt は衛星時計のエポック間誤差(s)、 δ は時刻差分演算子を示す。そこで

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

$$X = (\delta\rho_1 + c \cdot (\delta dt_1 - \delta dT), \dots,$$

$$\delta\rho_N + c \cdot (\delta dt_N - \delta dT))^T$$

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。

次に、(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 は近傍の偏微分係数行列、 X は X_0 の修正ベクトルを示す。

(2) 具体的なアルゴリズム

速度積分法はGPS受信信号における搬送波周波数の瞬時ドップラーシフト量を計測し、移動体の速度を求めている。瞬時ドップラーシフト量は移動体の瞬時速度を表しているが、この瞬時速度は観測雑音を含んでいるために実際の計測では誤差が大きくなる。そこで、この誤差を小さくするために本研究では、エポック間の搬送波位相の時間差から平均速度を求める。次に、求めた平均速度を時間積分し移動体の位置移動量を得る。この移動量を求めるための具体的なアルゴリズムを以下に列挙する。

- 単独疑似距離測定値、搬送波位相測定値、衛星データ、現在時間を得る。
- 衛星の位置を計算により求める。
- 観測方程式(4)の偏微分係数を計算する。
(これは受信機位置における受信機と衛星間の距離変化率)
- 2つのエポック間の搬送波位相変化量を得る。
- 既知である衛星の位置と衛星時計誤差から、搬送波位相変化量を補正する。
- 補正された搬送波位相変化量を用いて移動体の平均速度を計算する。ここで、未知数は受信機の変位および受信機時計のドリフトである。
- 求めた平均速度を積分により、移動体の三次元位置を得る。

ただし、アルゴリズム(e)における衛星時計補正值は次式で与えられる。

$$t = t_{SV} - \Delta t_{SV}$$

ここで、 t はGPS時間、 t_{SV} は衛星時間コード送信時間、 Δt_{SV} は t_{SV} のオフセットである。さらに、

Δt_{SV} は次式によって与えられる.

$$\Delta t_{SV} = a_{f0} + a_{f1} \cdot (t - t_{oc}) + a_{f2} \cdot (t - t_{oc})^2 + \Delta t_r + t_{gd}$$

ここで, a_{f0} , a_{f1} , a_{f2} は一つのサブフレームで与えられる多項式係数, t_{oc} は衛星時計参照時間, Δt_r は相対補正時間, t_{gd} はサブフレームのデータ遅延時間である. 航法パラメータが更新される時の受信機時計のドリフトとオフセットを整合するため, 受信機時計のオフセットは δdt 内に含まれている.

衛星の推測位置に誤差がある場合, 求めた速度に誤差を生じる. この場合概算で, 位置誤差100mは相対速度の最大誤差で約1cm/sとなる. そこで, 正確な衛星推定位置が得られれば, 精度良い速度が求まる. また, GPSによる移動体の単独測定位置精度はエポック間の搬送波位相の時間差測定に対して十分な精度であると考えられるが, より高精度な測位結果を必要とする場合は, 搬送波スムージング法を用いることも考えられる.

3. 実験概要

(1) 実験および解析方法

2003年9月7日, 和歌山御坊沖海域にGPSシステムを装備した5個のブイをダブルトライアンギュラー配置¹⁾に, また陸上リファレンス局を付近の防波堤近くに設置した. これら5つのブイのGPSシステムと陸上リファレンス局によってキネマティックGPS測位によるブイ位置変位量を計測し, さらに各衛星の搬送波ドップラーシフト量から速度積分法によりブイ位置変位量を計測した. 図-1に設置した5つのブイおよび陸上リファレンス局の概略配置を示す.

解析は実験で得られたサンプリング周波数5Hzで約1時間の5つのブイのGPSデータを用い, 速度積分法とキネマティックGPSによるブイの垂直方向変位量を比較検討した. 特に, 両手法による各ブイの垂直方向変位量について両手法別のパワースペクトル・位相およびその差を求め, これらの結果から周波数領域を3つに分け, 各領域内にある3波の波向推定を行った.

