

砕波形態の分類について(周期波)

北大工 正員 佐伯 浩
電々公社 正員 藤本 治聖
北大工 正員 尾崎 晃

§1. 緒論 海の波の砕波現象は、それが波の極限状態の現象である事から、種々の海岸工学の諸問題に大きく関連している。一般に浅海領域においては、ある水深において存在しうる最高の波高はその水深における砕波波高であり、設計波高算の決定にも重要な意味を持つ。また砕波後は Radiation Stress による Set up により沿岸流の発生に大いに関係している。また、海岸漂砂算の問題にも砕波が大きな役割を演じている事は周知の事実である。波の砕波そのものが海岸工学上大きな意味を持つものであるが、その砕波の形態についても同様に、海岸工学上重要な問題と考えられる。砕波の形態は大きく分けて3つに分けられていて、それぞれ Spilling Breaker (崩れ波)、Plunging Breaker (巻波)、それに Surging Breaker とよばれていて、これは砕波の形によって分けたものである。一般に、Spilling Breaker は波頂部から徐々に泡立ちながらくだり始め、その形は、比較的 Symmetric であって、この砕波限界の時の波高、水深、波長の関係は、海底勾配が緩やかな場合に限り、有限振幅波理論を用いて次式により計算できる。

$$C = U_{\text{crest}} \quad (1)$$

C : 波速 U_{crest} : 波頂部の最大水平方向流速

(1)式を用いて解く場合 (hb/L) (表-1)

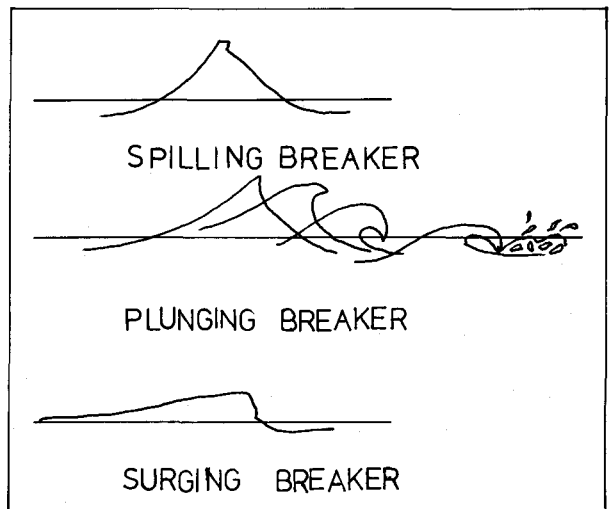
$L) \leq 0.07$ では Solitary wave, $(hb/L) \geq 0.07$ では Stokes 波を用いると実験値に近い値を示す。

次に、Plunging Breaker は、砕波時に波頂部の前面が垂直となり、その後巻き込む

ように急激に砕波する波で、一般に海底勾配が急勾配の場合にみられる砕波形態である。Surging Breaker は、波面前面に急勾配になり、波の脚部からくだり始める砕波形態である。これは、Green span, 岸、首藤らが長波の砕波条件に用いている条件に合っている。以上述べたように、砕波の形態は大きく分けて、3つに分けられるがこの砕波の形態については、今まで周期波については、Iversen, Patrick-Wiegel, 連水、Galvin, 根木、若田の研究があり、孤立波に対しては、Ippen-Kulin, 佐伯、宮川、花安の研究があり、その実験条件は表-1に示す。本研究は、我々が行った $S = 1/20, 1/50, 1/90$ の実験結果から緩勾配における砕波形態を明らかに

		WAVE TANK				SLOPE			
		長さ m	巾幅 m	深さ m	水底				
IVERSEN	1953	16.46	.31	.91	鉄板	$1/10$	$1/20$	$1/30$	$1/50$
PATRICK・WIEGEL	1954	?	?	?	?	$1/10$	$1/20$	$1/50$	
HAYAMI	1958	22.0	.75	1.0	鉄板	$1/19$	$1/29$	$1/38$	
GALVIN	1968	29.3	.46	.61	コンクリート	$1/5$	$1/10$	$1/20$	
SAEKI et al	1975	24.0	.60	1.0	アクリル板	$1/20$	$1/50$	$1/90$	

