

砕波による乱れ

酒井 哲郎

1. まえがき

砕波という現象が、海岸工学上きわめて重要であるという点に関しては、おそらく誰も異論はないと思われる。事実、海岸工学という分野が第2次世界大戦後出来て以来、砕波現象に関する研究が跡絶えることなく続けられ現在に至っている。最初のうちは、当然のことながら、砕波現象のうちマクロな水理量、すなわち砕波水深、砕波高などに重点が置かれた。一方、応用力学上の興味からも、最高波の理論としていくつかの研究が発表されており（例えば、榎木，1973 参照）、この方面ではごく最近また新たな展開がなされている。さて砕波に関する研究は、その後、その内部機構をも議論するようになり、とくに砕波の水粒子速度場に関して、計測技術の発達にともない、ある程度の解明が行なわれた（例えば、酒井，1976 参照）。

以上の砕波に関する研究は、海岸工学上の興味からは、とくに海岸構造物の設計上、また漂砂現象に関連して、その基礎的課題として認識されていたように思われる。砕波によって波高がどの程度減少するかという問題については、砕波後の波の減衰という問題として取りあげられ、多くの研究がなされている。この問題に関しては、次第に砕波の内部機構が重要になり、現在では、砕波による乱れた運動による波のエネルギーの逸散が、砕波後の波の減衰に関して支配的であるということまで来ている。

一方、沿岸漂砂に関しては、いわゆるラディエーション応力を考慮した沿岸流理論の展開により、新たな局面が開かれたことはよく知られている通りである。この理論の中では、ラディエーション応力、底面摩擦とともに、水平拡散項が重要である。この項は沿岸流速分布を現実に近い効果を持っている。これまで、この水平拡散項を、波の諸量や水深および汀線からの距離等で表現している。しかしながら、その物理的意味を考えた場合、砕波帯における砕波による乱れを直接考慮して水平拡散項を表現する方が望ましい。

勿論、漂砂現象のうちとくに砕波帯内での底質の浮遊に関して、砕波による乱れが重要であることは言うまでもない。また、砕波帯内での温排水の拡散などの問題に関しても、砕波による乱れが重要であると考えられ、事実、沿岸流理論と同様な扱いで水平拡散を表現している研究がある。

以上述べたように、砕波による乱れは、砕波帯における水理現象の中で重要な位置を占めると考えられるが、これまでは精度の高い計測装置がなかったこともあって、その実態は明らかにされていない。この講義では、以上述べたこれまでの砕波による乱れに対する扱いをやや詳しく述べた後、ごく最近の砕波による乱れに関する研究の動向を紹介する。

なお、ここで“砕波による乱れ”と表現しているが、実は砕波による乱れが、狭義の意味での乱れと同じであるかどうかはこの段階ではわからない。管路や開水路における乱れは、単に不規則な変動であるというだけでなく、本来が3次元的であり、乱れはたえず平均流からエネルギーを得て減衰することがない。砕波による乱れがそのような性質を有しているかどうかは、今後の研究によって明らかにされるはずである。

本稿の構成は、つぎの通りである。

1. まえがき
2. 従来の“砕波による乱れ”の扱い
 - (1) 砕波後の波高減衰
 - (2) 沿岸流
 - (3) 砕波帯における底質浮遊
 - (4) 砕波帯における物質拡散
3. 最近の“砕波による乱れ”に関する研究
 - (1) 深海の風波の砕波による乱れ
 - (2) 砕波帯での砕波による乱れ
4. “砕波による乱れ”の turbulent mixing layer および wake モデル
 - (1) 実験装置と測定結果
 - (2) turbulent mixing layer および wake との比較
5. あとがき

2. 従来の“砕波による乱れ”の扱い

(1) 砕波後の波高減衰

砕波後の波高減衰において支配的なものは、砕波による海水の渦動粘性によるものと考えて、砕波による渦動粘性係数を求めた研究が、すでに1956年に発表されている。土木学会の第3回海岸工学講演会で、井島・高橋・中村(1956)が、新潟海岸での冬期波浪を実体写真観測し、その波高減衰を砕波によって生じる渦動粘性によるエネルギー損失と考え、砕波による渦動粘性係数を $1 \sim 2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度と算定している。

その後10年して、砕波後の波高減衰のモデルに明確な形で砕波による乱れをとり入れた研究が現われている(Horikawa and Kuo, 1966)。この研究では、波のエネルギー平衡式を用いているが、その中で砕波による乱れが等方性であると仮定し、等方性乱流場の単位時間、単位体積当りのエネルギー逸散の表現を用いた。さらに砕波による乱れのエネルギーは、砕波点からの距離とともに指数関数的に減少すると仮定している。また、砕波による乱れ u' は、波による水粒子速度 u の鉛直勾配に比例するという仮定をし、

$$u' = \ell \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1)$$

さらにその比例定数である混合距離 ℓ は、Prandtl の仮説に従い、底面からの高さに比例すると仮定している。

$$\ell = \kappa \cdot (h + z) \quad (2)$$

ここに z は静水面を原点とし上向きを正とする鉛直座標、 h は水深、 κ はカルマン定数である。これらの砕波による乱れに関する仮定は、壁面乱流における概念を借用したものであり、それが妥当かどうかは、今後実際に砕波による乱れを測定して検討する必要がある。

次に、榎木・岩田・松本(1973)は、砕波後の波の減衰の機構を明らかにするために、水深減少の効果を取り除き、一様水深部での砕波後の波の内部機構を実験的に検討している。とくに horizontal roller の挙動を調べているが、それだけでは波高減衰が説明出来ないとして、波高減衰のモデルとして、砕波に

よる乱れのレイノルズ応力 P_{xx} (波の進行方向に直角な面に作用する波の進行方向応力) を含めて数値計算をし、実測値と比較している。ただしモデルはエネルギー平衡式ではなく、波の進行方向の運動方程式の形を用いている。このモデルでは、レイノルズ応力は Horikawa and Kuo と同様、Prandtl タイプの表現が出来るものとしている：

$$P_{xx} = \rho \ell^2 \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

さらに、 ℓ は水深と波高の和に比例すると仮定している。ここでも、従来の壁面乱流の概念が用いられており、Horikawa and Kuo と同様の問題がある。

水口・辻岡・堀川 (1978) は、数種類の形状の斜面上での砕波後の波高減衰の実験結果を説明するため、Horikawa and Kuo (1966) と同様、エネルギー平衡式を用い、その中で、渦粘性によるエネルギー逸散項の渦動粘性係数 ν を、

$$\nu = \nu_B \{ (a - c' \cdot h) / r' \cdot h \}^m \quad (4)$$

とおいている。ここで、 ν_B は砕波点での渦粘性係数、 a は波の振幅、 h は水深、 c' および r' は 2 種類の波高・水深比である。このような表現を考えたのは、実験結果を念頭においてのことと思われるが、著者も述べているように、渦動粘性係数の物理的意味が不明である。

