

津波のソリトン分裂過程に関する実験結果と数値解析結果との比較研究

間瀬 肇・安田誠宏・加次淳一郎*・高山知司・沖 和哉**・中平順一***

* 千代田アドバンスト・ソリューションズ(株)

** 京都大学大学院工学研究科

*** 八千代エンジニアリング(株)

要 旨

本研究では、造波水路内にリーフ地形を設け、リーフ地形を伝播する際の津波のソリトン分裂過程について実験的に検討し、さらに、数値シミュレーションを行って実験結果と比較した。その結果、ソリトン分裂の発生・発達の様子は、波形勾配や水深に深く関係していること、同じ条件の入射津波であっても、押波から始まるか、引波から始まるかによっても、ソリトン分裂の様子が異なることがわかった。また、2種類の Boussinesq モデルによる数値シミュレーション結果は、詳細には実験結果を再現することができなかった。特に、押波から始まるケースの第1波目の再現が困難であった。

キーワード: 津波, ソリトン分裂, 押波, 引波, Boussinesq モデル

1. はじめに

2004年に発生したインド洋津波による被害の状況は、タイやマレーシアのアンダマン海沿岸とインドやスリランカのインド洋西側諸国沿岸とでは、大きな違いがみられた。アンダマン海は水深の浅い海域が広がっており、津波は浅海域に入ると非線形性と分散性が卓越してきて、ソリトン波列が生じた。一方、インドやスリランカ沿岸は海底勾配が急なため、津波は沿岸付近で突如砕波して、陸に遡上した。このように海底地形特性が津波の変形特性に大きく影響し、それによって海岸構造物や家屋に作用する波力に違いが現れ、被災状況が異なると推測される。津波のソリトン分裂の実験は池野ら(2005)や安田ら(2006)によって行われている。

本研究においても、水理模型実験により水深や津波特性の差によるソリトン分裂過程を調べるとともに、数値解析モデルによりそれらのソリトン分裂過程の再現性を検討するものである。

実験においては、リーフ地形を対象とした津波の変形を計測し、ソリトン分裂の発生や波列の発達、さらには砕波を観測した。

数値解析モデルには、米国デラウェア大学で開発された FUNWAVE (Kirby et al., 1988) および米国コーネル大学で

開発された COULWAVE (Lynett et al., 2002) の2つの数値計算モデルを用いた。

2. 実験方法および条件

Fig.1 に示すリーフ地形を対象として、水深を変化させて水理模型実験を行った。用いた実験水路は長さ 50m、幅 1.0m、深さ 1.5m であり、模型縮尺は 1/100 を想定した。水路長の制約上、リーフの長さは 20m で水深を一定とし、勾配 1/20 の海浜をリーフに接続させた。本論文では取り扱わないが、防潮堤を模した堤体模型を汀線より 2cm 高い海浜上に設置し、津波による波圧の鉛直分布を測定した。

実験ではリーフ上の水深を $h=5\text{cm}$, 10cm , 20cm の3種類に変化させた。これらの条件を Case 1, Case 2, Case 3 とする。 $h=5\text{cm}$ のケースは水深の浅いリーフが長く続く地形を想定しており、 $h=10\text{cm}$ と 20cm のケースは、ソリトン分裂の程度あるいは有無を検討するためのものである。

入射波として孤立波を用いると安定すぎてソリトン分裂が生じにくいと考え、モデル津波として正弦波を用いた。津波の振幅 A および周期 T は、Table 1 に示すようにいくつか変化させた。また、押波から始まるケース(R)と引波から始まるケース(F)を設定した。

