

東北地域災害科学研究

第59巻 令和5年3月

論説	頁
2011年東北地方太平洋沖地震による地震の誘発現象の力学的検討 …… 渡部大地・前田拓人・高野智也	1
2019 - 2022年の東北の被害地震における建物強震観測記録 …… 大野 晋・三辻和弥・笹ノ間佑太	7
東北地方太平洋沖で発生した地震のP波直後の波形を用いた震源深さ推定の試み …… 小菅正裕	13
青森での1993年北海道南西沖地震 …… 鏡味洋史・水田敏彦	19
3次元不均質速度構造モデルを用いた青森県周辺の地震に対するCMT解推定 …………… 増永 仁・前田拓人・高野智也	25
ロードセルを用いた津波漂流物の衝突力に関する検討 …… 高橋 陸・齋藤憲寿・渡辺一也	31
下北半島, 関根浜のイベント堆積物について …… 木村雄大・岡田里奈・梅田浩司	37
避難行動解析に基づく地域条件を考慮した津波避難に関する研究 …………… 堀合紳弥・立花郁巳・遠藤貫太・高瀬慎介・加藤雅也・武山 泰	41
複数のオイルタンク群に作用する津波荷重の水理模型実験 …… 寺本尚史・丁 威・植松 康・小幡昭彦	45
津波氾濫流による抗力の評価におけるフルード数と抗力係数 …… 松富英夫	51
構造物にかかる流体力に関する基礎的検討 …… 立花郁巳・遠藤貫太・堀合紳弥・高瀬慎介・加藤雅也	57
河道内の植生および流木が洪水流に与える影響に関する検討 …………… 大森蒼士・自見寿孝・齋藤憲寿・渡辺一也	63
UAVを用いた馬場目川の砂州挙動と河床変動に関する研究 …… 自見寿孝・齋藤憲寿・渡辺一也	69
豪雨に伴い発生する流木の樹皮剥離過程に関する水理実験 …… 高谷快斗・自見寿孝・齋藤憲寿・渡辺一也	75
令和4年8月3日の大雨による岩手県一戸町内の被害について …… 松林由里子・紺野矩彦	81
令和4年8月に発生した秋田・青森豪雨災害について …… 渡辺一也・松林由里子	87
青森県2022年8月豪雨災害調査研究 …… 佐々木幹夫・竹内貴弘・高瀬慎介・三戸部佑太	93
緩衝材を活用した地震・津波対策技術の開発 …… 有賀義明	99
積雪時の地震の際に倒壊したカーポートに関する基礎的検討 …… 片岡俊一・岸恵里菜	105
慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた3層骨組の振動応答特性(その1)ダンパーおよび実験の概要 …………… 水間巧大・船木尚己・小嶋健太郎・飯藤將之・藤田智己	111
慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた3層骨組の振動応答特性(その2)実験および時刻歴応答解析結果 …………… 小嶋健太郎・船木尚己・飯藤將之・藤田智己・水間巧大	117
建築年代の異なる複数のブロックによって構成された建物の地震応答 …… 水野智貴・片岡俊一	123
2方向地震動を受ける鉄骨置屋構造物の屋根支承部への作用応力 …………… 阿部彩加・藤田智己・船木尚己・飯藤將之	129
集客施設による避難訓練の取組みと観光危機管理の観点からの考察 …… 山田修司	135
災害後人口移動の年齢別構造の分析 …… 奥村 誠・元井初音	141
1983年日本海中部地震災害の新聞記事による追跡 …… 水田敏彦・鏡味洋史	145

Tohoku Journal of Natural Disaster Science

Volume 59

March, 2023

ARTICLES

	Page
Mechanical Study of Triggered Earthquakes Caused by the 2011 Tohoku-Oki Earthquake ... Daichi WATANABE et al.	1
Strong Motion Records Observed in Buildings During 2019-2022 Earthquakes in Tohoku Region Susumu OHNO, Kazuya MITSUJI and Yuta SASANOMA	7
Depth Estimate Using P-wave Later Phase from Pacific Offshore Earthquakes of Tohoku District ... Masahiro KOSUGA	13
The 1983 Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake for Aomori Prefecture ... Hiroshi KAGAMI and Toshihiko MIZUTA	19
CMT Inversion for Earthquakes in and Around Aomori Prefecture, Northern Honshu, Japan, Using Three-Dimensional Heterogeneous Velocity Structure Jin MASUNAGA et al.	25
Study on Impact Force of Tsunami Drifting Objects Using Load Cells Riku TAKAHASHI, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE	31
Characteristics of Event Deposits in Sekine-hama, Shimokita Peninsula ... Yuta KIMURA, Rina OKADA and Koji UMEDA	37
Research on Tsunami Evacuation Considering Regional Conditions Based on Evacuation Behavior Analysis ... Shin-ya HORIAI, Ikumi TACHIHANNA, Kanta ENDO, Shinsuke TAKASE, Masaya KATO and Yasushi TAKEYAMA	41
Hydraulic Model Tests of Tsunami Force Acting on Oil Tanks Naofumi TERAMOTO, Wei DING, Yasushi UEMATSU and Akihiko OBATA	45
Froude Number and Drag Coefficient in the Evaluation of Drag Force Due to a Tsunami Inundation Flow Hideo MATSUTOMI	51
Fundamental Study of Fluid Forces Acting on Structures Ikumi TACHIHANNA, Kanta ENDO, Shinya HORIAI, Shinsuke TAKASE and Masaya KATO	57
Study of the Influence of Vegetation and Driftwood in the River Channel Soshi OMORI, Yoshitaka JIKEN, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE	63
Study on the Behavior of the Sandbar Using UAV and Riverbed Fluctuations in Babame River Yoshitaka JIKEN, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE	69
Hydraulic Experiment on the Bark Peeling of Driftwood Generated by Heavy Rainfall Kaito TAKAYA, Yoshitaka JIKEN, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE	75
Report on Survey of Flood Damage of August 2022 in Ichinohe Town... Yuriko MATSUBAYASHI and Norihiko KONNO	81
Damage Caused by the Flood Generated to Heavy Rain at Northern Tohoku Region in August 2022 Kazuya WATANABE and Yuriko MATSUBAYASHI	87
Investigation and Research on Downpour Disaster in August, 2022 in Aomori Prefecture Mikio SASAKI, Takahiro TAKEUCHI, Shinsuke TAKASE and Yuta MITOBE	93
Development of Seismic and Tsunami Measure Technology by Using Cushioning Materials Yoshiaki ARIGA	99
A Fundamental Study on Collapsed Carports During Snowy Earthquake ... Shunichi KATAOKA and Erina KISHI	105
Vibration Response Characteristics of Multi Story Frame Attached with Liquid Damper ... Kodai MIZUMA et al.	111
Vibration Response Characteristics of Multi Story Frame Attached with Liquid Damper ... KKentarou KOJIMA et al.	117
Seismic Response of a Building Composed of Several Blocks of Different Construction Ages Tomoki MIZUNO and Shunichi KATAOKA	123
Stresses Acting on the Roof Bearing of Gymnasium Structure Subjected to Earthquake Motion in two Directions Sayaka ABE, Tomomi FUJITA, Naoki FUNAKI and Masayuki HANDOU	129
Evacuation Drill at a Visitor Facility and its Consideration from the Perspective of Tourism Risk/Crisis Management Shuji YAMADA	135
Age Structure of Post-Disaster Inter-Prefectural Migration Makoto OKUMURA and Hatsune MOTOI	141
Tracking of the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake Disaster by Newspaper Articles Toshihiko MIZUTA and Hiroshi KAGAMI	145

Tohoku Research Group for Natural Disaster Science

日本自然災害学会東北支部役員（令和4年度）

支 部 長	前 田 匡 樹（東北大学・工）
幹 事 長	柴 山 明 寛（東北大学・災害研）
評 議 員	片 岡 俊 一（弘前大学・理工）
	渡 辺 一 也（秋田大学・理工）
	本 山 功（山形大学・理）
	山 本 英 和（岩手大学・理工）
	堀 則 男（東北工業大学・工）
	仙 頭 紀 明（日本大学・工）
	佐 藤 健（東北大学・災害研）
会 計 監 査 員	飯 藤 將 之（仙台高等専門学校）

2011年東北地方太平洋沖地震による地震の誘発現象の力学的検討*

弘前大学大学院理工学研究科 渡部 大地・前田 拓人・高野 智也

1. はじめに

大規模地震が発生すると、その震源域や周辺地域で地震活動が活発化することがよく知られている。2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震と呼ぶ）においても、日本列島全体に及ぶ広範囲で地震活動が活発化したことが報告されている（Hirose et al., 2011）。それによると、本震の震源域だけではなく、震源域から遠く離れた日本列島内陸部でもマグニチュード6以上の大規模地震やそれに伴う活発な地震活動が観測された。

東北沖地震後の震源域や日本列島内陸部での地震活動の活発化の要因の一つとして、東北沖地震の断層運動に伴う静的な応力変化が挙げられる（例えば、Ishibe et al., 2015）。東北沖地震は、日本列島に大きな地殻変動をもたらし、太平洋沿岸で最大5.3 mの東進、1.2 mの沈降が観測された（Ozawa et al., 2011）。このような大規模な地殻変動が内陸部での地震活動に影響を与えた可能性がある。そこで、クーロン応力変化（ ΔCFF ）という指標を用いて、東北沖地震の静的な応力変化による地震誘発の可能性が調査されてきた（例えば、Toda et al., 2011）。 ΔCFF とは、ある面（以下、レシーバー断層と呼ぶ）に対して、周囲からかかる静的な応力変化がどのように作用したのかを示す指標であり、レシーバー断層にかかるせん断応力 $\Delta\tau$ と法線応力 $\Delta\sigma$ 、見かけの摩擦係数 μ' を用いて、 $\Delta CFF = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma$ で表される（例えば、Toda et al., 2011）。 ΔCFF が正の値となれば、静的な応力変化によってその断層面での破壊が促進され、負の値となれば破壊が抑制されるということを示す。

これまでの ΔCFF の検討では、レシーバー断層として、そこで発生した地震の発震機構解の節面がよく用いられてきた（例えば、Ishibe et al., 2015）。しかし、防災科学研究所の広帯域地震観測網F-netで解析されたCMT解カタログに含まれる地震の発震機構解はもっぱらマグニチュード3以上の中・大規模の地震のみであり、気象庁の初動発震機構解はそもそも解析されているデータ数が少ない。中・大規模地震が発生しない地域や発震機構解が解析されていない地域では、 ΔCFF を用いた地震誘発の検討が困難である。

Uchide (2020) は、ニューラルネットワークを用いることで、これまで解析数が少なかった日本列島内陸部における小規模地震の初動解の解析を行なった。Uchide (2020) によって解析された初動解の数は約11万個であり、その膨大な数の初動解データが公開されている。そこで本研究では、この小規模地震を含む初動解カタログを用いて東北沖地震による ΔCFF を計算し、日本列島内陸部での静的な応力変化による地震の誘発についてより空間的・時間的に高分解能な調査を行い、これまで検討が困難であった地域も含め、より包括的に地震誘発について検討する。

*Mechanical study of triggered earthquakes caused by the 2011 Tohoku-Oki Earthquake by Daichi Watanabe et al.

2. 方法とデータ

本研究では、1997年から2020年までの気象庁一元化震源カタログの震源データを使用した（深さ0~20 km, 気象庁マグニチュード $M_J \geq 1$ ）。また、レシーバー断層として Uchide (2020) で解析された小規模地震の初動解と気象庁が解析した中・大規模地震の初動解を合わせて使用した（図1）。解析に用いた地震の発生期間は1997年から2012年3月11日までであり、初動解の数は10342個である。本研究では、レシーバー断層の地震発生期間を、1997年から2011年3月11日と東北沖地震後の2011年3月11日から2012年3月11日の2つに分類し、前者の定常的な活動期間を基準として、東北沖地震後の期間の ΔCFF の変動を検討した。

ΔCFF の計算においては、Yamazaki et al. (2018) の断層すべりモデルを使用した。地殻変動の計算には Okada (1992) に基づくサブルーチンプログラム DC3D を使用し、剛性率が33 GPa のポアソン媒質を仮定し、見かけの摩擦係数の値を0.4として計算を実施した。初動解には共役な2つの節面があり、実際に破壊が発生した節面がどちらであるかは定かではない。そこで本研究では両方の節面で ΔCFF を計算した。

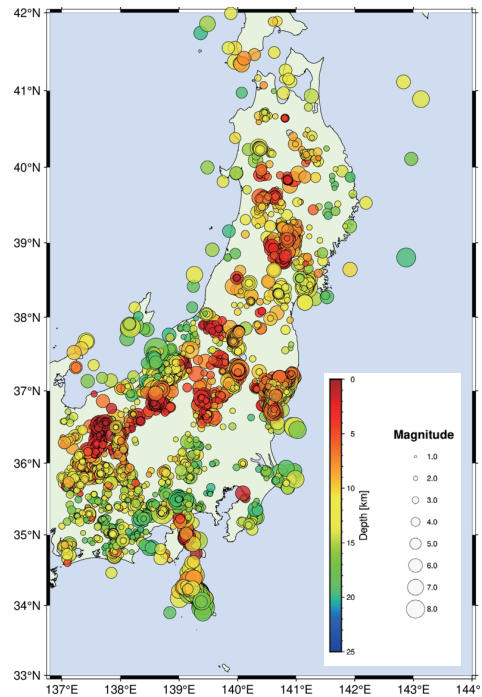


図1. 本研究でレシーバー断層として使用する初動解の震央分布図。期間は1997年から2012年3月11日。深さは20 km以浅。

3. 東北沖地震による ΔCFF と地震活動度

東北沖地震後の期間に発生した地震の初動解を用いた ΔCFF の結果を図2に示す。平均的な ΔCFF の地域性を調査するため、緯度経度幅がそれぞれ 0.4° の矩形領域毎に選択された節面上の ΔCFF の平均値を取った。また、 ΔCFF 推定におけるレシーバー断層の不確実性を考慮するため、各地震のレシーバー断層は初動解の2つの節面のどちらかをランダムに選択し、その操作を10000回繰り返してさらに平均値を取った。この結果から、主に秋田県や岩手県・福島県一北関東地域・新潟一長野県境などの地域で正の ΔCFF が、山形県周辺などの東北地方中部や千葉県周辺などで負の ΔCFF が分布していることがわかった。 ΔCFF の絶対値が大きい節面の値のみで空間分布を作成した場合でも同様の結果が得られた。また、これらの結果はレシーバー断層の節面の選択によらず安定していることも確認された。

理論的に計算された ΔCFF と地震活動との対応関係を以下のように調査した。東北沖地震前後の地震活動度として、図2と同様に緯度経度幅が 0.4° の矩形領域を設定し、それぞれの小領域内での地震数を期間ごとに比較した。本研究では東北沖地震後1年間(2011/3/11~2012/3/11)

の地震数と東北沖地震以前 1 年間（2010/3/11～2011/3/11）の地震数で同一矩形領域毎に比をとり、東北沖地震前後の地震活動度とした（図 3）。その結果、正の ΔCFF が分布している地域は、概ね地震活動が活発化しており、地震活動と ΔCFF が対応していることが見てとれた。しかし、東北地方中部などでは、 ΔCFF が負の値となったにもかかわらず地震活動が活発化しているため、地震活動と ΔCFF が対応していないことがわかった。

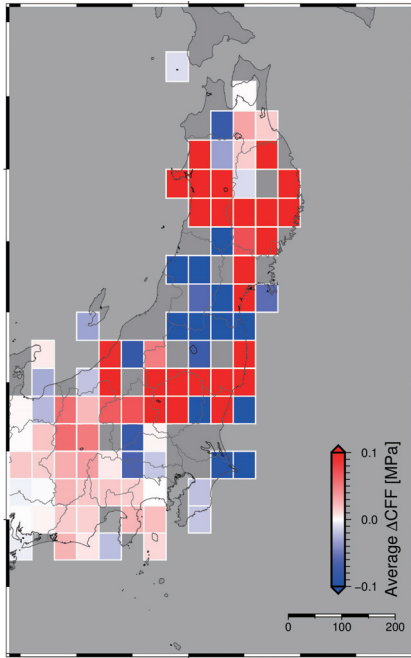


図 2. 東北沖地震後の期間に発生した地震のレーシーバー断層での ΔCFF の空間分布図。緯度経度幅が 0.4° の矩形領域毎に ΔCFF の平均値をとったもの。色は ΔCFF を示し、赤色は $\Delta CFF > 0$ 、青色は $\Delta CFF < 0$ を示す。

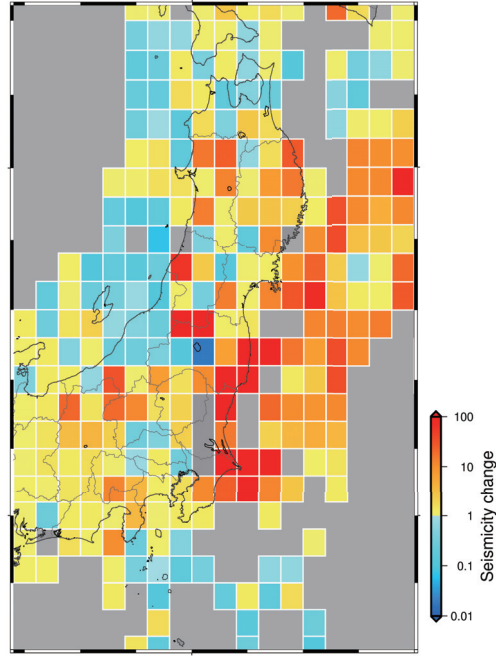


図 3. 東北沖地震前後 1 年間の地震活動度。矩形領域毎に東北沖地震後 1 年間の地震数と以前 1 年間の地震数の比を色で示す。暖色系は地震数が増加したことを示し、寒色系は地震が減少したことを示す。

4. 地震活動に対する東北沖地震による影響の抽出の試み

東北沖地震後の ΔCFF の結果（図 2）だけでは、東北沖地震以前から続く定常的な活動が東北沖地震の静的な応力変化に対してもともと調和的であった可能性を否定できない。そこで、図 2 と同様の方法で定常的な活動のレーシーバー断層に対して東北沖地震による ΔCFF を計算した（図 4）。その結果、東北沖地震後の ΔCFF の空間分布とは異なり、東北地方全域で ΔCFF が負の値となる特徴が見られた。東北沖地震後の期間と定常的な活動期間の ΔCFF の空間分布を比較すると、東北沖地震後に正の値が分布した地域では ΔCFF の値の符号が変化しているが、東北地方中部地域では東北沖地震前後で ΔCFF が負のままで変化が見られなかった。

また、東北沖地震による影響を抽出するために、矩形領域毎に東北沖地震後の ΔCFF と定常的な活動期間の ΔCFF の差を取った（図 5）。図 5 より、東北沖地震後の ΔCFF が正になった地域

だけではなく、負の値が分布していた東北地方中部でも ΔCFF が大きくなる変化があった。

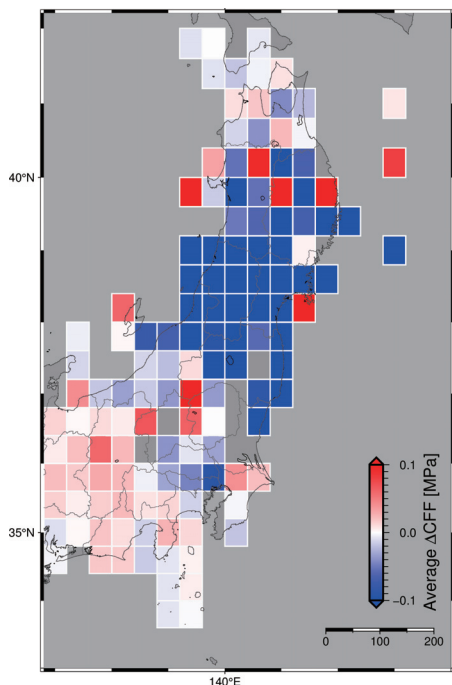


図 4. 定常的な地震活動のレーシーバー断層での ΔCFF の空間分布図。詳細は図2と同様。期間は1997年10月1日から2011年3月11日。

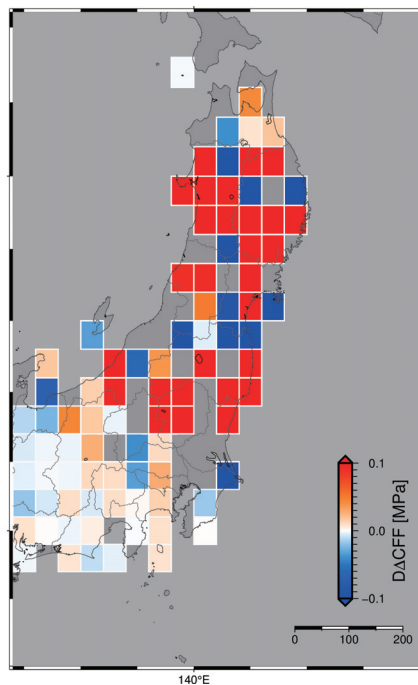


図 5. 東北沖地震前後での ΔCFF 値の変化。色は ΔCFF の変化を示す。赤色であるほど、 ΔCFF がより正の方へ変化したことを示し、青色であるほど、 ΔCFF が負の方へ変化したことを示す。

5. 議論

小規模地震を含む初動解をレーシーバー断層として、東北沖地震の静的な応力変化による ΔCFF を算出した結果、広い範囲において実際に観測された地震活動との対応が認められた。しかし、東北地方中部のように本研究で算出した ΔCFF の結果と地震活動との対応が見られないこともわかった。 ΔCFF は、レーシーバー断層の形状（走向・傾斜角・すべり角）に大きく依存するので、 ΔCFF はある位置での応力場と静的な応力変化がどれだけ整合しているかの指標である。そこで、Yoshida et al. (2012) による東北沖地震前後の期間での応力場の変化との比較を行なった。Yoshida et al., (2012) は、F-net の CMT 解と彼らが独自で推定した初動解を使用し、応力場の推定を行なった。その結果、秋田県や福島県南部、北関東地域では東北沖地震前後で応力場が変化し、変化後の応力場が東北沖地震による静的な応力変化に調和的であることが示された。また、東北地方中部では東北沖地震前後で応力場の変化がなく、この変化がなかった応力場は静的な応力変化に調和的な応力場とは異なるものであったことも示された。その結果は、本研究で得られた ΔCFF の結果と整合的であった。Yoshida et al. (2012) で応力場の変化が変化した地域では、正の ΔCFF が分布し地震活動が活発化した。反対に応力場が変化しなかった地域では、

本研究では負の ΔCFF が分布し東北沖地震前後の期間で ΔCFF の符号の変化がなかった。

以上のことから、秋田県や岩手県、福島県南部や北関東地域、新潟—長野県境地域では、東北沖地震の静的な応力変化によって地震が誘発されたと考えられる。また、山形県や宮城県、福島—山形県境では東北沖地震の静的な応力変化では地震活動の活発化の要因が説明できないことがわかった。しかし、山形県周辺では東北沖地震前後で ΔCFF の符号は負から変化しなかったものの、東北沖地震後に ΔCFF の値が大きくなり、0に近づくという結果が得られていた(図5)。この地域の発震機構解の変化(図6)を調べると、わずかに横ずれ断層型の地震が増えており、横ずれ断層型のレシーバー断層は ΔCFF が正のものが多く、これらの地震が東北沖地震後に ΔCFF の値を大きくする変化をもたらしていたと考えられる。この結果は、小規模の地震の初動解を用いたために得られたものである。

また、Yoshida and Hasegawa (2018) では、福島—山形県境地域において詳細な震源再決定を行い、震源位置が時間と共に深部から浅部に面上に移動していることから、この地域では深部からの流体の寄与により地震活動が活発化したことを示唆した。このことから、地震の誘発現象について議論するためには、静的な応力変化だけではなく流体の移動などの他の要因についても検討する必要がある。

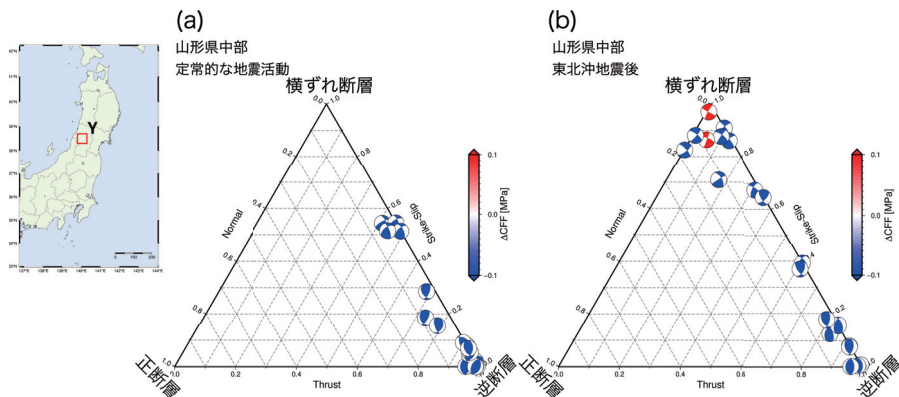


図6. 山形県中部で発生した地震の発震機構解の変化。(a)定常的な地震活動の三角ダイアグラム。(b)東北沖地震後の活動の三角ダイアグラム。上の頂点ほど横ずれ断層型、右下の頂点ほど逆断層型、左下の頂点ほど正断層型であることを示す。

6. おわりに

本研究では、Uchide (2020) と気象庁の小規模地震を含む初動解カタログを使用して、東北沖地震の静的な応力変化による ΔCFF を計算した。その結果、秋田県や岩手県、福島県南部、北関東地域、新潟—長野県境では、東北沖地震の静的な応力変化によって地震が誘発されたと考えられる。また、東北地方中部地域においては負の ΔCFF が分布していたものの、定常的な活動期間の ΔCFF に対して東北沖地震後の ΔCFF の値が増大していることがわかった。Yoshida and Hasegawa (2018) では、山形—福島県境地域では地下からの流体が地震活動の引き金となったことを示唆している。このことから、地震の誘発現象について議論するためには、静的な応力変化だけではなく地下流体の影響や地震動による動的な誘発作用など複合的な検討をする必要

がある。

また、小規模地震の初動解を用いて時空間的に高分解能な ΔCFF を算出したことによって、静的な応力変化では地震誘発を説明できない地域でも、 ΔCFF 値が大きくなるような変化が得られた。これは、東北沖地震前後で発震機構解が僅かに変化したことによるものと考えられる。よって、 ΔCFF を用いた地震の誘発を議論する上では、小規模地震も含めた初動解をレシーバー断層として使用することの有用性が示されたと考えられる。

謝辞

Uchide (2020) で解析された初動解データカタログ、気象庁一元化震源カタログの震源データと初動解データカタログを使用しました。また、防災科学技術研究所が公開している Okada (1992) に基づくサブルーチンプログラム DC3D を使用しました。記して感謝いたします。

参考文献

- Hirose, F., Miyaoka, K., Hayashimoto, N., Yamazaki, T., & Nakamura, M. (2011). Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M w 9.0) —Seismicity: foreshocks, mainshock, aftershocks, and induced activity—. *Earth, Planets and Space*, 63(7), 513–518.
- Ishibe, T., Satake, K., Sakai, S., Shimazaki, K., Tsuruoka, H., Yokota, Y., Nakagawa, S., & Hirata, N. (2015). Correlation between Coulomb stress imparted by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and seismicity rate change in Kanto, Japan. *Geophysical Journal International*, 201(1), 112–134.
- Okada, Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space, *Bull. seism. Soc. Am.*, 82, 1018–1040.
- Ozawa, S., Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T., Tobita, M., & Imakiire, T. (2011). Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake. *Nature*, 475(7356), 373–376.
- Toda, S., Stein, R. S., & Lin, J. (2011). Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M= 9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer. *Geophysical Research Letters*, 38(7), L00G03.
- Uchide, T. (2020). Focal mechanisms of small earthquakes beneath the Japanese islands based on first-motion polarities picked using deep learning. *Geophysical Journal International*, 223(3), 1658–1671.
- Yamazaki, Y., Cheung, K. F., & Lay, T. (2018). A self-consistent fault slip model for the 2011 Tohoku earthquake and tsunami. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(2), 1435–1458.
- Yoshida, K., Hasegawa, A., Okada, T., Iinuma, T., Ito, Y., & Asano, Y. (2012). Stress before and after the 2011 great Tohoku-oki earthquake and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan. *Geophysical Research Letters*, 39(3), L03302.
- Yoshida, K., and Hasegawa, A. (2018). Hypocenter migration and seismicity pattern change in the Yamagata-Fukushima border, NE Japan, caused by fluid movement and pore pressure variation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95, 5000–5017.

2019–2022 年の東北の被害地震における建物強震観測記録*

東北大学災害科学国際研究所 大野 晋
山形大学理工学研究科 三辻 和弥
東北大学工学研究科 笹ノ間佑太

1. はじめに

東北大学災害研では、仙台市と宮城県・岩手県・山形県の公共建物（校舎や自治体庁舎）で強震観測を行っている。本稿では2019年6月19日山形県沖の地震から2022年3月16日福島県沖の地震の間で観測された強震記録について報告する。

2. 強震観測建物

仙台市内のトリガー型強震観測については文献[1]、宮城県・岩手県・山形県の連続観測については文献[2]に建物と観測概要を記載している。

3. 強震記録の概要

表1に観測された加速度最大値の一覧（水平2成分のうち大きい方）を示す。同一敷地内に震度計もしくはK-NET観測点がある場合はその加速度最大値も記載している。図1に対象地震の震央位置、F-netメカニズム解と観測点位置を示す。図2は宮城県内の観測点について、2021年(M7.3)もしくは2022年(M7.4)福島県沖の地震の頂部応答加速度波形・擬似速度応答スペクトル（減衰5%）、基礎階計測震度をまとめて示している。

これらの図表から、頂部で1Gを超えるなど大加速度記録が観測されていること、短周期では建物内で増幅していることが確認できる。全て5階以下の中低層建物であるため建物内の増幅は短周期に限られるが、基礎免震建物である東北大学災害研では基礎階に比べて上層階の振幅が低減されており、免震層の効果が確認できる一方、免震層の応答周期と見られる3s付近では増幅していることも確認できる。

4. 建物の応答特性

文献[2]と同様、基礎階に対する最上階の伝達関数（バンド幅0.2HzのParzen Windowで平滑化）を求め、1次周波数とピーク応答倍率を読み取るとともに、1次周波数の1/2-2倍の帯域制限後2回積分して求めた変位波形から基礎階に対する最上階の1次モード相対変形角を算出した。なお、免震建物では低周波側のカットオフ周波数を0.1Hzに固定して基礎階と1Fの相対変位を求めた。

上記で算出した長辺方向の伝達関数振幅、1次固有振動数及びピーク応答倍率と変形角の関係について、旧耐震基準（1980年以前竣工）RC造建物の結果を図3に、現行耐震基準（1981

**Strong motion records observed in buildings during 2019-2022 earthquakes in Tohoku region by Susumu Ohno, Kazuya Mitsuji and Yuta Sasanoma

年以降竣工)建物に対する結果を図4に示した。いずれの変形角も0.01radに達しておらず(免震でも10cm以下)、大加速度の割には変形角は小さかったことが確認できる。これは福島県沖の地震で指摘されているように短周期卓越型の地震が多かったため[文献3]と思われる。

旧基準の建物は全て耐震補強済みであるが、固有周波数及びピーク応答倍率の変形角依存性は現行基準建物よりも大きい傾向がある。また、東北大災害研の伝達関数には小変形時から変形角依存性が顕著であり、免震層による応答周期の長周期化と高周波振幅の低減が確認できる。

表1 対象地震と観測記録の加速度最大値一覧

	日時	2019.6.18	2020.9.12	2021.2.13	2021.3.20	2021.5.1	2022.3.16	2022.3.16
	震央	山形県沖	宮城県沖	福島県沖	宮城県沖	宮城県沖	福島県沖	福島県沖
建物名	Mj	6.7	6.2	7.3	6.9	6.8	6.1	7.4
構造	深さ(km)	14	43	55	59	51	57	57
社鹿総合支庁舎 RC	MYG011	6	71	361	530	397	81	682
	1F	6	-	-	-	240	65	462
	2F	7	-	256	365	324	110	571
	3F	12	-	381	480	523	121	732
釜小学校 RC	1F	19	-	-	-	-	64	280
	2F	22	-	-	-	-	-	333
	4F	30	-	-	-	-	-	461
七ヶ浜町庁舎 RC	震度計	-	-	397	-	-	-	496
	1F	15	23	292	-	-	-	-
	2F	21	31	633	-	-	-	-
	3F	55	77	1162	-	-	-	-
白石市庁舎 RC	B1F	12	9	190	72	57	-	-
	3F	27	17	358	146	79	-	-
	5F	50	30	425	223	139	-	-
鹿島台総合支所庁舎 S	震度計	-	-	269	-	-	-	340
	1F	29	42	202	242	143	44	301
	2F	48	63	363	302	207	75	528
	3F	52	65	433	320	239	87	679
大崎市役所東庁舎 RC	1F	68	17	139	60	47	24	171
	3F	50	24	176	86	68	32	224
	5F	110	38	229	122	96	47	290
栗原市庁舎 RC	1F	-	48	166	106	109	32	-
	4F	-	89	279	198	208	61	-
	4F(ホール)	-	73	222	223	194	-	-
大船渡市庁舎 RC	IWT018	17	29	49	59	49	14	105
	B1F	4	48	55	99	98	10	92
	2F	6	48	83	126	171	15	150
	3F	9	59	95	175	196	19	188
宮古地区合同庁舎 RC	IWT005	6	23	33	35	48	6	72
	1F	11	21	36	35	40	5	56
	2F	12	24	40	38	43	6	65
	3F	12	27	47	46	52	7	75
庄内総合支庁舎 RC	1F	106	6	33	13	10	6	46
	3F	124	7	41	16	11	6	49
	4F	146	8	46	20	12	6	53
東北大災害研 免震	地表	47	25	-	-	63	-	-
	B1F	27	14	273	69	42	48	310
	1F	20	14	63	38	24	22	113
	5F中央	20	12	92	35	24	24	103
東北大人間環境系 免震	B1F	26	-	-	-	-	-	-
	1F	29	-	112	54	-	36	101
	5F	33	-	108	63	-	45	160
宮城県図書館 SRC,S	1F	27	17	186	-	-	-	-
	3F	35	-	216	177	125	-	-
鶴ヶ谷小学校 RC	1F	15	13	146	111	94	24	145
	3F	20	26	324	204	171	76	386
沖野小学校 RC	1F	22	28	285	144	100	89	285
	4F	48	50	456	275	198	-	-

加速度最大値(cm/s/s, 水平2成分の大きい方)

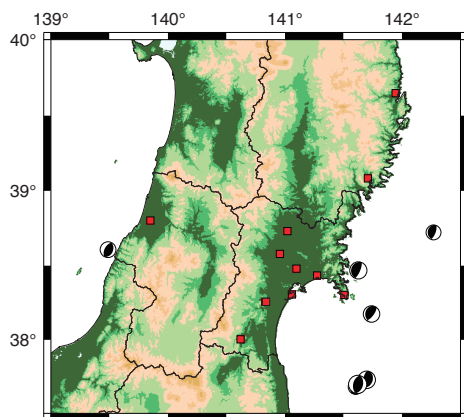
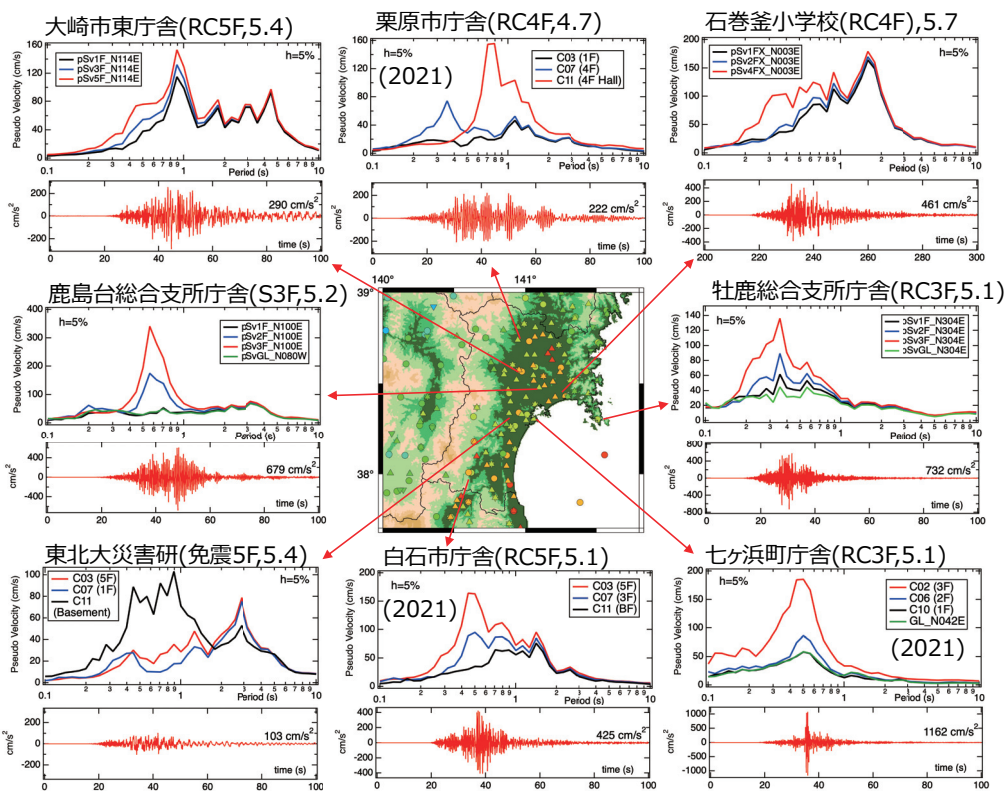


図1 対象地震の震央位置・F-net メカニズム解と観測点位置 (■)

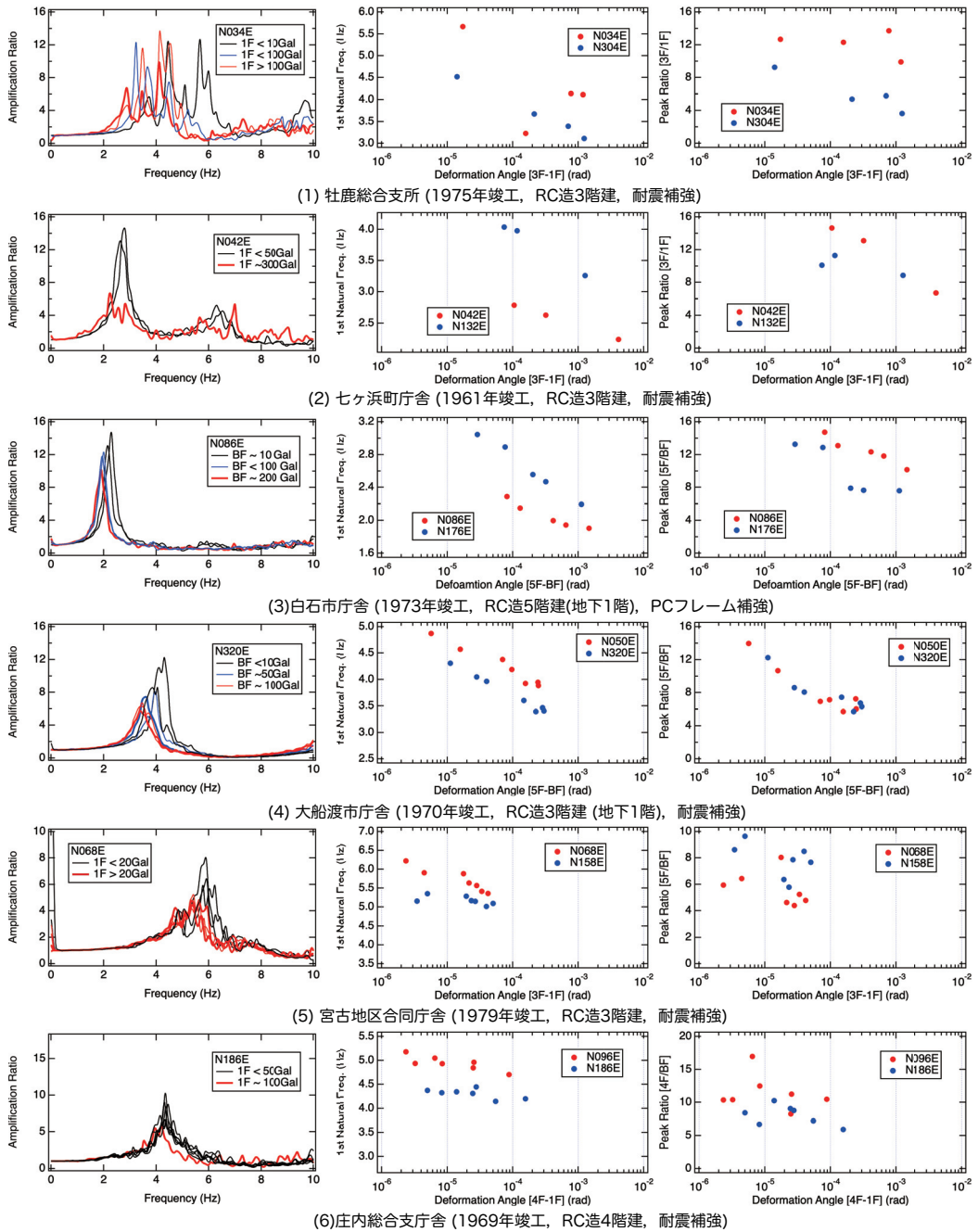


建物記録の頂部加速度波形と応答スペクトル, 基礎階計測震度 最上階 中間階 基礎階 地表

図中に(2021)と記載があるものは2021年(M7.3), それ以外は2022年(M7.4)福島県沖の地震,

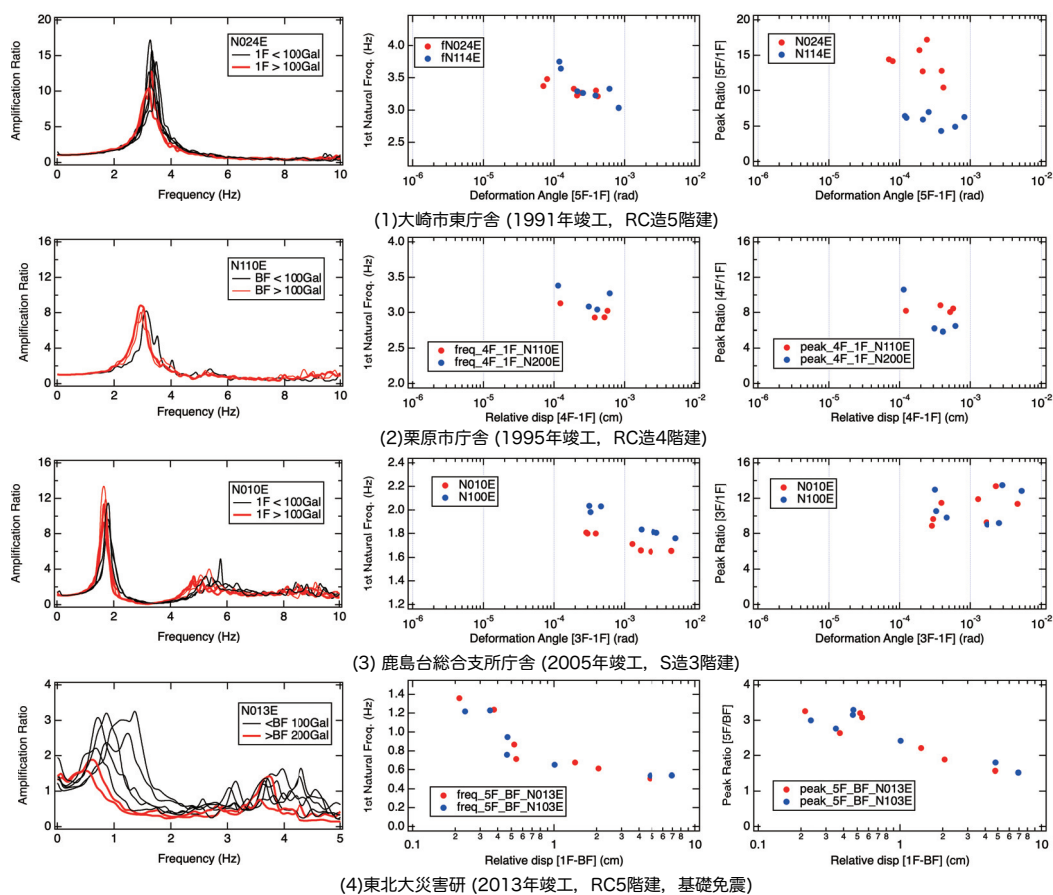
上部右端の数値は基礎階計測震度

図2 2021年, 2022年福島県沖の地震の記録 (頂部加速度波形と擬似速度応答スペクトル)



(左)長辺方向最上階／基礎階伝達関数振幅, (中央と右)1次固有振動数及びピーク応答倍率と変形角の関係

図3 旧耐震基準(1980年以前竣工)RC造建物の応答特性



(左)長辺方向最上階／基礎階伝達関数振幅, (中央と右)1次固有振動数及びピーク応答倍率と変形角の関係

図4 現行耐震基準(1981年以降竣工)建物の応答特性

参考文献

- [1] 大野晋・源栄正人 (2015) 強震観測から求めた仙台市低層公共建物の卓越周波数変化, 日本地震工学会第11回年次大会梗概集, p3-29.
- [2] 笹ノ間佑太・大野晋・三辻和弥 (2022) 地震観測記録に基づく東北地方中低層建物の動的特性の把握に関する研究, 日本建築学会東北支部研究報告集 構造系, 85, pp.13-16
- [3] 日本建築学会東北支部 (2022) 令和4年3月16日の福島県沖の地震災害調査速報

東北地方太平洋沖で発生した地震の P 波直後の波形を用いた震源深さ推定の試み*

弘前大学理工学研究科 小菅 正裕

1. はじめに

東北地方太平洋沖では 2011 年東北地方太平洋沖地震を初めとして多くの大地震が発生しており、今後も日本海溝・千島海溝沿い巨大地震の発生が懸念されている。そのため、太平洋沖プレート境界付近で比較的規模の大きな地震が発生した場合には、過去の地震も含めて地震活動評価を行う必要がある。プレート境界周辺では、東北地方太平洋沖地震に代表されるプレート境界地震、太平洋プレート内部を破壊するスラブ内地震、太平洋プレート最上部の海洋性地殻内地震、さらに陸側プレート内地震が発生するので、それらを識別して評価する必要がある。しかし、震源域が陸域の地震観測網から離れているために、走時データを用いる場合には震源深さと地震発生時刻の間にトレードオフが生じて、深さを精度良く決定できないという問題があった。2020 年 9 月以降については、日本海溝海底地震津波観測網 S-net のデータが気象庁の一元化震源決定処理に用いられるようになり、深さの精度は改善されたと言える。しかし、地震活動評価はそれ以前に発生した地震も含めて行う必要があるので、S-net 利用以前の期間における震源深さの問題は依然として残っている。図 1 は岩手県とその沖合で発生した地震の震源分布を比較したものである。

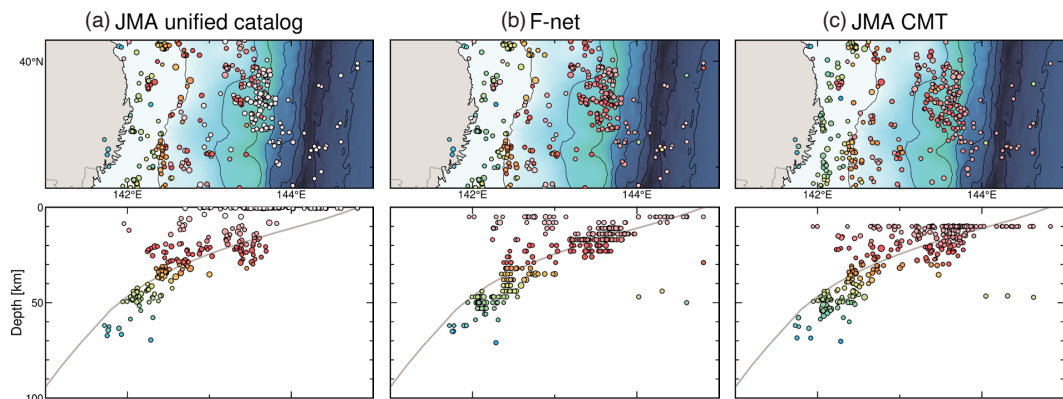


図 1 1997 年～2019 年の期間に気象庁 CMT 解が得られた地震の震源分布の比較。(a) 気象庁一元化震源、(b) F-net MT 解のセントロイド、(c) 気象庁 CMT 解のセントロイド。(b) は震央位置は (a) と同じで、波形を使ってセントロイド深さを推定したもの、(c) は波形を基にセントロイドの震央と深さを推定したもの。セントロイドを表す丸印の色は深さを示す。断面図の曲線は、Kita et al. (2010) と Nakajima and Hasegawa (2006) を基に弘瀬 < <https://www.mri-jma.go.jp/Dep/sei/fhirose/index.html> > がまとめた太平洋プレートと陸域プレートの境界。断面図は深さ方向に 2 倍に拡大している。

*Depth estimate using P-wave later phase from Pacific offshore earthquakes of Tohoku district by Masahiro Kosuga

(a) は気象庁一元化処理震源で、P波・S波の初動走時を用いる通常の震源決定法によるものである。震源はプレート境界周辺にばらついている他に、深さが0 kmに固定されたものが多数存在する。(b) と(c) は波形インバージョン法によるもので、観測波形と理論波形が合うように震源(点震源と見なしたときのエネルギー放射の重心のセントロイド)とモーメントテンソル解を推定したものである。海域で発生した地震については、走時を用いた震源よりも波形から決めた震源深さの方が信頼性が高いと考えられているが、図1の結果では深さ5 kmや10 kmに固定されたものも多く、波形を利用しても浅い地震の震源深さの精度が大幅に向上したようには見えない。

これまで、震源深さの改善には海底反射波のsP波を用いることも行われてきた(例えば, Umino et al., 1995)が、目視で確認できる周波数帯の利用に限られ、波動の空間的連続性は考慮されてこなかった。一方、Hi-net 観測網の地震計特性を補正して低周波成分を抽出すると、空間的に連続したさまざまな後続波が見られることがわかってきた。本研究ではその中でP波直後の後続波に注目し、波動伝播シミュレーションも用いて検討した結果、波形の震源深さ依存性を用いて震源の深さを推定できる可能性があることがわかったので報告する。

2. データ処理とシミュレーション

波形データ処理では、地震計の特性補正、フィルタリング、auto gain controlによる振幅調整を行った。その例を図2に示す。Hi-net 地震計の固有周波数は1 Hzであるので、それよりも低周波になるほど振幅が小さくなる。しかし、地震計特性の補正を行うことで、図に示す0.02–0.2 Hzの帯域

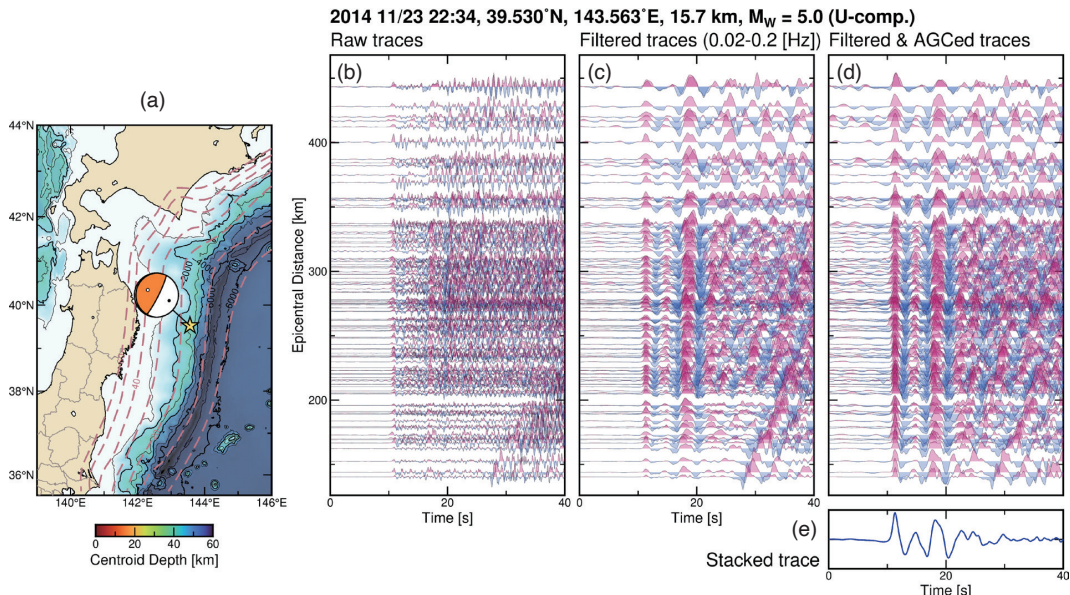


図2 波形データの処理。(a) は対象地震の震央とモーメントテンソル解。(b) は波形を震央距離順に並べたもので、P波初動を10 s程度の位置に合わせている。(c) は0.02–0.2 Hzの帯域フィルターをかけた波形。(d) は auto gain controlによる振幅補正を行った波形で、それを足し合わせた重ね波形を(e)に示す。(b)–(d)の波形は振幅が正の部分を赤、負の部分を青で塗りつぶして表示している。

での波も明瞭に見えるようになる。また、振幅調整によって波動の視認性が向上し、P波初動から10 s程度の時間範囲内で空間的に連続性した波動が明瞭に見える。その平均的な波動を表現するために、波形の重合を行ったものが(e)である。

このP波後続波の理論的再現性の検討を、波動伝播シミュレーションを基に行った。シミュレーションにはOpenSWPC (Maeda et al., 2017) を用い、3次元地下構造として全国1次地下構造モデル(JIVSM) (Koketsu et al., 2012) を用いた。震源位置・マグニチュード・メカニズム解は、気象庁CMT解のセントロイド位置・モーメントマグニチュード・モーメントテンソル解のダブルカット成分を与えた。

3. 観測とシミュレーションの比較

図2に示した地震に対して、Hi-net観測点での計算波形に対して観測波形と同様な処理を行って比較した結果が図3である。観測重合波形と比較すると、計算重合波形の2番目の正のピークの振幅は小さく、4番目の正のピークの振幅とピークまでの時間間隔が大きいという違いがあるが、対応する波動は概ね再現されていることがわかる。図3(c)は震源深さを変えてシミュレーションを行った場合の重合波形を示したものである。深さ10.7 km以深では、3番目の正のピークの出現時刻が深さとともに遅くなることわかる。このことは、観測波形と計算波形の比較から震源深さが推定できる可能性を示唆するものである。

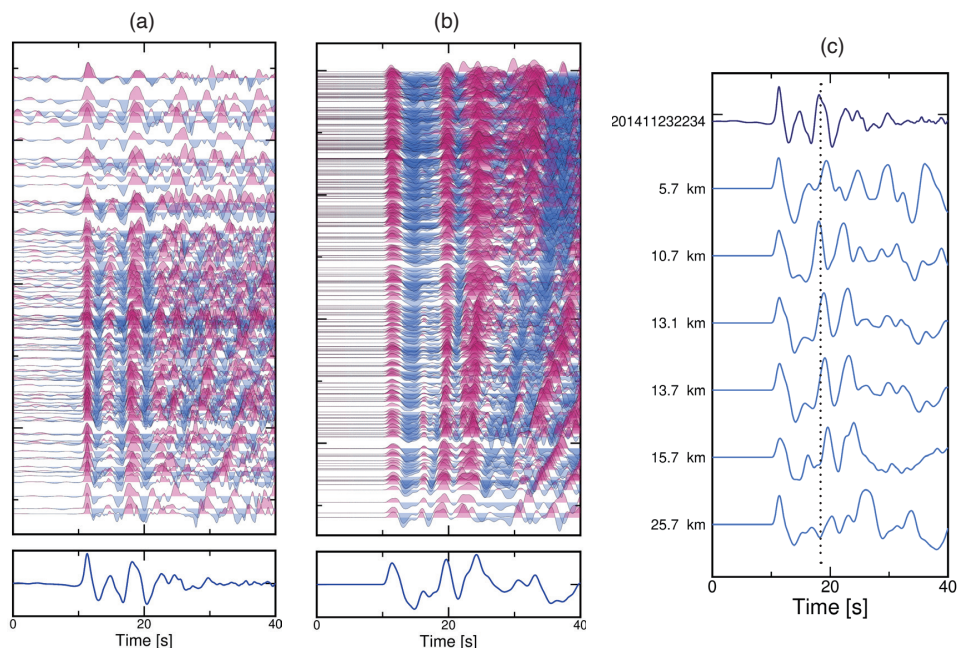


図3 観測波形と計算波形の比較。(a)は観測波形で図2(d)と同じ。(b)は計算波形を(a)と同様に表示したもの。(a)との観測点密度の違いは、(a)の観測波形ではS/N比が小さい観測点を除いて表示しているため。(c)は深さを変えた計算重合波形と観測重合波形(最上段)の比較。点線は観測重合波形の3番目のピークの位置を示す。

4. 震源深さの推定

図3の結果を受けて、深さを変えて計算した重合波形と観測重合波形の相関係数を求めた(図4(b))。それを深さの関数としてプロットすると、上に凸の分布となる(図4(c))。そこで、相関係数を深さの多項式で近似して相関が最大となる深さを求めると14.0 kmとなり、セントロイド深さ(15.7 km)よりもやや浅い値が得られた。観測波形と計算波形を重ね合わせて見ると(図4(b)), P波初動の正のピークと3番目の正のピークの時間間隔は、セントロイド深さを仮定した場合より

