

19. 周期の長い波浪を対象とした波浪スペクトル推定精度に関する研究

岩崎裕志

1. 目的

近年の波浪による港湾構造物の被災事例として、日本海側では2008年2月の寄り回り波による伏木富山港の防破堤のケーソン滑動、太平洋側では2006年9月の台風襲来による久慈港の護岸損傷が挙げられる。これらの事例に共通する波浪の特徴は設計波高を上回る有義波高ではないにもかかわらず、設計波の周期を上回る周期の長い波となっている点である（表-1参照）。

表-1 被災時における波高および周期

	伏木富山港		久慈港	
	設計波	襲来波	設計波	襲来波
有義波高	5.3 m	4.22 m	6.0 m	4.08 m
有義波周期	12.0 sec	14.2 sec	12.6 sec	17.0 sec

設計波の算定には波浪推算モデルが用いられるが、波高の予測精度向上に関する検討事例が主であり、周期の再現性については十分な検討がなされていない。

一方、1970年以降、国土交通省、各地方整備局、港湾空港技術研究所などの相互協力のもとに港湾海洋波浪情報網（以下、NOWPHAS）が整備され、現在では70地点以上の波高・周期などの情報を収集・蓄積している。また、1995年に波向の観測を目的として開発され、現在の観測の主要な観測機器である海象計では方向スペクトルの推定が可能である。

本研究では上述の被災事例を対象にWAMによる再現計算および海象計で得られたデータに基づく方向スペクトル推定を行い、波高、周期、波浪スペクトルについて周期の長い波浪の発達メカニズムを明らかにするとともに、両者の比較を行うことで、波浪推算モデルで推定される周期の推定精度を確認することを目的としている。

2. 内容

2-1. 波浪観測データの解析

海の波は不規則な水面変動をなすが、次式のような無限の正弦波の重ね合わせとして表現することができる。

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (1)$$

ここで、 a_n 、 f_n 、 ε_n ： n 番目の成分波の振幅、周波数および位相。これを周波数成分ごとのスペクトルで表したものが周波数スペクトル $S(f)$ である。

さらに、実際の波浪では成分波ごとに波向が異なるため、周波数スペクトルに方向成分を考慮した方向スペクトル $S(f, \theta)$ を用いる。波の方向性を表す方向分布関数 $G(f, \theta)$ を用いると、方向スペクトルは以下のように表すことができる。

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta) \quad (2)$$

今回の検討では、海象計によって測得された波浪データについて解析を行った。海象計は水深50m程度の沖合に設置が可能な海底設置型の計測機であり、設置水深における水圧変動に加えて、鉛直上方に射出される超音波により水面変動を、鉛直軸より角度30°傾けて3方向に射出される超音波により、上、中、下層の水粒子速度を計測している（図-1）。

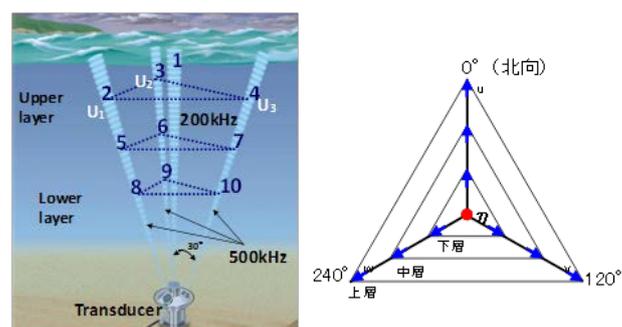


図-1 海象計の概略図

水粒子速度を計測する超音波の水平射出角度は北を0°とした時計回りで0°、120°、240°である。これらのデータのうち水面変動から有義波高と周期を、水面変動及び上層3方向の水粒子速度から波向および方向スペクトルの推定を行う。なお、今回の観測値

の方向スペクトル推定にはベイズ型モデルによる方向スペクトル推定法を用いた。

荒天時には砕波による水面付近への気泡の混入が原因で超音波の乱反射が発生し、水面変動が取得できない場合がある。そのような場合については同時に取得している水圧変動を用いることにより方向スペクトルの推定が可能と考えられる。そこでまず、実際には欠測のない2007年7月の室津を対象に、水面変動が取得できなかった場合を想定し、水圧変動を用いて方向スペクトルの推定を行った場合の推定精度を確認した。図-2の上図はスペクトルのエネルギーにおけるピーク周波数、下図はピーク波向に関して、水面変動を用いて推定した場合との差を誤差として推定誤差の頻度を整理したものである。波向、周波数ともにほとんどのケースで精度良く推定できていることから、暴浪時に水面変動が取得できなかった場合であっても、水圧変動を用いて方向スペクトル推定が可能であることがわかる。

