

2024 年度 山口応用地質研究発表会

発表要旨集

2024 年 5 月 23 日

山口大学

山口大学理学部附属地質技術者教育センター

山口大学理学部地球圏システム科学科

中国地質調査業協会山口県支部

目次

口頭発表

- 0S-1. 石灰岩洞窟の形成過程における崩壊の要因 . . . 1
○乾智美, 辻智大〈山口大学〉
- 0S-2. 山口県に分布する岩石の単位体積重量 . . . 5
○原中浩二〈山口建設コンサルタント〉
- 0S-3. 堆積岩露頭で発生した落石のメカニズム及び地質調査結果に関する考察 . . . 7
○田河翔大, 石本裕己〈宇部建設コンサルタント〉
- 0S-4. トンネル工事の岩盤判定における AI の活用事例 . . . 12
○重谷隆太〈国土交通省〉, 鬼村雅和〈UIC コンサルタント〉,
荒木光一〈五大開発〉
- 0S-5. 関門層群から採取された断層岩のコア試料の分析結果 . . . 14
○吉原和彦, 津田秀典, 木山拓海, 清崎恵, 金折裕司〈トキワコンサルタント〉,
西村祐二郎〈山口大学名誉教授〉
- 0S-6. 令和 6 年能登半島地震で発生した斜面災害の地形的特徴と現地調査結果 . . . 19
○瀧本真理, 太田岳洋〈山口大学〉
- 0S-7. 2024 年能登半島地震による地盤の変形に関する広域地質調査 (速報) . . . 21
○辻智大, 山田佑哉〈山口大学〉

ポスター発表

- PS-1. 九重火山における火山岩の斑晶と石基のサイズ定義 . . . 26
○福岡仁至, 太田岳洋〈山口大学〉
- PS-2. 阿武川-佐波川の河川争奪の要因と年代 . . . 30
○山田佑哉, 辻智大〈山口大学〉
- PS-3. 熱帯泥炭地における沿岸地盤の崩壊形態別分類 . . . 36
○香川拓輝, 山本浩一〈山口大学〉, Sigit Sutikno〈リアウ大学〉,
Noerdin Basir〈ブンカリス高等専門学校〉, Muhammad Haidar
〈インドネシア地理空間情報庁, 東京大学〉
- PS-4. 木と地すべり地における化学的風化メカニズム . . . 40
○村尾駿太郎, 太田岳洋〈山口大学〉
- PS-5. Probe for Measuring Three-Dimensional Groundwater Velocity without
Borehole . . . 42
○Joaninha Belo Ornai, Masataka Aoki, Koichi Yamamoto
〈Yamaguchi University〉
- PS-6. 3次元簡易地下水流向流速計の開発 . . . 48
○山本浩一〈山口大学〉
- PS-7. 景勝地須佐湾周辺の火山性堆積物：須佐ホルンフェルスはカルデラか？
. . . 53
○大和田正明, 太田岳洋, 江島圭祐〈山口大学〉

石灰岩洞窟の形成過程における崩壊の要因

○乾智美^{1)*}・辻智大¹⁾

1)山口大学

* E-mail: d018vcu@yamaguchi-u.ac.jp

Factors of collapse during the formation of limestone caves

Inui Tomomi^{1)*}・Tomohiro Tsuji¹⁾

1) Yamaguchi University

* E-mail : d018vcu@yamaguchi-u.ac.jp

キーワード : 石灰岩洞窟, 崩壊, 断層

Keywords: Limestone cave, Collapse, Fault

1. はじめに

カルスト地域では鉱産資源や観光資源などカルスト資源の開発が進んでいるが、このような開発により陥没穴が形成されるような事例が国内外で発生している¹⁾。山口県美祢市においても同様な地面の陥没が発生している²⁾。このようなカルスト地域における崩壊リスクやその要因を知ることは、安全な観光や資源開発のために必要であり、カルスト景観の発達を考えるうえでも重要である。さらに、石灰岩洞窟の拡大にも石灰岩の崩壊が起因しているとされており、崩壊には断層が関与していることが指摘されている³⁾。乾・辻(2023)⁴⁾では崩壊リスクの検討のために、美祢市秋吉台北東部の景清穴において、どのような断層が崩壊に関与するのか、断層の特徴や、洞窟の幅、断層と空洞との関係などについて検討した。今回は同地域の大正洞において同様の調査検討及び、iPhone13Pro max を用いた LiDAR 3D スキャンという新たなアプローチで、石灰岩の崩壊メカニズムの検討を行った。

2. 調査結果

本研究では、大正洞を5箇所崩落部に分類し、うち崩落部3~5の3箇所には断層が確認された(図1(a))。崩落部1は洞口部分であり、断層は未発見であるが大量の崩落礫が観察される。崩落部2でも断層は未発見であるが、数本の割れ目が交差し上方に延びる空間が形成されている。また、後述する崩落部4の断層が観察される箇所もある。崩落部3は洞幅約12m、天井高約5mの空間で、N17°W,73°E、破碎幅25cm程の断層が1本観察される。洞床には30~40cm最大径約1.8mの崩落礫が見られ、断層北部末

端を頂上部とする高さ3 m程の崩落礫の斜面を形成している。崩落部4ではN37°W,55°EとN47°W,60°Eの2本の断層が交差し、洞幅約21 m、天井高約7 mの空間でホール状の空間全体がキープロック崩壊を起こしたような様相を呈する。崩落礫は断層沿いに広く分布し礫径は20~40 cm、最大径は約1.5 mであった。崩落部5ではN52°W,62°E, N42°W,76°E, N57°W,40°Eの3本が平行に観察された。N52°W,62°Eの断層は出口付近まで伸びる約55 mの断層で連続性が良く、N42°W,76°Eの断層は約50 cm程の破碎帯を伴う。前者の断層に沿って洞窟は延長しており、洞幅は約8 m、天井高は約15 m程で、洞壁の表面は溶食により滑らかである。洞床の崩落礫は景清穴や大正洞の他の崩落部に比べ少なく、泥に埋もれるようにして少量観察されるほか、洞壁沿いに破碎された岩塊が観察される箇所もある。崩落部5の出口付近には崩落礫が斜面を形成しており、崩落礫の礫径は20~50 cmで最大径は約2 mであった。斜面上部では崩落礫が堰き止められるようになっており、礫の隙間から植物根が観察された。洞窟外出口西側でも石灰岩礫が斜面を形成している。礫径は20~50 cm、最大径は1.5 mである。礫山中腹にN42°W,74°Wの岩壁が観察される。

3Dスキャンは洞窟外の礫山上部から崩落部5の礫山上部にかけて行った。その結果、洞窟内外の両地点間の距離は約2 mであった(図2(a))。これにより、洞窟外で観察されていた割れ目の分布を正確にすることができ、洞窟内礫山上部のN57°W,78°Sの割れ目と洞窟外礫山上部のN42°W,74°Wの割れ目が連続するような位置関係にあることが分かった。またこの割れ目は洞窟内でも複数箇所を確認されている(図1(a) Loc.7~9)。また、洞窟外の石灰岩の分布域が図1のように明確になった。

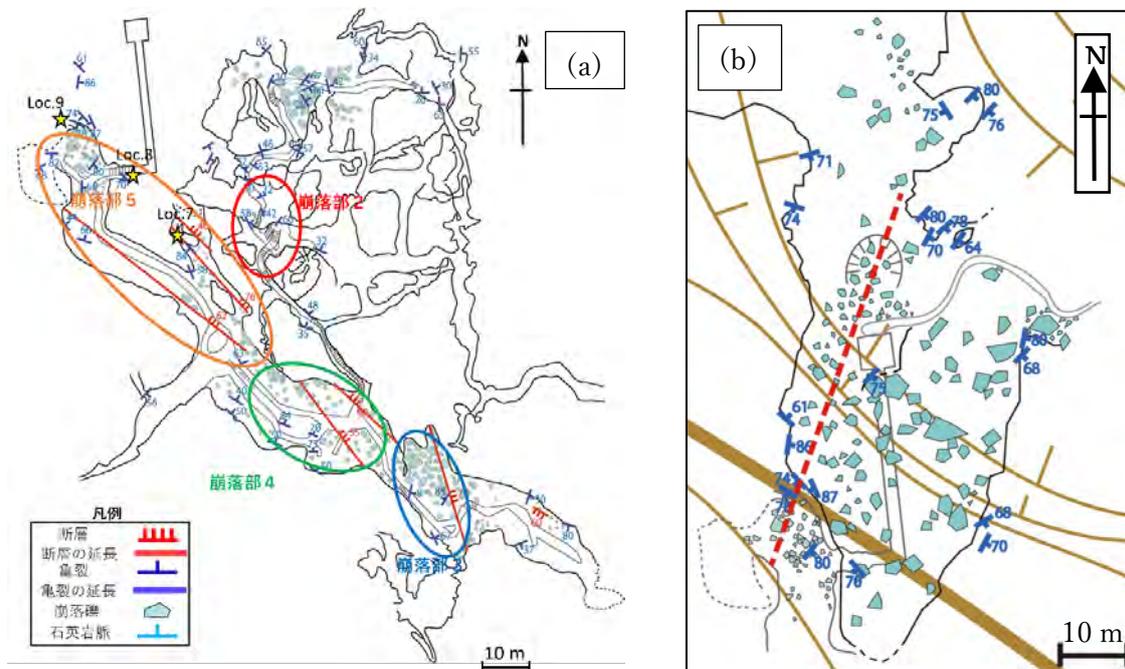


図1 大正洞の断層，崩落礫分布(村上,2015⁵⁾ 大正洞測量時に加筆) (a)，大正洞出口周辺の崩落礫，石灰岩分布 (b)。

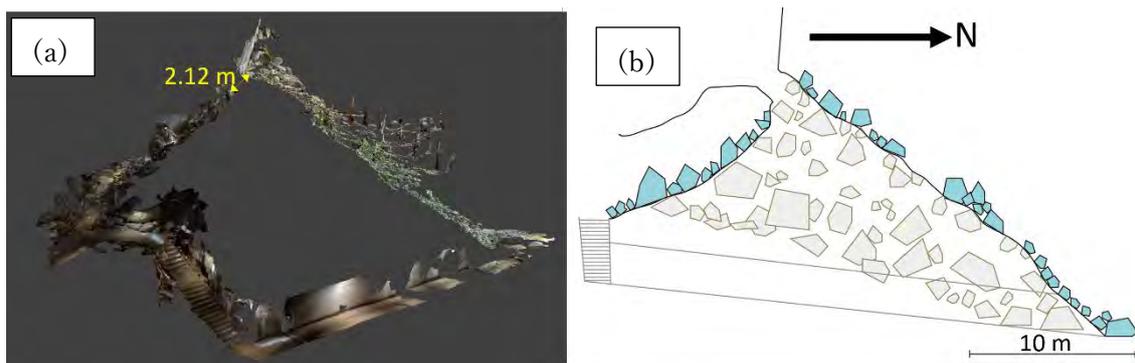


図2 大正洞出口付近の3D スキャン (a), 大正洞出口付近の推定断面図 (b).

3. 考察

大正洞の各崩落部において、破碎帯を伴う断層が確認される傾向にあることから、景清穴と同様に連続性の良い断層が崩壊に大きな影響を与えたと考えられる。しかし空間の拡大に関して、断層沿いに滑らかな洞壁が続くことから、景清穴に比べ溶食の影響が大きいのではないかと推察される。洞壁が滑らかな箇所の方が崩落礫の量が少ないこともこれを支持する。

3D スキャンによって得られた洞窟外までの距離と堆積物から、大正洞出口付近は崩落礫によって隔てられた空間ではないかと推察される。割れ目の走向傾斜及び分布位置から、この箇所の崩落にも石灰岩の割れ目が関与したと推察される。また、予察的ではあるが、この空間が崩落礫によって隔てられているとすると、崩落礫の量から崩落の規模や崩落前の空間を復元できる可能性がある。

4. まとめ

断層の位置及び走向傾斜と崩落礫の分布から、大正洞においても崩落の発生には断層が大きな影響を与えていると考えられる。しかし、崩落礫の量及び洞壁の様子から景清穴に比べると、溶食が空間の拡大に大きく影響したと推察される。また、踏査と3D 測量を組み合わせることにより、礫山の産状を立体的にとらえることがより簡便になった。これにより、石灰岩の崩壊の過程や崩壊前の状態を推測できる可能性がある。

5. 謝辞

本研究にあたり、美祢市文化財保護課の村上崇史氏には調査への同行や、測図の提供、ご助言など、多大なるご協力を賜った。また、調査にあたり減免申請や調査中の宿泊など、美祢市観光政策課の職員の方々とほっとビレッジ美東の中屋弘幸氏には大変お世話になった。以上の方々に記して感謝の意を表す。

6. 引用

- 1) Jo De Waele, Francisco Gutiérrez, Mario Parise, Lukas Plan. (2011): Geomorphology and natural hazards in karst areas: A review, *Geomorphology*, **134**, 1-8.
- 2) 議会だより編集委員会 (2021) : みね議会だより,美祿市議会,**40**, 5.
- 3) 太田正道, 杉村昭弘, 配川武彦 (1980) : 秋吉石灰岩層群と地質構造, 河野通弘編, 秋吉台の鍾乳洞-石灰洞の科学-, 帰水会, 9-24.
- 4) 乾智美, 辻智大 (2023) : 石灰岩洞窟における割れ目と崩壊の関係性, 日本地質学会西日本支部第 173 例回講演要旨, 23.
- 5) 村上崇史, 浦田健作, 戸澤茉莉花, 村瀬健志 (2015) : 国指定天然記念物「大正洞」と「犬ヶ森の穴」の連結,および新たに発見された空間について,*洞窟学雑誌*,**40**, 1-14.

山口県に分布する岩石の単位体積重量

○原中浩二¹⁾*

1) 山口建設コンサルタント

* E-mail: haranaka@yamacon.co.jp

Unit weight of rocks distributed in Yamaguchi Prefecture

Koji Haranaka¹⁾*

1) Yamaguchi Construction Consultant

* E-mail: haranaka@yamacon.co.jp

キーワード：山口県，岩石，単位体積重量，岩種，岩盤分類

Keywords: Yamaguchi Prefecture, Rocks, Unit Weight, Rock Type, Rock Classification

1. はじめに

山口県には多様でさまざまな岩石が分布している。土木地質において、岩盤の単位体積重量は設計に必要な地盤定数の一つであるが、通常は文献からの一般値が採用されている。ここでは、山口県において岩盤ボーリング等で採取された岩石について単位体積重量を測定し、N 値や岩級区分に応じて整理した事例について報告する。

2. 手法

土木地質においては、岩盤に応じて地盤定数として単位体積重量を設定し、各種設計においてその値が利用されている。単位体積重量は岩石の密度試験から求めることが本来の手法であるが、通常の業務において岩石試験は実施せず、一般的な値¹⁾を岩種にかかわらず、N 値や硬軟等から地質技術者の主観によって設定されていることが多い。しかし、岩盤は岩種や硬軟、割れ目や風化の状態によっても大きく異なっている。ただし、細分化すると煩雑となり、モデル化においても非常に複雑となる。このことから、今回は岩種と岩級区分、N 値で区分したうえで、ボーリングで採取されたコアを寸法測定法や浮力法等で単位体積重量を求めることとした。

3. 結果と考察

岩種については、火成岩、堆積岩、変成岩に応じて分類し、岩級区分は DL, DM, DH, CL, CM, CH で区分した。岩級区分については、各種文献の岩級区分表^{2) 3)}を参考にしている。N 値 ≤ 300 で採取されたコアにおいて、N 値と単位体積重量の関係を図 1 に整理を行った。

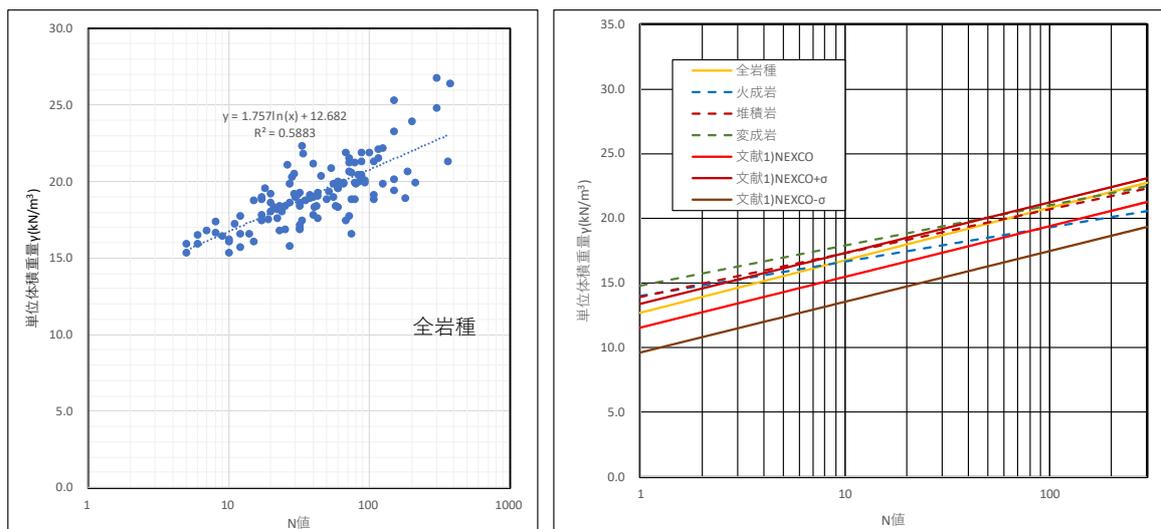


図1 各岩種における N 値と単位体積重量の関係(左:全岩種, 右:各岩種と文献値¹⁾)

また、N 値データが得られていない岩盤も含めて、岩級区分と単位体積重量の関係について、表1に整理を行った。

表1 各岩種における岩級区分と単位体積重量の関係

岩種	単位体積重量 γ (kN/m ³)					
	DL	DM	DH	CL	CM	CH
全岩種	18.1	19.4	20.8	24.8	25.7	26.7
火成岩	17.1	18.8	20.0	23.3	25.1	27.3
堆積岩	18.6	19.8	21.1	25.5	25.8	26.0
変成岩	18.7	19.6	21.2	25.7	26.1	-

4. 結論

土木設計において採用されている単位体積重量は、一般的に用いられている文献の値よりも、山口県に分布する岩石は全体的に高い傾向にある。データが蓄積することで精度が向上するため、今後もデータを取得して、わかりやすい岩石と単位体積重量の関係について、整理を進めたいと考えている。

引用文献

- 1) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社編(2016): 設計要領第二集, 橋梁建設編, 4-7p.
- 2) 山口県土木建築部砂防課編(2020): 山口県急傾斜地崩壊防止工事マニュアル(案), 6-18p.
- 3) 日本応用地質学会(1983): 岩盤分類, 応用地質特別号

堆積岩露頭で発生した落石のメカニズム及び 地質調査結果に関する考察

○田河翔大^{1)*}・石本裕己¹⁾

1) 宇部建設コンサルタント

* E-mail: s-tagawa@ukcnet.co.jp

Study on rockfall mechanism generated in sedimentary rock outcrops and Geological Survey Results

