

# 浅水変形実験波と波理論

服 部 昌太郎

## 1. 緒 言

波が海岸に向かって進行するにつれて、波が感じる海底面の影響は徐々に増し、その結果様々な波の変形現象が発生することは良く知られている。その中でも、水深の減少と共に波形勾配が増大するだけでなく、水深がより浅くなると水面波形の非対称性が強まる浅水変形と言われる現象は、長年にわたって多くの研究者と技術者の関心を引き、この波動場の特性を解明するため様々な努力がなされている。

浅水変形過程と強く関係している、波の最終状態とも言える碎波や海浜への遡上波の特性の解明だけでなく、波高が相対的に大きくなる高波浪下での底質移動と海底地形変動、海岸・海洋構造物に作用する波力などの問題を検討するためにも、波高、周期、水深および海底勾配を計算条件として波運動場を精度良く計算することが、海岸工学の重要課題の一つとなっている。

浅海域の波が受ける海底摩擦以外の非線形効果は、(1)水面波形、流速と圧力場が線形波理論のものと差を生ずる、(2)波高変化は、線形波のエネルギー流束保存の仮定より計算されるものと一致しない、(3)波の相互干渉によって水面波形の不安定性が増大する、と言った形で現れる (Le Méhauté, 1971)。(1)と(2)に対しては、種々の有限振幅波理論とその適用によりこれまで検討がなされてきた。しかし、水面波形にも見られる海底勾配の効果 (図-1), すなわち(a)平均水面に対する上下方向の非対称性 (vertical asymmetry) と、(b)波峰の前後面の水平方向の非対称性 (horizontal asymmetry) の中で、(b)は保存波を前提とする波理論では取り扱うことはできない。

そこで本講では、斜面上の波の浅水変形に関する問題の中より、(1)波高変化、(2)波理論の適用限界、(3)波動場の計算の三つを取り上げ、海底勾配の効果による波の前傾変化に関連させて、これまでの研究をたどり検討することを試みたいと思う。

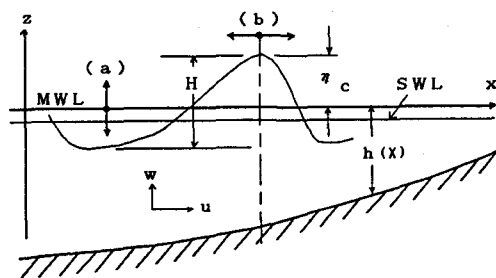


図-1 説明図

## 2. 浅水変形の理論

波動水槽内に一樣勾配斜面を設置して規則波による実験を行うと、波高は一時減少し、一樣水深部から相対水深が  $h/L_0 = 0.1 \sim 0.2$  付近まで波形は比較的对称性を保持する。波が進行すると波高が増大して平均水面に対する上下方向の非対称性が顕著となり、さらに水深が減少すると波頂前面の水

面勾配が急に波頂背面の勾配は緩くなり波谷部は裾をひいて、波谷の位置が波面の立ち上がる直前にまで後方にずれる、波頂に対する水平方向の非対称性、すなわち波形の前傾が発生して砕波にいたることが観察される (Eagleson, 1956)。この浅水変形に関する従来の理論的研究を、磯部 (1985 B) は表-1 のように解析手法別に分類している。

表-1 波の浅水変形に関する解析手法の分類 (磯部, 1985 B)

|                                                     | 海底勾配<br>$\frac{  \nabla h  }{h/L}$ | 相対水深<br>$(h/L)^2$ | 相対波高<br>$H/h$ | 基本となる<br>波動理論名    | 次数 | 波速の定義 | 参 考 文 献                      | 備 考                                                              |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------|---------------|-------------------|----|-------|------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| エ<br>ネ<br>ル<br>ギ<br>ー<br>フ<br>ラ<br>ッ<br>ク<br>ス<br>法 | $\approx 0$                        | 1                 | $\epsilon$    | ストークス波            | 1  | 無関係   | たとえば堀川 [1973]                | ハイパボリック波(3次)と併用<br><br>流れ考慮<br>クノイド波(3次)と併用<br>Cokelet [1977] の解 |
|                                                     |                                    |                   |               |                   | 3  | 1     | Le Méhauté・Webb [1964]       |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   | 3  | 1     | James [1974 a]               |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   | 4  | 2     | 山口・土屋 [1975]                 |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   | 3  | 1     | 黄・郭 [1975]                   |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   | 5  | 2     | 磯部・堀川 [1981]                 |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   | 高次 | 2     | 酒井・Battjes [1980]            |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   | 々  | 々     | Stiassnie・Peregrine [1980]   |                                                                  |
|                                                     | $\epsilon$                         | $\epsilon$        | $\epsilon$    | クノイド波             | 1  | 2     | Svendsen・Brink-Kjæer [1972]  | ストークス波(5次)と併用                                                    |
|                                                     |                                    |                   |               |                   | 2  | 2     | 山口・土屋 [1975]                 |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   | 3  | 新     | 安田・土屋 [1977]                 |                                                                  |
|                                                     | 0                                  | $\epsilon$        | $\epsilon$    | 孤立波               | 高次 | 2     | Stiassnie・Peregrine [1980]   |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   |    |       |                              |                                                                  |
| 振<br>動<br>法                                         | $\delta$                           | 1                 | $\epsilon$    | 微小振幅波             |    |       | Biesel [1952]                |                                                                  |
|                                                     | $\epsilon$                         | $\epsilon$        | $\epsilon$    | K-dv方程式           | 1  |       | 首藤 [1974]                    |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   | 2  |       | 安田ら [1979]                   |                                                                  |
| 数<br>値<br>解<br>法                                    | 1                                  | $\approx 0$       | 1             | 有限振幅長波<br>(特性曲線法) |    |       | Carrier・Greenspan [1958]     |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   |    |       | 首藤・松村 [1965]<br>石田・中島 [1981] |                                                                  |
|                                                     | 1                                  | 1                 | 1             | MAC 法             |    |       | Chan ら [1969]<br>和田 [1973]   |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   |    |       | Fenton・Mills [1976]          |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               |                   |    |       | 日野・灘岡 [1983]                 |                                                                  |
|                                                     |                                    |                   |               | 共形変換法             |    |       |                              |                                                                  |

浅水変形計算の代表的な方法であるエネルギーフラックス法は、Rayleigh (1911) の仮定に基づいて行われる。すなわち、

- (1) 斜面上の波は進行と共に水面波形が連続的に変化することから、海底勾配の効果を考慮した理論の第1近似として、斜面上の水深と波高から水面波形、位相速度、水粒子速度、圧力変動などは一様水深に対する理論より計算しうる。
- (2) 鉛直断面を通過する波のエネルギー流束は一定であり、斜面の反射はきわめて僅かである。
- (3) 浅水変形過程では進行波の波数は変化せず、周期は保存される。