(図-1)



にするとともに、今まで

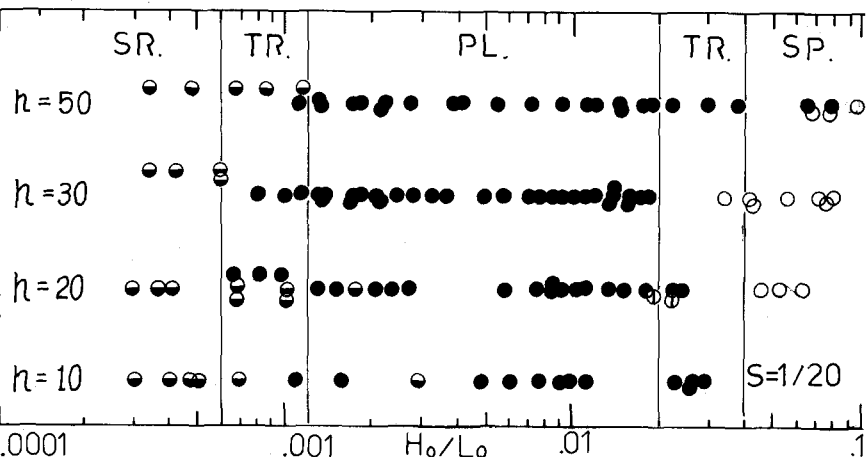
行なわれた砕波形態の分類が各研究者によって違っている事から、その理由を明らかにするとともに、完全な砕波形態の分類図を作ろうとするものである。

§2. 実験装置と実験方法

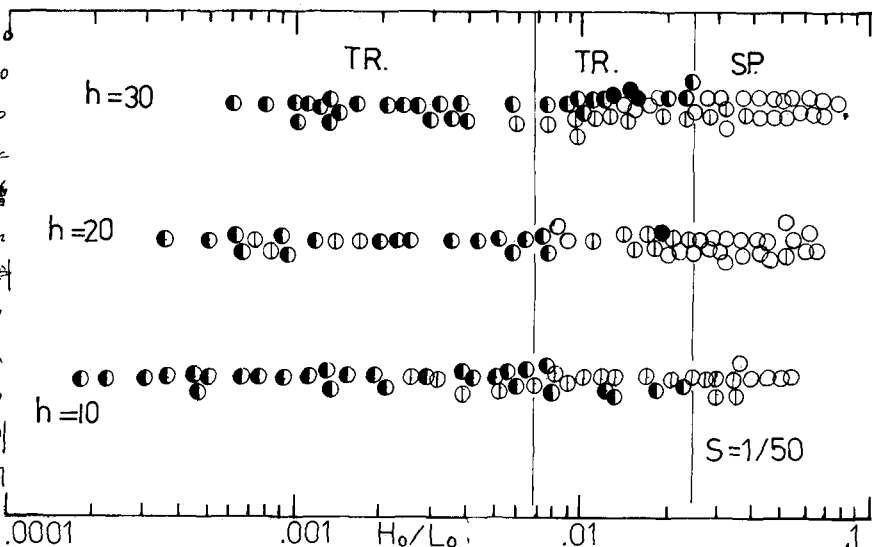
実験は水底勾配 (S) が $1/20$, $1/50$, $1/90$ で行なった。水深は斜面の Toe の一様水深部で $h = 10, 15, 20, 30, 40, 50$ cm で、周期は $T = 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0$ sec でデータ数は 540 個である。実験に用いた水槽は鋼がラス張り水槽で、深さ 1m、幅 0.6m、長さ 24m である。観測部は鋼製フレームにアクリル板を張ったもので、できるだけ滑らかに保つよう心がけた。波高の測定は抵抗線式波高計を用い、砕波の形態は肉眼観測と 16mm ミネカメラによって分類した。砕波形態の分類をする場合次の点を考慮した。

- (イ) Iversen, Patrick, Wiegel, Hayami, Galvin 等が行った形態分類の差は水槽の規模、海底摩擦等実験装置の差
- (ロ) 実験装置の規模の差による水理条件の差
- (ハ) 砕波形態を分類する時の分類基準の違い。