Shota Tagawa^{1)*}, Hiromi Ishimoto¹⁾

1) Ube Kensetsu Consultant

* E-mail: s-tagawa@ukcnet.co.jp

キーワード：堆積岩露頭、落石メカニズム、空中写真判読、ボーリング

Keywords: Sedimentary rock outcrops, Rockfall mechanism, Aerial photography deciphering, Boring

1. はじめに

令和4年8月に県道斜面上部に位置する堆積岩露頭より落石が発生し、斜面を転落した後、落石防護柵を破壊し県道上に落下した。幸い人的被害はなかったが、堆積岩露頭は延長約52m、高さ約15mと広範囲に分布しており、将来的に同規模の落石が発生することが懸念された。

平成28年5月に島根県の県道で落石事故が発生した。走行中の軽自動車に落石が直撃し、2名が死傷している。このことから落石災害防止は、国の重要課題であるといえる。

本発表では、落石発生メカニズム及び当該斜面の地質状況について、主に空中写真判読、地表踏査およびボーリング結果に基づいて考察する。

2. 地形地質概要

2.1 地形概要

当該地の周囲には概ね100~200mの山地が分布しており、小起伏~大起伏丘陵地に分類される。県道を挟んだ東側にはダム湖が形成されている。1975年2月に撮影された空中写真¹⁾を図1に示す。空中写真によると当該地の直上流ではダムの導水トンネル工事が行われている様子を読み取れる。また、当該地は大規模な伐採が行われており、この時期を含めて、人工改変が行われた可能性が示唆される。

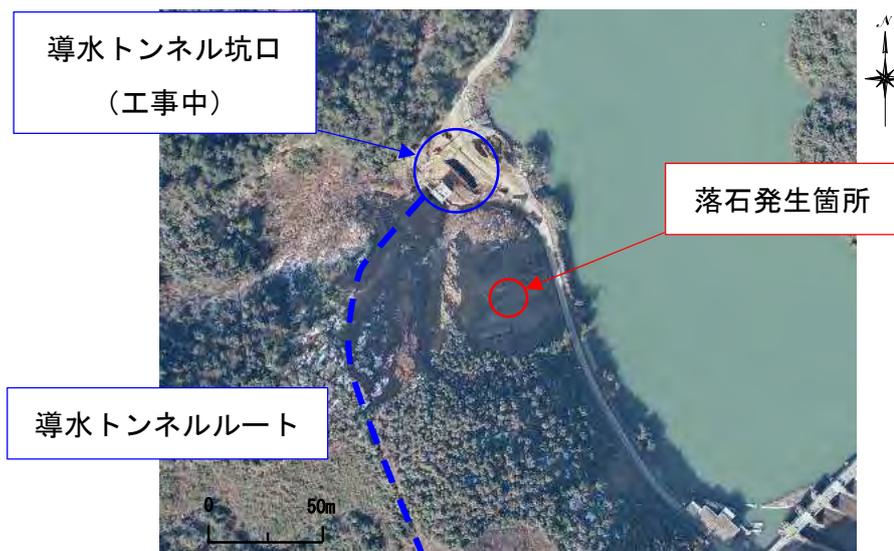


図1 過去の空中写真 (1975年2月撮影)

2.2 地質概要

山口県地質図²⁾によると、当該地の地質は、中生代トリアス紀の美祢層群であり、泥岩、砂岩、礫岩の堆積岩及び石炭からなる。なお、地表踏査及びボーリングで確認された基盤岩は、砂岩を主体（一部泥岩を含む）とするものであった。

3. 調査結果

3.1 地表踏査結果

道路上に落下した落石の規模は $1.4\text{m} \times 1.2\text{m} \times 1.0\text{m}$ 程度である (図2-左)。斜面上部にある堆積岩露頭に確認された落石跡は、高さ $4.0\text{m} \times$ 幅 $2.0\text{m} \times$ 奥行 1.0m 程度である (図2-右)。落石跡は2方向の弱層部と背面の高角度亀裂の3方向に囲まれており、植物根の発達を確認された。露頭の下側斜面には、露頭から供給された人頭大～拳大の礫が扇状地状に堆積している。露頭にはクサビを形成する2方向の亀裂が全体的に発達している。



図2 県道上の落石 (左) と露頭の落石跡 (右)

3.2 ボーリング結果

斜面に堆積している礫の層厚及び基盤岩の性状を把握することを目的とし、落石発生箇所
の斜面上側と斜面下側においてボーリングを実施した。ボーリング位置図を図3に示す。

なお、平成28年に実施された既存ボーリングの位置も併記する。

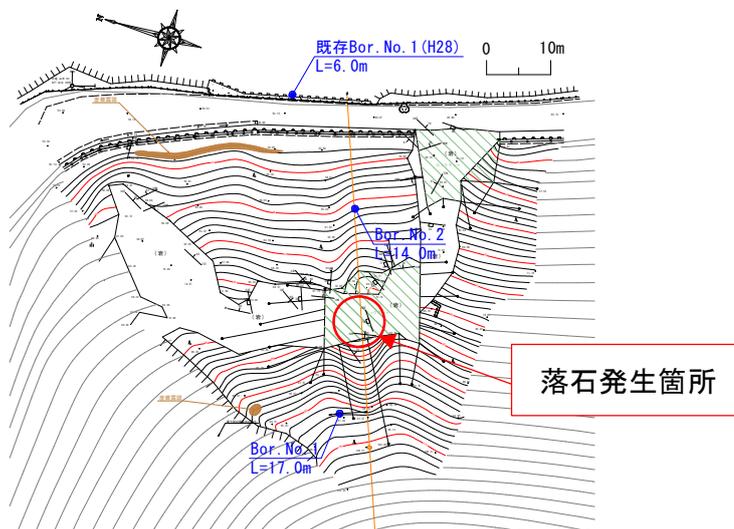


図3 ボーリング位置図

ボーリングの結果、Bor.No.1において地表から3m程度、Bor.No.2において地表から11m
程度の深さまで崖錐層を確認した(図4)。落石発生箇所を境に上側と下側の崖錐層の性状
は異なっており、前者は砂質土を主体とするのに対し、後者はφ2mm~80mm程度の硬質礫
を主体とすることから、露頭からの落石により構成されていると想定される。基質は中砂~
粗粒砂を主体とするが、ボーリングコアでは空洞(5cm)が認められたことから、礫のみで
構成されている箇所があると想定される。平均N値は8であり、緩い状態で堆積している。



図4 Bor.No.1 (左) 及び Bor.No.2 (右) のコア写真

4. 考察

4.1 落石メカニズム

地表踏査結果に基づき、落石発生メカニズムについて考察した。まず、地形的素因として、急勾配（傾斜角 40° 程度）で斜面高 18m 程度の不安定な露頭斜面であることが挙げられる。地質的素因としてはクサビを形成する層理面及び亀裂の発達である。さらに、亀裂沿いに侵入した植物根の成長や風による揺さぶり効果、重力による亀裂の沿いの緩みの進行、雨水侵入に伴う亀裂面の風化進行や介在物の流出による強度低下等が誘因となったと考えられる。

以上のことから考察した落石発生メカニズムを以下に示す。

- ①クサビを形成する方向の亀裂が発達
- ②亀裂への植物根の侵入・成長によるクサビ効果、風の影響による植物根の揺さぶり効果、重力による緩み、雨水の影響等の様々な要因により亀裂沿いの緩みが進行
- ③亀裂面の緩みや強度低下により落石が発生
- ④斜面を転落する過程で亀裂に沿って分解が進むが、亀裂の少ない岩塊が道路上に落下

4.2 地質想定断面図

ボーリング結果に基づき作成した地質想定断面図（主側線）を図 5 に示す。Bor.No.2 で確認された崖錐層（B_A）は地中深くまで分布している。周辺の露頭状況及び平成 28 年に実施された既存ボーリング結果を鑑みても、不自然なほど厚く堆積している。これについては、空中写真判読で判明した当該地の人工改変が関わっていると推察する。

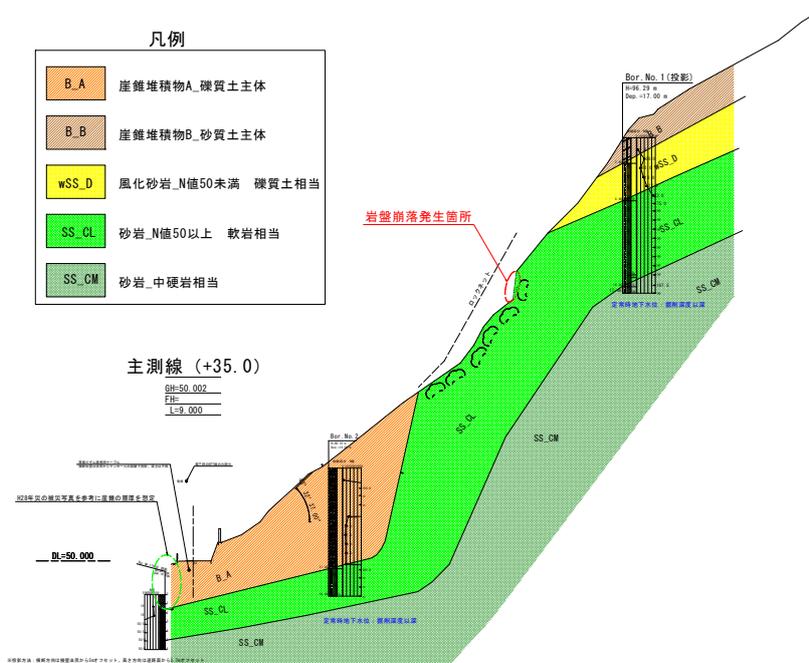


図 5 地質想定断面図（主側線）

5. まとめ

落石のパターンには転石型（抜落ち型）と浮石型（はく離型）があり、今回の落石は浮石型に分類される。落石パターンによって落石対策工の適用性が変わってくるため、地表踏査を行い、落石メカニズムを考察することで、それぞれの斜面に適用した落石対策工を選定することができる。

地質想定断面図についてはボーリング結果のみに頼るのではなく、過去の空中写真を判読することや既存資料を紐解くことにより、土地利用の変遷や人工改変の可能性を把握し作成することが重要である。

引用文献

- 1) 国土地理院 地図・空中写真閲覧サービスに加筆：整理番号(CCG7412)、撮影年月日(1975年2月26日)
- 2) 山口県地学会 (2012) : 山口県地質図第3版 (15万分の1) 説明書

トンネル工事の岩盤判定における AI の活用事例

○重谷隆太^{1)*}・鬼村雅和²⁾・荒木光一³⁾

1) 国土交通省, 2) UIC コンサルタント(株), 3) 五大開発(株)

* E-mail: shigetani-r87jb@mlit.go.jp

Application of AI in Tunnel Face Determination for Tunnel Construction.

Kouta Shigetani^{1)*}, Masakazu Onimura²⁾, Koichi Araki³⁾

1) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2) UIC Consultant Co., Ltd.,

3) GODAI KAIHATSU Co., Ltd.

* E-mail: shigetani-r87jb@mlit.go.jp

キーワード：山岳トンネル, AI, 岩盤判定, 遠隔臨場

Keywords: Mountain Tunnel, AI, Tunnel Face Judgment, Remote Presence

1. はじめに

山岳トンネル工事では、トンネル掘削時に切羽の地質状況を評価するために切羽観察を実施している。この切羽観察は、切羽近傍で技術者が目視でチェックする事が中心であり、その精度、定量化や安全性が観察時の課題となっている。近年は建設 DX の推進や安全性を解決するために、遠隔臨場で切羽観察を実施する取り組みが行われている。しかし、遠隔臨場で行う場合、ディスプレイに映る画像で岩盤を判定するため、現地で直接岩盤を確認するより情報量が減り、誤認識等から誤った判定をしてしまい、過大・過小施工が生じてしまう可能性がある。

そこで、本稿では遠隔臨場により低下した判定者に対する情報量を補完するために、切羽写真と切羽観察データシートを用いた岩盤判定 AI 技術の有効性を検証する。

2. 教師データの作成

2.1 教師データ作成の概要

今回の学習ならびに判定で用いられる画像は、施工業者から日々提出される切羽記録写真を用いた。画像の取得方法は以下の通りである。¹⁾

- ① 図1のように切羽記録写真を左肩・中央・右肩に分割する。
- ② ①に得られた各画像に対して、実際に学習・判定に利用するサイズに分割し、教師データとする。
- ③ 教師データを増やすために、図2のように範囲をずらしながら画像を取得していく。



図1 左肩・中央・右肩への分割

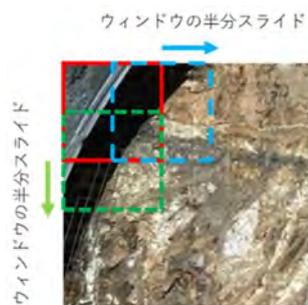


図2 教師データの取得方法

3. 岩盤判定に用いるプログラムの作成

岩盤判定は、切羽を構成する岩石名と 8 つの観察項目を判定するため、それぞれの項目に対して個別の AI で判定した。したがって、岩盤判定 AI として、9 つの AI を作成した。

なお、今回の AI は学習した事のない未知の情報に対しては『判定不能』とし、判定を地質技術者へ促す結果を出すようにプログラムを構築した。

4. AI による岩盤判定検証

岩盤判定 AI による検証は、実際の施工現場である『俵山第 1 トンネル工事』の第 2 回岩盤判定、第 3 回岩盤判定と第 4 回岩盤判定で実施した。

3 回実施した岩盤判定において、岩盤判定 AI の荷重平均点は、技術者の荷重平均点と類似する点数となった。

5. まとめ

今回実施した 3 度の検証結果は、概ね現地で直接切羽を観察している技術者の荷重平均点とほぼ一致し、遠隔臨場で判定を行う技術者への情報を補完できるものであると判断した。

しかしながら、次に挙げる問題点が明らかとなったため、今後の検討課題とする。

- ・教師データが施工業者の判定を基に作成されているため、判定が施工業者寄りになる。
- ・圧縮強度については、画像判定では限度がある。

6. 謝辞

本検証を行うにあたり、施工者である佐藤工業(株)より、データの提供と様々な協力を賜った。ここに深謝致します。

引用文献

- 1) 荒木光一, 藤田達大, 鬼村雅和, 山縣宏紀, 2022 年 7 月「深層学習によるボーリングコア画像からの岩種区分判定の基礎検討」第 57 回地盤工学研究発表

関門層群から採取された断層岩のコア試料の分析結果

○吉原和彦^{1)*}・津田秀典¹⁾・木山拓海¹⁾・清崎 恵¹⁾ 金折裕司¹⁾・西村祐二郎²⁾

1) トキワコンサルタント (株) 2) 山口大学名誉教授

* E-mail: yoshihara@tokiwack.co.jp

Analysis of boring core samples of fault rocks collected in the Kanmon Group

Kazuhiko Yoshihara^{1)*}, Hidenori Tsuda¹⁾, Takumi Kiyama¹⁾, Megumi Kiyosaki¹⁾,
Yuji Kanaori¹⁾, Yujiro Nishimura

1) Tokiwa Consultant Co., Ltd. 2) Emeritus Professor of Yamaguchi University

* E-mail: ttk@tokiwack.co.jp

キーワード：関門層群，ボーリングコア，断層岩，熱水変質，スレーキング試験

Keywords: Kanmon group, Boring core, Fault rocks, hydrothermal alteration, Slaking test

1. はじめに

山口県下関市豊田湖周辺で県道の道路改良が計画されている。この道路事業の一環で実施されたボーリング調査で、断層岩のコア試料が採取された。この断層岩が道路計画に及ぼす影響を把握する目的で、コア試料の肉眼観察、顕微鏡観察、X線回折、スレーキング試験を実施した。本稿では、これらの結果を整理して報告する。図1に調査範囲と調査地点を示す。



図1 調査範囲 (a)と調査地点およびリニアメントの分布 (b)

(a) 国土地理院地理院地図 (GSI Maps を利用) に調査範囲を加筆

(b) 豊田湖周辺の地形基図 (国土地理院地図 3D 機能使用) にリニアメントと調査地点加筆

2. 地形地質概要

2.1 地形概要

調査地は山口県中央西部，下関市街地から北西方向に約 35 kmの位置している．断層岩のコア試料が採取された場所は，豊田湖の西の小さな山稜尾根の頂部にあたる．調査地周辺の地形は標高 200～600mの中起伏山稜が連なっており，北側では急傾斜な山地，南側では緩傾斜な山地が広がっている（図 1 b）．リニアメントの方向は，主に北東-南西方向のものが多く抽出され，山口県内の主要な活断層方向と同じ方向である¹⁾．また，調査地の東側には活断層確実度 I および II の渋木断層が存在する²⁾．

2.2 地質概要

調査地域に分布する地質は，中生代白亜紀の関門層群下関亜層群下部層（堆積岩優勢層）の泥岩・砂岩・礫岩・凝灰質砂岩・赤色泥岩である．現地踏査では，道路沿いに弱風化した岩盤露頭が確認された．

3. 断層岩のコア試料

ボーリングで採取された断層岩のコア写真を図 3 に示す．深度 0.0～8.9mの黄褐色および赤褐色部分は，強風化礫岩である．深度 8.9～16.0mの灰色部分が熱水変質を受けた断層帯である．断層帯の灰色部分を肉眼観察によって土質区分を行った．深度の浅いほうから固結粘土質砂礫，弱破碎部，固結粘土質砂，原岩，中石に分類される．コアの肉眼観察，断層帯を構成する断層コアとダメージゾーンの概念図（図 4），および断層岩の分類表（表 1）などを参考にして断層岩の分類を行った⁶⁾．

表 1 断層岩の分類表 Higgins (1971)⁴⁾と Scholz (2002)⁵⁾を一部改編

		未結合	結 合 性		
岩片の割合			ランダムな組織	葉状構造	鉱物の著しい成長
			シュードタキライト		
	50%	断層角礫	マイクロプレッシャー	プロトマイロナイト	マイロナイト質片麻岩
	30%	断層ガウジ	カタクレーサイト	マイロナイト	ファイロナイト
10%	ウルトラマイロナイト			プラストマイロナイト	



