

浅水変形波動場の計算法

桂川 哲行*・服部 昌太郎**

1. 緒 言

高波浪下での漂砂と地形変動や構造物に作用する波力などの問題を検討する場合、不規則性ととも波の有有限振幅性と海底勾配による波の変形を考慮して、水面波形と水粒子速度の時間変動を精度よく算定する必要がある。

海底勾配の効果を考慮した浅水変形波の理論的研究としては Biesel(1952), Carrier・Greenspan(1958), Iwagaki・Sakai(1972), 首藤(1974), Svendsen・Buhr Hansen(1978) など、また実験式としては水平流速時間波形の磯部・堀川(1981)のものがある。しかし、実際問題の検討に採用される波高 H , 周期 T , 水深 D および海底勾配 $\tan \beta$ を計算条件として、相対的に波高が大きく非線形性の強い浅水波動場を計算しうる理論はない。

そこで、本研究では有限振幅性と海底勾配の効果によって生ずる、水面と水粒子速度波形の平均値と最大値に対する二種類の非対称性を考慮した波動場の計算法を提案し、ストークス波第5次近似理論(磯部ら, 1978)と Dean(1965)の流れ関数法への適用について示す。

2. 実験装置とデータ処理法

海底勾配の効果による波の変形特性と計算法の妥当性を検討する目的で、反射吸収式フラップ型造波装置を備える両面ガラス張り二次元波動水槽(0.30 m×0.55 m×20 m)内に、1/10 と 1/20 勾配の二様不透過平滑斜面を設置して実験を行った。水面変動測定は分圧式波高計(正豊工学製)、水面変動測定断面の水粒子速度は二成分 LDV 流速計(DISA)を用いて同時測定を行った。測定出力はサンプリング間隔 0.0067 s (Exp. 1) と 0.005 s (Exp. 2) でデジタル記録計に収録した後、電算処理(FACOM-VP30)を行った。測定波形の個々の波は zero-up 法により定義し、その 50 波の位相平均波形を実験波形とした。なお、流速計出力中の drop out データは処理波形の位相毎に集計し、位相平均計算より除外した。表-1 に示す実験条件は、造波時に 2 次自由波が発生し

ない条件 $Ur_0 (=gHT^2/D_0^2) < 13$ (Swart・Loubser, 1978) を考慮して決定した (D_0 : 造波板前面水深)。不透過斜面の反射率は最大 6%, 測定機器とデータ処理に係る測定誤差は 1~2% 程度と推定される。

3. 波形前傾化の評価

保存波に対する非線形波理論では、海底斜面の効果による波形の前傾変形が考慮されていないため、理論の適用限界も基本的にはこの効果によって支配される(関根・服部, 1985)。そこで本研究では、波形の前傾効果を非線形波理論結果に組み込むため、その変形特性の定式化を実験結果により行った。

式(1)に示されるように、前傾変形が見られる水面と流速の測定時間波形 $f(t)$ の調和解析結果には、基本波とそれに対して位相差 ζ_n を持つ高調成分波とが存在する。

$$f(t) = \sum_{n=1}^N C_n \cos(n\omega t') + \sum_{n=1}^N S_n \sin(n\omega t') \\ = a_1 \cos(\omega t) + \sum_{n=2}^N a_n \cos n(\omega t + \zeta_n) \quad \cdots (1)$$

ここで、 $\omega t' = \omega t - \arctan(S_1/C_1)$

$$\zeta_n = \arctan(S_n/C_n)/n - \arctan(S_1/C_1)$$

C, S, a は振幅で、添字 1 と $n (=2, 3, \dots)$ は基本波と n 次成分波を示す添字、また $\omega = 2\pi/T$ 。Flick・Guza・Inman(1981)は、1/25 勾配斜面上の浅水変形波の水面波

