

# 大規模数値解析による鉄道駅舎に対する津波挙動の再現

室谷 浩平\*

Reproduction of the Tsunami Behavior against a Station Building by a Large Scale Numerical Simulation

Kohei MUROTANI

The coastal area of the Tohoku region suffered serious damage from the tsunami caused by the Great East Japan Earthquake in 2011. A target in our research is to develop a simulator in order to predict potential damage and to take disaster prevention measures for railway structures against such large scale tsunami. In this research, the tsunami of the Great East Japan Earthquake was simulated and the damage process of the Shishiorikarakuwa station in Kesenuma city was estimated by our tsunami simulator. In the tsunami simulator, a zoom up analysis by three analyses stages is adopted to cover a large area from an epicenter to an urban area. From the result of the tsunami simulation, the structure analysis of the Shishiorikarakuwa station under the tsunami fluid pressure is performed.

キーワード：津波解析，鉄道構造物の構造解析，粒子法，有限要素法，大規模並列計算

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、日本周辺における観測史上最大の地震であり、震源域は広大で南北500km、東西200kmであった。この地震により、波高10m以上、最大遡上高40mにも上る巨大な津波が発生し、東北地方の太平洋沿岸部は甚大な被害にみまわれた。鉄道構造物では、東北地方太平洋沿岸部のJR線において、在来線23駅、約60kmにわたる線路、橋げた101ヶ所で、津波による流失、瓦礫による埋没などの被害を受け、合計で1,730ヶ所に被害が発生した<sup>1)</sup>。

東日本大震災による被害は、地震による直接的な被害よりも津波による被害の方が深刻であった。そのような背景から、本研究では、大地震により発生した津波が鉄道構造物へ及ぼす影響を解析するために、図1のような、

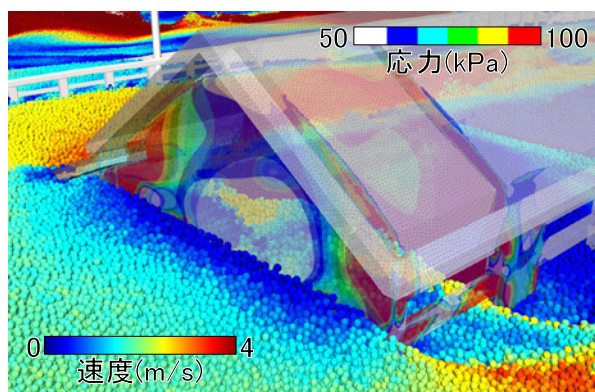


図1 粒子法による津波解析と駅舎の構造解析の結果

津波による流体圧力を外力とした鉄道構造物の構造解析を実施できる解析手法を開発した。本稿では、津波により周辺のほとんどの構造物が倒壊する中、気仙沼市街地の鹿折唐桑駅が津波による浸水被害を受けたにもかかわらず、ほぼ原型を留めて倒壊を免れた理由についての検証と考察を、本研究で開発した解析手法を用いて行う。

## 2. 東日本大震災を模擬した津波解析

### 2.1 3段階のズームアップ津波解析

本研究では、東日本大震災の際に発生した津波が鉄道構造物へ及ぼす影響を解析することを目的とする。都市部の地上構造物を対象とした3次元の津波解析を行う際に問題となるのは、津波の流入流出境界条件である。実際の津波では、数km～数十kmの幅の波が数十分以上押し寄せてくる。さらに、震源における断層のすべり量、海底と地上の地形、地上構造物の配置などの多くの要素が複雑に絡み合い、解析対象である地上構造物に対する津波の挙動を正確に再現することは困難である。そこで、本研究では、図2のような、津波波源から対象となる地上構造物までを、3段階に分けてマルチスケールの解析を行う手法を開発した。

本研究では、1,000km四方程度、4km×2km、180m×150mの3つの解析領域を設定し、大きな解析領域から小さな解析領域に順次に境界条件を渡す3段階のズームアップ解析<sup>2)</sup>を実施する。第1の解析では、震源で発生する津波波源から沿岸部までの津波伝播解析を実施する。この解析は、1,000km四方程度の広範囲の解析が必要となるため、計算コストが低い2次元の浅水長波

\* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

特集：鉄道力学

解析を用いる。第1の解析で得られた解析結果を用いて、第2の解析のための流入流出境界条件を生成する。第2の解析では、沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上する解析を実施し、第3の解析のための流入流出境界条件を生成する。第3の解析では、解析対象である市街地に津波が侵入する市街地浸水解析を実施する。第2、第3の解析では、遡上計算が容易な3次元MPS (Moving Particle Simulation) 法を用いて計算を行う。MPS法は、粒子法的一种であり、自由表面の流れや浮遊物の取り扱いに適する手法である。本研究では、様々なMPS法の中で、大地らが開発したMPS陽解法<sup>3)</sup>に、改良型SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法<sup>4)</sup>の半離散化式を適用した改良型MPS陽解法を用いるが、本稿では単にMPS法と記述する。MPS法は、解析領域の大きさに比例する粒子数を必要とするため、第2の解析では、直径1mの粒子を用いて解析を行い、第3の解析では、直径10cmの粒子を用いて解析を行う。第3の解析では、津波がどのように市街地に押し寄せるかを再現し、流体圧力による鉄道構造物の挙動を評価する。

第1の解析(1000km四方程度) 第2の解析(4km x 2km)

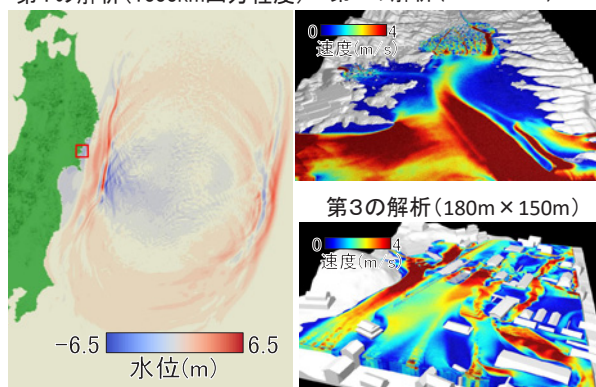


図2 3段階ズームアップ津波解析の概略<sup>2)</sup>

## 2.2 東日本大震災後の気仙沼の様子

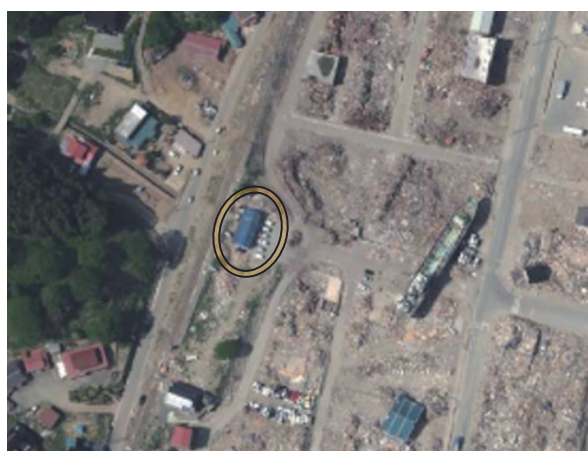
本節では、東日本大震災後の気仙沼の様子を観察する。図3は、国土地理院により2011年5月26日に撮影された東日本大震災後の気仙沼の航空写真<sup>5)</sup>である。図3(a)では、気仙沼全体の津波による被害状況が確認でき、図3(b)では、60m級の巨大船舶である第18共徳丸が、鹿折唐桑駅前50m付近に漂着した様子が確認できる。図3(a)から、多くの地上構造物が流失した様子が確認できるが、図3(b)から鹿折唐桑駅は浸水被害を受けたにも関わらず、原型を留め倒壊を免れたことが確認できる<sup>5)</sup>。

## 2.3 気仙沼の第1の解析

本節では、第1の解析について説明する。図4は、第1の解析の2次元差分法による浅水長波解析の結果



(a) 気仙沼市街地(長方形領域は(b)の鹿折唐桑駅付近)



