

数値波動水路内で線形理論を用いて発生させた不規則波の特性および適用限界に関する一考察

藤原隆一*

VOF 法に基づいて自由表面の処理を行う数値波動水路 CADMAS-SURF において, 不規則波を扱う場合の造波方法について検討した。造波方法に線形波の重ね合わせ理論を用いた場合に発生する平均水位の上昇を抑制するには, 各成分波の水平水粒子速度から質量輸送速度を差し引く方法が有効であるが, 本研究では静水面上の水粒子速度の与え方に改良を加えた方法について, その適用条件を数値シミュレーションによって検討し, 発生した不規則波の適用性を水理模型実験および従来の算定法と比較した。その結果, 造波地点の波形勾配が 0.03 程度までであれば安定した計算が可能であること, また発生した不規則波の一樣斜面上の波高変化および越波量を水理模型実験によって検証し, 妥当であることを明らかにした。

1. はじめに

沿岸域の防災は, 周囲を海で囲まれた我が国にとって重要であり, それらの検討には従来水理模型実験が重要な役割を果たしてきた。近年, コンピュータの発達に伴い, 数値モデルを用いた手法が実用的に用いられるようになってきたが, 今後は水理模型実験および数値シミュレーションを組み合わせることで, 両者の長所を活かした効果的な検討が可能になると考えられる。VOF 法に基づいて自由表面の処理を行う数値波動水路 CADMAS-SURF は, 波浪の持つ本質的な非線形性を高精度に取り扱うことが可能な数値モデルであり, 断面実験をシミュレートできる (磯部ら, 1999)。CADMAS-SURF は規則波だけでなく, 不規則波にも対応可能であるが, その場合, 造波地点における水位変動および水粒子速度 (水平, 鉛直) を独自に与える必要がある。その場合, 造波ソースとエネルギー減衰帯を組み合わせた方法が長時間の計算には有効である。造波ソースへの入力, 厳密には波の非線形性を考慮して与える必要があるが, 実用的にはその取り扱いや計算時間の問題などから, 簡便な方法が望まれるところである。線形理論を用いた成分波の重ね合わせによって不規則波を作成する手法は簡便でありよく用いられるが, 波の非線形性を考慮していないために造波時間の増大と共に平均水位が上昇し, 不規則波として解析するのに必要な 100 波程度の波数を得るまでの検討が困難である ((財) 沿岸開発技術研究センター, 2001)。藤原ら (2002) は, 線形理論で与える成分波の水平水粒子速度から予め質量輸送速度を差し引くことで, 平均水位の上昇を抑制できることを示した。この手法は簡便であるが, 静水面以上の水平流速が過大になる問題があった。

本研究では, 静水面上の水粒子速度の与え方に改良を

加えた方法について, その適用条件を数値シミュレーションによって検討することとした。また, 発生した不規則波の適用性を検証するため, 一樣斜面上における波高変化および越波量に関して水理模型実験および従来の算定法と比較した。

2. 造波信号の作成方法

(1) 線形理論による造波方法

線形理論で与える成分波の水平水粒子速度から予め質量輸送速度を差し引く方法 (藤原ら, 2002) には一部表記の誤りがあり, その部分を修正して以下に示す。水位変動 η , 水平水粒子速度 u および鉛直水粒子速度 w は式 (1) - 式 (3) で与えられる。

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \dots\dots\dots (1)$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \dots\dots\dots (2)$$

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \sin(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \dots\dots\dots (3)$$

ここに, ε_m はランダムな位相角, f_m は周波数, a_m は振幅, $k_m (= 2\pi/L_m, L_m$ は波長) は波数および M は成分波の個数である。ただし, 鉛直座標 z は静水面から上方を正にとるものとする。式 (2) において, 水平水粒子速度を算出する際に, 各成分波に応じた質量輸送速度を減じる。すなわち, マスフラックスを軽減する水平水粒子速度 U は式 (4) のように算出した。

$$U(z, t) = \sum_{m=1}^M \left\{ 2\pi f_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) - \bar{U}_m \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここでストークス波の質量輸送速度 $\bar{U}_m$ は, 成分波を表す添え字 m を除くと, 深海波および浅海波に対してそれぞれ式 (5) および式 (6) のように表される。

