

テンション・スレッド流速計により計測された 砕波の水粒子速度の特性

中川 武夫*, 岩田好一朗**, 小山 裕文***

1. 緒 言

砕波後の波の水粒子速度はその大きさと方向が急激に変わることに加えて渦の発生や気泡の混入を伴うために一般には精密な測定が困難である。実験水槽内での砕波点付近の水粒子速度の測定例としては浮遊粒子¹⁾, 超音波流速形²⁾, 熱膜流速計³⁾, レーザー・ドップラー流速計⁴⁾によるものがある。一方, 現地海岸での測定例は主として電磁流速計⁵⁾を用いたものが多い。

以上の研究のうち実験水槽内のものは水粒子速度の3方向成分を同時に測定した例がない。一方, 現地のものは測定点が少ないことや, 海浜流などとの複雑な干渉のために砕波後の波の水粒子速度の特性は未だ十分には明らかではない。本研究ではこの特性を明らかにするために, 2次元水槽内で造波された波の砕波帯における水粒子速度の3方向成分をテンション・スレッド流速計⁶⁾を用いて同時計測し, 砕波変形にともなう水粒子速度の時間的かつ空間的特性を明らかにするとともに, その乱れについて考察を加えることにする。

3. 実験装置

実験装置の概要を図-1に示す。実験は名古屋大学土

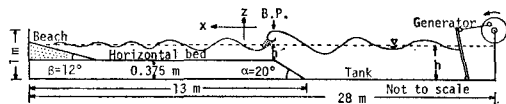


図-1 実験装置概要図

木工学教室の2次元造波水槽(幅0.7m)で行われた。造波装置はピストン型とフラップ型の混成型である。なお, 座標は図示のような波の進行方向へ向かう右手系とする。

実験に使用したテンション・スレッド流速計(以下, T.T. 流速計と略記)の全容を図-2に示す。T.T. 流速計とは「流れの中に張り合わせてある糸は流下方向へその流速に応じた抗力を受ける」という原理に基づいて設

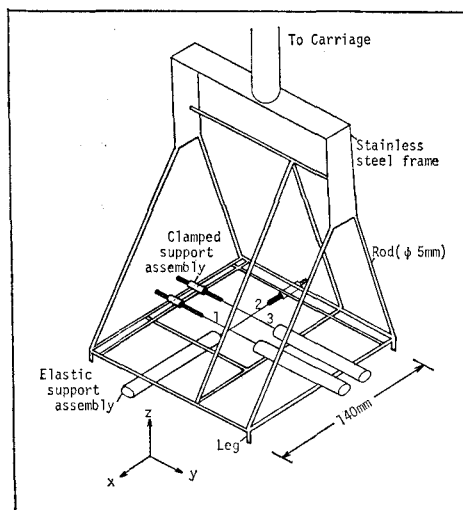


図-2 テンション・スレッド流速計の全容

計された流速計である。すなわち, この糸に働く抗力を速度に較正すれば糸が張り合わされている位置での流速が求められることとなる。

T.T. 流速計の検知部は本体底部に張り合わせた3本の綿糸1, 2および3である。各綿糸の一端は剛性支持され, 他端は図-3に示した片持ち板, 厚さ0.5mmの

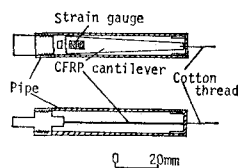


図-3 スレッドの弾性支持部断面図

先端に弾性支持されている。片持ち板の両面に各1枚ずつの半導体ひずみゲージ, 120Ωが張ってある。また, 片持ち板の材質にCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic, 比重1.7, 引張弾性率20,000 kg/mm²)を用いたことおよび片持ち板の平面形状を台形とした理由は板の自重による影響を極限するためである。各綿糸の長さ, 太さはそれぞれ55mm, 0.1mmであり, 綿糸1, 2, 3はそれぞれ互いに直交する x, y, z 方向の速度成分を独立に

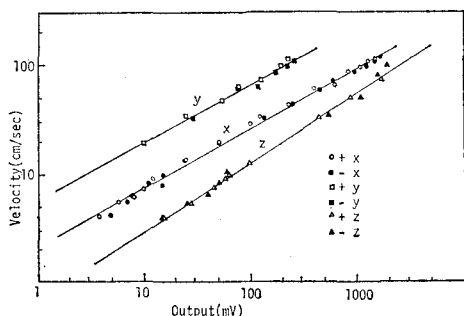
* 正会員 Ph. D 金沢工業大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科

