

地質工學

第 20 輯

NGP 日本物理探鑛株式会社

季刊誌 地質工学 発刊の辞

我が日本物理探鉱株式会社は本年 12 月（1952 年）を以て創立 10 周年を迎えることになった。就いてはその記念事業の一つとして季刊誌地質工学を発刊することにした。これは我々科学技術の仕事に携わるものとしては最も相応しいことだと思ったからである。

記事の内容は物理探鉱 (Geophysical Prospecting) と土質力学 (Soil Mechanics) を主体とするが、地質工学 (Geotechnics) という土木建築に関する応用地質という立場から地下水または水文学 (Hydrology)、建造物の基礎工、隧道、堰堤の施工法等も含めたい。また応用地質学という見地からいえば勿論、温泉、鉱床地質等に関する諸問題も含んでくることになる。

兎に角本誌の内容は我々の事業の定期的な集積の里程標としたい考えであるが、一面地質工学に興味と関心を持たれる諸氏に取って有意義な存在となるであろうことを確信する。

同好の士の投稿は大いに歓迎することになっているから別項投稿規定によって活発な合流を期待する。知識と経験の交換によって斯界の進歩と発達に就いて大いなる寄与をなすであろうことを我等はここに切に念願する次第である。

1952 年 10 月

渡 邊 貫

【創刊号より転載】

Action is the foundational key to all success.

（行動がすべての成功への基本的な鍵である。）

美術分野の巨匠と呼ばれたピカソの言葉より

地質工学 第20輯

目 次

- 建設発生土をめぐる課題と対応
京都大学大学院地球環境学堂 勝見 武 ……1

- 自然由来でヒ素を溶出するトンネル掘削土砂に対する
酸化マグネシウム系材料を用いた不溶化处理および不溶化处理土の長期溶出挙動
株式会社 鴻池組 技術研究所 大阪テクノセンター 大山 将 ……5

- 谷底平野に潜在する旧河道と地質リスクについて
日本物理探査株式会社 北陸支店 伊藤 直基 ……12

- 環境配慮行動を促す体験型環境教育の試み
～沖縄県久米島での実施を中心に～
日本物理探査株式会社 関東支店 小櫻 慶吾 ……16

- ストレプト藻類 RAF 様キナーゼの機能解析
日本物理探査株式会社 関東支店 山崎 優斗 ……23

- 市民による絶滅危惧種ツシマヤマネコ保全活動の取り組み
―減少要因に対する保全の実践―
日本物理探査株式会社 中部支店 岡田 美夢 ……32

- 震源断層面のすべり分布を考慮した南海トラフ巨大地震の被害推定
日本物理探査株式会社 中部支店 後藤 健斗 ……41

建設発生土をめぐる課題と対応

勝見 武¹⁾

1) 京都大学大学院地球環境学堂

1. はじめに

2021年7月に静岡県熱海市で土石流災害が発生し、その起点が不適正に盛られた残土であったことから、建設工事等で発生した土を適切に処理し利用することの重要性が改めて喚起されている。この災害を受けて、危険な盛土等を全国一律の基準で包括的に規制する法制度の必要性から、「宅地造成等規制法の一部を改正する法律（令和4年法律第55号）」いわゆる盛土規制法が2022年5月に制定され、本年5月に施行された。災害から一年弱で法制定がなされたのは、特例的に早い対応であったと聞く。また、資源有効利用促進法の政省令が改正され（2022年9月2日公布）、発生土の適正な搬出先への確実な搬出等が定められた。このように、発生土への対応に関する法制度整備が進められているが、その実効性を高めるためにはいくつかの課題もある。そこで本稿では、課題の一つである自然由来の重金属等の問題を中心に、発生土をめぐる課題と対応について述べる。

2. 発生土に関する動向

発生土の発生や利用の実態は、建設廃棄物と併せて国土交通省により約6年間隔で「建設副産物実態調査」が行われており、最新の2018年度の調査によると建設発生土の約80%が利用されていた¹⁾。この実態調査の結果に基づいて、「建設リサイクル推進計画」が1997年以来約6年間隔で策定・更新されている。最新の第五次の推進計画²⁾では、これまでの「量」への取組みに一定の成果がみられたことから、今後は「質」の向上を進めていく必要性がうたわれている。

発生土の処理と有効利用に関する昨今の特筆すべき事項として、① 土を大量に扱う大規模プロジェクト等が実施され、発生土への適切な対応が求められていること、② 土の不適切な処理による被害が生じ、その対応が求められていること、③ 土に含まれる重金属等への対応が、環境関連の法規制の整備などに伴って求められること、の3点が挙げられよう。

①は、大都市圏の高速道路ネットワーク整備、整備新幹線やリニア新幹線などがある。大都市圏の交通社会基盤整備では、既に土地利用・開発が飽和した地上での建設工事は難しい場合が多く、

大深度地下の利用も含めてトンネル掘削が避けられない。また、高速鉄道では線形をなめらかにする必要からトンネル延長が長くなり、一方でトンネル以外の地上部分では、沈下など変位を極力制限する必要があるため、盛土はほとんど行われない（高架橋がほとんど）という特徴がある。その結果、多くのプロジェクトでは土の供給過多の傾向となる。

②では、2020年7月の静岡県熱海市での土石流災害が記憶に新しく、建設工事から発生する土の搬出・運搬・処理について、社会の厳しい目が向けられた。国は、盛土の安全性に関する点検・調査を行い³⁾、前述のように2022年5月に盛土規制法を制定するに至った。

③は、2003年に施行された土壤汚染対策法（以下、土対法）の影響が大きい。特に2010年の同法の改正では、それまで法対象ではなかった自然由来の重金属等が法対象となったことで、発生土の取扱いも影響を受け、同時に様々な取組みが進められ、2017年の法改正で揺り戻しがあった。これについては、3章以下で述べる。

3. 土壤汚染の法制度について

土を利用するにあたっては、有害物質による汚染（環境影響）を避けなければならない。土壤環境基準は「人の健康の保護および生活環境の保全の上で維持されることが望ましい基準」として29項目が定められている。また、2002年には土対法が制定され、土壤汚染の防止ならびに調査・対策が規定された。同法には現在26の特定有害物質について「指定基準」が定められ、これに適合しない場合は当該土地が指定区域（要措置区域と形質変更時要届出区域）に指定されて対象土が管理下におかれるとともに、健康被害のおそれがある場合はそれを防止するための措置が求められる。なお、指定区域は、汚染土壌を区域外に持ち出す際に規制をかける制度であって、汚染の除去を求めるとか直接のペナルティーを課すとかするものではないが（ただし要措置区域によっては汚染の除去が求められる）、区域指定されることを嫌ってか、現地から汚染を取り除くために土壌そのものを掘削除去する対策が行われることが多い（汚染が取り除かれれば区域指定は解除される）。しか

し、掘削除去は、掘削・運搬・処理に多大なコストとエネルギーを課して、社会トータルで見れば環境負荷増ともいえることから、その実施は汚染物質の種類や濃度、土地利用形態、地下水への影響などを考慮した上で慎重に選択されるべきと考える⁴⁾。

4. 自然由来の重金属等と土壤汚染対策法

自然由来の重金属等（ここでは法令上の8項目であると素、鉛、フッ素、ホウ素、セレン、カドミウム、六価クロム、水銀が対象）を含む発生土への対応は、建設事業関係者の多くが近年頭を悩ませている問題となっている。土や岩石に重金属等が含有している状況は特別なことではない。土や岩石の元素組成は地域によって若干の違いがあり、日本では例えばヒ素の濃度が世界平均より高いなどの特徴がある。考慮すべき主な地層・地質としては、海成の粘土層・泥岩、熱水変質を受けた地質、鉱脈や鉱床に近い地層などがあり、それらの中には前述の土壤環境基準や土対法の指定基準を超過するような含有量・溶出量を呈する岩石や土も存在する。

土対法の2003年の施行と2010年の改正に伴い、土を扱う現場は土対法に則しあるいは準じて自然由来の問題に対応するようになったが、このような対応は過剰に安全側ではないかとの指摘がみられてきた。したがって、2015年6月の規制改革実施計画では自然由来の重金属等の問題に対して緩和の必要性が提起され、2017年の法改正時には自然由来の重金属等を含む土（自然由来土）について一定の条件下で有効活用を認める緩和（合理化）がなされ、2019年の改正法の施行を経て現在に至

っている。

その具体的内容のエッセンスは図1に示す通りであり、自然由来の重金属等を含む土の利用の制度の概念を図示している。これは、図1に示すように、① 自然由来特例区域間で土壌を移動する方法、② 汚染土壌処理施設として許可された土構造物に土を活用する方法、の2つに分類できる。①と②はどちらも土の活用を示した制度だが、もともとなる考え方が異なるため別々のガイドラインに記されている。

①は土の移動に着目していることから「汚染土壌の運搬に関するガイドライン」⁶⁾に具体的事項が記されて、「地質的に同質である範囲内」で「汚染の状況が同様」であれば土壌の移動が可能とされている。搬出先には既に自然由来物質が存在しているのだから、同じ自然由来物質を他の場所から持ってきてリスクは増えないという前提である。

