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

Offshore Wave Characteristics Observed by GPS Buoys on the Tohoku to Shikoku Coast, Japan

河合弘泰¹・佐藤 真²・川口浩二³・関 克己⁴

Hiroyasu KAWAI, Makoto SATOH, Koji KAWAGUCHI and Katsumi SEKI

This study has estimated the monthly-mean significant wave height and period, most frequent wave direction, wave power, and wave and wind calmness ratio at the GPS buoys and their nearby coastal wave gauges on the Tohoku to Shikoku Coast, Japan. There is a similar seasonal variation in the monthly wave statistics among the seven GPS buoys on Tohoku Coast. The spatial variation among these GPS buoys is smaller than the yearly variation. The wave height at the coastal wave gauge is smaller than that at the GPS buoy owing to the surrounding bathymetry. The wave power is generally larger and the calmness ratios are lower at the GPS buoy sites than at the coastal wave gauge sites. The GPS buoys observed high waves near the typhoon center and the wave generation and propagation owing to a low-pressure system.

1. はじめに

全国港湾海洋波浪情報網NOWPHASでは1970年から全国各地で、海岸から概ね3km以内の水深10～60mの海底で水圧式または超音波式の沿岸波浪計を設置し、定常的に観測を行ってきた。ただし、沿岸波浪計の捉える波浪は必ずしも沖波ではなく、波向によっては岬や島に遮蔽され、周期や波高によっては屈折や浅水変形をしたものである。例えば、太平洋沿岸の設計沖波（50年確率波）の周期は一般に12～16sであり、これを深海波として捉えるためには、112～200mより深い海域で観測する必要がある。そのため、NOWPHASでは、海岸から10～20km沖合の水深100～400mの地点にブイ式のGPS波浪計を2007年から導入し、現在では図-1に示す12基が本格運用に入っている。初期に導入されたものは、既に3年以上のデータを蓄積し、沖合の波候やその年変動を知ることができる。また、波力や洋上風力など自然エネルギーを開発する際の基礎データとしても役立つ。

そこで本研究は、東北～四国沿岸のGPS波浪計の観測データに基づいて沖合の波浪特性を調べ、これまで沿岸波浪計で捉えてきた波浪特性との違いを明らかにした。

2. 解析の方法と対象地点

本研究では、GPS波浪計とその近傍の沿岸波浪計における、各月の平均有義波高・周期、最多波向、波パワー、有義波高や平均風速に基づく静穏率を求め、その季節特性や年変動を調べるとともに、GPS波浪計と沿岸波浪計による観測値の相関解析も行った。その一方で、代表的な高波擾乱における沖合の波浪特性も考察した。

これらの統計解析では、主として最新の確定値である2009年の20分間隔の有義波諸元（河合ら、2011）を用い、年変動の検討では2008年の確定値（河合ら、2010）と2010年の速報値も用いた。対象地点は、図-1で示した12基のGPS波浪計のうち本格運用を開始したばかりの⑪徳島海洋沖を除く11基と、これらの近傍にある7基の沿岸波浪計である。なお、GPS波浪計は、ブイの上下・水平動をRTK-GPSにより1s間隔で計測しており、その水平

図-1 NOWPHASの波浪観測地点の位置と水深

1	正会員	博 (工)	(独法) 港湾空港技術研究所 海洋情報研究領域長心得
2			(独法) 港湾空港技術研究所 海洋情報研究領域海象情報研究チーム
3	正会員	博 (工)	(独法) 港湾空港技術研究所 海洋情報研究領域海象情報研究チームリーダー
4	正会員	博 (工)	(独法) 港湾空港技術研究所 海洋情報研究領域海象情報研究チーム

(a) 青森・岩手県沿岸

(b) 宮城・福島県沿岸

(c) 中部～四国沿岸

図-2 GPS波浪計による2009年の月別波浪統計量

動から共分散法で波向を求めている（清水ら，2007）．沿岸波浪計のうち本論文で波向を掲載する地点は，水位と水平方向の水粒子速度を0.5s間隔で計測し，EMLM法で波向を求めている（橋本ら，1995）．

