

浅海域の風波の水粒子速度に関する研究

瀬山 明*・木村 晃**・国友慶記***

1. 緒 言

著者らはここ数年来、ゼロアップクロス法で定義した不規則波の個々の波の力学特性について種々の検討を行ってきた。その結果、底面摩擦による波高減衰のように規則波とほとんど同じ特性を持つ場合もあれば、碎波現象のようにかなり異なる特性を示すこともあることが明らかになってきた。この研究はやはり、ゼロアップクロス波の力学的な特性を解明する研究の一環として行ったもので、水粒子速度に関して実験的な検討を行ったものである。

一方向に伝播する不規則波の水位変動 $\eta(x, t)$ は一般に次式のように表わされることが多い。

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(k_n x - \sigma_n t + \varepsilon_n) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 a_n , k_n , σ_n , ε_n はそれぞれ成分波の振幅、波数、角周波数、初期位相角である。また、個々の成分波は微小振幅波と同じ特性を持つと仮定されることが多く、例えば水平水粒子速度 $u_n(x, z, t)$ は

$$\begin{aligned} u_n(x, z, t) &= a_n \sigma_n \frac{\cosh k_n(h+z)}{\sinh k_n h} \\ &\quad \times \cos(k_n x - \sigma_n t + \varepsilon_n) \\ &= \sigma_n \frac{\cosh k_n(h+z)}{\sinh k_n h} \eta_n \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

のように表わされる。ここに h は水深であり、 z 軸は静水面より上向きに正である。したがって、式 (1) で表わされる不規則波の水平水粒子速度 $u(x, z, t)$ は次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} u(x, z, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sigma_n \frac{\cosh k_n(h+z)}{\sinh k_n h} \\ &\quad \times \cos(k_n x - \sigma_n t + \varepsilon_n) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

不規則波の内部機構の測定は非常に困難であるので、式 (1)~(3) の検証は必ずしも十分行われているとはいえないが、超音波流速計を用いた Taira¹⁾、土屋・山口²⁾ および岩垣・酒井・石田³⁾ の研究をあげることができる。各研究者の共通した結論は式 (1)~(3) の関係は

そのまま、もしくは若干の補正をほどこすことによりほぼ成立するとしていることである。しかしながら、これらの研究は主に非線型性の弱い波を対象としたものであり、斜面上や水深の小さな領域での検討は必ずしも十分でない。浅海域においては不規則波も波形が非線型な特性を有するため、式 (1)~(3) のようにすべての成分波を free wave と仮定した取扱いはいできない。しかしながら、現状では非線型性を有する不規則波の内部機構の算定方法は確立されておらず、これにかわるものとしてゼロアップクロス法等波別解析法による内部機構の推定が行われているに過ぎない。元来、ゼロアップクロス法は明確な力学的根拠を持たない一種の便宜的な方法であるから、この方法による解析の妥当性あるいはもし可能であるとした場合にはいかなる波動理論を適用すべきか等の問題を実験的に検討する必要がある。そこで、この研究では浅海域の風波の水粒子速度を対象としてこの点の検討をおこなう。

2. 実験装置および方法

実験に用いた水槽は長さ 25 m、幅 0.6 m、深さ 1 m の風洞水槽であり、水槽の終端部には 1/10 勾配の鋼製スロープを設置した。水槽の終端部より 7 m の点に風抜き口を設けた。したがってここで用いた波への風圧効果は無視できる程度である。また、風波の方向分散特性を除去するために、後述する各測点の前後 1.5 m の間に幅 10 cm 間隔の波切り板を設置して、この区間内では波が直進するようにした。水位変動および水粒子速度は水深 40 cm の一様水深部 (測点 A) と斜面上の水深 30 cm (測点 B)、20 cm (測点 C) および 10 cm (測点 D) の計 4 点で測定した。水粒子速度は、A, B, C の各点では静水面から下方に 5 cm, 10 cm, 15 cm の 3 点、D 点では静水面から下方に 3 cm, 5 cm, 8 cm の 3 点で測定し、水粒子速度の鉛直分布が検討できるようにした。実験は送風を開始して十分定常になってから 2 分間約 150 波の波を測定し、0.04 sec 間隔で digital 化し後の解析に用いた。