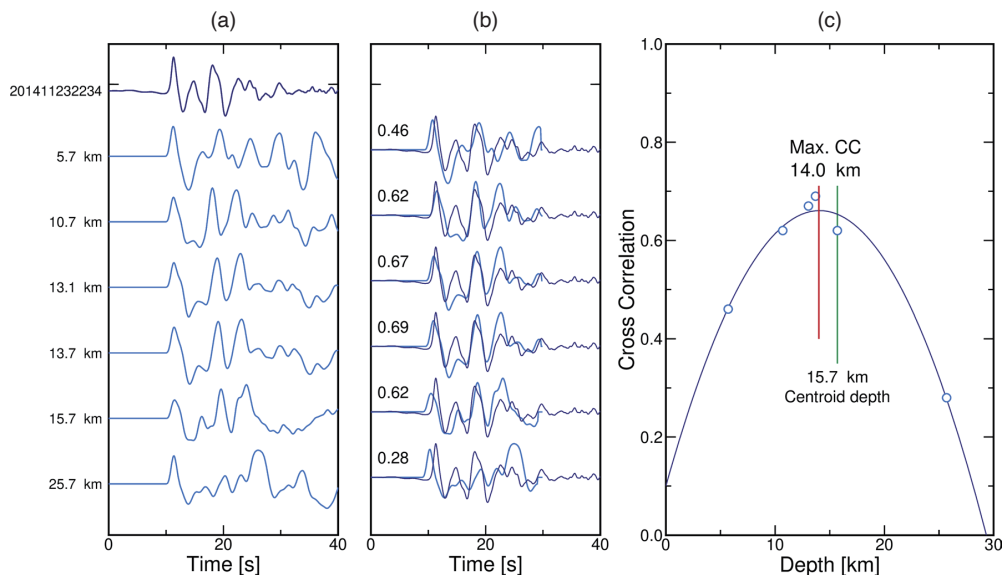


図4 震源深さの推定例(1)。(a)は観測重合波形と深さを変えた計算重合波形の比較(図3(c)と同じ)。(b)は観測重合波形と重ねて表示したもの。数値は相関係数を表す。(c)は相関係数を震源深さの関数としてプロットしたもの。黒い実線は相関係数を深さの多項式として近似したもので、赤い実線は相関係数が最大となる深さ。緑色の実線で示されるのは気象庁CMT解のセントロイド深さ。

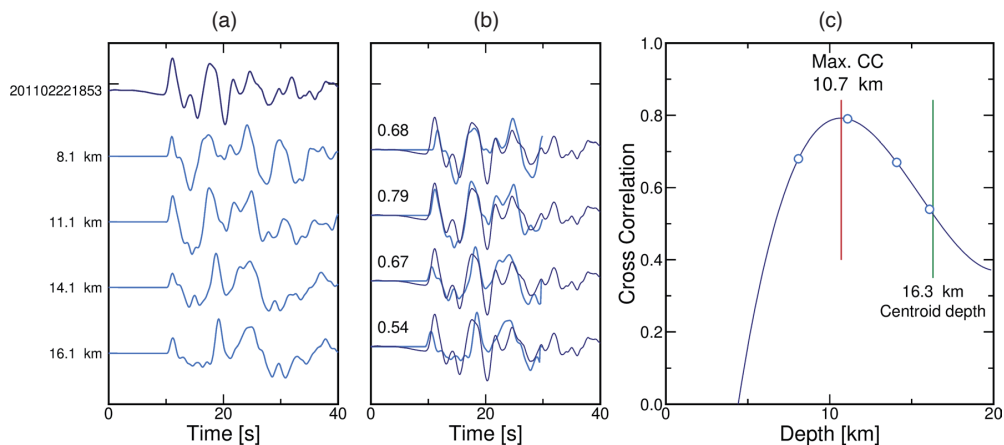


図5 震源深さの推定例(2)。図の表示は図4と同じ。

も 13.7 km を仮定した場合の方が合っていて、それが相関係数に反映されている。

図 5 は、東経 143.5° 付近の宮城県沖において発生した地震について、震源深さを推定した例である。この場合は、セントロイド深さ 16.3 km に対して、相関係数からは 10.7 km とかなり浅い値が得られた。低角逆断層型のモーメントテンソル解から、この地震はプレート境界で発生したものと考えられ、震央はプレート境界の深さ 10 km と 20 km の等深線の間に位置している。プレート境界の傾きは、沈み込みの開始点である日本海溝付近では低角度で、西にいくほど角度が増し、最終的に 30° 程度になる。したがって、10.7 km という深さが浅すぎることはないと考えられる。

以上のように、P 波初動直後の後続波について、深さを変えた計算波形と比較することで、震源深さを求めることができた。しかし、その深さが妥当かどうかは、別のデータ、例えば S-net による震源深さと比較するなどして検証する必要がある。

5. 議論

本研究では、P 波初動直後の後続波を震源深さ推定に利用する可能性を検討した。このような後続波は、どこで発生した地震において見られるのであろうか？ 図 6 は、岩手県沖で発生した地震の観測重合波形を並べて示したものである。図 2 と同様な後続波は、(b) では下の 2 地震を除いて、(c) では一番下の地震を除いて見られるので、P 波初動直後の後続波は特別な地震に限られるものではないことがわかる。(a) に示したプレート境界の等深線と比較すると、図 2 と同様な後続波は、20 km の等深線よりも東側で発生した地震に対して見られることがわかる。また、(c) の一

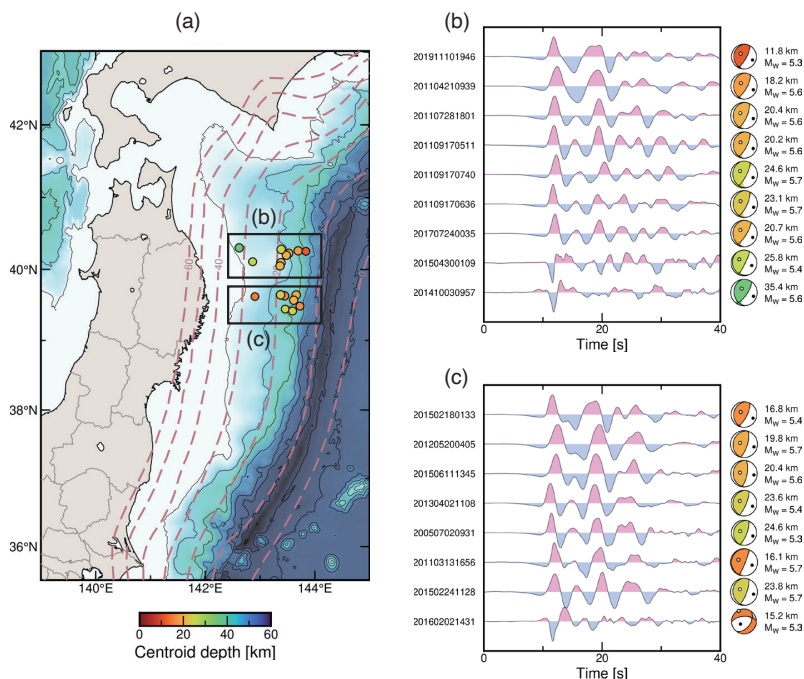


図 6 (a) の図中の (b) と (c) の領域で発生した地震の観測重合波形。波形は東側で発生した地震が上になるように並べていて、その右にモーメントテンソル解を示す。モーメントテンソル解の押しの領域の色はセントロイド深さを示す。

番下の地震のモーメントテンソル解は、他の全ての地震の解（低角逆断層型）とは異なっている。これらのことから、本研究で着目した後続波は、浅い低角逆断層型の地震において見られる可能性が高い。それ以外の地震からはどのような後続波が出現するかについては、系統的な調査が必要である。

P波後続波を用いての震源深さ推定は、計算重合波形が深さとともに系統的に変わること根拠にしている。深さ推定の理論的裏付けを得るためには、P波後続波の起源を明らかにする必要がある。OpenSWPCで出力される波動場のスナップショットを用いて、陸域の観測点に出現するP波後続波を時間を遡って震源方向に追っていくと、マントルウェッジ部分で生成されていることがわかった。観測重合波形では、震源が浅くなるとP波と後続波の時間間隔が短くなる。これは震源よりも上方での反射を示唆するが、起源の特定にはさらに詳細な検討が必要である。

6. おわりに

本研究では、CMT解析においても深さの推定が困難な浅い地震（図1）について、P波初動直後の後続波を計算波形と比較することで、震源深さを推定する可能性を示した。今後は、S-netを用いて推定された震源深さと比較して方法の妥当性を確認するとともに、後続波を効率的に利用して3次元的な震源位置を推定する方法の開発が必要である。

謝辞

本研究では防災科研H-netの観測波形とMT解カタログ、および気象庁一元化震源とCMT解カタログを使用した。波動伝播シミュレーションには東京大学地震研究所のEIC計算機システムを利用した。（公財）地震予知総合研究振興会からは研究費の援助をいただいた。以上の機関に謝意を表す。

文献

- Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima, and T. Matsuzawa, 2010, Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 290, 415-426.
- Koketsu, K., H. Miyake, and H. Suzuki, 2012, Japan integrated velocity structure model version 1, 15th World Conference on Earthquake Engineering.
- Maeda, T., S. Takemura, and T. Furumura, 2017, OpenSWPC: an open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media, *Earth Planets Space*, 69:102, doi: 10.1186/s40623-017-0687-2.
- Nakajima, J., and A. Hasegawa, 2006, Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone?, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16309, doi: 10.1029/2006GL026773.
- Umino, N., A. Hasegawa, and T. Matsuzawa, 1995, sP depth phase at small epicentral distances and estimated subducting plate boundary, *Geophys. J. Int.*, 120, 356-366.

青森での 1993 年北海道南西沖地震*

北海道大学 鏡味 洋史

秋田大学地域防災減災総合研究センター 水田 敏彦

1. はじめに

1993 年北海道南西沖地震は北海道に多大の被害をもたらしたが、隣県の青森県ではどのような被害・影響があったのか 30 年前の災害を振り返ってみる。本地震は、日本海東縁に発生する海溝型地震であり、青森県では深浦で震度 5、むつ、青森で震度 4 を観測した。当時の地震調査報告書、学術論文、当時の新聞記事などを紐解いてみる。

2. 青森県の防災ホームページでの北海道南西沖地震

青森県危機管理局防災危機管理課のホームページ¹⁾には、『過去の災害情報』のページがあり、主な災害として地震については表 1 に示す 3 つの地震、1968 年十勝沖地震・1983 年日本海中部地震・1994 年三陸はるか沖地震が掲げられている。1993 年北海道南西沖地震は含まれておらず探すと、『過去の災害情報』として 1980~2021 の災害を年ごとにまとめた一覧表があり、平成 5 (1983) 年の災害 12 件の一つとして 1 行の被害統計が掲げられているのを見つけた。表 2 に抜粋して示す。人的被害は死者 1 名、住宅被害は一部破損が 2 棟のみである。被害額は総計 7 億円を超えるが、農林関係、水産関係が多い。

表 1 青森県の主な地震として掲げられている 3 地震¹⁾

発生年月日	被害等
1968 (昭和 43) 年 5 月 16 日 (十勝沖地震)	マグニチュード 7.9、震度 5 八戸、田名部、青森 震度 4 弘前 死者 46 名、行方不明者 2 名、重軽傷者 671 名 被害額 470 億円 (うち農林関係 114 億円、水産商工関係 102 億円)
1983 (昭和 58) 年 5 月 2 日 (日本海中部地震)	マグニチュード 7.7、震度 5 深浦、むつ 震度 4 青森、八戸 死者 17 名、重軽傷者 25 名 被害額 518 億円 (うち土木関係 146 億円、農林関係 104 億円、建物関係 101 億円)
1994 (平成 6) 年 12 月 28 日 (三陸はるか沖地震)	マグニチュード 7.5、震度 6 八戸 震度 5 青森、むつ 死者 3 名、重軽傷者 783 名 被害額 755 億円 (うち商工労働関係 477 億円、建物関係 122 億円)

表 2 青森県の平成 5 年の災害一覧¹⁾ から 1993 年北海道南西沖地震を抜粋。

人的		住家被害				非住家被害	被害額 (単位: 千円)									
死者	負傷者	全壊	半壊	一部破損	床上浸水		床下浸水	建物関係	環境保健関係	商工労働関係	農林関係	水産関係	土木関係	文教関係	その他	計
1				2			4	695	10,473	51,178	422,578	166,254		41,510	1,852	724,540

*The 1983 Hokkaido-Nansei-oki Earthquake for Aomori prefecture. by Hiroshi Kagami and Toshihiko Mizuta

3. 被害調査報告書などの東北地方の被害報告および統計

地震直後の被害調査報告書，被害調査に関する論文などで取り扱われている北海道以外の被害について概観してみる。

3.1 日本被害地震総覧²⁾

日本被害地震総覧によると，地震の諸元は 1983.7.12, 22 h 17m, M=7.9, h =35 km, 北海道内では各種施設の多大の被害があった。とくに津波は日本海沿岸の各地（含む沿海州，朝鮮半島）に達したとしている。表 3 に示すように各種の被害統計表が掲載されている。大半は北海道のみを取り纏めたもので，それ以外の被害については全国統計として一括表示あるいは，東北地方の内数が示されているのみである。

表 3 日本被害地震総覧²⁾に掲載の各種被害表での北海道以外の被害の取り扱い

番号	表題	統計の範囲
表 369-1	被害状況全道集計表	北海道のみ
表 369-2	全国の被害の状況（消防庁）	内訳なし
表 369-3	建物被害状況	北海道のみ
表 369-4	地震保険支払見込	東北地区内数
表 369-5	危険物の被害状況	北海道のみ

3.2 科研費報告書³⁾

研究代表者（北海道大学：石山祐二）ほか分担者 23 名よりなるが東北地方の分担者は東北大学，秋田大学の各 1，計 2 名のみである。津波の報告は，北海道から九州に亘る日本海沿岸の一部として東北地方の報告があるが，その他の建物被害など東北地方の記載は全くない。もっぱら，北海道の被害地震として扱われている。

3.3 日本建築学会災害調査報告書⁴⁾

被害統計は北海道のみである。強震記録は八戸，新潟の記録が取り上げられている。地盤関係の被害の中で青森県車力村の液状化が報告されている。後述の学会報告による。人的被害の章では，大間町で 1 名の船から転落死が記載されている。

表 4 日本建築学会災害調査報告書⁴⁾の目次と，北海道以外の記載の一覧

章	表題	備考	東北地方等北海道以外の記載
1	被害概要	一覧表は北海道のみ	
2	地震及び地震動		強震記録：八戸・新潟
3	地盤および地質		
4	津波および津波被害	西日本・韓国	
5	火災	北海道のみ	
6	建築構造物の被害	詳しいが北海道のみ	
7	土木構造物の被害	北海道のみ	
8	地盤・ライフラインの被害		青森県車力村での液状化
9	人滝被害		大間町で船から転落死

3.4 土木学会震害調査報告書⁵⁾

全15章よりなる大部な報告書である。北海道以外での被害は人的被害(大間町での死者1)、津波被害、農業被害の記載がある。強震記録については、東北各地の強震記録が紹介されている。表5に報告書の目次と北海道以外の記述を示す。

表5 土木学会震害調査報告書⁵⁾の目次と、北海道以外の記載の一覧

章	表題	備考	東北地方等北海道以外の記載
1	はじめに		
2	地震・地殻変動	強震記録	北海道以外もあり、青森港。八戸港、津軽大橋、下湯ダム、米代川堤防など
3	地震動		
4	津波	5節：新潟県以西	4節：東北地方
5	地盤		
6	河川		
7	道路		
8	鉄道		
9	農地・農業用施設		青森・秋田県の被害一覧表
10	港湾・漁港		
11	ライフライン		
12	建築物の被害		
13	火災		
14	情報伝達		
15	救出・救援活動		

3.5 学術論文

三輪・森・沼田⁶⁾は1983年日本海中部地震の際の液状化被災地を中心に現地調査を行なっている。北海道南西沖地震は震源距離が遠かったこともあり、液状化による噴砂を確認したのは青森県車力村下牛潟地区の水田だけであったとしている。車力村の被害箇所、被害概要などを表6にまとめ直し示す。これらの結果は、前述の日本建築学会被害調査報告に反映されている。

表6 車力村の液状化被害一覧、三輪・他⁶⁾より作成

町村	場所	構造物	被害の概要	地形・地質
車力村	牛潟 太田光	水田・休耕田	水田被害 1983年日本海御中部地震の際に液状化	砂丘と沖積低地の境界
		住宅	ブロック塀の開口亀裂、土蔵の壁崩落	
	屏風山砂丘	休耕田	1983年日本海御中部地震の際に液状化	砂丘の吹き抜け凹地

4. 新聞記事

青森県の代表的な地方新聞に東奥日報がある。青森県立図書館でマイクロフィルムを閲覧複写し、1993年7月13日朝刊から16日朝刊までの記事を翻刻し利用した。また、全国紙として朝日新聞をデータベース聞蔵Ⅱ⁷⁾を利用し青森版の記事を収集し資料とした。両新聞の見出しを日を日付順に表7に示す。朝日新聞は朝刊のみである。地震に関する項目を当時の市町村別に整理し表8に、分布を図1に示す。

表 7 新聞記事の見出し一覧

日	東奥日報	朝日新聞
13日	■線路点検、漁船は避難 県内	■線路点検、漁船は避難 県内
夕刊	■大間では「漁民死ぬ」恐怖の一夜 ハマ緊迫 県内、避難勧告解除」出漁船の消息気遣う●漁船2隻沈没 深浦漁港●県が被害対策」連絡本部設置■海峡線ストップ」乗客、フェリーへ殺到■震度計が降り切れる」日本海側」青森気象台●奥尻島警戒へ」護衛艦を派遣」陸自大湊	
14日	■車力で流砂現象確認」水田2ヶ所■農道やため池に亀裂」土蔵、体育館など一部崩壊■6割が「まず火元」寝入りばな、慌てず行動」本社調査●地震の空白地帯」以前から危険」田中弘大教授●海峡線不通続く	■生活への「余波」終日」交通機関乱れ 休校も」北海道南西沖地震 ■深浦で漁船2隻が沈没
夕刊	■被害3億3千万円 県内13日現在	
15日	■県が地震災害融資」中小企業向け 経営安定制度を適用」■海峡線が復旧 北海道南西沖地震●義援金受付開始」日赤県支部●義援金や救援物資」郵便料金を免除」県内郵便局●園児ら募金活動」消防士も」鱒ヶ沢	■北海道南西沖地震」県内の被害、3億円超す」水産施設被害で1億6540万円 ●津軽海峡線が」運転を再開 ●救援募金を受け付け」八戸市
夕刊	■津波時速 652 キロ 北海道南西沖地震」深浦験潮所●奥尻へ麗水 240 本」青森・八甲田の水研究会が送る	
16日	■県内被害は4億円超す●行方不明者捜索へ」海自が大湊港出	■義援金活動広がる」青森市職員も ●不明者捜索に」派遣部隊出向」海自大湊基地

表 8 新聞記事による市町村別被害一覧

郡	市町村	津波関連	ライフライン	建物	その他	現市町村
東津軽郡	青森市			中央病院壁亀裂	観光物産館アンテナ支柱破損、商品被害	青森市
	今別町		水道管破損、断水 280 戸 14 日以降復旧			今別町
	平内町			病院配管破損		平内町
	蟹田町				農業被害	外ヶ浜町
西津軽郡	木造町		水道管破損、断水 50 戸 13 日中復旧			つがる市
	車力村			一部破損 1 戸	水田液状化	
	鱒ヶ沢町	住民一部避難				鱒ヶ沢町
	深浦町	津波 25 cm、漁船沈没 2 被害 6 隻、漁具流出			商品被害	深浦町
	岩崎村	避難勧告 550 人			農業被害	
中津	弘前市		電柱トランス出火、鎮火			弘前市
南津	黒石市				農業被害	黒石市
	平賀町			土蔵一部破損		平川市
北津軽郡	五所川原市			病院壁亀裂、配管破損	工場生産ライン停止、商品被害	五所川原市
	金木町		停電	病院壁亀裂		
	市浦村	避難命令	500 戸停電、水道管破損、13 日復旧			
	中里町			一部破損 1 戸		中泊町
	小泊村	30-100 cm潮位上昇、高台避難、タグボート沈没 1	水道一部破損	医療施設一部破損		

上北郡	十和田市				商品被害	十和田市
	三沢市				商品被害	三沢市
	天間林村				農業被害	七戸町
	六ヶ所村				動燃異状なし	六ヶ所村
下北	横浜町				農業被害	横浜町
	大間町	沖出帰港後係留中海に転落死亡 37M				むつ市

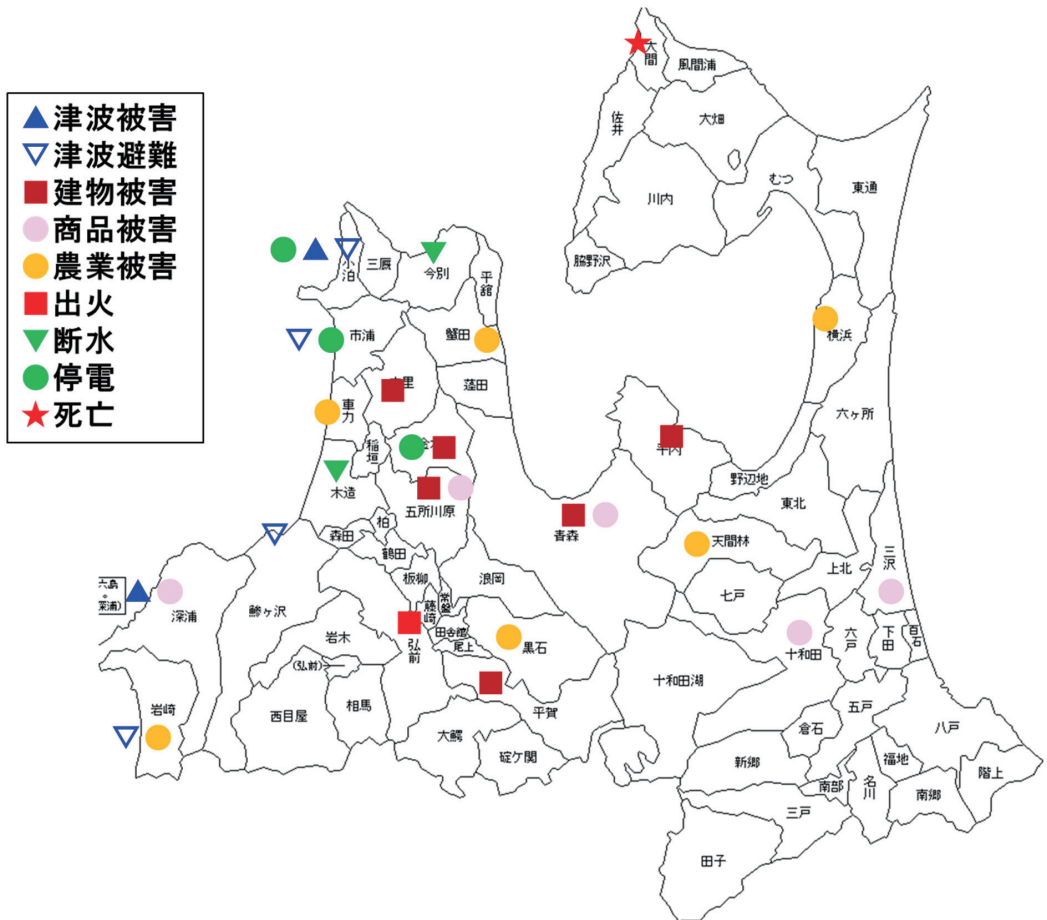


図1 新聞記事に表れた市町村別被害

津波被害は日本海沿岸の深浦町、小泊村でみられ、大間町では津波の沖出から帰港中1名が海中に落下死亡している。金木町、五所川原市では病院の壁に亀裂が入る軽微な建物被害が生じている。ライフライン被害は断水、停電が各地でみられるが短時間のうちに復旧している。鉄道は、青森—三沢、青森—碓ヶ関、鳴沢—鯉ヶ沢間が一時不通になった。青森—函館間の津軽海峡線は北海道側の被害により全面運休となり、代替のフェリーが混雑したこと、青森—千歳の臨時航空便が運航されたことが大きく報じられている。

5. まとめ

小論では、1983年北海道南西沖地震の際の隣県である青森県での被害について、当時の被害調査報告書、新聞記事を再読し、どんな地震であったのか考察した。青森県の防災のホームページでは主な過去の地震被害としては挙げられておらず、年次の災害の記録として一行の被害統計が示されているのみである。史料を再読した結果、確かに被害は軽微ではあったが、それなりの影響・インパクトを与えていたことを明らかにすることができた。特に同地に多大な被害をもたらした10年前の1983年日本海中部地震の記憶は新しく様々な教訓が生かされていたことを再認識することができた。大規模な地震の場合、どうしても被害集中地域のみが着目されがちであるが、隣接地域の被害や影響についても貴重な災害履歴として活かしていくべきである。同様の事例は他にも多くあるはずである。今後とも史料発掘に努め考察していきたい。

文献

- 1) 青森県防災ホームページ, 2022.11.8 閲覧
<https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kikikanri/bosaikikikanri/>
- 2) 宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子, 日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 511-515, 2013.
- 3) 石山祐二(研究代表者): 平成5年北海道南西沖地震・津波とその被害に関する調査研究, 文部省科学研究費突発災害調査研究成果, 196pp, 1994.
- 4) 日本建築学会: 1993年北海道南西沖地震災害調査報告, 日本建築学会, 237-497, 1995.
- 5) 土木学会耐震工学委員会: 193年北海道南西沖地震震害調査報告, 499pp, 1997.
- 6) 三輪滋・森伸一郎・沼田淳紀: 1983年北海道南西沖地震における青森県車力村での再液状化, 日本建築学会東北支部研究発表会, 289-292, 1994.
- 7) 朝日新聞社: 記事データベース聞蔵Ⅱ, <https://database.asahi.com/index.shtml>, (2022.10.入手)

3次元不均質速度構造モデルを用いた 青森県周辺の地震に対する CMT 解推定*

弘前大学大学院理工学研究科 増永 仁・前田 拓人・高野 智也

1. はじめに

地震の発震機構は、定常的な地震活動を把握するのみならず、地域の応力場やひずみ場を評価する上でも重要な指標である。発震機構の推定結果は発震機構解と呼ばれ、そのひとつにセントロイドモーメントテンソル解 (CMT 解) がある。日本周辺で発生した地震については 1990 年代以降、気象庁や防災科学技術研究所 (防災科研) が逐次的に CMT 解を推定している。

CMT 解は、地下構造を仮定して計算した理論波形と観測波形がよく一致するようなセントロイドとモーメントテンソルを探索することで推定される。気象庁や防災科研は、水平成層をなす 1 次元地震波速度構造を仮定して CMT 解の推定を行っている。しかし地下の 3 次元不均質が強い地域では、1 次元速度構造モデルによる CMT 解に系統誤差の含まれる可能性が明らかになっている (例えば Takemura et al., 2020)。

青森県の周辺には日本海溝と千島海溝が存在し、直下には太平洋プレートが沈み込んでいるため、地下構造は 3 次元的不均質性が強いと考えられる。そこで本研究では、青森県周辺で発生した地震を対象に、3 次元不均質速度構造モデルを用いて CMT 解を推定する。また 1 次元速度構造モデルを用いて求められた CMT 解と比較し、3 次元不均質速度構造モデルの適用が CMT 解の推定にもたらす影響を検討する。

2. 手法

本研究では、気象庁一元化震源カタログおよび広帯域地震計の変位波形を用いて CMT 解を推定する。以下では、モーメントテンソルの推定とセントロイドの推定を順に説明する。

モーメントテンソルの推定は、適当なセントロイドを仮定したときに観測点位置より期待される JMA2001 モデル (上野・他, 2002) の P 波理論走時から 120 秒間の観測波形を使用して行う。ここで短波長不均質構造と震源時間関数の影響を軽減するため、波形には一元化震源において M5 未満の場合に 0.02 – 0.05 Hz の、M5 以上の場合に 0.01 – 0.05 Hz のバンドパスフィルタを適用する。なお純粋な断層運動による地震は体積変化を伴わないため、中村・他 (2003) に従ってモーメントテンソルの対角成分の和がゼロになる拘束条件を加える。すなわち全波形のうち i 番目の理論波形 u_i は、 n 番目のモーメントテンソル成分 m_n とグリーン関数 G を用いて時刻 t において

$$u_i(t) = \sum_{n=1}^5 m_n * G_{in}(t) \quad (1)$$

* CMT inversion for earthquakes in and around Aomori prefecture, northern Honshu, Japan, using three-dimensional heterogeneous velocity structure by Jin Masunaga et al.

表1 セントロイドの探索範囲

マグニチュード	$M < 5$	$5 \leq M < 6$	$6 \leq M$
水平方向 [°]	[-0.1, 0.1]	[-0.2, 0.2]	[-0.5, 0.5]
深さ方向 [km]	[-10, 10]	[-20, 20]	[-50, 50]
時間方向 [s]	[-2, 2]	[-6, 6]	[-6, 16]

と表され、これを m について解いてモーメントテンソルを推定する。

セントロイドの推定は、(1)式に従い理論波形を計算したとき、観測波形と理論波形の適合度 (Variance Reduction; VR) が最も高い発震時刻と震源位置を探索することで行う。ここで波形の適合度は、 i 番目の波形における時刻 t の観測振幅を $f_i(t)$ 、理論振幅を $g_i(t)$ としたとき

$$VR = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N \int [f_i(t) - g_i(t)]^2 dt}{\sum_{i=1}^N \int [f_i(t)]^2 dt} \right) \times 100 [\%] \quad (2)$$

と定義する。セントロイドの探索候補は、震源カタログの発震時刻と震源位置を取り囲むよう表1の範囲に水平方向 0.1°, 深さ方向 1 km, 時間方向 1 秒の間隔で設定する。

なお以下のいずれかの条件に当てはまる場合については、CMT 解が不正確な可能性があるとして推定結果から除外する。1つ目は推定した CMT 解をもとに各観測点で求めた VR について、50%以上の観測点数が 2 点未満の場合である。2つ目は VR が 50%以上の全観測点についてセントロイド位置からの方位角を求めたとき、その差の最大値が 45°未満の場合である。

3. データ

本研究では、北緯 39.5–42.0°, 東経 138.0–146.0°, 深さ 150 km 以浅で 2004 年 4 月 1 日から 2022 年 9 月 30 日までに発生した M3.0 以上の地震 (図 1) を解析対象とした。波形記録には防災科研の広帯域地震観測網 F-net のうち、北海道、東北地方および北陸地方に位置する 20 点の変位波形を使用した。モーメントテンソルの推定に用いるグリーン関数は、差分法および相反定理を用いて OpenSWPC (Maeda et al., 2017) により計算した。グリーン関数の計算に使用する速度構造について、3次元不均質速度構造としては Koketsu et al. (2012)の全国 1 次地下構造モデル (JIVSM) を用いた。また、1次元速度構造としては防災科研 F-net における CMT 解の推定で使用されている Kubo et al. (2002)のモデルを用いた。

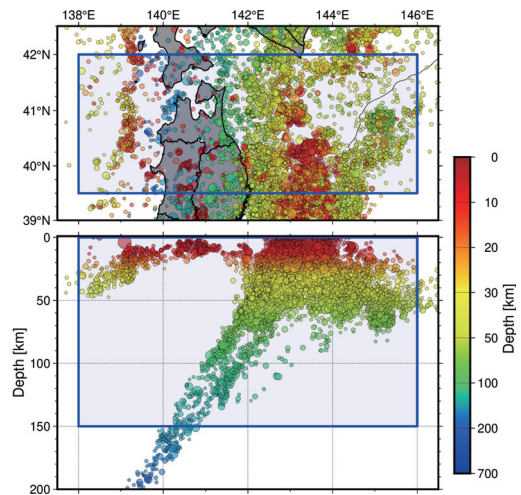


図1 青森県周辺の地震活動 (丸印) と解析対象領域 (青色枠)。気象庁一元化震源で 2004 年 4 月から 2022 年 9 月までに発生した M3.0 以上の地震を示している。

4. 結果

解析の対象となった 8967 地震について、1 次元速度構造モデルを使用した場合と、3 次元不均質速度構造モデルを使用した場合のそれぞれについて CMT 解を推定した (図 2)。推定した地震数はそれぞれ 2174 地震, 2646 地震となり, 3 次元不均質速度構造モデルで解析した地震数の方が約 22% 多かった。解析に使用した観測点数の頻度分布は図 3 のようになり, 3 次元不均質速度構造モデルを用いることで多数の観測点を使用した割合が増加した。またモーメントテンソルに含まれる断層運動の割合を示したダブルカップル成分比 (DC 成分比) の頻度分布は図 4 のようになり, 3 次元不均質速度構造モデルを用いることで 80% 以上の割合が増加した。

以下ではプレート境界付近の CMT 解に着目する。図 5 は, 測線の周囲 10 km にセントロイドが求まった CMT 解の分布を示したものである。A-A'断面, B-B'断面, C-C'断面のいずれも, 3 次元不均質速度構造モデルを用いることで東側を中心に低角逆断層型の CMT 解が多く解析された。特に B-B'断面と C-C'断面では, 測線の中央部から東側にかけて, セントロイド深さがプレート境界深さに近い CMT 解が多く推定された。図 6 はプレート境界型と考えられる地震の CMT 解について, 太平洋プレート (PAC) の沈み込み角に対する節面の傾斜角について頻度分布を示したものである。ここでプレート境界型の地震は, JIVSM による PAC 上面の深さが 10–80 km で, セントロイド深さが PAC 上面から ± 20 km, 走向が 180–270°かつすべり角が 45–135°に該当するものと定義した。また節面は傾斜角の小さい面を選択した。1 次元速度構造モデルを用いた場合は沈み込み角よりも傾斜角が 5°や 25°程度大きい CMT 解を多く推定したが, 3 次元不均質速度構造モデルを用いた場合には傾斜角が 25°程度大きい CMT 解をほとんど推定しなかった。これらの結果は, 3 次元不均質速度構造モデルを用いて CMT 解を推定することで, よりプレートの沈み込み角に近い傾斜角を持つ CMT 解の割合が増加したことを意味する。

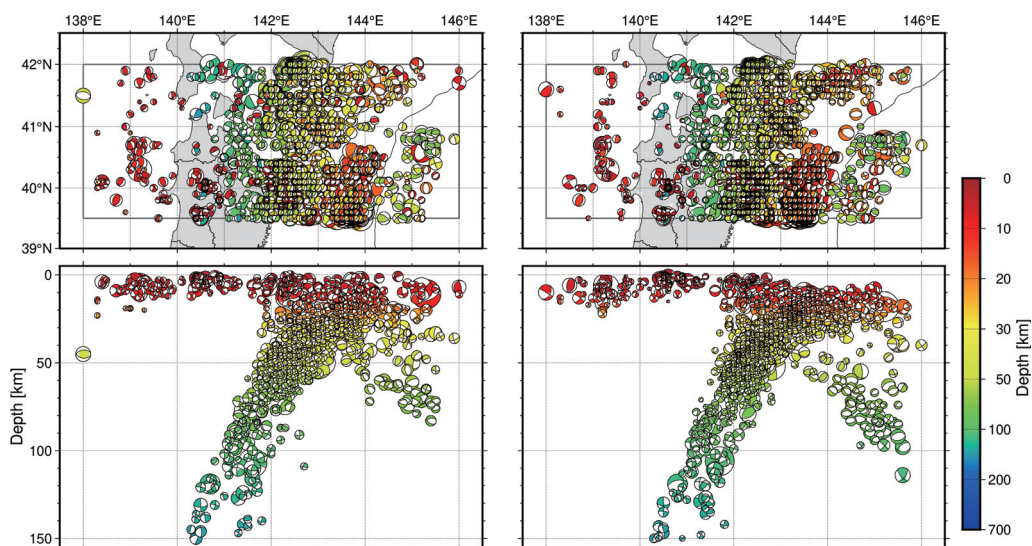


図 2 1 次元速度構造モデルを使用して推定した CMT 解 (左) と 3 次元不均質速度構造モデルを使用して推定した CMT 解 (右)。平面図の灰色枠は解析対象領域。

5. 議論

本研究で、3次元不均質速度構造モデルを用いることで1次元速度構造モデルを用いた場合よりも多数の観測点を使用してCMT解を推定できた理由には、北海道や新潟県の低速度異常の存在が考えられる。図7は気象庁一元化震源で深さ10 km以浅となった地震について、震央とCMT解の推定に使用した観測点を結んだ線を全地震について重ねたものである。北海道や新潟県にある一部の観測点は1次元速度構造モデルによる推定でほとんど使用されていないことが分かる。これらの地域では、地震波干渉法を用いた3次元のS波速度構造に関する推定(Nishida et al., 2008)において低速度異常が描像されている。つまり、青森県周辺の地震に対するCMT解の推定において多数の観測点を利用するには、3次元不均質速度構造モデルの導入

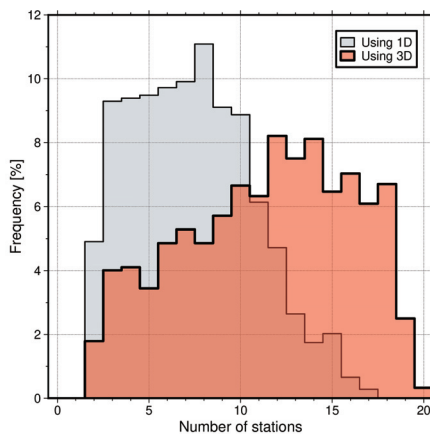


図3 使用した観測点数の頻度分布。灰色は1次元速度構造モデルを、橙色は3次元不均質速度構造モデルを用いた場合のもの。

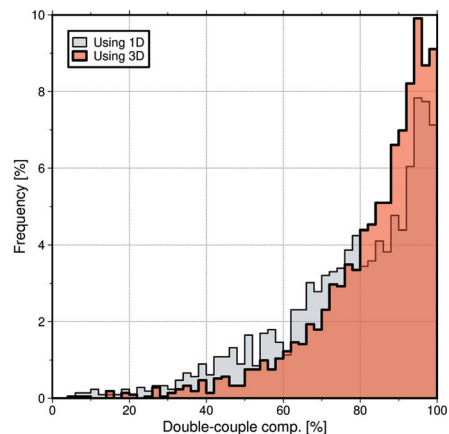


図4 DC成分比の頻度分布。灰色は1次元速度構造モデルを、橙色は3次元不均質速度構造モデルを用いた場合のもの。

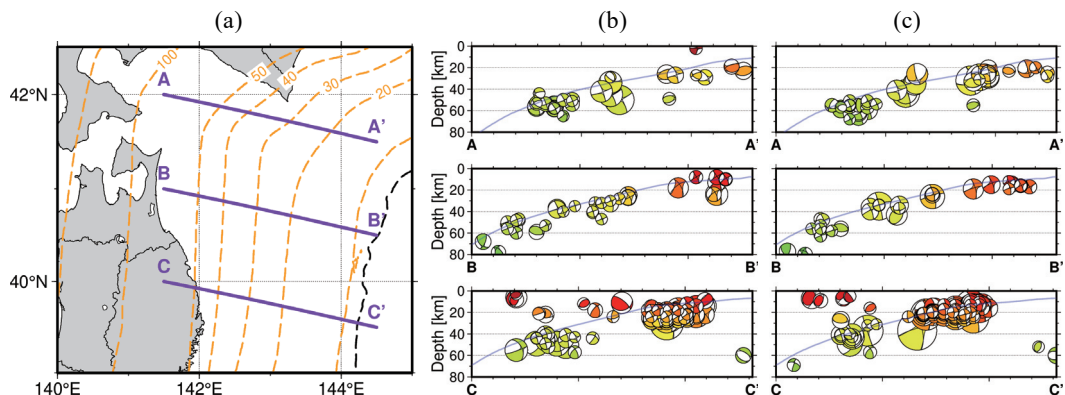


図5 (a)測線の位置。黒点線は海溝軸、橙点線はJIVSMによるプレート境界深さ。(b)1次元速度構造モデルを用いたCMT解 ($M_w \leq 4.0$) の測線断面図。(c)3次元不均質速度構造モデルを用いたCMT解 ($M_w \leq 4.0$) の測線断面図。(b)(c)の青線はプレート境界。CMT解の大きさは規模に応じている。CMT解の色は図1のカラーズケールを参照。

が不可欠であると考えられる。

3次元不均質速度構造モデルを用いた CMT 解は、1次元速度構造モデルを用いた CMT 解よりも推定誤差が減少していると考えられる。DC 成分比は、一般には断層運動による地震で大きくなるが、観測波形の SN 比が悪い場合や、不均質構造の影響によってグリーン関数が不適切だった場合には小さくなることもある（例えば 川勝, 1991）。図 4 のように 3次元不均質速度構造モデルを用いることで DC 成分比の高い地震が増加したことは、不均質構造を考慮することによって断層運動によりふさわしい CMT 解を推定できるようになったことを示すと考えられる。ただし、3次元不均質速度構造モデルを用いた CMT 解にも DC 成分比が低い地震が一部存在する。これは、本研究で使用したモデルで再現できていない不均質構造が影響している可能性や、実際に DC 成分比の低い地震が発生している可能性などが考えられる。DC 成分比の低い地震について議論するには、これらの可能性を切り分けて検討する必要がある。

ところで、海溝軸付近やその東側にセントロイド位置が求まった CMT 解では、いずれの速度構造モデルを用いてもその深さが 50 km 以深となる場合があった（図 2）。太平洋プレートの厚さは数十 km に及ぶが、海洋プレート内で発生する地震のほとんどはプレートの中心や浅部で起こると考えられている（例えば 長谷川・他, 2015）。つまり、これらの CMT 解は推定結果が十分に正確でない可能性が考えられる。

6. おわりに

本研究では、青森県周辺で発生した地震について 3次元不均質速度構造モデルを用いることで、1次元速度構造モデルを用いるよりも多数の観測点を用いて多数の CMT 解を推

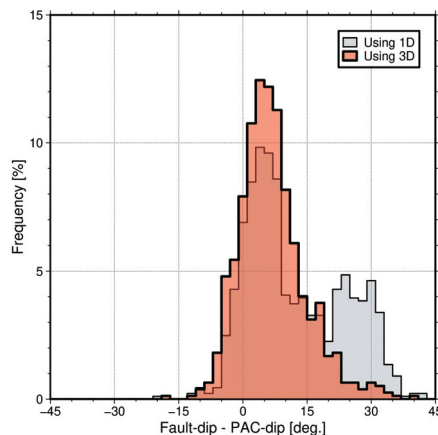


図 6 傾斜角の差の頻度分布。値は節面の傾斜角から太平洋プレートの沈み込み角を引いたもの。灰色は 1次元速度構造モデルを、橙色は 3次元不均質速度構造モデルを用いた場合のもの。

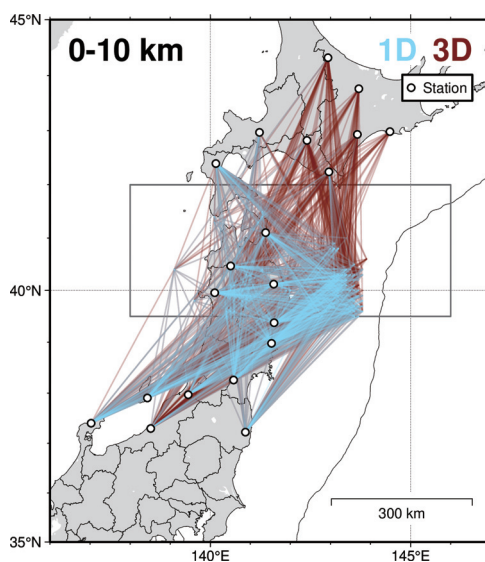


図 7 CMT 解を推定した地震のうち、震源深さが 10 km 以浅の震央と推定に使用した観測点を結んだ線。青色線は 1次元速度構造モデルを、赤色線は 3次元不均質速度構造モデルを用いて推定した場合のもの。丸印は観測点。灰色枠は解析対象領域。

定できることを明らかにした。また、3次元的不均質性が特に大きいと考えられるプレート境界付近の地震では、陸上にある観測網から離れているにも関わらず、プレート境界型地震を強く示唆する低角逆断層型の CMT 解が推定されることを示した。

今後の展望として、海底地震計を併用した CMT 解の推定が挙げられる。防災科研は日本海溝海底地震津波観測網 S-net の運用を 2016 年より開始している。S-net 観測点は広帯域地震計を持たないため一定の工夫を必要とすると考えられるが、海域の地震を中心に解析精度を更に向上できる可能性がある。

謝辞

本研究には、気象庁の一元化震源データおよび JMA2001 走時表、および防災科学技術研究所 F-net の広帯域地震観測網波形記録を使用しました。

文献

- 長谷川昭・佐藤春夫・西村太志. (2015). 地震学. 共立出版.
- Kubo, A., Fukuyama, E., Kawai, H., & Nonomura, K. I. (2002). NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application. *Tectonophysics*, 356(1-3), 23-48. doi:10.1016/S0040-1951(02)00375-X.
- 川勝均. (1991). 地震の大きさと多様性—Moment tensor inversion を中心として—. 地震 第 2 輯, 44, 265-277. doi:10.4294/zisin1948.44.Supplement_265.
- Koketsu, K., Miyake, H., & Suzuki, H. (2012). Japan integrated velocity structure model version 1. In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (Vol. 1)*, Paper number 1773, Lisbon.
- Maeda, T., Takemura, S., & Furumura, T. (2017). OpenSWPC: an open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 1-10. doi:10.1186/s40623-017-0687-2.
- 中村浩二・青木重樹・吉田康宏. (2003). 気象庁広帯域地震観測網による CMT 解析. 験震時報, 66(1), 1-15.
- Nishida, K., Kawakatsu, H., & Obara, K. (2008). Three-dimensional crustal S wave velocity structure in Japan using microseismic data recorded by Hi-net tiltmeters. *Journal of Geophysical Research*, 113, B10302. doi:10.1029/2007jb005395.
- Takemura, S., Okuwaki, R., Kubota, T., Shiomi, K., Kimura, T., & Noda, A. (2020). Centroid moment tensor inversions of offshore earthquakes using a three-dimensional velocity structure model: slip distributions on the plate boundary along the Nankai Trough. *Geophysical Journal International*, 222(2), 1109–1125. doi:10.1093/gji/ggaa238.
- 上野寛・畠山信一・明田川保. (2002). 気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—. 験震時報, 65(1), 123-134.

ロードセルを用いた津波漂流物の衝突力に関する検討*

秋田大学理工学部 高橋 陸

秋田大学大学院理工学研究科 齋藤憲寿・渡辺一也

1. はじめに

2011年の三陸沖で発生した津波は、過去に起きた津波よりもはるかに上回り、東日本に大きな被害をもたらした。津波発生時の避難方法として、耐久性のある構造物¹⁾やシェルター等の漂流物を用いた避難方法が有効であることが示されており、それらの耐久性や安全性の検討を行うため、模型を用いた実験が行われている。

また、秋田港周辺には、洋上風力発電施設やコンテナ群が近い距離に位置する。東日本大震災では津波によって漂流した廃棄物は、2000万トンを超え、コンテナ、流木、船舶等が挙げられる。東日本大震災のような地震がこれから秋田港沖で発生した場合のことを考慮する必要がある。

既往研究として、中尾ら²⁾は圧力計を用いた桁の圧力の検討、蒔苗ら³⁾は水路に固定したシェルター模型を使用し、重松ら⁴⁾は漂流物模型を使用して波力を計測している。荷重を受けるものに対しての研究は行われてきたが、衝突する影響を与える側についての研究はあまり多くない。

本研究は、構造物および漂流物にロードセルを用いて津波によって漂流物が構造物に衝突した際の荷重を計測し分析を行った。

2. 実験概要

(1) ロードセル

ロードセルは図-1に示す。既往研究では、四分力計を用いて津波による波力を計測してきたが、本実験ではロードセルを用いて荷重を計測した。ロードセルの計測方法はひずみゲージによる計測であるため比較的単純な構造であり、体重計や本実験のように用途に合わせた製作が可能である。

ロードセルの設置場所は、構造物上部、喫水5cmであることから漂流物下部から2.5cmとした⁵⁾。また、図-2で示すキャリブレーションを行い、実験に使用する上で異常がないか確認した。

荷計重計測間隔は、0.02秒ごととした。なお、ロードセルはArduinoと呼ばれる8ビットマイコンボード、Processing/Wiring言語を実装した統合開発環境より構成されるシステムを利用しパソコンと接続することで計測や記録を可能とした。ロードセル及びArduinoは小型かつ安価なため技術ハードルが低く、低コストである測定を可能としている⁶⁾。

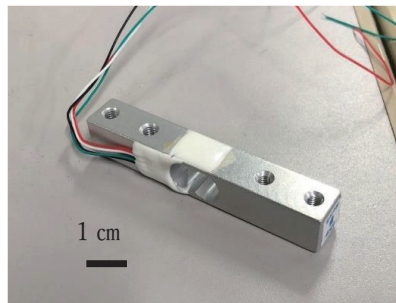


図-1 ロードセル

* Study on Impact Force of Tsunami Drifting Objects Using Load Cells by Riku TAKAHASHI, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE

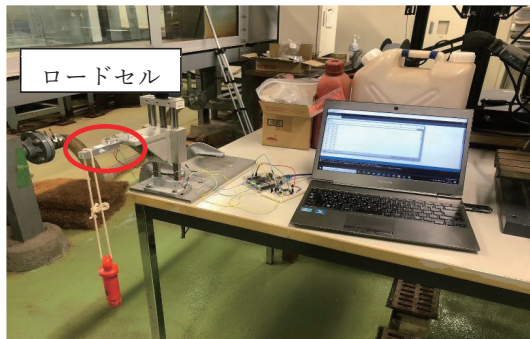


図-2 キャリブレーションの様子

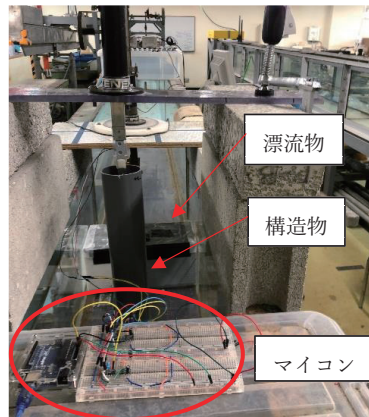


図-3 水路下端から見た模型配置

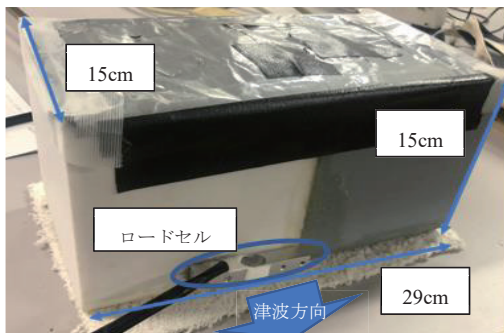


図-4 漂流物模型

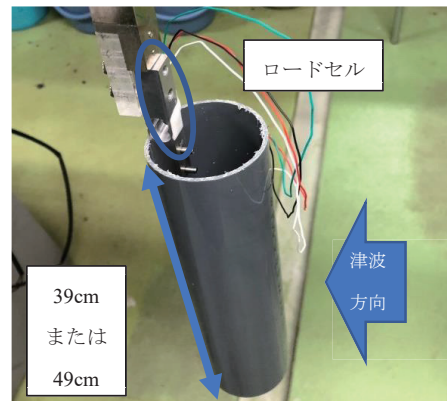


図-5 構造物模型

(2) 漂流物模型

構造物模型，漂流物模型，マイコンやPCの実際の配置は，図-3に示す。

漂流物模型は，既往研究と同様に3Dプリンターで作られた直方体の浮体を使用した。模型が津波によって左右に回転しないように全長を水路幅に合わせるため，模型のサイズは，幅29.0cm，高さ15.0cm，長さ15.0cmであり，模型の喫水は模型底面から5cm，内部のおもりは1051g入れ，全体の重さは2100gとなった。漂流物模型は図-4に示す。

(3) 構造物模型

構造物模型は，塩ビパイプを切断し，39cm，49cmの2つを想定した。構造物は，曲げによる影響や単純な荷重計測として扱いにくいことから底面から0.5cm離している。浸水深を0cmとする場合は39cm，浸水深を7.5，15cmとする場合は49cmの塩ビパイプを用いる2種類の塩ビパイプを用いるのは，浸水深の条件を変えることで構造物に漂流物が当たる高さが変わってしまいロードセルが計測する荷重に違いが生じることを防ぐためである。構造物模型は図-5に示す。

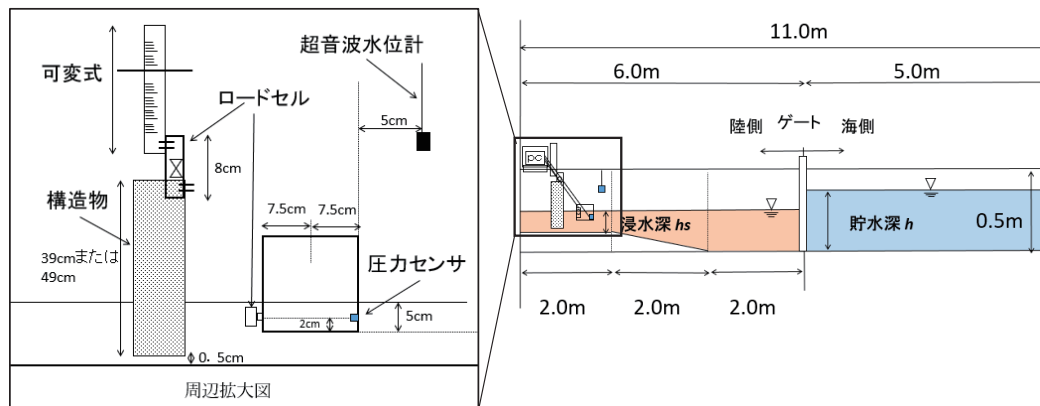


図-6 水路の概略と構造物周辺

(4) 実験水路

実験水路の概略と構造物周辺に関して図-6に示す。実験水路は幅 0.30 m、高さ 0.50 m、全長 11.0 m であり、海側 5.0 m、陸側 6.0 m、斜面勾配 1/26 の鋼製矩形水路を使用した⁷⁾。

貯水深は、ゲート右手側に溜めた水であり、 $h = 20 \sim 30$ cm、浸水深はゲート左手側に溜めた水であり $h_s = 0 \sim 15$ cm の間で実験を行うものとする。

実験手順は、水路の海側にある貯水槽に水を貯め、実験水路のゲートを急開することにより、模擬津波を発生させた。漂流物は、勾配斜面部を流れた後、漂流物模型に衝突する。本研究は、津波の第一波目を浸水深 0 cm、第二波目以降を浸水深 7.5 cm、15 cm とした。

本実験では、貯水深 30 cm の場合、津波によって構造物の治具が破壊されること、貯水深 20 cm、25 cm 時の浸水深 15 cm の条件の場合、津波が弱く、漂流物が構造物に衝突しないことから 5 通りの条件をもとに検討していく。実験条件について表-1 に示す。なお、実験は 5 つの各パラメータを 3 回ずつ計測した。

表-1 実験条件

	浸水深 h_s (cm)	貯水深 h (cm)
第一波目の津波想定	0	20, 25
第二波目以降の津波を想定	7.5	20, 25
	15	30

3. 実験結果

図-7, 8 に挙動の経時変化, 図-9, 10 に水位の経時変化, 図-11, 12 に荷重の経時変化を示す。

(1) 貯水深 20, 25 cm, 浸水深 0 cm

第一波目の津波を想定した浸水深 $h_s = 0$ cm において、貯水深 $h = 20, 25$ cm と変化させた。

貯水深と浸水深の差が広がったことにより流量が増え漂流物の移動速度も速くなった。図-7 に示す、貯水深が 0 cm の場合、水路の幅に合わせて作った漂流物の影響と喫水がないことから水路へ水

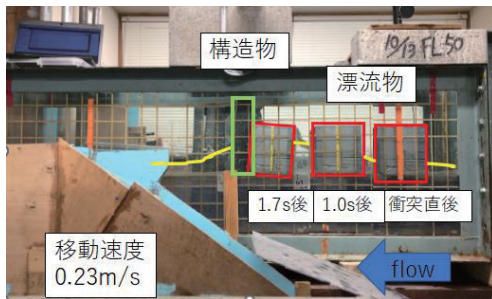


図-7 浸水深 0 cm 時の挙動の経時変化

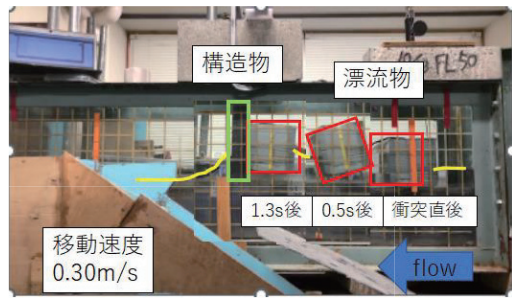


図-8 浸水深 7.5 cm 時の挙動の経時変化

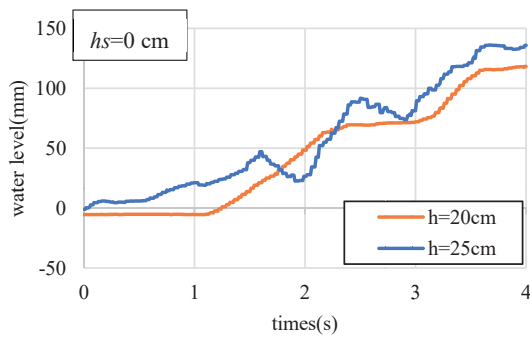


図-9 浸水深 0 cm 時の水位の経時変化

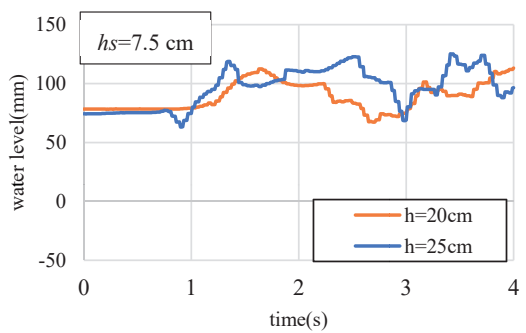


図-10 浸水深 7.5 cm 時の水位の経時変化

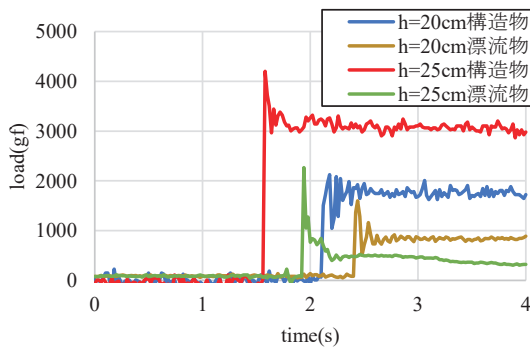


図-11 浸水深 0 cm 時の荷重の経時変化

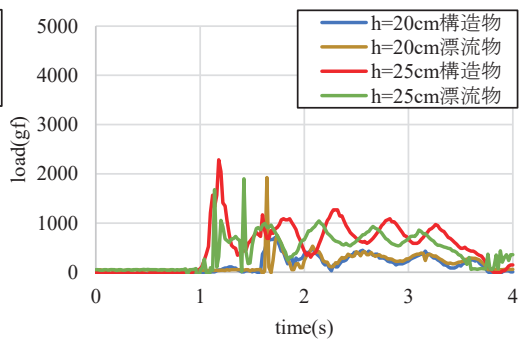


図-12 浸水深 7.5 cm 時の荷重の経時変化

があまり流れず、水をせき止めてしまうことから跳ね返りの影響で階段状の水位となり、急上昇していると考えられる。模型は津波の衝突直後に強く押し出され、やや傾きながら構造物へと衝突した。