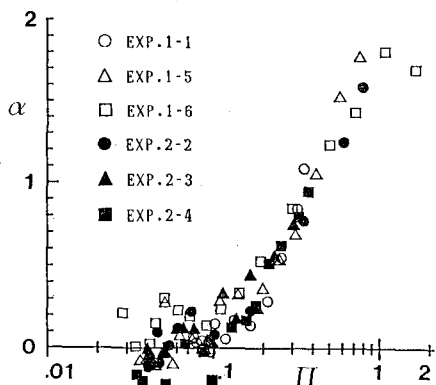
表-1 実験条件

EXP.	T (s)	SLOPE	D_i (cm)	H_i (cm)	H_o/L_o	U_{ro}
1-1	0.80	1/20	33.0	6.5	0.068	1.22
1-2	0.68	1/20	35.0	3.7	0.051	0.47
1-3	0.84	1/20	43.0	5.6	0.049	0.84
1-4	0.62	1/20	35.0	1.7	0.028	0.18
1-5	0.99	1/20	43.0	4.0	0.026	0.84
1-6	1.40	1/20	43.0	2.7	0.009	1.14
2-1	0.54	1/10	35.0	2.5	0.055	0.20
2-2	0.66	1/10	35.0	2.2	0.040	0.26
2-3	0.62	1/10	35.0	1.7	0.028	0.18
2-4	0.76	1/10	35.0	3.0	0.022	0.47

H_i : 一定水深 D_i での波高

* 工修 中央大学大学院土木工学専攻科 (現在東洋建設)

** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

図-1 水面波形の前傾度 α と非線形性パラメータ II

形を調和解析 (FTT 法) して式 (1) より位相差を算定し、砕波後水面波形が段波状となって進行するに従い、 $\zeta_n/(n-1)$ が $\pi/2$ に漸近することを見出している。

図-1 は、水面波形の前傾度 α (関根・服部, 1985) と合田 (1983) の非線形性パラメータ $II [= (H/L) \coth^3 kD, k=2\pi/L, L: \text{波長}]$ との関係を示したもので、波形の前傾が発生し始める地点が $II=0.08 \sim 0.1$ の中間水域であることから、Ursell パラメータよりも II と α との間に良好な相関が認められた。そこで、 II と $\tan \beta$ とにより ζ_n の定式化を行うこととする。

測定水面波形の調和解析 (FFT 法) より得られた成分波振幅を使用して、7 次までの ζ_n を式 (1) より算定した結果、実験式 (2) をえた。

$$\zeta_n/(n-1) = A_n \log II + B_n$$

$$= 0 \quad [II \leq 10^{-(B_n/A_n)}] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $A_n = (n-1)/30 + 3/5$, $B_n = (4/3) \tan^{1/4} \beta$ 。上式中の B_n は、波形の前傾すなわち成分波に位相差が発生

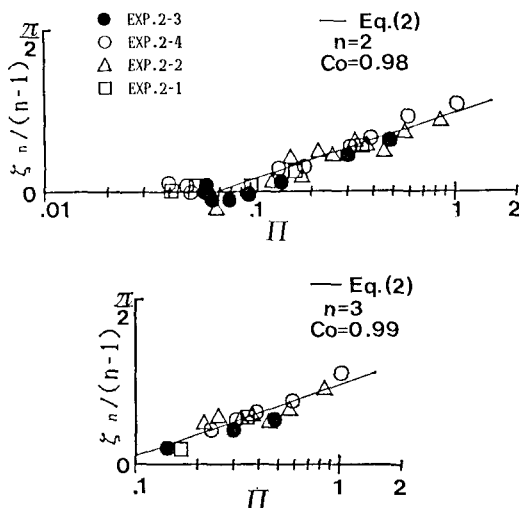
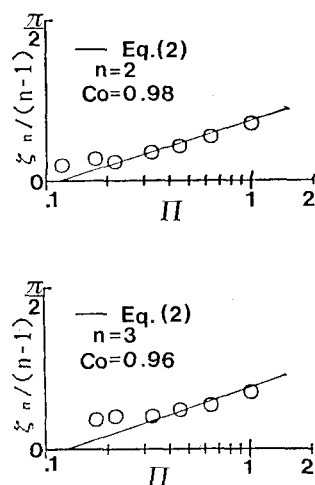
する斜面上の地点を規定するものである。入射波条件が等しい 1/10 と 1/20 斜面上の測定波形を比較すると、斜面勾配が急なほど波形の前傾変形が大きく、また前傾化が開始する地点の相対水深 D/L が大きくなる (II 値は小さくなる) ことが認められた (Adeyemo, 1968; Hedges-Kirkgoz, 1981)。式 (2) は以上の事柄を考慮にいて導いた。図-2 と 3 は、1/10 と 1/25 (Flick, Guza, Inman, 1981) 勾配斜面の実験結果よりえられた $\zeta_n/(n-1)$ と実験式 (2) との比較を $n=2, 3$ に対して示したもので、 C_0 は両者間の相関係数である。