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 大日本土木株式会社

3. 実験結果ならびに考察

ゼロアップクロス法による解析に先立ち、式(1)~(3)で示される成分波の概念について検討した。通常、互いに異なる2つの不規則変動に含まれる成分波相互の関係を検討するためにはクロススペクトル解析法がよく用いられる。いま水位変動 η および水平水粒子速度 u のそれぞれのスペクトルを $S_{\eta\eta}$, S_{uu} とし、両者のクロススペクトルを $S_{\eta u}$ とする。このクロススペクトルは実部 $C_{\eta u}$ (Co-spectrum) と虚部 $Q_{\eta u}$ (Quad-spectrum) にわけることができる。この関係を用いると η と u の成分波相互の相関を示すコーヒーレンス Coh , 位相関係を示す位相スペクトル θ ならびに振幅の比を示すゲイン G はそれぞれ次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} Coh &= \frac{C_{\eta u}^2 + Q_{\eta u}^2}{S_{\eta\eta} S_{uu}}, \\ \theta &= \tan^{-1} \left\{ -\frac{Q_{\eta u}}{C_{\eta u}} \right\}, \\ G &= \sqrt{\frac{C_{\eta u}^2 + Q_{\eta u}^2}{S_{\eta\eta}^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ゲインは周波数応答関数と呼ばれることもあり、式(1)~(3)の仮定のもとでは式(2)の右辺の η_n を除く部分が η を u に変換するための周波数応答関数となる。2.で説明したデータに対してクロススペクトル解析を行った結果を示したものが図-1~4である。各図の(a)~(c)はそれぞれ斜面上のB, C, Dの3点の η と静水面下5cmの u を用いて計算したものである。図-1が η のスペクトルであり、若干の over shoot 現象が見られるが、ここで用いた風波が飽和状態に達していることがわかる。図-2は η と u のコーヒーレンスである。もし不規則波に対して式(1)~(3)の仮定が成立すればすべての周波数帯で $Coh=1$ となるはずである。しかしながら、各図とも図-1に示したスペクトルのピーク周波数付近では1に近い値を示しているが、それを少しはずれると低周波側、高周波側とも Coh の値は急激に低下していることがわかる。 $Coh \approx 1$ と見なし得る周波数帯はB点では1.3~2.8 Hz, C点では1.3~2.6 Hz, D点では1.2~3.4 Hzであり、A点でも1.3~2.8 Hzであった。 η のスペクトルのピーク周波数 f_p が各点とも1.56 Hz付近であるので、これらの周波数帯を f_p で正規化すると、 $0.8 < f/f_p < 1.7$ の範囲内では見かけ上 η と u の成分波相互に相関関係が存在する。岩垣・木村⁵⁾, 光易・郭⁶⁾は不規則波に対し式(1)の概

