航走出会い波浪の特性

徳長 航*・桑島 進**

Characteristics of the Measured Waves by a Ship under Way

Wataru TOKUNAGA and Susumu KUWASHIMA

Abstract

The shipborne-type wave height meter-using microwave Doppler radar is capable to measure the ocean waves while she is steaming. Instruments of this type are already installed on more than 100 ships. The encountering wave period measured by the instrument onboard depends on the ship's speed and the course. But it has seemed that ship's speed and course do not affect the wave height. However, there are some recent reports that the wave heights measured at the almost same time in various ship's course are different from each other. So, we investigated the characteristics of waves measured by a ship under way using the numerical simulation technique.

In the result, it became clear that the frequency distribution of the wave heights is affected according to the encountering period of component waves. The significant wave height is defined as the mean of the highest one-third of the waves. So, It is not strange that the significant wave height of following waves is smaller than that of the head waves. On the other hand, the value of estimated significant wave height, which is derived from the wave spectrum, is not generally affected by ship's speed and course.

1. はじめに

大洋における波浪観測は依然として乗組員による目視観測が主体となっている。しかし目視観測は人間の主観に左右され易いためその精度については疑問が付きまどってきた。さらに近年、乗組員の人数削減や外国人船員化の影響を受けて気象庁への観測報告数は年々減少の一途を辿っている⁽¹⁾。このようなマイナス面を解決する一手段として客観的な値を自動計測する船用波高計の開発が叫ばれてきた。この声に応えるべく開発されたマイクロ波式波高計⁽²⁾は船舶が航走しながら波浪を計測できる利便性を持っているところから本邦内外の大学や官庁船などを中心にすでに100隻以上の装備実績があり、装備船の数は今後とも増加するものと思われる。

ただし、当該波高計によって得られる波浪の周期は船舶が航走しながら計測することから、船速および波の進行方向に対する船首方向によって異なる“出会い周期”である。一方、波高は航走する船舶

に対する出会い波高とはいえ、海面の垂直変動だけを計測していることから船速や船首方向によって異なることは無い“絶対波高”と思ってきた。ところが、最近に至り当該波高計による波高値が、波向きに対する船首方向によって異なる傾向があるとの報告が寄せられた^(3,4)。不規則海面に対する波高は一般に有義波高を指しており、先の報告は有義波高の方向別相違を指摘したものである。すなわち、この報告は波高を含む不規則波形の統計的性質が、航走出会い波浪の場合は方向別に異なって算出される可能性を示唆している。そこで、波向きによる計測波高の差を明らかにすべく出会い波浪の統計的性質について改めて数値シミュレーションを用いて検討した結果、算出方法による統計値の差とその特性が明らかとなったのでここに報告する。

2. シミュレーション波浪の発生方法

外洋波のスペクトルの標準形として使用される Pierson-Moskowitz (以下、P-M) スペクトル⁽⁵⁾を

* 学生会員 東京商船大学大学院 (〒135-8533 江東区越中島2-1-6)

** 名誉会員 東京商船大学 (〒135-8533 江東区越中島2-1-6)

用いて、出会い波の方向、船速などの違いによる波形の得られ方のシミュレーションを行った。この得られたシミュレーション不規則波形からゼロアップクロス法やスペクトル解析等の方法により、有義波高や出会い周期などを計算し、それらの信頼性や精度について比較解析を行った。

2.1 P-Mスペクトル

外洋の風成波発生域内で十分に発達した風波スペクトルとかなりよい一致を示しているP-Mスペクトルを用いてシミュレーションを行った。P-Mスペクトルとは、十分に発達し吹送距離には無関係になったと考えられる波浪スペクトルを風速の関数として一般化したものであり、P-Mスペクトル $\phi(f)$ は、

$$\phi(f) = k_1 f^{-5} \exp(-k_2 f^{-4}) \quad (2.1)$$

$$k_1 = 8.1 \times 10^{-3} g^2 / (2\pi)^4 \quad (2.2)$$

$$k_2 = 0.74 \left[\frac{g}{2\pi U} \right]^4 \quad (2.3)$$

のように表される。ここで g は地球重力加速度($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)である。本来のP-Mスペクトルの風速は $U_{19.5}$ であり、これは海面上19.5 mにおける風速である。今回のシミュレーションの場合は単に外洋での波形を得るために用いたので、 $U_{19.5} = 10 \text{ m/s}$ としてシミュレーションを行った。