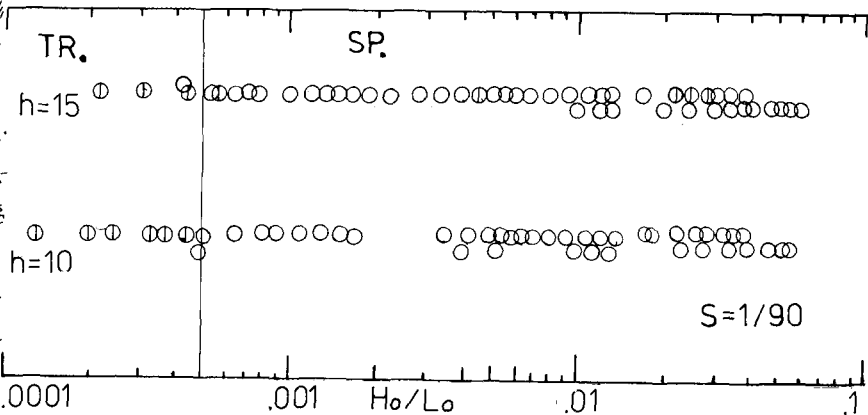
(図-Z a)



(図-Z b)



(図-Z c)



(イ)、(ロ)については表-1に示すように、水路の規模はそれ程大きな差はないし、実験に用いた波の波高、周期、水深にも差はほとんどないから、分類の違いは(イ)、(ロ)によるものでないと思われる。よって過去の研究者による差は、破波形態分類基準の差によるものと思われる。実際に、ある海底勾配 S で実験を行ってみると、まず沖波換算波形勾配 (H_0/L_0) が大きいた時は、破波波形もほぼ対称形で波頂部から徐々にくだける完全な Spilling Breaker の領域があるが、それから (H_0/L_0) が小さくなると波形は Symmetric に近いが波頂部がふと巻く波があり、 (H_0/L_0) が小さくなるにつれて波形の非対称性が目立ち始め巻き方も大きくなってきて、たいてい目にも Plunging Breaker と思われる領域となる。 S が急勾配の場合さらに (H_0/L_0) が小さくなると、Surging Breaker に近い破波となるが、しかしまだ巻き波の影響が残っている形態となる。即ち破波の形態は連続的に変化するもので、完全に独立して分類できるものは Spilling Breaker のみで、あとは定義によって、分類区分は異なることになる。波形以外の例えは水底の圧力とか、流動内の流速分布の違いによっても、この破波形態の分類はできるとは思うが、以上述べたように、破波の形態は波形観測からは連続的に変化する等から、流速分布、圧力分布によって破波形態を分類しようとしても連続的に変化するため、明確な形態区分は得られそうにない。Iversen, Patrick・Wiegel, 津波, Galvin 等の結果が互いに異なる理由はそこにあると思われる。

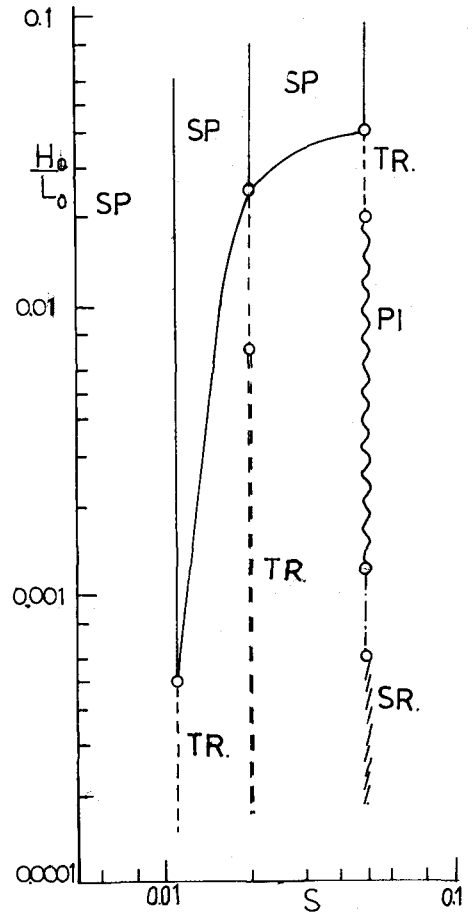
5. 破波形の定義

今回の我々の実験においては、破波形態を無理に分ける事を避け大きく3つに分けた。

- (イ) 完全な Spilling Breaker の範囲
- (ロ) 完全な Plunging Breaker の範囲
- (ハ) 完全な Surging Breaker の範囲