図3. 採取された断層岩のボーリングコア写真 (灰色部分)
写真に加筆した①~③の数字は図4と対応している。

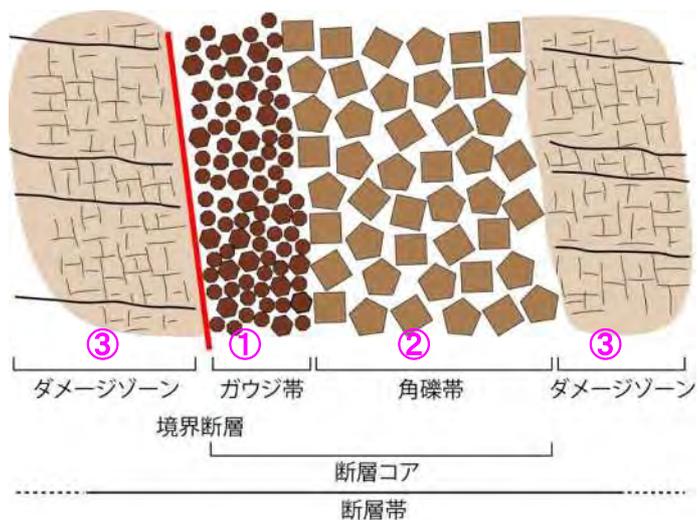


図4 断層帯を構成する断層コアとダメージゾーンの概念図
Billi (2005)³⁾を一部改変

4. 偏光顕微鏡観察

7個の断層岩コア試料を樹脂で固めて薄片を作成した。図5と図6にガウジ帯と角礫帯の偏光顕微鏡写真（それぞれ、左の写真がオープンニコルで、右の写真がクロスニコル）を示す。全体的に破碎と変質が進んでおり、一部変質した角閃石の大きな斑晶が認められる。これらの斑晶は割れているか、もしくは砕けている。割れ目を充填する鉱物は、X線回折結果からイライトまたは緑泥石と判定される。

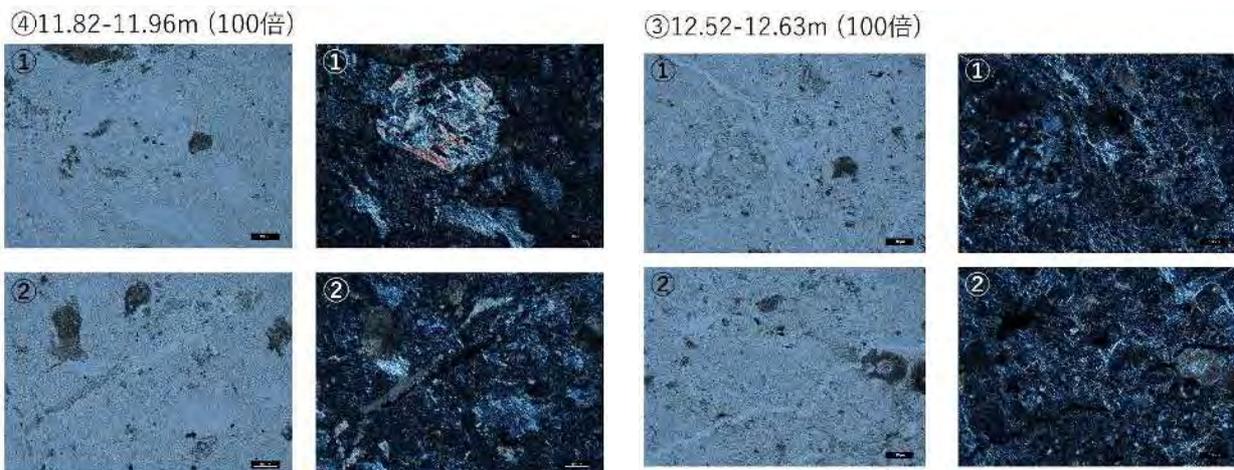


図5. 偏光顕微鏡写真（ガウジ帯）

図6. 偏光顕微鏡写真（角礫帯）

5. X線回折測定

断層岩コア試料を構成する鉱物を同定する目的で、X線回折測定を実施した。図7にX線回折測定結果を示す。

測定結果では、すべての試料でイライトの含有量が多いことがわかった。イライトと緑泥石は粘土サイズの雲母鉱物であり、粘土質の堆積岩や低変成度の変成岩にも含まれている。

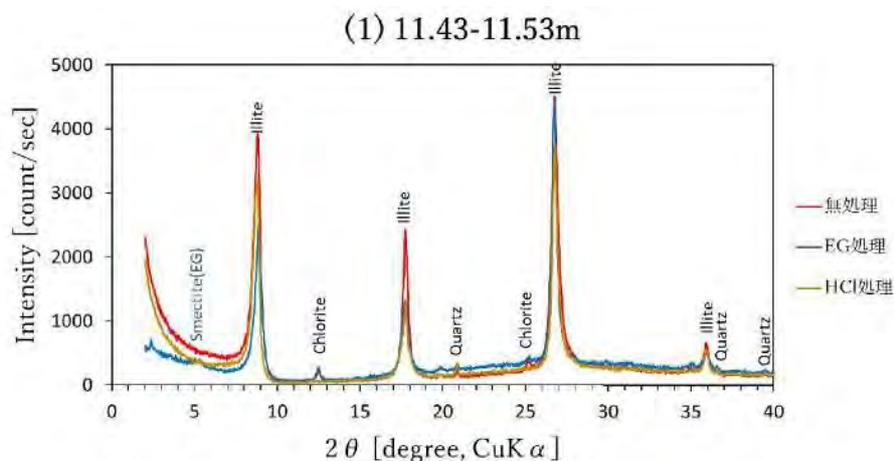


図7. X線回折測定結果図（ガウジ帯）

6. 岩石のスレーキング試験

スレーキング試験とは、乾燥・水浸によって供試体に生じる細粒化などの形状の変化をみるための試験である。断層岩コア試料を用いて、スレーキング特性について調べた。試験結果より、ほとんどの試料でスレーキングし易いことが分かった。

7. 考察：熱水変質と破碎作用

歌田・澤田⁷⁾によると、当地域を含めた広域の熱水変質帯にはイライトが多く生成されている。また、熱水変質帯は細い帯状に分布していることも示されている。断層活動によって生じた岩盤中の割れ目に沿って熱水変質作用を受けて、イライト生成やスレーキングし易い脆弱帯及び脆弱部が形成されるものと考えられる。

8. まとめ

断層岩コアの肉眼観察によって、①ガウジ帯、②角礫帯、③ダメージゾーンが明瞭に区分できたが、顕微鏡観察では明瞭には区別されなかった。X線回折測定では、ガウジ帯や角礫帯になるほどイライトの含有量が多い傾向であった。一方、ダメージゾーンでは、イライト以外の鉱物も複数確認された。岩石のスレーキング試験では、断層岩のコア試料ではいずれも浸水直後に細片化が始まることが分かった。

謝辞 断層岩試料の薄片作成、顕微鏡写真撮影、およびX線回折測定は(株)セレスにお願いした。断層岩の薄片作成に関しては、(一財)電力中央研究所相山光太郎主任研究員と(株)セレス飯田高弘氏に助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 西村祐二郎・今岡照喜・金折裕司・亀谷 敦 (2012) : 山口県地質図 第3版(15万分の1) および同説明書, 山口地学会, 167p.
- 2) 活断層研究会編 (1991) : 新編日本の活断層—分布図と資料—, 東京大学出版会, 437p.
- 3) Billi,A. (2005): Grain size distribution and thickness of breccia and gouge zones from thin(<1 m) strike-slip fault cores in limestone, Jour. Struct. Geol., 27, 1823-1837.
- 4) Higgins,M.W. (1971): Cataclastic rocks, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 687, 97p.
- 5) Scholz,C.H. (2002): The Mechanics of Earthquakes and Faulting: Second edition. Cambridge University Press, 471p.
- 6) 金折裕司 (2016) : 断層雑感, 地質工學, 14, 1-11.
- 7) 歌田 実・澤田臣啓 (2005) : 西日本、関門層群 (白亜紀前期) の変質作用. 地質学雑誌、111, 206—216.

令和 6 年能登半島地震で発生した 斜面災害の地形的特徴と現地調査結果

○瀧本真理^{1)*}・太田岳洋¹⁾

1) 山口大学

* E-mail: e044vcv@yamaguchi-u.ac.jp

Topographic Features and Field Survey Results of the Landslides Caused by the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Mari Takimoto^{1)*}, Takehiro Ohta¹⁾

1) Yamaguchi University

* E-mail: e044vcv@yamaguchi-u.ac.jp

キーワード：令和 6 年能登半島地震, 斜面崩壊

Keywords: The 2024 Noto Peninsula Earthquake, Landslide

1. はじめに

令和 6 年 1 月 1 日 16 時 10 分に石川県能登地方の深さ 15 km でマグニチュード 7.6 の地震が発生した。この地震により、石川県輪島市や志賀町で深度 7 を観測したほか、能登地方の広い範囲で深度 6 弱や 6 強の揺れを観測し、甚大な被害が発生した。地震の発生機構は北西-南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型であり、地殻内で発生した地震である¹⁾。この地震により多くの斜面崩壊が発生した。国土地理院の判読した斜面崩壊・堆積分布のポリゴンデータによると、能登半島全域において 2345 箇所の斜面崩壊が確認された。能登半島北東部にあたる輪島東~珠洲地区においては 1213 箇所の斜面崩壊が確認され、特に集中的に崩壊が発生した²⁾。斜面崩壊は中新世のデイサイト・流紋岩の溶岩・火砕岩（宝立山層・栗蔵層）の分布域において最も多く発生し、漸新世～中新世の安山岩・玄武岩質安山岩の溶岩・火砕岩（高洲山層）や非海成の砂岩もしくは砂岩・泥岩（縄文層）の分布域においても崩壊が多発した³⁾。本報告では、中新世の流紋岩火砕岩である栗蔵層が分布する石川県珠洲市若山町北山及び珠洲市真浦町逢坂トンネルにおける大規模な斜面崩壊について地形的特徴及び現地調査の結果を報告する。

2. 手法

空中写真判読から、地震による崩壊地の滑落崖の判読を行った。能登半島東部の地域では、令和 6 年能登半島地震の発災前の 1 m メッシュ DEM データが朝日航洋株式会社によって公開されている⁴⁾。本データに基づき、珠洲市若山町北山及び珠洲市真浦町逢坂トンネル周辺における発災前の地形判読を行った。また、2 箇所の崩壊地及び周辺の現地調査を行った。

3. 結果・考察

珠洲市若山町北山の崩壊地は最大幅約 500 m に及び、能登半島全域における最大規模の崩壊である。発災前の DEM データより、本崩壊は明瞭な滑落崖と地すべり移動体の形成域において発生した。隣接する 2 箇所地すべり地形の移動体を跨ぐように崩壊が発生し、滑落崖は尾根部を超える。東部の滑落崖及び崩積土中の転石は基本的にシルト岩が分布する。崩壊深度はおよそ 30 m と推定され、東部の滑落崖は流れ盤を呈するシルト岩の層理面と、層理面に対して高角度に発達するクラックに規制された平滑な面が確認された。崩積土中のシルト岩の多くは細かくブロック状に破碎され、崩積土の末端では層理面にスリッケンラインを有する約 2 m の転石が確認された。北山の崩壊は、流れ盤を呈する層理面と節理面に支配された崩壊である可能性が高い。

珠洲市真浦町逢坂トンネルの崩壊地は最大幅約 150 m に及ぶ。本崩壊は明瞭な滑落崖と地すべり移動体の形成する斜面において発生した。地震によって堆積した崩積土が逢坂トンネルの坑口を覆う。崩壊深度は 15 m 以上と推察される。滑落崖の南東部では火山灰の薄層を挟在する火山礫凝灰岩が分布し、受け盤を呈する。火山礫凝灰岩の層では、層理面と層理面に対して垂直に発達したクラックに沿って岩盤が分離し、後方回転する様子が確認された。滑落崖の北西部では凝灰角礫岩が分布し、クラックに沿って剥離した岩盤が滑落崖に留まる。逢坂トンネルの崩壊は、南東部において層理面とクラックに沿って剥離した岩盤が後方回転したこと、北西部においてクラックに沿って岩盤が剥離したことで発生した可能性が高い。

4. 引用

- 1) 地震調査研究本部 地震調査委員会 (2024) : 令和 6 年能登半島地震の評価
https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2024/20240101_noto_3.pdf
- 2) 国土地理院ウェブサイト : 斜面崩壊・堆積分布データ
https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101_noto_earthquake.html#6-1
- 3) 産総研 : 第八報 2024 年能登半島地震に伴う斜面崩壊の崩壊箇所と地形・地質との関係 (予察) <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/ното2024/ното2024-08.html>
- 4) G 空間情報センター: 令和 6 年能登半島地震 (能登東部発災前 DEM) 【朝日航洋株式会社】 <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/aac-disaster-20240101-dem>

2024 年能登半島地震による地盤の変形に関する広域地質調査（速報）

○辻智大^{1)*}・山田佑哉¹⁾

1) 山口大学

* E-mail: t-tsuji@yamaguchi-u.ac.jp

Preliminary report on the geologic survey for the ground deformation associated with 2024 Noto Peninsula Earthquake

Tomohiro Tsuji^{1)*}, Yuya Yamada¹⁾

1) Yamaguchi University

* E-mail: t-tsuji@yamaguchi-u.ac.jp

キーワード：令和 6 年能登半島地震，地表変状，地質調査

Keywords: 2024 Noto Peninsula Earthquake, Surface Deformation, Geologic Survey

1. はじめに

2024 年 1 月 1 日 16:10 頃に発生した令和 6 年能登半島（Mw7.5，最大震度 7）では，輪島市西部で最大約 4 m の隆起，最大約 2 m の西向きの変動，珠洲市北部で最大約 2 m の隆起，最大約 3 m の西向きの変動が認められた（国土地理院 2024）¹⁾。これに伴い，陸域では 2024 年能登半島地震の地震断層の可能性のある地表変状が報告された（国際航業株式会社 2024，白濱ほか 2024，鈴木・渡辺 2024，吉田，2024）²⁻⁵⁾。筆者らは 2024 年 5 月 1 日から 5 日にかけて，能登半島東部の珠洲市若山町，折戸町，真浦町，能登半島西部の輪島市長井町～縄又町，志賀町富来，酒見地域において現地地質調査を行ったので，地表変状に関する結果を報告する。

2. 手法

2.1 地形調査および地質調査

SAR による解析^{1,6)}，レーザー測量による解析結果²⁾および発震後の空中写真⁷⁾の判読を行い，SAR 干渉縞の不連続，地殻変動の不均質，線状の地表変状を抽出し，令和 6 年 5 月 1 日～5 日の 5 日間で現地地質調査を実施した。地表変状のずれに関して，水田，畦道，車道，ブロック塀などを指標として，2 m ポール，折れ尺，クリノメーターを用いて簡易的な測量を行った。

3. 能登半島各地の地表変状

3.1 珠洲市若山町

珠洲市若山町において全長約 4 km, 幅 100~200 m, 最大上下変位約 2.2 m の隆起帯が報告された⁵⁾。筆者らは特に最も大きな落差が認められた珠洲市若山町中を調査し, その結果, 南流する河川の西側(白濱ほか³⁾の C 地点)にて, 走向 N57°E, 190 cm の南側隆起, 90 cm の左横ずれが計測された。本断層に開口割れ目は発生しておらず, 隆起側の北端部が北側に崩落していること, 隆起側(南側)に南下がりの撓曲が発達することから, 本断層は逆断層と推察される。断層の南側に発達する撓曲は 165~185 cm 南側低下, 右横ずれ(変位量未計測)を示す。これは北側の断層によるずれをほぼ解消するものであり, 吉見・丸山⁸⁾による調査結果と調和的である。

3.2 珠洲市折戸町

発震後の空中写真⁷⁾では, 珠洲市折戸町灰庭の北東-南西方向の尾根部付近の畑にて全長約 1.2 km にわたり, 断続的に分布する多数の線状の地表変状が判読された。これらの地表変状の一部は, 吉田⁹⁾による空中写真判読結果と一致すると考えられる。現地調査の結果, 畑の変状の多くは耕作により消失していたが, 畔, 道路およびその周辺にてその一部が確認され, 連続的な線状の地表変状として 150 m 程度追跡された(図 1b)。この線状の地表変状上(O1 地点)にて走向 N74°E, 40 cm の南側隆起, 20 cm の右横ずれが計測された。これは谷側(南側)が隆起する成分で, 逆向きの低崖をなしている。ここより約 100 m 西では開口成分を伴う 3 本の線状の地表変状(合計で 44 cm 南側隆起)が認められた。

この線状の地表変状から約 450 m 北の珠洲市折戸町灰庭の尾根付近の畑においても, 発震後の空中写真⁷⁾により東北東-西南西方向の線状の地表変状が大きく 2 条判読された。西部のものは全長約 250 m, 東部のものは全長約 200 m である。その間には急峻な地形のため変状の認められない区間が 430 m 存在するものの, 両者は大局的には同一の直線上に分布しており, 連続する可能性がある。両者を総合すると全長約 900 m である。これらの一部は吉田⁹⁾の判読結果と一致すると考えられる。現地では, 耕作されて消失した畑を除き, 西端から東端まで走向 N40~60°E, 10~50 cm の北側隆起の地表変状が確認された。西端部(O2 地点)では走向 N57°E, 50 cm の北側隆起, 50 cm の右横ずれが計測された。畑の西側の北流する谷にて北側隆起により小規模な湿地が出現していた。畑と谷中の湿地との比高および位置関係に基づき, 約 70°S 傾斜が計測された。

3.3 珠洲市真浦町

調査地域は珠洲市真浦町漁港に注ぐ西流の谷である。本地域は SAR による解析¹⁾により大きな隆起と西進が見られた地域の南縁にあたる。現地調査の結果, 谷の左岸側に約 300 m に

わたり断続的に線状の地表変状が認められた(図 1c). 港湾付近(M1 地点)では走向 N70°E, 15 cm の左横ずれ, 30 cm の北側低下, 約 60 m 東(M2 地点)では走向 N72°E, 40 cm の左横ずれ, 20 cm の北側低下, 約 300 m 東(M3 地点)では走向 N38°E, 60 cm の左横ずれ, 50 cm の北側低下が計測された. これらは SAR による解析結果と調和的である. また, これらの変状の一部は吉田⁹⁾の判読結果と一致すると考えられる.

3.4 輪島市長井町～縄又町

航空レーザー計測の解析結果²⁾によると, 輪島市長井町から門前町中屋にかけて北東方向に複数の線状の隆起が認められる. 現地調査の結果, 輪島市長井町の水田および道路に2つの背斜構造が認められた(図 1d). 北西側のもの(N1 地点)は N43°E, 南東側のもの(N2 地点)は N37°E の方向に隆起軸を有し, 両者は並走していた. いずれも隆起量は 20 cm 程度であった. 北側のものは半波長約 15 m と計測された. また, 輪島市縄又町の国道 249 号線および水田(N3 地点)において走向 N52°E 程度, 約 20 cm 北西側隆起の撓曲が認められた. これらは航空レーザー計測の解析結果と調和的である.

3.5 志賀町富来

SAR 干渉画像¹⁾によると, 北東-南西走向の志賀町富来川南岸断層沿いに干渉縞の不連続が認められる. 現地では, 鈴木・渡辺⁴⁾が南東側隆起と左横ずれを伴う地表地震断層と報告した A 地点を調査した. 吉見・丸山⁶⁾は本地点にて液状化による地盤沈下や側方流動が生じたとしている. 調査の結果, 耕作された畑に開口割れ目は消失していたが, 鈴木・渡辺⁴⁾が地表地震断層とする位置に, 南東側が相対的に隆起する地表変状が確認された(図 1e). この地表変状の見られる住宅の北側(T1 地点)にて, 土砂の移動による地盤の空洞化および地盤沈下が認められた. また, 前述の畑に隣接する電柱(T2 地点)の南東側のアスファルトに圧縮性隆起, 北西側に開口割れ目が認められた. これは, 電柱に対して地盤が北西に移動したことを示唆する. この地盤の移動の下流側にはマンホールの浮き出し(T3 地点), 擁壁と柵のはらみ出しおよびその西側の側溝の圧縮性隆起(T4 地点)が認められた. これらの結果は地盤沈下や側方流動が生じたとする吉見・丸山⁶⁾による調査結果と調和的である.