②は受け入れる施設の構造と運用が重要なことから「汚染土壌の処理業に関するガイドライン」⁷⁾に、「自然由来等土壌構造物利用施設」への活用として、要件が記されている。この長い名前の「自然由来等土壌構造物利用施設」とは、いわゆる「盛土」「盛土構造物」である。地下水汚染をおこさないこと、土を適切に管理する体制が整っていること、等が要件となる。

自然由来物質を含む土を盛土に使うことによって地下水汚染が懸念されるのであれば、リスク低減のための対策工が施された盛土（対策盛土）とする。対策盛土は後述の「国交省マニュアル」⁸⁾に記載されており、例えば図2に示すように盛土の

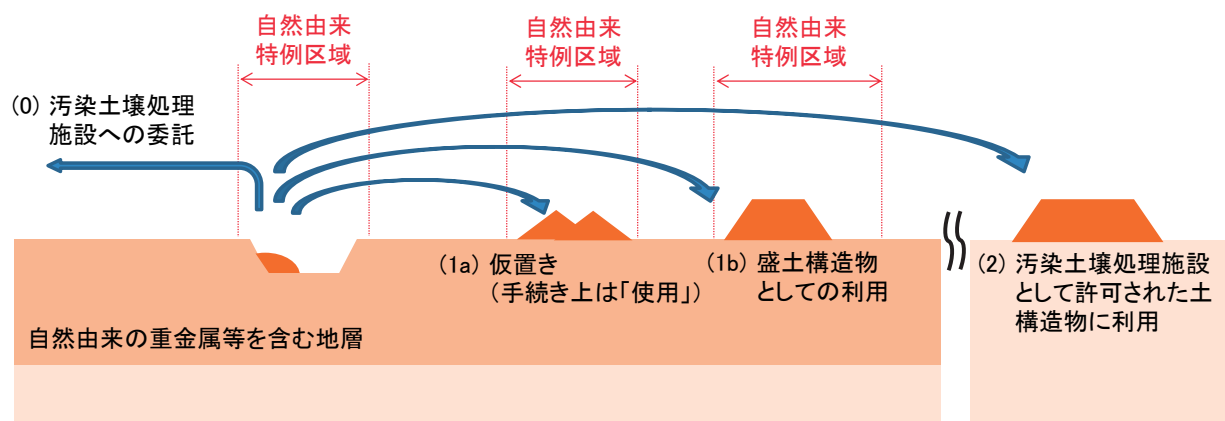


図1 改正土壤汚染対策法における自然由来基準不適合土壌の活用方法のイメージ図（文献⁵⁾より）

（注：土の移動は、基準不適合が自然由来であることが前提である。人為の汚染の可能性が懸念される場合（自然由来特例区域に区域指定された後に施設等が設けられるケースなど）は、人為汚染がないことを確認する必要がある。）

中にジオメンブレン（遮水シート）を敷設して内部を水理学的に隔離する（外部から内部に雨水が入らず、内部の水が外に出ない）などの方策がとられた盛土のことである。対策盛土には、ジオメンブレンの敷設のほかにも、遮水粘土層の敷設、不溶化材の混合、原地盤の緩衝能の活用などの方法がある。

5. 国土交通省のマニュアル

掘削する全ての土砂（土壌）が、土対法の対象となるわけではない。土対法では、面積3000 m²以上（条件によっては900 m²以上）の土地で形質変更を行うときに調査を義務付けており、その結果、基準超過の土壌があれば指定区域に指定される。また、当該地の面積が3000 m²未満であったり、そもそも対象が土壌ではなく岩石であれば、土対法の対象とならない。したがって、自然由来の重金属等を含む土でも、法対象外となるものは相当数存在する。

このような法対象外の土は、2010年に国土交通省から出された「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）」⁸⁾などに基づいて、2019年の改正法の施行前にも対策盛土等としての利用が進められた。整理すると、自然由来が法に含まれることになった2010年から自然由来土の活用が法制度化された2019年は、法対象の自然由来土は活用できなかったが、法対象外の自然由来土は活用が行われていた。この法対象外の土の利用の実績があったからこそ、土対法の改正が実現し、合理化がはかられたものと筆者

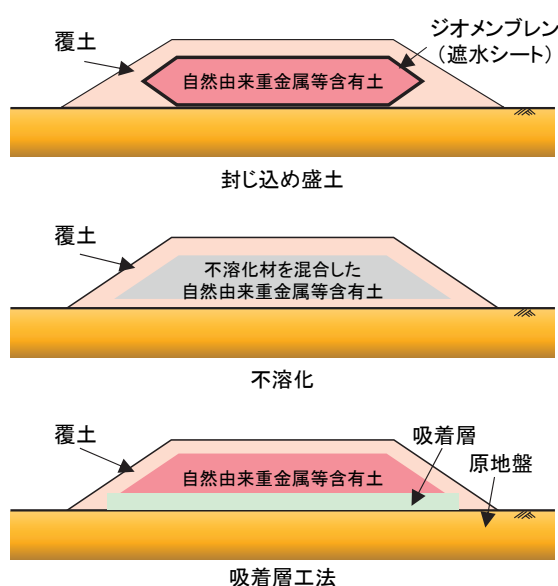


図2 対策盛土（自然由来の重金属等を含む発生土の活用にあたって、リスク低減対策が施された盛土）の例

は考えている。なお、このマニュアルは「国交省マニュアル」と呼ばれることが多い。2023年3月には改訂版が出されている⁹⁾。

6. 自然由来の重金属等の特性を考慮した、あるべき方向性について

自然由来の重金属等は、基準を超過していたとしても、大きく超過している事例は少なく、基準の数倍程度におさまっているものが多い。このことが、前述の法制度や国交省マニュアルにおける土の活用の科学的根拠の一つになっていると考えられる。（もちろん、地質によっては非常に高濃度の重金属等を含むものもあり、これらは区別して考えるべきである。）したがって、著しく高い濃度で基準超過することはないだろうとの見立てに裏付けを与える上でも、また、地下水汚染の影響がないレベルの濃度だろうとの見当をつける上でも、活用しようとする土の濃度について予め見当がつけられるのがのぞましい。地域の特徴的な個々の地質について、自然由来の重金属等の種類や含有量・溶出特性などを把握しておけば、このような予めの見当の参考になる。図3は、法に基づき自治体に提出された調査結果から鉛、ヒ素の濃度データを拾ってその分布を確かめたもので、対象は沖積粘土層である。ヒ素では9割の土で基準の10倍以内におさまっており、鉛では同じく9割の土で基準の3倍以内におさまっている¹⁰⁾。このような特徴を地質ごとに把握しておくことで、上記に示した活用が計画段階からとりあげられやすくなると考えられる。

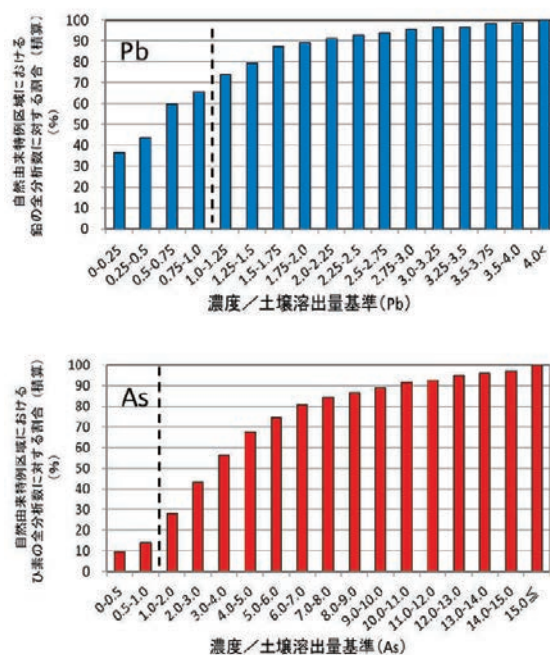


図3 自然由来特例区域におけるヒ素の土壌溶出量の基準値超過程度の例¹⁰⁾

このように、自然由来の重金属等を含む土は、技術上の蓄積と制度化によって、有効活用が可能となっている。一方、全国の多くの自治体が独自に定める、いわゆる「残土条例」では、基準不適合の土はいかなる場合も使ってはならないとされているところが少なくない。これには、自然由来の重金属等を含む土も該当する。各自自治体・地域に固有の条件や課題に配慮しながら、法の趣旨や土の取扱いのあるべき姿との整合がはかられていくことが期待される。

