

周波数特性からみた砕波後の波の変形に関する一考察

—砕波の内部機構に関する基礎的研究 第5報—

榎 木 亨*・岩田好一郎**

1. 緒 言

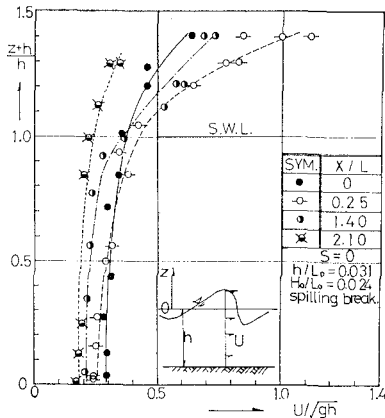
著者らは第21回海岸工学講演会¹⁾において、砕波後の気泡連行を伴う波高減衰の大きい領域ではエネルギー逸散の高々10%程度が底面摩擦によりもたらされることを水理実験より明らかにするとともに、砕波後の波の変形、特にエネルギー逸散を支配するのは底面摩擦とhorizontal roller 以外の気泡連行を伴う強い乱れであることを指摘した。この乱れの構造は詳細な流速場が判明しない限り解明されないが、気泡連行を伴う乱れは静水面上の波面に集中しており、その部分での水粒子速度の波の進行に伴う減衰がきわめて大きいこと(図一1参照)、砕波の流速と水面波形の周波数特性の相関関係が強いという報告²⁾があること、などにより静水面近傍の水粒子速度と強い相関関係を有すると考えられる水面波形の周波数特性を解析することによりある程度砕波後の乱れの解決の糸口がつかめるものと判断される。砕波後の波形はその非対称性が著しいので、基本周波数以外の周波数成分が含まれていると考えられるが、こういった砕波後の波の周波数特性について従来あまり論議がなされていない。今回著者らは砕波後の波の水面波形の周波

数特性について水理実験を行って明らかにし、この周波数特性の面より砕波後の波の変形について考察を加えたので、その結果を報告する。

2. 水理実験

(1) 実験装置と実験方法

実験は前回¹⁾と同様の前端部が1/18の勾配をもつ一定水深域と1/15, 1/25と1/40の3種類の傾斜水域に対して行った。傾斜水域での実験は本学のブランジヤ型造波機が設置されている屋外鋼製造水槽(長さ50m×幅0.63m×高さ1.0mの片面ガラス張り)を用いて行った。なお、一定水深域の実験は前回¹⁾と同一の造波水槽と造波装置を用いて行った。実験波は各実験水域に対し、spilling breaker と plunging breaker が生起するように選定したが、実験種目を示すと表一のごとくである。水面波形の計測には4台の電気抵抗線式波高計を用いた。このうち1台は造波板近傍に固定して発生波を計測し、残りの3台を砕波点前後で適宜動かして主に砕波後の波の計測をしたが、計測は造波板始動後第10波目から行った。なお、計測地点の間隔は原則として10cm間隔としたが、必要な場合には5cm間隔とした。この水面波形の記録はすべて磁気テープで行い、これと平行して16mm高速シネカメラ(100コマ/sec~200コマ/



図一1 砕波後の波の水粒子速度 (S=0, X=砕波点からの距離, L=水深 h での波長)

表一 実験種目

RUN	T (sec)	H ₀ (cm)	H ₀ /L ₀	S (h cm)
RUN-1	0.80	7.2	0.072	h=14 cm
-2	0.80	10.3	0.103	"
-3	1.20	5.4	0.024	h=7.0 cm
-4	1.20	10.8	0.048	"
-A・1	0.84	7.4	0.067	S=1/15
-A・2	0.90	7.3	0.058	"
-A・3	0.96	4.8	0.034	"
-A・4	1.22	3.7	0.016	"
-B・1	0.83	7.9	0.073	S=1/25
-B・2	1.00	7.0	0.045	"
-B・3	0.96	4.9	0.034	"
-B・4	1.22	3.5	0.015	"
-C・1	0.80	6.4	0.064	S=1/40
-C・2	1.00	7.6	0.049	"
-C・3	1.22	6.2	0.027	"
-C・4	1.53	8.4	0.023	"
-C・5	2.04	5.6	0.0085	"