荷重の経時変化は、構造物荷重を先に計測し、0.36 秒後に漂流物の荷重を計測した。荷重は、貯水深に関係なく津波衝突直後のピークが最大値としていた。同時に荷重が計測できなかった要因として、津波によって傾いた漂流物の上部に構造物が衝突した後、下部に取り付けていたロードセルに衝突したことで計測時間にずれが生じたと考えられる。

(2) 貯水深 20, 25 cm, 浸水深 7.5 cm

第二波目以降の津波を想定した、浸水深 $h_s=7.5$ cm において貯水深 20, 25 cm と変化させた。浸水深が 7.5 cm 時は、図-8 のように漂流物に喫水があることで、図-10 で示す、浸水深 0 cm 時のように水がせき止められることはなく、漂流物の下部より排出された。荷重の経時変化は、浸水深に水があることから緩やかに上昇している。貯水深 $h=25$ cm の時、ピークが2度測定されているが、津波衝突直後ではなく2度目のピークが最大値としていた。浸水深 0 cm 時と比べ、構造物、漂流物荷重は同時に計測し、荷重のピークの差は貯水深 20 cm では、608 gf、25 cm では、1204 gf となった。

(3) 貯水深 30 cm, 浸水深 15 cm

挙動の経時変化を図-13、水位の経時変化を図-14、荷重の経時変化を図-15 に示す。第二波目以降の津波を想定し、水位差を増加させた浸水深 $h_s=15$ cm において、貯水深 $h=30$ cm として実験を行った。浸水深 15cm の場合、喫水を十分に設けられることから津波発生後、漂流物は前後に傾きながら構造物へ衝突、水は水路下端へと排出され、反射波の影響も少なく漂流物の影響を受けず、水位を計測できた。しかし、漂流物荷重は、上記の4パターンとは傾向が異なり、荷重のピークを複数計測していた。荷重のピークを複数測定し、構造物や漂流物に対する直接的な荷重は計測できたが、継続的な荷重については正確に計測することが出来なかった。

(4) 貯水深と浸水深の差による比較

図-16 に各実験の貯水深及び浸水深の条件ごとに水位差に対する津波衝突直後の荷重の最大値の関係を示す。既往研究⁸⁾では、津波衝突時において水深の差が大きいほど波力の最大値が大きくなっていったが、本研究でも同様に、漂流物が計測した荷重は第一波目、第二波目以降ともに貯水深と浸水深の差が大きくなるほど荷重の最大値が大きくなった。

しかし、構造物が計測した荷重は第一波目、第二波目以降どの条件においても 1000~2000 gf と漂

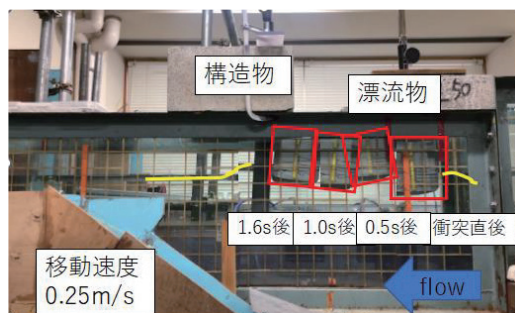


図-13 浸水深 15 cm 時の挙動の経時変化

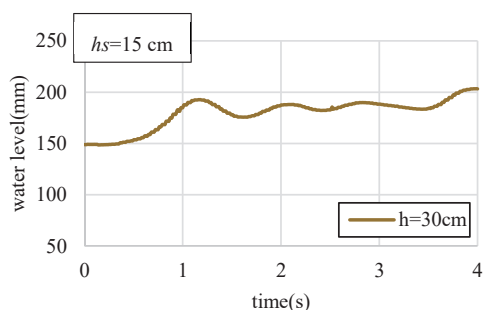


図-14 浸水深 15 cm 時の水位の経時変化

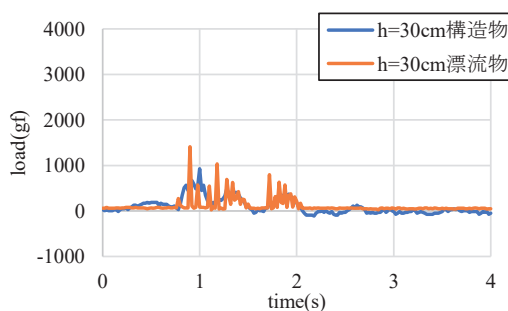


図-15 浸水深 15 cm 時の荷重の経時変化

流物荷重の傾向とは異なり、横ばいの傾向を示した。漂流物衝突時、構造物の固定はしているが構造物に用いた塩ビパイプが衝突によって後ろに傾く挙動を示したことから、受ける荷重を受け流し荷重を過小評価した要因となつたと考えられる。

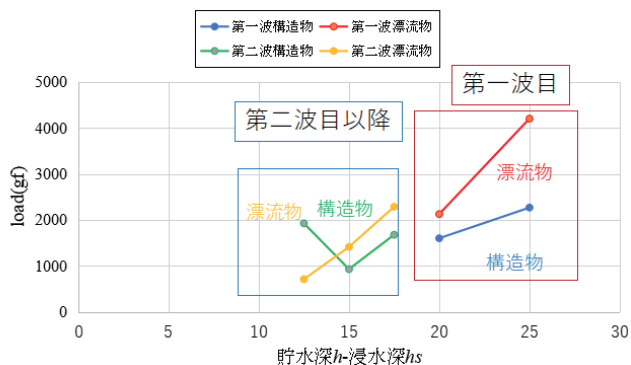


図-16 貯水深と浸水深の差による比較

4.おわりに

本研究では、ロードセルを用いて津波発生時の洋上風力発電施設にコンテナや船舶のような漂流物が衝突することを前提に、構造物及び漂流物に作用する荷重を計測することが確認できた。津波が発生すると、シェルター模型は津波と同方向に構造物へと向かい衝突する。条件ごとに貯水深や浸水深は異なるが、今回実験で用いた条件の範囲では、水位差が大きいほど漂流物、構造物の受ける荷重が増えるが、一定の荷重が加わると塩ビパイプが後ろに傾き荷重を過小評価していた。浸水深 0 cm 時と浸水深 7.5 cm, 15 cm の場合では、0 cm 時は喫水がないことから反射波を受け水位が上がり、浸水深のある状態とは異なる挙動を示した。

今後の展開として、浸水深の有無や貯水深の範囲を変えると云った条件ごとの水位と荷重の位置関係を合わせ津波による影響を細かく分析することや、最大ピーク値の差、水位差によって起こる違いがあるのか検討していく予定である。

参考文献

- 1) 小尾博俊：津波避難タワーの構造形式と漂流物の衝突挙動に関する数値解析的検討，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.71, No.2, pp.I_1201-I_1206, 2015.
- 2) 中尾尚史，糸永航，野坂克義，伊津野和行，小林紘士：矩形断面桁に作用する津波の圧力特性に関する実験的研究，Vol.68, No.4, pp.I_1145-I_1150, 2012.
- 3) 蒔苗 純，齋藤憲寿，渡辺一也：ロードセルを用いた浮体式津波避難シェルターの波力に関する検討，東北地域災害科学研究，Vol.55, No.56, pp.101_106, 2020.
- 4) 重松孝昌，中東大輔：二重式浮体津波避難シェルターの運動特性に関する実験的研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.I_751-I_755, 2011.
- 5) 木村修一，近藤博，本間重雄：動的ロードセルの設置条件に関する一考察，土木学会論文集，Vol.65, No.777, pp.I_187-192, 2004.
- 6) Arduino 基礎入門!電子工作初心者のためのまとめ (前編) (<https://deviceplus.jp/Arduino/arduino-listicle-01/>) (2022-12-10 アクセス)
- 7) 望月良純，齋藤憲寿，渡辺一也：加速度センサを用いた漂流物の波力に関する検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，第 78 巻, No.56, pp.I_505-I_510, 2022.
- 8) 石塚大智，齋藤憲寿，渡辺一也：圧力センサを用いた漂流物の波力に関する検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.78, No.2, pp.I_103-I_108, 2021.

下北半島，関根浜のイベント堆積物について*

弘前大学理工学部 木村 雄大
弘前大学大学院理工学研究科 岡田 里奈
弘前大学大学院理工学研究科 梅田 浩司

1. はじめに

日本海溝・千島海溝沿いの領域では、巨大な地震が繰り返し発生しており、過去に多くの被害を受けてきた。2011年東北地方太平洋沖地震以降、津波堆積物の調査が盛んに行われ、これまで報告がなかった北海道の胆振地方（清水ほか，2013）や下北半島の太平洋側に17世紀に発生したと考えられる地震に伴う津波堆積物が見つかった（Tanigawa et al., 2014）。これらの津波堆積物の分布を説明するためには、1611年の慶長三陸地震の震源域を従来よりも北側に想定することや、17世紀の北海道東部の地震の震源域を西側まで広げるといった想定が必要となる。以上のことから、青森県では特に下北半島での津波堆積物の調査が重要となる。最近になって筆者らのグループは、下北半島北部の関根浜において複数枚のイベント堆積物を挟む露頭を発見した。そこでは層相観察・記載を行うとともに、室内ではX線CT撮影、鉱物組成（モード分析）、粒度分析、 ^{14}C 年代測定、珪藻分析などを行ったので、それらの結果について報告する。

2. 調査地点および調査方法

調査地点は、下北半島北端の関根浜港の東側に位置する。露頭は海岸から約50m離れた、最終間氷期の海成段丘と海岸線間の標高約5mの微高地であり、その標高は約1.5mである（図-1）。イベント堆積物の特徴を明らかにするため、層相観察・記載および試料採取を行った。採取した試料は、250mm×65mm×10mmで厚さ1mmの亚克力容器に封入し、X線CT画像撮影を行った。撮影は高知コアセンターのX線CTスキャナ Aquilion PRIME Focus Edition（キヤノンメディカルシステムズ製）を使用した。なお、実質的な空間分解能は約1mmである。また、採取した試料の一部は、超音波洗浄機によって泥成分を除去したの

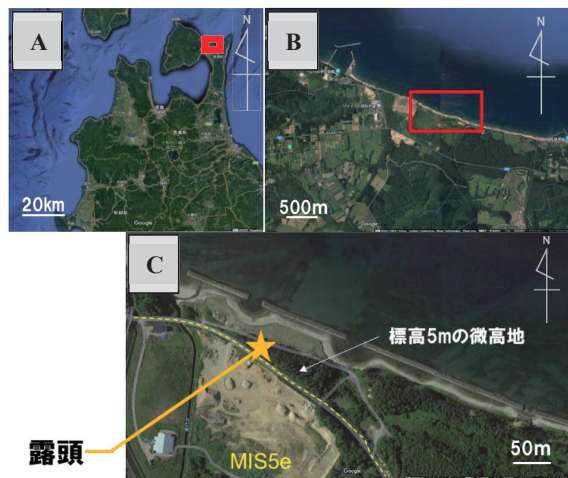


図-1 調査地点の位置図

A：下北半島，B：関根浜周辺，C：露頭位置

ち、1/4mm～1/16mmに篩分けを行い、約200粒子を目途に実体顕微鏡を用いて石英、斜長石、角閃石、輝石、磁鉄鉱、石質岩片に区分し、その割合を求めた。粒度分析はレーザー回折粒度分布測定装置SALD-3000J（島津製作所製）を用いて0.1～2000 μm の分析範囲で行った。放射性

*Characteristics of event deposits in Sekine-hama, Shimokita peninsula by Yuta Kimura, Rina Okada and Koji Umeda

炭素年代測定は日本原子力研究開発機構東濃地科学センターの加速器質量分析装置を用いた。珪藻は光学顕微鏡（400 ～ 1000 倍）で観察し、100～250 個の珪藻化石の検定・計数を行った。

3. 層相観察

今回、観察した露頭は、上位が砂混じりの有機質シルト層、下位が泥炭を主体とし、そこにはイベント堆積物と考えられる 8 層の砂層が挟まれている（図-2）。地表から深度 0.10m までは極細粒砂の風成層からなる。深度 0.10～0.32m は細～中粒砂でイベント H 層と命名した。深度 0.32～0.38m は有機質シルトからなる。深度 0.38～0.41 m は泥混じり細粒砂（G 層）、深度 0.41～0.42m は有機質シルト層を挟む。その下位の深度 0.42～0.56m は細～中粒砂（F 層）で、上方細粒化が認められる。また、下位の泥炭層（深度 0.56～0.65m）との境界は明瞭な侵食面が認められる。

深度 0.65～0.69m は細粒砂（E 層）、深度 0.69～0.74m は泥炭層、深度 0.74～0.77m は淡黄褐色の細粒火山灰（D 層）、深度 0.77～0.86m は泥炭、深度 0.86～0.90m は泥炭混じり細粒砂（C 層）、深度 0.90～1.15m は泥炭、深度 1.15～1.19m は細粒砂（B 層）、深度 1.19～1.32m は泥炭で、大型の木片が含まれる。深度 1.32～1.34m は細粒砂（A 層）で、深度 1.34～1.54m は泥炭からなる。

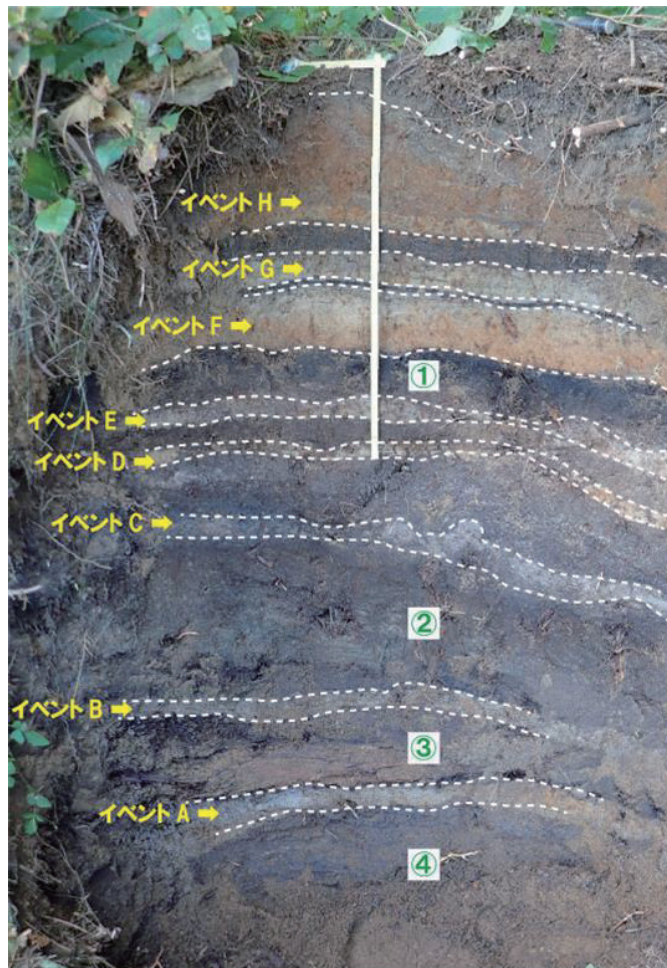


図-2 イベント堆積物（折尺の長さ（上下）は 75cm）
①～④は ^{14}C 年代試料採取位置

4. 鉱物組成・粒度分析

イベント A～C および E～G はともに中～細粒砂サイズの砂層であり、鉱物組成、粒度分布ともに、海浜砂と類似する。図-3 に海浜砂とイベント E の実体顕微鏡写真、粒度分布、鉱物化学組成を示す。この露頭でみられる砂層（イベント堆積物）は、いずれも海浜砂が運搬・堆積したものであり、海由来のイベント（津波、高潮等）によって形成されたと考えられる。なお、

イベント D とした淡黄褐色の細粒火山灰は、偏光顕微鏡観察によるとバブルウォール型の火山ガラスから構成されること、エジリンオーゾイトを含むことから西暦 946 年 (Oppenheimer et al., 2017) に降灰した白頭山・苫小牧テフラ (B-Tm) と考えられる。また、イベント H は、砕屑粒子がほとんど円摩されていないこと、輝石の含有量が大きいことなどから陸由来のイベント (例えば、洪水) による堆積物の可能性がある。

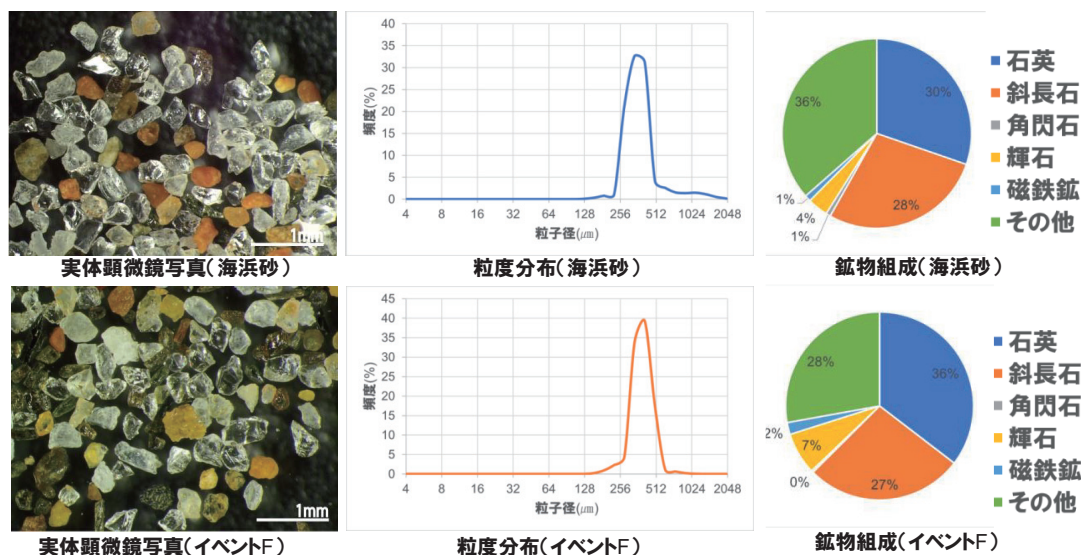


図-3 海浜砂 (上段) とイベント F (下段) の実体顕微鏡写真, 粒度分布, 鉱物化学組成

5. ^{14}C 年代測定

図-2 の①~④の泥炭の ^{14}C 年代を表-1 に示す。イベント A は 3850~2750 年前頃, イベント B は 2850~2100 年前頃, イベント C は 2200 年前頃~西暦 946 年, イベント E は西暦 946 年前~17 世紀に海由来のイベントによって形成された堆積物であると考えられる。また, イベント F~H は, 17 世紀以降に堆積したイベントと考えられる。

表-1 ^{14}C 年代測定結果

	放射性炭素年代 (yr BP)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
①	334 ± 49	-22
②	2145 ± 50	-24
③	2793 ± 56	-15
④	3791 ± 60	-18

6. 議論

これらの結果から, イベント F および G は, 17 世紀以降に海由来のイベントによって形成された堆積物の可能性が高い。以下の議論ではイベント F と G を併せて Em1 と呼ぶ。前述したように, Em1 と下位の泥炭の境界は明瞭な侵食面が認められること, 泥質成分に富む薄層 (マッドレイブ?) が挟まれる。図-4 に Em1 の X 線 CT 画像を示す。露頭ではわかりにくい X 線 CT 写真では平行~斜交葉理が認められることから, 砕屑粒子は強い水流によって運ばれた

のち、その流れが停滞したことが示唆される。Em1 およびその下位の泥炭層の珪藻分析の結果をみると、下位の泥炭層には淡水性の珪藻しか認められないのに対して、Em1 には汽水性の *Diploneis smithii* や *Diploneis interrupta*, *Cocconeis stauroneiformis* などの海水性～汽水性の珪藻が 40%程度含まれている。特に、*Cocconeis stauroneiformis* は海生生物に付着しながら生息しているもので、強い海流によって運ばれたことは間違いない。以上のことから、今回発見された関根浜のイベント堆積物 Em1 は、Tanigawa et al. (2014) が報告した下北半島東通村の津波堆積物 S1 と対比できる可能性がある。

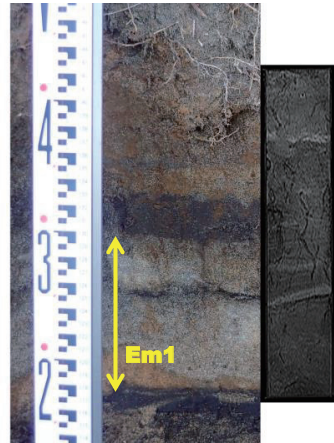


図-4 Em1 (F~G 層) の X 線 CT

引用文献

- 清水康博・永井 潤・岡村 聡・西村裕一 (2013) 砂丘を越えて沿岸低地を遡上した津波による堆積モデル：北海道胆振海岸東部に分布する 17 世紀津波堆積物の研究例. 地質雑, 119, 1-16.
- Tanigawa K., Sawai, Y., Shishikura, M., Namegaya, Y. and Matsumoto, D., 2014, Geological evidence for an unusually large tsunami on the Pacific coast of Aomori, northern Japan. Jour. Quatern. Sci., 29, 200-208.

避難行動解析に基づく地域条件を考慮した津波避難に関する研究*

八戸工業大学大学院 堀合 紳弥
 八戸工業大学大学院 立花 郁巳
 八戸工業大学大学院 遠藤 貫太
 八戸工業大学大学院 高瀬 慎介
 八戸工業大学大学院 加藤 雅也
 八戸工業大学大学院 武山 泰

1. はじめに

北海道や東北地方の沿岸地域では、日本海溝・千島海溝沿いを震源とする地震が発生し、青森県内でも最大 26.1m の津波到達が予想されている¹⁾。想定される津波が発生すると、東日本大震災当時より浸水区域(図-1)が拡大し、海拔数 m 程度の低地市街地域ではほぼ全域が浸水する可能性があり、浸水想定区域内に位置する避難所・避難場所の初動開設が制限される。この場合、地域住民の避難目標とすべき施設が減少し、令和 3 年度八戸市指定避難所²⁾136 ヶ所中 34 ヶ所が開設制限を受け、収容可能人数全 75,583 人のうち 20,033 人が収容不可となり、避難に要する移動距離の長距離化が懸念される。その一方、地方圏域では少子高齢化による地域の年齢分布の変動が進んでおり、今後、高齢者が増加すれば、避難速度の低下などにより地域全体の避難の所用時間が増加すると考えられる。また、冬季に発災した場合には、積雪による道路閉塞や路面凍結により交通状況が悪化し、さらに地域住民の被災リスクが高まる恐れがある。

そこで本研究では、青森県八戸市を対象としたマルチエージェントシステムを用いた避難シミュレーションにより、冬季夜間と夏季夜間を想定した解析を行い、気象状態の変化などの気象条件を考慮した住民避難への影響について検討する。

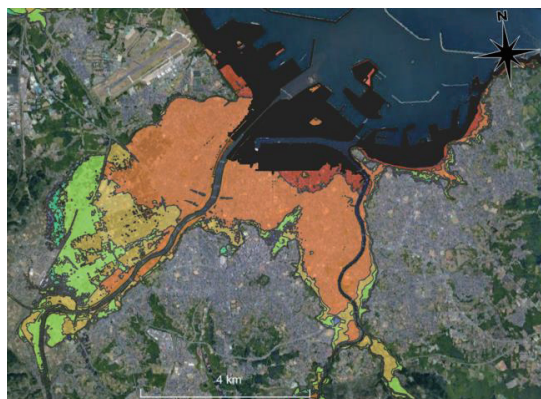


図-1: QGIS による東日本大震災浸水区域³⁾(黒区域)と浸水想定区域⁴⁾(色別区域)

* Research on Tsunami Evacuation Considering Regional Conditions based on Evacuation Behavior Analysis by Shin-ya Horiai, Ikumi Tachihana, Kanta Endo, Shinsuke Takase, Masaya Kato and Yasushi Takeyama

2. 対象地域の環境特性

解析対象とした八戸市を有する青森県は、県の東側を太平洋、西側を日本海、北側を津軽海峡に囲まれた本州最北端の地域である。冬季には津軽地方はじめとする県全域で積雪を観測する。八戸市の過去20年間(2001年～2021年)の気象観測記録⁵⁾を整理すると、2010年には日最大降雪量61cm(図-2)を観測している。同市では降雪量が概ね10cmを超えた場合に、重機による除雪作業が着手されるが、主要幹線道路や交通量が多い路線から優先的に除排雪を行うため、降雪時間や降雪量、交通状況によっては作業完了まで時間を要する。とくに、除雪重機の進入路や従事する車両数の問題から、住宅地のような密集区域では、除排雪作業が迅速かつ十分に行き渡るとは言えない。さらに、気温低下によるアイスバーン等の路面状況により、スリップ事故などの交通障害が多発する。また、歩道閉塞による歩行者の歩行環境へも影響が出るため、冬季の避難を想定する場合には、道路状況による交通障害も十分に考慮する必要がある。

さらに、近年、全国的に問題視されている少子高齢化による人口変動は、八戸市でも例外ではない。市高齢者福祉計画⁶⁾によれば、総人口の推移(図-3)として2020年から2045年までに約6万人の減少傾向し、少子高齢化により2020年の生産年齢人口57.0%、高齢化率31.8%に対し、2045年には生産年齢人口46.3%(2020年比:-10.7pt)、高齢化率約44.9%(2020年比:+14.5pt)となる見込みであり、今後は全人口の約半数が高齢となることが予想されている。この場合、若年層よりも避難速度が低下する高齢層が半数を占めるため、地域住民の全体的な被災リスクの増加が懸念される。また、高齢者の増加により、避難支援を必要とする災害時要援護者の登録数が増加すると考えられるが、若年層の減少により、災害発生時に要援護者の避難支援にあたる健常の避難支援者が不足する可能性もある。避難支援者が不足した場合、避難支援者1人あたりの要援護者数が増加し、津波到達までに避難支援者自身の安全確保が不十分となる危険性があるため、地域住民の年齢人口分布の変動について十分考慮し、より実態に即した避難計画を策定する必要がある。

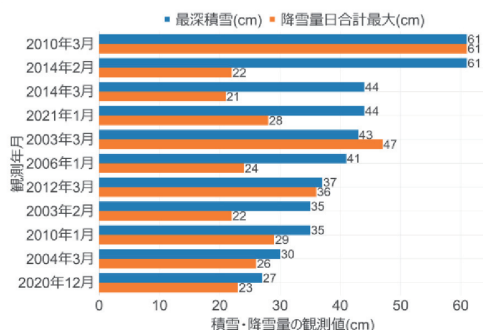


図-2：八戸市の降雪・積雪量の観測値

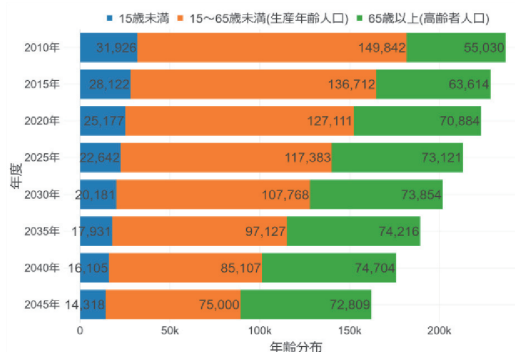


図-3：八戸市の将来人口の年齢分布

3. 地域条件を考慮した避難行動解析

解析対象とする青森県八戸市の気象状態の変化および人口年齢分布を考慮し、冬季夜間帯に想定される日本海溝沿いを震源とする地震が発生した場合の避難シミュレーションを実施した。

対象は同市柏崎地区の男女 60 歳以上(男性 n=1,548, 女性 n=2,201)で、第一波到達予想時刻の地震発生後 38 分時点で避難行動中のエージェントをカウントし、気象条件による避難所への未到達者エージェントの変化を比較した。解析条件を表-1 に示す。解析には NetLogo6.2.2(図-4)を用いた。このソフトウェアは津波避難に関する先行研究⁷⁾でも用いられており、構築したマルチエージェントシミュレーションの計算と可視化をリアルタイムで可能としている。エージェントの経路探索法には A*アルゴリズム法を適用し、避難開始地点から最短経路を探索し最寄りの避難所へ向かう。想定する環境は最遅条件となる冬季積雪状態での夜間避難とした。エージェントの避難速度は、小坂ら⁹⁾による先行研究内で用いている夏季避難速度を基準とし、これに内閣府被害想定 WG¹⁾による積雪係数(0.8)、夜間未除雪係数(0.6)、夜間係数(0.8)を考慮した速度を冬季夜間の避難速度とした。各エージェントには標準偏差に基づいた速度偏差により、速度のばらつきを与えている。車両避難者の運転速度は、当該地域の道路環境を考慮し夏季運転速度を 40km/h と設定、これに各速度係数を考慮し、冬季運転速度は 19.2km/h とした。避難目標については、市指定避難所の中で、大津波警報時に初動開設される柏崎地区周辺の最寄りの避難施設とした。また、住民が順次避難を開始するまでの所要時間は最早で地震発生 10 分後からと設定した。

解析の結果を表-2 に示す。避難方法の選択割合を 100%歩行避難、歩行・車両各 50%、100%車両避難とした場合の 3 ケースを夏季と冬季の 2 想定で実施した。その結果、最大で男性 31 人(n 比 2.0%)、女性 40 人(n 比 1.8%)の未到達エージェントが計測され、ほとんどのケースで夏季避難と比べ冬季避難では未到達者が 0.2~0.6pt 上昇していた。その一方、各 50%の割合で避難した場合には、100%歩行避難の場合より大幅に未到達者数が減少していた。車両避難 100%のケースでは、季節による結果の変化があまり見られなかった。季節条件により車速、加・減速度、車間距離等を考慮しているが、車両自体への積雪による影響は考慮されていなかったため、今後は避難開始時の車両自体からの除雪時間等も考慮した解析を進めたい。

表-1：解析条件および使用したパラメータ

解析環境	NetLogo6.2.2
経路探索法	A*アルゴリズム法
解析ステップ	1ticks(step)=1sec
想定環境	冬季積雪状態での夜間避難
夜間歩行速度	夏季 0.91m/s : 冬季 0.44m/s
速度偏差	標準偏差に基づく
夜間運転速度	夏季 40km/h : 冬季 19.2km/h
避難開始時間	地震発生 10 分後～

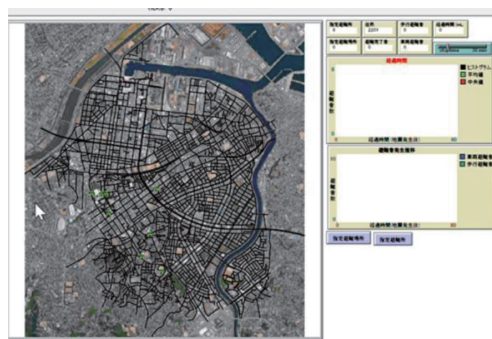


図-4：NetLogo の制御・出力画面

表-2：解析結果

未到達 エージェント数	男性 60 歳以上(n=1,548)		女性 60 歳以上(n=2,201)	
	夏季避難者	冬季避難者	夏季避難者	冬季避難者
避難方法選択割合 歩行：車両				
100：0	24 人(1.6%)	31 人(2.0%)	27 人(1.2%)	40 人(1.8%)
50：50	16 人(1.0%)	18 人(1.2%)	17 人(0.8%)	27 人(1.2%)
0：100	14 人(0.9%)	15 人(1.0%)	13 人(0.6%)	13 人(0.6%)

4. おわりに

本研究では、千島・日本海溝沿いを震源とする地震および津波による被害が想定される青森県八戸市を対象とし、冬季夜間帯における男女 60 歳以上の住民の避難行動についての解析を行った。その結果、第一波到達予想時刻の時点で避難途中だった住民数は 100%歩行避難の場合で最大男性 31 人(n 比 2.0%)、女性 40 人(n 比 1.8%)となった。避難手段を 50%ずつとした場合、ある程度の人的被害のリスクを低減できることが分かった。現時点では、特定の年齢区分の解析結果であり、今後は年齢層が混在する解析条件へ展開し、各エージェント間の影響についても考慮する予定である。

5. 参考文献

- 1) 内閣府 (防災担当)：被害想定手法について (第 1 回ワーキンググループでのご意見を踏まえた手法の検討), 日本海溝・千島海溝沿の巨大地震対策検討会ワーキンググループ(第 2 回), 2020.
- 2) 八戸市：令和 3 年度指定避難所一覧, 2022.2.15 取得.
- 3) 東京大学空間情報科学研究センター：復興支援調査アーカイブ 八戸市浸水深, 2020 年 11 月 25 日 取得.
- 4) 国土交通省：国土数値情報 青森県津波浸水想定区域, 2022 年 6 月 17 日 取得.
- 5) 気象庁：過去の気象観測記録 青森県八戸市 降雪気温データ, 2021 年 10 月 18 日 取得.
- 6) 八戸市：第 8 期高齢者福祉計画, p.5, 2021.
- 7) Mas, E. Suppasri, A. Imamura, F. and Koshimura S. : Agent-based Simulation of the 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami Evacuation An Integrated Model of Tsunami Inundation and Evacuation, Journal of Natural Disaster Science, Vol 34, pp.41-57, 2012.
- 8) 川辺赳史, 檜山和男：建物の倒壊を考慮した津波遡上及び津波避難シミュレーションシステムの適用性向上, 第 40 回土木学会関東支部技術研究発表会, 第 I 部門, 2013.
- 9) 小坂陽介, 野村尚樹, 大藤愛子, 宮島昌克：マルチエージェントシステムを用いた津波避難に関する解析—輪島市臨海地域を対象とした事例研究—, 土木学会論文集, A1(構造・地震工学), Vol.73, No.4 (地震工学論文集第 36 巻), pp.11010 - 11017, 2017.

複数のオイルタンク群に作用する津波荷重の水理模型実験*

秋田工業高等専門学校 寺本 尚史・丁 威・植松 康
秋田県立大学 小幡 昭彦

1. 研究の背景と目的

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震に伴って発生した大津波によって、沿岸部に建設されていた多数のオイルタンクに甚大な被害が発生した。また、流出したオイルは火災などの二次被害を引き起こした。このように、沿岸部のオイルタンクが津波によって崩壊すると、社会・経済に極めて大きな影響を及ぼす。東南海地震などの発生が危惧されている現在、オイルタンクの津波対策は急務の課題である。東北地方太平洋沖地震以降、その被害の規模と印象が大きかったことで、建築物に対する津波荷重が注目され、研究が増え始めている。日本建築学会の「建築物荷重指針・同解説」¹⁾(以下、「荷重指針」と称す)にも2015年の改定により、津波荷重の章が盛り込まれた。しかし、一般的な矩形構造物に対して、動的な荷重を等価静的荷重に置き換えた津波荷重の算定式を与えているものの、オイルタンクのような円筒形構造物に対しては規定されていない。したがって、オイルタンクに対して合理的な耐津波設計法を確立するために、円筒形構造物に作用する津波荷重を適切に評価する必要がある。

また、石油備蓄基地では複数のオイルタンクが建設されるため、津波荷重の評価においては相互作用の影響を考慮する必要がある。その影響を踏まえた上でオイルタンク群に作用する津波波圧・波力の特性を明らかにし、最適な耐津波設計を確立することが重要である。

そのため本研究では、沿岸部に建設される鋼製オイルタンク群を想定した水理実験を行い、その実験結果に基づいて、タンク群の配置パターンが津波荷重に及ぼす影響を把握し、適切な配置を評価方法のための基礎的知見を得ることを目的とする。

2. 水理模型実験の概要

2.1 実験水路

水理模型実験には秋田工業高等専門学校が所有する実験水路を使用する。実験水路の概要を図1、写真1に示す。水路の全長は約15m、断面形状は長方形であり、水路内法幅0.6m、高さ0.8mである。貯水槽に一定量の水を溜め、遮水壁を瞬間的に開放することで津波の押し波を再現する。模型の位置は図1に示す通り、流入口で起こる乱れが減少し始め、反射波が到達する時間が十分に取れる、遮水壁から6.5m、後方の消波装置より3.5mとした。

2.2 模型概要

本研究では、円筒形の中型オイルタンクを対象とし、模型を単独で配置したもの(単棟)および周辺に同じ寸法のダミー模型(写真2(b)参照)を1~2棟配置したもの(連棟)の実験を行う。幾

*Hydraulic model tests of tsunami force acting on oil tanks by Naofumi Teramoto, Wei Ding, Yasushi Uematsu and Akihiko Obata



写真1 実験水路

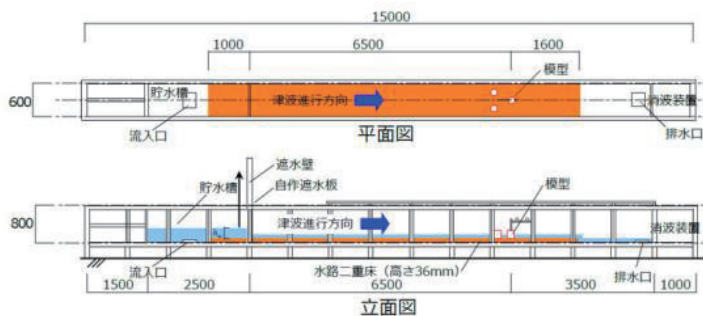
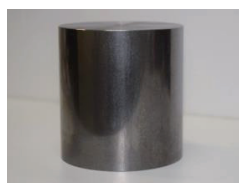


図1 実験水路概要



(a) 測定用模型



(b) ダミー模型

写真2 実験模型

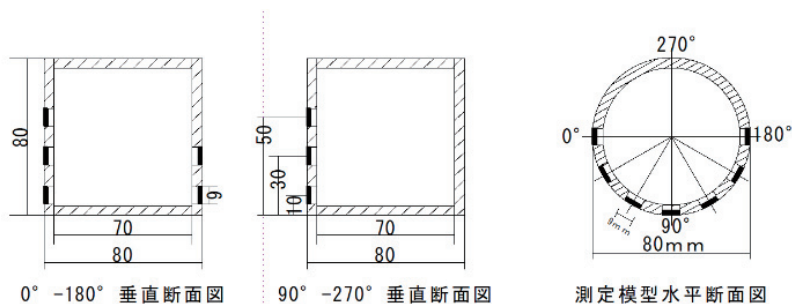


図2 波圧測定点の配置

何学的縮尺率は $\lambda_L=1/250$ とし、模型の外径は80 mm、高さは80 mmとした。

模型の位置は流入口で起こる乱れが減少し始め、反射波が到達する時間が十分に取れる、遮水壁から6.5 m、後方の消波装置より3.5 mとした。模型の位置を図1に示す。流速計と波高計は模型前後の値を測定するために設置するが、計測器のフレームなどにより、波に乱れが生じるため、模型位置から左右にずらして設置した。流速計は模型中央から前方へ207 mm、後方へ273 mmの位置とした。波高計は模型中央から前後110 mmの位置とした。流速計、波高計、共に左右方向は模型中央から150 mm、壁面から150 mmの位置とした。

2.3 測定方法

模型、各測定器具の測定位置を図3に示す。模型前後の値を測定するためにプロペラ式流速計と容量式波高計を設置した。なお、波に乱れが生じるため、流速計および波高計は模型位置

から左右にずらして設置した。

また測定用模型には模型の表面に圧力センサーを 18ヶ所設置した。設置個所を図 2 に示す。模型の底部からの高さが 10 mm, 30mm, 50mm の位置に, 片側 180 の範囲にそれぞれ 7 点, 7 点, 4 点設置した。

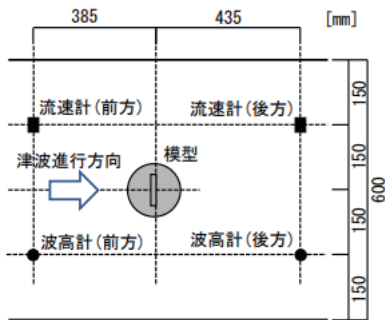


図 3 測定機械の配置

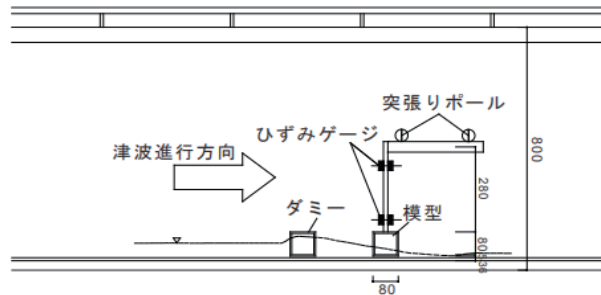


図 4 津波力測定方法

津波の大きさは貯水槽の貯水高さ h_w を変化させることによって調整する。本実験では貯水高さ $h_w = 140\text{mm}, 180\text{mm}$ の 2 種類とした。津波波力測定には片持ちの鋼板を用いる。図 4 に津波波力測定方法を示す。先端に模型を取り付けた鋼板を架台から吊りし, 荷重が作用したときの 2 点の曲げひずみ ε を鋼板に貼り付けたひずみゲージから計測する。得られた曲げモーメント勾配からせん断力を算出し, これを模型に作用する津波波力とする。なお, 測定にあたっては, 津波作用時の鋼板のひずみと模型の回転によって模型底部分と床との衝突を防ぐため, 模型と水路床との間に 5 mm クリアランスを設けた。

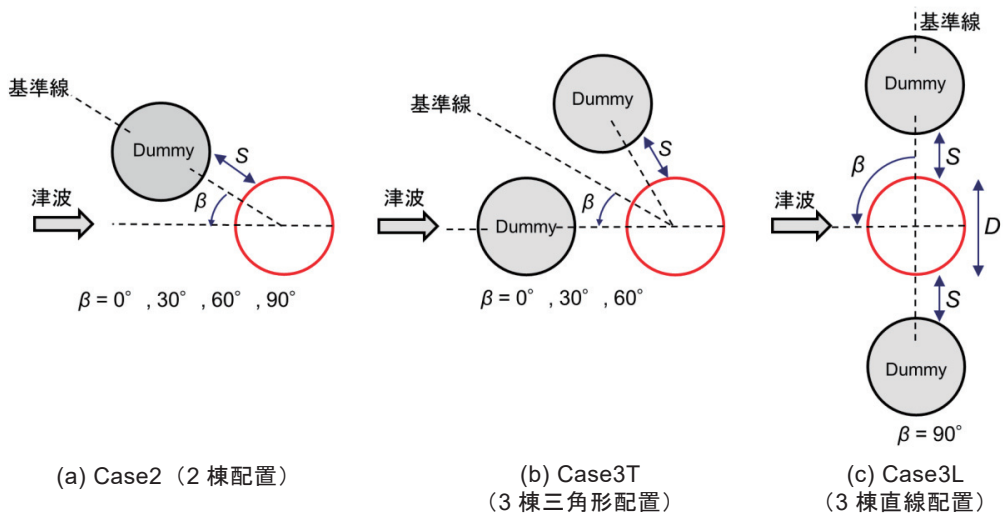


図 5 連棟配置ケース

模型の配置パターンを図 5 に示す。配置パターンは、単棟(Case1), 2 棟(Case2), 3 棟を三角形に配置(Case3T), 3 棟を直列に配置(Case3L)の 4 ケースとした。ここで, 図中の S は隣棟間隔, D はタンクの直径, β は各配置の基準線に対しての津波入射方向である。隣棟間隔は消防法に基づき $S/D=0.25, 0.5, 1.0$ とした。実験を行ったケースの一覧を表 1 に示す。各ケースそれぞれ 5 回ずつ実験を行い, アンサンブル平均した値を測定値とした。サンプリング周波数はいずれも 100 Hz, 測定時間 T は約 60 秒である。

表 1 実験ケース一覧 (各ケースとも $h_w = 140\text{mm}$, $h_w = 180\text{mm}$ を実施)

	S/D	$\beta(^{\circ})$			
Case 1	—				
Case 2	0.25	0	30	60	90
	0.5	0	30	60	90
	1.0	0	30	60	90
Case 3T	0.25	0	30	60	
	0.5	0	30	60	
	1.0	0	30	60	
Case 3L	0.25				90
	0.5				90
	1.0				90

3. 水理模型実験の結果と考察

3.1 津波流速および波高

単棟(Case1), 貯水高さ $h_w = 180\text{mm}$ 時の流速と波高の測定結果を図 6 に示す。模型前面に滞留が生じるため, 模型前方の流速は最大値に達した後, 急激に減速しているのに対し, 波高は津波到達後に徐々に上昇する傾向が見られた。

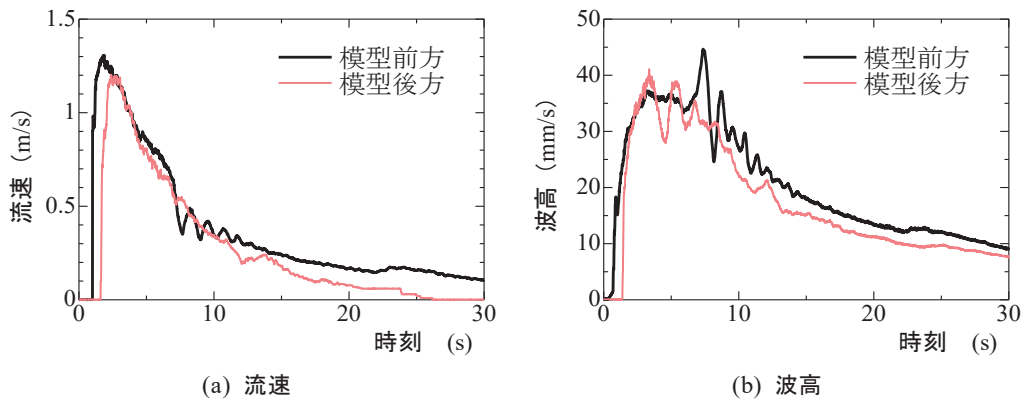


図 6 流速と波高の時刻歴変化(Case 1)

3.2 津波波力

図 7 に、貯水高さ $h_w = 140\text{mm}$, $S/D = 0.5$ 時における Case2, Case3T および Case3L の各実験ケースの最大波力 F を、Case1(単棟配置時)における最大波力で除して無次元化した値(最大波力比)を示す。Case2 の津波入射角 $\beta = 0^\circ, \beta = 30^\circ$ の場合、最大波力比が 1 を下回ったが、これは波がダミー模型側面で剥離することで、津波先端部が対象模型に直接衝突しないためであると考えられる。これを連棟配置における「シールド効果(図 8)」と呼ぶ。一方、Case2 の $\beta = 60^\circ \sim 90^\circ$ の波力は最大波力比が 1 を上回ったが、これは模型が津波を堰き止めることにより(図 8)、模型前方の波高が上昇したことが影響していると考えられる。同様に、三角形 Case3T の $\beta = 0 \sim 30^\circ$ ではシールド効果により波力が減少し、Case3T ($\beta = 60^\circ$) と Case3L ($\beta = 90^\circ$) では堰き止めにより波力が増大し、特に Case3L の場合の波力は約 1.8 倍に増加した。

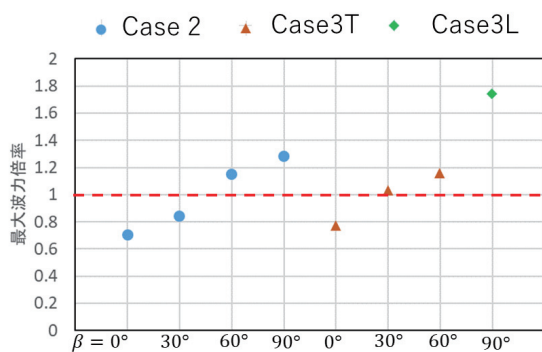


図 7 最大波力比

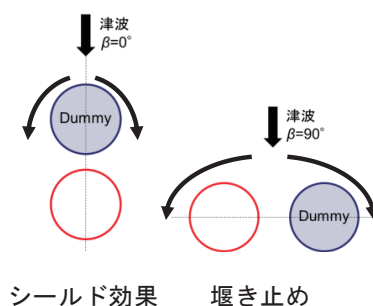


図 8 シールド効果と堰き止めの概要

3.3 津波波圧

Case2, Case3T, Case3L のうち、Case1 と比べて波力が減少したケースおよび増加したケースにおける波圧分布(模型高さ 10mm の位置)の比較を図 9(a),(b)および図 9(c),(d)に示す。ここで、図中の薄い色の線が単棟の波圧分布、黒色の線が連棟の波圧分布を示す。図 9(a)の Case2, $\beta = 0^\circ$ の波圧分布を見ると、模型前面 (0°) の波圧が Case1 に比べて大きく減少しているのに対し、模型側面 ($\pm 30^\circ$ および $\pm 60^\circ$) の波圧が増加していることが分かる。図 9(b) の Case2, $\beta = 30^\circ$ の配置パターンでも、模型前面 (0°) の波圧は単棟配置時に比べて減少している点は同様であった。模型側面 (30° および 60°) の波圧については、ダミー模型の配置されている方向の波圧が小さくなったが、それによってはじかれた波によって配置されていない方向の模型側面 (-60°) の波圧は逆に上昇した。

一方、波力が増加した Case2, $\beta = 90^\circ$ (図 9(c)) および Case3L, $\beta = 90^\circ$ (図 9(d)) のケースにおける波圧分布を見ると、いずれも Case1 との波圧と比べ全体的に大きい傾向を示したが、模型前面 (0°) の波圧はほぼ同じ値となっているのに対し、模型側面 ($\pm 30^\circ$ および $\pm 60^\circ$) の波圧は大きくなる傾向となった。そのため、波力には津波進行方向に対して模型前面の波圧よりも模型側面にかかる波圧が大きく影響を及ぼしている可能性が考えられる。

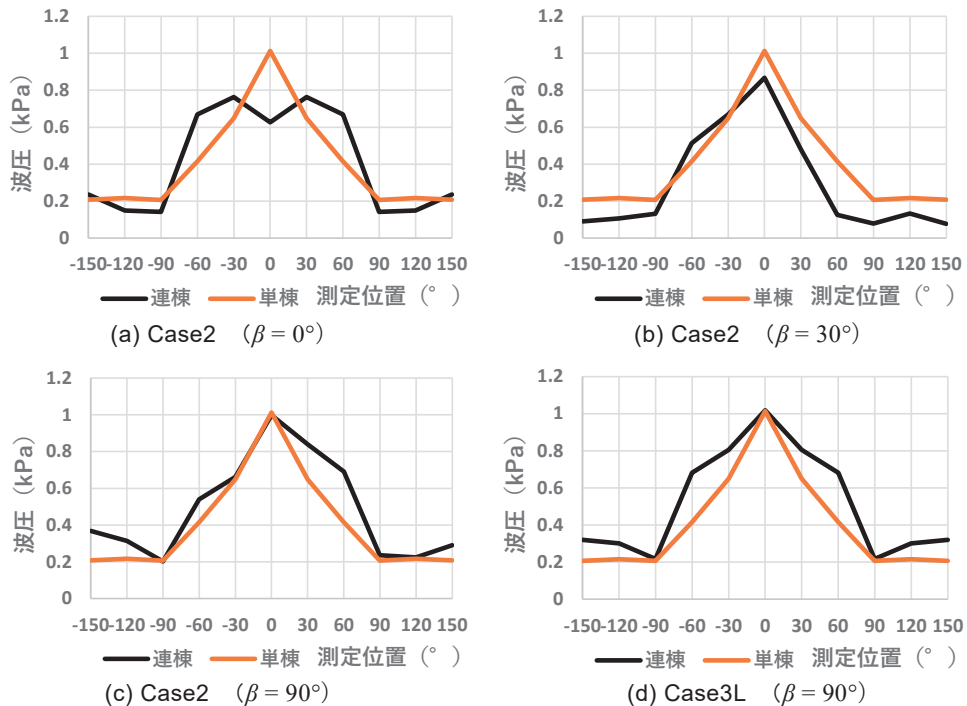


図 9 各配置パターンにおける波圧分布 ($S/D=0.5$, $hw=108\text{mm}$, 模型高さ 10mm の位置)

4. 結論

本研究では配置パターンの異なる円筒形オイルタンク群に作用する津波波力および波圧を検討するために水路実験を行った。

水路実験による配置・棟数が与える影響を検討した結果、単棟配置時の最大波圧と比較した場合、連棟配置時の最大波力は津波入射角の違いにより、増加・減少のいずれの場合もあること、特に 2 棟配置の場合は、入射角 45° がその境界となっていることが分かった。また、波力の増減には全体的な波圧の大きさだけでなく測定模型側面の波圧差の影響も関係していると考えられる。

謝辞

本研究は前田記念工学振興財団 令和 3 年度研究助成「海浜地帯に建つオイルタンク群の相互干渉を考慮した津波荷重と耐津波設計」(2021 年, 研究代表者: 寺本尚史), および科研費研究活動スタート支援「オイルタンク群に作用する津波荷重および耐津波設計に関する研究」(2021 年, 研究代表者: 丁威) の一部によるものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015
- 2) Akihiko OBATA, Naofumi TERAMOTO, Hiroki KAMEYA, Yuki TAKADATE, Kosuke SATO, Yasushi UEMATSU: Experimental Investigation of Tsunami Loads on a Group of Cylindrical Oil Storage Tanks, Advanced experimental mechanics, Vol.7, pp.155-161, 2022.8

津波氾濫流による抗力の評価におけるフルード数と抗力係数*

中央大学研究開発機構 松富 英夫

1. はじめに

陸上に遡上した津波の先端部背後の入射氾濫流（準定常流）による建築物等の構造物への津波荷重は抗力として評価される¹⁾。抗力の評価には抗力係数 C_D が必要であるが、抗力係数の入射フルード数 F_r への依存性や値などがよく判っていない。

本研究は孤立した直方体建築物等を対象に抗力係数の入射フルード数への依存性や値とともに実津波の入射フルード数の値域を既存の諸結果の検討を通して考察する。

2. 入射氾濫水深と建築物等の背面浸水深の関係

津波の入射氾濫流（非定常流）が建築物等に衝突し過ぎる過程において、氾濫流のエネルギー損失域は大きく二域に分けられよう。一つは建築物等の前面側での反射段波や跳水形成などによるエネルギー損失で、もう一つは建築物等の前面から下流側でのものである。

前者でのエネルギー損失（局所的に増加の場合もある）は次式で評価されよう²⁾。

$$\frac{h_f}{h_i} = 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{v_f}{v_i} \right)^2 + \zeta_i \right\} \frac{v_i^2}{gh_i} = 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{v_f}{v_i} \right)^2 + \zeta_i \right\} F_r^2 \quad (1)$$

ここで、 h_f は建築物等の前面における最大浸水深（氾濫流衝突初期の上方へのスプラッシュによるものは除く）、 h_i と v_i は津波の最大入射氾濫水深とそのときの氾濫流速、 v_f は建築物等の前面における流速、 ζ_i は建築物等の前面側における広義のエネルギー損失係数、 g は重力加速度である。建築物等の前面側に開口部がない場合は $v_f=0$ である。

後者でのエネルギー損失は次式で評価されよう³⁾。

$$C_v^2 = \frac{1}{1 + \zeta} \cong \frac{v_i^2}{2g(h_f - h_r)} \quad (2)$$

ここで、 C_v は流速係数、 ζ は建築物等の前・背面間でのエネルギー損失係数、 h_r は建築物等の背面における最大浸水深（現地調査）または建築物等の前面における最大浸水深時の背面浸水深（水理実験）である。

ζ_i 、 ζ や C_v は水理量ばかりでなく、建築物等の大きさ、形状や建築物等に対する入射氾濫流の流向、流れの非定常性等にも依存するため^{3), 4)}、今後多くの経験を積んで定めていく必要がある。

式(1)と(2)から入射氾濫水深 h_i と建築物等の背面浸水深 h_r の関係として次式が得られる。

$$h_r \cong h_i \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\zeta - \frac{v_f^2}{v_i^2} - \zeta_i \right) F_r^2 \right\} \quad (3)$$

* Froude number and drag coefficient in the evaluation of drag force due to a tsunami inundation flow by Hideo MATSUTOMI

ここで、 $F_r = v_i / \sqrt{gh_i}$ で、 $\zeta \leq \zeta_i + v_f^2 / v_i^2 + 2 / F_r^2$ が満たされる必要がある。式(3)は以下で利用される。

3. 先端部背後の入射氾濫流による抗力の抗力係数

津波氾濫流先端部の定義は曖昧である。波力や波圧の時間波形から定義される場合は氾濫流衝突初期の衝撃的な時間波形（認められない場合もある）が治まるまでと考えればよからう⁵⁾。この曖昧さが氾濫流先端部背後の最大波力の同定に混乱を来す可能性がある。

津波の入射氾濫流による抗力の評価法には二つの視点があろう。一つは主に既往津波を対象とする視点で、建築物等の構造物の影響を受けた水理量で抗力を評価する方法である。もう一つは主に想定津波などの将来津波を対象とする視点で、建築物等の構造物の影響を受けていない入射氾濫流の水理量で抗力を評価する方法である。もちろん、どちらの視点の方法であっても、対象津波が同一の諸元・条件下であれば、評価結果は同じでなければならない。

