

津波の河川遡上に関する研究

理工学域工学系 柿沼 太郎 ・ 工学部 中村 祐輔

1. 河川を遡上する津波の危険性

津波は、河川、運河や水路があると、これらに進入し、内陸深くまで進行しやすくなる。そのため、堤防や水門を越えて河川を遡上した津波が、市街地や田畑等に浸水被害をもたらす可能性がある。平野部を流れる感潮河川等において、河川水の流下速度があまり大きくない場合、河川を進行する津波は、一般に、陸上を遡上する津波よりも、摩擦や効力を受けにくく、位相速度が大きい。従って、河川に進入した津波は、海岸から陸上に遡上した津波よりも先に、市街地等に到達する危険性を有する。

2003年十勝沖地震や、2016年福島県沖地震では、津波が河川に遡上する様子が、自衛隊や市民によって撮影されている。いずれの津波も、河川進入時の津波高さがそれほど大きくなかったこと、また、河川伝播中に津波が分裂したことによって、河川堤防を越える波高を有さなかったため、河川津波による大きな被害は、発生しなかった。ただし、前者では、河川堤防の地震による破損が、幾つもの地点で見られた。このような場所に、大波高の津波が遡上していたならば、複合的な要因によって浸水被害が生じていたことが示唆される。

他方、2011年東北地方太平洋沖地震津波では、巨大な津波が、砂洲やラグーンといった河口地形の破壊をもたらした。宮城県気仙沼市の御伊勢浜海岸^{おいせ}では、**図-1**の衛星写真が示すように、地盤沈下の影響も含めて、50 mもの幅の砂浜海岸が消失した (Kakinuma ら, 2012)。



(a) 2011年東北地方太平洋沖地震津波前

(b) 2011年東北地方太平洋沖地震津波直後

図-1 宮城県気仙沼市御伊勢浜海岸の衛星写真 (© 2010 Google, © 2011 Cnes/Spot Image, Image © 2011 TerraMetrics)

このように巨大な津波は、幾多の地域の海岸堤防や水門を越えた。岩手県大船渡市三陸町越喜来^{おきらい}地区は、越喜来湾の湾奥に位置するが、津波が、**図-2(a)**に示す^{ほれい}甫嶺川水門を越えて内陸に侵入した。越喜来地区は、**図-2(b)**に示すように、壊滅的な被害を受けている。

また、北上川では、北上大堰の天端を越えた津波が、河口から約 49 km 遡上し、堤内地浸水域の、海岸線から津波到達点までの最大距離約 12 km より遠くに及んでいる (田中ら, 2011)。

更に、津波によって、**図-3**に示すような落橋も数多く発生しているが、こうした落橋は、流体力のみならず、漂流物の衝突が加わり発生した可能性もある。

2. 河川における津波対策

一般に、河川堤防、堰や水門は、流水が下流方向に作用する場合のみを考慮して設計される。従って、河川に大流量の逆流をもたらす津波遡上の対策を講じておく必要があるが、現時点では、津波に伴う流体力や、浸水、そして、河口周辺の地形の脆弱性等に関して、あまり研究が進んで

いない。また、前述のように、地震動が激しい地点での河川堤防の破損は、河川を遡上した津波による浸水被害に繋がる可能性がある。今後、河川を遡上する津波による水位上昇や流体力を考慮して、河川設計を行なう必要がある。



(a) 甫嶺川水門付近



(b) 越喜来地区の内陸部

図-2 岩手県大船渡市三陸町越喜来地区の被災状況 (2011年4月4日撮影)



図-3 JR 気仙沼線の落橋 (2011年4月5日撮影)

ただし、河川に進入した津波を内陸でくい止め、市街地の浸水被害を抑制する試みは、以前より行なわれている。その一例として、図-4 に、宮城県の八幡川防潮水門を示す。これは、高潮及び津波の両者に対して、防護効果を期待する水門である。



図-4 宮城県の八幡川防潮水門 (2010年4月12日撮影)

また、**図-5** は、大阪府の^{あじ}安治川水門を示している。安治川水門は、日本で最初に建設された、主水門がアーチ型ゲート式の水門であり、供用開始は、1970年であった。主水門の経間は、57mであり、閉門所要時間は、約30分である。また、副水門は、スイングゲート式で、経間は、15mである。船舶の進入禁止索の張り出し等も含めて、一連の全操作には、50分程度を要する。



