

砕波による乱れのレイノルズ応力について

酒井 哲郎*・三反畑 勇**

1. ま え が き

砕波帯内の流体運動場は、波の周期より長い時間スケールを有する定常流、砕波後の波による水粒子速度場、および波の周期より短い時間スケールを有する砕波による乱れの三者からなっており、その複雑な流体運動機構としての興味はもちろん、海岸工学上きわめて重要な空間でもある。このうち砕波による乱れに関しては、最も遅くその研究が始まり、現在はまだ現象の解明のための観測、実験事実の積み重ねの段階にある。

砕波帯内の流速測定計器としては、熱膜流速計が大半であり^{1),2)}、一部レーザードップラー流速計を用いたものがある³⁾。またその解析内容は、大半が乱れ強度であり、一部レイノルズ応力について議論したものがある²⁾。熱膜流速計による測定結果は、流速計としての不安定性などにより精度に問題がある。レイノルズ応力を測定した例²⁾は、スプリット型熱膜流速計を用いたものである。

ここでは、2成分レーザードップラー流速計を用いて、従来同様、実験水槽内の一様勾配斜面上で砕ける規則波による砕波帯内の岸沖方向および鉛直方向流速を同時測定し、気泡通過等による出力の低下の影響をとり除いてレイノルズ応力を計算してその実態を明らかにし、砕波帯内の流体運動場における砕波による乱れの効果を検討する。

2. 実験装置、条件および方法

(1) 実験装置

昨年(1982)の海岸工学講演会⁴⁾で発表した実験結果と比較するために、実験装置は流速測定装置を除いてほぼ同じである。

用いた流速計は、往復流の2成分が測定可能なレーザードップラー流速計(日本科学工業製、光学システム 8143 S、信号処理システム 8015 (トラッカータイプ)、以後 LDV と略)で、いわゆる前方散乱方式を用いた。

トラッカーからは、流速出力のほかについてい

るドロップアウト信号(以後 DOS と略)を出力している。この DOS は、トラッカーが散乱粒子の運動による周波数のドップラーシフトを感知できる場合には、そのピーク電圧が約 3.5 V のスパイク状のパルス電圧であるが、レーザビームが水面から出たりビームを気泡が通過して、トラッカーがドップラーシフトを感知できない場合には、約 0 V に落ちこむ。

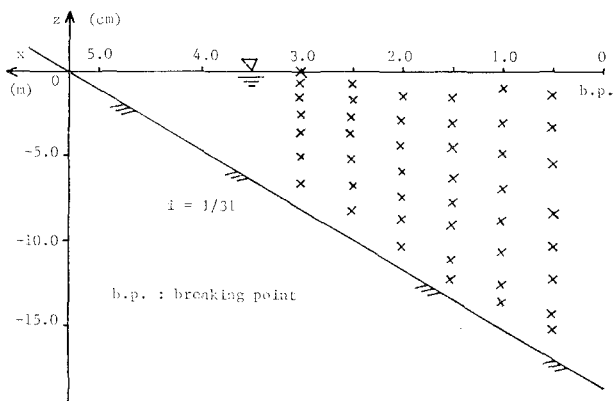
前方散乱方式で LDV を用いる場合には、水槽の両側に設置されるその発光部と受光部は、常に同じ位置関係を保つ必要がある。そのため発光部と受光部は、上下方向に移動可能な水槽を跨ぐ形のフレームに設置し、フレームは水槽上を波の進行方向に移動可能な台車にのせた。

(2) 実験条件

一様水深部の水深(h_1)は 35 cm、斜面勾配(i)は 1/31 である。波の周期(T)は 1.17 sec、砕波点水深(h_b)は 18.0 cm、砕波高(H_b)は、12.8 cm、砕波帯(W)は 530 cm である。換算沖波波形勾配(H_0/L_0)は 0.063 で、砕波形式は典型的な崩れ波型砕波である。なお、すでに述べたように、この条件は昨年度の海岸工学講演会で発表した実験条件とほぼ同じである。

(3) 実験方法

レーザードップラー流速計による岸沖方向と鉛直方向の流速の同時測定は、砕波点より 0.5 m 岸側から岸方向 0.5 m おきに 6 測線で、各測線では鉛直方向に底面の約 1 cm 上方から静水面付近まで 7~8 点で行った(図一



図一 流速測定点

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 関西技術研究所

1 参照).

