

砕波後の波の位置と運動エネルギーの低減過程

岩田好一朗*・富田孝史**・石井弘行***

1. 結 言

砕波後の波のエネルギー変化を正確に把握することは、砕波帯以浅における海岸工学上の諸問題、例えば海浜流や海浜地形変化などの精度の高い予測のために不可欠である。波のエネルギーは位置と運動エネルギーにより構成されているが、なかでも運動エネルギーがそれらの諸問題に対して重要な係わりあいをもっていると考えられる。

水粒子の運動が複雑多岐にわたる砕波後において、運動エネルギーがどのように変化し、位置エネルギーや波の全エネルギーの低減過程とどのような係わり方をしているのかを明らかにすることは基本的に重要であるが、今まで斜面上の波動場の水粒子速度を計測して砕波後の波の運動エネルギーの変化過程を論議した研究は皆無である。

本研究では、水理実験によって砕波帯内の水粒子速度と水位変動を同時計測することにより波の位置と運動エネルギーを求め、それらの変化特性を波の全エネルギーやエネルギー流束の低減過程やエネルギー逸散などの変化特性と関連づけて検討を加えようとするものである。

2. 水理実験

(1) 実験装置

実験は名古屋大学工学部土木工学教室のフラップ型造波装置を有した片面ガラス張りの鋼製二次元水槽（長さ25m、幅0.7m、深さ0.95m）に1/10と1/30の二種類の木製の一樣傾斜面を設置して行われた。斜面は造波装置からできる限り離れた所に設置し、造波装置と斜面先端部との間には十分な一樣水深部を設けた。水面波形の計測には、電気容量式水位計を使用した。水粒子速度の計測は、キャンティレバー型流速計（岩田ら、1983）ならびに砕波前の気泡の混入しない領域では電磁流速計を併用して行われた。

(2) 実験方法

1/10と1/30勾配の斜面前端部の一樣水深部の水深をそれぞれ60cmと52cmとした。実験は、1/10と1/30勾配の斜面上で Spilling 型砕波、Plunging 型砕波および Heavy-Plunging 型砕波が生じるように表-1に示される規則波を発生させて行った。なお、Heavy-Plunging 型砕波は、Plunging 型砕波のなかでも砕波時の波の巻き込みが激しいものを指している。計測点を、図-1に例示するように、水平方向には砕波点より若干沖側から汀線近傍まで、鉛直方向には底面近傍から波頂部付近まで、それぞれできる限り密に選んだ（1ケース当り120から200点である）。計測は、水槽上部に設置された岸沖方向に移動可能な台車に水位計と流速計を取り付けて行った。各計測点における水面変動と水粒子速度の時間波形、ならびに造波装置前面の一樣水深部における水面波形を同時に磁気テープに記録した。また、砕波状況、砕波後の波の空間波形および気泡混入領域などを16mm高速シネカメラを使って記録した。

表-1 実験諸元

Case	砕波型式	斜面勾配	周期 T (s)	沖波波高 H_0 (cm)	砕波波高 H_b (cm)	砕波水深 h_b (cm)
1-1	Spilling	1/10	0.95	21.4	13.8	26.3
1-2	Plunging	1/10	1.35	16.9	14.3	18.8
1-3	H-Plunging	1/10	1.35	15.6	13.9	14.8
2-1	Spilling	1/30	1.00	10.4	10.0	16.0
2-2	Plunging	1/30	1.45	7.0	9.1	13.3
3-3	H-Plunging	1/30	1.60	7.1	9.0	13.7

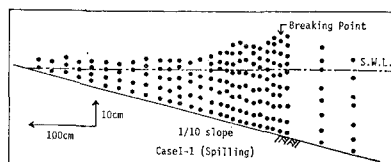


図-1 計測点 (Case 1-1)

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*** 工修 積水ハウス(株)

(3) 解析方法

静水面を基準にとったときの単位時間当りの波の位置エネルギー E_P 、単位時間当りの運動エネルギー E_K および全エネルギー E_T をそれぞれ次式で定義した。

$$E_P = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^\eta \rho g z dz \dots\dots\dots (1)$$

$$E_K = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-h}^\eta \frac{\rho}{2} (u^2 + w^2) dz dt \dots\dots\dots (2)$$

$$E_T = E_P + E_K \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 z ：静水面を基準とした鉛直上向きの距離、 η ：水面変動、 u ：水平方向の水粒子速度、 w ：鉛直方向の水粒子速度、 T ：波の周期、 h ：静水深、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 t ：時間である。

