

津波ソリトン遡上実験および数値シミュレーション

千田 健一¹・岩間 俊二^{1,2}・舘澤 寛¹・三上 勉¹
 鈴木 介¹・菊池 茂¹・石川 勝章¹

1. はじめに

筆者らは、CIP 法を用いた非線形分散長波方程式による新しい津波シミュレーションモデルを開発中である^{1)~5)}。本研究は、同モデルを陸上遡上をも含むモデルに拡張し、その精度を検証するものである。第一に、津波ソリトン波列発生装置を製作した。第二に津波ソリトン遡上実験を実施してシミュレーション検証データを取得した。第三に、実験と同一条件で数値シミュレーションを実施し、同モデルの妥当性を検証した。

2. 津波ソリトン実験

(1) 津波ソリトン波列発生実験

筆者の一人は、自宅庭に長さ 8m の津波ソリトン実験水路を保有している (図 1)。一

般に津波ソリトン波列発生実験は、ダムブレイク法で行われる⁵⁾。これは、水路にゲートを設け、その上下流で水位差を生じ、これを急開することで段波を発生させるものである。ダムブレイク段波は、しばらく伝播するとソリトン波列に遷移する。同方法の欠点は、ゲート急開の最波先端で砕波を生じやすいことである。このため、本研究では、造波方法に以下の改良を施した (図 1)。車輪を付けた直方体を、おもり、滑車、ワイヤー線で引き、押し波を造波する。この方法の優れた点は、動き出しはゆっくりであるが次第に加速し、途中からは直方体に働く水圧・抗力とおもりの張力が釣り合って、一定速度になる点にある。その結果、波高水深比を大きくしても、非砕波の津波ソリトン波列を容易に造波できる。

本研究の物理寸法と無次元化表示の関係を

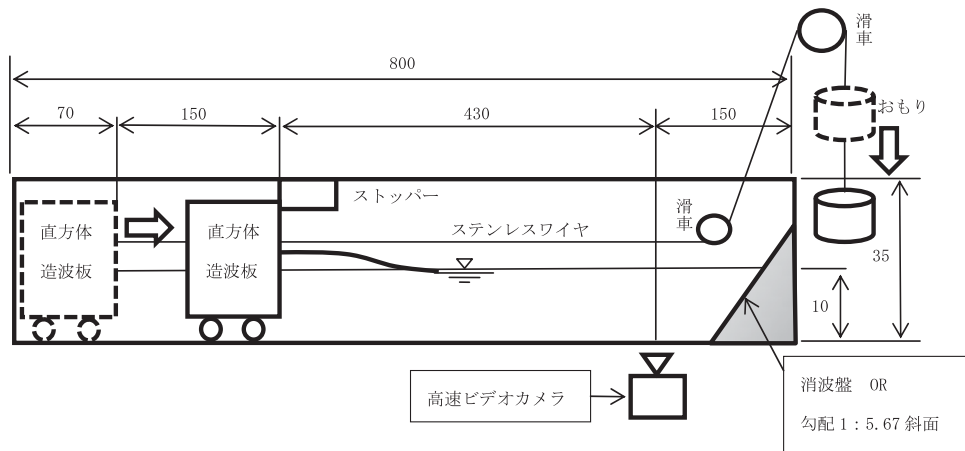


図 1 津波ソリトン発生装置 (単位 [cm])

¹ (株) 防災技術コンサルタント

² 岩手大学 社会人博士課程在学

以下に示す。

h_0 水路水深 $X^* = x/h_0$, $h^* = h/h_0$, $\eta^* = \eta/h_0$, $t^* = t\sqrt{g/h_0}$

水路水深 h_0 は, 10cm : 一定とした。実験では, おもりの重量を変化させることで, 異なる波高のソリトン波列を造波できる。波高水深比 $\eta^* \approx 0.4$ の実験結果を図 2 に示す。図 2 中, t^* の時間原点は, ソリトン波列第 1 波ピークが後続ビデオカメラ前面を通過する時刻としている。ソリトン波列は, 2 波まで発生している。