2.2 波形の作成

先のP-Mスペクトルから時系列波形 η を得るには、風速 U に対応するP-Mスペクトルのピーク周波数から高周波側、低周波側共にパワーがピーク値の1000分の1を示すまでの周波数を0.001 Hzごとに分割し、それぞれの分割領域周波数に対する成分波を作る。シミュレーションにおける風速10 m/sのスペクトルに対するピーク周波数は0.137 Hzであり、最低周波数は0.080 Hz、最高周波数は0.699 Hzであった。周波数間隔は0.001 Hzであるから合計620個の成分波を作ったことになる。一つずつの成分波 η_n は、

$$\eta_n(t) = a_n \sin(2\pi f_n t) \quad (2.4)$$

のようにして作る。ここで n は周波数分割領域における n 番目の区分を示す。P-Mスペクトルの全スペクトルエネルギーは、負の周波数部分を折り返したワンサイドスペクトル (One Side Spectrum) を表したものであることから、成分波の片振幅 a_n は、

$$a_n = \sqrt{2\phi(f_n) \times \Delta f} \quad (2.5)$$

と表される。ここで Δf は周波数分割幅 (本シミュレーションにおいては0.001 Hz) である。この成分波をランダムな位相差 ε_n を用いて、

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N a_n \sin(2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (2.6)$$

のようにランダムに合成させることにより不規則波の時系列 $\eta(t)$ を得る。この不規則波時系列は海面の固定点で計測した時に得られるであろう波形を示しており、ここでは原波浪と呼ぶことにする。(2.6)式における重ね合わせ数 N は、0.001 Hz毎に作った成分波の数620である。シミュレーション波としては上記の時系列波形 $\eta(t)$ を用い、サンプリングタイム0.1秒ごとに抽出点数を 2^{14} 個に相当する16,384点、すなわち発生時間を27.3分に設定した。この波浪に航行船の針路に応じた速力を加えることにより、波形の変化、算出される有義波高、出会い周期の変化を解析した。

2.3 船速合成

先に発生させた原波浪に向波と追い波それぞれにつき、船速を合成させて、向波と追い波での出会い波形を得る。合成の方法としては、まず原波浪の各成分波毎の波速 C_n (m/s) をそれぞれの成分周波数 f_n を用いて、

$$C_n = \frac{g}{2\pi f_n} \quad (2.7)$$

により求め、船速 v (m/s) の船舶が会おうであろう出会い成分波の周波数 f_{En} をドップラー効果の次式、

$$f_{En} = f_n \left| \frac{C_n - v \cos \theta}{C_n} \right| \quad (2.8)$$

により新たに求める。ただし、 θ は船首方向と波の進行方向との角度差である。船速と波向きによっては、出会い成分波の周波数が計算上、負になる場合があるが、物理的に負の周波数はないため絶対値をとるものである。この各出会い成分波の周波数を用いて、上記(2.4)式と同様にそれぞれの出会い周波数毎の成分波 η_{En} を

$$\eta_{En}(t) = a_n \sin(2\pi f_{En} t) \quad (2.9)$$

のようにして作り、それを再び上記(2.6)式と同様に合成した、

$$\eta_E(t) = \sum_{n=1}^N a_n \sin(2\pi f_{En} t + \varepsilon_n) \quad (2.10)$$

が求める出会い不規則波浪となる。横波では船速を合成しても(2.8)式の $\cos \theta$ の値が0になるので船速の影響は受けず、周波数の変化は起こらないで原波浪の波形データと同じ形になる。一例として、船速12 k't、向波(上段)と追い波(下段)の場合のシミュレーション波形を図1に示す。向かい波と追い波では、波高に差は無さそうであるが、出会い周期は異

