

ソリトン形状をもつ河川津波の発生に関する検討

Investigation of Solitary Waves for Tsunami Run-up in a River

北見工業大学大学院社会環境工学専攻 (株)豊水設計構造マネジメント部	○学生員	吉江祐人 (Yuto Yoshie)
北見工業大学工学部社会環境工学科	正員	佐藤之信 (Yukinobu Sato)
鹿児島大学大学院理工学研究科生命環境科学専攻	正員	中山恵介 (Keisuke Nakayama)
	正員	柿沼太郎 (Taro Kakinuma)

1. はじめに

河川津波は、巨大地震の発生により誘発される津波が沿岸部に到着し、河川を遡上することによって発生する。北海道の太平洋側に位置する十勝川において、平成 15 年 9 月 26 日に十勝沖地震による河川津波の遡上が確認されており、同じく太平洋側に面する新釧路川においても平成 22 年 2 月 27 日に発生したチリ地震による河川津波の遡上が確認されている。また、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震によって、これらの河川に河川津波が遡上した痕跡が確認されたという報告が残されている^[1]。河川津波対策検討会では、東北地方太平洋沖地震後の平成 23 年 8 月に緊急的な対策として、これらを含む河川において川幅の縮小による振幅の増大に注意が必要であると指摘している。また、過去の研究では、河川津波がソリトン波として進行することから、川幅縮小や河川の蛇行によって生じた反射波が共鳴増幅されることにより、振幅が大きく変化することが示されている。したがって、河川津波の遡上による被害低減を考える上でソリトン波の性質を考慮しなくてはならず、沿岸部に押し寄せる波による河川津波を正確に評価し、実際の河道計画に反映させる必要があるといえる。

本研究では、河川津波に対する検討が必要とされている新釧路川及び十勝川のうち、十勝川に対して強非線形強分散内部波方程式を利用し、津波が浅海域から河川域に侵入する際に発生するソリトン波について検討を行う。また、強非線形強分散内部波方程式を用いて得られる数値解析で示された河川域を遡上するソリトン波と、3 次オーダのソリトン波の理論解を比較し、検討を行うことを目的とする。

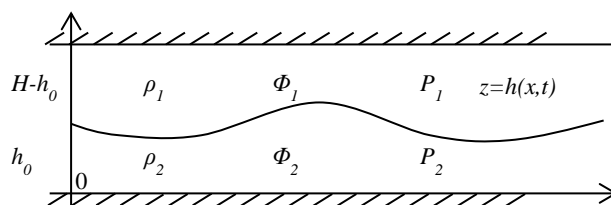


図-1 2層流体システム

2. 強非線形強分散内部波方程式

本研究で使用する強非線形強分散内部波方程式には、非静水圧の効果が考慮されており、渦なしにおける強分散関係を高精度に再現するために、速度ポテンシャルの概念が利用されている。基本的に多層の方程式であることから、第 i 層の速度ポテンシャル $\phi_i(x, z, t)$ を次式のように N 個のべき乗で展開される式で示す。

$$\phi_i(x, z, t) = \sum_{\alpha=0}^{N-1} \{f_{i,\alpha}(x, t) \cdot z^\alpha\} \quad (1)$$

ここで、 $f_{i,\alpha}$ は i 層目における次数 α の重み、 z^α は次数 α の鉛直分布関数を示す。

変分法(柿沼,2001)^[2]を適用して、最終的に上層及び下層に対する次式のような強非線形強分散内部波方程式を得る。

上層の方程式：

$$\eta^\alpha \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{\alpha + \beta + 1} \nabla (\eta^{\alpha + \beta + 1} \nabla f_{1,\beta}) - \frac{\alpha \beta}{\alpha + \beta - 1} \eta^{\alpha + \beta + 1} f_{1,\beta} = 0 \quad (2)$$