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学教室
 ** 正会員 工博 大阪大学講師 工学部土木工学教室

sec) で碎波の挙動を撮影した。

(2) 解析方法

水面波形の周波数特性をフーリエ成分波の面より論議するため、26 秒間の水面波形記録を 1/40 秒間隔、あるいは 41 秒間の波形記録を 1/25 秒間隔で読みとりデジタル化し、そのうち 1024 個のデータを用いて FFT 法でフーリエ解析を行った。また、碎波形式の識別、碎波水深、碎波波高および碎波後の気泡連行領域、horizontal roller の発生と消滅地点および規模などは全て 16mm 高速シネカメラの写真解析より決定した。

(3) 実験結果とその考察

(i) 気泡連行域と horizontal roller

水面波形の周波数特性について論議する前に一様傾斜水域での碎波により生起する horizontal roller と気泡連行域について述べておく。傾斜水域の碎波により形成される roller には 3 種類あり、図-2 に示すように、波頭部が静水面と交差する点の沖側で生起する roller (Type-A と称す)、splash の岸側先端部に形成される roller (Type-B と称す) と段波波先で見られるような気泡連行を伴い波先とともに移動する roller (Type-C と称す) であり、この Type-C の roller の消滅地点が気泡連行の消滅する地点である。Type-A と Type-B の roller は対になって静水面下に形成されるが、Type-C は静水面より上の波前面部に形成される。そしてその規模は Type-B、つまり splash の先端部に形成される roller が一番大きく、ついで Type-A (Type-B と同一規模のと

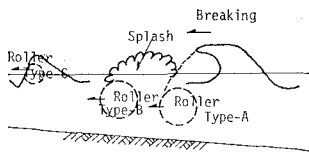


図-2 horizontal roller

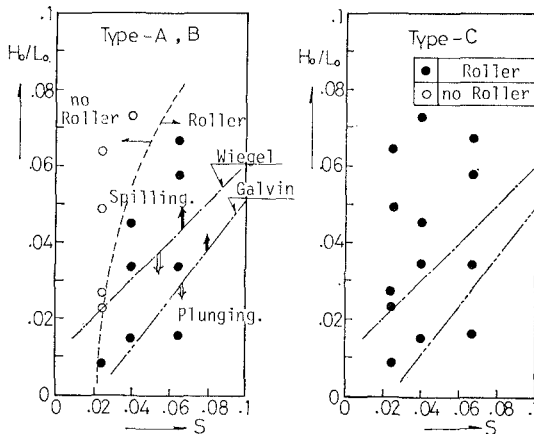


図-3 Roller の発生限界

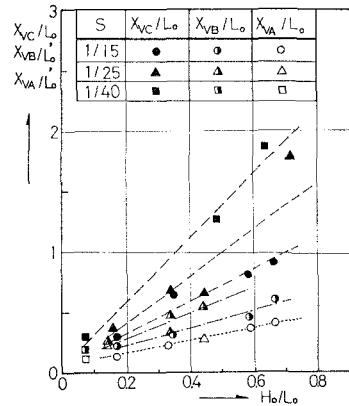


図-4 Roller の消滅距離

きもある)、Type-C の順である。なお一定水深域での碎波ですでに著者らの指摘した³⁾ roller は Type-A であり、Type-B、Type-C は明確に認められなかった。この 3 種類の roller の発生限界を示した図-3 によれば、Type-A と Type-B の roller は底面勾配 S が大きいほど、また沖波波形勾配 H_0/L_0 が小さいほど形成され易いのに対し ($S=1/15$ では著者らの実験範囲では全て Type-A、B の roller は形成される)、Type-C の roller は傾斜水域では常に形成され、波状段波の波先部のように気泡連行して波先とともに移動するため、図-4 に示すようにその消滅距離 X_{VC}/L_0 (X_{VC} =碎波点から Type-C の roller が消滅する地点までの水平距離、 L_0 =沖波波長) は Type-A (X_{VA}/L_0 の値)、Type-B (X_{VB}/L_0 の値) に比してきわめて汀線側となる。また図-3 に示すように Type-A、B の roller の形成の有無は Patric⁴⁾ あるいは Galvin⁵⁾ が指摘した spilling breaker と plunging breaker の碎波形式の分類とは一致していない。この事は著者らがすでに一定水深域の碎波で指摘した事実³⁾、つまり碎波の形式により horizontal roller の形成の有無が決まり spilling breaker は horizontal roller の形成を伴わないという事実と異なっており、このことは一様勾配の傾斜水域での碎波後の波の挙動の複雑さを示すと同時に水底勾配の有無により波動エネルギー逸散過程がかなり異なることを示すものと考えられる。