(イ)の完全な Spilling Breaker は、波形は Symmetric に近く、波峰から波の進行方向に水平に水粒子が飛び出す破波形であり、波頂部の一部が巻きこむ場合には、この完全な Spilling Breaker の範囲には入らない。(ロ)の完全な Plunging Breaker は破波直前には波峰の前面が垂直となり、波頂部から巻きこむように破波する場合で、Galvin が定義した、Crest Touchdown point の高さ、図-1に示すように、 S, W, L より下にある範囲を完全な Plunging Breaker とした。また、波頂部が巻きこむ Crest Touchdown point に達した時、波内に十分な空気を巻きこんでいる事を完全な Plunging Breaker の条件とした。また、波頂部が Touch down した後、Splash する事が完全な Plunging Breaker の条件とした。(ハ)の完全な Surging Breaker は、波の前面の脚部から破波を始めるもので、Air pocket を含む事なく、また、破波の前面に Splash を生じないような波をさす。この波は後でもほべるように、急勾配の時のみにも生じるもので、沖波換算波形勾配が小さいので、実験水槽で起こす場合、波高が小さくなるため、観察が非常に困難であった。以上の3つの破波形態の他に、その各々の形態の中間領域を設け、これを遷移領域とした。

(図-3)



これは、画一的に形態を分類するよりは、波による種々の物理現象を説明するのに都合がよいからである。この破波形態の遷移領域を設定する事により、今まで各研究者により得られた研究形態の分類の違いが、より一層明確になった。

§4. 実験結果 (S と H_0/L_0 による整理)

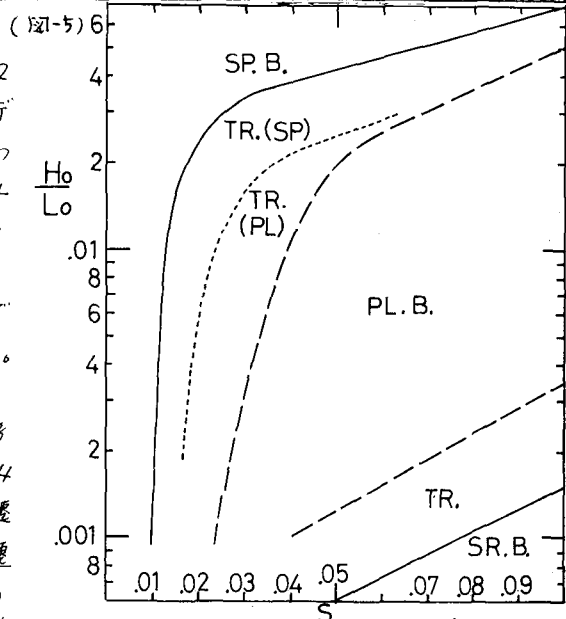
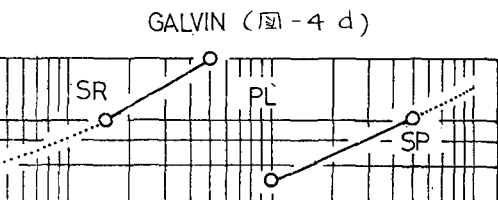
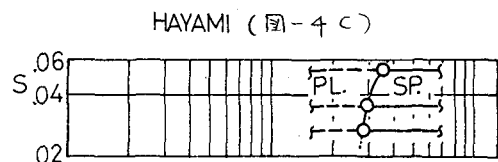
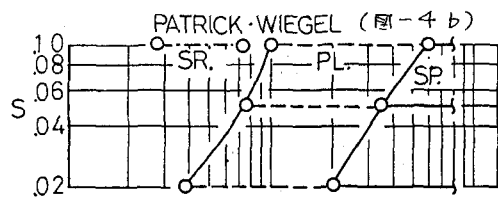
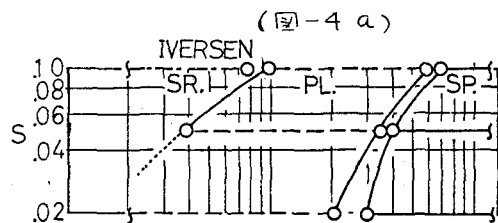
図-2 a (a), (b), (c) に $S = 1/20, 1/50, 1/90$ の実験結果を破波計算波形勾配 (H_0/L_0) と破波形態により分けたものである。破波の波高水深を H_B , h_B とするとき、 H_B と h_B は次の関係がある事を知られている。