(1) 既報の非定常流実験式からの検討

松富ら⁶⁾は、既往津波を対象とする視点から、非定常流による水理実験に基づいて抗力式における投影面積 A の評価に直方体建築物等の背面浸水深 h_r を用いた場合の抗力係数 C_{Dr} の評価実験式（建築物等に開口部がない $v_f=0$ の場合の回帰式）として次式を提示している。

$$C_{Dr} \cong 13 F_r^{0.56} \lambda^{-0.29} \quad (4)$$

ここで、 F_r は代表流速として入射氾濫流速 v_i を想定し、代表水深として背面浸水深 h_r を用いた場合のフルード数、 λ (%) は入射氾濫流横断方向の建築物模型間の開度（ $=100 \times (1 - \text{建築物模型幅} / \text{実験水路幅})$ ）である。投影面積 A の評価に h_r を用いた場合の抗力係数 C_{Dr} は開度 λ へ有意に依存することが特徴である。

式(3)を用いて式(4)を書き換えれば次式を得る。

$$C_{Dr} \cong 13 \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1 - (\zeta - \zeta_i) F_r^2 / 2\}}} \right)^{0.56} \lambda^{-0.29} \quad (5)$$

式(5)の F_r は代表水深として最大入射氾濫水深 h_i を用いた場合のものとなっている。

式(5)を入射氾濫流の諸元で評価された抗力係数 C_{Dir} へ書き換えるには式(5)に h_r / h_i を掛ければよく、その場合の抗力係数評価式として次式を得る。

$$C_{Dir} \cong 13 \left(1 - \frac{1}{2} (\zeta - \zeta_i) F_r^2 \right) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1 - (\zeta - \zeta_i) F_r^2 / 2\}}} \right)^{0.56} \lambda^{-0.29} \quad (6)$$

式(4)は直方体建築物模型を実験水路の底面と片側壁の両方に密着させた水理実験で得られたものである。したがって、氾濫流中に孤立して建つ直方体建築物模型に対する抗力係数とするには、過去の実験的知見⁶⁾や文献的知見⁷⁾から推して、式(6)に0.6程度を掛ければよいと判断される。その場合の抗力係数評価式として次式を得る。

$$C_{Dir} \cong 7.8 \left(1 - \frac{1}{2} (\zeta - \zeta_i) F_r^2 \right) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1 - (\zeta - \zeta_i) F_r^2 / 2\}}} \right)^{0.56} \lambda^{-0.29} \quad (7)$$

開度 λ が100%の場合は完全に孤立した直方体建築物等におけるものとなる。ただし、式(4)は λ の範囲が67~83%の水理実験で得られたものであることに注意を要する⁶⁾。

今、実際にはあり得ないが、定常な一様水深の入射汜濫流が水平床上の孤立した直方体建築物等に衝突し、建築物等の前面側において汜濫流のエネルギーの損失や局所的な増加が一切ない場合を想定しよう。この場合は広義のエネルギー損失係数 $\zeta_i=0$ で、実際の入射汜濫流に比べて大きめの h_i や v_i を想定していることになる。また、建築物等の前面から下流の流れでは建築物等にとって実際に起こり得る最悪な場合(大きな入射汜濫流速、すなわち大きな抗力)を想定して、エネルギー損失係数 $\zeta=0.235$ (流速係数 $C_v=0.9^3, 4)$ に相当)を採用しよう。これらの想定の場合、式(7)は次式となる。

$$C_{Dir} \cong 7.8(1-0.1175F_r^2) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1-0.1175F_r^2\}}} \right)^{0.56} \lambda^{0.29} \quad (8)$$

また、実津波における入射フルード数 F_r の値域は $0.9 \times (0.7 \sim 2)^8 = 0.63 \sim 1.8$ 程度となる。

松富ら⁶⁾は投影面積 A の評価に前面浸水深 h_f を用いた場合の抗力係数 C_{Df} の評価実験式(回帰式)として次式も提示している。

$$C_{Df} \cong 2.4F_r^{-0.62} \quad (9)$$

投影面積 A の評価に h_f を用いた場合の抗力係数 C_{Df} は開度 λ へ有意に依存しないことが特徴である。

式(9)に対して投影面積の評価に h_r を用いた場合と同様な議論を展開すれば、順に次式群を得る。

$$C_{Df} \cong 2.4 \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1-(\zeta-\zeta_i)F_r^2/2\}}} \right)^{-0.62} \quad (10)$$

$$C_{Df} \cong 2.4 \left(1 + \frac{1}{2}(1+\zeta_i)F_r^2 \right) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1-(\zeta-\zeta_i)F_r^2/2\}}} \right)^{-0.62} \quad (11)$$

$$C_{Df} \cong 1.44 \left(1 + \frac{1}{2}(1+\zeta_i)F_r^2 \right) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1-(\zeta-\zeta_i)F_r^2/2\}}} \right)^{-0.62} \quad (12)$$

ここで、 C_{Dir} は入射汜濫流の諸元で評価された抗力係数で、式(11)は式(3)でなく、式(1)を用いて導かれている。

$\zeta_i=0$ 、 $\zeta=0.235$ とした場合、式(12)は次式となる。

$$C_{Df} \cong 1.44 \left(1 + \frac{1}{2}F_r^2 \right) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1-0.1175F_r^2\}}} \right)^{-0.62} \quad (13)$$

式(8)と(13)が孤立した直方体建築物等に直角に汜濫流が入射する場合の抗力係数評価実験式で、両式の計算例を図-1に示す。実線部分が水理実験(評価実験式)の範囲(適用範

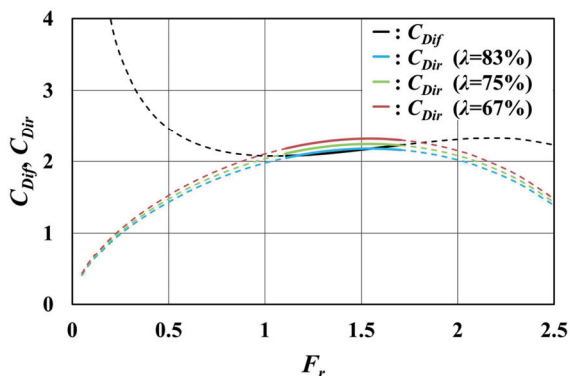


図-1 松富ら⁶⁾の抗力係数評価実験式(8)と(13)の入射フルード数 F_r への依存性（実線の範囲は水理実験の範囲）

図)である。図によれば、両式から評価された抗力係数値はほぼ同じである。ほぼ同じことに式(6)と(11)への0.6掛けといった掛け数値が関係しないこと、 ζ の値を変化させれば式(8)と(13)から評価される抗力係数値の差が拡大することから、 $\zeta_i=0$ と $\zeta=0.235$ の組み合わせは本水理実験値に対してほぼ妥当な一組み合わせであることを示している。

図-1によれば、松富ら⁶⁾の水理実験範囲内 ($v_i/\sqrt{gh_r}=1.2\sim 2.1$ 。これを $\zeta_i=0$ 、 $\zeta=0.235$ として書き換えれば $v_i/\sqrt{gh_i}=1.1\sim 1.7$)における抗力係数値は2.1~2.3である。この値は自然河川を利用した定常流による水理実験で得られた桑村⁹⁾の射流領域 ($v_i/\sqrt{gh_i}=1.0\sim 1.8$)における水理実験値 1.2 ± 0.2 に比べて1.8倍強とかなり大きい。参考までに松富らの抗力係数値を桑村のものとも一致させるには式(6)と(11)へ0.6掛けでなく、0.33掛けにする必要がある。1.8倍強という大きな違いの理由として汜濫流（非定常流）と定常流における水深係数 h_f/h_i や波力機構の違いが考えられる。一般に水深係数は汜濫流におけるものの方が大きい¹⁰⁾。したがって、入射汜濫水深 h_i が同じ場合、汜濫流における前面浸水深 h_f の方が大きく、波力も大きいことになる。波力機構の違い例であるが、水平床上的汜濫流では汜濫流先端部が建築物等の前面鉛直壁へ衝突した後に鉛直方向へ投げ出され、投げ出された水塊が後続の汜濫流へ落下着水したときに最大波力が発生する 경우가多々ある^{11), 12)}。このときに汜濫流が建築物等の背面に達（影響）していない場合もある。

桑村⁹⁾は定常流による抗力の大きさは建築物等への背面全静水圧を差し引いた全静水圧の0.6~0.8倍と指摘している。一方、松富ら⁶⁾の水理実験における抗力の大きさ（汜濫流による最大波力に占める造波抵抗力の割合は不明）は全静水圧の2倍程度である。したがって、松富らの抗力は桑村のもの平均的に2.9倍弱である。抗力係数比が1.8強、抗力比が2.9弱という両比の違いは $\zeta_i=0$ と想定したことにより松富らの水理実験における入射汜濫流による流入運動量 $h_i v_i^2$ が、換言して、式(1)から理解されるように入射汜濫流の h_i と v_i が過大評価（既述）されることが一因していると考えられる。

(2) 既報の定常流実験値からの検討

松富ら¹³⁾は胸壁模型を越流した定常流による孤立した直方体建築物模型への波力を含む

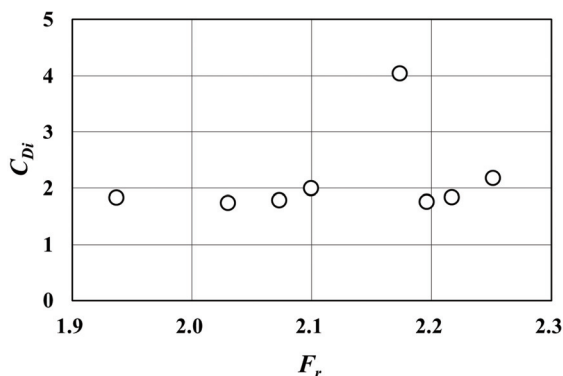


図-2 松富ら¹³⁾の定常流実験値に基づく抗力係数 C_{Di} の入射フルード数 F_r への依存性

水理実験値を提示している。その実験値に基づいた抗力係数 C_{Di} を図-2に示す。入射フルード数 F_r の値域が弱跳水形成の狭い範囲に限られているが、抗力係数値は前面浸水深と波力が最も小さい条件下のデータを除いて2前後（1.7～2.2）である。この値は図-1に示したもののより少し小さい程度である。松富ら^{10), 13)}はこれらの実験値と氾濫流によるものとの比較も行っており、波力は氾濫流によるものの方が大きい、両者の差はそれほど大きくない。したがって、抗力係数の差もそれほど大きくないと推定され、図-1と2の平均的な抗力係数間の差の傾向と整合する。

(3) その他の検討

松富ら¹⁴⁾は水平床上の孤立した直方体建築物に対して定常な一様水深の入射氾濫流、静水圧、無摩擦を想定し、抗力係数が2以上であることや入射フルード数 F_r にほとんど依存しないことを理論的に考察している。

池谷ら¹⁵⁾は水平床上の孤立した直方体建築物模型に対して非定常流による水理実験を実施し、最大波力に対する抗力係数は射流域において2程度で、ほぼ一定であることを提示している。

(4) 現状での判断

以上の諸検討から、水平床上の孤立した直方体建築物等への津波先端部背後の準定常的な入射氾濫流による抗力の抗力係数は定常流の場合⁹⁾と同様に射流域ではほぼ一定で、現状の知見ではその値としてこれまでと同じ2.1程度¹⁾の採用が推奨される。

4. おわりに

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- 1) 津波の入射氾濫水深 h_i と水平床上の孤立した直方体建築物等の背面浸水深 h_r の関係式(3)を提示した。
- 2) 水平床上の孤立した直方体建築物等への津波先端部背後の準定常的な入射氾濫流による抗力の抗力係数は定常流の場合⁹⁾と同様に射流域ではほぼ一定で、その値として現状の知見ではこれまでと同じ2.1程度¹⁾の採用が推奨される。

謝辞：本研究の遂行にあたり科学研究費（基盤研究(C)，20K05041，代表：松富英夫）の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，pp.563-592，2015.
- 2) 松富英夫，決得元基，齋藤雅大：開口部を有する鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する基礎実験，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，pp.326-330，2013.
- 3) 松富英夫，飯塚秀則：津波の陸上流速とその簡易推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp.361-365，1998.
- 4) 松富英夫，岡本憲助，佐藤和典：浸水痕跡に基づく簡易氾濫流速推定法の基礎的検討，水工学論文集，第52巻，pp.673-678，2008.
- 5) 有川太郎：津波の事典，朝倉書店，pp.162-163，2007.
- 6) 松富英夫，大向達也，今井健太郎：津波氾濫流の構造物への流体力，水工学論文集，第48巻，pp.559-564，2004.
- 7) 椿東一郎：水理学II，森北出版，p.272，1974.
- 8) Matsutomi, H. and K. Okamoto: Inundation flow velocity of tsunami on land, Island Arc, Vol.19, Issue-3, pp.443-457, 2010.
- 9) 桑村 仁：氾濫流に建つ直方体構造物の抗力と揚圧力，日本建築学会建築系論文集，Vol.81, No.720, pp.219-227, 2016.
- 10) 松富英夫，小泉拓也，照井裕介，加藤広之，岩瀬浩之：定常と非常実験の違いが胸壁越流後の津波の氾濫流やRC造建築物への波力に及ぼす影響，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.74, No.5, pp.1225-1230, 2018.
- 11) 松富英夫：砕波段波衝突による衝撃波力について，土木学会論文集，No.399/II-10, pp.147-155, 1988.
- 12) 水谷夏樹，梅田尋慈，池本将大：構造物に衝突し打ち上がった水塊の落水によって生じる波力特性について，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.73, No.2, pp.919-924, 2017.
- 13) 松富英夫，小泉拓也，加藤広之，岩瀬浩之：胸壁越流後の津波氾濫流とそのRC造建築物への波力，日本地震工学会・大会－2017梗概集，P-14, 2017.
- 14) 松富英夫，有川太郎，嶋津 朋，決得元基：開口部を有するRC造建築物の前面浸水深，広義のエネルギー損失係数と移動・転倒条件，第14回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.2651-2660, 2014.
- 15) 池谷 毅，末長清也，福山貴子，秋山義信，鈴木紀雄，舘野公一：反射特性を考慮した陸上構造物に作用する津波波力の評価法，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.71, No.2, pp.985-990, 2015.

構造物にかかる流体力に関する基礎的検討

八戸工業大学大学院 立花 郁巳
 八戸工業大学大学院 遠藤 貫太
 八戸工業大学大学院 堀合 紳弥
 八戸工業大学大学院 高瀬 慎介
 八戸工業大学大学院 加藤 雅也

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震は国内観測史上最大の規模であり、発生した津波は木造住宅を倒壊させ、RC 構造物の外壁や開口部を損傷させるなど大きな被害を与えた。倒壊した際の瓦礫が津波に巻き込まれることで被害が拡大したと考えられている。現在、千島・日本海溝地震による20m級の津波の予測がされており、東北地方太平洋沖地震による津波被害を超える規模の被害をもたらすとされている。

構造物を建設する際に波力の算定が行われており、波の衝突時の波力を求め設計に用いられている。しかし、波の力は衝突時だけでなく遡上している間、構造物にかかり続ける。また、波力の算定には様々な抗力係数がモデル化されているが近似的な値を用いていることから避難ビルなどの重要構造物や複雑な形状をした構造物には、より詳細な流体力の計測が重要である。また、壁状の直立平面やタンク形状のような円柱、建屋模型のような矩形および立方体などの形状を用いた波力、流体力の研究¹⁾²⁾³⁾は多くされているが津波避難タワーなどのような複雑な形状の研究例は少ない。

そこで本研究では、津波遡上により構造物にかかる流体力について数値解析を行い詳細な流体力の計測を行うことを目的とする。はじめに、水理模型実験と数値解析の結果を比較し精度の検討を行った。その後、津波避難タワーを模して作成したモデルと、それと同じ容積の矩形モデルを用いたダムブレイク解析を行い、浸水深と形状の違いで作用する流体力がどのように変化するかを比較し考察、検討を行った。

2. 実験概要

実験に用いた水路の概要を図-1に示す。水路は全長 20m、水路幅 0.60m、水路深さ 1.0m の開水路で、底面は剛性、側面はアクリルガラス製である。波を遡上させるために水路内にブロックと鉄板を用いた台を設置し、その上に底面積 0.15×

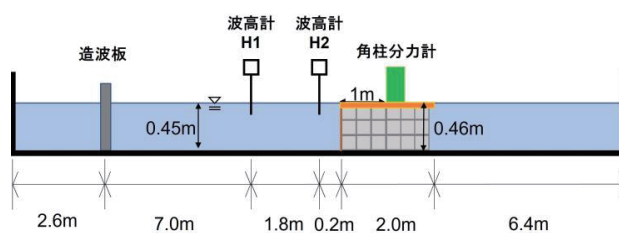


図-1 水路の概要

* Fundamental Study of Fluid Forces acting on Structures by Ikumi Tachihana, Kanta Endo, Shinya Horiai, Shinsuke Takase, Masaya Kato

0.15m²、高さは 0.3m の角柱分力計を設置する。造波装置により津波を発生させた波の波高の変化と角柱にかかる流体力を波高計 H1, H2 と分力計を用いて計測する。また、本実験において発生させる津波は孤立波とする。造波する孤立波の波高は 10cm とし、孤立波を造波する際の造波板の振幅と速さは孤立波理論（式-1, 2）を用いて設定した。

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \left\{ \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right\} \quad \dots \text{(式-1)}$$

$$c = \sqrt{g(h + H)} \quad \dots \text{(式-2)}$$

ここで、 η : 孤立波波高の理論値、 c : 流速、 H : 波高、 h : 水深、 x : 位相、 t : 時間、 g : 重力加速度である。また、再現性を得るために同じ条件の実験を 3 回行った。

3. 再現解析概要

OpenFOAM 内の二相流ソルバーである interFoam を用いて解析を行った。OpenFOAM を用いて作成した水路のモデルを図-2 に示す。配置や測定位置は水理模型実験同様であり、モデルは開水路で壁面、底面 Slip 条件、角柱は noSlip 条件と設定した。モデルの寸法は造波板のゼロ位置から作成したため全長 17.4m、幅 0.6m、高さ 1.0m であり、角柱を配置する台の高さは実験と同じく 0.46m である。また、角柱の寸法も同じく底面積 0.15 × 0.15m²、高さ 0.3m で作成している。流体力のデータ抽出には、OpenFOAM の FunctionObject 機能である forceCoeffs を用いた。この機能は、トルク係数 C_m 、抗力係数 C_d 、揚力係数 C_l を出力することができるため、角柱の抗力係数 C_d を時系列データで取り出し、その抗力係数から式-3 を用いて流体力を求める。

$$D = \frac{1}{2} C_d \rho U^2 S \quad \dots \text{(式-3)}$$

ここで、 D : 流体力、 C_d : 抗力係数、 ρ : 密度、 U : 代表速度、 S : 代表面積である。

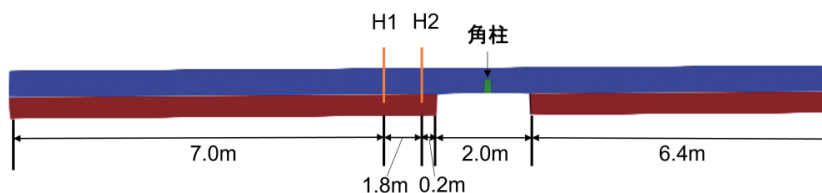


図-2 再現解析モデル

4. 解析精度の検証結果

実験結果および解析結果を図-3, 4, 5 に示す。図-3 のグラフでは波高 H1 の比較を行った。波高の時刻歴変化における最初の波のグラフ形状に着目すると解析結果は実験結果を再現できていることがわかる。その後の反射波については実験と違う挙動を示しているが、孤立波である最初の波を良い値で再現できていることから H1 での解析結果の精度は概ね良い結果を得られた。図-4 のグラフでは波高 H2 の比較を行った。H1 の比較と同じく最初の波のグラフ形状に着目すると解析の値が実験の値より大きいことがわかる。しかし、差は数 cm であるため H2 での解析結果の精度も概ね良い結果が得られた。また、図-3, 4 より孤立波の進行速度も解析で再現できていることがわかる。図-5 のグラフでは流体力の比較を行った。流体力の最大値は近い値を示していることがわかる。また、流体力の時刻歴変化におけるグラフの形状についても再現できていることがわかる。これらの示すことから OpenFOAM による解析は、実験値と近い値と水の挙動を再現できることが分かったため、解析精度は良いと考えられる。

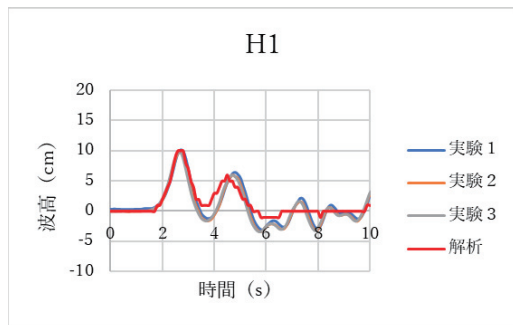


図-3 波高 H1

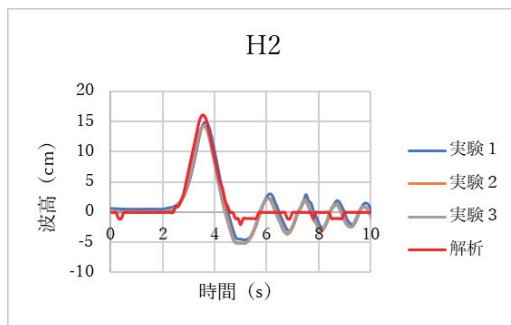


図-4 波高 H2

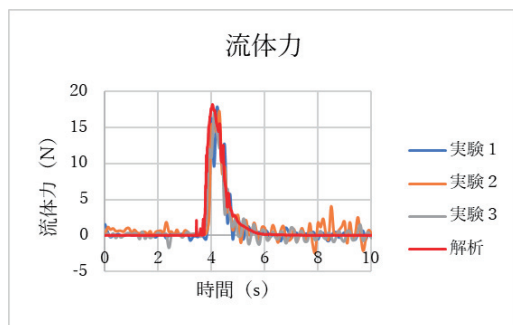


図-5 流体力

5. 解析概要

OpenFOAM を用いて避難タワーモデルを設置した水路の解析モデルを図-6 に示す。境界条件は、開水路で底面、壁面は Slip 条件，モデルは noSlip 条件，避難タワーモデル後方の壁は outFlow の条件にし，水が流出するようにした。水路のモデルの寸法は高さ 80m，全長 200m，幅 76m である。水柱は高さ 40m と 30m の 2 つの条件で行う。水柱の長さは 70m，そこから 60m 離れたところに避難タワーモデルを配置する。避難タワーモデルの正面，側面を図-7，8 に示す。高さ 17.4m，幅 21.2m，全長 29.8m の三階建てを想定している。この避難タワーモデルをモデル 1 とする。モデル 1 と同じ容積の矩形モデルを図-9 に示す。この矩形モデルをモデル 2 とする。解析は，モデル 1 の水柱 40m と 30m，モデル 2 の水柱 30m の 3 ケース行った。

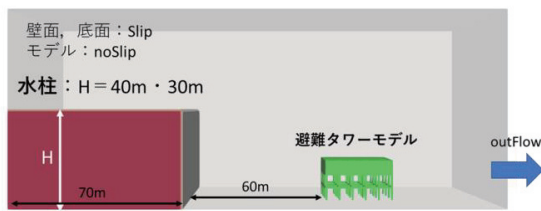


図-6 水路モデル

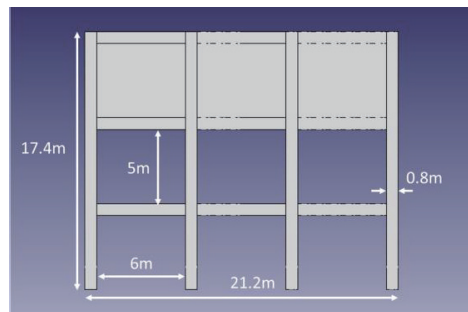


図-7 避難タワーモデル
(モデル 1) : 正面

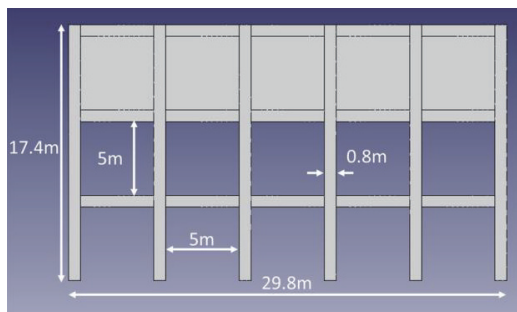


図-8 避難タワーモデル
(モデル 1) : 側面

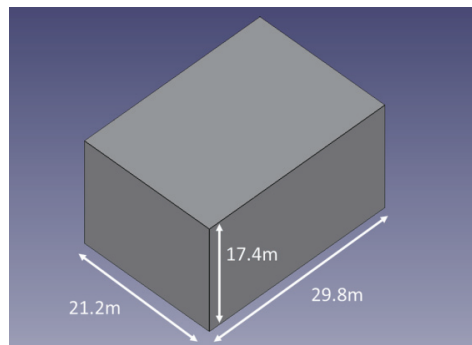


図-9 矩形モデル (モデル 2)

6. 解析結果

水柱 30m のモデル 1 とモデル 2 の比較を図-10 に示す。モデル 1 の流体力の最大値はモデル 2 の最大値の約 1/3 であり形状による遡上津波への有効性があることを確認できた。また、モデル 2 の流体力は衝突時に最大値を出しその後減少していくが、モデル 1 の流体力は衝突時に上昇し、その後わずかに減少し徐々に最大値まで上昇している。水柱 30m と水柱 40m のモデル 1 の比較を図-11 に示す。ここで、水柱 30m の浸水深は約 7m であり、水柱 40m の浸水深は約 11m であった。水柱 40m の流体力の最大値は 30m より約 2 倍大きい値となっている。また、水柱 40m の場合でも流体力は衝突時に上昇、その後、減少し最大値まで上昇する挙動がみられた。これは、モデル 1 のような形状で水が滞留し水位が上昇し構造物にかかる流体力も上昇したと考えられる。水柱 30m、モデル 1 のシミュレーション結果を図-12 に示す。

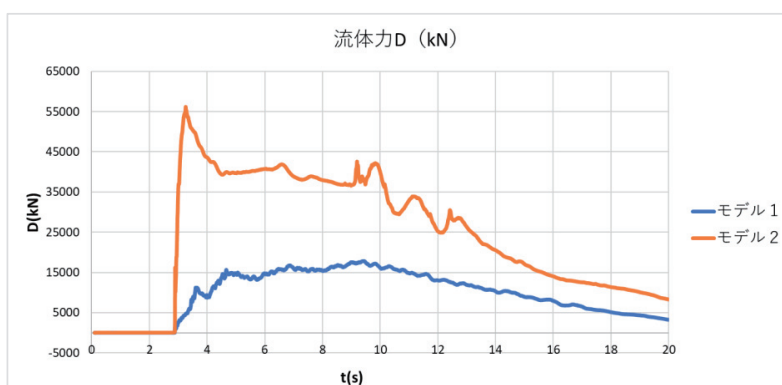


図-10 水柱 30m のモデル 1, モデル 2

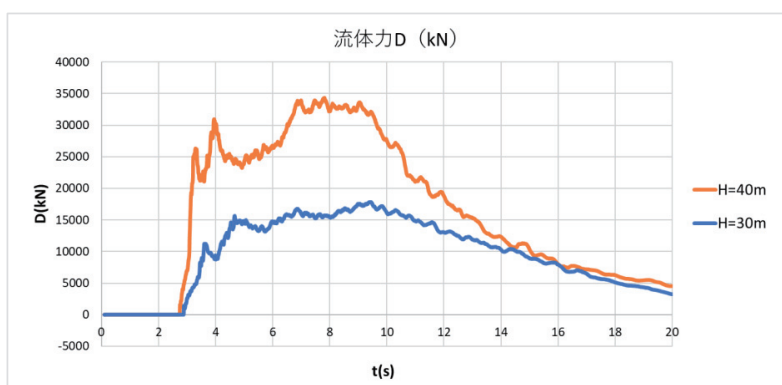


図-11 水柱 40m, 水柱 30m のモデル 1

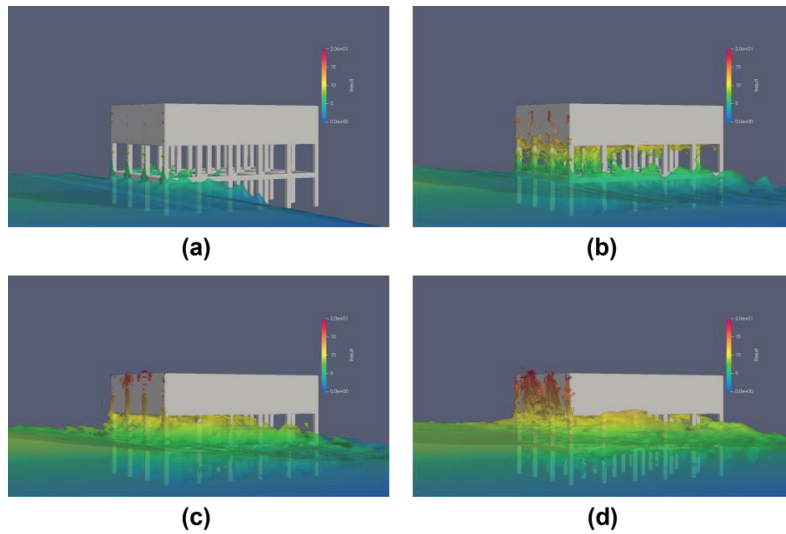


図-12 シミュレーション結果（水柱 30，モデル 1）

7. おわりに

本研究では、水理模型実験と再現解析の結果の比較により、OpenFOAMによる孤立波と反射波による波高変化の再現、流体力について満足する結果で解析することができると分かった。津波避難タワーを模して作成したモデルと、それと同じ容積の矩形モデルを用いたダンプレイク解析に関しては、津波避難タワー形状の遡上津波に対する有効性があることを確認でき、避難タワーモデルの流体力の時間変化は矩形モデルと違い衝突時ではなく、時間が経過し水位が上昇したときに最大値を示すことが分かった。また、浸水深が約 4m 変化するだけで今回用いたモデルでは構造物全体にかかる流体力は約 2 倍になることが分かった。しかし、今回は構造物全体にかかる流体力を解析で求めたが、避難タワーモデルのような形状は部材ごとに流体力のかかり方に違いがあるため、部材ごとにかかる流体力の解析を今後の課題として検討を続けたい。

8. 参考文献

- 1) 織田幸伸，本田隆英，高島知行：陸上構造物に働く津波波力の時系列評価に関する研究土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.70，No.2，I_796-I_800，2014.
- 2) 榊山勉：津波遡上によるタンクに作用する流体力に関する研究土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.70，No.2，I_891-I_895，2014.
- 3) 高橋研也，前田勇司，西畑剛，小牧大樹：陸上構造物に作用する津波波圧と波向の影響に関する実験的研究土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.70，No.2，I_306-I_310，2014.

河道内の植生および流木が洪水流に与える影響に関する検討*

秋田大学工学部 大森蒼士

秋田大学大学院理工学研究科 自見寿孝・齋藤憲寿・渡辺一也

1. はじめに

河川流域には多くの植生と樹木が存在している。河道内の植生は流水抵抗の働きをし、洪水時の水位上昇を引き起こす。河道周辺の樹木は洪水時に発生する河岸の崩壊により流木化し、河道内を流下する。これにより植生による水位上昇が生じる。その結果、氾濫水とともに流木が市街地に流入し、人命や家屋に被害が生じるおそれがあるため、適切な河川整備が必要である。既往研究では植生に関する河道内の流れの検討¹⁾²⁾や、洪水時の流木の挙動に関する研究³⁾⁴⁾が行われてきたが、植生と流木が相互作用した際の洪水時の検討については行われていない。

そこで本研究では水理模型実験を行い、植生の密度と流木長による水位上昇量について検討した。

2. 研究対象

本研究のコンセプトとして、2022年8月に発生した記録的大雨により氾濫した五城目町の内川川や富津内川のような中小河川を対象にする。馬場目川圏域河川整備計画⁵⁾より馬場目川圏域中流部である富津内川合流点の川幅が30~50m、勾配は1/300である。よって、川幅30mの河川を想定し、縮尺を1/100として実験を行う。

3. 実験方法

実験は直線矩形開水路に植生モデルを設置し、流木の模型を水路の一方の端から投入して行った。本研究で用いた植生モデルの設計図を図-1に、水路に設置した模型を図-2に示す。植生モデルは剛体な植生を模擬するため真鍮を用い、直径6mm高さ50mmとした。密生度は2種類とし、高密生度(50mm間隔25本)と低密生度(100mm間隔9本)とした。実験で用いる流木模型を図-3に示す。材質は秋田県に広く分布している杉を用い、想定する流木の長さを20m、15m、10mとする。縮尺1/100より、流木の模型を200mm、150mm、100mmとした。杉の直径は実スケールにおいて0.5mと想定して、模型流木直径は5mmとした。

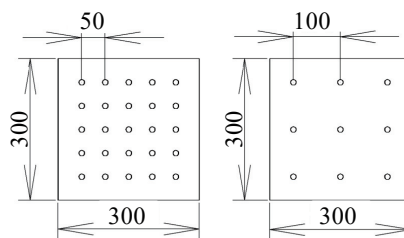


図-1 植生モデル設計図



図-2 植生モデル

(左:高密生度, 右:低密生度)

*Study of the influence of vegetation and driftwood in the river channel by Soshi OMORI, Yoshitaka JIKEN, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE

実験方法として、流量を $0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.0056 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.0028 \text{ m}^3/\text{s}$ の3通り流して行く。それぞれの流量の特徴として、馬場目川の計画高水流量を基準に、「洪水流量」と「平水流量」と「低水流量」の3パターンである。秋田県の雄物川の支川である荒川に流入した杉流木数⁶⁾より本数を算出し、流木モデルを植生層のおよそ 0.8 m 上流から流木長別に 40 本流下させた。流木の比重は乾燥状態で $0.42 \sim 0.50$ であり、7日間水につけた湿潤状態で比重は $0.81 \sim 0.88$ であった。実験では湿潤状態を使用した。上流から流木モデルを流下させ、カメラを用いて植生モデルを設置した箇所を横と上から流木が堆積する様子を記録した。流木は1秒におよそ3本ずつ投入した。流木長ごとに5回ずつ、密生度別と流量別に実験を行い、合計90回実験を行った。流木の堆積状況は、流木堆積率で評価した。流木堆積率は式(1)で表される。

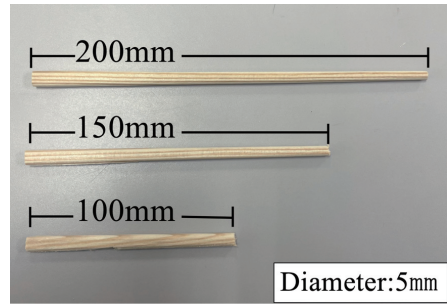


図-3 流木モデル

$$\text{流木堆積率(\%)} = \frac{\text{堆積した流木の本数}}{\text{投入した流木の本数}} \times 100 \quad (1)$$

流木が堆積した際の水位を計測した。計測した箇所を図-4に示す。計測箇所を植生間と植生後方に分類し、高密生度は各列5点、低密生度は各列3点計測した。列ごとの水位を平均し、1列目を 0 mm とし、高密生度は 50 mm 間隔で6列、低密生度は 100 mm 間隔で4列算出した。また、植生層を通過した際の水位を計測するため、 400 mm の列の水位を計測し同様に平均値を算出した。

流木モデルが無い状態の水位を基準にした際の水位の変化を水位上昇率で評価した。水位上昇率は式(2)で表される。

$$\text{水位上昇率(\%)} = \frac{\text{流木堆積時の水位}}{\text{流木無し時の水位}} \times 100 - 100 \quad (2)$$

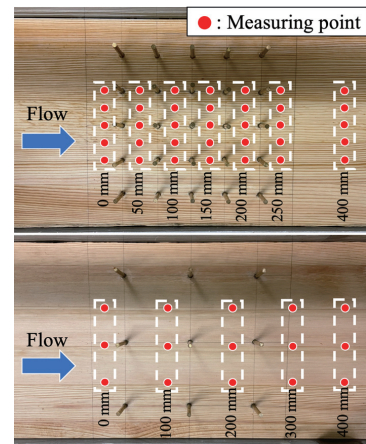


図-4 計測箇所

(上：高密生度，下：低密生度)

4. 実験結果

(1)流木の挙動について

高密生度植生モデルの流木の挙動を植生層上と横から撮影したものを図-5に、低密生度植生モデルの場合を図-6に示す。左から 200 mm , 150 mm , 100 mm の流木モデルの様子である。写真は流量 $0.0056 \text{ m}^3/\text{s}$ 時の挙動を撮影したものであるが、 $0.0028 \text{ m}^3/\text{s}$ の時も同じような挙動を示した。高密生度の場合、流木長に関わらず流木モデルの多くが1列目の植生モデルに堆積した。一方、低密生度の場合も 200 mm , 150 mm の流木モデルは1列目の植生モデルに堆積したが、 100 mm の流木モデルの多くが植生層を通過し、堆積しなかった。

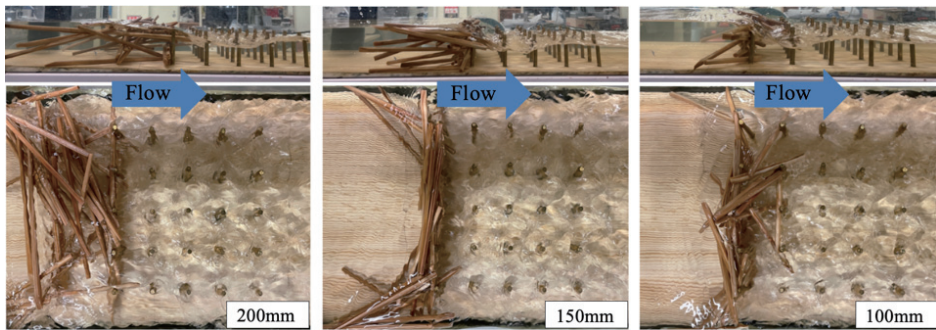


図-5 流木モデルが高密度植生モデルに堆積した様子 (0.0056 m³/s)

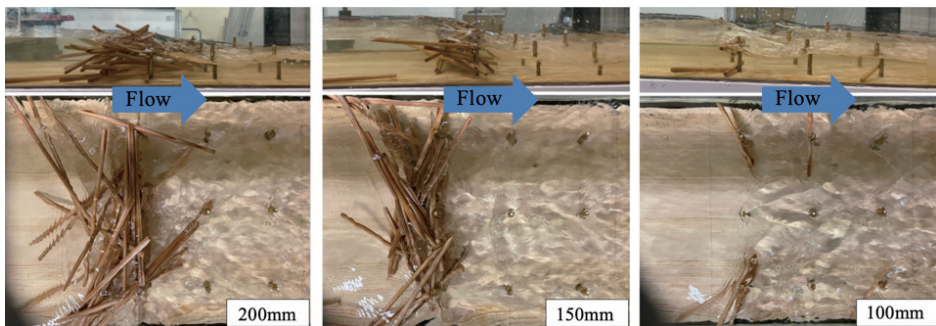


図-6 流木モデルが低密度植生モデルに堆積した様子 (0.0056 m³/s)

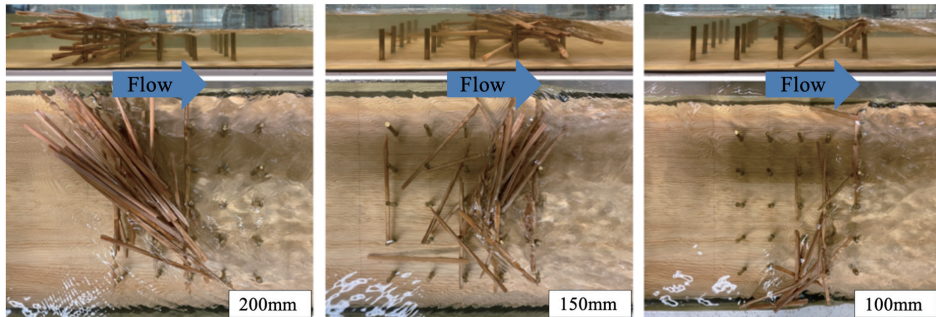


図-7 流木モデルが高密度植生モデルに堆積した様子 (0.0083 m³/s)

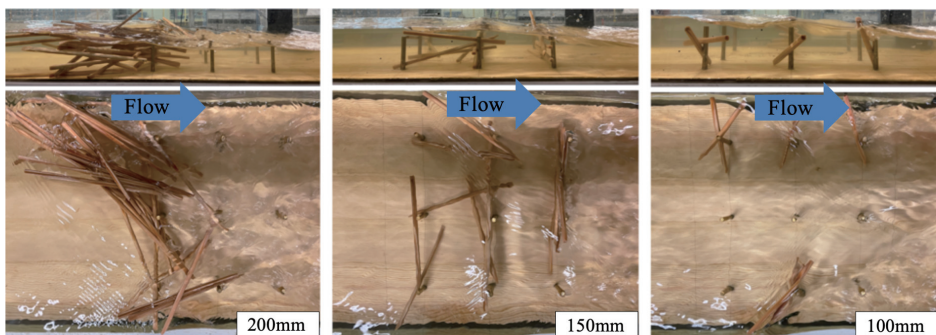


図-8 流木モデルが低密度植生モデルに堆積した様子 (0.0083 m³/s)

また、流量 $0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$ 時の高密生度植生モデルを図-7に、低密生度植生モデルの場合を図-8に示す。水位が植生高さより高いため、高密生度の場合流木モデルが植生モデルに重なるように堆積した。また、流量の増加に伴い水位も増加しているため、 150 mm の流木モデルは植生層後方に堆積し、 100 mm の流木モデルは半分以上が植生層を通過し、堆積しなかった。低密生度の場合、 200 mm の流木モデルは高密生度同様に堆積したが、 150 mm 、 100 mm の流木モデルはほとんどが植生層を通過した。

(2)流木の堆積率について

流木長と流木堆積率の関係を以下に示す。流量 $0.0028 \text{ m}^3/\text{s}$ を図-9、 $0.0056 \text{ m}^3/\text{s}$ を図-10、 $0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$ を図-11に示す。

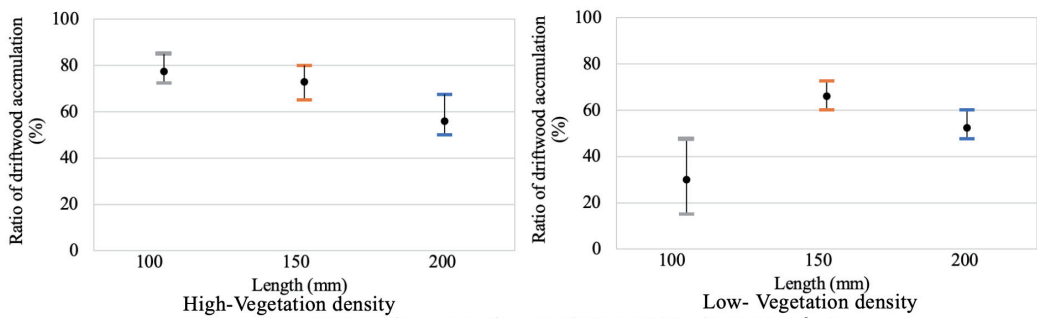


図-9 流木長と流木堆積率の関係 ($0.0028 \text{ m}^3/\text{s}$)

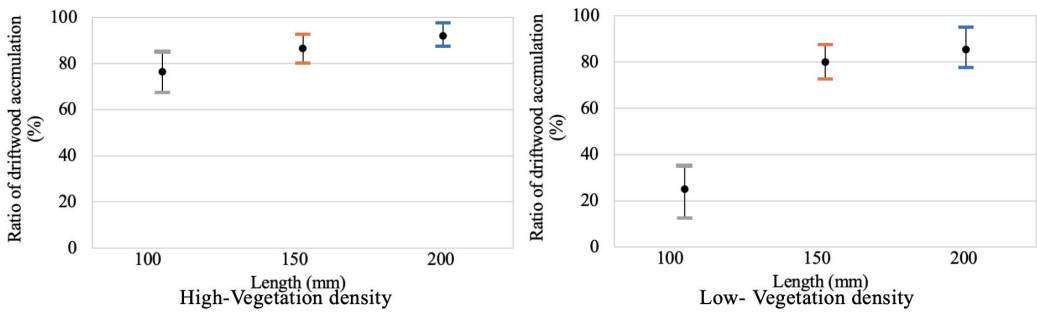


図-10 流木長と流木堆積率の関係 ($0.0056 \text{ m}^3/\text{s}$)

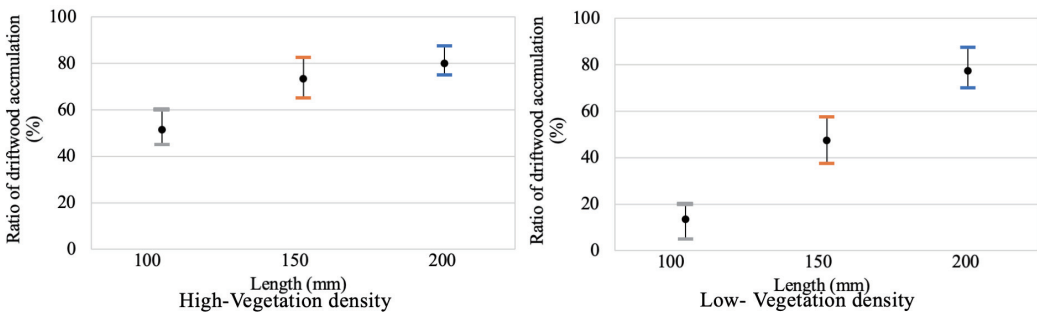


図-11 流木長と流木堆積率の関係 ($0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$)

0.0028 m^3/s の場合、高密度では流木長が短いほど植生モデルに堆積しやすいが、低密度では150 mm が最も堆積していた。0.0056 m^3/s 、0.0083 m^3/s の場合、高密度・低密度ともに流木長が長いほど植生モデルに堆積することが確認できた。0.0028 m^3/s 時の傾向が異なることの原因として、流量が小さいため自重により流木長が長いほど河道内を流下せず留まる流木が現れることであると推測される。分布の範囲は10~30%であり、どの流量の場合も低密度の時の長さ100 mm の流木堆積率のばらつきが3種類の流木長の中で最も広範囲であった。これは流木長が植生モデルの1スパンの間隔と同じであり、植生モデルに多く堆積する場合とあまり堆積しない場合の2種類に分かれるためと推測される。

(3)水位の上昇率について

各流木長における水位上昇率について、0.0028 m^3/s を図-12、0.0056 m^3/s を図-13、0.0083 m^3/s を図-14 に示す。

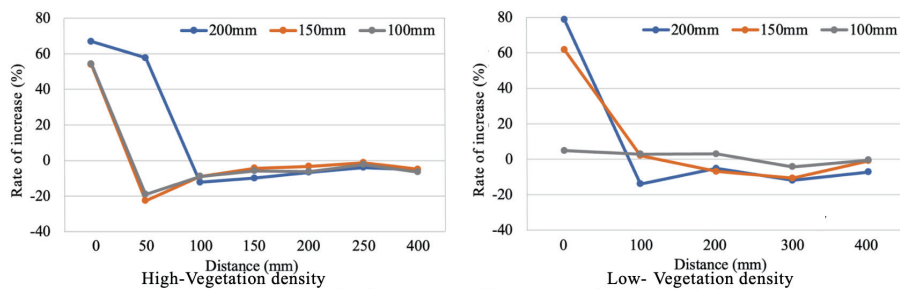


図-12 各流木長の水位上昇率 (0.0028 m^3/s)

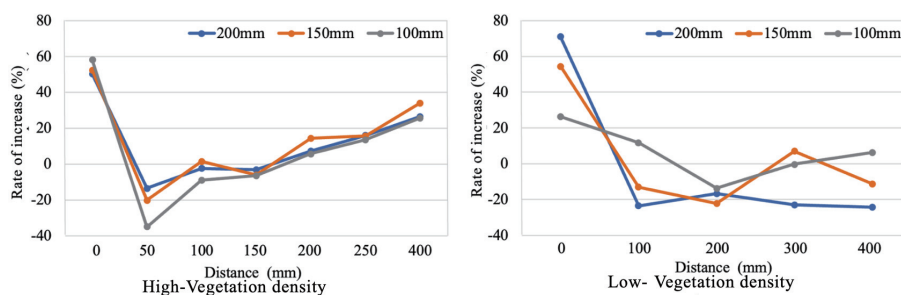


図-13 各流木長の水位上昇率 (0.0056 m^3/s)

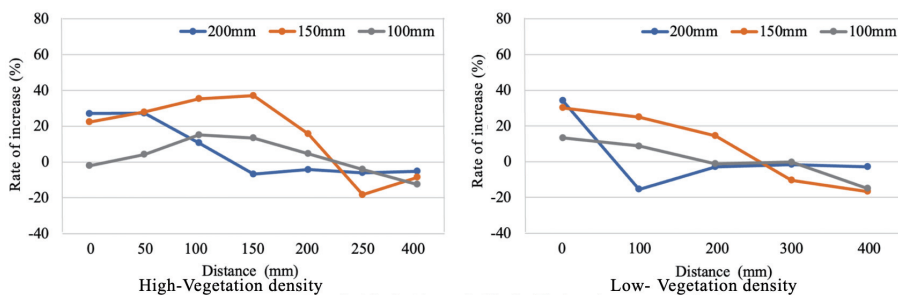


図-14 各流木長の水位上昇率 (0.0083 m^3/s)

0.0028 m³/s の場合、高密度度は流木長にかかわらず 1 列目に 50 %を超える水位上昇があり、3 列目以降の変化は見られなかった。低密度度は 200 mm、150 mm の流木モデルは高密度度同様の結果が得られたが、100 mm の流木モデルの水位変化は見られなかった。0.0056 m³/s の場合、高密度度・低密度度ともに上昇率にやや違いはあるものの同じような形となり、同様の結果が得られた。0.0083 m³/s の場合、植生の列ごとの上昇変化は 0.0028 m³/s と 0.0056 m³/s ほどではないが、全体的に同じような変化となった。これは、0.0083 m³/s は水位が植生の高さよりも高くなるため、流木モデルの堆積位置が植生層全体に広がるためと推測される。

5. おわりに

本研究では、植生の密度と流木長による水位上昇量について検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 流木の堆積について、流木長が長いほど密度度に関わらず堆積率が高く、流木長が短いと植生層を通過し、堆積率が低くなることが確認された。また、流量が小さいと流木の自重により河道内に留まる流木が見られ、特に長い流木で顕著に見られた。
- 2) 水位の上昇について、流木長が長いほど密度度に関わらず水位が上昇することが確認された。しかし、洪水時は全体的に水位が上昇するので平常時に比べて変化量は小さくなった。また、洪水時は密度度よりも流木長の影響を大きく受け、流木長が長いほど流木は複雑に堆積するため、水位の変化も複雑であった。

謝辞

本研究を行うにあたり科学研究費補助金（20H00256、代表：風間 聡）の助成を受けた。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 赤堀良介, 春日井勇輝: 植生内の流れの構造と浮遊砂堆積状況の関連について, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.70, No.2(応用力学論文集 Vol.17), I_753-I_760, 2014.
- 2) 溝口敦子: 直立性植生内の流速鉛直分布荷底面粗度が及ぼす影響の実験的検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.74, No.1, pp.38-50, 2018.
- 3) 初田直彦, 赤堀良介, 清水康行: 蛇行流路の流体場と流木の挙動に関する実験と数値解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2(応用力学論文集 Vol.15), I_415-I_422, 2012.
- 4) 西脇 遼, 渡辺一也, 齋藤憲寿, 松林由里子, 田中 仁: 橋梁部に堆積した杉流木に関する水理模型実験, 土木学会論文集 G(環境), Vol.75, No.5, I_255-I_260, 2019.
- 5) 秋田県: 二級河川馬場目川水系馬場目川圏域河川整備計画変更, 平成 27 年 2 月, <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjd7_OMtP37AhWrmFYBHXC8ClSQFnoECBoQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.pref.akita.lg.jp%2Fuploads%2Fpublic%2Farchive_0000010601_00%2Fseibi_babame.pdf&usq=AOvVaw0IhLTFHt8kbrScIwz7g3PA>(2023/1/12 閲覧)
- 6) 松林由里子: 2017 年秋田豪雨によって水田に堆積した流木の特徴: 東北地域災害科学研究, 第 56 巻, pp. 1-6, 2020.