以上の仮定は、一波長間の相対水深変化の割合が非常に僅かである、すなわち式(1)の勾配パラメター

Sの大きさが波形勾配  $H/L$  と同じである場合に満たされている。

$$S = h \times L / h = 0 \quad (H/L) \quad (h \times : \text{海底勾配}) \quad (1)$$

この方法では、局所的な波の条件を用いてエネルギー波束  $F_{AV}$  の保存式(2)または(3)によって波高を計算することから、海底勾配の効果は見掛け上入っていない。

$$F_{AV} = (\rho/T) \int_{-h}^{\eta} \int_{-h}^{t+T} \Phi_x \Phi_t dt dz = \text{const.} \quad (2)$$

$$= (\rho/T) \int_{-h}^{\eta} \int_{-h}^{t+T} \{ (u^2 + w^2)/2 + p + gz \} dt dz = \text{const.} \quad (3)$$

ここで、 $\Phi$ ：速度ポテンシャル、 $u$ と $w$ ：水平・鉛直流速、 $T$ ：周期、 $p$ ：圧力、 $g$ ：重力の加速度、 $\rho$ ：水の密度、 $t$ ：時間。

ストークス理論には式(2)を用い、微小振幅波 ( $ST1$ ) に対しては浅水係数  $K_s$  の式(4)がえられる。

$$K_s = H/H_0 = (C_0/2nC)^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 $C$ ：波速、 $n = \{1 + 2kh/\sinh 2kh\}/2$ 、 $k = 2\pi/L$ 。

Le Méhauté と Webb (1964) はストークス波第3次近似解 ( $ST3$ )、また Koh と Le Méhauté (1966) は5次近似解 ( $ST5$ ) によって  $K_s$  の計算を行っている。クノイド波理論 ( $CN$ ) に対しては式(3)を用い Svendsen と Brink-Kjaer (1972) が、岩垣・酒井 (1967, 68) はハイパボリック波理論 ( $HP$ ) また孤立波理論 ( $SW$ ) を使って Stissine と Peregrine (1980) が計算を行っている。図-2 (磯部, 1985 B) は浅水係数  $K_s$  と相対水深  $h/L_0$  との関係を示したもので、図中の実線は Stissine と Peregrine の厳密解、破線はクノイド波理論第1近似解 ( $CN1$ ) によるもので、その終端は線形波理論解との一致点としている。図-3 (磯部, 1985 A) は、浅水係数の実験値と計算値との比較を示したものである。

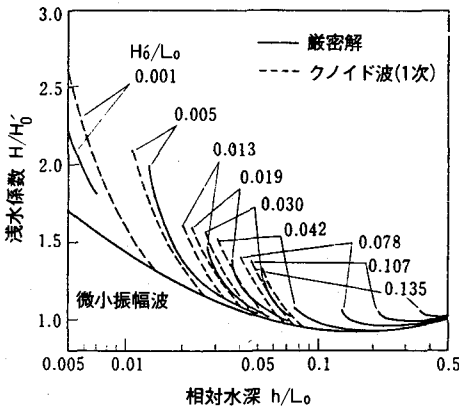


図-2  $K_s$  と  $h/L_0$

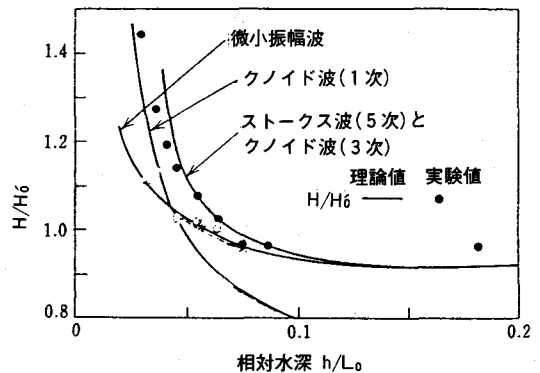


図-3  $K_s$  の実験値と計算値との比較

微小振幅波理論は波峰の尖りを考慮していないため、計算結果が実験に較べて過小となる。対称波形を前提とする理論では、海底勾配の効果による波形の前傾変形が無視されていることから、一般に計算値が実験値を上まわる。しかし、クノイド波理論第1近似解はその性質のためか、実験波に近い変形を示すことは非常に興味深い事柄である (Isobe, 1985)。

波が砕波状態に近づくとき波峰前後の波形の非対称性を考慮した浅水変形，すなわち水底勾配の効果を考慮した計算を行う必要がある。首藤（1974）は，海底勾配の効果をとり入れた Kakutani（1971）の  $K-dV$  方程式により，海底勾配が他の非線形項に較べて小さいとして摂動計算を行って，波高の有限性の効果がある場合には波高変化はグリーンの式に従い，波形は前傾することを示した。また，実験との比較より実用性の高い波高計算式(5)を提案している。この結果は，計算図表としても与えられている。

式(4) (ST1理論)

$$Hh^{2/7} = \text{const.}$$

$$Hh^{5/2} \{ \sqrt{ghT^2/h^2} - 2\sqrt{3} \} = \text{const.}$$

$$gHT^2/h^2 \leq 30$$

$$30 \leq gHT^2/h^2 \leq 50 \quad (5)$$

$$50 \leq gHT^2/h^2$$

図-4 は 1/20 勾配斜面の実験結果（Hattori, 1987）と式(5)との比較で，図中には Yamada・Shiotani（1968）と合田（1970）の砕波限界が示されている。この図より，砕波点付近までの波高変化を式(5)で十分算定しうることが解る。

Biesel（1952）は微小振幅波理論を用い，海底勾配が小さいとして摂動法によって水面と水粒子速度を計算して，水面波形が前傾する事を示した。また，Euler 座標系から Lagrange 座標系への変換を行って，波峰前面と背面の水面勾配の平均値を用いた式(6)の水面波形の非対称性を表すパラメーター  $S$  を導いている。

$$S = h \times (kh_0/2)^2 \{ 3 + (kh/\tanh kh) - 3kh \tanh kh \} / D^2 (\sinh kh)^2 \tanh kh \quad (6)$$

ここで，

$$D = 1 + (kh/\sinh kh \cosh kh)$$

Iwagaki・Sakai（1972）は，非線形長波方程式より，水面波形の非対称性を解析的に示した。Svendsen と Hansen（1978）は，Kakutani と同等の海底勾配の効果を考慮した  $K-dV$  方程式（Johnson, 1973）を，相対波高と海底勾配を含む微量の二つを摂動パラメーターとして級数展開を行い水面変形を計算している。第1近似解はクノイド波で，第2近似解によって波形の非対称性が表されるが，この第2近似解が解析的に解けないため数値計算を行っている。図-5 に示す，入射波形状勾配が比較的大きい斜面勾配 1/35 上の実験波形（Buhr Hansen・Svendsen, 1974）との比較例に見られるように，波峰前面での水面の立ち上がりは実験と良い一致を示すが，波峰背後の水面形状に若干大きな差が見られる。