(2) 沿岸流

ラディエーション応力を沿岸流理論に初めて取り入れたのは、Bowen (1969), Thornton (1970), Longuet-Higgins (1970) らであり、その後 James (1974), Jonsson, Skovgaard and Jacobsen (1974) と発表された。これらはいずれも、沿岸流の発生起因としてラディエーション応力を考え、それとつり合うものとして底面摩擦、流速分布を平滑化するものとして水平拡散項を考えている。しかもこの水平拡散項を表現するのに、いずれも $A \cdot dV/dx$ 、すなわち gradient タイプのものをを用いている。ここで、 V は沿岸流速、 x は汀線に直角方向の水平座標、 A は水平渦動粘性係数である。 A については、代表的な長さのスケール L と速度のスケール U の積に比例するとして、Thornton と Jonsson らは、 L として水平方向水粒子の軌跡の特性長、 U として水平方向水粒子速度の特性値を用いている。又、Longuet-Higgins は、 L に対しては汀線からの距離 $|x|$ 、 U としては線型長波の波速 $\sqrt{gh}$ を用い、

$$A = N |x| \sqrt{gh} \quad (5)$$

を得ている。(A は動粘性係数に対応し、粘性係数に対応するものは $A\rho$ (ρ : 海水の密度))。ここに N は定数である。

Battjes (1975) は、以上の研究に対して、まず砕波帯内の水平拡散項が、gradient タイプで表現できるという保証はないこと、又、渦動粘性係数を決定する長さや速度のスケールとして必ずしも 1 つずつでよいという理由がないこと、さらに、仮りに 1 つずつでよいとしても、波による水粒子の軌跡および速度を用いるよりも、砕波帯における乱れによる運動量の変換がもたらす砕波による強い波のエネルギーの逸散によることを考えれば、とくに U については砕波によるエネルギー逸散量を用いた表現をすべきであると述べている。

まず、最初の点については、彼は、砕波による乱れが非等方性から等方性に変っていく割合が、沿岸流のシアに比例するとして、説明出来るとした。さらに、乱れのエネルギー逸散を乱れの integral

scale で表現し、それが碎波によるエネルギー逸散量に等しいとして、 U として碎波によるエネルギー逸散量を用いた表現をした。その場合、長さのスケール L としては、水深を用いている。その結果、最終的な渦動粘性係数 A の表現は、Longuet-Higgins の表現 (式 (5)) に、海底勾配がその $4/3$ 乗で入っている形となった。以上の Battjes の扱いにおいては、ある程度碎波による乱れの効果が考慮されているが、まだ十分ではなく、多くの仮定を含んでいる。

Huntley (1976) は、現地海岸において、沿岸流を支配する方程式中の底面摩擦項と水平拡散項を実測することを試みた。その結果、レイノルズ応力をラディエーション応力から分離することに失敗し、その原因として流速計をあまりに底面近くに設置しすぎた点を考えた。そのことから逆に、沿岸流に関する 3 層モデル、すなわち、碎波による乱れは上層部に集中しており、底面近傍の底面摩擦の支配的な下層とともに、乱れの弱い中層に作用しているというモデルを提案している。

橋本・宇多 (1978) も、現地海岸において沿岸流を観測した。とくに汀線直角方向と平行方向の流速変動 u, v の相互相関 $\overline{uv}$ の実測値を、沿岸流 V の岸・沖方向勾配 $\partial V / \partial x$ に比例すると仮定して、渦動粘性係数の値を求めた (実際にはラディエーション応力も含まれている)。求めた値は $4.65 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ で、Longuet-Higgins (1970) の渦動粘性係数 (式 (5)) の N を計算すると、Longuet-Higgins の 10^{-2} と同じオーダーになったと述べている。

水口・大嶋・堀川 (1978) は、平面水槽で測定された沿岸流の岸・沖方向分布が、Longuet-Higgins の理論解と比べて、とくに碎波点付近から沖側でその値が大きな理由として、Longuet-Higgins が碎波帯内外で同じ表現の水平拡散係数を用いている点を取りあげ、拡散係数が乱れ強度に比例することを考えて、碎波帯外の拡散係数を、

$$A = A_B \cdot (h/h_B)^{-1} \quad (6)$$

の形で与えて、Longuet-Higgins の理論解を求め直した。(ここで A_B は碎波点での拡散係数、 h_B は碎波水深である。) しかし、得られた理論値は、若干 Longuet-Higgins の理論値より大きくなったものの、実験値よりは依然かなり小さいことがわかった。

(3) 碎波帯における底質浮遊

底質の浮遊と波による乱れの関連については、これまでかなりの研究があるが、それらは砂漣上の乱れを含めて、碎けていない状態の波動下での底質の浮遊を扱っており、とくに碎波による乱れを対象としたものはない。また、現地海岸での浮遊砂濃度の鉛直分布から拡散係数を求めている研究もあるが、とくに明瞭に碎波による乱れと関連づけて議論しているわけではない。

ごく最近になって、Kana (1978) は現地海岸での浮遊砂の観測から、浮遊砂量が碎波高が増加するとともに減少することを明らかにし、その理由として、崩れ波の場合は、碎波によって連行された気泡したがって乱れが、波の峯近傍に限られるのに対して、巻き波の場合は、底面近くにまで達するという事実 (Miller, 1976) を考えた。

一方、田中・加藤・灘岡 (1979) も、現地海岸において碎波帯内の浮遊砂濃度を観測し、その鉛直分布から、底面近傍では波動運動にともなって底面近傍に発生した乱れが、一方上層および中層では碎波の峯直下に生じる波高スケールの大規模な渦運動が鉛直拡散に対して支配的であると述べている。この事実は、Huntley (1976) の提案した 3 層モデルに類似している。

