CADMAS-SURFで発生させた不規則波の伝播特性

THE TRANSFORMATION OF IRREGULAR WAVES ON HORIZONTAL BED BY CADMAS-SURF

藤原隆一[1]・藤間功司[2]・成毛辰徳[3]・稲垣　聡[4]・安井章雄[5]・和田匡央[6]
Ryuichi FUJIWARA, Koji FUJIMA, Tatsunori NARUKE, Satoshi INAGAKI, Akio YASUI and Masao WADA

[1]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）
[2]正会員　工博　防衛大学校　システム工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20）
[3]　いであ（株）国土環境研究所（〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早渕2-2-2）
[4]正会員　工修　鹿島建設（株）技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）
[5]正会員　博（工）　日本海洋コンサルタント（株）技術本部（〒136-0074 東京都江東区東砂7-19-31）
[6]（財）沿岸技術研究センター（〒102-0092　東京都千代田区隼町3-16　住友半蔵門ビル6F）

CADMAS-SURF is one of the accurate numerical models that can apply to a performance-based design of maritime structure. However, there were a few application examples to irregular waves, because of the increase of computation time. Thus, a systematic study of irregular waves by CADMAS-SURF has been conducted with a cooperation of research group. The numerical simulations are conducted for transformation of irregular waves propagating a flat flume with a constant depth. The calculated spectra and representative waves are compared with those set as the target and the results of theoretical study. The characteristics of irregular waves generated by CADMAS-SURF are consistent with the existing knowledge. The modification of given spectra to make irregular waves is recommended to agree the spectra, significant wave height or significant wave period with the target at some point. The adequate selection of option parameter is required to avoid the numerical damping.

Key Words : *Irregular waves, wave generation, numerical diffusion, CADMAS-SURF*

1．研究の目的

CADMAS-SURF は，耐波設計のための有力なツールであり [1]，様々な場面での利用が広がっている．例えば，蒋ほか [2]，鶴ヶ崎ほか [3] および高橋ほか [4] は地盤 FEM モデル，また熊谷ほか [5] は地形変化モデルとの連成によって波－地盤－構造物への相互作用が取り扱えるように拡張している．一方，川崎ほか [6]，大熊ほか [7]，鈴木ほか [8] および藤原ほか [9] は，CADMAS-SURF を実用的な問題へ適用し，その妥当性を確かめているが，これらの検討には規則波が用いられている．不規則波についても，高橋・池谷 [10] に示されるように適切な造波信号を与えれば計算は可能であり，越波量に対しても妥当な結果が得られることが，中野ほか [11]，藤原 [12]および藤原ほか [13]によって報告されている．ただし，不規則波を用いた検討では 100 波程度の波数を計算する必要があることから，計算時間が長時間に及ぶこともあって，系統的に不規則波の伝播状況を検討した事例は見られない．

本研究では，一様水深上における不規則波の伝播を CADMAS-SURF でシミュレートし，数値拡散などによる誤差の影響も含め，通過波検定地点で有義波高，有義波周期，スペクトルなど不規則波の特性を目標に合わせるためにどうすればよいかを議論し，不規則波を用いて耐波設計を行う際の留意点を示した．

2．計算方法

(1)検討ケース

検討ケースを**表-1**に示す．波浪条件は，設計条件として想定される範囲を包含し，波形勾配が $H_{1/3}/L_{1/3}$=0.02～0.08程度となるように有義波高$H_{1/3}$，有義波周期$T_{1/3}$および水深hを設定した．ここで，$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.02～0.04は実際によく発生するケースに対応する．$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.06は最大級の作用波浪を想定したケースであり，それ以上の波浪が作用したときに計算としてどのような結果が得られるのかを調べたのが$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.08のケースである．また，造波方法による比較を行えるように造波ソースと造波境界について計算を実施した．不規則波は，修正Bretschneider－光易型の周波数スペクトルを対象とした．

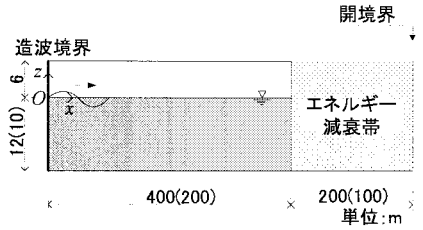
表-1　検討ケース

Run	h(m)	$H_{1/3}$(m)	$T_{1/3}$(s)	$L_{1/3}$(m)*)	$H_{1/3}/L_{1/3}$	造波方法
1	12	2	10	99.7	0.020	造波ソース
2		4			0.040	
3	10	3	6	48.4	0.062	
4		4			0.083	
5	12	2	10	99.7	0.020	造波境界
6		4			0.040	
7	10	3	6	48.4	0.062	
8		4			0.083	