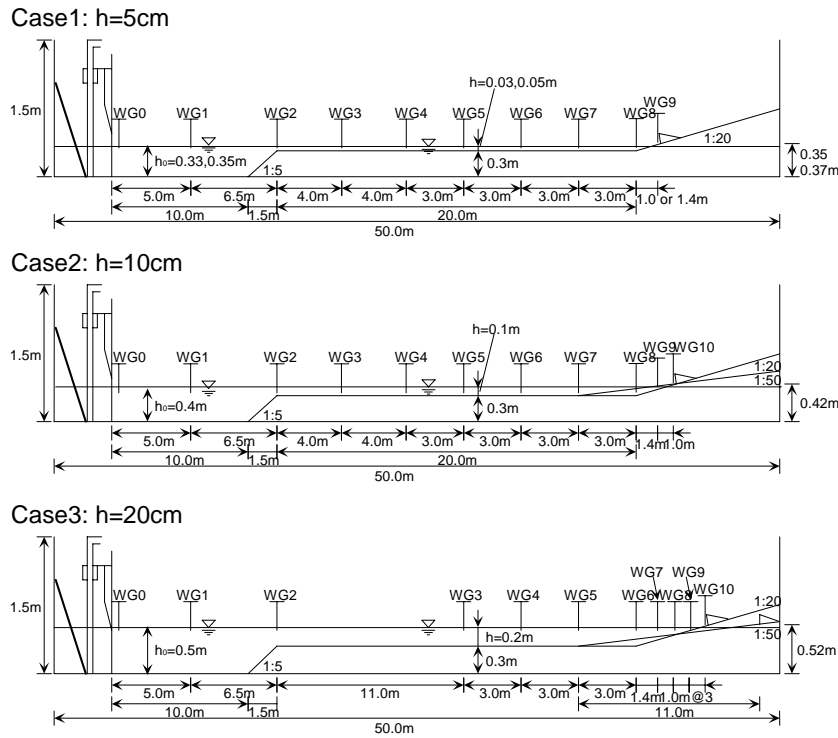


Fig. 1 Cross section of the experimental flume

Table 1 Experimental conditions

a) 押波ケース(R)

一様水深 $h_0=30\text{cm}$ リーフ水深 $h=5\text{cm}$			周期		
			2.4	3.5	現地(min) S=1/50
			3.3	5.0	現地(min) S=1/100
			20.0	30.0	実験(sec)
振幅	1.5	3.0	3.0	●	●
	2.5	5.0	5.0	-	-
	現地(m) S=1/50	現地(m) S=1/100	実験(cm)		

一様水深 $h_0=40\text{cm}$ リーフ水深 $h=10\text{cm}$			周期		
			2.4	3.5	現地(min) S=1/50
			3.3	5.0	現地(min) S=1/100
			20.0	30.0	実験(sec)
振幅	1.5	3.0	3.0	●	●
	2.5	5.0	5.0	●	-
	現地(m) S=1/50	現地(m) S=1/100	実験(cm)		

一様水深 $h_0=50\text{cm}$ リーフ水深 $h=20\text{cm}$			周期		
			2.4	3.5	現地(min) S=1/50
			3.3	5.0	現地(min) S=1/100
			20.0	30.0	実験(sec)
振幅	1.5	3.0	3.0	●	●
	2.5	5.0	5.0	●	-
	現地(m) S=1/50	現地(m) S=1/100	実験(cm)		

b) 引波ケース(F)

一様水深 $h_0=40\text{cm}$ リーフ水深 $h=10\text{cm}$			周期		
			2.4	3.5	現地(min) S=1/50
			3.3	5.0	現地(min) S=1/100
			20.0	30.0	実験(sec)
振幅	1.5	3.0	3.0	●	●
	2.5	5.0	5.0	-	-
	現地(m) S=1/50	現地(m) S=1/100	実験(cm)		

一様水深 $h_0=50\text{cm}$ リーフ水深 $h=20\text{cm}$			周期		
			2.4	3.5	現地(min) S=1/50
			3.3	5.0	現地(min) S=1/100
			20.0	30.0	実験(sec)
振幅	1.5	3.0	3.0	●	●
	2.5	5.0	5.0	●	-
	現地(m) S=1/50	現地(m) S=1/100	実験(cm)		

3. 数値解析モデル

本研究では、高非線形で分散性を $O(\mu^4)$ (μ は水深波長比) まで考慮した米国デラウェア大学で開発された数値解析プログラム FUNWAVE (Kirby et al., 1988) および米国コーネル大学で開発された COULWAVE (Lynett et al., 2002) を用いて数値計算を行い、実験値と計算結果を比較する。以下、数値解析モデルの概要を示す。

3.1 支配方程式

FUNWAVE で用いられる方程式は、Wei et al. (1995) による拡張 Boussinesq 方程式である。連続式は

$$\eta_t + \nabla \cdot M = 0 \quad (1)$$

$$M = (h + \eta) \begin{bmatrix} u_\alpha + \left(\frac{z_\alpha^2}{2} - \frac{1}{6}(h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \nabla(\nabla \cdot u) \\ + \left[z_\alpha + \frac{1}{2}(h - \eta) \right] \nabla(\nabla \cdot (hu_\alpha)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

で表される。運動方程式は

$$u_{\alpha t} + (u_\alpha \cdot \nabla) u_\alpha + g \nabla \eta + V_1 + V_2 + R_f - R_b = 0 \quad (3)$$

と表される。ここで、 V_1 および V_2 は分散項、 R_f は海底摩擦項、 R_b は砕波減衰項である。式(2)に現れる基準深さ z_α は $z_\alpha = -0.531h$ を用いる。

COULWAVE における支配方程式は、分散項だけが異なる (Lynett et al., 2002)。これらの基礎式は非常に長くなるので、詳しくは原論文を参照されたい。

