

砕波の内部機構に関する基礎的研究 (第1報)*

——砕波型にもとづく二、三の考察——

榎 木 亨**・岩田好一朗***・中辻 啓二****

1. 緒 言

波が海岸に接近し水深が浅くなるにつれて変形し、前後の波形の対称性を失い、やがて波の運動を保持できなくなり、砕波となって波から流れへの形式に移行し打ち上げ波となることは周知の事実である。

波が砕け、流れへと転換される砕波変形現象は水文学的にも興味深い問題であり、また防災工学上、ほとんど砕波点より陸側に設けられている海岸堤防や護岸堤の合理的設計のために必要とされる波圧、波の打ち上げ高、のり面洗掘、漂砂の移動などの的確な把握のためにも、砕波変形過程の波の水文学的特性を正確に知らなければならないという観点からも、早急に解決しなければならない問題である。このようなことから、1951年 Iversen¹⁾の実験的研究をその緒として、従来、多くの実験的、理論的研究がなされてきている。

砕波はその砕ける形状により、spilling 型、plunging 型、surging 型の三つの形式に分類され、この形式は沖波波形勾配と底面勾配のみで規定されることは Iversen²⁾、速水³⁾、Patric-Wiegel⁴⁾ などによりすでに実験的に解明されている。この三つの形式ごとに砕波機構が異なると考えるべきであるが、従来、砕波条件として、(i) 波の峰における水平方向の水粒子の速度が波速に等しいか、あるいは大きくなる時、(ii) 波を表示する特性曲線群が交わって包絡線を作るとき、(iii) 波前面部が垂直になるとき、(iv) 波の表示式がその定常解を失うとき、などを考え、有限振幅の深海波・浅水波理論、長波理論、あるいは、孤立波・クノイド波理論により展開して種々の砕波時特性、および砕波後の波の特性などが導かれている。しかし、こういった砕波時の波の特性と砕波形式および砕波機構の関係について十分な議論がなされていないし、また、砕波後の波の挙動に関しては、その挙動がきわめて複雑であるため、従来、砕波形式に関係なく一括して孤立波理論、段波理論などで代表させて取扱っているが、このように一括して取扱うこ

との妥当性についても明確な論議がなされていないのが現状であって、むしろ力学的に砕波変形の内部機構を論じるまでには至っていない。

本研究の目的は、波が砕け、流れへと転換される砕波変形過程の内部機構を力学的に解明することにあるが、とりあえず、砕波現象をより正確に把握し、波の特性諸量の挙動を明確に知るために、1/15 の一様勾配の傾斜面を有する水域で周期波を対称として水理実験を行なった。

本論は、この実験結果に基づき、砕波変形過程における波高、波形などの波動特性諸量の挙動をとりまとめ、砕波の形式 (spilling 型と plunging 型のみを対称とする) により波の挙動が異なるのか否かを検討し、さらに段波理論の砕波後の波動への適応性に検討を加え、かさねて従来の研究成果に検討を加えたものである。

2. 実験装置と実験方法

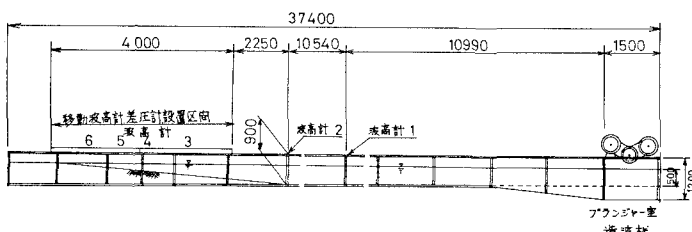
(1) 実験装置

造波水槽としては図-1に示すように長さ 37 m×幅 0.8 m×高さ 0.9 m の片面ガラス張り鋼製水槽を用い、一端に全長 9 m の勾配 1/15 の木製固定床を設置して模型海浜とし、他端にはプランジャー型造波機を設置してある。波高は電気抵抗線式水位計により計測するが、砕波瞬時およびその前後での波形は 16 mm 高速シネカメラで計測する。流速は差圧式流速計で測定するが、差圧式流速計は定常流においてピトー管マノメーター式流速計とほぼ完全に一致した値を示している。