3.6 志賀町酒見

SAR 干渉画像¹⁾によると, 北北東-南南西走向の酒見断層沿いに干渉縞の不連続が認められる. 現地調査では酒見地域において酒見断層を横切る道, 断層に沿う道および水田を踏査したが, 道路の割れや地盤の僅かな撓みは観察されたものの, 線状の地表変状は視認されなかった.

4. 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。現地調査に際して、宿泊したゲストハウスきちにお世話になり、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。

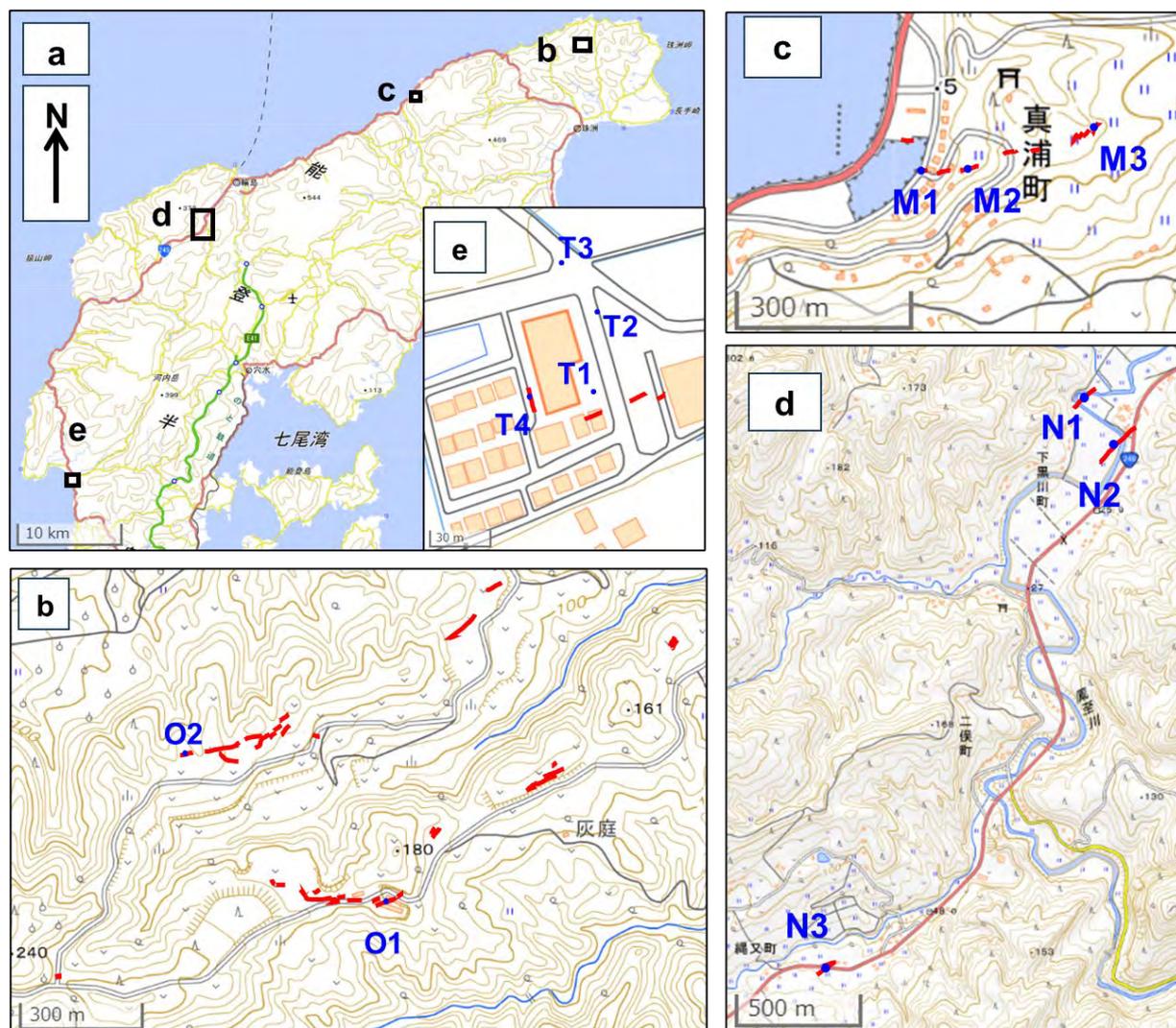


図1 能登半島現地調査において地表変状を確認した地点。空中写真判読および現地調査にて線状の地表変状と判断されたものを赤線で示す。ただし、アスファルトや人工物にのみ認められる割れ目、地すべりおよび崩壊に伴われるものと判断されるものは除外した。観察地点のうち本文で説明しているものを青丸で示した。(a) 能登半島全体地図。(b) 珠洲市折戸町地域。(c) 珠洲市真浦町地域。(d) 輪島市長井町～縄又町地域。(e) 志賀町富来地域。

引用文献

- 1) 国土地理院 (2024a): 「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, https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto_insar.html (2024 年 4 月 9 日閲覧)
- 2) 国際航業株式会社 (2024): 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 年 4 月 9 日閲覧)
- 3) 白濱吉起, 石山達也, 立石 良, 安江健一 (2024): 令和 6 年能登半島 (M7.6) に伴い若山川沿いに生じた地表地震断層【速報】, <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/news/20465/> (2024 年 2 月 12 日閲覧)
- 4) 鈴木康弘, 渡辺満久 (2024): 富来川南岸断層に沿う地震断層の発見, http://disaster.ajg.or.jp/files/202401_Noto011.pdf (2024 年 4 月 9 日閲覧)
- 5) 吉田一希 (2024): 石川県珠洲市若山町に出現した上下変位を伴う線状の地表変状(速報), <https://www.gsi.go.jp/common/000254854.pdf> (2024 年 4 月 9 日閲覧)
- 6) ALOS 利用推進研究プロジェクト (2024): 「だいち 2 号」による令和 6 年能登半島地震の観測結果について, (2024 年 4 月 9 日閲覧)
- 7) 国土地理院 (2024): 空中写真正射画像 珠洲地区, 輪島地区, 輪島中地区 (1/2 撮影), https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101_noto_earthquake.html#3-1 (2024 年 4 月 9 日閲覧).
- 8) 吉見雅行, 丸山 正 (2024): 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状の現地調査), <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/noto2024/noto2024-09.html> (2024 年 4 月 9 日閲覧)
- 9) 吉田一希 (2024): 令和 6 年能登半島地震に伴い生じた地表の亀裂分布, <https://www.gsi.go.jp/common/000255654.pdf> (2024 年 4 月 9 日閲覧)

九重火山における火山岩の斑晶と石基のサイズ定義

○福岡仁至^{1)*}・太田岳洋¹⁾

1) 山口大学

* E-mail: d002wbu@yamaguchi-u.ac.jp

The crystal size distribution of phenocrysts and groundmass at Kuju volcano.

Masashi Fukuoka^{1)*}, Takehiro Ohta¹⁾

1) Yamaguchi University

* E-mail: d002wbu@yamaguchi-u.ac.jp

キーワード：九重火山，斑晶，石基，結晶サイズ分布

Keywords: Kuju volcano, Phenocryst, Groundmass, Crystal Size Distribution

1. はじめに

火山岩における斑晶結晶は、マグマ溜まりで晶出する結晶であり、石基結晶はマグマ溜まりでメルトの部分である¹⁾。斑晶と石基は、サイズが異なるだけでなく、数密度も異なるため、火山岩に対して結晶サイズ分布(Crystal Size Distribution)を求めれば、定量的に斑晶と石基が求まるはずである¹⁾。しかし、サイズが大きく異なる斑晶と石基の全てにおいて正確なサイズ分布を求めることは容易ではないため、実際はCSDを行わず、火山岩の肉眼観察や偏光顕微鏡観察における「見た目」で斑晶と石基を区分するのが現状である¹⁾。

筆者らが研究対象とする大分県南西部に位置する九重火山は、現在も噴煙が認められる活火山である。九重火山は、角閃石斑晶に富む安山岩～デイサイト質マグマが噴出した西部～中部域と、角閃石斑晶に乏しい苦鉄質マグマが噴出した東部域に区分される²⁾。このうち、筆者らが対象とする西部～中部域の岩石では、主に斜長石、角閃石、単斜輝石、直方輝石、不透明鉱物が含まれる。各鉱物は多様なサイズで分布するため、斑晶と石基を「見た目」で定義することは容易ではない。

そこで、今回は九重火山の火山岩の斑晶と石基を区分することを目的とし、中部域の中岳火山の溶岩試料を例にモード測定を行い、各鉱物のサイズを測定した。これに加え、サイズごとの形状を記載した。これらの手法で得られた結晶のサイズ分布から、斑晶と石基のサイズについて検討した。

2. 測定試料

今回は、九重火山中部域に分布する中岳溶岩の山頂部の溶岩塊を対象とした。岩質は石英かんらん石黒雲母含有直方輝石単斜輝石角閃石安山岩である。

3. 手法

岩石薄片に対してモード測定を行い、各鉱物のサイズを測定した。カウントにおいては、志村・小島³⁾を参考に、各鉱物のサイズを測定できるように工夫した。カウントできるサイズに限りがあるため、不透明鉱物を除き、長径は0~0.5mmの範囲において0.05mm間隔で、短径は0~0.2mmの範囲において0.02mm間隔で測定した。不透明鉱物は短柱状のものが多いため(図2参照)、長径、短径のいずれも0~0.2mmの範囲において、0.02mm間隔で測定した。

上記に加えて、各鉱物の形状(長柱状、短柱状、針状)ごとにサイズ分布を求めた。形状の定義において、アスペクト比(長径/短径)が「2~5」を長柱状とし、2以下を短柱状、5より大きいものを針状とした。

測定対象の鉱物は、斜長石、直方輝石、単斜輝石および不透明鉱物である。なお、本試料中に多く含まれる角閃石は最大5mmとサイズが大きく、今回測定対象としたサイズ内のカウント数が3つと非常に少ない。また、かんらん石、黒雲母、石英は、いずれも測定数が少ない。これらの鉱物は精度の良いサイズ分布が得られなかったため、今回は対象から除いた。

4. 結果

4.1 各鉱物のサイズ分布

各鉱物の長径、短径のサイズ分布を図1に示す。

斜長石において、長径は0~0.05、0.05~0.1mmが85~90個と多く、0.1mm以上のものはそれぞれ50個未満と少ない。短径は0~0.02mmが約120個と最も多く、サイズの増加に伴ってカウント数が減少する。

単斜輝石において、長径は0.05~0.1mmが13個と最も多く、それよりサイズが増加するにつれてカウント数は減少する。短径において、0~0.10mmのサイズはそれぞれ4~9個と多く、0.10mmより大きいサイズではそれぞれ2個以下と少ない。また、0~0.02mmに比べて0.02~0.04mmの個数が少ない。

直方輝石において、長径は0.05~0.1mmが25個と最も多く、それより大きいサイズでは、サイズが増加するにつれてカウント数が減少する。短径は0.02~0.04mmが22個と最も多く、それよりサイズが増加するにつれて、カウント数が減少する。

不透明鉱物において、長径は0~0.02mmが48個と最も多く、0.02mm以上のものはそれぞれ13個以下と少ない。短径は0~0.02mmが22個と最も多く、0.02mmより大きいものはそれぞれ11個以下と少ない。

4.2 各鉱物の形状とサイズの関係

図2に各鉱物の形状ごとのサイズ分布を示す。

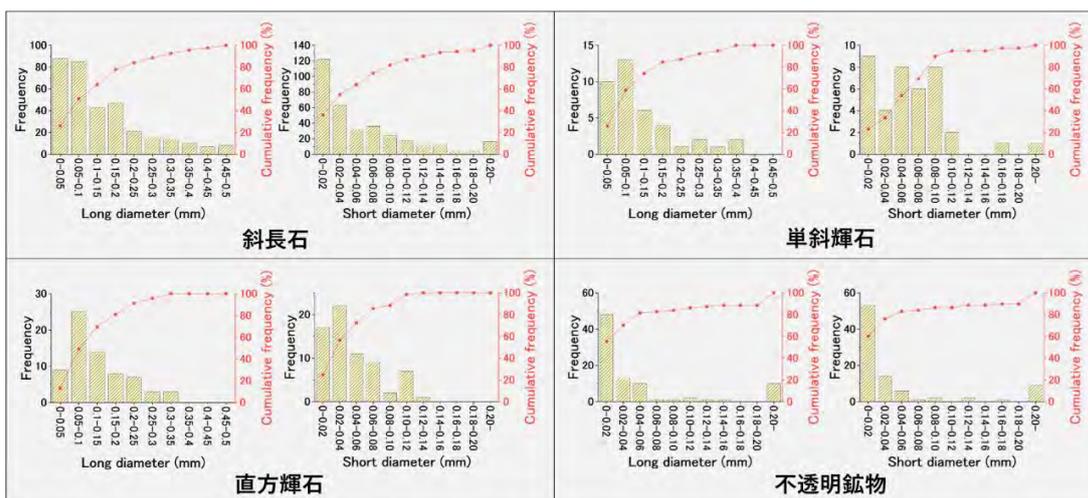


図 1 各鉱物の長径，短径のサイズ分布

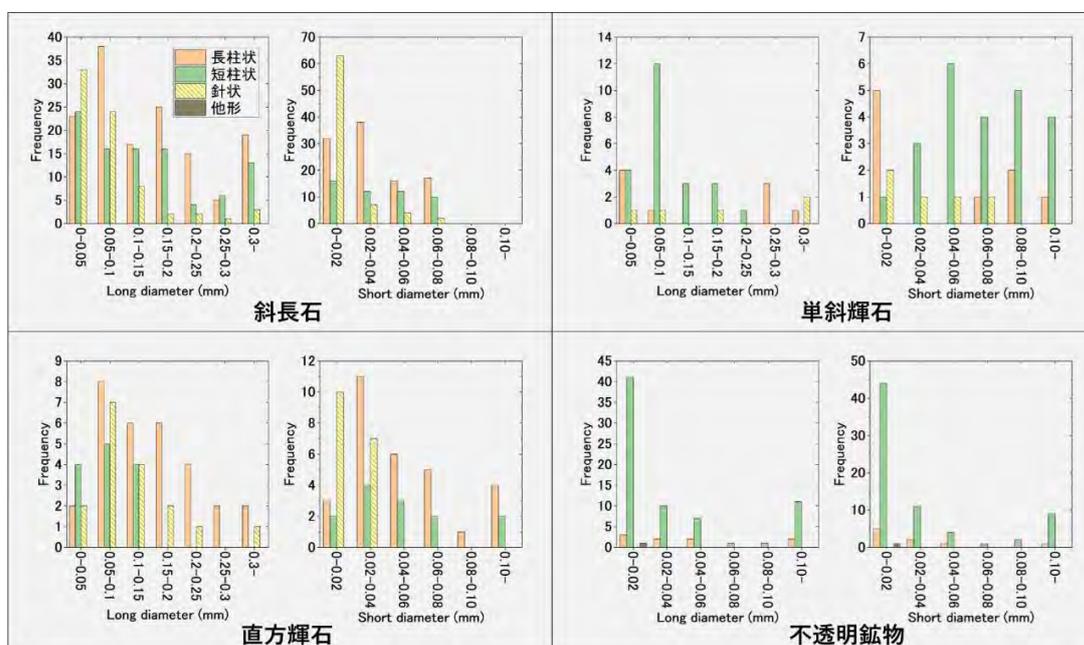


図 2 各鉱物の形態ごとのサイズ分布

斜長石は、全体的に長柱状，短柱状，針状結晶の順に多くカウントされた。長径において，0~0.05mm は針状結晶が最も多い。また，針状結晶はサイズの増加に伴って減少する。短径において，0-0.02mm は針状結晶が 63 個と最も多い。さらに 0.02~0.04mm の針状結晶は 7 個であり，0-0.02mm より著しく少ない。

単斜輝石は，全体として短柱状，長柱状，針状結晶の順に多くカウントされた。長径において，全体的に長柱状と短柱状の結晶が針状結晶より多い。短径において，0~0.02mm は長柱状が 5 個と最も多い。

直方輝石は，全体として長柱状，針状，短柱状の結晶の順に多くカウントされた。長径に

において、針状結晶は 0.05~0.1mm が 7 個と最も多い。短径において、針状結晶は 0~0.04mm でのみ認められた。

不透明鉱物は、全体として短柱状が最も多くカウントされ、長柱状のものは微量認められた。

5. 考察：各鉱物の斑晶と石基のサイズ

斜長石は、長径において 0.10mm を境に頻度のギャップが認められる(図 1)。また、短径において針状結晶が 0.02mm 以下に多く認められた(図 2)。これらのことから、斜長石の斑晶と石基は長径 0.10mm、短径 0.02mm で区分できる可能性がある。

単斜輝石は、短径において 0.10mm を境に頻度のギャップが認められた。一方で、短径 0.02~0.04mm の個数が 4 個と少ない。さらに、0~0.02mm に長柱状、針状結晶が多くカウントされた(図 2)。これらのことから、単斜輝石の斑晶と石基は短径 0.02mm で区分できる可能性がある。しかし、今回は測定数が少ないため、今後はより測定数を増やす必要がある。

直方輝石は、針状結晶が 0~0.04mm に濃集することから(図 2)、斑晶と石基は短径 0.04mm で区分できる可能性がある。

不透明鉱物は、長径・短径いずれも 0~0.02mm が最も多く、それ以上の粒径は極端に少なくなるため(図 1)、斑晶と石基は 0.02mm で区分できる可能性がある。

6. まとめ

今回はモード測定を行い、各鉱物のサイズ分布およびサイズ毎の形状を測定した。その結果、斑晶と石基をサイズと形状で区分できる可能性がある。

引用文献

- 1) 鈴木由希 (2022) : 斑晶の岩石学的解析 (1), 火山, 67, 233-244.
- 2) 川辺禎久・星住英夫・伊藤順一・山崎誠子 (2015) : 九重火山地質図. 火山地質図 no.19, 産総研地質調査総合センター, 8p.
- 3) 志村俊昭・小島 萌 (2015) : エクセル VBA によるポイントカウント・アプリケーション, 情報地質, 26, 15-20.

