

長周期波スペクトルの提案と現地観測との比較検証

Proposition of long Period Wave Spectra for Numerical Estimation of Wave Field in Harbors and Its Verification with Field Data

西井康浩¹・吉田明徳²・山城賢³・小野貴也⁴

Yasuhiro NISHII, Akinori YOSHIDA, Masaru YAMASHIRO and Takaya ONO

Three model spectral shapes on long period waves, which can be used as incident wave spectra for more accurate numerical estimations of long period wave fields in harbors, were proposed. Using continuously measured wave data at a point far outside and at two points inside Shibushi harbor in Kagoshima prefecture, Japan, the validity of the three proposed different spectral shapes, a) BS type, b) Exponential type, c) Triangular type, together with Hiraishi's flat shaped spectra, were examined. It was found that for a relatively long period of 80 to 120s, Hiraishi's flat type spectra largely underestimate the observed wave spectra, but for a relatively short period of less than 50s, all spectral shapes give practically the same spectra as the observed one.

1. はじめに

長周期不規則波による港湾内水面変動の再現計算を行う場合、長周期波成分を含んだスペクトル形が必要となる。長周期波の周波数帯を表すスペクトル分布の標準モデルとして、平石ら(1997)が風波に依存する矩形の近似形スペクトルを提案している。しかしながら、サーGINGによる係留船舶の荷役障害が報告されている志布志港(鹿児島県)のように、長周期波側にも顕著なエネルギーピークを有する海域では、エネルギーレベルを一定とする近似型よりは、エネルギーピークを考慮した長周期スペクトルを用いた方が、より現象の再現が可能とも考えられるが、それらの妥当性を観測値と比較して検討した例は見当たらない。

そこで、本研究では、長周期波側にもエネルギーピークを有するデュアルピーク型スペクトルとして、長周期波側を再現する3つのスペクトル形を提案し、志布志港で測得された港内外の連続波浪観測との比較検証を通じて、平石らの近似型を含め、モデルの妥当性を評価することを試みた。なお、長周期波による波浪場の再現計算には、平山(2002)がエネルギー吸収関数を実務で汎用的に使えるように改良した高次型スポンジ層を沖側の境界と任意反射境界に有するブシネスクモデル NOWT-PARI Ver. 4.6 β (改良版)を用いた。

2. 長周期波スペクトルの提案

(1) デュアルピーク型スペクトルの一般形

長周期波が問題となる港湾では、波浪の連続観測デー

タを用いて周波数スペクトルを描くと、長周期波側にも顕著な凸型のピークが現れる場合が多い。図-1は新たに提案した、長周期波側のピークを考慮したデュアルピーク型スペクトルの一般的な分布形を示したものである。長周期波領域は、低周波数側の下限境界となる下限周波数 f_{min} から風波との境界となる境界周波数 f_{b0} を範囲とし、この間を周波数 f_{B1} と f_{B2} とでピーク領域(長周期波2)とフラット領域(長周期波1, 3)に区分する。長周期波領域のピーク周波数とそこでのエネルギーレベルおよびフラット領域のエネルギーレベルは、対象とする港湾ごとに決められるべき性質ものである。本文は長周期波浪場の計算において、入射波スペクトルの形状による港内のスペクトルの再現性を検討することが目的であることから、今回の検討においては、計算値との比較検証の対象に用いた観測スペクトルから読み取って設定し、フラット領域のエネルギーレベル下限値 S_{Lmin} は長周期領域のパワーが、用いた観測スペクトルの長周期領域のパワーと一致するように設定している。

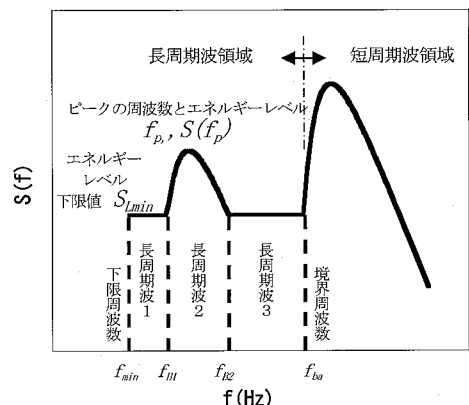


図-1 デュアルピーク型スペクトル

- | | |
|-------|-----------------------|
| 1 正会員 | (株)三洋コンサルタント 調査部長 |
| 2 正会員 | 工博 九州大学大学院准教授 工学研究院 |
| 3 正会員 | 博(工) 九州大学大学院助教 工学研究院 |
| 4 正会員 | 工修 (株)三洋コンサルタント 調査部係員 |

