

自然災害研究協議会  
中国地区部会

研究論文集

第11号

2025年2月

自然災害研究協議会  
中国地区部会

共催：山口大学地域レジリエンス研究センター

目次

2024年7月の梅雨前線に伴う豪雨により山形県戸沢村で発生した洪水災害の特徴……………	1
山本晴彦	
2024年11月に鹿児島県与論島と沖縄県北部で発生した豪雨災害の特徴……………	5
山本晴彦	
時間防災学の視点を用いた雄物川流域「下黒瀬地区」の洪水・土石流堆積物調査……………	9
伊藤幸輝・田口岳志・鈴木素之	
湾曲水路の横越流における曲率半径と流出角度の関係に関する実験的研究……………	13
三戸裕矢・朝位孝二・渡辺勝利	
湾曲水路の横越流における横越流箇所と流出角度に関する実験的研究……………	17
木原凜・三戸裕矢・朝位孝二	
2024年台風11号（ヤギ）によりベトナム北部で発生した土石流災害について……………	20
鈴木素之・松木宏彰・Nguyen Thanh DUONG	
令和6年能登半島地震による地表変状：引張応力場でなぜ圧縮変形が起こるのか？……………	24
辻智大・山田佑哉	
令和6年能登半島地震で発生した大規模斜面崩壊の崩壊メカニズムに関する考察……………	28
瀧本真理・太田岳洋	
令和6年能登半島地震による土構造物の被害事例とその考察……………	32
藤本哲生・鈴木素之・河内義文・酒井直樹	
樹木形状の定量化と斜面地形－岩国市の丘陵地の例……………	36
黒木貴一・太田岳洋・宮本新平・山本道輔	
d4PDFを用いた将来降雨に基づく榎野川流域の氾濫予測……………	40
青柳拓篤・大中臨・福丸大智・渡部哲史・赤松良久	
停滞前線に伴う大雨の強化と長期化に関する解析……………	43
富田勇斗・田中健路	

東シナ海からの水蒸気フラックスを考慮した球磨川・川内川流域の NARX による豪雨発生予測 モデルの開発 .....	47
松坂琉生・朝位孝二・白水元・西山浩司・弘中勇駿	
気象衛星観測データから豪雨域の発生を判定する深層学習についての検討 .....	51
白水元・米山航平・島田真歩・芹澤遥介・柳沢真穂・原田朋弥	
静止気象衛星高頻度観測データを用いた火山噴火に伴う大気波動の検出 .....	55
村上太一・田中健路	
熱帯泥炭地海岸における限界崩壊距離の推定 .....	59
香川拓輝・小田辰海・山本浩一・Muhamad YUSA・神山惇・鈴木素之	
NDVI を活用した深層学習に基づく斜面崩壊発生ポテンシャル評価の高度化 .....	63
山下文輝・福丸大智・江口翔紀・大中臨・赤松良久	
FVCOM を用いた漂流ゴミ追跡シミュレーションに関する研究 .....	67
岡田遥太郎・朝位孝二	
海岸保全施設の陸間統廃合に関するアンケート調査 .....	71
糸川菜友子・朝位孝二・上原高寛・吉永祐二	

# Chugoku Regional Division Research of Natural Disaster Research Council

## No. 11 Contents

Characteristics of Flood Damage in Tozawa Village of Yamagata Prefecture Caused by Heavy Rainfall Associated with Baiu-front in July 2024 .....	1
<i>Haruhiko YAMAMOTO</i>	
Characteristics of Heavy Rainfall Disaster in Yoron Island, Kagoshima Prefecture and Northern Okinawa Prefecture in November 2024 .....	5
<i>Haruhiko YAMAMOTO</i>	
Investigation of Flood and Debris Flow Deposits in the Shimokurose Area of the Omonogawa River Basin from the Perspective of Time-related Disaster Prevention Studies .....	9
<i>Koki ITO, Takeshi TAGUCHI, Motoyuki SUZUKI</i>	
Experimental Study on Relationship Between Radius of Curvature and Lateral Overflow Angle in Curved Channel .....	13
<i>Yuya MITO, Koji ASAI, Katsutoshi WATANABE</i>	
Experimental Study on Relationship between Lateral Overflow Angle and Location of Lateral Weir in Curved Channel .....	17
<i>Rin KIHARA, Yuya MITO, Koji ASAI</i>	
Mudslide Disaster in Northern Vietnam Caused by Typhoon No. 11 (Yagi) in 2024 .....	20
<i>Motoyuki SUZUKI, Hiroaki MATSUGI, Nguyen Thanh DUONG</i>	
Surface Deformation Caused by 2024 Noto Peninsula Earthquake: Why Does Compressive Deformation Occur in Tensile Stress Field? .....	24
<i>Tomohiro TSUJI, Yuya YAMADA</i>	
A Study on the Mechanism of Large-Scale Landslides Caused by the 2024 Noto Peninsula Earthquake .....	28
<i>Mari TAKIMOTO, Takehiro OHTA</i>	
Examples of Damage to Earth Structure Caused by the 2024 Noto Peninsula Earthquake and the Consideration .....	32
<i>Tetsuo FUJIMOTO, Motoyuki SUZUKI, Yoshifumi KOCHI, Naoki SAKAI</i>	
Quantification of Tree Deformation and Micro-landform of Hillslope: Case Study of the Hilly Area of Iwakuni City .....	36

*Takahito KUROKI, Takehiro OHTA, Shimpei MIYAMOTO, Michisuke YAMAMOTO*

Inundation Forecasting in the Fushino River Basin Based on Future Rainfall from d4PDF ..... 40

*Takuto AOYAGI, Nozomu ONAKA, Daichi FUKUMARU, Satoshi WATANABE, Yoshihisa AKAMATSU*

Numerical Analysis of the Intensification and Prolongation of Heavy Rainfall Associated with Stationary Fronts ..... 43

*Hayato TOMITA, Kenji TANAKA*

Development of NARX-Heavy Rain Forecast Model at Kuma-gawa and Sendai-gawa River Basins by Considering Vapor Flux from East-China Sea ..... 47

*Ryuki MATSUSAKA, Koji ASAI, Hajime SHIROZU, Koji NISHIYAMA, Yuma HIRONAKA*

A Study on Deep Learning for Determining the Occurrence of Heavy Rainfall Areas from Meteorological Satellite Observation Data ..... 51

*Hajime SHIROZU, Kohei YONEYAMA, Maho SHIMADA, Yosuke SERIZAWA, Maho YANAGISAWA, Tomoya HARADA*

Detection of Atmospheric Waves Associated with Volcanic Eruptions Using High-Frequent Observation Data by Geostationary Meteorological Satellite ..... 55

*Taichi MURAKAMI, Kenji TANAKA*

Estimation of Critical Collapse Distance in Tropical Peatland Coast ..... 59

*Hiroki KAGAWA, Tatsumi ODA, Koichi YAMAMOTO, Muhamad YUSA, Atsushi KOYAMA, Motoyuki SUZUKI*

Advanced Slope Failure Potential Assessment Based on Deep Learning Using NDVI ..... 63

*Fumiki YAMASHITA, Daichi FUKUMARU, Syoki EGUCHI, Nozomu ONAKA, Yoshihisa AKAMATSU*

Study on Simulation of Marine Garbage Track Using FVCOM ..... 67

*Yotaro OKADA, Koji ASAI*

Questionnaire Survey on the Consolidation and Integration of Land Gates in Coastal Protection Facility ..... 71

*Mayuko ITOGAWA, Koji ASAI, Takahiro UEHARA, Yuji YOSHINAGA*

# 2024年7月の梅雨前線に伴う豪雨により山形県 戸沢村で発生した洪水災害の特徴

山本 晴彦

山口大学大学院創成科学研究科

## 1. はじめに

2024年7月24日の明け方から、梅雨前線が中国大陸の華北地方から日本海を通過して北日本に延び、前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだ影響で、東北地方は大気の状態が非常に不安定となった。このため、山形県や秋田県で非常に激しい雨や猛烈な雨が降り続き、24日から27日までの3日間の積算降水量は、山形県の真室川町差首鍋で457.0mm、新庄で420.5mm、最上町の瀬見で411.5mm、酒田大沢で407.5mmを観測するなど、山形県の庄内・最上地方を中心に400mmを超える記録的な大雨となった。ここでは、豪雨により甚大な浸水被害が発生した山形県最上地方に位置する戸沢村を対象に、豪雨の時間的・空間的特徴、過去の降水量・水位データや地形などから見た浸水リスク、現地での浸水痕跡の調査などに基づく被害状況などについて報告する。

## 2. 豪雨と水位の特徴

図1に示した2024年7月24日～26日(3日間)の積算降水量(mm)の分布図では、最上川中流で合流する支川の鮭川などでは400mmを超える豪雨を観測し、この豪雨により最上川中下流、鮭川流域などで洪水災害が発生した。特に、秋田県境に近い出羽山地の荒木川(日向川水系)では533mmの最大値を観測し、高坂ダム(鮭川)でも525mmの豪雨を記録している。図2に示した10分間降水量・積算降水量の推移を見ると、最大1時間降水量が60mm弱を観測した荒木川では、7月の24日午後から夜、25日の日中、25日夜遅くから26日未明の3つの降水イベントに見舞われており、高坂ダムでもほぼ同様な傾向を示している。新庄では25日午前から26日明け方にかけて2つの降水イベントが生じており、高坂ダムと新庄の間に位置する差首鍋では両者の中間的な降水イベントとなっている。

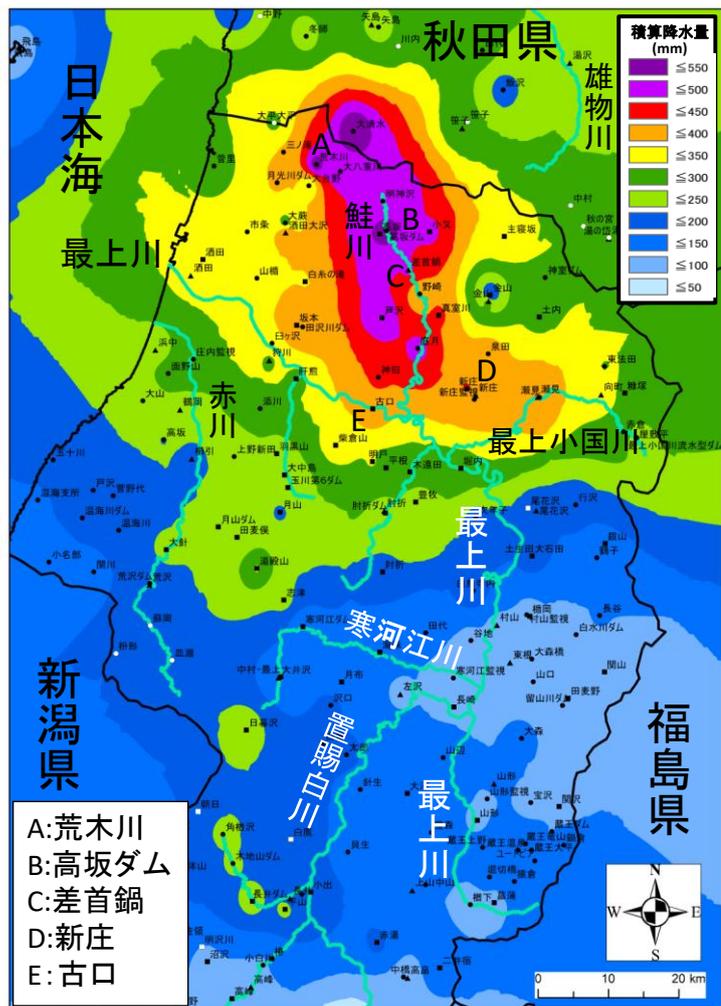


図1 2024年7月24日～26日(3日間)の積算降水量の分布図

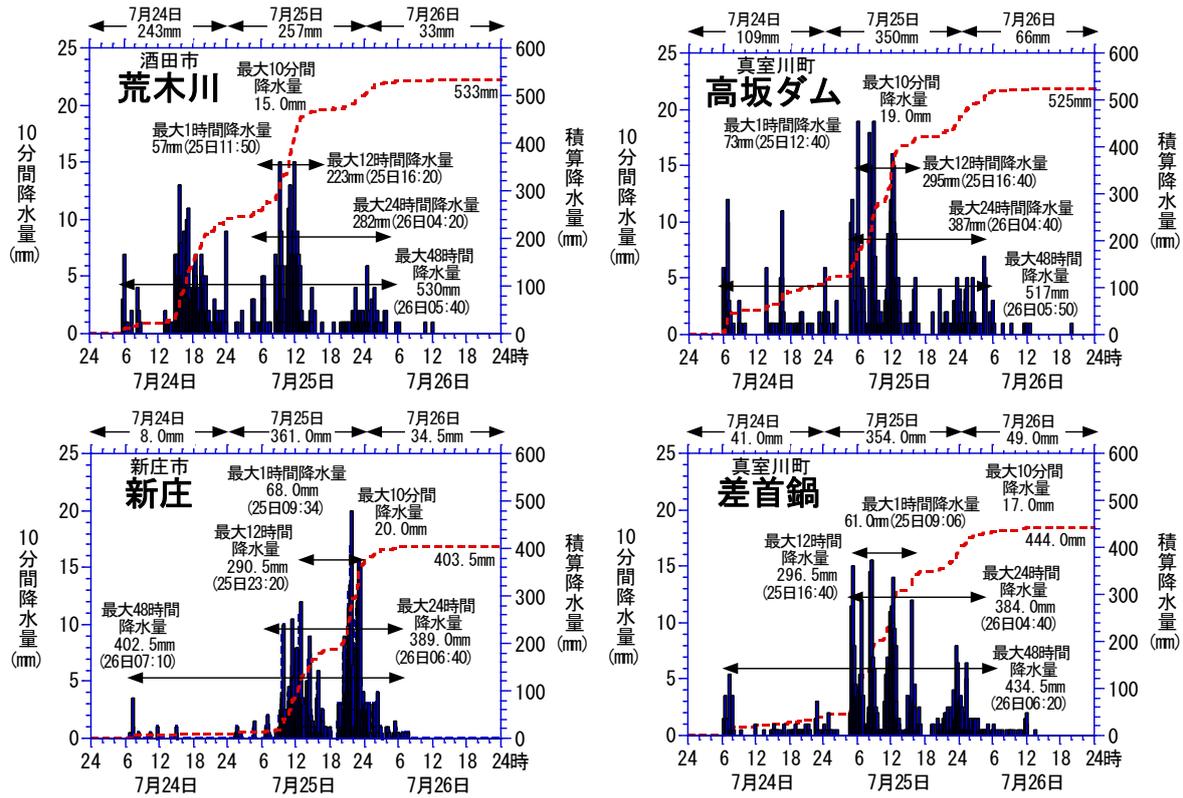


図2 2024年7月24日～26日（3日間）の10分間降水量・積算降水量の推移

最上川中流に位置する戸沢村の古口地区には水位観測所が設置されており、過去の記録を整理して表1に示した。今回の豪雨により観測された10.57m以前は、『戸沢村史』（1965）に記載された「明治12（1897）年10.35m」「延宝7（1679）年9.3m」が高水記録であるが、この2つ水位の出所は不明である。近年のデータからは昭和19年に観測された8.95mが既往の最高値となっており、9m級の水位に見舞われたことから甚大な被害が発生していたものと推察されるが、戦中期に発生した水害でもあり、被害状況が記された資料は見当たらない。戸沢村防災マップ（2019年保存版）に掲載された「戸沢村の災害と歴史」には、昭和30年7月から平成30年8月に発生した災害まで、25件の災害が記されており、地震に関する被害を除く（2011年東日本大震災：一部損壊3戸）24件が台風や大雨による被害で、主に最上川や支川の角川、角間沢川の氾濫による浸水被害となっている。特に昭和30年から4年連続で甚大な被害に見舞われており、昭和44年も最上川と角川の氾濫により村役場が置かれている古口地区（古口水位観測所8.57m）を中心に全壊・半壊各1戸、床上浸水274戸、床下浸水87戸と、363戸にも及ぶ住家被害が生じている。今回の水害では、大規模半壊50棟・中規模半壊14棟・半壊52棟などとなっている。

表1 古口水位観測所で観測された水位の順位<sup>1)</sup>

順位	洪水名称	最高水位 (m)	生起日時
1	令和6年 梅雨前線豪雨	10.57 <sup>2)</sup>	2024/7/26 6:00 <sup>2)</sup>
2	明治12年	10.35 <sup>3)</sup>	1897/7/10
3	延宝7年 <sup>4)</sup>	9.3 <sup>3)</sup>	1679/5/25
4	昭和19年 梅雨前線豪雨	8.95 <sup>5)</sup> (9.50 <sup>3)</sup> )	1944/7/21
5	昭和44年 梅雨前線豪雨	8.57 <sup>6)</sup>	1969/8/8
6	平成30年 梅雨前線豪雨	8.53	2018/8/6 5:00
7	令和2年 梅雨前線豪雨	7.79	2020/7/29 7:00
8	平成16年 梅雨前線豪雨	7.65	2004/7/17 21:00
9	平成30年 秋雨前線豪雨	7.57	2018/8/31 11:00
10	平成25年 梅雨前線豪雨	7.21	2013/7/18 20:00
11	平成26年 梅雨前線豪雨	7.21	2013/7/18 20:00
12	平成9年 梅雨前線豪雨及び台風第7号	7.11	1997/6/29 9:00
13	平成23年 梅雨前線豪雨	6.86	2011/6/24 16:00
14	昭和56年 梅雨前線豪雨	6.80	1981/6/23 6:00
15	平成5年 地すべり	6.68	1993/7/14 23:00

注1：「水文水質データベース」のデータを基礎に作成。順位記録から、昭和48（1973）年からの水位順位の記録と推定。  
 注2：「水文水質データベース」では5:40～6:00に「10.53m」、「山形県河川・砂防情報システム」では5:30と6:00に「10.57m」を表記。  
 注3：『戸沢村史』（1956）より転記。注4：『戸沢村史』では「宝暦7年」と記載されているが、1679年は「延宝7年」で、記載ミス。  
 注5：『最上川工事史』（1971）より転記。注6：戸沢村の資料より転記。

### 3. 蔵岡地区における浸水被害の実態

最上川中流では33.7k~37.3k区間の約24km, 支川の鮭川では合流点0.0km~13.6k, 20.8k~22.6k区間の約15kmが計画高水位(HWL)の超過区間となり, 戸沢村の蔵岡地区(45.3k)では左岸が幅100mにわたり欠損する被害が発生した。これにより, 堤防を越えて氾濫流が流入し, 最高3.5mを超える浸水深に見舞われ(空中写真1), 住家被害は大規模半壊50件, 中規模半壊10件, 半壊6件, 一部損壊2件の計68件にも上り, 地区内で被害がなかった住家はわずか2件に止まっている。

蔵岡地区の居住域は浸水想定が計画規模でも0.5~3mと想定(図3)されており, 平成30年8月の水害を契機に, 地区を取り囲むように高さ3mの輪中堤が2023年3月に完成したが, 今回の水害は輪中堤をも水没させる甚大な被害であった。写真1には蔵岡地区における住宅の浸水被害(2024年9月19日撮影)を示しており, 軒下まで浸水する甚大な被害が発生している。その一方で, 庄内地方では玄関を含む1階部分や駐車場で雪に埋もれる(新庄で最深積雪の平年値が128cm)ことから, 3階建て住宅の1階に駐車場(ビルドインガレージ)を設ける住宅が数多く認められる。しかし, 写真2に示したように地盤高3.3mに浸水痕跡が確認でき, 浸水被害の回避には至っていない。戸沢村役場では地区住民の意見を集約しており, 令和7年度に防災集団移転事業による地区全体の移転計画の立案を予定している。



空中写真1 最上川と鮭川の合流地点に位置する蔵岡地区における浸水被害の状況(2024年7月26日撮影, 戸沢村提供)

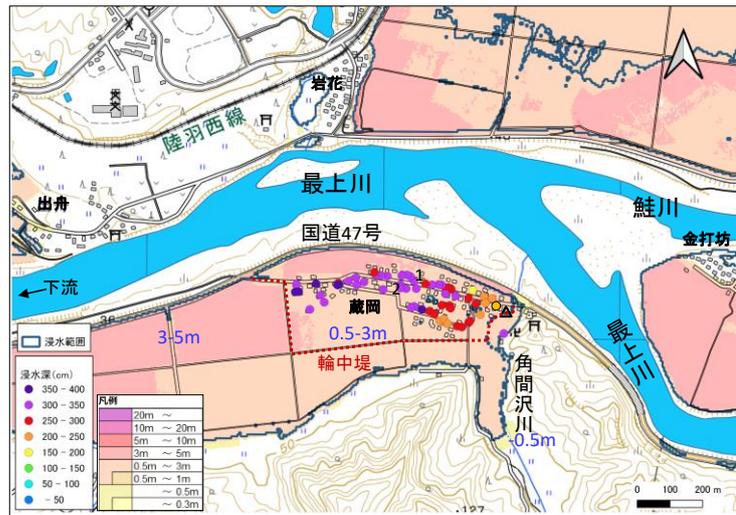


図3 蔵岡地区付近の洪水浸水想定図(計画規模)と筆者の現地調査による浸水深(cm)の分布(1・2は写真番号)



写真1 蔵岡地区における住宅の浸水被害



写真2 蔵岡地区における住宅の浸水被害

#### 4. 古口地区における浸水被害の実態

蔵岡地区から3km下流に位置する古口地区は、役場が置かれる村の中心地であり、地区内を東西に国道47号が走っている。地区の北側を流れる最上川の左岸に設けられた古口雨量水位観測所では、水位が既往の水位を超える10.57mを観測し、排水機場の排水能力が追い付かず、内水氾濫が発生した。空中写真2には役場が立地する古口地区における浸水被害の状況を示しており、宝蔵寺や役場の浸水痕跡と現地調査での浸水深がほぼ一致していることから、最高浸水時に撮影されたものと推察される。

古口地区は最上川左岸と角川・砂子沢川に隣接して堤防を築き、排水機場を整備して内水氾濫を軽減する対策を行っていたが、排水が追い付かず角川橋東詰の国道47号に面した住宅では、地盤高1.4mに浸水被害が生じている(写真3)。周囲より標高が低い旧国道と陸羽西線に挟まれたエリアは、以前は水田であったが、開発が徐々に進んで公共施設や住宅が建ち並び、



空中写真2 戸沢役場が立地する古口地区における浸水被害の状況 (2024年7月26日撮影, 戸沢村提供)

最高で2m弱の浸水深に見舞われている(図4)。写真4には写真2と同じ1階部分を駐車場や倉庫などの非居住スペースに利用している住宅の浸水状況を示している。浸水深が1.3mであることから、蔵岡地区のような居住スペースへの被害は生じていないが、嵩上げていない写真3な



図4 古口地区の洪水浸水想定図(計画規模)と筆者の現地調査による浸水深(cm)の分布(3・4は写真番号)



写真3 古口地区における住宅の浸水被害



写真4 古口地区における住宅の浸水被害

# 2024年11月に鹿児島県与論島と沖縄県北部で発生した豪雨災害の特徴

山本 晴彦

山口大学大学院創成科学研究科

## 1. はじめに

2024年11月8日から10日にかけて、鹿児島県の奄美地方と沖縄地方に高気圧の周辺を回る東寄りの温かく湿った空気が流れ込んだことにより、大気の状態が非常に不安定となり、3日間の積算降水量は与論で869mm、沖縄県北部の与那覇岳で809mmを観測した。本豪雨により与論島の茶花地区や沖縄県北部の国頭村・大宜味村などでは甚大な浸水被害に見舞われた。ここでは、記録的な大雨により発生した与論島と沖縄県北部の被害について、降水の時間的・空間的特徴、地形的特徴と水害リスクの分析、現地での実測浸水深の調査などに基づく被害状況などについて報告する。

## 2. 豪雨の特徴

図1に示した2024年11月8日～10日(3日間)の積算降水量(mm)の分布図では、与論島から沖縄県北部にかけて600mmを超える豪雨を観測しているが、沖縄永良部島や沖縄県中部では300mm以下の降水であった。

与論空港に与論島アメダスが設置されている以外に、鹿児島県(与論)、与論町(那間、古

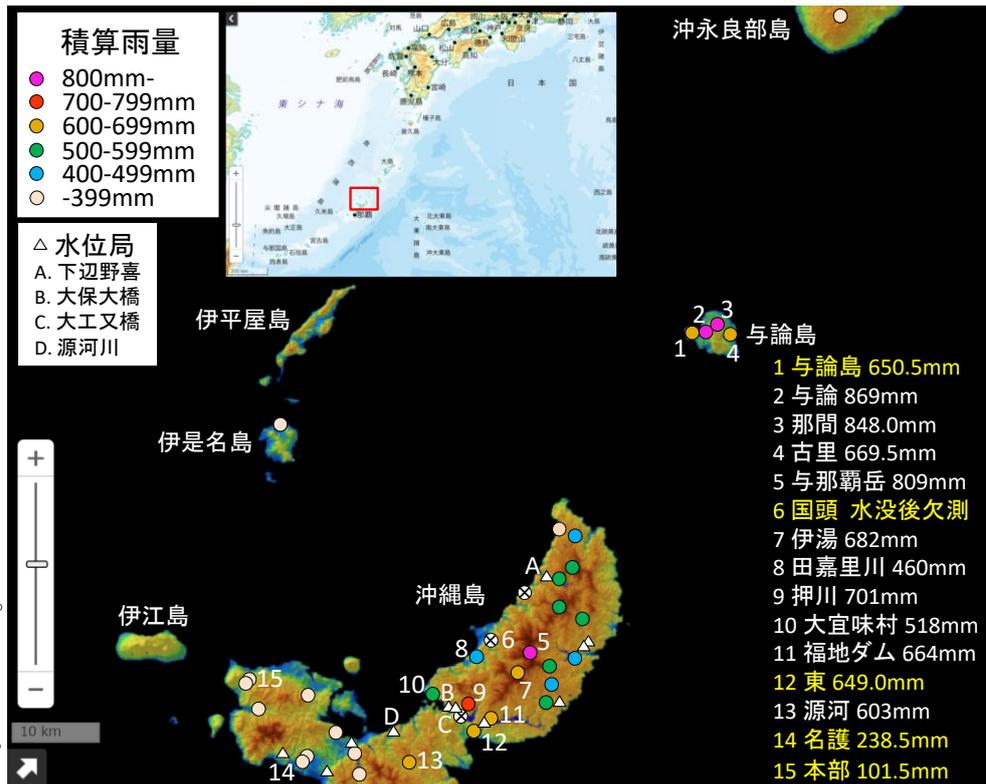


図1 2024年11月8日～10日の積算降水量(mm)の分布図と水位局の位置

里)が雨量計を設置しており、与論で869mm、那間で848.0mmを観測し、与論アメダスと古里は650mm強と狭い島内でも異なっている。与論島アメダスでは日降水量、最大6・12・24・48時間降水量が1978年の観測開始からの極値を更新している。沖縄本島の最高峰(503m)である与那覇岳では809mmの県内最大値を観測し、山岳部の伊湯、押川、源河などで600mmを超える豪雨となっている。与那覇岳では、アメダスが1976年～2005年、国土交通省が1983年から雨量観測を実施しており、24時間累積雨量は1984年8月20日(445mm)、1985年8月13日(420mm)に次ぐ394mmを観測した。

### 3. 与論島（与論町）における浸水被害の実態

鹿児島県の最南端に位置する与論島は、周囲は23.7km、面積20.6km<sup>2</sup>、最高点標高97.1mで、島全体が平坦な段丘状の地形となっており、上空から見ると丸い形状を呈している(図2)。

与論島はサンゴ礁が隆起して生じた島であることから、降った雨は地中に浸み込む一方で、町の市街地である茶花地区は地質が礫や砂から

構成され、繁華街の銀座通り付近は周囲より標高の低いことから、雨水が流れ込んで浸水被害が生じる水害地形を有している。

図3には与論の10分間降水量と茶花地区の銀座通りの与毛田橋で観測された水位を示しており、11月8日の昼前から雨が降り始め、13時30分に最大1時間降水量139mmの集中豪雨の様相を呈している。その後、強弱を繰り返しながら雨は弱まりはじめ、夜遅くには一旦、小康状態になっている。銀座通りの与毛田橋の水位は夕方の17時44分に最高水位156cmを観測した後、23時30分には54cmまで約1m低下しており、標高が低い丁字路付近では大きな浸水被害は認められなかった。しかし、8日24時前から雨脚が再度強まり、10分間降水量が20mmを超える豪雨となった。



図2 与論島防災マップに記した与論アメダス(1)、雨量局(与論(2)・那間(3)・古里(4))および茶花地区の位置(黒色破線枠は図4上の範囲)

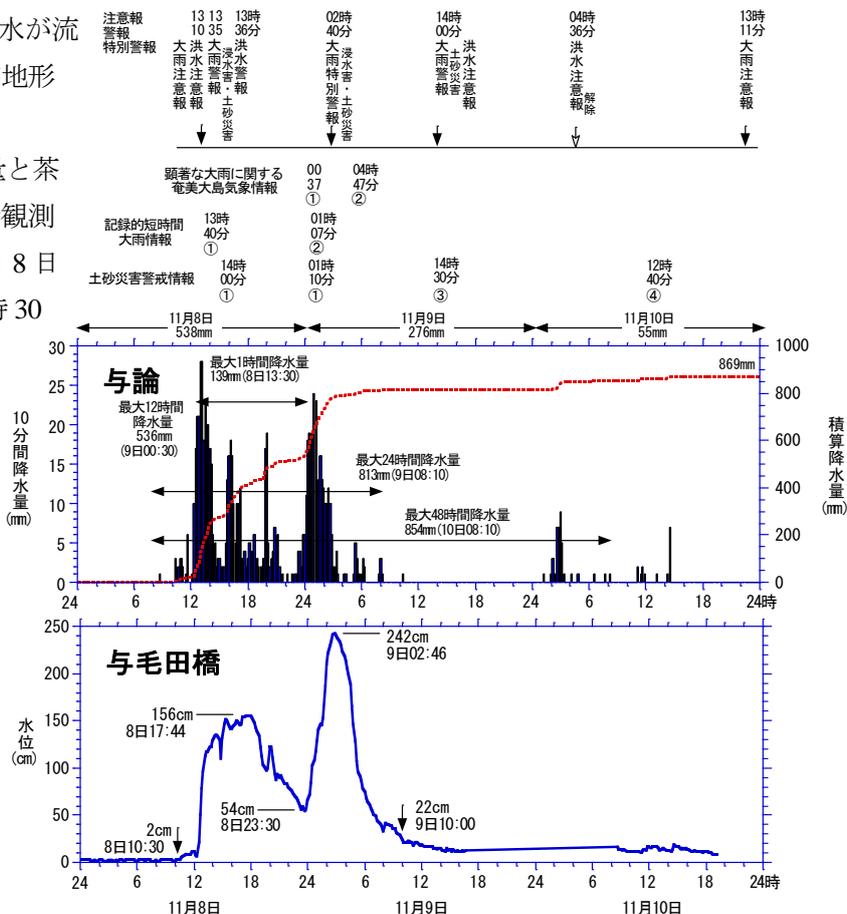


図3 与論における2024年11月8日~10日の10分間降水量(積算降水量)、与毛田橋の水位、防犯気象情報の推移(図中の①~④は各種情報の第1~4号)

これにより、用水路の水位は平常時の水位（8日10時30分で2cm）まで低下しなかった状況で豪雨となったため、水位は急上昇して9日2時46分に242cmと前日の最高値156cmを1m近く上回る水位となった。図4には茶花地区の標高図と筆者が実測した浸水深、写真1には浸水時の様子（与論町提供）と浸水痕跡を示した。標高が高い中央通りから下の銀座通りは、以前は水稻やイグサが栽培されている低湿地であったが、昭和40年代の離島ブームにより昭和48年には島に69,986人が訪れる観光地（島民人口8,000人）となり、銀座通りは飲食店、宿泊施設、商業店舗が建ち並ぶ繁華街が形成された。しかし、標高が高い東側から用水路や道路によって大雨時には泥流が流れ下り、幾度となく浸水被害に見舞われてきた。今回の豪雨でも、隆起サンゴ礁の石灰岩に由来する島内の大部分では、大きな浸水被害は認められなかったが、地質が礫や砂で構成された氾濫平野の銀座通り付近では、写真1に示した1mを超える浸水被害に見舞われた。筆者の調査から、商店主らは8日夕方の浸水が回避されて安心していたが、翌9日未明の浸水は対応が出来なく、大きな被害が生じたと述べている。

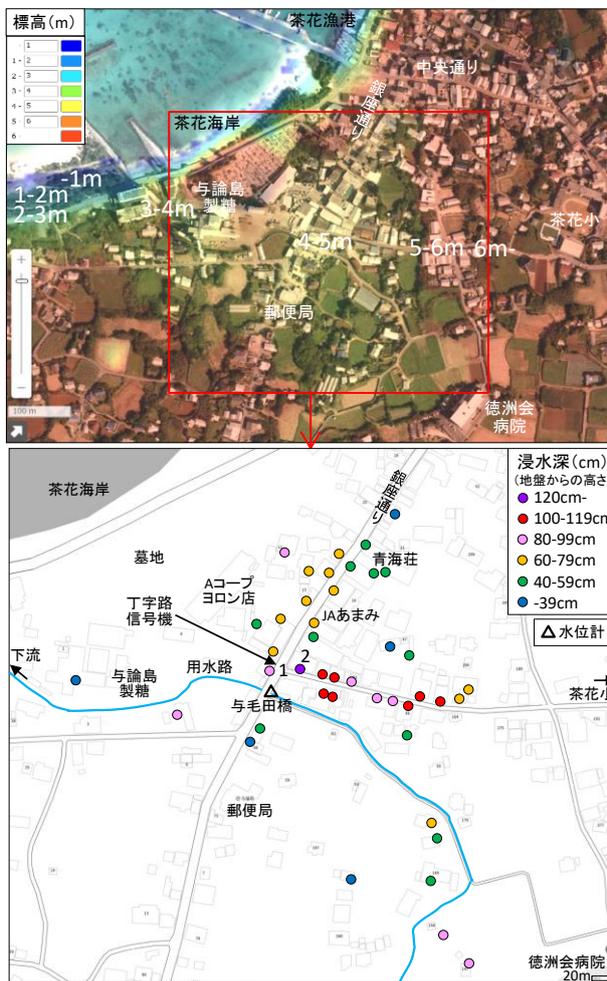


図4 与論町茶花地区の標高図（上）と現地調査により得られた浸水深（下、cm）

写真1 与論町茶花地区の浸水被害（上：ホームセンター、丁字路の浸水状況（与論町提供）

#### 4. 沖縄県北部（国頭村）における浸水被害の実態

沖縄本島の最高峰の与那国岳（図1）に降った雨は、分水嶺の西側では比地川水系の比地川（合流地点より流路延長7.0km、流域面積9.2km<sup>2</sup>）と支川の奥間川（合流地点より流路延長5.5km、流域面積7.2km<sup>2</sup>）に流れ込み、東シナ海に注ぐ。浸水被害が特に顕著であった国頭村では、比地川とその支川の奥間川が氾濫したことにより、両河川に挟まれた比地区で中規模半壊1件、半壊3件、準半壊15

件、一部損壊 10 件、床下浸水 9 件の計 38 件の住家被害、非住家被災も 41 件に達した。

図 5 には与那覇岳で観測された降水量、国頭村における気象防災情報を示した。なお、比地川と奥間川には水位計は設置されていない。11 月 8 日の夜遅くから翌 9 日未明にかけて 6 時間で 280mm の豪雨を観測しており、比地川の氾濫により比地区公民館裏の住宅では、1 階の駐車場・倉庫が 60cm 程度浸水したが、

日中には雨が弱まり、掃除をしていたと述べている。しかし、翌 10 日の 4 時頃からの猛烈な雨により道路の水嵩が急に高まり、居住部分の 2 階までは水が来なかったが、玄関に上る階段脇の門柱の高さ 2m 近くまでに泥流が達したと証言している (図 6)。住民の多くは 2 回目の雨は真夜であり、家財や自動車を避難させることが出来なかったと述べている。奥間川も氾濫し、国頭アメダスは浸水により欠測し、やんばる野生生物保護センターでも改装中の展示室が高さ 1m まで浸水する被害が生じた (写真 2・3)。

