GPS波浪計の観測に基づく波浪の方向スペクトル推定法に関する検討

Estimation Method of Directional Wave Spectra from GPS Buoy Motion

関 克己¹・河合弘泰¹・川口浩二¹・猪股 勉²・橋本典明³

Katsumi SEKI, Hiroyasu KAWAI, Koji KAWAGUCHI, Tsutomu INOMATA and Noriaki HASHIMOTO

GPS buoys on NOWPHAS acquire deepwater waveforms at a spot of 100-400m in water depth and 10-20km off the shoreline. This study estimated the directional spectrum from the 1-s-long-interval time series of the altitude and two-directional horizontal velocity components of the GPS buoy off the Pacific coast of Owase Port during the passage of Typhoon Melor in 2009 by applying the extended maximum entropy principal method. It confirmed that the peak frequency and direction of the observed spectrum met well those of the hindcasted at major timings in the storm event. Furthermore, this study determined the parameter S_{max} for Mitsuyasu directional spreading function from the observed spectrum. The value was 10-20 in relatively calm wave conditions, 50-70 in swell, and 20-40 in wind waves.

1. はじめに

全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS）では、2008年にGPS波浪計の本格運用が開始され、図-1に示すように、2013年3月現在では15基が運用されている。GPS波浪計は、離岸距離が10～20km、水深が100～400m程度の沖合に設置され、離岸距離が2km程度の沿岸波浪計（海底設置式波高計）と比較して島や岬による遮蔽を受けず、またその設置水深は深海波条件を満たしているため、沖波を直接観測できる。ブイの上部に設置したGPSセンサーの座標（高度、緯度、経度）、ブイの傾斜角や加速度などを1.0s間隔で計測し、得られた水面変動データから波別解析で有義波など基本的な統計量を算出している。このデータを用いて有義波、波パワー、静穏度などの月別統計解析や周期帯別波浪の解析が行われ、沖合の波浪特性が明らかにされてきた（河合ら、2011、2012；関ら、2012）。周期帯別の主波向も清水ら（2007）による手法で算出しているが、ブイ式の観測装置であるが故に観測地点が時々刻々と変化する特徴があり、方向スペクトルの推定は行っていない。

そこで、筆者ら（関ら、2013）は、多方向不規則波によるGPS波浪計ブイの動揺の計算を行い、得られたブイの座標、傾斜角、加速度の時系列から方向スペクトルを推定する可能性を示した。本研究では、その検討で得られた知見を基に、実際の観測データから方向スペクトルや集中度パラメータ S_{max} の推定を試みた。

図-1 GPS波浪計の設置位置

図-2 台風0918号の経路と三重尾鷲沖GPS波浪計の位置

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋情報研究領域
2 (独法)港湾空港技術研究所 海洋情報研究領域
3 フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院

図-3 解析対象期間の有義波高, 周期および風速の観測値

表-1 各ケースの波浪および風の観測値

case	年	月	日	時	分	波別解析				スペクトル解析			$W[m/s]$	$\theta_{wind}[deg.]$ 16方位	$f_{windp}[Hz]$
						$H_{1/3}[m]$	$T_{1/3}[s]$	$T_{mean}[s]$	$\theta[deg.]$	$H_{1/3}[m]$	$T_{02}[s]$	$\theta_p[deg.]$			
①	2009	10	8	21	40	2.01	9.4	8.1	200	2.19	8.2	204	1.3	67.5	0.098
②	2009	10	8	19	0	2.03	9.7	8.2	175	2.18	8.21	184	5.3	22.5	0.091
③	2009	10	6	7	40	2.34	10.6	7.8	152	2.63	7.56	156	10.0	22.5	0.086
④	2009	10	7	13	40	4.69	11.7	8.6	195	5.03	8.93	198	15.0	67.5	0.061
⑤	2009	10	8	2	40	15.14	14.4	12.5	194	15.82	11.81	184	22.8	45.0	0.063

2. 解析対象地点と期間

本論文では, 2009年に中部地方に上陸した台風0918号の来襲時の三重尾鷲沖GPS波浪計を対象とする. 図-2に示すように, この観測地点は概ねE~SW方向に開けており, この台風は10月8日2:30頃に最接近した.

図-3には, 10月6日~10月8日に得られた有義波高 $H_{1/3}$, 有義波周期 $T_{1/3}$ および10分間平均風速 W の時系列を示している. 10月7日12時頃から, 風速が急速に増大し始め, それに伴い波高も増加している. 10月8日2:40には最大有義波高15.14mを記録している.

図-3において, 風速が5m/s以下, 5m/s程度, 10m/s程度, 15m/s程度の時刻の1つをそれぞれ①, ②, ③, ④, 最大有義波の起時を⑤として選定し, 各時刻の方向スペクトルを検討した. 表-1には各時刻の波別解析による有義波高 $H_{1/3}$, 有義波周期 $T_{1/3}$, 平均周期 T_{mean} , 清水ら(2007)の手法による主波向 θ , スペクトル解析による有義波高 $H_{1/3}$, 平均周期 T_{02} , ピーク波向 θ_p , 10分間平均風速 W , 風向 θ_{wind} (16方位), 風のピーク周波数 $f_{wind,p}$ を示している. 波向および風向は真北を 0° とした時計回りで定義し, スペクトル解析での有義波高 $H_{1/3}$ と平均周期 T_{02} はスペクトルのモーメントから以下の式で算出している.