図-5 大阪府の安治川水門（2016年11月19日撮影）

大阪府には、多くの天井河川が存在し、こうした水門と、**図-6**に示すような、道路入口に設置された防潮鉄扉等を組み合わせて、市街地への浸水を抑制する。**図-6**に示す防潮鉄扉は、尻無川水門に近接して設置された、径間8.4m、扉体高さ1.79mの鉄扉であり、電動の場合、開閉速度は、3m/minである。



(a) 尻無川水門（奥）と尻無川左岸1号防潮鉄扉（手前左側）



(b) 尻無川左岸の市街地（奥）と尻無川左岸1号防潮鉄扉（手前右側）

図-6 大阪府の尻無川水門に隣接する尻無川左岸1号防潮鉄扉（2016年11月19日撮影）

大阪府が有する、主水門がアーチ型ゲート式の水門数は、3基であり、安治川水門、尻無川水

門と、**図-7**に示す木津川水門である。**図-7(b)**に示された曲線形のガイドに沿って、水門が稼動する。なお、増水時や、水門上流側の河川水の流下流量が大きい場合には、こうした水門を使用する際に、上流側の水位を低下させるための排水施設等も併用する必要がある。排水施設としては、例えば、大阪市にある毛馬排水機場や、泉大津市にある八軒川排水機場が挙げられ、排水能力は、前者が、約 330 m³/s、後者が、約 4.2 m³/s である。このうち、毛馬排水機場は、寝屋川流域の洪水対策機能も併せ持つ施設である。



(a) 木津川水門 (右) と三軒家水門 (左)



(b) 木津川水門の左岸側の側面

図-7 大阪府の木津川水門と三軒家水門 (2016年11月19日撮影)

図-7(a)には、木津川水門の左側に、三軒家水門も示されている。大阪府は、アーチ型ゲート式の3大水門の他に、三軒家水門、正蓮寺川水門や、六軒家川水門といった水門も有している。これら3水門の形式及び径間を**表-1**に示す。また、以上の大阪府の6水門の位置を**図-8**に示す。

表-1 大阪府の正蓮寺川水門、六軒家川水門及び三軒家水門の型式及び径間

水門名	型式	径間 (m)
正蓮寺川水門	ローラゲート	14.0
六軒家川水門	ローラゲート3門	8.5, 14.0, 8.5
三軒家水門	走行式スルースゲート	14.6

なお、**図-8**のGは、堺泉北港堺2区基幹的広域防災拠点の位置を示している。これは、京阪神都市圏における災害応急活動の核となる施設であり、供用開始は、2012年であった。本施設は、上町断層帯地震や、東南海・南海地震等の大規模災害の際に、救援物資の中継基地や、被災地支援隊のベースキャンプとして使用される。

図-9に、本施設の写真を示す。**図-9(a)**に示す国土交通省近畿地方整備局近畿圏臨海防災センター内には、食料等の物資や、**図-9(b)**に示す防水板等が備えられ、また、海水淡水化装置も設置されている。そして、**図-9(c)**に示すヘリポートにより、ヘリコプタによる災害医療支援等の重要な機能を担うことができる。更に、**図-9(c)**に示されたテント内には、**図-9(d)**に示すような重機や土木作業用機材を含む様々な物品が保管されている。上記の水門といった防護施設で防

ぎ切れないレベル2の災害に対しても、多面的に検討し、十分な備えをしておく必要がある。



図-8 大阪府の水門のうちの6水門の位置（地理院地図を改変した。なお、Gは、堺泉北港堺2区基幹的広域防災拠点の位置を示す。）



(a) 近畿圏臨海防災センター (b) 防水板 (c) ヘリポートとテント (d) テント内の重機

図-9 堺泉北港堺2区基幹的広域防災拠点（2016年11月15日撮影）

3. 河川を遡上する津波の数値解析

河川において津波対策を行なうためには、数値解析を実施し、想定される津波がどのように河川に進入し、遡上するのかを調べる必要がある。本研究では、河川堤防の必要堤高等に関して論じることを目的として、様々な河道形状を有する河川に対する津波の遡上に関して、数値解析に基づき検討した。そして、いかなる河口が津波に脆弱であるのか、また、支川の存在や、河道の屈曲が、津波の伝播にどのような影響を及ぼすのかを調べた。その際に、河川勾配及び河川流量の影響を無視し、また、津波が大陸棚上で分裂することを考慮して、比較的短周期の波を河口に入射させた。このような条件に対し、非線形浅水方程式系を差分法で解く数値モデルを適用して、河川内の水位や流速を算出した。本報告書では、津波の河川遡上の数値解析結果の一例を示す。