(2) 解析結果および考察

表-1, 2にキネマティックGPSと速度積分法により得られた, 水平および垂直方向変位量の標準偏差を示す. 1時間の間にブイが海面上をゆっくりと数メートル程度移動していることから, ブイの水平方向変位の標準偏差に両手法間に大きな違いは見られない. しかし, 垂直変位の標準偏差はキネマティックGPSによる変位に比べて速度積分法における標準

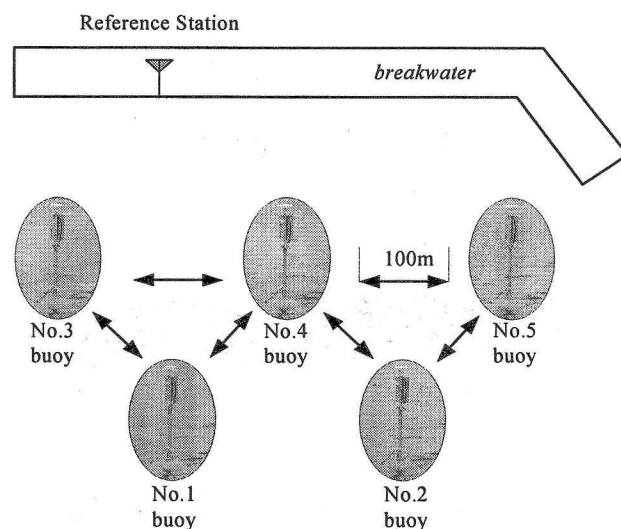


図-1 実験概要

表-1 キネマティックGPSによるブイ位置変位

Buoy No.	1	2	3	4	5
σ_x (m)	0.45	0.76	0.63	1.21	1.02
σ_y (m)	0.36	0.45	0.69	0.71	0.81
σ_z (m)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09

表-2 速度積分法によるブイ位置変位

Buoy No.	1	2	3	4	5
σ_x (m)	0.70	0.42	0.50	0.64	0.58
σ_y (m)	0.88	0.86	1.18	0.81	0.54
σ_z (m)	1.18	1.63	1.32	1.61	1.09

偏差は約14倍にもなっている. それは, ブイの垂直方向の変位量が最大波高で約0.2m程度しかなく, ブイ垂直変位量が水平変位量に比べて速く少量であることから, 速度積分法によるブイ変位量に積分誤差の影響が大きく, その結果大きな標準偏差を示していると考えられる.

ブイの垂直方向変位が波高計測に用いられるため, 以下では特に垂直方向変位について調べる. 図-2, 図-3にそれぞれキネマティックGPSと速度積分法によるブイの垂直方向変位を示す. キネマティックGPSによる計測結果は-1.8mを平均として上下に0.2m程度の幅で変動する波高の様子を示している. 一方, 図-3の速度積分法による結果には, ゆっくりとした比較的長い周期成分である積分誤差に波高変動を表す短い周期成分が加わっていることが見られる. さらに, 図-4に速度積分法により求めたブイの垂直変位からキネマティックGPSにより求めたブイの垂直変位の差を示す. 図-4では, キネマティックGPSにより計測された波高変動が差し引かれ, 比較的長い周期成分だけが残る, これが速度積分法によ