(ii) 碎波後の波の周波数特性

碎波後の波は、碎波により生起した horizontal roller、splash、気泡連行を伴った非対称性の強い波形を示すため、基本周波数成分以外の周波数成分の波が含まれていると考えられる。ここでは、いかなる周波数成分の波がいかなる割合で含まれ、それが波の進行に伴いいかなる挙動を示すかを明らかにしていく。図-5、図-6 は碎波後の波の進行に伴う成分波高スペクトルの変化の一例を示したもので、図-5 は $S=1/25$ での碎波 (RUN-B-4) の成分波高スペクトルであり、図-6(a) は $S=1/40$

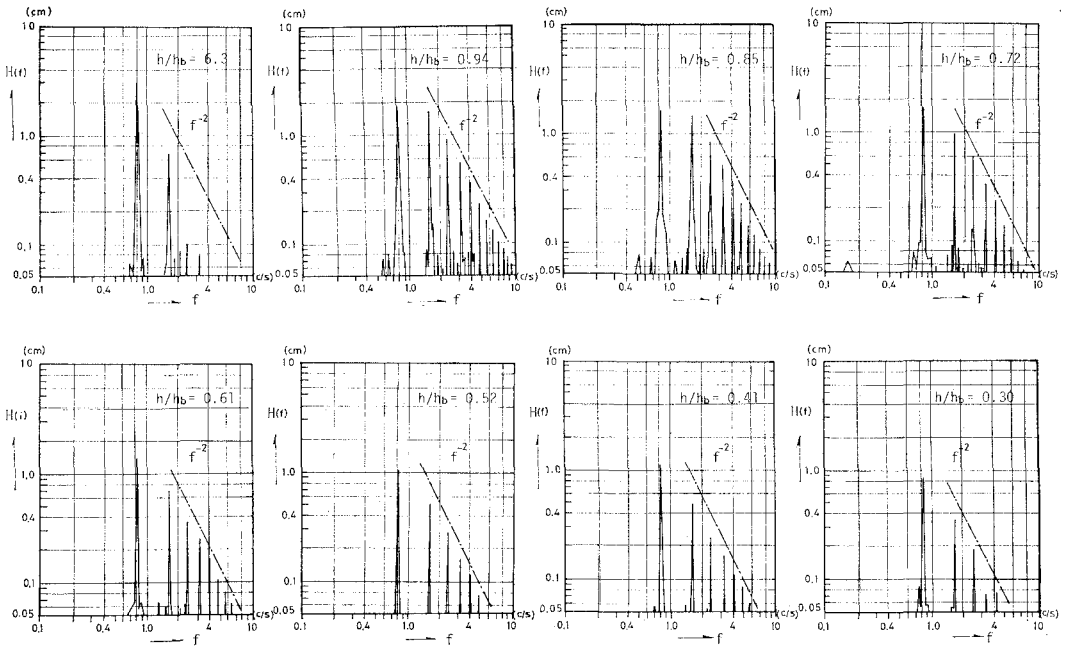


図-5 成分波高スペクトル

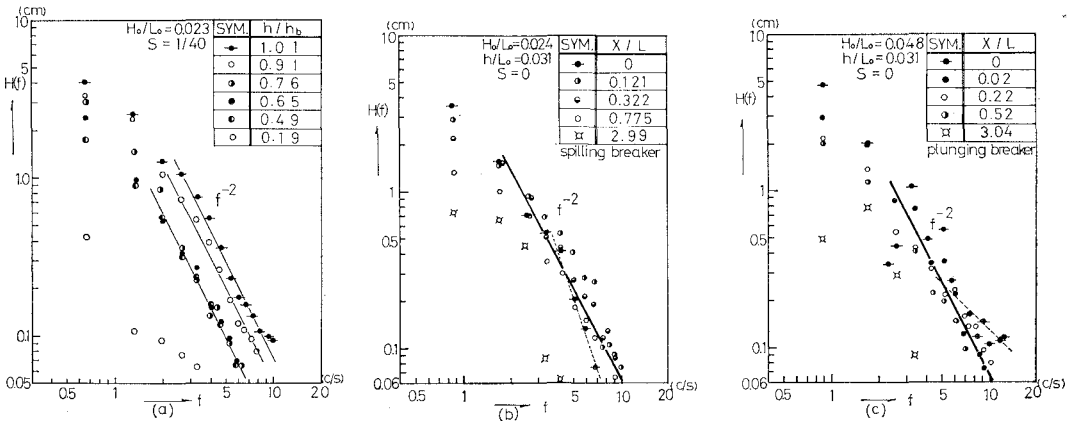


図-6 成分波高スペクトル (卓越成分波)

での砕波 (RUN-C-4), (b), (c) は $S=0$ での砕波 (RUN-3 と RUN-4) における卓越成分波のみの波高スペクトルを示したものである。図-5 から明らかなように、砕波後の波 (以後単に波と称するときはフーリエ解析をしていない計測波を意味する) の構成成分波 (以後単に成分波と称す) は基本周波数とその基本周波数の8倍~14倍程度の整数倍の調和成分波がきわめて卓越しており、他の周波数成分波は無視されるほど小さい。このことは砕波は沖波での基本周波数 (あるいは

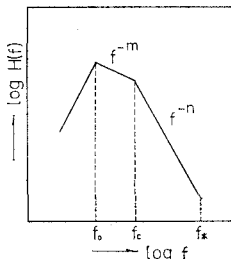


図-7

