

北上川における津波の河川遡上と津波氾濫流 解析から導かれる現地観測データの解釈

DISCUSSION ABOUT OBSERVED DATA BASED ON THE SIMULATION OF
TSUNAMI RUN-UP AND INUNDATION IN THE KITAKAMI RIVER

松井大生¹・内田龍彦²・福岡捷二³

Daiki MATSUI, Tatsuhiko UCHIDA and Shoji FUKUOKA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 博(工) 中央大学研究開発機構教授 (同上)

³フェロー 工博 Ph. D. 中央大学研究開発機構教授 (同上)

There are two major factors which make it difficult to simulate tsunami run-up in the Kitakami River by the 2011 Tohoku Earthquake. Since the water level gauges in the bay or estuary broke due to the huge tsunami, inflow volumes from the ocean and tsunami waves could not be estimated. And, the water running up in the river flowed out to the inundation area not only by overflowing but also levee breaches. It is considered that these flows have significant effects on the behavior of tsunami run-up in the river.

This study aims to discuss the observed data based on the simulation of the tsunami run-up and inundation in the Kitakami River. First, we conducted the simulations using two fault models and discussed the reproducibility, particularly of the inflow conditions of the tsunami. Second, we investigated the simulations with and without levee breaches. Through comparisons between the simulations and observation results, the effects of levee breaches on the tsunami were discussed.

Key Words : *tsunami, run up in rivers, the Kitakami River, inundation, fault model, levee breach, non-hydrostatic quasi-3D model, 2011 Tohoku Earthquake*

1. 序論

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波(以下では今次津波と呼ぶ)は、河川を遡上する津波が堤防越流や破堤氾濫することにより、沿岸域のみならず海岸から離れた沿川地域にも大きな被害をもたらした。海域から伝播してきた津波がどのように河川遡上し、氾濫をするのか、また、その相互作用を理解することは防災対策を講じる上で重要である。このためには、津波の伝播から河川遡上、氾濫流を一体的に再現できる実用的な数値解析法による再現計算結果と、現地観測データとを合わせて検討し、今次津波で生じた現象を説明することが求められる。

著者ら¹⁾は、水深積分モデルの枠組みで流速と圧力の鉛直分布を考慮できる一般底面流速解析法²⁾を、津波解析に応用した「非静水圧準三次元津波解析法」を開発してきた。水位が時空間的に密に計測された北上川の津波河川遡上実験³⁾と比較し、解析結果は各点の水位と河口

部の流速の時間変化を再現したことから、境界条件が適切に与えられた場合においては、この解析法は河川の津波遡上現象を適切に再現できることがわかった。しかし、北上川の今次津波の再現計算では、全体的に水位が高く見積もられており、この原因を究明し、再現性を向上させることが課題として残されていた。

今次津波の再現計算を扱った既往研究の中で、河川遡上を主眼とした研究例は多くない。津波波高が低く、水位が縦断的に密に観測されている利根川では、赤穂・石川⁴⁾や二階堂ら⁵⁾が検討を行っている。前者は河口付近での第一波の最高水位が観測結果に合うように断層モデルの変位量を増加させ、後者は河口での実測水位波形の変位量を引き伸ばして与えることによって、概ね計算結果は河道内の実測波形を再現している。しかし、津波遡上が顕著であった東北地方の河川を対象とした、河川遡上と氾濫流を合わせた検討はほとんど行われていない。

津波遡上実験の解析³⁾や既往の利根川の津波遡上解析^{4),5)}と比較して、北上川の津波解析を難しくさせている主要因は二つ考えられる。一つ目は、湾内や河口部での

水位データが激しい津波によって欠測していることにより、海域から流入する津波の遡上量や波形を検証できない点である。このため、これを決定づける断層モデルの選択は重要である。小園ら⁶⁾は国内で多く用いられている今次津波の断層モデルである藤井・佐竹モデルと東北大学モデルの様々なバージョンを用いて、東京湾内の実測水位波形と計算結果の比較から再現性と有用性を検討している。計算結果と実測値の差に比べて、各断層モデルでの計算結果の差は小さいように見える。しかし、波源域から近く、かつ、大きな津波波高が湾に進入し河川遡上する北上川において、断層モデルによる再現精度の差を知ることは重要である。二つ目は、津波の河川遡上に伴う河道から堤内地への氾濫流である。特に北上川では、大きな津波波高による越流だけでなく、右岸4.1km～4.6kmで大規模な破堤が生じており、その規模の大きさから津波遡上に及ぼす影響は小さくないと考えられる。