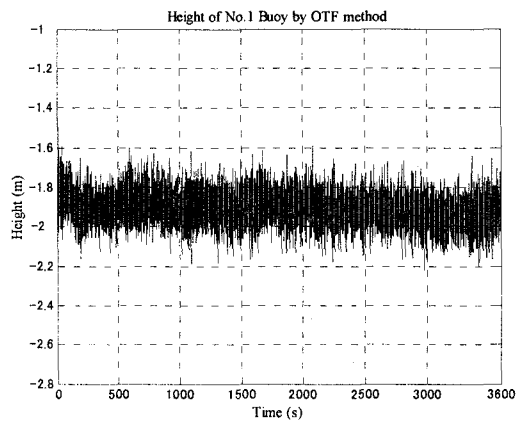


図-2 キネマティックGPSによる垂直方向変位

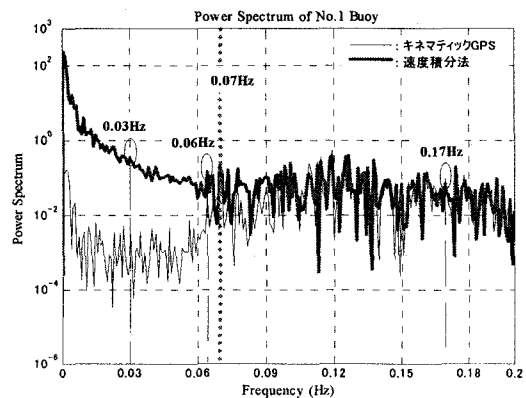


図-5(a) No. 1ブイ垂直変位のパワースペクトル

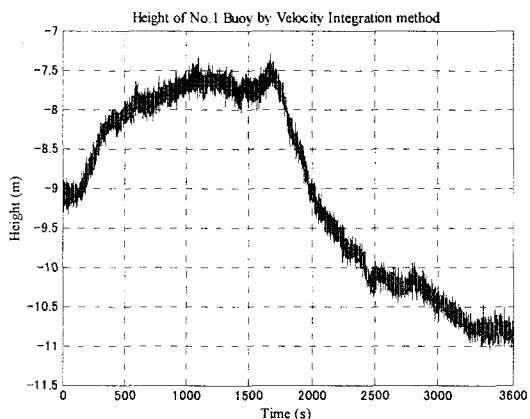


図-3 速度積分法による垂直方向変位

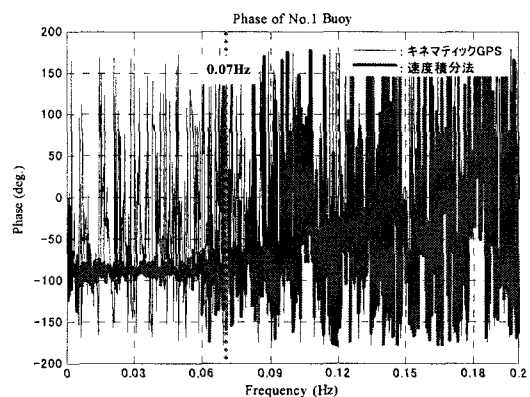


図-5(b) No. 1ブイ垂直変位の位相

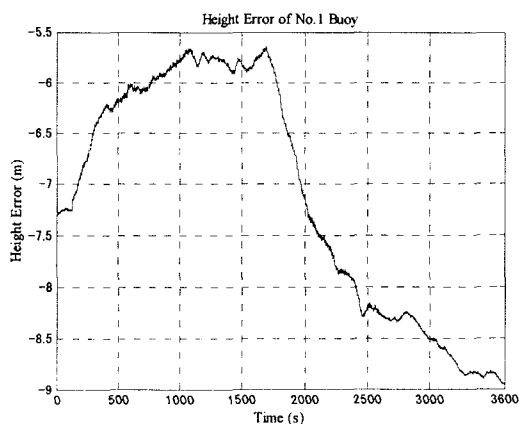


図-4 速度積分法による垂直方向変位誤差

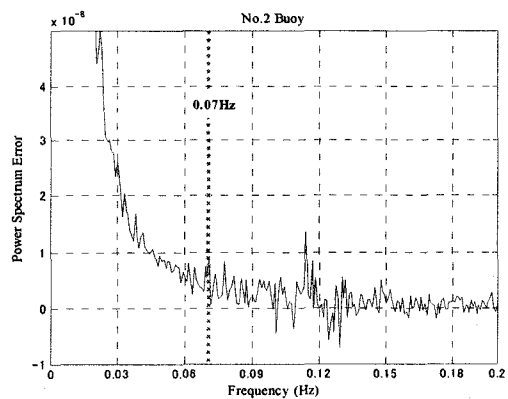


図-6 No. 2ブイ垂直変位スペクトル誤差

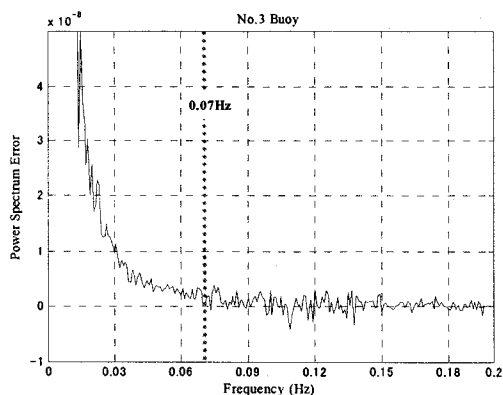


図-7 No. 3ブイ垂直変位スペクトル誤差

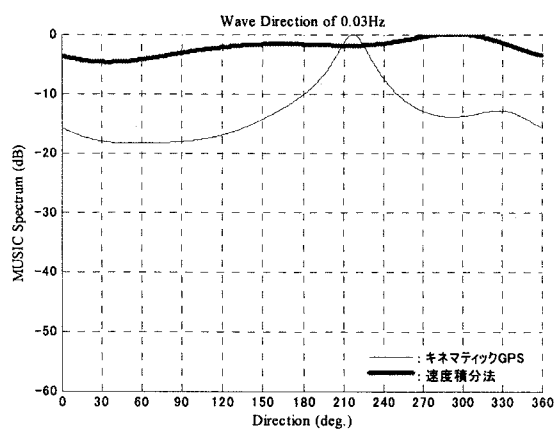


図-10 不一致領域 (0.03Hz)