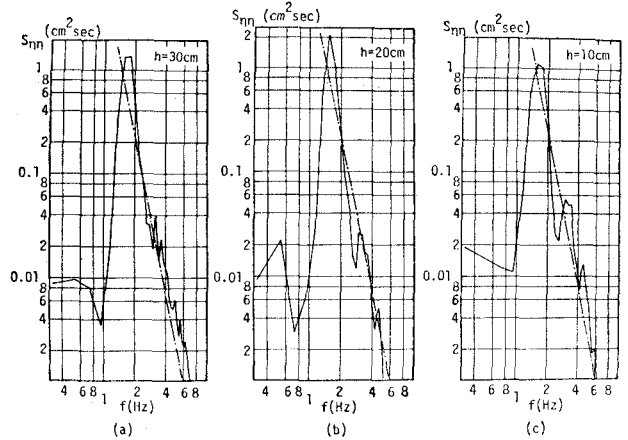


図-1 水面変動のスペクトル

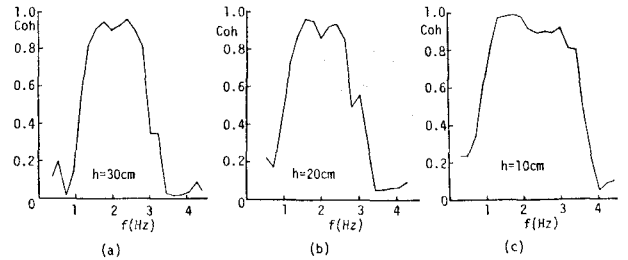


図-2 η と u のコーヒーレンス

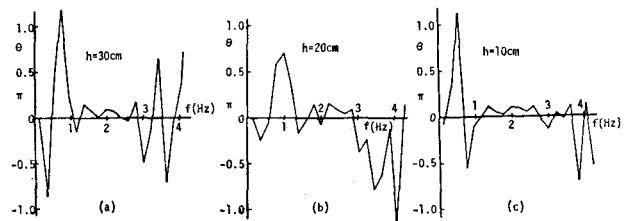


図-3 η と u の成分波の位相差

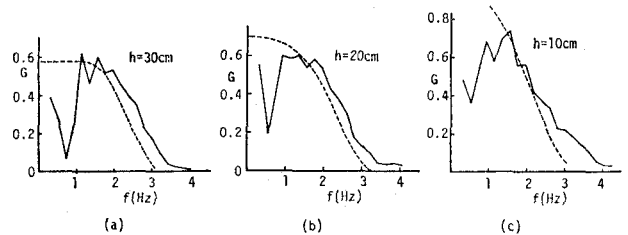


図-4 u の η に対するゲイン

念が成立する周波数帯をそれぞれ $0.75 < f/f_p < 1.5$, $0.8 < f/f_p < 1.6$ としているが、 η と u を用いた解析でもほぼ同じ結果が得られた。図-3は位相スペクトルであり、 η と u の成分波の相互の位相差を表す。各図ともピーク周波数付近では0に近い値を示しているが、 Coh と同様高周波側および低周波側にずれるにしたがってかなり大きく変動していることがわかる。 η と u の

成分波相互に式 (2) の関係が成立するならば θ の値は 0 となる。しかし、 $\theta \approx 0$ と見なし得る周波数帯は B 点では 1.3~2.6 Hz, C 点では 1.3~2.6 Hz, D 点では 1.0~2.6 Hz および A 点でも 1.3~2.6 Hz となっており、 $Coh \approx 1$ と見なし得る周波数帯とほぼ一致していることがわかる。図-4 が u の η に対するゲインを示したもので、図中の破線は式 (2) で示した微小振幅波理論から計算したいわゆる周波数応答関数である。データに若干の凹凸はあるが、各図に共通して、 f_p より低周波側では理論値の方が大きく、 f_p より高周波側では逆に実験値の方が大きくなっている。以上の各図の結果を総合すると $0.8 < f/f_p < 1.7$ の周波数帯以外の成分を何らかの方法で除去し、図-4 の実線と破線が一致するように補正をほどこせば、水粒子速度場は式 (1), (3) から推定できるようである。しかし、ピーク周波数成分に対応する 2 倍周波数成分、3 倍周波数成分等高周波数成分は前述した有意な周波数帯の外にあり、それは 図-1 からわかるように、水深の減少とともに増加している。式 (1)~(3) による解析では free wave といわゆる bound wave の識別ができないため、波形が非線型な特性を持つ場合には誤差を生ずる。図-5 は D 点における η (実線) と静水面下 3 cm の u の実測値 (一点鎖線) ならびに式 (1)~(3) に基づいて η から計算した水平水粒子速度 u' (点線) を示したものである。 u' は η

をフーリエ変換し、各成分波に対して式 (2) の関係を適用しさらに逆変換して算定した。図からわかるように、波高の小さい波では u と u' の差は小さいが、中央部の波形に強い非線型特性の見られる波では、両者の間にかなりの差が見られる。このように、成分波の概念にもとづく解析法は強い非線型性を持つ波に対して適用することには問題がある。したがって浅海域にある不規則波の水粒子速度の算定は他の方法によらざるを得ず、現状ではゼロアップクロス法が最適と考えられる。図-5 の η と u の比較からもわかるように、両者の峰、谷およびゼロクロス点の位置は非常に良く対応しており、このことは他のデータについても同様であった。したがって、ゼロアップクロス法により波を分割し、同時刻の水粒子速度をその波固有のものとして規則波と同様に取扱うことに原則的な問題はない。しかしながら、不規則性の故に個々の波について波形および水粒子速度を波高・周期の等しい規則波と比較することはあまり意味がない。したがってここでは次に述べるように平均波を定義して解析に用いた。すなわち、波高・周期の 2 次元分布をそれぞれの rms 値の 1/5 ごとのランクに区分けし、同一ランクに入る波の数が 10 波以上になるものを選び出した。このようにして選出された波高、周期のほぼ等しい不規則波を、波形のゼロアップクロス点をそろえて重ね合わせて平均し、平均波形を求めた。また水粒子速度

度は個々の波の波形と同時刻のデータを重ね合わせて平均して求めた。このようにして決定した平均波の波形および水平水粒子速度を示したものが 図-6 (a)~(c) である。各図はそれぞれ B~D の各点のデータを 1 例ずつ示したもので、水粒子速度は静水面下 5 cm のものである。実線が平均波のものであり、破線は微小振幅波、点線は Skjelbreia によるストークス波の第 3 次近似解である。ただし、ここで用いた超音波流速計は発信部と受信部の間の平均流速を出力するタイプのものであるため、各図の理論曲線はこの点を考慮して補正してある。