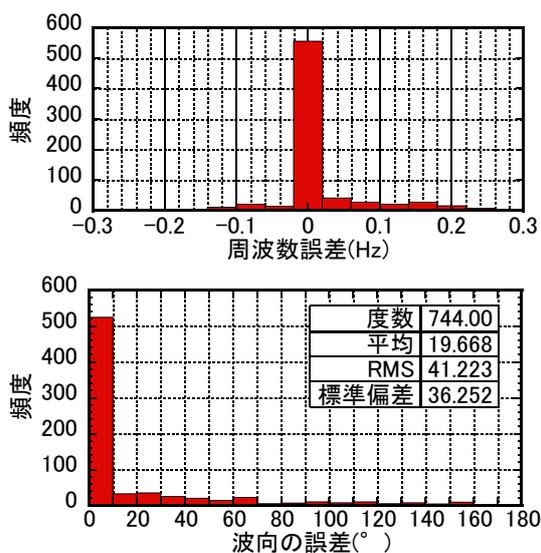


図-2 水圧を用いた方向スペクトルの精度

2-2. 波浪推算モデルによる再現

波浪推算には第三世代波浪推算モデル WAM を用いた。WAM ではエネルギー平衡方程式に基づき、方向スペクトル $S(f, \theta)$ が計算され、 $S(f, \theta)$ を用いた以下の式(3), (4)により、有義波高 H_s 、有義波周期 T_s が算出される。

$$H_s = 4.0 \sqrt{\iint S(f, \theta) df d\theta} \quad (3)$$

$$T_s = \iint f^{-1} S(f, \theta) df d\theta / \iint S(f, \theta) df d\theta \quad (4)$$

ここで、 f は周波数、 θ は方向である。

本概要では2008年2月に北陸地方を中心とする日本海側の広範囲に高波をもたらした期間を対象として検討をおこなった結果を示す。この暴浪により、NOWPHAS では富山において有義波高 9.92m、有義波周期 16.2sec を観測した。また、その他の観測地点においても有義波周期 10 秒を超える波浪が観測された。

対象とした地点は図-3 に示すとおりであり、NOWPHAS の海象計による観測地点のうち、当該期間に欠測が少ない輪島、直江津、富山、金沢、福井、柴山の6地点をとした。



図-3 対象地点

2-3. 再現検討

(1) 波高・周期

直江津における有義波高 (上図) および有義波周期 (下図) について WAM による推算値と NOWPHAS による観測値の時系列を図-4 に示す。

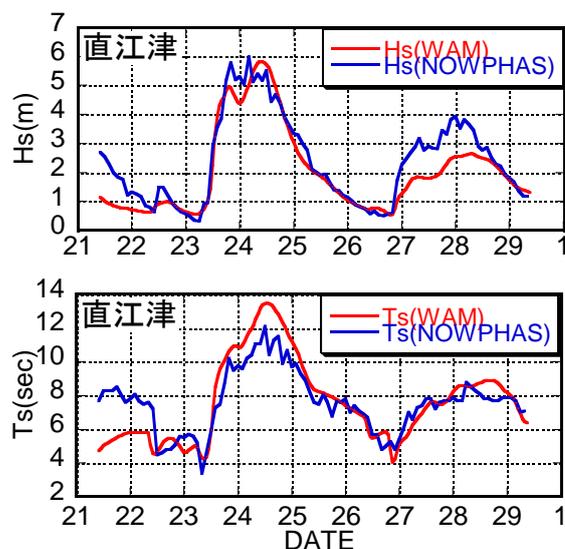


図-4 有義波高および有義波周期の時系列

23日から24日にかけての波高の増大時をみると、有義波高は非常によく一致していることがわかる。一方、周期についてもおおむね精度良く推算されているが24日のピークの付近でWAMによる推算値がやや上回っている。