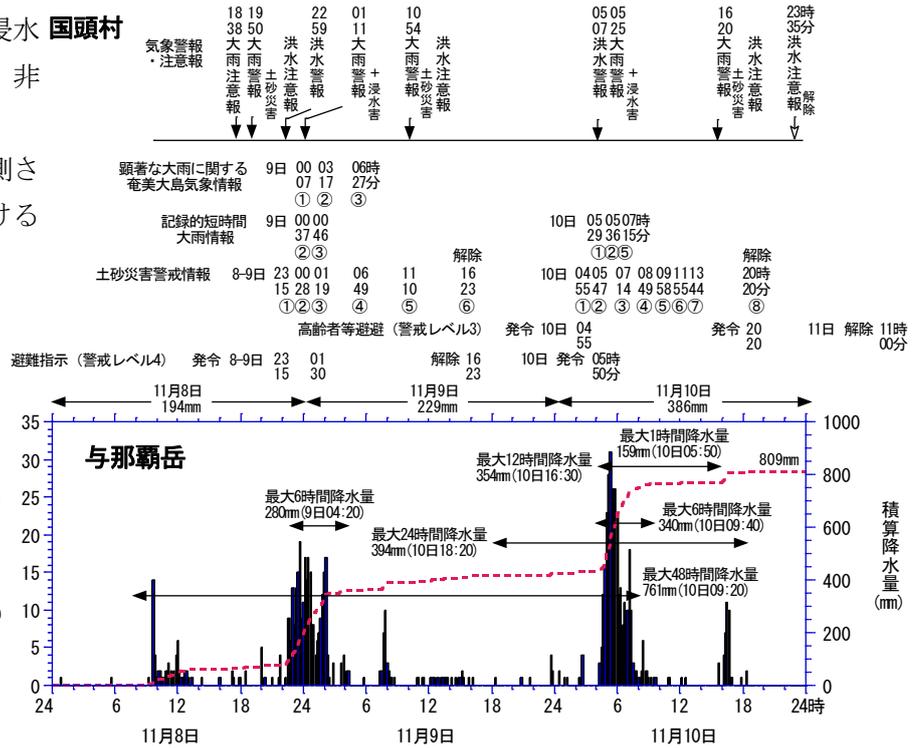


図 5 2024 年 11 月 8 日～10 日における与那覇岳の 10 分間降水量 (積算降水量) と国頭村の気象防災情報の推移



図 6 比地・奥間地区の浸水深 (cm)



写真 3 やんばる野生生物保護センターウフギー自然館とマングースバスターズ事務所の被害



写真 2 比地地区における住宅の浸水被害

# 時間防災学の視点をを用いた雄物川流域「下黒瀬地区」の洪水・土石流堆積物調査

伊藤 幸輝<sup>1)</sup>・田口 岳志<sup>1)</sup>・鈴木 素之<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>秋田大学理工学部システムデザイン工学科, <sup>2)</sup>山口大学大学院創成科学研究科

## 1. 研究背景および目的

近年、全国各所で異常気象による局所的な豪雨が多く観測され、これによって土砂災害や洪水等の自然災害が多発している。そこで本研究では、秋田県雄物川流域で発生した豪雨や洪水による災害の履歴を整理し、時間防災学の視点から今後発生し得る大規模土砂災害の予測に役立てることを目的<sup>1)~4)</sup>としている。本研究では、近世の史料集や町史の文献解読から現場を選定し、雄物川流域で発生した過去の洪水・土石流によって堆積した堆積物

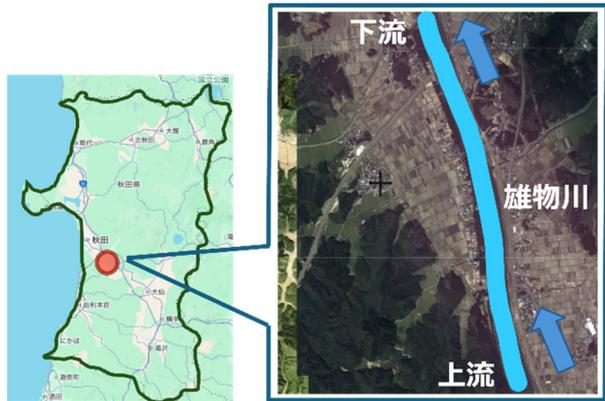


図-1 調査地点 (国土地理院地図を加工して作成)

物についてハンディジオスライサーを用いて地層調査を行った。その結果、採取したコアから過去の洪水等によって堆積したと思われる層を確認した。本稿では、密度試験および粒度試験により災害履歴調査を実施した結果について述べる。

## 2. 調査対象地点

雄物川流域付近の山麓部沿いで発生した洪水・土石流に纏わる史料集・町史を解読した。その結果、秋田県秋田市雄和地区で過去に繰り返し洪水や土砂崩れが発生していたという記載を確認した。この結果と付近の土砂災害警戒区域箇所等を勘案して秋田市雄和「下黒瀬」地域を調査の対象とした。図-1に調査地点を示す。

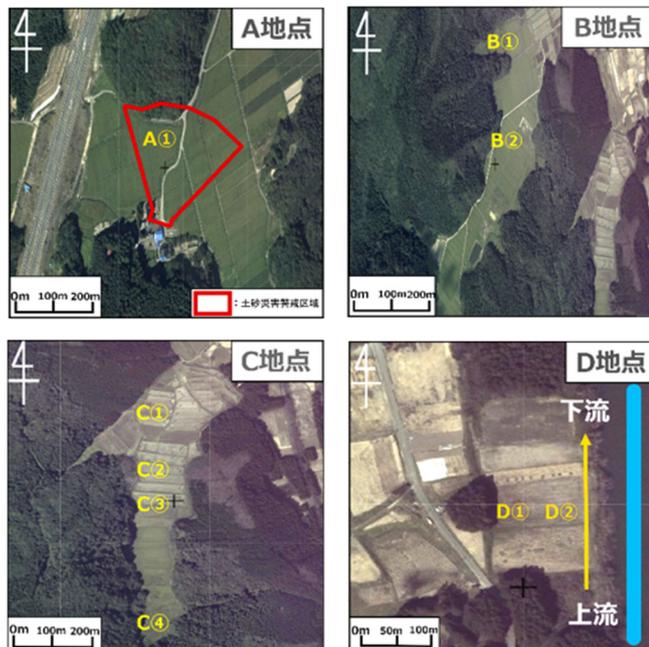


図-2 ジオスライサー調査実施箇所航空写真図 (国土地理院地図を加工して作成)

## 3. ジオスライサー調査

ジオスライサー調査では、高さ 2m、幅 10 cm コの字型サンプルボックスとふたを交互に地中に打ち込み、両者を同時に引き抜くことで土層の形状を乱

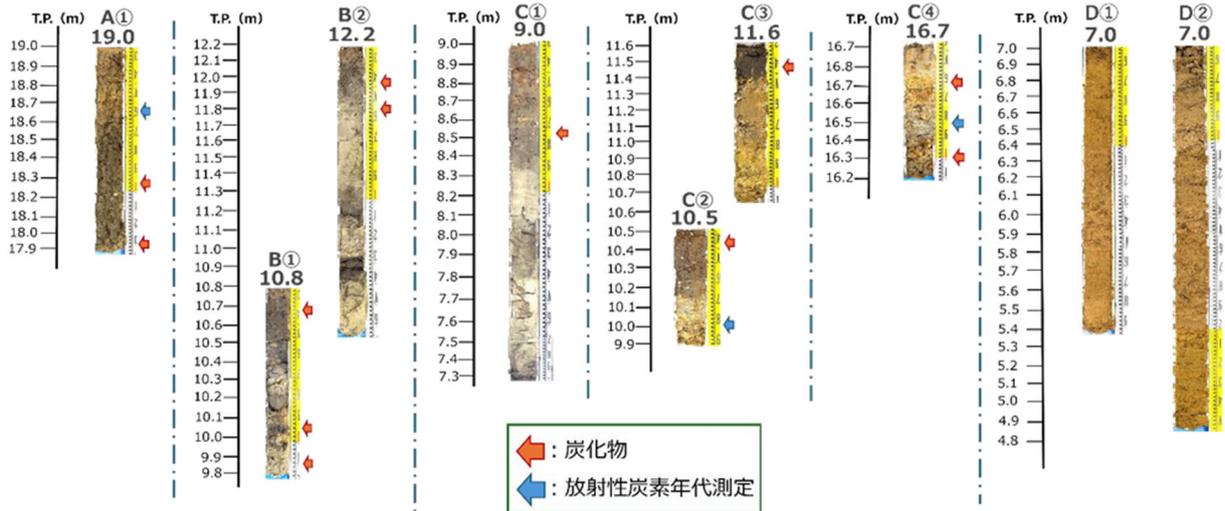


写真-1 ジオスラiserで採取した試料のコア写真

さずに地層から試料を採取した。本研究では2mのハンディジオスライサー（復建調査設計社製）を用いて試料採取を行った。図-2にハンディジオスライサー調査を実施した箇所を示す。山麓側から川側にかけて、A~Dの4地点で、合計9カ所の調査を行った。

#### 4. 調査結果および考察

下黒瀬地域で採取した試料のコア写真を写真-1に示す。コア観察によって層分類を行った結果、A①, B①②, C①~④の各層に特徴的な層がみられた。A①については、粒度試験・顕微鏡観察・放射性炭素年代測定を実施した。粒度試験から得られた粒度加積曲線を図-3に示す。この結果から、土砂災害警戒区域に指定されている箇所では採取したA①は、一部の層で逆級化構造を呈していた。そこで、下黒瀬地区の河岸で行われた土質ボーリング（一般財団法人国土盤情報センター、国土盤情報データベース）と比較した結果、どちらもコアの主成分が砂質

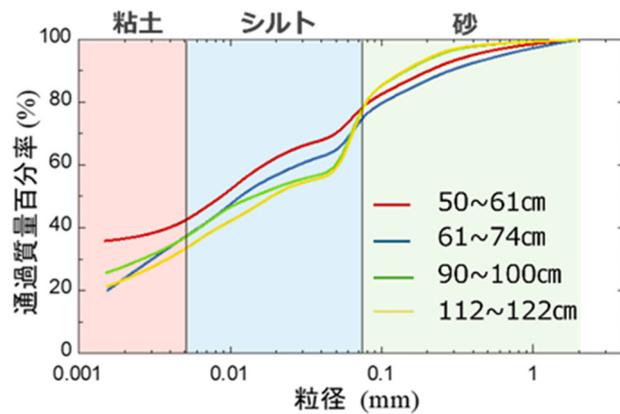
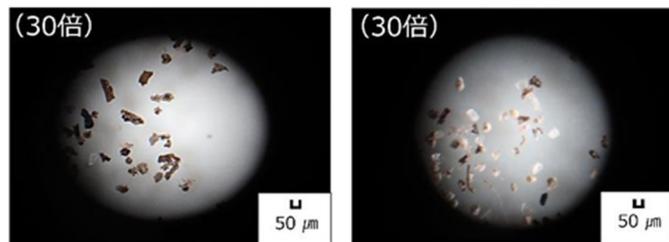


図-3 A①地点における粒度加積曲線



A①地点 T.P. 18.6m

A①地点 T.P. 18.7m

写真-2 A①地点における顕微鏡観察

シルトであり、本調査の妥当性が確認できた。また、層の色に変化がみられた T.P.18.6~18.7m地点で粒径 250 $\mu$ m 残留分について顕微鏡観察を実施した。写真-2に示すように T.P.18.6m地点では多くが木片で構成されているのに対し、上部の T.P.18.7m地点では火山由来と思われるガラス片がみられた。このことから、飛来した火山灰が土砂の影響によって堆積した可能性があると考えられる。

表-1 災害年表と放射性炭素年代測定結果

年	災害履歴	放射性炭素 ( <sup>14</sup> C) 年代測定結果	
A.D. 2000	2017年	↑ ↓ 1808~1924年 下黒瀨 (A①)	
	1987年		
	1981年		
	1979年		
	1972年		
	1965年		
	1957年		
	1955年		
	1951年		
	1947年		
	1944年		
	1936年		
	1928年		
	1923年		
	1918年		
	1914年		
	1912年		
	1910年		
	1900		1896年
			1894年
1892年			
1878年			
1800	1854年		
	1851年		
	1804年		
	1777年		
1700	1755年		
	1728年		
	1727年		
	1704年		
0	1674年		
	1600年		
	1500年		
B.C. 1200	1000年	↑ ↓ 1458~1524年 下黒瀨 (C④)	
	830年		
1200	地震	↑ ↓ 1132~1016年 下黒瀨 (C②)	
	1200年		

災害年表を表-1に示す。放射性炭素年代測定を行った3検体のうち、A①のみ災害年表と一致した。A①の測定結果が1808年～1924年であった検体について、災害年表ではその間に8回の洪水と2回の地震が発生しており、これらのイベントの痕跡を残す層である可能性がある。

5. まとめ

下黒瀨地域では土砂災害警戒区域に指定されている層に対して、粒度試験を実施した結果、層の色が変化しており、逆級化構造を呈していた。近傍の地盤情報データと比較した結果、河岸の土質と類似していたため、河川洪水由来の堆積物であった可能性が考えられる。顕微鏡観察結果からは木片の層とガラス片を含む層が確認され、堆積環境の僅かな変化を確認できた。また、A①による放射性炭素年代測定では、1800～1900年代の災害年表と一部一致しており、記載されてる災害イベントの影響を受けて堆積した可能性が考えられる。

【謝辞】

本研究は科研費挑戦的研究(萌芽)(鈴木素之, 22K18871)の助成を受けて実施した。関係各位に謝意を表します。

【参考文献】1)田口岳志, 荒野拓海, 小池勇輝, 楮原京子, 松木宏彰, 鈴木素之: 秋田県雄物川中流域

における洪水由来の堆積物特性とその発生頻度，地盤工学ジャーナル，Vol.19，No.1，pp.89-100.

2) 荒野拓海, 田口岳志, 小池勇輝, 鈴木素之, 楮原京子, 松木宏彰：時間防災学の視点をういた雄物川流域の洪水堆積物調査，第58回地盤工学研究発表会 CD-Rom, 2023. 3) 荒野拓海, 田口岳志, 小池勇輝, 谷口昂, 鈴木素之, 松木宏彰:時間防災学の視点をういた雄物川流域「大曲地区」の堆積物調査，令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会 CD-Rom, 2022. 4)小池勇輝, 田口岳志, 荒野拓海, 鈴木素之, 楮原京子, 松木宏彰：秋田県雄物川流域「九升田・刈和野」地域の洪水堆積物調査，第57回地盤工学研究発表会 CD-Rom, 2022. 5)一般財団法人国土地盤情報センター，”一般財団法人 国土地盤情報センター-NGIG”，2024-03, <https://publicweb.ngic.or.jp/viewer/>, (参照 2025-02-08)

# 湾曲水路の横越流における曲率半径と流出角度の 関係に関する実験的研究

三戸 裕矢<sup>1)</sup>・朝位 孝二<sup>1)</sup>・渡辺 勝利<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>山口大学大学院創成科学研究科, <sup>2)</sup>徳山工業高等専門学校土木建築工学科

## 1. はじめに

近年, 集中豪雨や台風によって, 計画規模を超える洪水が頻発し, 全国各地で氾濫による被害を受けている. 特に, 河川堤防の破堤による外水氾濫は, 堤内地に大量の外水が流入することになるため, 被害は甚大となる. したがって, 堤防背後地を中心に, 貴重な人命や資産などが失われる危険性が高いことから, 氾濫流の挙動を十分に理解し, 適切にモデル化することは重要である.

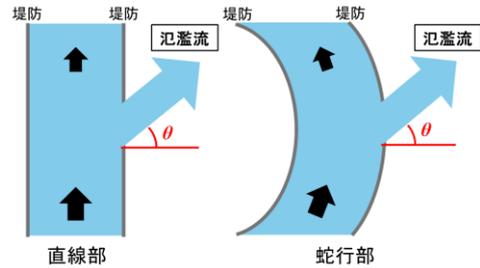


図-1 河川からの氾濫流

破堤部からの外水流出を横越流と見做せば, 横越流堰での知見を活用できる. 直線開水路における横越流については, 流量公式の開発に関する研究が多く行われている<sup>1)2)</sup>. また, 実際に河川が破堤するのは蛇行部の水衝部であることが多く, このような箇所では遠心力の効果を考慮した横越流の水力特性を把握する必要がある. 湾曲水路の横越流については, 朝位ら<sup>3)</sup>が流量公式の開発, 直線水路との水路特性の差異について実験的に研究を行っている.

ところで, 実際の氾濫流は, 図-1 に示すように慣性力の働きによって流下方向に角度を持って流出しており, 流出角度は破堤氾濫による被害を予測する上で重要な要素であると考えられる. このことから, 横越流の流出角度について検討し, その挙動を把握することは, 防災上意義があることと考えられる. しかしながら, 例えばある水量に設定したときどのような流出角度になるのかというように, 流出角度自体に着目し, 実験的に検討した事例は見受けられない. そこで本研究では, 横越流の流出角度と水力条件の関係を明らかにすることを目的として, 横越流堰高をゼロ, 横越流堰幅を固定とした条件でフルード数  $Fr_1$  を系統的に変化させた実験を行い, 流出角度に及ぼす影響について検討した. また, 曲率半径  $R$  をパラメータとし, 曲率半径による遠心力効果を考慮した水路特性の差異が流出角度に与える影響についても検討した.

## 2. 実験装置と条件

実験は, 図-2 に示すアクリル製の直線水路と湾曲水路で行った. 湾曲水路は直線部と湾曲部で構成されている. 湾曲部の曲率半径は  $R = 0.50\text{m}$ ,  $0.70\text{m}$ ,  $0.90\text{m}$  の3種類である. また, 直線水路は曲率半径が無限大の湾曲水路とみなすことができる. 湾曲水路では, 遠心力効果が最大になると考えられることから, 横越流堰を湾曲部開始位置から  $\phi = 90^\circ$  の位置に設置した. 水路幅は直線水路, 湾曲部ともに  $B = 0.20\text{m}$  である. 水路床勾配  $I$  は直線水路では  $1/1000$ , 湾曲水路では設置する際に流下方向に勾配を設けることが製作上困難であることから, 水平 ( $I=0$ ) に設置した. 横越流堰の形状を図-3 に示す. 流入流量を  $Q_{IN}$ , 横越流流量を  $Q_L$ , 流出流量を  $Q_{OUT}$ , 堰幅を  $L$  とする. また, 水路中央水深のうち堰中央部の水深を  $h$ , 堰上流端の水深を  $h_1$ , 堰下流端の水深を  $h_2$  とする.

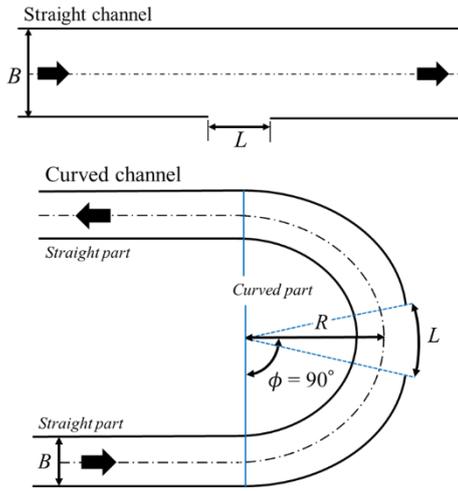


図-2 実験水路平面図（上図：直線水路，下図：湾曲水路）

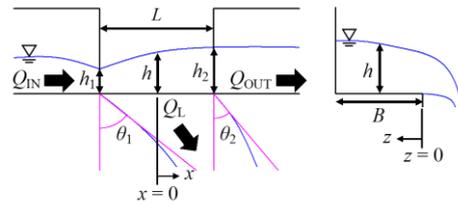


図-3 横越流堰形状（左図：側面図，右図：横断面）

表-1 実験条件

横越流堰幅 $L$ (m)	曲率半径 $R$ (m)	流入流量 $Q_{IN} \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$	フルード数 $Fr_1 = \frac{q}{\sqrt{g h^3}}$
0.20	0.50, 0.70, 0.90, $\infty$ (直線)	1.5, 1.9, 2.2, 2.7, 3.0, 3.4	0.65, 0.70, 0.80, 0.90, 0.95, Max (1.0~1.1)

実験条件を表-1に示す。フルード数  $Fr_1$  は、流入流量  $Q_{IN}$  と堰上流端中央部の水深  $h_1$  で定義されている。水路末端の堰によって水深を変化させることで調整した。  $Fr_1 = Max$  は用いた水路の特性上、各流量で設定することができる最大のフルード数 ( $Fr_1 = 1.0 \sim 1.1$ ) である。また、  $R = 0.90\text{m}$  においては、  $Q_{IN} = 1.5 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$  では  $Fr_1 = 0.80$ 、  $Q_{IN} = 1.9 \sim 2.2 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$  では  $Fr_1 = 0.90$ 、  $Q_{IN} = 2.7 \sim 3.4 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$  では  $Fr_1 = 0.95$  が設定できた最大のフルード数  $Fr_1$  であった。本研究では、フルード数  $Fr_1$ 、流入流量  $Q_{IN}$ 、曲率半径  $R$  を系統的に変化させて、図-3の側面図に示す堰上流端の流出角度  $\theta_1$  と堰下流端の流出角度  $\theta_2$  を堰の正面から撮影した画像より計測した。

### 3. 実験結果

図-4に直線水路における流出角度の計測結果を示す。横軸にフルード数  $Fr_1$ 、縦軸に流出角度 (degree) を示している。図-4(a)は横越流堰上流端の流出角度  $\theta_1$  の計測結果である。フルード数が増加するにつれて流出角度  $\theta_1$  が大きくなる傾向がみられる。また、流入流量が増加するに伴い、流出角度  $\theta_1$  が大きくなる傾向もみられるが、その差はわずかである。したがって、堰上流端の流出角度  $\theta_1$  の変化は主にフルード数に依存していると考えられる。

図-4(b)は横越流堰下流端の流出角度  $\theta_2$  の計測結果である。流出角度  $\theta_2$  でもフルード数が増加するにつれて角度が大きくなる傾向がみられるが、その変化は流出角度  $\theta_1$  よりも顕著である。また、流出角度  $\theta_2$  では  $Fr_1 = 0.95$  で変化の傾向が変わっている。フルード数  $Fr_1$  が 0.95 未満の常流の条件では、同じフルード数でも各流入流量で流出角度  $\theta_2$  が大きく異なっている。一方で、フルード数  $Fr_1$  が 0.95 以上の射流あるいは射流に近い条件では、流出角度  $\theta_2$  が急激に大きくなるが、流入流量ごとの角度の差は小さい。これらのことから、フルード数  $Fr_1$  が常流の条件では、流出角度  $\theta_2$  の変化はフルード数だけでなく、流入流量に関するパラメータにも依存していると考えられる。

図-5に湾曲水路における流出角度の計測結果を示す。湾曲水路では曲率半径を変えても同様の傾向がみられたことから、遠心力効果が最も大きいと考えられる  $R = 0.50\text{m}$  の結果を代表例として示す。

図-5(a)は横越流堰上流端の流出角度  $\theta_1$  の計測結果である。図-4(a)の直線水路の結果と同様に、フルード数が増加するに伴い、流出角度  $\theta_1$  が大きくなる傾向がみられ、同じフルード数、流入流量の条件では直線水路よりも角度が大きくなっている。また、流出角度  $\theta_1$  の増加量も直線水路より大きい。

図-5(b)は横越流堰下流端の流出角度  $\theta_2$  の計測結果である。流出角度  $\theta_2$  の変化の傾向も、図-4(b)の直線水路の結果と同様である。フルード数  $Fr_1$  が 0.95 未満の条件において、同一の水理条件では直線

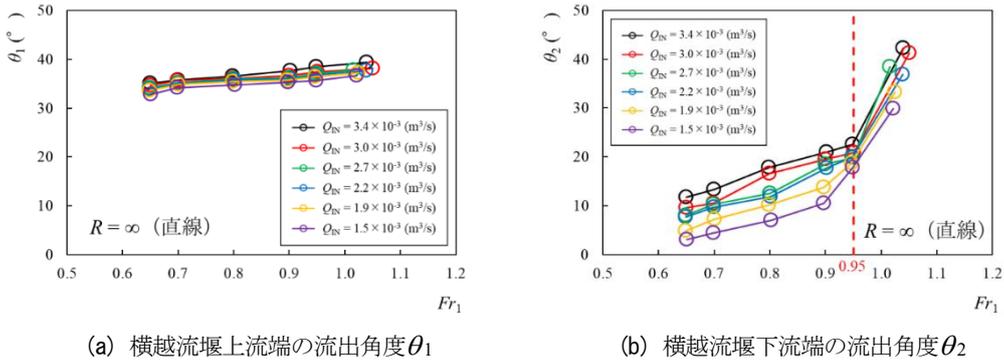


図-4 直線水路におけるフルード数と流出角度の関係

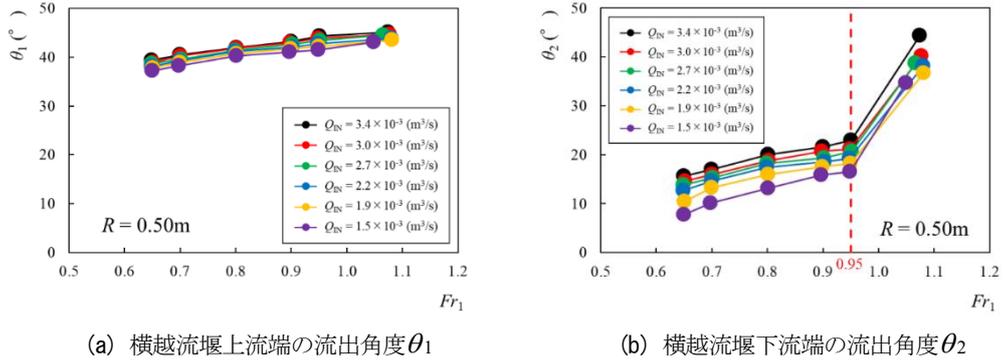


図-5 湾曲水路 ( $R = 0.50\text{m}$ ) におけるフルード数と流出角度の関係

水路よりも流出角度 $\theta_2$ が大きくなっている。特に、フルード数  $Fr_1$  が 0.80 以下の条件では、 $5.0^\circ$ 以上と顕著に差があり、これは曲率半径の遠心力効果によるものであると考えられる。一方で、フルード数  $Fr_1$  が 0.95 以上の条件では、流出角度 $\theta_2$ が直線水路の結果とほぼ同様の値となっており、水路特性の差異が流出角度 $\theta_2$ に与える影響は見られない。

図-6~8 は、フルード数  $Fr_1$  と流出角度の関係について曲率半径  $R$  をパラメータとして示したものである。ここでは、本実験において最大の流入流量である  $Q_{IN} = 3.4 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ 、中間の流入流量である  $Q_{IN} = 2.7 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ 、最小の流入流量である  $Q_{IN} = 1.5 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ の結果を示す。また、射流の条件である  $Fr_1 = Max$  は各条件でフルード数  $Fr_1$  の値が異なることから、ここではフルード数  $Fr_1$  が 0.95 以下の結果を示す。なお、前述の通り  $Q_{IN} = 1.5 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ の  $R = 0.90\text{m}$  では  $Fr_1 = 0.90$ 、0.95 に設定することができなかつたため、データはなしとなっている。図-6~8(a)は横越流堰上流端の流出角度 $\theta_1$ の結果である。流入流量に関わらず、すべてのフルード数  $Fr_1$  で  $R = 0.50\text{m}$ 、 $0.70\text{m}$ 、 $0.90\text{m}$ 、直線水路の順に、曲率半径が大きくなるにつれて流出角度 $\theta_1$ は小さくなる傾向が確認できる。このことから、流出角度 $\theta_1$ は曲率半径による遠心力効果の影響を強く受けていると考えられる。

図-6~8(b)は横越流堰下流端の流出角度 $\theta_2$ の結果である。 $Fr_1 = 0.65$ 、 $0.70$ の条件では、流出角度 $\theta_1$ の結果と同様に、流入流量に関わらず曲率半径が大きくなるにつれて流出角度 $\theta_2$ が小さくなっている。 $Fr_1 = 0.80$ は  $Q_{IN} = 3.4 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ の条件では、曲率半径が  $0.50\text{m}$  のときの角度は大きいですが、その他の曲率半径の角度は、ほぼ同様である。一方で、 $Q_{IN} = 2.7 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ 以下の条件では、基本的に曲率半径が大きくなるほど流出角度が小さくなる傾向がみられたことから、 $Fr_1 = 0.80$ では流入流量が増加すると水路の曲率の影響が弱くなると考えられる。 $Fr_1 = 0.90$ 、 $0.95$ の条件では、流入流量ごとで結果が異なっており、明確な傾向は確認できなかった。これは、射流に近い条件では堰区間内で流速が大きいまま流出することから、堰下流端の側壁に水流が勢いよく衝突し、角度が安定しないことも原因であると考えられる。

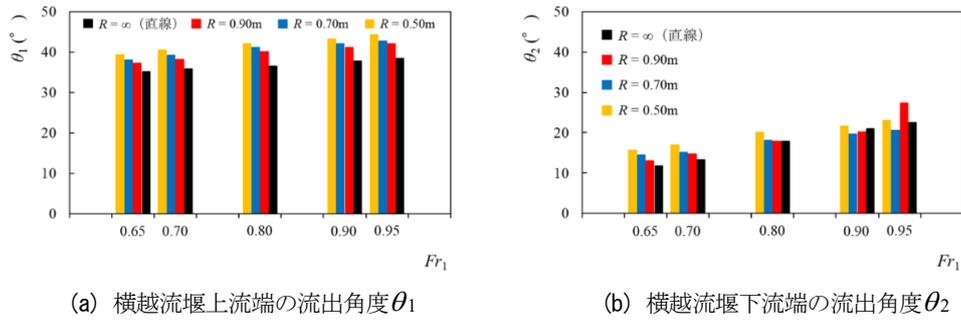


図-6 曲率半径ごとの流出角度の比較 ( $Q_{IN} = 3.4 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$ )

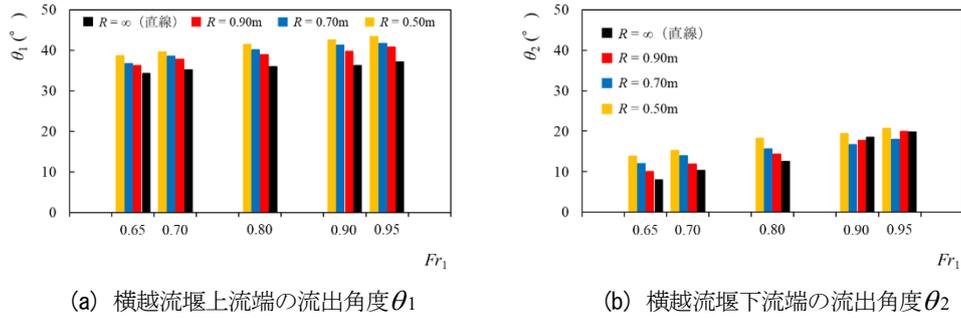


図-7 曲率半径ごとの流出角度の比較 ( $Q_{IN} = 2.7 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$ )

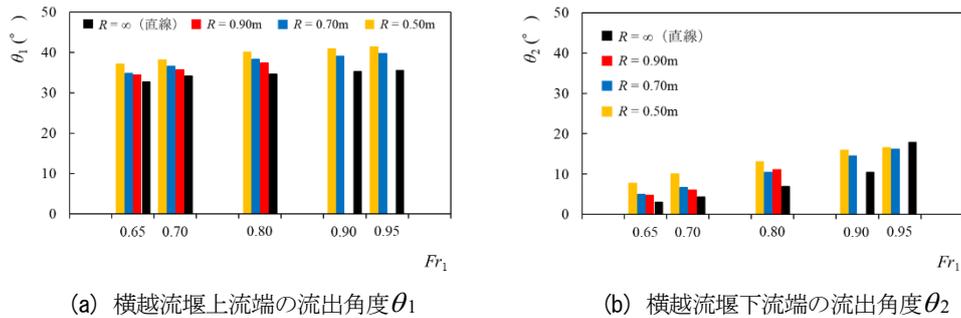


図-8 曲率半径ごとの流出角度の比較 ( $Q_{IN} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$ )

#### 4. おわりに

本研究では、横越流の流出角度と水理条件の関係、曲率半径による水路特性の差異が流出角度に与える影響を明らかにすることを目的として、フルード数  $Fr_1$ 、流入流量、曲率半径を変化させて実験的に検討した。その結果、直線水路、湾曲水路ともにフルード数の増減による流出角度の変化は、堰上流端よりも下流端の方が大きいことがわかった。また、堰上流端の流出角度は曲率半径による遠心力の影響を強く受けており、同じ水理条件では曲率半径が大きいほど角度が小さくなった。堰下流端の流出角度では曲率半径の影響は  $Fr_1 = 0.80$  以下のみで確認できた。

#### 参考文献

- 1) Subramanya, K., and Awasthy, S.C.: Spatially varied flowover side-weirs, Journal of Hydraulics Division ASCE,98(HY1), 1-10, 1972.
- 2) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 常松智博, 俣賀円: 接近流が常流の場合の有限な相対堰高を有する横越流堰の流量係数, 土木学会論文集, No.803/II-73, pp.81-89, 2005.
- 3) 朝位孝二, 河元信幸: 曲率半径を考慮した湾曲水路の横越流公式の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, I\_577-I\_582, 2016.