なっているのがわかる。

図1 シミュレーション波形の一例

3. シミュレーション波形の解析

3.1 波 高

今回の解析では航走出会い波浪に対し、波高 H_s を次の3種類の方法で求めた。一つ目は一般に不規則波形からの波高算出に用いられているゼロアップクロス法による1/3最大波高である。この1/3最大波高はSverdrupとMunkにより有義波高と定義されている⁽⁶⁾。ゼロアップクロス法は平均水面に対して波形の値がマイナスからプラスになる交点をゼロアップクロス点とする。そして一つのゼロアップクロス点から次のゼロアップクロス点までを一波として波形を取り扱う。この一波の時間間隔を周期、その一波における最大値と最小値の差を波高と定義する方法である。そしてゼロアップクロス法により得られた全波高の中で大きい方から三分の一の数の波高を取り出して平均した値を1/3最大波高 $H_{1/3}$ と定義するものである。

二つ目は、得られた出会い波形をフーリエ変換して再びスペクトルで表し、その全スペクトルエネルギー（波形データの分散 η^2 に等しい値）から換算して有義波高を推定した波高（以下、スペクトル換算波高）であり、波の全スペクトルエネルギーを m_0 とすると、

$$H_s = 4.004 \sqrt{m_0} \quad (3.1)$$

$$\text{ただし、} m_0 = \int_0^\infty \phi(f) df = \eta^2 \quad (3.2)$$

の統計的関係式⁽⁷⁾から得られるものである。

三つ目は波高計の表示器に示すための表示用の波高（以下、表示波高と記す。）で、先の二つのように一定時間の観測した後の統計計算によって得られる波高と異なり、この表示波高は時々刻々と変化するそれまでの波高から有義波高を推定計算し、リアル

タイムに表示するものである。表示波高はコンデンサと抵抗の簡単な組み合わせによる電気的平均回路で構成表示されるが、それを数式化すれば、

$$H_s = 10 \bar{\eta}_{>0} \quad (3.3)$$

$$\text{ただし、} \bar{\eta}_{>0} = \frac{1}{\tau} \int_{-\tau}^0 \eta_{>0}(t) \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) dt \quad (3.4)$$

$\eta_{>0}$: 波形データの正の部分

$\bar{\eta}_{>0}$: $\eta_{>0}$ の平均

τ : 時定数

T : 平均時間

により得られる有義波高の推定値である⁽⁸⁾。上式における有義波高は時定数を平均時間の半分程度にすることにより、実用上十分な精度で推定表示できるので、今回は $T=6$ 分、 $\tau=3$ 分とした。つまり、現時点からさかのぼって6分間の波形データを考慮して、現時点の波高が算出されることになる。また、先の二つの波高と異なり一連のシミュレーション波形に対し、連続的に波高値が算出される。よって先の二つの波高値と比較するために、スタート後6分以降の定常状態になった時点から残りの21.3分間の表示波高値の平均を持ってその一連の波形データを代表する表示波高とし、同時にその標準偏差（以下、表示波高の標準偏差）を求めた。

そして、この3種類の波高と標準偏差を計算させる動作を一つの船速に対して、向波、追い波、横波につきそれぞれ異なった出会い波浪の波形で300回ずつ行った。その計算と同時に、ゼロアップクロス法による平均波高も求めた。

図2に波向き別のゼロアップクロス法による有義波高である1/3最大波高のグラフを示す。縦軸は波高(m)、横軸は船速(k't)である。図によれば、向波については船速が増すにつれて僅かながら直線的な減少傾向が見られる。追い波では船に追い越されるような成分の波が増えだす12k'tあたりから極端に波高が小さくなり始めるが、全体を通して減少傾向があるのではなく、値としては船速が8k't付近でやや

図2 有義波高（ゼロアップクロス法による1/3最大波高）

図3 スペクトルからの換算波高

大きめの値を示すが、その後船速の増加と共に小さくなり、20 k't付近で最小となっている。

図3に(3.1)式で定義した波向き別の出会い波浪スペクトルからの換算波高のグラフを示す。縦軸は波高(m)、横軸は船速(k't)である。前節のP-Mスペクトルの(2.1)式と全スペクトルエネルギーの(3.1)式より換算波高 H_s と風速の関係は、

$$H_s = 0.0213 \times U^2 \quad (3.5)$$

U : 風速(m/s)

