

# 非静水圧準三次元津波解析法を用いた北上川における 今次津波の河川遡上と氾濫流解析 Simulation of the 2011 Tsunami Run-up and Inundation in the Kitakami River with Non-hydrostatic Quasi-3D Model

14N3100040J 松井 大生  
Daiki MATSUI

**Key Words :** non-hydrostatic quasi-3D model, 2011 Tohoku Tsunami, Kitakami River

## 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（今次津波）は、河川を遡上し、堤防越流や破堤氾濫することによって、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。津波がどのように河川遡上し、氾濫するのか、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。例えば、今次津波の顕著な遡上が生じた北上川では、大規模な破堤氾濫や河口砂州のフラッシュ等の大きな地形変化が生じており、これらの現象が津波遡上と氾濫に及ぼす影響は明らかでない。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信頼性の高い解析モデル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解明することが求められる。

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、現象全体のスケールの大きさに比べ、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。そのため、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。

内田・福岡<sup>1)</sup>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を開発している。この解析法は河川における種々の三次元流れや局所洗掘現象などを説明できることが示されているが、洪水時の緩やかな非定常性を想定して開発されてきたために、鉛直方向流速の非定常項などが省略されている等の簡略化がされている。そのため、津波の河川遡上と氾濫流による強い非定常場に対する有用性や妥当性の検討は十分でない。

本研究では、一般底面流速解析法を応用した非静水圧準三次元津波解析法を開発し、大型水理模型での津

波河川遡上実験と比較して、解析法の妥当性を検討する。次に、今次津波の大規模な遡上が生じた北上川を対象とし、津波の河川遡上と氾濫流の一体解析法を構築する。そして、再現計算結果と観測データから実際に生じた現象について考察するとともに、観測データの精度や役割について考察し、河川遡上津波に対する観測体制のあり方を検討することを目的とする。本論文では、河口砂州のある場合とない場合の解析結果を比較し、その影響について考察し、合わせて上述した目的について検討する。

## 2. 非静水圧準三次元津波解析法の概要と改良点

開発した非静水圧準三次元津波解析法の概要と従来からの改良点を示す。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解析法である。水深積分連続式、水深積分水平方向運動方程式と合わせて、渦度の定義式を水深積分した底面流速方程式、水深積分渦度方程式、水表面の水平方向運動方程式、二重水深積分連続式(1)及び水深積分した鉛直方向運動方程式(2)を解く。

$$Wh = h \left( \frac{\partial z_m}{\partial t} + U_j \frac{\partial z_m}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ h^2 (k_2 \Delta u_j + k_1 \delta u_j) \right\} \quad (1)$$

$$\frac{dp_b}{\rho} = \frac{\partial Wh}{\partial t} + \frac{\partial h W U_j}{\partial x_j} + \frac{\tau_{bj}}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここに、 $ij=1(x),2(y),(z)$ :鉛直方向),  $h$ :水深,  $U_i$ :水深平均流速,  $W$ :水深平均鉛直方向流速,  $z_s$ :水面高,  $z_b$ :地盤高,  $z_m=(z_s+z_b)/2$ ,  $\Delta u_i = u_{si} - U_i$ ,  $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$ ,  $u_{si}$ :底面流速,  $u_{si}$ :水表面流速,  $dp$ :圧力の非静水圧成分 ( $dp=p-\rho g(z_s-z)$ ),  $p$ :レイノルズ応力の等方成分と圧力の和),  $dp_b$ :底面の圧力偏差,  $\tau_{bi}$ :底面せん断応力である。本解析法の改良点は、水面の時空間変化の大きい津波解析に応用するため、新たに二つの項を導入したことである。一つ目は津波の強い非定常性を考慮するために、式(1)において鉛直方向流速の非定常項を考慮した。この非定常項によって生じる圧力偏差のうち、式(2)の水位の時間変化項によるものは水平方向運動方程式において、Boussinesq方程式の分散項と同じ形となる。二つ目は津波先端等の水面の強い曲率の影響を考慮するため、水表面の水平方向運動方程式におけ