(2) 実験諸元および記号の説明

本実験の目的は砕波形式別による砕波後の波の変形を研究することであり、これに関与する各種の条件を表-1のようにとった。また解析および計測に用いた記号を図-2に示す。

図-1 実験装置



* 第24回年次学術講演会にて一部発表

** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部

*** 正会員 工修 大阪大学 助手 工学部

**** 学生員 大阪大学大学院 工学研究科

図-2 記号の説明

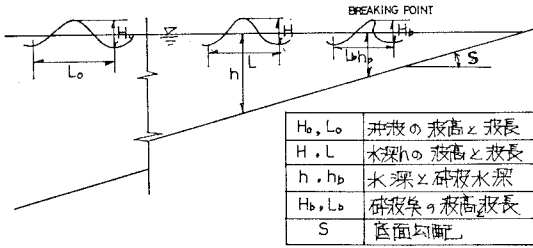


表-1 実験諸元 (記号は図-2)

静水深	h_0	50 cm
沖波波高	H_0	4.00 ~ 13.10 cm
沖波波形勾配	H_0/L_0	0.007 ~ 0.072
沖波周期	T_0	1.0 ~ 2.4 sec
海底勾配	S	1/15

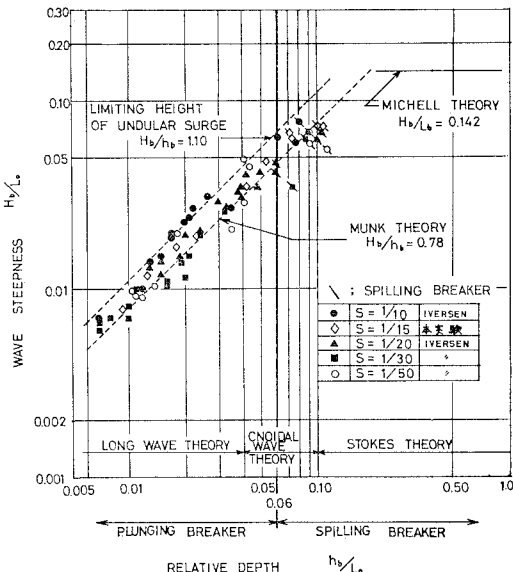
3. 実験結果とその検討

(1) 砕波点における波の特性

a) 比水深による砕波形式の分類

砕波形式は、沖波波形勾配と底面勾配のみで spilling 型, plunging 型, surging 型の三つに分類される。図-3 は相対水深による Wilson⁵⁾ の波動理論適用分類と同じ表示でもって砕波の波形勾配と砕波の比水深で示したもので、同図より水底勾配には無関係に比水深 $h_b/L_0 \geq 0.06$ の場合には spilling 型砕波となり、比水深 $h_b/L_0 < 0.06$ の場合には plunging 型砕波となり、砕波の形式は比水深 h_b/L_0 のみで規定されるといえる。Wilson の分類によれば $h/L_0 \leq 0.04$ の場合は長波理論、 $0.04 \leq h/L_0 \leq 0.1$ の場合はクノイド波理論、 $0.1 < h/L_0 < 0.5$ に対しては適用理論は明確でないが、Keulegan⁶⁾ に