阿武川—佐波川の河川争奪の要因と年代

○山田佑哉^{1)*}・辻智大¹⁾

1) 山口大学

* E-mail: e048vcv@yamaguchi-u.ac.jp

Causes and age of River Capture between the Abu River and the Saba River

Yuya Yamada^{1)*}, Tomohiro Tsuji¹⁾

1) Yamaguchi University

* E-mail: e048vcv@yamaguchi-u.ac.jp

Abstract

The river capture between the Abu river and the Saba river in the western Chugoku Mountains has been pointed out based on the trace of the middle terrace. The age of the river capture has been estimated to be between 130 and 85 ka, based on Aso-4 and Aso-3. However, Aso-4 pyroclastic flow deposits (pfd) have been found at the low altitude close to the elbow of capture. Then we need to reconsider the age of the river capture should be constrained by the Aso-4. This study discusses causes and age of the river capture based on geographical and geological survey. The middle terraces are classified M α and M β . The M α terraces along Saba river are distributed at altitude of 320 to 330 m near the elevation of the divide in valley (alt. 328 m). These consist of thick sediments. along the Honoki river are composed of fan deposit (alt. 310 m) and fluvial sediments (alt. 290 m). The M β terraces have the relative height of about 40 m from the recent Saba River bed. On the terrace at altitude of about 50 m below M α (alt. 275 m), mainstream fluvial sediments, Aso-4 pfd, tributary fluvial sediments and talus sediments were observed from the lower. The edge of fan deposits near the divide in valley (O surface) are composed of fluvial to lacustrine sediments. The bottom of Chojagahara (165 ka) lava dome is about altitude of 170 m. From the above, the following findings were obtained.

- The age of the river capture is before the deposition of the Aso-4 pfd.
- The direct cause of the river capture was due to the fan deposits near the divide in valley, which stored the constituent layers of the M α terraces.

キーワード：河川争奪，河成段丘，Aso-4 火砕流堆積物，長者ヶ原

Keywords: River piracies, River terrace, Aso-4 pyroclastic flow deposits, Chojagahara

1. はじめに

「河川争奪」とは、河川が流域を超えて隣の河川の水流を奪う現象¹⁾であり、その流域における地形発達史を考える上で重要である。中国地方においては、河川間の分水嶺が破壊突破されやすい環境であることを背景に、河川争奪の報告、研究が多数なされてきた²⁾。一方、河川争奪自体がなかったという論説も最近になって登場³⁾し、河川争奪の有無から議論する必要もでてきた。

中国山地西部、阿武川—佐波川の河川争奪は、大土路^{おおどろ}における風隙（谷中分水界，標高 328 m），中位段丘面（以下，「M 面」）が連続することなどを証拠として、かつての^{ほおのき}朴川は阿武川支流であり、佐波川の横山より上流域を含んでいたと考えられている^{4,5)}（以下，「古朴

川」) (図 1, 2). 本河川争奪の主な要因について, 野坂山による火山性堰止湖 (以下, 「古徳佐湖」) の形成で生じた周辺の侵食基準面上昇, 争奪前の佐波川 (以下, 「古佐波川」) における大原湖断層に沿って進行した谷頭侵食^{4,5)}, 谷中分水界付近における扇状地 (本稿において「O 面」とする) の形成によるダムアップ⁹⁾が指摘されている. また, 河川争奪の終了年代は M 面の段丘化と関連して説明され, 阿武川流域に分布する Aso-4 (阿蘇 4, 86 ka⁶⁾)⁷⁾, Aso-3 (阿蘇 3, 133 ka⁸⁾)⁹⁾ (図 2) から 130~85 ka 頃とされている^{4,10)}. しかし, 争奪の肘 (図 1) に近く, M 面より下位の段丘 (図 1: loc.1) から Aso-4 火砕流堆積物が発見された¹¹⁾ことから, 河川争奪の年代は制約され, M 面の見直しが必要である. そこで, 本研究では地理的, 地質学的調査に基づいた河川争奪の成因, 年代の再検討を目的とする.

2. 結果

M 面は M α 面と M β 面に区分した. M α 面について, 佐波川上流域においては谷中分水界の標高付近に分布し, 主に河川性の円礫層, 砂層, シルト層で構成され堆積物が厚い. 朴川沿いにおいては南界 (標高約 310 m, 図 1: loc.2) で扇状地性の角礫層, 葉ツ久 (標高約 290 m, 図 1: loc.3) で佐波川上流域起源の堆積岩礫を含む河川性の円礫層が認められた. M β 面について, 佐波川上流域において河床との比高を約 40 m もち, M α 面と同じ特徴 (礫種比, 風化度など) をもつ構成礫を含む. M α 面より標高 50 m 以上の低位の段丘 (標高約 275 m, 図 1: loc.1) では下位から河川性の円礫層, Aso-4 火砕流堆積物¹¹⁾, 支流性の亜円~角礫層, 崖錐性の角礫層が認められ, 本面を Ls1 面とした. O 面の扇端部 (標高約 320 m, 図 1: loc.4) では下位から河川~湖成性と考えられる円礫層, 砂層, シルト層, 扇状地性の角礫層が認められた. また, 争奪の肘より約 7 km 下流には長者ヶ原 (165 ka¹²⁾) が分布し, 基底は標高 170 m 程度である (図 1, 3).

3. 考察

河川争奪の終了年代は, Ls1 面の構成層に Aso-4 火砕流堆積物が狭在することから 86 ka 以前である. また, 165 ka 以前, 現在の大原湖湖尻付近は標高 170 m 程度であった. 河川争奪の終了年代を先行研究^{4,10)}を踏まえて 130 ka 頃であるとする, 長者ヶ原の形成が河川争奪より古く, 古朴川と古佐波川の上に極端な地形的障害があったと考えられる. しかし, その候補に挙げられる地形は認められず, このモデルには疑問が残る. 反対に, 河川争奪が長者ヶ原の形成より古いとすると, 図 2 で示すような河川争奪のモデルが考えられる. 河川争奪が 130 ka 頃に終了していた場合は, 長者ヶ原溶岩の年代の再検討が必要である. それに対し, 165 ka 以前に終了していた場合は徳佐盆地における段丘面との対比を再検討する必要がある.

また、M面の分布標高はM α 面とM β 面で異なることについて、M α 面の構成層は滑川起源の碎屑物の供給があった可能性が言及されている⁴⁾。しかし、先述の長者ヶ原の基底標高から、滑川は165 kaには古佐波川水系に属していた(瀬戸内海方面へ流れていた)と考えられる。また、M α 面は佐波川上流域において、谷中分水界の標高付近に分布し、朴川沿いにおいては標高約290 mより高標高では河川性の構成層が認められない。これらのことからM α 面はO面付近における扇状地堆積物のダムアップによって形成され、これが河川争奪の直接の原因になったと考える(図2, 3)。

本稿の内容は本研究会のほかに、日本地球惑星科学連合2024年大会におけるポスター発表においても議論を重ねる予定である。

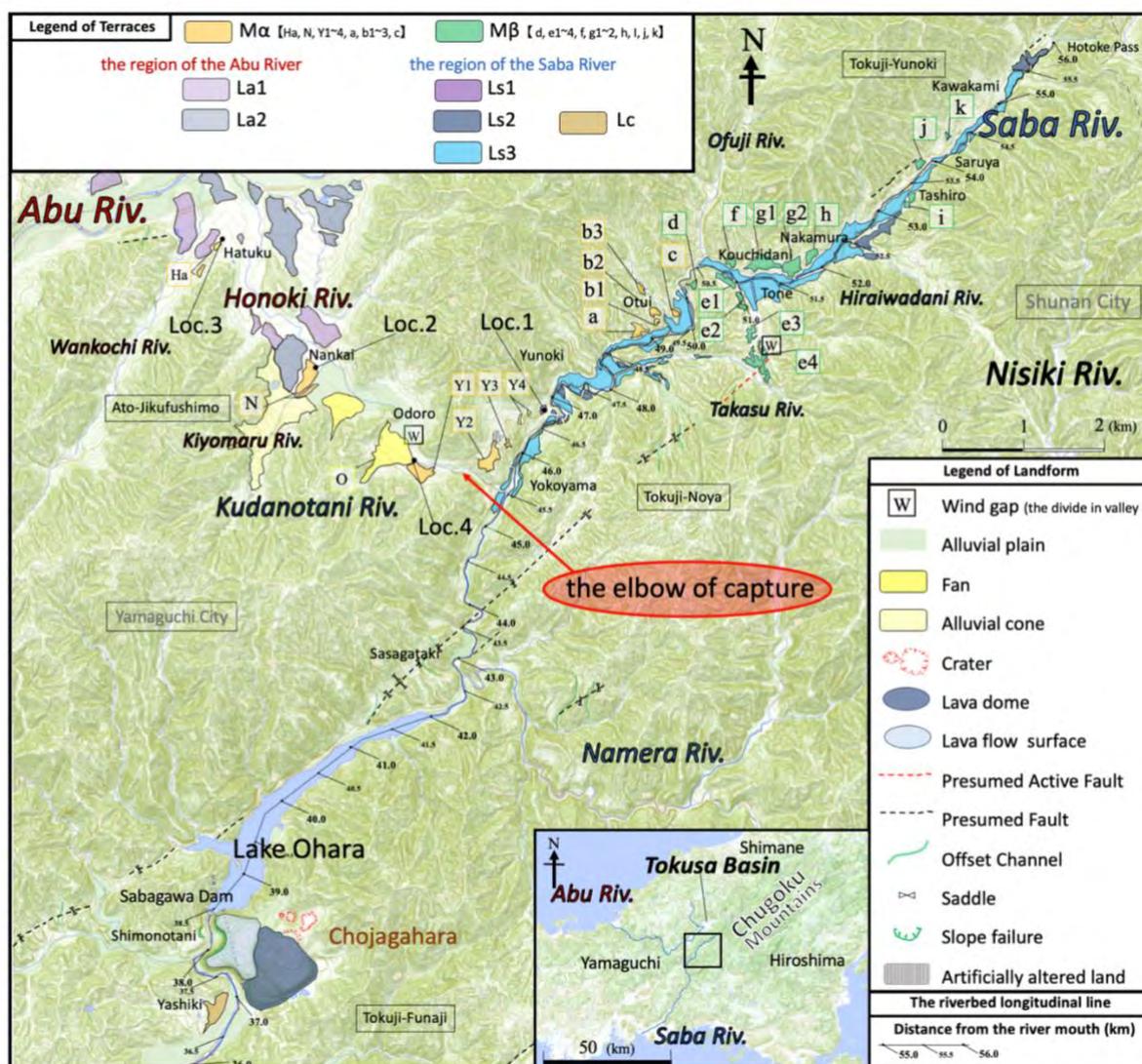


図1 佐波川上流域—朴川沿いにおける地形区分および露頭位置。

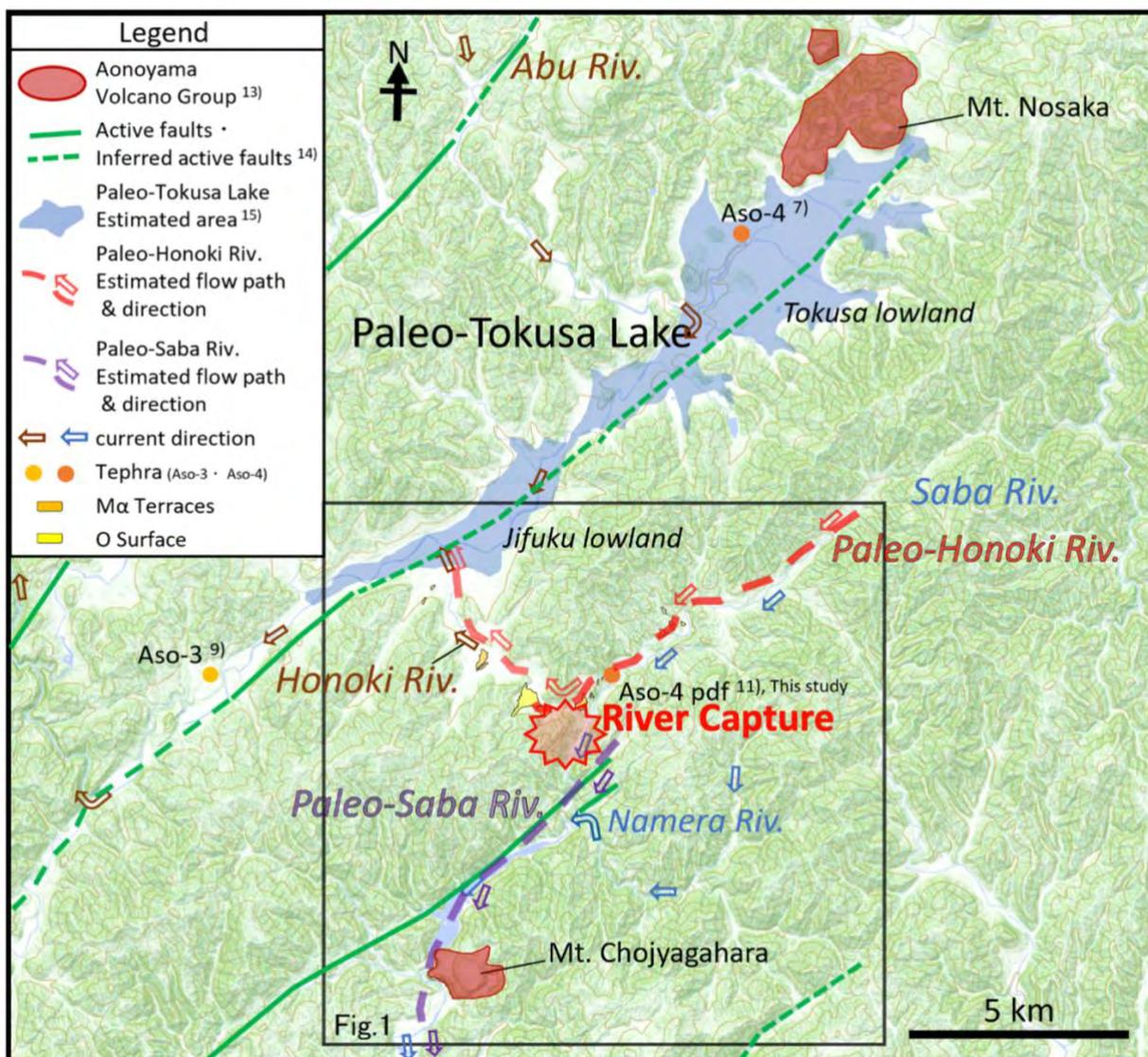


図2 佐波川上流域，朴川沿いにおける Mα 面，Mβ 面，O 面の分布と河川争奪のモデル．
 青野山火山群の分布は（松浦ほか，2006）¹³⁾，活断層の分布は（西村ほか，2012）¹⁴⁾，古徳佐湖の推定水域は（山内・白石，2023）¹⁵⁾に基づく．

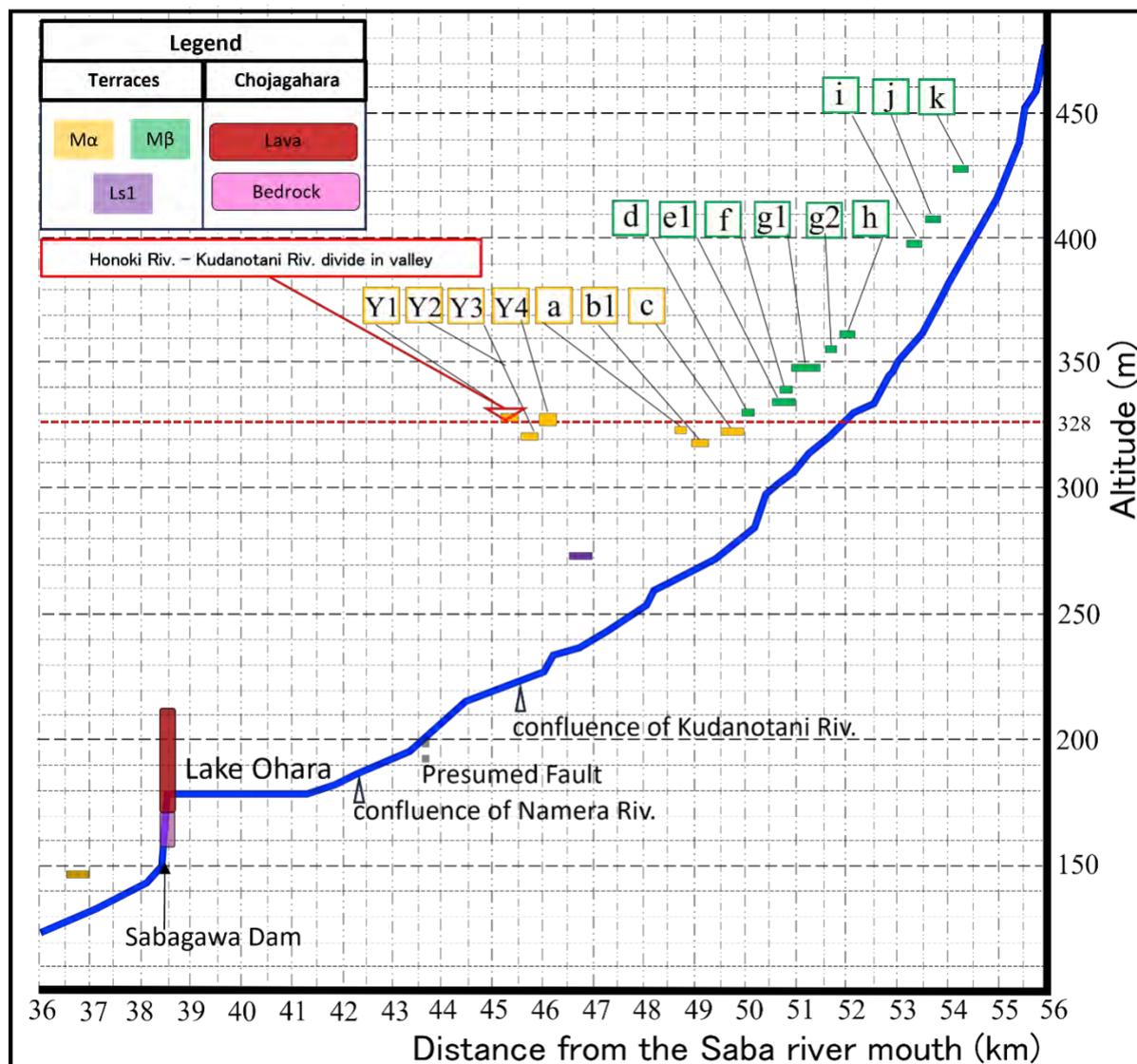


図3 佐波川上流域における河床断面・段丘面，長者ヶ原およびその基底の投影図。

河床縦断線は図1に示す。Ls2面，Ls3面，Lc面は省略。距離：標高＝50:1。

謝辞

旧柚野中学校露頭の調査において，山口県土木建設事務所には許可を，工事事業者である株式会社井原組には協力をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 齊藤享治 (2024) : 河川争奪, [最新] 地学辞典, 地学団体研究会, 平凡社, 279.
- 2) 小畑浩 (1991) : 中国地方の地形, 古今書院.
- 3) 高橋雅紀 (2023) : 分水嶺の謎 峠は海から生まれた, 技術評論社.
- 4) 山内一彦・白石健一郎 (2014) : 徳佐盆地周辺部の河川争奪に関する新たな知見. エリア

- 山口, 43, 19-33.
- 5) 山内一彦 (2003) : 中国山地西部, 徳佐盆地周縁における河川争奪. 立命館地理学, 15, 31-47.
 - 6) Albert, P., Smith, V., Suzuki, T., McLean, D., Tomlinson, E., Miyabuchi, Y., Kitaba, I., Mark, D., Moriwaki, H., Suigetsu 2006 Project Members and Nakagawa, T. (2013) : Geochemical characterisation of the Late Quaternary widespread Japanese tephrostratigraphic markers and correlations to the Lake Suigetsu sedimentary archive (SG06 core) . Quaternary Geochronology, 52, 103-131.
 - 7) 市谷年弘・鈴木毅彦・三好教夫・星見清晴 (1996) : 山口県徳佐盆地における 68 m ボーリング試料からの阿蘇4テフラの検出. 鳥取県立博物館研究報告, 33, 39-45.
 - 8) 長橋良隆・吉川周作・宮川ちひろ・内山 高・井内美郎 (2004) : 近畿地方および八ヶ岳山麓における過去 43 万年間の広域テフラの層序と編年-EDS 分析による火山ガラス片の主要成分化学組成-. 第四紀研究, 43, 15-35.
 - 9) 相山光太郎・福地亮・林崎涼・加藤和浩・金折裕司 (2022) : 山口県北東部, 大原湖-弥畝山西方断層系に属する長門峡断層の活動性. 活断層研究, 56, 13-31.
 - 10) 山内一彦・白石健一郎 (2022) : 徳佐盆地渡川周辺における断層露頭および断層変位地形. 山口地学会誌, 84, 1-4.
 - 11) 辻智大・太田岳洋・藤原尚起・中田英二・潮田雅司・中村千怜 (2022) : 阿蘇カルデラから 170 km 離れた山口市徳地における Aso-4 火砕流堆積物の発見. 日本地質学会第 129 回学術大会講演要旨.
 - 12) 古山勝彦 (1997) : 山陰東部地域の新生代火山岩の地球化学的検討. 西南日本の新生代火山活動とテクトニクス. 平成 6 年度~8 年度科学研究費補助金基盤研究 (A) (1), 研究成果報告書, 34-35.
 - 13) 松浦浩久・尾崎正紀・脇田浩二・牧本博・水野清秀・亀高正男・須藤定久・森尻理恵・駒澤正夫 (2006) : 20 万分の 1 地質図幅 山口および見島.
 - 14) 西村裕二郎・今岡照喜・金折裕司・亀谷敦 (2012) : 山口県地質図 第 3 版 (15 万分の 1) 説明書. 山口地学会.
 - 15) 山内一彦・白石健一郎 (2023) 中国山地西部, 阿武川上・中流域における水系変化と断層運動. 立命館地理学, 35, 71-88.