3. 解析方法および結果

(1) 解析方法

流速計から出力される岸沖および鉛直方向の流速に対応する電圧出力とそれぞれの DOS および砕波点と流速測定点の水位に対応する電圧出力は、すべて 0.01 sec で AD 変換した。

レーザードップラー流速計の周波数変化と流速の間には、ビーム交差角とレーザの波長によって決まる線形の関係がある。流速に対応する電圧出力はこの関係を用いて流速に変換した。

変換された水位、流速および DOS は、各測定点ごとにその 48 sec 間を X-Y プロッターで図化した。図化された DOS と流速波形から、流速計がドロップアウトしている区間を決定し、以後の解析から除いた。

約 40 波が含まれる 48 sec 間のうち、ドロップアウトしているとして除かれた区間以外のデータに関して、昨年と同様 0.1 sec の移動平均を行ない、それからの偏差を乱れ u' , w' と定義した。この乱れに関して、これまでと同様に、一波ごとの乱れ強度、および波の一周期を分割する 0.1 sec の区間ごとの乱れ強度の位相変化を計算した後、レイノルズ応力の解析を行った。

従来、交番振動流やリップル上の波による乱れの研究では、レイノルズ応力は多くの波の各位相での u' の平均値として定義されている⁹⁾。本来のレイノルズ応力はこの位相平均と異なり、時間平均で定義されている。ここでも時間平均によって、レイノルズ応力を定義する。

次の問題は、この平均時間をどうとるかである。乱れそのものは 0.1 sec の移動平均からの偏差として定義されているので、0.1 sec 以下では意味がない。0.1 sec 以上として、その長さは興味を持っている現象によって変ってくる。ここでは、波の周期より短い時間スケールでの運動量輸送におけるレイノルズ応力の役割を明らかにすることを目的とし、時間平均の長さを 0.1 sec とする。

なお、上述のレイノルズ応力は 0.01 sec ごとに得られるが、一周期にわたる変化の傾向を全体として把握するために、乱れ強度の位相変化と同様、波の一周期を 0.1 sec ごとの区間に分割し、各区間に対して、全波にわたって上述の 0.01 sec ごとのレイノルズ応力を平均し、それを各区間における平均的なレイノルズ応力として、その位相変化をもって、平均的な位相変化を表わすものとした。

(2) 解析結果

一波ごとの乱れ強度、および波の一周期を分割する 0.1 sec の区間ごとの乱れ強度の鉛直分布とその位相変化に関しては、一昨年 (1981)¹⁾ および昨年 (1982)⁴⁾ の結