一樣勾配斜面上を進行する流の変形は，安田ら（1979）が行ったように  $K-dV$  方程式をそのまま数値計算すればよい。

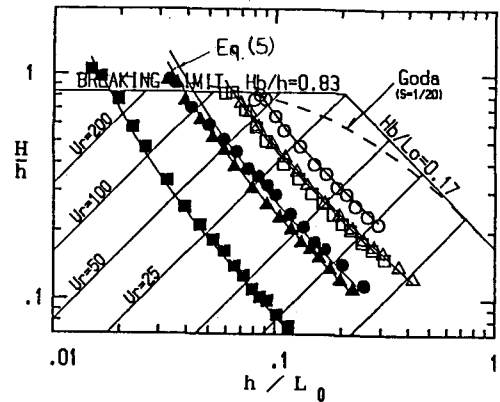


図-4 波高変化の実験と式(5)との比較

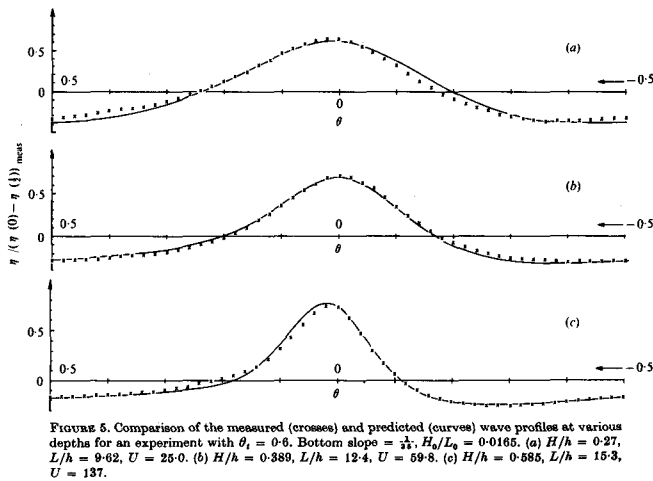


図-5 測定水面波形と計算波形との比較

以上簡単に紹介した、海底勾配の影響を考慮した波形変形の理論計算の多くは、波形と一体として計算されるべき水粒子速度に関して直接触れていない。

### 3. 一様斜面上の浅水変形実験

#### 3.1 測定装置とデータ処理

入射波が海底斜面の効果により変形を開始し碎波するに至る過程の、水面と流速変動に関する実験が、これまで数多くなされてきた。また、各種の有限振幅波理論の適用性を検討するため、一様水深での実験もなされている。著者が収集した1950年以降の文献より、水面変動は抵抗線式、容量式、そして分圧式波高計、また水粒子速度はプロペラ式（Goda）と超音波式（Tsuchiya・Yamaguchi）小型流速計、中立浮遊粒子（Iversen）や水素気泡（Iwagaki・Sakai）などを用いたトレーサー法、熱線または熱膜式流速計、そしてレーザー流速計と年を経るにしたがって測定機器の進展が反映して、実験精度が向上している事が解る。測定出力も、オシログラフの読み取りから始まり、現在のアナログあるいはデジタル記録を電算処理する技術へと進歩している。1970年代までは、水面変化は静水面を基準として測定され、浅水域での非線形性波動場の測定基準面となる平均水面の決定、あるいは流速の定常成分の抽出は不可能に近かった。以上の様な測定機器とデータ処理技術の進歩だけでなく、反射波吸収式造波装置などの出現に見られるように実験装置も著しく改善され、測定精度の低下の主要原因であった斜面よりの反射や二次的な波の発生も低減している。

従って、従来の実験結果を利用する場合には全ての結果を同列に扱うことをせず、測定方法と実験精度を十分考慮して使用することが肝要である。

#### 3.2 斜面上の波高変化

浅水変形波の実験では、エネルギーフラックス法的前提となる Rayleigh の仮定が、実験水槽内で

斜面上の波の波形と波高の変化を数値計算によって求めることは、現在では当り前の事となっており、如何に精度良く合理的に計算できるかが人々の関心を集めている。しかし、本講の冒頭で述べた、波高、周期、水深及び海底勾配を計算条件として、工学的に有効と果われる程度の計算量で、波形と水粒子速度変動を計算する方法は、まだ十分な信頼度を持って確立されていないと言える。

再現されるかを検討している (Wiegel, 1950 ; Iversen, 1952 ; Eagleson, 1956 ; Iwagaki, 1968 ; Yamaguchi・Tsuchiya, 1976 ; Svendsen・Hansen, 1976, 77)。Svendsen・Hansen (1976) は、従来の研究結果に一致点がみられない理由を調べ、(1)実験波特性の違い、(2)使用斜面が急勾配である、(3)摩擦損失の影響、(4)造波装置による二次的な自由波の発生などが、実験結果に影響していることを指摘している。Yamaguchi・Tsuchiya (1976) は、摩擦の効果が1/50斜面上の波高変化の15%にも及ぶことを指摘している。二次的な波の発生による測定誤差の増加には多くの測定者が悩まされており、その二次波を避けるために造波機前面でのアーセル数は  $Ur < 13$  となるように、実験条件を設定する必要がある (Swart, 1978)。

相対水深  $h/L_0$  が0.1以下になると実験波の波高は増大し始め、水深の減少と共に波高の増大率は線形波理論より大きくなり、砕波点に近づくに従ってクノイド波理論と類似の傾向を示す。岩垣・酒井 (1967) は、Wiegel, Iversen, および Eagleson の実験結果を使用してハイパボリック波理論の波高変化との比較検討を行っているが、そのなかで有限振幅波の波高変化は波形勾配、相対水深と海底勾配にも関係することを指摘している。Svendsen・Buhr Hansen (1977) は実験と理論計算とより、クノイド波理論による浅水変形計算で線形波理論へ移行する条件を、実験と理論計算より波形勾配が小さい場合には  $h/L_0 = 0.12$ 、波形勾配が大きい場合には  $h/L_0 = 0.14$  とすることを提案した。

### 3.3 波峰高さ

構造物の設計には波力の作用高さなどを決める上で、平均水面よりの波峰高  $\eta_c$  を算定する必要がある。また、相対波峰高  $\eta_c/H$  は、波の非線形性を表すもう一つのパラメーターである  $T_c/T$  (図-6) と共に使用されている。

Goda (1964) は、 $h/L$  をパラメーターとした  $\eta_c/H$  と  $h/L$  との関係で実験結果を整理するよりも、図-7に示すように  $\eta_c/h$  と  $H/h$  との間により良い相関があることを示している。図中の  $\eta_c = H/2$  は微小振幅波、また  $\eta_c = H$  は孤立波に対する限界で、両者間の差が小さいことが高相関をもたらす