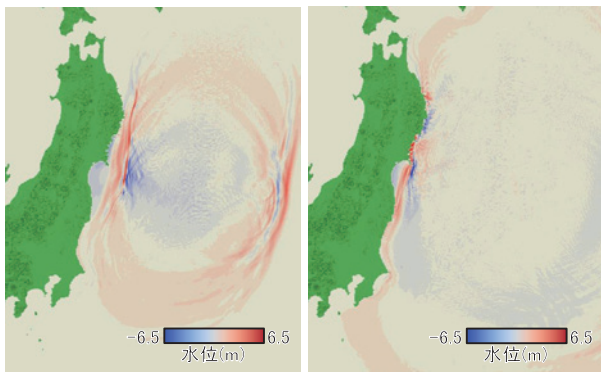
(b) 鹿折唐桑駅付近(楕円内は鹿折唐桑駅)

図3 東日本大震災後の気仙沼の航空写真<sup>5)</sup>

であり、構造計画研究所が開発した津波シミュレータTSUNAMI-Kを用いた。TSUNAMI-Kは、東北大学の今村教授が開発した2次元差分法による浅水長波解析手法<sup>6)</sup>を用いた津波波高・遡上計算ソフトウェアである。初期水位は、藤井佐竹の55小断層モデルVer. 8.0から計算し、津波発生時刻を14時47分とした。図4(a)は津波発生1,200秒後の15時7分、図4(b)は津波発生2,400秒後の15時27分の津波が伝播している様子である。図5は、国土交通省港湾局によって観測され、港湾空港技術研究所で処理されたGPS波浪計の観測結果<sup>7)</sup>と、TSUNAMI-Kによる浅水長波解析の解析結果の比較である。本研究では、1,350mの粗いメッシュを用いたが、概ね良い一致をみている。

## 2.4 気仙沼の第2の解析

第2の解析では、気仙沼湾と気仙沼市街地の両方を解析範囲に含める必要があるため、気仙沼湾の鹿折川河口を中心とした南北4km、東西2kmを解析範囲とした。図6と図7は、津波発生2,400秒後の15時27分を解析開始時刻とした第2の解析結果であり、鉄道総研が開発



(a) 15時7分 (b) 15時27分

図4 第1の解析

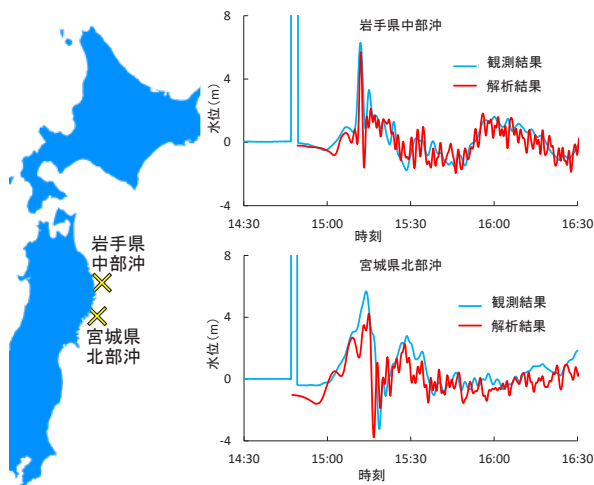
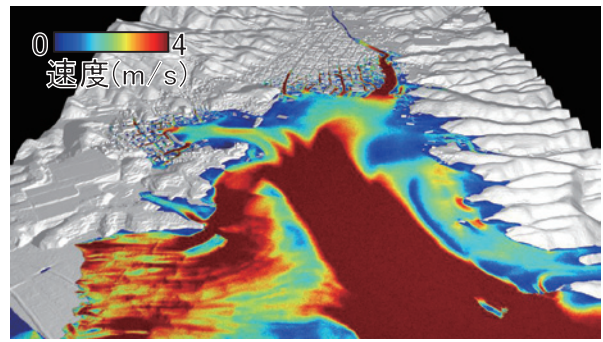