そこで本研究では、今次津波の波源域での条件を与える二つの断層モデル、河川を遡上する津波の解析に適切と考えられる「非静水圧準三次元津波解析法」と現地において取得された様々なデータを用い、複数の条件下で北上川の今次津波解析を行う。さらに、計算結果と現地観測データを相互に検証し、考察することで、今次津波で生じた現象を明らかにし、現地観測データのもつ意味や役割を理解することを目的とする。まず、第一に、津波河川遡上解析の再現性の検証を目的として、東北大学モデル(version1.2)⁷⁾と藤井・佐竹モデル(version4.2)⁸⁾の二つの断層モデルよりそれぞれ求めた初期水位を用いた再現計算を行う。その比較から今次津波の再現性、特に海域から流入する津波の波形と遡上量について検討する。第二に、実際に大規模な破堤が生じた北上川右岸4.1km～4.6kmの破堤を考慮した計算を行う。破堤の考慮の有無が再現性にどのように影響するのか、また、河道内の津波遡上や氾濫に及ぼす破堤の影響について検討し、現地観測データと合わせて考察する。

2. 非静水圧準三次元津波解析法の必要性

今次津波に代表される最大レベルの津波は、湾域や河口部において波の変形や地形による複雑な流れを生じる。さらに、その津波が河川を遡上し、堤防越流や破堤を伴う三次元流れを介して、氾濫流と相互作用した結果として、構造物や堤防の被災、局所洗掘へと繋がる。個々の現象が広域から局所の様々なスケールを有して相互作用しており、また、全体のスケールが大きなことに比べ、構造物周辺等の被災に繋がるような現象は局所的であり、三次元性を有する現象である。そのことから、局所的な範囲に高精度なモデルを適用することでは、効果的な防災対策を検討することは難しいと考えられる。そこで、流れの三次元性を考慮でき、種々の現象を一体的に再現

できる本解析法を用いる必要がある。

本研究で用いる非静水圧準三次元津波解析法の概要を示す。本解析法は、水深積分モデルの枠組みで流速と圧力の鉛直分布を考慮できる準三次元解析法である。水深と水深平均流速場は水深積分した連続式と流速と圧力の鉛直分布を考慮した水深積分した水平方向の運動方程式により解かれる。レイノルズ応力は渦動粘性係数 ν_t を用いて表現し、 ν_t は流速鉛直分布の変形による乱れ生産を考慮した水深積分乱れエネルギー輸送方程式を用いた1方程式モデルにより計算する。

流速と圧力の鉛直分布を計算するため、水深積分した連続式、水深積分した水平方向の運動方程式と連立して、渦度の定義式を水深積分した底面流速方程式、水深積分した渦度方程式、水表面の水平方向運動方程式、二重水深積分した連続式及び水深積分した鉛直方向運動方程式を解く。これらの方程式群が流速と圧力の鉛直分布を介して解かれることにより、流れの三次元性を考慮した解析が平面二次元解析の枠組みで可能となる。

これを水面の時空間変化の大きい津波解析に応用するため、水深積分した鉛直方向運動方程式において鉛直方向の非定常項を考慮し、水表面の水平方向運動方程式において、水面における鉛直方向運動方程式を用い水面の鉛直方向圧力勾配項を考慮している。解析法の詳細と実験結果との比較については、文献⁹⁾を参照されたい。

3. 北上川の津波遡上と氾濫流の一体解析

(1) 検討方法と解析条件

内田・福岡による既往の研究⁹⁾では、流れの三次元性の影響は水深が浅く地形が複雑となる湾域や陸域での津波氾濫流では重要となるが、水深の深い場所ではほとんど現れなかった。このことから、本研究では、断層モデルを含む広域の津波伝播解析と追波湾、北上川、氾濫流を含む詳細領域の津波遡上・氾濫流解析の二つのステップに分けて解析を行う。