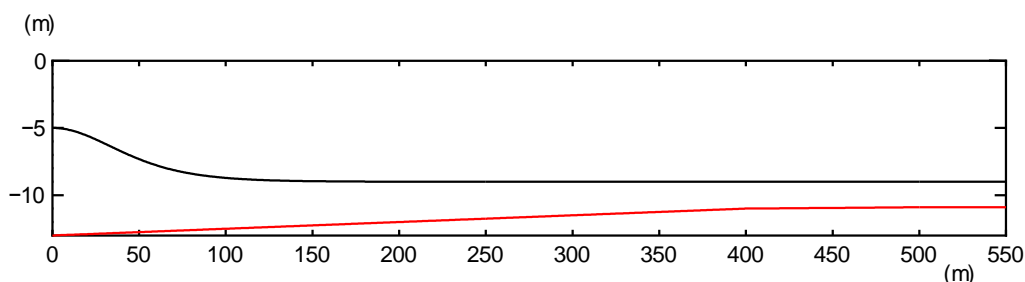


図-2 計算領域及び初期界面状態 (初期振幅 4m)

$$\eta^\beta \frac{\partial f_{1,\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} \eta^{\beta+\gamma} \nabla f_{1,\beta} \nabla f_{1,\gamma} + \frac{\beta\gamma}{2} \eta^{\beta+\gamma-2} f_{1,\beta} f_{1,\gamma} + g\eta + \frac{p_1}{\rho_1} = 0 \quad (3)$$

下層の方程式：

$$\eta^\alpha \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{\alpha+\beta+1} \nabla \{ (\eta^{\alpha+\beta+1} - b^{\alpha+\beta+1}) \nabla f_{2,\beta} \} - \frac{\alpha\beta}{\alpha+\beta+1} (\eta^{\alpha+\beta+1} - b^{\alpha+\beta+1}) f_{2,\beta} = 0 \quad (4)$$

$$\eta^\beta \frac{\partial f_{2,\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} \eta^{\beta+\gamma} \nabla f_{2,\beta} \nabla f_{2,\gamma} + \frac{\beta\gamma}{2} \eta^{\beta+\gamma-2} f_{2,\beta} f_{2,\gamma} + g\eta + \frac{p_1 + (\rho_2 - \rho_1)gh_1}{\rho_2} = 0 \quad (5)$$

ここで、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ であり、 $\eta(x,t)$ 、 $p_1(x,t)$ 、 $h_1(x)$ 及び ρ_i は、それぞれ、界面変動、界面における圧力、第 i 層の静水深及び第 i 層の密度を示す。

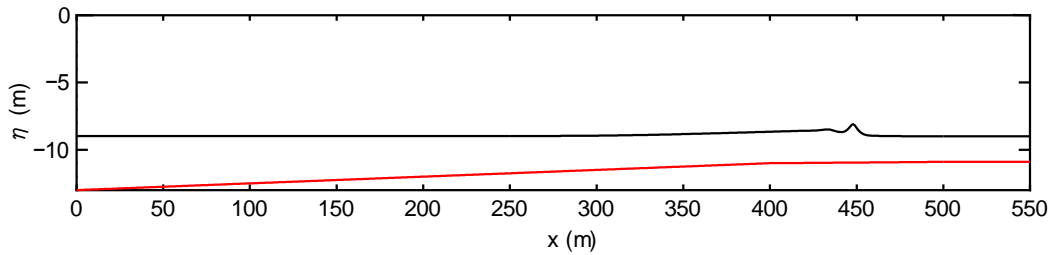
式(2) ~ (5)は、Nakayama・Kakinuma^[3]に示されるような陰解法を用いた差分法により解く。

3. 数値解析モデルの概要

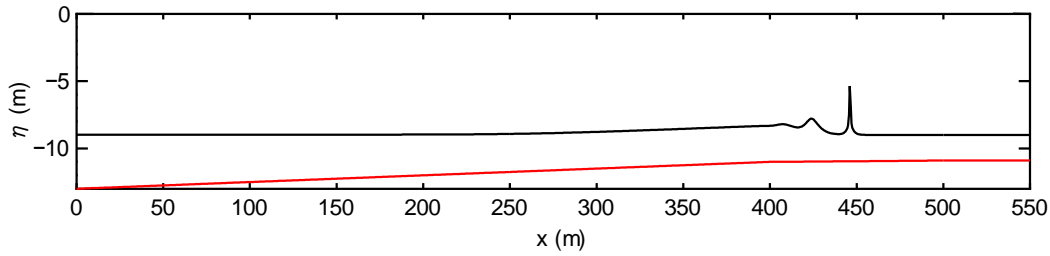
本研究では、図-1 に示されるような、最上面部を水平板で固定した、2 層の流体における差分法を用いた数値解析モデル^[4]を使用している。また、本研究のように表面波を対象に計算を行う場合、上層の流体の密度が下層の流体に比べて、極めて軽いという仮定の下で計算を行う。したがって、内部波の計算と同様に、2 層間の流体における数値解析と同様に計算を行うことが可能である。