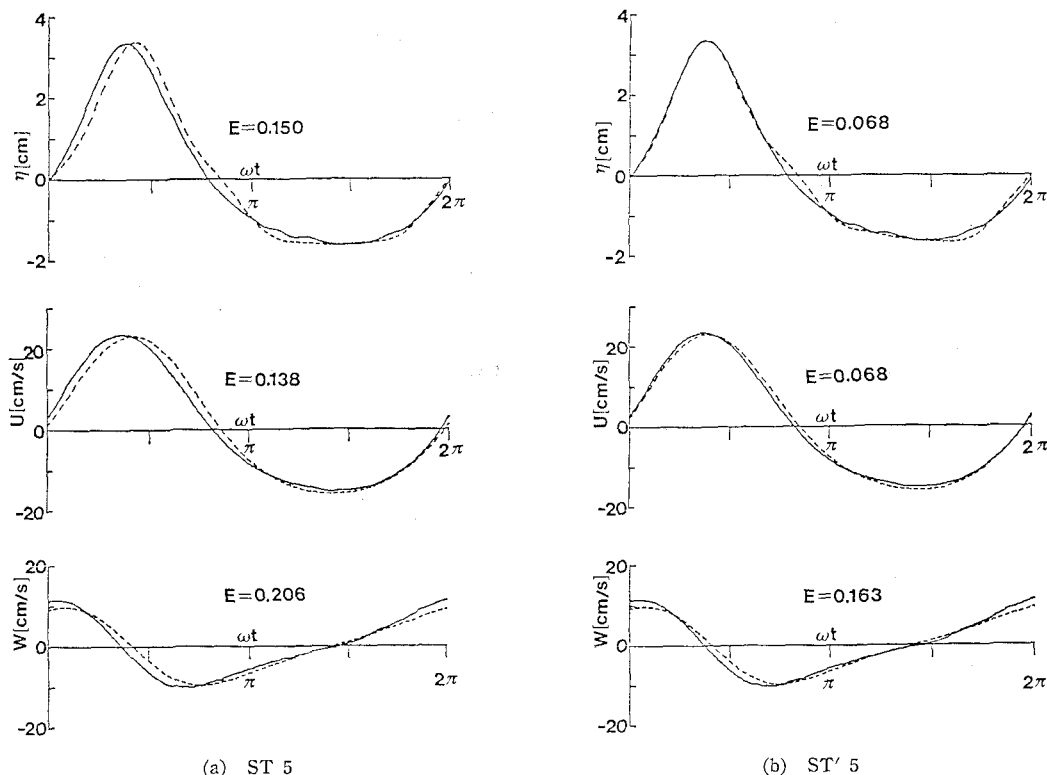
4. 位相差を考慮した計算法

適用の対象とする非線形波理論は、ストークス波 5 次近似理論 (ST 5) と、Dean の流れ関数法 10 次近似 (SFMB 10) および齊藤・磯部 (1987) が提案した波峰高を用いる改良流れ関数法 10 次近似 (SFMC 10) である。クノイド波理論は、位相差 ζ_n の組み込みに理論解を Fourier 級数に展開しなければならないことなどから適用の対象としない。