広域の津波伝播解析において、初期水位は東北大学モデル(version1.2)⁷⁾と藤井・佐竹モデル(version4.2)⁸⁾のそれぞれの断層モデルから、Okada¹⁰⁾の方法で与える。用いる解析法は平面二次元解析法であり、メッシュスケール比1/3(1350～50m)の1wayネスティング手法⁹⁾を適用する(図-1参照)。

詳細領域の津波遡上・氾濫流解析においては、広域の津波伝播解析から求めた50mメッシュの計算結果を用いて、湾域の水位、流速の時空間分布を与える(図-2参照)。詳細領域の解析法は非静水圧準三次元津波解析法である。詳細領域のメッシュサイズは10mであり、震災前の地形に対して地形全体一様に70cmの地盤沈下を考慮して地形データを作成している。津波来襲前の北上川では干潮直後の上げ潮の時間であり、水面勾配がほとんど

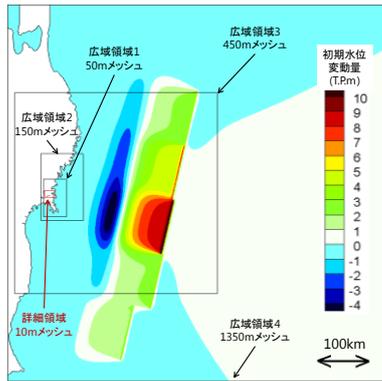


図-1 広域計算領域（東北大学モデルによる初期水位）

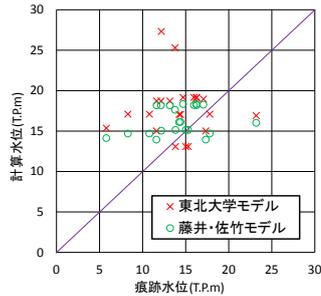


図-3 湾内での計算水位と痕跡水位の比較

ど水平であったと考えられる。津波来襲時の河川の流況を再現するのは困難であるため、本解析では地震発生時の河道内、湾内の初期水位は、T.P.0.0mに断層モデル（東北大学モデル）による沈下量を与えることで考慮した。しかし、後述の観測所の水位波形図からわかるように実測値と計算初期水位には差異が生じており、初期水位の与え方については今後も検討が必要である。北上川の実測水位データより、約49km地点まで津波の遡上が確認されているが、大堰付近の痕跡水位より、大堰下流では反射による水位上昇、大堰上流では津波波高の大幅な減衰が確認されている。このことから、本解析では津波波高が大きい北上大堰より下流に主眼を置き、北上大堰を完全反射条件として取り扱い、その上流には津波が遡上しない条件を設定している。底面粗度は、手引き¹⁾に示されている値を参考に水域は $n=0.025$ とした。高水敷は植生が繁茂していることから $n=0.028$ 、堤内地は全て一様に $n=0.030$ とし、これらのマンニングの粗度係数をManning-Stricklerの式から相当粗度 k_s に換算し与えた。

(2) 断層モデルの比較

断層モデルによる津波遡上の再現精度の差について検討する。図-3は広域計算における湾内での計算水位と痕跡水位の比較である。痕跡水位は東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる調査結果¹²⁾である。どちらの断層モデルでの計算結果も痕跡水位に比べ水位を大きく計算している。これは、解析において湾内の複雑な地形や樹木によるエネルギー減衰の評価が不十分であることが考えられる。今次津波のような大規模な津波では、湾内においても強い流れが発生しており、湾内の抵抗評