のように求まる。シミュレーションにおいては風速を $U=10$ m/sに設定したため、(3.5)式による換算波高は2.13 mになるはずであるが、図によれば船速の影響、波の向きにかかわらず、非常によく一致しているのがわかる。また、いずれの波向きにおいてもスペクトル換算波高は図2に示した有義波高に比べて全体的にやや大きめに示している。

図4に波向き別の表示波高のグラフを示す。図によれば、追い波において船速が増すにつれ僅かな増加傾向が見られるが、向波、横波においても船速による変化、波向きによる変化はほとんど無い。また、いずれの波向きにおいても図2に示した有義波高や図3に示した換算波高よりも小さな波高を示している。

図5に表示波高の標準偏差のグラフを示すが、船速が増すにつれ、追い波の標準偏差は大きく増加するが、向波は若干減少する傾向がある。

3.2 出会い周期

出会い周期においても有義波高と同様に3種類の

図4 波高計における表示波高

図5 表示波高の標準偏差

方法で求めた。一つ目は本来の定義⁽⁶⁾に従ったゼロアップクロス法による周期である。ここでは、ゼロアップクロス法により得られた、1/3最大波の出会い周期の平均(以下、有義波出会い周期)とすべての出会い周期の平均(以下、平均出会い周期)の両方を求めた。

二つ目は、出会い波浪スペクトルピークからの周期(以下、スペクトルピーク出会い周期)である。前節で述べたように出会い波形からフーリエ変換してスペクトルを平滑化し、最もパワーの強い周波数、つまりピーク周波数の逆数から得た周期である。

三つ目は、表示出会い周期である。表示波高と同様に波高計の表示に使用されているもので、先の二つのように一定時間の観測した後に統計計算によって得られる出会い周期と異なり、この表示出会い周期は時々刻々と変化するそれまでの出会い周期から現時点での出会い周期が推定計算され、リアルタイムに表示するものである。この表示出会い周期 T_n は、

$$T_n = 0.1 T_0 + 0.9 T_{n-1} \quad (3.6)$$

T_0 : 直前の個別波の周期

で表される。そして、表示波高の場合と同様に、有義波出会い周期やスペクトルピーク出会い周期と異なり一連のシミュレーション波形に対し、一つの出会い周期が算出されるわけでない。よって一連の波形において得られたすべての表示出会い周期の平均をもってその一連の波形を代表する表示出会い周期とし、同時にその標準偏差(以下、表示出会い周期の標準偏差)を求めた。また、この表示出会い周期は、式からもわかるように現時点の波形が平均海面を切った時、つまりその時点での一波の周期が確定した時にのみ、新しい周期を算出、更新表示するようになっている。

波高と同様に、この3種類四つの出会い周期と標準偏差を計算させる動作を一つの船速に対して、向波、追い波、横波につきそれぞれ波形を変えて300回ずつ行った。

図6 向波における出会い周期

図6に向波における3種類四つの出会い周期のグラフを示す。縦軸は周期(秒)、横軸は船速(k/t)である。図によれば、スペクトルピーク出会い周期が最も長く、次に有義波出会い周期、最も短いのは平均出会い周期と表示出会い周期で、ほぼ同じ程度であった。向波であるから、全体として船速が増すにつれ出会い周期は短くなっていく。ここでスペクトルピーク出会い周期が他の出会い周期に比べ長くなるのは、スペクトルのピーク周期 T_p と有義波周期 $T_{1/3}$ との関係によるものである。観測データに基づいて導かれた関係式には、

$$T_p \div 1.09 T_{1/3} \quad (3.7)$$

などがあり⁽⁹⁾、特に風浪とうねりが重なってくると、周期分布の広がりは大くなり、(3.7)式における係数も大きな幅を持つ。今回のシミュレーションの場合を船速の影響がない横波で計算した結果、係数は1.18となった。また、有義波周期と平均周期 $\bar{T}$ の関係も同様に大きな幅を持つが、平均的な関係としては、

$$T_{1/3} \div 1.18 \bar{T} \quad (3.8)$$

が成立すると報告⁽⁹⁾されている。この係数についても同様に今回のシミュレーション結果から計算したところ係数は1.20となり、ほぼ同じ結果となった。これらを考慮すると図6においてスペクトルピーク出会い周期が他の周期に比べ長めに示されたのは当然の結果とも言える。