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} \dots\dots\dots (1)$$

$$T_{02} = \sqrt{m_0/m_2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, m_0 および m_2 は, それぞれ周波数スペクトルの0

次, 2次のモーメントである. 波別解析とスペクトル解析を比較すると, 有義波高ではスペクトル解析の方が1割弱大きくなる傾向があり, 平均周期も両手法で1割程度の差がある.

3. 方向スペクトルの推定

(1) 方向スペクトルの推定方法

関ら(2013)は, 多方向不規則波に対するブイの動揺計算を行い, 得られたブイの座標, 傾斜角, 加速度の時系列から方向スペクトルを推定する可能性を示した. その結果によると, 入力値を座標のみとし, 伝達関数には観測値を用いて, 拡張最大エントロピー原理法(EMEP, 橋本ら, 1993)で算定する場合の再現性が最も高かった. EMEPは方向スペクトルに標準形を仮定せず, 任意の形状で推定できる実用的な方法である.

本研究ではそれを踏まえて, ブイの高度, ブイの水平変位を時間微分して得られる水平速度2成分の計3成分を入力値とし, EMEPにより方向スペクトルを推定した. また, 1s間隔のデータを1024個使用し, 方向分割数は $180 (\Delta\theta=2^\circ)$ としている.

(2) 波浪推算値との比較

図-4は, ケース⑤(最大有義波の起時)について, 観測と第3世代波浪推算モデルの一つであるSWANを用いた推算による方向スペクトル(ピーク値で無次元化)を比較したものである. ピーク(A)の周波数および波向は近い値を示している. ただし, 観測値には0.09Hz, 80° 付近に小さなピーク(B)があり, 推算値ではピーク(A)

図-4 方向スペクトルの推定結果 (ケース⑤)

付近が双峰, という違いもある。

表-2は, 各ケースについて, 観測と推算による方向スペクトルのピーク周波数 f_p およびピーク波向 θ_p を示す。推算で双峰となるケース⑤ (図-4参照) およびケース②を除けば, 概ね観測と波浪推算は対応している。

(3) 風速の影響

表-1で示した各ケースの風速の周波数スペクトル S_{wind} を図-5に示す。これらのピーク周波数は0.06~0.10Hzである。ケース⑤のみ, プイの移動に伴う見掛け上の風速を除去(補正)して求めた結果も併記しており, プイの移動の影響が小さいことも確認できる。また, 10分間平均風速から求めたダベンポートスペクトルも併記している。関ら(2013)は, プイの動揺計算においてダベンポートスペクトルをもつ変動風を与え, その風が波浪の方

表-2 観測と推算によるピーク周波数とピーク波向

case	観測値		波浪推算値	
	f_p [Hz]	θ_p [deg.]	f_p [Hz]	θ_p [deg.]
①	0.094	204	0.092	208
②	0.094	184	0.088	208
③	0.078	156	0.079	148
④	0.063	198	0.058	196
⑤	0.063	184	0.050	212

図-5 風速の周波数スペクトル

向スペクトルの推定に及ぼす影響が小さいという結果を得たが, 本研究で解析した観測値では波浪と風のピーク周波数の差は小さい。

図-6に, 図-4(a)のケース⑤に対応するケース①~④の観測による方向スペクトルを示す。これらの図の破線は風のピーク周波数 $f_{wind,p}$ および風向 θ_{wind} を示している。全ケース①~⑤において風速のピーク周波数と風向が交差する付近にピークは存在しない。ただし, 風速が15m/sを越えるケース④, ⑤では風向に対応する方向に若干のエネルギーが存在している。

4. 方向集中度パラメータの推定

(1) 方向集中度パラメータの推定方法

本研究では, 光易型方向分布関数を仮定し, 方向集中度パラメータ S_{max} を5~150まで1刻みで変化させ, 式(3)で定義する自乗誤差 Q が最小となる S_{max} を算定した。

$$Q(S_{max}) = \sum_i \sum_j (s(f_i, \theta_j) - G(\theta_j | f_i, S_{max}) s_f(f_i))^2 \quad \cdots (3)$$

ここで, S は推定した方向スペクトル, G は光易型方向分布関数, s_f は周波数スペクトル, i, j はそれぞれ周波数および波向の成分である。方向分布関数の積分範囲は 360° とし, ピーク値の1/2以上のエネルギーを持つ範囲で自乗誤差の計算を行っている。

図-6 方向スペクトルの推定結果 (観測値, 破線: $f_{wind,p}$, θ_{wind})