$$\left(\frac{H_B}{H_0} \right) = f \left(S, \frac{H_0}{L_0} \right) \quad \text{--- (2)}$$

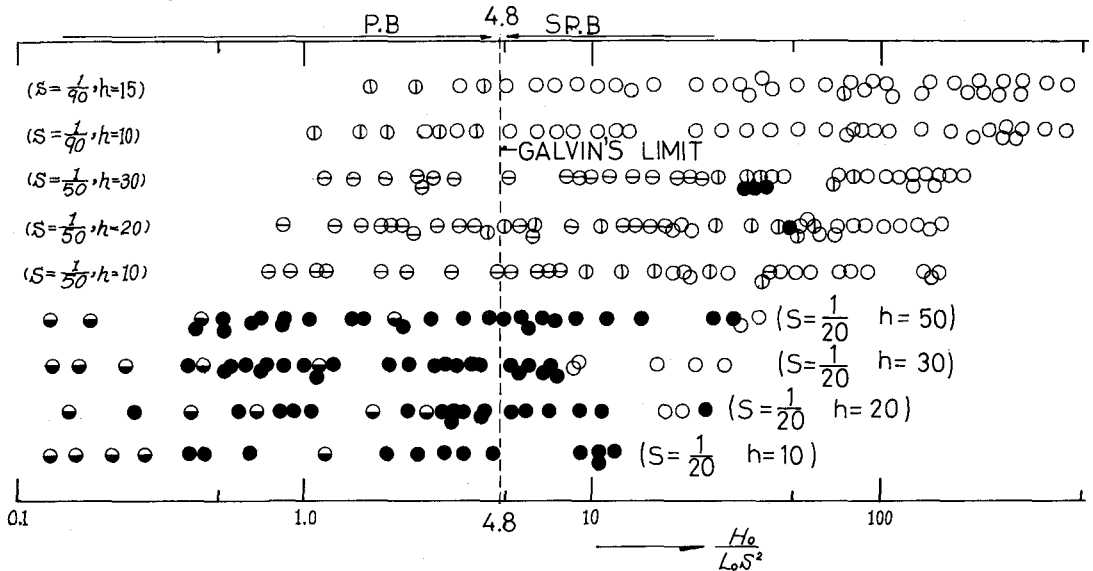
$$\left(\frac{h_B}{H_0} \right) = f \left(S, \frac{H_0}{L_0} \right) \quad \text{--- (3)}$$

$$\left(\frac{H_B}{h_B} \right) = f \left(S, \frac{h_B}{L_0} \right) \quad \text{--- (4)}$$

以上の式より、破波の波高、水深(位置を表す)は (H_0/L_0) と (S) によって決定される事になる。よって一般に破波問題は (S) と (H_0/L_0) が大きく関係している事を示している。過去一連の研究者は、図-2 a 如く破波形態を S と (H_0/L_0) で分類している。図-2 において、 $S = 1/20$ では、実験水深によって、若干データのバラツキはあるが、一応3つの破波形態と2つの遷移領域に分ける事ができる。($H_0/L_0 \geq 0.04$ では完全なる Spilling Breaker, $0.0012 \leq (H_0/L_0) \leq 0.02$ では完全なる Plunging Breaker であり、($H_0/L_0 \leq 0.0006$ では完全なる Surging Breaker である事を示す。また、遷移領域は $0.02 < (H_0/L_0) < 0.04$ と $0.0006 < (H_0/L_0) < 0.0012$ である。遷移領域において、例えば、 $0.02 < (H_0/L_0) < 0.04$ においては、(H_0/L_0) が 0.04 に近づくで、同じ遷移領域でも、波頂部の巻き込みは小さく、Crest Touch down Point は波頂部のすぐ近くにある場合で運動自体は、Spilling Breaker に極めて近い。次に (b) の $S = 1/50$ においては、($H_0/L_0 \geq 0.025$ では完全なる Spilling Breaker となるが、($H_0/L_0 < 0.025$ では完全なる plunging Breaker になる事がある。このため Crest Touch down Point が最高水位と、S. W. L. 中間より高い位置にある場合も完全なる Spilling Breaker に近い Plunging Breaker とし、Crest Touch down Point の位置がそれより低い場合も完全なる Plunging Breaker に近い Plunging Breaker と定義した。



