

# 線形理論を用いた不規則波信号作成 における流速の補正方法

## A METHOD FOR MODIFYING A HORIZONTAL VELOCITY OF IRREGULAR WAVE GENERATION BY A LINEAR THEORY

藤原隆一<sup>1</sup>  
Ryuichi FUJIWARA

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東洋建設(株) 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

A method for making irregular waves in numerical simulation by a linear wave theory is simple and of great utility in a practical work. It is necessary to modify a horizontal velocity profile, because a total mass of calculated region increases with time by a mass transport. Although several studies have been made on modifying a horizontal velocity in the last few years, it leaves much room for improvement. We also have proposed a method for modifying a horizontal velocity that subtract Stokes drift. In the present study, an improved method for generating irregular waves is proposed. The purpose of this paper is to investigate the validity of the modified method. In the result, the modified method is applicable to a calculation of irregular waves.

**Key Words :** Irregular waves, wave generation, mass transportation, CADMAS-SURF

### 1. はじめに

著者らは、不規則波を用いた CADMAS-SURF<sup>1)</sup> の実用的な利用を目指し、これまでに成分波の重ね合わせによる不規則波信号の作成方法とその妥当性を検証してきた(藤原ほか<sup>2)</sup>; 藤原<sup>3)</sup>)。その場合、表面流速には静水面の流速を引き伸ばす Wheeler の方法を適用するとともに、作成信号に含まれる質量輸送に生じる総水量の増大を抑制する手法として成分波に対してストークスドリフト分を考慮する補正を提案しているが、高波浪時には水深変化が計算結果に影響を与えるほど大きくなる場合があり、実用上さらなる改善の必要性があった。その後、計算結果を基に流速を補正することで、被災限界程度の高波浪に対しても実用的な精度で越波流量を推定する可能性を示した(藤原ほか<sup>4)</sup>)。一方、榊山・米山<sup>5)</sup>は、多方向不規則波を用いた3次元計算を対象に同じく成分波の重ね合わせによる信号作成法を提案しているが、断面平均流速を用いて質量輸送量の補正を行っている。

本研究では、藤原ほか<sup>4)</sup>の方法をさらに改善し、事前の計算結果を用いることなく流速を補正する方法を検討し、その適用性を検証した。また、この結果から、水路長や造波水深の与え方によってより安定した条件で不規則波計算を行うことができる目安を示すことで、実用計算に資することを旨とした。

### 2. 不規則波の信号作成方法

これまでに提案した不規則波の信号作成方法をまとめて以下に示す(図-1参照)。

水位変動  $\eta$ 、水平水粒子速度  $u$  は式(1)および式(2)で与えられる。

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

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

ここに、 $\varepsilon_m$  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、質量輸送量を軽減する水平水粒子速度  $U$  はストークスドリフト  $\bar{U}_m$  (ストークス波の質量輸送速度) を用いて式(3)のように与える。

$$U(z, t) = \sum_{m=1}^M \left\{ 2\pi f_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) - \bar{U}_m \right\} \quad (3)$$

ここで  $\bar{U}_m$  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(4)および式(5)のように表される。

$$\bar{U} = \frac{\pi H}{T} \frac{\pi H}{L} \exp\left(\frac{4\pi z}{L}\right) \quad (4)$$

$$\bar{U} = \frac{1}{2} \frac{\pi H}{T} \frac{\pi h}{L} \frac{\cosh 4\pi(h+\bar{z})/L}{\sinh^2(2\pi h/L)} \quad (5)$$

ここに、 $\bar{z}$ は水粒子の平均位置を表す。

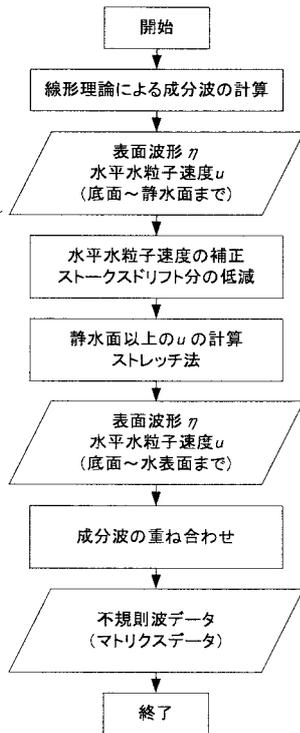


図-1 計算フロー

なお、表面流速は、図-2に示すように水位が静水面以上の場合にはWheelerの方法（線形理論による表面流速を水面まで引き伸ばして与える）を適用し、それ以外では線形理論の値をそのまま与えることとした。

