浅海における強非線形波の反射

名古屋工業大学大学院　学生会員　○肥後克紀
名古屋工業大学大学院　　Ni Nyoman Pujianiki
名古屋工業大学大学院　フェロー　　喜岡　渉

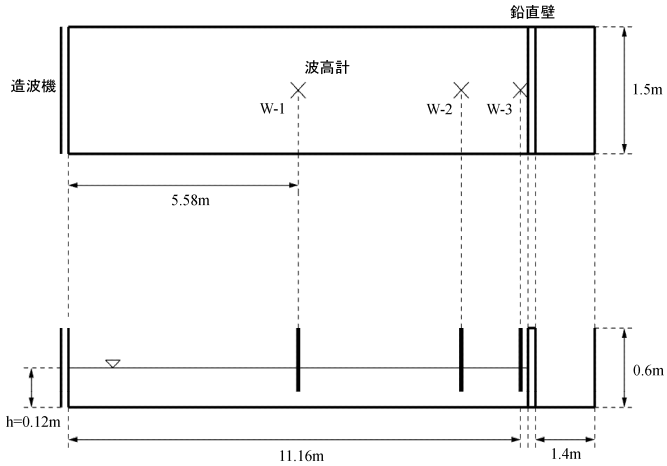
1.　はじめに

鉛直壁から波形勾配が比較的緩やかな弱非線形波が反射することによって生じる重複波動場については，ストークスの高次解をはじめ有限振幅波理論でうまく説明できる．しかし，入射波の波形勾配がさらに大きくなると，非砕波時においても鉛直壁前面の重複波動場には非周期性の波列が現れる．Longuet-Higgins・Drazen(2002)は，深海波条件で規則波実験を行い，入射波の波形勾配 ak が 0.24 より大きい強非線形波では 3 波に 1 波，波高が増幅する Triple Instability が発生することを示している．深海波であるため，この振幅変調は時間とともに増幅し，3 波に 1 波毎の砕波に至る．喜岡ら(2008)は，中間水深において入射波の波形勾配を種々に変化させた規則波および 2 成分合成波を用いた造波水槽実験を行い，鉛直壁前面における波の周期・波長および波形変形について詳しく調べ，入射波の ak が 0.2 以上になると，位相速度は有限振幅波理論値と比べて著しく減少し，3〜4 波に 1 波の波高が増幅する振幅変調が現れることを見出した．

こうした入・反射波の非線形相互干渉により励起される現象は相対水深に大きく依存するので，浅海条件における重複波動場の特性についても明らかにしておく必要がある．本研究は，波形勾配の異なる規則波および 2 成分合成波を用いた造波実験および数値解析を行い，浅海における強非線形波の反射特性について明らかにしようとするものである．

2.　実験方法

長さ 11.2m，幅 1.5m，高さ 0.6m の造波水槽の一端に厚さ 10mm のアクリル板（裏面を鋼製アングル材で補強）を取り付け反射板とし，水路中央の地点 W-1，反射板から 1 波長程度離れた W-2，および反射板前面 W-3 の 3 箇所に容量式波高計を設置した．W-2 を 1cm きざみで移動させ，W-3 と水位変動が同位相になる反射板から 2 つ目の腹を探し出して波長を求めた．水深は全ケースで一定で h=12cm とした．実験に用いた振幅，周期の異なる 4 種類の規則波の実験条件を**表−1** に示す．2成分合成波については，周期 T_1, T_2 が異なり，振幅 a_1, a_2 が等しい正弦波を重ね合わせたものを用い，その実験条件は**表−2** に示す．



図−1　実験装置概要

表−1　規則波の実験条件

case	T(s)	H(cm)	a(cm)	ak
1	0.85	2.0	1.0	0.08
2		4.0	2.0	0.15
3		5.0	2.5	0.19
4		5.8	2.9	0.22

表−2　2 成分合成波の実験条件

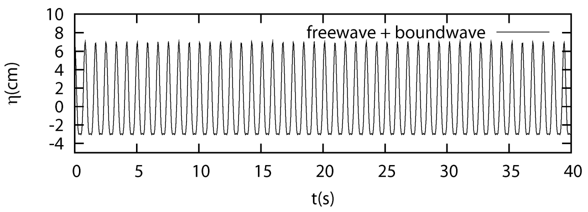
case	T_1(s)	T_2(s)	a(cm)	a_1(cm)	a_2(cm)
5	0.75	0.825	1.6	0.8	0.8
6			2.4	1.2	1.2
7			2.8	1.4	1.4