熱帯泥炭地における沿岸地盤の崩壊形態別分類

○香川拓輝^{1)*}・山本浩一¹⁾・Sigit Sutikno²⁾・Noerdin Basir³⁾・Muhammad Haidar⁴⁾⁵⁾

1) 山口大学, 2) リアウ大学, 3) ブンカリス高等専門学校,

4) インドネシア地理空間情報庁, 5) 東京大学

* E-mail: hkagawa@yucivil.onmicrosoft.com

Classification of Peat Mass Movements Type in Coastal Ground of Tropical Peatlands

Hiroki Kagawa^{1)*}, Koichi Yamamoto¹⁾, Sigit Sutikno²⁾, Noerdin Basir³⁾, Muhammad Haidar⁴⁾⁵⁾

1) Yamaguchi University, 2) University of Riau, 3) Bengkalis state Polytechnic,

4) The Geospatial Information Agency of Indonesia, 5) The University of Tokyo

* E-mail: hkagawa@yucivil.onmicrosoft.com

キーワード：泥炭地崩壊, 熱帯泥炭地, ブンカリス島, 沿岸域, 海岸侵食

Keywords: Peat Mass Movements, Tropical Peatlands, Bengkalis Island, Coastal Area, Peat Coastal Erosion

1. はじめに

亜寒帯, 北極圏, 熱帯に分布している泥炭地は植物により吸収された大気中の二酸化炭素を貯蔵する重要な役割を果たしている¹⁾. 熱帯泥炭地では, 炭素循環面の側面と災害面での問題に直面している. 災害面の問題として, インドネシア共和国リアウ州ブンカリス (Bengkalis) 島の北部海岸で海岸侵食が伴った泥炭地崩壊が頻発している. 熱帯泥炭地での泥炭地の報告例は少なく²⁾, これまで一般市民が立ち入らない人目のつかない箇所が発生していたため問題視されていなかった. しかし, 2022 年末に地元メディアによって深刻な状況が報告された³⁾. 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は, 16 世紀以降から泥炭地特有の地すべり現象 (Landslides) として認知されている⁴⁾.

そこで, 本研究は北方泥炭地の泥炭地崩壊の分類⁵⁾に倣い, 現地調査結果と衛星画像解析, 数値計算シミュレーション結果を組み合わせ, 熱帯泥炭地特有の沿岸地盤の崩壊形態別の分類を行い, 熱帯泥炭地での泥炭地崩壊の発生要因を考察することを研究目的とした.

2. 手法

2.1 研究対象地域

本研究の対象地域は, ブンカリス島である. ブンカリス島を図 1 に示す. ブンカリス島は, 北緯 1.6° 東経 102° 付近に位置し, ケッペンの区分によれば熱帯雨林気候である. 2000 年以降,

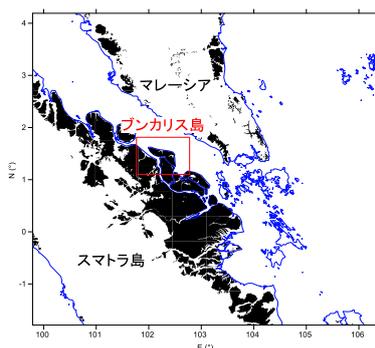


図1 研究対象地域 (■：泥炭地⁶⁾)

ブンカリス島の北部は広範囲が泥炭地湿地林からアブラヤシ畑に転換され、縦横に水路が建設されている。

2.2 現地調査結果と衛星画像解析を組み合わせた研究方法

本研究は、RTK-GNSS を用いた沿岸地盤断面測量結果と UAV による空撮結果、SPOT-6, Landsat8, Sentinel-1, Sentinel-2 の衛星画像解析を組み合わせて、泥炭地崩壊の発生時期の特定を行った。特定した発生時期の気象観測結果や水路水位の結果、崩壊跡の UAV による空撮結果を北方泥炭地の泥炭地崩壊の特徴⁵⁾と比較し、DEMNAS の衛星画像の地形を使用して実施した地下水流動計算の数値計算シミュレーション結果と現地で実施した土質試験結果を使用して算出した地盤安全率をもとに泥炭地崩壊の形態別に Burst Type と Flow Type に分類を行った。

3. 結果と考察

3.1 Burst Type

2013年8月24日と2014年3月11日に現地で実施した地盤断面測量の結果を比較したところ、沿岸域約100m区間の標高が2014年3月11日時点で平均2.01m低下した。2013年9月18日に撮影されたSPOT-6と2014年12月17日のUAVによる空撮結果を比較した結果、2014年12月17日のUAVによる空撮写真には、北方泥炭地の泥炭地崩壊の bog burst の二次的特徴であるテンションクラックが発生していることが確認された。泥炭地崩壊によりクラックが発生すると、表層の連続していた植生が不連続になることから、植生被覆率が低下すると考えた。UAVによる空撮結果から作成したVARIの二値化画像とLandsat8, Sentinel-2画像のバンド演算によって作成したNDVIの値から植生被覆率とNDVIの関係を示し、植生被覆率の変化によって泥炭地崩壊発生時期を推定した。当該箇所の植生被覆率の時系列変化を図2に示す。2013年12月27日に植生被覆率は0.87であったものの、2014年2月13日には0.20に低下した。その結果、泥炭地崩壊は2013年12月27日から2014年2月13日の49日間に発生したことが推定された。2013年9月18日時点のSPOT-6画像で当該箇所は、平面上

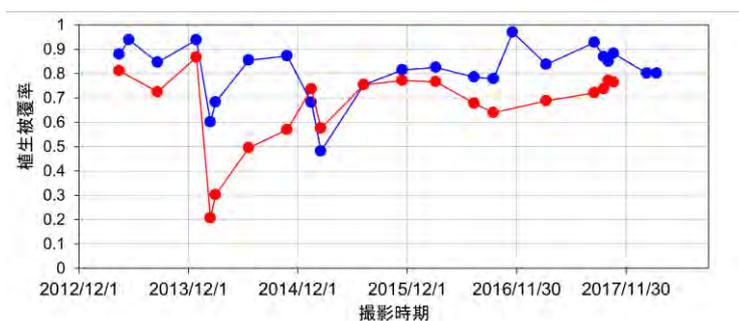


図2 崩壊域の植生被覆率の時系列変化 (● : Burst Type 箇所, ● : Flow Type 箇所)

海域と連続した植生がはっきりとした境界があることから、2013年9月18日時点で当該箇所は海岸侵食によって形成された崖の地形であると考えた。DEMNASの標高データを使用して、緩やかに傾斜のある地形から海岸侵食により崖地形に遷移させて、それぞれの地形について地下水流動計算を行った結果と現地での土質試験結果により地盤安全率の計算を行った。その結果、崖地形に遷移するほど沿岸部の地盤安全率は低下することがわかった。北方泥炭地での bog burst は泥炭の採掘によって形成された不連続な地形から崩壊が発生することが報告されており、熱帯泥炭地での海岸侵食によって形成される崖は同様の作用を引き起こしているのではないかと考えられる。さらに、沿岸部の崖から崩壊し、内陸部が崩壊した泥炭塊に引っ張られる形でテンションクラックを引き起こしているのではないかと考えられる。

3.2 Flow Type

2014年8月20日と2015年1月10日に現地で実施した地盤断面測量の結果を比較したところ、内陸側約400m区間の標高が2015年1月10日時点で平均2.07m低下していた。2015年1月10日のUAVによる空撮結果、崩壊跡の特徴の一時扇状地⁷⁾が形成されていたことから、2014年8月20日から2015年1月10日にかけて泥炭地崩壊が発生したことが考えられた。面積13.7haの大規模な一扇状地は、崩壊の規模が大きいことを示していた。Burst Typeと同様に植生被覆率の経時変化を確認したところ、2014年10月27日に0.87であった植生被覆率が2015年2月16日には0.48に低下した。そのため、2014年10月27日から2015年1月10日の間に泥炭地崩壊が発生したことが考えられる。当該箇所の植生被覆率の時系列変化を図2に示す。Sentinel-1のSAR画像によると2014年12月22日から2014年12月28日に突発的に陸域面積が増加していた。これは一時扇状地の発生による増加であると考えられ、2014年12月22日から2014年12月28日の7日間に泥炭地崩壊が発生したことが考えられる。2014年12月1日から2015年1月31日までの間に現地で観測した降雨量と水路水位を確認したところ、観測期間中の降雨量の最大は12月23日の $107.9 \text{ mm day}^{-1}$ で、12月26日には 84.1 mm day^{-1} を記録した。観測期間中の最大の降雨量を記録した後、2014年12月27日に

突然水路水位が低下した。水路の天端高は 9.0 m であるが、2014 年 12 月 27 日 11 時 10 分に水路水位は 9.1 m を記録し、記録した 10 分後には 7.9 m まで急低下している。急激な水路水位の低下から、2014 年 12 月 27 日 11 時 10 分から 11 時 20 分の間に、水路の決壊によって泥炭地崩壊が発生したことが推定された。Flow Type の泥炭地崩壊は北方泥炭地の peat flow あるいは bog flow のようにスラリー状の泥炭が内陸側から海岸部へ流出する崩壊であると考えられる。

4. 結論

熱帯泥炭地の沿岸域では、Burst Type と Flow Type の 2 種類の形態の泥炭地崩壊が確認された。Burst Type の泥炭地崩壊は、海岸侵食によって形成される崖地形が崩壊に起因していると考えられた。また、Flow Type の泥炭地崩壊は、多量の降雨による水路の決壊に起因して発生していた。今後、それぞれの崩壊跡の泥炭塊、地盤の亀裂の形状等から泥炭地崩壊の発生メカニズムを明らかにする必要がある。

謝辞：本研究は科学研究費補助金 17H01668 によって実施された。

引用文献

- 1) Osaki, M., Tsuji, N. (2015) Tropical Peatland Ecosystems, Springer, preface vii
- 2) Wilford G. E. (1966) Peat landslide in Sarawak, Malaysia, and its significance in relation to washouts in coal seams, *Journal of sedimentary Research*, 36(1): 244-247.
- 3) RiauOnline, Impact Of Abrasion In Simpang Ayam Vil-lage, Bengkalis Island Threatened To Be Washed Away (2024 年 4 月 2 日閲覧)
(<https://www.riauonline.co.id/riau-pesisir/read/2022/12/14/dampak-abrasi-di-desa-simpang-ayam-pulau-bengkalis-terancam-hanyut>)
- 4) Bowes D.R. (1960) A bog burst in the Isle of Lewis. Scott. *The Geographical Journal*. 76, 21-23.
- 5) Dykes P, A., Warburton, J. (2007) Mass movements in peat: A formal classification scheme, *Geomorphology* 86 (2007), 73-93.
- 6) Xu, J., Morris, P.J., Liu, J., Holden, J. (2017) PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on meta-analysis. University of Leeds. Online at <https://doi.org/10.5518/252>, (2024 年 4 月 24 日閲覧) .
- 7) 山本浩一, 朝隈友晴, 香川拓輝, Sigit SUTIKNO, Noerdin BASIR, 神野有生 (2019) 熱帯沿岸泥炭地海岸の崩壊による一時扇状地の発生と消滅に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.75, No.2, I_1249 --I_1254 1254.

木与地すべり地における化学的風化メカニズム

○村尾駿太郎^{1)*}・太田岳洋¹⁾

1) 山口大学

* E-mail: e047vcv@yamaguchi-u.ac.jp

Chemical weathering mechanism in the Kiyu landslide area, Yamaguchi Prefecture, Japan

Shuntaro Murao^{1)*}, Takehiro Ohta¹⁾

1) Yamaguchi University

* E-mail: e047vcv@yamaguchi-u.ac.jp

キーワード：化学的風化

Keywords: Chemical weathering

1. はじめに

山口県阿武町木与地区では昭和 40 年以降、流紋岩と花崗岩からなる斜面が頻繁に崩壊しており、崩壊斜面では酸性の地下水が確認されている¹⁾。木与斜面の崩壊地については、清水ほか¹⁾により花崗岩と流紋岩の地質境界付近にすべり面が把握されている¹⁾。また、土塊の移動形態や地下水位の変動に伴う土塊の移動が観測され、排水工による地下水位低下に伴い移動が停止したことが報告されている¹⁾。これらのことから、誘因が地下水位変動であることが明らかになっている¹⁾。しかし、すべり面の形成などの素因、及び酸性の地下水の成因の詳細については把握されていない。一般に、酸性の地下水が分布する地域では比較的化学的風化の進行が速く、崩壊を促進する要因となることが考えられる²⁾。

そこで本研究では、露頭試料及びコア試料についての岩石記載、X 線回析、溶出試験から、木与地すべり地域におけるすべり面の形成の素因と考えられる化学的風化のメカニズムを明らかにすることを目的とする。

2. 地形・地質概要

研究地域は、標高 300m 前後の海岸沿いの山体斜面で、斜面は波の浸食作用により形成された海食崖と推定される¹⁾。研究地域の地質は、中生代白亜紀の阿武層群福賀累層に相当する流紋岩と中生代白亜紀後期に福賀累層に貫入した花崗岩からなる¹⁾。流紋岩は花崗岩の貫入時の接触変成作用を受けていると考えられる¹⁾。

3. 研究手法

本研究地域に分布する岩石の鉱物学的・化学的特徴を把握するために、X線回析と溶出実験を行った。研究に使用した岩石試料は研究地域における露頭試料とコア試料である。X線回析は、各鉱物のピーク強度から鉱物組合せや各鉱物の含有量を定性的に把握することを目的に行った。溶出実験は、化学的風化の主要過程である水-岩石反応における陽イオン、陰イオンとそれに伴うpHとECの変化を把握することを目的に行った。本実験は、土壤汚染に関わる元素の溶出特性を把握する試験として行われる環境庁告示第46号に準じて行い、実験より得られた検液のpH、ECおよび陽イオン、陰イオンの溶出量を測定した。陽イオン(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})はICP発光分光分析法、陰イオン(Cl^- , SO_4^{2-})はイオンクロマトグラフ、 HCO_3^- は硫酸滴定法により分析した。

4. 結果・考察

上記の実験から以下のことが分かった。肉眼観察において、流紋岩は硬質であり、花崗岩は非常に風化しており軟質であった。X線回折分析において、流紋岩には黄鉄鉱が、花崗岩にはスメクタイトが認められた。溶出実験において、流紋岩溶出水は酸性を示した。一方、花崗岩溶出水は中性付近を示し、流紋岩溶出水に比べECが大きく、 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} の溶出量が多い傾向を示す。以上から、すべり面形成過程は以下のように推定される。①花崗岩の貫入により、流紋岩は接触変成作用、熱水変質作用を受ける。その際、流紋岩は硬質になり、流紋岩中に黄鉄鉱が形成される。②流紋岩中の黄鉄鉱の酸化により酸性の地下水が形成され、地質境界付近を流下する。③地質境界付近の花崗岩は、流紋岩に比べ酸性の地下水による溶脱を強く受ける。④下位に相対的に脆弱な花崗岩が分布するキャップロック構造が形成される。地質境界付近の花こう岩をすべり面として地すべりが発生した。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所山口国道維持出張所萩分室様よりボーリングコアを借用させていただいた。

引用文献

- 1) 清水則一・中田幸男・太田岳洋(2020):一般国道191号木与地区の防災対策レベルと監視レベルに関する研究,pp.106-123.
- 2) 丸山清輝・武士俊也(2004):中栗地すべりにおける鮮新世泥岩の化学的風化,日本地すべり学会誌,Vol.41,No.4,pp.375-384.

Probe for Measuring Three-Dimensional Groundwater Velocity without Borehole

Joaninha Belo Ornai ¹⁾*, Masataka Aoki ²⁾, Koichi Yamamoto ¹⁾,

1,2) Yamaguchi University

* E-mail: k_yama@yamaguchi-u.ac.jp

Abstract

A simple method for directly measuring three-dimensional groundwater flow velocity using a paper disk velocity probe without using a borehole was developed and evaluated in the laboratory. Special paper with 1 mm dot circle printed on it is used for the probe. In a groundwater environment measurement, the dye ink eluted from the printed dots leaves a trail on the paper. In this study, we attempted to verify groundwater velocity and direction in three dimensions using two types of its two-dimensional probes: vertical and horizontal. Laboratory tests showed that the vertical groundwater flow direction determined by the vertical 2D type is equivalent to the tilt setting of the device with the corresponding RSME is 11.12 degrees. In addition, the groundwater flow direction for the horizontal 2D measurement results agree to the device orientation with corresponding RMSE is 12.35 degrees. Moreover, the groundwater flow velocity measured by the sensor showed a good correlation coefficient of $R^2 = 0.8861$ with the set value ranging from 0 – 0.15 cm/min.