図-10に、周期 T_m が5分の規則波が、鹿児島県の肝属川に入射した場合のシミュレーション結果を示す。ここで、水面変動は、静水位からの水位の変動である。入射波は、波高 H_m が2mであり、図の右端の反射吸収造波境界から、左向きに海域に入射している。入射波は、押し波が引き波に先行する。計算格子間隔を $\Delta x = \Delta y = 5\text{ m}$ 、計算時間間隔を $\Delta t = 0.05\text{ s}$ とした。図-10(a)及び(b)では、静水深の条件が異なっており、海域及び河川域ともに静水深が、図-10(a)及び(b)のそれぞれの場合において、2m及び3mで一様である。両図は、入射開始後26.7分後の水面変動の分布を示しており、静水深の深い(b)の場合の方が、津波の遡上速度が大きく、津波の先端

が、より上流まで進行していることがわかる。

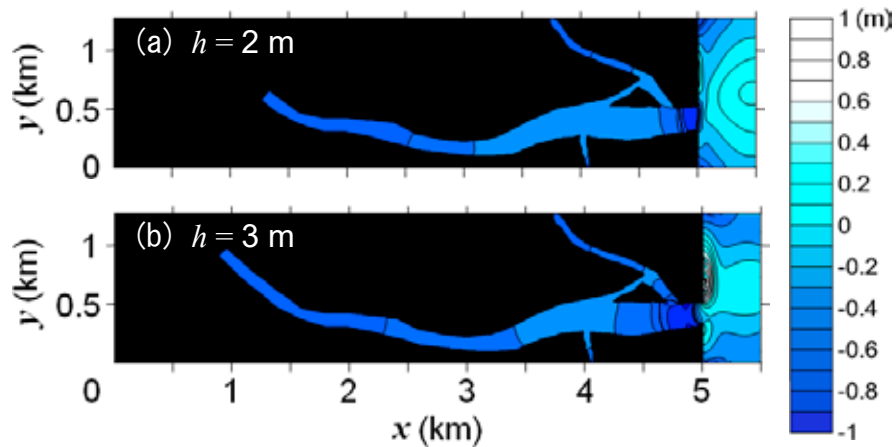


図-10 肝属川を津波が遡上する場合の時刻 $t = 26.7$ min における水面変動の分布 ($H_{in} = 2$ m, $T_{in} = 5$ min)

また、図-10(a) 及び (b) の各場合に対する、図-11 に示す本川河道内の 3 地点 A, I 及び D と、支川河道内の地点 F における水面変動 η を図-12 に示す。