複数実験結果を図 2 に示す。ソリトン波高時系列のばらつきは微小で, 実験の再現性は良好である。以上より, ソリトン波列の発生に成功した。

(2) 津波ソリトン遡上実験

Synolakis (1987) の実験 (図 3) に倣い,

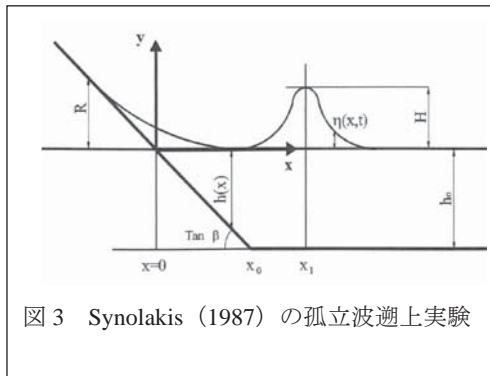


図 3 Synolakis (1987) の孤立波遡上実験

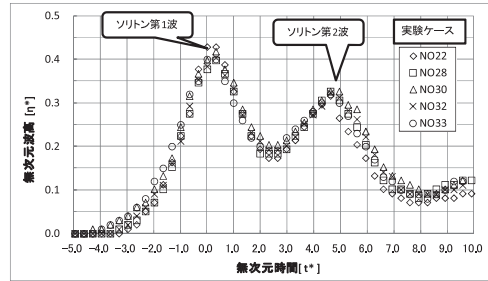


図 2 ソリトン波列発生実験結果

水深一定の水路に接続する斜面に, 孤立波を遡上させ, その遡上高を測定した。水路水深 $h_0=10\text{cm}$, 斜面勾配 $\cot\beta=5.67$ に対する実験結果を図 4 に示す。図中黒丸が本実験である。本研究の実験装置は, 小規模であるにもかかわらず, 打ち上げ高は, 波高水深比の広い範囲で, 既往研究⁹⁾と極めてよく一致した。

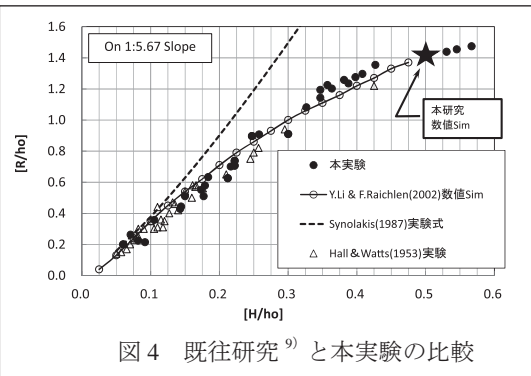


図 4 既往研究⁹⁾と本実験の比較

3. CIP 法を用いた津波ソリトン伝播・遡上シミュレーション

(1) CIP 法+非線形分散長波モデルの提案

1) 支配方程式 現在の津波シミュレーション技術は, 今村, 首藤, 後藤, 藤間^{6) 7)}らの数値誤差の研究によりその信頼性が確立された。彼らが開発した東北大モデルの概要を以下に示す。次元支配方程式は, 以下の非線形長波式である。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに, η は波高, M は x 方向の線流量, h, D, g は, 各々, 静水深, 全水深, 重力加速度である。ここでは, 説明を簡略にするため, 摩擦損失項は無視している。

本研究で提案する非線形分散長波解析モデルは, 上記東北大モデルに分散項を付加し, 非線形分散長波式⁸⁾に拡張したものである。

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

差分法は、東北大モデルと同様、スタッガード・リーブフロッグ法とした。移流項は、例えば1次精度の風上差分で差分化すると、数値粘性の作用で、計算精度が低下する（今村⁶⁾）。移流項の誤差克服法は、複数提案されており、嶋原、今村は、移流項を3次精度の風上差分を提案している。また、後藤らは、非線形分散モデルでは2次精度の中心差分が採用している。本モデルでは、移流項を、3次精度のCIP法により差分化した。分散項は、空間方向に2次精度の陽形式中央差分を用いて差分化した。移流項が空間方向3次精度、分散項が空間方向2次精度なので、当モデルは全体として空間方向に2次の精度が確保されている。