(4) 碎波帯における物質拡散

Harris, Jordaan, McMurray, Verwey and Anderson(1962)は、碎波帯での染料の混合の議論の中で、拡散係数は、波高を H 、波の周期を T として、 H^2/T に比例すると考えた。観測結果もその考えを支持するものであった。この考えは、沿岸流理論での水平拡散項に関する Thornton (1970)および Jonssonら(1974)の考えと類似している。

Inman, Tait and Nordstrom (1971)は、現地海岸での碎波帯内で染料の拡散の実験を行ない、とくに岸・沖方向の拡散では碎波による乱れが支配的になるとして、その拡散係数を算定した。拡散係数は、拡散が Fick の法則に従うと仮定し、染料が碎波帯の幅一杯に拡がる時間から逆算した。さらに計算された拡散係

数 ϵ_X は、二乗平均碎波高 H_b 、碎波帯の幅 X_b 、波のスペクトルのピーク周波数に対応する周期 T によって与えられる $H_b \cdot X_b / T$ と同じオーダーであることを示した (図-1)。彼らは、その理由として、混合距離理論を用いて拡散係数を説明することを試み、速度のスケールとして、碎波高を水が落下する際の自由落下速度を取り、長さのスケールとして、孤立波の通過による水粒子の移動距離をとった。さらに、碎波帯内での波の個数にも関係するとして、最終的に上述の観測事実を説明した。この考え方も又、沿岸流理論における Thornton および Jonsson らの考えに類似しており、碎波による乱れそのものは直接は考慮されていない。

なお、田中・和田・小森・竹内(1979)も、平面水槽の碎波帯内の拡散係数を求めて、Harris らおよび Inman らの結果と比較している。

3. 最近の“碎波による乱れ”に関する研究

以上見てきたように、碎波による乱れは、碎波帯での種々の現象において十分その重要性を認められてはいるが、その効果を表現するのに、その構造が不明のために、多くの仮定を設けており、又構造そのものではなく、外的要因である波の水理量等を用いて表現している。一方、このような状況の下で、4年前ぐらいから、実際に碎波による乱れを測定しようとする研究がいくつか現われた。ただその前に、主に碎波状態での air-sea interaction という海洋学的観点から、深海波の碎波の乱れについての研究が 10 年前ぐらいからいくつかあるので、それについて先に述べる。

(1) 深海の風波の碎波による乱れ

Lee and Masch (1970)は、風洞水槽での碎けている風波下での水粒子速度を hot-film 流速計で測定し、そのパワースペクトル密度を計算した。その結果、一般にパワースペクトルには2つのピークがあり、そのうち低周波数側のものは、水面変動のピーク周波数に一致することがわかった。この低周波数側のピークのパワーと、それより高周波数側のパワーの比が、碎波によって生じた乱れの波動運動に対する相対的な大きさを示すものと考え、水深方向のその値の分布から、水面からの碎波による乱れの侵入深さを求め、風速の増加とともに深くなることを示した。

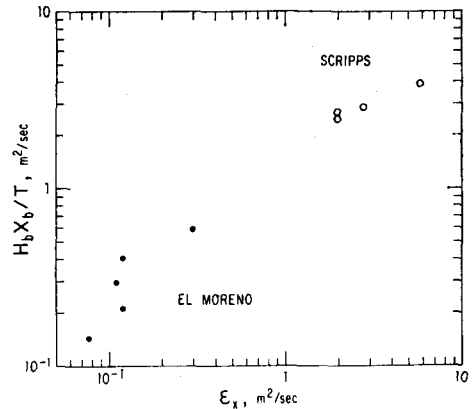


図-1 染料の拡散から求められた碎波帯での拡散係数 ϵ_X と $H_b \cdot X_b / T$ との比較 (H_b : 二乗平均碎波高, X_b : 碎波帯の幅, T : 波の周期, Inman 他, 1971より)

Lemmin, Scott and Czapski (1974) は、湖において風波下の水粒子速度を測定し、そのパワースペクトル (エネルギー密度) を求めた。とくにその慣性領域での波数スペクトルの勾配を検討し、風波の発生初期には、 $-5/3$ 乗則には従わず -3 乗の勾配を有するが、時間的に次第に $-5/3$ 乗則に変わっていくことを明らかにした (図-2)。 -3 乗則は 2 次元乱れに対して成立するもので、このことから、彼らは、風波下の乱れは最初 2 次元的なものから 3 次元的なものになっていくことを示した。

Jones and Kenney (1977) は、海洋および湖での風波下の流速変動に関して議論し、通常の壁面乱流と同様、摩擦速度に比例する速度のスケールと、水面からの距離に比例する長さのスケールを持っていることを示した。またこれらのスケールで無次元化されたスペクトル分布は、乱流境界層のそ

れに類似していることも示した。なお長さのスケールが水面からの距離に比例するという点は、2. (1) で述べた碎波後の波高減衰に関する Horikawa and Kuo (1966) および 榎木・岩田・松本 (1973) のモデルでの混合距離を底面からの高さあるいは波高の和とした仮定と明らかに違っている。

Donelan (1977) は、実験と現地観測によって、風波の場合の空気から水への運動量輸送における乱れの効果を検討した。その結果、乱れによる水面近くの水の混合は波高のオーダの深さにまで達すること、流速のスペクトル分布形から、乱れは低周波数側で生成され、波の周波数より高周波数側では white capping によって生成されること、運動量フラックスは低周波数側の変動によることなどを示した。

以上の研究は、すべて風波の場合であり、風の影響のない碎波帯での碎波による乱れとは同一視は出来ないが、とくに乱れの 3 次元性、代表的な速度と長さのスケール、およびその存在領域 (水面下の) に関して参考になると思われる。

(2) 碎波帯での碎波による乱れ

Thornton, Galvin, Bub and Richardson (1976) は、現地海岸の碎波帯での水粒子速度を測定した。同時に測定された水面変動と水粒子速度のコヒーレンスを求めた結果、かなり高い値が得られ、このことから碎波の水粒子速度には乱れはあまり存在しないと述べている。流速計の底面からの高さが示されていないが、図から見てかなり底面近くに設置されたようなので、Huntley (1976) と同様、流速計が底面に近すぎて、水面近傍の碎波による乱れを測定しえなかったものと考えられる。

一方、Miller (1976) は、実験水槽で碎ける波によって水中に連行された気泡を写真撮影し、気泡の空間分布を示した (図-3)。崩れ波の場合は、気泡は水面近傍にのみ存在しているが、巻き波の場合は底面まで達している。このことは又、碎波による乱れの分布の碎波型式による相違を示しているものと考えられる。