図7に追い波における3種類四つの出会い周期のグラフを示す。同じく縦軸は周期(秒)、横軸は船速(k/t)である。図によればいずれの場合も10k/tまでは出会い周期は長くなっている。しかし、その後船速が上がるにつれスペクトルピーク出会い周期は長くなるのに対し、有義波出会い周期は14k/tをピークに、残りの2つの周期は10k/tをピークに短くなって

図7 追い波における出会い周期

いく。このことを一例として図8に示すように船速が24k/t追い波のシミュレーション波形(下段)から考察すると、全体を通して長周期が存在しているが、ゼロアップクロス法では細かな変動しか読みとれていないことがわかる。反対に、スペクトルピーク出会い周期は、フーリエ変換で解析可能な最も低周波にピークがあり(上段)、図7には示していないが、スペクトルピーク周期は24k/tで最長1000秒を越える周期を示し、その後、船速の増加と共に短くなる。

図8 船速24k/t追い波のスペクトルとシミュレーション波形
(上段: スペクトル, 下段: シミュレーション波形)

図9に波向き別表示出会い周期の標準偏差の300回シミュレーションにおける平均を示す。縦軸は周期の標準偏差、横軸は船速(k/t)である。向波では図6に示したように表示出会い周期が短くなるに伴って、表示出会い周期の標準偏差も小さくなる傾向がある。追い波では図7に示したように10k/tで周期が最も長くなるが、出会い周期の標準偏差は12~16k/tで最も大きくなる。これらの船速でのシミュレーション波形を調べたところ、出会い波形も8k/tまでは原波浪の波形に似た非常に滑らかな波形であるのに対し、10k/t以降では細かな波形変動が現れてくる。特に12~16k/tでは本来の周期であるべき長い周

図9 表示出会い周期の標準偏差

図10 有義波高の標準偏差

期でゼロアップクロス点を通るものと細かい周期でゼロアップクロス点を通るものの混在が激しい。そしてスペクトルエネルギーは小さいが、かなりの高周波の成分を持った波が存在していた。結局、表示出会い周期といえどもゼロアップクロス法を用いているので、様々な周期の影響を受けることになる。このため出会い周期の標準偏差が大きくなったと思われる。また、このことは船舶に追い越される波の成分と船舶を追い越す波の成分が両方とも多く混在していることを表し、実時間での周期表示を難しくさせていると思われる。

4. 考 察

4.1 波 高

3種類それぞれの算出方法や波向きの違いにより、波高の値はまちまちであったが、スペクトル換算波高が最も針路、船速に影響されない安定的な値を示した。これは航走海面における波浪のスペクトルエネルギー総和（波形データの分散）は成分波の周波数に関係なく、振幅だけに依存しているためであり、当然の結果とも言える。

これに対し、ゼロアップクロス法による有義波高（1/3最大波高）については、観測時間内における成分波間の相対出現回数に関係するため、周期の長い波は出現回数が少なくなり結果としてその成分波高は有義波高に反映されなくなる。特に船速が卓越波の波速に近い追い波においては卓越成分波の出現回数が少なくなり、有義波高は正しく算出されていないと言える。図10にゼロアップクロス法による1/3最大波高の300回における標準偏差を示す。図によれば、追い波の場合、船速によっては有義波高が大きく変動することがわかる。これは、実船計測において追い波では計測波高（有義波高）のばらつきが大きいという報告⁽⁴⁾と一致している。

また、スペクトル換算波高は波向きにかかわらず、全体を通してゼロアップクロス法による有義波高よりも波高値が大きかった。このことを横波つまり船

速の影響がない場合で考えると、ゼロアップクロス法による有義波高と比べ約4.5%ほど大きい。この大きさの関係から(3.1)式の換算係数を計算すると約3.82となる。このことは(3.1)式において、有義波高 H_s を求める換算係数は実測波形については4.004ではなく、3.8の方が妥当のようであるという報告⁽¹⁰⁾とほぼ一致している。