7. 社会情勢・制度の影響を受ける土のマネジメント

3～6章では土に含まれる有害物質、特に自然由来の重金属等に関する事項を述べたが、本章では再び発生土全般に関する事項に戻りたい。

現代社会をとりまく環境をあらわすキーワードとして、SDGsやカーボンニュートラル、経済合理性や効率性、コンプライアンスなどがあり、これらは社会の制度やコンセンサスとして土のマネジメントにも影響を及ぼしているものと考えられる。土の掘削、運搬、盛立あるいは処分（堆積）、そして維持管理といったプロセスでは、複数の複数の者（社）が関わることがほとんどである。例えば、土を発生する工事を実施する者と盛土を行う者とが異なり、また、それぞれの工事で発注者・施工者が存在し、施工者の下には別の者が個々の仕事を請け負うなど、様々な形態がある。効率化や経済合理性を目指すのであれば、事業を細分化し、専門性の高い複数の者（社）がそれぞれの領域に責任をもって業務を遂行することが考えられる。また、複数者の競争によって価格低下が達成されるメリットもある。掘削側工事のクライアント（発注者や消費者）の満足度は、できあがった成果物の品質と価格等によるが、そこに発生土対応のコストはどのように付加されるであろうか。発生土の処分にはできるだけコストをかけたくない。しかしながら、盛土築造や維持管理のコストを不当に減らすと、盛土の不安定や崩壊などのリスクが生じうる。複数者が関わっていると、弱い者（社）にコストやリスクを押し付けたり、あるいはリスクの存在を見えなくしてしまう（そして先送りしてしまう）という危険性が生じうる。様々な場面でみられる経済合理性・効率化への要求は、このような傾向に拍車をかけているものと考えられる。

土の利用にあたってコンプライアンスの側面からみれば、様々な規則に従う必要がある。しかし、「決まりに従っておけばよい」「自らが考える余地はない」というわけではない。例えば、自然由

来土のような比較的低濃度でこれまで特段のリスクがなかったものも、掘削などの人間の手が加わると、基準を超えていることのみによりリスクへの過剰な懸念が生じて、利用を制限している例がみられる。しかしながら自然由来土の章（4～6章）で述べたように、基準を超えていても、適切な対応を施しながら土を使うことは認められている。その際に求められているのは、様々な制約条件のもとで、地域の特性や工事、土質に応じ、そして目的に応じて、創意工夫をして問題解決をはかっていく「創造的な営み」である。同時に、可能性あるリスクを正しく理解し、リスクを減らすために必要なコストを関係者が協力して負担するという意識をもつことが求められる。

末尾ながら、本稿は筆者の既発表原稿¹¹⁾を部分的に編集してまとめている。また、本稿をまとめるにあたり、多くの方々に日頃よりご教示を頂いたことが参考になっている。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省（2020）：平成30年度建設副産物実態調査結果。
- 2) 国土交通省（2020）：建設リサイクル推進計画2020 — 「質」を重視するリサイクルへ。
- 3) 内閣府（2021）：盛土による災害の防止に関する検討会提言。
- 4) 東京都（2022）：環境・経済・社会に配慮した持続可能な土壌汚染対策ガイドブック。
- 5) 勝見 武（2019）：法改正等を踏まえ、自然由来物質を含む土への対応を考える、基礎工, Vol.47, No.6, pp.2-5。
- 6) 環境省（2022）：土壌汚染対策法ガイドライン第2編 汚染土壌の運搬に関するガイドライン（改訂4.1版）。
- 7) 環境省（2022）：土壌汚染対策法ガイドライン第3編 汚染土壌の処理業に関するガイドライン（改訂4.2版）。
- 8) 建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会（2010）：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）。
- 9) 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル改訂委員会（2023）：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（2023年版）。
- 10) 伊藤浩子・勝見 武（2020）：土壌汚染対策法に基づく調査結果からみた西大阪地域における自然由来重金属等の土壌溶出量の特徴、地盤工学ジャーナル, Vol.15, No.1, pp.119-130。
- 11) 勝見 武（2023）：土について、廃棄物資源循環学会誌, Vol.34, No. 4, pp. 231 - 239。

自然由来でヒ素を溶出するトンネル掘削土砂に対する

酸化マグネシウム系材料を用いた不溶化処理および不溶化処理土の長期溶出挙動

大山 将¹⁾

1) (株) 鴻池組 技術研究所 大阪テクノセンター

1. はじめに

重金属等に汚染された土壌の不溶化処理は、土壌汚染対策法において地下水等の摂取によるリスクに対する措置方法の一つとされており、汚染物質の地下水への溶出を防止することで摂取経路を遮断することが可能である。不溶化処理は、処理の前後で汚染物質の含有量（絶対量）が変化しないが、物理・化学的に汚染物質の溶出抑制が可能である。筆者らは土壌汚染対策法施行以前から、固化材を用いた不溶化処理（固化・不溶化処理）を重金属等汚染土壌に対するリスク低減措置の一つとして位置付けて検討を重ねてきた。その過程で、所定の品質に調製した酸化マグネシウム（ MgO ）を主成分とする材料（酸化マグネシウム系材料）が重金属等汚染物質全般に対して高い不溶化効果を発揮することを見出し¹⁾、土壌を固化する性質も合わせ持つことも踏まえ、「マグネシウム系固化材」と称して、実際のサイトへの適用を進めてきた（例えば2)3)4)。

一方、トンネル建設工事などにおいて、自然の岩石などに含まれている重金属等による問題が顕在化している。自然由来の重金属等で基準不適合となる土砂についても、平成22年の改正施行により土壌汚染対策法の対象となったが、トンネル建設工事で坑内から発生する掘削土砂（掘削ズリ）は法対象外となる場合が多く、発生量が膨大となる場合も多いことから、自然由来で重金属等を含む場合は周辺環境への影響を及ぼさないよう、適切な対応が求められる。不溶化処理は、条件によっては比較的簡便かつ低コストで、大量の処理が短期間に実施可能である⁵⁾ことから、自然由来で重金属等を溶出する土砂に対しても、対策方法の一つとして適用を検討されるケースが増加している。なかでも、酸化マグネシウム系材料（マグネシウム系固化材）は重金属等汚染物質全般に対して高い不溶化効果を発揮することや、性状が粉体であり土砂と混合して強度も発現する特長を有していることから、自然由来で重金属等を溶出する土砂への適用性が非常に高いと考えている。

ヒ素汚染土壌に対する不溶化処理は、古くから塩化第二鉄（ FeCl_2 ）や硫酸第二鉄（ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ）な

どの第二鉄塩を添加して難溶性のヒ酸鉄鉄（ FeAsO_4 ）を生成させる方法が示されている⁶⁾⁷⁾が、最適pHは4～5の酸性側であり、不溶化処理後のpHの変動による不溶化効果への影響を受けやすいと考えられる。また、ヒ素は高アルカリ雰囲気で過剰に含まれるカルシウムイオンにより水酸化カルシウム－ヒ酸－水和物（例えば $\text{Ca}_4(\text{OH})_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ）などの難溶性塩⁸⁾を生成するため、セメントや石灰系材料による不溶化処理も有効であるが、不溶化効果を長期間継続するためには不溶化処理土が高アルカリ性雰囲気で維持される必要がある。

筆者はこれまで、トンネル建設工事で遭遇した自然由来でヒ素を溶出する掘削土砂に対して、酸化マグネシウム系材料（マグネシウム系固化材）を用いた不溶化処理を適用した事例について、室内配合試験で作製した不溶化処理土や、実施工時に現場で採取した不溶化処理土を長期間保管し、溶出挙動を追跡調査した結果を報告してきた。本報告では、追跡調査を継続している2つの事例⁹⁾¹⁰⁾について、不溶化処理土の溶出試験の結果を追加したうえで、長期的な溶出挙動について述べる。

2. 酸化マグネシウム系材料（マグネシウム系固化材）の特徴

マグネシウム系固化材（写真1）は酸化マグネシウム（ MgO ）を主成分としており、低アルカリであり、セメントなどに微量に含まれる六価クロム等の重金属を含まない。また、土壌に添加すると、石灰類に見られるポズラン反応と同様の作用が長期間にわたって起こり、低アルカリ域で耐久性のある硬化物が生成され固化する。さらに、重金属等により汚染された土壌全般に対して優れた不溶化効果を発揮することの特徴としている。

固化・不溶化処理は、一般的には汚染土壌にセメント等の固化材を混合して強度をもつ固化体に改質して水密性を向上させ、生成した水和物により汚染物質を物理的に封じ込めること（移動性・溶出性の縮小）とされるが、水和生成物の吸着作用（吸着固定）や、アルカリ雰囲気における水酸化物生成・沈殿や共沈、難溶性塩生成など（溶解

度の減少)の物理・化学的効果との相乗効果により汚染物質を固定化・不溶化するものと考えられる¹¹⁾。マグネシウム系固化材についても、上記の様な種々の作用の相乗効果により高い不溶化効果を発揮するとともに、pH変化に対する緩衝能力が不溶化効果の長期的な安定性に寄与していると考えている。



写真1 マグネシウム系固化材

3. 不溶化処理事例<その1>

3.1 不溶化処理対象掘削土砂

山陰地方のトンネル建設工事において、掘削土砂(掘削ズリ)から自然由来で基準を超えるヒ素の溶出が確認されたことから、室内配合試験で不溶化処理の適用性を検討した。試験には掘削土搬出先に運搬され、仮置きされていた状態の掘削土を採取した(写真2(a))。掘削土を自然含水比状態でよく混合し、9.5 mmフルイを通過したものを試料土とした(写真2(b))。



(a) 有姿・調整前



(b) 調整後・9.5mmフルイ通過試料(試料土)

