

河川を遡上する津波の 3 次元数値解析

理工学域工学系 柿沼 太郎

1. 序 論

2011 年東日本大震災では、沿岸域に到達した津波が河川を遡上し、河川堤防を越えて沿川地域に甚大な被害をもたらした(田中ら, 2011). これ以前にも, 1983 年日本海中部地震(首藤, 1984)や, 2003 年十勝沖地震等の際に, 河川を遡上する津波が確認されている. こうした河川津波は, 一般に, 陸上を遡上する津波に比べて伝播速度が大きく, 遡上距離が長い. そのため, 沿岸域から遠く離れた内陸域にも, 被害が拡大する危険性が指摘され, 河川津波に対する対策が重要視され始めている(河川津波対策検討会, 2011). 河川津波に関しては, これまで, 河床勾配が津波の伝播特性に影響を及ぼすこと等が検討されている(e.g. 茅根ら, 2014). ただし, 既存の研究では, 現地河川における複雑な実現象を対象とすることが多く, 入射波や河川の各条件が, 津波の伝播に与える影響に関しては, 不明な点が多い. そこで, 本研究では, 河川津波の基礎的な特性を把握することを目的として, モデル地形を対象とした 3 次元数値解析を行ない, 河川幅, 入射波波高, 水深や河口形状の違いが, 遡上する津波の伝播過程にどのような影響を及ぼすのかを調べる.

2. 数値解析の手法及び条件

数値モデルとして CADMAS-SURF/3D(沿岸技術研究センター, 2010)を適用し, 図-1 に示すような河道を有する河川内の 3 次元流体運動を対象とする.



図-1 一様単断面を有する河川の平面形状

ここで, 線対称性より河川の中立軸を完全反射境界とし, 中立軸から右岸側のみを計算対象領域としている. 河川断面の形状を矩形とし, 一様単断面の河川を対象とする. 本研究では, 河川幅 W が一様であるとする. 静水深は, 図-1 に示す白色の水域内で一様とする. 水域内の静水深 h_0 を 2.5 m, 3.0 m, または, 5.0 m とする. 造波位置を $x = 0.0$ m とし, 河口位置を $x = 100.0$ m とする.

海域及び河川上流端の境界には, Sommerfeld の放射条件を適用する. 鉛直方向上向きを z 軸の正の方向とし, 静水位を $z = 0.0$ m とする. 簡単のために, 底面摩擦及び河川流量の影響を無視する. 計算格子間隔は, $\Delta x = 0.5$ m, または, 1.0 m とし, $\Delta y = 1.0$ m とする. また, $\Delta z = 0.05$ m, または, 0.1 m とする. 計算時間間隔は, CFL 条件を満足するよう自動的に決定される.

入射波は, 孤立波とし, 入射波波高 H_0 は, y 軸方向に一様に 0.25 m, または, 0.5 m とする. なお, 河川堤防が十分に高いとし, 河川の氾濫を考慮しない.

3. 河川幅が河川津波に及ぼす影響

図-1 において, $\theta = 90.0^\circ$ とする. すなわち, 海岸と河岸が直角する場合を対象とする. 静水深を $h_0 = 2.5$ m とし, 入射波は, 波高 $H_0 = 0.25$ m の孤立波とする. 河川幅を $W = 10.0$ m, 20.0 m, 30.0 m, 40.0 m, 50.0 m, 60.0 m, 70.0 m, 80.0 m, 90.0 m, または, 100.0 m とする. 図-2(a) に, 図-1 において陸域がない場合, すなわち, 全領域が海域で, 河道がない場合の水面形の時間変化を示し, また, 図-2(b) に, 河川幅が $W = 50.0$ m の場合の水面形の時間変化を示す.