図-3 砕波波形勾配と砕波比水深

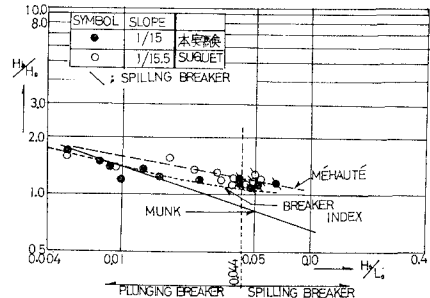


よれば $h/L \geq 0.1$ (微小振幅波理論によれば $h/L_0 \geq 0.06$), Laiton⁷⁾ によれば $h/L \geq 0.125$ (微小振幅波理論によれば $h/L_0 \geq 0.1$) に対してストークス波が適用されるとしていること、また筆者らの実験において、 $h_b/L_0 \geq 0.1$ の範囲では、Ursell⁸⁾ の parameter $L_b^2 \cdot H_b/h_b^3 \leq 35$ であって、岩垣⁹⁾, 佐伯¹⁰⁾ らの研究によれば、この領域ではストークス波理論は適用されると考えてよかろう。したがって筆者らの比水深による砕波形式の分類と波動理論適用分類とをつき合わせると、ストークス波理論を砕波点にまで拡張すれば spilling 型砕波の記述に、長波理論のそれは plunging 型砕波の記述に、クノイド波理論のそれは spilling 型と plunging 型砕波の遷移状態の記述に適用されると考えてよい。

b) 砕波波高

砕波波高は、従来、限界波形勾配あるいは最高波高より求められているが、図-3 によれば、砕波波高は砕波形式により異なることが認められ、spilling 型砕波をとるものは Munk¹¹⁾ の孤立波の限界波高を越すのが少ないが、plunging 型砕波をとるものはほとんど孤立波の限界波高を越し、著者の一人¹²⁾ が波状段波の実験において求めた限界波高 $H_b/h_b = 1.10$ でほぼ規定される。また沖波波形勾配と沖波波高で無次元化した砕波波高との関係を示した図-4 によれば、spilling 型砕波より plunging 型砕波の方が沖波波高に対する砕波波高の比が大きいたことが認められる。そして Munk の孤立波式 $\frac{H_b}{H_0} = \frac{1}{3.3 \sqrt[3]{H_0/L_0}}$ は plunging 型砕波の波高の記述には適合するが、spilling 型には適合しないことが明らかである。このことから長波性理論の plunging 型砕波への適用が妥当であると考えられよう。なお同図では breaker index, および Méhauté¹³⁾ の実験式 $\frac{H_b}{H_0} = 0.76 S^{1/7} \cdot \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-1/4}$ が実験値と比較的よく一致している。

図-4 沖波波形勾配と無次元砕波波高



(2) 水深変化による波の変形

a) 波高

上述のように砕波形式により、砕波時の波の特性が異なるため、砕波に至るまであるいは砕波後の波の変形過程において波の挙動に差異が存在する。図-5 は沖波波形勾配をパラメーターにして、水深変化にともなう波高変化を示したものであるが砕波後の波高変化においては

図-5 水深変化による波高変化

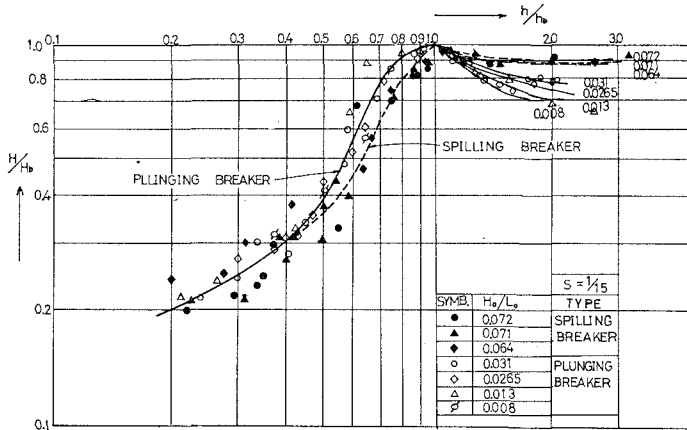


図-6 水深沖波波形勾配と波高変化の関係 (中村・白石・佐々木)