3.2 汀線移動境界の取り扱い

波の遡上を計算するためには、汀線位置を計算できなければならない。FUNWAVE モデルではスリット法が用いられている。

一方、COULWAVE モデルでは、汀線の位置を線形外挿を用いて求めている。

3.3 計算条件

数値計算においては、造波装置の位置を $x=0\text{m}$ として、 $x=0\sim 50\text{m}$ を計算領域とした。FUNWAVE では、格子間隔を 0.1m 、計算時間間隔を 0.005s とした。COULWAVE においては、格子間隔は同様に 0.1m としたが、計算時間間隔はクーラン数が 0.1 となるように設定される。

底面摩擦係数は基本的に 0.005 としたが、ケースによっては 0.001 とした。計算時間は、波が 2 波以上入るよう 100s とした。

実験において波高を計測した点と同じ位置で、自由水面変位や水粒子速度を出力した。

碎波減衰モデルやスリットに関するパラメータとしては、それぞれ以下の値を用いた (記号は原論文 (Kirby et al., 1988) を参照)。

$$\left. \begin{aligned} \eta_i^{(I)} &= 0.65\sqrt{gh} \\ \eta_i^{(F)} &= 0.08\sqrt{gh} \\ \delta &= 0.01 \\ \lambda &= 50 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

4. 結果および考察

押波から始まるケースのリーフ上水深が 10cm である R-Case 2, $A=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$ の結果を Fig.2 および Fig.3 に示す。Fig.2 は実験結果と FUNWAVE による計算結果, Fig.3 は実験結果と COULWAVE による計算結果との比較を示したものである。それぞれの図の下側から順に波高計 WG1, WG2, の波形が示してある。

Fig.2 において、第 1 波目に関して、実験ではソリトン分裂が生じているのに対して、シミュレーション結果では見られない。津波本体の波高は実験結果とそれほど変わらないが、ソリトン分裂波がない分、全体的に計算結果は小さい値となっている。また、岸から反射される波は計算では表現されていない。第 2 波目に関しては、ソリトン分裂が発生する位置は実験値とよい一致を示す。しかし、実験では波高計 WG3 の位置で分裂波は 3 波程度であるのに対して、数値シミュレーションでは 10 波以上と多くなっている。遡上帯付近の WG9 および WG10 の位置ではソリトン分裂が表現されていない。

Fig.3 では、COULWAVE を用いて計算された反射波は実験とは異なり、波状を呈しない状態で伝播している。第 1

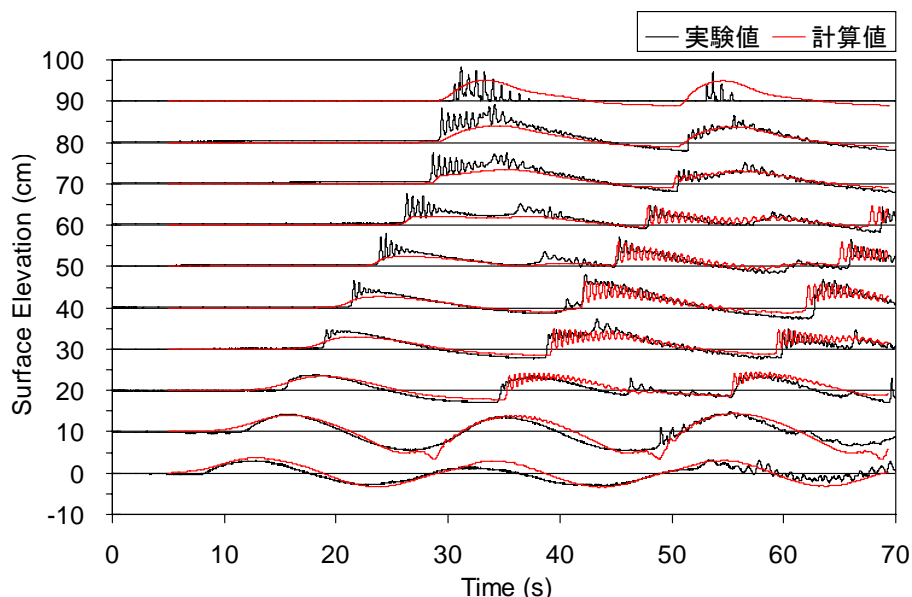


Fig.2 Comparison of tsunami propagation profile by the experiment and the FUNWAVE model (R-Case 2;; $h=10\text{cm}$, $A=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