(様式 1)

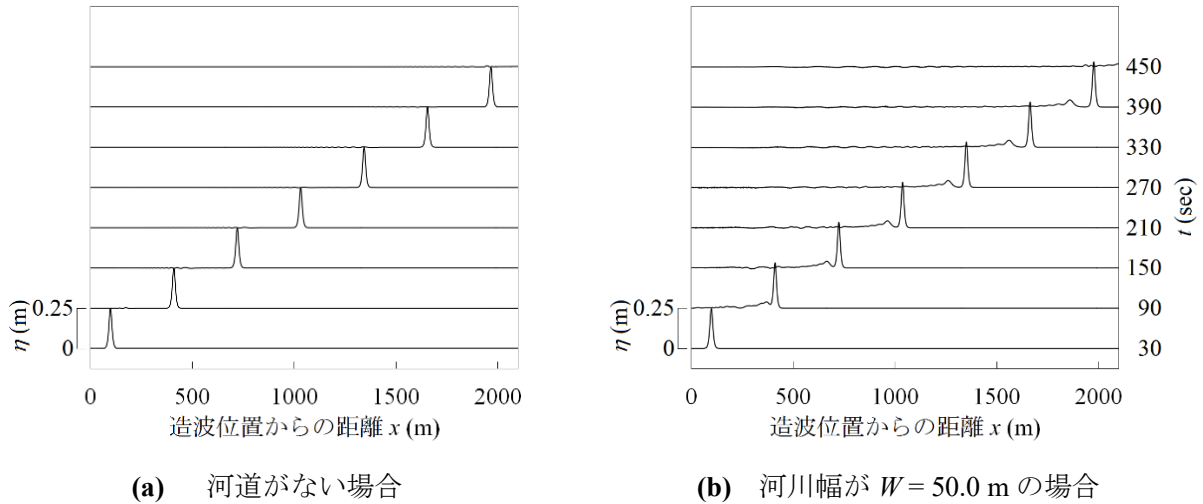


図-2 図-1 の $y = 0.0$ m における水面形の時間変化

ここで、河川中立軸が位置する $y = 0.0$ m における水面形の時間変化を示す。また、 η は、水面変動である。河道がない場合、孤立波が波形を変えずに伝播していることが確認できる。これに対して、河川幅 W が 50.0 m の河道がある場合、波高が徐々に増加し、分裂波が生じている。

図-3 に、河川幅 W が 50.0 m である場合の、河川中立軸が位置する $y = 0.0$ m と、河岸位置の $y = 25.0$ m における、 $t = 30.0$ s、 60.0 s 及び 90.0 s の水面形を示す。

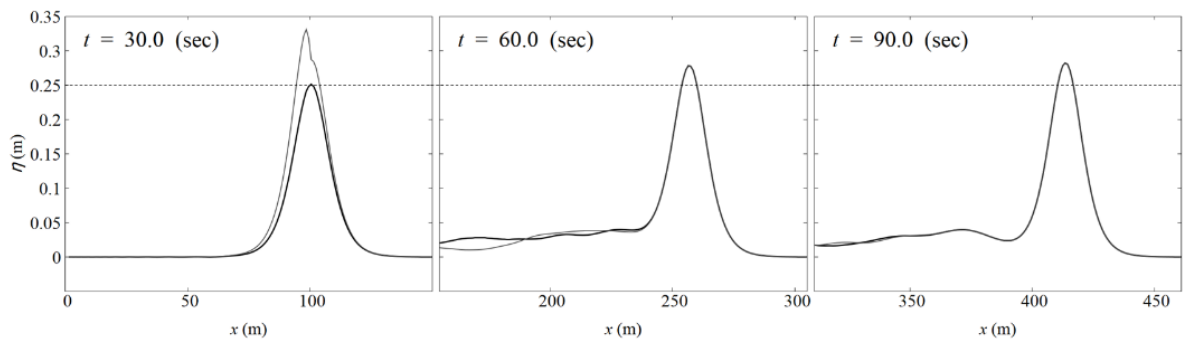


図-3 河川幅 $W = 50.0$ m の場合の各時刻における水面形 (黒色: 河川中立軸位置 ($y = 0.0$ m), 灰色: 河岸位置 ($y = 25.0$ m))

時刻 $t = 30.0$ s のとき、海岸で反射した波の一部が回折して入射波とともに河川内へ進入するため、河岸近傍の波高が大きくなり、河川の横断方向で波高に違いが生じる。河岸近傍では、この波高増加に伴い、波峰のピーク付近の曲率半径が低減し、また、波峰のピークが、河道がない場合よりも後方に位置して、峰前面に、段が見られる。その後、津波が伝播するにつれて、次第に波高が河川の横断方向に一樣となり、その波高は、 $t = 60.0$ s において、入射波波高よりも大きくなっている。そして、 $t = 90.0$ s では、水面形の曲率効果により、最大水位が更に上昇しており、また、第 1 波の背後に、分裂波の生成が確認できる。