# 湾曲水路の横越流における 横越流箇所と流出角度に関する実験的研究

木原凜<sup>1</sup>・三戸裕矢<sup>2</sup>・朝位孝二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山口大学社会建設工学科, <sup>2</sup>山口大学大学院創成科学研究科

## 1. はじめに

近年の気候変動に伴い、河川堤防の破堤に伴って生じる洪水災害への対策が課題となっている。河川堤防が破堤する際に横越流が生じることから、横越流は河川堤防の破堤とみなすことができる。また、破堤による流出は水路横断方向に対して角度をもって起きることから、破堤氾濫流の流出角度は洪水被害を予測する上で重要な要素である。

三戸ら<sup>1)</sup>は、最大の水衝部となる位置に横越流堰位置を固定し、直線水路と湾曲水路における横越流の流出角度について実験的に研究を行った。湾曲水路での流出角度は流れが常流の場合に直線水路と比べて曲率半径による遠心力の影響が堰上流端側での流出角度に強く表れていることを示した。本研究は、三戸ら<sup>1)</sup>の研究の延長として、横越流堰箇所ごとに遠心力効果などの影響による流出角度の差異について明らかにすることを目的とし、様々な堰位置での流出角度について実験的に研究を行う。

## 2. 実験装置と実験条件

図-1 に実験水路の概略を示す。実験は貯水槽・水路部で構成される湾曲水路で行う。水路幅  $B = 0.20\text{m}$ 、横越流堰幅  $L = 0.20\text{m}$  は固定であり、曲率半径を  $R$ 、円弧中心に対して湾曲部上流端と横越流堰中央部がなす角を  $\phi$  とする。図中の赤点は計測点であり、水深と流速を計測する。

図-2 に横越流堰の形状を示す。堰中央部、上流端、下流端の水深をそれぞれ  $h$ 、 $h_1$ 、 $h_2$  とし、流入流量を  $Q_{IN}$ 、流出流量を  $Q_{OUT}$ 、横越流流量を  $Q_L$ 、越流部上流側の流出角度を  $\theta_1$ 、越流部下流側の流出角度を  $\theta_2$  とする。実験条件を表-1 に示す。曲率半径を2種類、堰設置位置を3種類、流入流量を6種類、フルード数を6種類設定した。フルード数は水路末端の堰高さを調整することにより設定しているため、水路末端の堰高さが0である場合をフルード数最大としている。

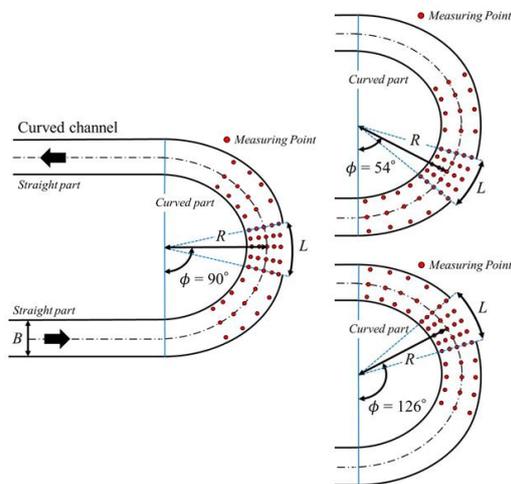


図-1 水路概略図

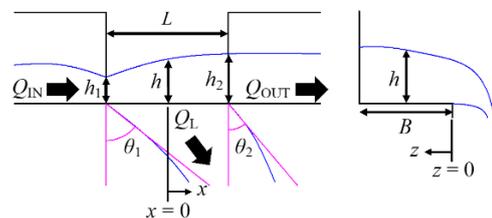


図-2 横越流堰の形状

表-1 実験条件

曲率半径 $R(\text{m})$	湾曲水路 堰設置位置 $\phi(^{\circ})$	流入流量 $Q_{IN} \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$	フルード数 $Fr_1 = \frac{Q_{IN}/(Bh_1)}{\sqrt{gh_1}}$
0.50 0.70	54	1.5	0.65
		1.9	0.70
		2.2	0.80
	126	2.7	0.90
		3.0	0.95
		3.4	Max(1.0~1.1)

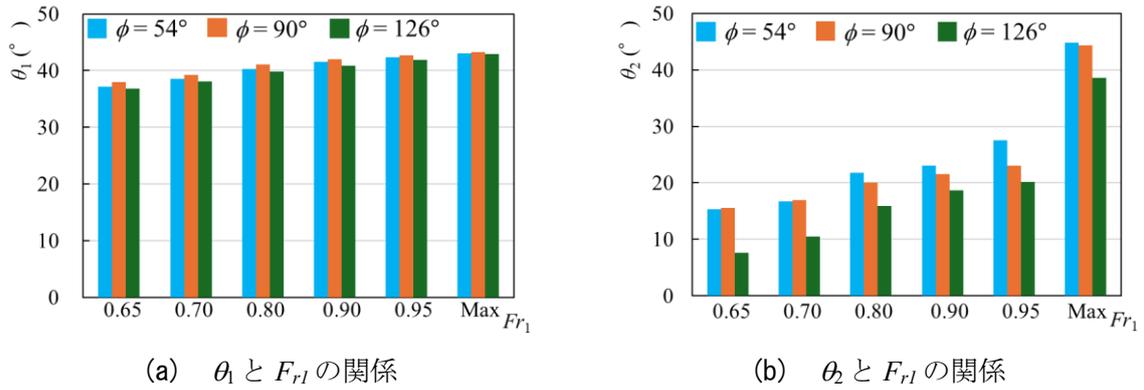


図-3 フルード数と流出角度の関係 ( $Q_{IN} = 3.4 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$ ,  $R = 0.70\text{m}$ )

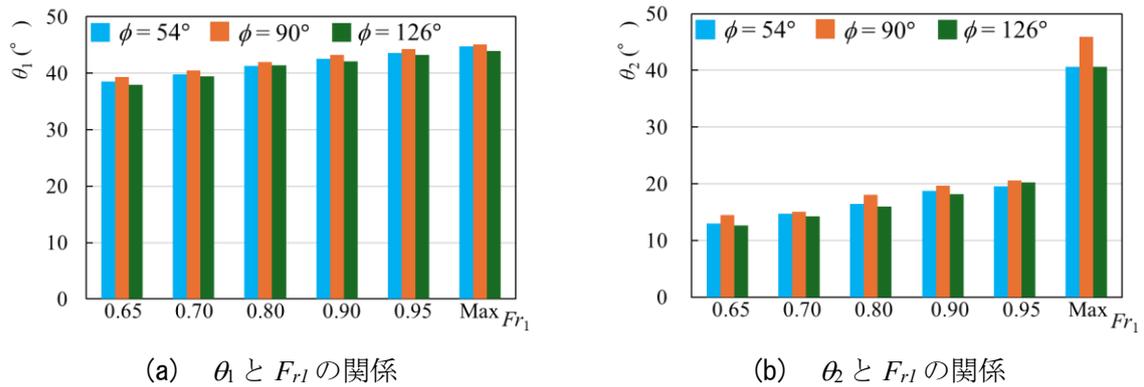


図-4 フルード数と流出角度の関係 ( $Q_{IN} = 3.4 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$ ,  $R = 0.50\text{m}$ )

### 3. 実験結果

#### (1) 堰設置箇所ごとのフルード数と流出角度の関係

図-3 にフルード数と流出角度の関係の一例として  $R = 0.70\text{m}$ ,  $Q_{IN} = 3.4 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$  での結果を示す。  $\theta_1$  と  $\theta_2$  に共通する傾向として、流出角度の値の大小関係は大部分で  $\phi = 90^\circ$ ,  $\phi = 54^\circ$ ,  $\phi = 126^\circ$  の順に値が大きい。  $\theta_2$  において  $F_{r1} = 0.95$  でのみ、  $\phi = 54^\circ$  よりも  $\phi = 126^\circ$  での  $\theta_1$  が大きい。

$\theta_1$  と  $\theta_2$  の相違点として、すべての堰位置において流出角度の値に大きく表れている。流れが常流である条件では、フルード数が増加するに従って  $\theta_1$  は緩やかに増加するが、  $\theta_2$  は  $\theta_1$  よりも低い値から緩やかに増加していき、常流から射流となった際に値が急激に増加している。これらの傾向は他の流入流量の条件においても同様に見られる。流入流量と流出角度の関係は、流入流量が少ないほど  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  の値が小さくなるという傾向が堰位置やフルード数、曲率半径によらず表れている。

#### (2) 曲率半径ごとのフルード数と流出角度の関係

図-4 に  $R = 0.50\text{m}$ ,  $Q_{IN} = 3.4 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$  でのフルード数と流出角度の関係の関係を示す。  $R = 0.50\text{m}$  でのそれぞれの流出角度について、  $\theta_1$  は前述した  $R = 0.70\text{m}$  での結果と同様に  $\phi = 90^\circ$ ,  $\phi = 54^\circ$ ,  $\phi = 126^\circ$  の順に値が大きい傾向が表れている。一方で、  $\theta_2$  は異なる傾向を示している。堰設置位置  $\phi$  ごとの  $\theta_2$  の大小関係が一貫しておらず、  $F_{r1} = 0.65, 0.70$  において  $\phi = 90^\circ$ ,  $\phi = 54^\circ$ ,  $\phi = 126^\circ$  の順に値が大きいのが、  $F_{r1} = 0.80, 0.90, 0.95, \text{Max}$  においては  $\phi = 54^\circ$ ,  $\phi = 90^\circ$ ,  $\phi = 126^\circ$  の順に値が大きいという傾向がみられる。同じ流入流量における  $R = 0.70\text{m}$  の結果である図-3 との比較では、堰設置位置  $\phi$  ごとの大小関係が  $F_{r1} = 0.80, 0.90, 0.95, \text{Max}$  において大きく異なっている。フルード数ごとでの流出角度の値の変動は  $R = 0.50\text{m}$  において大きくなっており、曲率半径が変化したことによる遠心力効果の影響がより顕著に表れている。

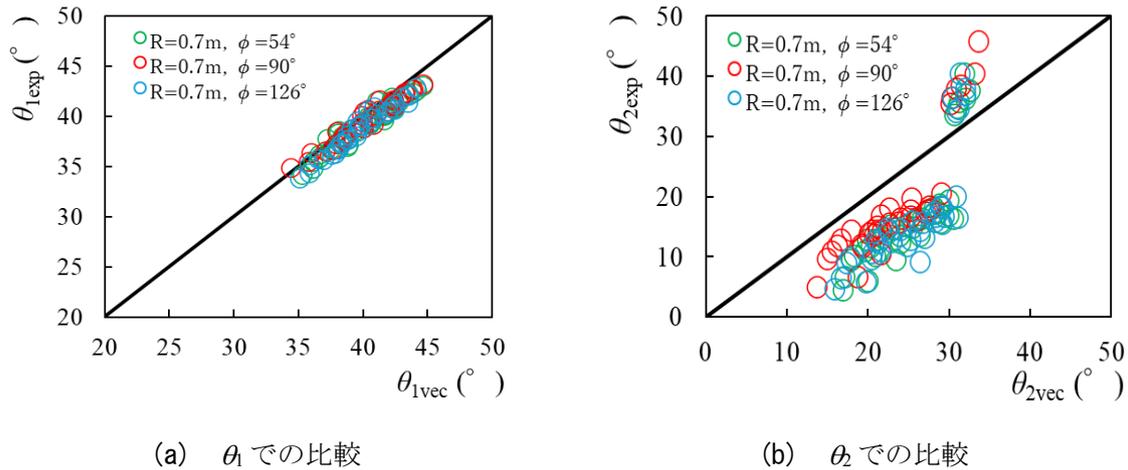


図-6 流速ベクトルと流出角度の実測値の比較 ( $R = 0.70\text{m}$ )

#### (4) 流速ベクトルの角度と流出角度の実測値の比較

図-6 に流速ベクトルの角度と流出角度の実測値の比較を示すグラフの一例として、 $R = 0.70\text{m}$  の結果を示す。(a)に $\theta_1$ 、(b)に $\theta_2$ について示している。

$\theta_1$  について、いずれの堰位置でもデータは線形的に分布し、全体のデータは線形的に分布している。実測値と比べてやや過大評価のデータが多いものの、データのばらつきはほとんどなくまとまっている。堰位置ごとの相対誤差について、 $\phi = 54^\circ$ では3.23%、 $\phi = 90^\circ$ では1.97%、 $\phi = 126^\circ$ では2.85%であり、 $\phi = 90^\circ$ で最も高い精度が得られている、全体の相対誤差の値は2.45%を示しており、良好な精度が得られている。

一方で、(b)に示す同じ曲率半径における $\theta_2$ のデータには全体のデータに大きくばらつきがあり、実測値と比べて大きく過大評価となっているデータと、過小評価となっているデータの群がある。堰位置ごとの相対誤差について、 $\phi = 54^\circ$ では68.67%、 $\phi = 90^\circ$ では54.44%、 $\phi = 126^\circ$ では117.44%であり、どの堰位置においても精度は著しく低い結果が得られている、全体の相対誤差の値は71.69%を示しており、 $\theta_1$ に対して比較的低い精度となっている。

$R = 0.50\text{m}$  においても、 $\theta_1$ の全体の相対誤差は3.23%を示しており、 $R = 0.70\text{m}$ での精度より低いものの、良好な精度が得られている。 $\theta_2$ は $R = 0.70\text{m}$ での結果と同様に、 $\theta_1$ に対して著しく低い精度となっている。

#### 4. おわりに

本研究では湾曲水路の横越流における横越流箇所と流出角度に関する実験的研究を行った。 $\theta_1$ は明確な傾向が各パラメータで見られた。今後堰位置ごとの流出角度を検討していく上で、さらに多くの曲率半径、堰位置等の条件を加えて横越流堰上流側の流出角度を中心に分析していくことが必要であると考えられる。実際の河川堤防の破堤において、下流側の流出は氾濫域が流出角度を短時間で上回るケースが多くあり、破堤部下流側の流出角度が上流側の流出角度よりも検討する意義が薄いことも踏まえておくべきである。このことから、今後は横越流堰上流端側の流出角度 $\theta_1$ を中心に算定式の開発を進めていく。

#### 参考文献

- 1) 三戸裕矢, 朝位孝二, 渡辺勝利: 直線水路と湾曲水路の横越流における流出角度に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), 2025

# 2024 年台風 11 号（ヤギ）によりベトナム北部で 発生した土石流災害について

鈴木 素之<sup>1)</sup>・松木 宏彰<sup>2)</sup>・Nguyen Thanh Duong<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 山口大学大学院創成科学研究科, <sup>2)</sup> 復建調査設計高知支店, <sup>3)</sup> Hanoi University of Mining and Geology

## 1. はじめに

2024 年 9 月、ベトナム北部において、2024 年台風 11 号（呼名：Yagi）により甚大な人的・物的被害が発生した。この台風は過去 30 年間にベトナムを襲った台風の中で最も強い台風として記録される<sup>1)</sup>。台風は、9 月 7 日にクアンニン省とハイフォン市に上陸した後、人口 1,900 万人の北部地域全体が長期間集中豪雨に見舞われ、各所で洪水、地すべり、広範囲の浸水が発生し、それに伴い人的・物的被害が生じた<sup>1)</sup>。これまでに被災状況が調査されているが、数件報告されているのみであり<sup>2)4)</sup>、学術的な見地からこの災害の全容は明らかにされていない。一方、ベトナム北部では毎年のように土砂災害が発生しており、特に 2017 年 8 月 3 日夜からの豪雨によってソンラ省イトン地区を中心として大規模な土石流が発生し、川沿いの集落を襲い、死者 27 人ならびに行方不明者 14 名の被害が生じたことが報告されている<sup>5)6)</sup>。そこで、著者らは、2025 年 1 月 9 日、台風 11 号および台風 11 号から変わった熱帯低気圧による大雨がもたらした大規模土石流の被災箇所の現地調査を行った。以下に、その結果を報告する。なお、ベトナムにおける気象、地形、地質等に関する情報は必ずしも十分に入手・精査できておらず、被害状況の報道も限定的であることから、本文ではインターネットで公開されている二次的情報を基に記述したことをお断りする。

## 2. 台風および台風から変わった熱帯低気圧による被害の概要

台風 11 号は 2024 年 9 月 1 日 15 : 00 に発生し、9 月 7 日にベトナム北部に上陸し、9 月 8 日 21 時に消滅し、熱帯低気圧に変わった。本台風の最低気圧は 915 hPa、最大風速は 55 m/s を記録した<sup>7)9)</sup>。南シナ海でこれほど中心気圧が低下した台風としては、他に台風 202122 号ぐらいしか見当らず、南シナ海における観測史上最強クラスの台風となっているとも報じられている<sup>9)</sup>。

2024 年 10 月 23 日時点の台風 11 号による被害情報<sup>6)10)</sup>をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 被害発生日時：台風（その後、熱帯低気圧）がもたらした大雨による被害は 9 月 8 日以降に拡大したとみられる。
- 2) 被害を受けた地域：ベトナム北部全域であり、特にラオカイ省、イエンバイ省、カオバイ省に被害が集中している。
- 3) 被害の規模：人的被害としては、死者 321 人、行方不明者 24 人、負傷者約 2,000 人である。物的被害としては、284,000 棟の家屋が損壊または破壊、そのうち 84,000 棟が洪水の影響を受けた。また、2,350 の学校と 745 の医療施設が被害を受けた。約 286,660 ha の水田、63,350 ha のその他の作物や野菜の被害を受け、約 44,556 頭の家畜と 575 万羽以上の家禽が死んだり流されたりした。この他に、交通、通信、市場、水道施設が台風による洪水や地すべりによって深刻な影響を受けた。

### 3. 被災箇所の状況

調査箇所はラオカイ省バオイエン区ヌー村（Làng Nù）である。図1にベトナム北部における調査箇所の位置を、写真1に調査箇所周辺の空中写真を示す。当該箇所はハノイ中心部から車で片道4～5時間ほどかかる距離にある。この箇所では、発生した大規模土石流が村落や田畑を襲い、死者60人ならびに行方不明者9人という大きな被害になった。写真2～8に現地の被災状況を示す。なお、現地状況に関してはドローンによる空撮動画が公開されている<sup>2)</sup>。これを参照すると、土石流のトリガーとなったのは源頭部の大規模斜面崩壊であり、台風および台風から変化した熱帯低気圧がもたらした大雨に起因するものと考えられる。土石流が発生したのは、9月10日早朝6時頃とされ、被災者は避難できずに土石流に襲われたと考えられる。写真2は慰霊塔から見た土石流堆積物および流木の状況である。発生土砂量は160万m<sup>3</sup>以上と推定され、堆積土砂の厚さは大きい所で15～18mと見込まれている。被災箇所周辺の地質は花崗

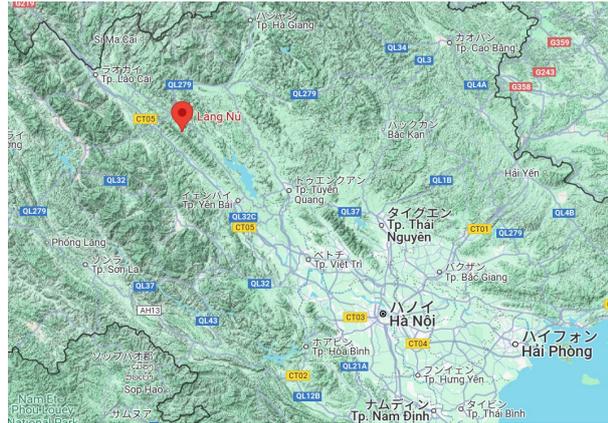


図1 ベトナム北部における調査箇所（Làng Nù）の位置（Google Mapより引用）

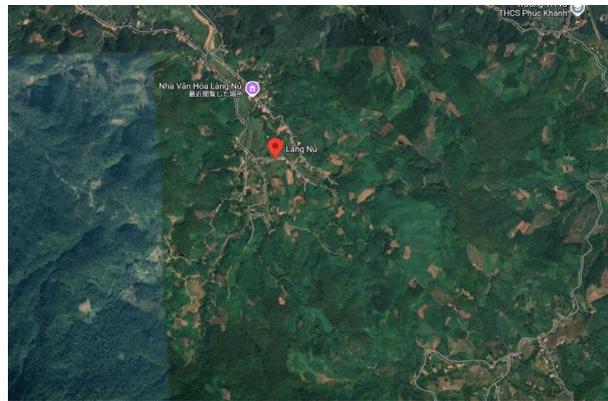


写真1 調査箇所周辺の空中写真（Google Mapより引用）



写真2 慰霊塔から観察した土石流堆積物および流木の状況



写真3 土砂が氾濫・堆積した平野部（細粒な土砂が広く、厚く堆積している）



写真4 土石流が削剥した斜面に見られる旧土石流堆積物（斜面の赤褐色の土はサブロライト）



写真5 巨転石と被災家屋



写真6 被災を免れたか、あるいは軽微であったとみられる家屋



写真7 慰霊塔の状況



写真8 家屋の残骸や流木等の堆積状況

岩、片麻岩、粘板岩である。また、この周辺には北西～南東方向に延びる第一級の断層群の Red River 断層があることから<sup>5)</sup>、岩石は過去の断層運動で破碎され風化変質していた可能性がある。写真3は土砂が氾濫・堆積した平野部であり、細粒な土砂が溜まっていた。この場所で土試料と埋没していた炭化樹木を採取した。写真4に示す土石流が削剥した斜面には土石流堆積物の特徴である逆級化構造が確認された。これより、この場所において過去に土石流が発生していたと推察される。また、斜面の表層土は風化した赤褐色のサブロライトとみられることから、この箇所の風化層厚は大きいとみられる。写真5～8は被災箇所周辺の状況を示しているが、写真6の奥に見える家屋は僅かな標高差で被災を免れたか、軽微であったとみられ、この場所が避難場所として適地となる可能性がある。

#### 4. 採取試料の土質特性

図2(a)、(b)に、写真3の土砂堆積部で採取した2試料の粒径加積曲線を示す。(a)の試料の通過質量

百分率は粒径 2 mm 以下が 83.1 %、粒径 0.1 mm 以下が 5.5 % であることから、砂質土である。また、(b)の試料の通過質量百分率は粒径 2 mm 以下が 87.9 %、粒径 0.1 mm 以下が 49.7 % であることから、(a)の試料よりも細粒分を多く含んだ砂質土である。このことは、降雨が細粒な土砂が平野部まで長距離運搬されるほどの長期間の大雨であったことを裏付けている。

## 5. まとめ

近年、温暖化による気候変動の影響が世界各地で顕在化し、大雨や洪水のリスクが高まっている。特に発展途上国では防災体制の脆弱性や災害意識の低さが大きな課題である。今回のケースから、このような激甚な大雨災害がベトナムでも起こることが分かった。なお、この被災箇所で犠牲になった住民が大雨に関する情報を取得していたか、土石流や洪水に対するリスクを認識していたかの検証が今後重要であると考え。また、避難情報の伝達と受け止め方、避難経路の確認など、ソフト面の防災対策の更なる点検が必要であろう。

**謝辞** 本研究は科学研究費補助金挑戦的研究（萌芽）（22K18871，代表者：鈴木素之）の助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) IFRC: Viet Nam, Asia-Pacific | Typhoon Yagi - Operation Update #2 (MDRVN024), <https://reliefweb.int/report/viet-nam/viet-nam-asia-pacific-typhoon-yagi-operation-update-2-mdrvn024> (閲覧日：2025年2月12日)。
- 2) 愛媛大学農学部森林資源コース森林環境制御研究室：ベトナム北部の台風災害調査, <http://forest-resources.agr.chime-u.ac.jp/kankyoseigyo/> (閲覧日：2025年2月12日)。
- 3) 東京都市大学環境学部環境地理学研究室：台風 YAGI による土砂災害現場の調査を実施しました, [https://www.comm.tcu.ac.jp/satogo\\_lab/posts/news20.html](https://www.comm.tcu.ac.jp/satogo_lab/posts/news20.html) (閲覧日：2025年2月12日)。
- 4) AHA Center: AHA Centre Situation Update No. 4: Landslides and Flash Floods in Northern Viet Nam, Thursday, 10 Aug 2017, 16:00 hrs (UTC+7), <https://reliefweb.int/report/viet-nam/aha-centre-situation-update-no-4-landslides-and-flash-floods-northern-viet-nam> (閲覧日：2025年2月12日)。
- 5) 川村喜一郎, 大久保泰邦, Le Quoc Hung, 熊谷勇河, 藤田勝, Nguyen Ho Kham：2017年8月にベトナム北部で発生した土砂災害の調査報告と新しい調査方法の検討, 第10回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.205-211, 2020年9月。
- 6) OCHA, UNCT Viet Nam: Viet Nam: Typhoon Yagi and Floods - Situation Update No. 5 (as of 23 October 2024), <https://reliefweb.int/report/viet-nam/viet-nam-typhoon-yagi-and-floods-situation-update-no-5-23-october-2024> (閲覧日：2025年2月12日)。
- 7) 気象庁：台風位置表 令和6年(2024年), <https://www.data.jma.go.jp/yoho/data/typhoon/T2411.pdf> (閲覧日：2025年2月12日)。
- 8) ウェザーニュース：2024年台風11号(ヤギ・YAGI), <https://weathernews.jp/onebox/typhoon/2024/11/> (閲覧日：2025年2月12日)。
- 9) デジタル台風：2024年台風11号(ヤギ|YAGI), <https://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/news/2024/TC2411/> (閲覧日：2025年2月12日)。
- 10) ベトナムニュース総合情報サイト VIETJO：台風3号ヤギ、死者・行方不明者336人に, [https://www.viet-jo.com/news/social/240913184318.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.viet-jo.com/news/social/240913184318.html?utm_source=chatgpt.com) (閲覧日：2025年2月12日)。

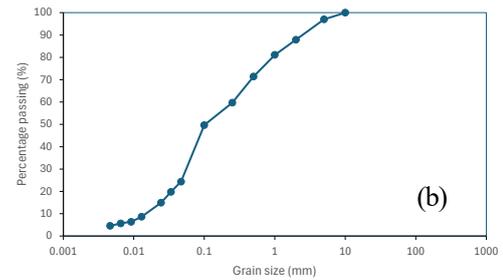
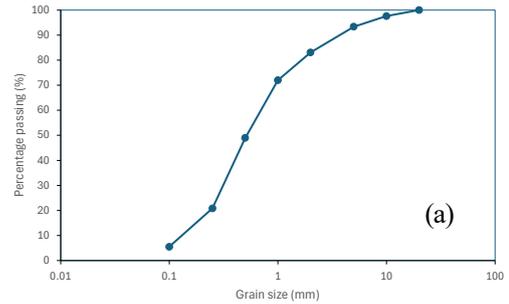


図2 土砂堆積部で採取した試料の粒径加積曲線

# 発令和6年能登半島地震による地表変状： 引張応力場でなぜ圧縮変形が起こるのか？

辻 智大<sup>1)</sup>・山田 佑哉<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>山口大学大学院創成科学研究科

## 1. はじめに

2024年1月1日に発生した能登半島地震(Mw7.5, 最大震度7)では, 能登半島沖の北東-南西走向, 南東傾斜の逆断層が動き, 走向方向に約150 km破壊した<sup>1)</sup>(地震調査研究推進本部地震調査委員会). この地震により, 能登半島の北西部の輪島市西部で最大約4 m, 最大約2 m西向きに変動する大きな地殻変動が認められた<sup>2)</sup>(国土地理院). この地震によって逆断層の上盤側の地殻が北西に伸長したが, 地表には正断層のみならず, 逆断層や横ずれ断層など様々な変位が認められた<sup>3)</sup>(吉見). これらの多様な変形に対する明確な解釈は与えられていない. さらに, 未だに認識されていない断層変形も多数存在し, それらの一部は既に消失した. そこで本研究では, 能登半島内に認められた変形のうち, 輪島市鳳至川沿いに形成された圧縮性の変形に着目し, その成因を考察する目的で, 地形地質調査および海岸における隆起量の測定を実施した. これらの結果をSAR<sup>2)</sup>(国土地理院, 2024), レーザー測量による解析結果(国際航業, 2024), 発震後の空中写真判読結果と比較した.

## 2. 研究方法

本研究では, 2024年1月11日に撮影された輪島市西部の空中写真<sup>5)</sup>から地表変状と推定されるものを抽出した. 2024年5月1日~5月5日の5日間に現地地形地質調査を実施した. 本調査では, 輪島市西部において地表変状を観察した. この時点では調査地域において田畑の耕作がほとんど行われていなかったため, 田畑を中心に地表変状が残っていた. また, 門前町周辺の海岸沿いで隆起量の計測を行った.

## 3. 能登半島の地殻変動

国土地理院の観測および現地調査によると, 能登半島北西部で最も隆起量が大きく, 大きい所では4 mを超える<sup>2)</sup>. 門前町周辺の海岸沿いで計測の結果, 門前町五十洲の小崎にて最大4.5 mの隆起が認められた. 隆起量はこの地点で最大であり, 海岸沿いの調査では南および東に向かって小さくなる.

また, 能登半島内における水平変位量分布は非常に不均質である. 能登半島北西部では北向き変位量は小さく, 西向き変位量および隆起量が大きい(最大約1.5 m)<sup>2)</sup>. Fukushima et al.<sup>6)</sup>の北向き変位変位量分布図(図1a)によると, 鳳至川を境にその北西側と南東側で変位量分布の傾向がはっきりと異なる. すなわち, 鳳至川沿いより南東側では北向き変位が卓越しているのに対し, 北西側の地域では南向きの変位が認められる(図1a). その傾向は航空レーザー計測の解析結果<sup>4)</sup>による北向き変位量分布図(図1b)においても認められる. 航空レーザー計測の解析結果<sup>4)</sup>による上下変位量分布図(図1c)を見ると, 輪島市長井町から門前町中屋にかけての鳳至川沿いに, 北東方向に複数の線状の隆起部が認められた.

#### 4. 鳳至川沿いの地表変状

輪島市鳳至川沿いの g 地点の田んぼでは  $N43^\circ E$  の軸を有する背斜状隆起が認められた。この背斜状隆起の隆起量は 20 cm，半波長は約 15 m であった。この田んぼの北東側の畔も同様に隆起しており，さらにその北東延長部の護岸擁壁が破損していた。この隆起に横ずれ変形は認められなかった。h 地点では， $N37^\circ E$  の軸を有する約 20 cm の背斜状の高まりが認められた（図 1g）。この高まりの北東側の鳳至川の護岸擁壁が崩壊し，さらに北東側の道路に変状が発生していた。i 地点では， $N52^\circ E$  の隆起軸を有し，北西側が約 20 cm 隆起する変状が認められた。これらは発災後の 2024 年 1 月 11 日に撮影された空中写真（図 1d~f）において雪の分布する範囲と溶けている領域の境界の方向と調和的である。これらの空中写真と現地地形地質調査の照合より，これらの変状が 2024 年能登半島地震によって発生したものと判断される。

航空レーザー測量<sup>4)</sup>および解析によると，鳳至川の現地で見られた背斜状隆起は，航空レーザー測量の上下変位分布図で認められる全長数 km に及ぶ線状の隆起と位置および方向が一致する。上下変位分布図で認められる直線状の隆起は  $N40\sim 50^\circ E$  の軸を有し，左雁行配列する背斜状隆起とみなされる。

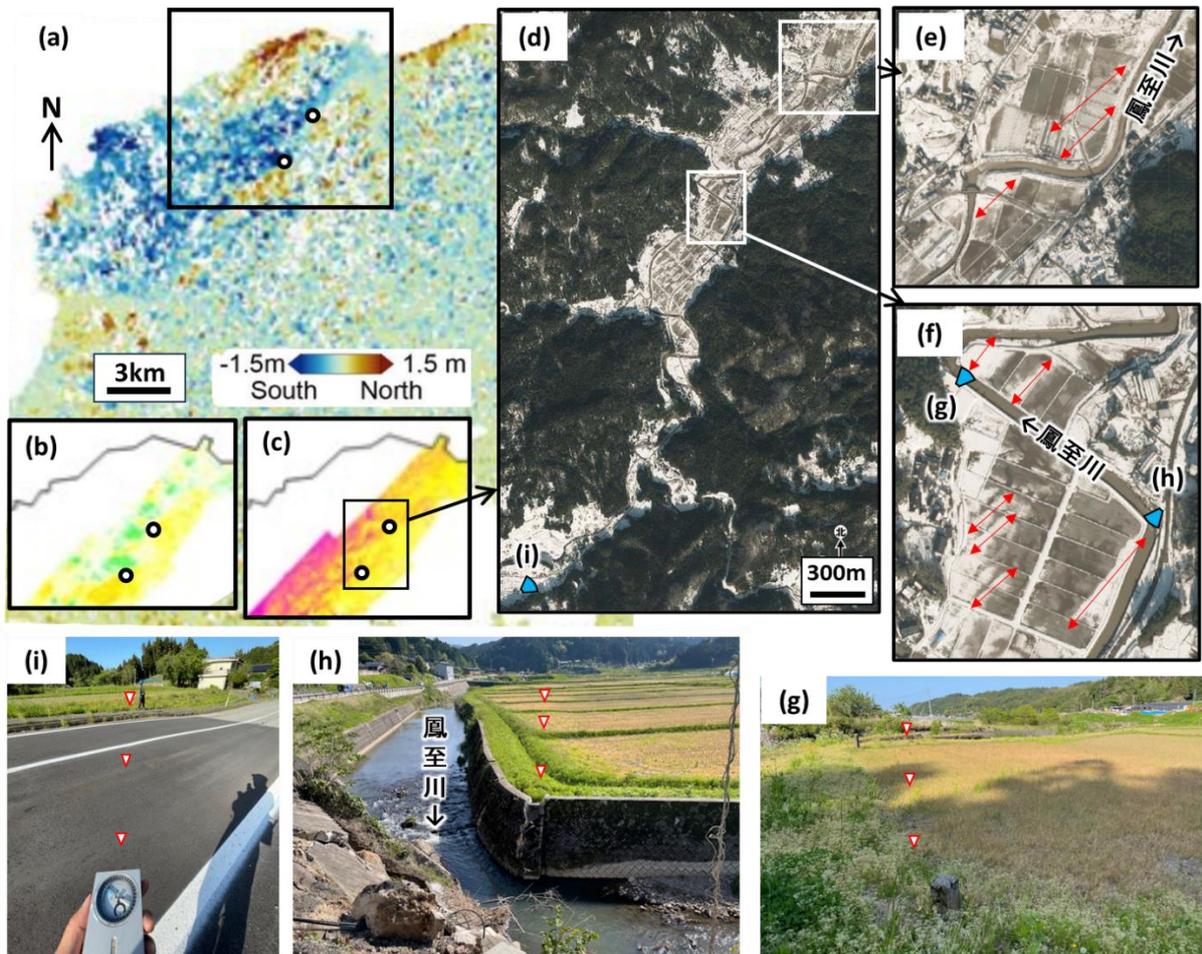


図 1 鳳至川沿いの地表変状。(a) 北向きの変動分布図<sup>6)</sup>。(b, c) 北向きおよび上下変位分布図<sup>4)</sup>。a~c 中の黒丸は f と i の位置を示す。(d~f) 発災後の空中写真<sup>5)</sup>。写真南西から北東に鳳至川が流れている。赤色の両矢印は圧縮性隆起の軸を表す。水色の印は写真 g~i の撮影方向を示す。(g~i) 圧縮性隆起の写真。赤色枠の三角形は圧縮性隆起の位置を示す。

### 5. 引張応力場でなぜ圧縮性的変形が発生したのか？

鳳至川沿いでは、それぞれが  $N40\sim 50^\circ E$  の背斜軸を有し、全体として  $N35^\circ E$  に続く雁行背斜褶曲群を成している。この変状が発生した鳳至川を境に、南東側と北西側とで地殻変動に差異が認められた。すなわち、鳳至川の北西側（能登半島の北西部）では北向きの変位量が小さく、西向きの変位量が大きい（最大約 1.5 m）<sup>2)</sup>。また、半島の北西端に向かうほど隆起量が大きくなる傾向が認められた<sup>2)</sup>。これに対し、鳳至川の南東側には顕著な傾動は認められず、北西方向への変位量が大きく（最大 0.9 m）、鳳至川の北西側に対する南東側の相対的な北進が認められた。このように、地殻変動は連続的ではなく、鳳至川沿いに変形の集中が認められることから、本論では鳳至川を境とする北西側と南東側のブロックとして扱う。鳳至川より北西側のブロックに対して南東側のブロックが相対的に北進することで、地表に圧縮性の隆起が生じたと解釈される（第2図）。

また、雁行背斜褶曲群をなした理由としては、鳳至川の北西側のブロックでは北向き変位量は小さく西向き変位が大きかったことにより、ブロックの境界に左横ずれせん断応力が発生し、左雁行背斜褶曲群が発生したと解釈される。なお、谷中低地は軟弱地盤であることから、せん断変形が集中した可能性がある。

令和6年能登半島地震で輪島市鳳至川沿いに発生した左雁行状の背斜状隆起は、北側ブロックの西進と隆起（北西ほど隆起する傾動）および南東側ブロックの北西進が組み合わさることによって形成された圧縮性隆起（pressure ridge）であると解釈される。

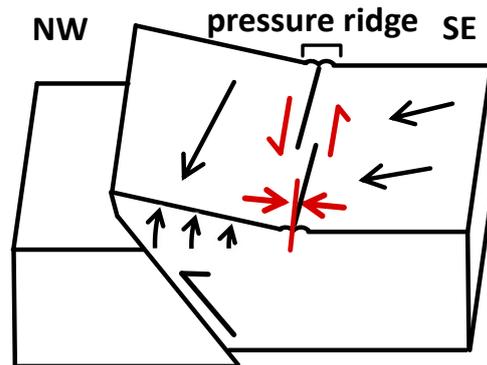


図2 圧縮性隆起形成の解釈図

### 6. 謝辞

本調査に際して、山口大学地域レジリエンス研究センターおよび自然災害研究協議会の支援を頂いた。ゲストハウスきちに宿泊し、調査を円滑に進めることができた。ここに記して感謝を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 令和6年能登半島地震の評価(令和6年2月9日公表), 地震調査研究推進本部 Web ページ, [https://www.jishin.go.jp/main/oshirase/20240101\\_noto.html](https://www.jishin.go.jp/main/oshirase/20240101_noto.html), 2024 (2024年4月9日閲覧)
- 2) 国土地理院: 「だいち2号」観測データの解析による令和6年能登半島地震に伴う地殻変動(2024年1月19日更新) [https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto\\_insar.html](https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto_insar.html), 2024 (2024年4月9日閲覧)
- 3) 吉見雅行, 丸山 正: 第九報 2024年能登半島地震の緊急調査報告(陸域に出現した地表変形の現地調査), <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/noto2024/noto2024-09.html>, 2024 (2024年4月9日閲覧)
- 4) 国際航業株式会社: 航空レーザー計測成果を用いた数値地形解析結果【速報】(能登地域:西部), <https://www.kkc.co.jp/disaster/2024/01/%E4%BB%A4%E5%92%8C%EF%BC%96%E5%B9%B4%E8%83%BD%E7%99%BB%E5%8D%8A%E5%B3%B6%E5%9C%B0%E9%9C%87/> 2024 (2024年4月9日閲覧)

- 5) 国土地理院: 地理院タイル一覧ページ, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>, (2024年4月9日閲覧)
- 6) Fukushima, Yu et al.: Landscape changes caused by the 2024 Noto Peninsula earthquake in Japan, *Science Advances*, 10, eadp9193

# 令和 6 年能登半島地震で発生した大規模斜面崩壊 の崩壊メカニズムに関する考察

瀧本 真理<sup>1)</sup>・太田 岳洋<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>山口大学大学院創成科学研究科

## 1. はじめに

2024 年 1 月 1 日、石川県能登地方を震源とするマグニチュード 7.6 の地震が発生した。この地震により能登半島全域において斜面崩壊が発生し、道路の寸断や家屋倒壊等の被害が発生した。能登半島北東部にあたる輪島東～珠洲地区では、特に集中して崩壊が発生した。図 1 に輪島東～珠洲地区における 5 万分の 1 地質図幅<sup>1)</sup>に地震で発生した斜面崩壊の発生域を重ねて示す。新第三紀流紋岩質火砕岩の分布する栗蔵層、珪質シルト岩の分布する飯塚層、デイサイト質火砕岩の分布する宝立山層で崩壊が多発し、栗蔵層、飯塚層では大規模な斜面崩壊が複数箇所が発生した。

過去に発生した大規模な地震性斜面崩壊として、堆積岩地域において層すべりを引き起こした 2004 年中越地震<sup>2)</sup>や、ハロイサイト化した第四紀降下火砕物層の崩壊が発生した 2016 年熊本地震<sup>3)</sup>、2018 年胆振東部地震<sup>4)</sup>が挙げられる。しかし、新第三紀の火砕岩分布地域における地震性斜面崩壊の報告例はほとんどないため、今回の地震により生じた斜面崩壊に対して地質学的な関連性を考察することは重要である。本報告では、栗蔵層（流紋岩質火砕岩）分布域で発生した大規模な斜面崩壊の地形・地質的特徴を明らかにし、それに基づいた崩壊メカニズムに関して考察を行う。