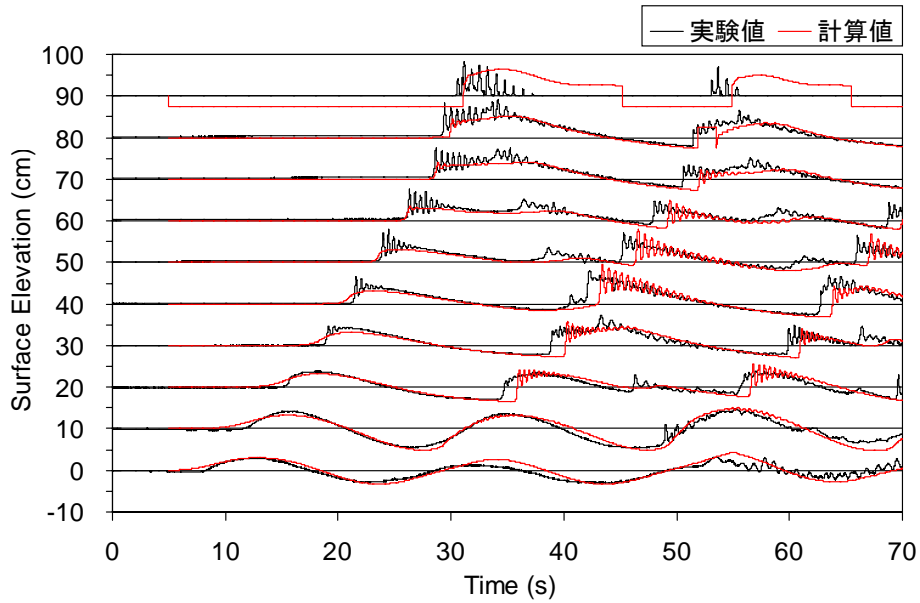


Fig.3 Comparison of tsunami propagation profile by the experiment and the COULWAVE model
(R-Case 2: $h=10\text{cm}$, $A=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

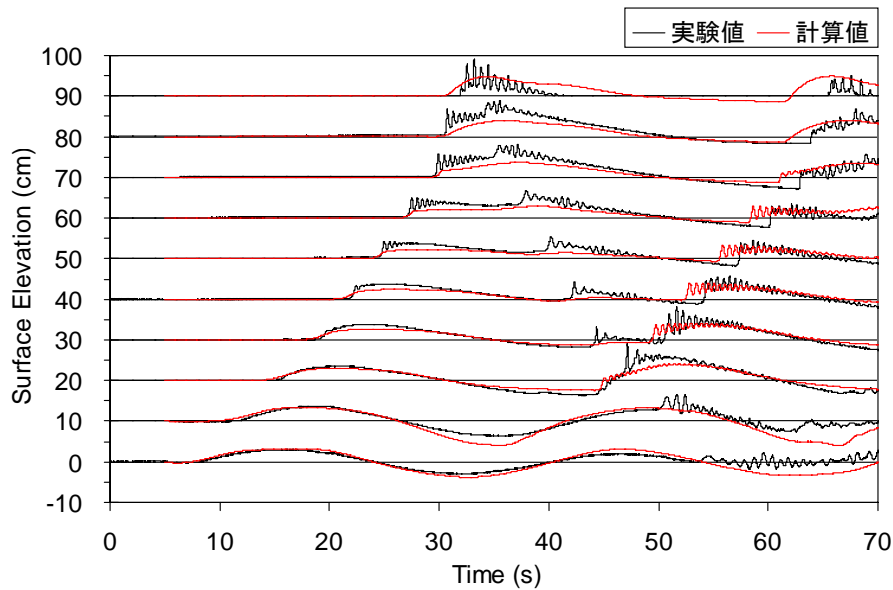


Fig.4 Comparison of tsunami propagation profile by the experiment and the FUNWAVE model
(R-Case 2: $h=10\text{cm}$, $A=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)

波目に関しては数値シミュレーションではソリトン分裂はほとんど生じていない。分裂波の数や波高も小さい。位相速度に関しては実験値とよい一致を示す。第2波目に関しては、ソリトン分裂の発生位置は実験値とほぼ一致する。位相速度は実験結果よりも大きく、分裂波の波高は計算値が大きい。分裂波の数については、WG3の位置では計算値の方が多いが、それ以降の位置では同程度である。

周期を30sとするR-Case 2, $A=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$ の結果をFig.4およびFig.5に示す。FUNWAVEによる数値シミュレーション結果と実験値とを比較したFig.4をみると、Fig.2と同様に、1波目に関して、実験ではソリトン分裂が発生しているのに対して、数値シミュレーションでは発生していない。波の位相速度は実験値とよい一致を示す。2波目に関しては、ソリトン分裂波の数および波高は各点で実験値と