図-4 に、様々な河川幅 W の場合に対する、 $y = 0.0$ m に沿った、各地点における水面変動の最大値、すなわち、津波高さ η_{\max} の分布を示す。河川幅が狭いほど、各地点における津波高さが大きく、津波高さの増加率は、入射波波高と比較して、 $W = 10.0$ m の場合に、最大で約 56.6% 、また、 $W = 100.0$ m の場合に、最大で約 7.0% となった。先に述べたように、津波が伝播するにつれて、次第に波高が河川の横断方向に一樣となるが、河川幅が狭いほど、波高が河川の横断方向に一樣となるまでにかかる時間が短いため、河口から $x = 300.0$ m 程度までの間において、津波高さのピークが、河川幅が狭いほど、河口に近い位置に生じる。また、河口付近での津波高さの増加率が大きいほど、この後に現れる水面形の曲率効果が強くなる。河川幅が狭い $W \leq 80.0$ m の河川では、河口から $x = 300.0$ m 程度までの間に現れる津波高さの第 1 のピークより上流において、水面形の

(様式 1)

曲率効果により津波高さが増加し、第 2 のピークが現れる。この第 2 のピークの発生位置は、河川幅に依存し、これより上流では、徐々に津波高さが低減する。 $W = 10.0$ m の場合、河口付近に位置する第 1 のピークの津波高さの増加率は、入射波波高と比較して、約 33.7 % であり、また、第 1 のピークより上流で、水面形の曲率効果によって現れた第 2 のピークの津波高さの増加率は、約 56.6 % である。一方、 $W = 50.0$ m の場合は、第 1 のピークの津波高さの増加率は、約 10.6 % であり、第 2 のピークの津波高さの増加率は、約 13.6 % となっている。他方、河川幅が広い $W \geq 90.0$ m の河川では、水面形の曲率効果が弱く、顕著な第 2 のピークが認められない。

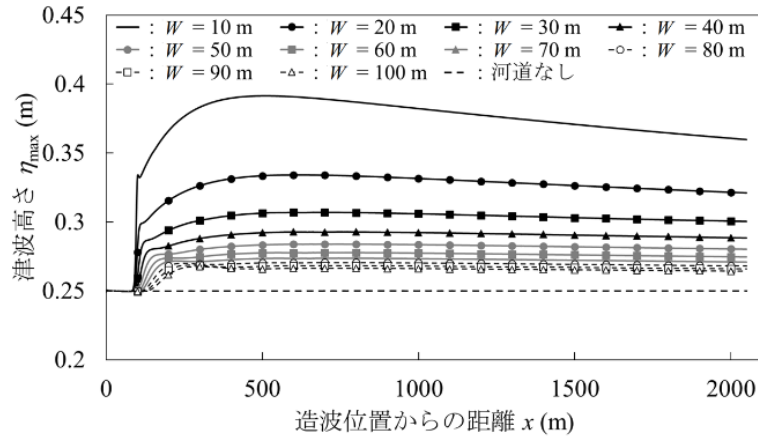


図-4 様々な河川幅の場合における $y = 0.0$ m に沿った津波高さ η_{\max} の分布

4. 入射波波高が河川津波に及ぼす影響

図-1 において、 $\theta = 90.0^\circ$ とし、静水深を $h_0 = 2.5$ m とする。河川幅 W は、20.0 m、または、50.0 m とする。また、入射波は、入射波波高 H_0 が、0.25 m、または、0.5 m である孤立波とする。ここでは、孤立波の代表波長 λ_s を次式で定義する。

$$\lambda_s = \int_0^{50h_0} \eta dx / H_0 \quad (1)$$

式(1) より、静水深 $h_0 = 2.5$ m の場合、波高 $H_0 = 0.25$ m 及び 0.5 m の孤立波の代表波長 λ_s は、それぞれ、19.3 m 及び 13.8 m となり、また、代表波形勾配 H_0/λ_s は、それぞれ、0.013 及び 0.036 となる。