同様に、実験水槽における碎波による乱れを流れの可視化によって検討したのが、Peregrine and Svendsen (1978) である。彼らはその結果、Longuet-Higgins and Turner (1974) が提案した碎波前面の空気を連行した surface roller は支配的要因ではないとし、碎波による流れの場は、turbulent mixing layer の流れの構造に類似していることを示した。もしそうだとすれば、碎波帯での碎波による乱れの空

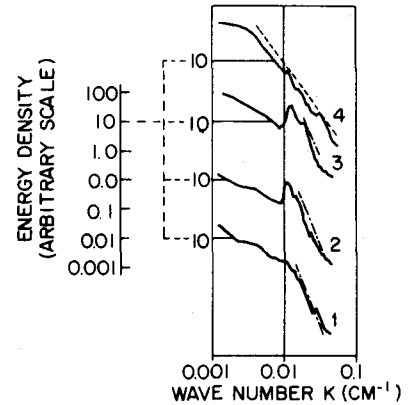


図-2 湖の風波下の流速変動のパワースペクトルの時間的变化 (時間は、番号順に進む、-----: -3 乗, - · - · - : $-5/3$ 乗, Lemmin ら, 1974 より)

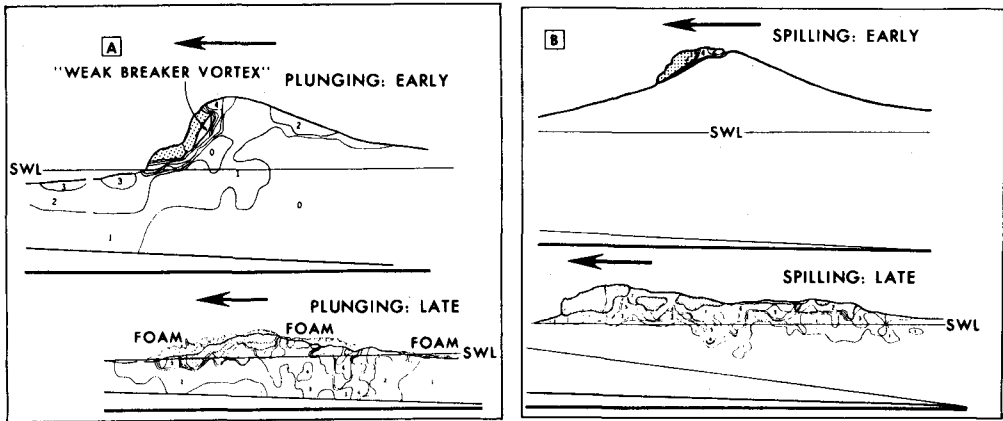


図-3 巻き波と崩れ波における気泡濃度の鉛直分布 (Miller, 1976 より)

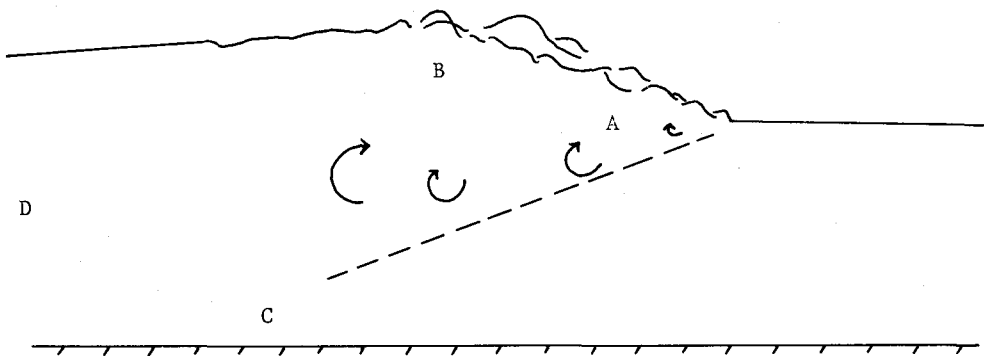


図-4 砕波の内部機構のモデル, A: 混合領域 (turbulent mixing layer と類似), B: 重力との干渉領域, C: 底面との干渉領域, D: wake (減衰) 領域 (Peregrine and Svendsen, 1978 より)

間分布等について、すでに理論的、実験的に多くの結果が得られている turbulent mixing layer の結果をそのまま適用できることになる。ただし、この議論はすべて定性的なものである。図-4 は、彼らのモデルを示している。

寛・山崎・菅野(1978)は、風洞水槽の斜面上の風波による水粒子速度を測定し、乱れによる拡散係数を推定している。拡散係数の推定の考え方は、流速変動の自己相関から、波による流速変動のみの自己相関を周期関数として差し引き、残りを乱れによる自己相関として、それから拡散係数を求めるものである。求められた拡散係数の岸・沖方向、鉛直方向の分布を示しているが、風波の場合なので斜面上での砕波による乱れのみの効果が不明である。

堀川・堀田・水口・磯部(1979)は、Thorntonら(1976)と同様の現地観測を行ない、流速変動(波による水粒子速度と乱れの両方が含まれている)のパワースペクトル、水面変動と流速変動の間の伝達関数、変動成分の二乗平均、および変動成分と水面変動との相関の鉛直分布から、Huntley(1976)と類似の3層モデルの存在を示唆している。とくに下層では、Thorntonら(1976)と同様、流速変動は水面変動によるものが支配的だと述べている。

以上紹介した5つの研究のうち2つは、現地観測によるものであり、他の3つは実験水槽内での測定で

ある。現地海岸での場合、波は一般に汀線に対して斜めに入射し、沿岸流も存在する。2.(2) の沿岸流理論における水平拡散項の扱いに関する Battjes (1975) の議論で述べたように、砕波による乱れの非等方性が沿岸流に関係していることが考えられる。その意味で一般に、現地海岸での砕波による乱れは、実験水槽内の汀線に直角に入射する砕波による乱れとは、かなり異なった性質を有することが考えられる。しかしその一方で、研究の方法として、最初から沿岸流と共存している状態での砕波による乱れを扱うよりも、まず砕波による乱れのみを抽出してその性質を明らかにしてから、より複雑な現実に近い状態に進む方が、現象の把握には都合がよいと考えられる。次節ではこの観点に立って、3.(2)で述べた Peregrine and Svendsen (1978) の砕波による乱れの turbulent mixing layer モデルについて、定量的に検討した Battjes と筆者の研究 (Battjes and Sakai, 1980) について述べる。