UAV を用いた馬場目川の砂州挙動と河床変動に関する研究*

秋田大学大学院理工学研究科 自見寿孝・齋藤憲寿・渡辺一也

1. はじめに

近年、全国で台風などの大雨に伴い、河川流量が増加することで洪水被害が多発している。秋田県においては 2022 年 8 月上旬から中旬にかけて県の北部を中心に総降水量 400 mm の大雨による河川氾濫、浸水被害などが生じている¹⁾。河道に形成される砂州は流れを蛇行させる大きな原因²⁾であり、河道の変遷および護岸の被災と大きく関係するため、河道管理において砂州の挙動の把握は重要な課題とされている。しかし、国土交通省の調査³⁾によると、国管理の一級河川は全てにおいて定期縦横断測量を実施しているが、馬場目川のような二級河川等は河川数が膨大である故に定期縦横断測量の実施率は 1 %程度に留まっている。被害を少なくするためには、高頻度かつ高精度なデータの蓄積が必要であるが、現状として二級河川においてこのようなデータの取得は困難である。そこで、比較的容易かつ低コストで空中写真を入手できる UAV に着目した。UAV の研究方法として粒度分布の計測⁴⁾や河川の地形計測⁵⁾、植生の遷移状況の把握⁶⁾などがあり、様々な用法で用いられている。

本研究では、馬場目川の中流域において UAV を用いて写真を撮影し、その写真から定量的に砂州の動きや変化を観察し、砂州の挙動について定量的に評価した。また、砂州上で横断測量を行い、洪水前後の河床変動を検討した。

2. 研究方法

(1) 対象河川

図 1 に対象領域である馬場目川中流域と久保観測所の位置を示す。馬場目川は流域面積 910.5 m²、幹川流路延長 47.5 km の秋田県内最大の二級河川である。図 2 に現地の横断測線と対象砂州と砂州長、砂州幅の例を示す。本研究では、対象を UAV で撮影し、SfM 技術を用いて復元した画像を用いて水面上の砂州から面積、砂州幅、砂州長を求め、水位データとともにそれらの関係を既往研究⁷⁾の結果に加えて検討した。対象領域は秋田県五城目町平の下地区に位置する河川湾曲部後の左岸の砂州である。また、水位は対象領域から 4.3 km 下流に位置する久保観測所のデータを利用した。本研究の対象領域は図 2 に示す延長約 850 m の領域であり、川幅は領域内を通して約 30 m 程度である。また、図中黒線の矢印は

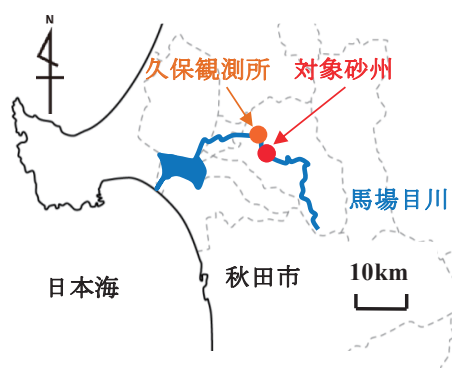


図 1 対象領域

*Study on the Behavior of the Sandbar Using UAV and Riverbed Fluctuations in Babame River by Yoshitaka JIKEN, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE

流路方向を示す。対象領域を拡大した写真を図3に示す。河川右岸の湾曲部には農作業用の取水口があり、低水位時において水が溜まるように横断構造物によって水路を狭窄しているため取水口付近には砂州が生じている。本研究では図3に示す河川湾曲部後の囲まれた領域内の砂州に着目し対象とした。対象である河道内の砂州の様子を図4に示す。

(2) 現地観測

UAVにより上空150 mから約215 m×115 mの空中写真を対象領域全体850 m内で50~60枚程度を撮影する。この時縦横80%はオーバーラップするように細かく、河川に沿って撮影を行った。現地観測は2017/9~2022/7の間で行った。また地上から3次元的に河床変動を検討するため、図3に示す測線上で横断測量を行った。

(3) SfM 処理

画像解析によるSfM処理を行った。撮影した空中写真を3Dモデリング化し、SfM処理によって得られた図2に示す画像から対象領域内の砂州の動きを定性的に把握した。次に、図3の河川湾曲部後の砂州を対象とし、対象領域内の砂州の面積A、砂州長L、砂州幅Bを導出し、評価した。また、久保観測所の水位を η とした。ここで、砂州長Lは砂州の流路方向の最大の長さ、砂州幅Bは流路に対して垂直方向の最大の長さとした。

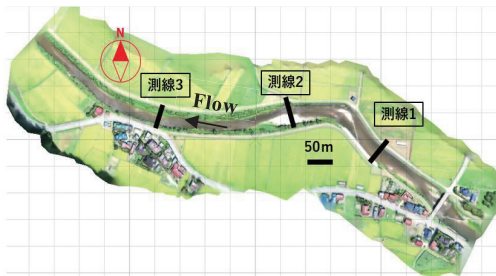


図2 対象領域全体の様子



図3 対象領域全体の様子



図4 河川湾曲部後の砂州の様子

3. 結果

(1) UAV 測量結果

図5に既往研究⁷⁾(2017/9/11~2018/11/28)と本研究で観測した日の水位 η (m) と砂州面積 A (m^2) の関係を示す。これを見ると、平常水位である 0.88 m より水位が低い場合、砂州面積が急激に増加する傾向にあった。

図6に既往研究⁷⁾(2017/9/11~2018/11/28)と本研究で観測した日の砂州幅 B (m) と砂州面積 A (m^2) の関係を示す。また図7に既往研究⁷⁾(2017/9/11~2018/11/28)と本研究で観測した日の砂州長 L (m) と砂州面積 A (m^2) の関係を示す。これを見ると砂州幅が 1 m 変化すると砂州面積は 100 m^2 変化しており、比例関係にあった。砂州長が 1 m 変化すると約 10 m^2 変化していた。砂州幅と砂州面積の関係を見ると、砂州幅が 1 m 長くなる毎に砂州面積は 300 m^2 増加していることが分かった。また、砂州長と砂州幅の関係を検討したところ、砂州長が大きくなると、砂州幅が大きくなることが分かった。このことから、対象砂州において、砂州面積の変化には水位と砂州幅、砂州長の全てが関わっている。そのため、砂州の流出や再形成は砂州長が変化する上流側と、砂州幅が変化する河道中心で行われていると考えられる。

図8に既往研究⁷⁾(2017/9/11~2018/11/28)と本研究で観測した日の久保観測所の水位 η (m) および砂州面積 A (m^2)、砂州幅 B (m)、砂州長 L (m) の経時変化を示す。2017/9~2018/9 にわたって砂州面積や砂州幅が大きかった理由として、図4に示す2017年集中豪雨による河川湾曲前左岸洗掘による掘削工事の影響であると考えられる。図9に洗掘が生じた左岸の様子と掘削工事後の左岸の様子を示す。その後の砂州面積・砂州幅・砂州長を見ると、洪水や融雪出水により、各パラメータの数値が小さくなるが、平常水位が続くことで砂州が回復し、砂州面積の場合 1000~2000 m^2 、砂州幅の場合 10~20 m、砂州長の場合 100~150 m の範囲で変化していることが分かった。また、久保観測所の水位は 0.8~3.0 m の範囲であった。

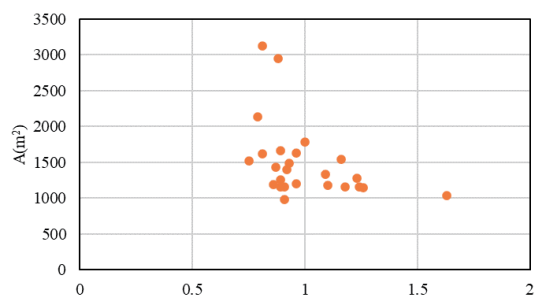


図5 水位と砂州面積の関係

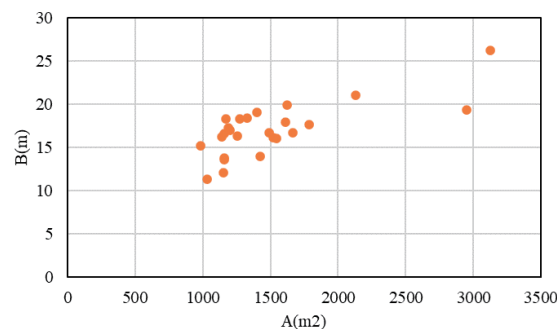


図6 砂州幅と砂州面積の関係

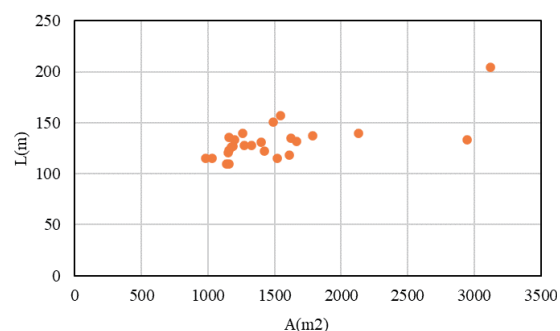


図7 砂州長と砂州面積の関係

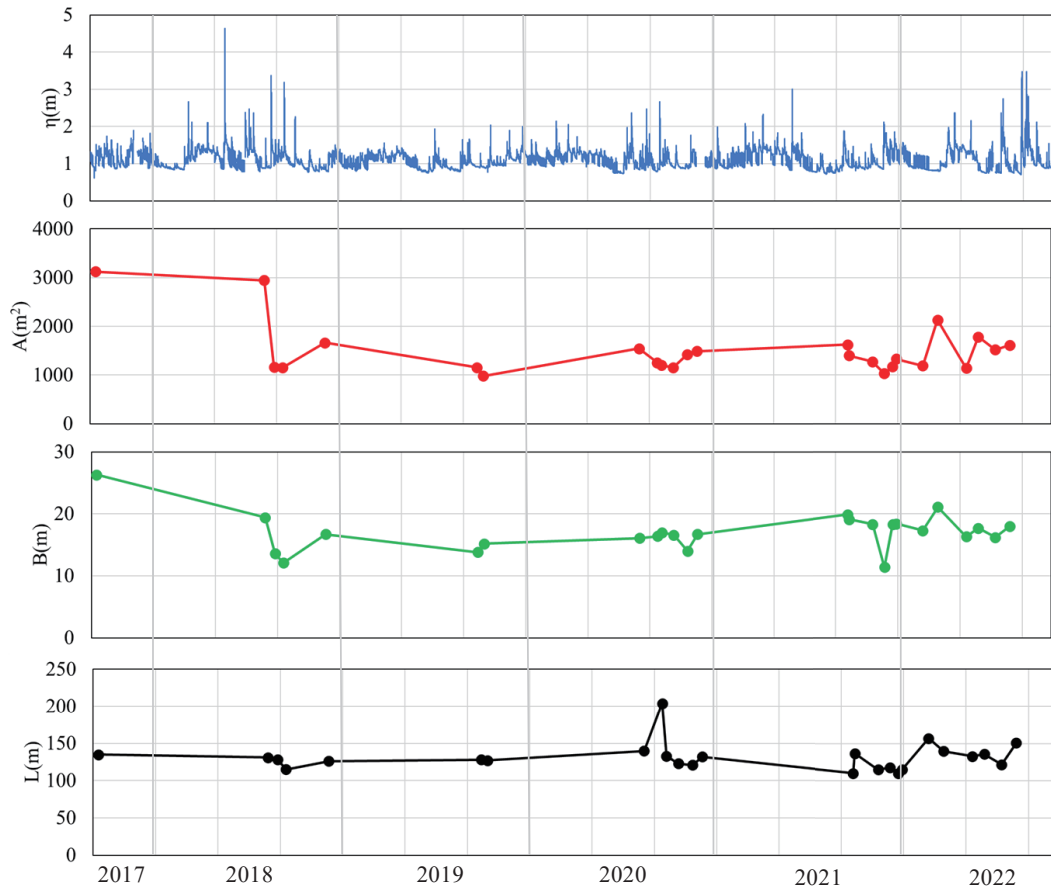


図 8 水位と砂州の経時変化



図 9 河川湾曲前における工事前(上)と工事後(下)の様子

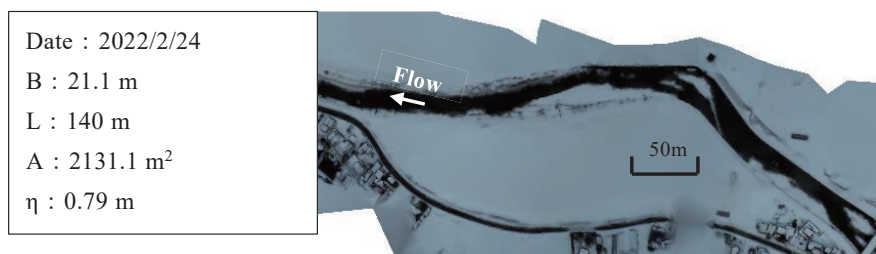


図 10 融雪出水前の砂州の様子



図 11 融雪出水中の砂州の様子

図 10, 図 11 に 2022 年の融雪出水前の砂州の様子とその直後に測量した融雪出水中の砂州の様子を示す。図 8 の水位データを見ると、2017 年の集中豪雨以来最も砂州面積が大きい日が観測された日は 2022/2/24 であった。これを見ると馬場目川では冬季は積雪により、河川の上流から水が供給されない日が続くため、通常水位を下回り、砂州の発達が進む。一方で 4 月に入ると融雪による出水の影響で流量が大きく、砂州の一部または全てで浸水することが分かった。2022/4/20 の水位 1.26 m では、砂州の上流側で浸水が見られた。砂州幅・砂州長から評価すると、水位の上昇による砂州面積の減少は水衝部である上流側が原因であると考えられる。

(2) 横断測量結果

図 12, 13, 14 に洪水前後の測線 1, 2, 3 の横断測量結果を示す。対象領域において平常水位は 0.88 m 付近であり、水位 2 m 前後の洪水で砂州は浸水していた。久保観測所のデータによると、この期間に氾濫危険水位 3.4 m を超えた日が 2 日間、水位 2 m を超えた日が 6 日間存在した。これを見ると、対象領域の上流側に位置する測線 1 では河道中心から右岸側で最大 30 cm 堆積が見られた。砂州が存在する測線 2 では左岸側で洪水後土砂が洗掘されており、河道中心では土砂が堆積していた。横断測量結果から、砂州面積の変化に水位と河道中心の影響が関係しているのではないかと考えられる。

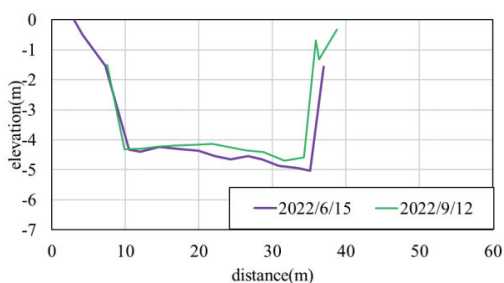


図 12 測線 1 の横断測量結果

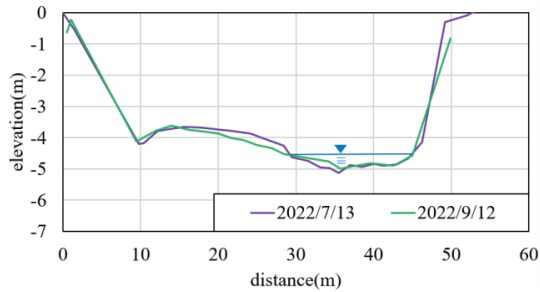


図 13 測線 2 の横断測量結果

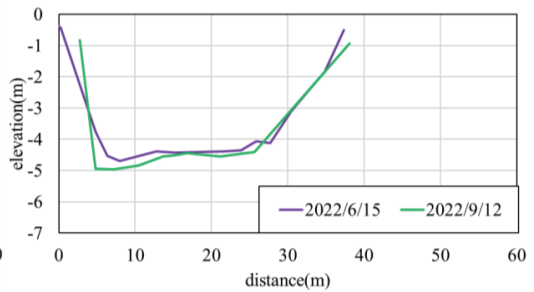


図 14 測線 3 の横断測量結果

下流側に位置する測線 3 では左岸側で最大 20 cm 洗掘が生じており、対象領域全体で土砂の流出、堆積が確認できた。

4. おわりに

本研究では、UAV の空中写真から砂州面積と水位、砂州幅、砂州長の関係を定量的に検討した。その結果、研究対象である馬場目川中流域では融雪出水と洪水の影響で砂州の流出と再形成が繰り返されていることが分かった。砂州の流出や再形成は上流側と河道中心で行われていると考えられる。また、横断測量結果から、2022 年 8 月豪雨による洪水で、対象砂州において堆積と洗掘が見られ、砂州面積の変化に水位と河道中心の影響が関係していると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり科学研究費補助金 (20H00256, 代表: 風間 聡) の助成を受けた。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 秋田地方気象台: 秋田県災害時気象資料
<https://www.jma-net.go.jp/akita/data/saigai/pdf/saigai_20220808_15akita.pdf> (2022/11/3 閲覧)
- 2) 清水義彦, 岩見収二, 加藤千恵: 砂州の樹林化と河岸条件が単列蛇行流路の形成に及ぼす影響に関する数値実験, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.72, No.4, pp.I_781-I_786, 2016.
- 3) 河川管理の状況と課題—国土交通省
<www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/.../dai01kai/dai01kai_siryou2.pdf> (2022/12/11 閲覧)
- 4) 寺田康人, 藤田一郎, 浅見佳世, 渡辺 豊: UAV による撮影画像を用いた洪水前後の砂州上粒度分布の計測, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.71, No.4, pp.I_919-I_924, 2015.
- 5) 原田守啓, 荒川貴都, 大井照隆, 鈴木英夫, 沢田和秀: UAV と水域可視化処理による河川地形計測手法の検討: 河川技術論文集, 22 巻 p. 67-72, 2016.
- 6) 津田将行, 尾島 勝, 仲嶋 一, 中越信和: 芦田川下流試験域における UAV 空撮による河床変動に関する調査・解析, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.77, No.2, pp.I_793-I_798, 2021.
- 7) 藤澤尚矢, 渡辺一也, 齋藤憲寿, 植木洸太郎: 馬場目川を対象とした河道内砂州の挙動に関する検討, 土木学会論文集 G(環境), Vol.75, No.5, pp.I_275-I_280, 2019.

豪雨に伴い発生する流木の樹皮剥離に関する水理実験*

秋田大学理工学部 高谷快斗

秋田大学大学院理工学研究科 自見寿孝・齋藤憲寿・渡辺一也

1. はじめに

近年、全国各地で台風などの豪雨に伴い、大量の水や土砂とともに流域の森林から樹木が流木となり流出し周辺地域の家屋や橋梁に被害を与えている¹⁾²⁾。これまで流木の被害を抑えるために、流木の挙動や捕捉工についての研究³⁾⁴⁾⁵⁾が行われている。流木の樹皮剥離過程を明らかにすることで、流下時間と樹皮剥離の進行度の関係から、流木の発生源を推定することに繋がり今後の森林管理にとって有用である。しかし、流木の樹皮が流下中に剥離する過程についての研究は少ない。既往の研究⁶⁾⁷⁾では杉の枝や杉の樹皮から作製された流木モデルを用いているが、実験のケースが少なかった。

そこで本研究では、樹皮を用いた流木モデルでの実験のケースを増やし流木の樹皮剥離過程を検討した。水路内に流木モデルを固定し、水・砂礫とともに流して流木モデルに衝突させることで生じる樹皮の剥離の観察を行った。

2. 実験概要

1) 流木モデル

既往の研究と同様に成木の樹皮を用いて流木モデルを作製した。作製した流木モデルを図1に示す。樹皮の厚さは約0.4cmである。芯材は2.4cm×3.0cmの木材を使用した。芯材の4面に樹皮を接着剤で貼り付け、流木モデルとした。さらに画像解析において樹皮が剥離した部分を区別するため、樹皮表面に白色のアクリスプレーを塗布した。水流に対して正面を上流側として側面1、側面2、下流側と区別した。作製した流木モデルはクランプで上部を挟んで、水路に固定した。

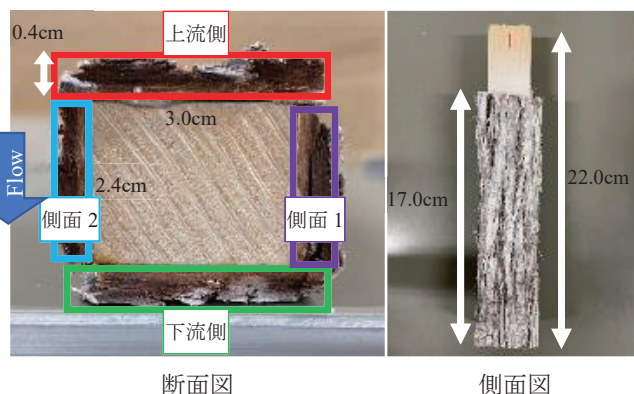


図1 流木モデル

2) 土砂

実験に使用する土砂を図2に示す。秋田県北部を流れる馬場目川から採取されたものを使用した。均等係数は7.79である。土砂の粒径加積曲線を図3に示す。

*Hydraulic Experiment on the Bark Peeling of Driftwood generated by Heavy Rainfall by Kaito TAKAYA, Yoshitaka JIKEN, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE



図2 水路に敷き詰めた土砂の様子

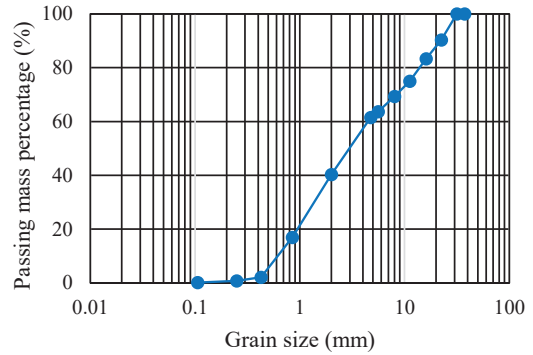


図3 粒径加積曲線

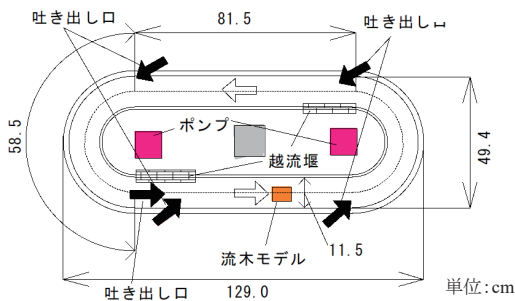


図4 平面循環水路図³⁾

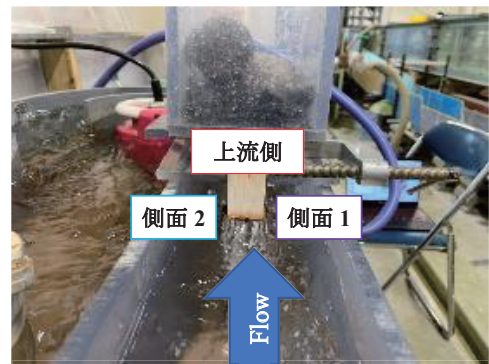


図5 固定した流木モデル(正面図)

3) 水路概要

平面循環水路の概要を図4に示す。寸法は、水路全体の横幅129.0 cm、奥行49.4 cm、水路の外周の長さ280.0 cm、直線81.5 cm、曲線58.5 cm、水路幅11.5 cmである。中央のポンプから水路内に水流を発生させており、水路内壁にある4箇所の吐き出し口と、流木モデルの設置位置の直線上に1箇所の計5箇所から水流を発生させている。流速は水路内に浮かべた木の周回時間から0.90 m/sとした。図5に示すようにクランプを用いて水路中央に流木モデルを固定した。土砂の層厚は4.0 cmとし水位は14.0 cmとした。また土砂を常に衝突させるため、流木モデル下流側に堆積した土砂を循環させながら実験を行った。

4) 剥離の評価方法

実験時間は480分とし、30分おきにポンプを止め、流木モデルの樹皮部分計4面を撮影し樹皮の剥離の様子を観察した。剥離の評価は画像解析で行い、樹皮全体の面積(pixel)と剥離した箇所の面積(pixel)を求め、以下の式(1)に示す剥離率(%)とした。

$$\text{剥離率(\%)} = \frac{\text{剥離した箇所の面積(pixel)}}{\text{樹皮全体の面積(pixel)}} \times 100 \quad (1)$$

3. 実験結果

1) 剥離状況

実験は同様の条件で計3回行った。まず、各面の樹皮が剥離した様子の観察を行った。流木モデルの上流側（Upstream）、側面1（Side1）、下流側（Downstream）それぞれの面で樹皮が剥離していく過程を図6～図8に示す。

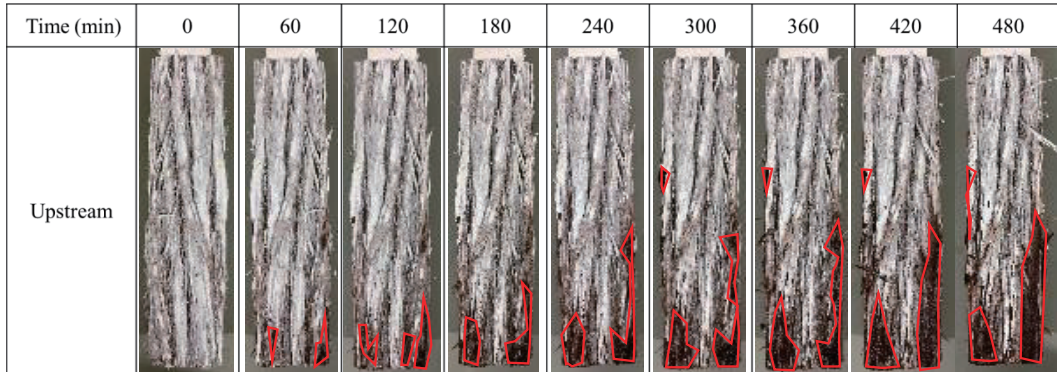


図6 剥離状況（上流側）

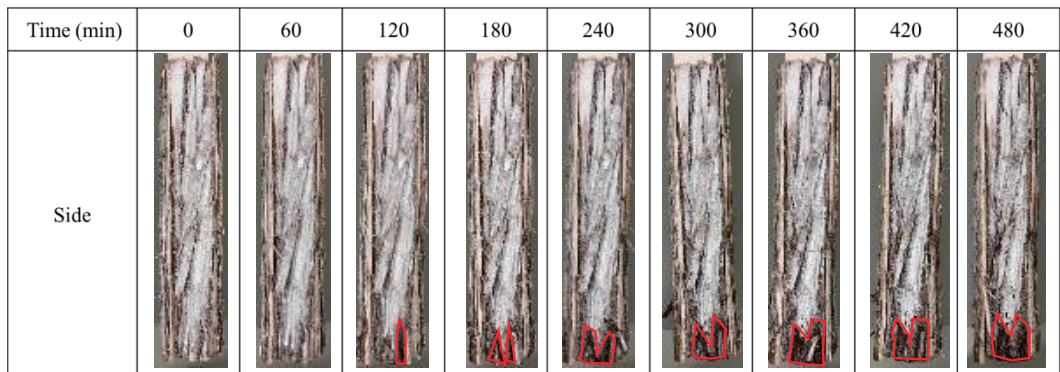


図7 剥離状況（側面1）

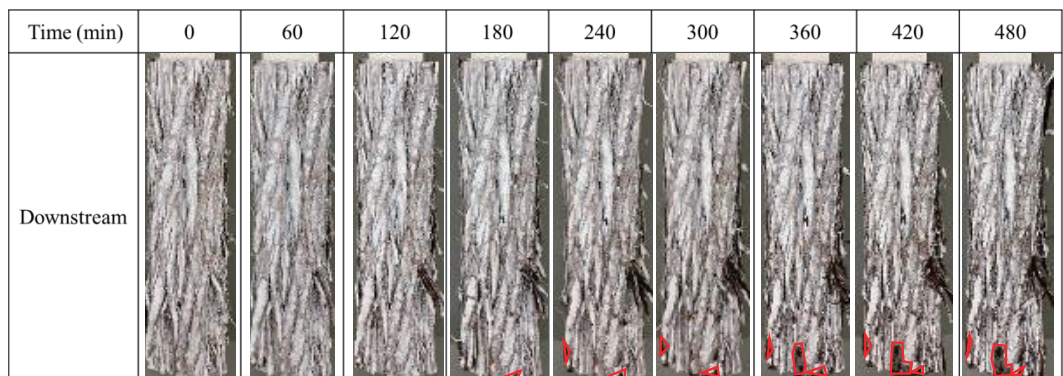


図8 剥離状況（下流側）

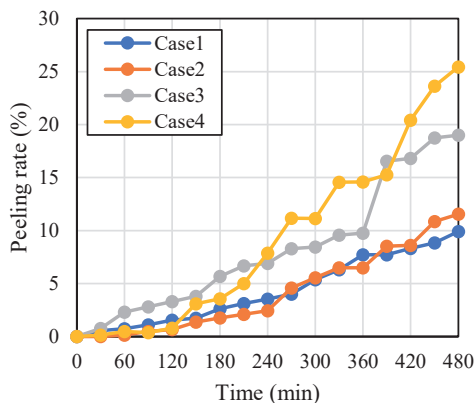


図9 剥離率（上流側）



(a) 側面拡大図

(b) 正面剥離図

図10 390分後において剥離した樹皮の様子

樹皮の剥離状況を観察した結果、上流側が最も剥離が進行していることが分かる。上流側は水流と土砂が衝突しやすいため他の面と比較して剥離が進行したと考えられる。上流側の剥離状況に着目すると、流木モデル下部の剥離を中心に拡大していることが分かる。粒径の大きい土砂は河床を転がりながら流木モデルに衝突することから、下部を中心に剥離が拡大したと考えられる。また実験開始 60 分後に確認できた剥離部分から広がるように剥離している。剥離は最初に生じた部分を中心に広がるように進行することが確認できた。剥離した部分の広がり方について樹皮の横方向には拡大せず樹皮にそって縦方向に拡大していることが分かる。また、側面の剥離状況でも下部に剥離した部分が確認できる。土砂が上流側に衝突後、側面を通り抜けて下流に流下していく過程で、側面に擦るように土砂が当たったことで剥離が生じていると考えられる。下流側に関しては、上流側や側面のような土砂の衝突がほとんど起こっていない。結果として剥離した部分がそれ以上拡大することなく、小さな面積の剥離のみ生じたと考えられる。

2) 剥離率

次に時間と剥離率の関係について検討を行った。本実験では同様の条件で実験を 3 回行った。実験の 1 回目～3 回目をそれぞれ Case1～Case3 とする。さらに既往研究で得られた結果を Case4 とし剥離率の比較を行った。上流側の剥離率の時間変化を図 9 に示す。4 ケースを比較すると全て 60 分後には剥離の進行がはじまっている。その後、それぞれの上昇率は異なるが、剥離率は 480 分経過まで上昇する傾向が見られた。このことから流下中の流木は土砂の影響により剥離をし続けると考えられる。次に Case3 において 360 分から 390 分にかけて剥離率が 6.8 %ほど急激に上昇していることが確認できる。390 分後における樹皮の表面の様子を図 10 に示す。画像から大きめの樹皮が 1 枚剥離したことにより剥離面積が増加したため、剥離率が急激に上がったと考えられる。このように樹皮の塊が剥離した原因として、樹皮の隙間に入り込んだ小さい粒径の土砂の影響がある。樹皮の隙間に土砂が入り込み、その部分へさらに土砂が衝突することで樹皮が塊のまま 1 枚剥離したと考えられる。また、このような樹皮 1 枚が剥離したときはそこから剥離が広がる傾向は見られなかった。

側面 1 の剥離率の時間変化を図 11 に、側面 2 の剥離率の時間変化を図 12 に示す。側面については 90 分後には全てのケースで剥離が現れた。また、側面 2 の Case1 の剥離率が他の 3 ケースよりも高くなっている。原因として図 10 に示した現象と同様に Case1 において樹皮の隙間に細かい粒径の土砂が入り込むという現象が生じた。さらにその部分に土砂が衝突することで大きい樹皮が剥離したことが、高い剥離率につながったと考えられる。側面 1 と側面 2 では土砂や水流の衝突具合が同程度であるが剥離率に差が生じたため、樹皮の個体差の影響が考えられる。

下流側の剥離率の時間変化を図 13 に示す。下流側については 3 ケースが 120 分後に最初に剥離が見られ、残り 1 ケースは 240 分後に剥離が見られた。水流や土砂の衝突が起こりにくいことから上流側、側面と比較しても剥離率は低くなっていることが分かる。

最後に、各面の剥離率を平均したものを図 14 に示す。上流側 (Upstream) の剥離率は 16.4 %、側面 1 (Side1) では 5.2 %、側面 2 (Side2) では 9.9 %、下流側 (Downstream) では 2.5 %となった。120 分から 150 分にかけて側面の剥離率が上流側を上回っている。また、各面の剥離率の標準偏差 σ をまとめたものを表 1 に示す。剥離率が高い面の順にばらつき具合も大きくなっており剥離率と標準偏差が比例関係にあることが確認できた。また、全面で剥離率が 95 %信頼区間の範囲に入っている。また、95 %信頼区間から上流側の剥離率は最低で 4.1 %から最大 28.8 %

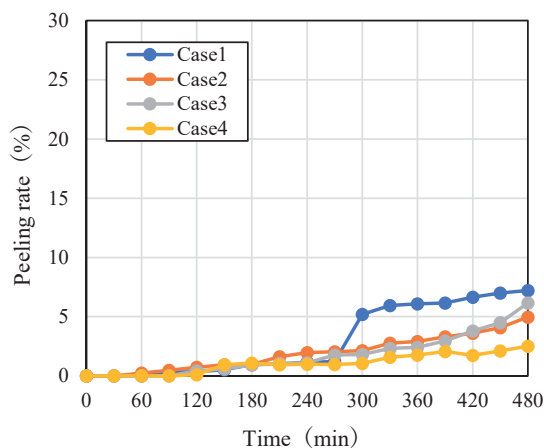


図 11 剥離率 (側面 1)

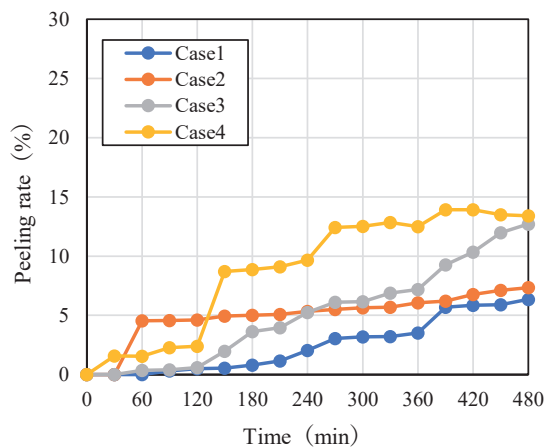


図 12 剥離率 (側面 2)

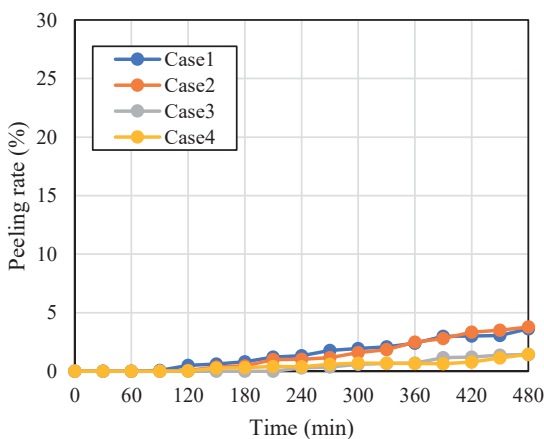


図 13 剥離率 (下流側)

まで上昇する可能性があることが分かった。

4. おわりに

本研究では、平面循環水路を用いて流木モデルの樹皮が剥離する様子を観察した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 面によらず流木モデル下部から剥離が進行している。これより河床を転がる粒径の大きい土砂の衝突が、樹皮の剥離に影響を及ぼしている。
- 2) 粒径の異なる土砂が混在していることで、樹皮の隙間に細かい粒径の土砂が入り込み、剥離を助長しているケースが見られた。
- 3) 剥離率の標準偏差から、剥離率が高くなる程結果のばらつき具合も大きくなる。また、95%信頼区間から最大28.8%の剥離率が得られることが分かった。

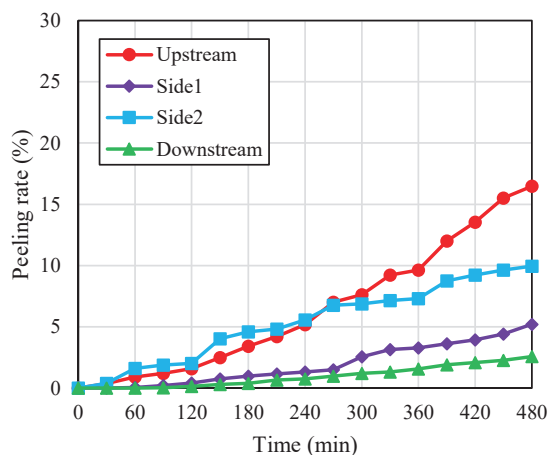


図 14 剥離率 (各面)

表 1 剥離率の標準偏差 σ (%)

	120 min	240 min	360 min	480 min
Upstream	1.05	2.26	3.08	6.20
Side1	0.22	0.39	1.66	1.74
Side2	1.67	2.70	3.27	3.13
Downstream	0.20	0.43	0.88	1.13

謝辞

本研究を行うにあたり科学研究費補助金 (20H00256, 代表: 風間 聡) の助成を受けた。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 石川芳治, 水山高久, 福澤 誠: 土石流に伴う流木の発生及び流下機構, 砂防学会誌, 第 42 巻 3 号, pp.4-10, 1989.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部: 平成 29 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害の概要<速報版> Vol. 6, <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_kyushu_gouu/gaiyou.pdf>. (2023 年 1 月 12 日閲覧)
- 3) 立石龍平, 堀口俊行, 園田佳巨, 嶋川 理: 回転円筒実験における土石流中の流木偏析現象に対する個別要素解析, 構造工学論文集, 第 65 巻 A, pp. 821-834, 2019.
- 4) 渋谷 一, 香月 智, 大隅 久, 石川信隆, 根付き流木モデルによる流木捕捉工の捕捉効果に関する実験的検討, 構造工学論文集, 第 57 巻 A, pp.1087-1094, 2011.
- 5) 中屋志郎, 横山俊治, 佐々浩司, 村井政徳: 樹木に残された流下痕跡による阿津江土石流の流下方向の推定, 日本地すべり学会誌, 第 42 巻 6 号, pp.499-505, 2006.
- 6) 谷口隼也, 齋藤憲寿, 渡辺一也: 平面循環水路を用いた樹皮の剥離過程に関する検討, 令和元年度土木学会東北支部技術研究発表会, II-40, 2020.
- 7) 佐藤 丈, 谷口隼也, 齋藤憲寿, 渡辺一也: 流木モデルを用いた樹皮の剥離過程に関する水理実験, 東北地域災害科学研究集会, 第 57 巻, pp.29-34, 2020.

令和4年8月3日の大雨による岩手県一戸町内の被害について*

岩手大学理工学部 松林 由里子, 岩手大学大学院総合科学研究科 紺野 矩彦

1. はじめに

令和4年8月1日から6日にかけて前線による大雨により、北海道地方から東北地方、北陸地方で記録的な降雨量を記録し、土砂災害や浸水被害が発生した。岩手県一戸町では、8月3日に24時間雨量で127.5mm(奥中山観測所)^[1]、125.0mm(一方井観測所)^[1]を記録し、馬淵川水系の河川の氾濫と、内水氾濫、土砂災害による被害が発生した。一戸町内の被害概要と、避難対応について現地調査、聞き取り調査、町内会長を対象としたアンケート調査を行った。

2. 一戸町内の被害の概要

岩手県一戸町では、8月3日に大雨(土砂災害)警報、洪水警報が発表され、10時20分に、関屋、向町、下町地区(352世帯 725人)を対象に高齢者等避難準備情報、11時20分から、翌日4日11時まで、関屋、下町、向町、諏訪野地区(504世帯、1054人)を対象に避難指示が発令された。町内では、4カ所の避難所が開設され、避難者は30世帯62人であった^[4]。1名の人的被害があった。住家の浸水被害は、表-1に示すように、市街地である一戸地区での床下浸水件数が多い。原因は内水氾濫と、馬淵川(県管理区間)からの氾濫だと推測される。岩根橋への流木と塵芥の堆積による堰上げと、岩根橋左岸下流の住宅街への越水の流入が確認されている。

表-1 一戸町内の浸水住家件数^[3]

地区名	床上浸水	床下浸水	非住家
小鳥谷	1	1	-
奥中山	-	2	床下浸水(牛舎)1件
小繋	2	1	流木による損壊(空家)1件
一戸	5	13	-
女鹿	-	1	土砂流入(小屋)1件、基礎部分の土砂流出(倉庫)1件
西法寺	4	3	床上浸水(店舗)1件
高善寺	-	1	-
本町	-	-	床下浸水(空家)1件

3. 聞き取り調査

馬淵川を管理する岩手県庁県土整備部、一戸町の防災を担当する一戸町総務課、一戸町小鳥谷地区の指定避難場所を運営する小鳥谷地区センターに、災害発生状況、当時の対応などについて聞き取り調査を行った。

(1) 小鳥谷地区の内水氾濫と避難行動について

*Report on Survey of Flood Damage of August 2022 in Ichinohe town by Yuriko Matsubayashi and Norihiko Konno

小鳥谷地区周辺の現地の確認と小鳥谷地区センターに聞き取り調査を行った結果を示す。

IGR（岩手銀河鉄道）小鳥谷駅を中心に持つ小鳥谷地区は、東側に馬淵川水系平糠川が南から北へと流れ、西側に段丘があり、住宅街が、平糠川の流れて南から北へと緩やかに傾斜する斜面上の地区である。地区内の指定避難場所は、小鳥谷地区公民館、小鳥谷小学校、旧小鳥谷中学校である。8月3日の状況について、10月21日に、小鳥谷地区公民館職員の方に聞き取り調査を行った。

小鳥谷地区では農業用水路や小河川からの内水氾濫や斜面災害が発生した。8月3日10時20分に、一戸町の高齢者等避難準備情報発令とともに小鳥谷地区公民館に避難所を開設した。公民館の西側を流れる農業用水路から、内水氾濫した泥水が道路上を流れ、畑を越えて駐車場に流入した。公民館の前を通る道路上にも泥水が流れたが、避難を妨げるほどの水深や流速ではなかった。内水氾濫の泥水は、公民館前の道路を通って、郵便局周辺を含む北側の低い場所に広がった。8月9日の調査時には、街中の広い範囲で、地盤から10cm程度の泥水の痕跡が見られた。避難者について、内水氾濫が発生した水路近くにある小鳥谷保育園から、職員と園児が運動場へ避難したので、避難所で食事を提供した。また、近所の10代の住民、川の近くに住む高齢者、通行止めで帰宅困難になった他地区の住民などが避難した。



図-1 小鳥谷地区センター周辺道路への水路からの溢水
(国土地理院地図に流れの向きを示す矢印とコメントを追加)



図-2 一戸町市街地の馬淵川周辺の浸水深

(岩手県庁県土整備部河川課から提供を受けた浸水深を国土地理院地図に記入)



写真-1 岩根橋左岸の越流

(岩手県庁県土整備部河川課提供)



写真-2 岩根橋に堆積する流木

(岩手県庁県土整備部河川課提供)

(2) 一戸町市街地周辺の浸水被害

8月3日の大雨にともない、一戸町の中心地である一戸地区では、まちの真ん中を南から北へと流れる一級河川馬淵川（県管理区間）からの越水と内水氾濫によって、浸水被害が発生し

た。図-2 に、主な浸水地域の浸水深を示す。この中で、岩根橋下流左岸での浸水被害は、岩根橋への流木堆積によるせき上げが原因となっている。岩根橋は町道にかかる橋で、8月3日は、写真-1 に示すように、岩根橋上流から、左岸下流側への越水が、低い位置にある住宅街に流入し、床上浸水被害が発生した。写真-2 は、水位低下後に橋に残された流木の様子を示す。

4. 馬淵川の流木堆積状況について



図-4 流木調査箇所
(国土地理院地図に調査箇所を示す)

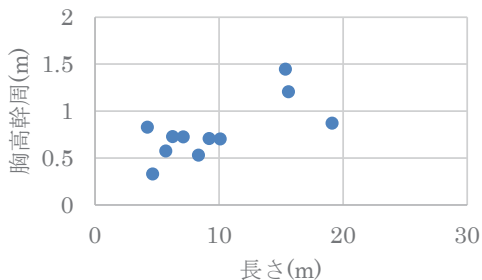


図-5 流木の長さ と 胸高幹周囲長



写真-3 流木堆積状況

岩根橋への流木堆積の原因となった流木規模の推測のために、馬淵川の岩根橋上流部に堆積している流木の長さ、周囲長、形状について調査を行った。河川敷内の、低水路に近い位置に堆積する流木は、河川管理者によって撤去されたが、高水敷に堆積していて流出の恐れが少ない流木を対象に、岩根橋上流部の河川敷内で、流木の長さ と 胸高周囲長を計測し、図-5 のように 11 本の流木の計測を行った。岩根橋より上流部には、自然護岸、河畔林のある区間が続いており、長さ 10m を越えるような流木が発生し、河川敷内に堆積する。計測対象となった流木は、河川敷内の植生や岩によって堆積している流木が多く、樹皮や枝が残されていない、朽ちかけ

たものも多かった。

5. 町内会長を対象としたアンケート調査

町内ごとの避難誘導状況について知るために、アンケート調査票を配布し、回答を得た。配布は、12月28日に一戸町内の町内会長90名を対象に一戸町役場から郵送いただいた。1月15日までに返信用封筒で得られた35通の回答結果を示す。

図-6に、8月3日の大雨の際にどのような危険を感じたかの問いに対して、選択肢（複数回答可）とそのほか（自由記述）で質問した結果を示す。一戸地区では、「馬淵川の水位が高くなり、水が増えて危険だと思った」の選択肢、水路からの内水氾濫が発生した小鳥谷地区では、道路が冠水して危険だと思った、という選択肢を選んだ回答者が多い。

また、アンケートで、避難誘導についての問いへの回答で、一戸ちく内で、道路が冠水して避難行動が妨げられたという回答があった。

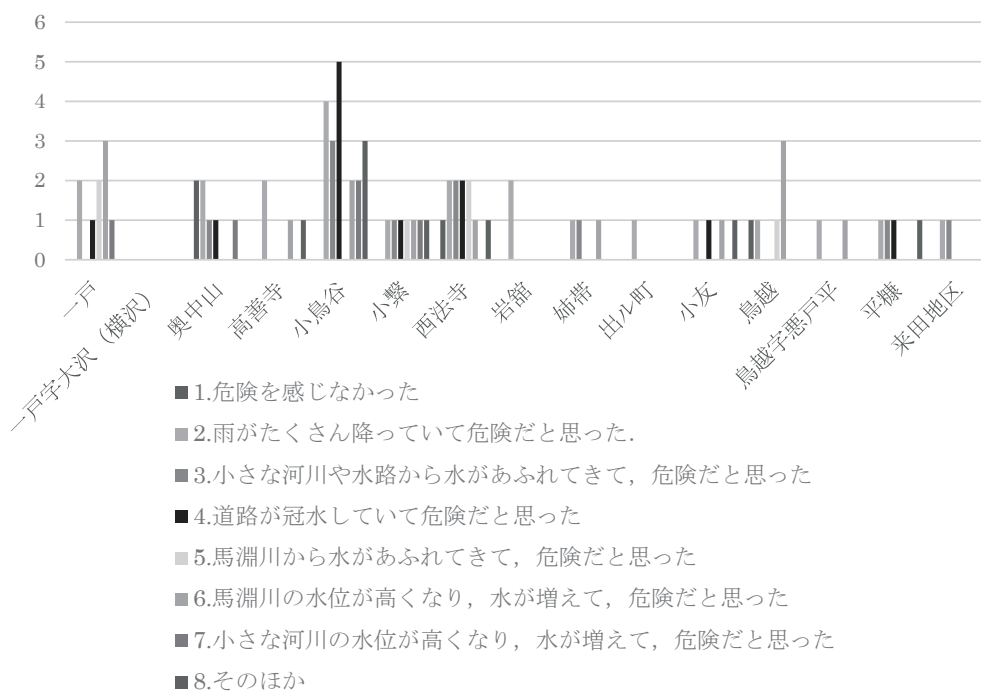


図-6 アンケート「令和4年8月3日の大雨によって危険を感じましたか。」の回答

また、選択肢「その他」に自由記述された危険に関する記述内容を整理した結果を表-2に示す。選択肢にある道路の冠水以外に、道路上の早い流れ、洗掘など、道路上の流れによって危険を感じたという記述内容が多い。また、普段は水量の少ない沢から水や土砂、流木が流出して危険を感じたという記述が2件ある。

表-2 アンケート「令和4年8月3日の大雨によって危険を感じましたか。」そのほかの自由記述内容から得られた危険

種類	内容
河川	河川に倒木
沢	沢から過去に無い大量の水と土砂の流出
	普段流水の無い沢からの水と流木の流出
斜面災害	畑の斜面の地滑り
情報	「防災無線」放送が聞きづらい
道路	国道4号線が冠水して通行止め
	舗装無しの道路の洗掘（通行不能）
	下水マンホールから道路上への流出
	道路に川のように水が流れた
	土砂の流出による道路の通行不能

6. まとめ

2022年8月3日の大雨によって、一戸町内で発生した被害状況によって、現地調査、聞き取り調査、アンケート調査を行った。一戸町の中心地では、橋への流木堆積による越水の他、馬淵川からの越水や内水氾濫による被害が発生した。小鳥谷地区では、水路からの内水氾濫が発生して、避難行動を妨げるほどではなかったが、指定避難場所周辺道路が冠水した。ただし、アンケート調査結果では、小鳥谷地区での道路の冠水による危険性を感じたという回答が複数件見られた。

7. 謝辞

一戸町内の浸水深データをはじめとするデータ提供、資料提供をいただいた岩手県庁県土整備部河川課に厚く御礼申し上げます。

聞き取り調査への対応と、郵送によってアンケート配布を行ってくださった一戸町役場のみなさまに心より感謝申し上げます。

アンケート調査にご対応いただいた町内会長の皆様に感謝申し上げます。

8. 参考文献

[1]国土交通省気象庁，アメダス観測所データ

[2]一戸町 HP，町長メッセージ：令和4年8月3日に発生した大雨による災害について，更新日：2022年08月12日

[3]岩手県復興防災部防災課 防災危機管理担当，令和4年8月3日（水）の大雨警報発表に伴う対応状況（第14報兼最終報），令和4年8月17日（水）17時00分現在

[4]一戸町，広報いちのへ，No. 722，2022年9月，<https://www.town.ichinohe.iwate.jp/material/files/group/36/20220909.pdf>

令和4年8月に発生した秋田・青森豪雨災害について*

秋田大学大学院理工学研究科 渡辺一也
岩手大学理工学部 松林由里子

1. はじめに

令和4年8月に立て続けに発生した豪雨により北東北においては甚大な被害を受けた。活発な前線の影響で東北北部は記録的な大雨となったことが報告されている(例えば¹⁾)。秋田県においては2022年8月上旬から中旬にかけて県の北部を中心に総降水量400ミリの大雨による河川氾濫、浸水被害などが生じている²⁾。青森県においても大雨の影響で県内では土砂災害や浸水などの被害が相次いだ³⁾。他にも岩手県において一戸町や岩手町などで浸水被害があり、ライフライン関係では多くの地点で停電が確認された⁴⁾。

そこで、本研究では特に被害の大きかった、秋田県、青森県において現地観測を行い、被害の状況について把握した。

2. 降雨

今回の降雨では、日本海から東北地方・北陸地方にのびる前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだため、東北地方では大雨となったことが報告されている⁵⁾。3日から4日にかけては複数の地点で24時間降水量が観測史上1位の値を更新するなど録的な大雨となった。この大雨により、土砂災害や河川の増水や氾濫、低地の浸水による被害が発生した。

さらに8日から15日にかけて前線が日本海から北日本に停滞し、前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込み続けたため、大気の非常に不安定な状態が続いた。その結果秋田県では北部を中心に、総降水量が400ミリを超える大雨となった⁶⁾。青森県においても8日昼過ぎから雨が降り始め、9日朝から昼過ぎにかけて、津軽を中心に激しい雨が降った⁷⁾。

そのため、今回の降雨による被害は広範囲に及んでいる。

3. 秋田県内の被害概要

次に秋田県における現地調査について述べる。ここでは特に被害の顕著であった下内川、内川川、芋川、五反沢川、仏社川の結果について述べる。

(1) 下内川での被害

a) 被害概要

下内川では、8月3日の豪雨により、河川改修が進んではいなかったものの、沼館地区で堤防が決壊して周辺の水田や住宅地に水が流れ込み住宅が水に浸かる被害がでた。また周辺では線路が被害を受け、暫くの間電車が不通となった。

*Damage caused by the Flood generated to Heavy Rain at Northern Tohoku Region in August 2022 by Kazuya WATANABE and Yuriko Matsubayashi

b) 下内川概要

下内川は大館市を流れる幹川流路延長が 20km で米代川の 2 次支川となっている。

c) 被害調査

本研究では上流から下流へと向かって被害の調査を目視により行った。写真-1 に示されるように堤防が破堤している箇所が確認された。また、それにより浸水被害が生じていた(写真-2)。



写真-1 堤防の被害



写真-2 民家への被害

(2) 内川川での被害

a) 被害概要

8月13日に五城目町の内川川で氾濫が発生した。人的被害は確認されていないが、13日の10時の時点で、住家の床上浸水 52 棟、床下浸水 59 棟の被害が確認されている。内川川にかかる橋には流木がひっかかり、水位が堰上げしたことにより被害が大きくなった。

b) 内川川概要

内川川は馬場目町流れる幹川流路延長が 6.8km で、馬場目川の支川富津内川の支川となっている。

c) 被害調査

写真-3 に示されるように民家で 1.3m の浸水が確認できた。また、湯ノ又川橋においては橋上への浸水を確認した。



写真-3 民家への浸水被害



写真-4 湯ノ又川橋の被害

(3) 芋川での被害

a) 被害概要

8月13日に芋川で氾濫が発生した。氾濫は加賀沢、松本両地区で生じ、周辺の田畑に水が流れ込んだ。

b) 芋川概要

芋川は秋田県由利本荘市を流れる子吉川水系子吉川支流の一級河川である。支流を含めた流域は横手市や秋田市にも及んでいる。幹川流路延長44kmとなっている。

c) 被害調査

写真-5に示されるように本川で増水していた。また、写真-6のように田んぼ、他で氾濫を確認した。



写真-5 本川の様子



写真-6 氾濫の痕跡

(4) 五反沢川での被害

a) 被害概要

8月13日に上小阿仁村を流れる五反沢川で溢水があり、田畑へ水が流れた。

b) 五反沢川概要

五反沢川は北秋田市、上小阿仁村を流れる幹川流路延長が4.3kmで、米代川の小さな支川となっている。

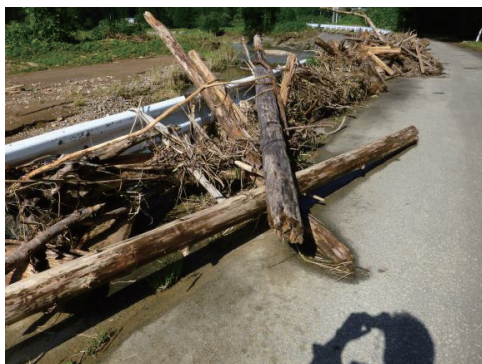


写真-7 ガードレールに堰止められた流木



写真-8 田んぼへの溢水

c) 被害調査

写真-7 に示されるように山地から流出した流木がガードレールにより堰止められていた。また、写真-8 の様に田んぼへの溢水を確認した。

(5) 仏社川での被害

a) 被害概要

8月13日に上小阿仁村を流れる仏社川で溢水があり、家屋に被害があった。

b) 仏社川概要

仏社川は北秋田市，上小阿仁村を流れる幹川流路延長が4.5kmで，米代川の小さな支川となっている。

c) 被害調査

写真-9 に示されるように流出した流木が橋脚により堰止められていた。また、写真-10 の人家への被害が多くあった。



写真-9 橋脚に堰止められた流木



写真-10 田んぼへの溢水

4. 青森県内の被害概要

次に青森県における現地調査について述べる。ここでは特に被害の顕著であった北金ヶ沢駅，奥津軽いまべつ駅，藤島川について述べる。

(1) 北金ヶ沢駅の被害

a) 被害概要

8月3日に北金ヶ沢駅付近で豪雨による出水があり，線路に被害があった。

b) 浸水現場概要

北金ヶ沢駅の近くの塩見形橋下の線路の下の水路において，沢から流出した水が流れるようになっている。

c) 被害調査

写真-11 に示されるような幅2.2mの小さな水路が，流木によって堰き止められ氾濫が生じた。写真-12 に示したように，災害の復旧が行われていた。



写真-11 浸水箇所（幅 2.2m）



写真-12 線路の復旧の様子

(2) 奥津軽いまべつ駅の被害

a) 被害概要

8月3日に奥津軽いまべつ駅付近で豪雨による出水があり、駅周辺に被害があった。

b) 浸水現場概要

奥津軽いまべつ駅近くに今別川が流れており、幹川流路延長は8.8kmとなっている。

c) 被害調査

写真-13 に示されるように奥津軽いまべつ駅構内においても被害があった。駅構内では、駅員さんによると駅舎1階の階段1段めまでの浸水、トイレ内の浸水痕では約15cmであった。また近くの水路（写真-14）や今別川においても氾濫があった。



写真-13 トイレ内の浸水痕



写真-14 水路への浸水被害

(3) 藤島川の被害

a) 被害概要

8月3日に藤島川で豪雨による出水があり、流木が押し寄せたことにより、人家への被害が生じた。

b) 藤島川概要

藤島川は青森県東津軽郡外ヶ浜町三厩藤嶋を流れる小河川である。

c) 被害調査

写真-15 に示されるように流木による被害が広範囲で見られた。また、流木だけでなく土砂の堆積もあった（写真-16）。



写真-15 流木による民家への被害



写真-16 流木・土砂の堆積

5. おわりに

本研究では2022年8月に起きた北東北における豪雨災害について調査を行ったものである。今回の災害では広範囲におよび、普段被害が出ていない地域においても被害が目立った。災害記録を自然災害デジタルアーカイブとして残し、後々の災害に対して役立てて頂ければ幸いである。

参考文献

- 1) ウェザーニュース：東北大雨で河川氾濫，浸水被害も 雨が落ち着いてもしばらく警戒を
<<https://news.yahoo.co.jp/articles/f2a42a0c290ff318540dba58270a9478aeb4422a>> (2023年1月11日閲覧)
- 2) 秋田地方気象台：秋田県災害時気象資料，
<https://www.jma-net.go.jp/akita/data/saigai/pdf/saigai_20220808_15akita.pdf> (2022/11/3 閲覧)
- 3) 東奥日報社：「ゴゴゴッ」住宅に濁流 青森・外ヶ浜町三厩藤嶋地区 大雨で土砂崩れ，川氾濫，
<<https://nordot.app/927761059617161216?c=113147194022725109>>(2022/8/8 閲覧)
- 4) 岩手日日新聞社：一戸の男性1人不明 大雨 県北中心，被害拡大，
<<https://www.iwanichi.co.jp/2022/08/05/8410902/>>(2022/8/6 閲覧)
- 5) 気象庁：8月1日から6日の前線による大雨 令和4年（2022年）8月1日～8月6日（速報），
<<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2022/20220822/20220822.html>>
(2023/1/12 閲覧)
- 6) 秋田地方気象台：令和4年8月8日から15日の秋田県の大雨，
<https://www.jma-net.go.jp/akita/data/saigai/pdf/saigai_20220808_15akita.pdf> (2023/1/12 閲覧)
- 7) 青森地方気象台：北日本に停滞した前線による大雨（令和4年8月8日～13日），
<https://www.jma-net.go.jp/aomori/obs-fcst/pdf/disaster/20220826_stationary_front.pdf>
(2023/1/12 閲覧)

青森県 2022 年 8 月豪雨災害調査研究*

八戸工業大学 佐々木幹夫・竹内貴弘・高瀬慎介
東北学院大学 三戸部佑太

1. 緒言

本年 8 月に青森県は過去に経験したときの無い大雨に見舞われ全県にわたり被害が発生した。降雨は 2 段降雨となっており、前期降雨が 3 日、後期降雨が 8 日～13 日に発生し、降雨量は 3 日 0 : 00～14 : 00 で、十和田 165.5 mm、平川市温川 162.5 mm、8 月 8 日 13 時～13 日 14 時で弘前市岳 444.5 mm、深浦 433.5 mm の豪雨となっており、被害は河川氾濫だけでなく、家屋、農作物、道路、鉄道、交通等全般にわたっている。

この災害に対して、著者らは災害調査チームを結成し、2022 年 8 月豪雨の降雨特性、豪雨による降雨災害の被害状況、災害発生のメカニズムを明らかにすることを目的に調査を進めている。この調査研究により、今後の防災・減災力向上のための課題を見いだせれば幸いと考えている。

2. 調査の内容

本調査研究は表-1 に示すような調査研究チームで実施している。

表-1 青森県 2022 年 8 月豪雨災害調査研究チーム

氏名	所属・職位	調査担当分野
竹内 貴弘	八戸工業大学 教授	降雨の特徴
高瀬 慎介	八戸工業大学 准教授	豪雨被害の特徴
佐々木 幹夫	八戸工業大学 名誉教授	河川水位の特徴、県市町村の対応
三戸部 佑太	東北学院大学 准教授	青森県における線状降水帯の特徴

この調査研究は現在中途にあるがこれまでに得られた結果の概要を示すと以下ようになる。

3. 降雨特性 (担当：竹内貴弘)

前期降雨³⁻¹⁾においては、8 月 2 日 15 時～8 月 3 日 15 時まで、青森県の津軽地方に停滞前線がみられ、8 月 3 日 3 時日本海中部で前線上に低気圧が発生し 8 月 3 日 15 時には東北部を通過した。このため、前線と低気圧に向かって、暖かく湿った空気が流れ込み、大気の状態が不安定となり、大雨につながった。8 月 3 日 9 時を例にとると、地上天気図 (図 3-1) から青森県の津軽地方に停滞前線が確認できる。深浦町付近 では 3 日 07 時 20 分までの

*Investigation and research on downpour disaster in August, 2022 in Aomori Prefecture by Mikio Sasaki, Takahiro Takeuchi, Shinsuke Takase and Yuta Mitobe

1時間に約90ミリ、08時までの1時間に約110ミリ、鯉ヶ沢町付近では08時10分までの1時間に約90ミリの猛烈な雨を解析し、07時34分と08時18分の2度にわたり深浦、鯉ヶ沢では記録的短時間大雨情報が発表された。また、線状降水帯による非常に激しい雨が降り続き、災害発生の危険度が急激に高まっているとして、「顕著な大雨に関する青森県気象情報」が07時59分に青森県で初めて発表された。観測史上1位の更新も複数あり、例えば、深浦で3日07時26分までの1時間に観測した91.5ミリは、通年として日最大1時間降水量の観測史上1位を更新するなど、記録的なものとなった。さらに、8月3日0時～14時までの雨量として深浦172.0mm、十和田165.5mm、平川市温川162.5mmとなった。

