

矩形ステップ上の不規則波の非線形挙動に関する実験的研究

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON NONLINEAR BEHAVIOR OF RANDOM WAVES ON A RECTANGULAR STEP

合田良実¹・牧野トモ子²

Yoshimi Goda, Tomoko Makino

¹フェロー会員 工博 横浜国立大学教授 大学院工学研究科 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区)

²横浜市職員 (土木職) (〒231-80 横浜市中区港町1-1)

A series of laboratory tests were made on the nonlinear behavior of random waves on a rectangular step. Waves with a sharply peaked spectrum exhibited the secondary and tertiary spectral peaks at the frequencies twice and thrice the peak frequency owing to nonlinear interactions, in a manner similar with the cases of regular waves. As the peakedness of spectrum decreases, the nonlinear spectral peaks become unnoticeable.

Random waves on a rectangular step are accompanied with long-period waves, the amplitude of which increases as waves propagate from the tip of step toward the rear end. While the long-period waves moving offshore maintain the nearly constant amplitude, the waves moving onshore increase their amplitude. The mechanism of amplification could not be clarified in the present study.

Key Words : Wave transformation, rectangular step, nonlinear interaction, spectral waves, long-period waves

1. はじめに

近年では海域環境の保全が重要な課題となっており, 埋立が避けられない場合でも干潟や浅場の造成が代替措置として実施されることが多い。水深がやや大きい場所で人工浅場を造成しようとするれば, その前面に潜堤を設けることになる。

そうした浅場の上では, 波浪の非線形性が顕著に現れる。規則波では入射周波数の2倍・3倍周波数成分が発達し, その振幅が場所的に一定間隔で増減を繰り返す。この現象については合田・岡崎(1998)が速度ポテンシャルの摂動展開を用いて理論的に説明したところである。しかし実際の波浪はスペクトル構造を持つ不規則波であるため, 規則波のような非線形波浪干渉がどの程度発達するか実験的に検証することが本研究の一つの目的である。

また, 先に合田・Wudhipong・江指(1994)が報告したように, 矩形ステップ上では不規則波に随伴する長周期成分が発達する。この現象については不明な点が多いので, 入射波のスペクトル形状を変化させて実験を行い, 長周期波発達のメカニズムを探ることが本研究の第二の目的である。

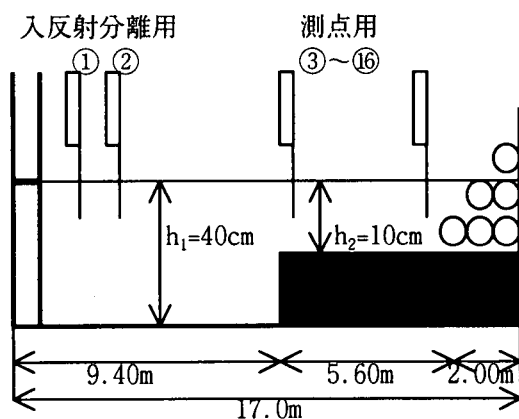


図-1 実験概要図

2. 矩形ステップ模型での実験

(1) 実験条件の概要

実験は長さ17.0m, 幅0.6mの二次元水路で行った。造波板からステップまでの区間は水深 $h_1=40.0\text{cm}$, ステップ上は水深 $h_2=10.0\text{cm}$ である。矩形ステップは造波板から7.90mの地点が先端であり, ステップの長さを5.60mとし, その背後の長さ2.0

mの区間に碎石を並べて消波斜面とした。

造波板から5.26mの地点とそれから0.30mの地点の各2箇所に波高計を設置し、入・反射波分離によって入射波の波高、周期を求めた。本報告に記載の波高および周期はすべてこの入射波高、入射周期である。各ケースの入射波高(H)と入射周期(T)を表-1に示す。表-1において、○は波群中に碎波が認められたケース、×は碎波が全く見られなかったケースを表している。

ステップ上およびその前方の波形の場所的变化については、最大16台の波高計を同時に使用して詳細に計測した。実験装置の概要図を図-1に示す。

実験波はJONSWAP型スペクトルを目標とし、ピーク周期約1.2sについては $\gamma=1$ および10、ピーク周期約1.6sについては $\gamma=3.3$ および10に設定した。