3. 沖合の月別波浪統計量

図-2は各GPS波浪計における2009年の各月の平均有義波高 H_m ，平均有義波周期 T_m ，最多波向 D_m （16方位で時計周りにNを1，Eを5，Sを9，Wを13と定義）を示す．ただし，測得率が80%未満の月は表示していない．この

図-3 宮城中部沖における月別波浪統計量の年変動

図-4 いわき沖・福島県沖・小名浜港の月別波浪統計量

図からまず，(a)と(b)に示す東北沿岸の7基では，非常によく似た季節変化をしており，波高はほとんどの地点で1月に最高，7月に最低となり，9月も高い．岩手北部沖から福島県沖まで直線で350kmほどの距離があるが，ここに並ぶ6基について各月の波高と周期の標準偏差は通年平均でそれぞれ0.06m，0.20sと非常に小さい．青森東岸沖は北海道に近く，水深も浅いため，東北沿岸の他の地点に比べて波高も周期もやや小さい．一方，中部～四国沿岸の波高や周期については，6～7月に小さく9月に大きい点で東北沿岸と共通する．しかし，少なくとも三重尾鷲沖と高知西部沖には，1月の波高が9月より低いという，東北沿岸とは対照的な特徴が見られる．

図-3は宮城中部沖を例に2008～2010年の値を示す．何れの年も7月ないし8月に波高や周期が最低となっている．各月の波高や周期の年変動の標準偏差は通年平均でそれぞれ0.16m，0.43sであり，図-2(a)，(b)で示した東北沿岸の地点差より顕著である．2009年の1月や9月には他の年に比べて波高も周期も大きく，12月は逆に小さかった．最多波向という指標は波向の頻度分布形の違いを敏感に反映するため，例えば3月の20分毎の波向は何れの年も方位3～8（NE～SSE）に分布しているが，最多

図-5 GPS波浪計と沿岸波浪計による月別波浪統計量の比較

図-6 石巻港における月別波浪統計量の年変動

波向は図のように2008年が方位3 (NE), 2009年が方位4 (ENE), 2010年が方位8 (SSE) と分かれた。

NOWPHASでは1988～1999年に、いわき沖の水深154 m地点のプラットフォームに設置したステップ式波高計による観測を実施している (清水ら, 1996)。図-4は、期間A (1991～1995年) のいわき沖と期間B (2008～2010年) の福島県沖の平均値を、同期間の小名浜港の沿岸波浪計と比較したものである。何れの期間や月でも、いわき沖や福島県沖は小名浜港より波高が高く、周期は短い。小名浜港の波高が両期間で同程度の月には、いわき沖と福島県沖でも同程度の波高になっている。つまり、いわき沖と福島県沖は同等な沖合の波浪を捉えている。

4. 沖合と沿岸の波浪特性の比較

(1) 月平均有義波

図-5は、GPS波浪計とその近傍の沿岸波浪計の3組について、月別波浪統計量を示す。ただし、釜石港では波向観測が行われていない。釜石港の波高と周期は岩手南部沖とよく似た季節変化をしており、その波高は岩手南部沖の0.46～0.61倍である。石巻港の波高や周期も宮城中部沖とよく似た季節変化をしている。ただし、1月に

図-7 岩手南部沖と釜石港の有義波高の相関性

は、宮城中部沖で北寄りの波浪が卓越し、石巻港ではこれが沿岸地形で遮蔽されて波高はむしろ低い。宮城中部沖の20分毎の波向は、ほぼ全方位に分布し、通年では方位3～9 (NE～S) がそれぞれ10%以上ある。石巻港では、方位7～10 (SE～SSW) に分布するが、最多波向はどの月も方位8 (SSE) であり、この方位が年間の65%を占める。潮岬は沖波に近い波浪が捉えられ、波浪推算の検証でよく使われてきた地点の一つである。その波高は三重尾鷲沖に近いが、9月の最多波向は潮岬で方位11 (SW), 三重尾鷲沖は紀伊半島の遮蔽により7 (SE) となっている。