(図 - 6)



ものが図-2a(b)である。よってこれは領域が広いため便宜上以上のように分けたわけである。一般に海底勾配が $S \leq 1/50$ の場合には (H_0/h_{13}) の値は、海底が水平であるという条件より得られる Stokes 波や Goidal 波の理論より得られる値に非常に近しいことが報告されているが、碎波波形においても $S = 1/50$ においては、完全な Plunging Breaker に生じない事から、この程度の海底勾配上を進行する波には、波重理論が碎波に近くまで適用できる事を示している。なお、 $0.007 < (H_0/L_0) < 0.025$ は完全な Spilling Breaker に近い Plunging Breaker, $(H_0/L_0) \leq 0.007$ は完全な Plunging Breaker に近い Plunging Breaker であった。(C)に $S = 1/50$ の結果を示す。 $S = 1/50$ の場合には、全領域にわたってほとんど完全な Spilling Breaker であって、 $(H_0/L_0) \geq 0.0005$ は完全な Spilling Breaker で、 $(H_0/L_0) < 0.0005$ は完全な Spilling Breaker に近い Plunging Breaker であった。この図-2の結果をまとめたものが図-3である。(図-4)の(a), (b), (c), (d)は Iversen, Patrick-Wiegel, Hayami, Galvin の実験結果を示したものである。(図-3)の我々の結果と図-4の他の研究者の結果をまとめてみると次の事が言える。

(1) $S = 1/50$ と $1/50$ の結果より判断して、Iversen と Patrick-Wiegel の Spilling Breaker の区分線は我々の完全な Spilling Breaker の線にほぼ一致する事から、Iversen, Patrick-Wiegel の Spilling Breaker の線は我々が定義した完全な Spilling Breaker の区分に一致している。よって $S = 1/50$ の結果も完全な Spilling Breaker と是めて良いと思われる。速水の結果もこれと同じである。

(2) $S = 1/20$ における完全な Surging Breaker については、Galvin の Surging-Plunging Breaker の境界に一致している事から、Galvin の Surging Breaker と Plunging Breaker の境界線は完全な Surging Breaker である事を示している。

(3) Galvin の Spilling Breaker と Plunging Breaker の境界は $S = 1/20$ 。我々の完全な Plunging Breaker と一致する事から、Galvin の Spilling Breaker と Plunging Breaker の境界は完全な Plunging Breaker を示していると考えられる。

(4) Surging Breaker と Plunging Breaker の間の完全な Plunging Breaker の範囲は $S = 1/20$ は我々の結果があるが、それより急勾配では、 $S = 1/10$ Iversen, Patrick-Wiegel の結果があるが、それより急勾配では、 $S = 1/10$ Iversen, Patrick-Wiegel の結果があるが、あまり判然と

してない。従ってこの領域で詳しい実験が望まれる。この図-3, 図-4より、上記に事を考慮すると、砕波形態の分類図は図-5で示される事となる。図-5を用いれば、 S と沖波波形勾配(H_0/L_0)が与えられれば砕波の形態が決まる事となる。

5. Off shore Parameter と Inshore Parameter. Galvin は $S = 1/5, 1/10, 1/20$ の緩勾配の実験結果から、off shore Parameter ($H_0/L_0 S^2$) と Inshore Parameter ($H_0/g T^2$) を砕波形態の分類ができる事を示した。5.4で示したように Galvin の砕波形態の定義に従って整理した結果を Off shore Parameter により表わすと次の如くなる。

$$\left. \begin{array}{ll} \frac{H_0}{L_0 S^2} \geq 4.8 & \text{Spilling Breaker} \\ 0.9 < \frac{H_0}{L_0 S^2} < 4.8 & \text{Plunging Breaker} \\ \frac{H_0}{L_0 S^2} < 0.09 & \text{Surging Breaker} \end{array} \right\} (5)$$