図-5は推算を行った6地点における有義波高(上図)、有義波周期(下図)について観測値と推算値を比較したものである。有義波高はおおむね精度良く推定できているものの、最大で2m程度の誤差があり、波高が低い場合に観測値が、波高が高い場合に推算値が大きくなる傾向がみられた。富山では観測波高に比べ推算波高が大幅に過小評価となっており、海底地形の再現が不十分であると考えられる。周期についてもおおむね精度良く推定されているが、富山を除くと長周期側では推算値がやや大きくなる結果となった。

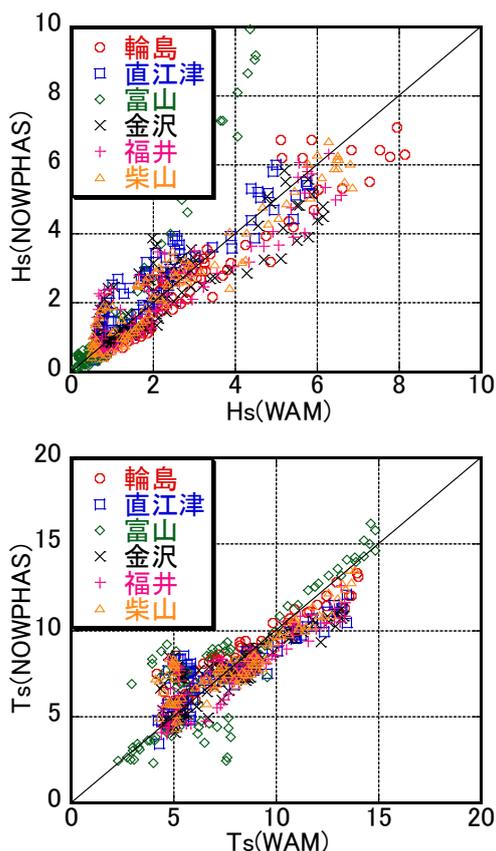


図-5 有義波高および有義波周期の比較

(2) 周波数スペクトルの比較

図-6は直江津で最も高い波高を観測した時刻における周波数スペクトルを示したものである。この時刻における観測値の有義波高：5.51m、有義波周

期：12.1secであり、推算値における有義波高：5.73m、有義波周期：15.9secである。両者を比較すると、スペクトルが最大値を取る周波数はほぼ一致しているが、推算による周波数の最大値が60に対し、観測による周波数の最大値は約40となり、スペクトル値に大きな差が表れていることが確認できた。

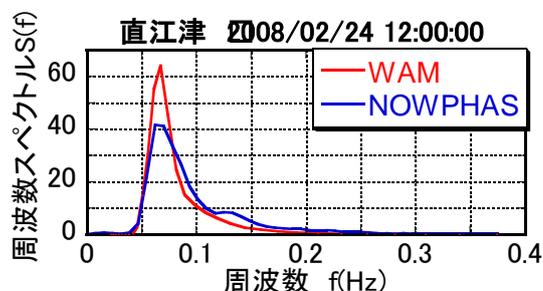


図-6 周波数スペクトルの比較

ここでは示していないが、周波数スペクトルの時間変化による発達過程をみると、WAMによる周波数スペクトルの方が低周波数側へのシフトが数時間早く、一山型の滑らかな発達をしている。また、NOWPHASによる周波数スペクトルについては減衰がWAMよりも速くなることが確認できた。

(3) 方向スペクトルの比較

図-6と同時刻の直江津における方向スペクトルを図-7に示す。上図がWAMにより推算された方向スペクトル、下図が観測から推定された方向スペクトルである。

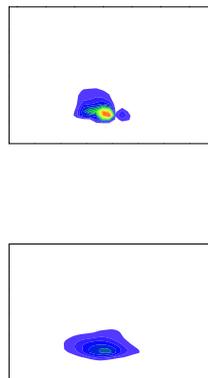


図-7 方向スペクトルの比較

波高にはそれほど差はないものの、スペクトルの値を比べると、推算における方向スペクトルはエネ

ルギーピークが鋭くとなっているが、観測から推定された方向スペクトルは方向成分に均されていることがわかる。

方向スペクトルの時間変化については、スペクトルの発達につれて、エネルギーピークが西～北西から、北側へシフトする様子が WAM でも再現できているが、WAMの方が数時間早く移動することが確認できた。また、NOWPHASによるスペクトルが減衰している時間帯にWAMのスペクトルでは二山できており、WAMの減衰が遅い原因であると思われる。