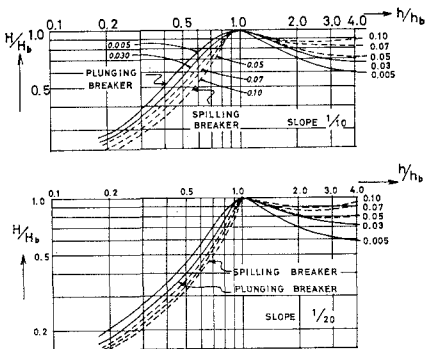
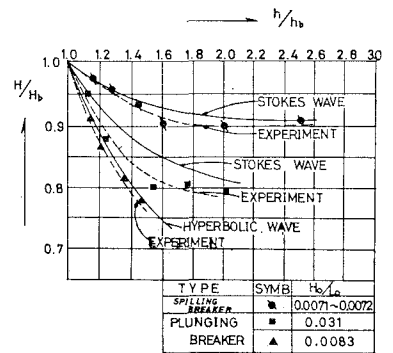


図-7 砕波前の波高変化 (理論値と実験値の比較)

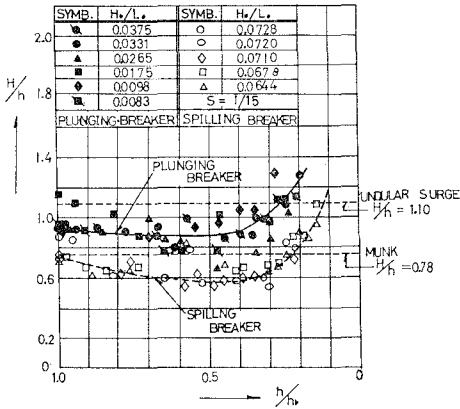


しかし $0.007 \leq H_0/L_0 \leq 0.018$ に対しては hyperbolic 波の傾向とほぼ同じくすることを確認しており、急激な波高増加ののち砕波する plunging 型砕波は、ある程度 hyperbolic 波で記述されるといえる。

砕波後の変形過程においては、中村らの結果によれば、沖波波形勾配が大きいほど、波高減衰が大きく、したがって、spilling 型砕波の波の波高減衰の方が plunging 型砕波のそれより大きいことを明示しているが、筆者らの実験によれば、図-4 に示すように、 H_0/L_0 別に明確な変化は認められないが、 $h/h_b \geq 0.4$ の範囲では spilling 型砕波の波は plunging 型砕波の波より波高減衰は大きくなることがわかる。しかし $h/h_b \leq 0.4$ では両者の区別ははっきりしなくなっていく。このような砕波後の波高変化については、また別に堀川¹⁷⁾が砕波前の沖波波形勾配に関係しないことを指摘しているが、砕波型によって波高変化が異なることは砕波型が H_0/L_0 , S などによって異なることから、単に H_0/L_0 のみによって議論できないことを示すものといえる。このように spilling 型砕波における波高減衰が plunging 型砕波より大きいのは (筆者らの実験では $h/h_b \geq 0.4$ の範囲) 砕波の内部機構の相違によるものであり、このことより、砕波変形過程においては spilling 型砕波の波は plunging 型砕波の波よりエネルギー放出が大きいと推定できよう。spilling 型砕波の波は plunging 型砕波の波より波高減衰が ($h/h_b \geq 0.4$ の範囲で) 大きいのは、水深変化に伴う相対波高の変化を示した図-8 によれば、 $h/h_b \geq 0.4$ では plunging 型砕波の波の相対波高の変化が、spilling 型砕波のそれより小さいことにも帰因するといえる。また図-8 によれば、plunging 型砕波の波の相対波高は spilling 型砕波のそれより大きく、ほとんど Munk の孤立波の限界波高を越して波状段波の限界波高で規定されているが、 $h/h_b \approx 0.5$ で極値をとり、 $h/h_b \rightarrow 0$ につれて波状段波の値を越して増大していく。一方 spilling 型砕波の相対波高は砕波点