*** 学生会員 名古屋大学大学院 土木工学専攻

検出する。綿糸 1 と 3 は同一水平面内に平行間隔 20 mm で張り合わせてあり、綿糸 2 は綿糸 1, 3 を含む平面の下 15 mm の水平面内に綿糸 1, 3 とは直交する方向に張り合わせてある。

T.T. 流速計の速度検出過程は流れから綿糸が受ける片持ち板の面に垂直方向の抗力をまず片持ち板自体のひずみ変位に変換し、この変位を半導体ひずみゲージを用い電圧信号に変え、動ひずみ測定器で増幅したのちデータ・レコーダに記録するというものである。なお、各綿糸が片持ち板の面に垂直方向の抗力を選択的に検出できるのは片持ち板の厚みに対する幅の比が十分大きくなるように設計されていることによる。以上のことから明らかなように、この T.T. 流速計で測定される流速は 3 本の綿糸を張った小空間における平均的な流速ということになるが、測定結果の解析においては、綿糸 1, 2, 3 の 3 つの中点の幾何学的中心を測定点と考えた。



図—4 流速計の速度校正曲線

図—4 にこの T.T. 流速計の速度校正結果を示した。速度校正は実験の前後各 1 回ずつ行い、較正值が実験中変わらなかったことを確認した。ここでの速度校正法は静水中を一定速度で流速計を走行させ、そのときに綿糸が水から受ける抗力に対応する出力電圧を逐次求めるものである。このようにして、綿糸 1, 2, 3 ごとに正負両方向の速度校正を行った。この T.T. 流速計は超小型プロペラ流速計との波の水粒子速度の並列測定によってもその信頼性が確かめられている。

なお、T.T. 流速計の全力学系の固有振動数が 100 Hz 程度であるため、測定結果に共振の効果はほとんど含まれていないと思われる。

3. 実験方法

実験中、T.T. 流速計は水槽上縁のレール上を滑動可能な台車に取り付けられ、 x と z 方向の任意の位置に固定された。なお、流速計の y 方向の位置は常に水槽の中央である。また、水粒子速度の計測と並行して 2 台の容量式水位計で水位変動を計測し磁気テープに収録した。水位の測定は造波装置後方 1 m および水粒子速度

測定断面である。

本実験では、水平台の前斜面直後で崩れる崩れ波と巻き波の水粒子速度の測定を行った。表—1 にこれらの実験波の諸元を示す。

表—1 実験波の諸元

諸元 型式	発生波			砕波点直前			
	波高 H (cm)	周期 T (sec)	水深 h (cm)	波高 H' (cm)	周期 T' (sec)	水深 h' (cm)	波長 L' (cm)
崩れ波	14.3	1.5	66.5	16.5	1.5	29.8	264
巻き波	10.7	1.4	56.5	12.7	1.4	19.5	186

水粒子速度の計測点は砕波点付近でとくに密にした。崩れ波の場合には x 方向へほぼ 10 cm 間隔で砕波点を含む 11 m の範囲、 z 方向には 3 cm 間隔で水槽底面より 2 cm 上から波の谷より 2 cm 下までの範囲で計測を行った。一方、巻き波の場合には x 方向へほぼ 10 cm 間隔で砕波点を含む 9 m の範囲、 z 方向には 2 cm 間隔で崩れ波の場合と同じ範囲内で計測を行った。この結果、崩れ波と巻き波の全測定点はそれぞれ 267 点と 176 点であった。

データ・レコーダに収録されたアナログ量はサンプリング周波数 50 Hz で AD 変換し電算処理した。スペクトル解析の方法は BT 法で、データー数 512、ラグ数 200、自由度 5 を用いた。

4. 実験結果および考察

計測された砕波の水粒子速度を次のように分けて考えることにする。

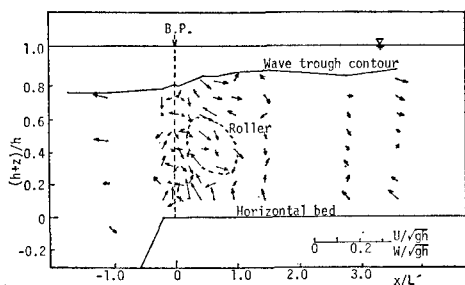
$$\text{水粒子速度} = \vec{U} + \vec{u} = \vec{U} + \vec{u} + \vec{u}'$$