一般に、進行する波の内部機構を測定する場合、測定計器を波と同じ速度で移動させることはむづかしい。測定計器を一点に固定した場合には、測定される水理量は波の位相の関数となり、時間のみの関数と比較してそれだけ解析が複雑となる。Battjes and Sakai (1980) は砕波による乱れを定量的に明らかにすることを目的とし、測定された水理量の統計解析が必要となることを考え、この種の研究の第1段階として、波形が移動しない砕波（以後定常砕波と呼ぶ）を扱った。

定常な砕波を実験的につくり出す方法として、ここでは、一様流中に翼（厚さ 4.8 cm、長さ 20 cm）を挿入し、その背後の水面に、砕波帯での崩れ波や、砕波点よりある程度岸側での巻き波の状況に類似した、空気を連行した乱れた波面を発生させた（図-5）。勿論、このような定常砕波の内部機構を、そのまま

図-5 Battjes and Sakai (1980)の実験条件

後で述べる流速測定を行なう一方で、染料によって流れの様子を定性的に検討したところ、Longuet-

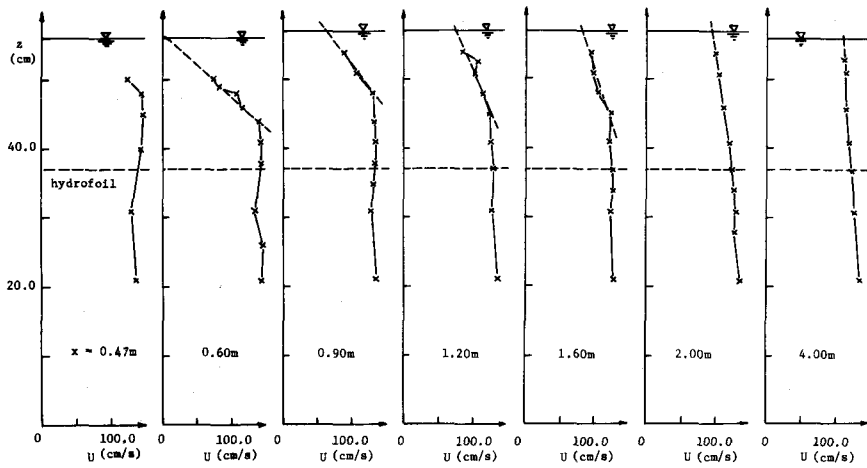


図-6 碎波面の下流での時間平均水平方向速度 U の鉛直分布 (Battjes and Sakai, 1980より)

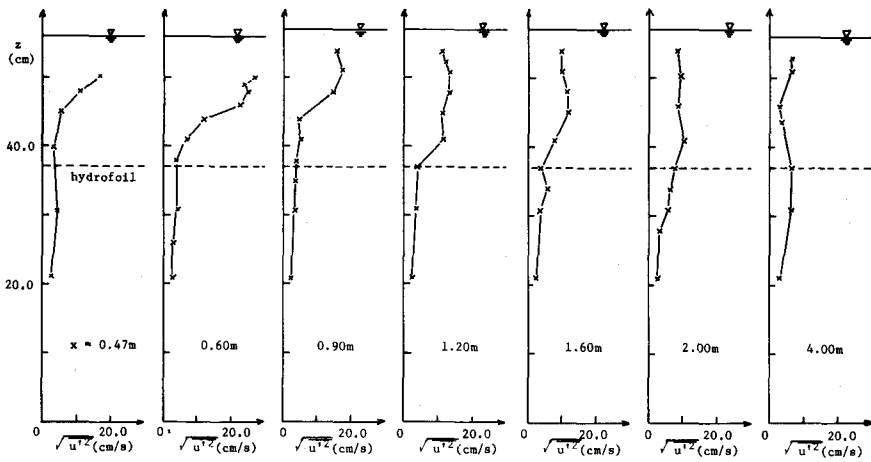


図-7 碎波面の下流での水平方向乱れ $\sqrt{u'^2}$ の鉛直分布 (Battjes and Sakai, 1980より)

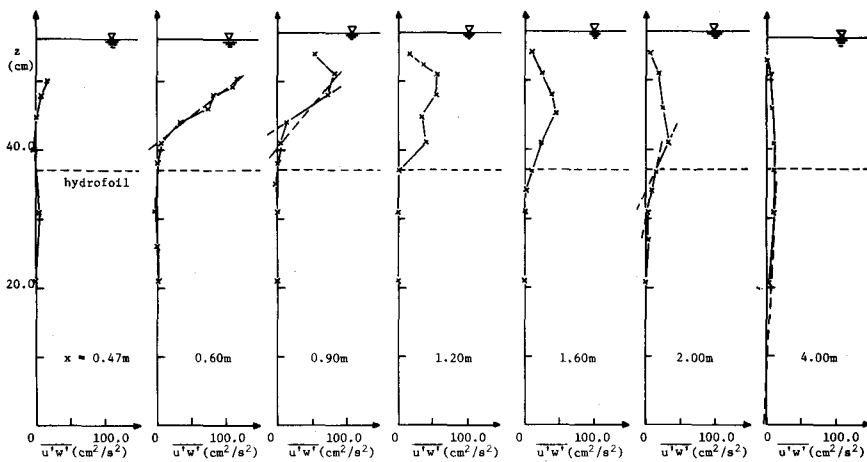


図-8 碎波面の下流での水平方向および鉛直方向乱れの相互相関 $u'w'$ の鉛直分布 (Battjes and Sakai, 1980より)