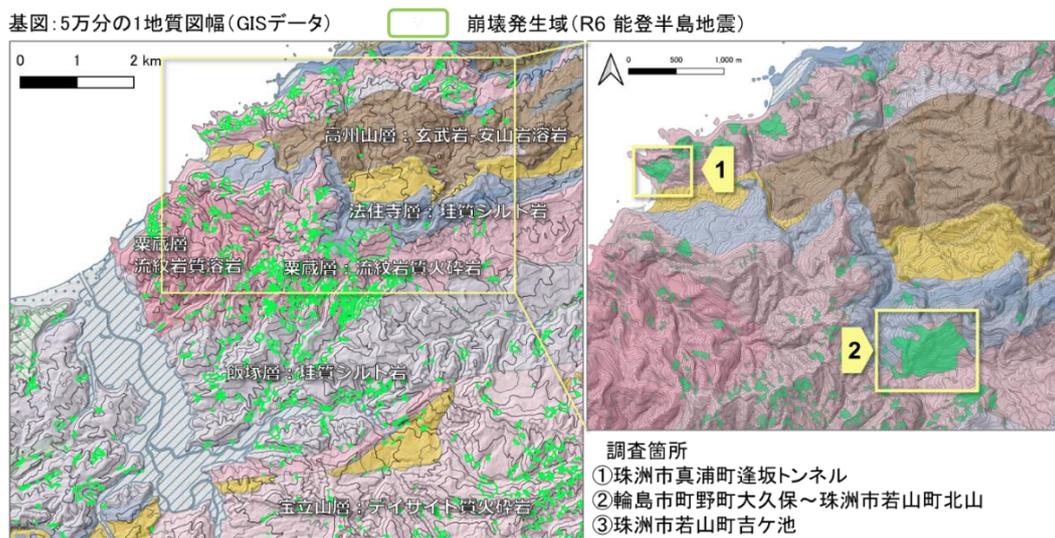


図 1 輪島東～珠洲地区における地質と崩壊分布

## 2. 調査地域

今回調査を行った大規模崩壊地は、①珠洲市真浦町逢坂トンネル ②輪島市町野町大久保～珠洲市若山町北山の 2 箇所である（図 1）。逢坂トンネルで発生した崩壊は北部に分布する栗蔵層（流紋岩質火砕岩）の分布域にあたる。大久保～北山で発生した崩壊は栗蔵層（流紋岩質火砕岩）と法住寺層（珪質シルト岩）の境界にあたり、栗蔵層は法住寺層を整合に覆うとされる<sup>5)</sup>。

### 3. 結果・考察

#### 3.1 真浦町逢坂トンネル

珠洲市真浦町逢坂トンネル坑口上の斜面で発生した大規模な斜面崩壊は、発生域の幅が約 150 m、面積が約 47,175 m<sup>2</sup>であり、大量の崩積土や倒木により道路やトンネル坑口が遮断された。

図 2 に、当該箇所周辺の発災前の 1mDEM<sup>9)</sup>より判読した不安定地形と、発災後の空中写真<sup>7)</sup>より判読した崩壊発生域を示す。発災前の斜面には複数の明瞭な旧地すべり地形や段差地形が認められ、非常に不安定な地形を呈する。今回の地震による崩壊は、旧地すべり地形の移動体上で発生したと推定される。

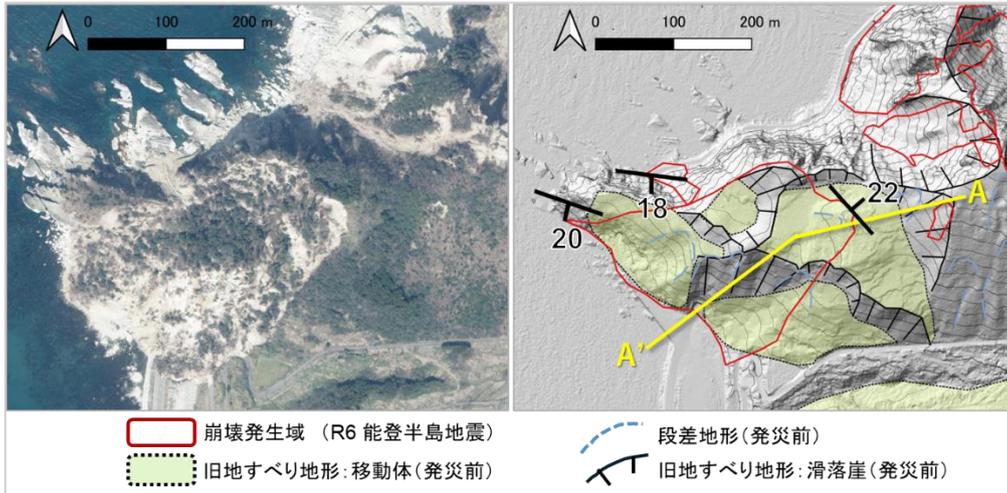


図 2 逢坂トンネル坑口上斜面における空中写真及び不安定地形

本地域は流紋岩岩片を含む凝灰岩～火山礫凝灰岩が分布し、一部は軽石を含む。層理面が明瞭であり、その走向はおおよそ東西方向で、20°前後南に傾斜する。しかし、滑落崖においては層理面の走向傾斜が変動し、一部は堆積構造が不明瞭であった。滑落崖の北西部と南東部では崩壊形態に違いが見られた。北西部では、固結度の高い岩盤が分布しており、その堆積構造は不明瞭である（図 3）。一方南東部では、層理面を有する比較的固結度の高い岩盤と粘土質な層が混在する。滑落崖が明瞭であり、北東に傾斜する固結度の高い層の層理面が滑落崖に対して受け盤構造を呈する。また、層理面に対して高角度に複数の節理が発達し、節理面と層理面に沿って岩盤が後方回転の様子が確認された。

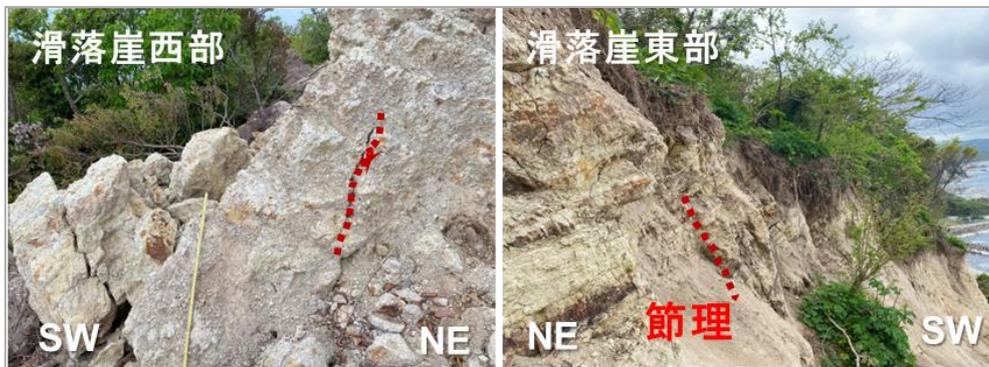


図 3 逢坂トンネル坑口上斜面の崩壊地における滑落崖

今回の地震により形成された滑落崖における受け盤構造や変形構造は、旧地すべり地形の形成時に移動体が後方回転したことで形成されたと考えられる。図 4 に逢坂トンネルにおける崩壊の推定断面

図を示す。発災前<sup>6)</sup>及び発災後<sup>8)</sup>に取得されたDEMデータより断面図を作成した。今回の地震による崩壊は、旧地すべり地形の移動体の一部が再滑動したことによると考えられる。

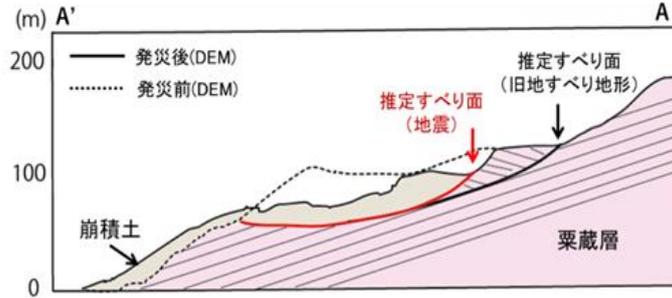


図4 逢坂トンネル坑口上斜面の推定崩壊断面図

### 3.2 町野町大久保～若山町北山

大久保～北山で発生した斜面崩壊は最大幅が約 800 m、発生域の面積が 312,830 m<sup>2</sup> と今回の地震による斜面崩壊の中で最大規模である。

図5に、当該箇所周辺の発災前の1mDEM<sup>6)</sup>より判読した不安定地形と、発災後の空中写真<sup>7)</sup>より判読した崩壊発生域を示す。発災前の斜面には複数の明瞭な旧地すべり地形や段差地形が分布する。今回の地震による崩壊は、複数の地すべり地形を跨ぐ形で発生し、滑落崖の最上部は尾根を越えた。

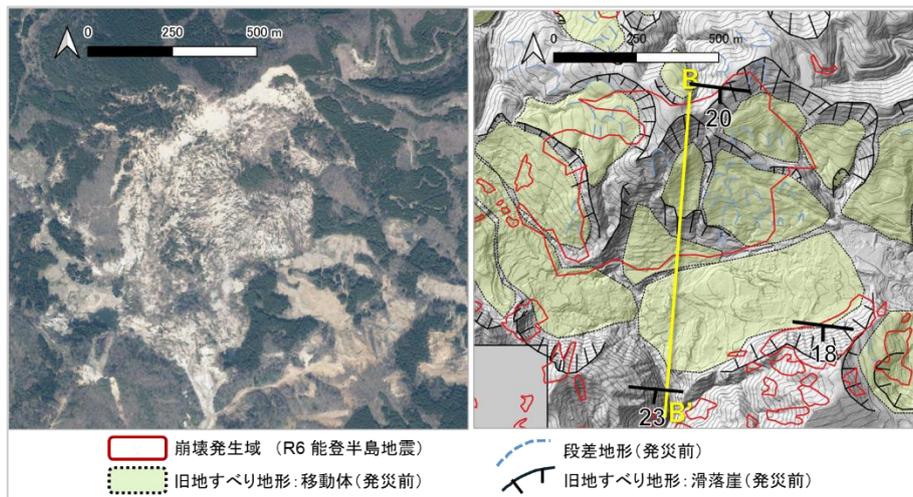


図5 大久保～北山における空中写真及び不安定地形

当該崩壊地は、主に栗蔵層である流紋岩質火砕岩の分布域とされるが、滑落崖には珪質シルト岩が分布しており、栗蔵層の下位の法住寺層に相当すると考えられる(図6)。滑落崖東部の珪質シルト岩の層理面の走向はおおよそ東西方向であり、南へ20°前後傾斜し、滑落崖に対し流れ盤構造を示す。また、滑落崖の岩盤の一部は変形し、構造が不明瞭であった。岩盤には層理面に対し様々な方向に多数の節理が発達し、層理面と節理面による平滑面が形成されている。崩積土中には、珪質シルト岩の転石及び栗蔵層である凝灰岩の転石が分布する。複数の珪質シルト岩転石の層理面にはスリッケンラインが確認され、層理面に沿って岩盤が滑動したと考えられる(図6)。

崩壊地の南の対岸斜面では、栗蔵層と推定される流紋岩岩片を含む軽石質凝灰岩～凝灰角礫岩が分布する。堆積構造は明瞭であり、層理面の走向はおおよそ東西方向で、南に20°前後傾斜し、珪質シルト岩の層理面の方向と調和的であった。



図6 大久保～北山の崩壊地における滑落崖及び転石

図7に大久保における地震発生前後の推定断面図を示す。大久保における大規模崩壊は旧地すべり地形の移動体が再滑動したことで発生し、地すべり範囲が拡大して、崩壊範囲が尾根部を超えたと考えられる。転石の分布より、崩壊前の斜面には珪質シルト岩（法住寺層）と凝灰岩（栗蔵層）が分布していたと考えられる。珪質シルト岩の層理面におけるスリッケンラインより、すべり面はシルト岩の層理面であると考えられる。また、岩盤に発達する節理も崩壊に寄与した可能性が高い。

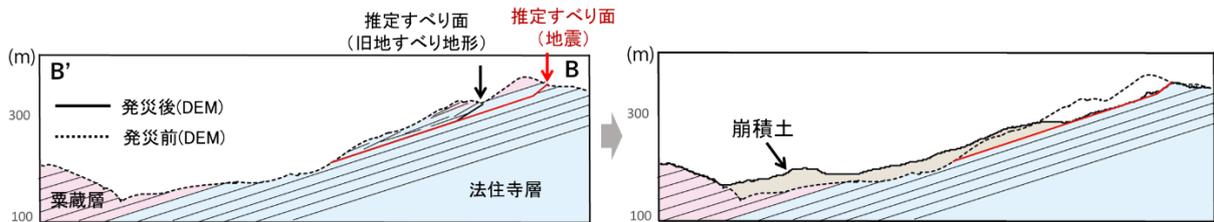


図7 大久保～北山斜面の推定崩壊断面図

#### 4. まとめ

令和6年能登半島地震で栗蔵層において発生した大規模な斜面崩壊について調査を行った。逢坂トンネル坑口上斜面では流紋岩質火砕岩における旧地すべり地形が再滑動し、移動体の一部から崩壊したと考えられる。大久保～北山の斜面では、栗蔵層の下位の法住寺層である珪質シルト岩をすべり面として旧地すべり地形が再滑動したことで崩壊が発生し、地すべり範囲が拡大したと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 産総研地質調査総合センター（2002）：5万分の1地質図幅「珠洲岬，能登飯田及び宝立山」
- 2) 関口辰夫・佐藤浩（2006）：新潟県中越地震における斜面崩壊の特徴と分布，日本地すべり学会誌，43巻，3号，142-154
- 3) 佐藤達樹・千木良雅弘・松四雄騎（2017）：2016年熊本地震により発生した阿蘇カルデラ西部における斜面崩壊の地形・地質的特徴，京都大学防災研究所年報 第60号B，431-452
- 4) 梅田浩司・千代谷佳織・柴正敏・近藤美左紀（2019）：平成30年北海道胆振東部地震に伴う斜面崩壊，応用地質，60巻，4号，172-179.
- 5) 吉川敏之，鹿野和彦，柳沢幸夫，駒澤正夫，上嶋正人，木川栄一（2002）：珠洲岬，能登飯田及び宝立山地域の地質，地域地質研究報告 5万分の1地質図幅
- 6) 朝日航洋株式会社「令和6年能登半島地震（能登東部発災前DEM）」  
<https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/aac-disaster-20240101-dem>
- 7) 令和6年能登半島地震 能登地区 正射画像（2024年4月5日～4月26日撮影）  
<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>
- 8) 林野庁「能登地域 0.5mDEM 数値標高モデル（令和6年能登半島地震の発災後）」  
[https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/2024noto\\_dem](https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/2024noto_dem)

# 令和6年能登半島地震による 土構造物の被害事例とその考察

藤本 哲生<sup>1)</sup>・鈴木 素之<sup>2)</sup>・河内 義文<sup>3)</sup>・酒井 直樹<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>大阪工業大学, <sup>2)</sup>山口大学大学院, <sup>3)</sup>ケイズラブ, <sup>4)</sup>防災科学技術研究所

## 1. はじめに

石川県能登地方では令和2年(2020年)12月から地震活動が継続し、令和6年(2024年)1月1日16時10分頃には深さ16kmを震源とするマグニチュード7.6の地震により輪島市、羽咋郡志賀町において国内7度目となる震度7が観測された<sup>1)</sup>。この地震による地盤の特徴的な被害として、能登半島北側沿岸部の地盤隆起、河北郡内灘町の埋立地における液状化現象などが確認され、社会基盤や建築構造物に甚大な被害が発生した<sup>2)</sup>。本文ではこの地震により被災した土構造物の被害事例とその考察について述べる。

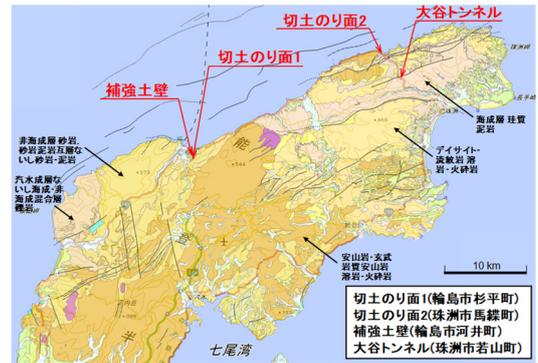


図1 調査位置図<sup>3)</sup>に加筆

## 2. 地震被害調査の概要

本調査は2024年3月29日から5月1日まで断続的に実施した。図1に、調査位置図を示す。本文では、石川県輪島市杉平町および珠洲市馬縷町の切土のり面、輪島市河井町の補強土壁、珠洲市若山町の大谷トンネルの計4箇所土構造物を対象とした被害調査結果を述べる。なお、本調査では対象土構造物の被害状況を目視により観察するとともに、一部の箇所において攪乱試料採取を行い、室内土質試験により採取土の物理特性を確認した。

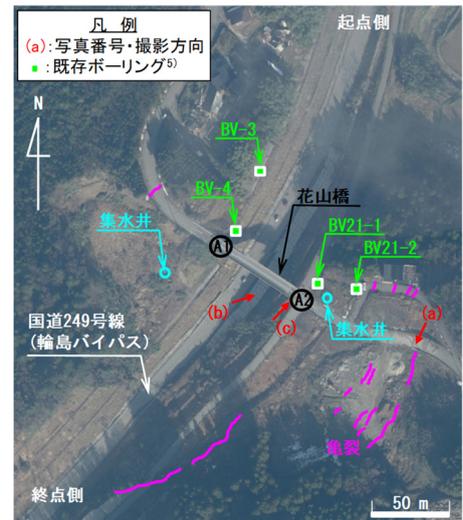


図2 現地概況図(切土のり面1)<sup>4)</sup>に加筆

## 3. 調査結果および考察

### 3.1 切土のり面1(輪島市杉平町)

図2に示すように、当該切土のり面は国道249号輪島バイパス(2009年12月供用開始)の本線に面し、上り線側、下り線側ともにのり面勾配は1:1程度、のり高の最大は18m程度であり、のり面内に跨道橋である花山橋(鋼橋)の橋台を有している。既存ボーリング柱状図<sup>5)</sup>によると、当該地の地質は表層から深部まで泥岩が分布しており、その硬さは上り線側ではGL-20mまでN値<20、下り線側ではGL-30~36mでN値34~58となるものの、その他はN値<30の軟質な岩盤である。当該切土のり面は、供用開始時には上り線側、下り線側ともに5段のグラウンドアンカー(受圧板:スクエアタイプ)が施工されていたが、下り線側は供用後の2015年7月頃に5段のグラウンドアンカーおよびコンクリート製砕工(厚さ60cm)、水抜きボーリングが追加されている。また、施工時期は不明であるものの、供用後の2014年11月には下り線側の切土のり面の背後地盤に集水井が設置されている。なお、当該切土のり面では、建設中の2007年3月25日に発生した平成19年(2007年)能登半島地震により花山橋周辺において斜面崩壊が発生したことから、花山橋の支承の取り換えや桁端部の切断が行

われた<sup>6)</sup>。

写真1に、被害状況写真を示す。なお、写真撮影位置および方向は図2を参照されたい。当該切土のり面は上り線側および下り線側ともに背後斜面からすべり破壊を生じ、前面側へ孕み出している。その規模については下り線側の方が上り線側よりも大きく、下り線側のすべりの頭端部は切土のり肩から80m程度背面側の位置、すべりの末端部は切土のり尻付近であることから大きな地すべりブロックが滑動したと推察される。また、これらから推定されるすべり面の角度は10°前後であり、低角度のすべりであることが推察される。このすべり破壊に伴い、下り線側の切土のり面に施工された当初および追加のグラウンドアンカーは両者ともにテンドンの破断によると思われる前面側への飛び出しが多くみられる。なお、調査時には応急的な安定性向上のため、幅7m程度、高さ3mの押え盛土が設置されていた。ここで、当該切土のり面のグラウンドアンカーの仕様は不明であるものの、飛び出したPC鋼より線の直径(約30mm)から推定される摩擦型アンカーとしての常時の許容荷重は約430kN/本であることから非常に大きな抑止力を期待していたことが伺える。しかし、当該地から北西約1.1kmに位置する地震計(K-NET 輪島)における観測地震動の三成分合成値が1,632Gal<sup>7)</sup>と大きな加速度であったこと、前述したように滑動した地すべりブロックが大規模であったことから、軟質な岩盤に定着を取ったグラウンドアンカーでは地震時の滑動力を抑止することが困難になった可能性が示唆される。なお、当該切土のり面の前面側への孕み出しにより花山橋のA1, A2橋台がともに転倒し、ゴム支承が全て破断するとともに橋台が鋼製主桁と衝突して下フランジに座屈がみられる。これに伴い、鋼製主桁がすべりに抵抗するストラットのような状態となっていることから、復旧工事の際には鋼製主桁と橋台との縁切り前に鋼製主桁に作用する圧縮応力などの状態を確認するとともに、すべりの再滑動防止のために必要に応じて押え盛土を追加するなどの対応が必要である。

### 3.2 切土のり面2(珠洲市馬縹町)

図3に示すように、当該切土のり面は国道249号大谷道路(2014年4月供用開始)の本線に面し、上り線側、下り線側ともにのり面勾配は1:1程度、のり高の最大は25m程度である。既存ボーリング柱状図<sup>5)</sup>によると、当該地の地質は表層から深部まで泥質凝灰岩が分布しており、その硬さは孔底のGL-23mまでN値58~127(平均N値97)であることから軟質な岩盤である。当該地では2005年度から2008年度までの試験切土の際に上り線側において地すべりが発生したため、2010年度に対策工(砕工およびグラウンドアンカー、集水井、押え盛土)が実施されたが、その後の本線切土後に新たに追従すべりが発生したため2011年度に押え盛土および頭部排土を行い、地すべりを一時的に止めて2012年度に再度対策工の検討がなされた<sup>8)</sup>。その結果、当初より



(a) すべり頭端部の亀裂



(b) グラウンドアンカーの飛び出し



(c) 主桁下フランジの座屈(A2側)  
写真1 切土のり面1の被害状況

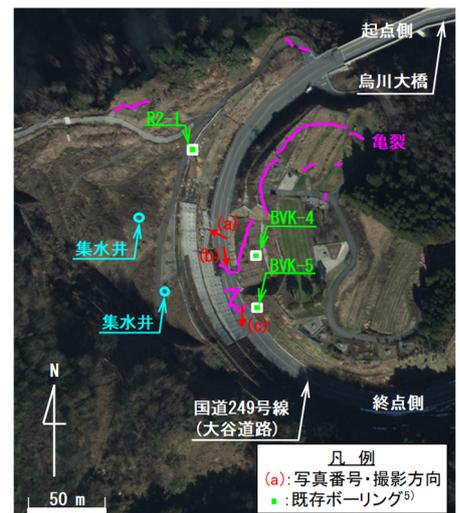


図3 現地概況図(切土のり面2)<sup>4)</sup>に加筆

も長尺のグラウンドアンカーを枠工とともに増打ちするほか、追加集水ボーリングが実施された<sup>8)</sup>。

写真2に、被害状況写真を示す。なお、写真撮影位置および方向は図3を参照されたい。当該地では上り線側の切土のり面がすべり破壊を生じ、道路面において前面側へ4m程度の孕み出しがみられる。また、このすべり破壊に伴い、当初および増打ちされた枠工の崩壊、グラウンドアンカーのテンドンの破断によると思われる前面側への飛び出しが多くみられる。ここで、前述したグラウンドアンカー(増打ち分)については、施工時の課題として軟質な泥質凝灰岩への確実な定着が挙げられており、周面摩擦力不足を解消するために削孔径のランクアップがなされている<sup>8)</sup>。また、当該地から北西約0.4kmに位置する地震計(K-NET 大谷)における観測地震動の三成分合成値が1,469 Gal<sup>7)</sup>と大きな加速度であったことから、前述した輪島市杉平町の切土のり面1と同様に、軟質な岩盤に定着を取ったグラウンドアンカーでは地震時の滑動力を抑止することが困難になった可能性が示唆される。したがって、切土のり面の安定性評価時にどのように地震力を考慮するのかが今後の課題であると考えられる。



(a) 枠工の崩壊



(b) 路面の変状(側方変形・隆起)



(c) グラウンドアンカーの飛び出し  
写真2 切土のり面2の被害状況

### 3.3 補強土壁(輪島市河井町)

図4に示すように、当該補強土壁は前面に輪島中学校、背面に航空自衛隊輪島分屯地が位置しており、天端が市道として利用されている壁高8m程度の直壁である。当該補強土壁の施工時期は不明であるものの、空中写真の変遷<sup>9)</sup>から市道が現在の線形となったのは1991年前後であるため、その際に施工されたと推察される。

写真3に、被害状況写真を示す。なお、写真撮影位置および方向は図4を参照されたい。当該地では、壁体前面の輪島中学校グラウンド(造成地盤、GL-2.0mの攪乱試料の物理特性：土粒子密度 $\rho_s=2.59\text{ g/cm}^3$ 、砂分含有率98%、最大粒径 $D_{\max}=9.5\text{ mm}$ 、均等係数 $U_c=2.2$ 、土質分類：砂(S))において側方流動が発生し、南西方向へ大きく変形している。その影響により、側方流動の発生境界付近に位置する補強土壁が前面側へ孕み出し、背面地盤が沈下している。なお、グラウンド(造成地盤)は標高約40m程度の段丘面上に位置しており、現時点で切盛境界や側方流動の発生原因は不明である。当該地の被害事例のように沖積平野以外の高地において補強土壁を計画する際、その基礎地盤の評価においてどのように側方流動の発生を予測するのかが今後の課題であると考えられる。

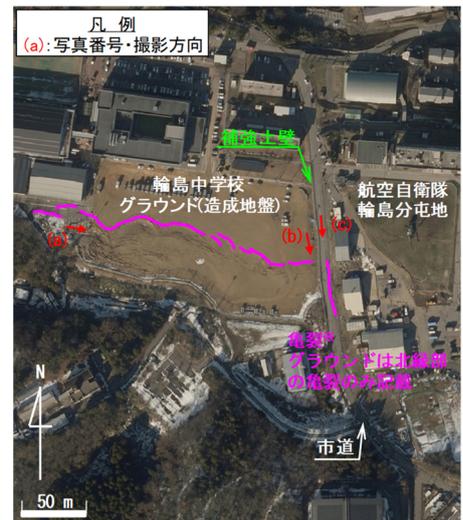


図4 現地概況図(補強土壁)<sup>4)</sup>に加筆

### 3.4 大谷トンネル(珠洲市若山町)

大谷トンネル(1997年12月竣工)は、国道249号の大谷峠下に建設されたNATM工法による山岳トンネルであり、延長782m、高さ4.7m、全幅員9.75mである。図5に示すように、当該トンネル周辺の基礎盤岩には新第三紀中新世の泥岩、その上位に崩積土が分布しており、南側坑口付近に泥岩と崩積土との



(a) グラウンドの側方流動



(b) 壁面の前面側への孕み出し  
写真3 補強土壁の被害状況



(c) 壁体背面地盤の沈下

境界をすべり面とする地すべりブロックが確認されたため、トンネル掘削前に地すべり対策工としてトンネル西側にアンカー付鋼管杭工(口径 508 mm, 肉厚 20 mm, 24 本)が施工されたほか、トンネル掘削時には上半の支持力不足対策としてウィングリブ付き鋼製支保工、湧水対策として排水ボーリング、切羽・天端の安定対策として注立式フォアボーリングが適用されている<sup>10)</sup>。

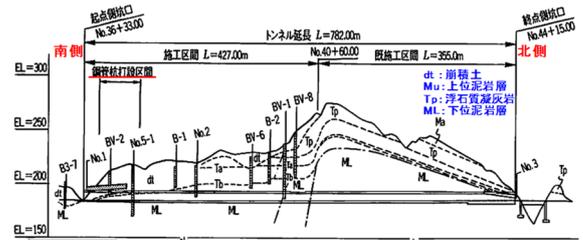


図5 大谷トンネルの地質断面図<sup>10)</sup>に加筆

写真4に、被害状況写真を示す。当該トンネルでは南側坑口から5スパン目以北の数スパンにおいて、覆工コンクリート(厚さ 300 mm)に亀裂や崩落がみられる。なお、覆工コンクリートや防水シートの変形状況からアーチ部に西側から力が作用したことが伺える。また、コンクリート舗装については南側坑口から5スパン目と6スパン目間の継目に変状がみられ、6スパン目が5スパン目に対して北西側へ変形(北側へ0.6m程度、西側へ0.6m程度)し、ダウエルバーの引き抜けや舗装下部の陥没(0.8m程度)がみられる。これらの覆工コンクリートやコンクリート舗装の被害の発生箇所は、前述した地すべり対策工の施工区間と概ね一致していることから地震により地すべりブロックが再滑動した可能性が示唆される。なお、覆工コンクリートとコンクリート舗装の変形の向きが異なる(逆方向)ことから、複数の地すべりブロックが関係している可能性がある。

#### 4. おわりに

南海トラフの巨大地震や首都直下地震など、近い将来に発生が予測されている大規模地震による土構造物の被害の軽減に資するため、今後も実地震後の被害調査により事例を蓄積するとともに、その発生原因の究明ならびに復旧・復興に向けた各種検討に尽力したい。



(a) 覆工コンクリートの崩落(南側から6~7スパン目、北向きに撮影)



(b) コンクリート舗装の継目の変状(南側から5~6スパン目、西向きに撮影)  
写真4 大谷トンネルの被害状況

#### 参考文献

- 1) 金沢地方気象台：令和6年能登半島地震の地震活動と防災事項ポータルサイト, <https://www.data.jma.go.jp/kanazawa/shosai/notojishinportal.html> (2025.2.9 閲覧)
- 2) 内閣府：令和6年能登半島地震に係る被害状況等について(令和7年1月28日14:00現在), [https://www.bousai.go.jp/updates/r60101notojishin/r60101notojishin/pdf/r60101notojishin\\_55.pdf](https://www.bousai.go.jp/updates/r60101notojishin/r60101notojishin/pdf/r60101notojishin_55.pdf) (2025.2.9 閲覧)
- 3) 産業技術総合研究所：地質図 Navi, <https://gbank.gsj.jp/geonavi/> (2025.2.9 閲覧)
- 4) 国土地理院：空中写真, [https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101\\_noto\\_earthquake.html](https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101_noto_earthquake.html) (2025.2.9 閲覧)
- 5) 一般財団法人国土情報センター：災害復旧支援地盤情報緊急公開サイト, <https://publicweb.ngic.or.jp/emergency-1/> (2025年2月9日閲覧)
- 6) 北都鉄工：橋を架けた人・直した人・これから直す人, <https://k-hokuto.co.jp/news/2148/> (2025.2.9 閲覧)
- 7) 防災科学技術研究所：2024年01月01日令和6年能登半島地震による強震動, [https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/html20240101160813/main\\_20240101160813.html](https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/html20240101160813/main_20240101160813.html) (2025.2.9 閲覧)
- 8) 大代昇平：一般国道249号大谷道路(大谷工区)完成について、北陸道路研究会会報「北陸路」(平成26年度), pp.18-21, 2014.
- 9) 国土地理院：地図・空中写真閲覧サービス, <https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1> (2025.2.9 閲覧)
- 10) 鶴井秀樹, 今井洋, 金田登志昭, 甘利哲夫：能登半島の地すべり地帯を NATM で貫く 国道249号大谷トンネル, トンネルと地下, Vol.29, No.4, pp.315-321, 1998.

# 樹木形状の定量化と斜面地形—岩国市の丘陵地の例

黒木 貴一<sup>1)</sup>・太田 岳洋<sup>2)</sup>・宮本 新平<sup>3)</sup>・山本 道輔<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>関西大学文学部, <sup>2)</sup> 山口大学理学部, <sup>3)</sup>中電技術コンサルタント, <sup>4)</sup>株式会社オーエスエー

## 1. まえがき

航空機等からのレーザー計測で得られた点群データは、主にグランドデータにより地形を捉え、自然災害に関わる分野に活用されてきた<sup>1),2),3)</sup>。点群密度の増加に伴い樹木形状も判読できるようになり、サーフィスデータからグランドデータ間の点群データは森林研究で注目され、樹木の位置・形状把握や地形と樹木との関係を明らかにする取り組みも進んだ<sup>4),5),6),7)</sup>。一方地形は、特に斜面で谷底に近い遷急線、後氷期開析前線の認識<sup>8),9)</sup>に始まり、その発達に関わる斜面崩壊、土層蓄積、水文特性が議論されてきた<sup>10),11),12),13)</sup>。その流れの中、点群データの密度は充実したものの、崩壊に至る斜面地形の発達に関して、土層移動に関連付ける樹木形状の把握手法を検討する段階にある<sup>14),15)</sup>。

そこで本研究では、樹齢別に樹木形状(傾動量と傾動方向)の点群データを用いる定量化方法を工夫し、斜面の土層移動の量や方向と斜面地形との関連を明らかにした。

## 2. 研究方法

### 2.1 研究対象地域

図1は、山口県東部の研究対象地域(365m×250m)を示す。そこは花崗岩による丘陵地で、主にアカマツ群落、スギ・サワラ・ヒノキ植林が分布するが、平成30年7月豪雨時に斜面崩壊が多数生じた。そこでレーザーデータ(Phoenix社 ultra, 点群密度(1200/m<sup>2</sup>))を得た。また壮齢林(1979-1983年に植栽)及び幼齢林(2008-2022年に植栽)が見られる西北西傾斜を持つ計測範囲(75m×50m)を設定し、樹木形状と地形との関係を議論した。なお地形は陰影図と等高線から11区分(基本地形の頂稜、上部谷壁、下部谷壁、低地、崩壊地形の旧崩壊地、旧崩落堆、崖錐、崩壊地、崩落堆、その他の河道、道路)し、DEM(1mと2m)から傾斜量と傾斜方位を求めた<sup>14)</sup>。

### 2.2 地形と樹木の分析

樹木に対し1~2m間隔の点群分布の変化で樹幹や樹冠を追跡し、その傾動量と傾動方向を求めた(図2)。壮齢木は2~6mと8~12mの点群中心(樹木中心)を結ぶ線に対し水平線aと6mの垂線b、幼齢木は5~6m点群を囲むポリゴンの重心(樹木中心)と樹木頂点を結ぶ線に対し水平線aと0.1mDSMと0.1mDEMによる標高差b、より傾動量 $\theta$ と傾動方向 $\phi$ を求めた。その結果を分布図化し、地形に対する樹木形状を分散図の相関で考え、土層移動と地形発達を論じた。

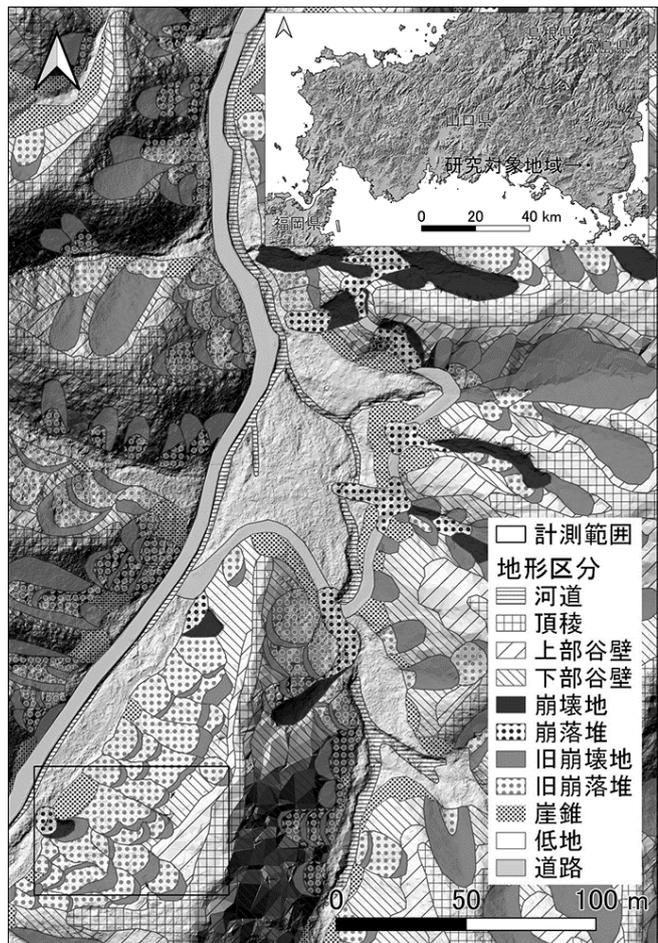


図1 研究対象地域と地形区分

### 3. 樹木形状の分布特徴

図3は樹木形状について丸印の大きさと(1)傾動量を、矢印の向きで(2)傾動方向を示し、壮齢木と幼齢木を区別する記号で樹木中心を示した。ここでは幼齢木が頂稜、上部谷壁、下部谷壁に多く、壮齢木は旧崩壊地、旧崩落堆、崖錐に多く分布する。壮齢木の傾動量は0.1度～18.9度で平均3.8度、幼齢木は0～2.9度で平均1.0度なので、壮齢木の値は大変大きい。傾動方向は、壮齢木は35.9度から351.8度、幼齢木は2.2度から358.8度にあるため後者のばらつきが若干大きい。これは全体傾斜に相反する傾動方向を持つ樹木の存在をも示す。壮齢木の傾動量は、旧崩壊地及びその付近で値が大きく、旧崩落堆と崖錐では大小が混在する。(1)と(2)を重ねて

見ると、旧崩落堆に直線的な、崖錐に発散的な、崩壊地に近い旧崩落堆に収束的な矢印の配列となる樹木群が認められる。これら樹木の傾動は、地形別に直線的な、発散的な、収束的な土層の系統的な動きを示すと考えられる。なお、幼齢木の樹木形状にも、壮齢木ほど鮮明ではないが、量と方向共に似た傾向が見られる。