(超音波式と水圧式)と波向(成分流速)の連続観測に切り替え、港内の波高計と同期を取った観測データが取得されている。ただし枇榔島の海底波高計に関しては、途中の停電や連続観測不具合による欠測期間が生じたため、それらの期間を除いた8月22日から9月14日までの約24日間のデータが得られている。

なお、この観測期間中に発生した台風の北上時には、若浜埠頭の各バース(岸壁(-9m)、岸壁(-12m)、志布志サイロバース、全農サイロバース)において係留船舶の動揺観測も行われている。また、平成12年(2000)と平成13年(2001)の台風発達期にも、志布志港沖防波堤付近および港内で連続的な波浪観測が実施されているが、残念ながら、両年とも海底波高計(ナウファス)では毎正時前後10分の20分観測のみで、長周期波を対象とする連続的な波浪観測は行われていない。

ところで、平成16年(2004)の観測期間中に台風が7個発生したが、志布志港周辺海域の波浪特性に大きな影響を及ぼした台風はT0416号、T0418号、T0421号の3つであり、図-4上図にT0416号とT0418号通過時の有義波高と有義周期の経時変化を示す。図-4下図は連続波浪データをFFTにより周波数分解した成分波の内、20秒をしきい値とする長周期波成分を用いて逆FFTにより再合成した長周期波の有義波高と有義周期の経時変化図である。本研究と関連して、今後、港内の係留船舶の長周期動揺に対する検討を行うことを考えていることから、9月3日に各バース同時に係留船舶の動揺観測が行われているT0418号北上時の波浪観測データを検証のために用いることとした。

このT0418号は、8月23日にマーシャル諸島付近で発生し、その後西北西に進み9月5日に沖縄本島を直撃した後東シナ海を北上し、大型で強い台風となって9月7日に長崎市付近に上陸した。このとき九州全域は完全

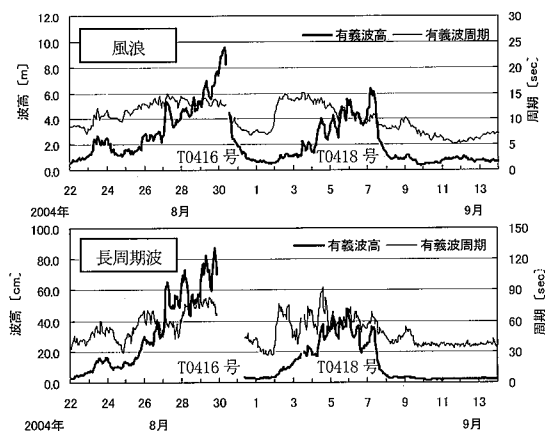


図-4 ナウファスの波浪経時変化図

に暴風圏内に入り、上陸時の台風の中心気圧は945 hPa、中心付近の最大風速は40 m/秒であった。このため、9月4日から8日にかけて、志布志港では有義波高の増大が観測され、有義波高の最大値は約6 mに達した。一方、有義波周期は9月2日から10日にかけてほぼ一様に減少し、この期間に約15秒から7秒に変化した。このことから志布志湾には当初うねりが伝播し、その後風波が入射したことが分かる。

4. 数値計算による長周期波の再現

(1) 計算に用いたモデル

長周期波による平面波浪場の再現計算には、Cruzら(1993)が示したエネルギー吸収関数を、平山(2002)が実務で汎用的に使えるように改良したエネルギー吸収帯(高次型スポンジ層)を有するブシネスクモデル、NOWT-PARI Ver. 4.6β(改良版)を用いた。対象とした地形は図-5にある平面モデル港湾を使い、図-2の4タイプの長周期波スペクトル形を入射波とする再現計算を行い、現地観測値と比較した。図-5にあるSt.1からSt.3は平成12年(2000)度の、St.4からSt.8は平成13年(2001)度の観測位置を示す。