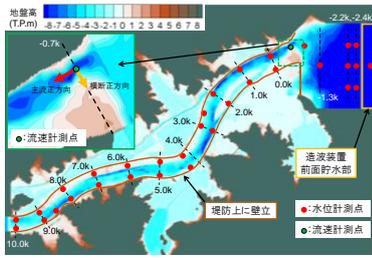


図-1 実験模型概要

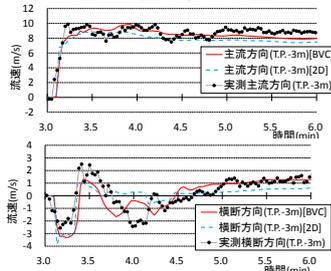


図-3 実測流速と計算結果の比較  
(左：主流，右：横断)

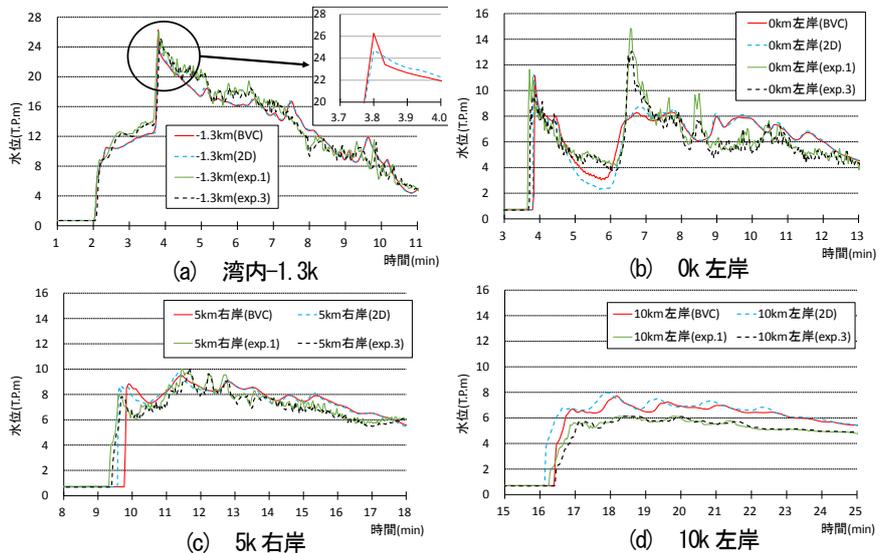


図-2 実験結果と計算結果(BVC法・2D解析法)の水位波形の比較

る水面の鉛直方向圧力勾配項を，水面における鉛直方向運動方程式(3)より評価した。

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{z=z_s} = \frac{\partial w_s}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial w_s}{\partial x_j} \quad (3)$$

ここに， $w_s$ ：水面の鉛直方向流速である。解析法の詳細については，文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

### 3. 津波河川遡上実験との比較

#### (1) 対象とする実験の概要と解析条件

実験は，国土技術政策総合研究所が追波湾の一部を含む北上川約10kmの河道と周辺地形を現地縮尺1/330で再現し，実施したものである(図-1参照)．詳しくは文献<sup>3)</sup>を参照されたい．本研究では，堤防壁立条件で河川流量なしのケースを対象とする．解析には，非静水圧準三次元津波解析法(BVC法)と平面二次元解析法(2D解析法)を用いる．なお，本論文では，実験値はフルード相似に基づき現地換算し，計算は現地スケールで行う．

#### (2) 再現計算結果とその考察

図-2は，実験結果と計算結果の水位波形の比較である．(c)0k左岸は解析結果と実験結果の差が最も大きかった地点である．第一波目通過後の急激な水位上昇を再現できていない．これは，0k左岸周辺の解析地形の再現性に問題があると考えられる．しかし，この地点以外では計算結果は全体的な波形と津波到達時間を再現している．(a)湾内-1.3kでは2D解析法に比べ，BVC法がピーク水位を大きく計算している．この地点は，壁からの反射波と流入する波が重なり非常に高いピーク水位となるが，BVC法はこれを再現している．(d)10k左岸では，BVC法の計算結果は2D解析法に比べ，津波の到達時間が遅く，波形全体の水位がわずかに低くなっている．これは，津波が河川遡上する際に流れの三次元性による運動量交換や圧力の非静水圧成分が抵抗として働い