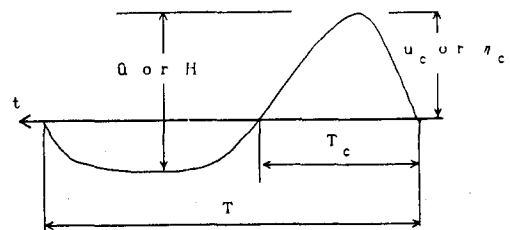


図-6 記号説明図

原因となっている。桂川・服部 (1988) は、勾配 1/10, 1/15 (Eagleson, 1956), 1/20, 1/34, (Buhr Hansen・Svendesen, 1979), 1/100 (Goda, 1964) の実験結果より、実験式(7)を導いた。

$$\eta_c/h = (\tan \beta)^{f_1(H/h)} \cdot \text{Exp} \{f_2(H/h)\} - 1 \quad (7)$$

ここで、 $f_1(H/h) = (H/h) \{2.44(H/h)^2 - 9.24(H/h) + 3.18\} \times 10^{-2}$

$$f_2(H/h) = (H/h) \{-1.93(H/h)^2 + 1.05(H/h) + 5.58\} \times 10^{-1}$$

図-8は勾配1/20の実験結果で、図-7と8中の実線が式(7)である。

Iwagaki (1968) は、 $\eta_c/H$  と  $h/L_0$  との関係によって  $ST$  および  $HP$  理論と実験との比較をして、

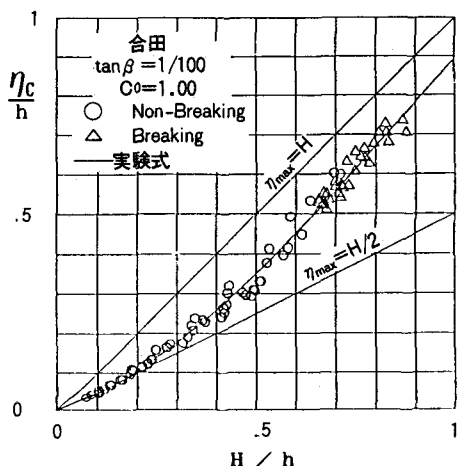


図-7 相対波峰高と相対波高

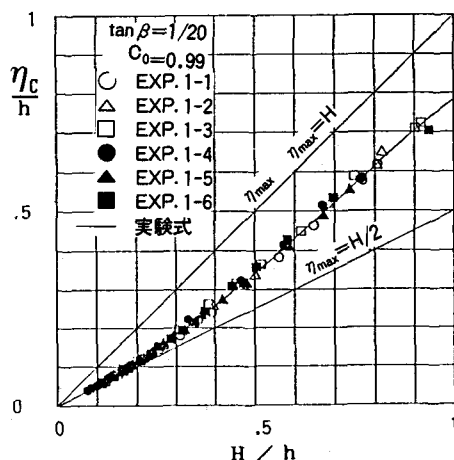


図-8 相対波峰高と相対波高

Bernoulli の式を適用して導びいた Bretschneider (1958, Fig. 2) の計算結果の傾向に類似した実験結果を示している。

#### 4. 浅水変形に対する理論の適用限界

対称波形の保存波に対する波理論には、海底勾配効果による水面波形の前傾効果は考慮されていない事だけでなく、理論展開の仮定により深海域から極浅海域に至る全領域に適用しう理論はなく、それぞれ固有の適用条件が存在する。従って、検討の対象とする現象によって、いずれの理論を適用するのが妥当であるかを決定することは、きわめて重要であると同時に難しい問題でもある。

波理論の適用範囲に関しては、(1)水面での二つの境界条件に対する計算精度に基づく理論的な適用条件 (mathematical validity) と、(2)実験・実測データと理論計算との比較により適用条件 (experimental validity) を判定する方法がある。工学的見地からは(2)の方法が重視されるべきで、Dean・Perlin (1986) はこの判定方法として(A)実測データとの比較、(B)実験結果との比較、および(C)理論の相互比較を挙げている。利用できる通常の実測データベースには、広範囲の波浪条件を含むものは数が少ないだけでなく、波の不規則性の影響と測定精度の不足と言った問題がある。一方、室内実験データは広範囲な実験条件の下で理論との比較に耐える精度をもってえられたものであるが、ある程度の実験装置と縮尺効果の影響を避けることは出来ない。

##### 4.1 保存波に対する適用限界

水面波形、水粒子速度、波速などに対して、一様水深での実験結果と各種の有限振幅波理論との比較を検討した実験的研究が、これまで数多くなされてきた。岩垣は早くから有限振幅波理論の適用性に関する研究に着手し、ST 1, ST 3, CN 2, および HP 理論の波の運動諸量に対する適用限界を検討している (岩垣・細見, 1966; 岩垣・山口, 1967; Iwagaki, 1968; Iwagaki・Sakai, 1970)。Le Méhauté・Divoky・Lin (1968) は、水面変動と波峰位相時の最大水平流速について12種類の

波理論と実験結果との比較を行っている。そして、実験結果と良い一致を示す理論を特定する事は出来ないが、Keulegan・Patterson (1940) のクノイド波理論が全般的に実験と一致していると結論している。Chakrabarti (1980) は大型実験水槽を用いた Dean (1965) の流れ関数法 (SFM) を含む 8 種類の理論と実験との比較結果より、理論の適用範囲を Le Méhauté (1976) の適用限界図上に示している。

理論精度より波理論の適用限界を検討した研究としては、Dean (1970), 土屋・山口 (1969), 堀川・

西村・磯部 (1987) がある。波理論の適用範囲を  $H/h$  と  $h/L_0$  との関係で示す、図-9 の Le Méhauté (1976), 図-10 の Komar (1976), および理論解の精度より決められた図-11 の磯部 (1985 A) のものを示す。

#### 4.2 浅水変形波に対する適用限界

既に述べたように、対称波形の保存図-9 波理論の適用限界 (Le Méhauté) 波を前提とする波理論は、海底勾配の効果による波形の前傾変形を表すことが出来ないことから、これら理論の極浅海域での適用限界が前傾変形の程度により支配されることが想定される。

実験により水面および流速波形の非対称性を定量的に検討した最初の研究として Adeyemo (1968, 70) のものが挙げられる。Adeyemo は、式(6)を含む 3 種類の非対称性を表すパラメータを用いて、上下方向の波形の非対称は  $h/L_0 < 0.1$  で顕著となり海底勾配が緩いほど変形率が大いこと、また波形の前傾変形は勾配が急であるほど大きくなることを見いだしている。また、Hedges・Kirkgos (1981) は、波形前傾が開始し砕波点に至る水域を transformation zone と名付け、斜面勾配が緩く