このように樹木形状の特徴は、壮齢木の方が傾動量は大きく、また傾動方向はそろうため傾向を読み取りやすい。また壮齢木も幼齢木も地形別に、傾動量は大きさに、傾動方向はばらつきに特徴がある。傾動量と傾動方向を合わせ見ると、系統的(直線的、発散的、収束的)な樹木配列が

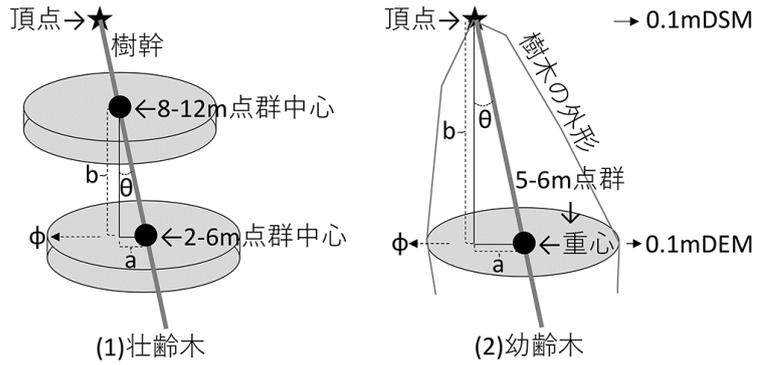
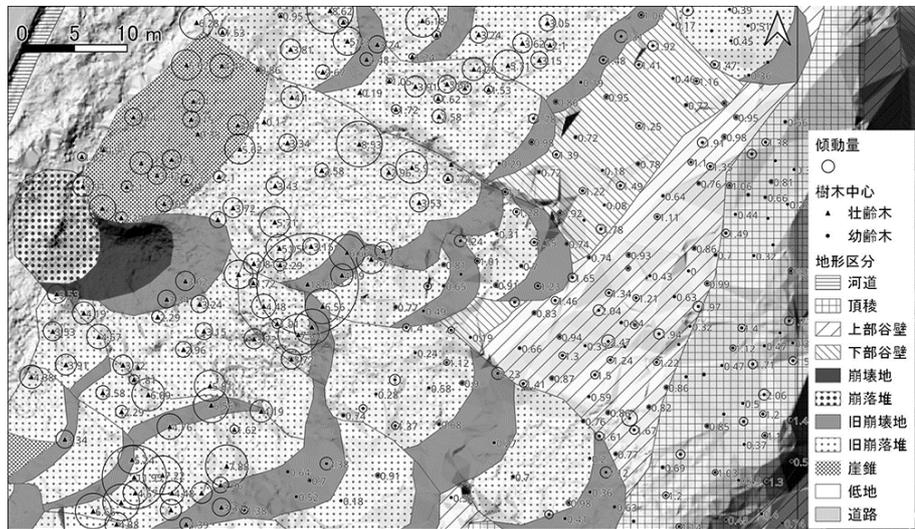
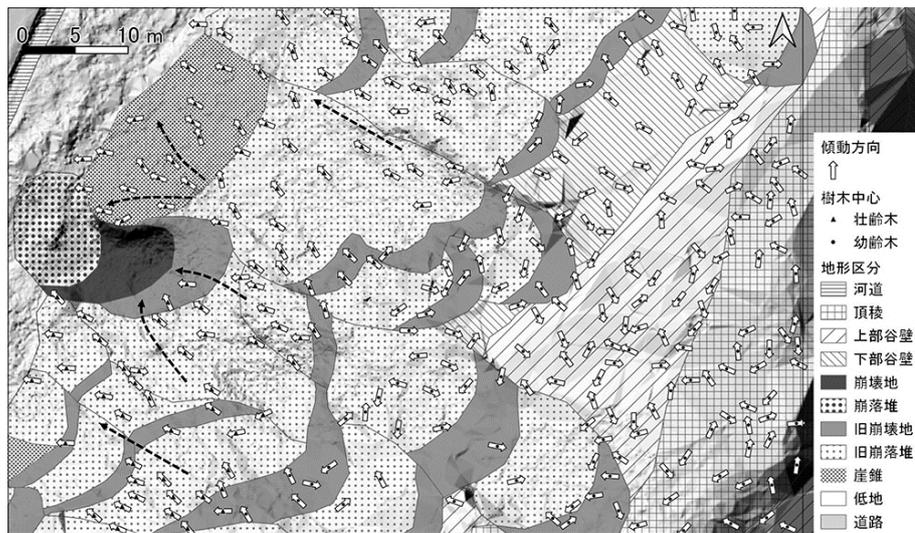


図2 点群を利用した樹木形状の求め方



(1) 傾動量



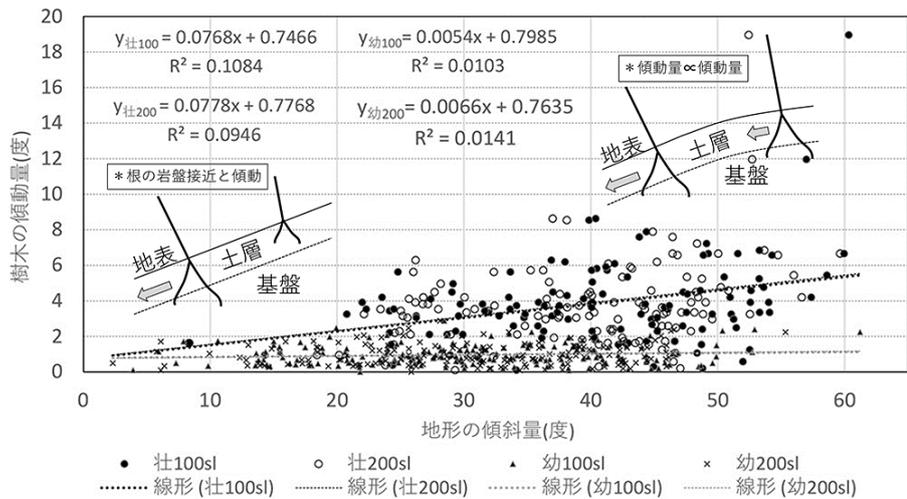
(2) 傾動方向

図3 計測範囲の樹木形状

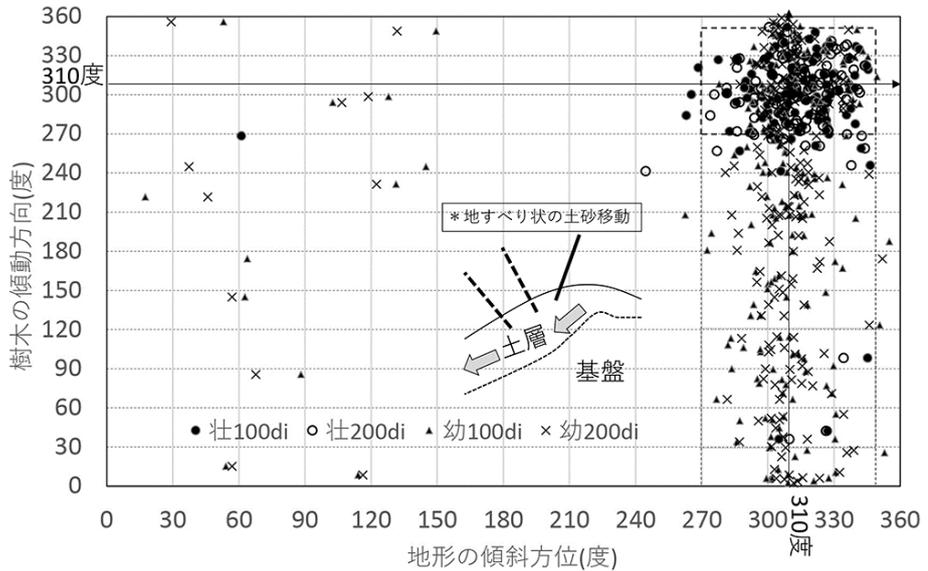
読み取れるため、樹木形状から特に壮齢林では土層動態と関連付けて地形発達を議論しやすい。

#### 4. 地形による樹木形状への影響

図4(1)は地形の傾斜量に対する樹木の傾動量を分散図で示す。壮齢林も幼齢林も弱い正の相関が認められる。壮齢林は幼齢林に比べ傾きが約10倍大きく、傾斜量により傾動は影響をより受けやすい。これは根が土層上位に止まる幼齢木より、土層下位で岩盤に近づく壮齢木の方が、土層の動きに対し根を支点とし傾動しやすいことを示している。なお、DEMサイズの1mと2mは両者の相関にあまり影響しない。このように樹木の傾動量は、傾斜量の増加とともに増し、その程度は壮齢林で大きい。これは、樹木の成長で根が岩盤に近づき、土層の動きに根元が抗しやすくなることを示す。



(1) 地形の傾斜量と樹木の傾動量



(2) 地形の傾斜方位と樹木の傾動方向

図4 地形量と樹木形状との関係

図4(2)は地形の傾斜

方位に対する樹木の傾動方向を分散図で示す。樹木は傾斜方位310度を中心とする270度から350度の斜面に集中する。研究対象地域の丘陵及び谷の長軸方向は、南南西-北北東にあり、計測範囲の一般斜面は西北西を向く。そこで見られる節理の法線は、約310度と130度付近に集中し<sup>16)</sup>、一般的な斜面方位とその方向性は一致するため、地形発達はロックコントロールを強く受けている。一方、樹木の大半は、谷側を向く傾動方向270度から350度に集まるが、それ以外の値も多い。その値の集中度は、壮齢林は高く、幼齢林は低くばらつく。これは樹木の成長に伴い、土層の動きに傾動方向も順応しやすくなることを示す。また両者とも特に幼齢林では、傾斜方向30度から120度付近に値の弱い集中があり、それらは一般斜面とは逆に山側を向く方向になる。これは土層移動に、不連続的な強さや方向を持つ地すべり状の土砂移動があることを示している。

#### 5. まとめ

山口県岩国市の丘陵地を対象に、点群データで定量化した樹木形状と地形との関連を検討し以下

のことが明らかとなった。

- 1) 壮齢木では樹幹，幼齢木では枝葉の広がりを示す点群を捉えることで，樹木の傾動量と傾動方向を定量的に求められる。
- 2) 樹木形状は地形別の特徴がある。また傾動方向で見る系統的な樹木配列から，直線的な，発散的な，収束的な，地すべり的な土層の動きが推定される。
- 3) 壮齢林は幼齢林に比べ，地形の傾斜量と樹木の傾動量の正相関の傾きが大きく，傾動方向のばらつきが小さい。これは樹木の成長により根系が岩盤に近づき根元が動きにくくなり，土層の動きに傾動が順応しやすくなることを示す。
- 4) 樹木形状は土層の動きに，土層の動きは一般傾斜に，一般傾斜は基盤構造に関連深いため，樹木形状は花崗岩の基盤構造の影響を受けている。

## 謝辞

本研究は日本国土開発未来研究財団の支援による「定量化地生態学的手法による斜面災害危険度評価手法の開発(代表：太田岳洋)」の一環で実施した。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 八木浩司・檜垣大助・吉松弘行・相楽渉・高木洋一・内山庄一郎(2003)：空中レーザー高精度地形図の地すべり，微地形判読への応用。地すべり，Vol.39, No.4, pp.421-427.
- 2) 岩橋純子・神谷泉・山岸宏光(2009)：LiDAR DEM を用いた表層崩壊のアセスメントに適する勾配と凹凸度の計算範囲の推定。地形，Vol.30, No.1, pp.15-27.
- 3) 菊地輝行・秦野輝儀・千田良道・西山哲(2018)：三次元点群データを用いた急斜面の維持管理における変動解析。日本地すべり学会誌，Vol.55, No.2, pp.65-71.
- 4) Yupan Zhang, Yiliu Tan, Yuichi Onda, Asahi Hashimoto, Takashi Gomi, Chenwei Chiu and Shodai Inokoshi(2023): A tree detection method based on trunk point cloud section in dense plantation forest using drone LiDAR data. Forest Ecosystems, No.10, pp.1-9.
- 5) 平田泰雅(2005a)：航空機レーザースキャナーデータを用いたヒノキ人工林における樹高と地形との関係。日林誌，Vol.87, No.6, pp.497-503.
- 6) 平田泰雅(2005b)：航空機レーザースキャナーを用いたスギ人工林計測におけるレーザー光の林冠透過率と地上照射密度の影響。森林計画誌，Vol.39, No.2, pp.81-95.
- 7) 青柳一翼・矢嶋準・森岡千恵・瀬口栄作・中嶋聡・中尾浩康・加藤薫，杉山智治(2023)：野洲川松林における3次元点群計測を活用したマツ類個体の形状寸法計測。日本緑化工学会誌，Vol.49, No.1, pp.145-148.
- 8) 羽田野誠一(1986)：山地の地形分類の考え方と可能性。東北地理，Vol.38, No.1, pp.87-89.
- 9) 吉永秀一郎(1990)：十勝平野東部の段丘を開析する小流域の最終表記以降の斜面発達。地理学評論，Vol.63, No.9, pp.559-576.
- 10) Dalrymple, J. B., Blong, R. J. and Conacher, A. J. (1968): A hypothetical nine unit landsurface model, Zeitschr. Geomorph., Vol.12, pp.60-76.
- 11) 田村俊和(1974)：谷頭部の微地形構成。東北地理，Vol.26, No.4, pp.189-199.
- 12) 恩田裕一(1989)：土層の水貯留機能の水文特性および崩壊発生に及ぼす影響。地形，Vol.10, No.1, pp.13-26.
- 13) 田村俊和(1996)：微地形分類と地形発達－谷頭部斜面を中心に－，水文地形学－山地の水循環と地形変化の相互作用－，恩田裕一ほか編。古今書院，pp.177-189.
- 14) 黒木貴一・太田岳洋・山本道輔(2024)：斜面の微地形と樹木の変形－平成30年豪雨による斜面崩壊地の例。第12回土砂災害に関するシンポジウム論文集，173-178.
- 15) 黒木貴一・太田岳洋・山本道輔(2024)：樹木形状と微地形の発達－岩国市西部の丘陵地の事例。日本地形学連合2024年秋季大会，日本地形学連合発表要旨集，Vol.5, No.1, p8.
- 16) 宮本新平・太田岳洋・辻智大・竹田拓己・黒木貴一・森川寛之(2024)：山口県岩国市における斜面崩壊と土壌の形成に関する検討。日本応用地質学会令和6年度研究発表会講演論文集，pp.275-276.

# d4PDF を用いた将来降雨に基づく 榎野川流域の氾濫予測

青柳 拓篤<sup>1)</sup>・大中 臨<sup>2)</sup>・福丸 大智<sup>2)</sup>・渡部 哲史<sup>3)</sup>・赤松 良久<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>山口大学社会建設工学科, <sup>2)</sup>山口大学大学院創成科学研究科, <sup>3)</sup>九州大学大学院比較社会文化研究院

## 1. はじめに

近年, 気候変動に伴って頻発化・激甚化する豪雨災害に対して, 流域治水に基づく河道整備計画が進められている. また, 流域治水計画は一級水系を中心に策定されてきたが, 近年は二級水系も対象になってきている. しかし, 二級水系の流域全体を対象として気候変動下の氾濫リスクを評価した事例は少ない. 都市域を流れる中小河川においても氾濫による被害が増大していくことが想定されていることから, 一級水系同様に流域治水に基づく河道整備計画を策定する必要がある, 将来気候を用いた氾濫シミュレーションに基づく氾濫リスク評価は重要になる.

本研究では, 山口市の市街地を流れる山口県二級水系榎野川(図1)を対象に降雨流出氾濫(Rainfall-Runoff-Inundation:以下 RRI)モデルと地球温暖化に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF:database for Policy Decision making for Future climate change)の2°C気温上昇将来気候シナリオ下(以下, d2PDF)における雨量データ(5km 解像度)を用いて気候変動下における榎野川流域の氾濫リスクを評価した.

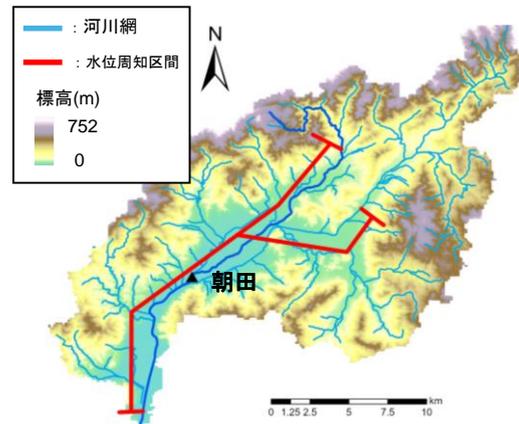


図1 榎野川の流域図と水位観測所

## 2. 高解像度河川断面を用いた降雨流出氾濫解析

### 2.1 解析方法

はじめに, 榎野川流域の降雨流出氾濫過程を再現するための RRI モデルの高度化を図った. 解析に必要な初期条件(標高, 流向, 累積流量, 土地利用: 50m 解像度)の作成には, ArcGIS pro (Eris 社)を用いた. 各土地利用パラメータの選定には岡峰ら<sup>1)</sup>による各パラメータの選択範囲からピーク時の流量の差が最も小さくなるように推定した. また, RRI モデルに入力する河道断面を山田ら<sup>2)</sup>の式により河道断面を矩形と仮定した場合(Case1)と水位周知区間を対象に令和5年11月に山口県が実施した航空レーザー測深の結果を用い, 該当区間に実河道断面を入力した場合(Case2)で解析を実施した. また, 2018年6月28日1:00から7月9日0:00の平成30年西日本豪雨を解析対象とした.

### 2.2 解析結果

図2に朝田水位観測所における Case1, Case2 の流量, 水位の比較を示す. Case1 でピーク誤差が+35 m<sup>3</sup>/s, Case2 で-13m<sup>3</sup>/s, 実績値と解析値の誤差率は Case1 で5%, Case2 で2%と両ケースともに一定の再現性を得られ, 大きな差はなかった. これは, 対象とした出水のように氾濫が発生していない状

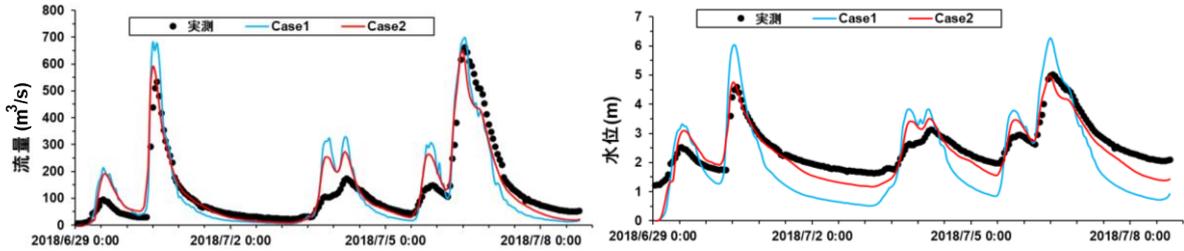


図2 朝田水位観測所における流量，水位比較

況では，流量は保存量であり，断面形状に依存しないことによると考えられる．一方，水位の比較では，Case1 でピーク誤差が+1.246m，Case2 で-0.064m と Case2 で解析結果の精度が向上した．これは，Case2 では実断面を入力にすることで各断面における流量に対する水位の応答を Case1 より詳細に再現できたためと考えられる．

### 3. 将来気候下における氾濫リスク評価

#### 3.1 解析方法

ゲリラ豪雨を含む詳細な将来気候における豪雨災害の被害を評価するため<sup>3)</sup>，将来気候には 5km 解像度の d2PDF を用いた．解析対象の降雨として，過去実験の 30 年分（1979/9~2009/8）を 6 海表面水温 (Sea Surface Temperature : SST) パターンで計 360 年分（3153600 時間），2°C 上昇実験の 61 年分（2030/9~2090/8）を 6 SST を 2 アンサンブルで計 732 年分（6412320 時間）からそれぞれ 1, 3, 6, 12, 24, 48, 72 時間降水量が最大の降雨事象を抽出し，2 章の Case2 と同様に高精度河道断面を用いて解析した．バイアス補正は，Dual moving window と Two-pass bias correction を採用した<sup>4)</sup>．

#### 3.2 将来気候下での解析結果

将来気候を用いた解析のうち，過去実験と 2°C 上昇実験のどちらも 3 時間降水量が最大となる降雨イベントにて氾濫域が最大となった．当該過去実験での朝田水位観測所の水位，流量を図 3 (a)，2°C 上昇実験での朝田水位観測所の水位，流量を図 3 (b) に示す．また，各シナリオ下における氾濫域と浸水深コンターを図 4 に示す．過去実験の結果を図 4 (a)，2°C 上昇実験の結果を図 4 (b) に示している．過去実験で氾濫域が最大となった 3 時間降水量が最大となる降雨イベントでは，朝田水位観測所でのピーク時の流量が 1830m<sup>3</sup>/s，最大水位が 7.6m，氾濫危険水位超過時間は 9 時間であった．また，氾濫域が 14.6km<sup>2</sup>，最大浸水深は 6.1m だった．一方で，2°C 上昇実験では，朝

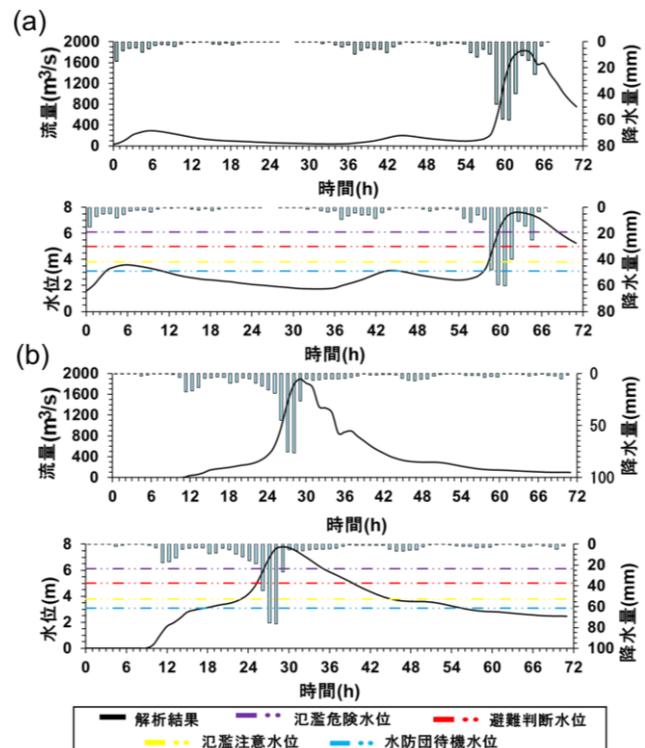


図3 朝田水位観測所の水位  
(a) 過去実験 (b) 2°C 上昇実験

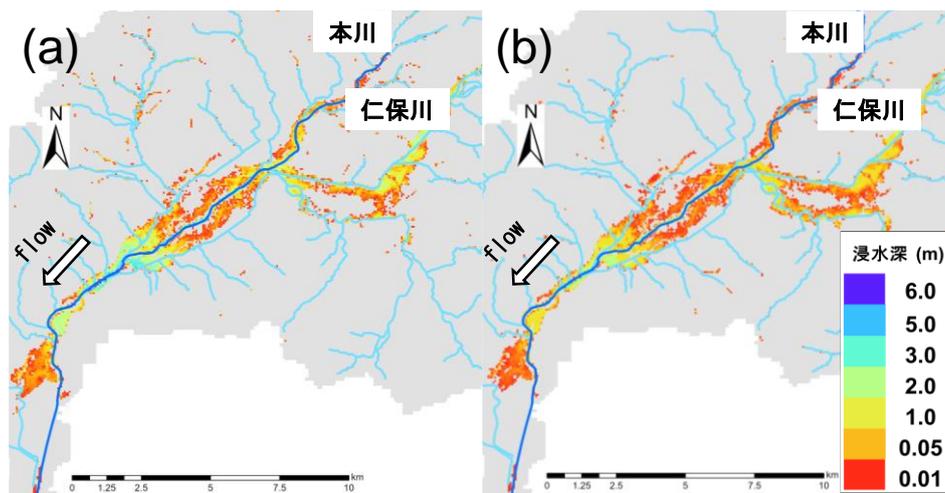


図4 各シナリオ下における氾濫域と浸水深コンター  
 (a) 過去実験の氾濫域と浸水深 (b) 2°C上昇実験の氾濫域と浸水深

田水位観測所でのピーク流量  $1894\text{m}^3/\text{s}$ 、最大水位  $7.8\text{m}$ 、氾濫危険水位超過時間は9時間であった。また、氾濫域は  $15.3\text{km}^2$ 、その最大浸水深は  $6.1\text{m}$  であった。2°C上昇実験では、過去実験と比較してピーク流量が過去実験値から  $3.5\%$  ( $64\text{m}^3/\text{s}$ ) 増加、最大水位が  $3\%$  ( $20\text{cm}$ ) 増加し、氾濫域は  $5\%$  ( $0.7\text{km}^2$ ) 増加した。特に仁保川左岸側の盆地、仁保川と本川との合流部付近の2地点において氾濫域が増大し、仁保川流域における氾濫域は  $35\%$  増加することが明らかとなった。

#### 4. おわりに

本研究では、山口市内の都市域を流れる山口県二級水系榎野川を対象に RRI モデルと  $5\text{km}$  解像度の d4PDF を用いて気候変動下における氾濫リスク評価を行った。氾濫リスクの詳細な検討のため、高解像度な実河道断面を入力することによって、水位の再現性が向上し、氾濫域、最大浸水深も高精度に再現可能となった。また、将来気候を用いた解析では、過去実験、2°C上昇実験のともに3時間降水量が最大となる降雨イベントにおいて氾濫域の面積が最大となった。2°C上昇実験では、過去実験と比較して、ピーク流量、最大水位、氾濫域が増大し、特に支川の仁保川において将来気候での氾濫リスクの顕著な増加が明らかとなった。本研究では、将来気候を用いた解析ケースが少ないが、今後は解析ケースを増加させることで、将来気候において氾濫リスクの高くなる箇所を特定することができると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 岡峰奈津美, 此島健男子, 米勢嘉智: アルタイム洪水予測モデルにおける複数の目的関数を用いた最適化手法および自動追加学習手法の考案, 河川技術論文集, 第29巻, 2023年6月
- 2) 山田真史, 富樫冨佳, 佐山敬洋: 分布型降雨流出氾濫モデルに適用する中小河川の河道断面推定法, 河川技術論文集, 第26巻, 2020年6月
- 3) 山田朋人, 星野剛: 過去気候・4°C上昇時を対象とした力学的ダウンスケール結果の概要 第2回 北海道における気候変動予測(水分野)技術検討委員会, 2017/11/21
- 4) Satoshi Watanabe, Masafumi Yamada, Shiori Abe, Misako Hatono; Bias correction of d4PDF using a moving window method and their uncertainty analysis in estimation and projection of design rainfall depth, Hydrological Research Letters, Vol.14, No.3, pp.117-122, 2020.

# 停滞前線に伴う大雨の強化と長期化に関する解析

富田勇斗<sup>1</sup>・田中健路<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>広島工業大学大学院工学系研究科・<sup>2</sup>広島工業大学環境学部地球環境学科

## 1. はじめに

昭和47年7月豪雨や平成30年7月豪雨などは、西日本を中心に梅雨前線が数日間にわたり日本上空に停滞したことで観測史上最大規模の大雨が発生した事例である。このような梅雨前線によってもたらされる豪雨災害は近年においても発生し続けており、地球温暖化による被害のさらなる激甚化が示唆されている。地球温暖化進行による降雨の激甚化に関しては、同様の気圧配置で降水系が同じ場所で発生することを前提として、線状降水帯をはじめとするメソβスケール擾乱の発達を評価する研究が多数行われている。しかしながら、地球温暖化に伴って、総観規模～メソαスケールの気象場が長期的に変化すれば、太平洋高気圧、チベット高気圧および対流圏中上層のトラフの発達にも影響をもたらすはずであるが、この点に着目した解析研究は稀少である。

そこで本研究では、梅雨前線とその周囲の気象場に着目し、梅雨前線の停滞を引き起こすメカニズムや条件を明確にすると共に、1970年代から2020年代にかけてどの程度、温暖化の影響が寄与しているのかを温暖化要因(温度、等圧面高度、水蒸気量、降水域、降水量、輝度温度)に基づいて解析し、50年間の間での温暖化の影響を明らかにすることを目的とした。なお、対象事例として昭和47年7月豪雨や平成30年7月豪雨を取り上げて行った。

## 2. 解析方法

### 2.1 使用データ・モデル

本研究では米国大気研究センター(NCAR)と米国海洋大気庁予測センター(NCEP)等により共同開発されたWRF(Weather Research and Forecasting Model) Ver. 4.4<sup>1)</sup>を用いて解析を行った。表1に計算条件を示す。WRFで使用する初期条件(初期値)には、気象庁長期再解析データ(JRA-55)を用いた。雲・降水過程の計算に関しては、微物理過程としてWSM6<sup>2)</sup>を使用し、大気境界層については、韓国延世大学の研究グループの開発した計算手法(Yonsei University Scheme)(Hong et al., 2008)<sup>3)</sup>を使用した。

表1 計算条件

	Domain1	Domain2	Domain3
格子点数	280×200	361×271	361×241
水平解像度	27km	9km	3km
鉛直層	50層		
計算時間間隔	21600秒		
格子点データ	気象庁長期再解析データ(JRA-55)		

### 2.2 温暖化トレンドの算出方法

① JRA-55に収録されているデータの中から、1958年から2021年までの夏場(6～8月)の温暖化要因(気温、水蒸気密度、等圧面高度、輝度温度)を3次元データとして、格子点ごとに取得した。

- ② ①で取得した50年間分のデータのうち、6～8月の3か月平均値の10年平均値を算出した。
- ③ ②で算出した1970年代平均値と2020年代平均値の差分を取得した。
- ④ 初期値にJRA-55を用いて、研究対象事例の気象場の再現実験をWRFで行った。
- ⑤ 昭和47年7月豪雨の再現計算に③の差分を加算した気象場で計算を行った。
- ⑥ 平成30年、令和2年7月豪雨の再現実験から③の差分を減算した気象場で計算を行った。
- ⑦ ⑤、⑥の計算結果と再現計算の計算結果を比較し、どのような影響が出るのかを解析した。

### 3. 研究結果

#### 3.1 渦度0線解析

本研究の2事例の降水ピーク時におけるDomain1の300hPa面渦度0線の分布を図1、2にそれぞれ示す。日本付近の中緯度に見られる渦度0線は、ジェット気流の強風軸に対応する。最近50年の地球温暖化の影響により、太平洋高気圧の層厚の増大および北側への勢力拡大傾向と上層のチベット高気圧の発達傾向に伴い、九州西側での対流圏中～上層のトラフが深まる傾向と日本海上空を通過する強風軸が日本付近で北偏する傾向が現れている。その影響が、前線の停滞位置や、梅雨前線帯での降水域の発達に影響を及ぼす。これについて、次節で述べる。

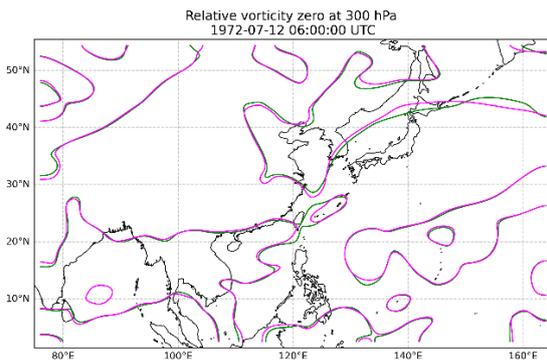


図1 昭和47年7月豪雨における  
相対渦度0線分布図  
再現計算(緑)、トレンド計算(マゼンタ)

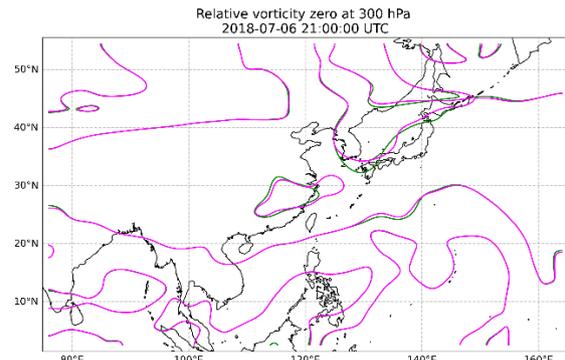


図2 平成30年7月豪雨における  
相対渦度0線分布図  
再現計算(緑)、トレンド計算(マゼンタ)

#### 3.2 降水ピーク時から24時間前までの積算降水量分布の比較

50年間の温暖化の影響が降水ピーク時に与える影響を解析するため、再現計算において3時間積算雨量が最大となる時刻を、昭和47年7月豪雨と平成30年7月豪雨について、それぞれ2つ選定した。そして、降雨ピーク時から24時間前までの24時間積算雨量を解析した。

##### (1) 昭和47年7月豪雨

##### ① 1972年7月11日15時から12日15時(JST)

図3は再現計算、図4はトレンド計算(2022年相当)における11日15時から12日15時(JST)の24時間積算雨量(100 mm以上)の分布図である。再現計算の積算降水量分布よりも、トレンドを加算した場合の分布の方が朝鮮半島寄りに降雨域が北上した結果となった。

##### ② 1972年7月12日6時から13日6時(JST)

図5は再現計算、図6はトレンド計算(2022相当)における12日6時から13日6時(JST)の24時間

積算雨量(100 mm以上)の分布図である。再現計算の分布図と比較して、トレンド計算の降雨域の分布は九州の西側に集中する結果となった。

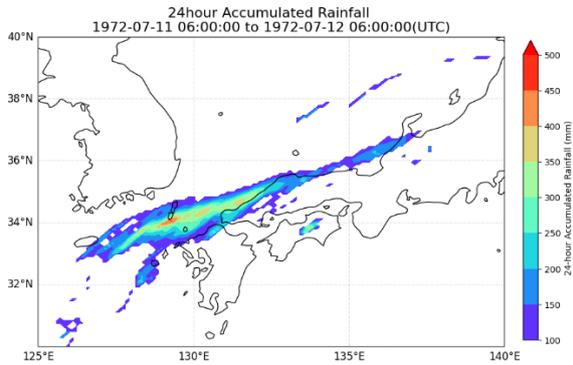


図3 再現計算における  
24時間積算雨量 100 mm以上の分布図

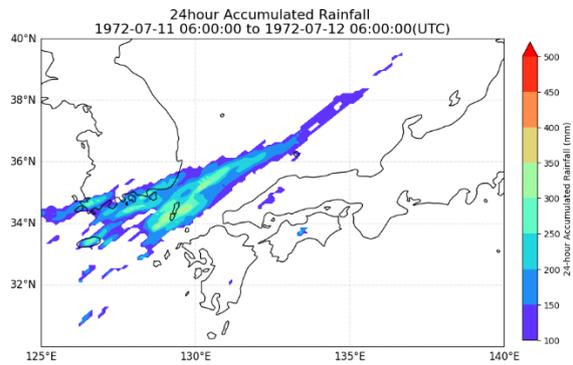


図4 トレンド計算(2022年相当)における  
24時間積算雨量 100 mm以上の分布図

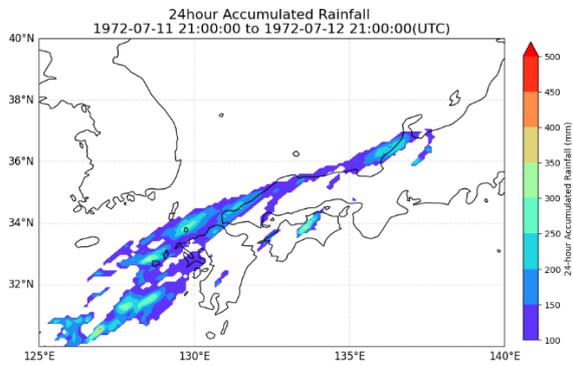


図5 再現計算における  
24時間積算雨量 100 mm以上の分布図

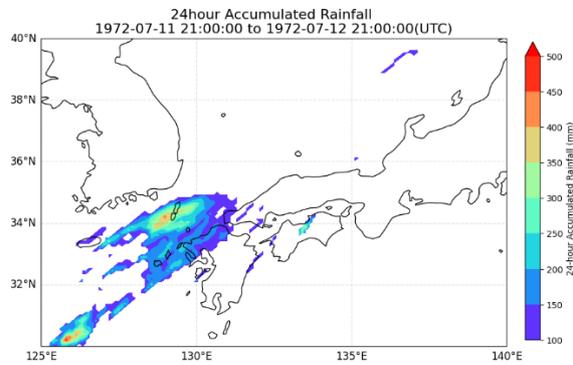


図6 トレンド計算(2022年相当)における  
24時間積算雨量 100 mm以上の分布図

(2) 平成30年7月豪雨

① 2018年7月6日3時から7日3時(JST), 2018年7月6日6時から7日6時(JST)

図7は再現計算, 図8はトレンド計算(1968年相当)における6日3時から7日3時(JST)までの24時間積算雨量(100 mm以上)の分布図である。再現計算と比較して、トレンド計算では再現計算で解析された450 mm以上の強い降雨域が解析されない結果となった。このことは7月6日6時から7日6時(JST)においても同様の結果が解析された。