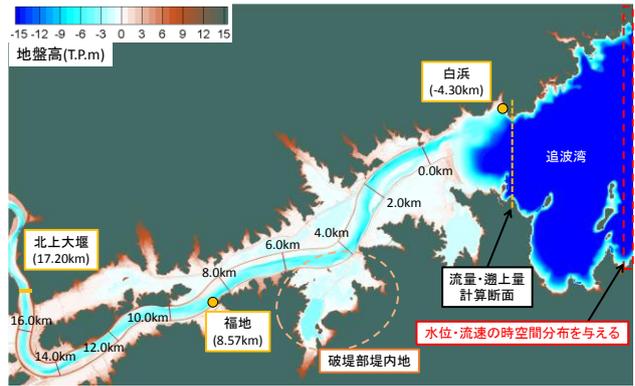


図-2 詳細計算領域

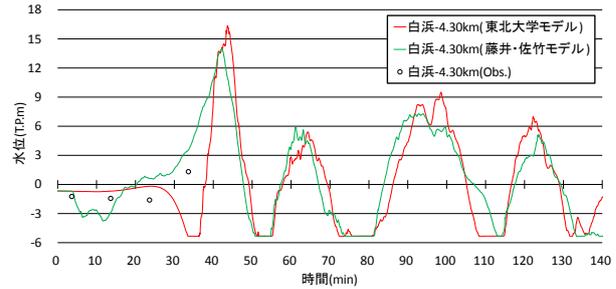
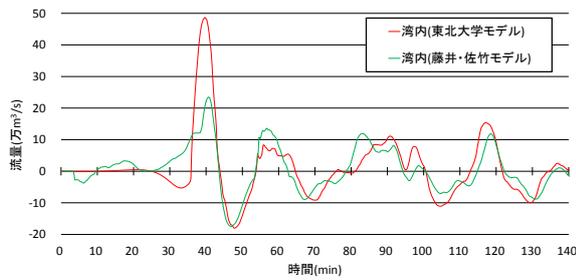
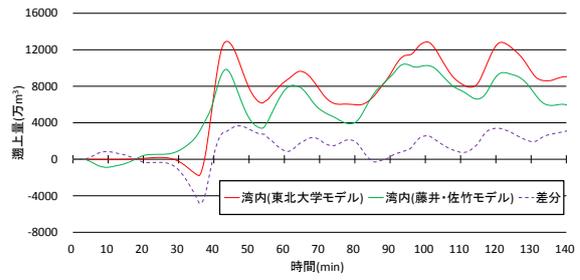


図-4 白浜(-4.30km)での水位波形

価法等については今後さらに検討する必要がある。二つの計算結果を比較すると、東北大学モデルの計算結果では水位を高く計算している点が二つあるが、それ以外の点では、その差は大きくないように見える。図-4は、白浜(-4.30km)での水位波形の比較である。湾内の白浜では、実測データは10min間隔データであり、激しい津波によって津波到達とともに欠測しているため、断層モデルの優劣は議論できないが、東北大学モデルでの計算結果は、大きく水位が低下してから第一波目が到達するのに対し、藤井・佐竹モデルでは、緩やかな水位上昇の後に第一波目が到達する。各波の峰を藤井・佐竹モデルが低く計算しており、各波の到達時間にも差があるものの、第一波目到達以降の全体的な波形については同様であると言える。図-5は、図-2に示す湾内断面での流量・遡上量ハイドログラフである。ここで河道遡上方向の流量を正としている。白浜での水位波形には大きな差は見られなかったものの、(a)を見ると、第一波目の流量波形は大きく異なり、ピーク流量においても大きな差が生じている。(b)は河川への遡上量の時間変化であり、(a)で示した流量を時間積分したものである。第一波目の流量波形の違いにより、遡上量の差が約 $-5,000$ 万 m^3 から約 $+4,000$ 万 m^3 と急激に変化しており、この第一波目の違いは大きなものであると考えられる。しかし、(a)からわかるように、第二波目以降の両者の全体的な流量波形の違いは大きくないことから、第二波目以降の遡上量の差は大きくない。図-6は、福地(8.57km)での水位波形の比較である。両断層モデルでの計算結果を比べると、藤井・佐竹モデルでは、河川への津波遡上量による差から第一波の津波波高が1m近く低下しており、断層モデル



