

非線形分散長波理論を用いた 津波ソリトン分裂・河川遡上・マッハ反射シミュレーション

千田 健一*・岩間 俊二**・三上 勉*・館澤 寛*・鈴木 介*

1. 目的

右写真は、2011.3.11 東日本大震災の際、名取川河口にて撮影された映像である¹⁾。映像は、第 1 波後半であり、浅水域で津波は変形し短いソリトン波列に分裂している。この映像からも、津波シミュレーションにおける非線形分散性の検討が重要であることがわかる。

本研究の目的は、非線形分散長波理論²⁾に基づく津波シミュレーションモデルを開発し、その精度を検証するとともに、津波ソリトン分裂・ソリトン波列の河川遡上・マッハ反射を再現することを目的とする。

2. ソリトン分裂シミュレーション³⁾

(1) 検討方法

初めに 1 次元解析モデルを開発し、非線形分散長波の解析解、実験・既往研究と比較し、その精度を検証した

(2) 支配方程式

非線形分散長波理論式には、既往研究から、その津波シミュレーションにおいて精度が実証されている後藤・藤間・首藤の式⁴⁾を用いた。

式 (1) が連続の式、(2) が運動の式である。

ここに、 η は、波高、 M は、 x 方向の線流量、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} \right) \dots \dots (2)$$

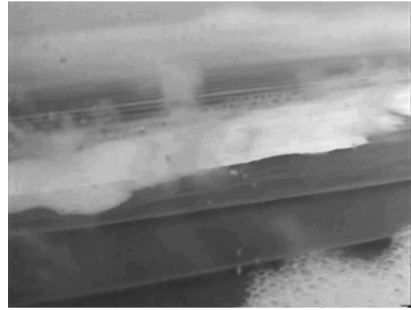


写真 1 名取川河口 (16:13) 東北地整みちのく号から撮影

h , D , g は、各々、静水深、全水深、重力加速度。なお、本研究では摩擦・砕波によるエネルギー損失を無視した。

(3) 差分法

差分法は、津波シミュレーションの分野で、最も信頼性の高い東北大モデルを参考に、Staggered grid の Leap-frog 法とした。数値粘性の原因となる移流項は、3 次精度の CIP 法で差分化し、誤差抑制を図った。分散項には 2 次精度の中央差分を用いた。

(4) シミュレーション精度の検証

1) クノイド波の再現

クノイド波は、浅水領域における非線形性と分散性を考慮した保存波である。クノイド波を計算し、同モデルの精度を検証した。クノイド波は、波高 5.0 m、水深 10.0 m、波長約 100 m とし、藤間らの CADMAS-SURF で計算し、同様の条件で、本モデルによりシミュレーションを行った。空間格子間隔は 10m、時間格子間隔 0.01 秒とした。造波境界から約 5 波長はなれた位置である 500 m 地点における CADMAS-SURF と本モデルのシミュレーション結果を図 1 に示す。結果はほぼ一致した。

*株式会社防災技術コンサルタント

**株式会社防災技術コンサルタント (岩手大学大学院工学研究科社会人博士課程在学)

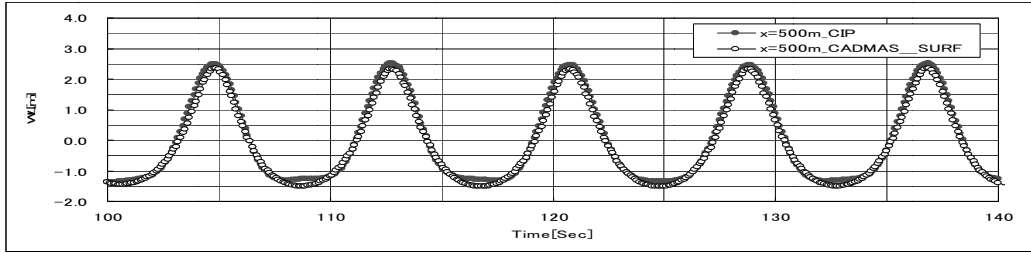


図1 計算精度の確認 (クノイド波の計算) : 造波境界から 500 m地点

2) 既往研究との比較

津波ソリトン分裂の数値計算に関しては、後藤、藤間、首藤⁴⁾ および Madsen⁵⁾ の研究が著名である。同研究の数値計算水路形状は、図2に示すように、水平床と1/20の一様勾配を組み合わせたものである。入射波条件は、 $x/h_1=10$ に波峰を持つ波高水深比0.12の孤立波である。ここに、 x は水平方向距離、 h