* 正会員 博(工) 東洋建設(株)鳴尾研究所 水域環境研究室長

$$\bar{U} = \frac{\pi H}{T} \frac{\pi H}{L} \exp\left(\frac{\pi \bar{z} i}{L}\right) \dots\dots\dots (5)$$

$$\bar{U} = \frac{1}{2} \frac{\pi H}{T} \frac{\pi H}{L} \frac{\cosh 4\pi(h+\bar{z})/L}{\sinh^2(2\pi h/L)} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\bar{z}$ は水粒子の平均位置を表す。

(2) 改良方法

静水面上の流速を線形理論で与えると過大になることを改良する方法として以下に示す2つの手法を試みた。

a) 手法1

海底から静水面までの速度分布を海底から水表面に投影することで、水面の最大水平水粒子速度を静水面のそれに置き換えた流速分布に変換する(図-1参照)。モリソン式の波力算定に用いる流速および加速度を与える方法として用いられたことがある(Wheeler, 1970)。鉛直水粒子速度も同様に与える。

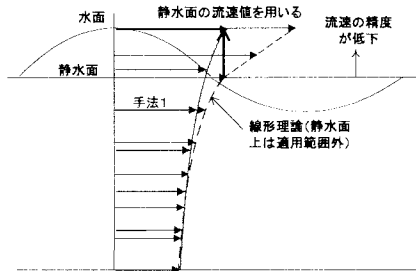


図-1 流速の与え方

b) 手法2

線形伝達関数に流れ関数法の水位-流速間の伝達関数をほぼ満たすような補正を加えた修正伝達関数(小山ら, 1984)の規則波に対する手法により成分波の流速を与える。静水面上($z>0$)の水平水粒子速度 u は補正関数 Ω を導入して式(7)および式(8)で表される(添え字 m を除く)。

$$u(z,t) = 2\pi f \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh k(h\Omega)} a \cos(2\pi ft - \varepsilon) \dots\dots\dots (7)$$

$$\Omega = 1 + \frac{a \cos(2\pi ft - \varepsilon)}{h} \left[1 - \frac{\cosh k(h+z)}{\{h + a \cos(2\pi ft - \varepsilon)\}} \right] \dots\dots\dots (8)$$

また、鉛直水粒子速度 w は式(9)で与えられる。

$$w(z,t) = \tanh k(h+z) \times u(t+\Delta t) \dots\dots\dots (9)$$

3. 発生した不規則波の適用性に対する検討

(1) 平均水位

a) 検討条件

計算が安定してできる条件を検討するため、波浪条件

を変化させた場合の水位変化を、一様水深($h=15$ m)のもとで調べた。格子間隔等は表-1に示すように設定し、水平方向の格子間隔 Δx は有義波の周期に相当する波長 L に対して1/100-1/200程度とした。ドナーパラメタは0.4とした。なお、減衰帯内では計算時間の短縮を図るため水平方向の格子間隔を4倍にし、接合部では格子間隔を等比級数的に変化させた。

表-1 検討条件

$T_{1/3}$ (s)	4	6	10	14
$H_{1/3}$ (m)	0.5-1.0	1.0-4.0	1.0-6.0	2.0-8.0
計算領域(m)	-154-251	-318-502	-495-903	
減衰帯幅*(m)	100	200	300	
x (m)	0.25	0.5	1.0	
z (m)	0.25	0.5	0.5	

*) 両側とも同じに設定

b) 検討結果

手法1に対する水深の無次元変化量 h/h_0 (h_0 :計算開始時の水深)の経時変化を図-2に示す。水深は全水量を水路長で除して算出した。なお、経過時間 t は $T_{1/3}$ で無次元化してある。 $H_{1/3}/L$ (L : $T_{1/3}$ に対する波長)をパラメタに取ると、 $H_{1/3}/L < 0.02$ では $t/T_{1/3} = 150$ までの間で水深変化は1%以内で安定している。しかし、 $H_{1/3}/L$ が大きくなるにつれて安定性は低下する。 $H_{1/3}/L < 0.03$ であれば、 $t/T_{1/3} < 100$ での水深変化は1%以内、また $t/T_{1/3} = 150$ では2%以内である。波形勾配が $0.03 \leq H_{1/3}/L < 0.04$ の場合、水深変化が1%以内であるのは $t/T_{1/3} < 40$ であり、それ以降では水深変化は4%程度まで増加している。さらに波形勾配が大きくなり $H_{1/3}/L \geq 0.04$ になると、水深の変化が急激に増大し、計算が不安定となり発散することが多くなる。