(a) 流量



(b) 遡上量と差分

図-5 河内(図-2 参照)での流量・遡上量ハイドログラフ

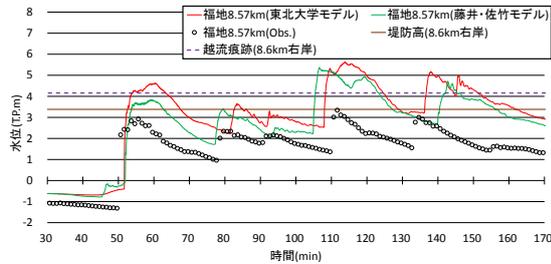


図-6 福地(8.57km)での水位波形

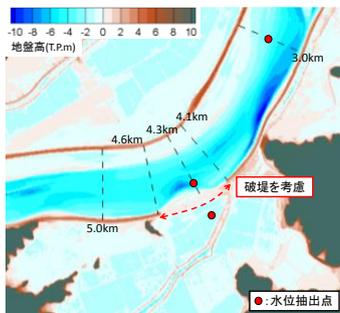


図-7 破堤箇所と水位抽出位置

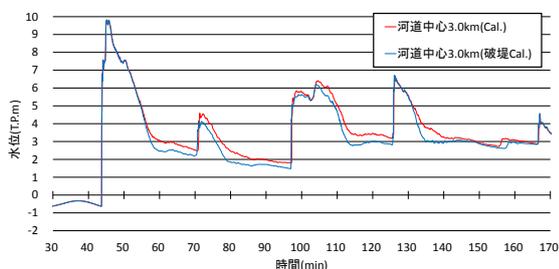


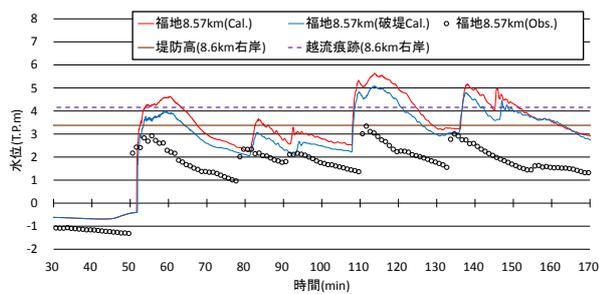
図-8 破堤箇所より下流の河道中心3.0km (図-7参照)での水位波形

による再現性の差が生じている。また、第二波目以降の各波の到達時間はやや異なるが、最大水位の差は実測値との差に比べて小さい。二つの計算結果と実測値を比べると、計算結果は水位を高く計算しており、時間が経過するにつれて実測値との差が大きくなっている。これは、計算結果での津波の遡上量が実際より多いと考えられることと、計算では北上大堰を通過する津波を無視したことにより、河道内の水量が実際より多くなっていることが原因と考えられる。しかし、実測値の詳細な波形の特徴が再現できていないことから、再現性の向上には、河内の解析精度の向上、堰を通過する津波の考慮と合わせて、河道地形や堤防、構造物、破堤等の河道条件を適切に考慮することが重要であると考えられる。

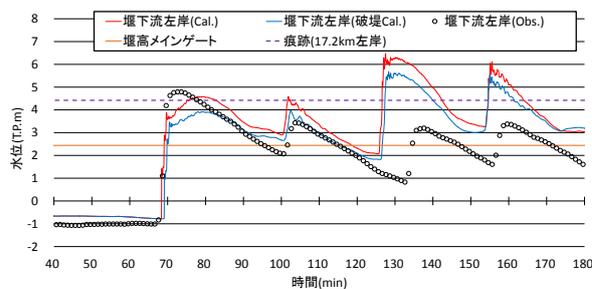
(3) 破堤が津波遡上に与える影響

河道内の津波遡上や氾濫流に及ぼす破堤の効果について検討する。まず、本検討での破堤の考慮方法について示す。実際に津波による大規模な破堤が生じた北上川右岸4.1km～4.6kmの破堤を考慮した計算を行った。今回の検討では簡単のため、計算初期から破堤が生じた箇所の堤防を取り除くことで破堤を取り扱った(図-7参照)。堤防を取り除いた箇所の地盤高は、周辺の堤内地の地盤高よりわずかに高いT.P.+0.5mとした。これは、周辺の堤内地の地盤高が計算上での初期の河道内水位より低いことから、津波到達前に堤内地への浸水が生じないようにしたためである。破堤による地形変化や残存する堤体の高さ、破堤を生じさせる時間については、今後の検討課題である。なお、本検討では東北大学モデルの断層モデルによる計算結果を用いている。