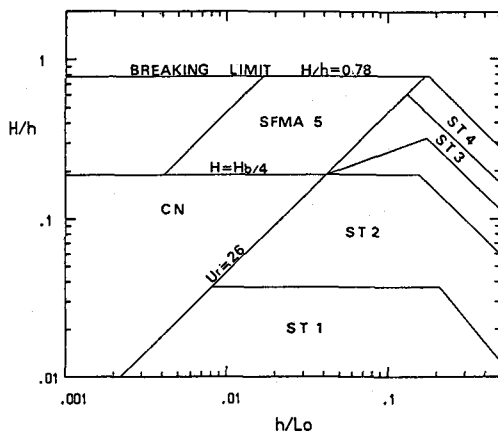


図-9 波理論の適用限界 (Le Méhauté)

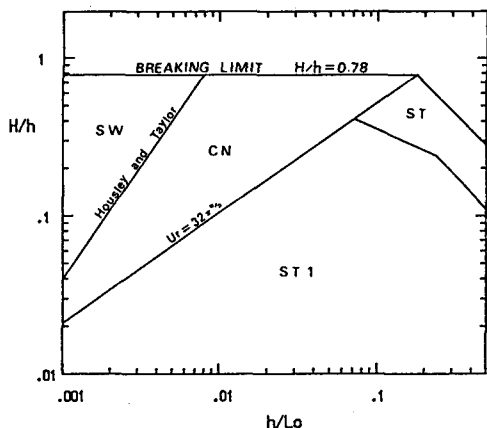


図-10 波理論の適用限界 (Komar)

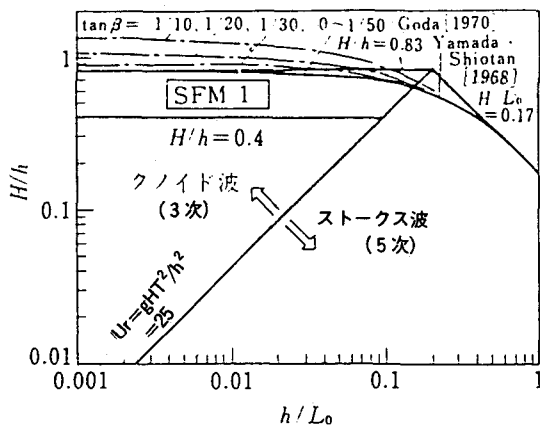


図-11 波理論の理論的適用限界



入射波の波形勾配が大きい程、この水域の幅が広がり波形変形が相対的に深い水深から始まることを見いだした。Kirkgos (1986) は、水粒子速度の変動波形にも同じ現象を認めている。図-12は、対称波形を仮定した Dean の流れ関数法10次近似 (SFMB 10) の計算結果と実験とを比較したもので、波形の前傾変化が顕著になると両者間の一致度が波峰位相時よりも波底位相時に大きく低下している事が解る。

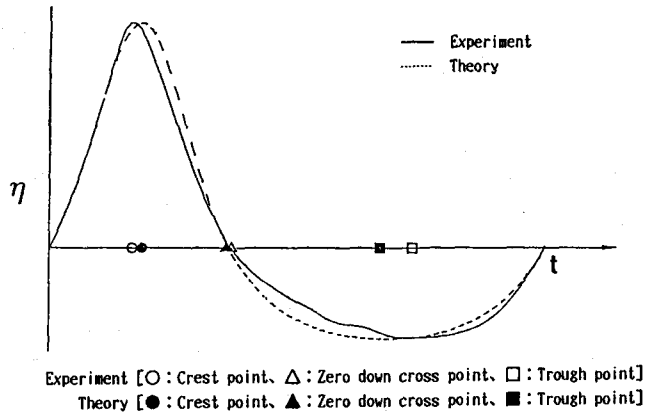


図-12 波形前傾による計算と実験との差

高波浪時での漂砂移動や構造物に働く波力を検討するには、水面及び水粒子速度の時間変動を精度よく算定する必要がある。この様な場合、理論と実験との一致度を定量的に評価して理論の適用限界を決めることが妥当と言える。関根・服部 (1985) は、理論と実験との一致度を式(8)の両者間の相対残差  $E$  により評価し、 $E$

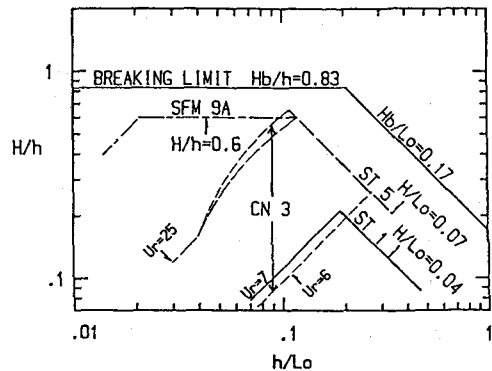


図-13 波理論の実験的適用限界

$< 0.1$  を限界値として浅水変形波動場に対する理論の適用限界をアーセル数  $U_r$  をパラメータとした相対波高  $H/h$  と相対水深  $h/L_0$  との関係で、図-13の様に与えた (Hattori, 1987)。

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2 / \sum_{i=1}^m X_i^2} \quad (8)$$

ここで、 $X_i$  と  $Y_i$  : 実験と理論波形の一周期を  $m$  等分した  $i$  番目の位相での値。

## 5. 浅水変形波動場の計算

浅水波動場の計算を、波高、周期、水深及び海底勾配より保存波の波理論によって行うには、海底勾配の効果による水面と流速時間波形の前傾を考慮する必要がある。

前傾変形がみられる測定波形  $f(t)$  を調和解析すると、式(9)のように基本波とそれに対して位相差  $\xi_n$  を持つ高調成分波が存在すると言う結果がえられる。

$$\begin{aligned} f(t) &= C_n \cos(n\omega t) + S_n \sin(n\omega t) \\ &= a_1 \cos(\omega t) + a_n \cos(n\omega t - \xi_n) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $\omega t' = \omega t -$

$\arctan(S_n/C_n)$ ,  $\xi_n =$

$\arctan(S_n/C_n)/n -$

$\arctan(S_1/C_1)$ ,  $C, S$

,  $a$ は振幅で、添え字1と

$n(=2, 3, \dots)$ は基本

波と $n$ 次成分波を示す添

え字、また $\omega = 2\pi/T$ 。

Flick・Guza・Inman

(1981)は、1/25勾配斜

面上の浅水変形波形を

FFT法で調和解析し、図

14の様に、砕波帯内に進行するに従い $\xi_n/(n-1)$ が $\pi/2$ に漸近することを見いだした。

測定水面波形の調和解析結果よりえられた成分波の振幅を使用して、式(9)より7次までの $\xi_n$ を算定して桂川・服部は合田の非線形パラメター $\Pi(= (H/L) \coth 3kh)$  (1983)と海底勾配 $\tan \beta$ とによって実験式(10)を導いた。

$$\xi_n/(n-1) = A_n \text{Log} + B_n$$

$$= 0 \quad (\Pi \leq 10^{-(B_n/A_n)}) \quad (10)$$

ここで、 $A_n = (n-1)/30 + 3/5$ ,  $B_n = (4/3) \tan^{1/4} \beta$

波形の前傾変形効果をストークス波理論(ST5)と保存波の流れ関数法(SFMB10)に導入して行った、水面と流速変動の計算結果と測定結果との比較例を図15と16に示す(図中の記号'は、位相差を考慮した計算であることを示す。) 齊藤・磯部(1987)は、対称波形を前提とするSFMB法が波頂高とこの位相での最大水平流速を測定値より過大に算出することを指摘し、波高に代えて平均水面よりの波頂高を入力条件とする改良計算法(SFMC)を提案