写真2 自然由来で基準を超えるヒ素を溶出するトンネル掘削土砂

事前分析として、土壌含有量試験(平成15年環境省告示第19号)および土壌溶出量試験(平成15年環境省告示第18号(以下、「環告18号溶出試験」と称する))を実施し、ヒ素の含有量および溶出量を測定した。また、土壌溶出量試験では、溶出操作後の検液pHも測定した(表1)。

ヒ素溶出量は0.16 mg/Lと基準(0.01 mg/L)の16倍、土壌含有量は47 mg/kgと基準(150 mg/kg)を下回ったが、ともに自然由来のヒ素としてはやや高い値であった。なお、不溶化材の比較や長期的な安定性を確認するうえでは、十分な量のヒ素を含んでいるものとする。

表1 試料土分析結果

ヒ素(As)		pH	湿潤密度 g/cm ³	含水比 %	地盤材料 小分類
含有量 mg/kg	溶出量 mg/L				
47	0.16	9.4	2.271	10.6	GS-F

【備考】湿潤密度は10cmモールドに2.5kgアンマーで3層25回突固めた際の密度

3.2 室内配合試験の方法

不溶化材として酸化マグネシウム系材料(マグネシウム系固化材)、高炉セメントB種(JIS R 5211)および塩化第二鉄液(工業用38%品)を選定し、室内配合試験で比較検討した。酸化マグネシウム系材料は海水系酸化マグネシウムである「スーパーMAG」相当品(宇部マテリアルズ製; 写真1)を使用した。

添加量は過去の実績を参考に、マグネシウム系固化材(粉体添加)は当初40, 60, 80 kg/m³としたが、添加量低減の検討を目的に10, 20, 30 kg/m³を追加した。高炉セメントB種(粉体添加)は60, 80, 100 kg/m³、塩化第二鉄液(38%溶液)は5, 7, 9 L/m³と設定した(最終的には20 L/m³の希釈液として添加した)。ソイルミキサーで試料土と不溶化材を混合して不溶化処理土とし、ポリエチレン袋に密封して恒温室(20℃)で養生して、材齢1日, 3日, 7日に環告18号溶出試験を実施した。残りの不溶化処理土は引き続き袋詰密封養生条件で恒温室(20℃)にて養生・保存した。28日, 77日, 1年, 2年, 3年, 4年, 5年, 10年および15年経過時に環告18号溶出試験を実施し、ヒ素溶出量および検液pHを測定した。

3.3 室内配合試験の結果および長期養生試料の追跡調査

室内配合試験結果およびその後の長期養生試料の追跡調査結果をまとめて表2および図1に示す。

酸化マグネシウム系材料(マグネシウム系固化材)による不溶化処理の結果、通常は適用しない添加量10, 20 kg/m³のケースを除き、添加量が30

表2 各種不溶化材による不溶化処理後のヒ素溶出量および検液 pH 分析結果

不溶化材 種類	区分	室内配合試験						長期養生試料—溶出挙動確認																	
	材齢	1日		3日		7日		28日		77日		1年		2年		3年		4年		5年		10年		15年	
	添加量 kg/m ³ (L/m ³)	ヒ素 溶出 mg/L	pH	ヒ素 溶出 mg/L	pH	ヒ素 溶出 mg/L	pH	ヒ素 溶出 mg/L	pH	ヒ素 溶出 mg/L	pH	ヒ素 溶出 mg/L	pH	ヒ素 溶出 mg/L	pH	ヒ素 溶出 mg/L	pH	ヒ素 溶出 mg/L	pH	ヒ素 溶出 mg/L	pH	ヒ素 溶出 mg/L	pH	ヒ素 溶出 mg/L	pH
酸化マグ ネシウム 系材料 (マグネシ ウム系固 化材)	10	<0.005	10.6	<0.005	10.6	<0.005	10.6	<0.005	10.2	<0.005	9.8	0.012	9.4	0.034	9.4	0.034	9.1	0.034	9.5	0.035	9.0	0.041	9.2	0.042	8.7
	20	<0.005	10.7	<0.005	10.7	<0.005	10.6	<0.005	10.2	<0.005	10.1	<0.005	9.7	<0.005	9.4	<0.005	9.1	<0.005	9.6	<0.005	9.1	0.025	9.2	0.006	8.8
	30	<0.005	10.7	<0.005	10.7	<0.005	10.6	<0.005	10.2	<0.005	10.1	<0.005	9.9	<0.005	10.0	<0.005	9.4	<0.005	9.4	<0.005	9.4	<0.005	9.5	<0.005	9.6
	40	<0.005	10.8	<0.005	10.7	<0.005	10.6	<0.005	10.2	<0.005	10.1	<0.005	10.0	<0.005	10.1	<0.005	9.7	<0.005	9.7	<0.005	9.6	<0.005	9.9	<0.005	9.6
	60	<0.005	10.9	<0.005	11.0	<0.005	10.9	<0.005	10.5	<0.005	10.2	<0.005	10.0	<0.005	10.0	<0.005	9.8	<0.005	9.8	<0.005	9.9	<0.005	10.0	<0.005	9.7
	80	<0.005	10.9	<0.005	11.0	<0.005	10.9	<0.005	10.5	<0.005	10.2	<0.005	10.2	<0.005	10.2	<0.005	9.9	<0.005	9.9	<0.005	9.9	<0.005	10.2	<0.005	9.8
高炉セメ ントB種	60	0.014	11.7	0.006	11.7	0.005	11.7	<0.005	11.5	<0.005	11.5	0.007	10.9	0.012	9.7	0.028	9.0	0.025	9.1	0.025	9.1	0.031	8.8	0.036	8.6
	80	0.006	11.9	<0.005	11.9	<0.005	11.9	<0.005	11.6	<0.005	11.6	<0.005	11.4	<0.005	10.9	<0.005	9.7	0.017	9.1	0.017	9.1	0.022	8.6	0.028	8.3
	100	<0.005	12.1	<0.005	12.0	<0.005	12.0	<0.005	11.7	<0.005	11.7	<0.005	11.5	<0.005	11.1	<0.005	9.7	0.015	9.1	0.015	9.1	0.023	8.4	0.022	8.2
塩化第二 鉄液	3	0.015	8.5	0.041	8.7	0.067	8.9	0.12	8.7	0.11	8.7	0.15	8.8	0.26	8.6	0.21	8.7	0.13	8.4	0.18	8.7	0.14	8.2	0.17	8.1
	5	0.013	8.2	0.031	8.4	0.041	8.7	0.073	8.5	0.065	8.6	0.098	8.6	0.14	8.4	0.14	8.6	0.10	8.3	0.14	8.6	0.12	8.1	0.13	7.9
	7	0.010	8.0	0.026	8.2	0.041	8.6	0.052	8.3	0.050	8.4	0.075	8.5	0.093	8.4	0.090	8.5	0.082	8.3	0.095	8.6	0.095	8.2	0.11	7.8

〔備考〕 添加量単位: 酸化マグネシウム系材料(マグネシウム系固化材)および高炉セメントB種はkg/m³ 塩化第二鉄液はL/m³ 〔備考2〕 赤字は土壌溶出量基準を超過した濃度

～80 kg/m³のケースでは処理直後から15年経過後まで全てヒ素溶出量が0.005 mg/L未満であり、高い不溶化効果と長期間の持続が確認できた。添加量30～80 kg/m³のケースを見ると、検液pHは処理後7日間では10.7～11.0、その後は徐々に低下し、5年経過後では9.4～9.9、10年経過後では9.5～10.2、15年経過後は9.6～9.8と当初より1.1～1.2の低下であった。

酸化マグネシウム系材料(マグネシウム系固化材、主成分:MgO)のpHは10程度で、土壤に添加すると初期はpH 10～11程度、長期的にはpH 9～10程度に落ち着くと従来説明してきたが、15年経過後においても概ねその通りの結果であった。pH変化に対する緩衝能力の高さは不溶化効果の長期的な安定性に寄与する要因の一つと考える。

なお、添加量が非常に少ない10 kg/m³のケースでは1年経過後から基準を超過するヒ素溶出が検出された。添加量20 kg/m³のケースでは5年経過後まではヒ素溶出量が0.005 mg/L未満であり、高い不溶化効果と長期間の持続を確認していたが、10年経過後には0.025 mg/Lと基準を超過するヒ素溶出が検出された。15年経過後ではヒ素溶出量は0.006 mg/Lと基準に適合していたが、検液pHは8.8まで低下していた。添加量10、20 kg/m³は通常は適用しない添加量であるが、不溶化効果の長期間の持続を担保する絶対量が不足していると考えられた。

高炉セメントB種による不溶化処理の結果、添加量60 kg/m³のケースでは材齢1日でヒ素溶出量が0.014mg/Lと基準を超過したが、材齢の経過(3～28日)とともに溶出量は低減し基準に適合した。添加量80、100 kg/m³のケースでは処理直後からヒ素溶出量は基準に適合した。