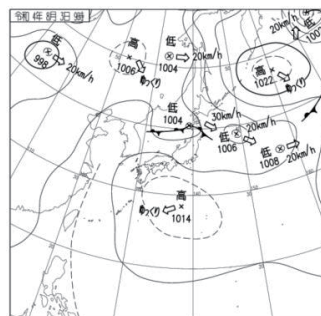


図3-1 8月3日9時
地上天気図

後期降雨³⁻²⁾においては、8月8日09時～8月13日15時まで、前線停滞が華北から日本海を通って北日本に発生し、8月9日15時から8月13日9時まで(8月12日3時から9時は北海道側移動)東北北部にはりだした。この期間、前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込み、青森県では大気の状態が非常に不安定となり、大雨につながった。8月9日9時を例にとると、地上天気図(図3-2)から青森県の津軽地方に停滞前線が確認できる。深浦町付近では9日7時までの1時間に約100ミリ、9日14時までの1時間に約90ミリの猛烈な雨を解析し、07時16分と14時17分の2度にわたり深浦では記録的短時間大雨情報(7:16時間雨量100mm、14:17時間雨量90mm)が発表された。青森県県土整備部の資料から中村川上流の観測所が8月9日から最大24時間雨量369mmを記録し平成24年7月の2.2倍程度に達していた。観測史上1位の更新も複数あり、例えば、9日の日降水量は、深浦で312.0ミリ、弘前市岳で252.5ミリ、鯉ヶ沢で202.5ミリと1日で平年の8月1か月の雨量を超える記録的な大雨となり、通年として観測史上1位を更新した。その後も、13日にかけて雨が断続的に降り続き長雨となり、降り始めの8日13時から13日13時までの総降水量は、深浦で433.5ミリ

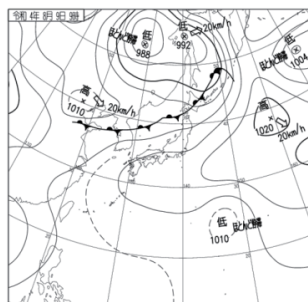


図3-2 8月9日9時
地上天気図

深浦 8/8～8/13

—時間雨量 —累積雨量

図3-3 8/8～8/13 深浦 時間雨量 累積雨量

(図3-3)、弘前市岳で444.5ミリ、今別361.0mm、五所川原市市浦361.0mm、鱒ヶ沢345.0mm、となった。日降水量として深浦312.0mmを記録、過去に経験したことのない最高の値となった。ここでは、被害の大きい鱒ヶ沢町の中心部を流れる中村川(2級河川)と期間降水量が多い弘前市岳地区の年最大日雨量データ(中村川は63年間で流域平均雨量は鱒ヶ沢・四兵衛森・岳・松代・鬼川辺観測所のデータを用いたティーンセン法による、岳は46年間の岳観測所)を用いて今回の最大日雨量 x (中村川268.5mm、岳252.5mm)の再現期間 T を対数正規分布に従うとし順序統計学的方法(トーマス法)で計算した。変換係数 ξ は $\xi = (X - m) / \sqrt{2}\sigma$ 、 $X = \log x$ 、 m は平均値、 σ は標準偏差で、 $\text{erf}(\xi)$ は誤差関数とすると、それぞれ次の関係がある。

(中村川の場合) $\log 268.5 = 0.23689 \log \xi + 1.93293$ より $\xi = 2.09386$

累積確率 $F = \frac{1}{2}\{1 + \text{erf}(\xi)\} = 0.9984675$ となり、再現期間 $T = \frac{1}{1-F} \cong 652$ 年

(岳の場合) $\log 252.5 = 0.21885 \log \xi + 1.89819$ より $\xi = 2.30327$

累積確率 $F = \frac{1}{2}\{1 + \text{erf}(\xi)\} = 0.9994377$ となり、再現期間 $T = \frac{1}{1-F} \cong 1778$ 年

また、トーマス法で累積確率 F を計算して対数正規図表にプロットすると過去の線上に位置しており、それらの近似曲線からも同様に中村川268.5mm、岳252.5mmに対する超過確率をそれぞれ計算すると0.001649と0.000637、これに対応する再現期間は606年と1569年となり概ねではあるが上記と一致する。したがって、中村川では確率年600年、岳では確率年1600年と考えられる。

前期降雨の8/3に青森県内で初めて線状降水帯が発生した。気象学的に厳密な定義は未だ存在していない。後期降雨では、線状降水帯の発表情報は無いが、基準にギリギリ満たない線状の降水帯も十分危険で、24時間で300ミリ超という大雨となっていた。津口裕茂、加藤輝之(2014)³⁻³⁾は、過去の集中豪雨事例を抽出し統計解析を行い、降水系の形状は線状の降水系が多く全体の64.4%を占めていたと報告している。また、上記の最大日雨量が過去の線上に位置していることから、母集団の性質に変化はなく、雨の降り方は変わっているというよりは、「狭い範囲で大量の降雨」となっていると考えるべきである。

また、参考までに昭和52年8月洪水や平成25年9月洪水である過去の岩木川水系の主な水害時の雨量を今回の平成4年8月洪水と比較すると、最多総雨量では、順に328mm(四兵衛森観測所)、196mm(深山沢観測所)、253mm(岳観測所)、また、最多時間雨量では、順に63mm(弘前観測所)、48mm(深山沢観測所)、62mm(深山沢観測所)となった。さらに、一般被害(人的・全壊・半壊)や浸水家屋数においても、今回の洪水は昭和52年8月洪水よりは少なかった。

4. 被害状況とその特徴 (担当: 佐々木幹夫、高瀬慎介)

4.1 被害状況とその特徴

青森県は8月3日午前6時30分に「令和4年8月3日の大雨に係わる災害対策本部(本部長: 県知事)を設置し、対応をすすめた。3日の雨に続き9日からの雨も豪雨となり、青森県は対策本部の名称を「8月3日からの大雨に係わる」と「の」を「から」に変更して対

応を図っている。被害は全県にわたり河川、道路、公共施設および個人家屋等の全般に発生し、9市11町2村に及んでおり、被害総額は383.6億円となっている（令和4年11月21日現在）⁴⁻¹⁾。幸にも人的被害が出ていない。家屋被害は全壊・半壊・準半壊・一部損壊計749棟、床下・床上浸水合計が57棟、社会福祉施設等の非住家被害数は全壊が5、半壊が28、道路被害を受け全面通行止めとなった路線が15、片側通行規制を受けた路線が11、通行止め解除の見通しの立っていない道路が7路線となっている。鉄道橋の被害が発生しており、津軽線（蟹田駅～三厩駅）では運転見合わせ、復旧の見通しは立っていない。また、五能線では深浦駅～鯉ヶ沢駅間の運転再開の見通しは立っていない。農林水産部関係の被害総額は169.2億円に達し、農作物関係の被害は35市町村で発生し、88.7億円の被害を被っている。公共土木施設被害は県管理の河川で214箇所、道路で87箇所、橋梁2箇所、砂防他7箇所、港湾5施設で生じている。市町村管理の河川、道路等では計224箇所被害を受けている。

4.2 被害の発生機構

前述のように3日には青森県に初めて線状降水帯が発生し大量の雨が降った。8日から12日にかけても大量の降雨があった。後半の雨に対しては気象庁からの線状降水帯の発表はなかったが降水量は多く、この大雨による被害が多い。鯉ヶ沢町では中村川流域に大量の降雨があり、河道は溢れ、氾濫水は河川の周りを流下し市街地に流れ込み、多くの家屋被害を出している。この外水氾濫により445戸の家屋が浸水している。また、この町では半壊家屋が300棟、一部破損が64棟に達している。この被害の原因は河川計画を上回る豪雨にある。この雨の確率率は前述のように流域平均雨量 $R=268.5\text{ mm}$ で $1/600$ となっている。県内各地で土砂災害、山腹崩壊が生じている。これは 30 mm を超える時間降雨が3時間以上続いているためと考えられる。道路は土砂流出および冠水により全面通行止めや片側通行規制になっている。

岩木川水系中里川では9日からの大雨により堤防（中里町）が破堤し、 100 ha の農地が浸水した。この破堤の原因は漏水パイピングによる破堤である。また、つがる市山田川（高光沼）堤防が破堤し、 300 ha が冠水した。この破堤は越流により生じた破堤である。

4.3 自治体の対応

8月3日からの大雨に係わる災害対策本部は青森県、青森市、弘前市、五所川原市、つがる市、平川市、外ヶ浜町、鯉ヶ沢町、深浦町および中泊町で設置されている。今別町では災害警戒本部を設置し対応に当たっている。

岩木川では9日からの豪雨により水位が上昇し、それに応じて支川の水位もバックウォーター（背水）により上昇し、この水位上昇により多くの支川が危険水位に達した。五所川原市では岩木川、十川、旧十川、金木川、相内川、桂川、および松ノ木川で危険水位に達したために沿川地区住民に避難指示を発令した。最初の避難指示は9日17:10に松野木川および桂川の沿線地区に、最後の発令は10日19:09となった。この避難指示により、延べ11000人の住民が避難している。

5. 青森県における線状降水帯の特徴（担当：三戸部佑太）

今回の青森県における豪雨の発生プロセスを詳細に調べるため、国土交通省のXRRAIN合

成雨量データ（データ間隔：1分）により降雨分布の時間変化を確認した。また、この豪雨を発生させた気象状況についても確認するため、気象庁のメソ数値予報モデルの GPV データを用いた。3時間ごとに発表される予報データのうちの初期値のみを使用し、3時間ごとの気象状況の変化を確認した。降雨の発生過程の確認は1分ごとの降雨データにより行ったが、以下では1分ごとのデータから作成した1時間ごとの降雨量の分布を示す。

まず前期降雨では、8月3日0時～11時の間に、青森県の北西側において発生した強い降水域が太平洋側に通過していく様子が確認された（図5-1上）。青森県の北西側において降水域が発達した8月3日0時ころの気象場（図5-1下）を確認すると、下層（950 hPa）において低気圧による渦が発生し、日本海上の湿度の高い空気が巻き込まれている。その上空（400 hPa）においては低温で乾燥した空気が存在し、対流が生じやすい不安定な大気環境であったことがわかる。このように低気圧に伴って発達した降水域が、その低気圧の移動に伴って太平洋側に移動していったのが前期降雨の特徴である。

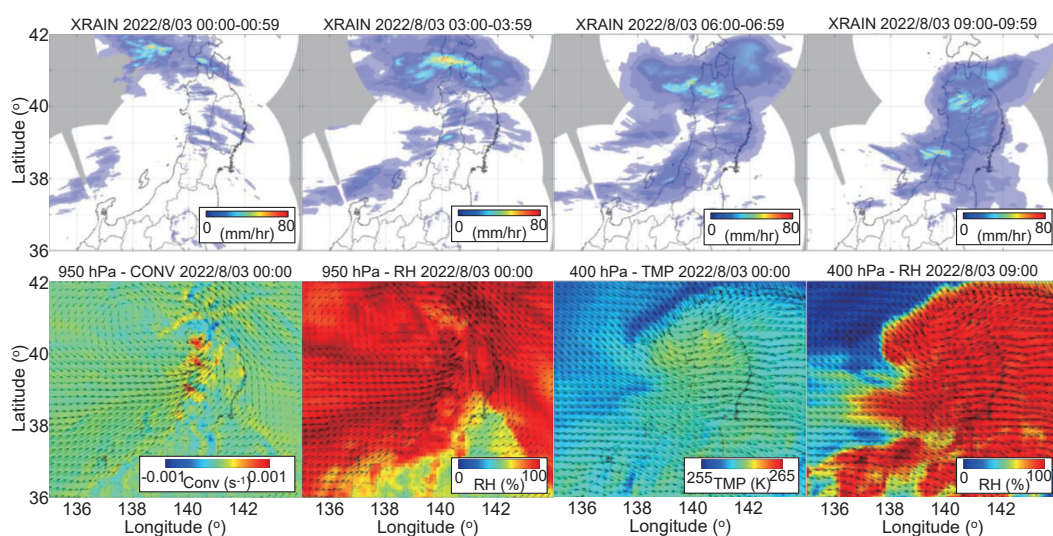


図 5-1 XRAIN 合成雨量データ（上）および気象庁 GPV データ（下、CONV：収束、RH：相対湿度、TMP：気温、ベクトル：風速）：前期降雨（2022年8月3日）

次に後期降雨についてみると、8月8日から13日にかけて繰り返し線状の降水帯が発生している（図5-2上）。日本海上における湿った空気が北東方向（青森～秋田）に向かって流れ込む状況が長期間にわたって維持されていた（図5-2下）。線状の降水帯の発生した時刻の直前の気象場を確認すると、その発生開始地点と概ね一致するところに強い収束域が確認できることが多かった（図5-2紫線）。この強い収束域および線状の降水帯の発生位置は時により変わっており、海上で発生する場合と海岸線付近で発生する場合の両方が確認できた。南西から北東に向かう風向きに対しては、青森県の日本海沿岸部で強い収束域が発生しやすく、この風向が長期間にわたり維持されたことが度重なる線状の降水帯の発生の要因であると考えられる。以上のように今回の後期降雨は、一つの大規模な線状降水帯の発生によるものではなく、高湿

な空気が南西から流入する構造が維持されたことによって繰り返し発生した複数の線状の降水帯によるものである。

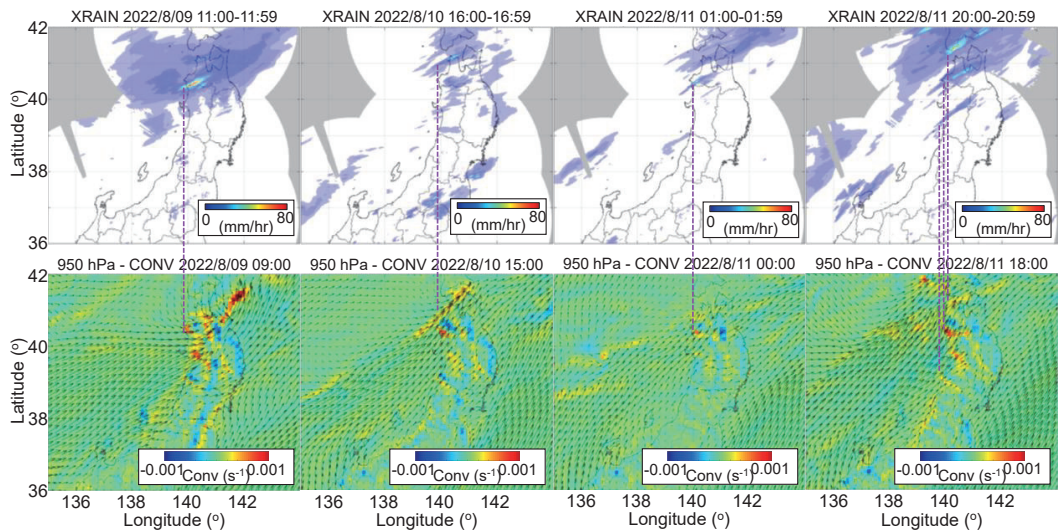


図 5-2 XRAIN 合成雨量データ（上）および気象庁 GPV データ（下，CONV：収束，ベクトル：風速）：後期降雨（2022年8月8日～13日）

6. 結言

青森県では2022年8月豪雨により大規模な災害が発生した。この豪雨の降雨特性、災害の特徴等についてこれまでの調査結果の概要を示してみた。

謝辞 被災の現地調査および資料、情報の提供にあたり、国交省青森河川国道事務所、青森県、被災地関係市町村および住民の方々にご協力を頂きました。5章において利用したXRAINデータは国土交通省より、GSM-GPVデータは気象庁により提供された。また、気象庁のGPVデータにアクセスする為に東京大学生産技術研究所・沖研究室及び喜連川研究室のアーカイブシステムを使用した。これらのデータセットは、文部科学省の補助事業により開発・運用されているデータ統合解析システム(DIAS)の下で、収集・提供されたものである。ここに、深甚なる謝意を表します。

参考文献

3-1) 青森県災害時気象資料、令和4年8月8日、青森地方気象台

https://www.data.jma.go.jp/aomori/obs-fcst/pdf/disaster/20220808_stationary_front.pdf

3-2) 青森県災害時気象資料、令和4年8月26日、青森地方気象台

https://www.jma-net.go.jp/aomori/obs-fcst/pdf/disaster/20220826_stationary_front.pdf

3-3) 津口裕茂、加藤輝之：集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析天気 61 (6), 455-469, 2014-06、日本気象学会。

4-1) 青森県、令和4年8月3日からの大雨に係わる被害等の状況（11月21日13:00分最終）、https://www.pref.aomori.lg.jp/koho/20220803ooame_saigaitaisakuhonbu_00.html,

緩衝材を活用した地震・津波対策技術の開発*

弘前大学大学院理工学研究科 有賀 義明

1. はじめに

沿岸域の地上構造物に関しては、強震動と津波の双方に対して有効な対策の実現が必要である。本研究では、免震・免波という考え方による地震・津波対策技術¹⁾について、これまでにSPH法 (Smoothed Particle Hydrodynamics Method) による津波衝突解析¹⁾、三次元動的・静的FEM解析による強震時および津波衝突時の有効性の評価²⁾等を行った。免震技術は既に実用化されているので、ここでは、免波技術に焦点を絞り、緩衝材を活用した場合の津波波圧の低減効果について津波模型実験³⁾を行い検討した。そして、津波波圧の低減効果が構造物の安全性評価にどのような影響を及ぼすかについて三次元FEM解析により検討した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、沿岸域の地上構造物の防災・減災に役立てるために、合理的な対策技術を開発すること及び地震・津波に対する信頼性の高い安全性評価法を開発することである。

3. 緩衝材の活用による地震・津波対策技術

従来の津波対策は、防波堤等による海側 (海岸線) での対策が主体となっているが、本研究では、構造物側での津波対策に着眼している。免波対策については、①津波からの回避 (津波が到達する場所には構造物を立地しない) を抜本的な対策として位置付けている。既設構造物の場合や立地上の制約等から抜本的な対策が困難な場合は、次善の策として、②津波からの構造物の隔離 (ドーム化、地下化等)、③津波の遮断 (防護壁等)、④構造物の形状や津波の到来方向等工夫による津波作用の低減、⑤緩衝材を活用した津波作用の低減等を位置付けている。ここでは、これらの内、「⑤緩衝材を活用した津波作用の低減」を研究対象としており、その基本概念を図1に示す。

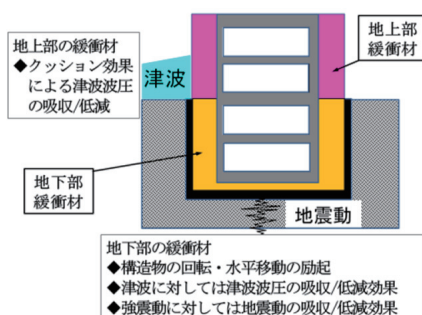


図-1 緩衝材を活用した地震・津波対策技術の基本概念

*Development of seismic and tsunami measure technology by using cushioning materials by Yoshiaki Ariga

構造物の地下部に配置した緩衝材は強震動に対する免震材として、構造物の地上部の緩衝材は津波に対する免波材として機能するように意図したものである。

4. 津波模型実験による津波波圧の低減効果の検討

(1) 実験の背景

地上構造物に作用する津波波圧に関して、津波の水深、流速、密度³⁾、構造物の平面形状⁴⁾、津波の入射角⁵⁾等の影響については研究事例が多い。しかし、構造物の鉛直形状の影響、緩衝材の影響等についての研究事例が見られない。そこで、緩衝材を活用した場合の津波波圧の低減効果について津波模型実験により検討した。

(2) 実験の目的

津波による構造物の損傷・破壊を評価するためには構造物に作用する波圧を明らかにすることが必要である。また、免波対策の実用化を図るためには構造物の表面に緩衝材を配置した場合に波圧の低減効果がどの程度あるのかを明らかにすることが必要である。このような必要性から、シンプルな構造物模型を作成して津波模型実験を行った。

(3) 実験装置と実験模型

実験には、直線二次元水路（パシフィックコンサルタンツ（株）つくば技術研究センター）を使用した。実験水路の形状と寸法を図2に示す。実験水路はコンクリート製であり、長さ4.9 mの貯水槽と延長15.9 mの二次元水路で構成されている。貯水槽と水路は転倒堰で仕切られており、この転倒堰を一気に倒すことで津波を模擬した流水を発生させる仕組みになっている。二次元水路の断面は、図3に示したように、幅0.9 m、側壁高0.48 mの矩形である。

波高は、構造物模型の上流側1.0 mの位置に容量型波高計を設置して計測した。波圧は、直径6 mm、厚さ0.6 mmの円盤型の圧力センサーを用いて計測した。圧力センサーは、図4に示したように、水路床から4.0 cm間隔で6個を構造物模型および緩衝材の表面に接着固定し、20 Hzで圧力を計測した。実験に用いた構造物模型の寸法と形状は、幅20 cm、高さ40 cm、奥行20 cmの直方体である。

(4) 実験ケース

実験ケースを表1に示す。図5には構造物模型の断面構造を示す。Case-1は、構造物模型に直接流水を作用させるケースである。構造物模型の側面勾配は、鉛直(仰角90度)である。Case-2は、緩衝材として厚さ10 cmのEPDM スポンジ（エチレンプロピレンゴムスポンジ）を配置したケースである。構造物模型と緩衝材の設置状況は図6に示したとおりである。緩衝材の保護板には、厚さ0.8 mmの塩ビ板を使用した。EPDM スポンジは、変形性に優れ、防振材、防滑材等として多用されている材料である。

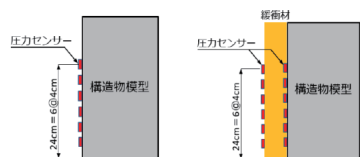
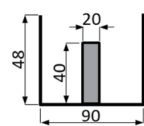
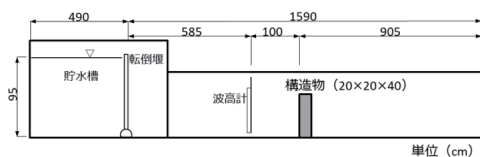


図2 実験水路の縦断面

図3 実験水路の横断面

図4 圧力センサーの配置

表 1 実験ケース

Case	構造物	流水		緩衝材
	側面勾配	波高	入射方向	材質 / 厚さ
1	鉛直	25cm	正面入射	無し
2	鉛直	25cm	正面入射	EPDM / 10cm

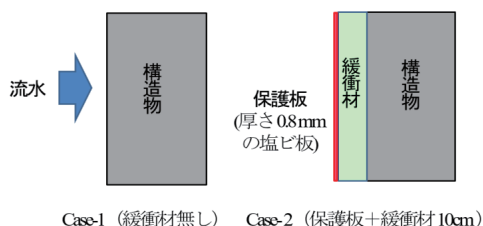


図 5 構造物模型の断面構造

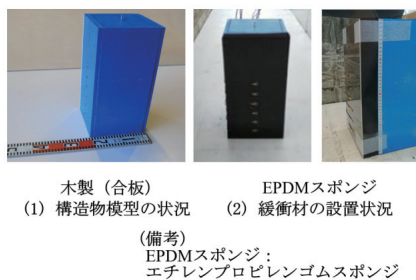
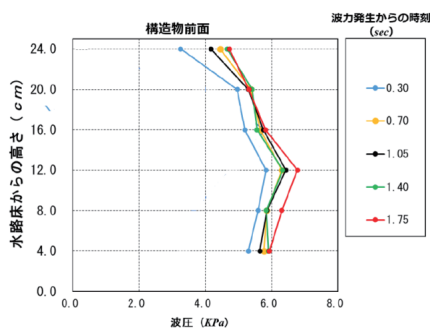


図 6 構造物模型と緩衝材の設置状況

(5) 実験結果

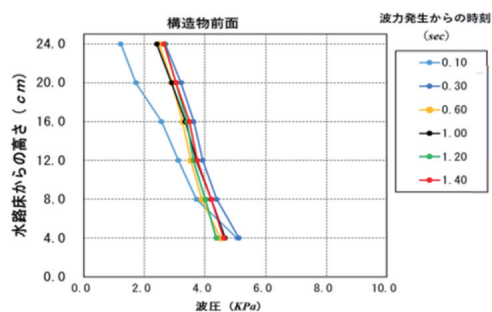
a) 構造物表面に作用した波圧の大きさと分布形状

実験では構造物模型の上流 1 m 地点で波高が 25 cm になるように設定した流水を作用させた。Case-1 と Case-2 について、構造物表面で計測された波圧の計測結果をそれぞれ図 7 と図 8 に示す。図中の折れ線は、主な時刻での鉛直方向の波圧分布を示す。Case-1 (緩衝材なし、構造物のみ) では、最大波圧は概ね 6.8 kPa であり、水路床からの高さが概ね 4~12 cm の区間では波圧の大きさはほぼ一定であり、水路床からの高さが概ね 12~24 cm の区間では直線的に減少した。波圧の鉛直分布の形状としては、台形もしくは五角形に類似した形状として捉えることが可能である。Case-2 (緩衝材あり、EPDM 10 cm 厚) では、図 8 に示したように、波圧の分布形状はきれいな三角形分布となった。Case-2 での最大波圧は、水路床からの高さが 12 cm の位置で約 4.0 kPa となり、Case-1 (緩衝材なし) の 6.8 kPa に比して約 6 割となり、EPDM スポンジによる波圧の低減効果を示す結果が得られた。



Case-1: 緩衝材なし, 構造物のみ

図 7 Case-1 の鉛直方向の波圧分布形状



Case-2: 緩衝材あり, EPDM 10cm厚, 保護板あり

図 8 Case-2 の鉛直方向の波圧分布形状

b) 考察

津波模型実験を行った結果、緩衝材を活用することによって津波衝突時の波圧を低減することが可能であることを確認できた。また、緩衝材がない場合は矩形・五角形に類似した形状であったものを緩衝材を配置することによって台形・三角形に類似した形状へと変化させることが可能であることを確認できた。緩衝材の有無による波圧の分布形状の変化を模式的に表現した結果を図9に示す。津波に対する構造物の安全性を評価する場合、波圧分布形状を三角形とするか矩形とするかに応じて、構造物内に発生する応力に大きな影響を及ぼすと考えられるので、緩衝材を活用することによって波圧の分布形状をコントロールすることが可能であることは、津波に対する構造物の安全性の向上を考える際に有用である。

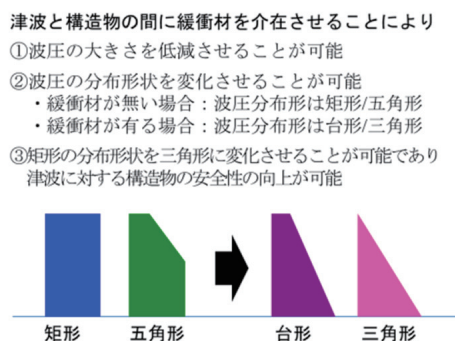


図9 緩衝材による波圧の分布形状の変化の模式

5. 三次元 FEM 解析による構造物内に発生する応力の評価

(1) 解析の目的

津波に対する構造物の安全性評価に関しては、津波波圧の大きさや分布形状の設定が評価結果にどのような影響を及ぼすかについて未検討の課題が多い。そこで、三次元 FEM 解析により検討した。津波波圧の大きさと分布形状は、図10に示したように①矩形分布 400 kPa、①矩形分布 260 kPa、①三角形分布 400 kPa の3ケースを設定した。波圧の大きさは SPH 法による津波衝突解析の結果²⁾を参考に、波圧の分布形状は津波模型実験の結果を参考に設定した。

(2) 三次元解析モデル

東日本大震災で被害を受けた仙台市南蒲生浄化センター第三ポンプ場の事例を参考に解析モデルを設定した。解析対象は、地上2階・地下2階の4階建の鉄筋コンクリート構造物とし、その形状と寸法は図11に示したとおりである。地盤は、二層の水平成層地盤を仮定した。地盤と構造物は、共に8節点ソリッド要素でモデル化し、解析は、三次元静的解析により線形解析として行った。解析には、解析プログラム ISCEF を使用した。

(3) 解析用物性値

解析に用いた構造物と緩衝材の物性値は表2に、地盤の物性値は表3に示す。

(4) 津波波圧の設定

津波波圧の大きさは400 kPaと260 kPa、鉛直方向の分布形状は矩形と三角形分布を設定した。波圧は、構造物正面の高さ0 m～6.5 m、幅20 mの矩形のエリアに等分布荷重として静的に作用させた。

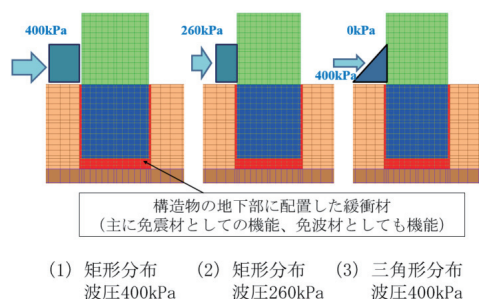


図10 波圧の大きさや分布形状の設定

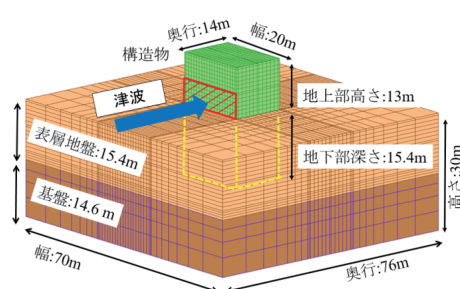


図11 三次元 FEM 解析モデル

表2 構造物と緩衝材の物性値

項目	せん断剛性 N/mm ²	密度 t/m ³	ポアソン比
構造物	14600	2.40	0.20
緩衝材	0.24	1.00	0.49

表3 地盤の物性値

層	層厚 m	せん断剛性 N/mm ²	密度 t/m ³	ポアソン比
表層	15.4	16	2.0	0.40
基盤	14.6	240	2.2	0.35

(5) 解析結果

a) 構造物内に発生したせん断応力

波圧によって構造物に発生した最大せん断応力の解析結果を図12に示す。構造物に発生した最大せん断応力は、矩形分布400 kPaで2.02 N/mm²、矩形分布260 kPaで1.32 N/mm²、三角形分布400 kPaで0.59 N/mm²となった。波圧の大きさが同じ400 kPaであっても、矩形分布では2.02 N/mm²、三角形分布では0.59 N/mm²となり約3割まで低下した。構造物に発生する応力は、波圧の大きさ及び分布形状の設定に応じて直接的に大きく変化することが確認できた。

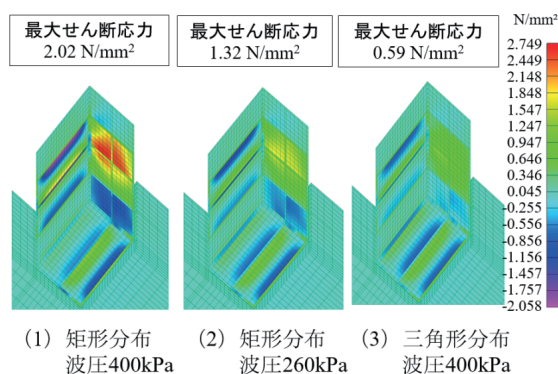


図12 波圧の設定による構造物に発生する最大せん断応力の比較

b) 考察

構造物の耐波設計に関する現行の指針・基準類⁶⁾では、津波波圧の分布形状は三角形分布を設定するのが通例である。しかし、津波模型実験を行った結果、構造物に対する破壊力が大き

い津波衝突時の波圧の分布形状は矩形に類似した形状となった。また、三次元FEM解析により応力評価を行った結果、三角形分布に比して矩形分布を設定した場合は、構造物に発生する応力が増大することを確認した。すなわち、三角形分布を設定した安全性評価は、矩形分布の設定よりも危険サイドの評価になることが確認できた。波圧の分布形状は構造物に発生する応力に大きな影響を及ぼすので、津波に対する構造物の安全性を精度良く評価するためには、構造物に作用させる波圧の大きさのみならず分布形状の設定が重要である。

6. まとめ

◇緩衝材の活用により構造物に作用する津波荷重を低減する技術を提案し、その効果について津波模型実験により検討した。その結果、緩衝材を活用することにより、構造物に作用する津波の波圧を低減することが可能であり、津波に対する構造物の安全性を向上させることが可能であることを確認できた。

◇緩衝材として EPDM スポンジを用いて津波模型実験を行った結果、緩衝材を介在させることによって波圧の大きさの低減のみならず、波圧の分布形状を矩形・五角形に類似した形状から台形・三角形に類似した形状へと変化させることができることを確認できた。

◇三次元FEM解析により検討した結果、波圧の大きさと分布形状の設定は、安全性評価に直接的に大きな影響を及ぼすことが確認できた。現行の指針・基準類では、安全性評価の際に三角形分布（静水圧分布）の波圧分布を設定することが通例になっているが、三角形分布の設定は、矩形分布の設定よりも危険サイドの設定になるので、信頼性の高い安全性評価を実行するためには、波圧の大きさと共に波圧の分布形状を適正に設定することが必要である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP21K04603 の助成を受けて実施しました。解析プログラム ISCEF の使用に際しては、センチュリテクノ(株)の中川弘明様から多大なるご配慮をいただきました。津波模型実験の実施では、パシフィックコンサルタンツ(株)の市山誠様から、SPH 法による流体解析では、(株)構造計画研究所の渡辺高志様から多大なるご協力をいただきました。研究に際しては、土木学会地震工学委員会水循環施設の合理的な地震・津波対策研究小委員会 WG1 の委員の方々から多大なるご協力をいただきました。記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺高志, 有賀義明, 西本安志, 大峯秀一, 山中明彦, 森崎啓, 佐藤優乃: 粒子法を用いた陸上構造物に作用する津波波圧の衝突条件による影響評価, 土木学会第 39 回地震工学研究発表会講演論文集, C12-1470, pp. 1-8, 2019.
- 2) 有賀義明, 佐藤優乃, 渡辺高志, 西本安志, 曹増延, 坂下克之, 鈴木高二朗, 有川太郎, 浅井光輝, 堀宗朗: 水循環施設における免震・免波構造の効果の評価に関する検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 73, No. 4, I_721-I_729, 2017.
- 3) 松富英夫, 岡田隼人, 久保田友寛, 今野史子: RC 造建築物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存に関する基礎実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 74, No. 2, I_265-I_270, 2018.
- 4) 榊山勉: 陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, I_771-I_775, 2012.
- 5) 高橋研也, 前田勇司, 西畑剛, 古牧大樹: 陸上構造物に作用する津波波圧と波向の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, I_306-I_310, 2014.
- 6) 日本下水道協会: 下水道施設の耐震対策指針と解説, 408p., 2014.

積雪時の地震の際に倒壊したカーポートに関する基礎的検討*

弘前大学 片岡俊一

弘前大学工学部地球環境防災学科 岸 恵里菜

1. はじめに

2021年2月13日に福島県沖で起きた地震（マグニチュード7.3）の際に、山形県内では最大震度5弱を観測し、20棟を越えるカーポートが倒壊した¹⁾。震度5弱はそれほど強い地震動ではなく、倒壊にはカーポートの屋根に積もっていた雪の影響が少なからずあると思われるが、カーポート本来の振動性状が不明であり、積雪がどの程度の影響であったかの定量的検討は行われていない。

青森県は積雪期が長く、政府地震本部がまとめた全国地震動予測地図を見ると、青森県内において今後30年以内に震度5弱以上の揺れに見舞われる確率は非常に高い。更に、弘前市の市街地を見る限り、問題となる構造形式のカーポートは普及しているようである。つまり、山形県において生じたカーポートの倒壊と同様の被害は今後青森県でも起こり得る。カーポートが倒壊し、自動車が利用できなくなると、避難や移動、あるいは自動車内での避難生活が困難になり、個人の財産の消失ではすまされない。

我々は積雪時の地震によるカーポートの倒壊原因を探り、将来に備えるために、被害状況だけではなく被害当時の山形県の地震記録と気象記録を収集した。さらに、青森県弘前市周辺ではあるがカーポートの振動性状、問題となるカーポートが存在する割合などを調べている。以下にはカーポートの振動性状と被害を受けたカーポートに近い地点の強震動の特徴を述べる。

2. 被害概要

山形県がまとめたカーポートの被害¹⁾と震度をまとめて表1に示す。震度計が被害を受けた地点に近接して設置されている訳ではないが、山形大学の三辻和弥教授は震度計の位置と被災建物の位置を確認しており、三辻によると中山町、村山市、河北町は被災地と震度計の位置は近いとのことである。参考のために、被害が発生した市町と震度計、K-NETの位置、AMeDAS観測点の位置を図1に示す。

さらに、地震時の積雪の影響を確認するために、山形県内の代表的なAMeDAS観測点の被害当日の日最大積雪深を最近の被害地震の日付けのものと比べて表2に示す。2011年東北地方太平洋沖地震や2022年3月16日の地震でも山形県内は震度5程度の揺れであったが、カーポートの倒壊は報告さ

表1 カーポートの被害とその市町村の計測震度

市町名	被害棟数	計測震度	震度計の位置
中山町	11	4.7	中山町長崎元町
村山市	6	4.2	村山市中央
東根市	2	4.2	東根中央
米沢市	1	4.8	米沢市林泉寺
寒河江市	1	3.7	寒河江市中央
河北町	1	4.4	河北町谷地

* A fundamental study on collapsed carports during snowy earthquake by Shunichi Kataoka and Erina Kishi

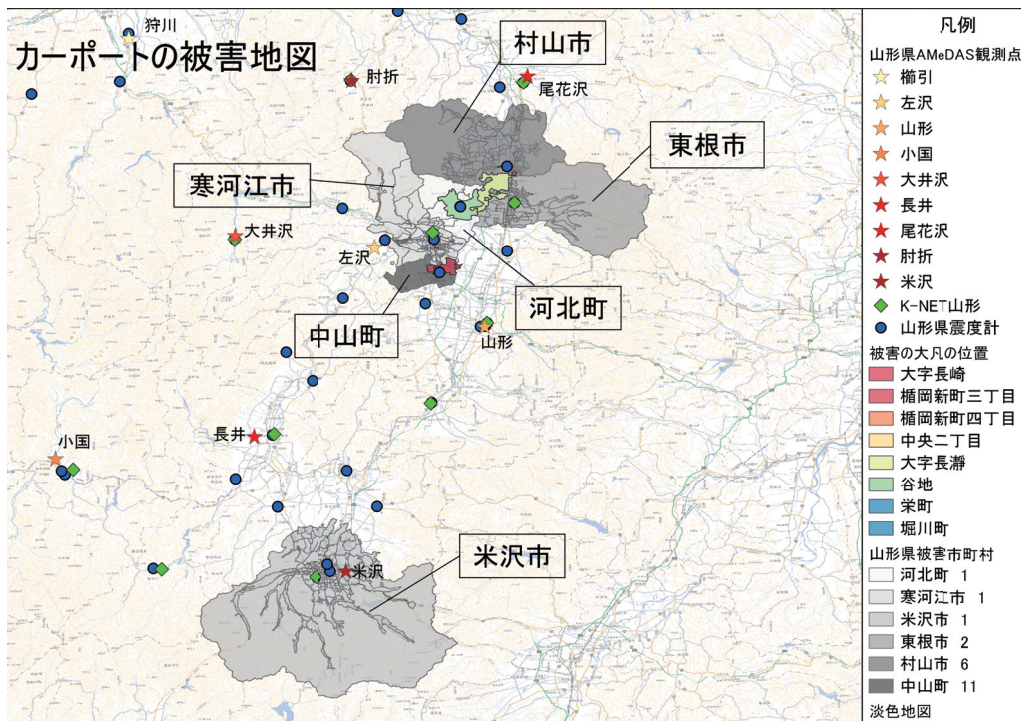


図1 山形県内でカーポートが倒壊した市町村の位置および強震計，AMeDAS観測点の位置

れていない。地震が起きた日付けで比較すると、2021年2月13日の日最大積雪深は多くの点で最大であることが分かる。

3. 問題となるカーポートの構造

倒壊の原因の一つとして

カーポートの構造形式が挙げられている。三辻による報告²⁾や新聞記事内での解説あるいは私信を総合すると、倒壊したカーポートは間口から見る方向（梁間方向）にはフレーム構造となっているが、奥行き方向（桁行方向）にはそのフレームが並べられて屋根部材が置かれているだけのものである。場合によっては、奥行き方向のフレーム同士を梁に比べて極めて小さな断面の部材で繋いでいるものも見られるが、販売パンフレットではこの水平材はオプションの扱いである。このような構造では、梁間方向と桁行方向で振動特性が大きく異なることが想像される。

破壊は柱脚頭部の接合部分に見られるので曲げ剛性が足りないことが直接の原因であるが、方向によって振動特性が異なることも被害に結びついた可能性がある。

表2 最近の被害地震の際のAMeDAS観測点における日最大積雪深

観測点名	2021年2月13日	2022年3月16日	2011年3月11日
左沢	73	41	65
尾花沢	165	102	151
米沢	99	77	84
肘折	227	235	322
山形	35	6	19

4. 振動実験

このような構造の固有振動数を求めるために、図2に示すカーポートを用いて振動試験を行った。スパン方向をX方向、桁行方向をY方向とする。

用いた振動計は3成分の加速度が計測できるMEMSセンサーで、電池と合わせて12gと軽量なものである。計測レンジを $\pm 2G$ (19.6m/s/s)とし、サンプリング振動数を100Hzとしてデータを取得した。分解能は12bitである。センサーはAndroidデバイスとBluetooth接続され、計測の制御やデータ保存はデバイス側で行う。

今回の実験では道路よりのフレームを構成する2本の柱(図中の柱1, 柱2)および、奥行き方向に1つはなれた柱(図中の柱3)の高さ約180cmに位置に各1台のセンサー(図ではLogtta)をPPベルトで柱に固定した。図に赤矢印で示したように高さ205cm程度の部分を人力で衝撃を加えた。衝撃は各柱毎にX方向、Y方向に対して行った。

柱1と柱4を打撃した際の衝撃波形をフーリエ解析して得られたフーリエスペクトルを図3に示す。顕著なピークは、4.2Hz, 4.8Hz, 2.7Hzに見られ、それはセンサーによらないことが多い。各図の一つのスペクトルが他と異なっているが、これは打撃した柱に取り付けたセンサーの信号に対応するものであり、打撃による衝撃で固定が緩んだものと考えている。さらに、詳細に見ると、図の凡例ではS3としてある柱4に取り付けたセンサー(図3ではLogtta3)のピーク振動数は他のものに比べてやや高い。

ピーク振動数と振動モードとの関係は次のように解釈している。X方向、Y方向のいずれの打撃でも4.8Hz付近でピークとなるが、詳細に見るとこのピークは柱3をX方向に打撃した場合には励起されておらず(図の(d))、柱1をX方向に打撃した際のセンサー3では励起されていない(図の(a))。このことから、この振動数はねじれ振動に対応したものと考えられる。ねじれ振動モードであるから、端部に位置する柱1を打撃した場合には、センサー1, 2はX方向、Y方向で

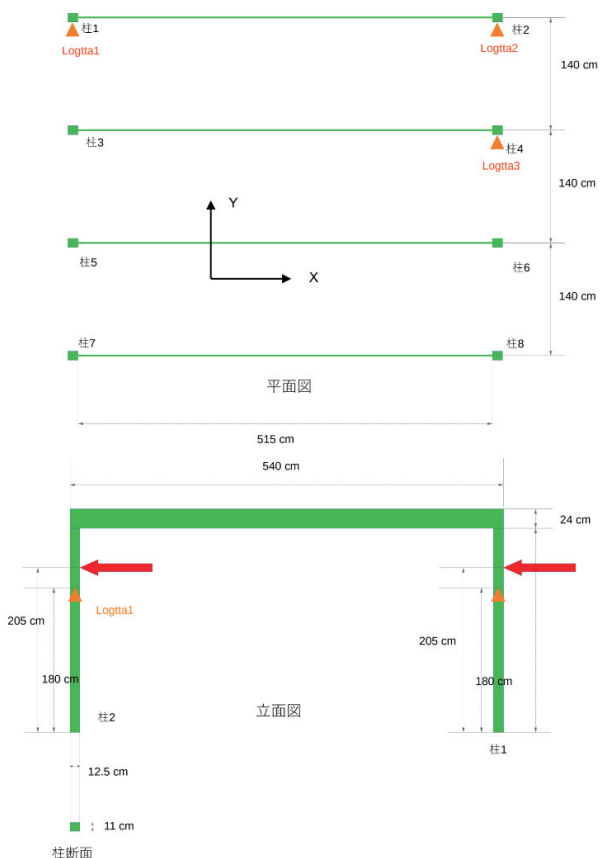


図2 振動実験を行ったカーポートの平面図と立面図

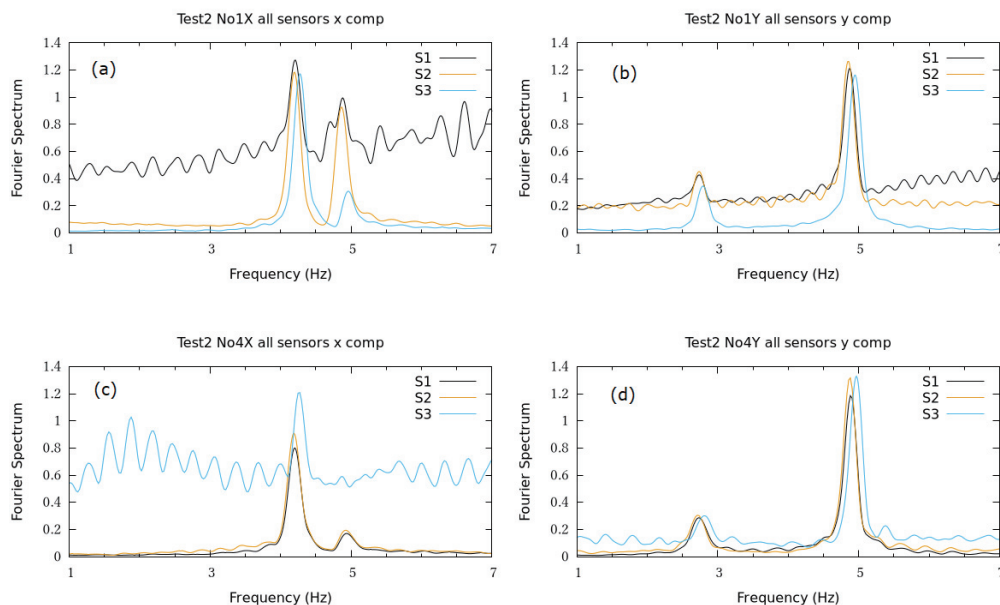


図3 衝撃波形のフーリエスペクトル。上段にある(a)と(b)は柱1を打撃した際のもので、(a)はX方向、(b)はY方向。下段は柱4を打撃した際のもので、(c)はX方向、(d)はY方向。

あっても振動が励起され、振れ中心に近い柱3に設置したセンサー3ではその影響が出にくい。柱3をX方向に打撃すると、振れ中心方向に打撃したことになるので、Y方向の振動は励起しないが、Y方向に打撃すると振れ中心に対して回転させる動きになるので、Y方向の振動が励起されるのであろう。さらに、ねじれ振動が顕著である事は、屋根材の水平剛性が有効的にカーポートの振動に寄与していることを表している。

上述の振動数をねじれ振動と考えると、X方向の固有振動数は4.2Hz、Y方向のそれは2.7Hzとなる。柱幅は間口の見つけで12.5cm、奥行きに11cmとそれほど異ならないので、水平方向のピーク振動数が大きく異なる理由は、構造形式の違いと考えるべきであろう。さらに、柱4に取り付けたセンサー3のピーク振動数が他に比べてやや高いのは両側の柱に拘束されている為であろう。

減衰定数を求めるために、センサー3のX方向、Y方向の振動データに対して、ピーク振動数付近のみをバンドパスフィルターで取り出し、自己相関関数を求めた。これを1自由度系の減衰と見なして、減衰定数を求めた。自己相関関数とそれにフィットさせた1自由度系の減衰振動とを図4に示す。X方向の減衰定数は0.7%、Y方向は2.9%となった。水平2成分で大きく異なっているがその理由は不明である。

5. 地震動の特徴

カーポートが倒壊した2021年2月の地震の際には積雪深が深かったことは前述したが、本節では地震動強さについて、最近の被害地震と比較してみる。被害が多かった中山町の震度計データ

は気象庁によって公開されている³⁾。それに加え、K-NET 米沢の記録⁴⁾を用いて、応答スペクトルを求めてみた。地震動とカーポートの設置方向との関係は分からないので、水平2成分の記録を用いて、水平面内の最大応答値とする二次元応答スペクトルと比較する。さらに、前述したように水平2成分で減衰定数が大きく異なるが、本報告では1%とした。破壊w考えるために、慣性力に対応する絶対加速度応答と変形に対応する相対変位応答を図5に示す。横軸はフーリエスペクトルと対応させるために振動数としている。

図の上段にある中山町の記録では赤線で示した2021年2月13日の記録は3Hz弱で他の地震動よりも強いことが分かる。前述した弘前のカーポートが中山町にあった場合は、他の記録に比べて大きな応答になったことになる。一方で、カーポート上に雪が堆積している場合には固有振動数が低下するので、逆に応答は3つの記録で最も小さいことになる。

下段にあるK-NET 米沢の記録では赤線で示した地震動は2011年のものより小さく、2011年と2021年の積雪深はほぼ同程度なので、米沢でのカーポートに倒壊には積雪の影響があった可能性が高い。

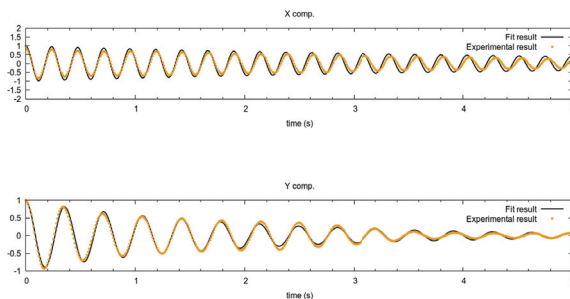


図4 バンドパスフィルターを施した振動データから求めた自己相関関数（黄色の線）とそれにフィットさせた1自由度系の減衰振動（黒色の線）

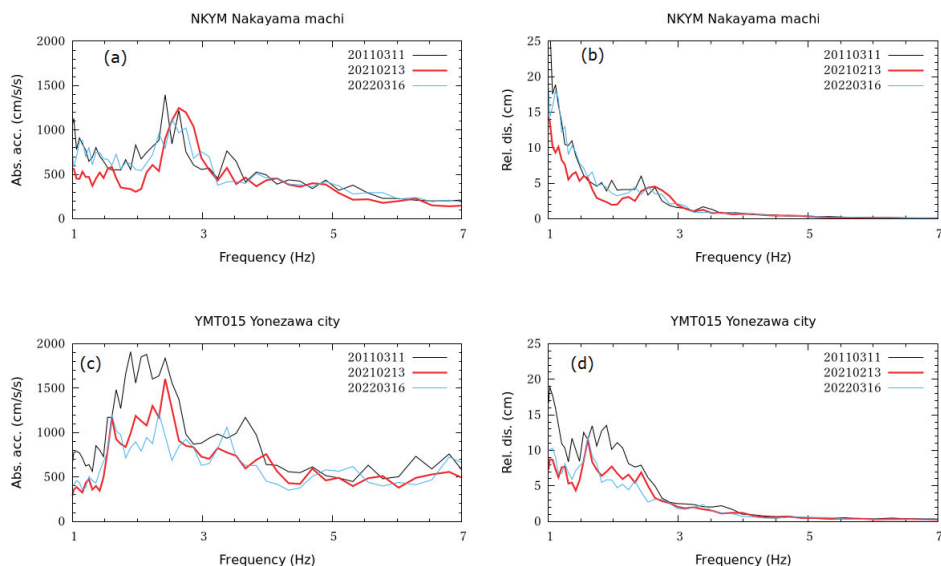


図5 中山町の震度計と K-NET 米沢の記録から求めた応答スペクトル。上段：中山町，下段：K-NET 米沢。左側が絶対加速度応答，右側が相対変位応答。減衰定数はいずれも1%。

6. まとめ

2021年2月13日に福島県沖で起きた地震の際に、山形県内で20棟を越えるカーポートが倒壊したことから、本報告では被害の概要と震度、積雪深のデータを整理した。さらに、弘前市内にあるカーポートの振動実験を行った。その結果、梁間方向と桁行方向で固有振動数が大きく異なっており、奥行き方向の振動数が間口方向の振動数よりも低いことが分かった。また、カーポートは振れ振動が励起され安いことも分かった。さらに、最近の被害地震の地震動と強さを比較してみた。K-NET米沢の記録は最近の被害地震の記録に比べて強くないことから、カーポートの倒壊に積雪の影響があることが示唆された。一方で、被害がもっとも多かった中山町の記録は最近の被害地震の記録に比べて強いものであり、積雪深の影響は判断できなかった。

参考文献

- 1) 山形県防災くらし安心部：福島県沖を震源とする地震に関する被害状況について（2/15 12:00 まとめ）
- 2) 三辻和弥：2021年2月13日福島県沖地震における建物被害への表層地盤の影響について、第56回地盤工学研究発表会，13-9-5-03，2021年7月
- 3) 気象庁 令和3年（2021年）2月13日23時07分 福島県沖の地震
https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/2102132307_fukushima-oki/index.html（2023年1月15日閲覧）
- 4) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019), NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004

慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた3層骨組の振動応答特性

(その1) ダンパーおよび実験の概要

仙台高専専攻科生 水間巧大

東北工業大学 船木尚己, 東北工業大学大学院 小嶋健太郎

仙台高専 飯藤将之, 藤田智己

1. はじめに

本稿は、東北工業大学において制振デバイスとして開発してきている慣性質量効果を有する液流ダンパーを多層フレームに組み込み、地震応答の低減効果を検討した結果をまとめたものである。液流ダンパーは一对のピストン・シリンダーと細長い連結管からなり、連結間に充填した液体が振動時に慣性質量効果を発揮することで構造物の長周期化と高減衰化をもたらし、地震応答低減を可能にすることができるものであり、これまで、液流ダンパー単体の特性やフレームモデルに組み込んだ検討を行ってきている¹⁾。本稿では、3層の縮小フレームに、連結間長さを3種類変化させ、更に、組み込む層を変えて検討した結果を示し、その1ではダンパーと実験の概要について、その2では実験結果と正弦波入力による応答解析結果を用いた周波数応答解析結果についてまとめる。

2. ダンパーの概要²⁾

液流ダンパーは一对のピストン・シリンダーを連結管でつないで構成する。ピストンを骨組の床に設置したバットレスに、シリンダーを骨組の上部床からの吊り下げた固定治具に固定し、骨組が水平方向に振動して層間変位が生じた際に移動するピストンにより、シリンダーに充填した液体を押し引きして、液体を連結管内に移動させて、慣性質量効果を発揮させるものである。液流ダンパーの概念と詳細を図1と図2に示す。

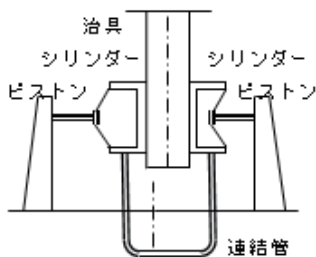


図1 ダンパーの概念図

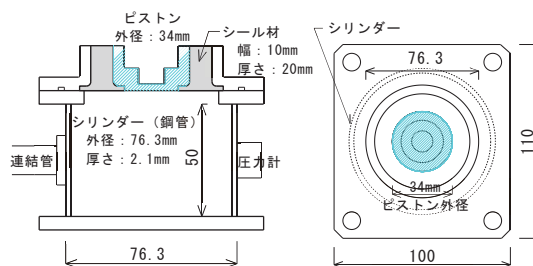


図2 ダンパーの詳細図

開発のために使っている縮小フレームに適用する液流ダンパーに用いるシリンダーは厚さ 2.1mm のステンレス製で、内径を 72.1mm で、深さを 50mm としている。ピストンはステンレス製で、外径 34mm としている。ピストンの外枠部分にはシール材（シリコンゴム）を充填し、液体が漏れることのないようにしている。ピストンの可動振幅は、おおよそ $0\pm 5\text{mm}$ である。連結管はステンレス製で、内径は 12mm である。連結間長さが長いほど、応答低減効果が大きくなるが、今回の実験では、連結間を長さ 0.5m, 1m, 2m の 3 種類用意した。

3. 試験体の概要

試験体の詳細を図 3 に、試験体ケースを表 1 に示す。3 層試験体であり、各層の階高を 500mm とし、各層フロアには、幅 500mm、奥行き 440mm、厚さ 8mm の鉄板を用いている。鉄板の質量は約 13.6kg である。柱には、幅 100mm、厚さ 4mm のアルミ板を用いており、1 本当たりの質量は約 0.5kg である。柱は各層 4 本とし、床と柱は、アングルとボルトを用いて接続している。ダンパーそのものの質量が約 4.9kg であり、バットレスとダンパー固定治具の重さを加えると、各層で質量の分布が不均一になるため、3 層上部の鉄板におもりを載せて調整している。結果として各層の質量は、3 層=23.5kg、2 層=28.7kg、1 層=34.9kg となっている。

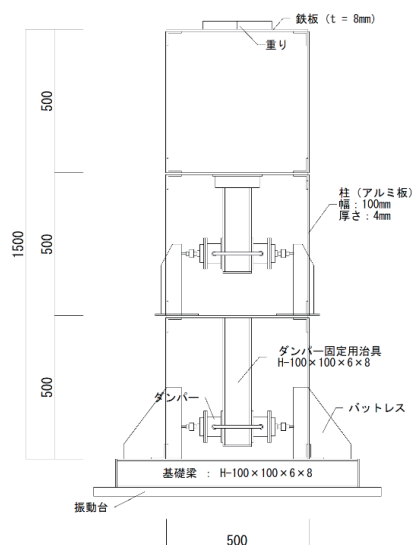


図 3 試験体詳細（単位：mm）

表 1 実験ケース

ケース	1 層	2 層	3 層
Case1	—	—	—
Case2	シール材※1	—	—
Case3	連結管 0.5m	—	—
Case4	連結管 1.0m	—	—
Case5	連結管 2.0m	—	—
Case6	シール材※1	シール材※1	—
Case7	連結管 0.5m	連結管 0.5m	—
Case8	連結管 1.0m	連結管 1.0m	—
Case9	連結管 2.0m	連結管 2.0m	—

※1：ダンパー内に液体が封入されていないもの

4. 実験の概要

加振実験のケースは、大枠、3 層ともダンパーのない場合、1 層のみにダンパーを取り付けた場合、1 層と 2 層にダンパーを取り付けた場合の 3 種類とする。ダンパーを取り付けた際に、シール材のみを施した場合と連結管長さを 3 種類変化させた場合の実験を行うため、表 1 に示すように、実験ケースは $1+(1+3)+(1+3)$ の全 9 ケースとなる。