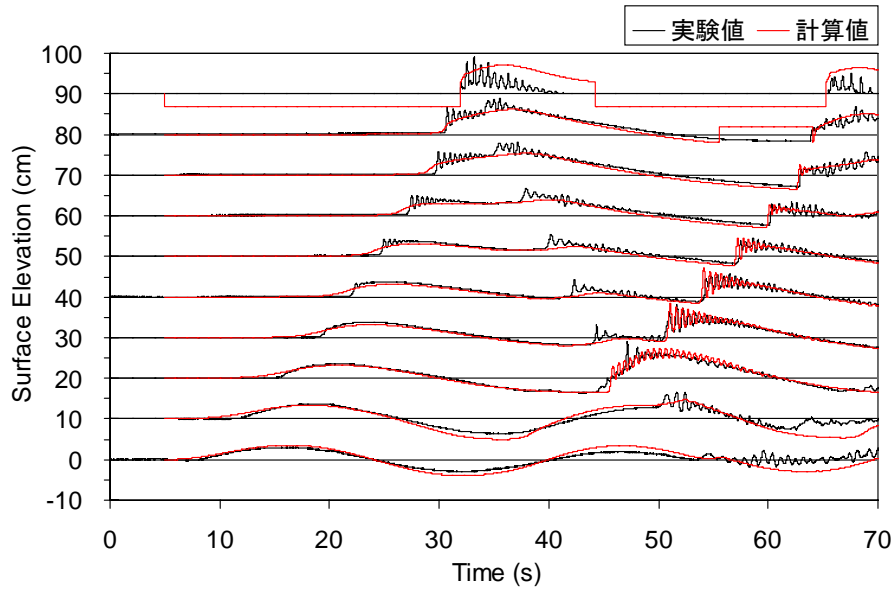


Fig.5 Comparison of tsunami propagation profile by the experiment and the COULWAVE model
(R-Case 2: $h=10\text{cm}$, $A=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)

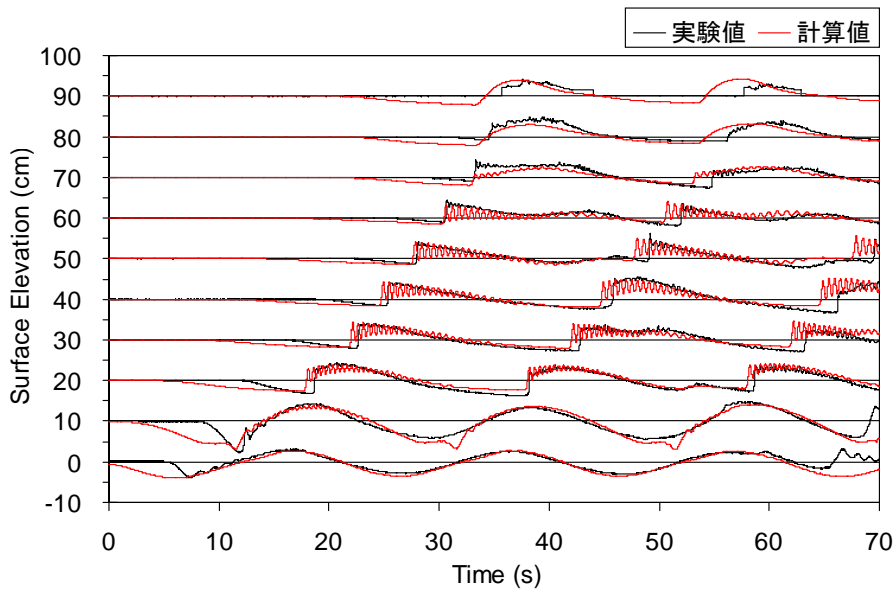


Fig.6 Comparison of tsunami propagation profile by the experiment and the FUNWAVE model
(F-Case 2 $h=10\text{cm}$, $A=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

よい一致を示しているが、位相速度が異なっている。

Fig.5 の COULWAVE による計算結果と実験値との比較をみると、実験で発生している第1波のソリトン分裂が数値シミュレーションでは表現できていないことがわかる。位相速度は実験値とよい一致を示す。第2波に関しては、ソリトン分裂過程は WG6 まで実験結果とよく一致する。WG7 以降は分裂波が表現されていないが、位相速度は実験

値とよく一致している。

次に、引波から始まるケースについてみる。F-Case 2, $A=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$ のケースの結果を、Fig.6 および Fig.7 に示す。押波から始まるケースでは実験においてソリトン分裂の発達がみられたが、引波ケースにおいては、ソリトン分裂はあまり生じない。FUNWAVE による数値シミュレーション結果と実験結果との比較した Fig.6 をみると、計算では