Keywords: Groundwater, Groundwater Environment, Groundwater Flow, Groundwater Velocimeter, Paper Disk

1. Introduction

Recently, there has been a growing demand for the investigation of groundwater flow velocity. The most used methods are tracer method which requires multiple boreholes installations. Tracers are the substances that easily dissolve in groundwater without interference by chemical or biological processes (e.g., sorption). A Heat Pulse Flowmeter (HPF) with four channels and electrical conductivity detectors provides centimeter scale readings for depth profiles velocity¹⁾. Besides, the point velocity probe (PVP) rapidly measures direction and magnitude of the water velocity vector within 9% and 8% at the centimeter scale in porous media without need of calibration²⁾. Similarly, groundwater-induced cooling was also presented using closed circulation of heated fluid, it overcame the functional relationship between differences temperature and groundwater velocity³⁾. In response to this need, a power-free, inexpensive, and time-efficient measurement probe called Paper Disk Groundwater Velocimeter (PDGVs) has been developed⁴⁾. The sensor structure is composed of melamine sponge and printed dot paper sheet. The PDGVs sensor paper comprises 65mm outer diameter and 29 mm inner diameter centralized with 12 dots where each are 3mm diameter. In addition, the PVC pipe is also required for this type of PDGVs, at the bottom part of the pipe enclosed with strainer which can facilitate the groundwater flow inside the pipe and the sensor capable of detecting the flow⁴⁾. In 2016, the PDGVs sensor paper was enhanced, resulting in a single dot with a 3mm diameter positioned at the center of the paper. The paper was manufactured by Maruman with a weight of 126.5 g/m². This improvement sensor's paper resulted in an alignment curve of the relationship between Darcy flow velocity and tailing lengths of giving period 5 and 60 minutes for ranged velocity of 0.3 cm/min -1.5 cm/min⁵⁾. Furthermore, existing devices can measure groundwater flow in three dimensions. However, the devices still need boreholes to be

measured⁶⁾. For this reason, we developed a small new device with absence of boreholes which can measure 3-dimensional groundwater flow velocity and direction.

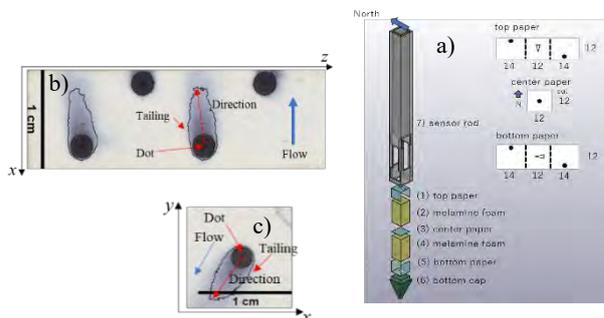


Fig 1. a) 3D model of Micro-Paper Disk Groundwater Velocimeter. The paper disk of M-PDGVs sensor after measurement is shown in b) vertical 2D type [tilt = 0°] and c) horizontal 2D type [direction = 220°] x axis and y axis are on the horizontal plane. z axis is vertical.

2. Materials and Methods

2.1. Micro-paper disk groundwater velocimeter

The Micro Paper Disk Groundwater Velocimeters (M-PDGVs) was invented based on the principle of the paper disk groundwater velocimeter⁵⁾. The M-PDGVs have two types, vertical 2D and horizontal 2D. These types consist of 1 m extension rod along with paper disk sensor of 29mm x 10mm size for vertical 2D, 10mm x 10mm size of horizontal 2D and 1mm diameter dot for both types. The ability of these micro types can measure the flow in vertical and horizontal directions.

Table 1 The details of the M-PDGVs vertical 2D and horizontal 2D types

Device Types	Materials	Dimensions
Vertical 2D	Paper	10 mm x 29 mm (1 mm diameter dot)
	Sponge	29mm x 6mm x 10mm
Horizontal 2D	Paper	10 mm x 10 mm (1 mm diameter dot)
	Sponge	10mm x 6mm x 29mm (2 units)

2.2. Experiment methods

The purpose is to verify horizontal and vertical velocity and direction with M-PDGVs. A water tank filled with quartz sand ($d_{50} = 0.5$ mm) was used for calibration of the Micro-PDGVs (Figure 2). Using a peristaltic pump, groundwater flow was generated in the sand tank.

The horizontal 2D type measure's velocity ranged from 0 cm/min – 0.12 cm/min and horizontal direction at -40 deg to 50 degrees in period of 60 minutes. However, the vertical 2D type measurement condition was undertaken for about 15 minutes period with the measured velocity ranged from 0 cm/min – 0.15 cm/min and vertical inclination at -45 to 45 deg., respectively as omnidirectional and inclinational test.

These experiments were conducted 5 times for each condition.

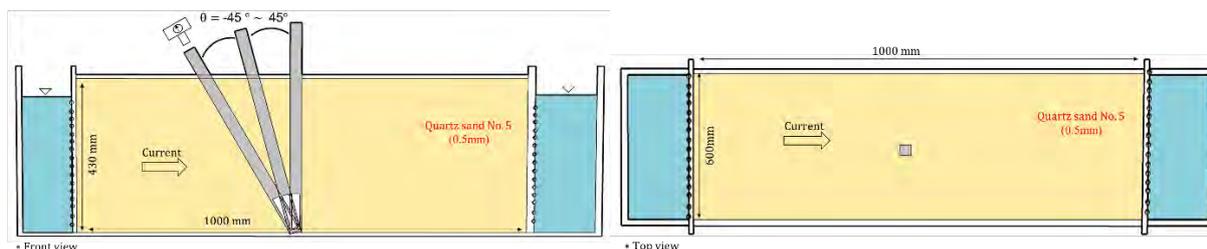


Fig 2. The water tank front and top view were used for vertical 2D and horizontal 2D M-PDGVs experiment.

Table 2. The velocity and direction measured condition in the laboratory experiment for both the vertical 2D and horizontal 2D M-PDGVs.

Measurement Devices	Direction	Time (minute)	Mean Tank Velocity (cm/min)
Vertical 2D	Setting tilt (0°, 15°, 30°, 45°, -15°, -30° & -45°)	15	0, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1 & 0.15
Horizontal 2D	Northward Orientation (-40°, -10°, 5°, 20° & 50°)	60	0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.04, 0.08 & 0.12

2.3. Analysis methods

In the analysis phase, the initial step involves the original paper solely with dot ink, which is subsequently eluted after submerged into the soil. Thereafter, the dot generated a tailing that aligned with the water flow directions in certain period. The dot and tailing length will be observed under an open-source image analysis software Image-J for binary tracking were used thresholds. Channel separation for the experiment includes the Red, Green, and Blue (RGB) colors, the brightness, value of 105 of the red channels, was used for a dot’s detection and the brightness of blue channels and red channel were used for a tailing detection. The following flowchart illustrates the mechanism.

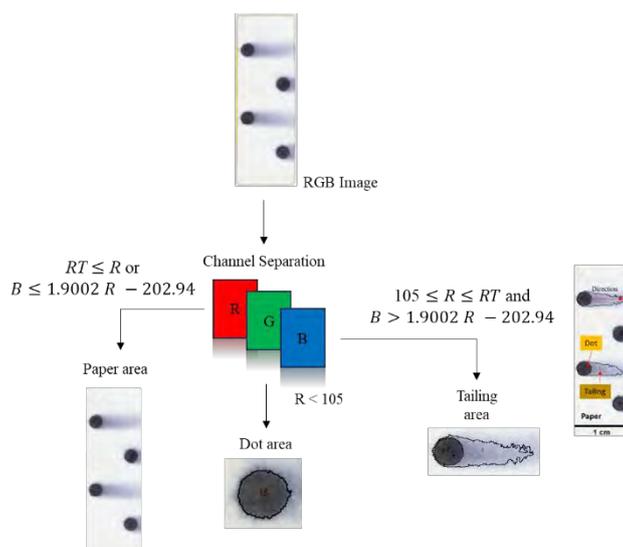


Fig 3. The channel separation analysis for the scanned paper dot and tailing, where the range of threshold RT at 150 – 220, the red channel R for dot detection 105 and the maximum brightness B 255.

The ink tailings area, shown in Fig. 4, are ideally close to an ellipse. Therefore, in order to assess the quality of the ink tailings, the ratio of the area of the ellipse to the area of the ink tailings was calculated, with its maximum Feret diameter as the major diameter and its minimum Feret diameter as the minor diameter; for a, the ratio of the approximate ellipse area to the ink tailings area was 0.9, and for b, in contrast, the ratio was 0.7.

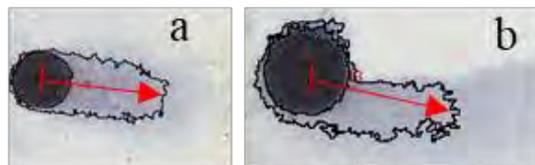


Fig 4. The quality of tailing length observation at vertical orientation [tilt = 0°]; a) 0.9 of the area and b) 0.7 of the area

The quality of tailing length Q is written as using area of the ink tailing A and ellipsoid are A' as below (1)

$$Q = \frac{A}{A'} \quad (1)$$

where,

$$A' = \frac{\pi}{4} D_{Fmax} D_{Fmin} \quad (2)$$

The length of the tailing by the eluted ink from the printed dot was identified from the scanned color image of the paper disk using blue and red channel using machine classification. The longitudinal red channel's brightness distributions of the tailings of ink were used to estimate groundwater flow velocity. The brightness distributions were acquired by the multiple thresholds of the red channel. When the brightness of the red channel is correlated to the concentration of the ink on the paper, the relationships between concentration of the ink on the paper and brightness of the red channel (B_R) is written as (3)

$$C = \alpha(255 - B_R) \quad (0 \leq B_R \leq 255) \quad (3)$$

When the relationships between C and velocity v is written as

$$\frac{dC}{dx} = -\alpha \frac{dB_R}{dx} = -\frac{\beta(t)}{v}$$

then

$$v = \frac{\beta(t)}{\alpha} \left[\frac{dB_R}{dx} \right]^{-1} \quad (4)$$

Where: C : ink concentration on paper (g cm^{-2}), B_R : brightness of red channel (-), x : distance on paper (cm), α : coefficient (g cm^{-2}), $\beta(t)$: coefficient ($\text{g cm}^{-4} \text{ s}$)

3. Result and Discussions

3.1. Vertical 2D measurement results

Fig. 5a shows the relationship between the tailing length of the vertical 2D type M-PDGV and the reciprocal of the ink brightness differential. This showed a linear relationship with high correlation coefficient ($R^2 = 0.8861$). Fig. 5b shows the vertical inclination direction errors at velocity of 0.1 cm/min in the range between -45 degrees and 45 degrees.

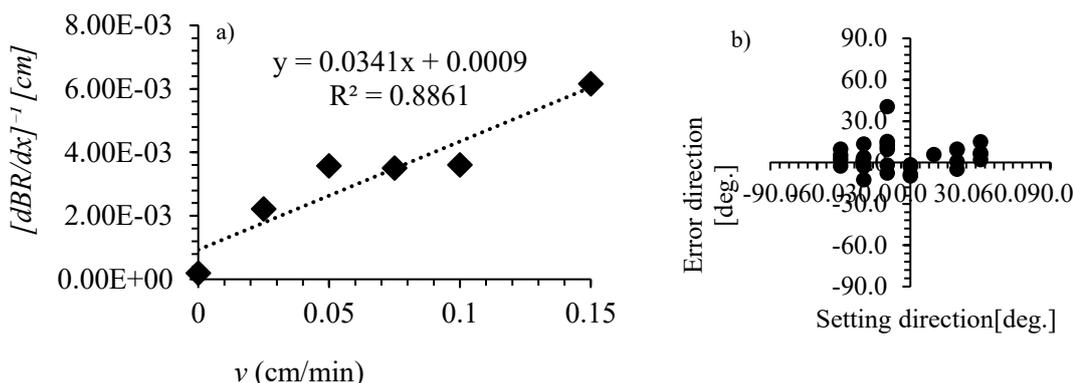


Fig 5a. The calibration line of calculated tank (Darcy) velocity v and inverse of the derivative of brightness of red channel with respect to distance on the paper x ; $t=15$ min and 5b. Relationship between setting direction and error direction of vertical 2D type at velocity = 0.1 cm/min

3.2. Horizontal 2D measurement results

Fig.6a illustrates the regression curve of the horizontal groundwater flow and result. Since there is a convex curve on the top, the upper limit of measurement is around 0.06 cm/min. Fig. 6b shows the relationship between horizontal 2D types setting directions and error directions.

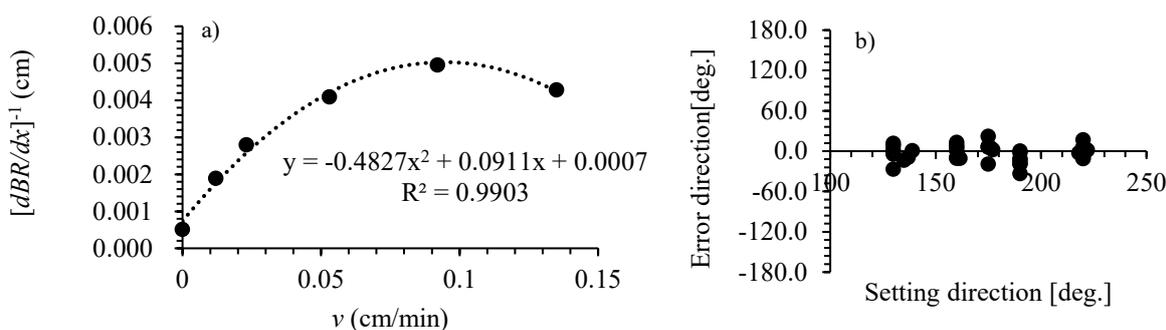


Fig 6a. The calibration line of calculated tank (Darcy) velocity v and inverse of the derivative of brightness of red channel with respect to distance on the paper x ; $t=60$ min and Fig 6b. Relationship between setting direction and error direction of horizontal 2D type [direction = 130° - 220°].

Table 3 provides standard deviation (SD) and root mean square error (RSME) values for horizontal 2D and vertical 2D measurements. For horizontal 2D, the standard deviation measured was 12.89 degrees, indicating a range of variability within -40 to 50 degrees based on horizontal orientation. The corresponding RSME is 12.35 degrees. As for vertical 2D device, the standard deviation of the vertical direction was 10.25 degrees and RSME was 11.12 degrees.

Table 3 The omnidirectional and inclinational test results of horizontal 2D and vertical 2D groundwater flow directions measurements by M-PDGVs.

Type	Velocity [cm/min]	Direction [deg.]	Time [mins]	SD [deg.]	RMSE [deg.]
Horizontal 2D	0.012 - 0.135	-40°, -10°, 5°, 20°, & 50°	60	12.89	12.35
Vertical 2D	0.1	Setting tilt 0°, 15°, 30°, 45°, -15°, -30° & -45°	15	10.25	11.12

4. Conclusion

The set of groundwater velocity probes, M-PDGVs, which can measure three-dimensional groundwater flow velocity without borehole was invented and tested. The velocity probes consistently showed linear responses to velocities ranging from 0 to 0.15 cm/min. In addition, both horizontal and vertical directional incline tests revealed that tailing tilt fitted alignment of the sensor inclination. This measurement emphasized the capability of M-PDGVs in detecting small-scale subsurface water movements. While the experiments were conducted in laboratory testing, the adaptability and precision of this probe suggest potential applications in such relevant field environments. This novelty is applicable in measuring groundwater flow in diverse environments were found to be challenge, including river embankment, ponds, tidal flat, wetland and micro-scale contamination areas.

REFERENCES

- 1) Devlin J.F. (2020): Groundwater Velocity. The Groundwater Project Guelph, Ontario, Canada. ISBN: 978-1-77470-000-6, 2020.
- 2) Labaky W. et. al (2007): Prove for measuring Groundwater at the Centimeter Scale. Journal of Environ. Sci. Technol. 2007, 41, 8453–8458. <http://dx.doi.org/10.1021/es0716047>.
- 3) Sun Z. et. al (2023): Measuring Groundwater Velocity: Method Based on Groundwater Flow-Induced Cooling. Journal of Hydrologic Engineering, 2023, Vol. 29, 1, <https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-5944>.
- 4) Ono et.al (2014): Observation of the Behavior of Groundwater on a Coastal Sandbar using a Paper Disk Groundwater Velocimeter. Journal of JSCE Transaction G (Environment), 2014, Vol.70, No.70, III_355-III_363.
- 5) Yamamoto et.al (2016): Development of the Single Dot Type Paper Disk Groundwater Velocimeter. Journal of JSCE, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 2016, Vol.72, 4, Pages I_907-I_912.
- 6) Yamamoto K. and Murai D. (2022): Groundwater Flow in Sandy Beach Adjacent to Tidal Flat. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), 2022, Vol.78, 2, Pages I_787-I_792.

3次元簡易地下水流向流速計の開発

○山本浩一¹⁾*

1) 山口大学

* E-mail: k_yama@yamaguchi-u.ac.jp

Development of 3-Dimensional Groundwater Velocimeter

Koichi Yamamoto¹⁾*

1) Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University

* E-mail: k_yama@yamaguchi-u.ac.jp

Abstract

We have developed a three-dimensional groundwater current measurement device that does not require a power source or tracer particles. During the 15-minute measurement, the elevation and depression angles followed the set angles well at 0.2 cm/min or higher.