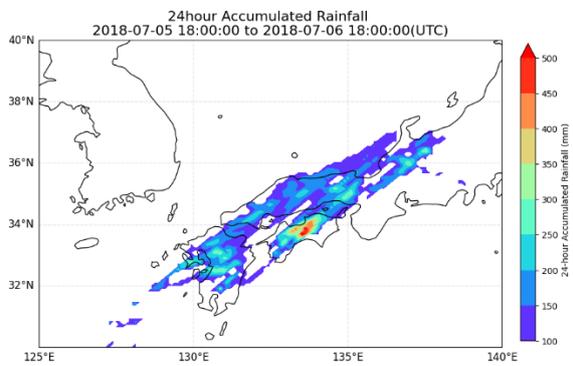


図7 再現計算における  
24時間積算雨量 100 mm以上の分布図

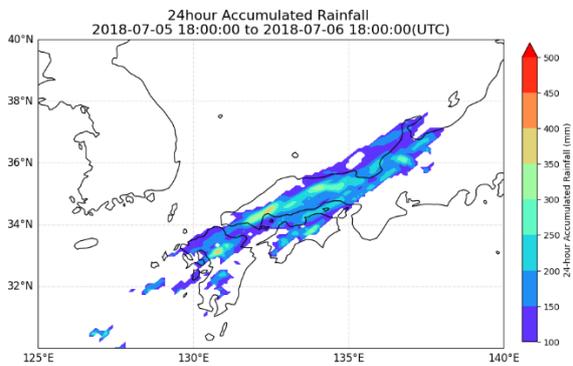


図8 トレンド計算(1968年相当)における  
24時間積算雨量 100 mm以上の分布図

### 3.3 Domain3 における領域内の3時間積算降水量の比較

図9および図10は、各対象事例について、Domain3の計算期間内で、指定した領域(北緯31度~36度、東経129度~134度)内における3時間積算雨量を示した図である。再現計算による3時間積算雨量の値を青色で、トレンドを加算・減算した場合の3時間積算雨量の値を橙色で示した。昭和47年7月豪雨では、再現計算の積算降水量がトレンドを加算した場合よりも多い結果となった。平成30年7月豪雨では、トレンドを減算した気象場の方が再現計算と比較して積算降水量が減少した。一方、令和2年7月豪雨では、計算期間内の領域内における降水量の差が小さく、明確な差が解析されなかった。そのため、本研究では温暖化の影響が明確ではない事例とした。

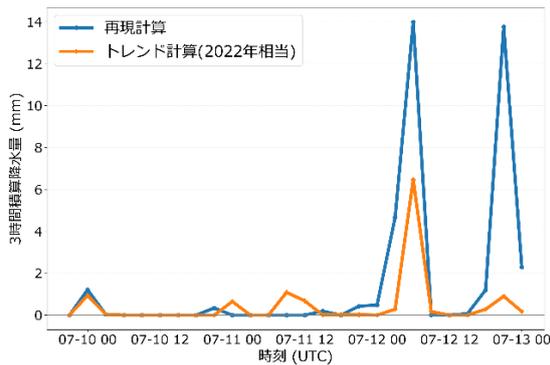


図9 昭和47年7月豪雨  
3時間積算雨量

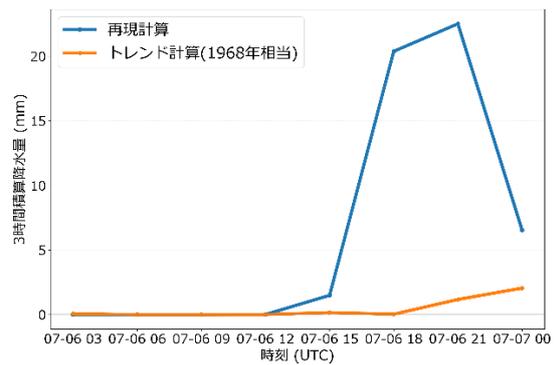


図10 平成30年7月豪雨  
3時間積算雨量

## 4. おわりに

平成30年7月豪雨および昭和47年7月豪雨、それぞれ近年と過去50年前の2事例に対して、総観~メソ $\alpha$ スケールの地球温暖化の影響を考慮して、梅雨前線付近の降雨域の発達や維持に関する解析を行った。地点や領域を固定して比較した場合、地球温暖化の影響で降水量が増大、減少する結果が双方混在しているように見える。しかしながら、過度0線の変化に見られるように、チベット高気圧や太平洋高気圧などの総観規模~メソ $\alpha$ スケールの長期変化に伴い、トラフの発達傾向や日本上空での前線の停滞位置の北偏傾向がもたらされ、ある地点における温暖化による降雨増加および降雨減少傾向と繋がっていることが示された。

## 参考文献

- [1] Wei Wang, et al: User's Guide describes the Advanced Research WRF (ARW) Version 4.4 modeling system, [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_v4/v4.4](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/v4.4) (2025.2.10)
- [2] Hong, S.Y., Jade Lim, J.O.: The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), JOURNAL OF THE KOREAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 42, 2, 2006, p129-151
- [3] Hong, S.-Y., Noh, Y., and Dudhia, J (2008) A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, Monthly Weather Review, vol. 134, pp.2318-2341
- [4] Moteki, Q.: Role of Typhoon Prapiroon (Typhoon No.7) on the Formation Process of the Baiu Front Inducing Heavy Rain in July 2018 in Western Japan, SOLA, vol.15A, 37-42, doi:10.2151/sola.15A-007(2019)

# 東シナ海からの水蒸気フラックスを考慮した球磨川・川内川流域の NARX による豪雨発生予測モデルの開発

松坂琉生<sup>1)</sup>・朝位孝二<sup>2)</sup>・白水元<sup>3)</sup>・西山浩司<sup>4)</sup>・弘中勇駿<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>山口大学工学部, <sup>2)5)</sup>山口大学大学院創成科学研究科, <sup>3)</sup>東海大学建築都市学部土木工学科, <sup>4)</sup>九州大学大学院工学研究院

## 1. はじめに

九州地方は前線や台風による被害が多く、東シナ海から南西の風によって湿った空気が供給されることで豪雨をもたらす傾向がある。東シナ海から供給される水蒸気を観測するのに適した位置である鹿児島県甕島にラマンライダーを設置するプロジェクトがあり、九州南部地方の気象現象と東シナ海からの水蒸気の流入の関係性を調査するため甕島のラマンライダー<sup>1)</sup>に着目した。本研究ではラマンライダーから得られた気象データを水蒸気フラックスとして算定・活用し、球磨川、川内川流域の流域平均雨量を AI で予測することで、九州地方南部での豪雨と甕島上空での気象条件の関連性を確認することを目的とする。得られた水蒸気フラックスを用いた雨量予測モデルの開発に際して時系列データの学習において強力な非線形モデルである Nonlinear Autoregressive with exogenous (NARX) モデル<sup>2)</sup>を採用した。

## 2. 研究手法

本研究では MathWorks 社が開発した数値解析ソフトウェアである MATLAB を使用して時系列のための時間的な動的振る舞いを示すことが可能<sup>3)</sup>な回帰型のニューラルネットワークで取り扱いが非常に簡便で時間的効率にも優れている NARX モデル<sup>4)</sup>を採用した。本研究では地理的要因に影響されにくい流域平均雨量の予測を主として実施した。本研究では降水にかかわる気象現象が起りやすい 600m(950hPa 面)における甕島上空での ERA-5 (ECMWFReanalysisv5)による気象データの鉛直分布から水蒸気のフラックスを算定した。以下の(1)に水蒸気フラックスの算定式を示す。

$$Hv \quad (1)$$

$Hv$ は水蒸気フラックスを表し $H$ は混合比,  $v$ は風速ベクトル( $v, u$ )で,  $v(m/s)$ :南北方向風速,  $u(m/s)$ :東西方向風速の成分を持つ。以下の(1)に甕島からの水蒸気フラックスの流域代表点方向成分の算定式を示す。

$$f = Hv \cdot n \quad (2)$$

$f$ は水蒸気フラックスの流域代表点方向成分を表し $n$ は甕島からの代表点方向単位ベクトルを表す。各流域の代表点方向の単位ベクトルと水蒸気フラックスの内積をとることで水蒸気フラックスの各流域代表点方向成分を取り出すことができる。本研究の気象予測の一部のケースで説明変数となる水蒸気フラックスはこのように各流域代表点方向成分を抽出したものを使用している。甕島から流域代表点への方向は中甕島から水平方向に緯度に沿った線を 0 度として各流域の代表地点までの南北方向の開き方から角度を取った。各流域での値は球磨川流域が $\theta = 30^\circ$ , 川内川

流域が $\theta = 11^\circ$ となった(図 1) . 本研究の予測に用いることで豪雨発生の要因として有用なパラメータであるかを確認することができる. 以下の表 1 に本研究で用いたモデルの学習期間, テスト期間並びにケースごとの目的変数, 説明変数を示す.

表 1 各データ期間と各変数

学習	2006~2021(6/1~9/30)
検証	2022~2023(6/1~9/30)
テスト	2024(6/1~9/30)

Case	目的変数	説明変数
1	流域平均雨量 (球磨川流域)	水蒸気フラックス
	流域平均雨量 (川内川流域)	水蒸気フラックス
2	流域平均雨量 (球磨川流域)	流域平均雨量 (球磨川流域)
	流域平均雨量 (川内川流域)	流域平均雨量 (川内川流域)

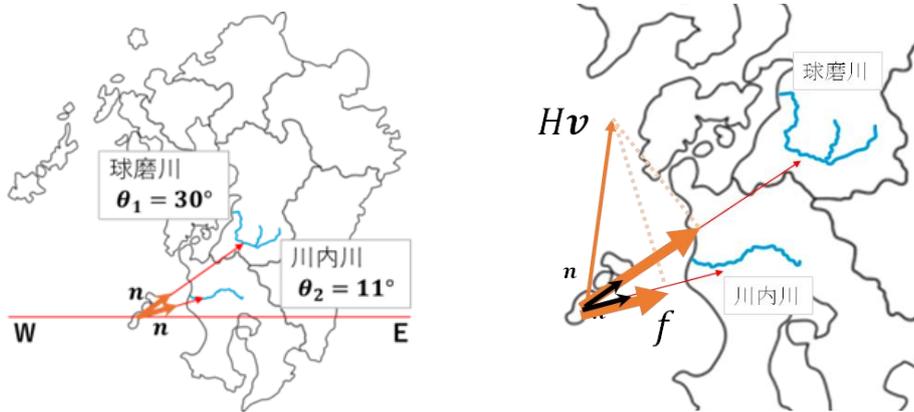


図 1 各流域の代表点までの角度と内積による補正

本研究における流域平均雨量は流域内の AMeDAS 観測地点を参照地点としたボロノイ分割により各地点の観測雨量を割り当て範囲面積に応じて平均化したものを用いた. 表 1 に示すケースのように過去の流域平均雨量, 過去の水蒸気フラックスをそれぞれ学習したモデルの予測精度を比較することで算出した水蒸気フラックスが九州南部の気象予測に有用か検討できる. ネットワーク構造は入力層, 隠れ層, 出力層ともに 1 層であり入力層には, 表 1 の気象データに加え, 初期遅延状態として 6 時間の過去の同気象データを与えた<sup>5)</sup>. 隠れ層では 10 個のニューロンで特徴量を分解する構造を使用した. 隠れ層に活性化関数としてシグモイド関数を導入することでネットワーク全体に非線形な変換を与えた<sup>6)</sup>. 本研究では豪雨災害をもたらす短期的な気象変動パターンや時系列依存性を学習するためリードタイムを 6 時間と設定し, 6 時間先の豪雨発生予測を行った. 予測結果の評価指標として実測値と比較した際の平均二乗誤差(MSE)と相関係数(R<sup>2</sup>)を使用した.

### 3. 予測結果

以下の図 2~9 に NARX モデルを用いた気象予測の結果を示す.

検証においてケースごとの精度差はほとんどなく雨量の多いピーク値の再現性も高い. 水蒸気

フラックスを学習したモデルは自分自身を予測したモデルと比較して同等かそれ以上の予測精度であることが確認できた。学習するパラメータによる精度の差がほとんどないことから甕島上空の気象情報から算定された水蒸気フラックスは説明変数として十分に有用なパラメータであるといえる。2024年の気象データは欠測値が多く、線形補間で補った値を考慮すると評価指標のわずかな低下が考えられた。しかしテスト結果では予測値が負の値を導いた要素も散見されるものの雨量ピーク値の再現性は高いように見受けられる。予測された雨量は実測値と強い相関を示しており MSE の水準も高く、豪雨災害対策としての雨量予測の観点から予測値が過大評価傾向であることも評価できる。よって検証・テスト結果を通じて水蒸気フラックスは球磨川・川内川流域平均雨量の時系列予測において有用な指標であると結論付けられる。

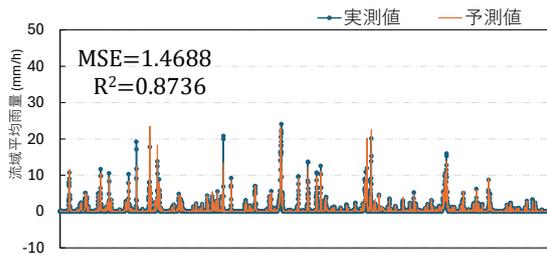


図 2 球磨川流域 (ケース 1 検証)

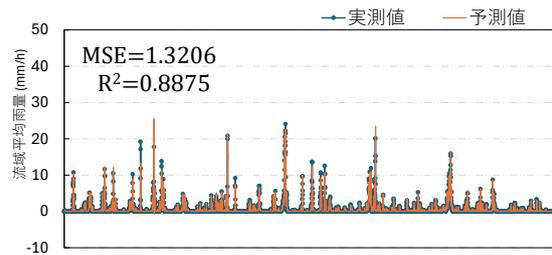


図 3 球磨川流域 (ケース 2 検証)

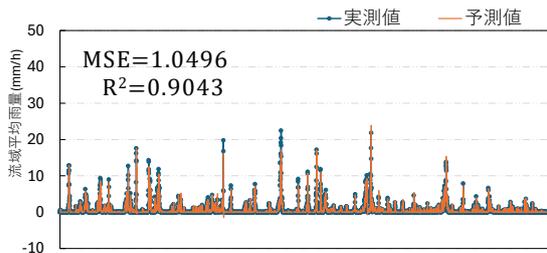


図 4 川内川流域 (ケース 1 検証)

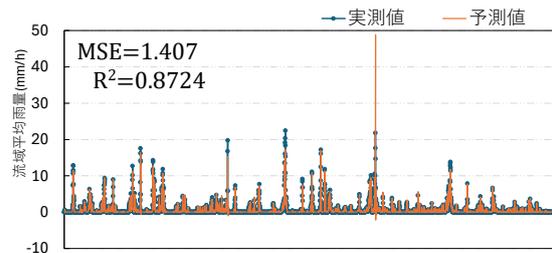


図 5 川内川流域 (ケース 2 検証)

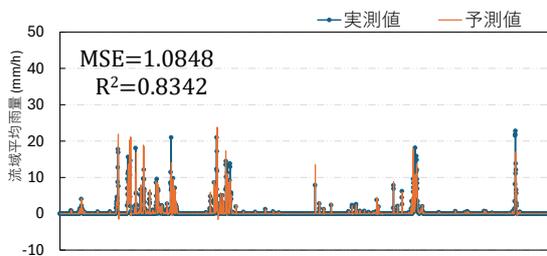


図 6 球磨川流域 (ケース 1 テスト)

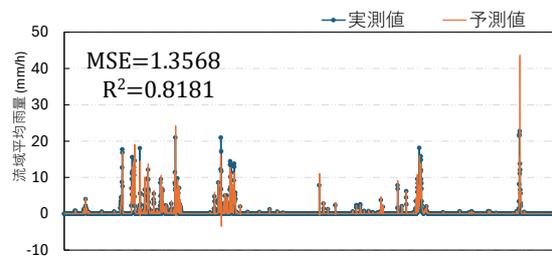


図 7 球磨川流域 (ケース 2 テスト)

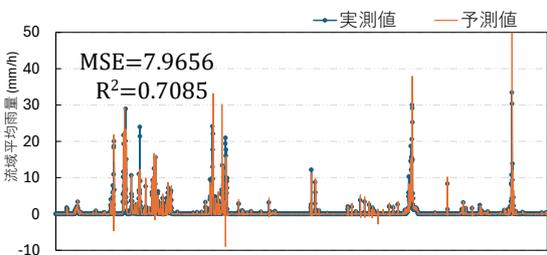


図 8 川内川流域 (ケース 1 テスト)

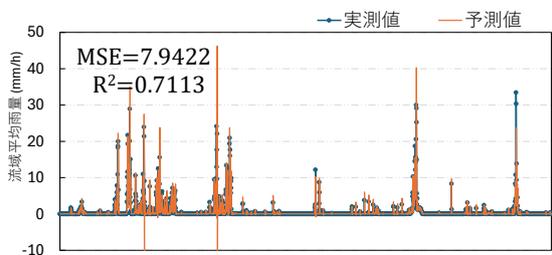


図 9 川内川流域 (ケース 2 テスト)

#### 4. おわりに

甕島から流入する水蒸気フラックスと川内・球磨川流域平均雨量との間には強い相関があり、甕島で観測された気象データからその風下の豪雨域発生を捉える指標として水蒸気フラックスは非常に有用であることを確認できた。本研究では NARX モデルを使用した。初期遅延状態を長時間に設定することで、雨量ピーク値の再現性や負の雨量予測値の向上がみられる可能性がある。初期遅延状態を長くとれる回帰型ニューラルネットワークには LSTM モデルなどがあり、予測精度の向上を目指して予測モデルの構築を行う必要がある。今後の課題としては、多様な角度からの予測を複合的に判断して精度を高めるために様々なパラメータでの予測を比較検討することが必要である。本研究では水蒸気フラックスのみであっても流域平均雨量の予測が高精度で実施できたが、より正確な雨量予測に関しては、別の予測モデルの検討や、今回使用したパラメータ以外の有用なパラメータを説明変数に加えて予測精度の向上を図る必要がある。

#### 謝辞

本研究は、内閣府の「研究開発と Society 5.0 との橋渡しプログラム (BRIDGE)」の対象施策「革新的な統合気象データを用いた洪水予測の高精度化」(国土交通省九州地方整備局委託、研究代表者 九州大学杉原裕司教授)において実施されました。

#### 参考文献

- 1) 英弘精機, “気温ラマンライダー用の多波長分光検出器を開発”. 英弘精機. 2022.8.8  
<https://eko.co.jp/information/85066.html> (参照 2025-01-31)
- 2) 高野靖也, 川口貴弘, 朝見聡, 佐々木理沙子, 足立修一: 自動微分を用いた深層 NARX モデルの LPV システムとしての解釈, 第 64 回自動制御連合講演会, オンライン開催, 2021.11
- 3) ”時系列 NARX フィードバック ニューラル ネットワークの設計”. MathWorks.2024  
<https://jp.mathworks.com/help/deeplearning/ug/design-time-series-narx-feedback-neural-networks.html> (参照 2025-01-30)
- 4) “回帰: 線形, 一般化線形, 非線形およびノンパラメトリック方式による教師あり学習”. MathWorks.2024  
<https://jp.mathworks.com/help/stats/regression-and-anova.html> (参照 2025-01-30)
- 5) “浅層ニューラル ネットワークの時系列予測およびモデル化”. MathWorks.2024  
<https://jp.mathworks.com/help/deeplearning/gs/neural-network-time-series-prediction-and-modeling.html> (参照 2025-01-30)
- 6) “時系列時間遅れニューラル ネットワークの設計”. MathWorks.2024  
<https://jp.mathworks.com/help/deeplearning/ug/design-time-series-time-delay-neural-networks.html> (参照 2025-01-30)

# 気象衛星観測データから豪雨域の発生を判定する 深層学習についての検討

白水 元<sup>1)</sup>・米山 航平<sup>2)</sup>・島田 真歩<sup>2)</sup>・芹澤 遥介<sup>2)</sup>・柳沢 真穂<sup>2)</sup>・原田 朋弥<sup>3)</sup>  
<sup>1)</sup>東海大学建築都市学部, <sup>2)</sup> 東海大学工学部, <sup>2)</sup> 東海大学大学院工学研究科

## 1. はじめに

線状降水帯とは、雨雲が列を形成して数時間同じ場所に停滞または通過することで大雨が降る現象のことである。この現象は90年代から確認されているが、言葉として使われはじめたのは2014年に広島県で発生した集中豪雨からと言われている。線状降水帯の仕組みは概ね説明できるようになったが、発生に必要な水蒸気の量や大気の安定度など未解明な点は残っている。現在、こうした豪雨を含む気象現象の量的な予測は数値予報モデルが用いられており、大気等に関する方程式をスーパーコンピュータ上で数値的に解いている。より小規模な構成でも、横江ら(2022)<sup>1)</sup>は気象物理シミュレーションモデル WRF を用いて3時間以上前から線状降水帯の発達を予測することに成功した。しかし、線状降水帯等豪雨域の発生位置や積乱雲の形状、降水量まで予測することは困難な現状がある。洋上の大気の観測データが特に不足し、線状降水帯等の豪雨域の発生予測に適した境界条件を入力できないというのもその原因と考えられる。

一方で、近年では洋上も含む広い範囲の雲・大気を観測する静止気象衛星ひまわりのマルチバンド観測データ(表1)をもとに多重層のニューラルネットワークを用いた機械学習の手法である深層学習を用いて大気場の諸量の分布を推定しようとする試みがなされている。藤本・手計(2024)<sup>2)</sup>は、完全畳み込みネットワークを用いて気象衛星ひまわり8号・9号の観測プロダクトから衛星雨量を求め変換アルゴリズムを提案した。ひまわり観測データ、標高データを入力し、レーダー雨量を教師データとして10分降雨強度を学習したもので特定流域の流域面積雨量で精度の評価を行っている<sup>3)</sup>。ここでは台風・前線・線状降水帯などの降水型別で整理すると降雨の再現精度が異なるという課題が述べられている。

以上の背景から、本研究では、こうした雨量やそのほか大気の諸量の分布推定を支援する目的で、ひまわり観測データから降水型を識別するネットワークを構築することを目的とする。そのために、過去に九州全域で起こった雨の事例の中で線状降水帯によるものか前線性降雨かを判定するモデルを作成、学習外のデータをランダムに選出し、それらを用いて精度の検証を実施した。

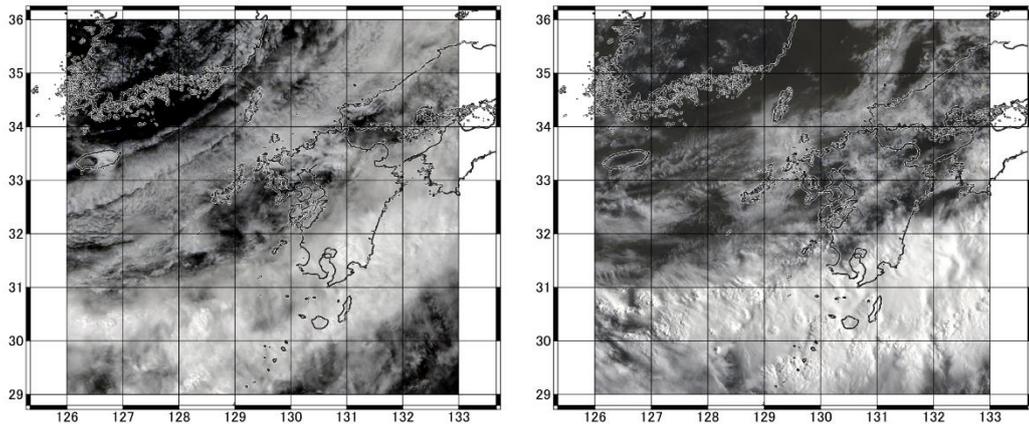
表1 ひまわり8号・9号センサバンド

バンド	1	2	3	4	5	6	7	8
波長(μm)	0.471	0.511	0.639	0.857	1.607	2.257	3.829	6.243
種別	可視光			近赤外			赤外	

バンド	9	10	11	12	13	14	15	16
波長(μm)	6.941	7.347	8.593	9.637	10.407	11.240	12.381	13.281
種別	赤外							

## 2. 研究方法

入力データとして2018年～2023年の5月から10月までの気象衛星ひまわりの日本域観測データから九州域を切り出し(バンド数:16, 緯度:29N～36N, 経度:126E～133E)(図1), 九州の各観測所の一時間当たりの降水量が15mm/h以上の場合を抽出し, それが線状降水帯か前線性降雨か日本気象協会の天気図や解説文を基に分類しラベルデータを作成した. 訓練データ数は159シーン, テストデータ数は31シーンである. TensorFlow/Kerasパッケージを用いて文字識別に用いられる2次元畳み込みニューラルネットワークをベースに衛星画像判読に対応させるネットワークを設定した. numpy配列に変換した衛星観測データ(351×351×16)とラベルデータ(前線:0, 線状降水帯:1)をpickleファイルに保存し訓練データとテストデータに約8:2の割合でランダムに振り分けた. ここで扱う深層ニューラルネットワークの構成を図2に示す. 大きく分けて入力層, 中間層(2層), 出力層とした. 第1中間層のConv2Dで10×10のピクセルウィンドウごとにそれぞれ2048個のフィルターをかけ特徴量の抽出を行い, そこからpooling2Dで2×2のピクセルウィンドウごとに最大値を抽出した. 次に過学習を防ぐためデータの50%を削除するDropout層を設けた. 第2中間層では同様にConv2Dで3×3のピクセルウィンドウごとに128個のフィルターをかけ特徴量の抽出を行い, pooling層で2×2のピクセルウィンドウごとに最大値をピックアップした. ここからFlattenで1次元化を行い, Denseで全結合した. 再びDropoutでデータを50%削除してから, Denseで確率化する出力層の2ノードに全結合した.



a) 線状降水帯発生時 2018年7月7日5:00

b) 通常の前線性降雨時 2020年7月6日3:00

図1 ひまわり衛星観測データの可視光バンド合成イメージ

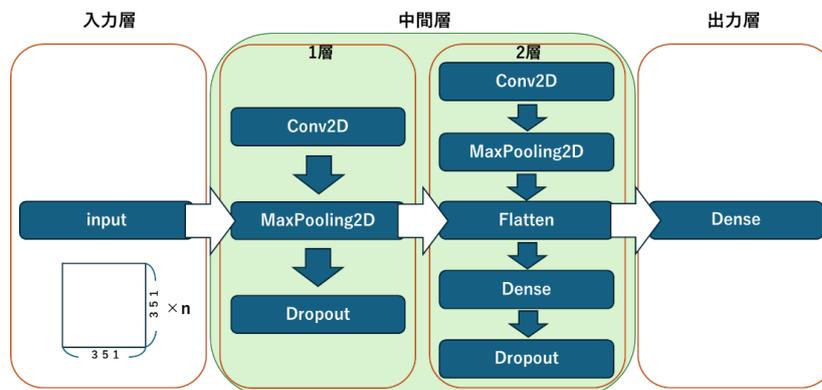


図2 ネットワーク構成概念図

### 3. 結果と考察

入力させる訓練データ・テストデータをマルチバンドのままとしたケースと各バンドの応答性を確認するために単バンドごとに切り分けたケースでネットワークの検証を実施した (表 2)。図 1a および図 1b は、それぞれ線状降水帯による降雨時と前線性降雨時の可視光バンド合成画像である。雲の分布自体を近いものを選んで示しているが、人の目で判読は非常に困難である。しかし、ケース 1 のマルチバンド入力での判定では、テストデータ全体で下の式で表される Accuracy (正解率) は 93% を示した。

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN}$$

ここで、TP は真陽性、TN は真陰性、FP は偽陽性、FN は偽陰性の判定ケース数である。ケース 2 の各バンドごとのテストデータの判定結果の Accuracy を表 3 に示す。バンド 9 を除いた各バンドは 90% の Accuracy を示した。輝度温度データが格納されたバンド 7~16 のテストデータの損失(Loss)の各エポックごとの履歴を図 3 に示す。Band9 は訓練データによるネットワーク最適化が進むごとに損失関数(categorical\_crossentropy)の結果である Loss が振動して Accuracy が 70% に悪化しその後改善が見られなかった。つまり過学習が発生し解消できなかった結果と考える。過学習とは取り込んだ訓練データの特徴を部分的に過度に学習してしまったことによって、他の特徴を掴めていない・無視してしまうことである。バンド 9 は標準大気で 400~500hPa 付近の対流圏上中層に存在する水蒸気の放射

表 2 ネットワーク検証実験ケース

ケース 1(マルチバンド)	ケース 2(単バンド)
<ul style="list-style-type: none"> <li>1-16 バンドをマルチチャンネル入力</li> <li>入力データの次元 : 351*351*16</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>単バンドずつ入力</li> <li>入力データの次元 : 351*351*1</li> </ul>

表 3 ケース 2 各バンドの Accuracy

バンド	1	2	3	4	5	6	7	8
Accuracy	90.0%	90.0%	90.0%	90.0%	90.0%	90.0%	90.0%	90.0%
バンド	9	10	11	12	13	14	15	16
Accuracy	70.0%	90.0%	90.0%	90.0%	90.0%	90.0%	90.0%	90.0%

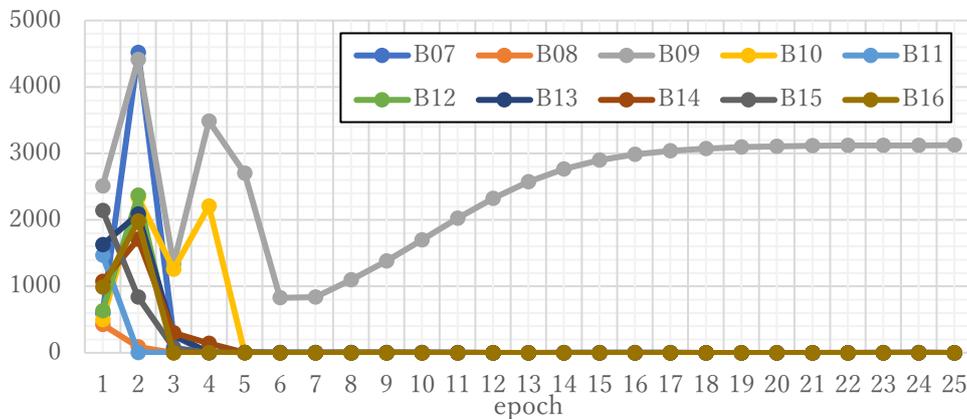


図 3 バンド 7~16 の損失 (Loss) の履歴

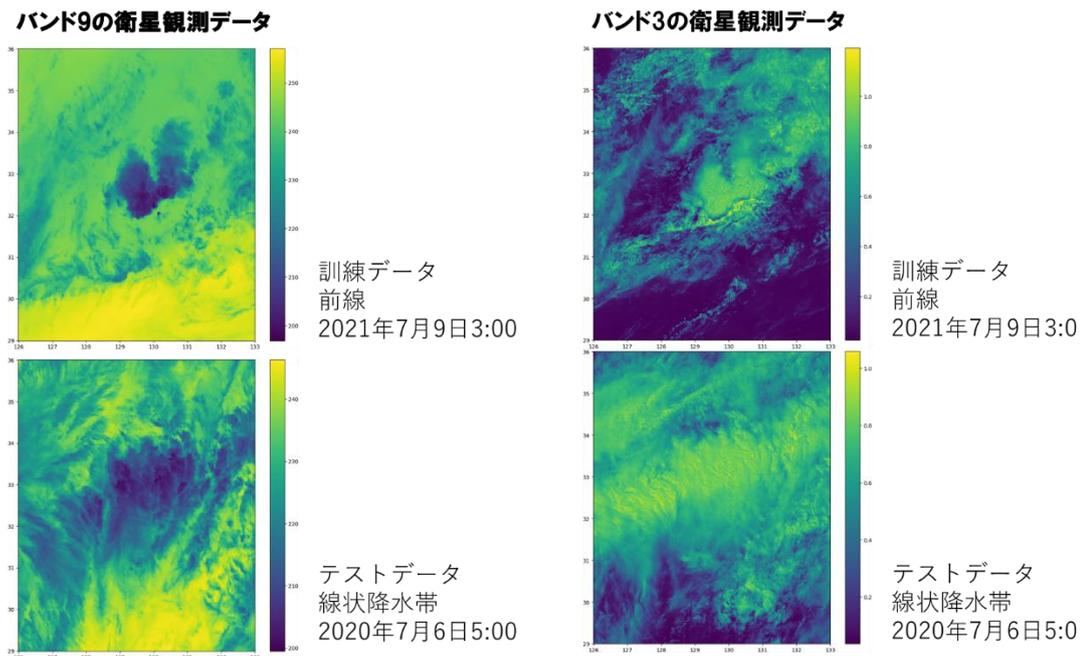


図4 バンド9（赤外 6.941  $\mu\text{m}$ ）とバンド3（可視光 0.639  $\mu\text{m}$ ）の同時刻比較

する波長の赤外線をよく捉える。同時刻の可視光バンドと比較すると（図4）、用意したデータの範囲でバンド9では前線性と線状降水帯で類似の分布となるものが含まれていたが、同時刻の別バンドでは例示したバンド3のように、異なる分布を示す。ネットワークモデルの汎化のためには、入力データ数を増やすことはもちろんではあるが、このようなバンド特有の特徴を抽出して検証し気象の物理現象と照合して原因を理解することもその助けになると考える。

#### 4. おわりに

本研究では、気象衛星ひまわり8号・9号の観測データを使い、2次元畳み込みニューラルネットワークを基盤にモデルを構築し、線状降水帯による降雨なのか前線性による降雨なのかを判定させるネットワークモデルを作成した。判定の結果マルチバンド入力のケースでは93.7%という高い精度を得ることができた。単バンドごとに判定した結果からはバンド9のみ他と結果が変わり、その原因は過学習によるものだと考えられる。今後更新される雨期のデータを取り込み、より多くの特徴を学習することで、汎化させたモデルの構築の作成に取り組みたい。

#### 参考文献

- 1) 横江 祐輝・北 真人・内田龍彦・河原 能久：XRAIN データを活用した前線性降雨における線状降水帯の予測精度向上，水分・水資源学会誌，Vol. 35, No.4, 2022.
- 2) 藤本 寛生・手計 太一：静止気象衛星ひまわりを用いた深層学習による新たな衛星雨量HiDREDv2の提案，Vol. 80, No. 16, 2024.
- 3) 藤本 寛生・手計 太一：気象衛星ひまわりデータにCNNを適用した雨量推定アルゴリズムの提案と流域面積雨量での評価，水資源学会2024年度研究発表会，Vol. 37, 2024.