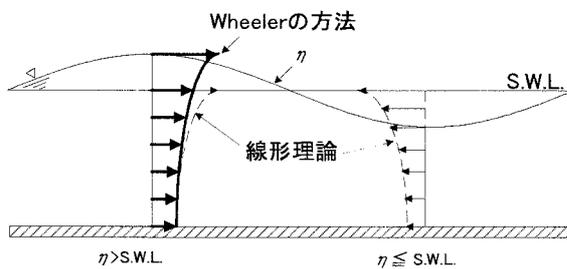


図-2 表面流速の与え方

ここまでの手順では、ストークスドリフト分の低減が静水面以上において過大となり、総水量が必要以上に小さくなるため、以下の手順を加えることでその抑制を図った。

- 1) 従来の方法（図-1の計算フロー）により計算を行い、全水量からの変化量 $\Delta V$ の時間変化を調べ、最小自乗近似法（一次近似）によって、このときの勾配 $a_1$ を算出する。
- 2) ストークスドリフトを考慮しない場合の計算

を行い同様に $a_2$ を算出する。

- 3)  $\Delta V$ は、質量輸送速度 $\bar{U}_m$ の大きさに比例していると考え、1)および2)の結果から、 $\Delta V$ の時間変化がゼロとなる勾配 $C$ を式(6)より算出し、これを $\bar{U}_m$ の補正係数とする。

$$C = a_1 / (a_1 - a_2) \quad (6)$$

- 4)  $\bar{U}_m$ にこの補正係数を乗じて、再度図-1に示すフローで計算を行う。

なお、勾配 $a_1$ および $a_2$ の算出方法は図-3に示す通りである。

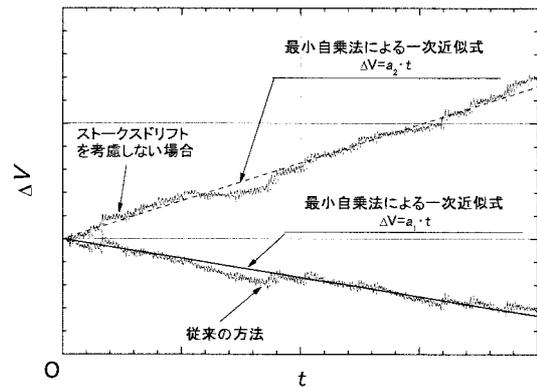


図-3 勾配 $a_1$ および $a_2$ の算出方法（模式図）

### 3. 計算方法

#### (1) 計算条件

造波水深を $h=10\text{m}$ 、 $20\text{m}$ および $30\text{m}$ と想定し、有義波周期 $T_{1/3}$ を $6\text{s}$ 、 $10\text{s}$ および $14\text{s}$ 、また有義波高 $H_{1/3}$ を $2\text{m} \sim 8\text{m}$ の範囲で変化させた15ケースを設定した（表-1参照）。表中には、入射波の特性を表すパラメータとして波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ およびアーセル数 $U_r$ を併せて示した。

#### (2) 計算断面

計算領域内の全水量の変化を調べるのが目的なので、計算断面は図-4のように単純な一様水深とし、計算領域を小さくすることで計算時間の大幅な短縮を図った。造波境界によって不規則波を発生させるとともに、他端にはエネルギー減衰帯を設けた。エネルギー減衰帯の内部は等比級数的に格子間隔を大きくした。計算時間は $T_{1/3}=6\text{s}$ 、 $10\text{s}$ および $14\text{s}$ に対してそれぞれ $1200\text{s}$ 、 $2100\text{s}$ および $2800\text{s}$ とし、ドナーパラメータを $0.4$ として与えた。なお、上述の重ね合わせを行う際の周波数範囲は、ピーク周波数 $f_p$ の $0.5 \sim 6.0$ 倍の範囲に設定した。CADMAS-SURFで用いた代表的な計算パラメータをまとめて表-2に示す。