たことが考えられる．河川を遡上するにつれてこの差が大きくなることから，津波遡上を扱う場合には三次元性を考慮した抵抗評価が重要だと考えられる．

図-3に-0.7kでの底面付近の実測流速と計算結果の比較を示す．流速は二次元電磁流速計を用いてTP-3.0mの高さで計測されており，主流・横断方向は図-1に示す通りである．計算結果の主流速の時間変化は両解析法の差は小さく，ともに実験結果をよく再現している．横断方向流速は主流速に比べ複雑に変化している．この場所は左岸側の湾地形からの反射波と右岸側の海岸堤防上の壁からの回折波が合わさり，二次流構造が時間的に複雑に変化する．BVC法による計算結果は4min付近の波形等，十分に再現できていないとは言えないが，2D解析法と比較して実験結果の再現性は改善されていると言える．

### 4. 本解析法を用いた北上川における今次津波の河川遡上と氾濫流の一体解析

#### (1) 解析方法と境界条件

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，氾濫域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，初期水位は地震発生直前の潮位TP-0.461mに沈下量を与えて考慮した．沈下量は東北大学モデル(version1.2)の断層パラメーターから求めた．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ネスティング手法を適用する(図-4参照)．

詳細領域の津波遡上・氾濫流解析においては，初めに地震発生直前の河川流況を解析した．解析地形は被災前の地形より作成した10mメッシュである．そして，地震による地盤沈下は瞬時に生じるとして，地震前後

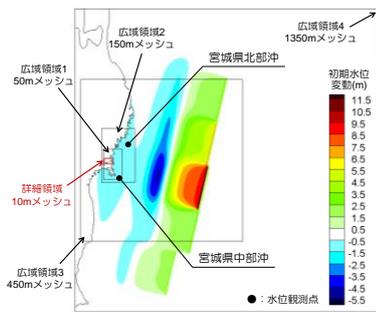


図-4 広域計算領域

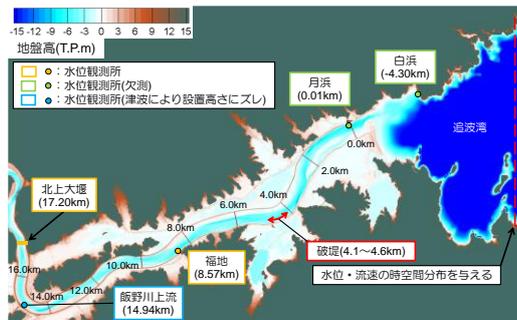


図-5 詳細計算領域

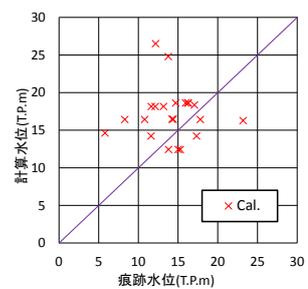


図-6 湾内の計算水位と痕跡水位の比較

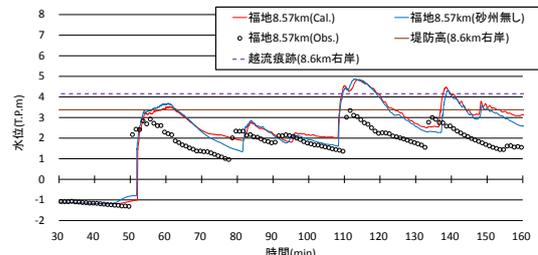
の水位計のゼロ点高変化と東北大学モデル(version1.2)の断層パラメータを用いて、解析した地震発生直前の河川流況に沈下量分布を与えた。この方法により、初期条件となる津波来襲前の河川流況を作成した。流入する津波の境界条件は、広域計算から求めた50mメッシュの計算結果を用いて、湾域の水位、流速の時空間分布を与える(図-5参照)。上流端境界条件は、堰直下で堰放流量 $40\text{m}^3/\text{s}$ を一定で与え、堰高を地盤高として考慮し、堰を通過する津波を考慮した。