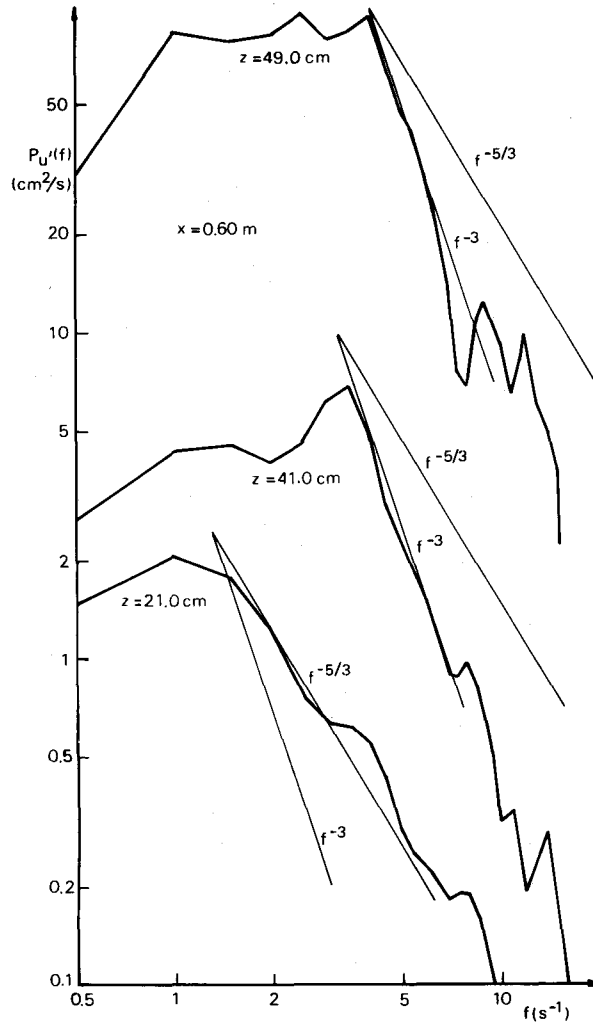


図-9 翼から 0.6 m 下流での水平方向乱れ u' のパワースペクトル分布の鉛直方向の変化
(Battjes and Sakai, 1980 より)

Higgins and Turner (1974) が提案した砕波面上の surface roller は顕著ではなく、Peregrine and Svendsen (1978) の観測と一致した。

空気を連行した砕波面下の水平および鉛直方向の流速は、レーザードップラー流速計を用いて同時に測定された。図-6, 7, 8 は、測定された水平方向の平均流速 U 、水平方向乱れ $\sqrt{u'^2}$ 、および水平方向と鉛直方向の乱れの相互相関 $\overline{u'w'}$ の、砕波面の下流の種々の距離 (x) での鉛直分布を示している。図から明らかに、空気を連行した砕波面の近くには強い速度欠損、乱れおよび u' 、 w' の正の相関の領域が存在している。これらは、流下方向および下方に向けて減衰しながら広がっている。

また、図-9 は、翼から 0.60 m 下流での水平方向乱れ u' のパワースペクトル分布の鉛直方向の変化を示している。図からわかるように、高周波数側のスペクトル分布の勾配は、 $z = 21.0$ cm では、 $-5/3$ 乗則に従っているが、砕波面近傍の $z = 49.0$ cm および $z = 41.0$ cm では -3 乗則に従っている。3. (1) で述べた Lemmin, Scott and Czapski (1974) の研究に関連して、砕波面近傍の乱れの卓越している領域では

乱れは2次元であるが、砕波面から遠ざかるにつれて、3次元的になっていくことを示唆しているようである。このことは、水面近くでも、砕波面から下流側に遠ざかるにつれて同様に言える。

(2) turbulent mixing layer および wake との比較

乱れに関する古典理論では、mixing layer, jet, wake のような数多くの自由せん断流れが研究されている。mixing layer は、2つの異なった速度の平行な流れの間に生じる流れであるのに対して、jet と wake は限られた速度余剰あるいは欠損の流れの領域である。mixing layer では速度差 (2つの流れの間の) は流下方向に一定であるのに対して、jet と wake ではその速度余剰又は欠損は減少していく。したがって、ここで測定された流下方向に速度欠損が減少する流れ (図-6) は、定性的には wake 中の流れにもっともよく似ていると言える。このことは、定量的あるいは少なくとも半定量的には、いくつかの代表的パラメータの流下方向の変化を、典型的な wake の対応する結果と比較することによって確かめられる。

比較に用いたのは、平均速度欠損 (ΔU)、水平方向乱れ強度の特性値 ($\tilde{u}'$)、および鉛直方向の長さのスケール (l) である。turbulent mixing layer および wake の理論では、すでに、高レイノルズ数およびほぼ平行な self-preserving な流れの仮定のもとに、これらの量の流下方向の変化の関係が導かれている。ただし、その結果は、これらの流れの物理的な原点から十分下流の領域のみに対して成立するものである。それらの結果の一部を、Tennekes and Lumley (1972) から引用したのが、表-1 である。ここで L は流下方向の長さのスケール、記号 “ $\sim$ ” は

比例することを意味し、 $\tilde{x} = x - x_0$ はある基準点 $x = x_0$ からの流下方向距離である。

ΔU , $\tilde{u}'$ および l の実験値は、つぎのようにして決定した。平均速度欠損は、 $\Delta U = U_i - U_f$ で計算した。ここで U_i は測定した

うちの最低点 ($z = 0.21$ m) での U の値であり、 U_f は、測定された平均流速の鉛直分布 (図-6) の上部の直線による外挿によって求められた平均自由水面での U の値である。 $\tilde{u}'$ については、 $\sqrt{\overline{u'^2}}$ の鉛直分布 (図-7) における最大値をとり、 l については、平均自由水面から、高いレイノルズ応力の領域から急激に様な領域に変わる点までの距離とした。この急変点の高さは、 $\overline{u'w'}$ の鉛直分布 (図-8) から直線補間によって求めた。

ΔU , $\tilde{u}'$, l の実験値を理論結果と比べる場合、 x_0 を与える必要がある。ここでは、図-10 に示すように視察により $x_0 = 0.5$ m とした。図-10 は明らかに、実験値が plane wake の理論に一致していることを示している。つまり ΔU と $\tilde{u}'$ は $(x - x_0)^{-1/2}$ に、又 l は $(x - x_0)^{1/2}$ に比例して変化している (ただし、 l の最上流での実験値を除いて)。このことから、砕波面の下流の流れは定性的のみならず定量的にも wake に類似していると結論できる。この流れの上方は自由水面によって限られており、水面は重力の作用によってほぼ水平である。したがってせん断層は主に鉛直下方に拡がり、流れの様相は対称な wake の半分の部分に類似しているといえる。

Peregrine and Svendsen (1978) が提案したような、重力の影響の少ない mixing layer に類似した流れの領域が、砕波点の直ぐ下流にあるとすれば、そのような領域は砕波の全体の鉛直方向の長さのスケールに比べて小さい。また、mixing layer のモデルは、砕波高のオーダの距離における、砕波によって生