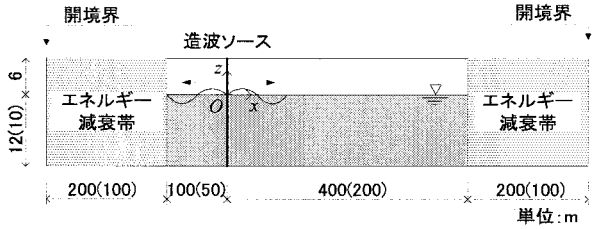
*) $T_{1/3}$に対する波長

(2) 計算断面

解析領域は図-1のように設定した．括弧内の値は，Run3，Run4，Run7およびRun8の場合（$T_{1/3}$=6sに対応）を表している．



(a)　造波境界



(b)　造波ソース

図-1　計算断面（括弧内の数字は$T_{1/3}$=6sに対応）

(3) 計算パラメタ

CADMAS-SURF の計算時に用いた代表的なパラメタの設定値を表-2 に示す．なお，オプションとして Ver.5.0 より導入された総水量自動補正機能を用い，補正対象時間は有義波周期の 3 倍とした．

表-2　代表的なパラメタの設定値

バージョン	5.0	減衰帯	DEGEREE	2
Δx	$L_{1/3}$/100		PARAX-X	0.6
Δz	(1/6～1/13)$H_{1/3}$		PARAX-Z	0.6
差分スキーム	DONER-0.4	境界条件（流速・圧力）		VP SLIP
ポーラス下限値	0.01			VP FREE
開境界の周期	100s	時間制御	自動	0.6

(4) 解析方法

不規則波の伝播状況を調べる測点は，造波地点（X=0m）と$X/L_{1/3}$=1.0，2.0 および 3.0 となる 3 地点を選んだ．また，解析時間は，これらの対象地点に波エネルギーが十分に到達したと考えられる造波開始後 $50T_{1/3}$～$200T_{1/3}$ の $150T_{1/3}$ とした．

3．一様水深上の不規則波の伝播

(1) 水面変動

波形勾配が $H_{1/3}/L_{1/3}$=0.020 および 0.062 のケースを例として，各地点における水面変動を示した結果をそれぞれ図-2 および図-3 に示す．いずれの場合も，計算を実施した中で任意に取り出した 150s 間について，造波ソースと造波境界による計算結果を表示してある．図-2 では，造波地点を始め，いずれの地点においても造波ソースと造波境界による違いは小さい．波形勾配が大きい図-3 では，造波ソースの水面変動が造波境界のそれに比べて大きくなっている．これは，峯付近の水平流速が大きくなると発生する造波ソース特有の現象（造波原理の問題）であるが，$X/L_{1/3}$=1.0 の水面変動には造波地点の影響は認められないことから，その影響は造波地点から 1 波長程度に限られる．大きい波高の波を起こすときには，この現象によって造波地点で砕波する波が発生するため，注意が必要である．