図-6は、石巻港の2008年～2010年の値を示す。波高や周期の年変動の標準偏差は年平均でそれぞれ0.06m, 0.36s, 最多波向は3年間を通じて方位8 (SSE) である。

図-7は、2009年4月の岩手南部沖と釜石港を例に、20分毎のGPS波浪計の有義波高 H_g と沿岸波浪計の有義波高 H_w の関係を、GPS波浪計での波向別にプロットしたものである。釜石湾は沿岸波浪計から見てNE～E方向が開けている。図の (a) は同時刻の波高に対するものであり、沿岸波浪計とGPS波浪計の波高比は、ENEに対しては1を中心にとらつき、NEとEに対しては1よりやや小さく、その他の波向では1よりかなり小さい。

GPS波浪計から沿岸波浪計までの距離は約14kmあり、周期8sの深海波の群速度6.3m/sでは37分かかる。そこで、GPS波浪計の波高とその40分後の沿岸波浪計の波高の組み合わせでプロットすると、図の (b) が得られた。時刻をずらしても波向毎の相関性に顕著な変化は生じない。有義波高の算定における統計的な変動、観測機器の

(a) GPS 波浪計

(b) 沿岸波浪計

図-8 2009年の各月の平均波パワー

図-9 GPS波浪計と沿岸波浪計による波浪の静穏率の比較

特性，GPS波浪計と沿岸波浪計の間の風や流れの作用など，多様な要因が絡んでいるものと考えられる。

(2) 波パワー

単位幅あたりの海面から海底までの全水深を通過する波浪の水粒子運動のエネルギーは，次元のある係数を用いて $0.5H_{1/3}^2 T_{1/3}$ (kW/m) と近似できる (田端ら，1980)。これを波パワー p_w と称し，これまで沿岸波浪計の観測値に基づく統計がなされてきた (高橋ら，1989；永井ら，1998)。図-8は2009年の各月の平均波パワーを示す。GPS波浪計の地点には全体的に沿岸波浪計より大きな波パワーがある。何れの地点も図-2や図-5で示したような波高・周期の季節変化を反映しており，岩手南部沖では1月に最大値の約29kW/m，7月に最小値の約7kW/mをとる。この最小値はこの図に示した各沿岸波浪計での最大値に近いレベルである。なお，図示していないが，GPS波浪計での波パワーは沿岸波浪計より波向に富んでいる。また，高知西部沖では5月，9月，10月に格段に大きく，これらは台風や低気圧の接近によるものである。波パワーは波高の2乗と周期に比例するため，高波擾乱

図-10 岩手南部沖における風の静穏率

表-1 2009年の主要な擾乱

No.	期間	擾乱
A	2月13日～2月14日	日本海低気圧
B	2月20日～2月21日	二つ玉低気圧～冬型気圧配置
C	3月12日～3月16日	日本海低気圧～冬型気圧配置
D	3月22日～3月23日	二つ玉低気圧
E	4月25日～4月28日	二つ玉低気圧～三陸沖低気圧
F	10月6日～10月10日	台風0918号

が月平均有義波高・周期よりも敏感に反映される。

(3) 波浪と風に対する静穏度

海上工事や船舶航行の安全管理では有義波高にしきい値を設定している。そのしきい値は工事内容や船舶の大きさによって異なるが，本研究では0.5，1m，3mを仮定し，しきい値以下である割合を月毎の静穏率として求めた。その2009年に対する結果を図-9に示す。有義波高が1m以下の割合は，石巻港の沿岸波浪計の地点では全ての月で0.8を超えている。釜石港の沿岸波浪計の地点では，冬季に北寄りの波浪が入りやすいために0.5程度に低下する月もある。沿岸地形の遮蔽を受けない岩手南部沖では，どの月も最低有義波高が0.5m程度であり，有義波高が1m以下の割合は0.2を超えない。

風速 (10分間平均風速) についても，気象庁の暴風・強風の定義や典型的な発電用風車のパワーカーブを参考に，10，15，25m/sをしきい値と仮定として静穏率を求めた。岩手南部沖の例を図-10に示す。風速が10m/s以下の割合は，夏季の6～8月には0.8程度に達するが，冬季の12～3月には0.3～0.4まで低下する。