表-1 自由せん断流れの特性量の流下方向変化

	mixing layer	plane wake
ΔU	const.	$\sim \tilde{x}^{-1/2}$
l	$\sim \tilde{x}$	$\sim \tilde{x}^{1/2}$
$\tilde{u}'$	$O\{(\tilde{u}/L)^{1/2}\} \Delta U = \text{const.}$	$O(\Delta U) \sim \tilde{x}^{-1/2}$

じた乱れの下方向および下流への拡がりを予知するには有効とは考えられない。

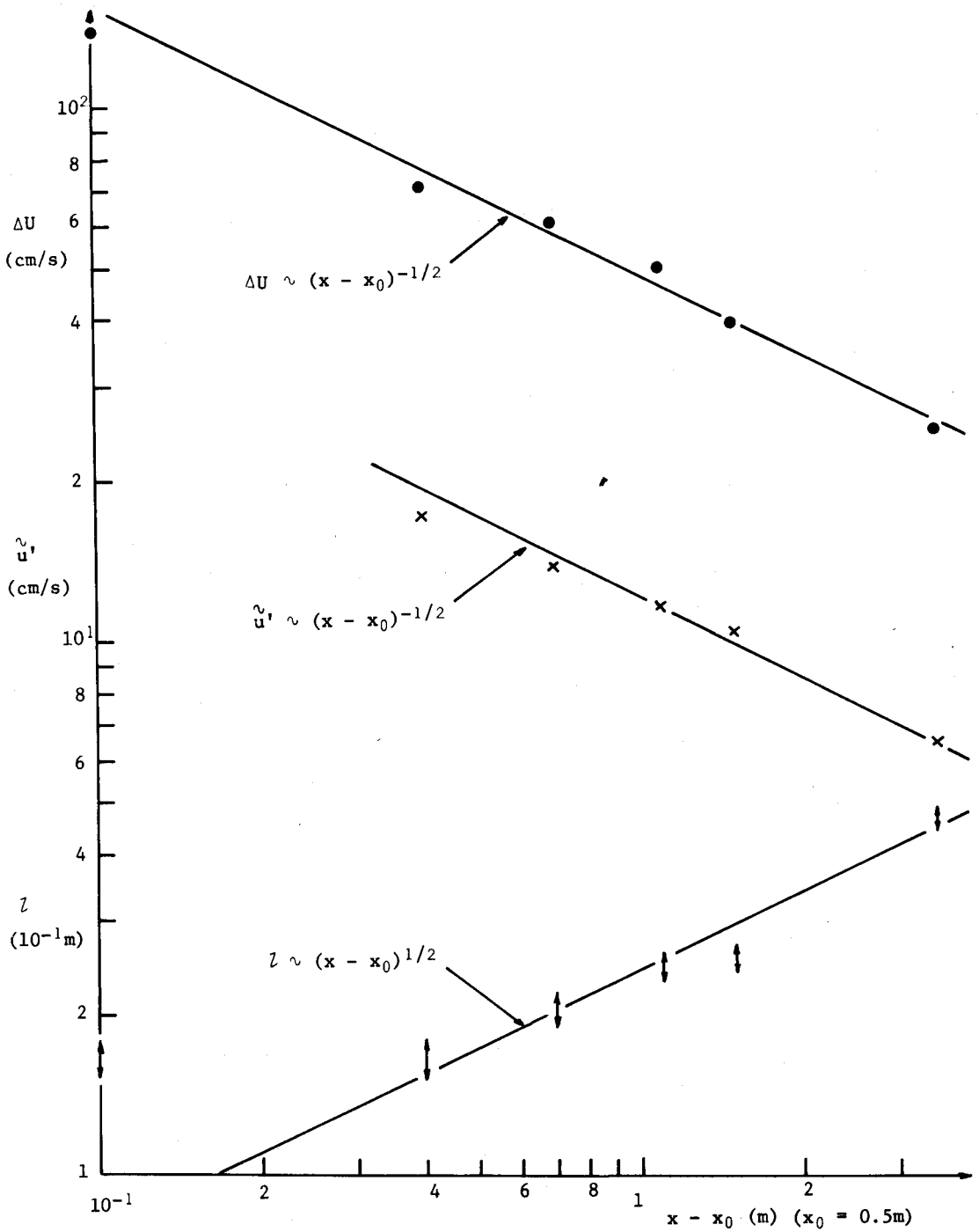


図-10 流れのパラメータの流下方向変化($x_0=0.5$ m), ●: 平均速度欠損, ×: 乱れ強度, ↓: せん断層厚さ (Battjes and Sakai, 1980より)

5. あとがき

以上、砕波帯における砕波による乱れに関して、これまでの取り扱い方を、海岸でのいくつかの現象に関して紹介した後、最近の実測例を紹介した。さらに、砕波帯における砕波による乱れの構造を研究する1つの方向として、現実の砕波帯での状況を単純化し、沿岸流の存在しない汀線に直角に入射する場合に対応するものとして、実験水槽の斜面上で砕ける波による乱れを測定する第1段階として、一様流中に置かれた翼の背後に生じる空気を連行した砕波面下の内部機構を測定し、turbulent mixing layer および wake の理論との比較を行なった研究を紹介した。

この方面の研究として、今年3月にシドニーで開催された第17回海岸工学国際会議において、実験水槽の斜面上で砕ける波の乱れをレーザードップラー流速計で測定した研究(Stive, 1980)が発表されている。その発表によれば、実際の砕波の場合も turbulent mixing layer あるいは wake のモデルと類似性があるとのことである。さらに筆者らは(酒井・稲田, 1980), 同じく実験水槽の斜面上の砕波点で浅の水粒子速度をホットフィルム流速計で測定した。測定上の問題点は多いが、砕波による乱れは砕波点から岸向きに一度増加したのち減少することを、実験的事実として示している。

なお、今後のこの方面の研究における、レーザードップラー流速計の有用性について述べたい。レーザードップラー流速計といえば、一般に高価な割に大した結果が得られないというのが、最近までの我々の認識であったように思われるが、筆者が実際に使用した経験から、技術的な面でしっかりしたアフターケアが期待できるならば、費用の点を除いて、その有用性はきわめて高いと思われる。一般にこのタイプの流速計は、他のものに比べてセンサーを測定個所に挿入するということがなく流れを乱さないということと、他の流速計と違って出力と流速との較正関係はキャリブレーションをすることなく簡単に決定できるという2つの重要な利点を持っている。またこれまで他の流速計も使用した経験からして、レーザードップラー流速計を使っている場合が、もっとも気を使わずに気軽に使えた。さらに波のような往復流を測定する場合でも、部品を追加すれば問題がない。さらにここで問題としているような気泡を含んだ流れの場合、一般に測定中に気泡の通過による出力の drop-out が生じるが、レーザードップラー流速計の場合、drop-out の間のみ0となり、有意な信号を送っている間は一定の矩形電圧を発生するいわゆる drop-out signal を同時に記録すれば、ある仮定のもとに、後の解析で drop-out の影響を除去した真のパワースペクトル等が得られる。