表-1 検討ケース

Run	h(m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/2}$ (m)	$L_{1/3}$ (m)	$H_{1/2}/L_{1/3}$	$H_{1/3}/h$	$U_r$
1	10	6	2	48.4	0.041	0.200	4.7
2			4	48.4	0.083	0.400	9.4
3		10	2	92.3	0.022	0.200	17.0
4			4	92.3	0.043	0.400	34.1
5		14	2	133.8	0.015	0.200	35.8
6			4	133.8	0.030	0.400	71.6
7	20	6	2	55.0	0.036	0.100	0.8
8			4	55.0	0.073	0.200	1.5
9		10	4	121.2	0.033	0.200	7.3
10			6	121.2	0.050	0.300	11.0
11		14	6	182.5	0.033	0.300	25.0
12			8	182.5	0.044	0.400	33.3
13	30	6	4	56.0	0.071	0.133	0.5
14		10	6	137.2	0.044	0.200	4.2
15		14	8	215.3	0.037	0.267	13.7

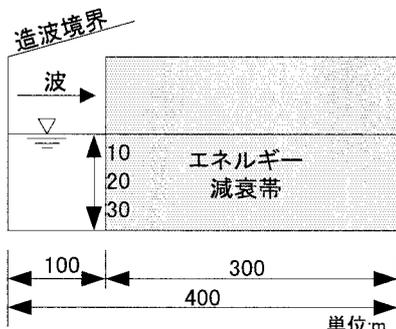


図-4 計算断面

表-2 代表的な計算パラメタの一覧

バージョン	Ver.4.0	減衰帯	DEGEREE	2
$\Delta X$	1		PARAX-X	0.6
$\Delta Z$	1		PARAX-Z	0.6
差分スキーム	DONER-0.4		WIDTH(m)	300.0
ボラス下限値	0.01			
造波モデル	造波境界			

#### 4. 流速の補正方法

##### (1) 補正係数 $C$

2. 不規則波の信号作成方法で示した方法によって算出されるそれぞれのケースにおける補正係数  $C$  を定式化することができれば、事前計算することなく流速の補正が可能になる。  $C$  は Wheeler の方法の適用に伴う質量輸送の誤差が影響すると考えられたので、波の非線形性を表すパラメタである  $U_r$  および  $H_{1/3}/L_{1/3}$  との関係を調べた。その結果、  $U_r$  に対する相関のほうが高く、最小自乗曲線は式(7)で表された。

$$C = 0.62 U_r^{0.08} \quad (7)$$

図-5は、ストークスドリフトの補正係数と  $U_r$  の関係を図示した結果であり、式(7)も併せて示してある。ストークスドリフトを考慮しない場合の総水量の増加割合を表すパラメタ  $a_2$  が相対的に小さい場合、ばらつきが大きくなる傾向にあったため、図では  $a_2=1$  をしきい値としてデータを分けて示した。ただし、  $a_2$  が小さい条件は総水量の変化が小さいことから式(7)の精度が低下してもその影響は相対的に

小さいと考え、以下の検討においては式(7)を用いて計算を行った。

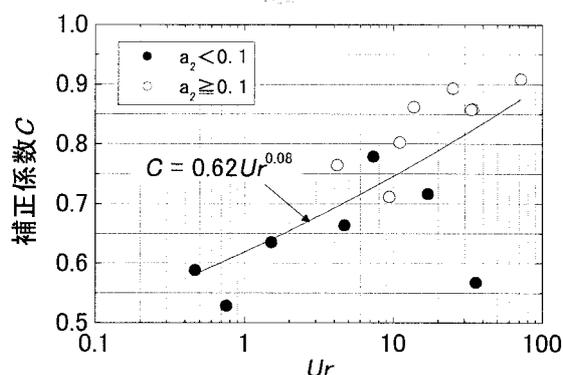


図-5 ストークスドリフトの補正係数と  $U_r$  の関係

##### (2) 総水量の変化

式(7)による補正を行った計算結果から、総水量の変化について考察する。

総水量  $V$  は時間ステップごとに出力されているが、そのままでは扱いにくいので「単位波長当たりの総水量の変化」を示す指標として取り扱えるよう式(8)のように無次元化した。

$$\frac{\Delta V}{h_0 L_{1/3}} = \frac{(h-h_0)B}{h_0 L_{1/3}} = \frac{(h-h_0)B}{h_0 B} \cdot \frac{B}{L_{1/3}} = \frac{\Delta V}{V_0} \cdot \frac{B}{L_{1/3}} \quad (8)$$