3.　計算方法

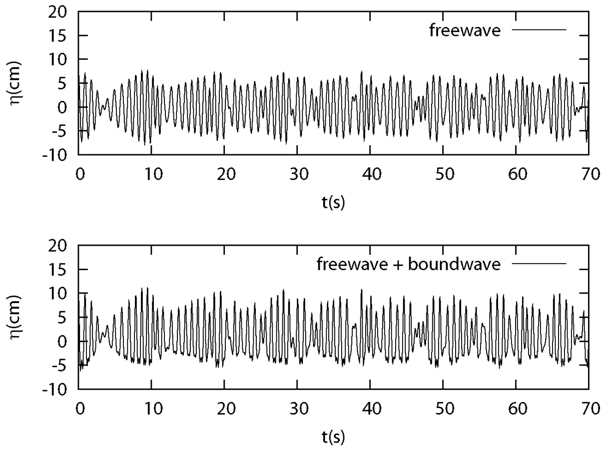
解析には 4 波相互干渉に基づく Zakharov 方程式を用いた．有限水深下での波列のゆっくりとした時間変動を記述する 3 次オーダーの Zakharov 積分方程式は次式で与えられる（Stiassnie・Shemer, 1984）．

$$i\frac{\partial B(\mathbf{k},t)}{\partial t}=\iiint_{-\infty}^{\infty}T(\mathbf{k},\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2,\mathbf{k}_3)B^*(\mathbf{k}_1,t)B(\mathbf{k}_2,t)B(\mathbf{k}_3,t) \times\delta(\mathbf{k}+\mathbf{k}_1-\mathbf{k}_2-\mathbf{k}_3)\exp\{i(\omega+\omega_1-\omega_2-\omega_3)t\}d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 d\mathbf{k}_3 \quad (1)$$

ここで，*は複素共役を示し，δはディラックのデルタ関



図−2　周期T=0.85s, a=2.5cmの反射境界での水位変動(case3)



図−3　周期 T_1=0.75s，T_2=0.825s，a=1.81cm の反射境界での水位変動

数である．式(1)の複素振幅 B は水位変動 $\eta(\mathrm{x},t)$ と次の関係にある．

$$\eta(\mathbf{x},t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left(\frac{\omega(\mathbf{k})}{2g}\right)^{1/2}\left[B(\mathbf{k},t)\exp\{i(\mathbf{k}_n\cdot\mathbf{x}+\omega(\mathbf{k})t)\}+*\right] \quad (2)$$

4 波相互作用による振幅変化を計算する式(1)は，離散化して次式で与えられる．

$$i\frac{dB_j}{dt}=\sum_{n=1}^{N}\sum_{p=1}^{N}\sum_{q=1}^{N}T(\mathbf{k}_j,\mathbf{k}_n,\mathbf{k}_p,\mathbf{k}_q)B_n^*B_pB_q\times\exp\{i(\omega_j+\omega_n-\omega_p-\omega_q)t\}\delta(\mathbf{k}_j+\mathbf{k}_n-\mathbf{k}_p-\mathbf{k}_q) \quad (3)$$

N 個の波成分の 4 波相互作用においては一般に，$T(\mathbf{k}_j,\mathbf{k}_n,\mathbf{k}_p,\mathbf{k}_q)=T(\mathbf{k}_j,\mathbf{k}_n,\mathbf{k}_q,\mathbf{k}_p)$ が成り立ち，さらに厳密な共鳴条件では最初の 2 つの $\mathbf{k}_j$，$\mathbf{k}_n$ に対しても対称性が成り立つことから，式(3)を変形し，Runge-Kutta 法を用いた数値計算により解くことにより，弱非線形の波列の時間発展，すなわち自由波成分の複素振幅の時間変化を求めることができる．

ここでは，自由波成分に加えて 2 次の拘束波を含めた次式により水位変動を計算する．

$$\eta(\mathbf{x},t)=\frac{1}{2\pi}\sum_{n=1}^{N+3N^2}\left(\frac{\chi_n}{2g}\right)^{1/2}\left[\tilde{B}_n\exp\{i(\mathbf{k}_n\cdot\mathbf{x}+\chi_n t)\}+*\right] \quad (4)$$

ここで，3 次の自由波および 2 次の拘束波に対する $\mathbf{k}_n$，χ_n，$\tilde{B}_n$ の各表示式は Stiassnie・Shemer（1987)の Appendix に与えられている．

4.　実験および計算結果

図−2 に case3 の条件を用いた反射境界での計算結果を示す．重複波の波高は揃っており，このケースでは 3〜4 波に 1 波毎の振幅変調は現れなかった．また，**図−3** には入射波の振幅 a=1.81cm とした 2 成分合成波の計算結果を示す．波群の前傾化や波群中の波高極大化は生じず，波群中の最大波付近に個々波の波高が揃うようになり，振幅変調が抑えられる波群変形となった．

5.　結論

本研究では，浅海域において規則波および 2 成分合成波が鉛直壁により反射し，形成される重複波の特性を，実験および数値解析によって調べた．中間水深における重複波動場と異なり，浅海条件では重複波の波高は揃い振幅変調は現れないことがわかった．

参考文献

喜岡　渉・岩塚雄大・肥後克紀・北野利一(2008)：鉛直壁からの強非線形波の反射について，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.11-15.

Longuet-Higgins, M.S., and David A. Drazen(2002): On steep gravity waves meeting a vertical wall, J. Fluid Mech., Vol. 466, pp. 305-318.

Stiassnie, M. and L. Shemer (1984): On modifications of the Zakharov equation for surface waves, J. Fluid Mech., Vol.143, pp.47-67.

Stiassnie, M., and L. Shemer (1987): Energy computations for evolution of class I and II instabilities of Stokes waves. J. Fluid Mech., Vol. 174, pp .299-312.