この平面モデル港湾は志布志港を対象に、ほぼ同スケールで平面空間(11,300 m×17,400 m)を切り取り、地形を簡略化させた仮想地形である。水深hは20.0 mから5.0 mまでとり、沿岸方向に平行な勾配水深とした。長周期波の入射波はSSEからの一方向波で与えた。長周期波側の下限周期は300秒に設定し、風波との境界周期は、平石の近似型では、平石ら(1999)による風波のピーク周波数から境界周波数を定める方法に倣った。

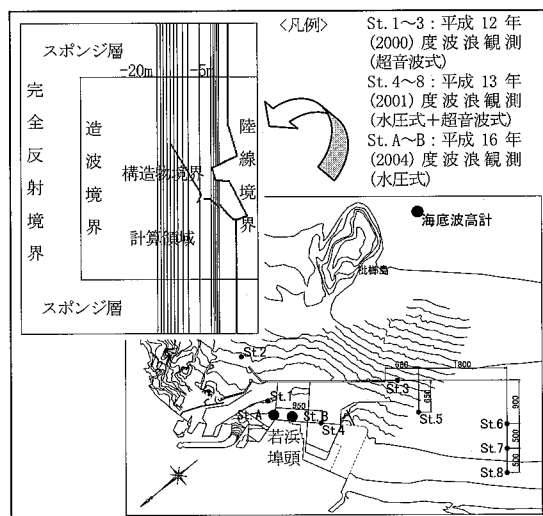


図-5 志布志港における波浪観測位置と平面モデル港湾

このため、台風 T0418 通過時の 9 月 5 日 18:00 から 9 月 6 日 6:00 までの 12 時間の観測データについて、データ長 1 時間、ずらし時間 30 分で FFT 解析をおこなって得られる計 23 個のスペクトルについて、長周期波エネルギーと波の総エネルギーの比の平均値を算定し、風波のピーク周波数に乘じる係数値 $\alpha_1 = 1.63$ を求めた。一方、提案した 3 タイプについては観測スペクトル分布から目視で境界周波数を定めた。波の作用時間は最短周期の波が計算領域に行き渡ってさらに造波境界に戻ってから後 1 時間とした。陸線境界および構造物境界は完全反射とし、空間差分 Δx は 25 m、時間差分 ΔT は $T/400$ 秒、スポンジ層厚 F は西井ら (2007) の検討結果を基に、水深 20.0 m で周期 300 秒のときの 1.0 波長に相当する 4200 m を与えた。

計算結果の比較検証の対象とした港内外の観測スペクトルのデータは、台風の影響により長周期波が発達し、ほぼ定常状態に達したと判断される 9 月 5 日の 22:30 から 23:30 までの 1 時間である。この抽出に当たっては、9 月 5 日 18:00 から 9 月 6 日 6:00 までの観測データについて 30 分ずらしでスペクトルの経時変化を求め、長周期波スペクトルのエネルギーレベルが大きく、かつ長周期波スペクトルの時間的変動がもっとも小さくなったときのスペクトル分布を採用した。

(2) 計算結果と考察

図-6 は、沖合いの枇榔島近傍の海底波高計 (ナウファス) で測得された波浪データから抽出した比較対象のための観測スペクトルと、このスペクトルを基に作成した 4 タイプの入射波スペクトルを比較して示した。

BS 型、指数関数型および三角形型は、2. (2) a), b), c) で述べたように、観測スペクトルの長周期波側のピーク周波数、ピークエネルギーおよび長周期波の全エネルギーから入力諸元が設定される。これに対し平石の近似型は、(1) で述べたように、境界周波数を決定すると、