表-1 実験ケースにおける入射周期および入射波高

	$T_p=1.2s$ および $1.6s$ シリーズ			スペクトル形状
	実現値		碎波	
	$T_{1/3}(s)$	$H_{1/3}(cm)$		
Case24	1.162s	1.03cm	×	$\gamma=10$
Case34	1.164s	1.54cm	×	
Case44	1.160s	2.01cm	×	
Case54	1.169s	2.59cm	○	
Case64	1.165s	3.07cm	○	
Case74	1.165s	3.63cm	○	
Case84	1.162s	4.04cm	○	
Case122	1.050s	1.00cm	×	$\gamma=1$
Case132	1.058s	1.44cm	×	
Case142	1.056s	1.92cm	×	
Case152	1.055s	2.43cm	○	
Case162	1.604s	2.86cm	○	
Case172	1.071s	3.40cm	○	
Data1	1.520s	0.99cm	×	$\gamma=10$
Data2	1.536s	1.53cm	×	
Data3	1.521s	2.20cm	×	
Data4	1.533s	2.67cm	○	
Data5	1.538s	3.05cm	○	
Data6	1.535s	4.18cm	○	
Data31	1.514s	0.69cm	×	$\gamma=3.3$
Data32	1.514s	1.15cm	×	
Data33	1.530s	1.56cm	×	
Data34	1.512s	2.00cm	×	
Data35	1.549s	2.38cm	○	
Data36	1.522s	2.86cm	○	

(2) 矩形ステップ上の波浪の空間的変動

実験により得られた波形記録からゼロダウンクロス法により波高と周期を定めた。不規則波用のプログラムを用いて解析を行い、各測点での最大波高 H_{max} 、1/10最大波高 $H_{1/10}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ 、平均波高

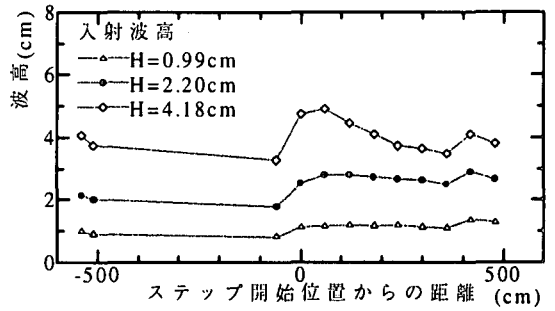


図-2 波高の空間分布例 (Data1, 3, 6)

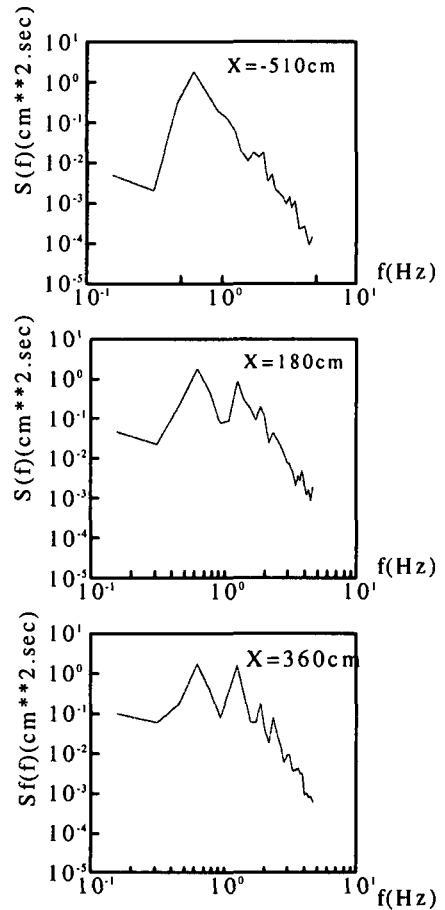


図-3 周波数スペクトルの場所的変動 (Data3)

H_{mean} , RMS波高 H_{rms} を求めた。本実験は不規則波によるものであるため、幾つもの成分波が合成されているが、ここでは有義波高 $H_{1/3}$ を各測点での代表波高 H として表示する。各ケースにおける代表波高の空間分布を図-2に示す。各周期毎に、▲はぎりぎり碎波しなかったケース、○は碎波限界よりも入射波高が小さいケース、●は碎波限界よりも入射波高を大きくしたケースを示している。