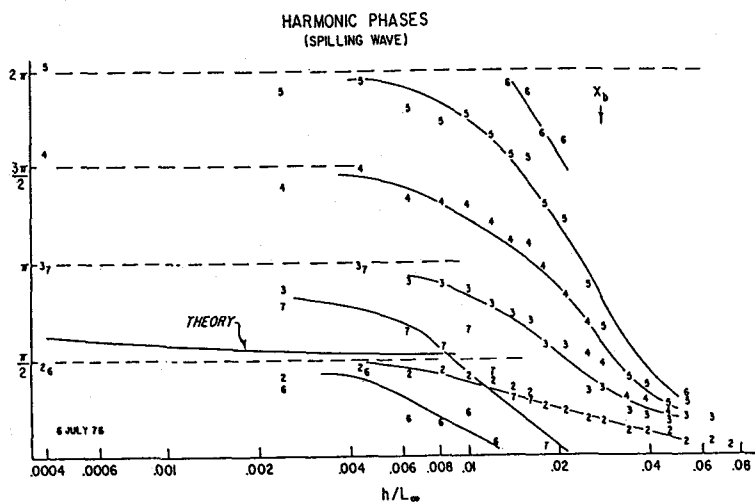


図-14 相対水深変化と $\xi_n$  ( $n=2-6$ )  
[ $H_0=7.7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{s}$ ,  $H_0/L_0=0.0191$ ]

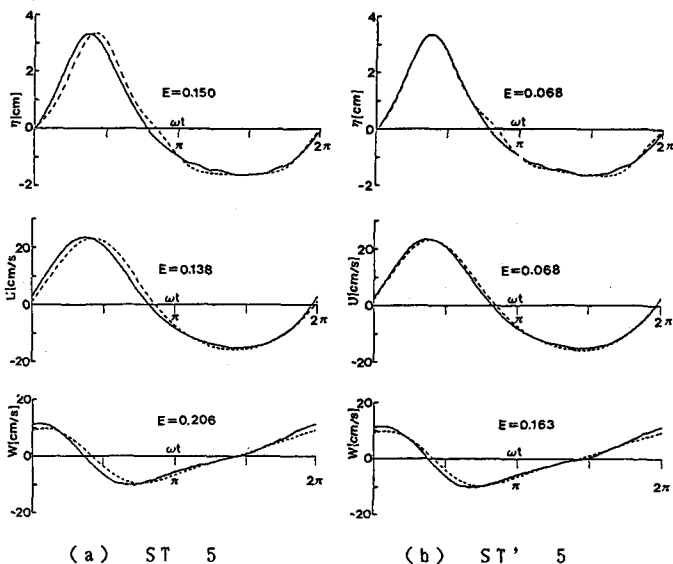


図-15 ST5理論の計算と実験との比較  
(実線: 実験結果, 波線: 計算結果)  
 $H=5.0\text{cm}$ ,  $T=0.84\text{s}$ ,  $z=-4.00\text{cm}$ ,  $Ur=28.4$

である。図-16より、波形の前傾効果を計算に取り入れた結果、実験と理論計算間の相対残差が低下し、両者間の一致の程度は十分と認められる。

この計算法によると、 $ST$  5 理論の適用限界はストークス理論計算の収束限界に相当する  $Ur=30$  程度となる。

Dean の流れ関数法には、測定水面波形と計算波形とが一致するように流れ関数を決定して流速場を計算する  $SFMA$  法と、対称波形を仮定して計算条件として波高、周期、水深を用いて波動場を計算する  $SFMB$  法とがある。 $SFMA$  法の適用範囲が、浅水変形波に対しても他の理論に較べて十分広いことは、これまでの研究で確認されている（例えば、岩垣・酒井、1974）。しかし、 $SFMB$  法は対称波形の仮定のため、浅水変形波に対するその適用範囲はクノイド波のそれと殆ど同じである（関根・服部、1985）。したがって、波形の前傾効果を考慮することによって、 $SFMB$  法の計算が安定である範囲では適用限界が碎波点近傍にまで広がる。日野・柏柳（1979）は、非定常進行波の水粒子速度を  $SFM$  法で計算する場合に、定常流速成分によって生ずる計算と測定結果間の差を補正する必要性を指摘している。また、渡辺ら（1980）と Flick・Guza・Inman（1981）もその発生を確認している、碎波点近傍の水面波形に対する水平流速波形の位相の遅れは、まだいずれの理論によっても再現することは出来ない。碎波帯内の流体運動場、特に流速の波動と乱れ成分の分離、を解明するためには、このような現象の発生機構を調べる必要があると思う。

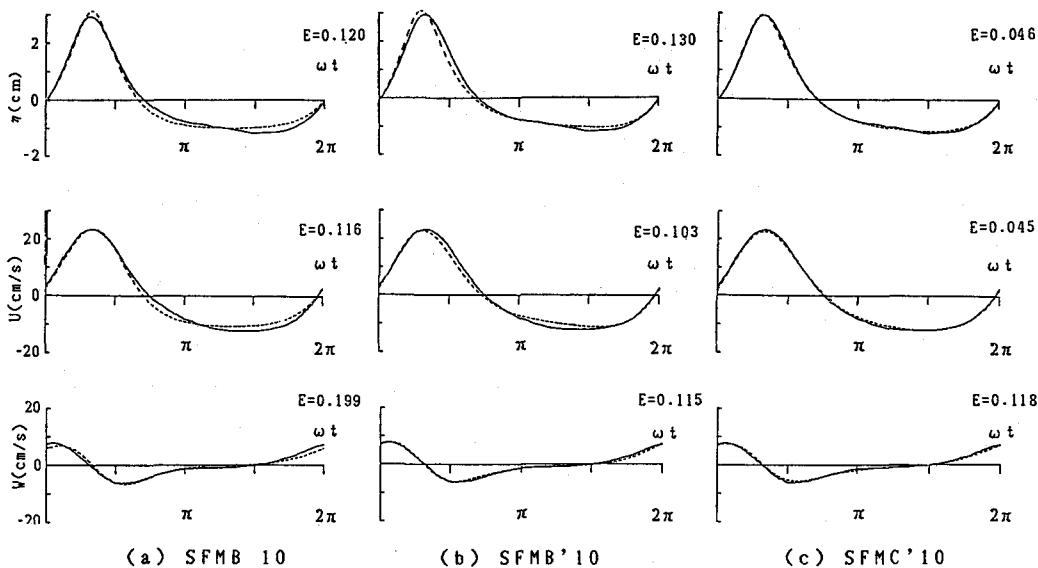


図-16  $SFM$  法の計算と実験との比較（実線：実験結果，破線：計算結果）  
 $(H=4.1\text{cm}, T=0.99\text{s}, h=8.0\text{cm}, z=-4.4\text{cm}, Ur=61.5, \tan\beta=1/20)$