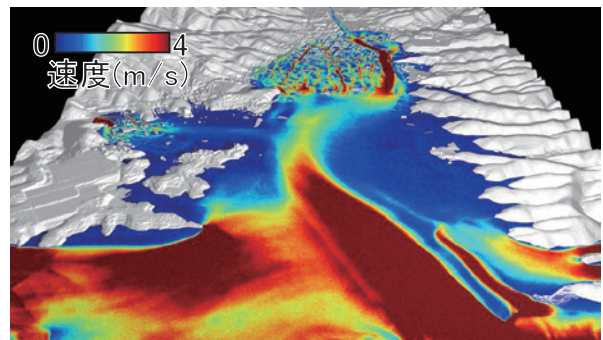
図5 観測結果<sup>7)</sup>と解析結果の比較

した粒子シミュレータを用いた<sup>2)</sup>。粒子シミュレータは、粒子同士の衝突を解析できるシミュレータであり、MPS法向けに開発が進められているソフトウェアである。第2の解析では、直径1mの粒子を用い最大1.3億粒子の解析を行った。解析に用いたコンピュータは鉄道総研のスーパーコンピュータXC30であり、100ノードを用いて、1,800秒間の解析に88時間を要した。

図6と図7から、気仙沼湾に侵入してきた津波は、鹿折川を最初に遡上していき、それを追うように気仙沼市街地内の構造物の間を縫うようにして津波が遡上していく様子が見て取れる。図8は、国土地理院が観測した浸水範囲<sup>8)</sup>と第2の解析の浸水範囲を比較した結果である。第2の解析の浸水範囲は観測値とおおむね一致していることが確認できる。今回解析対象とした気仙沼市街地は山間の地であるため、浸水範囲は流入流出量を適切に処理すれば、観測値と解析結果は合いやすいケースである。一方で、平地が内陸部まで広く広がるような地形では、陸地の属性(アスファルトや田畑など)が重要となり、解析結果と観測値の一致が難しくなる。

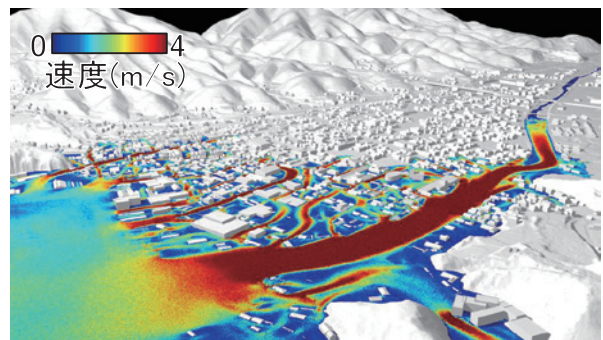


(a) 15時33分40秒

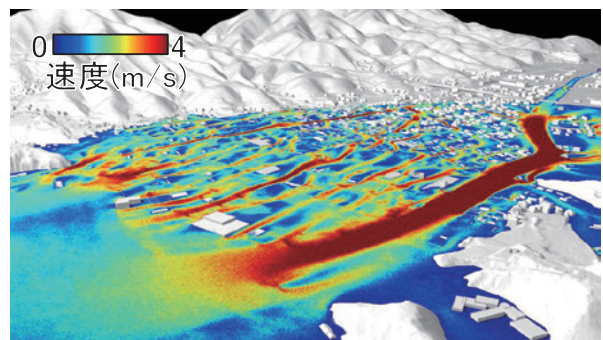


(b) 15時40分20秒

図6 第2の解析(全体)



(a) 15時33分40秒



(b) 15時40分20秒

図7 第2の解析(鹿折川河口付近)