は孤立波の波高である。図3のA, B, Cは、前記既往研究における $x/h_1=14.65, 30.0, 41.6$ 地点の水位時系列である。図中○印は Street et al. の水理実験結果である。本モデルの計算条件は、計算格子間5m, 時間間隔0.01秒である。当モデルのシミュレーション結果は、既往水理実験・シミュレーションとほぼ一致した。

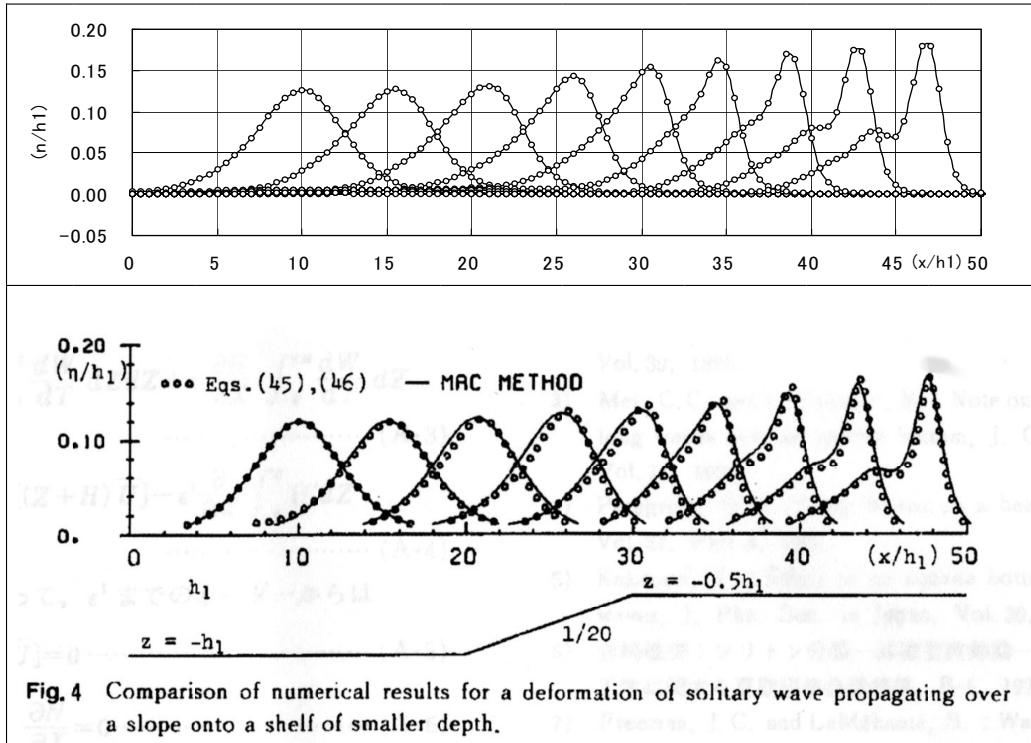


Fig. 4 Comparison of numerical results for a deformation of solitary wave propagating over a slope onto a shelf of smaller depth.

図2 本研究 (上段) と既往研究 (下段) の比較 (1)