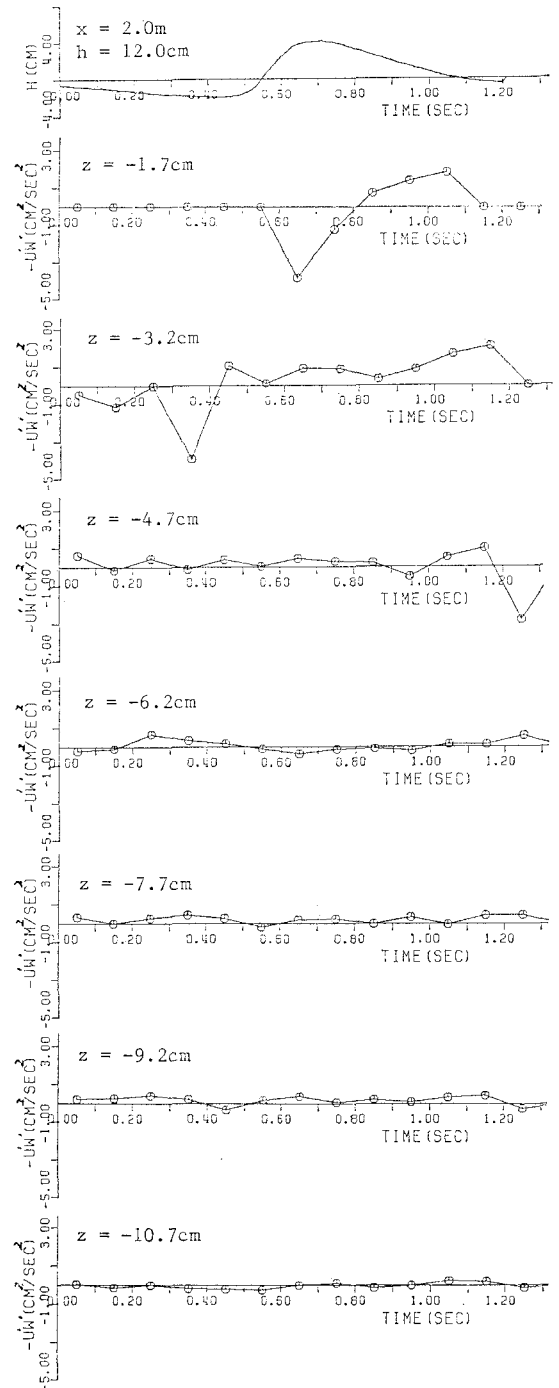


図-2 レイノルズ応力の位相変化 (砕波点より 2 m 岸側)

果と本質的には変わらないのでここでは省略する。

図-2 は、砕波点から 2.0 m 岸側 ($x=2.0\text{m}$) の鉛直方向 7 点でのレイノルズ応力の波の一周期内の変化を示している。ただし図に示したレイノルズ応力は約 40 波の平均である。一番上の図は、約 40 波の水位変動の平均を示す。一番上の図で示した波の一周期のうち、1.2

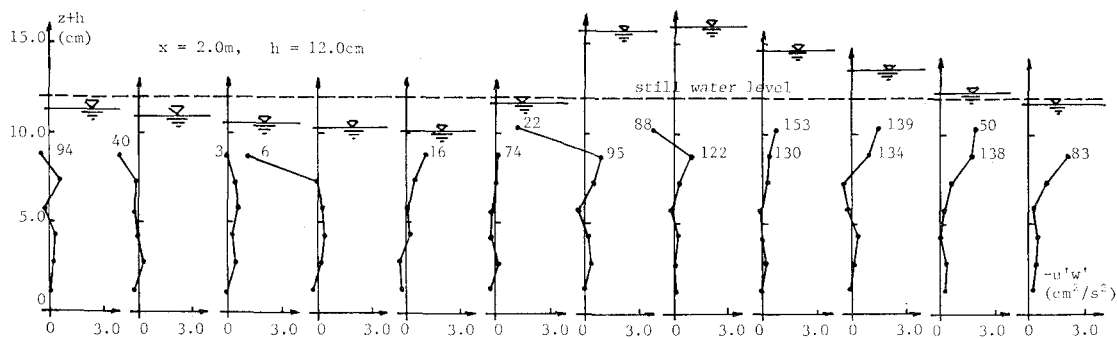


図-3 レイノルズ応力の鉛直分布 (砕波点より 2m 岸側)

sec 付近では波によってその周期が少しずつ変化するため、位相平均のデータ数が少ない。したがって、1.2 sec 付近の値は信頼性が低い。また、水面付近の測定点では、波の谷の位相では流速計がドロップアウトしているため図では 0 としている。

図-3 は、図-2 を別の表現で示したものである。すなわち、鉛直分布の位相変化を示している。図中の数字は平均したデータ数を示す。表示のない点は約 400 個であることを示す。もしドロップアウトがなければ、各波の 0.1 sec の区間内には 10 個のデータがあり、40 波では 400 個のデータがあることになるが、水面付近ではドロップアウトのために、平均データ個数が極端に減少している。

4. 考 察

(1) レイノルズ応力の定義

3. (1) で述べたように、この研究ではレイノルズ応力を 0.01 sec ごとの u', w' の 0.1 sec の移動平均で定義している。これまでの振動流や波の乱れのレイノルズ応力は、すべて位相を固定して多くの波に対して平均するいわゆる位相平均によって定義されている⁵⁾。図-2 および 3 では、移動平均によって定義されたレイノルズ応力を 0.1 sec の区間ごとに全波にわたって平均しているので、結果的には従来の位相平均によるものとあまり変らないが、レイノルズ応力の定義としては、位相平均によるものはレイノルズ応力としての物理的意味に乏しい。