図-5 に、河川中立軸が位置する $y = 0.0$ m に沿った相対津波高さ η_{\max}/H_0 の分布を示す。

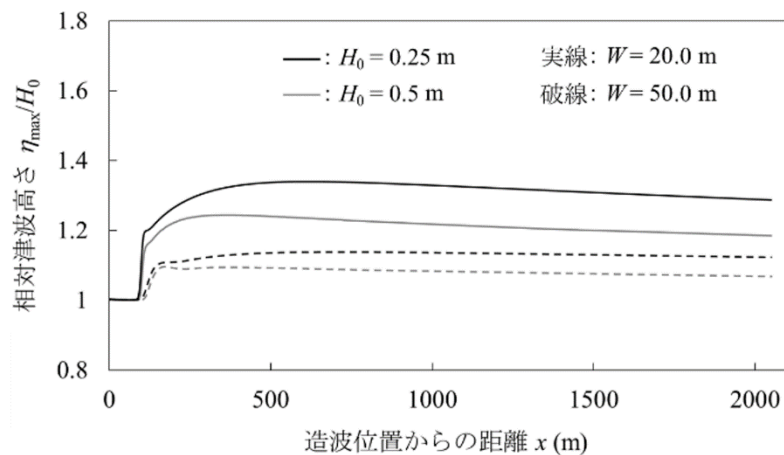


図-5 $y = 0.0$ m に沿った相対津波高さ η_{\max}/H_0 の分布 (黒色: $H_0 = 0.25$ m, 灰色: $H_0 = 0.5$ m; 実線: $W = 20.0$ m, 破線: $W = 50.0$ m)

(様式 1)

いずれの河川幅の場合も、代表波長が大きい場合に、相対津波高さが大きくなっている。これは、入射波の代表波長が大きいほど、河川内に進入する反射波のエネルギーが大きくなり、水面形の曲率効果が強くなるためであると考えられる。

5. 静水深が河川津波に及ぼす影響

図-1において、 $\theta = 90.0^\circ$ とし、静水深を $h_0 = 2.5$ m, 3.0 m, または、5.0 m とする。入射波は、波高が $H_0 = 0.5$ m の孤立波とする。入射波の代表波長 λ_s は、式(1) より、静水深 $h_0 = 2.5$ m, 3.0 m 及び 5.0 m の場合に、それぞれ、13.8 m, 18.2 m 及び 37.9 m であり、また、代表波形勾配 H_0/λ_s は、それぞれ、0.036, 0.027 及び 0.013 である。

図-6に、静水深 h_0 、入射波波高 H_0 及び河川幅 W が異なる 15 ケースの、入射波の代表波長・河川幅比 λ_s/W と、相対津波高さの最大値 $\eta_{\max, \text{peak}}/H_0$ の関係を示す。これらの両者に、正の相関が認められる。

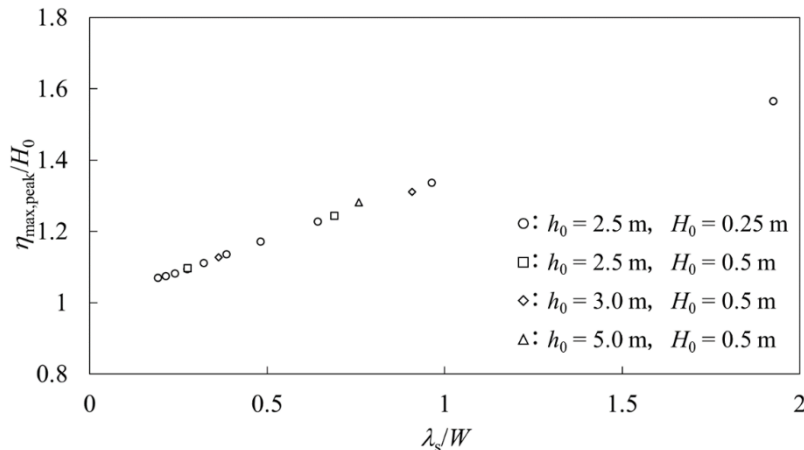


図-6 入射波の代表波長・河川幅比 λ_s/W と相対津波高さの最大値 $\eta_{\max, \text{peak}}/H_0$ の関係

6. 河口形状が河川津波に及ぼす影響

図-1において、静水深を $h_0 = 3.0$ m とし、河岸と海岸がなす角の角度を $\theta = 45.0^\circ$, 60.0° , または、 90.0° とする。また、入射波は、波高 $H_0 = 0.5$ m の孤立波とする。図-7に、河川中立軸が位置する $y = 0.0$ m に沿った津波高さ η_{\max} の分布を示す。