ここで、  $V$  : 単位幅当たりの総水量 ( $m^3/m$ )、  $\Delta V$  : 単位幅当たりの変化水量 ( $m^3/m$ )、  $h_0$  : 初期水深、  $L_{1/3}$  : 水深  $h_0$  における有義波周期に対する波長、  $B$  : 計算領域の全長 (エネルギー減衰帯を含む) とする。なお、一様断面水路であることから、

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (9)$$

として式(8)を書き換えると式(10)のように示される。

$$\frac{\Delta V}{h_0 L_{1/3}} = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot \frac{B}{L_{1/3}} \quad (10)$$

式(10)を変形した式(11)を見ると、当然のことではあるが、  $B/L_{1/3}$  を大きくする、すなわち計算対象となる領域の水平長さを大きくすると、相対的に水位高さの変化を低減できることが分かる。

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{\Delta V}{h_0 L_{1/3}} \cdot \frac{B}{L_{1/3}} \quad (11)$$

図-6は、無次元総水量の変化と有義波周期で無次元化した時間の関係をRun3に対して示した例であ

り、計算ステップ毎の値をそのまま示した。図中には流速の補正を全く行わない場合および従来のストークスドリフト分を除去した場合の結果も併せて示した。流速補正を行わない場合の無次元総水量の変化の最大値は約0.5となるが、ストークスドリフト分を除去した場合のそれは約-0.2となっている。ストークスドリフトの補正による補正を行うと、さらに最大値は小さくなり-0.1以下となっている。このように、式(7)を用いることで、総水量の変化を抑制していることが確認できる。

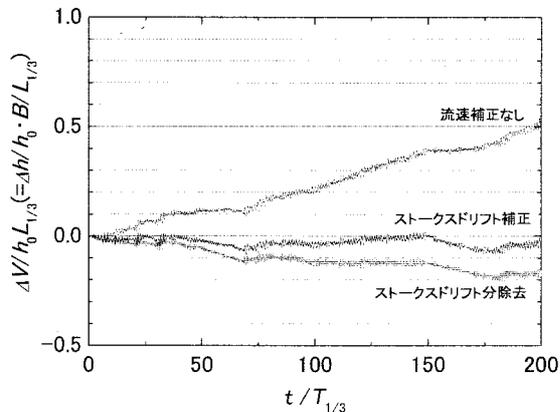


図-6 無次元総水量変化の比較 (Run3)

次に、水深ごとに無次元総水量の時間変化を表した結果を図-7～図-9に示す。h=10mおよびh=20mの場合を見ると、同じT\_{1/3}ではH\_{1/3}が小さいときのほうが無次元総水量変化は小さくなっている。また、h=10m、h=20mおよびh=30mを比較すると、水深が大きくなるほど無次元総水量変化は小さくなるようである。

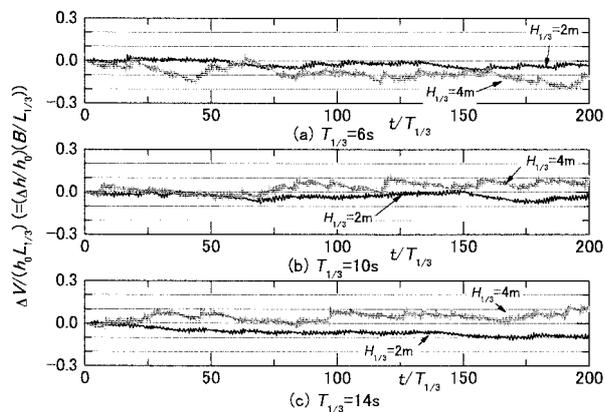


図-7 有義波高による比較 (h=10m)

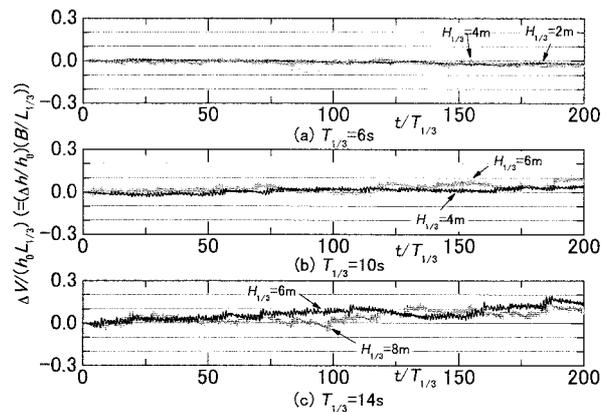


図-8 有義波高による比較 (h=20m)