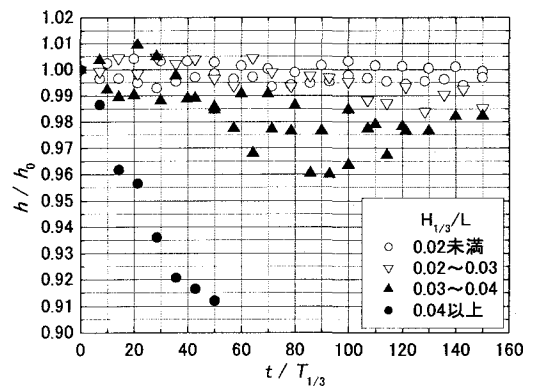


図-2 手法1における全水量の変化

以上より、手法1の場合、造波地点における波形勾配

が $H_{1/3}/L < 0.02$ であれば水深はほぼ安定しており, $0.02 \leq H_{1/3}/L < 0.03$ ではその変化量は小さいことが確認された. これより波形勾配が大きくなると, 計算時間の増加に伴う水深変化が大きくなり, $H_{1/3}/L \geq 0.04$ では計算が発散するため, 適用範囲としては $H_{1/3}/L < 0.03$ が目安となる.

手法2の場合, 静水面上の流速分布の精度は高くなったにもかかわらず全水深の変化は手法1に比べて数%程度大きくなった. 今回のようにマスフラックスの増加をストークス波の質量輸送速度を利用して軽減する方法では, 静水面上の流速を精度よく与える手法2よりも, 線形理論の流速を用いた手法1のほうが, 水量の変化が小さく安定した計算ができることが分かった.

なお, 波形勾配が大きい条件では, 規則波の場合と同じく非線形性を考慮して水位変動および水粒子速度を与えることが必要になる.

(2) 斜面上の波高変化

a) 検討方法

発生した不規則波の特性を調べるために, 斜面上を進行する波高変化を水利模型実験の結果と比較した. 検討断面は図-3に示すように1/20勾配斜面を対象とした. 実験は東洋建設(株)の不規則波長水路 ($55\text{ m}^2 \times 2\text{ m}^H \times 1\text{ m}^B$) を用いて行った. 実験に用いた不規則波は波形勾配が $H_0'/L_0 = 0.02$ となるように $T_{1/3} = 2\text{ s}$, $H_0' = 0.124\text{ m}$ を目標に与え, 水路内の波浪が安定したと考えられる造波開始後180 s からの205 s 間を対象に不規則波の統計値を算出した. 計算では, 実験時の海底地形を再現したが一様水深部の長さを実験に比べて短く設定し, 計算時間の短縮を図った. 計算格子間隔は Δx および Δz をそれぞれ $0.02\text{ m} - 0.04\text{ m}$ および 0.025 m , ドナーパラメタは 0.4 とした. また, 各測点に波エネルギーが十分に到達した計算開始後50 s からの250 s 間を検討対象とした.

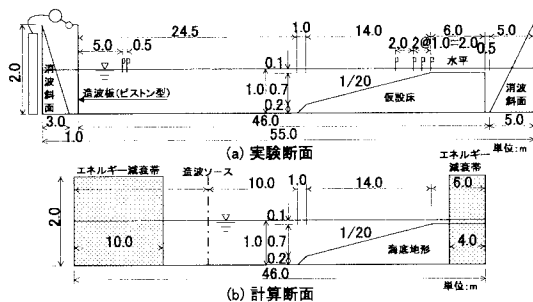


図-3 検討断面

b) 検討結果

計算で得られた水位変動 η の例を図-4に示す. 最下段が計算領域の左右境界端での η を表すことを除くと,

水深順に並べている. 最上段は造波地点 ($h = 100\text{ cm}$) における η を表しているが, 目標値をよく再現しており, 所定の波浪が発生していることが確認できる. 波が進行して一様勾配斜面上に進み, 水深が $h = 40\text{ cm}$ から $h = 30\text{ cm}$ になると, 波形が急峻となり波高が増大する様子が伺える. さらに波が進行し $h = 10\text{ cm}$ になると碎波によって波高が低減する様子が表れている. 一方, 最下段の計算領域の左右境界端ではほとんど水位変動は生じておらず, 減衰帯による波浪エネルギー減殺効果が期待通りに働いていることが確認された.