### 2.5 気仙沼の第3の解析

本節では、第3の解析を実施する。図9は、津波発生3,000秒後の15時37分を解析開始時刻とした第3の鹿折唐桑駅付近の解析結果であり、鉄道総研が開発した粒

特集：鉄道力学

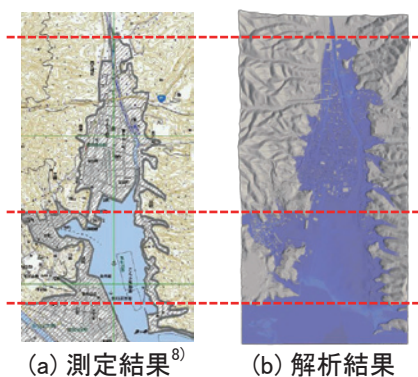


図8 浸水範囲の測定結果と解析結果の比較

子シミュレータを用いた。解析した範囲は、南北180m、東西150mである。直径0.1mの粒子を用い最大1.8億粒子の解析となった。解析に用いた計算機は鉄道総研のスーパーコンピュータXC30であり、50ノードを用いて、400秒間の解析に2週間かかった。図9(a)の15時39分頃から津波は盛土を越流し始め、図9(b)の15時40分過ぎには津波は盛土を大きく越流し、駅周辺で最も高所にあるプラットフォームまで浸水してしまっていることが確認できる。

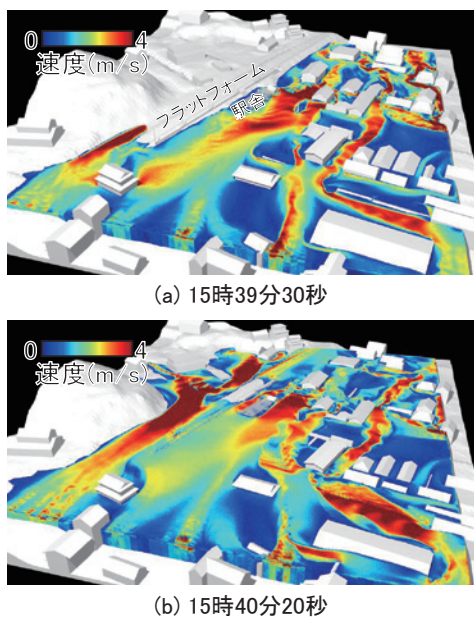


図9 第3の解析

### 3. 鉄道構造物に対する津波挙動の再現

#### 3.1 駅舎に作用する水圧の分布

第3の解析では、駅舎の窓とドアが全て開いているモデルOpと、窓とドアが全て閉まっているモデルClを作成して、それぞれ津波波圧による駅舎の構造解析を実施した。図10(a)では、津波が押し寄せてくるに連れ、ドアや窓などの開口部から駅舎内に津波が侵入し、海水

に満たされていく様子が確認できる。図10(b)では、津波が押し寄せてきても、ドアや窓は閉じられているため、津波の侵入口がなく、駅舎内に海水は入ってこない様子が確認できる。

図11(a)と(b)は、駅舎にかかる水圧の分布である。図11(a)と(b)を比べたところ、水位に応じて駅舎外壁に作用する水圧が変化しているところは類似している。しかしながら、図11(a)では駅舎内部に水圧が作用しているのに対して、図11(b)では駅舎内部には水圧が作用していないことが見て取れる。