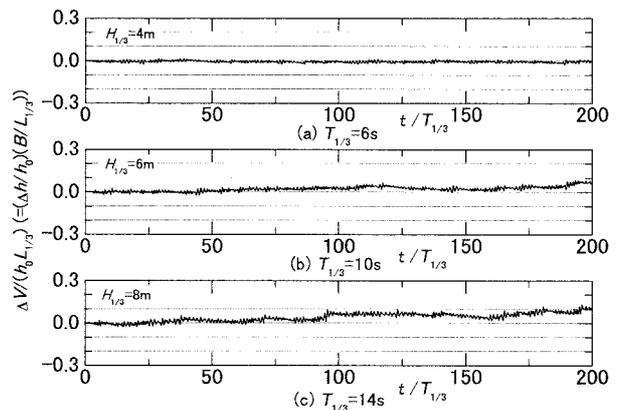


図-9 有義波高による比較 (h=30m)

図-7～図-9に示した結果から、造波水深による総水量変化の違いを見やすくするために、T\_{1/3}=6s、H\_{1/3}=4mの結果を選んで示したものが図-10である。入射波の条件が同じであれば、水深が大きくなると無次元総水量変化が小さくなる様子が明らかである。水深が大きくなると、ストークスドリフト自体が小さくなることおよび相対的にWheelerの方法の効果が小さくなることが影響していると考えられる。

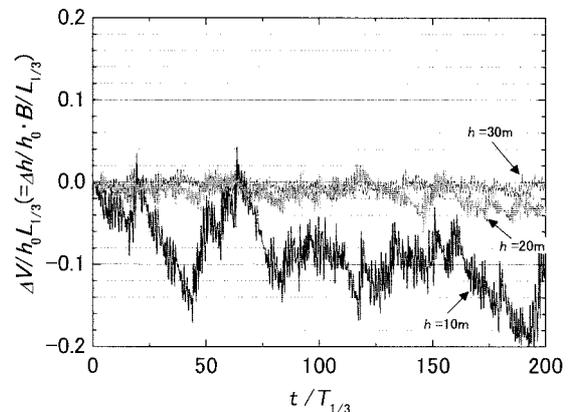


図-10 造波水深の違いによる比較 (T\_{1/3}=6s, H\_{1/3}=4m)

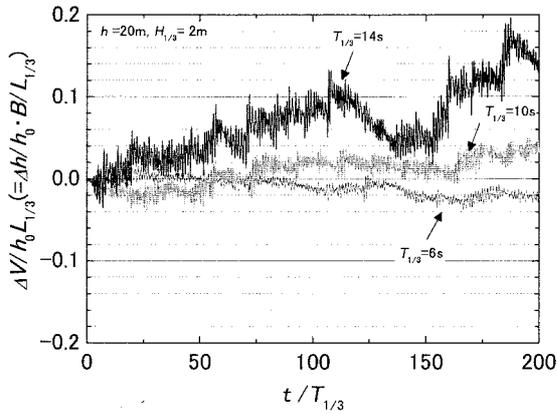


図-11 有義波周期による比較 ( $h=20\text{m}$ ,  $H_{1/3}=2\text{m}$ )

図-11は、有義波高 $H_{1/3}=2\text{m}$ としたときに有義波周期 $T_{1/3}$ が違うケースを比較した結果を水深が $20\text{m}$ の場合について示したものである。これらの中では $T_{1/3}=14\text{s}$ のケースにおいて最も無次元総水量変化は大きくなっており、 $T_{1/3}=6\text{s}$ および $10\text{s}$ のケースについては同程度の無次元総水量変化の最大値は同程度となった。

以上の結果より、式(7)を用いた流速補正を行った計算結果からは、無次元総水量の変化は従来の方法に比べると抑制されるが、完全にはなくなることが確認された。また、無次元総水量の変化が大きくなるのは、波高が大きい場合または水深が小さくなる場合であることが分かった。

### 5. 造波水深および水路長の設定方法

無次元総水量の変化は、式(7)を用いて水平流速を補正した場合でも完全にはゼロとにならない。無次元総水量の変化を抑制する手段としては、先述したように、造波水深および水路長を大きくすることが有効である。すなわち、造波水深および水路長が大きくなると、初期総水量が大きくなり相対的に総水量の変化が小さくなる。そこで、造波水深および水路長の設定方法について検討した結果を以下に示す。