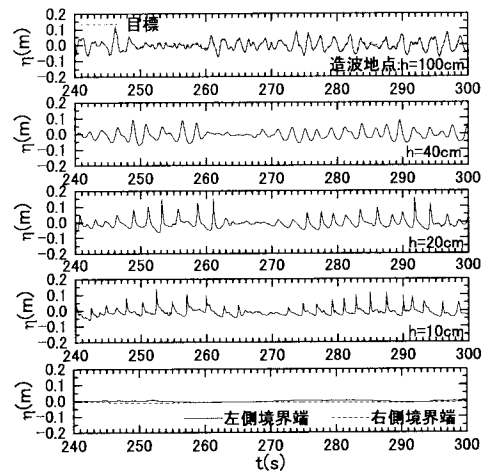


図-4 水位変動の計算結果の一例

図-5は, 有義波高 $H_{1/3}$ の変化を示したもので, $H_{1/3}$ および水深 h は H_0' で無次元化してある. 図中には碎波帯内の波高の略算式による算定値を併せて示した. 計算では, 波群の異なる3ケースの不規則波を発生させた結果をそのまま示した. 計算値と実験値および算定値の一致は良好である.

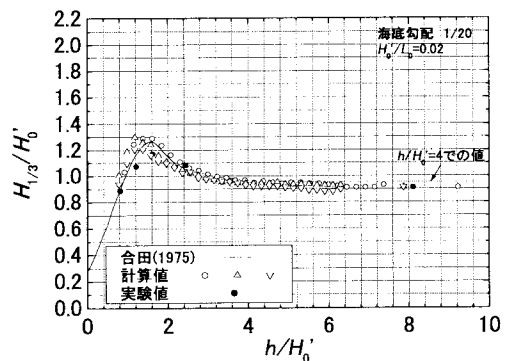


図-5 有義波高 $H_{1/3}$ の変化

図-6は同様に最高波高 $H_{\max}$ の変化を表したものであ

る。計算値における波群ごとのばらつきは有義波高に比べて大きくなっており、統計的な変動が大きくなるという基本的な特性が表れている。実験値および計算値は算定値に比べて全般的に小さい場合が多くなっている。算定値は1/250最大波高に相当するもので、設計的な観点から定められたものと考えられる。そのため、砕波帯より沖側における計算値および実験値は波の数が少ないことも影響して波高が小さくなりやすく、一方、砕波帯内では水深の影響が大きくなるためにそれらの影響が小さくなくなると考えられる。

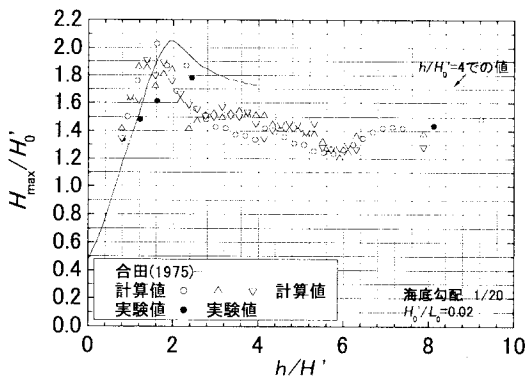


図-6 最高波高 $H_{\max}$ の変化

波高分布がレーリー分布で表されると仮定すると $H_{\max}/H_{1/3}$ の最多値および平均値は、波群中の波の数 N_0 をパラメータとしてそれぞれ「式 (10)」および「式 (11)」のように表すことができる。

$$(H_{\max}/H_{1/3})_{\text{mode}} \cong 0.706 \sqrt{\ln N_0} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$(H_{\max}/H_{1/3})_{\text{mean}} \cong 0.706 \{ \sqrt{\ln N_0} + \gamma / (2 \sqrt{\ln N_0}) \} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 γ はオイラーの定数である。そこで、これらの値と計算値を比較してみた (図-7 参照)。なお、最多値