図-2において、碎波が認められたケースはステップに到達すると波高が最大となり、その周辺の地点で碎波現象が認められた。それからステップに進むと波高は減少する。これに対して、碎波が見ら

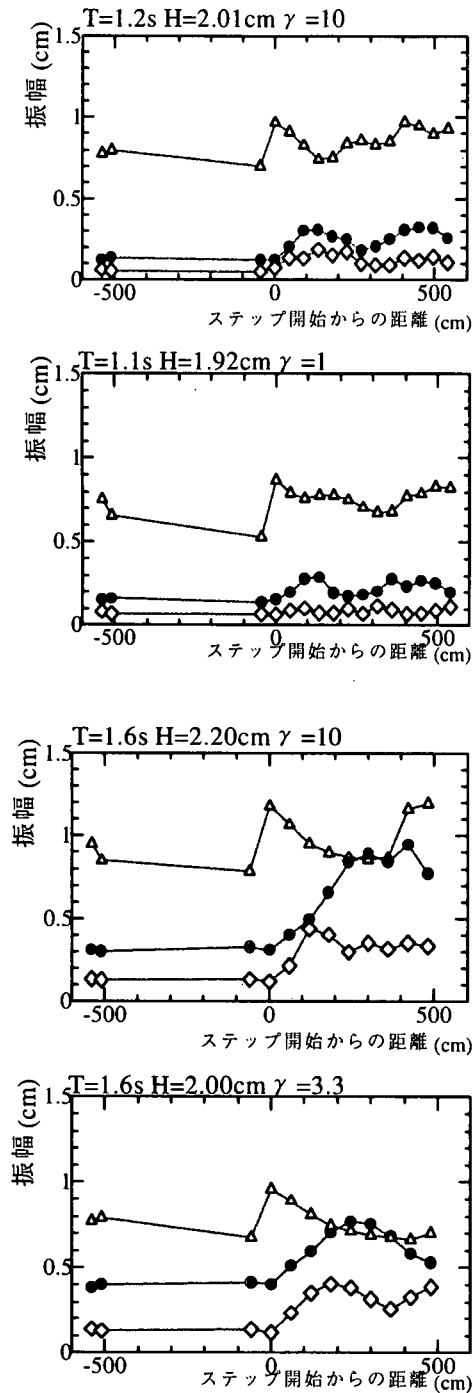


図-4 各周波数成分の振幅 (△: 基本, ●: 2倍, ◇: 3倍周波数ピーク)

れなかったケースはステップ上においてこのような変化は認められない。

3. 周波数スペクトルの非線形成分の解析

(1) 周波数スペクトルの変化

図-3は水路内の周波数スペクトル($\gamma=10$)の形状を対比したものである。一番上の図は造波板から2.5mの地点のもので、主ピークのみが存在する。

中央の図は矩形ステップ前端から1.80mの地点のもので、2倍・3倍周波数の位置に顕著な副ピークがみられる。下はステップ前端から3.60mの地点のものであり、2倍・3倍周波数の副ピークのエネルギー密度が増加している。

(2) 主・副ピークの代表振幅の場所的変動

周波数スペクトルを各ピークに対応する区間に分割し、それぞれに含まれるエネルギー ΔE_i を算定し、これから規則波相当の振幅 $a_i=(2\Delta E_i)^{1/2}$ を求めた。ステップ上における各周波数成分毎の振幅を図-4に示す。△は基本周波数ピークの振幅、●は2倍周波数ピークの振幅、◇は3倍周波数ピークの振幅を表している。

図-4の上から3番目はdata3のケースである。これからもわかるように、沖側($x=-500$ cm付近)およびステップ開始位置で波形は基本周波数ピークが卓越しており、2次波峰の発達は認められない。しかし、波が矩形ステップに到達すると、急激に2倍周波数ピークの振幅が増大していき、その後基本周波数ピークの振幅と相反するように増減を繰り返している。すなわち、ステップ上に入った所では基本周波数ピークの振幅が最大であってそれから岸側に進むにつれて減少し、やがて再び増大を示す。これに対して副ピークの振幅は逆の変化を示す。