表示波高は、向波の時はいずれの場合もほとんど変化がなかったが、追い波で船速が増してくると僅かに大きくなる傾向がある。ただし、スペクトル換算波高やゼロアップクロス法による有義波高のいずれと比べても波高値を小さく示している。このことは(3.3)式における係数が(3.1)式をもとに求められていることから当然の結果と言える。したがってゼロアップクロス法による有義波高に合わせるためには(3.3)式の表示のための換算係数を10ではなく、1割程度大きくすべきことを示している。

また、追い波の表示波高の標準偏差も船速が増すと大きくなる。これは、波高計の表示器を見た時によって、実際の波高とはズレがある場合が考えられる。このズレを減らすためには、表示波高の標準偏差の大きさに応じて、(3.4)式の時定数や平均時間を変える等の操作をする必要がある。

4.2 出会い周期

出会い周期においても3種類それぞれの算出方法や波向きの違いにより、その値はまちまちであったが、向波、追い波とも平均出会い周期と表示出会い周期はほぼ同じであった。一方、スペクトルピーク出会い周期において、向波の場合、他の方法による出会い周期と比べてやや周期を長めに示す傾向が見られた。このことは第3章、第2節で述べた通り、スペクトルのピーク周期と有義波周期と平均周期の関係で、(3.7)式と(3.8)式によるものと思われる。

図11に向波における船速毎のゼロアップクロス法での周期別平均頻度を示す。これは一連の波形中にゼロアップクロス法により得られた周期の頻度を表したもので、それぞれの船速につき300回行った平均

図11 向波におけるゼロアップクロス法での周期別平均頻度

である。つまり、一連のシミュレーション波形において何秒の周期がどのぐらいの頻度で発生するのかを調べたものである。縦軸は平均頻度、横軸は周期(秒)、一番手前が船速2k'tの場合で2k'tずつ順に一番奥が24k'tの場合である。向波であるから、船速が増すにつれて出会い周期は短くなるのは当然である。しかしここで注意すべきは、この図の速度別全平均がゼロアップクロス法による平均出会い周期とすることである。図によれば、船速により頻度は異なるが、頻度のピークが二カ所ある。0秒に近い周期は細かな雑音成分のような波形が平均水面を切って上下しただけで、本来の周期とは言いがたい。つまり、本来の卓越波の周期は長周期側のピークにあり、ゼロアップクロス法による平均出会い周期ではそれを特定できていない。

さらに、追い波でも同様であり図12は追い波における船速毎のゼロアップクロス法での周期別平均頻度であるが、図によれば、特に船速が増し細かな波形が多く存在してくると、頻度のピークは0秒付近の一カ所に集まってくる。そのため完全に本来の卓越波の周期を見つけることはできていない。追い波中(特に船速が速い場合)において、ゼロアップクロス法は有義波高(1/3最大波)と同じく出会い周期を算出するのに適していないと言える。また、このことはゼロアップクロス法を用いている表示出会い周期にも言えることで、ゼロアップクロス法により検出された短い周期成分の影響を多く受けて表示出会い周期も短くなると言える。

ゼロアップクロス法により出会い周期を算出する場合、1/3最大波における出会い周期の平均、つまり有義波出会い周期を採用すると、向波では図6で示した有義波出会い周期は、図11に示した長周期側のピークの周期に比較的近い値を示す。追い波でも図7で示した有義波出会い周期は、図10に示した長周期側のピーク周期が確認できる14k't程度までは比

図12 追い波におけるゼロアップクロス法での周期別平均頻度

較的近い値を示す。

5. まとめ

本研究においては、航走出会い波浪の特性を明らかにするために計算機内に不規則波を発生させ、その不規則波に対して船を走らせた場合に出会うであろう出会い波浪を各方向毎に比較した。ただし発生させた不規則波は周波数スペクトルの成分波を重ね合わせたいわゆる長波頂波であり、より実際の海面波に近い短波頂波とは異なっている。この意味では実際の海面波より方向性を強調したことになるが、方向別の違いを鮮明にする目的は達せられた。