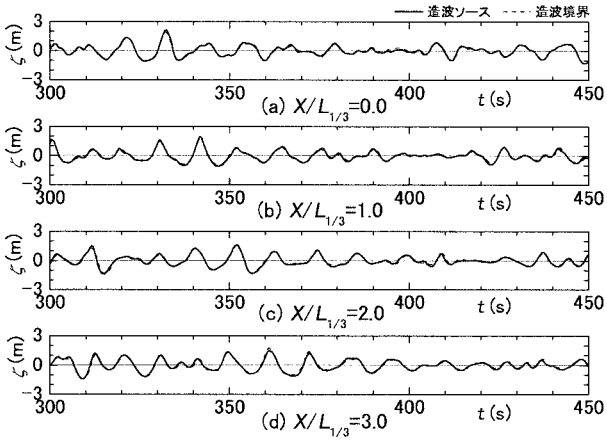


図-2　水面変動の比較（$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.020）

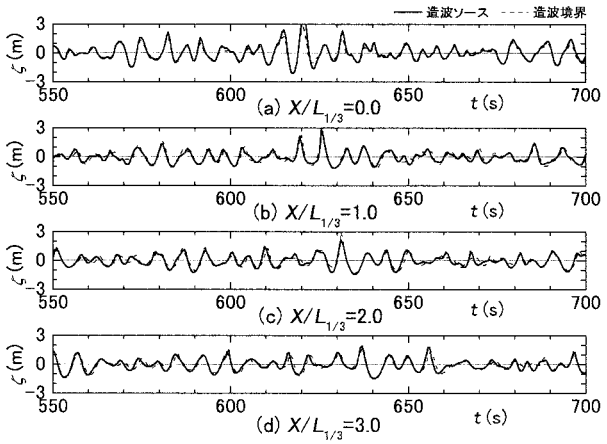


図-3　水面変動の比較（$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.062）

(2) 周波数スペクトル

水面変動と同ケースについて，各測点における周波数スペクトルを示した結果を示すのが図-4および図-5である．各図中には，目標値（入力値）を併せて示した．図-4の$X/L_{1/3}$=0（造波地点）の周波数ス

ペクトルは合わせ込み計算を行っていないことから，造波地点でほぼ目標値が得られていることは妥当な結果であると言える．ただし，$X/L_{1/3}$=1.0，2.0，3.0の図に見られるように造波地点から離れるにしたがい，高周波側の減衰が大きくなっている．波形勾配が大きくなる**図-5**になると，造波地点から離れた地点ではピーク周波数付近から高周波側の減衰が大きくなっている．これは，有義波周期が短くなったことで，ピーク周波数が減衰の大きい高周波側に近づいたことも影響していると考えられる．

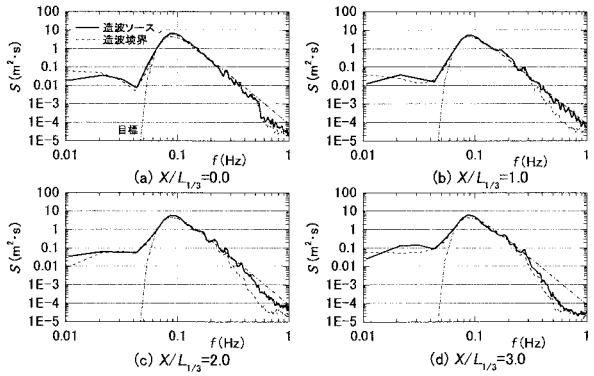


図-4　周波数スペクトルの比較（$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.020）

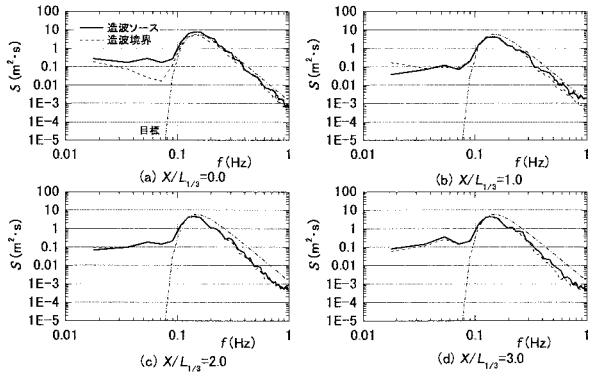


図-5　周波数スペクトルの比較（$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.062）

(3) 代表波

代表波について有義波および最高波の場所ごとの変化を，これまでと同じ条件について**図-6**および**図-7**に示す．**図-6**に示す$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.020の場合について見ると，$H_{1/3}$は目標値より若干大きいが$X/L_{1/3}$=3.0までは安定しており，造波方法による違いは見られない．H_{max}は$H_{1/3}$に比べて変動が大きく，造波地点から離れるほど波高が減衰しているように見える．$T_{1/3}$は造波地点から離れるほど目標値よりも長くなるが，T_{max}は$X/L_{1/3}$=3でほぼ同じか減少に転じている．**図-7**は，$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.062の結果を示す．造波境界の場合に造波地点において$H_{1/3}$が目標値より小さくなるのは先のケースと同じであるが，造波ソースの場合には逆に大きくなっていることが特徴的である．これは，造波地点におけるt=680s～690s，またt=760s～770s付近で見られるような水位が造波境界に比べて高くなる現象によるものである．これによって造波ソースを用いた場合のH_{max}は造波地点で8.97mと非常に大きくなっているが，$H_{1/3}$の波高変化を見ると造波地点から1波長も離れるとその影響はほとんど見られない．また，$T_{1/3}$が造波地点から離れるに従い長くなる傾向やT_{max}が造波地点から離れた地点でピークを持つよう変化をする傾向は他のケースと同じである．