図-8は、河道中心3.0km(図-7参照)での計算水位波形の比較である。破堤箇所の下流にあたる3.0kmでは、第一波目でピーク水位を記録することから、ピーク水位には破堤の影響が表れない。しかし、第一波目の通過後は破堤により河道内の水量が異なるため、破堤を考慮した計算結果の水位が破堤を考慮しない計算に比べ、低くなっている。図-9は、破堤箇所より上流の観測所での水位波形の比較である。(a)の福地8.57kmでは、どちらの計算結果も実測値に比べ、水位を高く計算しているが、二つの計算結果を比べると、破堤により各波の水位を大きく減衰させている。(b)の北上大堰下流左岸17.20kmでは、計算結果は第一波目と第二波目の到達時間を再現しているが、後続の波の到達時間や各波の水位の大小関係を再現できていない。これは、計算では北上大堰を不透過の壁として取り扱い、堰を通過する津波を無視していることや堰周辺の詳細な地形が十分考慮されていないことなどが原因と考えられる。二つの計算結果を比べると、(a)と同様に破堤の考慮により、大きな水位低下が生じていることが確認できる。さらに、破堤の影響によって各波の到達時間の遅れが、(a)と比較してははっきりと見えるようになっている。図-10には、左岸、右岸での河道内のピーク水位縦断分布を示す。どちらの計算結果も痕跡に比べて水位を高く計算しているが、破堤を考慮した計算結果では破堤部より上流で全体的にピーク



(a) 福地 (8.57km)



(b) 北上大堰下流左岸 (17.20km)

図-9 破堤箇所より上流の観測所での水位波形

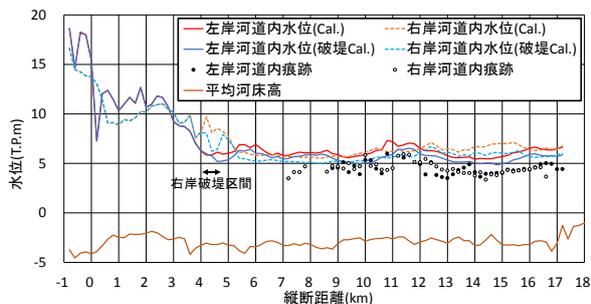
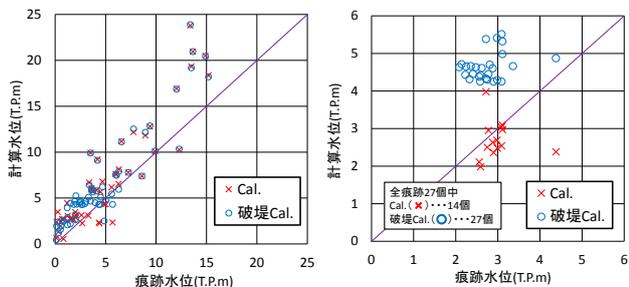


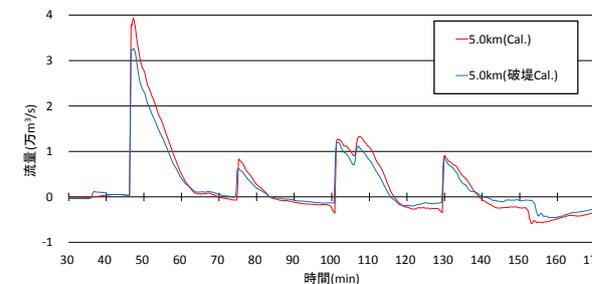
図-10 河道内ピーク水位縦断分布



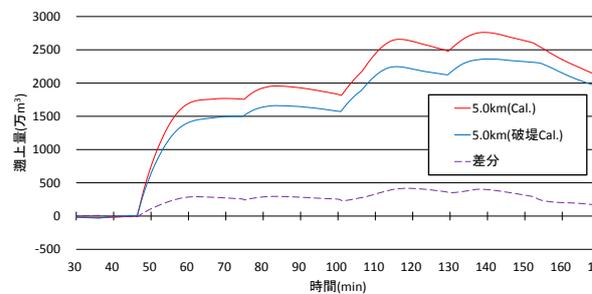
(a) 湾内を除く全体 (b) 破堤部堤内地(図-2 参照)