# 静止気象衛星高頻度観測データを用いた火山噴火に伴う大気波動の検出

村上太一<sup>1</sup>, 田中健路<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> 広島工業大学大学院工学系研究科・<sup>2</sup> 広島工業大学環境学部地球環境学科

## 1. はじめに

2022年1月15日にフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火に伴ってLamb波やPekeris波、内部重力波といった大気波動が発生し世界中に伝播した。これらの大気波動は、気圧変化を伴う波として世界各地で観測され、気圧変化によって気象津波と呼ばれる海洋長波を駆動し、世界中の沿岸で大きく増幅された二次振動として観測された。この気象津波によって西日本の漁港では、漁船の流失、転覆、沈没被害が発生した。Lamb波はOtsuka(2022)によってひまわり8号のフルディスク輝度温度データ(毎10分)を用いて可視化され、Pekeris波はWatanabeら(2022)が気象衛星と再解析データを用いて可視化された。<sup>[1], [2]</sup>しかし、これらの大気波動では西日本沿岸での気象津波の増幅を説明することはできない。気象津波増幅には太平洋平均水深と対応する約200 m/s程度の速度を持つ大気波動の存在が不可欠である。ひまわり8号は日本域の観測に限れば毎2.5分の観測が可能であり、より細かな温度変化を捉えることが可能である。そこで本研究では、ひまわり8号の日本域における高頻度観測の輝度温度データを用いて、気象津波発達に関連する大気波動の検出と解析を行う。

## 2. 研究方法

### 2.1 使用データ

今回の噴火事例に関する実況解析データとして、静止気象衛星ひまわり8号のBand-7~16の10チャンネルの赤外輝度温度データ(日本域0.02度格子, 毎2.5分間隔)と気象庁(南鳥島での1分間観測を除く10秒間観測)と地震研究所(IRIS)(1秒間観測)の地上気圧記録と気象庁(15秒観測), 国土交通省港湾局(0.5秒観測), ユネスコ政府間海洋委員会(UNESCO-IOC)(Flanders Marine Institute(VLIZ) and IOC, 2023)(1分観測)から潮位データ, ETOPOの海底地形データ, NCEP FNLの再解析データを使用した。解析期間は2022年1月15日10:00~18:00UTCである。

### 2.2 研究方法

① ひまわり8号のBand-7~16の赤外輝度温度データ(解析範囲: 26N-42N, 126E-142E)を中央差分法で時間二階微分を行った。<sup>[1]</sup>

$$\frac{\partial^2 T_{bb}(x, y, t)}{\partial t^2} \approx \frac{T_{bb}(x, y, t + \Delta t) - 2T_{bb}(x, y, t) + T_{bb}(x, y, t - \Delta t)}{(\Delta t)^2} \quad (1)$$

② (1)式の計算結果をさらに時間二重積分( $T_a$ )を行った。

$$T_a + C_1 t + C_0 = \iint \left( \frac{\partial^2 T_{bb}(x, y, t)}{\partial t^2} \right) dt^2 \quad (2)$$

③  $T_a$ の各画素に平面二次元バンドパスフィルタ(通過帯域の波長範囲は0.3~4.0度)を適用し、その後5~36分周期の通過帯域を持つバンドパスフィルタを適用し、ノイズ除去処理を行い、大気波動による輝度温度のゆらぎを検出し、波面の位相速度を求めた。

④  $T_a$ の位相速度, 方位角を考慮したネットワーク平均(解析範囲: 28N-32N, 130E-134E)を算出し、大気波動の波形を検出した。

⑤ 気象庁の気圧データを用いて④と同様の手法でネットワーク平均を算出し、比較した。

⑥  $T_a$ と潮位と地上気圧をそれぞれ連続ウェーブレット解析を行い、比較した。

⑦ 大気波動の位相速度と水深を用いてフルード数( $Fr = c/\sqrt{gh}$ )を算出し、共鳴条件を満たす海域を調べた。

## 2.2. 大気波動による気圧変化と温度変化

大気波動を衛星観測から検出するには気圧変化によって発生する温度変化に着目する必要がある。Lamb 波の場合を考える。Lamb 波は鉛直風擾乱を持たない大気波動であるため次の式で与えられる。

$$T_a = \gamma \left( \frac{T_0}{p_0} \right) p_f \quad (3)$$

ここで $T_0$ は平均気温、 $p_0$ は地上気圧、 $p_f$ は気圧偏差、 $\gamma$ は乾燥空気と定圧比熱である。2.0 hPa の振幅を持つラム波と日本の冬の典型的な値を代入すると約 0.16 K の温度変化が与えられる。

Pekeris 波と内部重力波の場合を考える。この2つの波は鉛直風擾乱を持つため次の形で与えられる。(Andrews et al (1979)式 3.1.3e' を線形化)<sup>[3]</sup>

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + \omega \left[ \frac{H}{p} \frac{\partial T_0}{\partial z} + \frac{\gamma T_0}{p} \right] = 0, \quad (4)$$

ここで $\omega$ は気圧変化速度( $\omega = (p/H)w$ )、 $w$ は鉛直速度、 $H$ はスケールハイトである。ここでスケールハイト 7 km 中層大気の温度 240K、鉛直温度勾配を $1 \times 10^{-3} \text{ K m}^{-1}$ 、波周期を 600 秒とすると温度振幅は 0.05 K が与えられ、衛星解析で可視化されることが期待される。

## 3. 研究結果および考察

### 3.1. ひまわり 8 号の観測によって可視化された大気波動

図 1, 2, 3 にひまわり 8 号全赤外バンドと Band-12-Band-13 で解析された大気波動の例を示す。1 月 15 日 10:30~12:30UTC 頃にかけて Lamb 波の伝播、12:30~14:30UTC 頃に Pekeris 波の伝播、13:00~18:00UTC 頃に内部重力波の伝播による波の波形が可視化された。Lamb 波は全ての赤外バンド捉えられ、Pekeris 波は成層圏と地上付近に応答を持つ Band-12 と成層圏に特化している Band12-Band-13 で捉えられ、内部重力波は Band-12 と Band12-Band-13 で明瞭に、Band-8 でわずかに捉えられ、それ以外のバンドでは領域南西側に限り捉えられている。時間間隔 2.5 分の衛星画像から波面の位相速度を算出すると、Lamb 波の平均速度は  $284.2 \pm 19.0 \text{ m/s}$ 、内部重力波の平均伝播速度は  $199.1 \pm 10.0 \text{ m/s}$  となった。内部重力波が Lamb 波と Pekeris 波と比べ北寄りに伝播しているのは上空の偏西風の影響を受けたとされる。

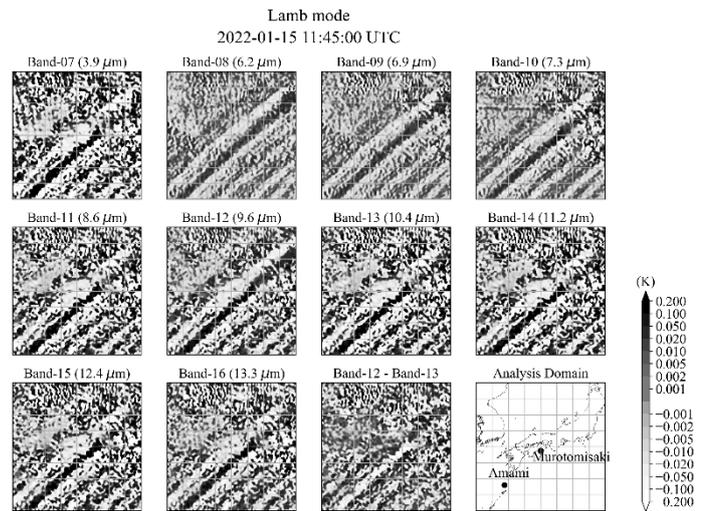


図 1 Lamb 波到達時のスナップショット

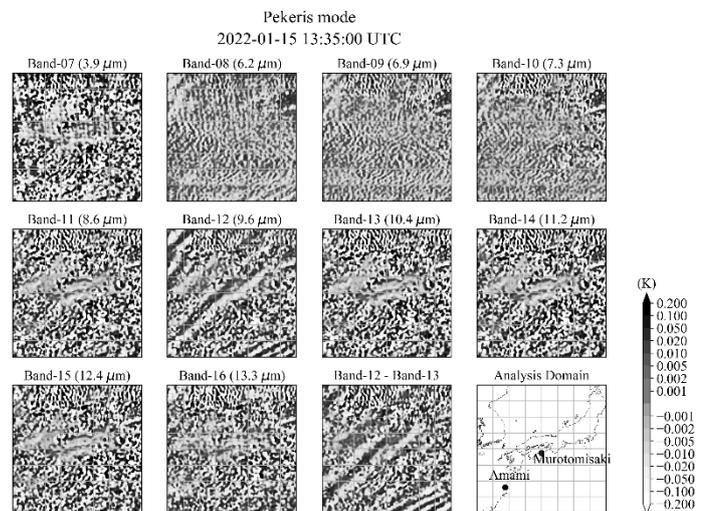


図 2 Pekeris 波到達時のスナップショット

### 3.2. ネットワーク平均処理によって検出された波の波形

図4にBand-8, 9, 10, 12-13, 13の波形, 図5に地上気圧の波形を示す. Lamb波は10:00~12:00UTC, Pekeris波は12:00~13:30UTC, 内部重力波は13:30~18:00UTCで表示している. 各バンドの並び方は高度と対応している. Lamb波の波形は地上付近に対応しているBand-13で応答が強く, 次いでBand-12-Band-13で応答が強く, その後に対流圏中上層に対応しているBand-8, 9, 10で弱い応答が捉えられた. Pekeris波の場合では成層圏と地上付近で強く応答しており内部重力波では成層圏でより強くそれに次いで地上付近, その後対流圏上部に対応しているBand-8で弱く応答している. この解析結果はIshizakiら(2023)図4に示されたLamb波とPekeris波の鉛直構造とよく対応している. [4]

地上気圧とBand-13を比較すると波形はよく対応している. 図3の右軸に示した気圧を温度変換(式4)したものと輝度温度を比較すると, 輝度温度のほうが高く表示されているが, これは衛星観測が気圧変化以外の温度変化も捉えているためと考えられる. 以上から衛星観測から地上気圧変化を捉えることができる.

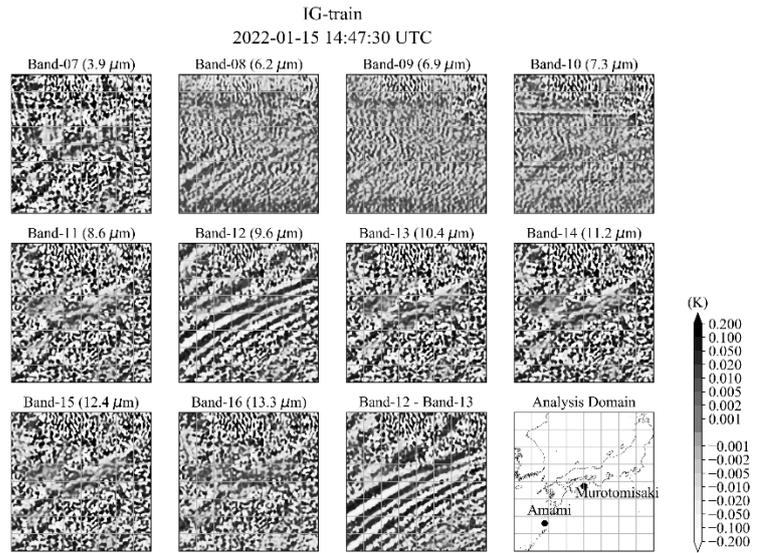


図3 内部重力波到達時のスナップショット

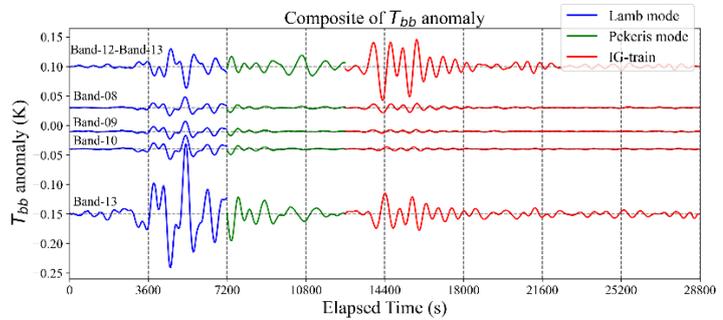


図4 輝度温度ネットワーク平均を用いて抽出された波形

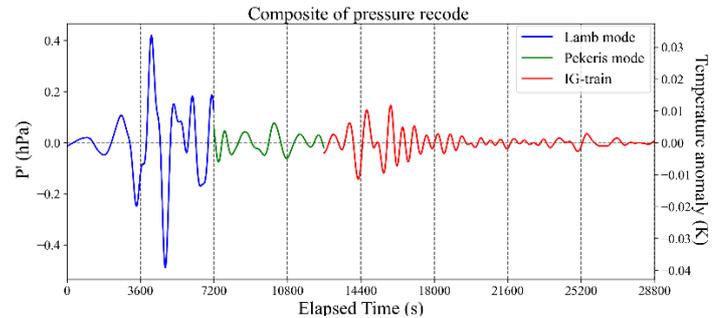


図5 地上気圧ネットワーク平均を用いて抽出された波形

### 3.3. 連続ウェーブレット変換を用いた地上気圧, 潮位, 衛星観測の比較

図6は名瀬と室戸岬における地上気圧, 潮位, 赤外輝度温度の連続ウェーブレット解析の結果を示す. 名瀬におけるLamb波による地上気圧は11:30UTC頃に周期7~7.5分のピークが現れている. これを赤外輝度温度と比較すると, 同時間帯, 同周期にピークが現れている. また潮位をみるとピーク到達後に遅れて数cmの潮位上昇が見取れる. 次に内部重力波の場合だと, 到達時間である14:20UTC頃に地上気圧では周期10~13分程度の気圧変化が現れ, 赤外輝度温度では同時刻帯, 同周期にピークが現れている. 潮位では14:40UTC頃に同周期に潮位の急上昇が捉えられている. 地上気圧や衛星観測と比べ潮位の変化が遅れているのは港湾に到達した気象津波が湾内の固有振動による潮位の急上昇のプロセスを挟むため, タイムラグが発生したと考えられる. また室戸岬でも同様の結果が得られた.

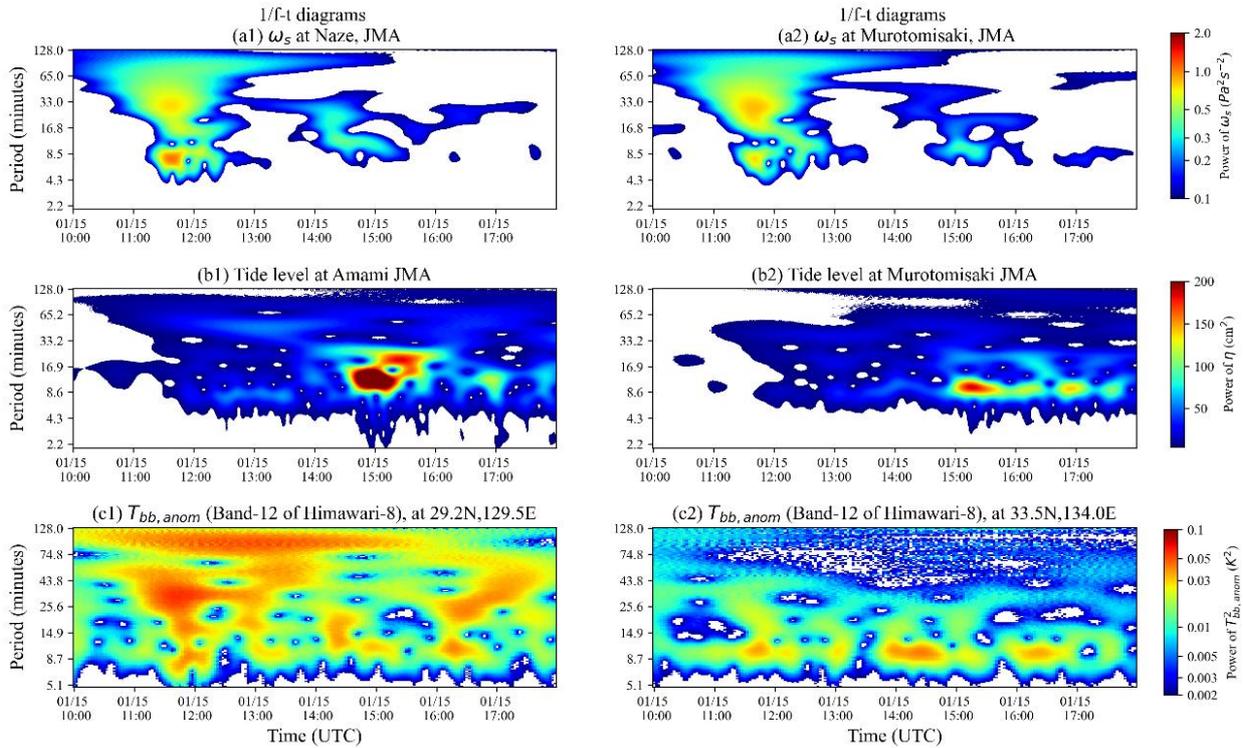


図6 名瀬(左), 室戸岬(右)における地上気圧(上図), 潮位(中図), 赤外輝度温度(下図)の連続ウェーブレット解析

#### 4. まとめと議論

今回の解析結果から, フルディスク観測では捉えることができなかった周期 10 分程度の内部重力波が可視化された. しかし, ノイズの影響を受け, 明瞭に捉えることのできない領域が存在し, ノイズを完全に除去することができるのならすべてのバンドで Pekeris 波と内部重力波をとらえることは可能かもしれない. そのためバンドパスフィルタのかけ方などは改善の余地があると考え.

この内部重力波は速度 200 m/s 程度の速度で日本南海の太平洋上を伝播することで Proudman 共鳴によって波が増幅したと考えられる. 港湾内の固有振動周期と一致した気象津波はより増幅し, 潜水効果も加わり, 西日本で船舶の被害が発生するほどの津波に発達したとされる.

地上付近に対応している Bnad-13 と地上気圧の波形がよく対応しており, 衛星観測で気圧変化をとらえることに成功した. 以上から衛星観測には, これまで静止気象衛星を用いて研究されていない山岳波をはじめとする大気波動を鉛直, 水平方向に詳細に解析することができる可能性がある.

#### 参考文献

- [1] Otsuka, S. (2022) Visualizing lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8, *Geophys. Res. Lett.*, 49(8) 1-9.
- [2] Watanabe, S., Hamilton, K., Sakazaki, T., and Nakano, M.(2022) First detection of the Pekeris internal global atmospheric resonance: evidence from 2022 Tonga eruption and from Global reanalysis data, *J. Atmos. Sci.*, 3027-3043
- [3] Andrews, D.G, Holton, J.R., and Loey, C.B. (1987) *Middle Atmosphere Dynamics*, International Geophysics Series vol. 40, Academic Press, 489 p.
- [4] Ishizaki, H., Sakazaki, T., and Ishioka, K. (2023) Estimation of the Equivalent Depth of the Pekeris Mode Using Reanalysis Data. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 101(6), 461-469, 2023.

# 熱帯泥炭地海岸における限界崩壊距離の推定

香川 拓輝<sup>1)</sup>・小田 辰海<sup>2)</sup>・山本 浩一<sup>1)</sup>・  
Muhamad YUSA<sup>3)</sup>・神山 惇<sup>4)</sup>・鈴木 素之<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>山口大学大学院創成科学研究科

<sup>2)</sup>山口大学工学部社会建設工学科

<sup>3)</sup>リアウ大学工学部

<sup>4)</sup>宮崎大学工学教育研究部土木環境工学プログラム

## 1. はじめに

泥炭地崩壊は、イングランド北部やアイルランドの北方泥炭地で16世紀以降に多く報告されてきた泥炭地での地すべり現象である<sup>1)</sup>。熱帯泥炭地ではあまり報告例<sup>2)</sup>がなかったものの、熱帯泥炭地のインドネシア国ブンカリス島北部海岸で頻発している。ブンカリス島での泥炭地崩壊の被災状況は深刻化しており、地元メディアは、2021年12月30日にはSesai Panjang海岸での被災を取り上げた<sup>3)</sup>。インドネシア国ブンカリス島北部海岸は海岸侵食を伴い泥炭地崩壊が発生している。海岸侵食によって泥炭地の崖が形成されている。

インドネシア国ブンカリス島北部海岸の泥炭地崩壊の深刻化に伴って、対策と同時にハザードマップの作成が急務である。本研究では、海岸からの累積の地盤安全率が1.0, 1.3, 1.5を下回る海岸からの距離を推定し、この距離を限界崩壊距離と定義した。ブンカリス島北部海岸を対象として、泥炭地崩壊を伴った海岸侵食を考慮した現地の海岸地形の進展に適応したハザードマップの作成のために、ブンカリス島北部海岸における限界崩壊距離を推定することを研究目的とした。

## 2. 研究方法

### 2.1. 衛星画像 (DEMNAS・Landsat data)

泥炭地盤断面の地盤高は、インドネシア国家数値標高モデル (DEMNAS: National Digital Elevation Model in Indonesia) を使用した。DEMNASの空間分解能は0.27秒角で、ジオイドモデルの鉛直データをもとに補正されている。DEMNASは、IFSAR (分解能5m), TERRASAR-X (分解能5m), ALOS PALSAR (分解能11.25m) の標高データを統合したものである。海岸線上の100m間隔の位置の海岸に対して法線方向の測線を作成し、法線のDEMNASの標高をGIS上で取得した。DEMNASの元データには、植生の影響が考えられたため、植生の影響を除去した<sup>4)</sup>。

1988年から2013年間に撮影されたLandsat5の衛星画像を使用して海岸侵食速度を算出した。Landsat5は解像度30mである。GIS上で1988年と2013年の画像の海岸線を100m間隔でプロットし、海岸に対して岸沖方向に進行する海岸侵食距離を計測し、年単位の撮影期間で除すことで海岸侵食速度とした。また、海岸の方位角と海岸侵食速度を一般化した。

Google Earth Engine (GEE) 上で、Landsat8の全バンドを使用して機械学習 (SVM) で2014年から2024年までの崩壊域を特定した。Landsat8の解像度も30mである。

### 2.2. アブラヤシの形態・バイオメトリクス調査

2024年8月31日、9月1日にブンカリス島北西部のMeskom村、9月4日にMeskom村の東部に位置するSimpang Ayam村で現地のアブラヤシの地上部・地下部の形態・バイオメトリクス調査を実施した。地上部については、樹高 ( $n=15$ )、幹部の胸高直径 ( $n=15$ )、断面積 ( $n=15$ )、胸高部のコアの湿潤単位体積重量 ( $n=15$ )、乾燥単位体積重量 ( $n=15$ )、含水率 ( $n=15$ )、含水比 ( $n=15$ )

及び葉部については葉軸長 ( $n=10$ )、葉軸の先端から 170 cm 位置の葉軸コア 5 cm ( $n=10$ )、コアの断面積 ( $n=10$ )、湿潤単位体積重量 ( $n=10$ )、乾燥単位体積重量 ( $n=10$ )、含水率 ( $n=10$ )、含水比 ( $n=10$ ) を計測した。幹部の胸高部のコアのサンプリングについては、インクリメントボア (Haglof 社製のコア長：400 mm、直径：5.15 mm、スレッド：3 (刃数/枚) 用) を用いて採取し、採取後にファルコンチューブに入れ、コンパクト天秤 (AND 社製の EW-150i) を使用して計量した。乾燥重量については、9 月 16 日までファルコンチューブに格納した後に 9 月 16 日から 2 日間 105°C で乾燥させ、同様に計量した。アブラヤシの果実については、収穫された直後の果実の湿潤重量を計測した ( $n=9$ )。地下部については、海岸部において根の成長範囲の計測を行った ( $n=7$ )。

### 2.3. 植生の荷重の算出方法

現地の植生は、アブラヤシと泥炭湿地林が主に支配している。そこで、本研究の地盤安全率は、アブラヤシと泥炭湿地林の荷重を考慮した。アブラヤシの荷重については、アブラヤシの形態・バイオメトリクス調査とアロメトリック方程式<sup>5)</sup>を使用して、地上部の各部位の重量を算出した後に荷重を計算した。Landsat 画像より、現地のアブラヤシプランテーションは 2003 年～2005 年にかけて建設されたものと考えられ、現地のアブラヤシは樹齢 19 年から 20 年程度であると想定される。アブラヤシは樹齢 25 年程度まで成長するため、現地のアブラヤシの生産性はピークに近づいているものと考えられる。この際に、アブラヤシの果実は、20 から 30 房であると仮定し、葉部は 40 から 50 枚であると仮定した。2017 年 3 月 4 日に UAV に Meskom 村の沿岸部約 68 ha の空中写真測量を実施し、空中写真測量の結果からオルソ画像を作成し、オルソ画像からランダムにアブラヤシを選択し、50 サンプルの樹冠投影面積を算出した。

泥炭湿地林については、現地で調査することが不可能であったため、文献値を使用した。中央カリマンタンにて 1998 年から 1999 年にかけて調査された泥炭湿地林の乾燥バイオマス<sup>6)</sup>と西カリマンタンにて 1993 年と 1994 年に調査された泥炭湿地林の含水比<sup>7)</sup>を使用して重量を算出した後に荷重を計算した。植生の荷重は、平均値・平均値±標準偏差で個体差・計測誤差を評価した。

### 2.4. 現地地盤の物理的性質及び強度特性の一般化

現地地盤の深度別の湿潤密度を調査するために、2014 年 8 月 20 日から 24 日にかけて Meskom 村にてオランダ式ピートサンプラー (大起理化学工業社製の DIK-105A) 使用してコアサンプリングを実施した。コアサンプリングは 50 cm ピッチで深度 6 m まで実施した。採取したコアの深度 1 m 間隔で平均することによって、地盤安全率の計算に使用する湿潤密度を算出した。

現地地盤の強度特性の粘着力と内部摩擦角については、2015 年から 2021 年に土層強度検査棒を使用して深度別に調査された文献値<sup>8)9)10)</sup>を用いて一般化した。2015 年から 2021 年までの調査結果の 1 m 刻みで同一深度の垂直応力とせん断応力の散布図を作成し、近似直線を求めることでブンカリス島北部海岸の深度別の粘着力と内部摩擦角とした。

### 2.5. 現地の植生及び地盤特性を考慮した地盤安全率の算出方法

植生の影響を考慮した地盤安全率の計算は盛んに研究されている。その多くは植生の根系の斜面崩壊の抑止効果によって安定するものである<sup>11)</sup>。本研究では、今井の地盤安全率の式<sup>11)</sup>を使用した。海岸から内陸に向かって 1,000 m の平坦な 2 次元地形モデルを仮定し、地盤高は 2 m から 10 m まで変動させ、一様に裸地、アブラヤシの影響、泥炭湿地林の影響があるモデルを計算した。各モデルにおいてすべり面の角度は 0° から 20° まで 0.1° 刻みで変動させて計算した。また、地盤は表面まで飽和の条件とした。植生を考慮した地盤安全率の式を式(1)に示す。本研究では、現

地の沿岸部の状況から泥炭地の植生の根は浅く抑止効果がないものと考えた。

$$F_s = \frac{c' + (\gamma z + W_V - h\gamma_w z) \cos^2 \beta \tan \phi'}{(\gamma z + W_V) \sin \beta \cos \beta} \quad (1)$$

ここで、 $c'$  ( $\text{kN m}^{-2}$ )は粘着力、 $\gamma$  ( $\text{kN m}^{-3}$ )は泥炭土塊の湿潤単位体積重量、 $z$  (m)はすべり面までの深度、 $W_V$  ( $\text{kN m}^{-2}$ )は植生の単位面積当たりの重量、 $h$  (-)はすべり面から地下水位までの割合、 $\gamma_w$  ( $\text{kN m}^{-3}$ )は水の単位体積重量、 $\beta$  ( $^\circ$ )はすべり面の角度、 $\phi'$ は内部摩擦角 ( $^\circ$ )である。

さらに、植生の影響を考慮した上で現地地盤の深度別の物理特性及び強度特性を考慮した地盤安全率の計算を行った。植生と深度別の物理特性及び強度特性を考慮した地盤安全率の式を式(2)に示す。

$$F_s = \frac{c' + (\sum (\gamma z - h\gamma_w z) + W_V) \cos^2 \beta \tan \phi'}{(\sum (\gamma z) + W_V) \sin \beta \cos \beta} \quad (2)$$

そして、式(3)を用いて海岸線から内陸に向かって水平方向と鉛直方向の累積の地盤安全率を計算した。

$$\sum F_s = \frac{\sum (c' + (\sum (\gamma z - h\gamma_w z) + W_V) \cos^2 \beta \tan \phi')}{\sum ((\sum (\gamma z) + W_V) \sin \beta \cos \beta)} \quad (3)$$

地盤高は2 m から 10 m まで変動させ、それぞれの地盤高において式(3)の  $\Sigma F_s=1.0$  を下回る海岸からの距離を限界崩壊距離とした。

## 2.6. 限界崩壊距離のマッピング及び評価方法

GIS 上で DEMNAS を使用して、ブンカリス島北部沿岸部 (2,782 ha) の海岸地形断面を 100 m 間隔で  $n=288$  測線取得した。GEE で土地被覆の分類を行った結果から、各画像時期の海岸線から1年後の限界崩壊距離を推定した。各方位角の海岸侵食速度で海岸侵食が進行するものと仮定し、1年間で想定される侵食距離の中で、地盤安全率  $\Sigma F_s=1.0$  を下回る地盤高がある場合、その地点から泥炭地崩壊がそれぞれの限界崩壊距離に応じた崩壊が発生するものとして、 $n=288$  の測線において推定した。崩壊が発生しないと推定された地点においては、方位角に応じた海岸侵食速度で海岸侵食が進行するものとした。その後、GIS 上でマッピングし、GEE の土地被覆の分類で得られた泥炭地崩壊が発生した領域と比較した。比較は混同行列を計算することによって推定精度を評価した。

## 3. 研究結果と考察

地盤安全率は植生の有無で大きな変化はなかった。そのため、植生が崩壊限界距離に与える影響は最小限であった。崩壊限界距離が最も長かったのは裸地条件で、最大距離は標高 10m で発生した。この裸地条件では、崩壊限界距離は  $\Sigma F_s=1.0$  で 555 m、 $\Sigma F_s=1.3$  で 559 m、 $\Sigma F_s=1.5$  で 560 m と算出された。2014 年から 2024 年までの崩壊域は、GEE 上での機械学習により Landsat 8 衛星画像を使用して特定された。推定された崩壊限界距離のマッピング結果を GIS 上の図-1 に示す。表-1 は、 $\Sigma F_s=1.0$  の場合の現地の地盤条件を反映した本研究の推定精度を示している。2014 年から 2024 年までの崩壊域の推定面積は、GEE で分類された崩壊域と 28%の重なり率であった。泥炭地崩壊リスクの予測には前例が少なく、比較基準の設定が難しいため、この重なり率を評価することは困難である。しかし、GEE の解析期間を短縮し、実際の降雨条件下での地盤の地下水位

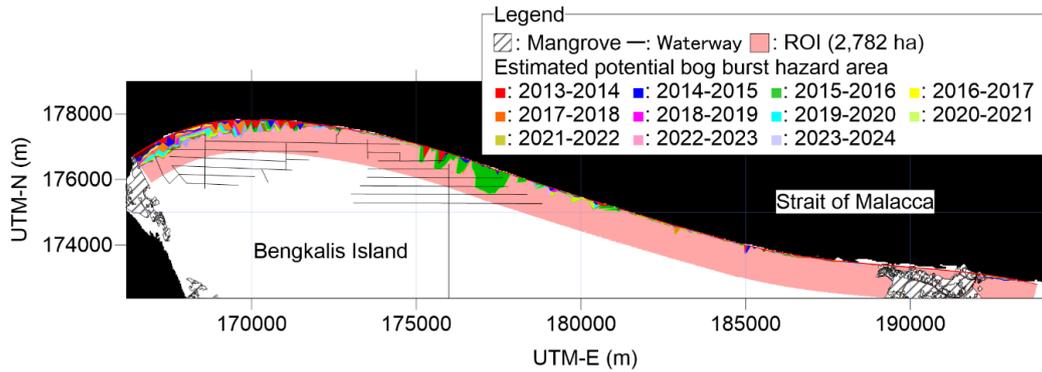


図-1 限界崩壊距離のマッピング結果

表-1 限界崩壊距離のマッピング結果と GEE による崩壊履歴の比較結果

	Overlap Ratio Precision	Intersection over Union (IoU)	True Positive Rate (TPR)	False Positive Rate (FPR)	Accuracy	F1 Score
2014	0.2637	0.1495	0.2566	0.0174	0.0237	0.2601
2015	0.5073	0.0901	0.0988	0.0129	0.1184	0.1653
2016	0.3589	0.1636	0.2312	0.0481	0.1044	0.2812
2017	0.1890	0.1328	0.3087	0.0591	0.0427	0.2345
2018	0.2637	0.2087	0.5000	0.0362	0.0253	0.3453
2019	0.2334	0.1892	0.5000	0.0322	0.0192	0.3182
2020	0.2418	0.1637	0.3365	0.0363	0.0332	0.2814
2021	0.2373	0.1619	0.3375	0.0360	0.0321	0.2787
2022	0.2388	0.1602	0.3273	0.0385	0.0356	0.2761
2023	0.2578	0.1826	0.3851	0.0391	0.0341	0.3089
2024	0.2340	0.1678	0.3724	0.0411	0.0326	0.2874
Total Area (2014-2024)	0.6618	0.3782	0.4689	0.0628	0.2076	0.5489
Average	0.2751	0.1609	0.3322	0.0361	0.0456	0.2761

を明らかにすることで、精度が向上する可能性がある。

#### 4. 結論

熱帯泥炭海岸における泥炭地崩壊の発生するポテンシャルのある領域を推定するために、崩壊限界距離が提案された。その結果、最大 560 メートルの大規模崩壊が発生する可能性があり、高位泥炭地のピートドームの頂部に近づくにつれて崩壊の危険性・規模が増加する可能性がある。

#### 謝辞

本研究は、令和 6 年度 若手研究者による研究プロジェクトに対する支援事業によって、山口大学基金の支援を得て実施した。

#### 参考文献

- 1) Dykes P, A. and Warburton, J.: Mass movements in peat: A formal classification scheme, *Geomorphology* 86, pp.73-93, 2007.
- 2) Wilford, G. E.: Peat landslide in Sarawak, Malaysia, and its significance in relation to washouts in coal seams, *Journal of sedimentary Research*, 36(1), pp.244-247, 1966.
- 3) RiauOnline, Impact Of Abrasion In Simpang Ayam Vil-lage, Bengkalis Island Threatened To Be Washed Away (Review: 09022025)<https://www.riauonline.co.id/riau-pesisir/read/2022/12/14/dampak-abrasi-di-desa-simpang-ayam-pulau-bengkalis-terancam-hanyut>
- 4) Kagawa, H. et al.: Estimation of particulate organic carbon export to the ocean from lateral degradations of tropical peatland coasts, *EGUsphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3547>, 2024.
- 5) Lewis, K., Rumpang, E., Kho, L.K. et al. An assessment of oil palm plantation aboveground biomass stocks on tropical peat using destructive and non-destructive methods. *Sci Rep* 10, 2230, 2020.
- 6) Oskari, M. and Tsuji, N.: *Tropical Peatland Ecosystems Chapter10*, Springer, pp.159, 2016.
- 7) Suzuki, E.: Diversity in specific gravity and water content of wood among Bornean tropical rainforest trees, *Ecological Research*, 14, pp.211-224, 1999.
- 8) Suzuki, M. et al.: Peat Soil Investigaiton in Indonesia Bengkalis Island by Sounding Test, in: *Proceedings of 51rd Geotechnical Engineering Research Meeting* (Okayama City), 2016.
- 9) Koyama, A. et al.: Investigaiton of Peat Landslide in Indonesia Bengkalis Island by Sounding Test, in: *Proceedings of 53rd Geotechnical Engineering Research Meeting* (Takamatsu City), 2018.
- 10) Yusa, M., et al.: Geotechnical Characterization Of Bengkalis' Peat Using Portable Tools, *International Journal of GEOMATE*, Vol.20, Issue 80, pp. 113-120, 2021
- 11) Imai, H.: Study on the Slope Failure Prevention Effect of Tree Root Systems. Hazama Research Annual Report, pp.34-52, 2008.

# NDVI を活用した深層学習に基づく 斜面崩壊発生ポテンシャル評価の高度化

山下 文輝<sup>1)</sup>・福丸 大智<sup>2)</sup>・江口 翔紀<sup>3)</sup>・大中 臨<sup>2)</sup>・赤松 良久<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>山口大学工学部, <sup>2)</sup>山口大学大学院創成科学研究科, <sup>3)</sup>日本工営

## 1. はじめに

近年, 気候変動の影響により, 豪雨災害が激甚化している. これに伴い, 土砂災害の発生件数が増加傾向にあり, 中でも, 土石流の被害が多く報告されている. 土石流は, 斜面崩壊によって発生した土砂が水と土の混相流となり, 溪流沿いから扇状地にかけて非常に広い範囲に対して甚大な被害をもたらす. こうした被害を防止するために, 土石流発生時の斜面崩壊発生位置を広域で簡便に推定する手法が必要である. そこで, 江口ら<sup>1)</sup>は, 素因 (地形, 水文環境など) のみを説明変数として, 斜面崩壊発生確率を予測する深層学習モデルを構築し, 山口県全域における土石流発生ポテンシャルを推定した. ただし, 本モデルでは衛星画像から目視で判読された平成 30 年 7 月豪雨の災害履歴を教師データとしているため, より広域への展開をするうえでは学習データの収集に多大な労力を要する. したがって, モデルの高度化や広域への適用をするためにも, 効率的かつより多くの土砂流下痕を教師データとして収集する必要がある.

本研究では, 正規化植生指数(NDVI : Normalized Difference Vegetation Index)を活用した土砂流下痕の抽出法を開発するとともに, 斜面崩壊発生ポテンシャル評価の高度化を試みた.

## 2. 方法

本研究では, 平成 30 年度 7 月豪雨の被災領域(図-1)を対象に, NDVI を活用した土砂流下痕の抽出と, そこから得られた源頭部の情報を教師データとする深層学習モデルを構築する. 本領域は江口ら<sup>1)</sup>が対象とした領域と同様である. したがって, 構築したモデルを比較することで NDVI を活用することの有用性を検討する.