を保持するものの、高次の調和成分波に分解*されるため波形は正弦波から著しくひずむことを示している。そしてその成分波高の分布は基本周波数 f_0 のほぼ2~3倍程度の周波数を境にてその高周波数側と低周波数側で異なり、図-7の模式図に示すように、高周波数側 ($f_0 \sim f_*$) で f^{-n} 、低周波数側 ($f_0 \sim f_0$) で f^{-m} に比例するような分布形状をとる。このうち高周波数側の勾配 n は、図-5、図-6に示すように、砕波の進行に伴い若干変化するもののその変化はきわめて小さく、気泡連行を伴う砕波帯で、ほぼ $n=2$ の一定値をとっている。さらにこの値は図-8 (砕波帯での平均値を示す) に示すように沖波波形勾配 H_0/L_0 と水底勾配 S による

* 必ずしも自由波になる事を意味するものではない。

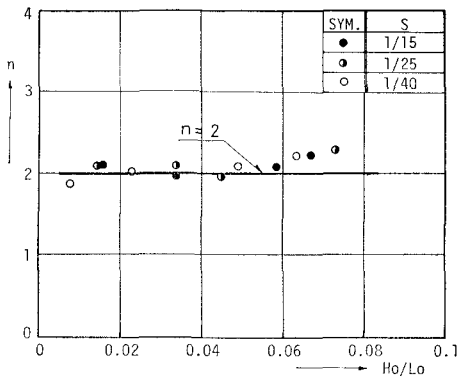


図-8 n と S と H_0/L_0 の関係

変化は小さく、ほぼ両者に無関係であるとみなされるため、この $n=2$ が、 f^{-2} が、砕波帯での一種の“平衡勾配”と判断される。つまり砕波は Type-C の roller と気泡を連行しながら高次成分波の波高が f^{-2} に比例するような分布形を保ちながらエネルギーの放出を行い減衰していくものと推察される。このことをさらに 図-6 (b), (c) の一定水深域の砕波について考えてみる。なお気泡連行領域(砕波帯)は 図-6(b) について $X/L \leq 0.75$, 図-6(c) について $X/L \leq 1.6$ である。ここで、 X は砕波点からの波の進行距離、 L は水深 h での波長を示す。波頂部から砕けていく 図-6(b) の spilling breaker の場合は砕波瞬時 ($X/L=0$) は高周波数側の