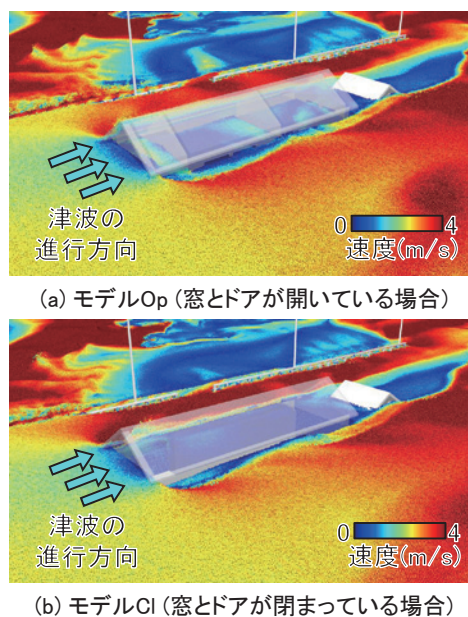


図10 15時41分10秒の鹿折唐桑駅の津波解析の結果

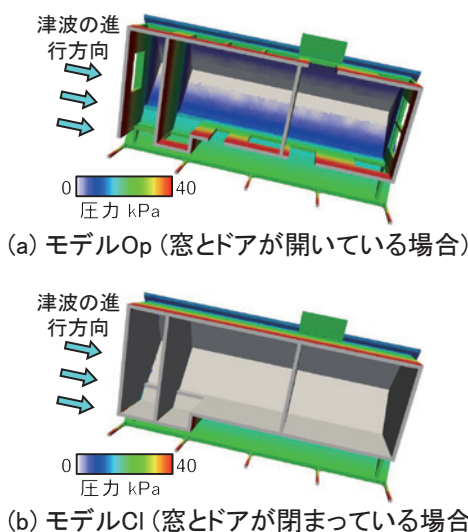


図11 15時43分40秒の鹿折唐桑駅の駅舎にかかる水圧 (下方から見上げた図)

3.2 駅舎における応力の分布

図12は、津波波圧を外力とした構造解析による相当応力分布の結果である。構造解析には、ADVENTURE\_Solid 1.2を用いた。メッシュサイズを5cmとし、四面体2次要素を用いた。底部の節点を固定し、図11の水圧を節点荷重に変換した。駅舎の壁は厚さ20cmとし、物性値にはコンクリートのヤング率とポアソン比を与えて静弾性解析を行った。実際の鹿折唐桑駅は木造であるが、駅舎に対する応力の作用を評価するためには、形状を保って（破壊されない状態で）解析を行う必要があり、あえて、木造ではなく強固なコンクリート構造物として解析を行った。図12(a)と(b)を比べると、水圧による駅舎内部からの支えの有無により、モデルClでは、モデルOpに比べて大きな応力が生じていることが分かる。

図13は、最大応力を示した図12の節点の位置である。図14は駅舎にかかる最大圧力の時系列、図15は駅舎にかかる最大相当応力の時系列である。図14では、両方の駅舎のモデルにおいて、時間が進むにつれ駅舎が受ける最大圧力は同じように大きくなっている。津波の水圧は静水圧による影響が大きいため、底部の要素ほど大きな水圧を受ける傾向にある。

モデルOpの節点A,BとモデルClの節点C,Dの応力の時系列を図16に示す。モデルOpでは、15時39分26秒～15時42分12秒で節点Aの応力が最大応力となり、時刻15時42分13秒～15時43分40秒で節点Bの応力が最大応力となっている。モデルClでは、15時39分32秒～15時40分33秒で節点Cの応力が最大応力となり、15時40分34秒～15時43分40秒で節点Dの応力が最大応力となっている。節点Cが最大応力を示すのは、津波の直撃を受ける場所であるためと考えられる。また、最大値応力となっている節点A, B, Dは、津波が押し寄せる背面の凹形状の場所であり、構造的に最も弱い場所の一つであるためである。図15から、水圧による駅舎内部からの支えの有無により、窓とドアが「閉まっている」場合は、「開いている」場合に比べて、15時43分40秒の時点では5.5倍、時系列中の最大値では3.5倍の相当応力が作用することを示す結果となった。

以上のことから、鹿折唐桑駅周辺の構造物が殆ど倒壊しているにもかかわらず、鹿折唐桑駅がほぼ原形を留めて残った一因は、鹿折唐桑駅は窓やドアが開いたオープンな構造になっており、津波が駅舎内部を通過したことで、駅舎に作用する応力が大きくなりすぎずに済んだことにあると考えられる。