今次津波では河川堤防の大規模な破堤が生じた。これまでに、破堤が生じると堤内地の氾濫量は増大する一方、上流への津波遡上量が低減することを明らかにしている<sup>2)</sup>。ここでは、実際に大きな破堤が生じた右岸4.1km~4.6kmがあらかじめ破堤しているとした。また、河口砂州が津波遡上や氾濫に及ぼす影響を検討するため、河口砂州のある場合とない場合の解析を行う。被災前後の河道横断測量データ等を参考に、河口砂州を取り除いた地形条件を設定した。

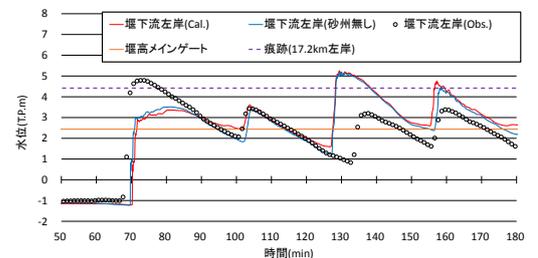
## (2) 解析結果とその考察

まず、広域の津波伝播解析の再現精度について検討する。図-6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速報値である。計算結果はややばらついているが、全体的に痕跡水位に比べ大きい。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、湾内の抵抗評価法等については今後さらに検討する必要がある。

次に、河口砂州が津波遡上や氾濫に及ぼす効果について検討する。図-7に観測所での水位波形の比較を示す。(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、各波の到達時間と全体的な波形は概ね再現されている。しかし、水位計は北上川本川から少し離れた支川内の水門付近に設置されており、厳密な比較が難しい。河口砂州の有無の二つの計算結果を比べると、河口砂州が無いことにより各波の水位低下が大きくなり、特に100min付近の水位の



(a) 福地(8.57km)



(b) 北上大堰下流左岸(17.20km)

図-7 観測所での水位波形

下がり方は実測値と同様な波形となっている。各波の到達時間、波高には砂州が無いことによる一様な影響は見られないものの、第一波目の到達時間が早まり、波高が大きくなっていることがわかり、その影響は上流の観測所での水位波形においても同様である。(b)の北上大堰下流左岸(17.20km)では、計算結果は第三波目以外の到達時間を再現しているが、第二波目以外の各波の水位の大小関係を再現できていない。また、計算結果の第一波目の波高が実測値に比べてかなり低く計算されているが、津波到達前から破堤状態として扱っているため、破堤による遡上量低減の影響も考えられる。このため、堰上流への越流量が少なくなっており、堰の越流と堰上流の水位波形の再現性と破堤の考慮方法については、更なる検討が必要である。図-8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、砂州無しの計算結果では河口周辺で全体的にピーク水位が0.5m~3.0m程度高くなっている。一方、河道内では河口砂州が無い方が全体的にピーク水位が若干低下しているが、その影響は僅かである。図-9は計算水位と氾濫痕跡水位の比較であり、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。堤内地を(a)左右岸下流部、(b)左岸2.4kmより上流、(c)右岸4.0~6.0km(破堤

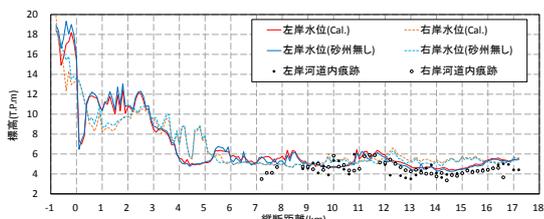


図-8 河道内ピーク水位縦断分布

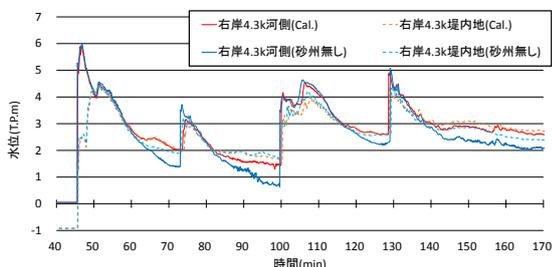
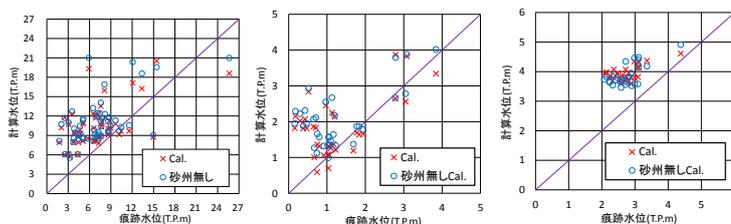