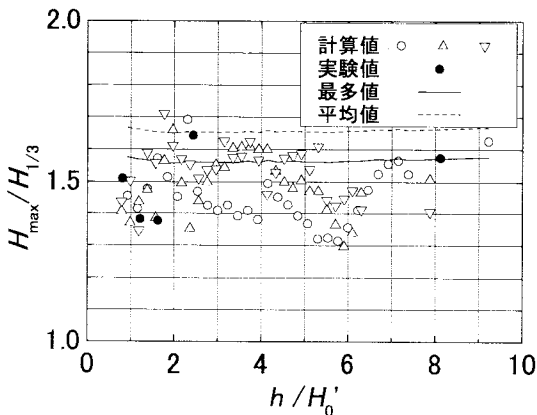


図-7 $H_{\max}$ と $H_{1/3}$ の関係

および平均値は3波群の平均値として図示した。

砕波の影響の小さく波高分布がレーリー分布に近いのは $h/H_0' > 3$ と考えられる。全体的に $H_{\max}/H_{1/3}$ は最多値より小さいが、実験値も同程度のばらつきとなっていることから、計算値は妥当なものと考えられる。

(3) 越波量

a) 検討方法

水理模型実験には前節と同じ水路を用い、1/30勾配斜面上に設置した消波構造物の越波量を測定した。図-8に実験断面を計算断面と併せて示す。不規則波は $T_{1/3} = 1.6$ s, $H_0' = 0.12$ m を目標とした。

実験では不規則波が安定したと考えられる造波開始後180 s から410 s 間を越波量の測定時間とした。なお、波群が異なる2ケースの不規則波を作用させ、その平均値を実験値とした。

計算においては実験時の海底形状を再現したが、計算時間の短縮を図るため、本ケースにおいても一樣水深部の距離を短くした。計算格子間隔は Δx および Δz を0.02 m とし、透過部のパラメータは既往の研究を参考に $C_M = 1.2$, $C_D = 0.9$ を想定し、空隙率 ε は40%および50%の2ケースを与えた。また、ドナーパラメータは0.1とした。越波量は構造物岸側端部上における流速の鉛直分布から換算して算出した。対象時間は計算開始後50 s から150 s 間とした。

消波構造物の断面は、図-9に示すように直立消波構

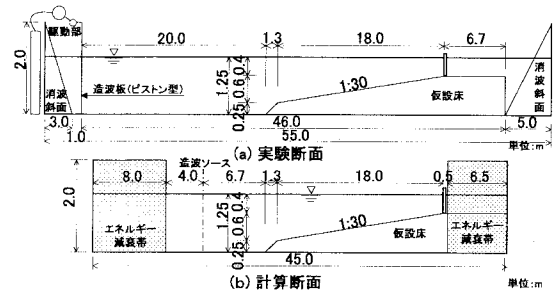


図-8 検討断面 (越波量)

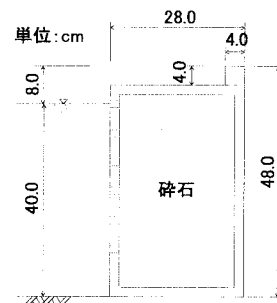


図-9 消波構造物の断面

造とし、天端上の背後側にパラペットを設けた。前面はスリット壁とし、内部に碎石を詰め、また上部はパンチングメタルで蓋をして、密閉しないようにした。

b) 検討結果

消波護岸および直立護岸の無次元越波流量について、計算値を実験値と比較した結果を表-2に示す。また参考のため、消波護岸に対する越波量算定図から読みとった算定値も併せて示した。計算値は実験値の約65%～76%の大きさであり、空隙の大きい $\varepsilon=50\%$ の越波量が $\varepsilon=40\%$ のそれに比べて18%大きくなった。さらに多くのケースについて検討する必要があるが、越波流量の算定値の精度は無次元越波流量のオーダーが 10^{-3} の場合0.2-3倍とされていることを勘案すると、計算値の精度はかなり高いと考える。