キーワード：地下水流向流速，ペーパーディスク，簡易計測，3次元流速

Keywords: Groundwater velocity, Paper disk, Easy measurement, 3-dimensional flow

1. はじめに

山腹の地すべり地，海岸の砂浜への浸透流など非定常な地下水流動が発生する場，堤防内部の浸透流など，土層中の鉛直水頭勾配が大きい流れ，あるいはこれを再現するための土質実験においては3次元的な地下水流向や流速の把握が必要となる場合がある．現在存在する単孔式3次元地下水流向流速計は水中に懸濁した鉱物粒子あるいは密度が調整されたトレーサ粒子の挙動を超音波で計測する方法，ビデオ映像の画像解析により求める粒子追跡法がある（地盤工学会 JGS1318-2015）．しかしこれらは懸濁物質をトレーサとして用いるので，粒子の粒径と密度による理論的な沈降速度からの乖離から鉛直流速成分を推定する必要があり，トレーサ密度を厳密に流体に整合させなければ直接流体の鉛直流速を測定することは不可能である．一方でペーパーディスク型地下水流向流速計はトレーサとして紙に印刷された染料インクを用いる水平流向流速が計測可能なものであり，トレーサと流体の密度差を考慮する必要がなく，流体の挙動を直接計測できるという利点がある．本研究ではこれを3次元の流向流速計測に応用した．

2. 研究方法

本研究で開発したペーパーシリンダー型3次元地下水流向流速計のセンサー部分はインクジェットプリンタで小さなドットを多数印刷した画用紙の円筒（ペーパーシリンダー）を塩化ビニルパイプの外側に巻き付け，これを円環状のメラミンスポンジで覆ったものである（図-1）．これを観測井戸に一定時間静置し，ペーパー上のテーリングから3次元の地下水流向を測定するものである．本研究で用いたセンサーは密度の大きな粒子を用いず，水に溶解した染料インクをトレーサとしているので，他の3次元流向流速計で必要な粒子沈降速度

の補正の必要はない。

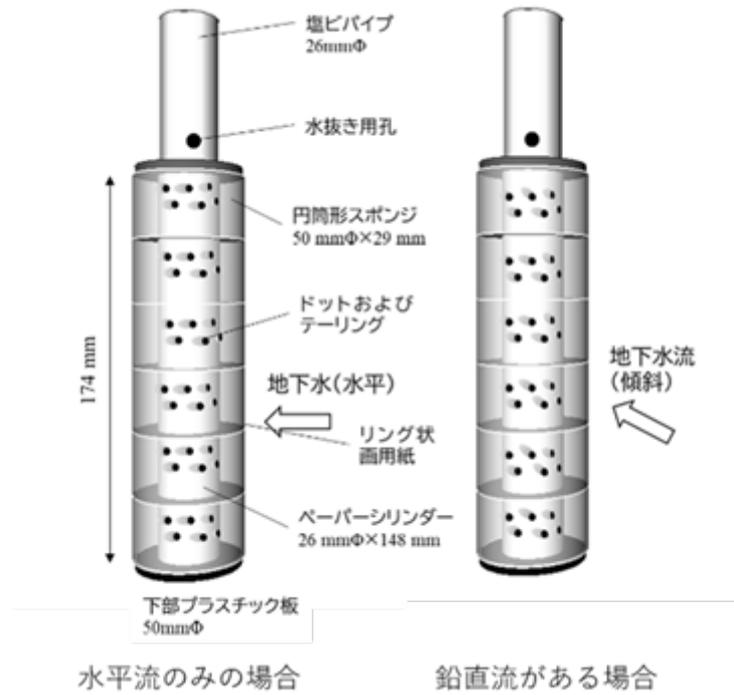


図-1 ペーパーシリンダー型地下水流向流速計

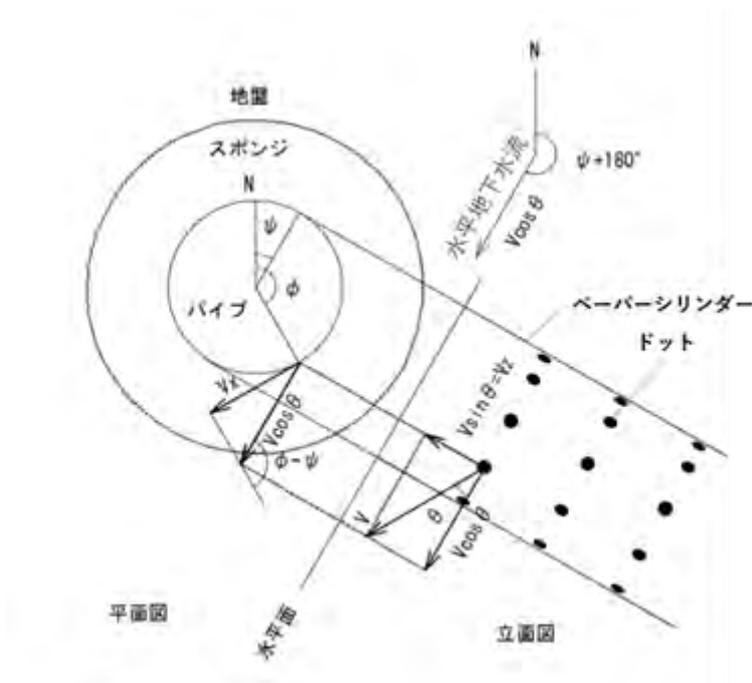


図-2 ペーパーシリンダー周辺の地下水流れのモデル

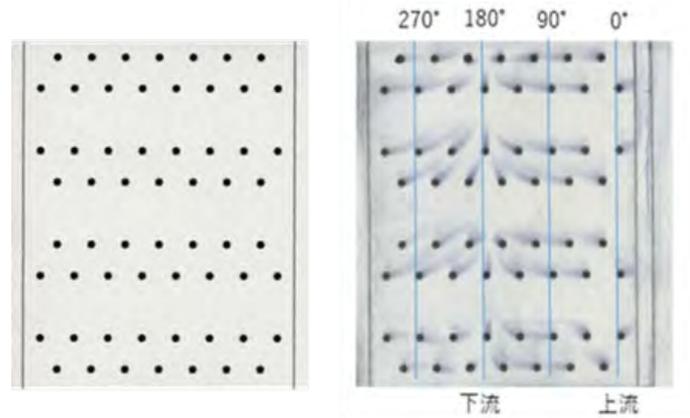


図-3 a) 計測前のドット印刷状況 b) 設定流速 0.2 cm/min, 設定仰角 30°, 設定流向 180° (風下向) のテーリング発生状況.

ペーパーシリンダー型 3 次元地下水流向センサーの外観図を図-1 に示す. センサーは VP20 塩ビ管 (外径 26 mm) と着脱可能なプラスチックリングからなるセンサー支持体に インクジェットプリンタで染料インクのドット (2 mm) を印刷した画用紙を巻きつけ円筒状としたペーパーシリンダー (全長 180 mm) を被せ, ペーパーシリンダーのさらに外側に厚さ 29 mm, 外径 50 mm, 内径 26 mm のメラミンスポンジ製の円筒 6 層をかぶせたものである. 地下水中にセンサーを静置することによりドットから染料インクが溶出し, メラミンスポンジ内部を輸送され再びペーパーシリンダー上に軌跡 (テーリング) が描画される. ネットロンカバーで保護したセンサーを観測井に一定時間静置後観測井から抜去し, ネットロンカバー, スポンジを取り外してペーパーシリンダーを展開, 乾燥させた後, フラットベッドスキャナーでペーパーをスキャンしたのち画像解析を行った.

ペーパーシリンダー表面においてペーパーの水平接線方向を x , 鉛直上向きを z とすると, 水平接線方向流速 v_x , 鉛直上向き流速 v_z はペーパー上の北からの方位を ϕ , 流向 (風上方位) を ψ , 水平からの仰俯角を θ として

$$v_x = v \cos \theta \sin (\phi - \psi) \quad (1)$$

$$v_z = v \sin \theta \quad (2)$$

となる (図-2). 流向 (風下方向) は $\psi + 180^\circ$ となる (ただし $0^\circ \leq \psi + 180^\circ \leq 360^\circ$). v_x は厳密には円周方向流速であるべきだが, v_x が十分に小さい場合は接線方向流速に近似できる. ある静置時間におけるテーリング長 L は流速 v の関数として表され,

$$L = f(v) \quad (3)$$

となる. (3) の関数 f は流速を変化させて L と v の関係を実験から求めた. よって流速は

$$v = f^{-1}(L) \quad (4)$$

で与えられる.

計測後のペーパーを図-3 に示す. 各ドットから薄いテーリングが発生していることがわかる. 室内実験として幅 60 cm×深さ 40 cm×長さ 100 cm の珪砂 5 号を充填し, 圧密した砂層を用意し, ストレーナを付属させたパイプを ± 30 度傾斜させて水平方向に地下水流速を与えて検定を行った. 計測時間は 15 分, 流速は 0.05 cm/min ~ 0.3 cm/min で 5 段階に変化させた.

3. 研究結果

テーリング長 L の x 成分 $L_x(\phi)$ のグラフを図-4 に示す。テーリングの向きは流向（風下方向の方位角）を境に反転するためその流向を $\phi+180^\circ$ として定めた。得られた $L_x(\phi)$ はサインカーブによく整合し、観測井が傾斜した（鉛直流がある）状況でも x 軸との+から-に至る交点（流向）が求められた。水平流向は $0.05 \text{ cm/min} \sim 0.3 \text{ cm/min}$ の範囲で標準偏差 11.5° で求められた。図-5 に観測井が 30° 傾斜した（鉛直流がある）状況におけるテーリング長 L の Z 成分 $L_z(\phi)$ のグラフを図-5 に示す。 $L_z(\phi)$ は全体にプラス側を示しており、 $L_z(\phi)$ と $L_x(\phi)$ の最大値の比から $\theta=29^\circ$ と求められ設定仰角の $\theta=30^\circ$ とほぼ整合した。図-6 に $t=15 \text{ min}$, $\theta=30^\circ$ における設定流速 V とテーリング長 L の関係を示した。流速とテーリング長は線形の関係にあり、テーリング長から流速に換算することができる。鉛直の流向すなわち、仰角は流速 0.2 cm/min 以上であれば設定された仰角に追従する傾向を示し、実験した ± 30 度の仰・俯角の範囲では鉛直流向が計測できることがわかった（図-7）。

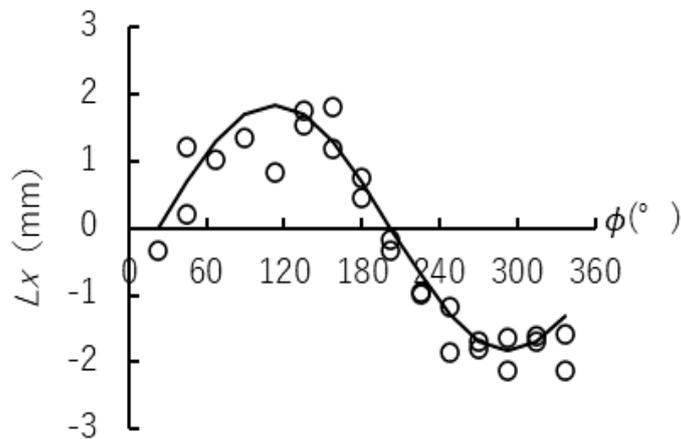


図-4 水平接線方向テーリング長 L_x の方位分布と近似曲線（設定流速 0.3 cm/min , 流向 180° , $\theta=30^\circ$ ）

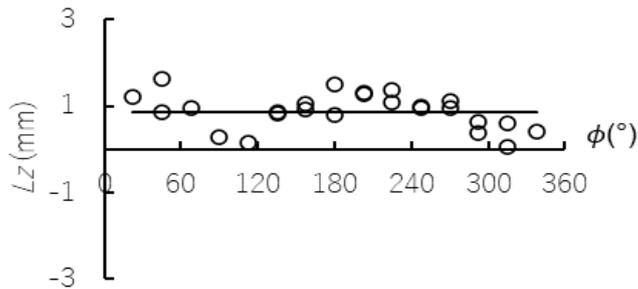


図-5 鉛直上向きテーリング長 L_z の方位分布（設定流速 0.3 cm/min , 流向 180° , $\theta=30^\circ$ ）

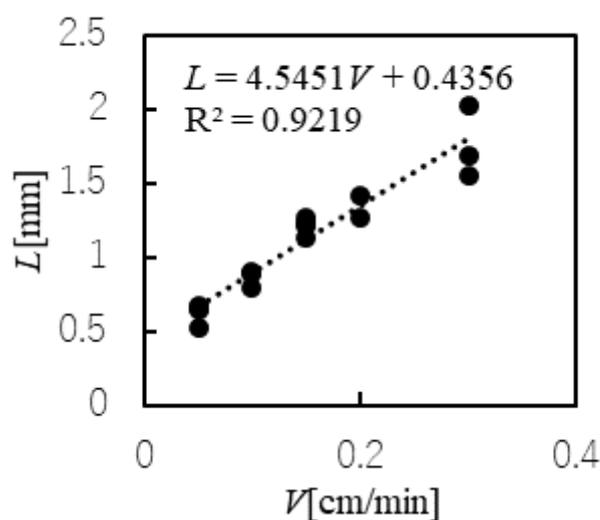


図-6 $t = 15 \text{ min}$, $\theta = 30^\circ$ における設定流速 V とテーリング長 L の関係

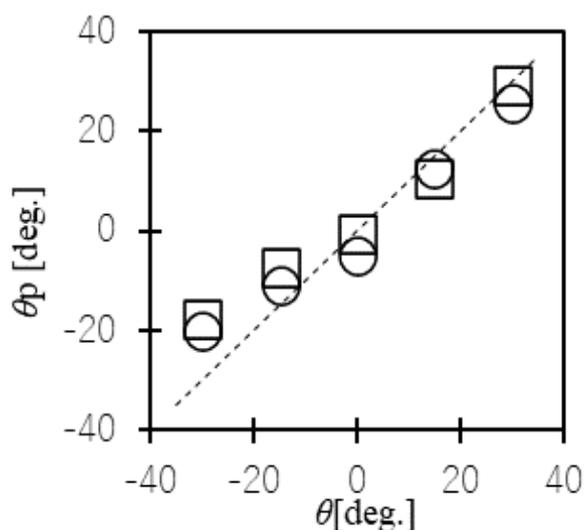


図-7 設定仰角 θ と計測仰角 θ_p の関係 (□ : 0.2cm/min, ○ : 0.3cm/min)

4. まとめ

電源を必要とせず、トレーサ粒子を必要としない3次元地下水流向流速測定装置を開発した。15分間の計測において0.2 cm/min以上で仰・俯角が設定角度に良好に追従した。なお本装置は特許出願中（特開 2023-146541）である。

引用文献

- 1) 山本 浩一, 小野 文也, 神野 有生, 関根 雅彦, 単ドット式ペーパーディスク型地下水流向流速計の開発, 土木学会論文集 B1 (水工学), 2016, 72 巻, 4 号, pp. I_907-I_912.

謝辞

株式会社宇部セントラルコンサルタントには3次元地下水流向流速計開発に際して現地調査協力・開発協力をいただきました。

景勝地須佐湾周辺の火山性堆積物： 須佐ホルンフェルスはカルデラか？

○大和田正明^{1)*}・太田岳洋¹⁾・江島圭祐¹⁾

1) 山口大学

* E-mail: owada@yamaguchi-u.ac.jp

Volcano-clastic deposits on the Susa Bay area: Is the Susa hornfels a caldera?

Masaaki Owada^{1)*}, Takehiro Ohta¹⁾, Keisuke Eshima¹⁾

1) Yamaguchi University

* E-mail: owada@yamaguchi-u.ac.jp

Abstract

This article serves as a new insight into the formation of the Susa Group as a result of Miocene igneous activities related to the opening of the Japan Sea. In addition to the route maps conducted by 3rd-year students of our department during the Fieldwork geology class, we obtained the following new geological information around Susa Bay area.

- 1) A scoria deposit is situated on Hira-Jima, and it gradually changes into the tuff breccia.
- 2) There are thin alternation beds resembling mantle bedding structure around Hira-Jima.
- 3) Pumice-bearing tuff is overlaid on welded tuff without any gaps on Susa Bay area.
- 4) There are some tuff breccia dikes in the Tatami-Iwa region.
- 5) Thin layers of tuff and tuff breccia beds are intercalated with the Susa Group.
- 6) An unsorted volcanic breccia is underlain by the southern foot of Mt. Koyama.
- 7) A convex box-like structure obtained from the reflected section is situated below the seabed off the coast of Susa Bay.

These data suggest that the strata around Susa Bay, represented by the Tatami-Iwa, were formed as a result of volcanic activity, probably related to the formation of a caldera.

キーワード：須佐湾，火山性堆積物，畳岩，カルデラ

Keywords: Susa Bay, Volcano-clastic deposits, Tatami-Iwa, Caldera

本研究の目的は、山口県内において昭和3年から国立公園に指定されている「須佐湾」周辺の成り立ちについて、日本海の形成に関連した火成活動という新たな視点によって地形・地質の発達過程を明らかにすることである。本発表では、昨年、山口大学理学部の野外実習で得られたルートマップを基本に、その後の調査によって得られた情報と合わせて現時点での考えを述べる。

「須佐湾」周辺は、高山を構成する斑れい岩やホルンフェルスや屏風岩など地質の博物館とも呼べる地形・地質資源が豊かな地域である。従来この地域は、白亜紀の火山砕屑岩類を基盤とし、それらを不整合で新第三系中新統須佐層群が累重するとされた(岡本・陶山, 1975)。須佐層群最下位層は厚い礫岩層で、その上位には砂岩層～泥岩層が順次累重し、最後に高山

斑れい岩 (14–15 Ma) の貫入と共に、この地域全体が上昇・剝削して現在の姿になったと考えられていた (Imaoka and Itaya, 2003)。こうした一連の海進から海退に伴う堆積盆の深度変化とそれに対応した堆積相の変化は、須佐層群が日本海の拡大に伴うリフト帯南縁の充填物と捉えることも可能であるが、不明な点が残されている (金折・山内, 2009)。今回の調査によって、我々は以下の新知見を得た。

- 1) 須佐湾内部の平島を構成する岩石は、スコリアを主体とする火山性堆積物で、従来須佐層群最下部とされた礫岩層に側方変化する。
- 2) 平島周辺に分布する地層の構造は地形の起伏を反映した「マントルベディング」に類似する。
- 3) 平島を構成する岩石との関係は不明だが、周囲の海岸線には溶結凝灰岩の上位に軽石を含む凝灰岩が累重する。
- 4) 壘岩には、ネットワーク状やパイプ状の産状を示す貫入性の凝灰角礫岩や凝灰質砂岩が分布する。
- 5) 高山東麓の須佐層群の礫岩層中に凝灰岩層が挟まれる。
- 6) 不淘汰火山角礫岩が江崎漁港をはじめ高山南部を取り巻くように点在する。
- 7) 須佐沖の海底反射断面には、下に凸の箱型構造が認められる (産総研データベース)。

上記 1) ~ 5) の地層の産状は、須佐湾周辺の地層が従来説明されたような堆積盆の形成に伴う碎屑性の堆積物ではなく、厚い礫岩層を形成するような近接した後背地からの急激な碎屑物の供給 (おそらく沈降を伴う) とともに火山活動に伴う火砕流や空中に舞い上がった火山噴出物、そして貫入性の火山碎屑物起源の地層・岩石が広く形成されたことを示す。また、6) と 7) は高山を取り巻くように陥没性の地形が形成され、それらが火山活動を伴っていることを示唆する。

以上から、景勝地である須佐湾周辺の地層は、火山活動に伴って形成され、壘岩に代表される須佐層群がカルデラ形成時に堆積したと推察される。

引用文献

- 1) Imaoka, T. and Itaya, T. (2003): K–Ar geochronology of a Middle Miocene submarine volcano-plutonic complex in southwest Japan. *Geological Magazine*, 141, 1–13.
- 2) 岡本和夫, 陶山義仁 (1975): 須佐層群. 山口県立山口博物館, 189–195.
- 3) 金折裕司, 山内靖喜 (2009): 新生界の分布と特徴 第 1 章 「日本地方地質誌・中国地方」, 日本地質学会編, 朝倉書店, 536p.
- 4) 産総研海域地質構造データベース 博多北方沖,
(https://gbank.gsj.jp/marineseisdb/line_map/gh852n4-HakaTa_dblist.html).

山口大学理学部附属地質技術者教育センター

山口応用地質研究発表会事務局：太田岳洋

〒753-8512 山口県山口市吉田 1677-1

TEL: 083-933-5753 FAX: 083-933-5753

E-mail: takohta@yamaguchi-u.ac.jp