ここに、 $\vec{U}$ は定常流成分、 $\vec{u}$ は非定常流成分、 $\vec{u}$ は波動成分そして $\vec{u}'$ は乱れである。

本章では実験結果の一部を示すとともに、定常流成分、非定常流成分及び乱れの 3 方向成分ごとの特性を砕波型式、砕波点及び水槽底面からの距離と関連づけて考察する。

(1) 定常流成分

定常流成分の速度は水粒子速度の単位周期当りの移動距離として求められた。図—5 に巻き波の場合の水槽中心線を通る垂直断面内での定常流の分布を示した。水平ローラーの付近での定常流の速度が波速の 0.1 倍以上にもなることがこの図からわかる。巨視的な定常流としては、砕波型式の違いにかかわらず、砕波点付近の水槽底面から上昇し、水表面に達したのち水表面近くを波の進行方向と逆に進む流れと、同様に水槽底面から水表面に達したのち水表面近くを波の進行方向へ進む流れが認められた。このような定常流は堀川ら⁷⁾により報告された

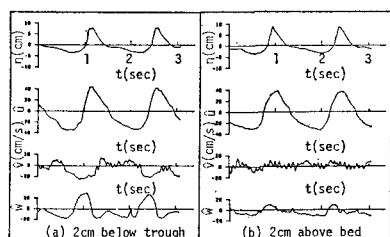


図—5 巻き波の定常流成分分布

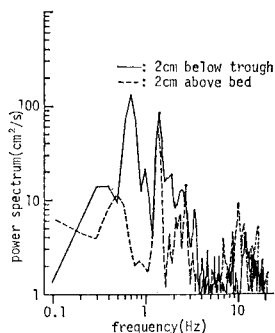
ものと類似している。なお、崩れ波の場合には水平ローラーが明確に認められなかった。

(2) 非定常流成分

図—6(a),(b)に水位変動 η と非定常流成分 $\hat{u}$, $\hat{v}$, $\hat{w}$ の時間変動を示した。この図から $\hat{u}$ および $\hat{w}$ と η との位相の対応が比較的良く認められるが、 $\hat{v}$ と η との位相の対応は明確ではないことがわかる。また、 $\hat{v}$ の時間波形にはとくに高周波成分が卓越しているのが特徴的である。

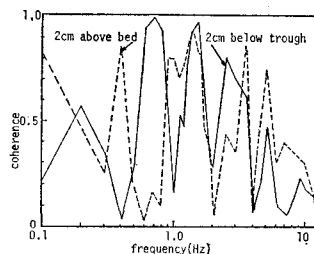


図—6 水位及び非定常流成分の時間変動 (碎波点後方 30 cm)



図—7 横方向非定常流成分のパワー・スペクトル (碎波点後方 30 cm)

図—7 に水深方向 2 点での $\hat{v}$ のパワースペクトルを例示した。図から $\hat{v}$ には周波数の高い帯域にもかなりの量のエネルギーがあることがわかる。この傾向は $\hat{w}$ も $\hat{u}$ と同様で、これら 2 成分のエネルギーが高周波数帯域 $f \geq 5 \text{ Hz}$ に占める割合は碎波点および水槽底面に近いほど増す。これに対して、 $\hat{u}$ のエネルギーは x および z 方向への変化とはほぼ独立に低周波帯域 $f \leq 5 \text{ Hz}$ に分



図—8 水位と横方向非定常流成分のコヒーレンス (碎波点後方 30 cm)

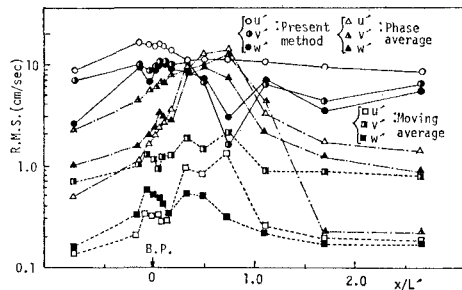
布していることも明らかになっている。また図—8 には $\hat{v}$ と η との間の水深方向 2 点でのコヒーレンスを例示した。図から、このコヒーレンスは底面に近づくにつれて小さくなることがわかる。これに対して、ここでは図示しないが $\hat{u}$ と η および $\hat{w}$ と η とのコヒーレンスの値は水深方向への位置の変化によらず発生波の基本周波数と倍周波数の付近でほぼ 1 となる。