エネルギー流束 F を二次のオーダーの圧力に対して与えられる次式で定義した。

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-h}^\eta u \left\{ \frac{\rho}{2} (u^2 - w^2) + \rho g \eta \right\} dz dt \dots\dots (4)$$

式(1)から(4)の計算に際しては、実験データを0.05秒で離散化し、8~10波を用いて時間平均を行い、鉛直方向積分は両端を長方形近似した台形公式を使用して行った。砕波点、気泡混入水深が最大となる地点(x_a)、気泡混入領域(x_o)、水平渦の形成領域、巻き込み点(Plunging point; x_p)などを全て16mmフィルムをフィルムモーションアナライザーで解析して決定した。なお、砕波点は波高最大地点とほぼ一致した。

3. 実験結果とその考察

(1) 波の位置と運動エネルギー

図-2は、波の全エネルギー E_T 、位置エネルギー E_P および運動エネルギー E_K の変化過程を示したものである。縦軸はそれぞれのエネルギーを砕波点における全エネルギー E_{Tb} で無次元化したものを示し、横軸は砕波点からの無次元距離 $x^* = x / \sqrt{g(h+\bar{\eta})} T$ を示している。ここで、 x は砕波点からの距離、 h は静水深、 $\bar{\eta}$ は平均水深、 g は重力加速度、 T は波の周期である。図中の○、△および■印はそれぞれ E_T/E_{Tb} 、 E_P/E_{Tb} 、および E_K/E_{Tb} を示し、 x_p 、 x_a および x_o はそれぞれ砕波点から、Plunging point まで、気泡混入水深が最大となる地点までおよび水中の気泡が消える地点までの無次元距離を示している。

全エネルギー E_T 、位置エネルギー E_P および運動エネルギー E_K の低減は、同じ斜面勾配では Heavy-Plunging 型砕波のときに最も急であり、以下 Plunging 型、Spilling 型砕波の順に緩やかになっていく。また、同じ砕波型式では斜面勾配が急になるほどそれらの低減も急になる。これらのエネルギー低減は気泡混入領域で著しいことが認められる。このことより、従来から言われているようにエネルギーの低減には気泡混入が重要な役割を果たしていることが確認できる。運動エネルギーと位置エネルギーの関係に着目すると、斜面勾配や砕波型式によらず砕波後は運動エネルギーが位置エネルギーよりも大きく