4.1 ストークス波 5 次近似理論への適用 (ST' 5)

本計算法を ST 5 理論に適用した ST' 5 は、(1) 位相差 ζ_n は式 (2) より、水面波形の基本波と成分波の振幅は保存波の理論解によりそれぞれ計算し、(2) ζ_n を ST 5 理論解の位相に代入して水面波形 $\eta(t)$ と水平・鉛直流速 $u(t)$ と $w(t)$ の計算を行う、(3) 入力波高と計算波高との差は基本波振幅を変化させた繰り返し計算をする手順で計算を進める。図-4 は、理論計算の適用限界に近い $Ur=28.4$ での ST 5 と ST' 5 による計算結果と測定結果とを比較した例で、図中の E 値は両者間の相対残差である。ST' 5 による $\eta(t)$ および $u(t)$ は測定結果と非常によく一致しているが、 $w(t)$ の一致度はまだ不十分

図-2 $\zeta_n/(n-1)$ と II の関係 ($\tan \beta=1/10$)図-3 $\zeta_n/(n-1)$ と II の関係 ($\tan \beta=1/25$)



図—4 ST 5 と ST' 5 による水面流速波形と測定結果との比較例 (実線: 測定結果, 破線: 計算結果)
($H=5.0$ cm, $T=0.84$ s, $D=10.0$ cm, $z=-4.00$ cm, $Ur=28.4$)

である。流速計算精度を向上するためには、水面波形に較べて前傾変形が小さい流速波形に対する ζ_n の決定、 $\eta(t)$ と同様の流速振幅に対する補正計算とが必要であると認められる。

4.2 流れ関数法への適用

Dean の流れ関数法 (1965) には、測定水面波形と計算波形とが一致するよう流れ関数を決定し流速場を計算する方法 (SFMA) と、対称波形を仮定し、計算条件として H, T, D を用いて波動場を計算する方法 (SFMB) とがある。本計算法の SFM への適用には、(1) 位相差 ζ_n を式 (2) で、また SFMB で式 (1) の基本波と成分波の振幅を計算する、(2) SFMB に ζ_n を代入して水面波形を計算する、(3) 入力波高と計算波高間の補正は、基本波の振幅に対して行う、(4) 計算水面波形を入力して SFMA により流速場の計算を行う。以上の計算法を SFMB' と記す。

図—5 は、Ursell 数 $Ur=84.3$ での SFMB 10, SFMB' 10 および後述の SFMC' 10 による計算水面波形 (破線) と測定波形 (実線) との比較例で、図中の E 値は両者間の相対残差である。SFMB' 10 は波形前傾の模様を良く表現しているものの、波頂より波谷にかけての位相で測定波形と一致しない SFMB の欠点が残存している。

斉藤・磯部は、対称波形を前提とする SFMB が波頂部での波頂高とその位相での最大流速を測定値より過大に算定することを指摘し、波高に代えて平均水面よりの波頂高 $\eta_{\max}$ を入力条件とする改良計算法 (SFMC) を提案した。本計算法を SFMC に適用するには、先ず $\eta_{\max}$ を計算条件よりを算定する必要がある。そこで本実験と Buhr Hansen・Svendsen ($\tan \beta=1/34$) (1979) の実験結果を用い、相対波頂高 $\eta_{\max}/D$ を実験値と良好な相関を示す (Goda, 1964) 相対波高 H/D と $\tan \beta$ の関数とした実験式 (3) を導いた。

$$\eta_{\max}/D = [\tan \beta] f_1(H/D) \times \exp[f_2(H/D)] - 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$f_1(H/D) = (H/D) \{ 2.44(H/D)^2 - 9.24(H/D) + 3.18 \} \times 10^{-2}$$