なお、 $\gamma=3.3$ の場合にもこうした振幅変調が認められるけれども、変動の度合いがやや小さい。一方 $\gamma=1$ の場合には振幅変調がほとんど認められない。すなわち、非線形干渉が広い周波数範囲で起きているために、2倍・3倍周波数ピーク振幅の場所的変動が小さいといえる。

(3) 規則波の非線形干渉理論との比較

進行波が矩形ステップ端に到達すると、ステップ上において副ピークの振幅が増幅する。合田・岡崎

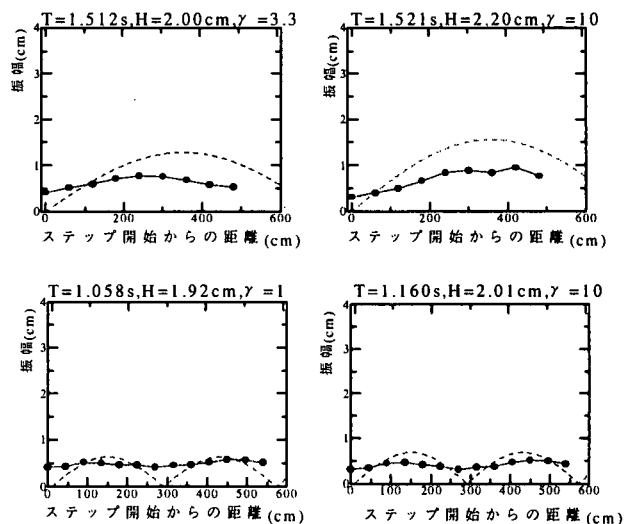


図-5 2倍周波数ピークの振幅の場所的变化 (実線: 不規則波実験, 破線: 規則波理論)

(1998)の報告によると、規則波についてもこのような現象を確認している。不規則波について規則波のような非線形干渉がどの程度起きているのかを確認するため、合田・岡崎(1998)による速度ポテンシャルの摂動展開に基づく理論解を用いて、ステップ上の2倍周波数ピークの振幅について比較を行った。規則波の2次オーダーの解と実験値を比較したものを図-5に示す。破線は規則波の理論解、実線は不規則波の実験値を表している。

図-5から見てわかるように、振幅の値は一致していないが、周期的変化の間隔はおおよそ同じような値となっている。しかし、 γ が小さくなるほど振幅変調の幅が小さくなる。不規則波の場合は、規則波と違い、無数の周波数成分が重なってできている合成波であるため、規則波のようなはっきりとした周期的変動はみられないと思われる。また振幅の変動幅については、 $T_p = 1.6$ sでは $\gamma = 3.3$ の方より $\gamma = 10$ の方が大きくなっている。 $T_p = 1.2$ sでは $\gamma = 1$ と10の差があまり顕著でないものの、後者の方がやや大きい。さらに波高が大きなケースでは、この差が大きくなる。

5. 長周期成分の解析

(1) 矩形ステップ上の重複波理論との比較

図-4においても、周波数0.4Hz以下の長周期成分のエネルギー密度は、 $x = -5.1$ mの造波板前では小さく、 $x = 1.8$ mと3.6 mのステップ上では10倍以上に増幅している。スペクトルの分解能力を高めてその構造を吟味すると、消波斜面を腹とする重複波が形成されていることが確認できる。図-6に理論解と実験値とを比較したものを数地点選んで記載する。●は実験値、破線は理論解を表している。なお、振幅はいずれもスペクトルの積分値から求めたRMS値として定義している。

ここで理論解としては、入射長周期波が $f = 0 \sim f_0$ の範囲で一様なエネルギーを持ち、その0次モーメントが m_ζ であると仮定する。今、ステップの有効長を l 、ステップ先端からの距離を x とすると、ステップ上の長周期波のスペクトル密度は次のようになる。

$$S_\zeta(f, x) = \frac{R^2 m_\zeta}{f_0} \left[1 + \cos \frac{4\pi f}{\sqrt{g h_2}} (x - l) \right] \quad (1)$$

ここに、 R は矩形ステップの共振による増幅係数であり、厳密解は合田・斎藤(1997)が与えている。ただし、今回は重複波の成立状況を確認するためであるので、次の簡略解を使用した。

$$R = \left[\cos^2 k_2 l + (\tanh k_2 h_2 / \tanh k_1 h_1)^2 \sin^2 k_2 l \right]^{-1/2} \quad (2)$$