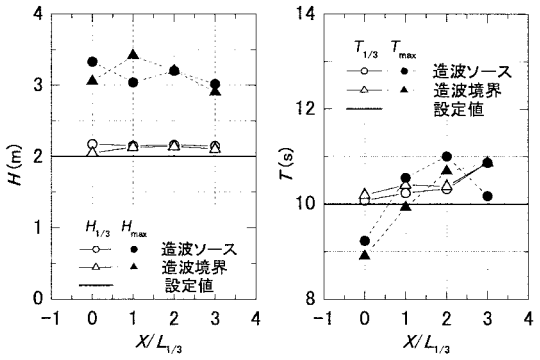


図-6　代表波の比較（$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.020）

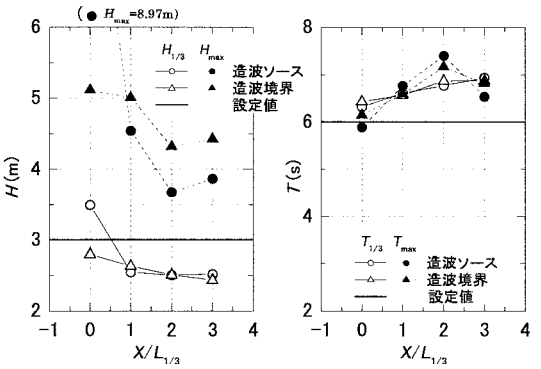


図-7　代表波の比較（$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.062）

次に，代表波の特性を詳細に見るために，波高分布がレーリー分布するとした場合に得られる$H_{1/10}$や$H_{1/3}$とH_{mean}の関係およびH_{max}の最多値を波高比の形式で整理した結果を**表-3**に示す．造波ソースと造波境界の違いは小さいので，造波ソースのみ示す．なお，造波地点（$X/L_{1/3}$=0.0）では先述のように水位が異常に高くなることによる波高比の増大が見られるので検討の対象外とした．$H_{max}/H_{1/3}$は，レーリー分布に基づく理論値に比べると過小であることが多い．$H_{1/10}/H_{1/3}$および$H_{1/3}/H_{mean}$の理論値は多数の記録から得られる平均的な関係を示すもので，連続100波程度の記録ではこの平均値からかなりずれることがある．このようなことを加味しても，計算値は妥当と言える．周期に関しては理論的検討が困難であるが，参考までに$T_{1/10}/T_{1/3}$，$T_{1/3}/T_{mean}$および$T_{max}/T_{1/3}$を算出した結果を**表-4**に示す．なお，表中には合田[13]が不規則波シミュレーションで得た代表周期比の中で修正Bretschneider－光易型に相当するWallops型スペクトルにおけるm=5の結果を併せて示した．

計算値は平均的に見るとこれらの結果とほぼ等しい．

表-3 代表波高比の比較（造波ソース）

(a) $H_{1/3}/L_{1/3}$=0.020($H_{1/3}$=2.0m, $T_{1/3}$=10.0s, h=12.0m)

$X/L_{1/3}$	波数N	$H_{max}/H_{1/3}$		計算	$H_{1/10}/H_{1/3}$		$H_{1/3}/H_{mean}$	
		理論	計算	理論	理論	計算	理論	計算
1	163	1.59	1.42	0.89		1.25		1.61
2	163	1.59	1.48	0.93	1.27	1.27	1.60	1.58
3	152	1.58	1.41	0.89		1.21		1.51

(b) $H_{1/3}/L_{1/3}$=0.040($H_{1/3}$=4.0m, $T_{1/3}$=10.0s, h=12.0m)

$X/L_{1/3}$	波数N	$H_{max}/H_{1/3}$		計算	$H_{1/10}/H_{1/3}$		$H_{1/3}/H_{mean}$	
		理論	計算	理論	理論	計算	理論	計算
1	154	1.58	1.30	0.82		1.17		1.46
2	151	1.58	1.44	0.91	1.27	1.19	1.60	1.47
3	149	1.58	1.38	0.88		1.13		1.46

(c) $H_{1/3}/L_{1/3}$=0.062($H_{1/3}$=3.0m, $T_{1/3}$=6.0s, h=10.0m)

$X/L_{1/3}$	波数N	$H_{max}/H_{1/3}$		計算	$H_{1/10}/H_{1/3}$		$H_{1/3}/H_{mean}$	
		理論	計算	理論	理論	計算	理論	計算
1	144	1.57	1.79	1.13		1.30		1.53
2	137	1.57	1.47	0.94	1.27	1.21	1.60	1.51
3	136	1.57	1.54	0.98		1.26		1.57