H_0/L_0 別に明確な差異は認められなかった。しかし spilling 型と plunging 型による差異は図中の点線および実線に示すように存在することがわかる。図-6 は中村・白石・佐々木¹⁴⁾の実験結果の一例であって、図中の plunging 型、spilling 型砕波型の分類は筆者らが、Iversen, 速水らの砕波型分類に基づき分類したものである。図-5, 図-6 によれば、砕波に至る変形過程では、沖波波形勾配が小さくなるにつれて波高増加は大きくなり、spilling 型砕波の波は plunging 型砕波の波より波高増加は小さいことが認められる。このように砕波形式 (あるいは H_0/L_0) により波高変化が異なるのは shoaling 時における波の性質の相違に帰因するものであって、ストークス波¹⁵⁾と岩垣の hyperbolic 波¹⁶⁾理論による値と実測値との比較の一例を示した図-7 によれば、 $H_0/L_0 = 0.07$ のように $h/L_0 \geq 0.1$ の範囲で砕波する spilling 型砕波の波はストークス波の傾向とほぼ同じくしておりストークス波により spilling 型砕波の波の挙動が記述されることはこの点でもいえる。一方 plunging 型砕波をとる波は H_0/L_0 が 0.0083 のように小さい場合は hyperbolic 波の傾向と同じくするが、 $H_0/L_0 = 0.031$ 程度の波は $h/L \approx 0.05$ で、ストークス波、あるいは hyperbolic 波の境界にあたるため十分な説明はつかない。

図—8 相対水深と相対波高

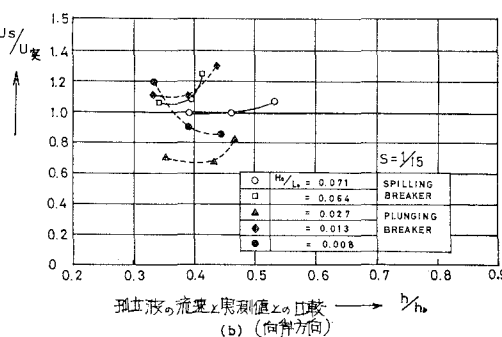
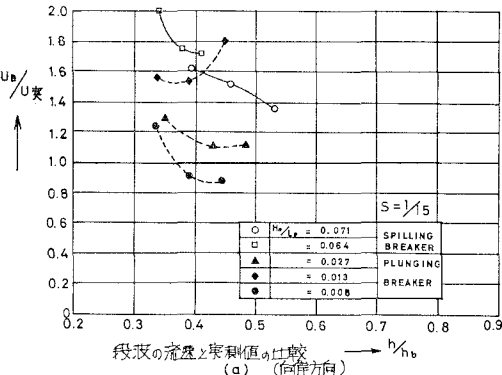


近傍では Munk の限界波高内にあるが、 $h/h_b \cong 0.4$ で極小となり $h/h_b \rightarrow 0$ につれて Munk の限界を越して増大していく。このように水深の変化に伴い相対波高が極小値をとる機構は現在のところ説明できないが、図—5 で示した波高減衰が不規則になる水深とほぼ一致しており、このことより $h/h_b=0.4$ 以浅では波の挙動がかなり変化するものと考えるべきであろう。

b) 流 速

差圧計はピット管をプローブとして用いるため、ピット管が気泡を含まないよう、また水面から出ないようにする必要があるため、砕波後の流速の測定に際してはかなりの制約を受ける。したがって本実験では砕波点より

図—9 砕波の流速変化 (向岸方向の最大流速)



静水深 4.0 cm に至るまでの三地点を選び、一地点につき深さ方向に三点で計測を行なった。図—9 は計測で得られた向岸方向の最大流速と孤立波と段波の理論流速値との比較を行なったものであって、計測値は鉛直方向三点の流速変動が小さいため平均した値をとっている。なお孤立波と段波の流速は次式で与えられるものとする。

孤立波
$$U_s = \sqrt{gh_t}(H/h_t) \left\{ 1 + \frac{3}{4} \left(2 \frac{z}{h_t} + \frac{z^2}{h_t^2} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