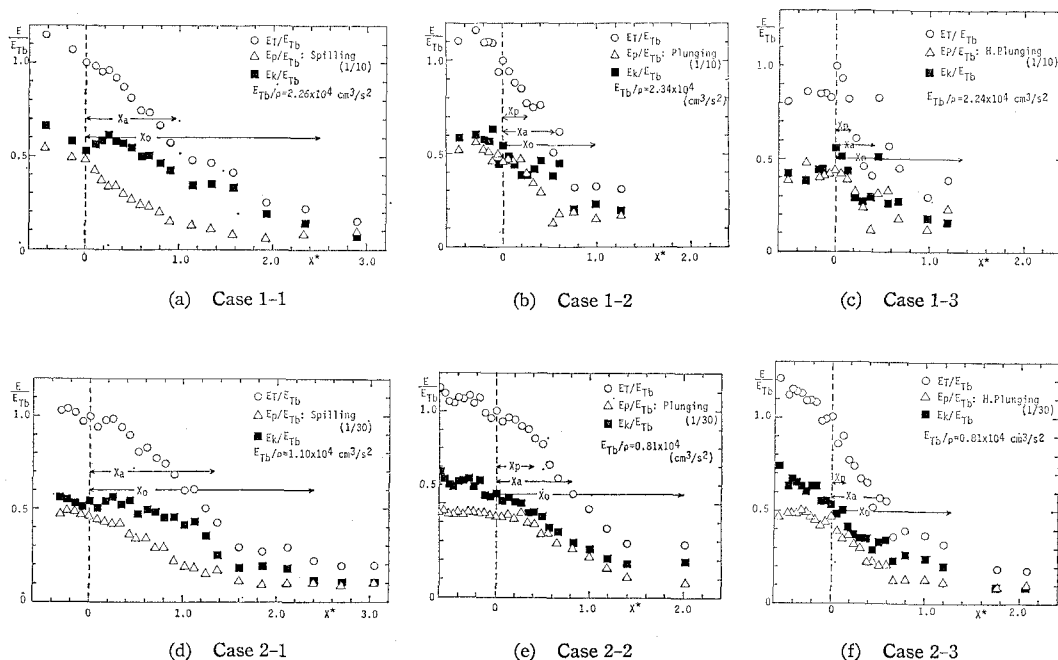


図-2 エネルギーの変化

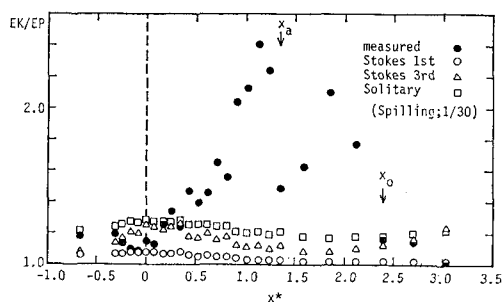
なる傾向が認められる。しかし、砕波型式によって、それらの低減過程は異なっている。

Spilling 型砕波では、砕波後まず波高の減衰に伴って位置エネルギーが減少し、そのときには運動エネルギーは漸減ししかない。位置エネルギーの減少は x_a を過ぎたあたりでほぼ終了し、その後はほとんど一定値をとるのに対し、運動エネルギーは x_a あたりで急に減少し、以後段階的に減少していく。 x_0 を過ぎたあたりになると E_P と E_K はほぼ等しくなる。以上のことより、Spilling 型砕波では、気泡混入の効果は、とくに位置エネルギーの低減に強く現れることが推察される。また、砕波直後に運動エネルギーの増大が認められる。この領域では気泡混入量はまだ少なく、気泡によるエネルギー損失は少ないが、位置エネルギーが減少していることから、位置エネルギーから運動エネルギーへの変換があったものと思われる。

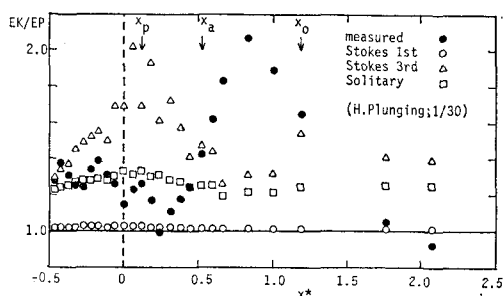
一方、Plunging 型および Heavy-Plunging 型砕波では、Spilling 型砕波ではみられなかった波頭の突っ込みやそれに伴う splash と大規模な水平渦の発生によってエネルギーの低減過程は、Spilling 型砕波のものとは異なる。1/10 勾配では、波頭の突っ込みなどの現象が激しいためにエネルギー変化は大きく変動しているが、1/10 と 1/30 勾配の両斜面において砕波後は運動エネルギーが位置エネルギーを上回りながら両者はほぼ同様に減少していく。とくに Heavy-Plunging 型砕波では、 x_0 までは位置エネルギーの減少は少ないのに対して、運動エネルギーの減少は大きい。その後 x_a にかけて位置エネルギーは急速に減少し、一方運動エネルギーは増大する。この領域では、16mm フィルムの解析から水平渦が存在していることが確認されており、この水平渦を介した位置エネルギーから運動エネルギーへのエネルギー変換があると考えられる。

また、上述したように、 x_p 、 x_a および x_0 は位置エネルギーと運動エネルギーの変化の過程と密着するパラメータとして重要である。

図-3 は、運動エネルギーと位置エネルギーの比 E_K/E_P を示したものである。図中の●印は実験値であり、○、△および□印は、実験から得られた波高と周期を使用して、それぞれ微小振幅波理論、Stokes の三次理論 (Skjelbreia・Hendrickson, 1961) および孤立波の二次理論 (岩垣・楳木, 1979) から求めた計算値である。なお、計算は波速の第二定義に従っている。Spilling 型砕波では、実験値はばらつきはあるものの $x^*=1$ 付近でピークを示すのに対し、計算値はどれも砕波点から減少傾向を示している。実験値と計算値の差異は、主に計算値において運動エネルギーが現象に対応していないことに起因している。ただし、孤立波理論に基づく運動エネルギー