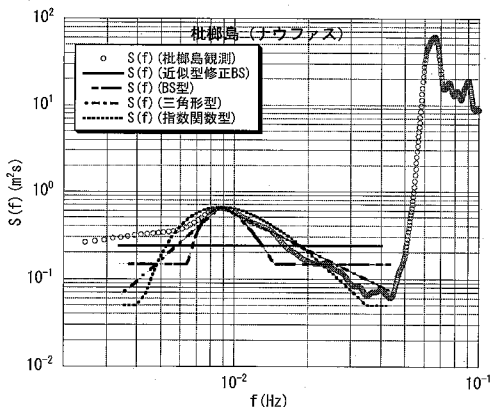


図-6 観測スペクトルと 4 タイプの入射波スペクトル

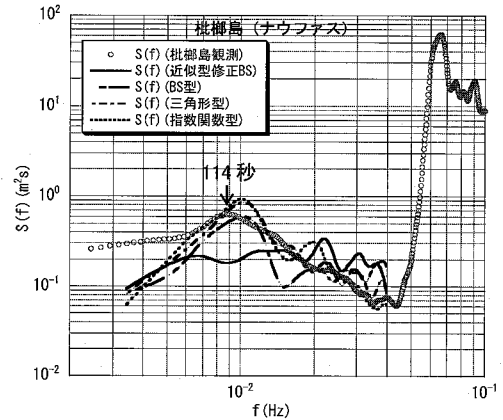


図-7 観測と計算のスペクトル分布 (ナウファス)

エネルギーレベルは風波の周波数スペクトルから自動的に決まることになる。エネルギーレベルを決定する周波数スペクトル密度関数に修正 Bretschneider- 光易型 (修正 BS 型) と Bretschneider- 光易型 (BS 型) が使われているが、ここでは修正 BS (以下、近似型修正 BS と称す) を採用して検討を行った。

図-6 に示す 4 タイプの入射波スペクトルを 1 時間作用させて得られた、枇榔島での水面変動の時系列から算定した長周期波スペクトルを図-7 に示している。

これによると、モデル化した入射波スペクトルの内、周波数スペクトル密度を一定値で与える近似型修正 BS では、高周波側にいくつかのスペクトル密度のピークを生じ、境界周波数側に向かって高いエネルギーレベルを保持する傾向がある。これに対しある程度ピーク周波数近傍のスペクトル分布を再現した BS 型、指数関数型および三角形型では、ピーク周波数付近で高いエネルギーレベルを保持し、かつ境界周波数側に向かうにつれて観測スペクトルと同様のエネルギーレベルの減衰が生じている。

次に港内の波浪観測の内、岸壁 (-9 m) と (-12 m) の境界付近にある St. A の観測スペクトルと計算スペクトルの比較を図-8 に、また岸壁 (-12 m) と志布志サイロバスの境界付近にある St. B についての比較を図-9 に示す。このとき、観測スペクトルに関して、沖合いのナウファスではスペクトル密度のピーク (114 秒) を持つほぼ凸型のスペクトル分布を示すのに対し、St. A と St. B の両観測スペクトルには明瞭な 3 つのピーク (St. A で 117 秒, 64 秒, 31 秒, St. B で 120 秒, 67 秒, 31 秒) が生じている。観測スペクトルに現れる 3 つのモードについて、計算スペクトルとの比較を見ると、120 秒近傍の第 1 モードに関しては、St. A と St. B とともに一定値を仮定する近似型修正 BS では計算値が観測値を

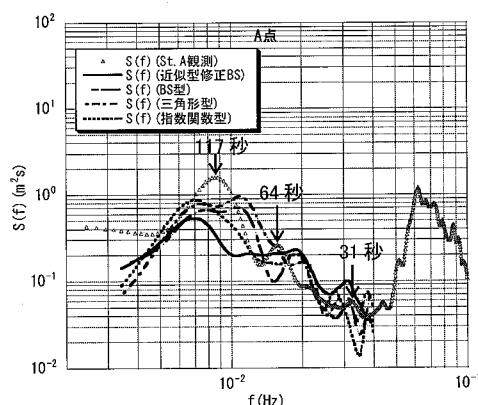


図-8 観測と計算のスペクトル分布 (St.A)