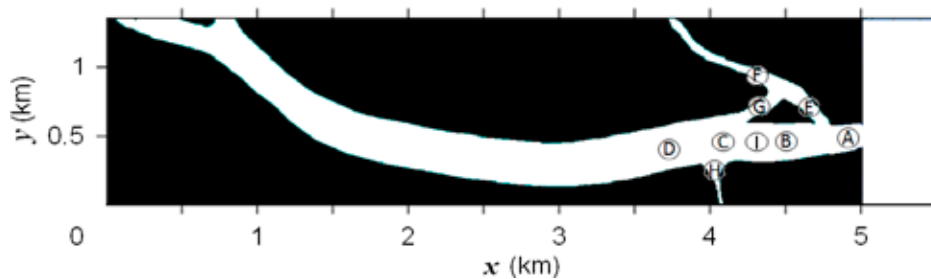


図-11 肝属川河道内の地点 A ~ I の位置

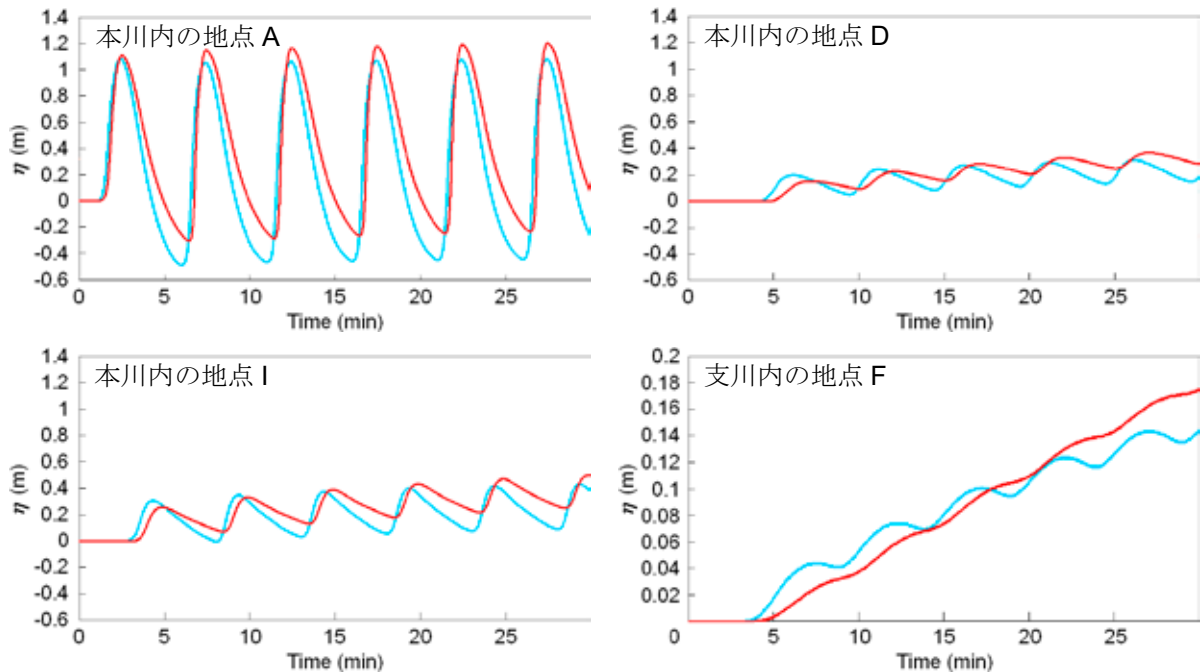


図-12 図-11 に示す地点 A, I, D 及び F における水面変動 (赤色のグラフが、静水深 $h = 2$ m の場合の、また、青色のグラフが、静水深 $h = 3$ m の場合の結果を示す。ここで、入射波の波高及び周期は、それぞれ、 $H_{in} = 2$ m 及び $T_{in} = 5$ min である。)

図-12において、赤色のグラフが、静水深 $h=2\text{ m}$ の場合の、また、青色のグラフが、静水深 $h=3\text{ m}$ の場合の結果を示しており、これより、静水深が深い後者的場合の方が、水面変動の波高が大きいことがわかる。また、静水深 h が 2 m 及び 3 m の両者の場合とも、各地点の平均水位が、時間の経過とともに僅かに上昇している。これは、河口に入射する津波が非線形な波となり、峰と谷が非対称な波形を有し、河川内に流入する質量輸送が生じているためである。図-12 より、静水深が浅い $h=2\text{ m}$ の場合の方が、各地点の平均水位の上昇率が大きいことがわかる。この平均水位の上昇は、支川内の地点 F においても認められ、水面変動の値が、第 3 波の通過時には、静水深が浅い $h=2\text{ m}$ の場合の方が大きくなっている。ただし、河床位置を基準高さとした最大水位は、静水深が深い $h=3\text{ m}$ の場合の方が大きい。なお、本数値解析では、津波に起因しない河川流量を考慮していないことに注意する必要がある。

図-13 に、静水深を 5 m で一様とし、周期 10 分 の規則波を肝属川に入射させた場合のシミュレーション結果を示す。ここで、前述した数値解析と同様に、入射波の波高は、 2 m であり、計算格子及び時間間隔は、それぞれ、 $\Delta x = \Delta y = 5\text{ m}$ 及び $\Delta t = 0.05\text{ s}$ である。河川の複断面を考慮しており、この場合、河床位置を基準高さとした水位が大きく、高水敷上を津波が伝播している。