各ケースについて、おおよそ 1~10Hz に入力周波数を変化させた正弦波加振とホワイトノイズ

を入力した加振を行った。加振には仙台高等専門学校・名取にある永久磁石振動台を用いた。加振機はSSV-125×3台であり、約1.5Hz以上で100kg 負荷時に0.83Gの加振が可能である。正弦波加振では、シール材が破損しないように、入力最大加速度の基準は20～25galとした。ホワイトノイズは、1/81.92～50Hzでのフーリエスペクトルをもとに作成し、振動保障を行ってからレベル調整をして入力した。

図4に示すように、計測項目は、振動台と各層の加速度、1階の左右に取り付けたダンパーの荷重と内圧、2階の左右に取り付けたダンパーの荷重と内圧、振動台の変位、1階ダンパーの変形、2階ダンパーの変形である。

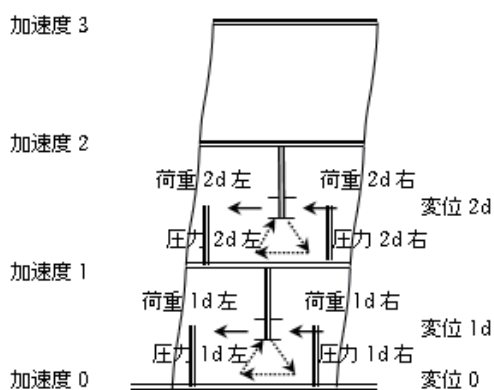


図4 計測項目

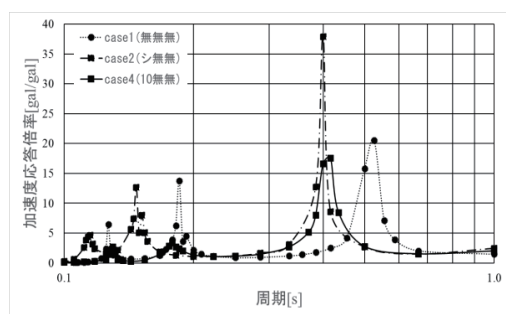


図5 応答倍率(case1・2・4)

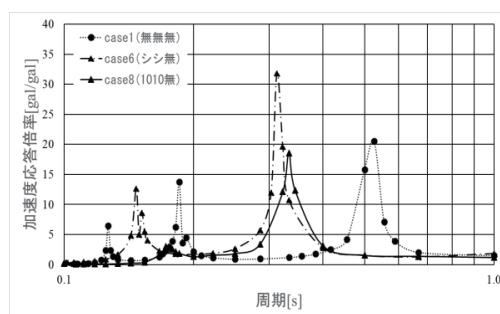


図6 応答倍率(case1・6・8)

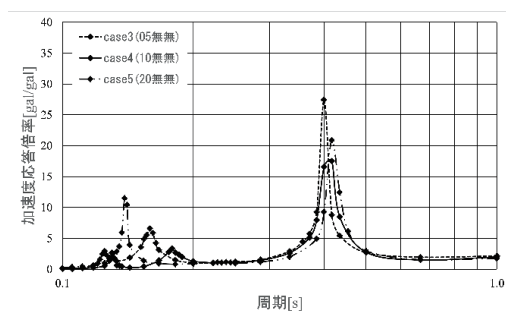


図7 応答倍率(case3・4・5)

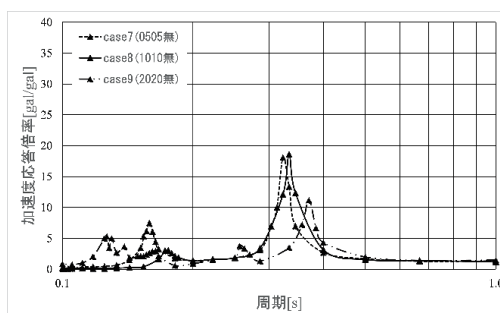


図8 応答倍率(case7・8・9)

5. 実験結果

図 5 に case1・case2・case4 の応答倍率（3 層／台）を、図 6 に case1・case6・case8 の応答倍率（3 層／台）を示す。両者ともに 1・2・3 次のピークが計測されている。1 次だけ比較すると、どちらの場合でもフレームのみよりもダンパーを組み込んだフレームの固有周期は短くなっている。シール材のみのケースの応答倍率は高くなるが、水を充填することによって応答が低減されている。

1 層のみにダンパーを組み込んだケースの応答倍率を図 7 に、1・2 層にダンパーを組み込んだケースの応答倍率を図 8 に示す。また、各ケースの実験で得られた数値を表 2 に示す。1 次での周波数は、連結管長さを変化させても大きく変わりが無い結果となった。

共振周波数におけるシリンダー・連結管の内圧差-変位関係を図 9 と図 10 に示す。内圧差は、左ダンパーのシリンダー圧力と右ダンパーシリンダーの圧力の差である。1 層のみにダンパーを取り付けた case3~5 の結果が図 9、1・2 層にダンパーを取り付けた case7~9 の結果が図 10 である。図 9 と図 10 上段より、連結管長さを長くすることによって、履歴ループの面積が大きくなることが確認できた。一方、図 10 下段の 2 層にダンパーを組み込んだ場合には履歴ループの面積が小さくなっており、逆 S 字のような形となっている。1・2 層に組み込んだ場合に、1 層のダンパーの役割が大きいことが確認された。

続いて、共振周波数におけるダンパー荷重-変位関係を図 11 と図 12 に示す。ダンパー荷重は、左ダンパーの荷重と右ダンパーの荷重の差である。1 層のみにシール材やダンパーを組み込んだ case2~5 の結果が図 11、1・2 層にシール材やダンパーを組み込んだ case6~9 の結果が図 12 である。全ケースともダンパー荷重-変形関係は、ほぼ弾性の挙動を示していることが確認できた。連結管が長くなるにつれて、荷重の値が小さくなることも確認できた。

6. まとめ

制振デバイスとして開発してきている慣性質量効果を有する液流ダンパーを 3 層フレームに組み込み、振動台を用いて行った加振実験について、ダンパーの概要、実験計画、実験より得られた応答低減効果についてまとめた。

フレームのみの試験体にダンパーを取り付けることによって、シリンダーの剛性によって固有周期が短くなるが、シリンダー内に水を充填した場合に、固有周期を長くして、応答倍率が小さくなることを確認した。更に、連結管が長いほどシリンダー間の内圧差が大きくなり、液流抵抗が大きくなっていることを示した。1・2 層にダンパーを組み込むと、1 層の内圧差-変位関係が紡錘形となる一方で、2 層の内圧差-変位関係は逆 S 字もしくは線形に近く、1 層に組み込んだダンパーの寄与が高くなる傾向が得られた。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究(C)（課題番号：21K04617、研究代表者：藤田智己）の助成を受けて実施されました。ここに記して謝意を表します。

表2 実験結果 周波数と応答倍率

	ピーク周波数[Hz]			ピーク周期[s]			応答倍率		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次	1次	2次	3次
Case1	1.9	5.4	7.9	0.53	0.19	0.13	20.5	13.8	6.5
Case2	2.5	6.8	8.7	0.40	0.15	0.11	40.1	11.4	9.3
Case3	2.5	6.3	8.0	0.40	0.16	0.13	27.4	6.6	2.9
Case4	2.4	5.6	7.7	0.42	0.18	0.13	17.5	3.4	2.7
Case5	2.4	4.2	7.2	0.42	0.27	0.14	20.9	1.2	11.5
Case6	3.2	6.8	n-obs	0.31	0.15	n-obs	31.8	12.6	n-obs
Case7	3.1	6.3	n-obs	0.32	0.16	n-obs	18.1	7.5	n-obs
Case8	3.0	5.7	13.5	0.33	0.18	0.07	18.6	3.1	4.0
Case9	2.7	3.9	7.9	0.37	0.26	0.13	11.3	3.8	5.5

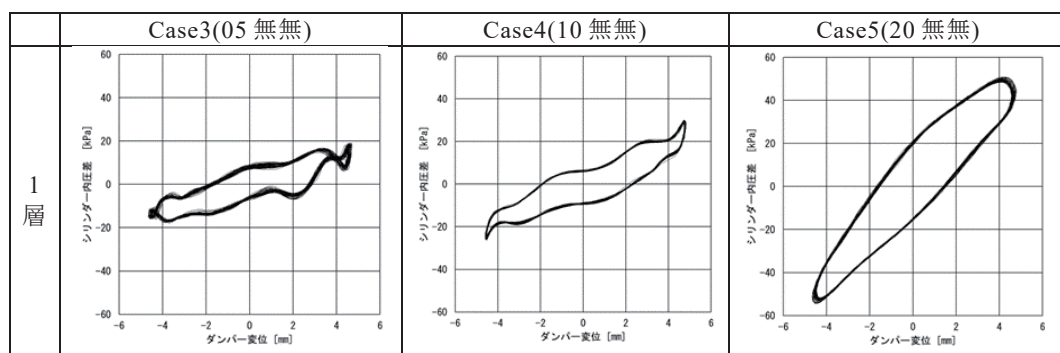


図9 内圧差-変位関係 (case3・4・5)

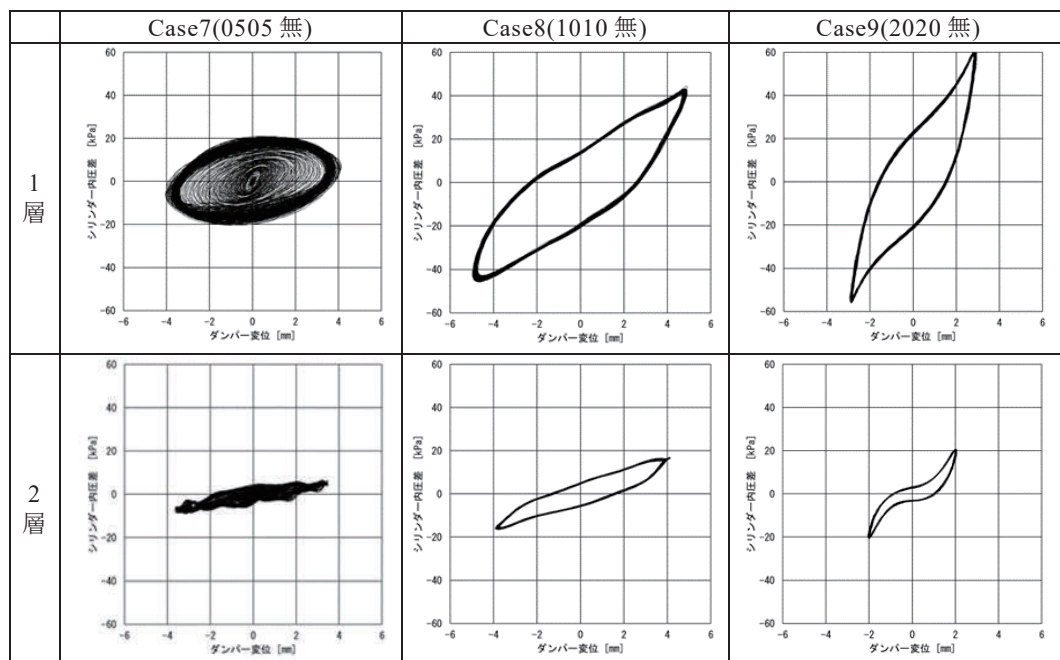


図10 内圧差-変位関係 (case7・8・9)

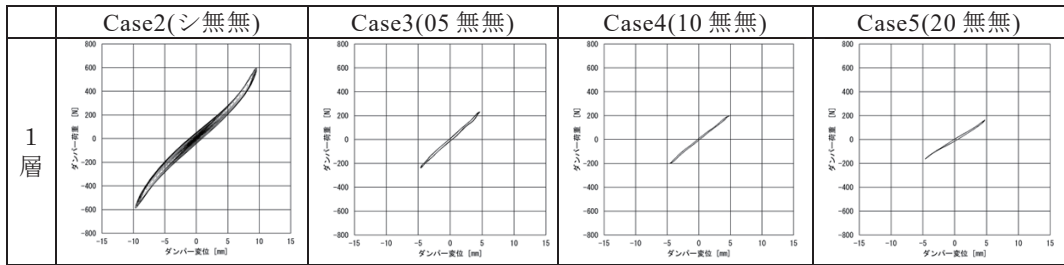


図 11 ダンパー荷重-変位関係 (case2・3・4・5)

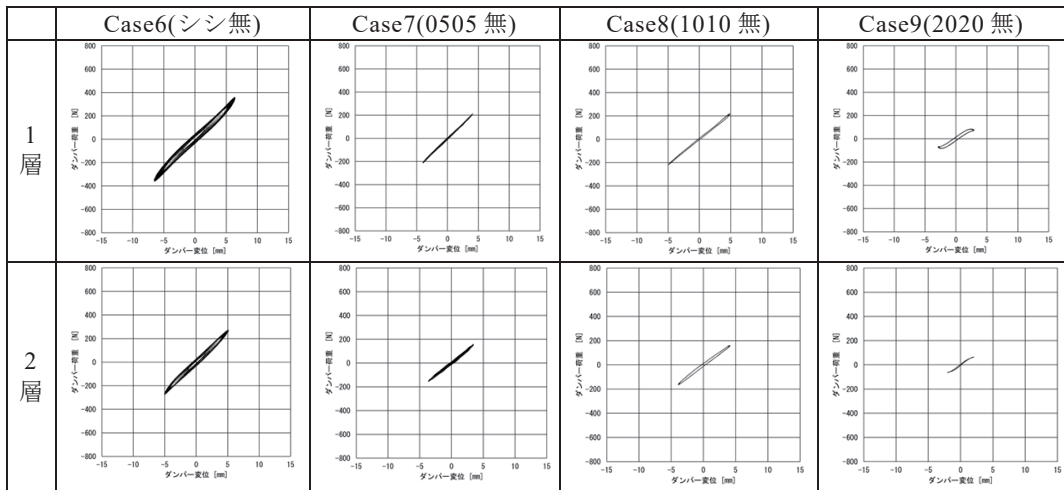


図 12 ダンパー荷重-変位関係 (case6・7・8・9)

参考文献

- 1) 畑中他：慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた多層骨組の振動応答特性その 1 試験体概要と振動台加振試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.863-864 2020-09
- 2) 畑中友：慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた制振骨組の振動応答特性，東北工業大学博士学位論文，pp.8,12 2017-03

慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた3層骨組の振動応答特性

(その2) 実験および時刻歴応答解析結果

東北工業大学大学院 小嶋健太郎

東北工業大学, 船木尚己

仙台高専 飯藤将之, 藤田智己, 水間巧大

1. はじめに

地震時における建物の応答を抑制することを目的として慣性質量効果を有する液流ダンパー¹⁾を提案し, その効果を1層の縮小骨組試験体による振動台加振試験と時刻歴応答解析により検証してきた^{例え²⁾}。本報においては, 本ダンパーが組み込まれた縮小3層骨組試験体による振動台加振試験の結果をシミュレーションするための時刻歴応答解析プログラムを作成し, 実験結果と解析結果の比較から, 解析手法の妥当性を検証することを主な目的とする。

2. 解析を行った対象実験の概要

その1で示した実験を基に解析を行った。液流ダンパーを1層もしくは1層と2層に組み込んで正弦波入力で加振試験を行った。加振レベルは25galとし, 1.0Hzから0.5Hzずつ変化させ, 10Hzまでとした。

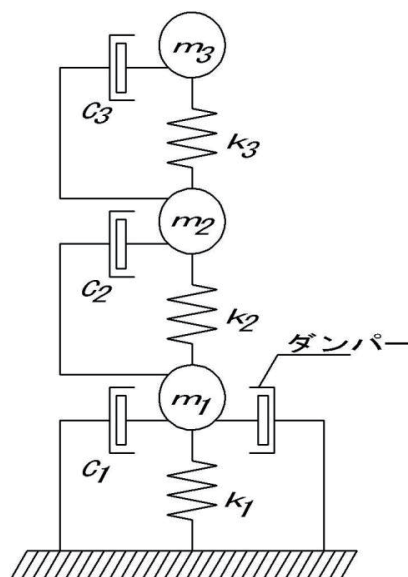


図1 解析モデル

3. 時刻歴応答解析

ダンパーが1層に配置された場合の解析モデルを図1に示す。解析モデルを基にした離散時間系の振動方程式は,

$$[\overline{M}_D]\{\ddot{x}\}_n + [\overline{C}]\{\dot{x}\}_n + [\overline{K}]\{x\}_n = -[\overline{M}]\{1\}x_{0n} - \{F_s + F_f\}_{n-1} \quad (1)$$

と導かれる。 \ddot{x}_n , \dot{x}_n , x_n はそれぞれ次のステップの加速度、速度、変位を表しており, $[\overline{M}]$, $[\overline{C}]$, $[\overline{K}]$ はそれぞれ質量マトリクス, 減衰マトリクス, 剛性マトリクスを表している。 $[\overline{M}_D]$ は質量効果が付加された質量マトリクスを表し,

$$[M_D] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta^2 m_{a1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表される。(2)式において、 m_a は連結管内の液体質量を、 β はピストンの有効断面積 A と連結管の断面積 a の比を表し、 $\beta^2 m_a$ が連結管内の液流による質量効果を示している。(1)式の右辺第1項の \ddot{x}_0 は地動加速度を、第2項の F_s と F_f は、それぞれシール材による抵抗力と液流による抵抗力を表しており、(3)式、(4)式のように表される。また、ダンパーの概念図を図2に示す。

$$F_s = C_s \dot{x} + K_s x \quad (3)$$

$$F_f = (\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3) \times A \quad (4)$$

(3)式において、 C_s 、 K_s はそれぞれ、シール材の減衰係数と剛性を示し、 \dot{x} 、 x はそれぞれピストンの速度と変位を表している。(4)式における ΔP_1 、 ΔP_2 、 ΔP_3 は連結管内の圧力損失で、流路形状が急激に変化する急縮小部と急拡大部の算出式はそれぞれ、

$$\Delta P_1 = \zeta \cdot \frac{\rho(\beta \cdot \dot{x})^2}{2} = \zeta \cdot \beta^2 \cdot \frac{\rho \cdot \dot{x}^2}{2} \quad (5)$$

$$\Delta P_2 = \frac{\rho(\beta \cdot \dot{x})^2}{2} = \beta^2 \cdot \frac{\rho \cdot \dot{x}^2}{2} \quad (6)$$

と表される。また、連結管内摩擦については、

$$\Delta P_3 = \frac{\rho \cdot L}{2D} u_m^2 \cdot f \quad (7)$$

と表される。

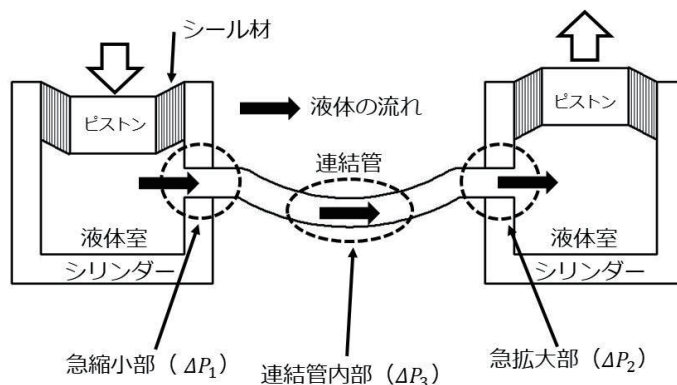


図2 ダンパー概念図

(5)式において ζ (=0.5) は流路形状により定まる係数を表している。また、(5)式から(7)式において液体の密度を ρ (=998.2kg/m³)としており、 L は連結管長さ、 D は連結管内径であり、値を表1に示す。 u_m は連結管内を流れる流体の平均速度を示しており、

$$u_m (= \beta \cdot \dot{x}_n) \quad (8)$$

と表される。(7)式の、 f は管摩擦係数を表しており、ダンパー単体による加振試験の結果から実験式として導かれる(表1)。なお、レイノルズ数 Re は、

$$Re = \beta \frac{u_m \cdot D}{\nu} \quad (9)$$

と表すことが出来る。ここで ν は動粘性係数を示しており、 ν は室温と同じ20℃の値を採用した。

4. 解析プログラム

解析には数値解析ソフトのMATLABを使用した。(1)式について数値積分法としてRunge-Kutta法を適用し、応答解析プログラムを作成した。解析はダンパーが付かないフレームのみの状態(Case1)とシール材のみのダンパーを組み込んだもの(Case2)、ダンパーを1層に組み込んだもの(Case4からCase6)について行った。解析プログラムのフローチャートを図3に、解析に使用したパラメータを表1に示す。フレームのパラメータはCase1の自由振動試験を行って得られた結果に基づき算出した値を採用している。ダンパーのパラメータについては、ダンパー単体の加振試験から得られた実験結果³⁾を参考にした。

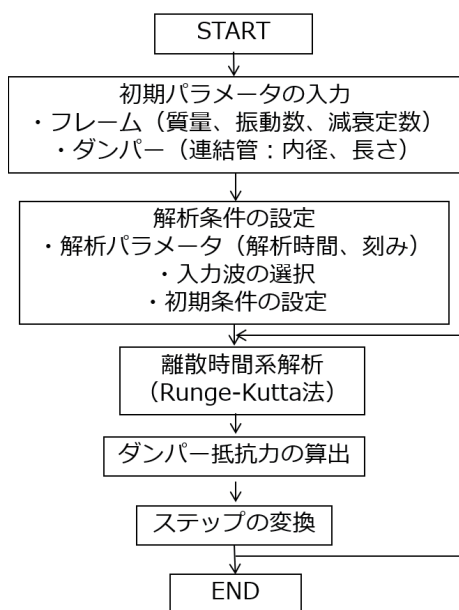


図3 フローチャート

表1 解析パラメータ
フレームのパラメータ

フレームのパラメータ		
質量 [kg]	$\begin{bmatrix} 34.9038 & 0 & 0 \\ 0 & 28.7038 & 0 \\ 0 & 0 & 23.5164 \end{bmatrix}$	
剛性 [N/m]	$\begin{bmatrix} 44497.2 & -22248.6 & 0 \\ -22248.6 & 44497.2 & -22248.6 \\ 0 & -22248.6 & 22248.6 \end{bmatrix}$	
減衰定数 [%]	$a_0[M] + a_1[K]$ (レーリー型減衰) a_0, a_1 は1.2%	
ダンパーのパラメータ		
ピストン有効半径 [m]	0.0220	
ピストン有効断面積 [m ²]	0.00152	
連結管内径 [m]	0.01	
連結管長さ [m]	0.5、1.0、2.0	
断面積比	19.36	
ダンパー抵抗力のパラメータ		
シール材	ばね定数 [N/m]	52432.2
	減衰定数 [N·sec/m]	66.9
管内摩擦 実験式 ($\varphi = 10\text{mm}$)	$L = 0.5\text{m}$	$f = 10611R_e^{-1.063}$
	$L = 1.0\text{m}$	$f = 1219.3R_e^{-0.88}$
	$L = 2.0\text{m}$	$f = 926.94R_e^{-0.899}$

5. 実験結果と解析結果の比較

実験結果と解析結果を比較した代表的な共振曲線の例を図4から図6に示す。

図4はダンパーの無い試験体の解析結果であり、1次、2次、3次とも実験結果とほぼ同じ周波数で応答倍率のピークが得られている。応答倍率の対応は不十分であるが、概ね振動特性を表現している。

図5は1層にダンパーを取り付け液体を入れてない試験体の解析結果であり、シール材による1次ピークシフトを精度よく再現している。2次、3次に関しては実験結果より柔らかめの周波数でピークを示しているが、ダンパー抵抗力のパラメータは概ね良い精度と考えられる。

図6は1層のダンパーに液体を封入した試験体の解析結果であり、1次ピークは対応がよいものの2次、3次はピークが再現できず、共振周波数付近で応答倍率に段差がつく結果となった。

6. まとめ

慣性質量効果を有する液流ダンパーが組み込まれた3層骨組試験体を対象に、その動的特性を解析的に把握するため、時刻歴応答解析プログラムを構築した。本報においては、構築した解析手法の妥当性を検証するために、解析結果を振動台加振試験により得られた結果と比較した。その結果、ダンパーを1層に配置した場合については、構築した解析プログラムによる結果は実験結果を概ね再現できることを確認した。

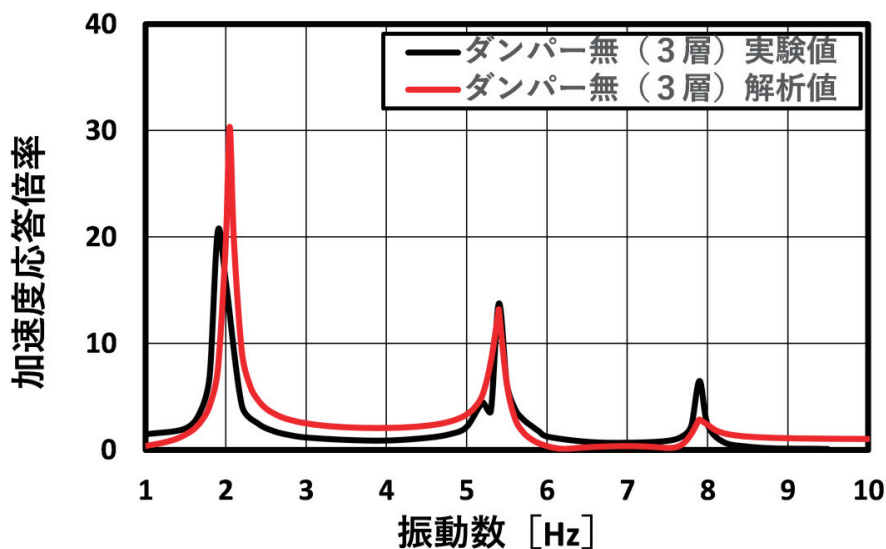


図4 共振曲線 (Case1 : 3層)

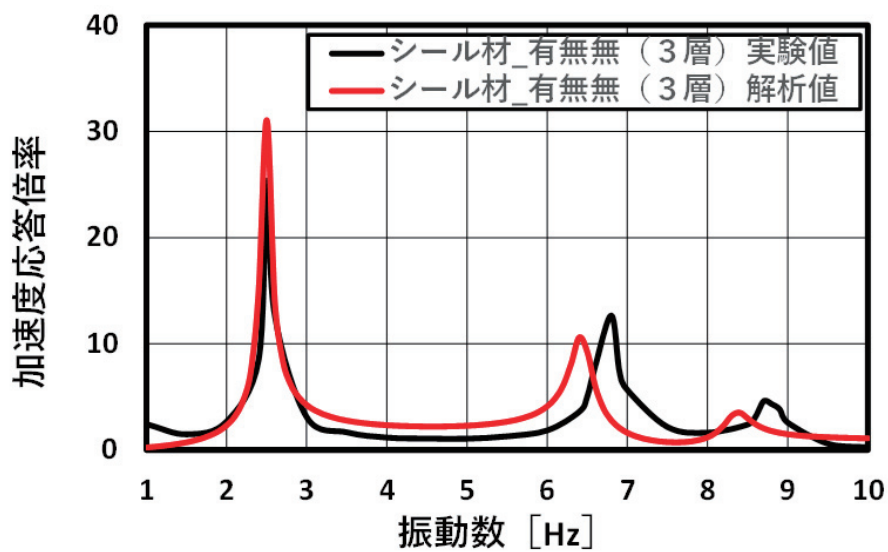


図5 共振曲線 (Case2 : 3層)

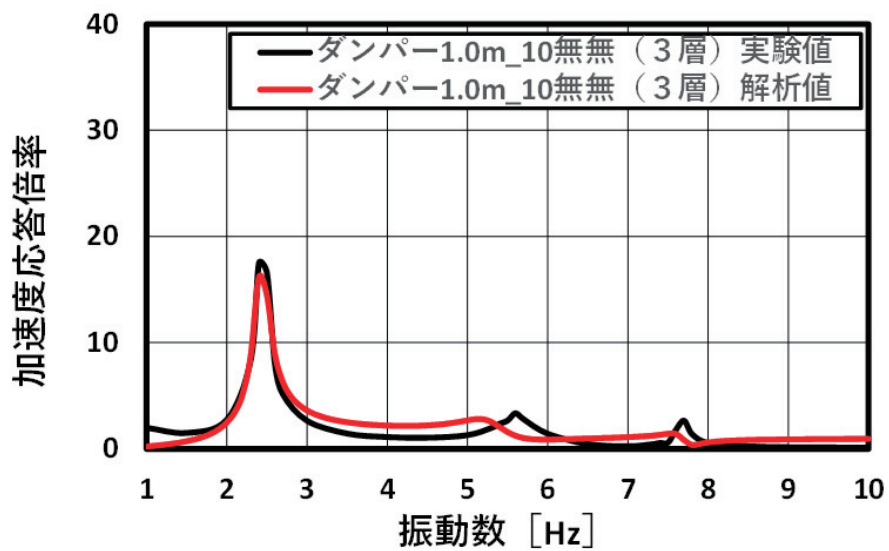


図6 共振曲線 (Case5 : 3層)

今後は、ダンパーが1層と2層に配置された場合の解析プログラムを構築するために、

Step1：質量効果が付加されたマトリクスの力学モデルの検討

Step2：より精度の高い実験値からの管内摩擦係数の算出

などを検討課題とし、ダンパーの取り付け状況を変えた解析を可能とすると共に、解析精度向上を図ることを目指す。

参考文献

- 1) 畑中友，船木尚己，藤田智巳：慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた多層骨組の振動応答特性（その1）試験体概要と振動台加振試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.863-864，2020.9
- 2) 畑中友，船木尚己：慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた1層制振フレームの振動応答特性（その4）地震応答解析の精度検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，21446，pp.891-892，2019.9
- 3) 畑中友：慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた制振骨組の振動応答特性，，東北工業大学博士学位論文，pp.8,12 2017-03

建築年代の異なる複数のブロックによって構成された建物の地震応答*

弘前大学大学院 地域共創科学研究科 水野 智貴
弘前大学 片岡 俊一

1. はじめに

弘前大学理工学部1号館（以下、「1号館」と記す）は、後述するように建築年代の異なる5個のブロックで構成されたコの字型の平面形状をした建物である。この建物では振動特性を知る目的で微動計測が行われている。その結果、各ブロックの固有振動数はほぼ等しいものの、振動特性は異なることが明らかになっている。

本研究では、地震計を1号館各所に設置して約2ヶ月の連続観測を行い、その記録中に含まれる地震記録を利用して、地震応答の特徴を検討した。

2. 建物について

1号館の平面図を図1、建物概要を表1に示す。図1に示すように、この建物は昭和42年から平成2年までに建設されており、建築年代の異なる複数のブロックが組み合わされた構造になっている。以下では、建築年代が異なるブロックを各々A～Eブロックと呼称する。A、B、Cブロックは地上4階建て、D、Eブロックは地上5階建て（Dブロックの一部は4階建て）のRC造である。A、B、Cブロックは平成11年、D、Eブロックは平成13年に耐震改修が行われている。骨組み形式は水平2方向ともにラーメン構造である。基礎はA、Bブロックが直接基礎、C、D、Eブロックが杭基礎である。また、C-Dブロック間とB-Eブロック間のみエキスパンションジョイントで接続されている。

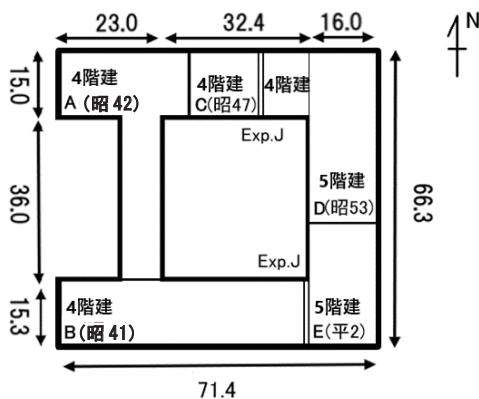


図1 1号館平面図

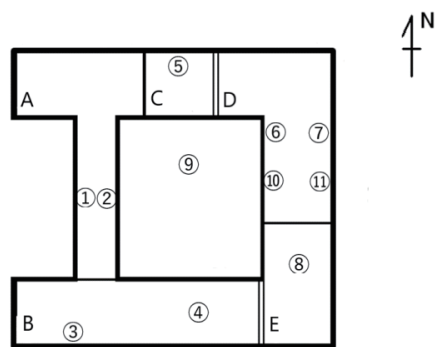


図2 地震計設置個所

*Seismic response of a building composed of several blocks of different construction ages

表1 1号館を構成する各ブロックの概要

ブロック番号	A	B	C	D, E
建設年月日	昭和42年	昭和41年	昭和42, 47年	昭和53年, 平成元年
延床面積 (m ²)	3497.27	1197.00	2717.65	6842.00
階層数	地上4階	地上4階	地上4階	地上5階 (一部4階)
高さ (m)	16.00	16.00	16.00	20.30
軒高 (m)	15.40	15.40	15.40	19.10

3. 地震観測

連続観測は、1号館の中庭・各ブロックの屋上・Dブロックの2階で行った。地震計の設置個所は図2の①～⑩の番号の位置である。①から⑧までは屋上、⑨は中庭の地表に地震計を設置している。⑩と⑪は2階部分に地震計を設置した。

用いた地震計は、Lennartz社製のLBS3-ATである。この地震計のセンサ感度は400V/(m/s)であり、A/D分解能は24bitである。GPS信号で時計の校正を行っているが、内部クロックの周波数精度は $\pm 5 \times 10^{-10}$ と非常に高いもので、地震計間の時刻差はほとんどないと考えている。

連続観測の期間は2021年10月28日から同年12月16日の49日間である。本研究では、この期間において青森県内で有感であった16個の地震に対応する時刻歴データを使用した。有感地震の検索には、気象庁が提供する震度データベース検索を利用した。

4. 伝達関数

それぞれの地震記録について、中庭を基準とした各観測点の伝達関数を求めた。その際、地震計を二つ設置したA、B、Dブロックでは二つの地震記録の相加平均を求め、それを用いて伝達関数を求めた。その後、ブロック毎に16個の伝達関数の振幅と位相の平均値を求めた。振幅の場合は振動数ごとの相加平均、位相の場合はそれぞれの位相を複素数に一度変換し、複素数の位相角を求め、その平均値としている。平均後の各ブロックの伝達関数の東西方向・南北方向成分を図3に示す。

伝達関数の位相差が-90度となる振動数が固有振動数と考え、図3に示した伝達関数の位相から、各ブロックの固有振動数を求めた。その結果を表2に示す。一般に、高さが異なる建物は固有振動数も異なるとされる。実際に、東西方向の固有振動数は各ブロックで異なる。一方で、南北方向の固有振動数は4.0Hzで一致している。つまり、対象建物の南北方向の固有振動数には、建物高さが影響しない特徴があるといえる。

東西方向の振幅の特徴として、C、Eブロックではピークが二つ存在する。位相については、C、Eブロックでは0度から-180度まで単調に変化していないことがわかる。

南北成分の伝達関数を見ると、すべてのブロックの振幅で4.0Hz付近に谷が存在している。位相については、変化が東西方向成分よりも急激である。

表2 各ブロックの固有振動数 [Hz]

ブロック番号	A	B	C	D	E
東西方向	3.6	3.7	3.4	3.4	3.7
南北方向	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

5. 考察

5-1 C, Eブロックの東西方向の振幅のピークと位相

振幅のピーク振動数は、Cブロックでは3.4Hzと4.3Hz、Eブロックでは3.4Hzと4.3Hzとそれぞれ二つ存在する。また、地表と屋上の位相差が-90度となる振動数は、Cブロックでは3.4Hzと4.1Hz、Eブロックでは3.7Hzと4.3Hzとなっている。この特徴の理由を、Cブロック、Eブロックと隣接するDブロックの伝達関数を比較して考える。

Dブロックでは位相差が-90度となる振動数は3.4Hzで、振幅のピーク振動数と一致している。この振動数は、Eブロックの振幅のピーク振動数3.4Hzと一致し、位相差が-90度となる振動数3.7Hzと近い値である。また、Eブロックのもう一つのピーク振動数である4.3Hzは、地表と屋上の位相差が-90度となる振動数でもある。このことから、Eブロックの3.7HzのピークはDブロックが固有振動数の3.4Hzで振動したときに、その振幅や位相が隣接するEブロックに伝達した影響が現れているのだと推測する。同時に、Eブロックの東西方向の本来の固有振動数は4.3Hz付近だと考えられる。

また、Cブロックの伝達関数の変化の特徴がEブロックに似ていることから、こちらもEブロックと同様に、隣接するDブロックまたはAブロックの影響が現れた結果と考えられる。

5-2 南北方向の振幅のピーク付近の谷

伝達関数の位相より、1号館のすべてのブロックにおいて南北方向の固有振動数は4.0Hzであるとしたが、この振動数付近において伝達関数の振幅には谷が生じている。この谷の原因を、考えるために地震波形を比較してみた。

図4は2021年11月3日にA, B, Cブロックで観測した地震波形を重ねたものである。この波形の振幅を比較すると、21秒付近ではCブロックの振幅がA, Bブロックのものより大きいことがわかる。一方で、27秒付近ではA, Bブロックの振幅がCブロックよりも大きくなっている。この例以外でも、同じように位相は同じであるものの、振幅の大小関係が異なる様子が複数確認できた。このことから、1号館に地震が入力した場合、ブロックごとに振幅が大きくなるタイミングに差が生じることがわかる。また、伝達関数のグラフより、各ブロックは南北方向の固有振動数こそ同じだが、詳細に比較すると振幅の大きさが異なることからわかるように、伝達関数が全く同じではない。

一号館の各ブロックは振動特性がわずかに異なることで、各ブロックが地震により振動するタイミングと振幅にわずかな差が生じている。これが原因となってブロック間で振動エネルギーの伝播が起きていると推測でき、その為に固有振動数の4.0Hz付近で振幅に谷が生じたと考えられる。

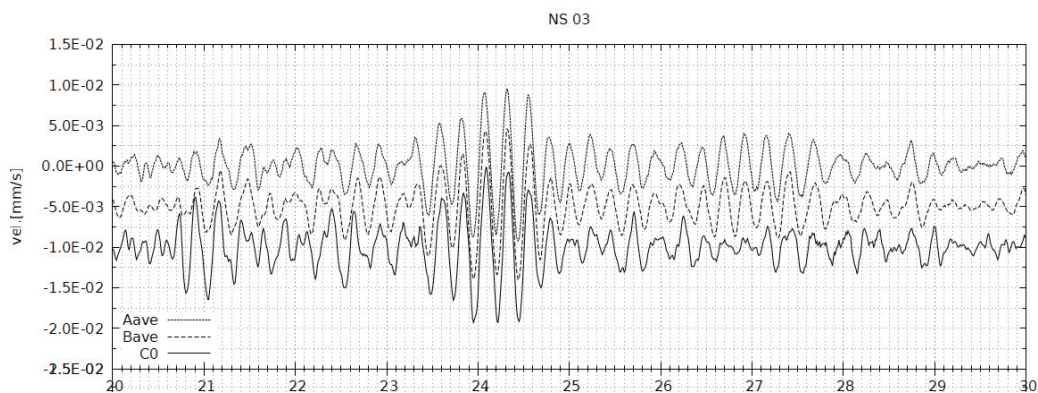


図4 A, B, Cブロックで観測した地震波形

6. まとめ

建築年代の異なる複数のブロックで構成された建物である弘前大学工学部1号館で地震連続観測を行い、得られた地震記録から中庭に対する各ブロック屋上の伝達関数を求め、それをブロック同士で比較することで1号館の地震応答を検討した。

伝達関数の位相に着目して各ブロックの固有振動数を求めた。その結果は、南北方向にはすべてのブロックで4.0Hzであった。ただし、伝達関数の振幅に着目すると4.0Hz付近にはすべてのブロックで谷が見られた。つまり、南北方向では、建物高さが固有振動数に影響していないが、振動特性が全く同じわけではない。1号館の各ブロックは固有振動数こそ同じだが、減衰がやや異なるためだと思われるが、地震時には各ブロックで振幅の大きさや揺れるタイミングにわずかな差が生じ、ブロック同士で振動エネルギーの伝播が生じているものと考えている。そのエネルギー伝播の影響が4.0Hz付近の振幅の谷に表れていると思われる。

東西方向の固有振動数は、ブロック毎に異なり3.4Hzから37Hzの間になった。隣接ブロックの影響が窺われ、Eブロックの伝達関数の振幅には二つのピークがあったが、一方はDブロックの固有振動に対応していると解釈している。

参考文献

- ・ 震度データベース検索 <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html>
- ・ 福和伸夫・飛田潤・平井敬 共著 : 耐震工学 教養から基礎・応用まで, 講談社, 出版日 2019年3月19日, 304ページ, ISBN 978-4-06-514819-8

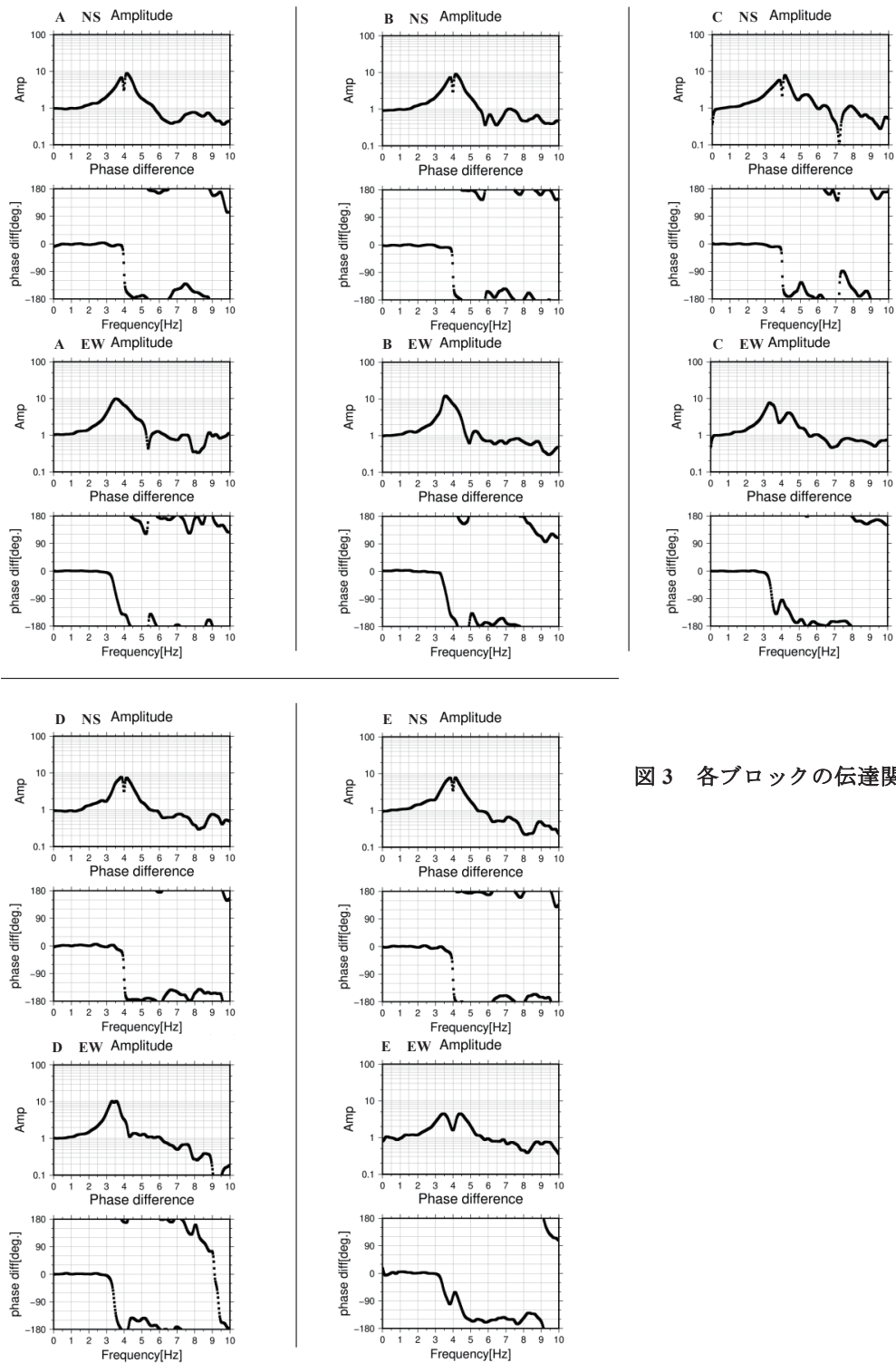


図3 各ブロックの伝達関数

2 方向地震動を受ける鉄骨置屋根構造の屋根支承部への作用応力

阿部彩加(仙台高等専門学校専攻科) 藤田智己(仙台高等専門学校)
船木尚己(東北工業大学) 飯藤將之(仙台高等専門学校)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震など、近年多発している地震によって鉄骨置屋根構造を有する空間構造物が構造的被害を受け、避難所としての機能を果たせなくなっていることが問題となっている¹⁾。これまでに被害の発生メカニズムの検討²⁾⁻⁵⁾が精力的に行われ、耐震診断法⁶⁾の提案もされているが、これらの成果は1方向の地震入力の結果が基であり、2方向地震動の影響については考慮されていない。

本研究では立体解析モデルによる地震応答解析を実施し、2方向地震動入力による影響について、置屋根支承部に作用するせん断応力(以降、支承部反力とする。)を明らかにするとともに、その推定方法について検討を行う。

2. 解析モデルの概要

解析には構造システム SNAP Ver.7を使用する。解析モデルを図1示す。鉄骨屋根を支持する下部構造が梁間方向(Y方向)41.5m、桁行方向(X方向)40.0mのRC造架構、屋根は円形鋼管を用いた山形の立体トラス構造で、比較的規模の大きな公共施設の体育館を想定している。また、支承部をY1とY9構面の柱頭に1構面9カ所の計18

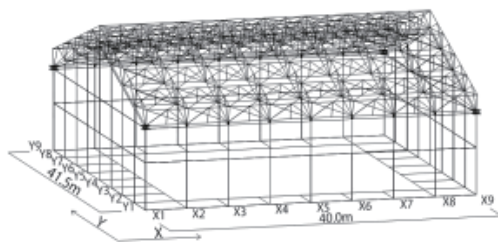


図1 解析モデルの概要

カ所で屋根を支持する2辺支持型モデルを設定している。屋根勾配は3/10となっており、妻面はトラス梁下までRC造壁が立ち上がっている。断面寸法は柱:B×D=700×1,200、基礎梁:b×D=550×1,500、メイントラス(中央部)は上下弦材:267.4φ×9.0、斜材:139.8φ×4.0、束材:101.6φ×3.2、メイントラス(端部)は上下弦材:267.4φ×6.0、斜材:139.8φ×4.0、束材:101.6φ×3.2、屋根ブレース:L-75×75×6で構成されている。架構を構成するすべての部材は弾性と仮定し、減衰は瞬間剛性比例型として、減衰定数はRC下部構造を3%、S造の屋根部分を2%に設定している。アンカーボルトを用いた従来の支承部についてはピン接合と仮定し、せん断および軸方向に対して十分に大きな剛性を付与した回転スプリングによりモデル化している。

地震波応答解析に用いる入力地震動は、最大速度を50cm/secに基準化した1940年Imperial Valley地震(エルセントロ波)、1952年Ken County地震(タフト波)、1968年十勝沖地震(八戸波)、1978年宮城県沖地震(東北波)、BCJ-L2の5種類とし、入力方向は梁間方向、桁行方向、2方向入力の3種類としている。

* Stresses acting on the roof bearing of gymnasium structure subjected to earthquake motion in two directions by Sayaka ABE, Tomomi FUJITA, Naoki FUNAKI, Masayuki HANDOU

3. 固有値解析結果

本構造の基本的な振動特性を確認するために固有値解析を行った。固有値解析により得られた主要な 15 次モードまでの固有周期と有効質量の一覧を表 1 に、主要な固有モードを図 2~3 (Y 構面, Z 構面) に示す。

X 方向の主要な振動モードである 1 次, 6 次モードは, 屋根部および Y1, Y9 構面の下部構造は振動せず, X1, X9 構面の妻面の壁だけが独立して振動するモードとなっている。また, 10 次モードは屋根と桁行の架構が振動し, 屋根面は中央ではらみだすモードとなる。

Y 方向の主要なモードである 8 次, 15 次モードは, とともに中央ではらみだすような形状で振動し, 屋根は逆対称の振動モードとなっている。

4. 地震応答解析結果

X, Y 方向の地震入力に対して発生する X, Y 方向の支承部反力の最大値を表 2 に, 各入力方向に対して全支承部の中で最大反力を記録する同時刻の支承部反力分布を図 4 に示す。なお図 4 は, 代表的な例として, エルセントロ波, 八戸波を示す。

X, Y 方向それぞれの地震入力に対して, 支承部反力は X, Y 両方向発生している。X 方向入力の場合では, X 方向支承部反力は X2 から X8 で同程度な値となり, X1, X9 はその半分程度にな

表 1 固有値解析結果

次数	周期 [sec]	有効質量比(%)		
		M_X	M_Y	M_Z
1	0.59	25.77	0	0
2	0.59	0	0	0
3	0.40	0	0	0
4	0.40	0	0	0
5	0.35	0	0	8.50
6	0.30	9.94	0	0
7	0.30	0	0	0.01
8	0.24	0	34.12	0
9	0.29	0.04	0	0
10	0.29	19.33	0	0
11	0.22	0	0	0
12	0.22	0	0.11	0
13	0.18	0	0	0
14	0.18	0	0	0.10
15	0.18	0	4.42	0

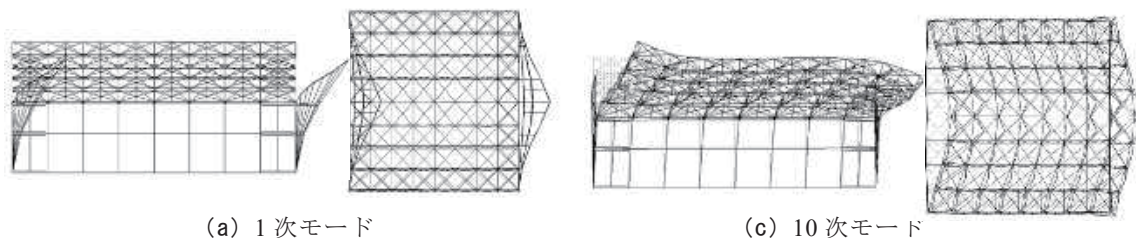


図 2 X 方向主要モード (Y 構面, Z 構面)

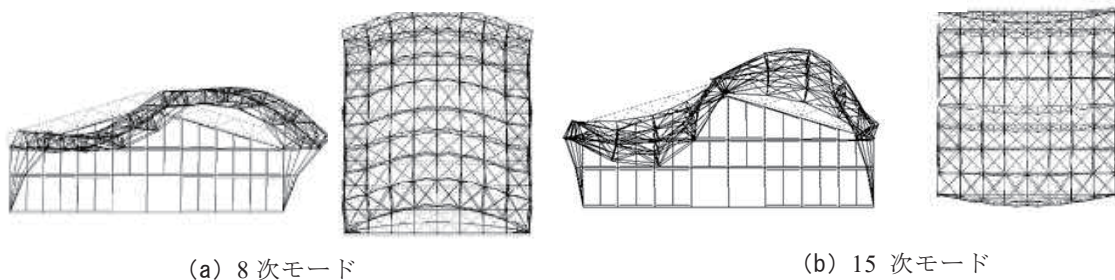


図 3 Y 方向主要モード (Y 構面, Z 構面)

っている。また、Y方向支承部反力はX5で0、X4からX2およびX6からX8にかけて徐々に大きくなり、X1、X9は極めて大きな値を示している。また、その大きさと向きはX5を中心とした点対称となっており、回転作用にとまなうものと示唆される。

Y方向入力の場合では、X方向支承部反力はX5で0、X4からX2およびX6からX8にかけて徐々に大きくなっており、X1、X9はX2、X8の2/3程度となっている。Y方向支承部反力はX5を中心に線対称となっており、X1、X9は極めて大きな値を示している。

両方向の地震入力に対してX1、X9支承部には極めて大きなY方向反力が発生することが確認できた。また、その際の振動モードは、固有値解析結果の8次、10次の振動モードであった。

表2 各支承部反力の最大値 [kN]

(a) エルセントロ波

入力方向	反力方向	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X	X	91.04	183.85	185.96	178.69	178.33	178.74	186.06	183.98	91.13
	Y	393.52	43.78	8.74	3.53	0	3.37	8.85	43.69	394.25
Y	X	107.74	150.51	133.76	70.47	0	70.47	133.76	150.51	107.74
	Y	843.25	60.71	37.05	42.79	50.19	42.79	37.05	60.71	843.25

(b) 八戸波

入力方向	反力方向	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X	X	72.53	149.03	148.16	143.3	144.22	143.26	148.06	148.9	72.44
	Y	306.6	32.33	7.31	1.38	0	1.33	7.44	32.24	305.88
Y	X	46.58	60.99	49.45	24.07	0	24.07	49.45	60.99	46.58
	Y	365.27	28.7	18.63	13.57	15.53	13.57	18.63	28.7	365.27

(c) タフト波

入力方向	反力方向	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X	X	92.53	183.05	180.58	175.71	177.03	175.66	180.48	182.92	92.43
	Y	389.54	40.39	8.16	2.56	0	2.72	8.03	40.3	388.82
Y	X	86.78	112.7	90.71	44.97	0	44.97	90.71	112.7	86.78
	Y	682.85	47.9	33.28	25.46	30.74	25.46	33.28	47.9	682.85

(d) 東北波

入力方向	反力方向	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X	X	46.6	102.12	100.16	94.06	93.48	94.02	100.06	101.99	46.5
	Y	167.66	36.33	7.58	1.24	0	1.26	7.71	36.24	166.94
Y	X	58.7	75.25	59.24	27.75	0	27.75	59.24	75.25	58.7
	Y	463.89	30.78	20.58	13.38	15.84	13.38	20.58	30.78	463.89

(e) BCJ波

入力方向	反力方向	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X	X	80.47	160.7	155.97	150.64	151.68	150.68	156.07	160.83	80.56
	Y	336.41	39.81	8.03	2.53	0	2.41	8.15	39.72	337.13
Y	X	85.47	109.52	86.1	41.27	0	41.27	86.1	109.52	85.47
	Y	674.52	43.28	26.6	25.46	31.17	25.46	26.6	43.28	674.52

5. 現行耐震診断法と地震応答解析の比較

本解析モデルの地震応答解析結果において極めて大きな支承部反力が発生した X1, X9 支承部の Y 方向反力について、現行の耐震診断法の結果と地震応答解析結果の比較を行う。

現行の耐震診断法⁶⁾は、屋根と RC 下部構造の柱頭が一体となっているピン支承の場合、図 5 に示すような構面外応答に対して、置屋根を支持する RC 片持架構の自立性を、応答加速度 α_R に片持架構上部の重量 m_{Ri} を乗じて得た地震力 $\alpha_R m_{Ri}$ を柱の耐力との比較により検討する。地震力が柱の耐力を上回り、RC 片持架構が自立しない場合には、図 6 に示すように不足分の応力として下部構造から屋根に伝わる水平力 R_a として支承部および屋根ブレース構面を通じて側面架構に伝達される。側面支承部には、この水平力 R_a と屋根に作用する地震力 Q_R が作用し、側面支承部の耐力と比較されることとなる。

現行の耐震診断法⁶⁾に倣って算出した X1, X9 の Y 方向支承部反力 R_b について、本解析モデルの構成部材を弾性と仮定しているため、RC 片持架構が自立したケースとして、屋根に作用した地震力 Q_R のみが側面架構へ伝達されるケース (CASE1), RC 片持架構が自立しないケースとして、屋根に作用した地震力 Q_R に RC 片持架構に作用する地震力 $\Sigma \alpha_R m_{Ri}$ をすべて加えたケース (CASE2) の 2 ケースを算出する。

本解析モデルにおいて α_R は、 $F_{G Ai}(R_t)=1.4, Z=1.0, R_t=1.0, A_i=1.0, F_h=1.0, C_0=1.0$ として、

$$\alpha_R = F_{G Ai}(R_t) \times Z \times R_t \times A_i \times F_h \times C_0 = 1.4 \quad (1)$$

となり、RC 片持架構として Y1, Y9 構面に作用する地震力 $\Sigma \alpha_R m_{Ri}$ は 1222.84kN となる。ここで、 $F_{G Ai}(R_t)$ は RC 片持架構の応答増幅係数、 Z は地域係数、 R_t は振動特性係数、 A_i は地震層せん断力分布係数、 F_h は応答低減係数、 C_0 はベースシア係数である。また、屋根に作用する地震力 Q_R は、 $Z=1.0, R_t=1.0, A_i=1.0, C_0=1.0$ 、屋根部の増幅¹⁾として中央部に水平応答率 $F_H=1.6$ を考慮して、2024.13kN となる。

X1, X9 支承部の 1ヶ所あたりの支承部反力は、屋根に作用した地震力 Q_R のみが側面架構へ

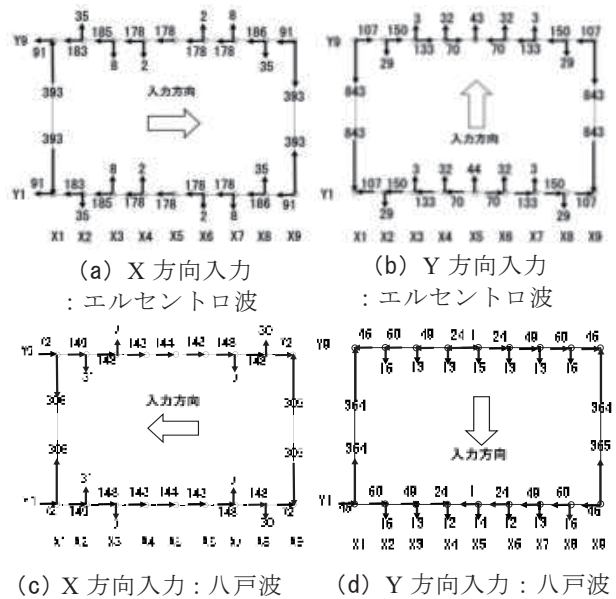


図 4 支承部反力分布 [kN]