4. 計算領域及び条件

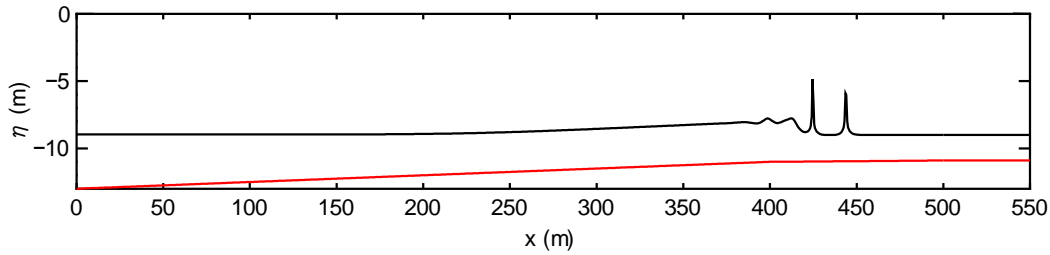
本研究では、図-2 に示すような計算領域を用いる。計算領域はメッシュを 1100 個のメッシュに分割するこ



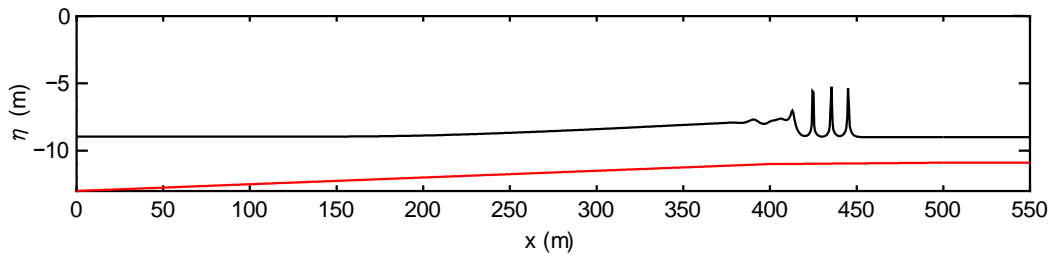
(a) 初期振幅 1m における河川域のソリトン波 t=69.7s 後



(b) 初期振幅 2m における河川域のソリトン波 t=60.8s 後

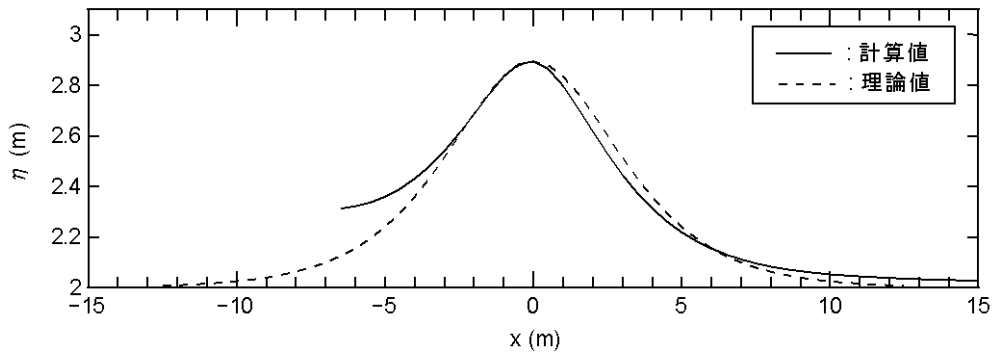


(c) 初期振幅 3m における河川域のソリトン波 t=54.8s 後

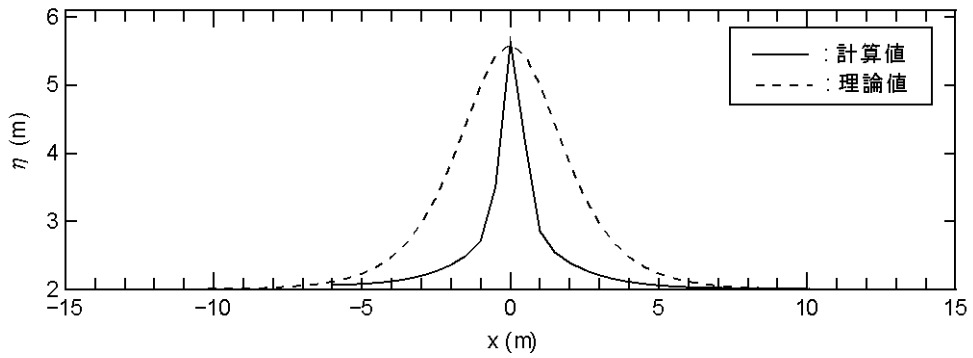


(d) 初期振幅 4m における河川域のソリトン波 t=52.1s 後

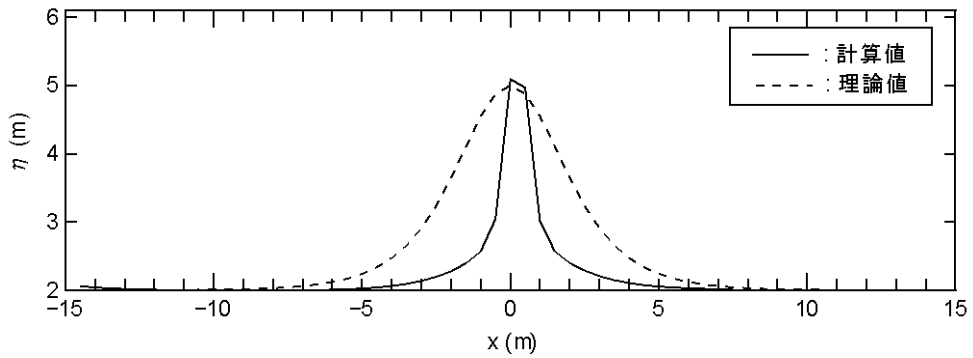
図-3 各計算条件における河川域のソリトン波



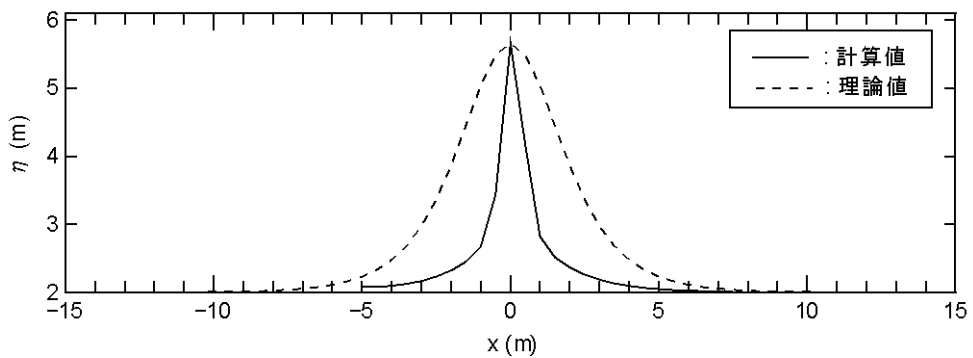
(a) 初期振幅 1m における解析解と理論解の比較 (ピーク波高を $x=0\text{m}$ とおいた.)