(a) Case 2-1



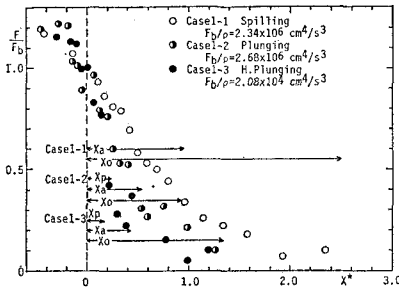
(b) Case 2-3

図-3 運動エネルギーと位置エネルギー

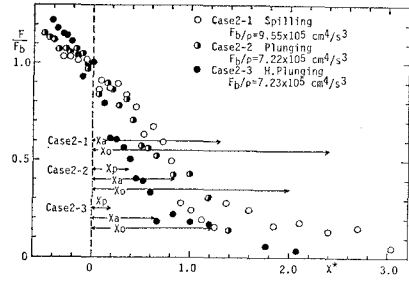
と位置エネルギーの値は実験値よりもかなり大きくなる。Heavy-Plunging 型砕波では、実験値は砕波点から x_p 過ぎあたりまでは減少し、その後増大して $x^*=0.8$ 付近でピーク値を示す。微小振幅波理論と孤立波理論に基づく計算値はそれぞれ 1.0 から 1.1 および 1.2 から 1.3 の範囲にあるのに対し、Stokes の三次理論に基づく計算値は砕波点付近で大きな値を取り、その後 1.4 付近まで減少する。このように、従来の理論で運動エネルギーと位置エネルギーの関係を論ずるのは困難であることがわかる。

(2) エネルギー流束

図-4 は、エネルギー流束 F の変化を示したものである。縦軸は無次元エネルギー流束 F/F_0 (F_0 : 砕波点におけるエネルギー流束)、横軸は無次元距離 x^* である。同図において所々エネルギー流束が増大している箇所があるが、これはエネルギー流束の表示式 (4) の誘導過程で使用した圧力の近似式に問題があると思われる。エネルギー流束は、斜面勾配や砕波型式によらず気泡が最も深い位置まで達する x_a まではほぼ直線的に減少し、その後は緩やかに減少する傾向を示す。この傾向は位置エネルギーの低減過程に似ている。図-2 に示したエネルギー低減過程と同様にエネルギー流束の低減は、斜面勾配が急になるほど急になり、また、Heavy-Plunging 型、Plunging 型、Spilling 型砕波の順に急である。これらの

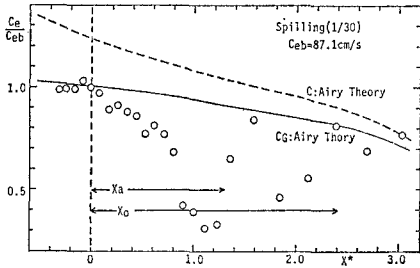


(a) 斜面勾配 1/10

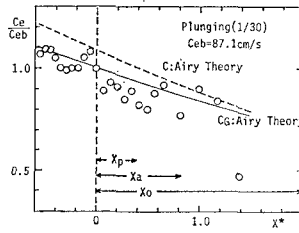


(b) 斜面勾配 1/30

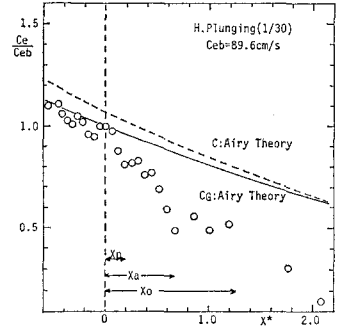
図—4 エネルギー流束の変化



(a) Case 2-1



(b) Case 2-2



(c) Case 2-3

図—5 エネルギー輸送速度

ことより、エネルギー流束の変化の割合で表現されるエネルギー逸散率は、砕波点から気泡混入水深が最大となる x_a までの領域で大きく、斜面が急であるほど、また、Heavy-Plunging 型砕波になるほど大きくなる。

(3) エネルギー輸送速度

砕波後では、波のエネルギーは群速度 C_g では輸送されないことが一般に言われている。図—5 は実験から得られたエネルギー輸送速度 $C_e (= F/E_T)$ を示したもので、縦軸は砕波点におけるエネルギー輸送速度 C_{eb} で無次元化したエネルギー輸送速度、横軸は無次元距離 x^* である。図中、○印は実験値であり、実線と破線はそれぞれ微小振幅波理論による群速度 C_g と波速 C である。砕波前はエネルギー輸送速度は群速度にほぼ等しいが、砕波後は波の進行に伴ってエネルギー輸送速度は群速度よりも小さくなっている。これは、泉宮・堀川(1982)の結果と一致している。また、斜面が急になるほど、砕波直後のエネルギー輸送速度と群速度の差は大きくなる。泉宮・堀川は、砕波後のエネルギー輸送速度と群速度の差の一因として定常流の存在をあげている。そこで、図—6 に本実験による Euler 平均流の分布を示す。縦軸は静水深で無次元化した底面からの距離であり、横軸は無次元平均流速である。平均流の鉛直分布形状は、灘岡ら