以上、巻き波を例にとって非定常流成分の解析結果を示したが、崩れ波の場合もこれらの結果は定性的には同じである。

(3) 乱れ

ここで大きな問題となるのは非定常流成分中の波動成分と乱れとをいかに分離するかということである。従来、碎波の乱れが水粒子速度の位相平均値⁸⁾あるいは移動平均値⁹⁾と水粒子速度の各瞬時値との差として定義されてきたが、これらの乱れの定義法の妥当性についてはまだ検討の余地が残されている。そのため、本論では、「碎波の水粒子速度の非定常流成分から発生波の水位変動のパワーの大部分を占める周波数に対応する速度成分を差し引いたもの」を碎波の乱れに直結する重要な指標と考えて、便宜的に乱れと定義し、この定義法も含めて、碎波の乱れについて若干の考察を行う。

図—9 に碎波の乱れ強度 (乱れの自乗平均平方根) が巻波の場合について碎波点からの距離に依存してどのように変わるかを乱れの成分別および定義法別に示した。新定義法の場合の乱れ強度は 3 成分とも碎波点付近で最大値をとり、 u' の乱れ強度が残りの 2 成分の乱れ強度



図—9 乱れ強度と碎波点からの距離との関係 (波の谷より 2 cm 下)

の約2倍となっている。これに対して、位相平均法および移動平均法の場合には碎波点後方 $x/L' \approx 0.7$ で最大値をとる。また、位相平均法の場合の各成分間の乱れ強度の大きさは u' と v' の乱れ強度が同程度で残りの w' の乱れ強度よりやや大きい、移動平均法の場合には v' の乱れ強度が最大であり、以後 u' 、 w' の順である。

また、図-9によると乱れ強度の絶対値は一般に新定義法が最も大きく、続いて位相平均法、移動平均法の順であるが、 $x/L' \approx 0.7$ では位相平均法で定義した乱れ強度が新定義法のそれを上回っている。ここで、新定義法の水粒子速度の平均値 $\bar{u}$ は造波装置直後 1m の地点での発生波の水位変動のエネルギーの約 98% を占める基本周波数および倍周波数に対応する水粒子速度の和とした。位相平均法では連続する5波の同位相ごとの水粒子速度を算術平均した値を水粒子速度の平均値とし、移動平均法では水粒子速度の時間波形を 0.02 秒間隔で離散化した連続する3点の水粒子速度のうち、中間点の水粒子速度に他点の2倍の重みをつけて平均した値を水粒子速度の平均値とした。

5. 結 論

本研究から得られた主な知見を以下に要約する。

- ① テンション・スレッド流速計により碎波の水粒子速度の3方向成分の同時計測が可能である。
- ② 水槽横方向の非定常流成分は低周波数帯のみならず高周波数帯にもかなりの量のエネルギーをもつ点で、残りの2方向の非定常流成分と対照をなす。
- ③ 碎波の水粒子速度の乱れ強度は乱れの定義法により最大値をとる位置、各成分間の大きさの順序およ

び絶対値が異なる。

なお、本研究は文部省科学研究費・自然災害特別研究(1)(代表者: 阪大 榎本亨教授)の助成金により行われた。

最後に本稿執筆に際し、有益な助言をいただいた名古屋大学、高木不折教授および本流速計の速度較正に便宜を計られた中部電力株式会社総合技術研究所に謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) Iversen, H. W.: Waves and breakers in shoaling water, Proc. 3rd Conf. on Coastal Eng., pp. 1~12, 1952.
- 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回海講論文集, pp. 97~104, 1971.
- 3) 磯部雅彦・福田直利・堀川清司: 碎波帯における流速場に関する二次元実験, 第26回海講論文集, pp. 41~45, 1979.
- 4) 林健二郎・竹内俊雄: レーザー・ドップラー流速計による波の水粒子速度測定について, 第33回土木学会年講概要集II, pp. 768~769, 1978.
- 5) Huntley, D. A. and Bowen, A. J.: Field measurement of nearshore velocities, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 538~557, 1974.
- 6) 中川武夫・岩田好一郎・小山裕文: テンション・スレッド流速計の基本特性, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 62~63, 1981.
- 7) 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三・品川正典: 海浜変形に関する実験的研究(第1報)——波による斜面上の Net Flow Pattern について——, 第27回土木学会年講概要集II, pp. 95~98, 1972.
- 8) 日野幹雄・大西亮一: 浅水表面波の粗底上の乱流構造, 第18回海講論文集, pp. 83~91, 1971.
- 9) 酒井哲郎・稲田義和: 斜面上の碎波による乱れの測定, 第35回土木学会年講概要集II, pp. 83~84, 1980.