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

図—6 と 7 は、斜面勾配 1/20 と 1/100 (Goda, 1964) の場合の実験結果と式 (3) との比較を示したもので、図中の $\eta_{\max}=H$ は孤立波、 $\eta_{\max}=H/2$ は微小振幅波に対する関係である。式 (3) の妥当性は、Eagleson (1956) の実験 ($\tan \beta=1/15$) などによっても確認した (合田と

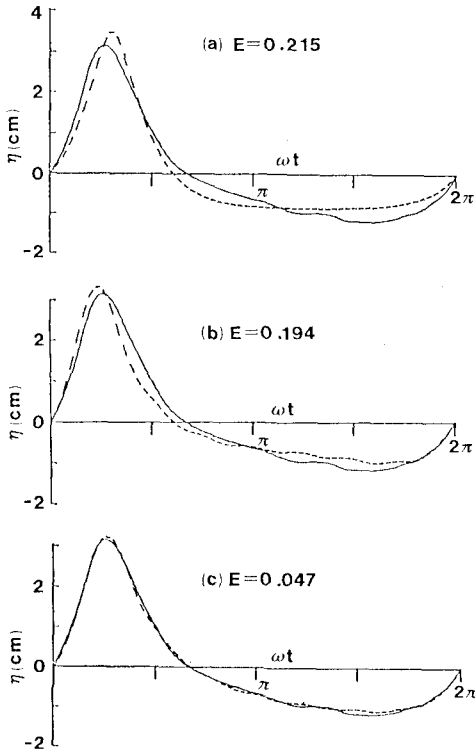


図-5 流れ関数法による計算水面波形の比較
(a) SFMB'10, (b) SFMB'10, (c) SFMC'10
(Exp. 1~5, $Ur=84.3$)

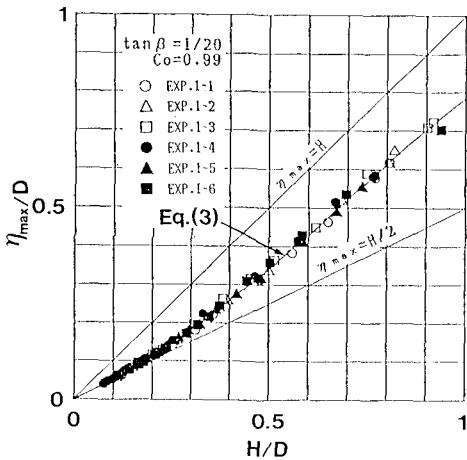


図-6 相対波頂高 η_{max}/D と相対波高 H/D との関係

Eagleson の実験では, η_{max} は静水面より測定した波頂高である. 式 (3) を使用して行った SFMC'10 による計算水面波形 (図-5(c)) は, 測定結果と極めて良好な一致を示している. 図-8 は, Buhr Hansen・Svendsen の実験結果より選んだ砕波直前 ($Ur=127.9$) での水面波形と計算結果との比較で, これより SFMC'10 の計算波形が一周期を通して測定波形とほぼ一致している