表-2 無次元越波流量

	$q/\sqrt{2gH^3}$	備 考
計 算 値	1.87×10^{-3}	$\varepsilon=40\%$
	2.20×10^{-3}	$\varepsilon=50\%$
実 験 値	2.89×10^{-3}	
算 定 値	1.82×10^{-3}	消波護岸

図-10は計算による越波の累計量を護岸直近の水位変動と併せて示したもので、大きな波が来襲したときに越波量の増加が大きくなる様子が明らかであり、目視観察による実験時の越波状況もほぼ同じであった。

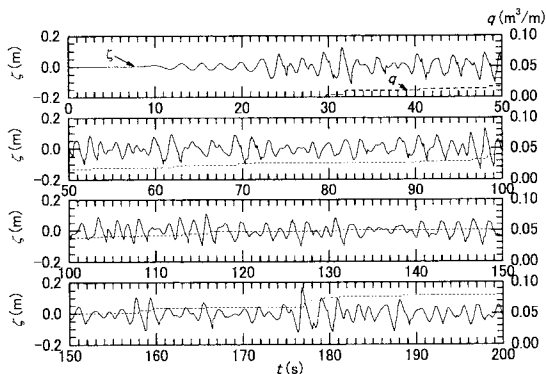


図-10 越波量の経時変化

井上ら(1989)は、不規則波中の1波ごとの越波流量を精密に測定し、最大越波量が平均越波量の5-20倍程度になることを示している。今回実施したケースについて越波が生じた1回ごとの越波量とその継続時間から1波ごとの越波流量を算出し、表-2に示した平均的な越波

流量と比較したところ、1波ごとの越波流量は平均的な越波流量に比べて平均値で約20倍の大きさとなり、井上らの示す最大程度となった。この違いについては越波の継続時間の取り方が関係しているのではないかと推察するが、検討ケースを増やすことを含め、より詳細な検討が必要である。以上より、越波の対検討手段として、本手法が有効な手法となる可能性が見出されたと考える。

4. ま と め

波浪の持つ非線形性を高精度に取り扱うことが可能な数値モデルである数値波動水路で不規則波を発生させる方法として、線形理論を用いた重ね合わせによって水位変動および水粒子速度を与える方法について、静水面上の速度分布の改良を行った。その結果、造波地点の波形勾配が0.03以下では水深の変化が小さいこと、またそのようにして発生した不規則波の斜面上の波高変化および越波量は妥当であることを水理模型実験結果との比較において検証した。なお、本手法は線形モデルであるため3次元モデルへの拡張は容易であることを付記する。

今後は、様々なケースに適用して、その適用範囲を明らかにしたいと考えている。また、波形勾配が大きくなる場合の不規則波の発生方法も今後の課題である。

謝辞：本研究を行うに際し、水理模型実験の実施は水工研究室・松村章子氏に、また数値計算の実施に際しては技術部・加藤直幸氏の協力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余錫平・榊山勉・藤岡功司・川崎浩司・蔣勤・秋山実・大山洋志(1999)：数値波動水路の耐波設計への適用性に関する研究－VOF法基本プログラムの作成－，海洋開発論文集，Vol.15，pp.321-326。
- 井上雅夫・島田広昭・殿最浩司：不規則波における越波量の出現分布特性，海岸工学論文集，第36巻，pp.618-622。
- (財)沿岸開発技術研究センター(2001)：数値波動水路の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリー，No.12，296p。
- 合田良實(1991)：増補改訂 港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp.258-262。
- 小山裕文・岩田好一郎・布藤省三(1984)：修正伝達関数法による水粒子速度の一算定法，第31回海岸工学講演会論文集，pp.59-63。
- 藤原隆一・山崎智弘・橋川正男・早瀬松一(2002)：複合断面地形の波の遡上に対するVOF法の適用性と不規則波モデルへの拡張，海岸工学論文集，第49巻，pp.136-140。
- Wheeler, J.D.(1970)：Method for calculating forces produced by irregular waves, Journal of Petroleum Technology, pp.359-367。