なお、ステップの有効長としては消波斜面部を考慮し、 $l = 7.0$ mを使用した。

図-6では、 $x = 0.60$ mと1.80 mの矩形ステップ先端付近で消波斜面を腹とする重複波が形成されてい

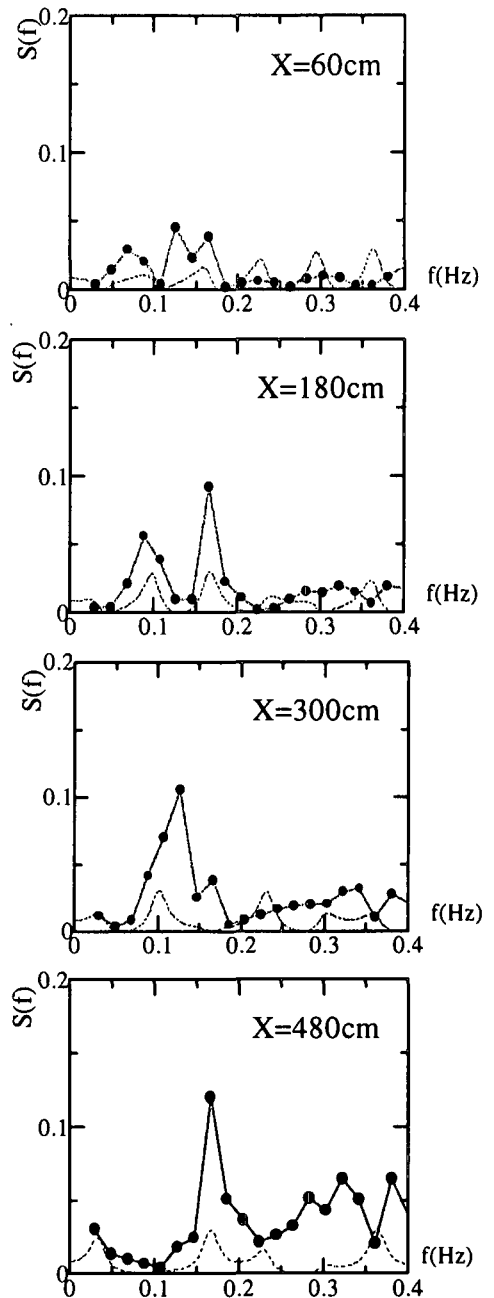
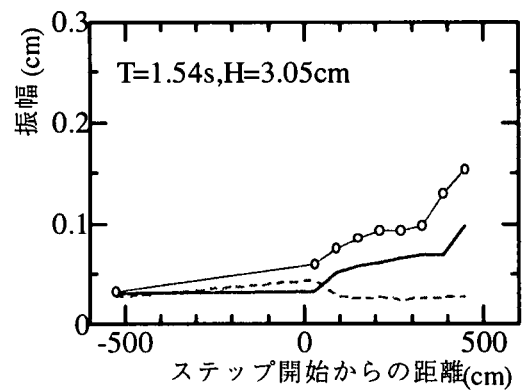
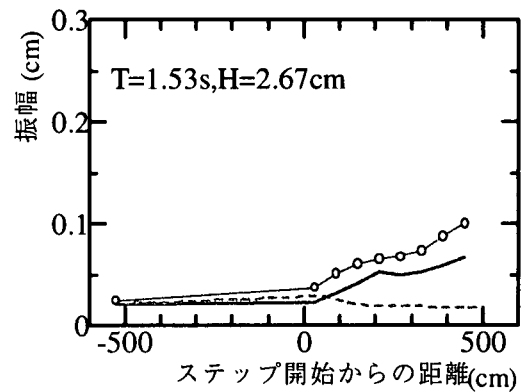