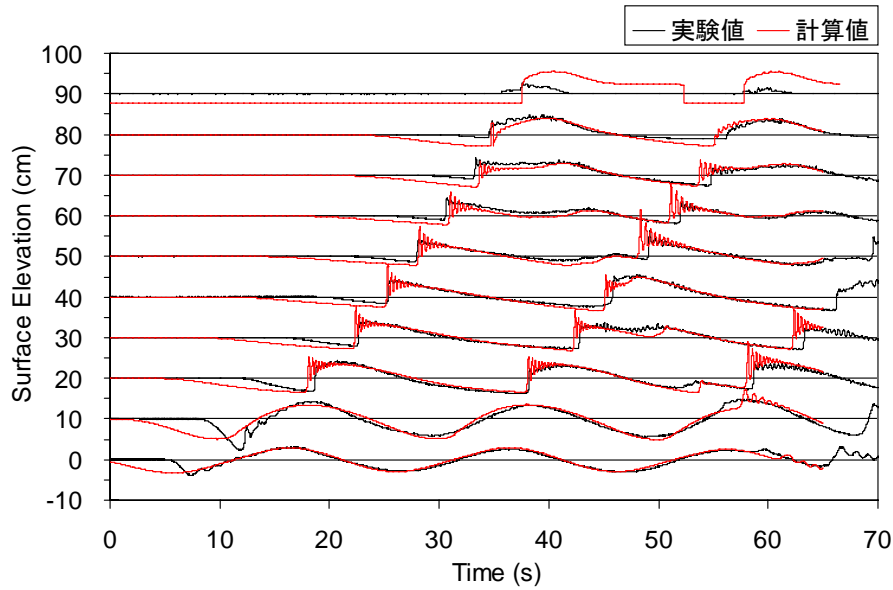


Fig.7 Comparison of tsunami propagation profile by the experiment and the COULWAVE model
(F-Case 2: $h=10\text{cm}$, $A=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

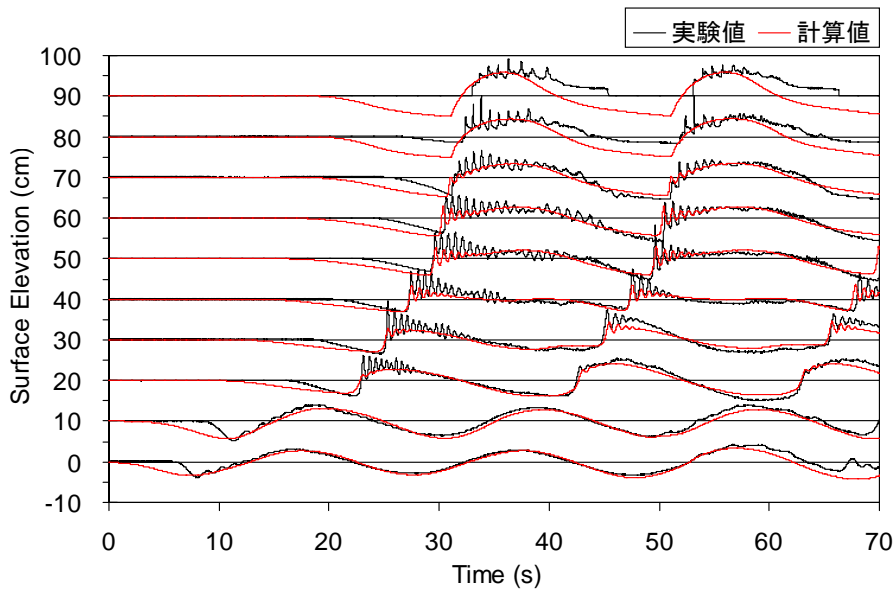


Fig.8 Comparison of tsunami propagation profile by the experiment and the FUNWAVE model
(F-Case 3: $h=20\text{cm}$, $A=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

ソリトン分裂が顕著である。しかし、遡上帯付近の WG9 および WG10 では波状性を表せていない。位相速度に関しては、第1波目は WG3~WG6 で、第2波目は WG4 以降で計算結果の方が速くなっている。

Fig.7によると、第1波目に関して、実験結果と比べて数値シミュレーション結果においてはソリトン分裂が著しい。そして、分裂波の数や波高は計算結果の方が大きくな

っている。位相速度に関しては、WG6 からやや計算値が遅くなっている。第2波に関しても同様の傾向があり、計算結果の方が分裂波の波高も数も大きい。位相速度は WG6 以降計算結果がやや速くなっている。

引波から始まるケースにおいて、ソリトン分裂が顕著に現れた実験ケースの結果を見る。F-Case 3, $A=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$ の結果を、Fig.8 および Fig.9 に示す。