検液pHは処理後7日間では11.7～12.1、その後は徐々に低下するが、添加量60 kg/m³では1～2年経

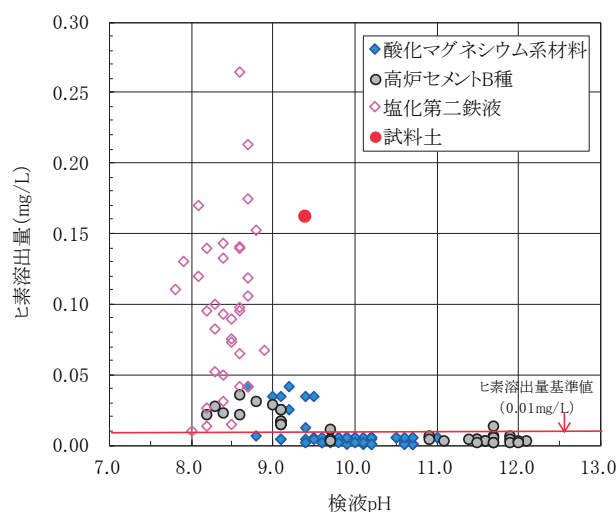


図1 検液pHとヒ素溶出量の関係

過時に1.2、添加量80、100 kg/m³では2～3年経過時に1.2、1.4と大きく低下し、5年経過後にはpHはいずれも9.1と初期と比較して2.6～3.0低下した。10年経過後にはpHは8.4～8.8、15年経過後には8.2～8.6となり、初期と比較して3.1～3.9低下した。

不溶化処理土の大幅なpH低下に伴い、添加量60 kg/m³では2年経過以降、添加量80、100 kg/m³では4年経過以降でヒ素溶出量は基準を超過した。pHの低下(中性化)によりカルシウム高アルカリ雰囲気での難溶性塩生成やセメント水和物中に取り込まれるといったセメントによるヒ素不溶化のメカニズム⁸⁾⁹⁾が崩れ、溶出量が増加したものと考ええる。

塩化第二鉄液による不溶化処理の結果、全てのケースで基準を超過する結果であった。材齢の経過とともにヒ素溶出量および検液pHが増加しており、元来アルカリ性である試料土の緩衝能力により不溶化処理土のpHが継続的に増加し、酸性側もしくはより中性側のpHが望ましい塩化第二鉄によるヒ素不溶化のメカニズム⁹⁾が崩れたものと考え

られた。

3.4 現場不溶化処理土の長期溶出挙動

3.3の室内配合試験の結果から、不溶化効果や長期的な安定性、発現強度などを勘案し、酸化マグネシウム系材料（マグネシウム系固化材）による不溶化処理を採用した。なお、現場添加量については、トンネル掘削土（掘削ズリ）の様な礫質土は現場での混合性が比較的良好であること、汚染物質（ヒ素）の不溶化処理が目的であることなどを考慮し、砂質土等の土質に対するマグネシウム系固化材の最低添加量を30 kg/m³と設定して、これを適用した。

実施工時（写真3）には、現場でマグネシウム系固化材を30 kg/m³添加・混合した不溶化処理土を5,000m³ごとに3回採取して試験室に持ち帰り、試料A～Cとして袋詰密封養生条件で恒温室（20℃）にて養生・保存した。7日、28日、1年～12年経過時に環告18号溶出試験、硫酸添加溶出試験¹²⁾および消石灰添加溶出試験¹²⁾を実施し、ヒ素溶出量および検液pHを測定した。長期養生試料の追跡調査結果を表3に示す。

環告18号溶出試験、硫酸添加溶出試験および消石灰添加溶出試験のいずれも、処理直後から12年経過後まで、ほとんどの試料のヒ素溶出量が0.002 mg/L未満であった。現場で採取して試験室に持ち帰った不溶化処理土でも、高い不溶化効果とpH変化に対する安定性が長期間持続していることを確認することができた。



写真3 酸化マグネシウム系材料による
現場での不溶化処理状況
(自走式土質改良機を用いた混合状況)

4. 不溶化処理事例<その2>

4.1 不溶化処理対象掘削土砂

近畿地方のトンネル建設工事において、掘削土砂（掘削ズリ）から自然由来で基準を超えるヒ素の溶出が想定されたことから、トンネル掘削前に

表3 現場不溶化材処理土の溶出挙動

材齢	溶出試験 方法	試料A		試料B		試料C	
		ヒ素 (mg/L)	pH	ヒ素 (mg/L)	pH	ヒ素 (mg/L)	pH
7日	環告18号	<0.002	10.1	<0.002	10.3	<0.002	10.1
	硫酸添加	<0.002	9.9	<0.002	10.3	<0.002	10.1
	消石灰添加	<0.002	10.4	<0.002	11.0	<0.002	10.3
28日	環告18号	<0.002	10.2	<0.002	10.1	<0.002	10.0
	硫酸添加	<0.002	10.0	<0.002	9.8	<0.002	9.9
	消石灰添加	<0.002	10.8	<0.002	10.2	<0.002	9.9
1年	環告18号	<0.002	9.9	<0.002	9.8	<0.002	10.1
	硫酸添加	<0.002	9.8	<0.002	9.8	<0.002	10.0
	消石灰添加	<0.002	10.0	<0.002	10.5	<0.002	10.9
2年	環告18号	<0.002	9.9	<0.002	9.5	<0.002	9.7
	硫酸添加	<0.002	9.8	<0.002	9.5	<0.002	9.6
	消石灰添加	<0.002	10.7	<0.002	10.8	<0.002	9.8
3年	環告18号	<0.002	9.8	<0.002	9.7	<0.002	9.5
	硫酸添加	<0.002	9.6	<0.002	9.4	<0.002	9.4
	消石灰添加	<0.002	9.9	<0.002	9.9	<0.002	9.6
4年	環告18号	<0.002	9.8	<0.002	9.9	<0.002	9.3
	硫酸添加	<0.002	9.8	<0.002	9.8	<0.002	9.6
	消石灰添加	<0.002	10.3	<0.002	10.3	<0.002	9.6
5年	環告18号	<0.002	9.8	<0.002	9.7	<0.002	9.4
	硫酸添加	<0.002	9.7	<0.002	9.6	<0.002	9.3
	消石灰添加	<0.002	9.9	<0.002	9.7	<0.002	9.4
6年	環告18号	<0.002	9.8	<0.002	9.7	<0.002	9.5
	硫酸添加	<0.002	9.9	<0.002	9.8	<0.002	9.7
	消石灰添加	<0.002	10.3	<0.002	10.1	<0.002	9.9
7年	環告18号	<0.002	9.8	<0.002	9.8	<0.002	9.5
	硫酸添加	<0.002	9.7	<0.002	9.7	<0.002	9.3
	消石灰添加	<0.002	10.0	<0.002	9.8	<0.002	9.6
8年	環告18号	<0.002	9.7	<0.002	9.5	<0.002	9.2
	硫酸添加	<0.002	9.9	<0.002	9.7	<0.002	9.5
	消石灰添加	<0.002	9.9	<0.002	10.1	<0.002	9.7
9年	環告18号	<0.002	10.1	<0.002	9.9	<0.002	9.9
	硫酸添加	<0.002	9.9	<0.002	9.7	<0.002	9.8
	消石灰添加	<0.002	10.1	<0.002	10.1	<0.002	10.0
10年	環告18号	<0.002	9.7	<0.002	9.2	<0.002	9.6
	硫酸添加	<0.002	9.8	<0.002	9.2	<0.002	9.7
	消石灰添加	<0.002	9.6	<0.002	9.7	<0.002	9.6

実施した水平ボーリングのコア試料を用いて、酸化マグネシウム系材料（マグネシウム系固化材）による掘削対象土砂の不溶化処理を検討した。

水平ボーリングで採取されたコア試料の中から、調査結果でヒ素溶出量が最も高かった区間（10 m）のうち5 m分のコア（砂岩）を採取した。これを9.5 mmふるいに全通するまでハンマで粉砕して土砂状とし、あらためて9.5 mmふるいを通させて均一に混合し、試料土として調整した（写真4）。



写真4 調整後の試料土の状況

試料土に対して、土壌含有量試験（底質調査方法および平成15年環境省告示第19号）および土壌溶出量試験（平成15年環境省告示第18号）を実施し、ヒ素の含有量および溶出量を測定した。また、土壌溶出量試験では、溶出操作後の検液pHも測定した（表4）。溶出量は基準（0.01 mg/L）を6.0倍超過していることを確認した。含有量については、自然由来の汚染と判断する際の上限値の目安（39 mg/kg）¹³⁾および基準（150 mg/kg）と比較して十分低い値であった。

表4 試料土分析結果

ヒ素(As)				含水比 %	湿潤 密度 g/cm ³	地盤 材料 小分類
含有量		溶出量				
底質調査 mg/kg	環告19号 mg/kg	環告18号 mg/L	検液 pH			
5.2	<5	0.060	8.8	3.60	1.874	SFG

【備考】湿潤密度は10cmモールドに2.5kgアンマーで3層25回突固めた際の密度

4.2 室内配合試験の方法

不溶化材は、酸化マグネシウム系材料（マグネシウム系固化材）として「スーパーMAG」（宇部マテリアルズ製；写真1）を使用した。

配合試験の条件として、不溶化材の室内添加量は、①試料土の土質性状（細粒分質礫質砂SFG）、②原土分析によるヒ素溶出量濃度（基準6.0倍超過）、③現場施工における最低添加量（酸化マグネシウムと同様の性状である消石灰を用いた安定処理では最低添加量の目安を30 kg/m³としている¹⁴⁾）、④マグネシウム系固化材による他の配合試験のデータなどを考慮し、30 kg/m³の1配合のみを設定した。