(d) $H_{1/3}/L_{1/3}$=0.083($H_{1/3}$=4.0m, $T_{1/3}$=6.0s, h=10.0m)

$X/L_{1/3}$	波数N	$H_{max}/H_{1/3}$		計算	$H_{1/10}/H_{1/3}$		$H_{1/3}/H_{mean}$	
		理論	計算	理論	理論	計算	理論	計算
1	146	1.58	1.47	0.93		1.18		1.54
2	137	1.57	1.52	0.97	1.27	1.19	1.60	1.46
3	117	1.54	1.43	0.93		1.24		1.51

表-4 代表周期比の比較（造波ソース）

(a) $H_{1/3}/L_{1/3}$=0.020($H_{1/3}$=2.0m, $T_{1/3}$=10.0s, h=12.0m)

$X/L_{1/3}$	$T_{max}/T_{1/3}$		$T_{1/10}/T_{1/3}$		$T_{1/3}/T_{mean}$	
	合田	計算	合田	計算	合田	計算
1		1.03		1.03		1.21
2	0.99	1.07	1.00	1.04	1.19	1.19
3		0.94		1.02		1.15
	平均	1.01	平均	1.03	平均	1.18

(b) $H_{1/3}/L_{1/3}$=0.040($H_{1/3}$=4.0m, $T_{1/3}$=10.0s, h=12.0m)

$X/L_{1/3}$	$T_{max}/T_{1/3}$		$T_{1/10}/T_{1/3}$		$T_{1/3}/T_{mean}$	
	合田	計算	合田	計算	合田	計算
1		1.11		1.04		1.16
2	0.99	1.00	1.00	1.01	1.19	1.16
3		0.98		1.01		1.13
	平均	1.03	平均	1.02	平均	1.15

(c) $H_{1/3}/L_{1/3}$=0.063($H_{1/3}$=3.0m, $T_{1/3}$=6.0s, h=10.0m)

$X/L_{1/3}$	$T_{max}/T_{1/3}$		$T_{1/10}/T_{1/3}$		$T_{1/3}/T_{mean}$	
	合田	計算	合田	計算	合田	計算
1		1.02		1.02		1.14
2	0.99	1.09	1.00	1.01	1.19	1.12
3		0.94		1.02		1.14
	平均	1.02	平均	1.02	平均	1.13

(d) $H_{1/3}/L_{1/3}$=0.083($H_{1/3}$=4.0m, $T_{1/3}$=6.0s, h=10.0m)

$X/L_{1/3}$	$T_{max}/T_{1/3}$		$T_{1/10}/T_{1/3}$		$T_{1/3}/T_{mean}$	
	合田	計算	合田	計算	合田	計算
1		0.90		1.02		1.20
2	0.99	1.05	1.00	1.01	1.19	1.13
3		1.12		0.99		1.13
	平均	1.02	平均	1.01	平均	1.16

(4) 差分スキームの影響

ここまでに示したように，CADMAS-SURFで発生させた不規則波は，従来の知見と合致する．ただし，造波地点から離れた地点における高周波側の周波数スペクトルの減衰と有義波周期が長くなる現象についてはさらなる考察が必要と考えられた．そこで，差分スキームの違いから数値拡散の影響を調べた．検討に際しては，周波数スペクトルの合わせ込みを併せて行い，不規則波計算をする際の標準的な手順についても考察した．

検討ケースは，Run1($H_{1/3}/L_{1/3}$=0.020)を対象とした．これまでに行った計算では風上差分を0.4，中心差分を0.6（DONORパラメタ0.4と表記）とするDONORスキームを用いて計算を行っていた．そこで，数値拡散の割合をさらに減じるため，DONORパラメタ0.2とした場合の計算を実施した．また，周波数スペクトルの合わせ込みは，$X/L_{1/3}$=2を対象地点としてそれぞれ2回まで実施した．

図-8は，各地点の周波数スペクトルを目標値とともに図示したものである．図中では，DONORパラメタ0.4の場合の表示をVP0.4としている．対象地点となる$X/L_{1/3}$=2では，DONORパラメタに関わらずほぼ目標値通りの周波数スペクトルが得られている．一方，対象地点から1波長離れた$X/L_{1/3}$=3では，DONORパラメタ0.4の場合の周波数スペクトルはピーク周波数の3-4倍以上の高周波成分が目標値に比べて小さく，減衰しているのが明らかである．このように，周波数スペクトルが高周波側の領域で目標値から小さくなるのは，差分スキームの違いによる数値拡散の寄与が大きいことが分かった．なお，周波数スペクトルの場合，合わせ込み回数を1回としたときと2回としたときの違いは明瞭ではない．