造波水深および水路長の設定は、水深の最大変化量 $(\Delta h/h)_{\max}$ を基準値として評価するのが実用的ではないかと考えた。先に示した図-7～図-9から $\Delta V/h_0 L_{1/3}$ の最大値を読み取り、式(11)の関係をを用い、無次元水路長 $B/L_{1/3}$ をパラメタとして $(\Delta h/h)_{\max}$ に置き換えた。表-3には、このようにして得られた $(\Delta h/h)_{\max}$ を造波水深のパラメタとして選んだ波高水深比 $H_{1/3}/h$ と併せて示した。Run1について見ると、 $H_{1/3}/h=0.2$ の造波条件に対しては、無次元水路長を $B/L_{1/3}=25$ とすることで、 $(\Delta h/h)_{\max}$ を $0.4\%$ 以下にすることができることを表している。Run2では、 $(\Delta h/h)_{\max}$ が他のケースに比べて極めて大きい、このケースは $H_{1/3}/L_{1/3}=0.083$ と非常に波形勾配が大きい条件に対応している。計算上どの程度の

精度を有するかについて検討するために行ったケースであるが、実際の海域でこのような波浪が発生することはほとんどないと考えられる。なお、全ケースを概観すると、 $H_{1/3}/h$ が大きいほど、また $B/L_{1/3}$ が小さいほど、 $(\Delta h/h)_{\max}$ が大きくなる傾向が見取れる。本手法は、線形理論に基づいた造波手法であるため、 $H_{1/3}/h$ が大きくなり非線形性が強くなると精度が低下することが表れている。

表-3  $\Delta h/h$ の最大値

Run	$H_{1/3}/h$	$(\Delta h/h)_{\max} \times 100(\%)$			
		$B/L_{1/3}$			
		25	30	35	40
1	0.200	0.4	0.3	0.3	0.3
2	0.400	2.8	2.3	2.0	1.7
3	0.200	0.6	0.5	0.4	0.4
4	0.400	0.9	0.8	0.7	0.6
5	0.200	0.6	0.5	0.4	0.4
6	0.400	1.3	1.1	0.9	0.8
7	0.100	0.2	0.1	0.1	0.1
8	0.200	0.2	0.2	0.2	0.2
9	0.200	0.2	0.2	0.2	0.1
10	0.300	0.5	0.4	0.3	0.3
11	0.300	0.8	0.7	0.6	0.5
12	0.400	0.7	0.6	0.5	0.4
13	0.133	0.1	0.1	0.1	0.1
14	0.200	0.3	0.3	0.2	0.2
15	0.267	0.5	0.4	0.4	0.3

そこで、造波水深と水路長の設定に便宜が図れるように、 $(\Delta h/h)_{\max}$ と $H_{1/3}/h$ の関係を $B/L_{1/3}$ をパラメタとして図示した結果を図-12に示す。先述のように、 $H_{1/3}/h$ が大きくなるほど、また $B/L_{1/3}$ が小さくなるほど、 $(\Delta h/h)_{\max}$ が大きくなっている様子が明らかである。 $H_{1/3}/h=0.4$ で $(\Delta h/h)_{\max}$ が大きい点は、先述したRun2のケースの結果である。