試料土とマグネシウム系固化材（粉体）をソイルミキサーで1分間混合して不溶化処理土とし、ポリエチレン袋に密封して20℃の恒温室内で養生した。材齢3日、7日、28日および長期養生試料として材齢1年、2年、3年、4年の時点で不溶化処理土の一部を分取し、土壌溶出量試験（平成15年環境省告示第18号）および検液pHの測定を行った。また、不溶化効果の安定性について評価するため、材齢7日および材齢1年、2年、3年、4年の不溶化処理土について、平成15年環境省告示第18号溶出試験に加えて、硫酸添加溶出試験¹²⁾および消石灰添加溶出試験¹²⁾および検液pHの測定を実施した。

4.3 室内配合試験の結果および長期養生試料の追跡調査

室内配合試験結果およびその後の長期養生試料の追跡調査結果をまとめて表5に示す。

表5 不溶化処理土の分析結果

材齢	環告18号溶出試験		硫酸添加溶出試験		消石灰添加溶出試験	
	ヒ素 溶出量 mg/L	検液 pH	ヒ素 溶出量 mg/L	検液 pH	ヒ素 溶出量 mg/L	検液 pH
3日	<0.002	10.2	—	—	—	—
7日	<0.002	10.1	<0.002	10.1	<0.002	10.9
28日	<0.002	10.1	—	—	—	—
1年	<0.002	10.0	<0.002	9.9	<0.002	11.2
2年	<0.002	9.7	<0.002	9.7	<0.002	10.7
3年	<0.002	9.9	<0.002	9.8	<0.002	10.1
4年	<0.002	9.8	<0.002	9.7	<0.002	10.1

マグネシウム系固化材30 kg/m³添加による不溶化処理で、若材齢（3日、7日、28日）および長期材齢（1年、2年、3年、4年）のいずれの不溶化処理土においても、ヒ素溶出量が0.002 mg/L未満と基準（0.01 mg/L以下）に適合しており、安定して高い不溶化効果が確認された。

硫酸添加溶出試験および消石灰添加溶出試験の結果、マグネシウム系固化材による不溶化処理土はヒ素溶出量が増加すること無く0.002 mg/L未満と基準適合（0.01mg/L以下）を維持したことから、不溶化効果のpH変化に対する安定性が高いことが確認された。特に、溶出試験検液pHは9.7～11.2の狭い範囲に集まった。これは、pHの変化に対する緩衝能力が高く、長期にわたって環境条件の変化による影響を受けにくいことを示している。

なお、今回のケースでは、室内配合試験の結果を材齢1年の時点まで確認し、その後、実際に現場において不溶化処理が施工された。事前検討の段階で、長期材齢の不溶化効果まで確認することは希ではあるが、トンネル掘削に先立って実施された水平ボーリング調査で採取したコア試料を用いて、早期に不溶化処理の検討を行うことができたため、不溶化処理を実施するか否かを判断する時期に、長期材齢（1年）の不溶化効果について確認することができたものと考えている。

4.4 現場不溶化処理土の長期溶出挙動

4.3の室内配合試験の結果をふまえ、現場では不溶化材として酸化マグネシウム系材料（マグネシウム系固化材）を採用し、基準不適合となったトンネル掘削土砂の一部（約2,900 m³）に対して添加量30 kg/m³で不溶化処理を行い（写真5）、所定の位置に埋め戻した。埋め戻された不溶化処理土を異なる4箇所から採取し、現場品質管理の分析用に一部を分取した後、残りの試料を試験室に持ち帰って、ポリエチレン袋に密封して20℃の恒温室内で養生した。材齢1年～8年の試料について、室内配合試験と同様に、平成15年環境省告示第18号溶出試験、硫酸添加溶出試験¹²⁾および消石灰添加



写真5 不溶化処理状況（上：不溶化材散布，
下：バックホウによる攪拌・混合）

溶出試験¹²⁾を実施した。現場品質管理として実施した施工時の土壌溶出量試験の結果と併せて、試験結果を表6に示す。

A-①試料については、土壌溶出量試験および硫酸添加溶出量試験において0.002～0.004 mg/Lのヒ素溶出量が認められたが、施工時のヒ素溶出量も0.002 mg/Lであり、大幅な溶出量増加は認められなかった。その他の試料については、全てヒ素溶出量が0.002 mg/L未満であり、総じて基準適合（0.01 mg/L以下）と安定して高い不溶化効果、および、不溶化効果のpH変化に対する安定性が長期間持続することが確認された。

溶出試験検液pHは、土壌溶出量試験では8.8～10.0、硫酸添加溶出試験では8.6～9.6、消石灰添加溶出試験では10.9～11.4と、それぞれ狭い範囲に集まっており、実際の不溶化処理土についても、pHの変化に対する緩衝能力が高く、長期にわたって環境条件の変化による影響を受けにくいことが示された。

5. おわりに

トンネル建設工事で遭遇した自然由来でヒ素を溶出する掘削土砂に対して、酸化マグネシウム系材料（マグネシウム系固化材）を用いた不溶化処理を適用した事例のうち、室内配合試験で作製し

表6 現場不溶化処理土の分析結果

試料 名称	材齢	環告18号溶出試験		硫酸添加溶出試験		消石灰添加溶出試験	
		ヒ素 溶出量 mg/L	検液 pH	ヒ素 溶出量 mg/L	検液 pH	ヒ素 溶出量 mg/L	検液 pH
A-①	(施工時)	0.002	—	—	—	—	—
	1年後	0.004	9.8	0.002	9.2	<0.002	11.3
	2年後	0.002	10.0	0.002	9.2	<0.002	11.4
	3年後	0.002	9.9	<0.002	9.3	<0.002	11.3
	4年後	0.002	9.6	0.002	9.1	<0.002	11.3
	5年後	0.002	9.9	0.002	9.0	<0.002	11.4
	6年後	0.002	9.4	0.002	9.1	<0.002	11.5
	7年後	<0.002	9.4	<0.002	9.3	<0.002	11.0
	8年後	0.002	9.6	0.002	8.8	<0.002	11.2
A-②	(施工時)	<0.002	—	—	—	—	—
	1年後	<0.002	9.5	<0.002	9.2	<0.002	11.2
	2年後	<0.002	9.8	<0.002	9.3	<0.002	11.2
	3年後	<0.002	9.8	<0.002	9.4	<0.002	11.2
	4年後	<0.002	9.1	<0.002	9.0	<0.002	11.0
	5年後	<0.002	9.8	<0.002	9.3	<0.002	11.1
	6年後	<0.002	9.2	<0.002	9.4	<0.002	11.3
	7年後	<0.002	9.4	<0.002	9.2	<0.002	11.0
	8年後	<0.002	9.4	<0.002	8.6	<0.002	10.9
B-①	(施工時)	<0.002	—	—	—	—	—
	1年後	<0.002	9.4	<0.002	9.2	<0.002	11.0
	2年後	<0.002	9.5	<0.002	9.2	<0.002	11.1
	3年後	<0.002	9.5	<0.002	9.3	<0.002	11.1
	4年後	<0.002	8.8	<0.002	8.9	<0.002	11.1
	5年後	<0.002	9.6	<0.002	9.2	<0.002	11.1
	6年後	<0.002	9.0	<0.002	9.2	<0.002	11.3
	7年後	<0.002	9.2	<0.002	9.1	<0.002	11.1
	8年後	<0.002	9.2	<0.002	9.0	<0.002	10.9
B-②	(施工時)	<0.002	—	—	—	—	—
	1年後	<0.002	9.7	<0.002	9.3	<0.002	11.1
	2年後	<0.002	9.9	<0.002	9.3	<0.002	11.2
	3年後	<0.002	9.8	<0.002	9.6	<0.002	11.4
	4年後	<0.002	9.5	<0.002	9.3	<0.002	11.2
	5年後	<0.002	9.8	<0.002	9.5	<0.002	11.2
	6年後	<0.002	9.4	<0.002	9.4	<0.002	11.3
	7年後	<0.002	9.5	<0.002	9.3	<0.002	11.1
	8年後	<0.002	9.4	<0.002	9.1	<0.002	11.0

た不溶化処理土や、実施工時に現場で採取した不溶化処理土を長期間保管し、溶出挙動を調査した結果について報告した。

酸化マグネシウム系材料（マグネシウム系固化材）は重金属等全般に対して優れた不溶化効果を発揮すること、緩衝能力も高く長期間にわたり不溶化効果を持続すること、性状が粉体であり土砂と混合して適度な強度を発現するため、液体系の薬剤を用いた不溶化処理の場合にしばしば懸念される強度付与の問題もないという特長を有しており、トンネル建設工事などで遭遇する自然由来で重金属等を含む土砂への対応に関して、適用性が非常に高いと考えている。