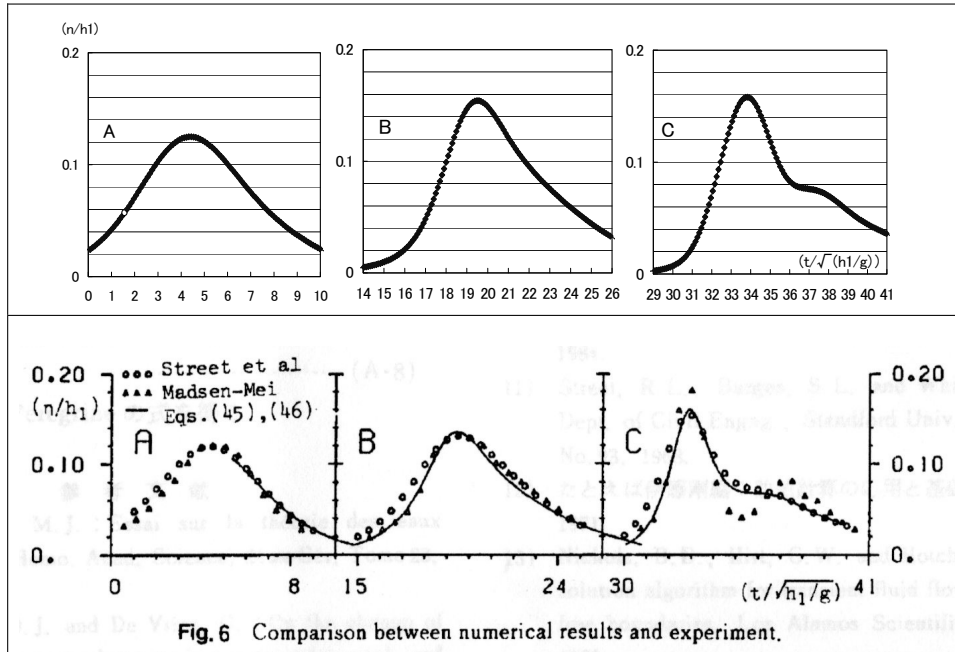


図3 本モデルの計算結果（上段）と既往研究（下段）の比較（2）

3. 河川遡上シミュレーション⁶⁾

(1) 検討方法

前記1次元モデルを拡張し、津波ソリトン分裂、ソリトン波列の河川遡上を再現し、3D可視化する。

(2) 支配方程式および差分法

支配方程式および差分法は、1次元非線形分散波方程式の解析法と全く同じであり、それを方向分離法により2次元化した。

(3) 地形境界条件

図4に示す。

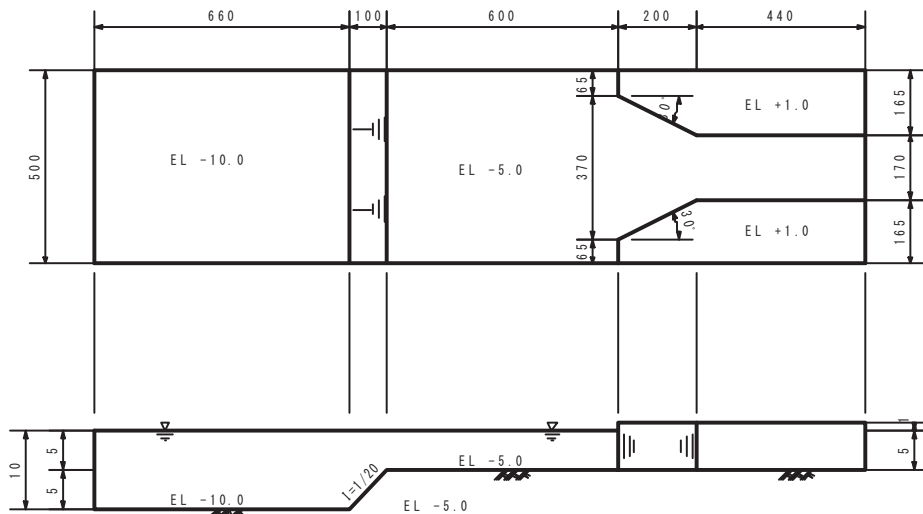


図4 地形条件

(4) シミュレーション結果

計算結果の考察は、当社の保有する津波シミュレーション3次元アニメ技術（海底地形透視；水位鳥瞰・色識別）を用いて行なった。河口付近を遡上する津波の2次元計算結果を図5に示す。入射波は1つの孤立波であったが、

河口付近では3波以上に分裂している。河口沖合 $x = 660$ 付近で、勾配 1 : 20 で水深 10 m から、5 m に浅くなったため、孤立波が分裂したのである。そのソリトン波列が河口部に到達すると、汀線では反射、次第に川幅が狭まる河岸では、反射波による波高の増幅が生じることが分かる。