2) ソリトン伝播シミュレーション

条件は、水深 $h_0=10\text{m}$ 一定、空間格子間隔 $\Delta x=h_0=10\text{m}$ とし、初期水位は、 $x=0$ に峰を持つ波高 11m の凍結孤立波とした。底面摩擦力は、ゼロとしている。この場合、非線形分散波理論により、波高 $\approx 5\text{m}$ の波が波高・波形を保存しながら伝播するはずである。津波業務で一般的に用いられる非線形長波+1次精度風上差分法と、本モデル：非線形長波モデル+CIP法の比較を図5に示す。従来モデルでは、波高の減衰が強く生じている。これは、運動方程式の移流項に1次精度の風上差分を用いていることにより、数値粘性が強く働いたためである⁶⁾。一方、本モデルでは、ソリ

トンの波高・波形は保存されている。このことから、以下の知見が得られた。『従来の非線形長波+1次精度風上差分法では、周期が短く波高水深比の大きな津波では、移流項の数値粘性の作用により、波高の減衰が生じる。また、波形が孤立波理論解とくらべ、前傾化する。当モデルは、アーセル数の大きな領域でも計算値は、理論と整合した。』

(2) ソリトン遡上シミュレーション

津波遡上計算のように、水深が小さくなると、摩擦損失の影響が大きくなる。摩擦損失項を含む非線形分散長波の運動方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + (gn^2/D)^{1/2} \frac{M|M|}{D^2} = \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} \right) \dots (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + f \frac{M|M|}{D^2} = \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} \right) \dots (5)$$

ここに、 n は、マンニングの粗度係数である。 f は、摩擦係数である。CIP法を用いた津波上シミュレーションモデルの概要を表1に示す。

1) 条件 シミュレーションでは、水深 $h_0=10\text{m}$ の水路に接続する斜面勾配 $\cot\beta=5.67$ の斜面に、波高 $H=5\text{m}$ の孤立波を強制入力した。波高水深比 $H/h_0=0.5$ である。空間格子間隔 10m 、時間格子間隔は 0.01sec とした。図中の η^* 、 x^* は、水面高さ η および水平座標 x を h_0 により無次元化したものである。無次元時間の定義は、 $t^* = t \sqrt{g/h_0}$ であり、孤立波が $x^* = 20$ のピーク通過時を $t^* = 0$ としている。最大の打ち上げ高は、 $t^* = 791$ ($t = 800\text{Sec}$) において生じ、 $\eta^* (= R/h_0) = 1.4$ である。これは、本研究の実験および既往実験と極めてよく一致した（図4 図中★印シミュレーション結果、●印本実験）。

2) 今後の課題整理 遡上高に関しては、きわめて良好に一致した。ただしシミュレーションの水面形は、スムーズさを欠いている。これは、摩擦抗力の計算をマンニング式により行ったことが一因と考えられる。よりスムーズな解を得る方法として、田中ら¹⁰⁾ の