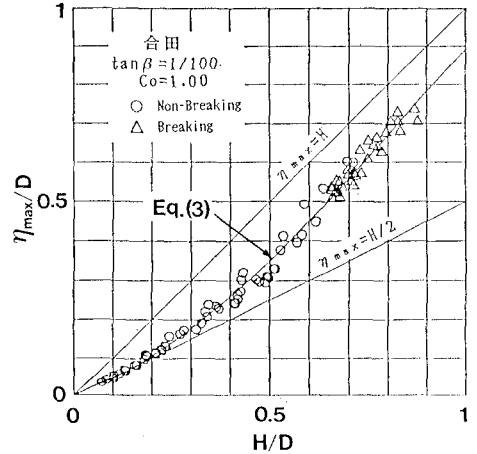


図-7 相対波頂高 η_{max}/D と相対波高 H/D との関係

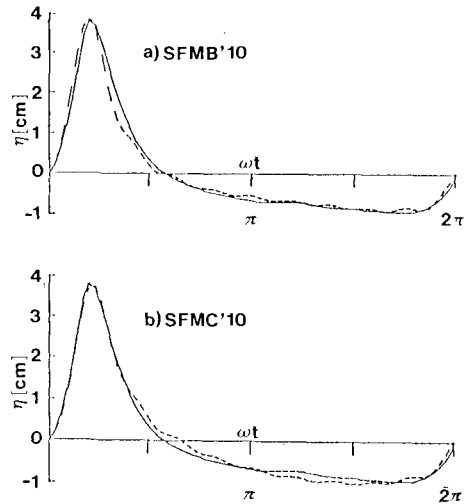
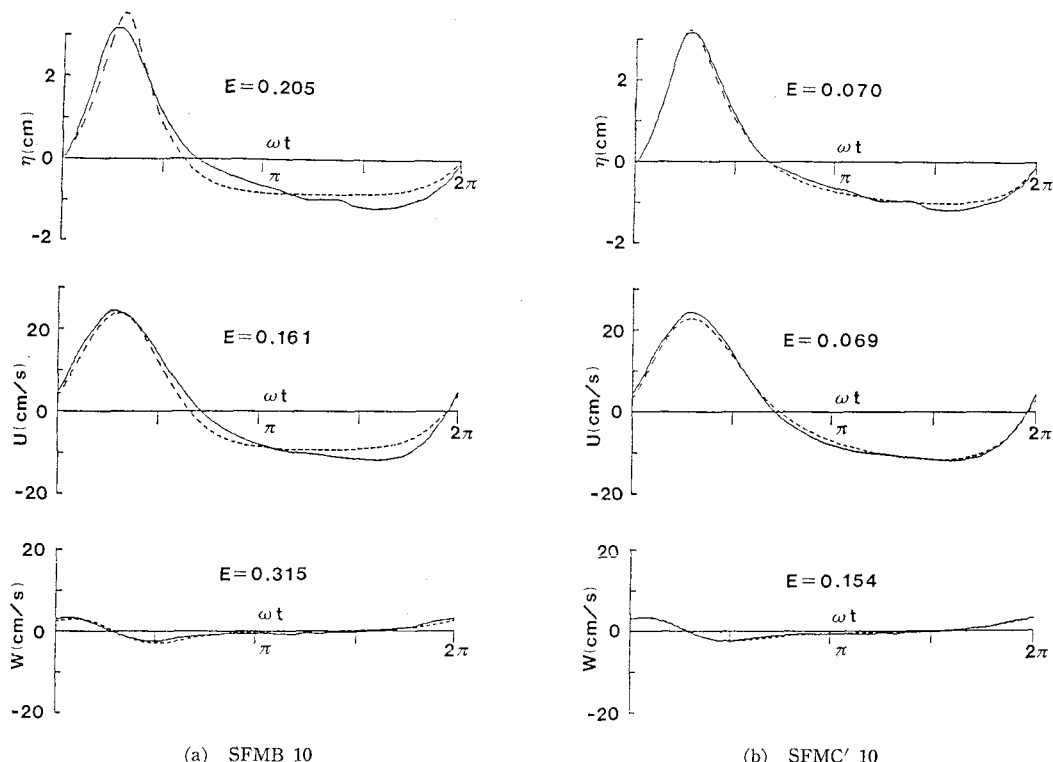


図-8 砕波直前水面波形の計算と測定結果との比較
($H=4.7$ cm, $T=1.00$ s, $D=6.0$ cm, $Ur=127.9$)

事が認められる.