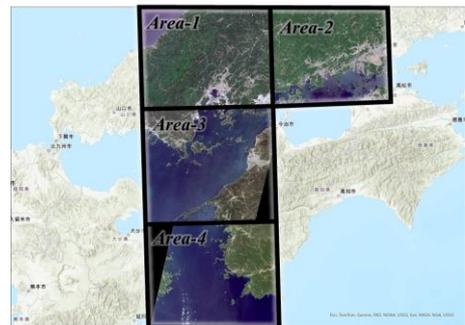


図-1 本研究の対象領域

### 2.1 NDVI を活用した土砂流下痕の抽出法の開発

本検討では, NDVI 画像のみから土砂流下痕を抽出する手法を提案する. 本検討では, European Space Agency(ESA)が運用する地球観測衛星 Sentinel-2 の衛星画像(10m メッシュ)を用いて, 豪雨前後の NDVI の差分を取ることで, 土砂流下痕を推定した. 式 (1)に NDVI の定義式を示す.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

ここで、NIR と RED は、近赤外線バンドと可視域赤色バンドにおける反射率を表す。NDVI は、-1~+1 の値をとり、+1 に近いと植生の活性度が高いことを示し、土砂災害時に樹木等が流出すると-1 に近づく。本検討では、NDVI に差が生じた領域を土砂流下痕として抽出した。NDVI の差分の閾値に関しては、衛星画像の土砂流下痕をとらえられていることに加え、季節変動に伴う植生変化で NDVI に微量の差が生じることに起因した誤検出がないような値を試行錯誤的に選定し、本研究は 0.2 に設定した。また、小畑ら<sup>2)</sup>に従い、豪雨前の NDVI が 0.3 以下の田畑、都市になるような領域を予め除外した。ここで、本研究に使用した衛星画像の撮影期間を表-1 に示す。画像は、平成 30 年 7 月豪雨が発生した 2018 年 6 月 28 日から 2018 年 7 月 8 日を跨ぐことに加え、雲や撮影条件などによる影響を極力受けにくい災害前後の期間のものを選定した。

表-1 衛星画像の撮影期間

	撮影年月日	
	豪雨前	豪雨後
Area-1	2018/6/1	2019/5/22
Area-2	2018/5/24	2019/5/24
Area-3	2018/3/28	2019/3/8
Area-4	2018/3/10	2019/3/5

## 2.2 斜面崩壊発生ポテンシャル評価の高度化

本検討では、江口ら<sup>1)</sup>が提案する深層学習モデルを基に、教師データを前節で抽出した土砂流下痕に置き換えることで、斜面崩壊発生ポテンシャル評価の高度化を行った。深層学習モデルの模式図を図-2 に示す。本モデルは、斜面崩壊確率を目的変数、地形勾配、累積流量、地被分類を説明変数とする階層型ニューラルネットワークモデルである。学習に必要なバッチサイズ、学習率およびエポック数は試行錯誤的に選定した。本モデルには、前章で抽出した土石流源頭部を崩壊地点、各崩壊地点から半径 100m 以上 250m 以内のランダムな 1 地点を非崩壊地点として教師データを与えた。ここで、100m 以上 250m 以内としたのは、国土交通省の XRAIN の分解能が 250m であり、同一の降雨条件と仮定できるためである。また、本検討では、崩壊および非崩壊を含めたすべてのデータセットのうち、90%を学習に用いて、残りの 10%を検証に用いた。

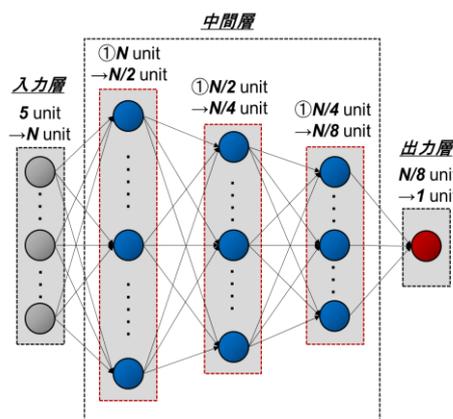


図-2 階層型ニューラルネットワークの模式図 (N は第 1 中間層のユニット数を示す。)

## 3. 結果・考察

### 3.1 NDVI を活用した土砂流下痕の抽出法の開発

土砂流下痕および源頭部の抽出結果を豪雨直後の衛星画像と共に図-3 に示す。豪雨直後の衛星画像と比較すると、土砂流下痕を概ね捉えることができている。図-3 の①に示すように災害履歴では抽出さ



図-3 NDVI に基づく土砂流下痕の抽出結果の一例

れていなかった土砂流下痕を本手法によって抽出することができている。これにより、災害履歴では2390箇所であったのに対し、本検討では3697箇所の土砂流下痕を抽出することができ、55%多く抽出することができた。また、図-3の②のように災害履歴では抽出されているが、本手法で抽出できなかった箇所があった。この領域のNDVIの差分値を確認すると、0.15付近をとっており、閾値である0.2を僅かに下回っていたためである。このような地点を抽出するためには、NDVIの閾値を下げるのが考えられるが、2.1でも述べたように閾値を下げると流下痕以外の箇所の誤検出が多くなる。今後は、土地利用や地形条件に応じた設定など、閾値の選定方法に工夫が必要である。

### 3.2 斜面崩壊発生ポテンシャルの高度化

本検討で構築したモデルによる斜面崩壊発生確率の予測結果の一例を図-4に示す。黒枠で示しているNDVIを基に抽出した土砂流下痕と比較すると、斜面崩壊が発生した箇所ではモデルによる斜面崩壊確率も0.7以上と大きくなっていることが確認された。また、NDVIによる抽出結果から実際は土砂侵食が確認されなかった箇所でも斜面崩壊確率が0.5以上であり、こうした箇所でも斜面崩壊発生リスクがあることが示された。また、モデルの精度を評価するために、全データに対する正しく予測した割合を示す正解率を算出した。その結果、正解率は0.674であった。一方で、江口ら<sup>3)</sup>が構築したモデルの正解率は0.651であり、わずかに精度が向上した。

ここで、両モデルにおける地形勾配・累積流量と崩壊/非崩壊の正解ラベルとモデルで予測した斜面崩壊発生ポテンシャルの関係を図-5に示す。本研究(図-5(a))における斜面崩壊発生ポテンシャルと正解ラベルを比較すると、地形勾配20~40°付近の崩壊が集中している点での斜面崩壊確率は1.0に近く、概ね正解ラベルと傾向が一致した。また、既往研究<sup>3)</sup>によって、斜面崩壊は地形勾配が15~35°の表層土砂が十分に存在する場所での発生率が高く、40°以上となる斜面では、表層土壌が岩盤をわずかに覆う程度しか存在していないため、発生率が低いことが示されている。江口ら<sup>3)</sup>(図-5(b))では、15°以上の地点で、斜面崩壊発生ポテンシャルが0.6付近の一定の値をとったのに対し、本研究(図-5(a))では、35°付近まで斜面崩壊発生ポテンシャルが徐々に高くなり、35°以上の範囲で徐々に低下している。

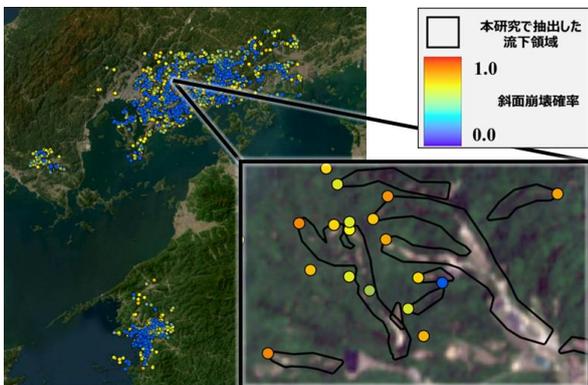


図-4 斜面崩壊発生確率の一例

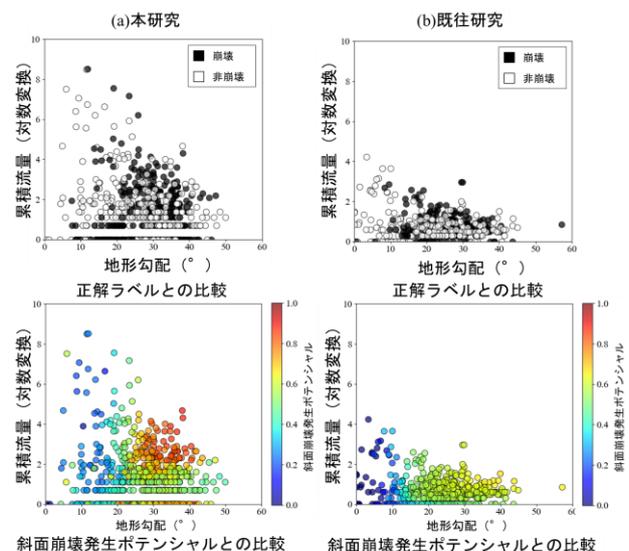


図-5 地形勾配・累積流量と正解ラベルおよび斜面崩壊発生ポテンシャルの比較

これは、既往研究<sup>3)</sup>の傾向と一致している。また、0～20°の範囲でも、正解ラベルで崩壊の地点で斜面崩壊発生ポテンシャルが0.5付近の値をとっており、地形勾配が小さい領域においても斜面崩壊発生ポテンシャルが高い地点を予測可能であることが分かる。

#### 4. まとめ

本研究では、NDVIを活用した土砂流下痕を抽出する手法を開発するとともに、抽出結果を教師データとする深層学習モデルを構築し、斜面崩壊発生ポテンシャルを評価した。まず、本研究では災害履歴の抽出方法に比べて55%多くの地点を抽出でき、NDVIの活用により多くの土砂流下痕を抽出できることが示された。さらに、これらを教師データとした深層学習モデルを構築することで、江口らりと同等の精度で斜面崩壊発生ポテンシャル評価が可能であり、NDVIを活用することの有用性が示された。

#### 参考文献

- 1) 江口 翔紀：機械学習を用いた土石流被災リスク評価手法の開発，山口大学大学院創成科学研究科修士論文(未刊行)，2024
- 2) 小畑 建太，岩男 弘毅：平成28年熊本地震に起因する斜面崩壊とASTERデータにおけるNDVI変化の関係，日本リモートセンシング学会誌，36巻4号p.417-420，2016.
- 3) 佐藤 丈晴：深層学習による近傍の地形的特性を考慮した土砂災害リスク評価，砂防学会誌，Vol. 74，No.2，p.3-12，2021.

# FVCOM を用いた漂流ゴミ追跡シミュレーションに関する研究

岡田 遥太郎<sup>1</sup>・朝位孝二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山口大学社会建設工学科, <sup>2</sup>山口大学大学院創成科学研究科

## 1. はじめに

集中豪雨や台風に被害の中で、流木や土砂等の漂流ゴミはその周辺海域に様々な悪影響を与えている。例えば、平成30年7月5日から7日にかけて、梅雨前線が九州北部から近畿地方に停滞したことで流木や土砂が河川へと流れ込み海域へと流出していった。写真-1 にその時の、周防灘で海洋環境整備船「がんにゅう」と「おんど2000」の回収状況を示す。これらの漂流ゴミは船舶の航行障害など悪影響を引き起こすので迅速かつ効率的な回収が求められている。現在、漂流ゴミの搜索は、漂流ゴミを回収する海洋整備事業船が港湾事業艇による事前調査の目撃情報を頼りに行われている。しかし、海洋整備事業船が目撃情報海域到着時には、既に漂流ゴミは風や潮流の影響で移動しており発見できなくなっていることが多い。このため、漂流ゴミ追跡シミュレーションにより効率的な回収方法を確立する必要がある。当研究室では<sup>2)</sup>は、漂流ゴミ追跡シミュレーションにFVCOMに海流と風によって駆動する漂流ゴミの移動モデルを組み込んだが、その妥当性は定性的にしか評価できていない。そこで、本研究ではこのモデルの定性的な妥当性を検討するために、平成28年9月5日から8日に九州地方整備局で実施した佐波川河口に投入された漂流ブイの移動調査結果<sup>3)</sup>に基づいた漂流ブイの移動シミュレーションを行った。



写真-1 平成30年7月13日周防灘の「がんにゅう」、「おんど2000」の土砂等の回収状況<sup>1)</sup>

撃情報を頼りに行われている。しかし、海洋整備事業船が目撃情報海域到着時には、既に漂流ゴミは風や潮流の影響で移動しており発見できなくなっていることが多い。このため、漂流ゴミ追跡シミュレーションにより効率的な回収方法を確立する必要がある。当研究室では<sup>2)</sup>は、漂流ゴミ追跡シミュレーションにFVCOMに海流と風によって駆動する漂流ゴミの移動モデルを組み込んだが、その妥当性は定性的にしか評価できていない。そこで、本研究ではこのモデルの定性的な妥当性を検討するために、平成28年9月5日から8日に九州地方整備局で実施した佐波川河口に投入された漂流ブイの移動調査結果<sup>3)</sup>に基づいた漂流ブイの移動シミュレーションを行った。

## 2. モデルの概要

### 2.1 漂流ゴミの移動モデル

FVCOMはChenらによって開発された海洋流動モデルで数値解法には有限体積法が採用されている。水平方向には三角形の非構造格子、鉛直方向には $\sigma$ 座標が用いられており複雑な海岸形状を取り扱うことができる。FVCOMには質量をもたない粒子の移動計算機能があり、それを改良して漂流ゴミの移動計算ルーチンを作成した。漂流ゴミの移動速度 $\mathbf{V}$ は海流成分 $\mathbf{U}$ と風の成分 $\mathbf{W}$ の合成からなるものとモデル化した。それを式(1)に示す。

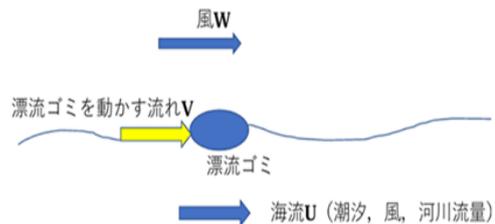


図-1 流動モデル<sup>2)</sup>

$$\mathbf{V} = a_1\mathbf{U} + a_2\mathbf{W} \quad (0 < a_1, a_2 < 1) \quad (1)$$

ここで $a_1, a_2$ は任意パラメータである。

## 2.2 計算領域

本研究で使用した計算格子を図-2 に示す。響灘、周防灘を対象とした計算領域で HSN モデルと呼ぶことにする。非構造格子の要素数は 20,295 個、接点数は 11,619 個である。鉛直方向には 10 層に分割している。水平解像度は 500 から 5000m である。境界は験潮所間を結ぶように設定している。各験潮所の潮位を 40 分潮の潮位から推算して与え、各験潮所間を結ぶようにして設定している。験潮所間の潮位は線形補間している。

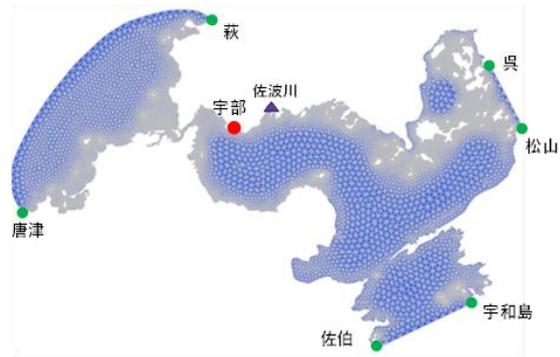


図-2 HSN モデル (格子と験潮位置)

## 3. 計算条件

### 3.1 佐波川河口の漂流ブイ調査

図-3 に投入された漂流ブイの形状を、図-4 に漂流ブイの軌跡を示す。漂流ブイ TYPE1 と TYPE2 の水没率は 0.46 で漂流ブイ TYPE3 の水没率は 0.83 である。平成 28 年 9 月 5 日の 13 時 20 分に投入された漂流ブイ TYPE1, TYPE2, TYPE3 は、同日の 18 時頃に防府市西浦地先に近づいたため回収された。9 月 5 日 18 時 20 分に投入された漂流ブイ TYPE1 は、6 日の 15 時に秋穂東地先で回収された。9 月 5 日 18 時 15 分に佐波川河口沖合に投入された漂流ブイ TYPE2 は 8 日の 14 時 50 分に、漂流ブイ TYPE3 は 8 日の 14 時 25 分に周防灘沖合で回収された。9 月 6 日 15 時 30 分に佐波川河口沖合に投入された漂流ブイ TYPE1 は周防灘沖合に回収された。

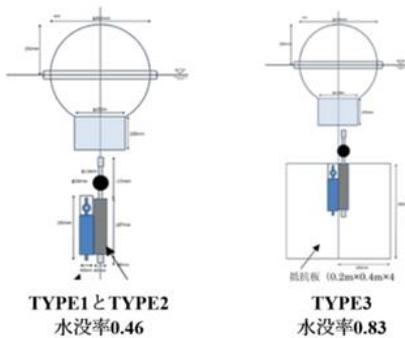


図-3 漂流ブイの形状<sup>3)</sup>

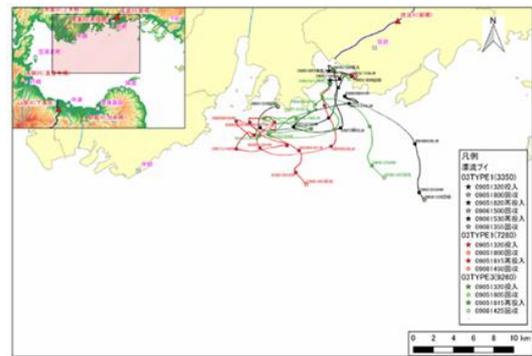


図-4 佐波川漂流ブイの挙動<sup>3)</sup>

### 3.2 防府市における調査時の風

漂流ブイ調査時の防府市の AMeDAS で観測された風向風速を図-5 に示す。9 月 5 日は南南東からの風を中心とした風向であった。6 日は南西からの風向が中心で、風速は最大 3.3m/s となった。7 日は北東から西北西への風向の推移があり、風速は最大 2.7m/s であった。8 日は北西からの風が中心で 11 時と 12 時には風速が 5m/s 以上を記録し強風となった。

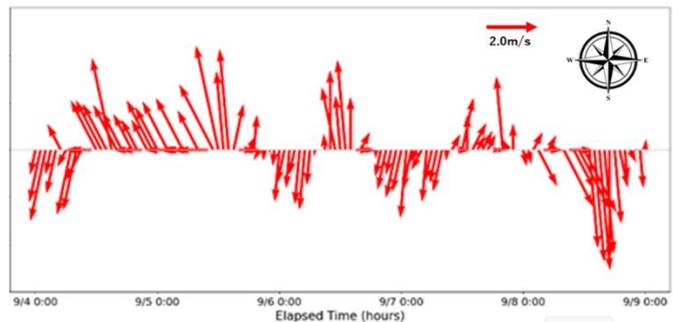


図-5 防府市における調査時の風向と風速

### 3.3 HSN モデルの潮汐の再現性の検討

HSN モデルの潮汐の再現性を検討するために、宇部港における計算潮位と観測潮位の比較を図-6 に示す。シミュレーションの結果は振幅においては、観測潮位よりも若干過大評価されているが、位相のずれは見られない。数値計算において潮汐場を立ち上げるための前駆時間を 24 時間として漂流ブイ投下の前日である 9 月 4 日から計算を開始した。

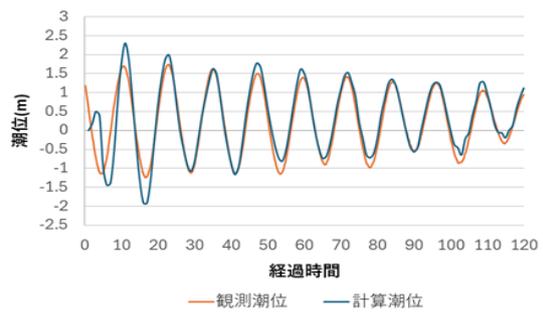


図-6 宇部港における潮位

### 4 シミュレーション結果

パラメータ  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  を種々変えて、漂流ブイの移動計算を行った。図-7 と図-8 は 9 月 5 日 18:20 に投入された TYPE1 の実測軌跡とシミュレーション結果である。それぞれ  $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.01$  および  $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.05$  の組み合わせである。漂流ブイは投入後、南へ移動しその後潮汐の影響で西へ移動する。やがて北へ移動して 9 月 6 日 15:00 に回収されている。図-7 のシミュレーション結果は概ねその挙動をとらえているが沖側への移動と到着位置が東にずれている。図-8 も同様のシミュレーション結果であるが、 $\alpha_2$  の値が図-7 の場合よりも大きいため風の影響でより沖側に移動している。

図-9 と図-10 は 9 月 5 日 18:15 に投入された TYPE2 の実測軌跡とシミュレーション結果である。それぞれ  $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.01$  および  $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.05$  の組み合わせである。漂流ブイは投入後、南へ移動しその後潮汐の影響で西へ移動する。東西方向に向きを変えながら最終的に沖へ移動して 9 月 8 日 14:50



図-7 計算結果 (TYPE1  $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.01$ )



図-8 計算結果 (TYPE1  $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.05$ )

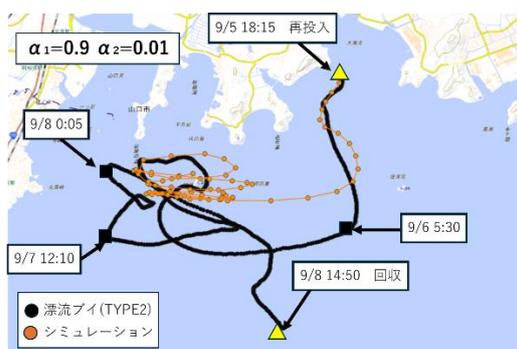


図-9 計算結果 (TYPE2  $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.01$ )



図-10 計算結果 (TYPE2  $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.05$ )

に回収されている。図-9 のシミュレーション結果も、南下してやがて西進し、東西に向きを変える。ただし、実測のように南側への移動はない。図-10 のシミュレーション結果は投入から9月6日5:30までの軌跡を良く再現している。風に影響を上手く取り込んでいるためと思われる。しかしながら西進後は、陸地に着岸し計算を進めることができなかった。

図-9 と図-10 は9月5日18:15に投入されたTYPE3の実測軌跡とシミュレーション結果である。それぞれ $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.01$  および $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.05$  の組み合わせである。漂流ブイの挙動は、図-9, 10のTYPE2と同様、投入後は南下し、その後西進して東西に移動する、最終的には風の影響でさらに南下する。図-11のシミュレーション結果は投入から西進するところまでは実測軌跡と良く一致している。しかしながら、その後は東西に移動するだけで南下はしない。図-12のシミュレーション結果は図-10と同様で、南下して西進ところまでは定性的に実測軌跡と一致するが、そのまま陸地に着岸する。



図-11 計算結果 (TYPE3  $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.01$ )

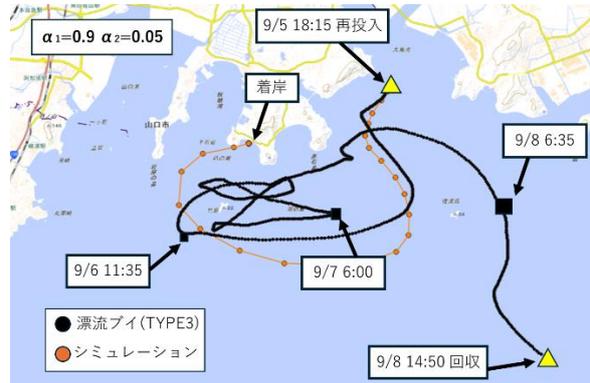


図-12 計算結果 (TYPE3  $\alpha_1=0.9$ ,  $\alpha_2=0.05$ )

## 5 おわりに

種々のシミュレーション結果から $\alpha_1$ は0.9程度、 $\alpha_2$ は0.01程度が実測軌跡を再現していることが分かった。しかしながら全移動観測期間の軌跡を完全に再現できていないわけではない。また限られた実測軌跡に基づく検討である。今後、より詳細にモデルパラメータを検討する必要がある。そのためには検証用データの取得のための観測を行う必要がある。またより正確な海上の風を取得する必要もある。欧州中期予報センター(ECMWF)や気象庁が提供する再解析データや予測データを利用することを考えている。

## 謝辞

本研究は中国整備局の令和6年度漂流ゴミの予測シミュレーションの高度化に関する研究の支援のもと実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：平成30年度九州北部の大雨による海域における流木等漂流物への対応  
[https://www.mlit.go.jp/report/press/port07\\_hh\\_000100.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/port07_hh_000100.html)
- 2) Andhita Triwahyuni, Koji Asai, I. Gede Hendrawan, Hajime Shirozu: Numerical simulation of drifted marine debris in Suo-nada caused by the north Kyushu heavy rainfall on July 2012, Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 2020.
- 3) 九州地方整備局：平成28年度 周防灘海域漂流ゴミ移動予測検討業務 業務内容説明資料

# 海岸保全施設の陸閘統廃合に関するアンケート調査

糸川 茉友子<sup>1</sup>・朝位 孝二<sup>2</sup>・上原高寛<sup>3</sup>・吉永 祐二<sup>4</sup>

山口大学社会建設工学科<sup>1</sup>, 山口大学大学院創成科学科研究科<sup>2</sup>, 山口県土木建築部港湾課<sup>3,4</sup>

## 1. はじめに

海岸堤防や河川堤防には部分的に開口部が設けられており、平常時はそこを人や車などが通行している。一方で、津波・高潮などの危険性が迫ってきている場合は、その開口部を閉鎖する必要がある。その閉鎖扉は陸閘と呼ばれる。災害から背後地を守るためには、陸閘を安全かつ迅速・確実に閉鎖しなければならない。しかし、例えば山口県において県港湾課だけが管理している陸閘は 1,000 基以上あり、それらを迅速かつ確実に閉鎖するには十分な現場作業員の確保や閉鎖時の安全性の確保が必要である。また少子高齢化が進む社会において将来的に現場作業員不足が懸念される。さらに陸閘自体の老朽化も進んでおり陸閘の更新が必要であるが、財政的な面から老朽化した現存の陸閘の全ての更新は困難である。

このような背景のもと、全国的に陸閘の統廃合が進められているが、それを実現するには必要な陸閘、そうではない陸閘を把握する必要がある。しかし数多く存在する陸閘についての把握は容易ではない。そこで本研究では宇部港に存在する陸閘について閉鎖作業を行う業者と陸閘使用の頻度が多いと思われる陸閘周辺住民に対して、設置個所の利用状況、業者の陸閘閉鎖所用時間、陸閘の常時閉鎖の可能性を探るためのアンケート調査を実施した。

## 2. 陸閘とは

陸閘とは、河川や海岸の堤防を切って設けられた開口部を閉じるための可動式の門扉であり、その門扉は洪水、津波又は高潮の際に閉鎖され、堤防などの役割を果たす。陸閘には、門扉を人力や動力で閉鎖する方式や、せき板等の資材をはめ込む方式など様々な構造や規模のものがある。陸閘があることによって、人や車両は堤防などを乗り越えることなく河川や港湾施設などを行き来することができ、洪水時等には閉鎖することで安全性が確保されることになる。



(a) 人の通行のために設置された陸閘



(b) 道路を横断して設置された陸閘

図 1 陸閘の例

### 3. 閉鎖作業業者を対象としたアンケート

宇部港の陸閘閉鎖作業を受託している業者は9社である。アンケートの質問項目は以下のような内容となっている。県港湾課を通して各業者にアンケートを依頼し、令和6年11月13日～11月25日に実施した。

- ①作業人員数 ②閉鎖作業時間 ③陸閘閉鎖の順 ④陸閘閉鎖の重要性 ⑤陸閘常時閉鎖の可否

図2は一つの陸閘の閉鎖作業時間を示している。図2の横軸はa:5分未満, b:5分以上10分未満, c:10分以上15分未満, d:15分以上20分未満, e:20分以上を表し、図3の横軸はf:30分未満, g:30分以上60分未満, h:60分以上90分未満, i:90分以上120分未満, j:120分以上を表している。多くは15分未満で作業が完了するが20分以上かかる場合がある。これは開口部に車道があり、閉鎖時には交通の安全性を確認する必要があるからである。図3は県から閉鎖依頼を受けて最終的に閉鎖を完了しその報告にかかるまでの時間を示している。f:30分未満と回答した業者は一基の陸閘閉鎖作業を請け負っている業者であった。この結果から、1～2時間は必要であることが分かる。

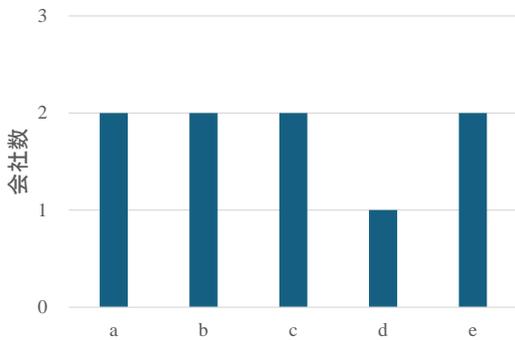


図2 閉鎖作業時間

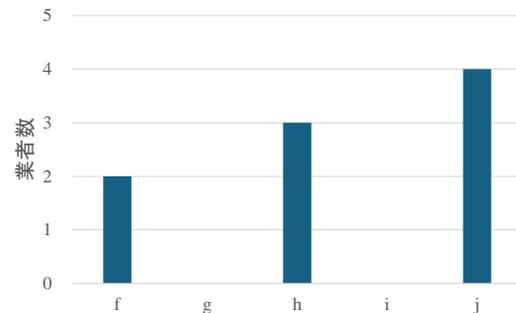


図3 閉鎖完了時間

効率的な陸閘閉鎖作業を行うには何が重要だかという質問に対する結果を図4に示す。回答選択肢は作業員の増員、陸閘の数を減らす、早めの閉鎖依頼、陸閘門扉の自動開閉化、陸閘周辺の道路整備である。上位3位までを数字で回答してもらい、上位順に重みをつけて集計した。最も多かった回答は陸閘門扉の自動開閉化、続いて陸閘の数を減らす、次に同率で作業員の増員と早めの陸閘閉鎖依頼となった。その他の意見では円滑な開閉のための定期的な整備という意見も得られた。このような結果から、作業員の目線からも陸閘閉鎖作業の円滑化の観点において陸閘の数を減らすことは有効であると考えられていることが分かった。また、常時閉鎖（平時から閉鎖しておくが開くこともできる）もしくは完全閉鎖（鍵をかけるまたは開口部をコンクリートで埋める）しても良い陸閘があるかアンケートを実施したが、多くは事業所内に陸閘があるため常時閉鎖や完全閉鎖は不可との回答だった。

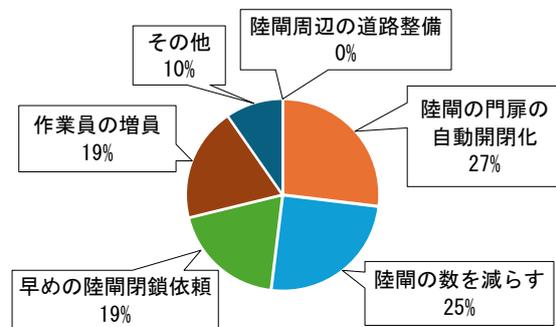


図4 陸閘閉鎖作業で重要度が高いもの

効率的な陸閘閉鎖作業を行うには何が重要だかという質問に対する結果を図4に示す。回答選択肢は作業員の増員、陸閘の数を減らす、早めの閉鎖依頼、陸閘門扉の自動開閉化、陸閘周辺の道路整備である。上位3位までを数字で回答してもらい、上位順に重みをつけて集計した。最も多かった回答は陸閘門扉の自動開閉化、続いて陸閘の数を減らす、次に同率で作業員の増員と早めの陸閘閉鎖依頼となった。その他の意見では円滑な開閉のための定期的な整備という意見も得られた。このような結果から、作業員の目線からも陸閘閉鎖作業の円滑化の観点において陸閘の数を減らすことは有効であると考えられていることが分かった。また、常時閉鎖（平時から閉鎖しておくが開くこともできる）もしくは完全閉鎖（鍵をかけるまたは開口部をコンクリートで埋める）しても良い陸閘があるかアンケートを実施したが、多くは事業所内に陸閘があるため常時閉鎖や完全閉鎖は不可との回答だった。



図5 閉鎖完了時間

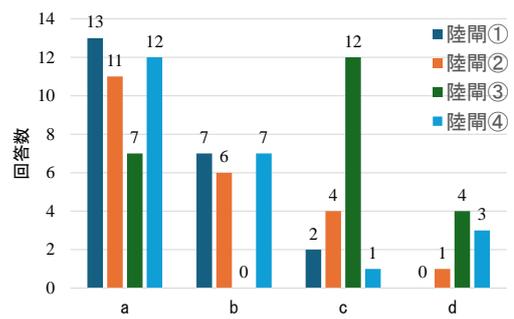


図6 陸閘閉鎖の可否

#### 4. 陸閘近隣住民を対象としたアンケート

宇部市内にある一部の陸閘を対象として近隣住民に陸閘利用状況や閉鎖の可否についてアンケート調査を実施した。令和6年12月20日に実施し、K自治会は30部、L自治会は35部を海岸沿いの65世帯にアンケート冊子を直接投函する形で配布を行った。令和7年1月5日までに回答を返送して頂くよう依頼した。最終的に23通の回答を得た。

図5に4基の陸閘位置を示す。これら4基の陸閘に関して「常時閉鎖したほうが良い」「完全閉鎖したほうが良い」「常時閉鎖も完全閉鎖もしないほうが良い」「わからない」の4つの選択肢の中から、自分の考えに近いと思われるものにそれぞれ回答していただいた。これら陸閘については閉鎖担当業者は利用者がある可能性があるため常時・完全閉鎖の是非はわからないという回答であったため、近隣住民にもアンケートを実施した。

この結果を図6に示す。横軸はa:「常時閉鎖をしたほうが良い」、b:「完全閉鎖をしたほうが良い」、c:「常時閉鎖も完全閉鎖もしないほうが良い」、d:「わからない」を表している。

図6より陸閘①、陸閘②、陸閘④では「常時閉鎖または完全閉鎖をしたほうが良い」と回答した人が半数以上となっているのに対して、陸閘③では「常時閉鎖も完全閉鎖もしないほうが良い」と回答した人が半数以上となっている。

陸閘③は陸閘①、陸閘②、陸閘④と比べて陸閘自体の幅が広く、人が容易に出入りできると考えられる。

図7に各陸閘の年間使用頻度について示す。図7の横軸はa: ほぼ毎日、b: 1週間に2~3回程度、c: 1週間に1回程度、d: 1か月に2~3回程度、e: 1か月に1回程度、f: 2~3か月に1回程度、g: 半年に1回程度、h: 1年に1回程度、i: ほとんど使わない、j: その他を表している。その他の意見は4つの陸閘すべて全く使わないというものだった。

4つの陸閘において最も多かった回答は「ほとんど使わない」であったが、陸閘③については半年に1回以上陸閘を利用する人が約45%も存在することが分かった。それに対して、「常時閉鎖または完全閉鎖をしたほうが良い」という回答が多かった。陸閘①、陸閘②、陸閘④については「ほとんど使わない」という回答が75%を超えていた。陸閘①、陸閘②の背後は浜が狭く利用しづらいが、陸閘③の背後の浜は広く利用されているようである。実際に陸閘③の利用頻度は他の陸閘よりも多いことを把握している。陸閘④は陸閘③との距離が約15mしかないため使用頻度は少ないと思われる。このような結果から陸閘①、陸閘②、陸閘④は実際に常時閉鎖を実施してもよいのではないかと考える。

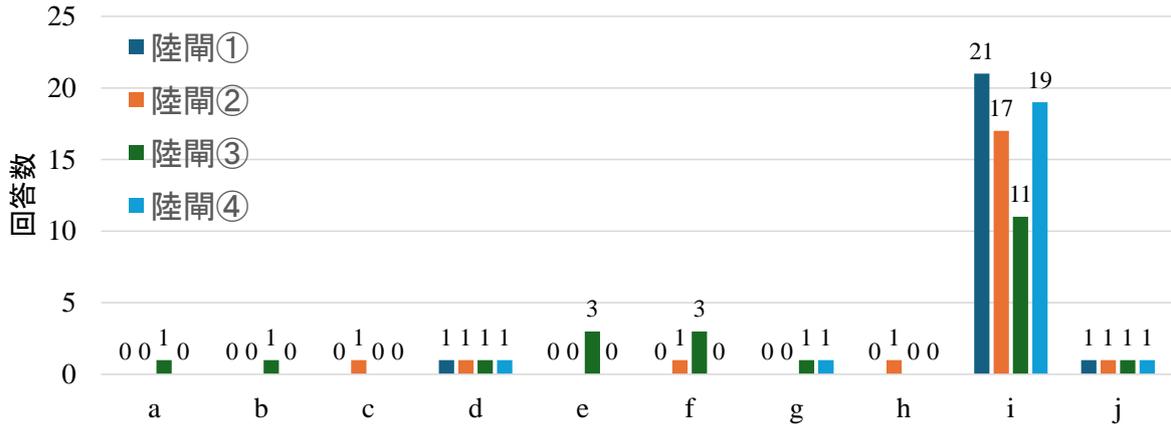


図7 各陸閘の年間使用頻度

## 5. おわりに

本研究では、宇部港に存在する陸閘について閉鎖作業を行う業者と陸閘使用の頻度が多いと思われる陸閘周辺住民に対して、設置個所の利用状況、業者の陸閘閉鎖所用時間、陸閘の常時閉鎖の可能性を探るためのアンケート調査を実施した。その結果、陸閘閉鎖作業の現状や地域住民の利用状況など詳しく知ることができた。どの陸閘が常時閉鎖可でどの陸閘が不可なのか、ある程度情報が集まれば、機械的（例えば AI などを利用して）に常時閉鎖が可能な陸閘が判定できるものと思われる。非常に個数の多い陸閘について有益な手法になると思われる。

### 謝辞

本研究遂行にあたり、業者へのアンケート調査の実施にあたりましては、陸閘閉鎖作業を受託されている業者様、地域住民へのアンケート調査の実施にあたりましては、ご回答をいただきました地域住民の皆様に深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 総務省行政評価局：河川の陸閘の管理・運用に関する調査結果報告書，令和5年7月