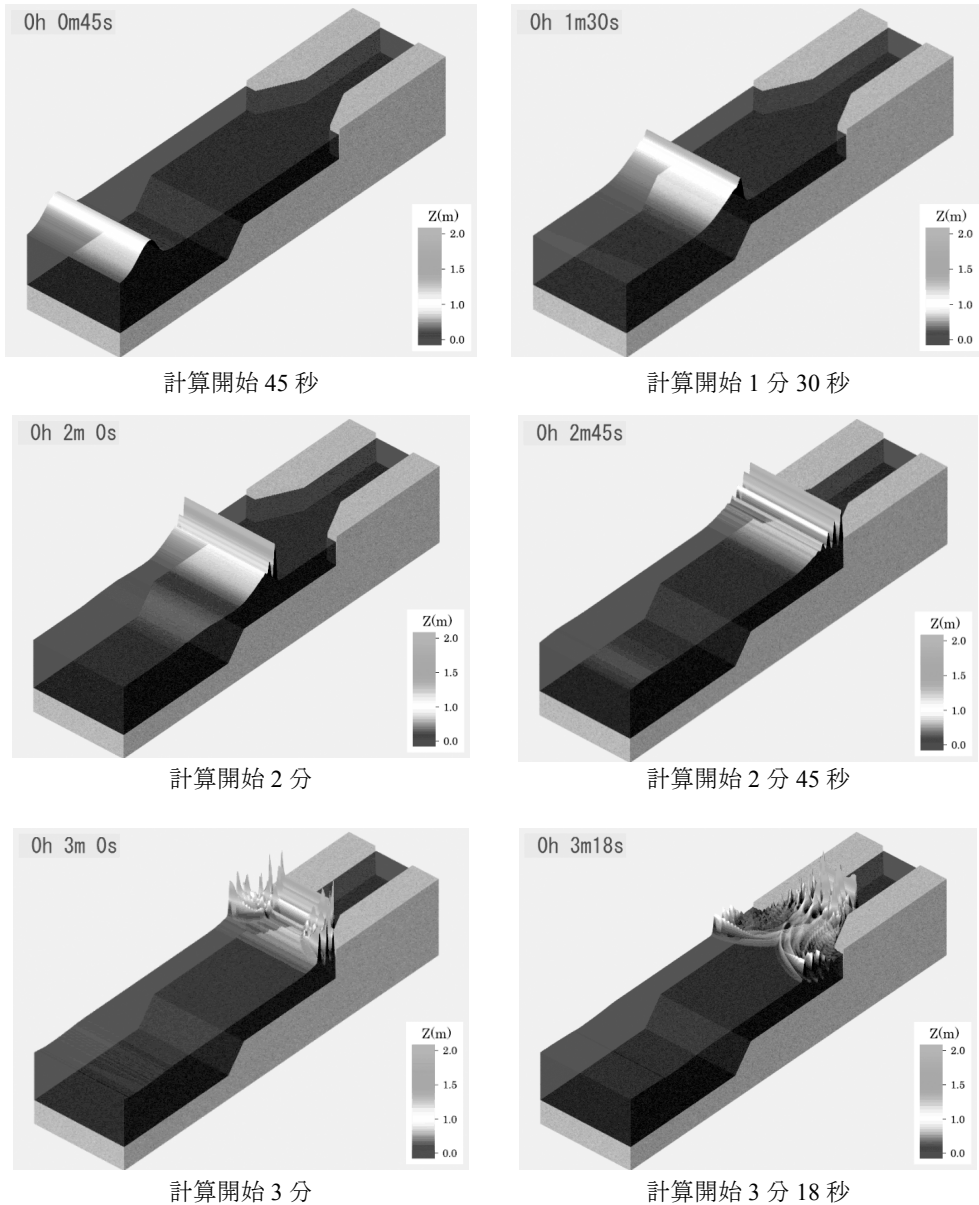


図5 河口付近を遡上する津波（非線形分散長波）

4. マッハ反射シミュレーション

(1) 検討目的

右写真は、2013.3.11 東日本大震災において津波が閉伊川を遡上する際、津波ソリトンの河岸での増幅現象を捉えたものである。津波は、写真の左（海側）から右（上流）に向けて遡上している。写真正面の右岸では、直立の特殊堤位置において津波ソリトンの入射波・反射波が非線形的に反射・重合し、写真手前の河川中央に比べ波高が非常に増大している。



写真2 閉伊川を遡上する津波ソリトンの河岸での波高増大 (3.11. 2011 岩手県宮古市)

河川を遡上した津波ソリトンが防波堤・堤防等に斜めに入射した際に非線形分散性により波高を増す現象は、従来マッハ反射として理論的・実験的研究されてきた。本章では、本津波シミュレーションモデルを用い、マッハ反射を再現できるか検証する。

(2) マッハシステムの発生条件^{7) 8) 9)}

直壁に斜め入射するソリトンの反射に関して Miles (1977a, b) が理論的研究を行っている。

平面波ソリトンの入射波入射角 ϕ_i (反射波ソリトンの波峰が鉛直壁に下した垂線となす角) および水深で正規化した振幅 a_i (今後単に振幅とよぶ) から計算される $\kappa = \phi_i / \sqrt{3a_i}$ が比較的小さい、もしくは入射ソリトン振幅が比較的大きい場合 ($0 < \kappa < 1$) には、反射形態は入射ソリトン・反射

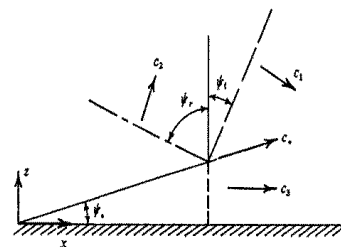


FIGURE 4. The Mach-reflexion pattern of §4. The angular scale is exaggerated.