また、理論値は波形、水粒子速度ともピークの位置が一致するようにして示した。各図とも平均波形は不規則波に特有の波形の凹凸が消えて滑らかになっている。B 点のデータでは波形の非線型性が小さく、平均波形と 2 つの理論値との対応は比較的良好である。

微小振幅波理論との対応は (c), (d) 図のように水深の減少

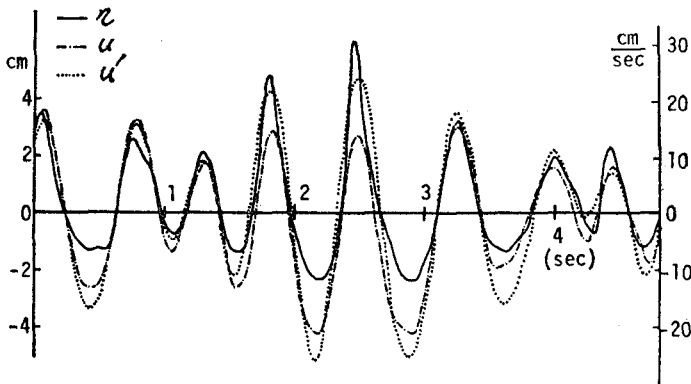


図-5 η , u および u' の時間波形

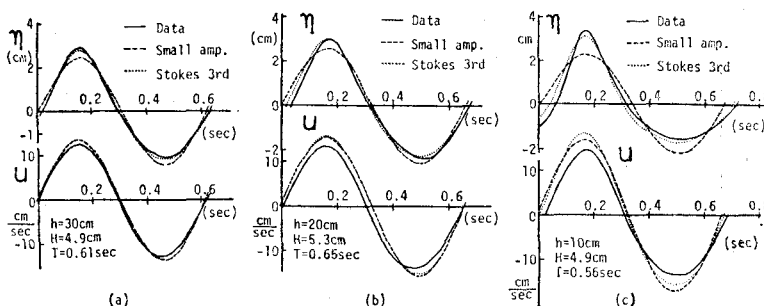
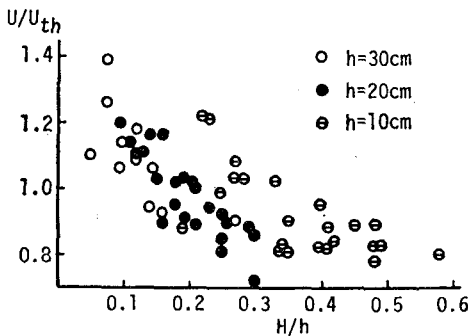
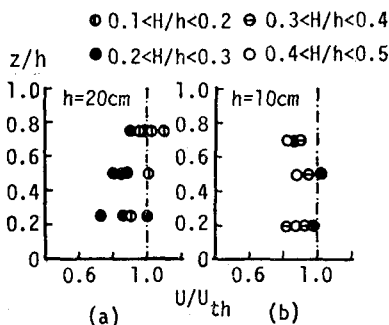


図-6 平均波の波形および水粒子速度

とともに悪くなってくるが、ストークス波理論とはいずれの場合も良好な対応を示した。しかしここでも、岩垣ら⁶⁾が指摘した波形が前かがみになる特性がわずかに見られる。一方、水粒子速度も平均化により滑らかな形状が得られており、峰、谷、ゼロクロス点の位置も波形とほぼ対応している。したがって前にも述べたようにゼロアップクロス法による解析に問題はない。水粒子速度の方は各水深とも強い非線型性は見られず、あわせて示した両理論はほとんど差がない。しかし実測値と理論値との間にはいずれの図においても少しずつの差があり、実測値の方が小さい値を示している。この点について検討するため、実測値の水粒子速度の正向きおよび負の向きの最大値 U_{max} および U_{min} の和 $U = U_{max} + |U_{min}|$ とストークス波理論を用いて同じ定義で計算した理論値 U_{th} との比を求めた。その結果を H/h に対してプロットしたものが図-7である。図中の○印はB点、●印はC点、⊖印はD点のデータである。図中の各データの周期は0.6sec 付近の非常に狭い範囲内に集中しているので、周期による影響は比較的小さいと考えてよい。図からわかるように、 H/h の増加とともに U/U_{th} の値が徐々に低下しており、また水深の減少とともにデータが右の方へずれている。この図から、B点では $H/h = 0.15$ 、C点では0.2、D点では0.25を境にしてそれより H/h が小さい領域では実測値は理論値に比して大きい値を示す。 H/h がこれより大きな領域では逆に理