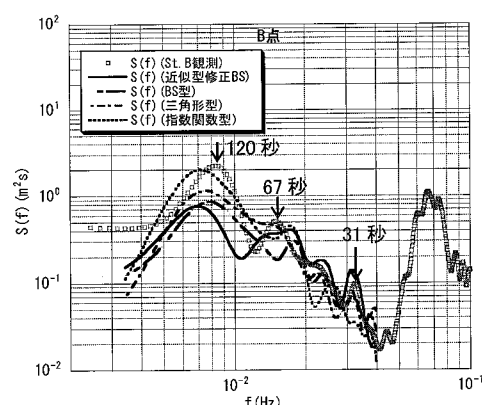


図-9 観測と計算のスペクトル分布 (St.B)

大きく下回りそのピーク周波数も小さく、より長周期側に現れる傾向がある。これに対して、観測値に現れる長周期領域のピーク形状を近似するBS型、指数関数型および三角形型ではいずれも、近似型修正BSに比べて観測スペクトルのエネルギーレベルに近い値を取っており、ピーク周波数も観測値に近づいている。

特に目立つのは、近似型では120秒から80秒あたりで観測値から大きく外れており、このあたりに共振周波数を取ることが多い比較的大型の係留船舶について、この波浪推算の結果を用いて長周期動揺の推定を行うと、推定結果に大きな差異が生じる可能性が考えられる。周期60～70秒の第2モードに関してはいずれのタイプでも若干短周期側にピークがずれる傾向が見られるものの、エネルギーレベルはほぼ同じ値を示しており比較的良好再現されている。周期50～25秒の比較的高周波数域ではいずれのタイプも観測値のエネルギーレベルとほぼ一致しており、近似型修正BSも若干エネルギーレベルは大きめに現れているものの、スペクトルの周波数変動をよく再現している。

5. おわりに

港湾内の長周期水面変動を数値モデルで検討する際に、入射波として用いる長周期波スペクトルについて、長周期波領域のスペクトル形状を模した3タイプ(BS型、指数関数型、三角形型)を提案し、これに平石らが提案したエネルギー密度を一定とする近似型を加えた4タイプについて、志布志港をモデルに長周期波浪場の計算を行った。志布志港では平成16年(2004)に港内2点と港外沖合1点で波浪の連続観測がなされており、港外沖合の観測スペクトルを基に4タイプの入射波スペクトルを設定し、港内2点について、計算値から得られた水面変動のスペクトルを観測スペクトルと比較することによって、各タイプの妥当性を検討した。その結果、特に顕著な差異として、エネルギー密度を一定とする近似型では、観測値に生じる振動の第1モード近傍の120秒から80秒あたりで、観測値を大きく下回る結果を与えることが分かった。したがって、長周期スペクトルに有意なピークを有する志布志港のような港では、スペクトルに現れるピーク形状を考慮した長周期スペクトルを用いる必要があると考えられる。

今回の検証は、長周期波部分にスペクトルピークを有する3タイプの長周期波スペクトルと、一定値で表した近似型スペクトルによる、港内波浪場の再現性の比較検証を目的としており、平石ら(1999)が近似型について示しているように、提案した3タイプの標準形をどのように定めるかは今後の課題である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、ご協力いただいた国土交通省九州地方整備局志布志港湾事務所の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三(1997)：港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて，海岸工学論文集，第44巻，pp. 246-250.
- 平山克也(2002)：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港研資料，No. 1036，pp. 84-86.
- 平石哲也(1999)：長周期波のエネルギーレベルとそれによる荷役稼働率の推定，港研資料，No. 934，pp. 9-11.
- 国土交通省九州地方整備局志布志港湾事務所(2004)：平成16年度志布志港長周期波・静穏度実態解析業務報告書
- Eric Cruz・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃(1993)：非線形波動方程式に対する無反射境界条件について，海岸工学論文集，第40巻，pp. 46-50.
- 西井康浩・吉田明徳・山城 賢(2007)：長周期波再現計算における境界処理法の基礎的な検証について，海洋開発論文集，VOL. 23，pp. 153-158.