図6 マッハシステムの説明図

ソリトン・ステム波 (マッハシステム) の3波共鳴条件から求められたマッハ反射 (mach reflection) となる (Miles, 1977b)。

同研究を踏まえ、マッハシステム発生条件を表1のとおり設定した。

表1 マッハシステムシミュレーションの境界条件

項目	諸元	備考
入射角 (Φ_i)	0.35rad (20°)	
水深	5.0m	一定
ソリトン波高	1.1m	初期凍結ソリトン波高 2.2m
振幅 (a_i)	0.22	$a_i = \text{波高} / \text{水深} = 1.1 / 5.0$
κ	0.43	$\kappa = \Phi_i / (\sqrt{3a_i})$

(3) 支配方程式および差分法

支配方程式および差分法は、前記 2 次元非線形分散波方程式の解析法と全く同じである。

(4) シミュレーション結果

図 7 にシミュレーション結果を示す。図中 C_1 , C_2 は、各々入射波、反射波である。 C_3 は、河岸に垂直に伸びていることからマッハ反射の理論的研究より予測されるマッハシステムと考えられる。以上より、当モデルはマッハ反射を再現できることが検証された。

5. 謝辞

本研究に際し、首藤伸夫東北大学名誉教授、今村文彦東北大学大学院教授、越村俊一東北大学大学院教授より有益なアドバイスを賜りました。記して謝意を表します。

6. 参考文献

- 1) 真野明・田中仁・有働恵子：海岸堤防の被災メカニズム：東日本大震災 3 ヶ月後報告会 :2011http://www.dcr.tohoku.ac.jp/surveys/20110311/docs/20110610_1-3_mano.pdf
- 2) 首藤伸夫 非線形波動論 1974 年度 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース 非線形波動論 B-1-1 ~ B-1-35
- 3) 一次元非線形分散波の方程式を用いた CIP 法による河川を遡上する津波の数値計算
千田健一 平成 20 年度 (2009) 土木学会 東北支部研究発表会 II48 P189-19 (CD_R)
- 4) 後藤智明, 首藤伸夫等 アーセル数が大きい場合の非線形分散波の方程式 土木学会論文集 第 351 号 /II-2, PP193-210,

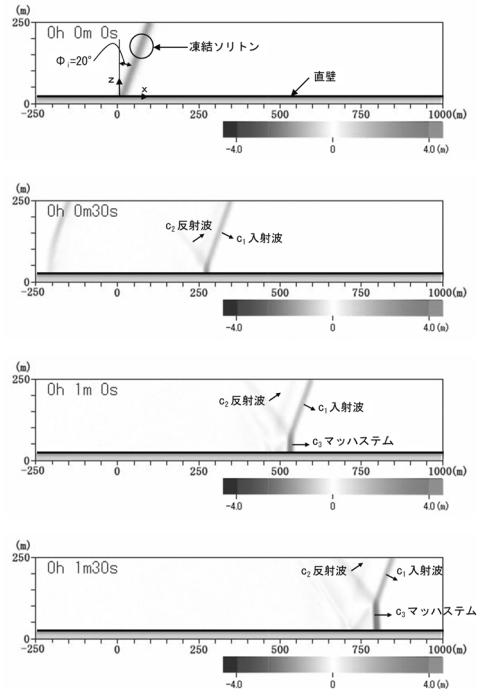


図 7 津波ソリトンのマッハ反射シミュレーション結果

198

- 5) Madsen, .S and Mae, C.C.: Solitary wave over an uneven bottom, J.F.M., Vol.39, 196
- 6) 二次元非線形分散波の方程式を用いた CIP 法による河川を遡上する津波の数値計算
千田健一, 鈴木介, 岩間俊二, 三上勉, 館澤寛 平成 20 年度 (2009) 土木学会 東北支部研究発表会 II49 P191-19 (CD_R)
- 7) 灘井章嗣 都司嘉宣 月刊海洋 平面波ソリトンの斜め反射に伴うマッハシステム現象 号外 No15 1998 P129-134
- 8) Miles, J.W : Obliquely interacting solitary waves, J.Fluid Mech., 79 157-169 (1977a)
- 9) Miles, J.W : Resonantly interacting solitary waves, .J.Fluid Mech., 171-179 (1977b)