図-7 $U/U_{th} \sim H/h$ 図-8 U/U_{th} の鉛直分布

論値の方が大きい値を与え、この傾向は H/h の増加とともに顕著になる。つぎに、図-8(a)、(b)はそれぞれ水深20cmと10cmにおける平均波の水平水粒子速度の鉛直分布を検討した結果である。図からわかるように、水深20cmの点では全体として $U/U_{th} < 1$ のデータが多いのは図-7と同じであるが、 z の減少とともに U/U_{th} の値が少しずつ小さくなっており、理論と幾分異なる分布形状を示す。しかし水深10cmの点では U/U_{th} は1より小さいものの鉛直分布の形状はほぼ同じである。

ここで解析に用いた波は $T\sqrt{g/h}$ が7以下のものがあり、規則波ではストークス波理論の適用範囲であるが、非線型性を有する波の水粒子速度は理論値より小さい値を示した。微小振幅波理論を用いた解析でもほぼ同じ結果が得られた。その他Deanの新しい流れ関数法⁷⁾との比較も行ったが、 U/U_{th} は図-7よりさらに小さな値を示した。

4. 結 語

この研究はゼロアップクロス法で定義した不規則波の水粒子速度について検討したものである。ここで得られた主要な結果および今後に残された問題点は次のとおりである。

成分波の概念に基づく解析の結果、この概念が適用できるのは $0.8 < f/f_p < 1.7$ の範囲に限られること、水深の小さな領域では波形に非線型な特性が強くあらわれている部分で局部的に、水粒子速度の実測値と理論値との間に差が生ずること等がわかった。したがってこの方法による解析は浅海域の不規則波に適用することには問題がある。

一方、ゼロアップクロス法で定義した不規則波は波形、水粒子速度とも平均化操作をほどこすことにより、ばらつきが小さくなり、一定の特性を示すようになる。波形は水深の減少とともに徐々に非線型な特性を示すようになるが、ここで用いたデータの範囲内ではいずれの場合もストークス波理論と良好な対応を示した。しかし水粒子速度とストークス波理論との比 U/U_{th} は $H/h = 0.2$ 前後を境にしてそれより小さい領域では $U/U_{th} > 1$ となり、逆に大きな領域では $U/U_{th} < 1$ となる。この値はさらに H/h の増加とともに減少する傾向があった。ここで用いた波が $T\sqrt{g/h} < 7$ と比較的狭い範囲に限られたため、水粒子速度に対する波動理論の適用性については十分な検討ができなかった。すでにKobuneら⁸⁾は同様な実験の結果、微小振幅波理論の適用が良好な結果を与えることを報告しており、この点については今後さらに広範な実験をおこない検討をする必要がある。

最後に、本研究を進めるにあたり貴重な助言をいただいた鳥取大学野田英明教授に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Taira, K.: Wave particle velocities measured with a doppler current meter, Jour. of Oceanographical Society of Japan, Vol. 27, No. 25, pp. 218~232, 1971.
- 2) 土屋義人・山口正隆: 超音波流速計による波の水粒子速度に関する実験的研究, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 97~104, 1971.
- 3) 岩垣雄一・酒井哲郎・石田 啓: 不規則波の水粒子速度と水面変動との相互関係に関する研究, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp. 149~154, 1972.
- 4) 岩垣雄一・木村 晃: 不規則波の水位の頻度分布と波形の非線型性について, 土木学会第 33 回年次学術講演会講演概要集, 第 2 部, pp. 832~833, 1978.
- 5) 岩垣雄一・木村 晃: 浅海域における不規則波の分散特性について, 京都大学防災研究所年報, 第 20 号 B-2, pp. 493~512, 1977.
- 6) 光易 恒・郭 一羽: 減衰領域における風波の研究—成分波の波速について—, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 323~328, 1976.
- 7) たとえば, 野田英明・塚田英春: Stream Function Theory の適用に関する研究, 土木学会中国四国支部第 31 回学術講演会一般講演概要, 1979.
- 8) Kobune, K., J. H. Nath and T. Yamamoto: Periodic theory velocity prediction in random wave, Summaries of 16th I.C.C.E., Paper No. 52, 1978.