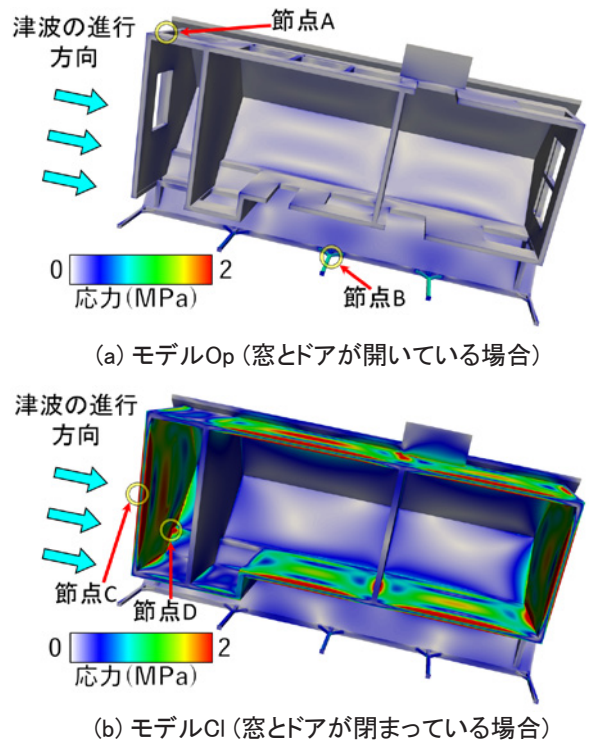


図12 15時43分40秒の鹿折唐桑駅の駅舎の津波波圧を外力とした構造解析による相当応力分布の結果（コンクリート構造物を想定したケース）

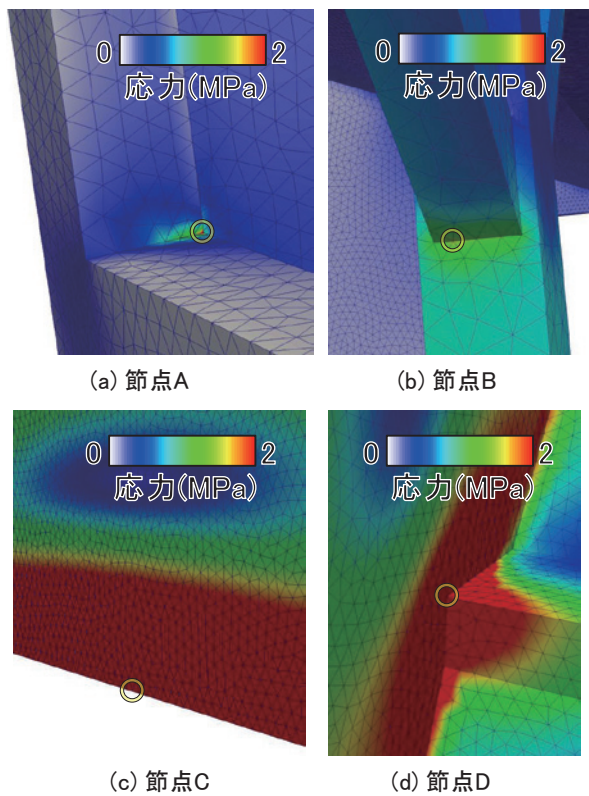


図13 最大相当応力を示した図12の節点A, B, C, Dの位置

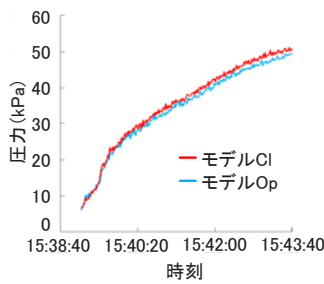


図 14 駅舎にかかる最大圧力の時系列

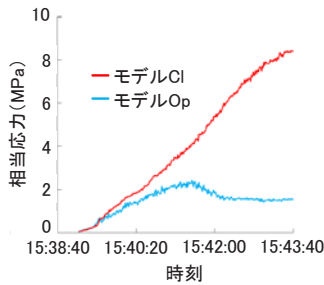


図 15 駅舎にかかる最大相当応力の時系列

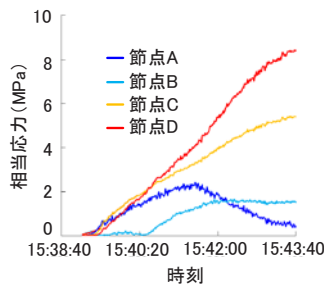


図 16 節点 A, B, C, D の相当応力の時系列

#### 4. おわりに

本稿では、気仙沼市街地に対して3段階のズームアップ津波解析の結果を用いて、気仙沼市街地にあったJR大船渡線鹿折唐桑駅の構造解析を実施した。震災当日、津波により周辺の殆どの構造物が倒壊する中、鹿折唐桑駅は津波による浸水被害を受けたにもかかわらず、ほぼ原型を留めて倒壊を免れた。解析結果により、鹿折唐桑駅は窓やドアが開いたオープンな構造になっており、津波が駅舎内部を通過したことが、鹿折唐桑駅が倒壊を免れた一因であると確認できた。

本研究では、3段階のズームアップ解析の結果から、鉄道構造物に対する津波波圧による構造健全性評価手法を開発した。しかしながら、津波による被害は、波圧だけでなく、津波により押し流された浮遊物によっても引き起こされる。浮遊物を扱う解析では、流体力を評価し浮遊物に外力として渡す必要があり、浮遊物が多数になると浮遊物同士の衝突を考える必要もある。さらに踏み込むと、構造物や浮遊物の破壊を扱う必要がある。これまでの研究成果により、浮遊物の扱いや衝突の解析はす

で実現できているが、妥当性確認が未実施であり、再現性の高い実験の実施も困難である。破壊を伴う解析は高解像度の解析が要求されるか、実験的・経験的手法が必要になるため、信頼性の高い解析の実施が困難になるとともに、妥当性確認を行うこと自体が困難である。このように、本研究で開発した解析手法には、まだ改善の余地が残されている。今後は、解析が実施可能な範囲で様々な津波被害を再現しつつ、実施が困難な解析に関しては、さらなる新規研究開発を実施することで再現できる現象を増やしていきたいと考えている。