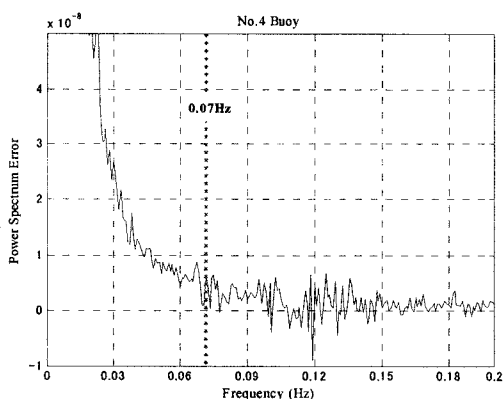


図-8 No. 4ブイ垂直変位スペクトル誤差

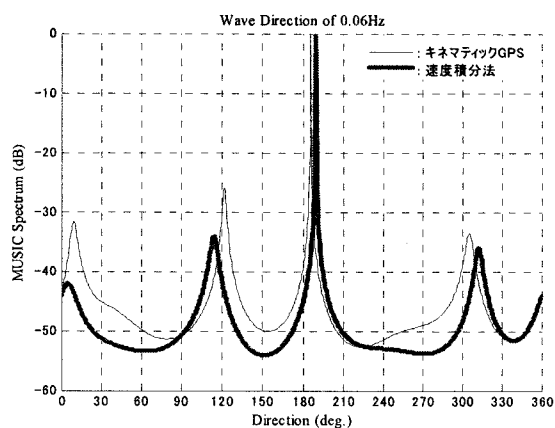


図-11 境界領域 (0.06Hz)

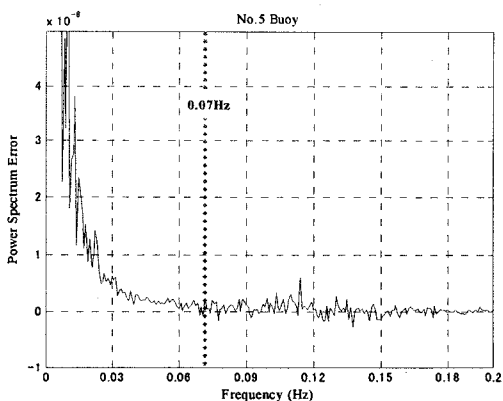


図-9 No. 5ブイ垂直変位スペクトル誤差

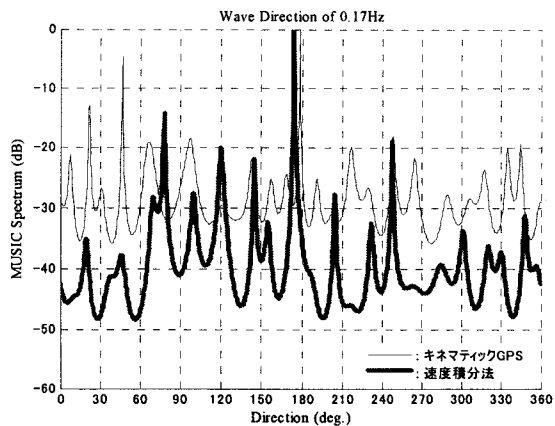


図-12 一致領域 (0.17Hz)

るブイの垂直方向変位の積分誤差と考えられる。

図-5 (a), (b)に速度積分法とキネマティックGPSから得たブイの垂直方向変位を、スペクトル解析により求めたパワースペクトル位相を示す。図-5 (a), (b)より、両手法によるパワースペクトルおよび位相に約0.07Hz付近に境界があり、0.07Hz付近以上のパワースペクトルおよび位相は両手法ともほぼ同じ値を示し、0.07Hz付近以下の低周波数成分は速度積分法における積分誤差のため異なる値を示し、速度

積分法によるパワースペクトルの方が大きな値を示している。これは、0.07Hz以上の周波数成分の波高は速度積分法によって計測可能であるが、それより低い周波数成分の波高は、積分誤差のために計測不可能であり、何らかの補正が必要である。