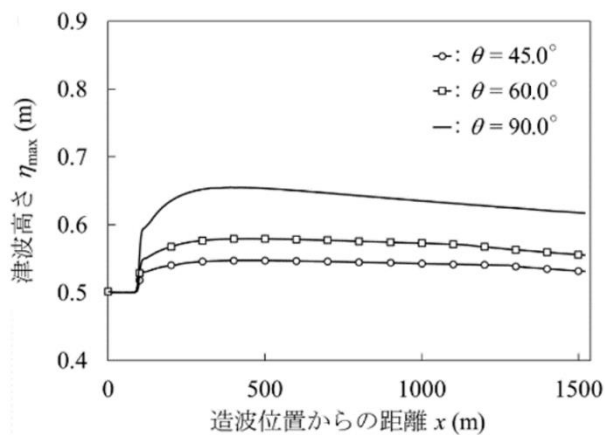


図-7 河岸と海岸がなす角の角度 θ が異なる場合の $y = 0.0$ m に沿った津波高さ η_{\max} の分布

角度 θ が大きいほど、津波高さが大きい。これは、角度 θ が鋭角の場合、反射波が河川内に進入しにくくなるためであると考えられる。津波高さの増加率の最大値は、入射波波高と比較して、 $\theta = 45.0^\circ$, 60.0° 及び 90.0° の場合に、それぞれ、約 9.5%, 約 16.0% 及び 約 31.1% である。

(様式1)

7. 結 論

河川津波の基礎的な特性を把握することを目的として、モデル地形を対象とした3次元数値解析を行ない、河川幅、入射波波高、静水深や河口形状の違いが、遡上する津波の伝播過程にどのような影響を及ぼすのかを調べた。河川に津波が進入する際に、海岸で反射した津波が回折して河川内に進入し、河岸近傍において、津波高さの第1のピークが現れた。その後、津波の河川遡上に伴い、水面形の曲率効果によって波高が増加し、津波高さの第2のピークが出現した。そして、峰の背後には、分裂波が発生した。河川幅が狭いほど、また、入射波波長が大きいほど、津波高さの入射波波高に対する増加率が大きくなった。また、入射孤立波の代表波長・河川幅比と、相対津波高さの最大値には、正の相関のあることがわかった。ただし、河川幅が広い場合には、こうした水面形の曲率効果が弱く、津波高さの顕著な第2のピークが認められなかった。更に、河岸と海岸がなす角が鋭角である場合には、海岸で反射した津波が河川内に進入しにくく、津波の河川遡上における水面形の曲率効果が弱くなるため、津波高さの増加率が低減した。

謝辞: 数値解析において、鹿児島県土木部の楠原 嘉氏に協力を得た。ここに、感謝の意を表す。

参考文献

沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, 沿岸技術ライブラリー, No. 39, 235p., 2010.

河川津波対策検討会: 河川への遡上津波対策に関する緊急提言, <http://www.mlit.go.jp/common/000163992.pdf>, 2011.

茅根康佑・盧 敏・田中 仁・梅田 信・真野 明・佐々木幹夫・川越清樹・土屋十圀・三戸部佑太: 東北三県における津波の河川遡上特性, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 70, No. 4, pp. I_1165-I_1170, 2014.

首藤伸夫: 秋田県北部海岸における日本海中部地震津波, 海岸工学講演会論文集, 第31巻, pp. 247-251, 1984.

田中 仁・Tinh, N. X.・盧 敏・Dao, N. X.: 2010年チリ地震津波の東北地方河川への遡上-河口地形と遡上特性との関連-, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 67, No. 4, pp. I_1627-I_1632, 2011.