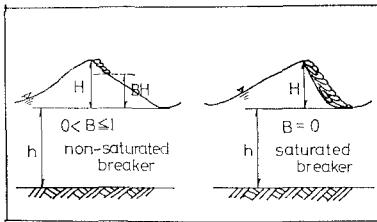


図-9

波高スペクトルの勾配は f^{-2} より大きく(図中で破線で示す)、まだ砕波前の特性を有している。これは Méhauté⁶⁾ が指摘したように砕波の乱れが波前体に“saturate”していないため(図-9 参照)、したがって乱れが saturate している、たとえば $X/L=0.121$, $X/L=0.322$ 地点では高周波数側の波高スペクトルはほぼ f^{-2} となっている。また、この砕波帯では波の進行にともなう基本周波数あるいはその2倍周波数といった低周波数成分波の波高低減が著しいのに対し、図-10 にも示すように基本周波数の4倍以上の卓越成分波の波高が逆に増大し、その程度は高次ほど大きいことが認められる。なお 図-10 に示す H_{ib} は、基本周波数の i 倍周波数波の砕波時の波高を意味する。このことは低周波数側から高周波数側へエネルギーの輸送がなされることを示すものといえる。また砕波帯を過ぎると、高次の周波数成分ほど急激に減少し、 $X/L=2.99$ 地点のように f^{-2} の平衡勾配から著しくはずれてしまう。一方、図-6(c) に示す plunging breaker の場合は、波頭部が波先におおいかぶさるようにして砕けるため砕波時(最高の波高を示す時点を採用)の成分波高スペクトルは spilling breaker の場合ほど整正な形を示さないが、高次の成分波高については $n \geq 1$ (図中破線で示す)で2よりかなり小さな値をとっている。これは一種の過飽和状態を示すものとも考えられ、この点 spilling breaker と対照的である。また、この plunging breaker の場合も乱れが saturate の状態になれば $X/L=0.22$, $X/L=0.52$ 地点のように f^{-2} の平衡勾配がほぼ成立している。この場合砕波後の低周波数側の波高低減が 図-6(b) に示す spilling breaker より著しいが、その割には高周波数側の波高の増加が小さく 図-10 に示すように、spilling breaker の場合と異なり砕波直後からほぼ減衰している。これは plunging breaker の場合砕波直後 horizontal roller の形成を伴うことを考えると、この波動内部に形成される roller に成

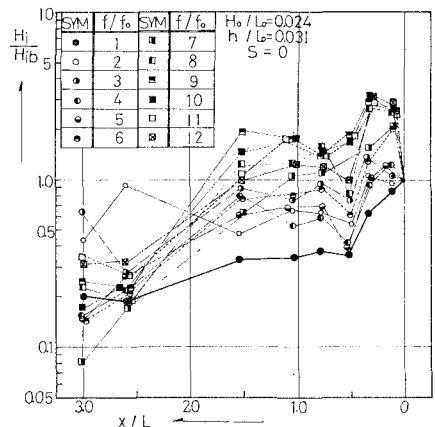
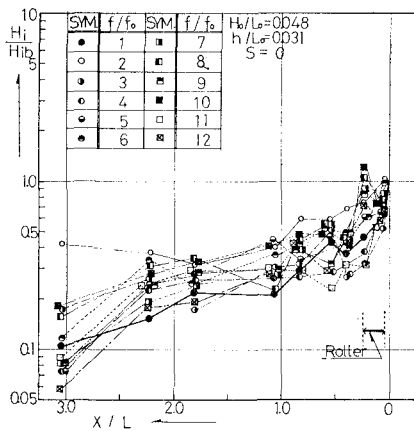


図-10 成分波高の変化 ($S=0$)

分波のエネルギーが消費されたものと判断される。

また、図-7に示す低周波数側のスペクトル勾配 m については n より小さい値をとることは既述の 図-5, 図-6 より明らかであるが、砕波帯での値の変化は水底勾配 S により異なる。なお、 f^{-2} が成立する上限の周波数 f_* は本実験ではたかだか 11 c/s 程度までであり表面張力波の領域には属していない。