本報告が不溶化処理の理解と適用に寄与し、汚染の程度や健康被害のおそれの有無に応じた合理的で適切な対策の推進の一助となれば幸いである。

謝辞

本報告の寄稿の機会を与えてくださいました日本物理探査（株）内田篤貴氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 特許公報 (特許第4109017号)
- 2) 大山将, 小山孝, 日高厚, 2005, マグネシウム系固化材を用いた重金属等汚染土壌の固化・不溶化処理事例, 第6回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.173-176
- 3) 大山将, 奥村正孝, 小山孝, 日高厚, 三成裕一, 2005, マグネシウム系固化材によるフッ素汚染土壌の固化・不溶化処理事例, 第11回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, S5-2, pp.584-587
- 4) 大山将, 2009, 酸化マグネシウム系材料による重金属等汚染土壌の不化処理事例と長期安定性, 第8回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.179-184
- 5) 大山将, 2003, 重金属等汚染土壌の固化・不溶化, 建築技術, No.639, pp.126-127
- 6) 環境庁水質保全局土壌農薬課監修, 1992, 土壌汚染対策ハンドブック, 公害研究対策センター, pp.52-55
- 7) 平田健正監修, 土壌環境センター編, 2001, 土壌汚染と対応の実務, オーム社, p.133
- 8) Bothe, J.V.Jr, Brown, P.W. , 1999, Arsenic immobilization by calcium arsenate formation, Environmental Science & Technology, Vol.33, No.21, pp.3806-3811
- 9) 大山将, 2022, 自然由来でヒ素を溶出するトンネル掘削土砂に対する酸化マグネシウム系材料を用いた不溶化処理土の長期溶出挙動, 地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.3, pp. 249-254
<https://doi.org/10.3208/jgs.17.249>
- 10) 大山将, 2018, 自然由来でヒ素を溶出するトンネル掘削土砂に対する酸化マグネシウム系材料を用いた不溶化処理に関する検討 (その2), 第24回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, S1-12, pp.45-49
- 11) Glasser, F.P., 1997, Fundamental aspects of cement solidification and stabilization, Journal of Hazardous Materials, 52(2-3), pp.151-170
- 12) 土壌環境センター, 2008, GEPC技術標準「重金属等不溶化処理土のpH変化に対する安定性の相対的評価方法」, GEPC・TS-02-S1
- 13) 環水大土発第1903015号 (改正 環水大土発第2202212号), 2022, 土壌汚染対策法の一部を改正する法律による改正後の土壌汚染対策法の施行について, <https://www.env.go.jp/content/000045235.pdf> (2023年7月閲覧)
- 14) 日本石灰協会, 2016, 石灰による地盤改良マニュアル (第7版)

谷底平野に潜在する旧河道と地質リスクについて

伊藤 直基¹⁾

1) 日本物理探査株式会社 北陸支店

1. はじめに

新潟県加茂市を流れる信濃川水系の一级河川下条川では、信濃川の計画水位見直しに伴う河川整備が計画されており、下流側では堤防の嵩上げ、上流側では築堤、掘削、護岸、既設橋梁の架替えが計画されていた。

河川改修工事において、既存地質調査資料からバイプロハンマ工法による鋼矢板打設が検討されていた。しかし、諸条件の変更により油圧圧入工法へ変更となったが、想定よりも岩盤分布深度が浅く、所定の深度まで矢板が打設できないという事案が発生した(図-1)。そこで、矢板の計画打設深度内における岩盤分布を把握する目的で、現況河川沿いに地質調査を実施した。本稿では、調査によって明らかとなった谷底平野の岩盤形状と地質リスクについて紹介する。



図-1 鋼矢板による仮締切

想定より浅い泥岩により矢板は所定深度に達していない

2. 地形・地質概要

当該地域は、標高 100m 程度の丘陵が開析された谷地形を呈し、狭長な谷底平野となっている。周囲は山地に囲まれ、所々に弧状の急傾斜面がみられる。急峻な所では高低差 50m、斜度 37° の攻撃斜面となっている(図-2)。

現況河川は、自由蛇行の形態を示すが、これまでの河川改修により部分的に直線化されている。

調査地の地質は、新第三紀鮮新世～第四紀前期更新世の砂質シルト岩・泥質砂岩が基盤をなし、これを軟弱な粘性土、緩い砂質土・礫質土からなる完新世の河川堆積物が覆っている。

地すべり地形分布図(防災科研)によれば、下条川流域には地すべり地形は確認されていない。

3. 調査概要

本調査では、図-2 に示す現況河川沿い及び周辺にてスクリーウエイト貫入試験 45 箇所、垂直電気探査 4 箇所を実施し、既存のボーリング資料も含めて地盤モデルを作成し、工区内の岩盤分布について推定・考察を行った。

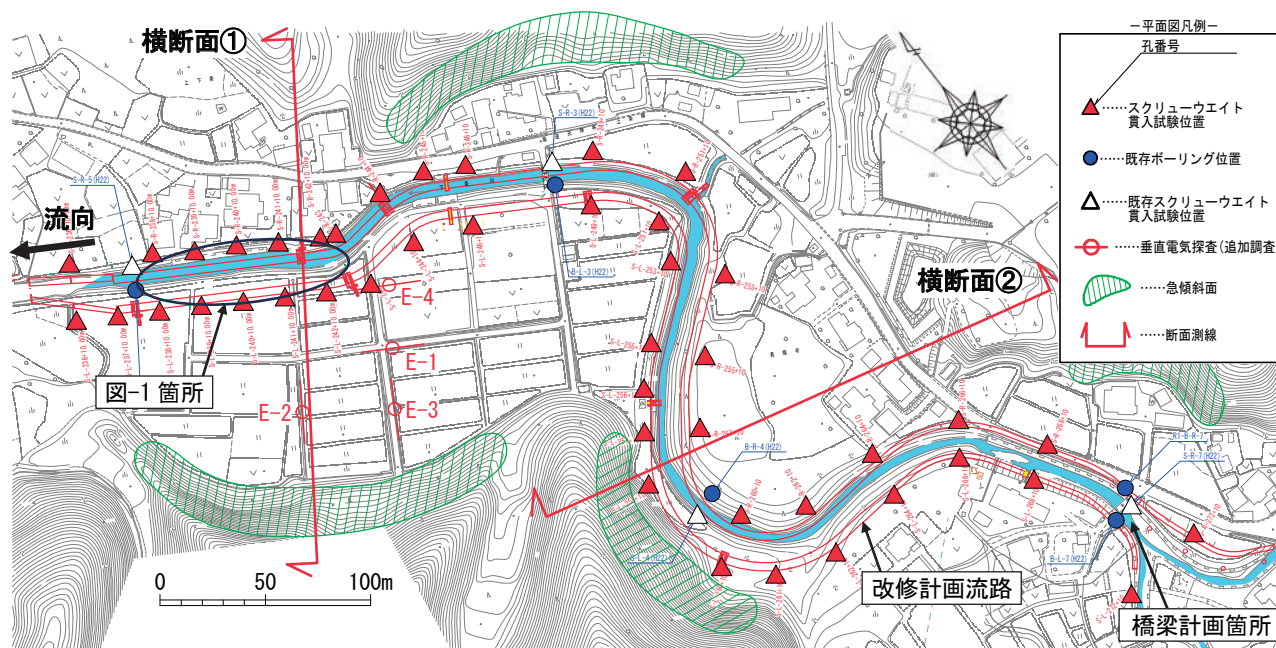


図-2 調査位置平面図

4. 調査結果・考察

現況河川の縦断方向における地質断面図を作成したところ、本調査地の特徴として、①縦断方向での岩盤の起伏が大きいこと、②左右岸で岩盤の分布深度が大きく異なることが確認された（図-3）。これらの結果から、追加調査として垂直電気探査

を行い、地質調査を行っていない範囲について岩盤の分布を推定した。本調査では、長い測線延長を確保できない地形条件や、Wenner 法と比べ深部の探査に適していることから、Schlumberger 法電極配置で測定を行った。また、探査深度は測線展開上の限度であった 32m とした（図-4）。