次に、レイノルズ応力の定義としての移動平均の時間間隔に関しては、3. (1) で述べたように問題とする現象によって変る。ここでは 0.1 sec としたが、これは波の一周期内における運動量輸送における砕波による乱れのレイノルズ応力の役割を調べるためである。もちろん波による乱れは、運動量そのもののほかに底質などの物質の輸送にも役割を果しているものと想像されるが、ここでは議論しない。

Stive ら (1982)⁶⁾は、砕波帯内での流速測定結果から、

砕波帯内における定常場での岸沖方向の運動量式におけるラディエーション応力項の中の乱れの貢献度を検討し、波の水粒子速度に比べて小さいことを示した。またここで議論しているレイノルズ応力は岸沖方向と鉛直方向の乱れの積であり、岸沖方向の運動量の鉛直方向の輸送および鉛直方向の運動量の岸沖方向の輸送の働きを有している。鉛直方向の運動は、波の周期より長い時間スケールすなわち定常場では無視しうるものである。その意味でも、ここでは波の周期より短い時間スケールでの現象すなわち波の一周期内の運動量輸送における砕波による乱れのレイノルズ応力の役割に注目した。

(2) レイノルズ応力の位相変化

さて、図-2 を見ると、明らかに水面に近いほどレイノルズ応力は大きくなることがわかる。これはこれまで乱れ強度に関して言われていたことから理解しうる。これまで砕波による乱れのレイノルズ応力の位相変化の測定例を示したものととして、青野ら⁷⁾のものがある。その例では、波の峰の前面でレイノルズ応力が負から正に変化する傾向があることを指摘している。図-2 でもその傾向が若干見られる測定点がある。

往復流の実験事実として、日野ら⁸⁾は、壁面近傍では正のレイノルズ応力が減速時に発生すると述べている。図-2 に示された本実験結果の傾向は、上述のように青野らと同様の傾向を示す場合が若干あるものの、基本的にはさらに複雑である。このことは、壁面でのシアアが支配する往復流に比べて、砕波帯では底面でのシアアのみではなく、自由水面の不安定による気泡を連行した乱れた水面から生じるシアアも支配的であることを考えれば当然である。

(3) レイノルズ応力の鉛直分布

すでに述べたように、図-3 の中の数字は平均したデータ個数を示す。ドロップアウトのない場合は 400 であるので、水面付近では極端に少なく、データとしての信頼性に乏しいものがある。ただし、他の測線の結果も含めて、レイノルズ応力の鉛直分布はきわめて複雑であると言える。

昨年のこの講演会⁴⁾においては、乱れ強度に関して、turbulent wake 理論の結果⁸⁾を拡張して、その鉛直分布の位相変化が説明しうることを示したが、図-3の複雑な鉛直分布は turbulent wake 理論の単純なレイノルズ応力の分布では説明できない。

交番振動流のレイノルズ応力の鉛直分布の測定例としては、日野ら⁹⁾のものがあるが、図-3の分布は壁面のシアの支配的な場のレイノルズ応力の分布とは当然のことながら異なる。青野ら⁷⁾は、砕波帯内のレイノルズ応力の鉛直分布に関しても実験結果を示している。ただしレイノルズ応力の定義が異なること、および結果の表示の仕方が異なるため、直接比較はできないが、青野らの原論文の図-7では顕著な負の値は見あたらない。

(4) 砕波帯の波動場におけるレイノルズ応力の貢献度

turbulent wake では、レイノルズ応力と平均流による運動量輸送とがつり合う。また、交番振動流では、加速度項、圧力勾配項とレイノルズ応力項とがつり合う。砕波帯内での波動場の運動量輸送におけるレイノルズ応力項の貢献度を調べるために、次式のようなレイノルズ応力を含めた岸沖方向の運動方程式を考える。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (-p - \rho \overline{u'^2}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{u'w'})$$