図-12 計算水位と氾濫痕跡水位の比較

水位が低下し、実測値に近い水位となっている。図-8、図-9からも明らかなように、ピーク水位への破堤の影響は破堤部の上流河道に限定されており、その下流河道への影響はほとんどないことがわかる。図-11は河道5.0km断面での流量・遡上量ヒドログラフであり、(b)は(a)の流量を時間積分した遡上量の時間変化である。(a)を見ると、破堤を考慮することにより、第一波目によるピーク流量が約7,000m³/s低減する。これにより約300万m³の差が遡上量に生じ、結果として破堤部より上流の河道で1m程度の水位差が発生していることがわかる。図-12は計算水位と氾濫痕跡水位の比較である。(a)は湾内を除く全体の比較であり、痕跡水位は東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる調査結果¹²⁾である。計算結果は全体的に水位を高く計算しており、二つの計算水位の差は高い痕跡水位ではほとんど無いが、約T.P.0~6mの低い痕跡水位では見られる。これは、破堤を考慮した計算結果が破堤部堤内地において水位を高く計算し、破堤区間より上流の堤内地では水位を低く計算したためである。(b)は破堤部堤内地(図-2参照)での比較であり、痕跡水位は東北地方整備局により計測されたものである。破堤を考慮した計算結果は、全ての痕跡水



(a) 流量



(b) 遡上量と差分

図-11 河道5.0km断面での流量・遡上量ヒドログラフ

位に対して水位を高く計算している。一方、破堤を考慮しない計算結果では、堤防に近い位置での痕跡水位に対して水位を高く計算しているが、それ以外の点では全体的に痕跡水位より低く水位を計算している。さらに、痕跡計測位置に水が到達しない場合、計算上での最大水位は図中にプロットできず、破堤を考慮しない計算結果において全27個の痕跡のうち、半数の痕跡位置に氾濫流が到達せずに14個しかプロットされていない。河道内の水位波形や痕跡水位に対して計算結果は水位を高く計算していることから、この破堤部堤内地での痕跡水位の再現には、破堤を考慮することが重要であると言える。図-13は破堤部付近での計算水位波形の比較である。水位抽出位置は図-7に示す通りである。河道内の水位波形は破堤の考慮により、水位が大きく低下しているが、全体的な波形に大きな違いはない。堤内地の水位波形は破堤を考慮しない場合、第一波目と第三波目での氾濫流により水位上昇が生じていることが確認できるものの、堤内地の広さに対して越流量が少ないことから、氾濫流によって堤内地の水位が上昇しにくい。このため、図-12(b)に示すように痕跡位置に氾濫流が到達しない結果になったと考えられる。一方、破堤を考慮した場合には堤内地の

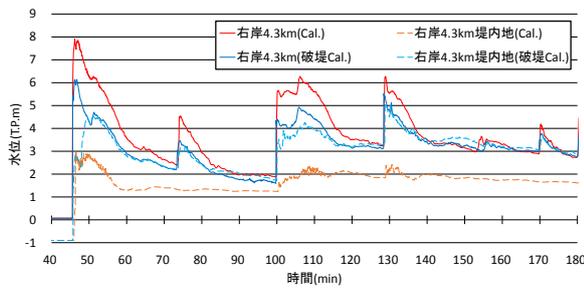


図-13 破堤部付近(図-7参照)での水位波形

水位波形が河道内の水位波形と同様になるほど、多くの氾濫流が堤内地へと流入していることがわかる。この結果、図-12 (b)に示したように、氾濫痕跡水位よりも高い計算最大水位の分布になった。これは、河川に遡上する津波のボリュームが大きいことも原因の一つと考えられるが、氾濫痕跡水位の再現は破堤考慮の有無の二つの計算結果の間にあると考えられるため、破堤が実際に生じた時間が第一波目の到達後すぐではなく、それ以降の後続の波により生じたことも考えられる。