図-10 破堤部での水位波形

部) と大きく三つのブロックに分けて痕跡水位と計算水位を比較する。どちらの計算結果も痕跡水位に比べ、全体的に水位を高く計算しており、特に(a)の下流部堤内地ではその差が大きい。計算結果を比較すると、(a)、(b)では同様に、砂州が無いことによる遡上量の増加により、計算水位が高くなり氾濫量が増加している。一方、(c)の破堤部である右岸4.0~6.0km堤内地では、砂州が無いことにより計算水位が低下している。図-10は破堤部での水位波形である。砂州があることにより引き波による河川流下方向の流量が低減され、河側で水位が高い状態が長く継続する。そして、河道内水位より破堤高が低いため破堤部への氾濫が助長され、トータルの氾濫量が増加する。その結果、図-9(c)の破堤部堤内地では、砂州の存在により計算水位が高くなったと考えられる。このことから、河口砂州は津波の遡上量を低減させ、河口付近での大きな水位低下、上流河道においてもわずかに水位を低下させ、津波の到達時間を遅らせる効果を持つ。しかし、一方で引き波による河川流下方向の流量を低減させ、河道内の水位が高い状態を継続させることから、河道内水位より低い堤防高、例えば破堤部において、氾濫を助長させる。このため、河口砂州の存在が津波波高を大きくするかどうかは、河口の津波波形と河道特性によって変わると考えられる。

## 5. 観測データの解釈と観測体制のあり方

北上川の今次津波では、湾内や河口部での水位データが激しい津波により欠測しており、また海域での水位観測点も湾口から遠く離れている。さらに、河口部での大規模な地形変化、破堤氾濫、橋梁による津波遡上阻害など、複雑な影響を受け遡上した後、福地(8.57km)で水位時系列データが取得されているため、河口付近の津波の波形や遡上量の検証が非常に困難である上、破堤や河口砂州のフラッシュなどの津波による



(a) 下流部左右岸 (b) 左岸 2.4kmより上流 (c) 右岸 4.0~6.0km

図-9 計算水位と氾濫痕跡水位の比較

現象や被災の実態を解明することは難しい。このためには、湾内や河口部での水位波形の取得と、空撮等による津波現象の観測が求められる。そして、これらの観測データと信頼性の高い解析法による計算結果を相互に検証し、考察していくことが肝要である。

## 6. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 一般底面流速解析法を応用し開発した非静水圧準三次元津波解析法と津波遡上実験結果を比較し、本解析法の妥当性を示した。本解析法と平面二次元解析法の差は全体的な波形には表れなかったが、流れの三次元性による運動量交換と非静水圧成分が津波の減衰と到達時間、局所的な水位上昇に影響を与えることを明らかにした。また、河口部の複雑な流れ場を解析するためには、流れの三次元性を考慮した本解析法が有用であることを示した。
- 2) 河口砂州が津波遡上に及ぼす影響は、河口付近での大きな水位低下、遡上量の低減であり、引き波時の河道内の水位低下を抑制し、高い水位を継続させることが明らかとなった。破堤部など堤防高が河道内水位より低くなる箇所がある場合には、河口砂州の存在により氾濫が助長されると考えられる。
- 3) 津波被害は湾内や河道で複雑に変形した水位波形の影響を受けるために、痕跡データのみならず、湾内や河口部での水位時系列データの取得と空撮等による津波現象の観測が不可欠である。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 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, 第70回年次学術講演会講演概要集, pp.303-304, 2015.
- 4) 松井大生, 内田龍彦, 福岡捷二: 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, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.72, No.4, 2016, 登載決定.