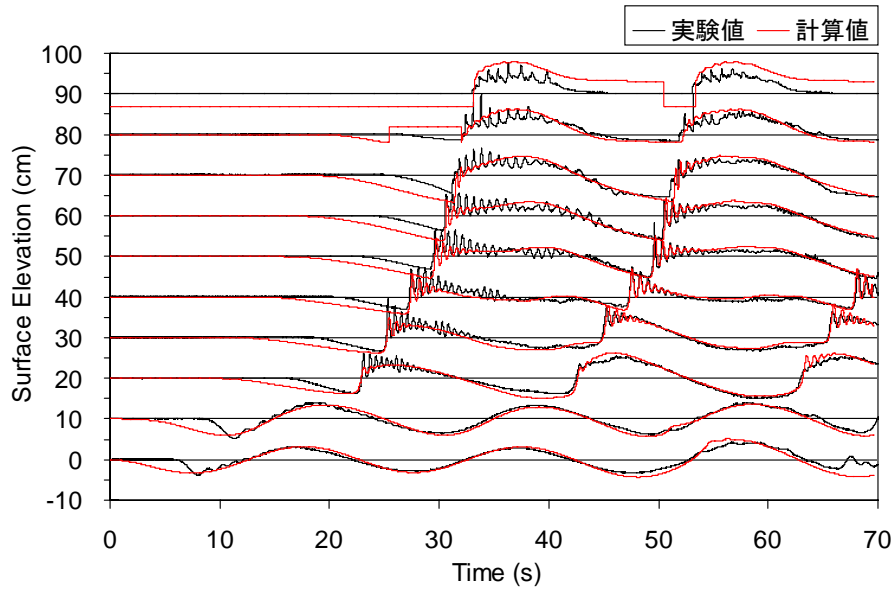


Fig.9 Comparison of tsunami propagation profile by the experiment and the COULWAVE model
(F-Case 3: $h=20\text{cm}$, $A=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

Fig.8のFUNWAVEによる結果と実験結果を比較すると、第1波目に関して、波の位相速度は実験結果とよく一致する。しかし、計算結果はソリトン分裂の発達が小さい。WG3では実験においては分裂波がすでに10波であるのに対して、計算結果では1波が発生し始めたところである。その先も分裂波の数や波高が小さくなっている。第2波目をみると、分裂波の波高は計算結果が若干小さくなっているものの、その数は実験結果とよい一致がみられる。遡上帯付近のWG9とWG10においては、波状性が表現できていない。

Fig.9のCOULWAVEによる計算結果と実験結果との比較の結果、位相速度に関しては全体的に実験値とよく一致する。ソリトン分裂の発達に関して、第1波目では、実験においてWG3の位置で分裂波が10波に達しているのに対して、計算値では分裂第1波が発生したところであるように、遅れている。分裂波の数は計算結果の方が小さい。第2波目に関しては全体的に実験値とかなり一致しており、分裂波の波高、数ともに実験計算とほぼ同じである。

以上のように実験結果と数値シミュレーション結果を比較したところ、ソリトン分裂過程の全体的な傾向は、再現できるが、詳細には両者には相違が見られることが多かった。その差異の傾向にも一貫性が見出せなかった。すべての比較結果を整理すると、Table 2のようであった。押波から始まるケースでは、第1波目のソリトン分裂を表現することが難しい。第2波目の結果は実験結果と一致する傾向にある。

本研究の数値計算上の問題点として、格子間隔を 0.1m

としたが、分裂波を表すには荒いことが考えられるので、もっと小さな格子間隔を用いた再計算を行う必要がある。

実験における波の分裂の状況をまとめると、砕波が生じない程度の浅い水深ほど、また、周期が短いほど波の分裂が現れやすくなること、同じ波条件であっても引き波から始まるケースの方が波の伝播に伴い水位が低下することで実水深が浅くなるので波の分裂が起こりやすくなることがわかった。

5. 結論

本研究では造波水路内にリーフ地形を設け、3ケースの異なる水深のもとで、正弦波で模擬した津波の波高と周期を変化させて、リーフ地形を伝播する際のソリトン分裂の発生、発達、砕波について実験的に検討し、また、2種類のBoussinesqモデル(FUNWAVEおよびCOULWAVE)を用いたシミュレーションを行って実験結果と比較した。主要な結論は、以下のようにまとめられる。

- 1) ソリトン分裂の発生・発達の様子は、波形勾配や水深に深く関係していること、同じ条件の入射津波であっても、押波から始まるか、引波から始まるかによっても、ソリトン分裂の様子が異なる。
- 2) 2種類の数値計算モデルによる数値シミュレーション結果は、詳細には実験結果を再現することができなかった。特に、押波から始まるケースの第1波目の再現が困難であった。

Table 2 Comparison about the soliton fission process between the experiment and the numerical test

a) 押波ケース(R)