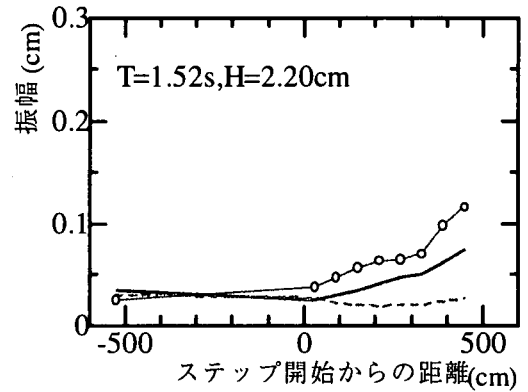
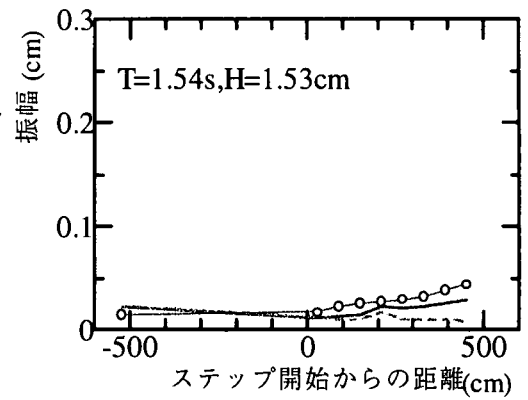
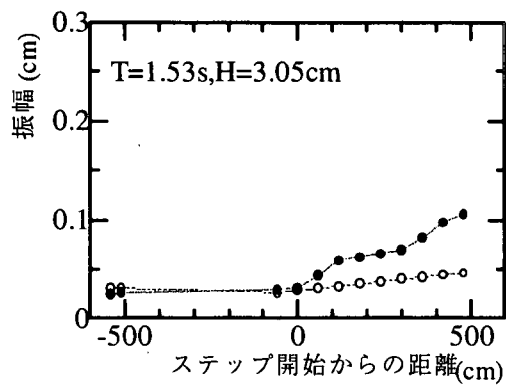
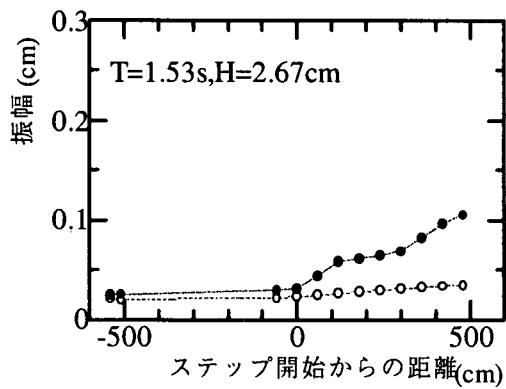
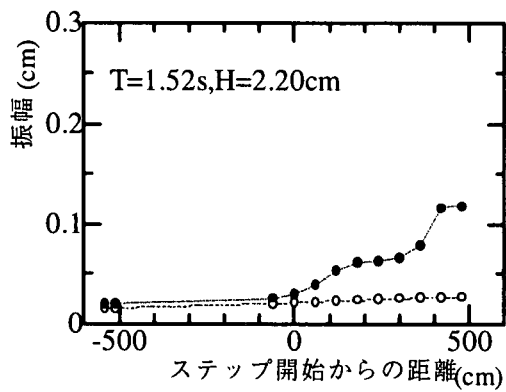
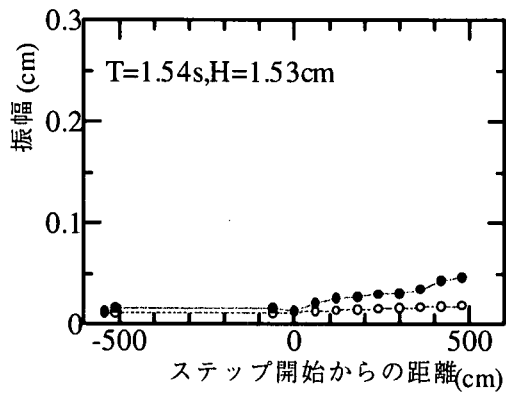