我々の $S = 1/20, 1/60, 1/90$ の結果をまとめたものが図-6である。これから明らかになるように $S = 1/50, 1/90$ の比較的緩勾配においては、off shore Parameter ($H_0/L_0 S^2$) で一義的に砕波形態が決定できる事が明らかである。しかし $S = 1/20$ では、数値こそ異なるけれども、この off shore Parameter で近似的に表わされるのである。Galvin の求めた off shore Parameter ($H_0/L_0 S^2$) は前にも述べたように、Galvin 自身求めた砕波形態の基準により、分類した形態区分によく適合するものであるが、その Galvin の砕波形態区分の基準が明確にない事が文獻と云える。我々が形態区分として得た(図-5)より判断すると、 $S \geq 1/20$ では、砕波形態区分線は全て平行に近い事である。これを式で表わすとあるいは式次で示される。

$$(6) \left\{ \begin{array}{ll} \left(\frac{H_0}{L_0 S} \right) \geq 0.72 & \text{完全な Spilling Breaker} \\ 0.72 \geq \left(\frac{H_0}{L_0 S} \right) \geq 0.44 & \text{完全な Spilling Breaker と完全な Plunging Breaker の遷移領域} \\ 0.44 \geq \left(\frac{H_0}{L_0 S} \right) \geq 0.028 & \text{完全な Plunging Breaker} \\ 0.028 > \left(\frac{H_0}{L_0 S} \right) > 0.014 & \text{完全な Plunging Breaker と完全な Surging Breaker の遷移領域} \\ \left(\frac{H_0}{L_0 S} \right) \leq 0.014 & \text{完全な Surging Breaker} \quad T=1.5L \quad 1/20 \leq S \leq 1/10 \end{array} \right.$$

また Galvin は Inshore Parameter ($H_0/g T^2 S$) でも分類する事ができるとしているが、この Inshore Parameter でも $S < 1/20$ の緩い水底勾配には適用できず、また off shore Parameter の場合と同じく、Galvin の砕波形態区分基準に不明確さがある事から適当でない。これに対して根本、若田等は (H_0/L_0) で Plunging Breaker と Spilling Breaker の区別ができる事を示しているが、これも $S \leq 1/60$ では適合しない事が明らかになった。

5.6. 結論. (1) 砕波の形態を区分する時今までは、Spilling Breaker, Plunging Breaker, Surging Breaker の3つに整理していたが、これらは連続的に変化する場合、それらの形態の間に遷移領域を設けた。(2) $S = 1/60, 1/90$ の緩い勾配の実験を行ない、緩勾配時の取波形態を明らかにした。 $S \leq 1/50$ では完全な Plunging Breaker は起こらなかった。また形態区分は $S > 1/20$ と $S < 1/20$ では大きく異なる事を明らかにした。(3) 遷移領域を設ける事で過去の研究成果の砕波形態区分の定義が明らかになった。(4) 我々の実験結果と過去の研究成果をまとめた砕波形態区分は(図-5)で示される。(5) Galvin の Off shore Parameter, 根本、若田の (H_0/L_0) による区分は緩勾配では不適当である。(6) (図-5)で示される砕波形態区分は $1/20 \leq S < 1/10$ の範囲では、(6)で示されるが、これは Galvin の導いた Off shore Parameter より一般性がある。 参考文献 Patrick, D.A., R.L. Wiegel: Amphibian tractors in the surf. Conf. Ships Waves. (1954) Iversen, H.W.: Waves and breakers in shoaling Water, Proc. 3rd Conf. Coastal Eng. (1953) Hayami, S.: Type of breakers, wave steepness and beach slope, Coastal Eng. Japan. (1958) Galvin, Jr, C, J.: Breakers Type Classification on three Labortary beaches. Jour Geophysical Res Vol 73 No. 12, (1968)