4. 結論

本研究では、大規模な破堤氾濫を含む広範囲の堤防越流が生じた北上川を対象として、適切と考えられる解析法を用い、二つの断層モデルの比較と破堤の考慮から、今次津波の河川遡上と津波氾濫流解析を行い、様々な現地観測データを考察した。以下に得られた結論を示す。

- 1) 東北大学モデル(version1.2)と藤井・佐竹モデル(version4.2)の二つの断層モデルを用いた今次津波の北上川の津波遡上再現計算結果を比較し、東北大学モデルが藤井・佐竹モデルに比べ津波の遡上量が大きく計算され、湾内や河道内で水位が高くなることを示した。いずれも全体的に実測値よりも津波の波形が大きく解析されたことから、再現性の向上には湾内の解析精度の向上が重要である。
- 2) 大規模な破堤が生じた北上川右岸4.1km～4.6kmの破堤を考慮した計算を行い、破堤無しの計算結果との比較から、どちらの計算結果も実測値に比べ水位が高く計算された。しかし、破堤により河道内の縦断ピーク水位分布や破堤部付近の堤内地の痕跡水位の再現性が改善され、上流河道では流量が大きく低減し、水位低下すること、また津波の到達時間が遅れることを示した。さらに、破堤が生じた時間は第一波目到達後すぐではなく、それ以降の後続の波により生じた可能性があることを明らかにした。
- 3) 上述の検討を行うためには、痕跡データのみならず、河道・氾濫域の多点での水位時系列データが取得されていることが望ましい。そして、実測データと信頼性

の高い解析モデルによる計算結果を相互に検証、考察することで、破堤などを含めた津波遡上と氾濫の現象を解明していくことが肝要である。

謝辞：本論文で使用した観測所での水位波形、河道内縦断痕跡水位、氾濫痕跡水位は国土交通省東北地方整備局、国土技術政策総合研究所に提供頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 松井大生, 内田龍彦, 中村賢人, 服部敦, 福岡捷二: 非静水圧準三次元解析法による北上川の津波河川遡上・氾濫流の一体解析, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.71, No.2, I_181-I_186, 2015.
- 2) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, I_1225-I_1230, 2012.
- 3) 中村賢人, 森啓年, 鈴木広幸, 服部敦: 津波遡上の最大水位に河川流量が与える影響に関する実験, 土木学会年次学術講演会, 第70回年次学術講演会, Vol.70, pp.303-304, 2015.
- 4) 赤穂良輔, 石川忠晴: 平成23年東北地方太平洋沖地震津波における利根川下流の津波遡上再現計算, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, I_1543-I_1548, 2012.
- 5) 二階堂竜司, 青木伸一, 田村浩敏, 神保正暢, 栗山広宣: 一般座標系を適用した河川の津波遡上計算～利根川における東北地方太平洋沖地震津波の再現～, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.70, No.2, I_295-I_300, 2014.
- 6) 小園裕司, 野島和也, 桜庭雅明: 東京湾内における東北津波の伝播特性および計算条件の違いによる計算精度の検討, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.69, No.2, I_437-I_442, 2013.
- 7) 今村文彦, 越村俊一, 馬淵幸雄, 大家隆行, 岡田清宏: 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施東北大学モデル(version1.2), 東北大学大学院工学研究科付属災害制御研究センター, 2012.
- 8) Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M. and Kanazawa, T.: Tsunami source of the 2011 off the pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol.63, pp.815-820, 2011.
- 9) 内田龍彦, 福岡捷二: 底面流速解析法を用いた津波による構造物周りの三次元流れと局所洗掘解析, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, I_271-I_275, 2013.
- 10) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, August 1985.
- 11) (財) 国土技術研究センター: 津波の河川遡上解析の手引き(案), <http://www.jice.or.jp/siryot1/pdf/tsunami.pdf> (2007).
- 12) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (<http://www.coastal.jp/tjt/>)による速報値(2015年2月16日参照)

(2015. 9. 30受付)