図-6 長周期波の周波数スペクトルの場所的変動
($T_{1/3} = 1.51$ s, $H = 2.00$ cm, $\gamma = 3.3$)

ることが確認できる。すなわち、各場所ごとに重複波の節となる周波数でスペクトル密度が極小となり、腹となる周波数で極大となっている。しかし、ステップを進むにつれて理論解と実験値が合わなくなる。すなわち、ステップ終端付近においては重複波が形成されていない。

長周期波の振幅について実験値と理論解を比較したものを図-7に表わす。●は実験値の振幅、○は理論解の振幅を表わしている。

図-7から見てわかるように、理論解では長周期エネルギーは場所に拘わらずほぼ一定であるのに対して、実験値のほうが岸側に進むにつれて次第に増幅している。



図一七 長周期波振幅の実験値と理論値との比較
($\gamma=10$, ●: 実験, ○: 重複波理論)

図一八 長周期の合成波, 入射波, 反射波振幅の場所的
変動 (○: 合成波, 太実線: 入射波, 破線: 反射波)

(2) 長周期成分の入射分離

長周期波の構造をさらに詳しく吟味するために、長周期波に対する入射分離を行った。この際の有効周波数範囲は合田(1990)の指針をやや修正した次式で定めた。

$$\begin{aligned} \text{上限 } f_{\max} & : \Delta l/L_{\min} = 0.45 \\ \text{下限 } f_{\min} & : \Delta l/L_{\max} = 0.025 \end{aligned}$$

ピーク周期約1.2sについては波高計間隔を $\Delta l=45\text{cm}$ であったので、周波数範囲を $0.055 \leq f \leq 0.350(\text{Hz})$ 、ピーク周期約1.6sの実験では波高計間隔 $\Delta l=60\text{cm}$ であって、周波数範囲を $0.041 \leq f \leq 0.350(\text{Hz})$ で設定した。図-8は入射波および反射波、長周期波の振幅の場地的変動を表す。実線は長周期波の入射波、破線は反射波、○は合成波の各振幅を表している。

図-8においては、入射波が岸側に進むにつれて増幅しているのが確認できる。一方、反射波の振幅はほぼ一定、あるいは減衰している。したがって、図-7で得られた長周期波振幅の発達は入射波振幅の増大によることが明らかである。

なお、図-7, 8に示したのはピーク周期約1.6s, $\gamma=10$ のケースである。他のケースについても同様な結果が得られている。また、ステップ後端付近での長周期波の振幅と入射波の有義波高と比べてみると、前者は後者のほぼ1.5乗に比例した。これは、碎波がしばしば見られるケースを含む波高範囲について成立する。ただし、碎波減衰が強くなると長周期波の振幅がやや飽和する傾向が見られた。

こうした矩形ステップ上での長周期波の発達の現象がどのようなメカニズムによるものか、現時点では不明である。今回は合田・Wudhipong・江指(1994)の実験を追認する結果にとどまったが、今後の課題として検討が進められることを期待したい。

6. むすび

今回の実験によって明らかになったことは以下の通りである。

1. 不規則波においても、矩形ステップ上では成分波間の非線形干渉によってピーク周

波数の2倍・3倍の位置に周波数スペクトルの副ピークが顕著に出現する。

2. スペクトルの主・副ピークのエネルギーから換算振幅を求めると、この振幅は矩形ステップ上で規則波の場合と同様な再帰的変動を示す。
3. 上記の現象は入射スペクトルのピークが鋭いときに顕著に現れ、風波に相当するJONSWAP型の $\gamma=1$ ではほとんど認められない。
4. 不規則波の長周期成分は、矩形ステップの先端から後端へ向かうにつれて次第に増大する。この増大は進行波成分が発達するためであって、反射波成分は振幅がほぼ一定、あるいは後端へ向けてやや減少する。このため、ステップ先端付近においては重複波の形成が見られるが、ステップ後方では認められない。
5. 矩形ステップ後端における長周期波の振幅は、入射有義波高のほぼ1.5乗に比例した。
6. 矩形ステップ上での長周期波エネルギー増大のメカニズムは不明であり、今後の課題として残された。

参考文献

- 1) 合田良實(1990)：港湾構造物の耐波設計－波浪工学への序説－(増補改訂)、鹿島出版会、333p.
- 2) 合田良實・Wudhipong, Kittitanasuan・江指好美(1994)：矩形ステップによる波の変形特性、海岸工学論文集、第41巻、pp.636-650.
- 3) 合田良實・斎藤正文(1994)：矩形ステップ上の波浪の共振特性、洋開発論文集、Vol.13, pp.135-140.
- 4) 合田良實・岡崎健一(1998)：矩形ステップ上の非線形波浪干渉と波浪限界、海岸工学論文集、第45巻、pp.46-50.

(1999. 4. 19受付)