繰り返し述べるが、砕波帯における“砕波による乱れ”は、砕波帯での各種の現象にとって重要な意味を持っている。この稿が、海岸水理に関心を持っている人々がこの点を認識し、この方面の研究が進歩することに少しでも役立てば、筆者の何よりのよろこびである。

参考文献

- Battjes, J. A.: Modeling of turbulence in the surf zone, Proc. Symp. on Modeling Techniques, ASCE, pp. 1050-1061, 1975.
- Battjes, J. A. and T. Sakai: Velocity field in a steady breaker, Proc. 17th Conf. on Coastal Eng., 1980 (印刷中).
- Bowen, A. J.: The generation of longshore currents on a plane beach, Jour. Marine Res.,

- Vol. 27, pp. 206–215, 1969.
- Donelan, M. A.: Whitecaps and momentum transfer, Proc. NATO Symp. on turbulent fluxes through the sea surface, wave dynamics and prediction, 1977.
- Harris, T. F. W., J. M. Jordaan, W. R. McMurray, C. J. Verwey and F. P. Anderson: Mixing in the surf zone, Proc. 1st Int. Conf. on Water Pollution Res., London, paper No. 34, 1962.
- 橋本 宏・宇多高明: 海浜流と摩擦係数の現地観測, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 435–439, 1978.
- Horikawa, K. and C. T. Kuo: A study on wave transformation inside surf zone, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., pp. 217–233, 1966.
- 堀川清司・堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦: 砕波後の波にともなう流速場に関する現地観測, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 46–50, 1979.
- Huntley, D. A.: Lateral and bottom forces on longshore currents, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 645–659, 1976.
- 井島武士・高橋智晴・中村憲一: 実体写真観測による砕波帯の波の性質について, 第3回海岸工学講演会講演集, pp. 99–116, 1956.
- Inman, D. L., R. J. Tait and C. E. Nordstrom: Mixing in the surf zone, Jour. Geophys. Res., Vol. 76, No. 15, pp. 3493–3514, 1971.
- James, I. D.: Estuarine and Coastal Marine Science, Vol. 2, pp. 235–249, 1974.
- Jones, I. S. F. and B. C. Kenney: The scaling of velocity fluctuations in the surface mixed layer, Jour. Geophys. Res., Vol. 82, No. 9, pp. 1392–1396, 1977.
- Jonsson, I. G., O. Skovgaard and T. S. Jacobsen: Computation of longshore currents, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 699–715, 1974.
- Kana, T. W.: Surf zone measurements of suspended sediment, Proc. 16th Conf. on Coastal Eng., pp. 1725–1743, 1978.
- Lee, C. Y. and F. D. Masch: Macro-turbulence from wind waves, Proc. 12th Conf. on Coastal Eng., pp. 223–242, 1970.
- Lemmin, U., J. T. Scott and U. H. Czapski: The development from two-dimensional to three-dimensional turbulence generated by breaking waves, Jour. Geophys. Res., Vol. 79, No. 24, pp. 3442–3448, 1974.
- Longuet-Higgins, M. S. and J. S. Turner: An 'entraining plume' model of a spilling breaker, Jour. Fluid Mech., Vol. 63, pp. 1–20, 1974.
- Longuet-Higgins, M. S.: Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, Jour. Geophys. Res., Vol. 75, pp. 6778–6801, 1970.
- Miller, R. L.: Role of vortices in surf zone prediction: sedimentation and wave forces: in Davis, R. A., Jr. and R. Ethington (eds.), Beach and Nearshore Sedimentation, S. E. P. M. Spec. Pub. No. 23, pp. 92–114, 1976.
- 水口 優・大嶋義隆・堀川清司: 沿岸流速の断面分布について, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 425–429, 1978.

- 水口 優・辻岡和男・堀川清司：碎波後の波高変化についての一考察，第 25 回海岸工学講演会論文集，pp. 155–159, 1978.
- Peregine, D. H. and I. A. Svendsen: Spilling breakers, bores and hydraulic jumps, Proc. 16th Conf. on Coastal Eng., pp. 540–550, 1978.
- Resch, F. J. and H. J. Leutheusser: Reynolds stress measurements in hydraulic jumps, Jour. Hydraulic Res., Vol. 10, No. 4, pp. 409–430, 1972.
- 酒井哲郎：沿岸の波の変形，1976 年度（第 12 回）水工学に関する夏期研修会講義集 B コース，B-2, 1976.
- 酒井哲郎・稲田義和：斜面上の碎波による乱れの測定，土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集 2, 1980（印刷中）.
- 榎木 亨：碎波特論，1973 年度水工学に関する夏期研修会講義集 B コース，B-2, 1973.
- 榎木 亨・岩田好一朗・松本 昇：碎波後の波の変形に及ぼす乱れの効果について，第 20 回 海岸工学講演会論文集，pp. 565–570, 1972.
- Stive, M. J. F.: Velocity and pressure field of spilling breakers, Proc. 17th Conf. on Coastal Eng., 1980（印刷中）.
- 田中則男・加藤一正・灘岡和夫：碎波帯内における浮遊砂濃度分布，第 26 回海岸工学講演会論文集，pp. 182–186, 1979.
- 田中寛好・和田 明・小森修蔵・竹内 出：拡散に影響を及ぼす海浜流の特性，第 26 回海岸工学講演会論文集，pp. 504–508, 1979.
- Tennekes, H. and J. L. Lumley: A First Course in Turbulence, MIT Press, 1972.
- Thornton, E. B.: Variation of longshore current across the surf zone, Proc. 12th Conf. on Coastal Eng., pp. 291–308, 1970.
- Thornton, E. B., J. J. Galvin, F. L. Bub and D. P. Richardson: Kinematics of breaking waves, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 461–476, 1976.
- 筧 源亮・山崎平弥・菅野晴行：海浜海域の風波による拡散に関する実験的研究，第 25 回 海岸工学講演会論文集，pp. 518–522, 1978.