		数値計算モデル	比較結果					
			ソリトン分裂波の波高		ソリトン分裂波の数		位相速度	
			一波目	二波目	一波目	二波目	一波目	二波目
R-Case1 $h_0=35\text{cm}$ $h=5\text{cm}$	A=3cm T=20s	FUNWAVE	同程度	同程度	同程度	同程度	遅い	遅い
		COULWAVE	同程度	大きい	同程度	同程度	同程度	遅い
	A=3cm T=30s	FUNWAVE	小さい	小さい	少ない	少ない	遅い	遅い
		COULWAVE	同程度	同程度	少ない	同程度	遅い	遅い
R-Case2 $h_0=40\text{cm}$ $h=10\text{cm}$	A=3cm T=20s	FUNWAVE	なし	大きい	なし	同程度	同程度	同程度
		COULWAVE	なし	大きい	なし	同程度	同程度	遅い
	A=3cm T=30s	FUNWAVE	なし	同程度	なし	同程度	同程度	速い
		COULWAVE	なし	同程度	なし	同程度	同程度	同程度
	A=5cm T=20s	FUNWAVE	なし	同程度	なし	同程度	同程度	同程度
		COULWAVE	小さい	大きい	少ない	多い	速い	遅い
R-Case3 $h_0=50\text{cm}$ $h=20\text{cm}$	A=3cm T=20s	FUNWAVE	なし	同程度	なし	同程度	同程度	同程度
		COULWAVE	なし	同程度	なし	同程度	同程度	同程度
	A=3cm T=30s	FUNWAVE	なし	同程度	なし	同程度	同程度	同程度
		COULWAVE	なし	大きい	なし	多い	同程度	同程度
	A=5cm T=20s	FUNWAVE	なし	大きい	なし	同程度	同程度	速い
		COULWAVE	なし	大きい	なし	多い	同程度	同程度

b) 引波ケース(F)

		数値計算モデル	比較結果					
			ソリトン分裂波の波高		ソリトン分裂波の数		位相速度	
			一波目	二波目	一波目	二波目	一波目	二波目
F-Case2 $h_0=40\text{cm}$ $h=10\text{cm}$	A=3cm T=20s	FUNWAVE	大きい	大きい	多い	多い	速い	速い
		COULWAVE	大きい	大きい	多い	多い	遅い	速い
	A=3cm T=30s	FUNWAVE	大きい	同程度	多い	多い	速い	速い
		COULWAVE	大きい	大きい	多い	同程度	同程度	速い
F-Case3 $h_0=50\text{cm}$ $h=20\text{cm}$	A=3cm T=20s	FUNWAVE	小さい	小さい	少ない	同程度	同程度	同程度
		COULWAVE	なし	同程度	なし	同程度	同程度	同程度
	A=3cm T=30s	FUNWAVE	なし	なし	なし	なし	同程度	速い
		COULWAVE	なし	大きい	なし	同程度	同程度	速い
	A=5cm T=20s	FUNWAVE	大きい	大きい	同程度	同程度	速い	速い
		COULWAVE	大きい	大きい	同程度	同程度	速い	速い

参考文献

池野正明, 松山昌史, 榊山 勉, 柳沢 賢(2005): ソリトン分裂と砕波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.751-755.
 安田誠宏・高山知司・山本博紀(2006): ソリトン分裂津波の変形と波力特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.256-260.
 Kirby, J.T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A.B. and Dalrymple, R.A.(1988): FUNWAVE 1.0, Fully nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and User's Manual, Res. Rep. NO. CACR-98-06, Center for Appl. Coastal Res., Dept. of Civil Eng., Univ. of Delaware, 80p.

Lynett, P. J. and Liu, P. L.-F.(2002): Modeling wave generation, evolution, and interaction with depth-integrated, dispersive wave equations COULWAVE Code Manual, Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package, 79p.
 Lynett, P.J., Wu, T.-R. and Liu, L.-F.(2002): Modeling wave runup with depth-integrated equations, *Coastal Engineering*, Vol. 46, pp.89-107.
 Wei, G., Kirby, J.T., Grilli, S. T., and Subramanya, R. (1995): A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. I : Highly nonlinear unsteady waves., *J. Fluid Mech.*, Cambridge, England, 294, pp.71-92.

Comparison between Experimental and Numerical Results for Soliton Fission Process of Tsunamis

Hajime MASE, Tomohiro YASUDA, Junichiro KAZI*, Tomotsuka TAKAYAMA,
Kazuya OKI** and Junichi NAKAHIRA***

* Chiyoda Advanced Solutions Corporation

** Graduate School of Engineering, Kyoto University

*** Yachiyo Engineering, Co., Ltd.

Synopsis

The present study examines the soliton fission process of tsunami propagating over reef shallow water coast by hydraulic experiments. The effects of water depth above the reef, tsunami amplitude and period are investigated. In addition to the experiments, two different kinds of numerical models are employed in order to know how accurately the models can reproduce the process of tsunami transformation such as the occurrence of fission, amplitude, number of soliton waves and phase celerity propagating over the reef. It was found that even if the tsunami amplitude and period are the same, the transformation process of first water-level-rising tsunami is different from that of first-falling tsunami and that there are differences between experimental transformations and numerically obtained transformations generally.

Keywords: tsunami, soliton fission, reef coast, Boussinesq equations