なお、本研究の一部は、JSPS 科研費 JP26390127 の助成を受けて実施した。

#### 謝 辞

本研究の一部は、国土交通省国土地理院が管理する航空レーザ測量データ、国土交通省港湾局によって観測され港湾空港技術研究所で処理された GPS 波浪計のデータ、国土交通省国土地理院ウェブサイトの地図・空中写真閲覧サービスの支援を受けたことを、ここに感謝する。

#### 文 献

- 1) 国土交通省東北運輸局, よみがえれ! みちのくの鉄道～東日本大震災からの復興の軌跡～, <http://www.tb.mlit.go.jp/tohoku/td/td-sub100.html>, 2012 (参照日: 2018年2月21日)
- 2) Murotani, K et al., "Tsunami run-up simulation", *High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering*, Springer Tracts in Mechanical Engineering, pp. 157-178, 2016.
- 3) 大地雅俊, 越塚誠一, 酒井幹夫: 自由表面流れ解析のための MPS 陽的アルゴリズムの開発, 日本計算工学会論文集, No. 20100013, 2010
- 4) 都築怜理: GPU スパコンにおける動的負荷分散を用いた大規模粒子法シミュレーション, 学位論文 (博士), 東京工業大学, 甲第 10097 号, 2016
- 5) 国土交通省国土地理院: 国土地理院ウェブサイト, 地図・空中写真閲覧サービス, 整理番号 CTO20116, コース番号 C10A, 写真番号 46, 撮影年月日 2011 年 5 月 26 日
- 6) Imamura F., Yalciner A. C., Ozyurt G., "TSUNAMI MODELING MANUAL (TUNAMI model)", <http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/projects/manual-ver-3.1.pdf>, 1995. (参照日: 2018年2月21日)
- 7) 国土交通省港湾局: 東北地方太平洋沖地震による津波観測データ, リアルタイム ナウファス, 2011
- 8) 国土交通省国土地理院: 2 万 5 千分 1 浸水範囲概況図 宮城県 No.72 (第 2 版), 2011 年 5 月 31 日