測定流速波形は、計算波形に較べて最大流速付近の波形の尖りは少なく、その大きさも小さい事は良く知られている。磯部・堀川(1981)は、浅水変形波の水平流速波形が微小振幅波の場合のように正弦波形に近いことに着目し、微小振幅波理論を用いた流速振幅を基本として、流速波形の非対称性に関する

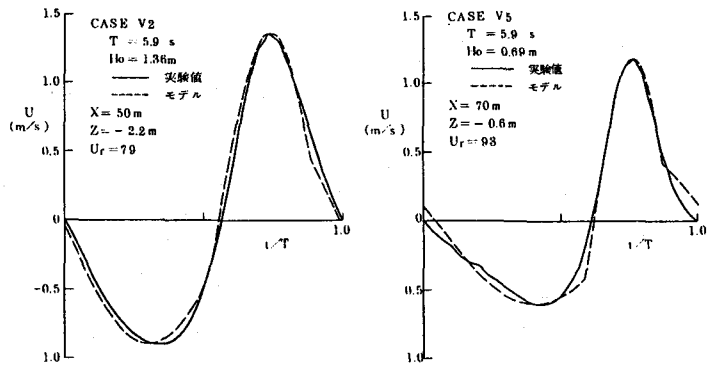


図-17 磯部・堀川モデルと測定結果との比較

パラメーター ( $\hat{u}_c/u$ ,  $T_c/T$ : 図-6 参照) 間の実験式とにより流速波形を計算する方法を提案している。図-17は、中央粒径0.47mmの砂で勾配 3/100の斜面を形成して行った、大型実験水槽内の実規模実験波下での水平流速測定波形(丸山ら, 1983)と計算波形との比較で、両者間に良好な一致が認められる。

波形の前傾効果を考慮した浅水変形波の波動場の計算法の主要な部分は実験結果に基づくものであり、今後理論的解明がなされる必要がある。

## 6. 終わりに

ある人の言葉を借りると、水深が変化する海域を進行する波の変形は、我々にとって永遠の研究課題であると言われている、海岸工学だけでなく波動現象に関心を持つ誰もが、一度は手掛けたいと思う問題の一つである。

本年度の夏期研修会での講義題目(浜中)として取り上げられている様に、近年、不規則波の碎波現象と関連して浅水変形の研究も行われているが(Sakai・Iwagaki, 1974; Dean・Perlin, 1986; 磯部・堀川, 1981), 浅水変形現象の解明に当たって検討する必要がある問題点を考えて、規則波の浅水変形に的を絞って検討してきた。著者の力不足のため、問題の本質をより鮮明にするまでには至っていないと思う。しかし、この問題に興味を持つ人々に本講が何等かの役に立つならば著者にとって望外の喜びである。紙面の制約上、著者が収集した従来の研究成果を全て紹介できなかったことは、大変残念である。

## 参 考 文 献

- 合田良実(1970): 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, No.180, pp. 39-44.
- 合田良実(1983): 波浪の非線形性とその記述パラメーター, 第30回海講論集, pp. 39-43.
- 日野幹雄・柏柳正之(1978): Wave Set-down, Set-up および水粒子軌道速度の推定における

- Dean の流れ関数法の適用性, 第25回海講論集, pp. 18-22.
- 堀川清司・西村仁嗣・磯部雅彦 (1977) : 有限振幅波の適用範囲について, 第24回海講論集, pp. 10-14.
- 磯部雅彦 (1985 A) : 有限振幅波の諸理論と適用範囲, 1985年度水工学に関する夏期研修会講義集, B-1, pp. 1-25.
- 磯部雅彦 (1985 B) : 海岸環境工学 海岸過程の理論, 観測, 予測方法, 堀川清司編, 東大出版会, 第1編4章, pp. 42-70.
- 磯部雅彦・堀川清司 (1981) : 碎波帯付近における流速場の浅水変化に関する研究, 第28回海講論集, pp. 5-9.
- 岩垣雄一 (1968) : クノイド波に関する研究 (第6報), 京大防災研年報, No. 1 1 B, pp. 1-26.
- 岩垣雄一・細見昌彦 (1966) : クノイド波に関する研究 (第3報), 京大防災研年報, No. 9, pp. 1-9.
- 岩垣雄一・酒井哲郎 (1967) : 有限振幅波の shoaling について, 第14回海講論集, pp. 1-7.
- 岩垣雄一・山口正隆 (1967) : Stokes 波とクノイド波の適用限界について, 第14回海講論集, pp. 8-16.
- 岩垣雄一・酒井哲郎 (1974) : Stream Function Theory による斜面上の碎波の水粒子速度の表現について, 第21回海講論集, pp. 27-32.
- 桂川哲行・服部昌太郎 (1988) : 浅水変形波動場の計算法, 第35回海講論集, 印刷中
- 丸山康樹・榊原勉・鹿島遼一・斉藤昭三・清水隆夫 (1983) : 実規模波浪を用いた碎波帯近傍の波高水粒子速度に関する実験的検討, 電力中研報告382034, 87 pp.
- 斉藤米一・磯部雅彦 (1987) : 碎波点付近の波峰流速の評価における流れ関数法の適用法の改良, 土木学会第42回年講概要集2, pp. 484-485.
- 関根義和・服部昌太郎 (1985) : 波動理論の適用範囲に関する実験的研究, 第32回海講論集, pp. 11-14.
- 首藤伸夫 (1974) : 非線形長波の変形 水路幅, 水深, の変化する場合, 第21回海講論集, pp. 57-63.
- 土屋義人・山口正隆 (1969) : セツ動解による有限振幅重複波理論の適用限界について, 第16回海講論集, pp. 7-14.
- 安田孝志・山下隆夫・後藤真太郎・土屋義人 (1979) :  $K-dV$  方程式による斜面上の波の変形, 第26回海講論集, pp. 21-25.
- 渡辺 晃・磯部雅彦・野沢是幸・堀川清司 (1980) : 斜面上で碎波する波の底面流速に関する実験的研究, 第27回海講論集, pp. 40-44.