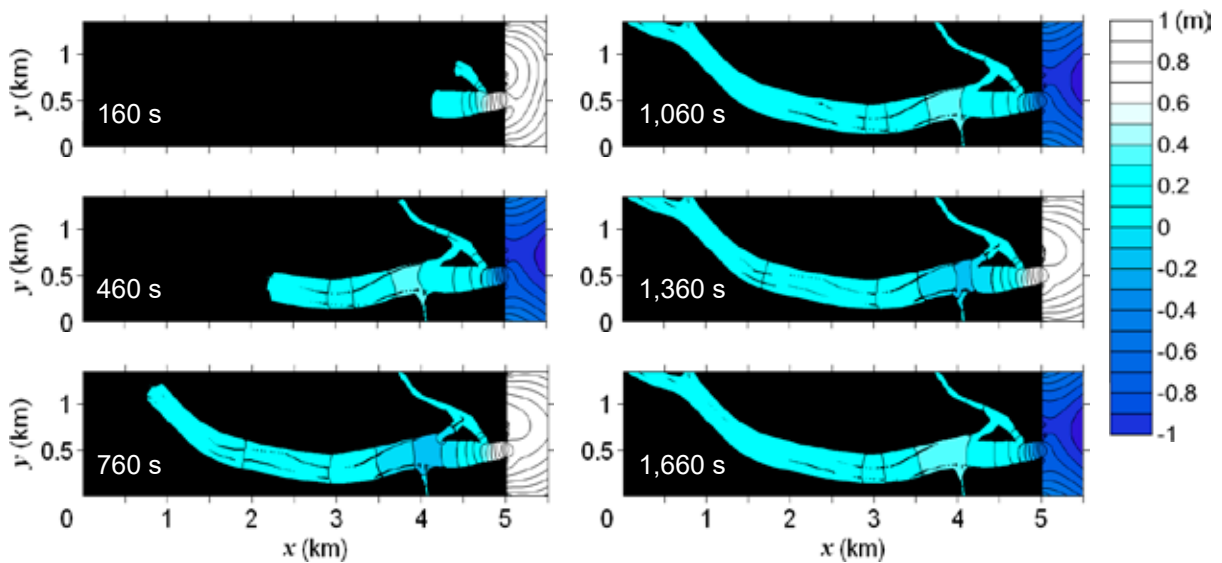


図-13 肝属川を津波が遡上する場合の各時刻における水面変動の分布 ($h = 5\text{ m}$, $H_{in} = 2\text{ m}$, $T_{in} = 10\text{ min}$)

静水深を 5 m で一様とし、周期 10 分 、または、 5 分 の規則波を肝属川に入射させた場合に対する、図-11 に示す本川河道内の 4 地点 A, B, C 及び D、並びに、支川河道内の 4 地点 E, F, G 及び H における水面変動 η をそれぞれ図-14 に示す。周期が長い図-14(a) の場合の方が、各地点における最大水位が大きく、特に、進行する向きを大きく変えて津波が進入する支川の河道内にある地点 G では、周期が長い場合の方が、最大水位が顕著に大きくなっている。なお、地点 G がある支川では、本川から直接この支川に伝播した波と、この支川に、地点 E がある支川に進入してから伝播した波とが重合する。

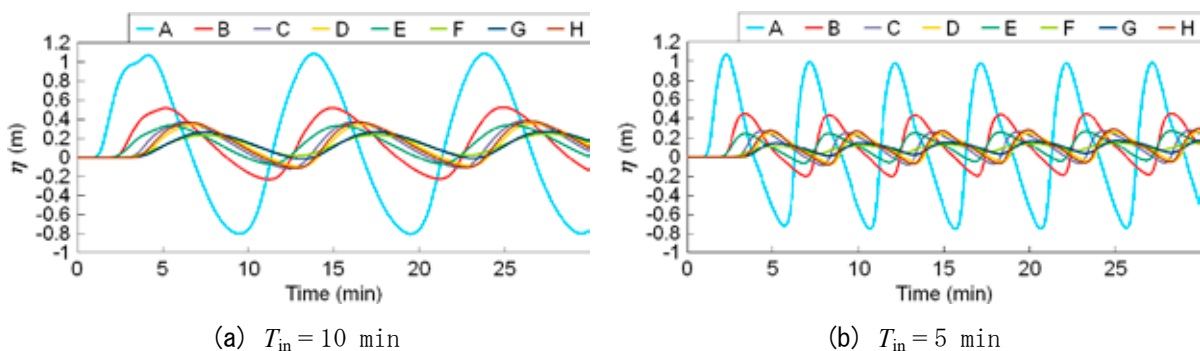


図-14 図-11 に示す地点 A ~ H における水面変動 ($h = 5\text{ m}$, $H_{in} = 2\text{ m}$)

謝辞: 本研究の現地調査において、大阪府の宮崎尚和氏の御協力を得た。また、数値解析において、鹿児島大学の浅野敏之教授に貴重な御助言をいただいた。ここに、感謝の意を表する。

参考文献

田中 仁・真野 明・盧 敏：津波の河川遡上，東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会 予稿集，pp. 38-43, 2011.

Kakinuma, T., Tsujimoto, G., Yasuda, T., and Tamada, T.: Trace survey of the 2011 Tohoku Tsunami in the north of Miyagi Prefecture and numerical simulation of bidirectional tsunamis in Utatsusaki Peninsula, Coastal Eng. J., Vol. 54, No. 1, Article ID 125007, 28 pages, 2012.