(b) 初期振幅 2m における解析解と理論解の比較 (ピーク波高を $x=0\text{m}$ とおいた.)



(c) 初期振幅 3m における解析解と理論解の比較 (ピーク波高を $x=0\text{m}$ とおいた.)



(d) 初期振幅 4m における解析解と理論解の比較 (ピーク波高を $x=0\text{m}$ とおいた.)

図-4 解析解と理論解の比較

とでメッシュ間隔を 0.5m とし、計算領域の側方を完全反射境界とする。計算時間間隔は $\Delta t=0.00025s$ とする。また、底面の勾配は十勝川における浅海域及び河川域の勾配^[5]を実際に与え、0m~400m までを浅海域、残り 550m までを河川域とする。各層の密度は、表面波に対する検討を行うため、上層を $1.000kg/m^3$ 、下層を $1000 kg/m^3$ として与える。

数値解析の初期条件として、領域の左側に半波長 50m で初期振幅がそれぞれ 1m, 2m, 3m 及び 4m の双曲線関数を静水状態に与える。数値解析は、強非線形強分散内部波方程式を 2 次オーダ解までを考慮し、それぞれの初期振幅で生じた河川域におけるソリトン波について考察し、その後、発生したソリトン波について、強非線形強分散内部波方程式におけるソリトン波の解と比較し、検討を行う。