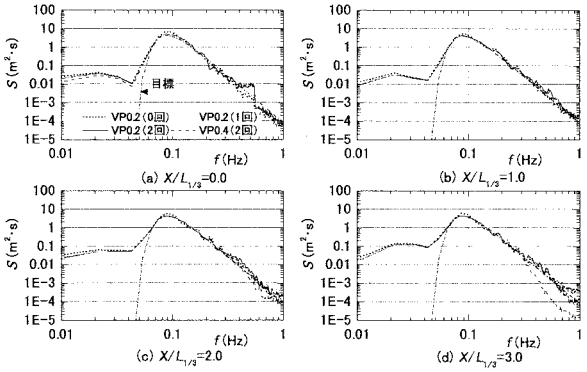


図-8 差分スキームの違いによる周波数スペクトルの比較（$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.020）

次に，代表波の特性について，有義波および最高波を各地点別に比較をした結果を**図-9**に示す．合わせ込みの回数による違いを代表波で比較すると，周波数の場合とは異なり，2回行った方が目標値に近づいていることが分かる．ただし，造波地点から1波長離れた地点($X/L_{1/3}$=3)では，$H_{1/3}$は安定しているが$T_{1/3}$は約4%長くなった．これは，先のケースで造波地点から1波長離れた地点での$T_{1/3}$の増大と同程度であることから，差分スキームの影響ではなく，造波してから安定するまでの変形によるものではないかと考えられる．実験値との比較などを行い，さらに詳細に検討すべき課題と考える．

以上より，不規則波計算をCADMAS-SURFで行う場合，差分スキームとしてDONORスキームを用い，DONORパラメタを0.2程度にして，数値拡散による影響を小さくすることが望ましい．また，周波

数スペクトルの合わせ込みに関しては，1回よりも2回行ったほうが代表波の一致度が高くなるが，周波数スペクトルでの比較では違いは小さい．したがって，実用的にはDONORパラメタを0.2程度にして合わせ込みを1回行えば十分ではないかと思われる．

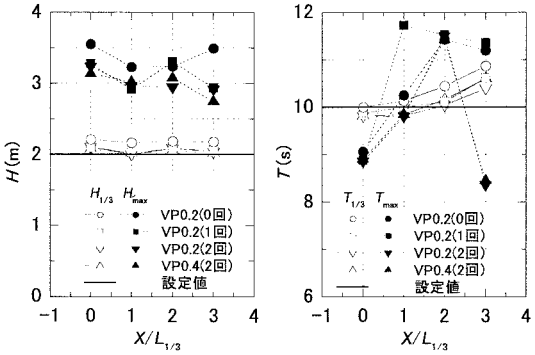


図-9　差分スキームの違いによる代表波の比較
($H_{1/3}/L_{1/3}$=0.020)

(5)格子間隔の影響

格子間隔の設定が計算結果，特に高周波成分の減衰に与える影響について調べた．検討は，Run3（$H_{1/3}/L_{1/3}$=0.062）を対象とし，造波地点から3波長($X/L_{1/3}$=3.0)離れた地点のスペクトル形状を目標値に合わせ込みを目指した．また，DONORパラメタ0.2とした．このケースにおいては，図-10に示すように合わせ込みを行っても，造波地点から2波長，3波長と離れると高周波成分が減衰する傾向にあった．したがって，目標に対して有義波高は小さめ，有義波周期は長めの波浪しか得られない結果となった．