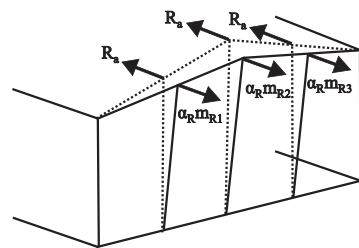


図 5 RC 片持ち架構の構面外応

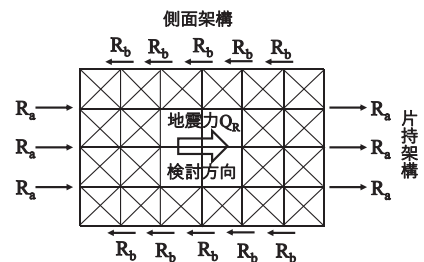


図 6 側面支承部反力への伝達

伝達されるケース（CASE1）では、

$$2024.13 \text{ kN} / 4 \text{ ヶ所} = 506.03 \text{ kN} \quad (2)$$

屋根に作用した地震力 Q_R に、RC 片持架構に作用した地震力 $\Sigma \alpha_R m_{Ri}$ をすべて加えたケース (CASE2)では、

$$506.03 + 1222.84 / 2 \text{ ヶ所} = 1117.45 (\text{KN}) \quad (3)$$

となる。

現行の耐震診断法⁶⁾に倣って算出した X1 支承部の Y 方向反力について、屋根に作用した地震力のみが伝達された CASE1、屋根に作用した地震力と RC 片持架構妻面に作用した地震力すべてが屋根に伝わり加わった CASE2 とともに、地震応答解析によって得られた、Y 方向および 2 方向入力の結果を図 7 に示す。

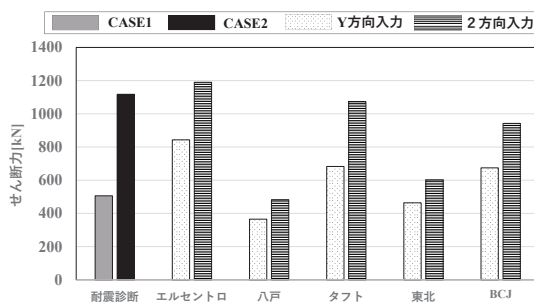


図 7 X1 支承部の Y 方向反力

すべての地震波において、Y 方向入力に比べ 2 方向入力の支承部反力は大きくなっている。

また、2 方向入力の結果は、現行の耐震診断法⁶⁾で安全性を過大評価した CASE2 の結果より大きくなるケースも確認でき、現行の耐震診断法⁶⁾をはじめ、1 方向入力の結果に基づき設計し安全性が確保された支承部では、耐力不足により被害が発生する可能性が高い。

6. 妻面支承部反力の推定

本解析モデルにおける Y 方向入力時に発生する X1, X9 支承部の Y 方向反力は、現行の耐震診断法⁶⁾で評価され、その妥当性も検証されている¹⁾が、X 方向入力で発生する支承部反力は考慮されない。ここでは、本解析モデルにおいて X 方向入力に対して発生する妻面 (X1, X9 支承部) の Y 方向支承部反力を以下 2 つの方法により推定を試みる。

6.1. 推定方法その 1

図 4 より確認された X5 支承部を中心とした点対称の支承部反力分布を考慮し、屋根面の地震力に起因する Y1 構面の回転作用 (曲げモーメント) を利用して推定する。

X 方向入力に対して、屋根部の各節点には慣性力 F_{Xi} が

$$F_{Xi} = m_i \cdot \ddot{x}_i \quad (4)$$

として作用する。ここで、 m_i は屋根の節点重量、 \ddot{x}_i は屋根各節点の絶対加速度である。この慣性力 F_{Xi} は Y1 構面に対し

$$M = \sum_{i=1}^N F_{Xi} \cdot L_{Yi} \quad (5)$$

のモーメントを作用させるものと考えられる。ここで、 L_{Yi} は慣性力が作用する位置から Y1 構面までの距離である。Y1 構面に生じるモーメント M を X1 から X9 支承部までの長さ L_X で除することで X1, X9 支承部の Y 方向反力が求められる。

6.2. 推定方法その 2

本構造を材料力学的な観点に基づき、図 8 に示す様な矩形の薄肉中空閉断面材と仮定し、薄肉断面材の力学（せん断流理論）を利用して推定する。

矩形の薄肉中空閉断面材に X 方向のせん断力が作用した場合、板厚の中心線に沿うせん断力を τ とすれば、これに板厚 t_w を乗じたせん断流れ($q=\tau \times t_w$)が板厚の中心線に沿って流れ、その応力分布図は図 8 のようになる。本解析モデルにおいて、X 方向入力に対して、平行な Y1 と Y9 構面には、壁の長さに比例したせん断力が流れ、壁 1m あたりに作用するせん断力の応力分布は $q=36.35\text{kN}$ となる。4 隅の Y 方向支承部反力はせん断応力分布図（図 8）における三角形の面積として求められる。

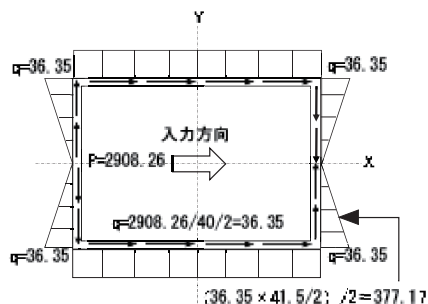


図 8 せん断力応力分布図
：エルセント波

6.3. 解析結果と推定方法の比較

表 3 に地震応答解析結果および上述した 2 つの推定方法で求めた Y 方向支承部反力を示す。両推定方法とも解析結果の 1 割程度の誤差であり、推定方法その 1 については、安全側の評価として推定可能であることがわかった。

表 3 X1 支承部の Y 方向反力 [kN]

	解析結果	推定方法 1	推定方法 2
エルセントロ	393.53	469.98	377.17
八戸	306.60	329.66	302.66
タフト	389.54	448.89	372.65
東北	167.66	222.66	201.50
BCJ-L2	336.41	375.45	322.76

7. おわりに

地震の入力方向に対し直行する方向の支承部反力の存在が明らかとなり、特に X1, X9 支承部の Y 方向反力は 2 方向の地震入力の影響を受けて極めて大きな反力となることがわかった。加えて、本論で提案する推定方法により、支承部反力の推定が可能であることを確認できた。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(C)（課題番号：21K04617，研究代表者：藤田智己）の助成を受けて実施されました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本建設技術高度化機構 他：鉄骨置屋根構造の耐震診断・改修の考え方，技報堂，2015.9
- 2) 成田和彦，竹内徹，松井良太：RC 妻面架構を有する鉄骨置屋根体育館の耐震性能，日本建築学会構造系論文誌，第 78 巻，pp.1895-1904，2013.11
- 3) 山田哲，松本由香 他：繰り返し荷重を受ける鉄骨置き屋根定着部の実験 鉄骨置き屋根定着部に関する研究 その 1，日本建築学会構造系論文誌，第 79 巻，pp.1687-1697，2014.11
- 4) 藤田智己，鈴木敦詞，木村祥裕：静的増分解析による鉄骨置屋根空間構造物の損傷メカニズムの検討，鋼構造年次論文報告集，第 22 巻，pp.447-452，2014.11
- 5) 伊藤賢治，山下哲郎，渡辺俊也：置屋根支承部の繰返しせん断加力実験と耐力評価，日本建築学会構造系論文誌，第 84 巻，pp.649-657，2019.5
- 6) 日本建築学会：ラチスシエル屋根構造設計指針，2016.11

集客施設による避難訓練の取組みと観光危機管理の観点からの考察*

東日本大震災・原子力災害伝承館 山田 修司

1. はじめに

本稿は、集客施設において実施される避難訓練の事例集積に資すること、および、その考察を目的とするものである。そのために、まず前半部において筆者が所属する福島県双葉郡双葉町に存する施設（「東日本大震災・原子力災害伝承館」、以下「事例施設」と記載）において2022年8月29日（月）に実施された、地震津波を想定した避難訓練（以下、「津波避難訓練」と記載）を事例施設の概要とともに訓練の実施概要を報告する（2・3節）。次に後半部で、そうした集客施設の抱える課題などに関して、社会科学的観点、特に「移動研究」を参照点に「観光と危機管理」をキーワードとして考察を加える（4節）。

集客施設においては各種の法令に定められた各種の避難訓練が実施されている。その一方で、その事例・実践報告は極めてアクセスしにくい状況にある。その背景に、避難訓練の実施は必要条件ではあるものの、公開を想定した報告までは日常業務外であり、またそのような時間や人材が不足している、あるいは施設管理上の防犯といった問題が想定される。そうした状況へは法政策論・行政学等からの課題が指摘されうるかもしれないが、本稿では扱わない。

事例集積が防災に資するものと本稿では想定する（図1）が、本稿では津波避難訓練の評価は行っていない。しかし上記の状況をふまえて本稿それ自体が一つの実践報告として資すると考えている。また実践報告はある種の情報公開の側面も有していることをふまえて、社会科学的観点がいくつかの有効な示唆を与えられると思われる。

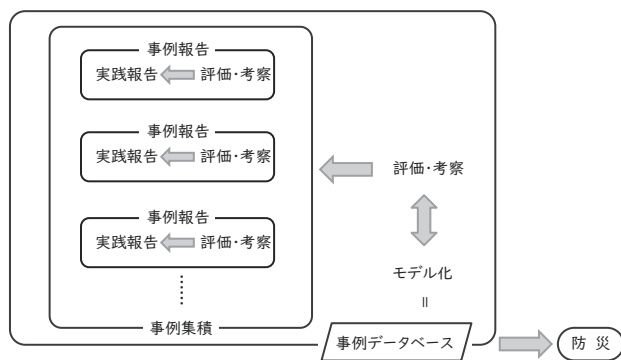


図1 事例集積から防災へ

日付	出来事
令和2年度 9月20日	開館
10月12日	来館者数1万人
2月14日	2/13福島県沖地震による臨時休館
2月15日	2/13福島県沖地震による臨時休館
令和3年度 5月3日	来館者数5万人
9月20日	開館1周年
3月17日	3/16福島県沖地震による臨時休館
3月14日	来館者数10万人
令和4年度 4月1日	(常任研究員着任)
9月20日	開館2周年
10月19日	来館者数15万人

表1 事例施設のあらまし

2. 事例施設の概要

事例施設は、2020年9月20日に開館した。通常は火曜日および年末年始を休館日として、

*Evacuation Drill at a Visitor Facility and its Consideration from the Perspective of Tourism Risk/Crisis Management by Shuji Yamada

それ以外の土曜日・日曜日，祝日も営業している（表 1）。開館からすぐに新型コロナウイルス感染症への対策を要請される状況にあるものの，2022 年 10 月 19 日には来館者が 15 万人を越えた（図 2）。年間で変動はあるものの，平日に団体客，土・日曜日に非団体客が多い傾向にある。来館者が最大で 1 日に 1,000 人を越える日もある。また，調査・研究部門が設置されており，2022 年 4 月より執筆者を含む常任研究員 4 名が着任した。

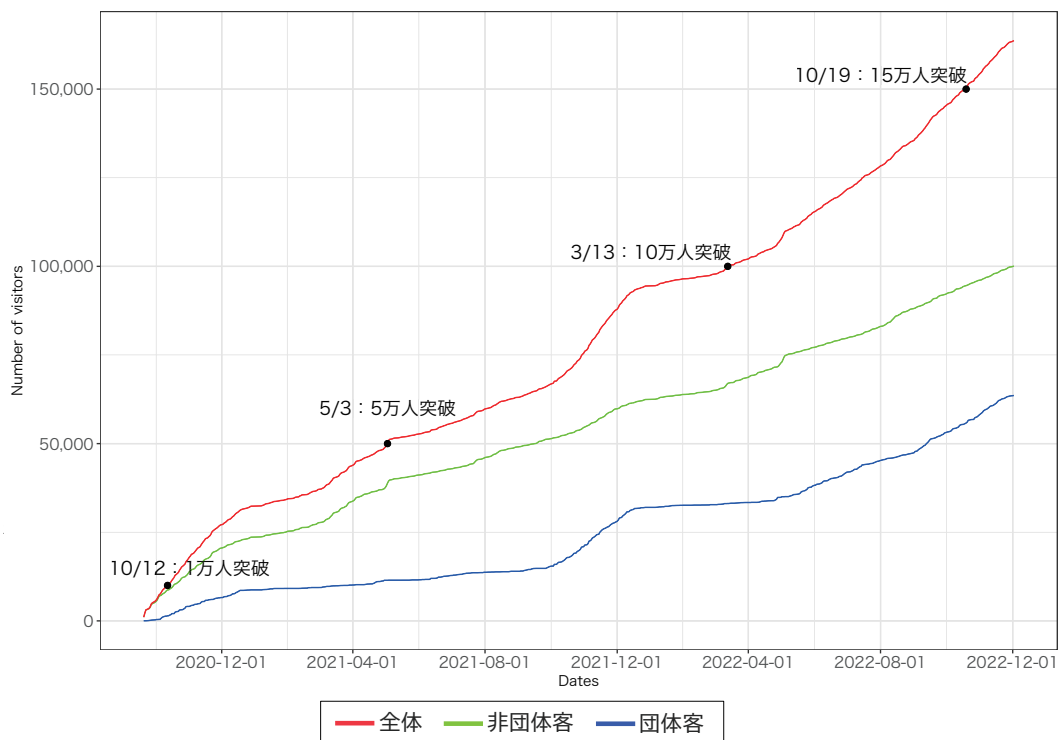


図 2 来客数の累積推移（出典：事例施設提供データより筆者作成）

3. 津波避難訓練の概要

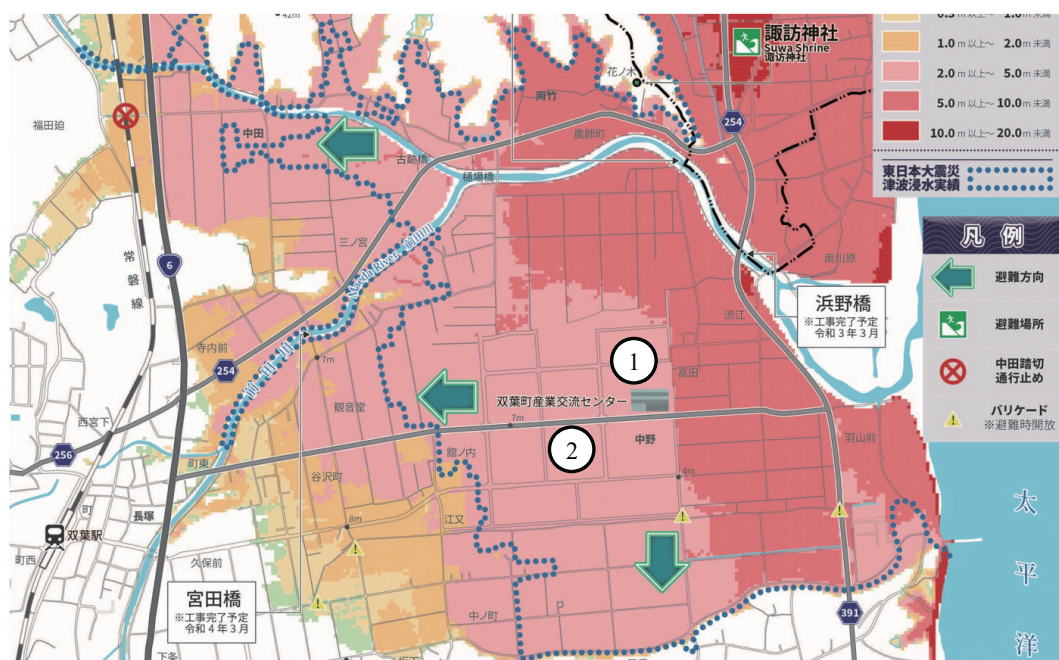
事例施設での避難訓練は，消防法令上の必須の訓練として位置づけられ，年 2 回実施されており，夏季に津波避難訓練を，冬季に防火訓練を予定している。訓練の実施にあたっては施設管理を担当する職員が中心となり執り行われる。今回は担当者，筆者を含む各部署より選出された数名の職員が構成員となって実施前に 2 回の検討・意見交換会がなされた。

津波避難訓練は 2022 年 8 月 29 日（月）に実施された。津波避難訓練は，（1）スタッフによる避難誘導の訓練と（2）館内での車椅子使用の訓練を行った。訓練立案の材料となる立地自治体のハザードマップ（図 3）と，避難誘導の流れを表 2 に記す。避難誘導の訓練の終了の後に，全員で再び館内に移動し，車椅子を用いた避難訓練を行った。介護福祉士の有資格者を講師にお招きし，車椅子利用の来館者を想定した「基礎的な車椅子の扱い方」，「車椅子利用者への接し方」，「館内での動きの注意点」などを受講した。避難訓練の最後には，消防署職員から

全体への講評を聴講した。避難誘導の訓練の講評は「小走りでよい」, 「率先避難は重要だが誰が誘導者かわかりにくい」, 「館内入場者数と避難者数の一致をどうするか」といった点が指摘された。

時刻	行動	備考
16:30	最終入館	
17:00	閉館	
17:15	業務終了	
17:25	訓練準備	
17:30	訓練開始	訓練開始合図(スタッフ無線) →館内放送(地震の発生、情報収集、待機要請) →大津波警報のため避難誘導指示(スタッフ無線) →避難の呼びかけ(館内放送) →避難誘導(スタッフ)・避難(来館者役)
17:35	報告者(=成人男性の来館者役)が避難場所に到着	配役に「車イス利用者(実車)」あり
17:40	最終退館者(事業部長)が避難場所に到着	避難場所で人数確認用の「カード」を配布

表 2 津波避難訓練(避難誘導の訓練)の流れ



①事例施設 ②一時避難場所

図 3 ハザードマップ(双葉町「津波ハザードマップ」を筆者加工)

4. 社会科学的観点からの考察

本節では社会科学的な観点、特に移動研究 (cf. アーリ 2015 ; 吉原 2022) からの示唆を述べる。上記報告した津波避難訓練での消防署職員による講評の最後の点 (館内入場者数と避難者数の一致) に注目したとき、事例施設単体での対策は現時点では困難と思われる。なぜならば、隣接する別の公的集客施設も水平避難を避難想定しており、加えて近隣区画では多くの民間の事業所の立地が進んでいるからだ。事例施設を含む当該地域に日常的な「居住者」はいない (注: 津波避難訓練当時。同年 8 月 30 日に避難指示が一部解除された)。このような地域における防災を考慮するとき、観光をキータームとして移動研究からいくつかの有効な示唆が与えられる。

事例施設をある種の観光施設と把握するならば、図 4 のように「地域」を理解できるとしよう。観光と防災の関連については、「観光危機管理 (Tourism Risk/Crisis Management)」という語がある。国内での観光危機管理への言及は、狭義には、JTB 総合研究所や観光庁などによる定義やマニュアルがある (高松 2018 : 観光庁 2021 ; 観光庁 2022a)。そのなかには観光と BCP (事業継続計画) との連続性を踏まえた論点もある (高松 2018 ; 朝倉 2021)。広義には、災害対策基本法」をはじめとして「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法」、「津波防災地域づくりに関する法律」といった法令により国・自治体に課せられた各種の「計画」の定めの中なかで、観光 (客) の防災を位置付ける必要があり、その現状を整理する研究もある (押田ほか 2018)。本稿では観光庁等による使用に限らない広い意味で観光危機管理を用いるとする。

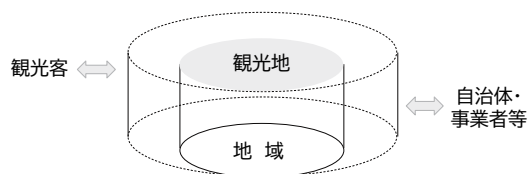


図 4 地域と観光地の重なりと拡がり

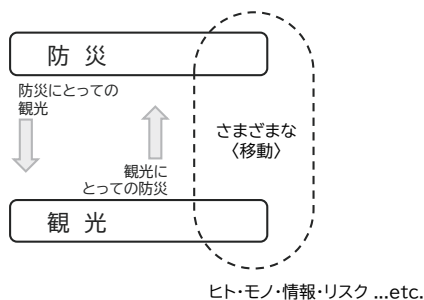


図 5 防災と観光のそれぞれ

危機管理の方策を考えると、「manage」の主体・対象が論点となりうる。つまり観光を「危機管理する」というときの主体は国・自治体・事業者による／個人によるものなのか？「manage」の対象 (またはフェーズ) は「risk」か「crisis」なのか？といった事柄は一つの重要な論点となりうる。本稿では、具体的な方策ではなく、どのような枠組みが有効なのか、考察する。

観光はまずもってヒトの移動をとまなう。マクロ・レベルでの移動は、ある程度に観測されており ((公財) 日本交通公社 2022, 観光庁 2022b), また新型コロナウイルスのもとでマイクロ・ツーリズム (道府県内・近隣地域内) のトレンドが先の調査で指摘されている。

社会科学的な移動研究が示唆するのは、「移動 mobility」をヒトだけでなく、「モノ」や「情報」も含めた多種多様な「移動 mobilities」としての理解である。こうした「移動」に「リスク」を加えることも可能であろう。観光の危機管理によって実現されるべき状態を、それが主体であれ対象であれ、「観光客が安全に移動できる・移動を選択できる状態」と定式化してみよう (注: 高松 2018 : 7ff による観光危機管理の定義では、観光客・旅行者と観光関連産業を対象と

している。本稿でも参考としたが、今回はヒトに焦点をしばり暫定的に定式化した)。そのような観光危機管理は「移動の正義」(Sheller 2018)といった政治的・道徳的な価値・理念と接続される。その実現にあたり、たとえばマイクロな観光であっても「土地勘」が観光客に求められ、それを有しているとは限らない。自然的・地理的な地域特性の知識、交通手段(自家用車、公共交通機関、etc.)とその「慣れ」、といった事柄が移動の要素となってくる。

危機管理の方策を規模でレベル分けすると、(a) 個人の動き(マイクロ・レベル)の統制、(b) 施設における運用(メゾ・レベル)、(c) 地域における運用(マクロ・レベル)が考えられうる。

(a) は難しく、(b) は自治体や事業者単独での訓練や計画が、(c) は地区防災計画の活用といったことが考えられる。これらに移動の要素をふまえると、上記の方策についてのメタ的な知識・情報が移動の要素となりうる。

たとえば自治体・事業者が個人を統制することは難しくとも、観光客自身にとって、あらかじめ情報を入手することでリスク管理の資源となり、またクライシスのフェーズでも観光客の自発的な対応の蓋然性の向上に貢献できるのではないだろうか。例として、事例施設の立地する双葉町が作成するハザードマップは A4 両面カラーの一枚もので、印刷物として各施設に配置されており、双葉町の公式ホームページから電子データとして閲覧・入手することが可能となっている。もしこのハザードマップの存在を知り閲覧していれば、観光客自身による自発的な対応が期待されうるだろう。もっとも、集合行為としての「群衆なだれ」や「自動車避難による渋滞」といった人的なハザードの発生とそれらへの対応は依然として避けられないが。

こうした議論から、これまでのリスク・コミュニケーションにおいて論じられてきたように、観光危機管理においてもリスクが自発的/非自発的なものとなりうる、ということがみてとれる。防災と観光はある状況では競合関係となりうる(山田 2018)が、それぞれの領域での論点が整理される枠組みを示すことができるならば、観光危機管理の方針も具体化しやすくなるのではないだろうか(図 5)。観光危機管理という一見新しい概念・用語であっても、リスクコミュニケーション論の延長に位置付けて論じることができる。

そして、だれが・どのようなリスクを負うのか、リスクをとる(risk take)のか、といったリスク言説の価値的な側面への接続に、移動研究は有効な視座となりうる。先に、観光危機管理による実現を「観光客が安全に移動できる・移動を選択できる状態」と定式化した。このような状態へ向けて、従来の観光に関する量的・質的調査に加えて、移動研究で進められている枠組み(菱山 2012; Kaufmann 2002; Kaufmann et.al. 2004)も援用できるだろう。多種多様な移動であっても、ヒトが移動を実現するための手段-目的関係を明らかにすることができれば、観光危機管理の目指す状態へ貢献しうる。

その枠組みにおいて、観光客による参照や施設相互の参照といった情報の移動としての、「事例データベース」(図 1)も寄与しうる。観光危機管理の企てにおいて、体系的システムのサブとしての「事例データベース」を構想するとき、どのような事例報告が可能なのか、どのような事例報告が必要なのか。そうした視点から照射するとき、自治体・事業所に求められる人員配置やデータ収集等が要件として定まると思われる。たとえば図 2 は日次データをもとにしている。団体客は属性まで収集されているが、個人客は人数のみである。消防署職員による指摘への対応は、たとえば時間帯ごとの入館者データ取得が考えられ、施設単独の限界を補完す

るビッグデータ等のデータ取得・利用の取組みによって可能となるかもしれない。

津波避難訓練の評価は、事前に想定＝設計された機能実現の検証と、状況・文脈を考慮した検証（生態学的妥当性）とが基準に考えられうる。そこには、実現可能性・実行可能性の基準も考慮されなければならない。実現・実行可能性の基準において、何を境界条件とするのか。避難訓練の取組みは、事例集積による教訓としての活用で、より深耕することができるだろう。

注

- 1) 本研究は令和4年度東日本大震災・原子力災害伝承館個人研究費の補助を受けている。
- 2) 本研究は筆者個人の見解であり、筆者の所属する組織の見解を示すものではない。

参考文献

- 1) アーリ, ジョン (吉原直樹・伊藤嘉高訳) 『モビリティーズ』 作品社, 2015 [原著 2007]
- 2) 朝倉はるみ「観光地の防災・減災と観光需要早期復旧に向けた行政の役割: 地域防災計画とBCP」『計画行政』, 44巻4号, pp.43-48, 2021 [doi: 10.14985/jappm.44.4_43]
- 3) 押田佳子・安齊航成・久島琴音「わが国における「観光危機管理」の現状と課題: 都道府県レベルにおける地域防災計画及び観光客対応マニュアルに着目して」『都市計画報告集』17巻, pp.339-342, 2018 [doi: 10.11361/reportscpj.17.3_339]
- 4) 観光庁『宿泊旅行調査統計報告』, 2008～2022 [Retrieved from <https://www.mlit.go.jp/kankocho/siryou/toukei/shukuhakutoukei.html>]
- 5) 観光庁『非常時における訪日外国人旅行者対応マニュアル作成のための指針』2021
- 6) 観光庁『観光危機管理計画等作成の「手引き」～事業者向け～』2022a
- 7) 観光庁『「令和3年度観光の状況」及び「令和4年度観光施策」(観光白書)』2022b [Retrieved from https://www.mlit.go.jp/kankocho/news02_000476.html]
- 8) (公財) 日本交通公社『旅行年報』2022 [Retrieved from <https://www.jtb.or.jp/book/category/annual-report/>]
- 9) 高松正人『観光危機管理ハンドブック』朝倉書店, 2018
- 10) 菱山宏輔「空間的移動に関する社会学的考察: 国境を越える移動・日常的な移動とV.カウフマンの「運動性」概念に関する試論」『経済学論集』, 78号, pp.165-190, 2012 (Retrieved from <http://hdl.handle.net/10232/14484>)
- 11) 双葉町「津波ハザードマップ」 (Retrieved from <https://www.town.fukushima-futaba.lg.jp/9360.htm>)
- 12) 山田修司「災害復興における防災＝技術の適切さ」『日本都市学会年報』51巻, pp.311-320, 2018
- 13) 吉原直樹『モビリティーズ・スタディーズ』ミネルヴァ書房, 2022
- 14) Kaufmann, V., *Re-Thinking Mobility*, Routledge, 2002 [paperback 2016]
- 15) Kaufmann, V., et.al., “Motility: Mobility as Capital,” in *International Journal of Urban and Regional Research*, Vol. 28-4, pp.745-756, 2004 [doi: 10.1111/j.0309-1317.2004.00549.x]
- 16) Sheller, M., *Mobility Justice: The Politics of Movement in an Age of Extremes*, Verso Books, 2018

災害後人口移動の年齢別構造の分析*

東北大学災害科学国際研究所 奥村 誠
株式会社復建技術コンサルタント 元井初音

1. 災害後の人口移動

自然災害は、直接的な人命や財産の損失だけでなく、社会・経済活動の長期的な停滞や復興需要によるポジティブな影響をもたらす。今後の災害対応・復興政策を考える上で、過去の災害がもたらした長期的な影響を把握する方法の開発が求められる。

著者らは、地域の社会・経済活動の量的水準を人口により把握できると考えて 1973-2003 年の人口移動と都道府県別自然災害統計を実施し、転出と転入への影響は被災規模により異なることを示した。また東日本大震災前後の数年間の都道府県別社会増減率を確認し、福島県の過剰転出分が宮城県に転入したと考えれば、各都道府県の増減率は安定的なトレンドに沿うことを確認した(図-1)。しかしこれらは全人口を対象としており、原発事故後に福島県から女性を中心に全年齢階層が転出する一方で残留者や転入者は単身の中老年男性にとどまり、性年齢構造が大きく崩れたことなどは確認できていない。

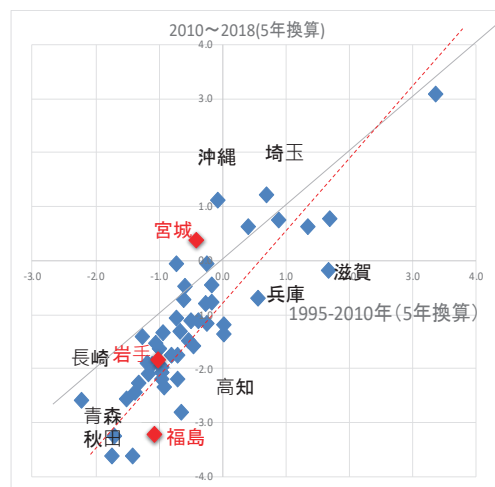


図-1 東日本大震災前後の都道府県別社会増減率

本報告では 2005-2020 年の都道府県間の移動人口の性年齢構成の質的な特徴を把握するための NMF(非負値行列因子分解)の結果を報告する。

2. 使用データと分析手法

2010, 2015, 2020 年の国勢調査基本集計の中の前住地別性別 5 歳階級年齢別の人口データを用い、調査年度と 5 年前の常住地を比較し都道府県ごとの転出者、転入者および残留者を求める。これを横方向に男女の 5 歳階級、縦方向に時期、転出・転入・残留、都道府県の順に配列して、観測行列を作成する。

一方、NMF は非負値の観測行列を、少数要素の発生パターン(因子負荷量)行列と要素発生頻度(因子得点)行列の積に分解する多変量解析手法で、ここではスパー

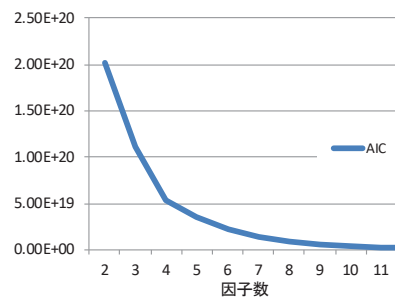


図-2 因子数に伴う AIC の変化

*Age structure of post-disaster inter-prefectural migration by Makoto Okumura and Hatsune Motoi

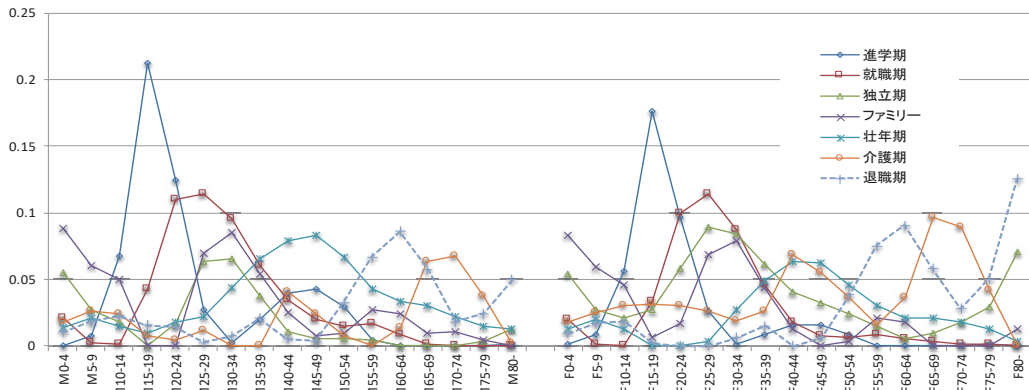


図-3 7つの因子の因子負荷量の値

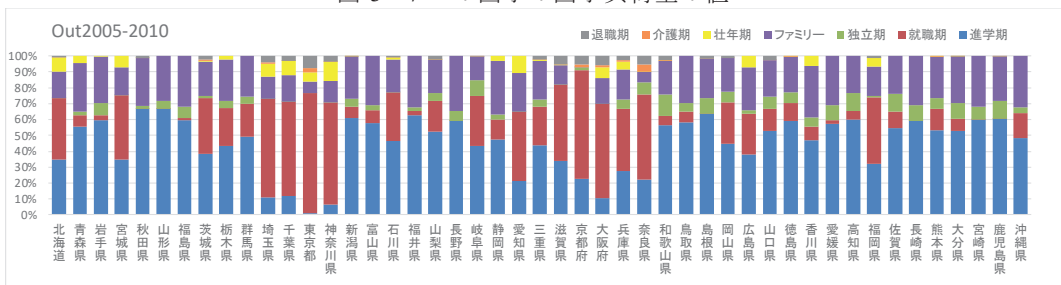


図-4 2005-2010年の転出人口における因子得点の構成比

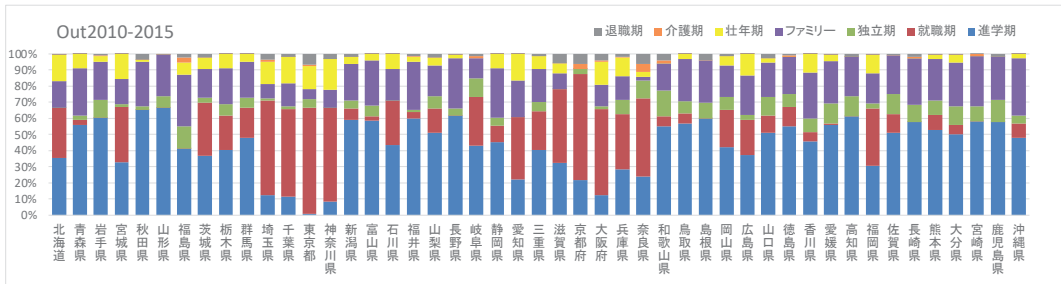


図-5 2010-2015年の転出人口における因子得点の構成比

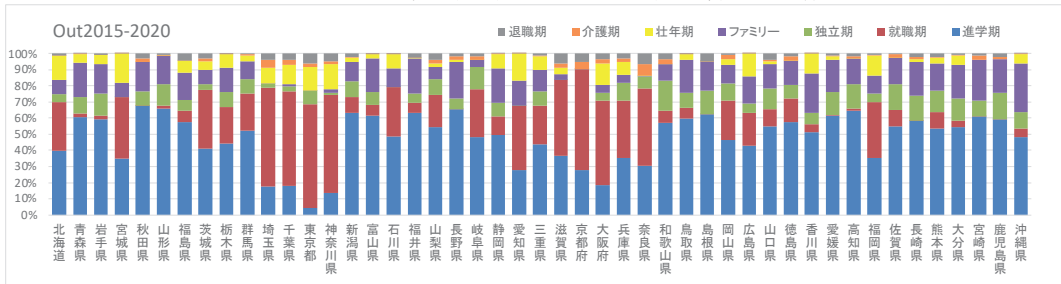


図-6 2015-2020年の転出人口における因子得点の構成比

ス性の高い要因抽出ができるベイズに基づく計算手法を用いる。因子数を変更した場合の AIC 指標の変化は図-2 のようであり、勾配の変曲点から因子数を7に設定した。

3. 人口移動パターンの性年齢別構成比

図-3の因子負荷量行列は、どのような性年齢階層の人が同様の人口移動（残留）行動をとるのかを表し、負荷量の値は各階層の構成比を表す。これより7つの因子は平均年齢の順に、進学期(平均26.3歳, 男性58%), 就職期(32.5歳, 54%), 独立期(37.3歳, 32%), ファミリー(29.4歳, 52%), 壮年期(47.6歳, 59%), 介護期(51.1歳, 35%), 退職期(61.0歳, 46%)と名づけた。ピークの個数に着目すると、進学期、就職期、壮年期は単独での移動だが、ファミリーと独立期は未成年の子供を含む世帯だが、後者は祖母を伴う3世代世帯を含む。介護期と退職期は中年層と高齢者を含む2世代の世帯であり後者は若年女性を含む場合もある。

4. 都道府県別の転出パターンの発生強度

因子得点行列から、3つの期間における各都道府県の転出における因子得点の構成比を図-4～図-6に示す。これらの図に共通して介護期と退職期は人口移動を起こしにくいことがわかる。首都圏からは就職期と壮年期の転出が多い一方、進学期の転出は極めて少ない。中京圏・関西圏・札幌・仙台・福などの都市圏も就職期と壮年期の転出が多いが、進学期の転出も首都圏より多い。その他の地方圏は進学期の転出が顕著でファミリーや独立期などの子育てを行う世帯の転出も比較的多い。秋田・山形・福島などの県では大学定員が少なく就職期の転出者が極めて少ないという傾向が見られる。図-5から東日本大震災時の原発事故を受けて、2015年までに福島県から就職期以外の全階層が転出し、その中の独立期以上の年齢階層の割合が6割弱と例外的に大きな値となっている。つまり既に生活が安定的でほとんど転出しないような世代の世帯までもが、転出を余儀なくされたことが読み取れる。図-6から2015年以降は、福島からの全世代の転出の傾向は若干弱まる一方で、東北、四国、九州の地方圏で独立期や進学期の転出が増えていることがわかる。

5. 都道府県別の転入パターンの発生強度

一方、3つの期間における各都道府県の転入における因子得点の構成比を図-7～図-9に示す。これらの図に共通してどの地域でも進学期と就職期に活発な転入が見られる一方で、介護期と退職期は人口移動を起こしにくいことがわかる。独立期と介護期の転入が首都圏、関西圏、福岡の他、岐阜と佐賀に発生している。ファミリーと壮年期の転入はほとんどの県で観測されているが、後者の割合は東北や九州などの遠隔の地方圏ほど大きいという傾向がある。このような遠隔地では子育てなどの条件が劣っており、Uターンにおいて単身男性の占める割合が大きいという傾向を反映していると考えられる。図-8から東日本大震災時の原発事故を受けて福島県へはファミリーの転入が無い唯一の県となった。逆に壮年期の割合が大きく増加しており、除染などの労働力として男性を中心とする単身者の転入が進んだことを反映している。図-9から2015年以降、福島へのファミリーの転入の少数にとどまるとともに、壮年期の割合は全県の中で最も大きいままである。以上のことから、原発事故の影響はいまだに持続し、転出よりも転入の回復が遅い。その他の東北の各県では、徐々にファミリーが減り壮年期が増加する傾向が進み、北東北の3県は北海道、沖縄よりも厳しい状況になっている。なかでも岩手は2010年以降にこの傾向が加速しており、震災の影響が懸念される。

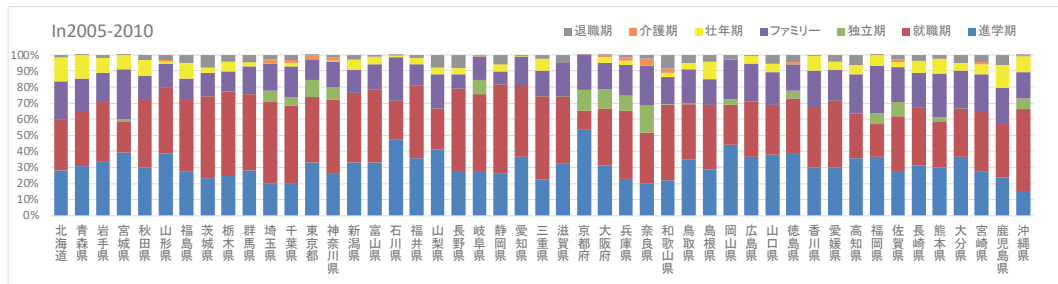


図-7 2005-2010年の転入人口における因子得点の構成比

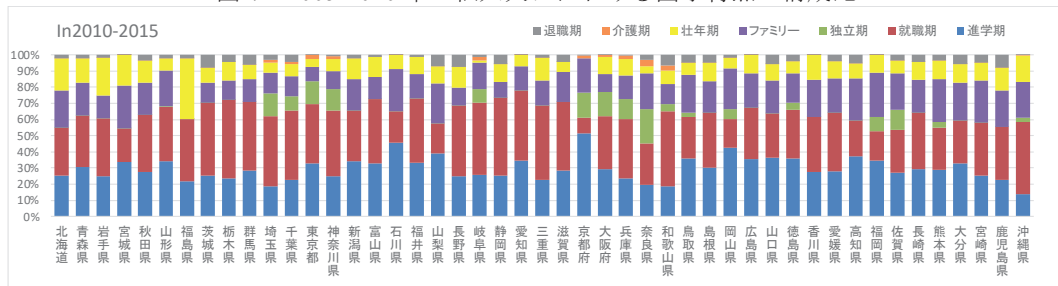


図-8 2010-2015年の転入人口における因子得点の構成比

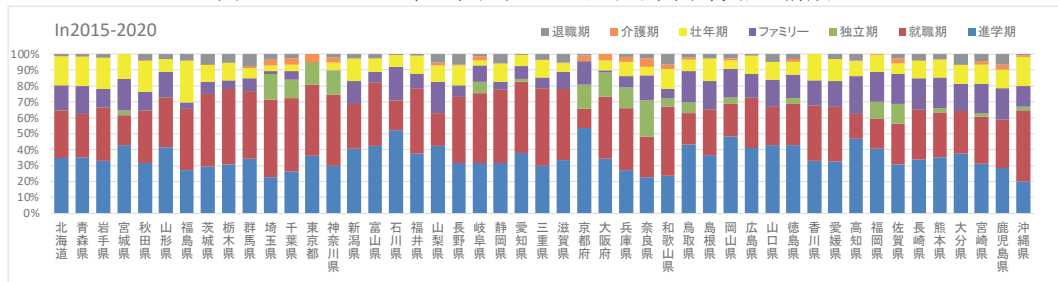


図-9 2015-2020年の転入人口における因子得点の構成比

6. おわりに

以上、本研究では、地域人口の年齢別構造の変化を把握する方法として、都道府県別の転入、転出、残留人口のデータにNMF(非負値行列因子分解)を適用した。その結果宮城を除く東北各県は他の地方圏と共通する人口移動構造を有していたが、原発事故の影響を受けた福島では2010-15年の期間に全階層の転出が起こるとともに、他県で見られるファミリーの転入が無くなり、壮年期の転入に頼るといふ変化が見られた。このうち転入への影響は2015-20年でも継続していること、北東北の他県でもファミリー層の転入が減少しており、2010年以降震災の影響によって岩手での変化が加速したことなどを明らかにした。

今後は、本研究の分析方法を市町村単位の詳細なデータに対して適用していきたい。また、期間中の災害の被害と因子得点との関係の分析や、災害被害と人口移動を統合的にNMFで分析していく予定である。

1983 年日本海中部地震災害の新聞記事による追跡*

秋田大学地域防災減災総合研究センター 水田 敏彦
 北海道大学 鏡味 洋史

1. はじめに

1983 年日本海中部地震は秋田県沖で発生した M7.7 の地震であり、今年 2023 年 5 月 26 日に発生から 40 年を迎える。被害は秋田県を中心として隣県の青森県や北海道、特に津波被害に関しては京都府や島根県など更に遠隔地におよび、地震直後から約 1 ヶ月程度に亘っては、人的・物的被害、震災対策、経済・社会的影響、復旧・復興、市民生活など震災に関する様々な情報が新聞を通じて報道された。現在でも各方面で震災の記憶や教訓を後生に伝える活動が行われているものの、震災から 40 年が経過し災害の情報は限られたものとなっている。小論では震災から翌年以降の新聞報道に着目し、どのように変化し関心が高まるのか明らかにする。

2. 新聞記事の収集

朝日新聞記事データベース「朝日新聞クロスサーチ」¹⁾ を使用し記事を収集資料とした。抽出にあたっては、見出し、本文、補助キーワードに『日本海中部地震』とあるものだけを収集した。記事データの収録期間は本紙が 1984 年 8 月～2019 年（※本紙テキストは 2022 年 11 月 3 日現在 2020 年以降未収録）、地域面は秋田版の収録開始が 1997 年以降であり 1997 年以降を対象とした。なお、記事内容を確認し、日本海中部地震と関係のない記事 9 件は除外した。

3. 記事数推移の推移

地震から約 1 年後の 1984 年 8 月から 1 年当たりの記事数の推移を図 1 に示す。地震翌年から 9 年目迄は減少し、10 年目の 1993 年には 46 件と 10 倍程度となっている。その後件数は減るものの報道は続き、他地域の大地震発生直後と 20 年、30 年の節目に関連記事が多くなる。

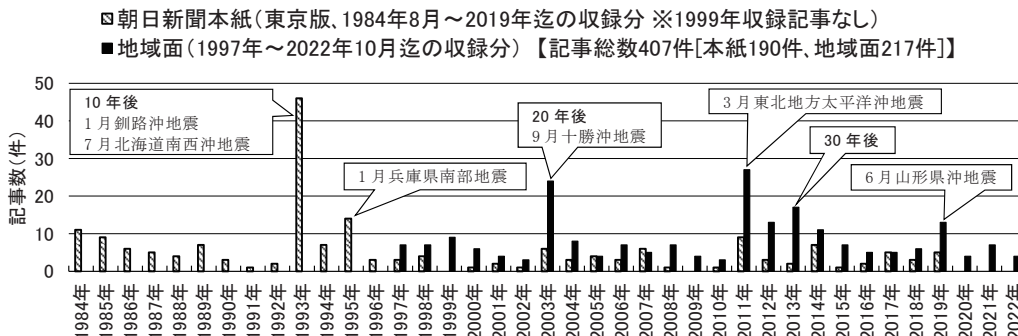


図 1 1983 年日本海中部地震に関する 1 年当たりの記事数の推移

*Tracking of the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake Disaster by Newspaper Articles by Toshihiko Mizuta and Hiroshi Kagami

4. 新聞記事の傾向と特徴

発災から翌年以降の新聞報道について、記事の内容は地域面では地震後の社会の対応（行政対応、社会対応など）が最も多く、被災経験者の声も多く記載されている。地域面の記事は秋田版（118件）と青森版（34件）が多い。一方、本紙では解説情報（一般的地震解説、他の地震との比較）の記載が多く、その他、社説（災害の教訓や防災事情など）や識者見解などがある。1983年日本海中部地震に関する周年記事、他地域の大地震発生直後に現れた比較記事が記載されているものを以下に示す。

4.1 周年記事

収集した新聞記事について、地震から15年（1998年）以降から39年（2022年）までの24年間の周年記事の見出しを整理し表1に示す。秋田版と青森版の記事を区別し、青森版は〔 〕内に示している。周年記事は長期的、継続的に掲載され、秋田版の記事総数118件のうち周年記事は約半数の58件と最も多い。秋田県では日本海中部地震が発生した5月26日を「県民防災の日」と定めており、県民防災の日前後に関心が高まり記事が増加し、各地で行われる地震や津波を想定した避難訓練の様子が多く報じられている。また、防災訓練の参加者減少の話題や震災の風化を心配する声、その他、被災経験者の震災の記憶についても継続的に報じられている。記事の内容は津波に関する話題が圧倒的に多く、日本海中部地震により各地で発生した液状化現象、その他、建物の耐震性に関する記事は非常に少ない。青森版については記事総数34件のうち周年記事は10件となっている。青森県については、深浦町が日本海中部地震発生の5月26日を「深浦町防災の日」と定め防災訓練を実施しており、深浦町を中心として防災訓練の様子や被災経験者の震災の記憶が報じられている。

4.2 他地域の大地震発生直後の記事

他地域の大地震発生直後に現れた日本海中部地震との比較記事の見出しを整理し表2に示す。下線は各記事のキーワードを示している。記事の内容は日本海中部地震の被害や教訓との比較、被害の原因となる地震現象の一般的比較解説が多く見られる。特に日本海中部地震から10年後に発生した1993年北海道南西沖地震直後に比較記事が最も多く掲載されている。地震ごとに異なる視点で報じられており、1993年釧路沖地震では液状化、1993年北海道南西沖地震では津波・隣接地域、1995年兵庫県南部地震では直下型、2003年十勝沖地震では津波、2011年東北地方太平洋沖地震では津波、2019年山形県沖地震では隣接地域が挙げられる。

表1 地震から15年以降の周年記事見出し一覧

周年	掲載月/日:秋田版の見出し []内は青森版の見出し
15 (1998年)	5/15:日本海中部地震から15年24日防災フォーラム能代などで 5/27:防災意識忘れないで日本海中部地震から15年、[本部長の知事が欠席日本海中部地震から15年県防災訓練]
16	5/27:10万人が防災訓練日本海中部地震から16年、[M7.3想定して地震災害訓練]
17	5/27:忘れないぞ日本海中部地震26日まで防災週間
18	5/27:惨劇風化させまい日本海中部地震から18年県民防災の日
19	5/27:県民防災の日初の薬品被害訓練も初動体制など確認

20 (2003年)	5/19:なまはげの姿で慰霊祭募金訴え日本海中部地震 20年 5/26: 県きょう防災訓練化学物質流出の想定も、日本海中部地震から 20年万全か防災への取り組み 5/27: 防災の誓い新た全県で訓練日本海中部地震から 20年 5/29: 絶版でも残部を販売日本海中部地震体験記危機管理意識のなさ露呈副知事地震時パチンコ 7/1 : 災害への備え訴えた企画展きょうから秋田大で開催
21	5/27: 津波犠牲者悼み海上慰霊祭男鹿で合川南小児童遺族ら
22	5/26: 日本海中部地震から 22年県内災害への備蓄 3割 5/27: 県民防災の日「直下型」想定し訓練県庁通報態勢を確認
23	5/27: 大地震想定し訓練県庁で職員 300人参加県民防災の日
24	5/26: 知事不在時に地震発生想定県防災訓練
25 (2008年)	5/26: 備え万全ですか全県で避難訓練日本海中部地震 25年
26	5/27: 各地で 26000人が訓練日本海中部地震から 26年「県民防災の日」 5/28: [深浦町防災の日町内一斉に訓練 26年前]
27	5/27: 県民防災の日各地で訓練や慰霊祭
28	5/22: 日本海中部地震から 28年 1)再起父をのんだ海支えに 5/23: 日本海中部地震から 28年 2)再起父を救命瀬戸際の子次々抱え 5/24: 日本海中部地震から 28年 3)封印心に秘めた「あの日」 5/26: 祈りの歌「秋田おほら節」みんなに届け合川南小できょう最後の慰霊祭、津波想定し避難 訓練計画きょうから 5市町 5/27: 日本海中部地震から 28年再建二重ローン乗り切る、「その日」に備えて県警津波対応に重 点県民防災の日、友へ届け鎮魂の民謡合川南小で慰霊祭日本海中部地震から 28年 5/28: 日本海中部地震から 28年継承追悼のナマハゲ募金
29	4/23: [津波の恐怖風化防げ日本海中部地震から来月で 29年] 5/26: 想定様々防災訓練県初めて噴火盛る
30 (2013年)	5/21: 日本海中部地震から 30年庁舎水没想定し移転訓練にかほ署 5/25: 自然災害に負けない親子で防災体験非常食試食や耐震実験あす大仙 5/25: 津波の記憶忘れない日本海中部地震から 30年旧合川南小学校で慰霊祭、[過去の地震を資 料から学ぶ弘前大で企画展]、[津波忘れない日本海中部地震から 30年深浦で訓練] 5/27: 13人の魂安らかに日本海中部地震 30年男鹿の海岸で慰霊祭 5/28: つなぐ備える震災の記憶上)息子の死生かされたか 5/29: つなぐ備える震災の記憶中)「減災」学ぶ運動会 5/30: つなぐ備える震災の記憶下)地域の被害語り継ぐ
31	5/27: 津波は来た秋田にも 31年前・104人犠牲「日本海中部」を忘れるな
32	5/27: あの日の忘れない日本海中部地震 32年訓練や慰霊祭、[3000人参加深浦で訓練日本海中部 地震の教訓生かし防災]
33	5/27: 震災風化させない日本海中部地震から 33年各地で慰霊祭や防災訓練
34	5/27: 男鹿で追悼悲しみ新た日本海中部地震から 34年、[震度 6 強津波 9メートル想定し訓練深 浦町日本海中部地震 34年]
35 (2018年)	5/24: 大震災想定県庁で防災訓練対策本部立ち上げ停電も実施 5/26: 津波の教訓生かし備え日本海中部地震きょう 35年 5/27: 遺族海に向かい合掌日本海中部地震から 35年
36	5/23: 津波犠牲児童の慰霊碑に献花日本海中部地震 26日で 36年 5/25: 地震・災害備え各地で訓練あす県民防災の日 5/27: 日本海中部地震から 36年津波犠牲遺族が海岸で慰霊
37	5/20: 津波で犠牲の児童思い清掃「静かに眠れるよう」日本海中部地震 5/27: 「自分の命守る知識を」日本海中部地震から 37年
38	5/20: 津波犠牲児童「忘れぬように」日本海中部地震 26日で 38年 5/26: 日本海津波考上) 白波ビデオが伝える衝撃日本海中部地震から 38年 5/27: 海が奪った子今もまぶたに日本海中部地震 38年男鹿遺族ら焼香 5/28: 日本海津波考中) 多数の活断層地震を誘引日本海東縁部 10~20年おきに大地震 5/29: 日本海津波考下) 高台避難住民の手で改善東日本大震災きっかけに話し合い
39	5/26: 来ないはずの津波義父奪った消えた 1キロ先の漁船日本海中部地震から 39年 5/27: 津波で犠牲児童悼む日本海中部地震から 39年、[日本海中部地震 39年津波犠牲の児童悼む 海岸で遺族ら秋田・男鹿]

表2 他地域の大地震直後に現れた日本海中部地震との比較記事の見出し一覧

地震名	掲載月/日:本紙東京版の見出し 下線は記事のキーワード[]内は本文を示す
1993年1月15日 釧路沖地震	1/18:住宅街で「 <u>液状化現象</u> 」発生釧路沖地震 2/19:釧路沖地震での保険金支払い推定約8億円
1993年7月12日 北海道南西沖地震	7/13:北日本に強震・津波ホテル崩れ数十人不明北海道南西沖地震, 死者36人不明約100人北海道の地震被害広がる, 津波警報9時間も北海道南西沖地震, 津波に弱い海底地形奥尻島エネルギー増幅効果北海道南西沖地震, 早かった津波襲来震源近く地震の規模大北海道南西沖地震, <u>日本海中部地震に似た型規模では上回る?北海道南西沖地震</u> 7/14:この惨事は他人事ではない(社説)[津波による大きな被害は日本海中部地震以来], 観測・予知の空白区直撃北海道南西沖地震, 「日本海にプレート境界」を説明できる有力証拠に北海道南西沖地震, 震源域奥尻島直下近く現地視察の阿部東大教授北海道南西沖地震, すごい底鳴り大津波 耳に残る恐怖北海道南西沖地震, 「津波警報」で明暗北海道南西沖地震, 生と死「一瞬」が分ける直撃の奥尻島北海道南西沖地震[十年前の日本海中部地震の教訓が生死を分けるカギ] 7/15:津波の高さ10メートル超す気象庁調査官が確認北海道南西沖地震, 余震の島「去るか残るか」揺れる奥尻町民 北海道南西沖地震[十年前の日本海中部地震の時には床上浸水] 7/16:実態を反映しない津波観測低くでる検潮所の値独自工夫の自治体も, 激震・津波・火災予測越えた複合災害北海道南西沖地震の奥尻島, 長さ100キロ断面破壊わずか40秒北海道南西沖地震, 奥尻島の津波は最高30.5メートルに到達北海道南西沖地震
1995年1月17日 兵庫県南部地震	1/17:「直下型」の怖さまざまざ防災対策の再検討迫る兵庫県南部地震[1950年以降に死者が百人を超えた地震], 過去の主な地震被害兵庫県南部地震
2003年9月26日 十勝沖地震	9/27:「津波でんでんこ」で巨大地震(社説)
2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震	3/12:太平洋岸繰り返す津波東日本大震災 3/25:津波の被害国内最悪死者・不明者は「明治三陸」超す東日本大震災
2019年6月18日 山形県沖地震	6/19:震えた街新潟・山形地震26人けが[一帯では過去に83年の日本海中部地震], 衝撃「ドン」長い揺れ住民避難不安な夜新潟・震度6強[この変動帯の近くでは過去に日本海中部地震が起きている] 6/20:余震・雨続く不安新潟・山形地震負傷28人[この領域では日本海中部地震などが起きている]

5. まとめ

1983年日本海中部地震について、発災から翌年以降の新聞記事を収集し、どのように変化し関心が高まるのか整理した。明らかにされた主な項目は以下の通りである。

- 1) 一般的に震災から10年以上経過すると記憶と教訓の風化が懸念されるが、10年単位の節目と他の大地震直後に関連記事が多くなる。
- 2) 本紙では一般的地震解説、他の地震との比較が多い。
- 3) 秋田県では日本海中部地震が発生した5月26日を「県民防災の日」と定めており、県民防災の日前後に関心が高まり地域面の記事が増加している。避難訓練が行われる周年記事は長期的、継続的に掲載されている。
- 4) 記事の内容は津波災害が圧倒的に多く、日本海中部地震により各地で発生した液状化現象、その他、建物の耐震性に関する記事に乏しい。

日本海中部地震は今年2023年に40周年となり、行政・市民レベルでも防災に関する関心が高まると思われる。津波災害に加え、地盤災害や建物の耐震化に関する情報・知識も提供していきたい。また、同様の収集・整理を長期間にわたって続けていきたい。

【参考文献】1) 朝日新聞社:朝日新聞クロスサーチ, <https://xsearch.asahi.com> (2022.11.3 閲覧).

令和5年3月1日 発行

東北地域災害科学研究 第59巻
(令和4年度)

編集者 自然災害研究協議会東北地区部会
部会長 前田 匡 樹
日本自然災害学会東北支部
支部長 前田 匡 樹

発行者 東北大学災害科学国際研究所
東北地区自然災害資料センター
センター長 今村 文彦
〒980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1
TEL 022 (752) 2099

印刷所 有限会社 明 倫 社
〒983-0842 仙台市宮城野区五輪二丁目9-5
TEL 022 (295) 8211