(iii) 次元解析に基づく“平衡勾配”の考察

砕波帯では波はエネルギー的に飽和状態になっているため水面波形そのものも一種の極限状態に達していると考えられる。したがって、その構成要素波特に水面波形のひずみとエネルギー逸散に関係する高次の周波数成分の構成のされ方にある種の限界状態が存在するものと考えられる。そこで、次元解析に基づき波高スペクトル $H(f)$ がいかなる次元量の組合せで表現されるか検討する。

上述した極限状態での水面波形を支配する量は、重力加速度 g 、周波数 f 、水深 h 、流体と気泡の混合した状態での“砕波渦度粘性係数とでも称すべき”粘性係数 ϵ_* (この ϵ_* は著者らの提案した³⁾ $\rho U_*^2 (U/h)$ に対応する量) である。つまり式 (1) が成立することになる。

$$H(f) = F(f, g, \epsilon_*, h) \dots \dots \dots (1)$$

式 (1) の波高スペクトル $H(f)$ の次元は [L] である。また、上述の実験によれば、高次周波数はほとんど深海域にあるため、 $H(f)$ は水深 h に explicit な形ではなく implicit な形で支配されるものと仮定して、右辺の諸量を組合せて左辺と同次元表示にすると式 (2) のように表わすことができる。

$$H(f) = \rho (\sqrt{gh^3/\epsilon_*}) \cdot g \cdot f^{-2} \quad (f_0 < f < f_*) \dots (2)$$

したがって、式 (2) に示すように高次調和成分波の波高は周波数の -2 乗に比例する値をとることがこの次元解析から明らかになり上述の実験事実と一致する。なお、波高スペクトル $H(f)$ は $\sqrt{gh^3/\epsilon_*}$ の量によっても左右され、この項が波の進行に伴う波高減衰に寄与するものといえる。

(iv) 砕波後の波高変化の再検討 (傾斜水域)

砕波後の波高変化 (成分波を意味しない) については従来比較的良好に検討されてきており、著者らもすでに $S=1/15$ の斜面での砕波では spilling breaker の方が plunging breaker より大きな波高減衰を示すことを指摘⁷⁾ している。 $S=1/15$ と $S=1/40$ の斜面での spilling breaker と plunging breaker の砕波後の波高変化の一例を示した 図-11 によれば、 $S=1/15$ の場合はすでに指摘したように spilling breaker の方が plunging breaker より波高低減が大きいものに対し、 $S=1/40$ では逆に spilling breaker の方が小さく、 $S=1/15$ と $S=1/40$ では傾向が逆転している。しかし、砕波型つまり H_0/L_0 別の差異が明確になるのは 図-11 に示すように、horizontal roller の形成後であり、このことは砕波型というより