このため，計算格子をさらに小さくした場合に，高周波成分の減衰が変化するかを主眼に検討した．

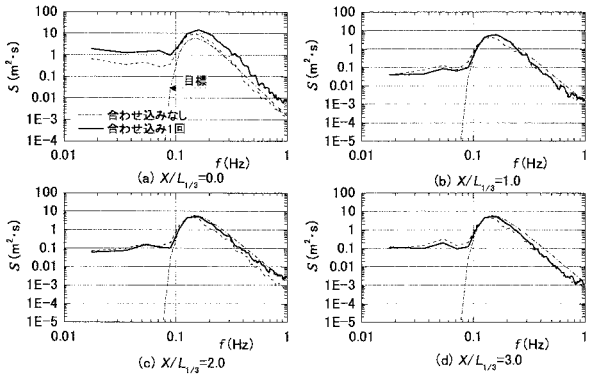


図-10　Run-3における合わせ込み結果

表-4　格子間隔の検討ケース

ケース	Δx(m)	Δz(m)	$\Delta x/L_{1/3}$	$\Delta z/H_{1/3}$	備考
1	0.500	0.300	1/100	1/6～1/13	当初
2	0.250	0.300	1/200	1/6～1/13	Δxを1/2
3	0.125	0.300	1/400	1/6～1/13	Δxを1/4
4	0.125	0.150	1/400	1/12～1/26	Δxを1/4 Δzを1/2

水平方向(Δx)，鉛直方向(Δz)の格子分割は表-4に示すとおりである．これらに対する周波数スペクトルの比較を図-11に，有義波と最高波の統計量の比較を図-12示す．また，$X/L_{1/3}$=3.0地点におけるケース1とケース3の時系列について図-13に示す．

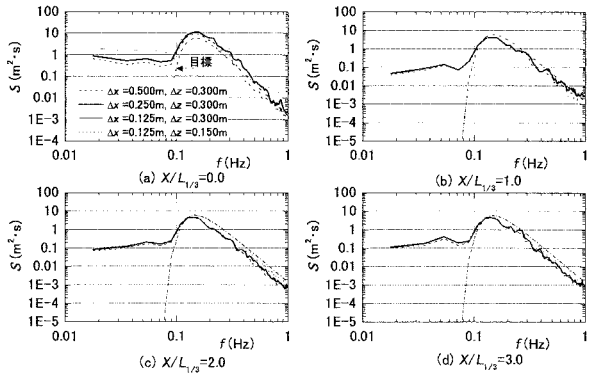


図-11　格子間隔の違いによる周波数スペクトルの比較
(Run3)

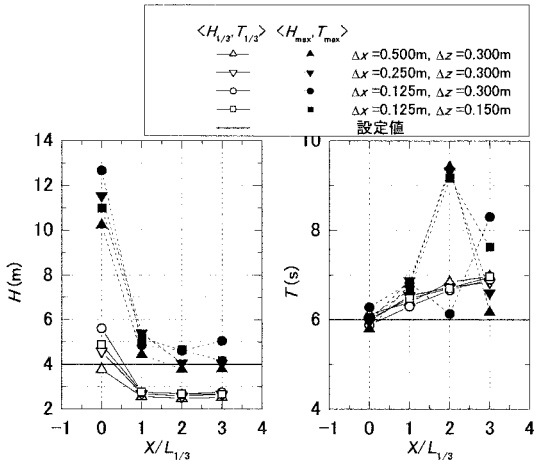


図-12　格子間隔の違いによる有義波および最高波の比較
(Run3)

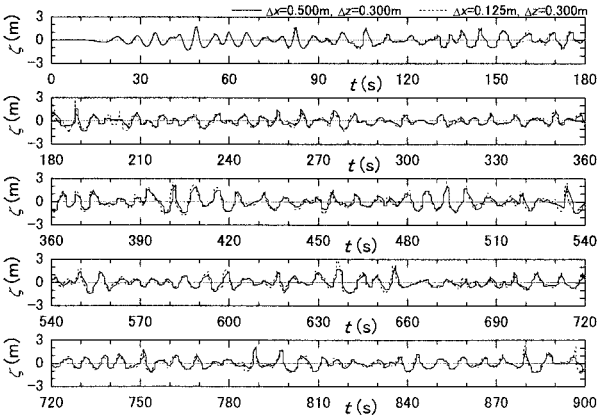


図-13　水面変動の比較（Run3）

周波数スペクトルについて造波位置から2～3波長離れた箇所で見ると，Δx=0.5mのケースに対してΔx=0.25mのケースでは結果はほぼ変わらず，高周波数成分の減衰が見られた．Δx=0.125mのケー