(2) 台風来襲時の方向集中度パラメータの変化

図-7の上段は有義波周期 $T_{1/3}$, 下段は方向集中度パラメータ S_{max} , 波別解析による有義波高と有義波周期から求めた波形勾配 H/L の時系列を示している。この図によると, 10月6日18時頃から S_{max} が増加している。この時, 波形勾配に変化はほとんどなく, 有義波周期は若干増加している。台風が遠方であってうねり性波浪が到達している状況であると考えられる。10月7日正午頃に境に, 波形勾配は増加し, S_{max} は減少している。この頃には台風が接近し, 台風の眼の前方で吹く強い東風で生じた風波が到達し始め, 有義波周期が低下したものと考えられる。10月8日2:40 (ケース⑤) に最大有義波高を観測した時の波形勾配は0.048, S_{max} は42であった。台風が通過した後は, 波形勾配が低下し, S_{max} も低下傾向を示している。なお, S_{max} の推定では方向スペクトルピーク値の1/2以上のエネルギーを持つ範囲を対象に当てはめを行っ

たが, 双峰などの影響により, 推定した S_{max} に振動が見られる。

図-8は波形勾配と S_{max} の散布図であり, 図中の三角形に似た折れ線は6時間毎の平均値を結んだもの, 右下がりの曲線は合田ら (1975) による提案式である。図-7でも示したように, うねり性波浪の到達で S_{max} が増加し, 風波の到達で波形勾配が増加し S_{max} が減少し, 波浪が減衰する過程では波形勾配も S_{max} も減少する, という時計回りの変化を見ることができる。 S_{max} の値は, 平常時に10~20, うねり性波浪が卓越するときに50~70, 風波が卓越する高波浪時に20~40が得られており, 設計の実務で標準的に用いられている値 (10, 25, 75) に近い値となっている。なお, 清水ら (1996) は, いわき沖の7か年の代表的な擾乱で最大有義波高の時の S_{max} を推定し, 10~20程度の値を得ている。

図-7 方向集中度パラメータと波形勾配の経時変化

図-8 波形勾配と方向集中度パラメータの関係

5. おわりに

本研究では、台風0918号の来襲時に三重尾鷲沖GPS波浪計で観測したデータを用いて方向スペクトルや方向集中度パラメータを推定し、以下の結論を得た。

- ① GPS波浪計の高度と水平速度2成分を入力値とし、EMEPで方向スペクトルを推定することで、波浪推算値に近いピーク周波数とピーク波向が得られた。観測と波浪推算による方向スペクトルの両方に誤差があるものの、これらが近い形状を示すということは、何れも真の形状に近いものであると思われる。
- ② 観測地点の風速が15m/sを越える場合に、風向に対応した方向に若干のエネルギーが現れることがある。
- ③ 設計の実務で標準的に使われている方向集中度パラメータの値に近い値が得られた。その値は、台風が接近して遠ざかる過程で大きく変化した。

今後は、海底設置式波浪計による方向スペクトルとの比較を含め、他の地点（海域）や他の擾乱でも同様の検

討を積み重ねながら、強風時で波浪と風のピーク周波数が近い場合の方向スペクトルの推定精度の検討、ブイの係留系の固有周期に近い低周波数（長周期波成分）の推定精度の検証、GPS波浪計と沿岸波浪計から得られた方向スペクトルと波浪推算・浅海波浪変形計算で得られたものとの比較なども行いたい。

本論文で用いた観測データは、国土交通省港湾局等が運営するNOWPHASで取得されたものである。また、本研究を遂行するにあたり、株式会社エコーの関係各位に協力を得た。本研究の一部は科研費（23360216）によるものである。ここに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己（2011）：GPS波浪計で捉えた東北～四国地方太平洋沿岸の沖合波浪特性，土木学会論文集B2（海岸工学），No.2，pp.I_136-I_140。
- 河合弘泰・関 克己・川口浩二・佐藤正勝・大友正悦・山谷早苗（2012）：GPS波浪計で捉えた東北日本海沿岸の沖合波浪特性，土木学会論文集B2（海岸工学），No.2，pp.I_101-I_105。
- 合田良実・鈴木康正（1975）：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算，港湾技研資料，No.230，45p。
- 清水勝義・永井紀彦・橋本典明（1996）：沖波の方向スペクトルの出現特性（第2報）——いわき沖における7か年の方向スペクトル統計——，港湾技術研究所報告，第35巻，第1号，pp.65-89。
- 清水勝義・永井紀彦・橋本典明・岩崎峯夫・安立重昭・奥勇一郎（2007）：GPSブイ式波浪計を対象とした複合的な波向き計算手法の提案，海洋開発論文集，第23巻，pp.231-236。
- 関 克己・河合弘泰・川口浩二・猪股 勉（2012）：太平洋側のGPS波浪計で観測された沖合の周期帯別波浪特性，土木学会論文集B2（海岸工学），No.2，pp.I_131-I_135。
- 関 克己・河合弘泰・川口浩二・猪股 勉・橋本典明（2013）：GPS波浪計による沖合の方向スペクトル推定手法の検討，土木学会論文集B3，Vol.69，No.2。（投稿中）
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃（1993）：海洋波の方向スペクトル推定における最大エントロピー原理法（MEP）の拡張，港湾技術研究所報告，第32巻，第1号，pp.3-25。