方向スペクトルにおけるエネルギーピークの周波数の逆数をピーク周期、エネルギーピークの波向をピーク波向とし、直江津におけるピーク周期(上図)とピーク波向(下図)の観測値と推算値の時系列を比較したものを図-8に示す。

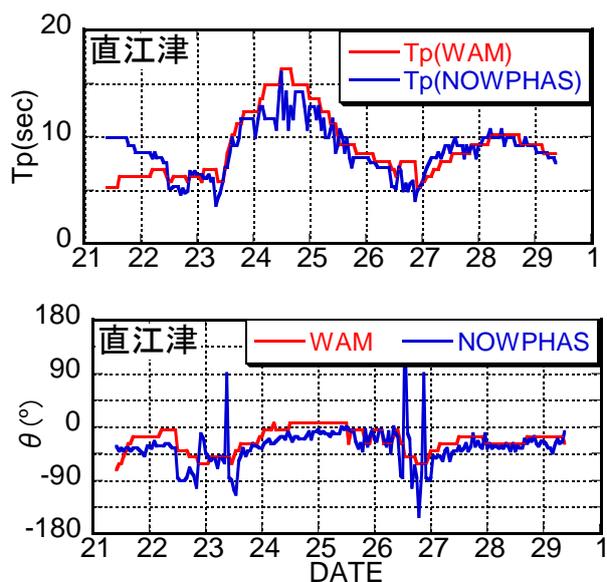


図-8 エネルギーピーク周期および波向の時系列

ピーク周期のグラフをみると、有義波周期による比較と傾向は一致しているが、有義波では過大評価されていたWAMによる推算値が観測値にほぼ一致する結果もみられる。ただし、観測による方向スペクトルは、推定精度が安定しておらず、有義波周期よりも差が大きくなる点もみられる。また、ピーク波向についても欠測のため精度が悪い期間を除けば、WAMによるピーク波向がやや北向きになるもの、おおむね傾向は一致することがわかる。

図-9は6地点におけるピーク周期の誤差を表している。なお、輪島に関する観測値は水面変動に欠測を含んでいたため水圧を用いて方向スペクトルの算定を行った。これをみると、有義波周期による比較と同様の結果となっているが、ばらつきは大きくなっていることがわかる。

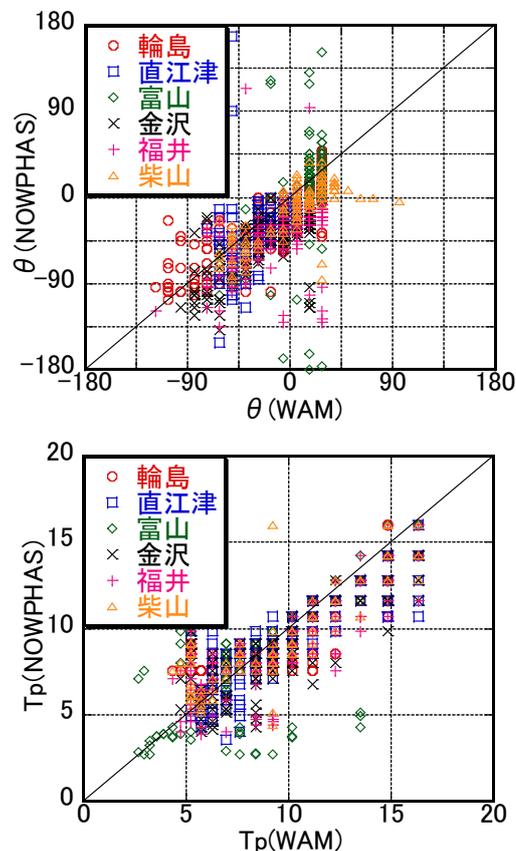


図-9 ピークにおける周期および波向の比較

3. 結論

周期の長い波浪の発生事例を対象として、波浪推算モデルによる再現計算を行い、波浪スペクトルの推定精度を確認した結果、以下の知見が得られた。

- WAMにより推算された有義波周期はおおむね良好な精度となっているが、観測値よりもやや大きくなる傾向にある。
- 周波数スペクトルおよび方向スペクトルは、WAMによる推算値のエネルギーピークが高くなる傾向にある。
- 方向スペクトルのエネルギーピーク周波数は観測値ではばらつくものの、推算値と概ね同程度の値が推定されており、有義波よりも精度良く推定できる時間帯も確認された。