スについては，高周波数成分の減衰が若干弱まる傾向が見られた．この傾向は，**図-13**の時系列を見ても確認される．しかしながら，Δx=0.125m に加えてΔz=0.15mとしたケースでは，特に$X/L_{1/3}$=3.0の箇所において高周波数成分の減衰が再度見られる結果となった．有義波の統計量で見ると，上記の結果を反映して，Δx=0.5mのケースに比べてΔx=0.125mのケースでは，$X/L_{1/3}$=2～3の箇所で波高が約0.2m，周期は0.1～0.2s短くなる傾向であった．ただし，参考までに900s(=150$T_{1/3}$)の計算に必要な計算時間はΔx=0.5mのケース（4時間，CPU:Intel Quad-core,2.66GHz相当）に比べ，Δx=0.125mのケースでは16倍以上になった．よって，格子間隔の設定は計算対象として高周波数成分がどの程度重要かによって選択すればよいと考えられる．

なお，**図-11**で，造波地点の$X/L_{1/3}$=0.0では入射波スペクトルが目標より大きく，またその大きさが格子サイズにより異なる結果となっている．造波地点で入射波スペクトルが目標より大きくなることは，前述のように，造波ソースを用いた造波方法では造波地点で極めて大きい水位が発生することに由来している．さらに，この大きい水位の発生の度合いが計算格子により異なる，すなわちΔxが小さい方が高い水位が発生する傾向にあることが，格子間隔によりスペクトル強度が変化し，有義波高なども変化する理由と考えられる．しかし，このように異常に高い水位の影響は1波長も進む間にほぼなくなり，**図-11**でも$X/L_{1/3}$=1.0では，約0.2Hzより低周波数側でどの計算格子のスペクトル強度もほぼ同じになっている．したがって，造波位置における水位は重要視せず，波が進行した後の$X/L_{1/3}$=2～3の箇所を対象に，波高・周期の設定を行うべきと考えられる．

4．まとめ

本研究の結果をまとめて最後に示す．

- CADMAS-SURFで発生した不規則波は，既往の代表波の特性とよく整合していた．
- 所与の地点で期待する周波数スペクトル形状を得るには，水理模型実験と同じように合わせ込みを行う必要がある．
- CADMAS-SURFで不規則波の計算を行う場合，差分スキームを用いてDONORパラメタを0.2程度にすることで，高周波数の数値拡散が抑制できることを確認した．
- 水平方向の格子間隔を小さくすることで高周波数成分の減衰はある程度小さくなるが，計算時間は増加するため，高周波数成分の重要度によって選択する必要がある．

今後の課題としては，造波地点から離れた地点で有義波周期が長くなる現象について，水理模型実験との比較などからさらに詳細な検討を行う必要があると考えられる．

謝辞：本研究は，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）において行われた波の伝播 WG で行われた作業内容をまとめたことを記し，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・蒋勤・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) 蒋勤・高橋重雄・村西佳美・磯部雅彦：波・地盤・構造物の相互作用に関する VOF-FEM 予測モデルの開発，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 51-55，2000.
3) 鶴ヶ崎和博・馬場慎太郎・金　夏永・三宅達夫・金子清美・手塚　隆・佐藤　清・徳永和幸：波浪が護岸背面地盤へ及ぼす影響，海岸工学論文集，第 49 巻，pp. 776-780，2002.
4) 高橋重雄・鈴木高二郎・村西佳美・磯部雅彦：波・地盤・構造物の相互作用に関する U-π 形式 VOF-FEM(CADMAS GEO-SURF)の開発，海岸工学論文集，第 49 巻，pp. 881-885，2002.
5) 熊谷隆宏・窪　泰浩・藤田和浩・植木一浩：透過堤内および周辺を対象にした非定常地形変化解析モデルの構築とその適用性について，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 461-465，2004.
6) 川崎浩司・富田孝史・下迫健一郎・高野忠史・熱田浩史：ラップゲート型高潮防潮堤の越波と作用波力，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 791-795，2003.
7) 大熊義夫・興野俊也・柴崎尚史・安田勝則・中野修：流速場における混成堤断面の被災状況の相違によるブロック安定性検討，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 751-755，2003.
8) 鈴木高二朗・大嵜菜々子・山本泰司：防波堤基礎での洗掘量の推定について，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 886-890，2003.
9) 藤原隆一・山崎智弘・橘川正男・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.
10) 高橋俊彦・池谷　毅：数値波動水路のリーフ上の波浪変形への適用，海洋開発論文集，第 16 巻，pp. 69-74，2000.
11) 中野　修・興野俊也・安田勝則・藤井直樹：規則波・不規則波による傾斜堤の波力・越波伝達波への数値波動水路の適用性について，海岸工学論文集，第 49 巻，pp. 726-730，2002.
12) 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.
13) 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.
14) 合田良実：数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質，第 34 回海岸工学講演会論文集，pp. 131-135，1987.