段 波
$$U_B = \sqrt{gh_t}(1-h_t/H) \left\{ \frac{1}{2} \frac{H}{h_t} \left(\frac{H}{h_t} + 1 \right) \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 h_t は水底から波谷までの深さ、 z 軸は鉛直上向を正とし、原点は波谷にとる。上記の制約のため $0.53 < h/h_b < 0.37$ の範囲しか実験値がないが、同図より、spilling 型砕波をとる波は孤立波の流速に比較的一致しており、段波の流速とはかなりかけ離れていることが認められる。また plunging 型砕波の波は孤立波から段波の広い範囲にわたる流速をとり、一定した傾向は認められない。実験資料が少くないため断言できないが、spilling 型砕波の波は孤立波の流速を有すると考えられ、この流速の点でも砕波型の特性が異なるといえる。しかしこの差圧式流速計では十分満足のいく計測ができないため、今後新しい計器の開発が待たれる。

4. 砕波後の波動への段波理論の適用

これまで、plunging 型砕波と spilling 型砕波の挙動を波高と流速の二点より考察してきたが、plunging 型砕波においては砕波後の相対波高は Munk の孤立波の限界波高を越し段波の限界波高でほぼ規定されること、流速は孤立波の流速とは異なることなどを考慮すれば、plunging 型砕波の波に対しては、段波理論の適用が推察される。一方 spilling 型砕波においては、砕波後の相対波高はほぼ Munk の限界波高で規定されること、また流速は孤立波の流速に近いことより、spilling 型砕波の波には孤立波理論の適用が考えられる。ここでは段波理論を取りあげて、その適用性について検討する。段波理論については、代表的なものとして Keller-Levine-Whitham¹⁸⁾ の計算があり、下記の有限振幅長波理論式 (3) を波先部で段波条件式 (4) を満たすようにして解き、水深変化に伴う段波の流速変化および波高変化を求めている。

$$\begin{cases} \eta_t + \{(h+\eta)u\}_x = 0 \\ u_t + u \cdot u_x + g \eta_x = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{cases} c = \sqrt{gh} \cdot \sqrt{(2h+\eta)/2h} \\ u = \eta \cdot c/h \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 c は段波の波速、 η は波高を示す。しかしこの Keller-Levine-Whitham の方法によれば、実測波高との比較を示した 図—10 から知れるように、相対水深

$h/h_b < 0.6$ の範囲では実測波高と大きく異なること、また汀線部で波高が 0 となる不合理な結果を導くため、筆者らの用いた実験波に対しては十分その実体を説明するには至らない。しかし $h/h_b > 0.6$ 以上のところでは比較的よく一致している。

これは、砕波後の変形過程では波のエネルギーが、底面摩擦、砕波により生起した乱れにより逸散すると考えられるが、

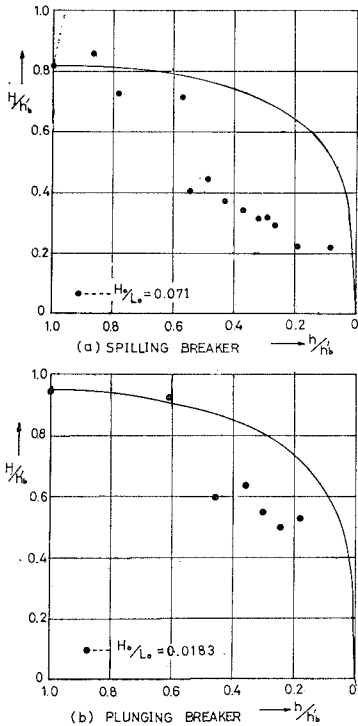
こういった逸散項が基礎式 (3) に含まれていないためと考えられる。なお図-10では、計算に用いた初期条件としての波高と水深は、plunging 砕波では波頭が波先部に完全に巻き込む地点、spilling 型砕波では波頭が波頭部で巻き込む地点での値を採用している。