5. 沖合での高波特性

GPS波浪計は台風や低気圧による高波も捉えている。図-5において月平均有義波高がよく一致した三重尾鷲沖のGPS波浪計と潮岬の沿岸波浪計の組み合わせ，表-1に示す2009年の代表的な擾乱を例に，各擾乱の最大有義波高・周期 (河合ら，2011) を図-11に示す。周期は概ね一致しているが，波高については擾乱F (台風0918号) のみGPS波浪計の値が沿岸波浪計を大きく上回っている。

図-12はこの擾乱時の有義波の経時変化を示す。三重尾鷲沖の波高の経時変化は非常に鋭いピークを描き，

図-11 主要擾乱における最大有義波高

図-12 台風0918号時による高波

15.14 m, 14.4sに達した。この記録は台風0423号による室津港の13.55mや台風0704号による中城湾の13.61mを超えて、NOWPHAS史上最高の記録である。ブイの測位、傾斜角、加速度、水位分布の歪度や尖鋭度にも、特に異常は見られなかった。この台風の中心は三重尾鷲沖の近くを通過し、GPS波浪計では毎20分値で最低気圧954hPa、最大平均風速29m/sを記録した。非常に限られた範囲で猛烈な高波が生じていた可能性がある。

図-13は、低気圧が東北地方の東方に位置し、三陸沖で等圧線がNNE～SSWの向きに並んだときに、東北沿岸のGPS波浪計が観測した有義波である。岩手南部沖では1月31日17時に23m/sの最大平均風速を記録した。波高や周期は時間とともに増加し、風下側となる南側で大きかった。東北沿岸のGPS波浪計がリアス地形の影響を受けない沖合に並んでいたために、このような波浪の発達が見えられた。これらのGPS波浪計は、図-2で示したように月平均統計量では似た値になるが、個々の高波擾乱では波高や周期が異なり、ピークの起時にも違いがある。

6. おわりに

本研究では、GPS波浪計の観測データに基づいて、月別統計量（常時波浪）と高波という2つの視点で沖合の波浪特性を検討した。主要な成果は以下の通りである。

- ①東北沿岸の7基のGPS波浪計では、月平均有義波高において概ね1月に最高で7月に最低という季節変化が得られた。岩手北部沖～福島県沖において、月平均有義波高・周期の空間的な変化は、2008～2010

図-13 2009年1月31日から2月1日の低気圧による高波

年の年変動よりも小さく、リアス地形の影響の小さい沖合の波浪を捉えていた。

- ②沿岸波浪計とGPS波浪計の同時刻の有義波高の比率は、岬などによる遮蔽の小さな波向に限って、1に近い値でばらつく。波浪の群速度を踏まえて時刻をずらしても、この比率のばらつきに顕著な差はない。
- ③GPS波浪計の地点は沿岸波浪計に比べて、波高や波パワーが大きく、波浪による静穏率は低い。
- ④GPS波浪計によって沖合で、台風の中心付近の高波や一様な風場で発達する波浪を観測できた。

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り、関係各位に謝意を表したい。

参考文献

- 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二 (2010)：全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 2008)，港空研資料，No.1209，93p。
- 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己 (2011)：全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 2009)，港空研資料，No.1226，120p。
- 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，Vol.23，pp.231-236。
- 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か年方向スペクトル統計，港空研報告，第35巻，第1号，pp.65-89。
- 高橋重雄・安達 崇 (1989)：日本周辺における波パワーの特性と波力発電，港湾技研資料，No.654，18p。
- 田端竹千穂・柳生忠彦・福田 功 (1980)：日本沿岸における波のエネルギー，港湾技研資料，No.364，20p。
- 永井紀彦・渡邊 弘・川口浩二 (1998)：長期観測結果に基づく我国沿岸の波パワーの出現特性に関する検討，港湾技研資料，No.895，26p。
- 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄・磯部憲雄・鈴木敏夫 (1995)：水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発，海岸工学論文集，第42巻，pp.1081-1085。