図-9 は, この様にして計算された水面波形を用いて, SFMA 10 で計算した $\eta(t)$, $u(t)$, および $w(t)$ と測定結果 ($Ur=84.3$) とを比較したものである. 水面波形と同様に SFMB'10 より SFMC'10 による水平流速波形は測定結果とより良い一致を示す. しかし, 鉛直流速の E 値はさほど改善されていないが, 計算と測定結果の一致度は実用的には十分であると言える. 測定結果によると, Flick・Guza・Inman (1981) と渡辺ら (1980) も指摘している, 砕波点付近では水面波形に対する最大水平流速の位相の遅れが認められた. なお, 日野・柏柳 (1978) は, 非定常進行波の水粒子速度を SFM により算定する場合に, 定常流速成分によって計算値と測定値間に生ずる差を補正する必要性を指摘しているが, 本計算ではそのような補正は行っていない.



(a) SFMB 10

(b) SFMC' 10

図-9 流れ関数法による波動場の計算結果例 (実線: 測定結果, 破線: 計算結果)
 $(H=4.3 \text{ cm}, T=0.99 \text{ s}, D=7.0 \text{ cm}, z=-5.5 \text{ cm}, Ur=84.3)$

5. 結 論

相対的に波高が大きく、波の変形効果が無視しえない浅水変形波動場を、計算条件として波高、周期、水深と海底勾配より算定する方法を提案し、その妥当性を実験結果との比較によって確認した。

この計算法では、波形の前傾変形の効果を Fourier mode の成分波と基本波との位相差 ζ_n の実験式 (2) により表現した。計算結果と測定結果との比較より、(1) ストークス波理論 5 次近似解は理論計算の不安定が生ずる $Ur=30$ 程度まで、また (2) 流れ関数法、特に波高に代えて波峰高を使用する SFMC' は、砕波直前での水面と流速の変動波形を計算しうることが解った。

謝 辞: 本研究を行うに当たり、適切な意見をいただいた中央大学水口優助教授、有意義な助言と電算プログラムを提供下さった東京大学磯部雅彦助教授、また実験とデータ処理に協力いただいた中央大学青野利夫助手と学部学生諸君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- Adeyemo, M. D. (1968), Proc. 11th ICCE, pp. 145~172.
 Biesel, F. (1952), Gravity Waves, Circular No. 521, U.S. Nat. Bureau of Standards, pp. 243~253.

- Buhr Hansen and I. A. Svendsen (1979), IHHI, Tech. Univ. of Denmark, Series Paper 21.
 Carrier, G. F. and H. P. Greenspan (1958), Jour. Fluid Mech., Vol. 4, pp. 97~109.
 Dean, R. G. (1965), JGR., Vol. 70, No. 18, pp. 4561~4572.
 Eagleson, P. S. (1956), Trans. AGU, Vol. 37, No. 5, pp. 565~572.
 Flick, R. E., R. T. Guza, and D. L. Inman (1981), JGR., Vol. 86, No. 5, pp. 4149~4160.
 Goda, Y. (1964), Rept. of the Port and Harbour Res. Inst. No. 8, pp. 1~74.
 合田良美 (1983), 第 30 回海講論集, pp. 39~43.
 Hedges, T. S. and M. S. Kirkgoz (1981), Coastal Eng., 4, pp. 319~333.
 日野幹雄・柏崎正之 (1978), 第 25 回海講論集, pp. 18~22.
 磯部雅彦・堀川清司 (1981), 第 28 回海講論集, pp. 5~9.
 磯部雅彦・西村仁嗣・堀川清司 (1978), 土木学会第 33 回年講概要集 2, pp. 760~761.
 Iwagaki, Y. and T. Sakai (1972), Proc. 13th ICCE, pp. 347~364.
 斉藤栄一・磯部雅彦 (1987), 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), 第 32 回海講論集, pp. 11~15.
 首藤伸夫 (1974), 第 21 回海講論集, pp. 57~63.
 Svendsen, I. A. and J. Buhr Hansen (1978), Jour. Fluid Mech., Vol. 87, part 3, pp. 433~448.
 Swart, D. H. and C. C. Loubser (1978), Proc. 16th ICCE, pp. 467~486.
 渡辺 晃・磯部雅彦・野沢幸・堀川清司 (1980), 第 27 回海講論集, pp. 40~44.