とくにこの式の中の左辺第2項と右辺第3項を比較する。比較する測定点として、実験結果から最も乱れが強いと考えられる砕波点から岸側 1.5 m の静水面下 4.2 cm の測定点を選ぶ。位相としては、水面が静水面を上方に切る位相と峰の位相の中間の位相を考える。そこでは、 $u \approx 20$ cm/sec である。 $\partial u / \partial x$ は直接測定はしていないので、流速の振幅を 30 cm/sec とし、周期 1.2 sec、水深 15 cm とし微小振幅波理論を用いると、 $u \cdot \partial u / \partial x \approx 14$ cm/sec² となる。

一方同じ測定点でのレイノルズ応力の鉛直勾配は、せいぜい 4 cm/sec² 程度である。従って、砕波帯の波動場の運動量輸送においては、砕波の乱れのレイノルズ応力は、波動の有限振幅性を表す移流項よりも貢献度が小さいことが考えられる。

5. あとがき

この研究は、実験水槽中の 1/31 の一様勾配斜面上で砕ける崩れ波型砕波による砕波帯内の岸沖および鉛直方向の水粒子速度を、2成分レーザードップラー流速計を用いて同時測定し、波の周期より短かい時間スケールでの砕波による乱れのレイノルズ応力の実態を明らかに

し、砕波帯内での波動場におけるレイノルズ応力の貢献度を明らかにしようとしたものである。

砕波による乱れは流速記録の 0.1 sec の移動平均からの偏差として定義し、0.01 sec ごとの同時の岸沖および鉛直方向の乱れの積に負号を付けたものの 0.1 sec の移動平均を再度とり、これをレイノルズ応力と定義した。実際の結果の表示は、波の周期を 0.1 sec ごとの区間に分割し、各区間ごとに約 40 波のデータを平均したものを示した。

以下のようなことが明らかになった。

1) 砕波による乱れのレイノルズ応力は、青野ら⁷⁾が実験事実として示した波の峰の前面の位相でレイノルズ応力が負から正に変化するという傾向を若干示す場合があるが、全体としてはその位相変化は複雑で、壁面乱流とは異なる。

2) 砕波による乱れのレイノルズ応力の鉛直分布とその位相変化はきわめて複雑で、turbulent wake や交番振動流のそれほど単純ではない。

3) 水平方向の運動方程式中の移流項とレイノルズ応力項の大きさを実測値を用いて比較したところ、レイノルズ応力項はかなり小さく、砕波帯内の波の周期より短かい時間スケールでは、砕波帯内の運動量輸送にはレイノルズ応力はそれほど支配的ではないことがわかった。

最後に、本研究を行なうにあたりご助言をいただいた京都大学工学部岩垣雄一教授に感謝の意を表するとともに、この研究は文部省科学研究費によったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 酒井哲郎・三反畑 勇：二次元砕波帯における砕波による乱れの構造，第 28 回海岸工学講演会論文集，pp. 15～19，1981。
- 2) 青野利夫・大橋正和・服部昌太郎：砕波による乱れ構造の実験的研究，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 159～163，1982。
- 3) 瀬岡和夫・近藤隆道・田中則男：LDA を用いた砕波帯内の流速場に関する実験的研究，第 28 回海岸工学講演会論文集，pp. 24～28，1981。
- 4) 酒井哲郎・稲田義和：砕波による乱れの時空間構造とそのモデル，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 164～168，1982。
- 5) 日野幹雄・柏柳正之・中山哲蔵・原 輝彦：交番振動流における乱れの発生とエネルギー輸送機構，東京工業大学土木工学科研究報告，No. 27，pp. 1～66，1980。
- 6) Stive, M. J. F. and H. G. Wind: A study of radiation stress and set-up in the nearshore region, Coastal Engineering, Vol. 6, pp. 1～25, 1982。
- 7) 青野利夫・大橋正和・服部昌太郎：砕波点近傍での乱れ特性に関する実験的研究，第 13 回乱流シンポジウム，pp. 180～183，1981。
- 8) Tennekes, H. and J. L. Lumley: A First Course in Turbulence, The MIT Press, pp. 104～145, 1972。