- Adeyemo, M. D. (1968) : Effect of beach slope and shoaling on wave asymmetry, Proc. 11th ICCE, pp. 145 – 172.
- Adeyemo, M. D. (1972) : Velocity field in the wave breaker zone, Proc. 13th ICCE, pp. 436 – 460.
- Biesel, F. (1951) : Study of wave propagation in water of gradually varying depth, Gravity Waves, National Bureau of Standards, Circular 521, pp. 243 – 253.
- Bretschneider, C. L. (1958) : Selection of design wave for offshore structures, Proc. ASCE, Vol. 84, No. WW2, pp. 1 – 37.
- Buhr Hansen, J. and I. A. Svendsen (1974) : Laboratory generation of waves of constant form, Proc. 14th ICCE, pp. 321 – 339.
- Buhr Hansen, J. and I. A. Svendsen (197) : Regular waves in shoaling water experimental data, Inst. Hydrodynamics and Hydraulic Eng., Tech. Univ. of Denmark, Series Paper 21.
- Chakrabarti, S. K. (1980) : Laboratory generated waves and wave theories, Proc. ASCE, Vol. 106, WW3, pp. 349 – 368.
- Dean, R. G. (1965) : Stream function representation of nonlinear ocean waves, Trans. AGU, Vol. 70, No. 18, pp. 4561 – 4572.
- Dean, R. G. (1970) : Relative validities of water wave theories, Proc. ASCE, Vol. 96, No. WW1, pp. 105 – 119.
- Dean, R. G. and M. Perlin (1986) : Intercomparison of near-bottom kinematics by several wave theories and field and laboratory data, Coastal Engineering, Vol. 9, pp. 399 – 437.
- Divoky, D., B. Le Méhauté, and A. Lin (1970) : Breaking waves on gentle slopes, Trans. AGU, Vol. 75, No. 9, pp. 1681 – 1692.
- Eagleson, P. S. (1956) : Properties of shoaling waves by theory and experiment, Trans. AGU, Vol. 37, No. 5, pp. 565 – 572.
- Flick, R. E., R. T. Guza, and D. L. Inman (1981) : Elevation and velocity measurements of laboratory shoaling waves, Jour. Geophys. Res., Vol. 86, No. C5, pp. 4149 – 4160.
- Goda, Y. (1964) : Wave forces on a vertical circular cylinder : Experiments and a proposed method of wave force computation, Rept. Port and Harbour Tech. Inst., No. 8, 74pp.
- Hattori, M. (1987) : Experimental study on the validity range of various wave theories, Proc. 20th ICCE, pp. 232 – 247.
- Hedges, T. S. and M. S. Kirko (1981) : An experimental study of the transformation zone of plunging breakers, Coastal Engineering, 4, pp. 319 – 333.
- Isobe, M. (1985) : Calculation and application of first-order cnoidal wave theory, Coastal Eng., Vol. 9, 309 – 325.

- Iversen, H. W. (1952) : Laboratory study of breakers, Gravity Waves, Nat. Bureau of Standards, Circular 521, pp. 9 – 32.
- Iwagaki, Y. (1968) : Hyperbolic waves and their shoaling, Proc. 11th ICCE, pp. 124 – 144.
- Iwagaki, Y. and T. Sakai (1970) : Horizontal water particle velocity of finite amplitude waves, Proc. 12th ICCE, pp. 309 – 325.
- Iwagaki, Y. and T. Sakai (1972) : Shoaling of finite amplitude long waves on a beach of constant slope, Proc. 13th ICCE, pp. 347 – 364.
- Iwagaki, Y., T. Sakai, and T. Kawashima (1972) : On the vertical distribution of water particle velocity induced by waves on beach, Coastal Eng. in Japan, Vol. 15, pp. 35 – 41.
- Johnson, R. S. (1973) : On an asymptotic solution of the Korteweg-deVries equation with slowly varying coefficients, Jour. Fluid Mech., Vol. 60, pp. 813 – 824.
- Koh, R. C. Y. and B. Le Méhauté (1966) : Wave shoaling, J. G. R., Vol. 71, pp. 2005 – 2012.
- Kakutani, T. (1971) : Effect of an uneven bottom on gravity waves, Jour. Phys. Soc. Japan., Vol. 30, pp. 272 – 276.
- Kirkgoz, M. S. (1986) : Particle velocity prediction at the transformation point of plunging breakers, Coastal Eng., Vol. 10, pp. 139 – 147.
- Komar, P. D. (1976) : Beach Processes and Sedimentation, Prentice-Hall, 429pp.
- Le Méhauté, B. (1971) : Theory of explosion-generated water waves, Advances in Hydrosience, Academic Press, Vol. 7, pp. 1 – 79.
- Le Méhauté, B. (1976) : An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves, Springer-Verlag, 315 pp.
- Le Méhauté, B. and L. M. Webb (1964) : Periodic gravity waves over a gentle slope at a third order approximation, Proc. 9th ICCE, pp. 23 – 40.
- Le Méhauté, B., D. Divoky, and A. Lin (1968) : Shallow water waves : A comparison of theories and experiments, Proc. 11th ICCE, pp. 86 – 107.
- Rayleigh, Lord (1911) : Hydrodynamical notes, London, Dublin, Edinburgh, Phil. Mag., Series 6, 21, 122, pp. 177 – 195.
- Sakai, T. and Y. Iwagaki (1974) : Transformation of irregular waves in shoaling water, Proc. 14th ICCE, pp. 412 – 430.
- Stiassine, M. and D. H. Pergrine (1980) : Shoaling of finite-amplitude surface waves on water of slowly-varying depth, Jour. Fluid Mech., Vol. 97, pp. 783 – 805.
- Svendsen, I. A. and O. Brink-Kjaer (1972) : Shoaling of cnoidal waves, Proc. 13th ICCE, pp. 365 – 383.

- Svendsen, I. A. and J. Buhr Hansen (1976) : Deformation up to breaking of periodic waves on a beach, Proc. 15th ICCE, pp. 477 – 496.
- Svendsen, I. A. and J. Buhr Hansen (1977) : The wave height variation for regular waves in shoaling water, Coastal Engineering, 1, pp. 261 – 284.
- Svendsen, I. A. and J. Buhr Hansen (1978) : On the deformation of periodic long waves over a gently sloping bottom, Jour. Fluid Mech., Vol. 87, Part 3, pp. 433 – 448.
- Swart, D. H. (1978) : Vortical water wave theory, Vol. 2 : Verification, Nat. Res. Inst., CSIR Res. Rept. 357, 130pp.
- Tsuchiya, Y. and M. Yamaguchi (1972) : Some considerations on water particle velocities of finite amplitude wave theories, Coastal Eng. in Japan, Vol. 15, pp. 43 – 57.
- Yamada, H. and T. Shiotani (1968) : On the highest water waves of permanent type, Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 18, Part 2, No. 135, pp. 1 – 22.
- Yamaguchi, M. and T. Tsuchiya (1976) : Wave shoaling of finite amplitude waves, Proc. 15th ICCE, pp. 499 – 506.
- Wiegel, R. L. (1950) : Experimental study of surface waves in shoaling water, Trans. AGU, Vol. 31, No. 3, pp. 377 – 385.