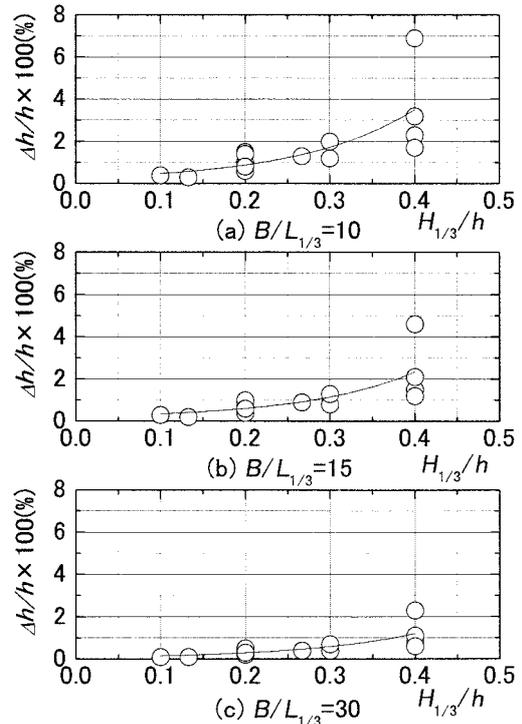


図-12 水路長および造波水深の検討結果

$H_{1/3}/h$  と  $B/L_{1/3}$  の影響を比較すると、 $B/L_{1/3}$  の影響は小さいと言える。 $H_{1/3}/h$  に着目すると、図中に示した計算値の傾向を示す曲線から分かるように、 $H_{1/3}/h=0.4$  になると  $(\Delta h/h)_{\max}$  の増加率が大きくなるようである。例えば、 $(\Delta h/h)_{\max}$  を 1%以下に抑制する場合を考えると、 $H_{1/3}/h=0.3$  以下であれば  $B/L_{1/3}=15$  程度とすればよいが、同じ水深でも入射波高が増大するなどして  $H_{1/3}/h=0.4$  になると  $B/L_{1/3}=30$  程度の水路長にする必要があることが分かる。不規則波計算を行う場合に最小限必要となる断面を想定すると、図-13 のような模型配置が考えられる。すなわち、造波ソースを用いて、構造物からの反射波を減衰させる領域として  $5L_{1/3}$ 、造波後の安定領域  $3L_{1/3}$ 、計算有効領域  $(5\sim 10)L_{1/3}$  程度が推定される。そうした場合の水路全長は  $(13\sim 18)L_{1/3}$  となり、 $H_{1/3}/h=0.3$  以下であれば水深変化を抑えるために水路長を拡張する必要はないものと考えられる。

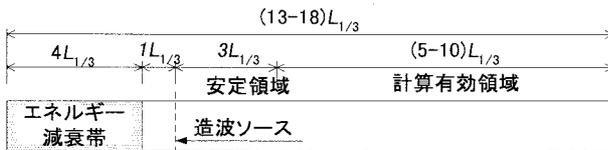


図-13 不規則波計算を行う場合の最小断面想定図

計算有効領域がさほど大きくない場合や  $H_{1/3}/h=0.4$  以上となる場合、エネルギー減衰帯を大きく取れば、先述のように初期総水量が大きくなり相対的に総水量の変化を小さくすることができる。その場合、エネルギー減衰帯内の水平方向の格子間隔を等比級数的に大きくすることができるので、格子数の抑制および計算時間の短縮が図れるが、格子幅の最大値としては計算領域内の格子幅の  $5\sim 10$  程度にしておくのが無難である。

なお、 $(\Delta h/h)_{\max}$  は、必ずしも計算終了時における水位変化を示したものではなく、計算時間内における最大値を表すものであり、場合によっては上述したよりも水路長を短くするなど、状況に応じた設定が望まれる。

## 6. おわりに

本研究の結果をまとめて最後に示す。

- 本研究における流速の補正方法によって、質量輸送に基づいて生じる総水量の変化を抑制する効果が得られることを数値シミュレーションによって確認した。
- 本手法を用いて不規則波の計算を実施する際の造波水深と水路長について検討し、それらの設定方法の目安を示した。
- 造波地点における入射波条件が  $H_{1/3}/h=0.3$  以下であれば、水深変化を抑えるために水路長を拡張するような必要はないと考えられる。
- 有効計算領域がさほど大きくない場合や  $H_{1/3}/h=0.4$  以上となる場合には、水路長を長くすることで水深変化を抑制することができるが、必ずしも有効計算領域を大きくする必要はなく、エネルギー減衰帯を大きくすることで合理的な計算が可能である。

謝辞：本研究を進めるに当たり、数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会（事務局・（財）沿岸技術研究センター）において行われた討議が非常に有意義であったことを記し、関係各位の皆様にはこの場を借りて謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 磯部雅彦・高橋重雄・余錫平・榊山 勉・川崎浩司・蔣勤・秋山 実・大山洋志：数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究－VOF 法基本プログラムの作成－，海洋開発論文集，第 15 巻，pp. 321-326，1999。
- 2) 藤原隆一・山崎智弘・橋川正男・早瀬松一：複合断面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. 136-140，2002。
- 3) 藤原隆一：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，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 41-45，2005。
- 4) 藤原隆一・熊谷 裕・宮田佳和：被災限界となる波浪作用下での CADMAS-SURF による越波量の検討，海洋開発論文集，第 23 巻，pp. 177-182，2007。
- 5) 榊山 勉・米山 望：数値波動水槽による多方向不規則波の 3 次元計算の検証と課題，海洋開発論文集，第 23 巻，pp. 183-188，2007。