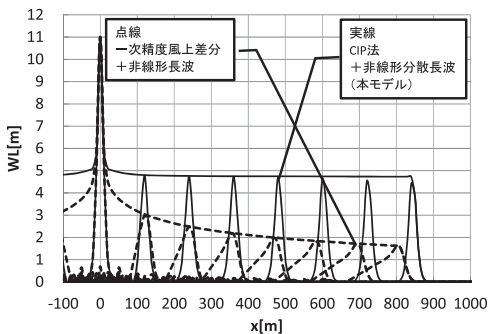
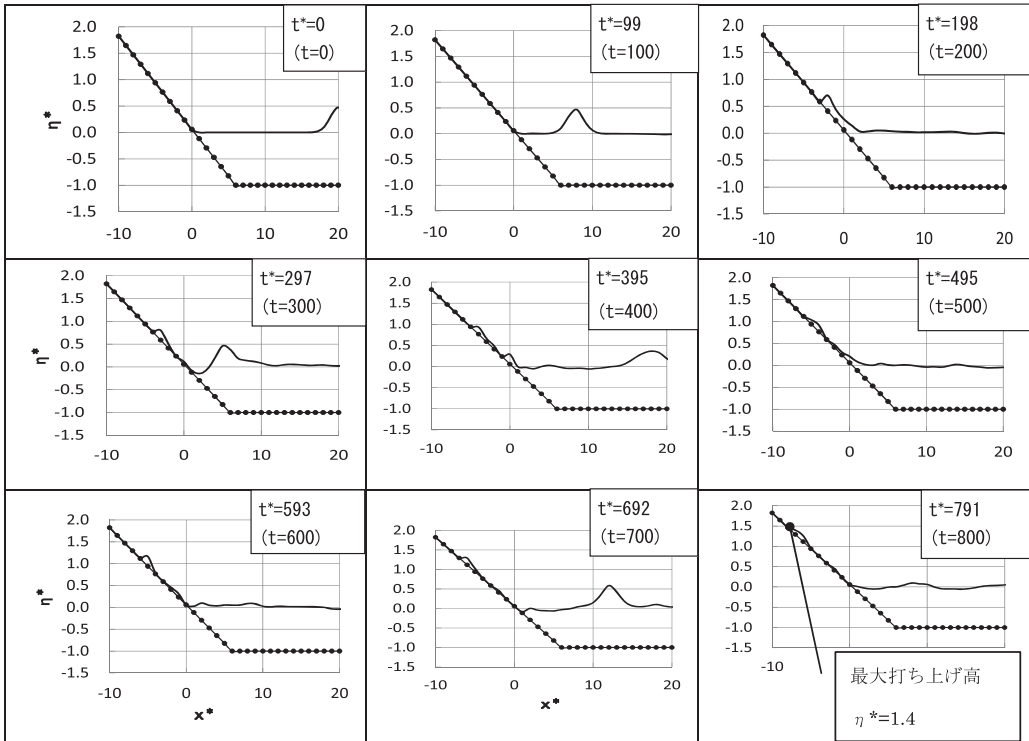


図5 津波ソリトン伝播シミュレーション（一次精度風上差分+非線形長波モデルと当モデルの比較）

表 1 新しい津波遡上シミュレーションモデルの概要

| 項 目 | 海 上 | 陸 上 |
|-----------|----------------|---------------|
| 支配方程式 | 非線形分散長波式 | 非線形長波式 |
| 移流項 (差分法) | 考慮 (CIP 法) | 考慮 (一次精度風上差分) |
| 分散項 (差分法) | 考慮 (2 次精度中央差分) | 無視 |
| 遡上先端水深 | — | 今村・小谷の方法 |
| 摩擦項の計算方法 | マンニング式 | 同左 |

図 6 遡上過程数値シミュレーション結果 $H/h_0=0.5$

方法にならない、底面境界層を $k-\omega$ モデル等で計算する方法が考えられる。

【参考文献】

- 1) 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, 岩間, 三上 平成 20 年度 (2009) 土木学会 東北支部研究発表会 II48 P189-19 (CD_R)

- 2) 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, 岩間, 三上 平成 20 年度 (2009) 土木学会 東北支部研究発表会 II49 P191-19 (CD_R)
- 3) 津波ソリトン波列の陸上遡上シミュレーションの新モデルの提案
千田 平成 24 年度 (2013) 土木学会 東北支部研究発表会 II-42 (CD_R)
- 4) 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, 岩間, 三上, 舘澤, 鈴木 津波工学研究報告 第30号 (2013) P105 ~ P110
- 5) 河川を遡上する津波のソリトン分裂実験およびシミュレーション
千田, 岩間, 舘澤, 鈴木, 菊池 平成25年度 (2014) 土木学会 東北支部 II-54 (CD_R)
- 6) 差分法による津波数値計算の打ち切り誤差
今村文彦, 後藤智明 土木学会論文集 第375/II-6 1986年11月 P241-250
- 7) アーセル数が大きい場合の非線形分散波の方程式
後藤智明, 首藤伸夫ほか 土木学会論文集 第351号 /II-2, PP193-210, 1984
- 8) 非線形波動論
首藤伸夫 水工学に関する夏期研修会講義集 Bコース B-1-1 ~ B-1-35
- 9) Y.Li and F.Raichlen Non-breaking and breaking solitary wave run-up
2002 J. Fluid Mech.(2002), vol.456, pp.295-318. P298
- 10) 浅水流方程式と乱流モデルを組み合わせた孤立波遡上の数値計算
田中仁・Mohammad Bagus Adityawan (2010) 土木学会論文集B2(海岸工学) Vol.66. No.1, 091-095