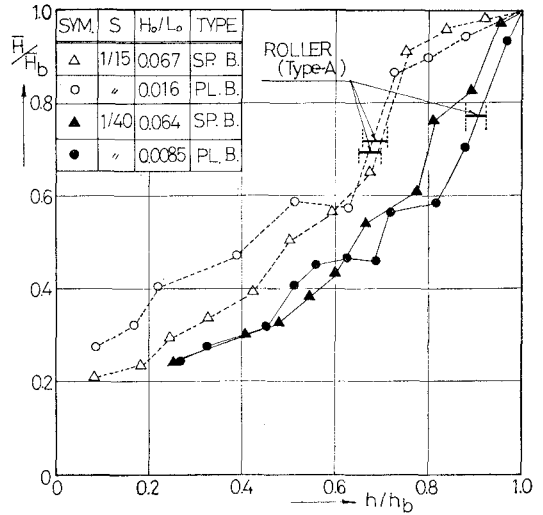


図-11 砕波後の波高変化

はむしろ傾斜水域での砕波にともなう horizontal roller (Type-A) の生起の有無とその規模に依拠すると考えられる。 $S=1/15$ では 図-3 に示すように spilling breaker の場合でも roller の形成を伴い、この roller の規模は砕波波高 \bar{H}_b と roller の生起水深 h_V によりほぼ決定される³⁾ ため、 $H_0/L_0=0.067$ の spilling breaker の波 ($\bar{H}_b=6.9$ cm, $h_V=5.6\sim 5.3$ cm (roller の中心軸位置)) により生起する roller の規模の方が $H_0/L_0=0.016$ の plunging breaker の波 ($\bar{H}_b=4.9$ cm, $h_V=3.5\sim 3.2$ cm) より大きい。なお、これは 16 mm フィルムの写真解析からも確認している。したがって、horizontal roller により消費される波動エネルギーは $H_0/L_0=0.067$ の spilling breaker の方が $H_0/L_0=0.016$ の plunging breaker の波より大きいため、roller の形成にともない spilling breaker ($H_0/L_0=0.067$) の波の方が大きく減衰したものと判断される。一方、 $S=1/40$ の場合は 図-3 に示すように、roller の形成をみるのは H_0/L_0 のきわめて小さい波に限定されて、 $H_0/L_0=0.064$ の spilling breaker の波は roller の形成を伴わないのに対し、 $H_0/L_0=0.0085$ の plunging breaker の波の方は roller の発生をみることになる。図-11 によれば、roller の形成に伴い plunging breaker ($H_0/L_0=0.0085$) の波の方が $H_0/L_0=0.064$ の spilling breaker の波より波高減衰が一時大きくなっており、両者の波高減衰の差異は horizontal roller の形成によることは明らかである。このことは一定水深域の砕波³⁾ で著者らがすでに指摘した事実と一致する。また本論で図示していない $S=1/25$ の場合についても同様のことが認められ、horizontal roller (Type-A) を伴う H_0/L_0 の小さい波の方が roller の形成を伴わない H_0/L_0 の大きい波より波高減衰が幾分大きくなっている。

3. 結 語

本論では砕波後の波の変形について、水面波形のフーリエ解析より得られる成分波高スペクトルの面より考察を進めてきた。それによれば、砕波後の波には基本周波数以外の高次の調和周波数成分波が含まれ、特に砕波帯では、高次の周波数側の波高スペクトルは周波数の -2 乗、 f^{-2} に比例する値を一種の“平衡勾配”として取ることが明らかにされた。また砕波後の波高変化について再検討を加えて、Patricら⁴⁾の提案した砕波型に関係なく砕波により生じた horizontal roller の規模が大きいほど波高減衰度合の大きいことを明らかにした。なお著者らは目下以前提案した砕波後の波動式⁸⁾について再検討を加え本論で明らかにした乱れの特性との関連づけを行っておりこの結果については後日報告する予定である。なお本研究に協力を賜った本学大学院生 沢田 隆君に謝意を表するとともに、本研究の一部は49年度文部省科学研究費、試験研究(2)(研究代表者:大阪大工・岩田好一期)によるものであることを付記しておく。

参 考 文 献

- 1) 榎木 亨・岩田好一期・松本 昇: 砕波後の波の底面摩擦力に関する実験的研究—砕波の内部機構に関する基礎的研究第4報—, 第21回海岸工学講演会論文集, 1974.
- 2) Richardson, D.P.: The Kinematics of Water Particle Velocities of Breaking Waves within the Surf Zone, NTIS, AD-769 423, 1973.
- 3) 榎木 亨・岩田好一期・松本 昇: 砕波後の波の変形に及ぼす乱れの効果について—砕波の内部機構に関する基礎的研究第3報—, 第20回海岸工学講演会論文集, 1973.
- 4) Patric, D.A. and R.L. Wiegel: Amphibian Tractors in the Surf, Proc. 1st. Conf. Ships and Waves, 1955.
- 5) Galvin, C.J.: Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches, Journal of Geophysical Research, Vol. 73, No. 12, June 15, 1968.
- 6) Méhauté, B.L.: On Non-Saturated Breakers and the Wave Run-Up, Proc. of 8th Conf. on Coastal Eng., 1963.
- 7) 榎木 亨・岩田好一期・中辻啓二: 砕波の内部機構に関する基礎的研究(第1報), 第16回海岸工学講演会講演集, 1969.