砕波後の波は一般に有限振幅長波として取り扱われるが、鉛直方向の速度成分が無視できないため、むしろ、波頂曲率を考慮した有限振幅波として扱うべきであろう。著者の一人¹⁹⁾は波頂曲率を考慮した有限振幅長波理論を用いると、水平床においては波状段波の波形、波高変化の実体が良好に記述されることを確認しているため、その理論を傾斜面に拡張して検討を加えたが、十分な説明ができなかった。今後、さらに検討し、この砕波後の波の挙動に関する段波理論の適用について後日詳細に報告したい。

5. 結 語

本研究は、砕波変形の過程における波の挙動を解明するため、まず水理実験の結果に基づいて、波高、流速の二点から検討を加え、砕波型別の特性を見出した。すなわち、spilling 型砕波は比水深 $h/L_0 \geq 0.06$ の範囲で

図-10 砕波後の波高変化 (Keller-Levine-Whitham の計算値との比較)



起こり、plunging 型砕波は $h/L_0 < 0.06$ の範囲で生じること、したがって Stokes 波理論の砕波への適用は spilling 型砕波に、長波理論は plunging 砕波の記述に適用されることが明らかにされた。

つぎに砕波後の波動への段波理論の適用については、 $h/h_b > 0.6$ の範囲においては Keller らの結果が比較的よく一致すること、しかし $h/h_b < 0.6$ の範囲ではその理論結果は十分実測結果を説明しえないことを明らかにしたが、今後、さらにこの段波理論の適用については検討を加えていきたい。

参考文献

- 1) Iversen, H.W.: Laboratory Study of Breaker, Gravity wave, N.B.S. Circular 521, 1951.
- 2) Iversen, H.W.: Waves and breakers in shaling water, Proc. 3rd. Conf. on Coastal Eng., 1952
- 3) 速水頌一郎: 破波の機構 (II), 第2回海岸工学講演会講演集, 1954.
- 4) Patric, D.A., & Wiegel, R.L.: Amphibian tractors in the Surf, Proc. Ist. Conf. on Ships and Waves, 1955.
- 5) Wilson, B.W., Webb, L.M. and Hendrickson: The Nature of Tsumami, Their Generation and Dispersion in Water of Finite Depth National Science Co., Tech. Rep. No. SN 57-2, 1952.
- 6) Keulegan, G.H.: Wave Motion, Engineering Hydraulics Wiley, New York, Chap. 11, 1950.
- 7) Laiton, E.V.: Limiting Condition for Cnoidal and Stokes wave, Journal of Geophysical Research, Vol. 67, No. 4, 1962.
- 8) 岸 力: 波動論 水工学シリーズ 64-05, 土木学会水理委員会編, 1964.
- 9) 岩垣雄一・酒井哲郎: 有限振幅波の shoaling について (II), 第15回海岸工学講演会講演集, 1968.
- 10) たとえば海岸保全施設設計便覧, 改訂版 土木学会編 1969.
- 11) Munk, W.H.: The solitary wave theory and its application to surf problem, Ann. New York Acad. of Sci. Vol. 51, Art 3.
- 12) 室田 明・岩田好一郎: 段波の変形に関する研究, 土木学会論文集, No. 160, 1968.
- 13) Le Méhauté, B. and Koh, R.C.Y.: On the breaking of Waves Arriving at an angle to the Shore, Journal of Hydraulic Research, Vol. 5, No. 1, 1968.
- 14) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄: 砕波による波の変形に関する研究, 第13回海岸工学講演会講演集, 1966.
- 15) Le Méhauté, B. and L.M. Webb.: Periodic Gravity Waves Over a Gentle Slope at a Third Order of Approximation, Proc. 9th Conf. on Coastal Engineering. 1964.
- 16) 9) と同じ
- 17) Horikawa, K. and C.T. Kuo: A study on Wave transformation inside surf zone, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., 1966.
- 18) Keller, H.B. Levine, D.A. and Whitham, G.B.: Motion of a bore on a sloping beach, Journal of Fluid. Mech., No. 7, 1960.
- 19) 12) と同じ