5. 表面波の進行に関する数値解析

図-3(a), (b), (c) 及び (d) は、それぞれの初期振幅を与え、発生したソリトン波が河川域において、その形状が安定し始めた時間の結果を示す。図-3(b), (c) 及び (d) については、最初に発生したソリトン波が河川域で安定し始めた時間の結果を示している。解析の結果、浅海域において 1m, 2m, 3m 及び 4m の初期振幅を与えた津波は、全てにおいて河川域でソリトン波として遡上するという結果を得られた。また、そのソリトン波の形状は河川域を約 50m 遡上したところで安定するという結果を得られた。

発生したソリトン波は、浅海域から河川域に向かう津波が分裂したことにより発生したものであることが確認できる。これは、津波が河川域に向かって進むにつれて、非線形効果によって周期が短い波が津波の前面に卓越することで、分裂効果が表れることにより、発生したと考えられる。図-3(a)において、河川域を遡上するソリトン波が 1 波であることに対し、図-3(b)に示される結果において、先行しているソリトン波の後方に存在する津波において、さらに分裂波が発生し始めていることが確認できる。また、図-3(c) 及び (d) の先行しているソリトン波の後方に 1~2 波のソリトン波が発生していることが確認された。

これは、初期振幅が大きい津波を与えると、波高水深比が大きくなるためより高い波が発生し、非線形効果も大きくなり、分裂効果も大きくなったものと考えられる。これらの結果から、河川域に向かう津波は、ソリトン波として河川を遡上し、ある大きさを超えた津波は水位の高い部分と低い部分の流速の差により非線形効果が強くなり、津波の分裂効果が大きくなるため、複数のソリトン波状段波として河川を遡上する可能性があると考えられる。

6. 理論解と解析解の比較

図-4(a), (b), (c) 及び (d) は、図-3 において確認されたソリトン波と、3 次オーダの理論解によるソリトン波の解を比較したものである。比較の結果、図-4(a)において、数値解析解は理論解にほぼ一致するという結果

が得られた。よって、図-4(a)で発生した波はソリトン波であったといえる。

一方で、図-4(b), (c) 及び (d) は、理論解と比べ、数値解析解は切り立った波形を示しており、波長に大きな違いが現れた。強非線形強分散内部波方程式は流速の鉛直分布を詳細に再現できるという特徴がある。つまり、展開次数を多くすることで、鉛直流速分布における近似曲線の次数を大きくすることができる。したがって、より再現性の高い解析結果を示すには、展開次数を多くする必要がある。

理論解におけるソリトン波の解が 3 次オーダ解まで考慮していることに対し、今回の計算では、方程式の展開次数を 2 次オーダ解までしか考慮していない。そのため、流速の鉛直分布が十分に再現されず、理論解と異なる形状が与えられた可能性がある。これらの結果から、数値解析におけるオーダを上げて解析を行うことで、理論解と解析解が一致する可能性があると考えられる。また、今回の解析で使用したメッシュ間隔では波に対する解像度が低く、表面波を正確に再現できなかった可能性があるとも考えられる。今後の課題として、メッシュ間隔をさらに細かくした数値解析についても考察していきたい。

7. 結論

本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 浅海域を進行する津波は、河川域に進むにつれて分裂効果によりに分裂し、ソリトン波として河川を遡上し、形状が安定し始める。
- (2) 初期振幅を大きくすると、強くなった分裂効果により、複数のソリトン波状段波として河川を遡上する。
- (3) 2 次オーダ解までを考慮した解析解は、理論解と比べると波長が大きく異なるため、3 次オーダ解を考慮した解析を行う必要があると考えられる。

今後は、方程式の展開次数及びメッシュ間隔を再考した解析により、河川を遡上する波がソリトン形状であることを確かめた後、2 次元波におけるソリトン波の河川遡上について解析を行う。

参考文献

- [1] 平成 23 年東北地方太平洋沖地震により、津波が河川を遡上した痕跡について
http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/press/press_h2303/22_sanrikujishin_23.pdf
- [2] 柿沼太郎(2001): 透水性海浜における内部波の挙動の数値計算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.146-150
- [3] Nakayama, K. and T. Kakinuma (2009): Internal wave in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, Int. J. Numer. Meth. Fluids.
- [4] Kakinuma, T. and K. Nakayama (2007): Numerical simulation of internal waves using a set of fully nonlinear internal-wave equations, Annual J. Hydraulic Eng., JSCE, Vol.51, CD-ROM.
- [5] 津波の河川遡上解析の手引き
<http://www.jice.or.jp/siryo/t1/pdf/tsunami.pdf>