結果として、航走出会い波浪の代表波高である有義波高を出会い波形からゼロアップクロス法による1/3最大波高で定義することは追い波状態で過小評価となる恐れから不適切である。むしろ、出会い波浪スペクトルの積分値(あるいは波形データの分散)から換算される波高をもって代表波高とした方が針路、船速に影響されず、安定的に原波高(固定点有義波高)に近い値が得られる。また、波高計に組み込まれた表示波高回路の指示値は波形によって若干変動するものの平均的には針路、船速に影響されず原波高に近い値を示すことが分かった。

出会い周期に関しては有義波周期、スペクトルピーク周期、表示出会い周期とも針路、船速に応じて値が変わることは当然あるが、特に追い波状態における周期については各々の周期に船速に応じた相違が表れてくる。出会い周期が原波浪周期(固定点波浪周期)を表せない以上、いずれの出会い周期も正しいとは言えず、それぞれの算出方法に応じた当然の結果を示す。ただし、「追い波状態で船速が波速と同程度になる出会い周期は無限大に近づくのではないか」という直感に近い値を示す周期は、スペクトルピーク周期である。この意味で出会い周期には

スペクトルピーク周期を採用した方が納得しやすい。しかしながら、将来的には波向きを判別することによる原波浪周期の推定に努力すべきであろう。

参 考 文 献

- (1) 桑島進：特集波浪データ「目視による波浪の観測」, TECHNOMARINE (日本造船学会誌), 第831号, pp. 11-19, 平成10年9月.
- (2) 安田明生・金居康文・桑島進：「マイクロ波を用いた船用簡易波高計の開発」, 日本航海学会論文集, 第66号, pp. 31-38, 昭和57年2月.
- (3) 坂元賢治・小幡紀一：「マイクロ波式波高計の改良について」, 神戸海洋気象台部内研究発表会概要, 2p, 平成11年11月.
- (4) 矢吹英雄：「マイクロ波式波高計の使用結果について」, 日本航海学会航法研究部会 (AUNAR) 発表概要, 2p, 平成10年12月.
- (5) Pierson, W. J. and Moskowitz, L.: A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii, J. Geophys. Res., No. 69, pp. 5181-5190, 1964.
- (6) Sverdrup, H. U. and Munk, W. H.: Wind sea and swell. Theory of relation for forecasting, U. S. Navy Hydrogr. Office, Washington. No. 601, 44p., 1947.
- (7) Longuet-Higgins, M. S.: On the statistical distribution of the height of sea waves, J. M. R., Vol. 11, pp. 245-266, No. 3, 1952.
- (8) Yasuda, A., S. Kuwashima and Y. Kanai: A

ship borne-type wave height meter for ocean going vessels, using microwave Doppler radar, IEEE. J. of Ocean Engineering, Vol. OE-10. No. 2, pp. 138-143, April 1985.

- (9) 山口正隆：「重回帰分析に基づく波浪の統計的特性の検討」, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 139-143, 昭和61年.
- (10) 合田良實・高山知司・岸良安治：「有義波高指示計の理論およびその実用化について」, 港湾技研資料, 運輸省港湾技術研究所, No. 238, 12p, June 1976.

質 疑 応 答

梅田直哉 (大阪大学)： $\omega_e=0$ 付近の波は時系列上で一定に近くなり、有限時間のrealizationではゼロアップクロスがなくなります、この点がゼロアップクロスで有義波高がずれてくる原因でしょうか。

桑島 進：質問者の例は特別な一因として考えられます。一般的な原因としては成分波の出会い周波数 ω_e が0に近づく(出会い周期が長くなる)ほどその成分波の出現回数が観測時間内において少なくなり、その成分波高が有義波高算出に反映されなくなることです(本文「考察」参照)。したがってゼロアップクロスが無くなる特別な例でなくても、少なくなるだけで有義波高はずれてきます。図8のスペクトル図に示すようにエネルギー(波高)の大きい卓越成分波の出会い周波数 ω_e がゼロに近くなるほど有義波高の減少度合いが増すことになります。