(1982) と同様に、trough レベルを境としてそれより上では岸向き、それ以下では冲向きであり、底面近くにピークが生じている。同図より、砕波点から汀線近くまではほぼ同程度の平均流が存在していることから、汀線近くになるほどこの平均流の影響が強く現れ、これにより運動エネルギーの一部が沖側に輸送されることは考えられる。ただし、Case 2-1(図—5(a)) に代表してみられる様なエネルギー輸送速度の増加現象は、平均流の存在だけでは説明できない。これに関して、図—5(a) と図—2(d) を比較すると、運動エネルギーと位置エネルギーが等しくなるとき、エネルギー輸送速度が群速度に近づく傾向が認められる。この傾向が有為なものであるかどうかについては、エネルギー流速 F の表示式(4)も含めて今後検討する必要がある。

4. 結 言

本研究により得られた主要な結論は以下のようである。

1) 砕波後の波の位置エネルギー、運動エネルギー、全エネルギーおよびエネルギー流束の低減は、同じ斜面勾配では Heavy-Plunging 型が最も急であり、以下 Plunging 型、Spilling 型砕波の順である。同じ砕波型式では、斜

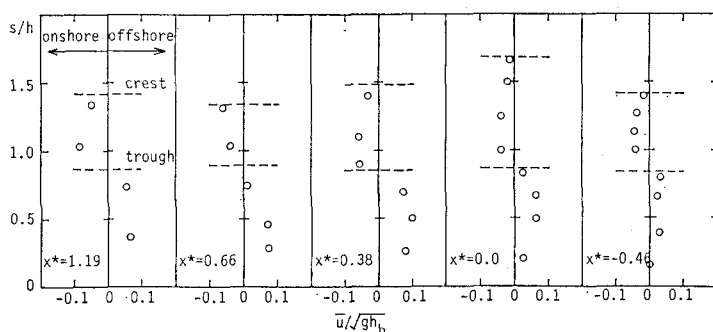


図-6 平均流の鉛直分布 (Case 2-3)

面勾配が急になるほどそれらの低減も急になる。それらの波のエネルギーなどの低減は気泡混入領域で大きい。

2) 砕波後は砕波型式に関係なく運動エネルギーが位置エネルギーよりも大きく、砕波型式および斜面勾配の違いにより全エネルギーに占める位置エネルギーと運動エネルギーの割合は異なる。

3) Spilling 型砕波では、砕波点直後において位置エネルギーから運動エネルギーへエネルギーの変換が生じる。Plunging 型および Heavy-Plunging 型砕波では、水平渦がエネルギー変換に大きく関与する。

4) 砕波後のエネルギー輸送速度は群速度よりも小さく、その差は同じ砕波型式において急斜面の方が大きい。これには波の谷以下で発達した冲向きの Euler 平均流の存在が関与している。

5) 気泡混入領域の強さおよび大きさを表すパラメータと考えられる、砕波点から Plunging point までの距離、気泡混入深さが最大となる地点までの距離および水

中の気泡が消える地点までの距離は、全エネルギーに占める位置エネルギーと運動エネルギーの大小関係を表す重要なパラメータである。

本研究は、文部省科学研究費補助金・総合研究 (A) (代表者: 中央大学 服部昌太郎教授) により行われた研究であることを付記しておく。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・堀川清司 (1982): 砕波によるエネルギー逸散過程に関する研究, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 15~19.
- 岩垣雄一・榎木 亨 (1979): 海岸工学, 共立出版, 463p.
- 岩田好一朗・小山裕文・布藤省三 (1983): 砕波後の波動エネルギーの変化に関する実験的研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 10~14.
- 灘岡和夫・近藤隆道・田中則男 (1982): レーザードップラー流速計による砕波帯内の流速場の構造の解明, 港研報告, pp. 49~106.
- Skjelbreia, L. and J. Hendrickson (1961): Fifth order gravity wave theory, Proc. 7th ICCE, pp. 184~196.