他の計測したブイにおいても、この速度積分法による積分誤差の特徴を示すために、図-6～図-9にそれぞれNo. 2からNo. 5までの各ブイにおける垂直方向

変位における両手法による各周波数におけるパワースペクトルの差を求め、それをパワースペクトル誤差として示す。どのブイにおけるパワースペクトルも、0.07Hz付近を境にしてそれより低い周波数で誤差が急激に増加している。そこで、0.07Hz付近を境界領域、0.07Hz以下を不一致領域、0.07Hz以上を一致領域と定義し、これら3つの周波数領域内から波を一つずつ選択し以下の解析に用いる。

ここでは、図-5より3つの領域内の卓越した波を不一致領域内で0.03Hz、境界領域内で0.06Hzおよび一致領域内で0.17Hzとそれぞれ選択する。そこで、これら3周波数によるブイの垂直位置変位を速度積分法およびキネマティックGPSから求め、それぞれの結果にMUSIC法を適用し、各波に関する波向の推定を行い、結果をそれぞれ図-10、11、12に示す。

図-10は不一致領域内における0.03Hzの波成分によりMUSICスペクトルを求めた結果で、同図よりキネマティックGPSの結果では210度付近に波向のピークが見られるが、速度積分法では積分誤差のために波向を示すMUSICスペクトルに明確なピークが見られない。図-11は境界領域付近の0.06Hzの波成分の結果で、両手法の結果共に190度付近に波向を示すMUSICスペクトルピークが見られる。最後に、図-12は一致領域内の0.17Hzの波成分の結果で、この図においても両手法とも180度付近に波向を示すMUSICスペクトルにピークが見られる。

これらの結果から、0.07Hz付近の境界領域より高い周波数成分波の波向測定は、速度積分法とキネマティックGPSの両手法で一致するMUSICスペクトルピークが見られ、これより低い周波数では積分誤差によって明確な波向推定が行えないことがわかった。しかし、前述のように速度積分法は陸上リファレンス局を必要としないと言う大きな利点があることから、今後はさらに速度積分法における積分誤差を補正するため、GPS信号からより正確な速度情報を抽出することを目指し、ブイ位置変位測定精度を向上させることを検討する必要がある。

4. 結論

本論文では、GPSシステムを装備した5つのブイを実験海域に設置して、ブイの速度を計測しそれを積分することで位置をもとめる速度積分法と従来から用いられているキネマティックGPSによりブイ位置の垂直方向変位量に対して比較検討を行った。これら両手法によるブイの垂直方向変位量計測結果が

ら、その周波数特性（パワースペクトルおよび位相）において、約0.07Hz付近の垂直位置変位量に境界が見られ、0.07Hz付近以上周波数領域におけるパワースペクトルおよび位相は両手法ともほぼ同じ値を示し、0.07Hz付近以下の低周波数領域では両手法の結果は異なる値を示し、積分誤差のため速度積分法によるパワースペクトルが大きな値を示していることがわかった。

さらに、両手法により得られたブイの垂直変位に関して0.07Hz付近を境界として一致領域、境界領域、不一致領域内で0.03Hz、0.06Hz、0.17Hz周波数の3波を選び、MUSICスペクトルにより3波の波向推定を行った。その結果、0.07Hz付近の境界領域より高い周波数成分波における波向測定は、速度積分法とキネマティックGPSの両手法の結果ともに一致するMUSICスペクトルピークが見られたが、これより低い周波数では積分誤差によって速度積分法の結果からは明確な波向推定が行えないこともわかった。

そこで、今後は速度積分法におけるリファレンス局を要しない利点があることから、さらに低い周波数の波を速度積分法により計測できるべく、速度積分法におけるブイなどを含めた移動体における位置変位測定の精度を向上させる必要がある。

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.
- 2) D. Hou, Y. Yoo, N. Kouguchi, H. Ishida and K. Itani, “Experimental Results and Comparison between Velocity Integration and OTF Position on the Sea”, Proceedings of the Institute of Navigation 2005 National Technical Meeting, January 24-26, 2005, San Diego, California, in print.
- 3) L. Serrano, K. Itani and M. Ueno, “A GPS Velocity Sensor: How Accurate Can It Be? ”, proceedings of the ION 2004 National Technical Meeting, January 26-28, 2004, San Diego, California, USA.
- 4) 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.