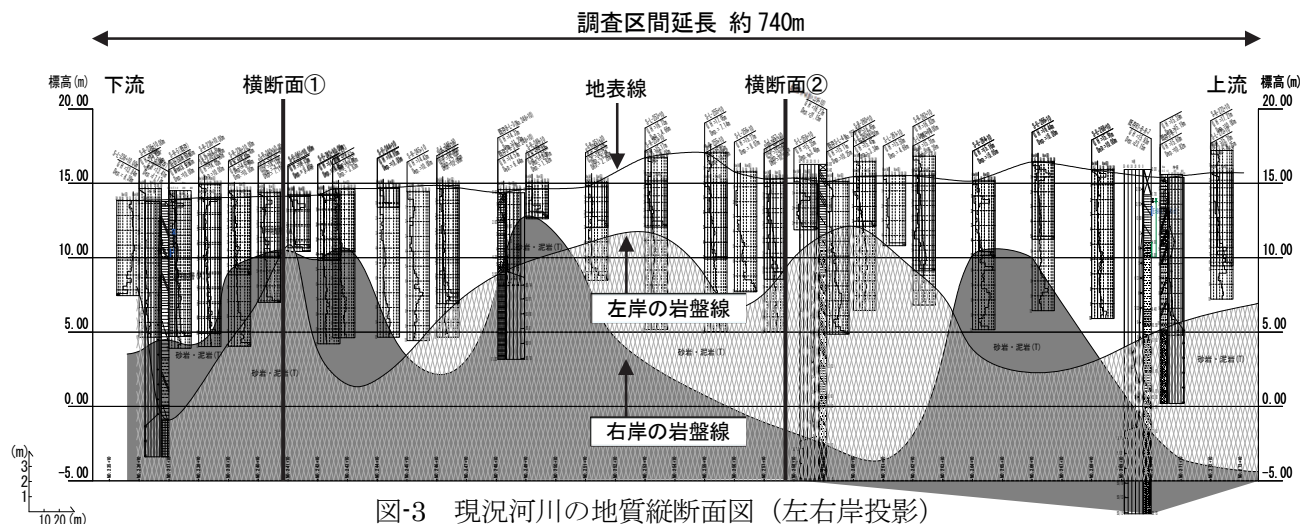


図-3 現況河川の地質縦断面図（左右岸投影）

現況河川の岩盤分布について、縦断・横断方向ともに起伏が大きい

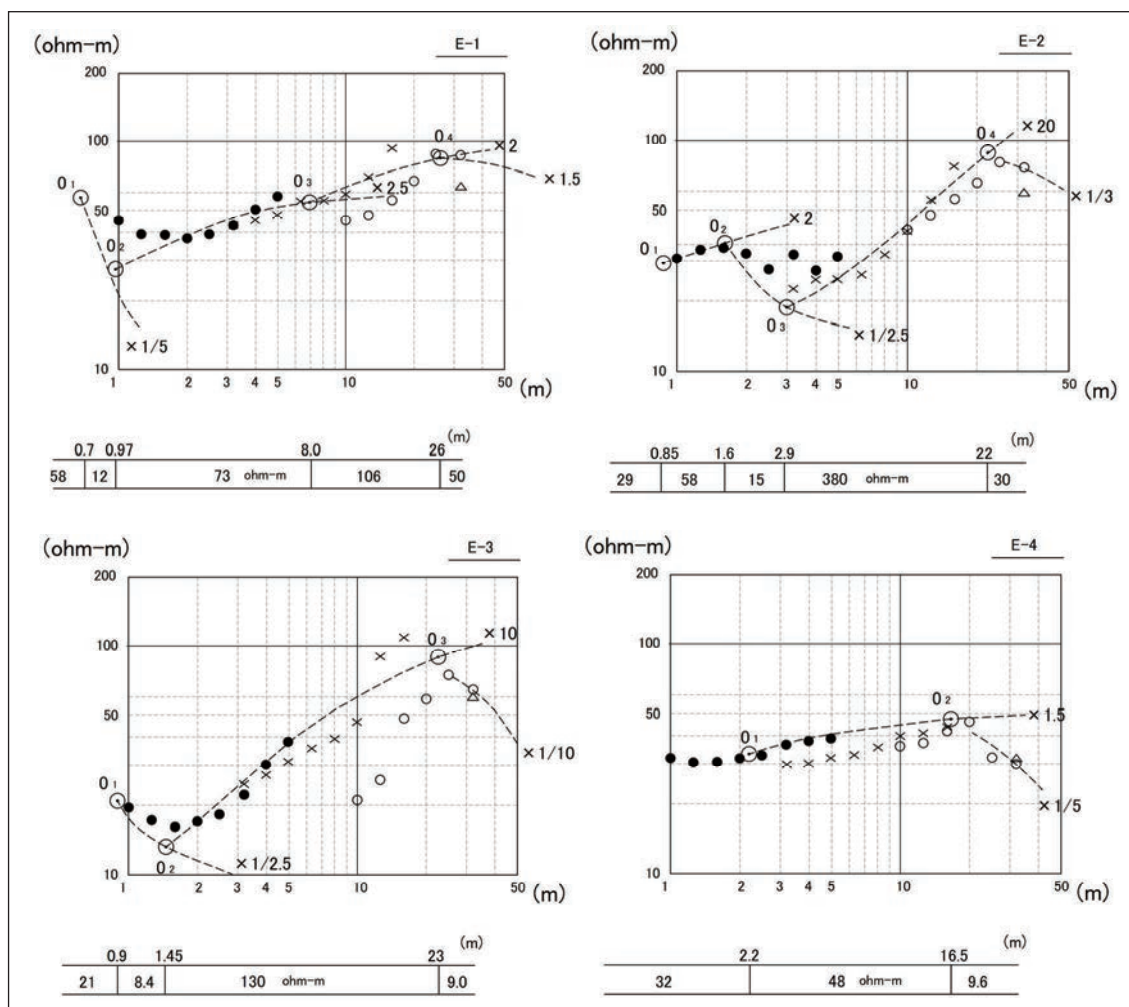


図-4 垂直電気探査結果（Schlumberger 法電極配置）

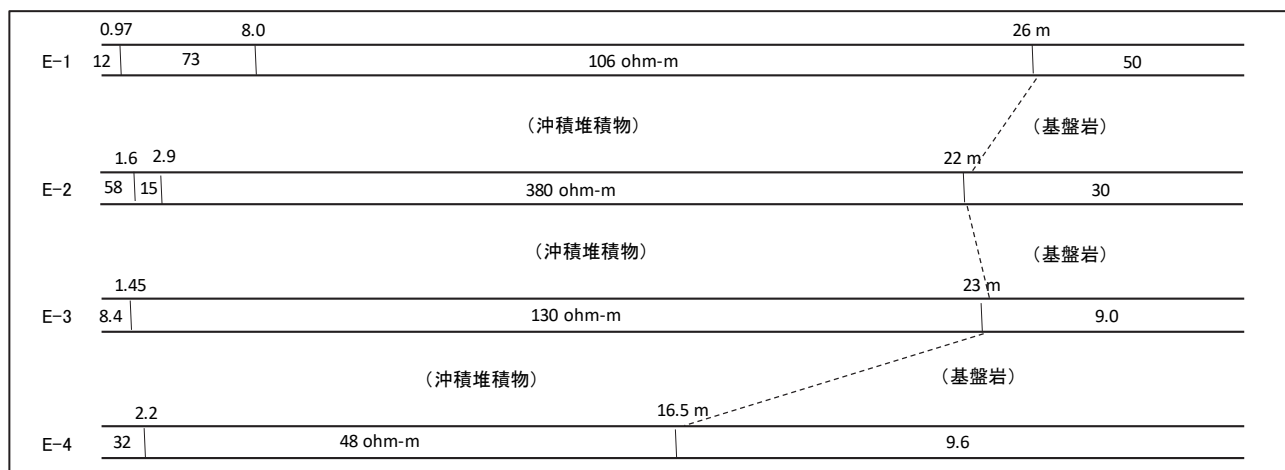
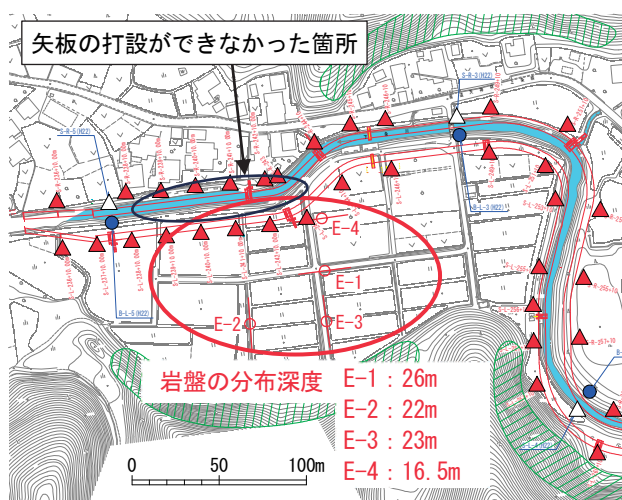


図-5 垂直電気探査結果の整理

図-6 垂直電気探査各地点の岩盤分布深度
現況河川に近い E-4 は他地点と比べ岩盤分布深度が浅い

沖積堆積物は粘土、砂、礫などからなる未固結の堆積物で、これらのうち数 ohm-m の場合は細粒土、数 10~100ohm-m 以上の比抵抗値の高い部分は砂や礫が優勢の土質であるものと判断される。基盤層の比抵抗値は数~数 10ohm-m を示しており、上位層とは明確に区分され、これらは泥岩や砂岩からなるものと判断される。

これらの結果も踏まえて岩盤の推定 3D モデルを作成したところ、沖積層下位の岩盤は深い谷地形を形成しており、旧河道は穿入蛇行の形態を示すことが明らかとなった(図-7)。推定 3D モデルから、旧河道は現況河川と比較して大きく蛇行しており、カーブの外側(攻撃斜面)では岩盤の傾斜が急になっている(図-8)。

また、推定 3D モデルの作成においては、谷底平野の沖積層下位に潜在する岩盤と周辺地山に連続性があるものと仮定し、傾斜を推定した。当調査で

はボーリング及びスクリーウエイト貫入試験結果の補間として岩盤の分布深度を把握するため、中心付近の精度が高い垂直電気探査を実施した。しかし、ダイポール・ダイポール法等の比抵抗二次元電気探査を行うことができれば岩盤の傾斜等、地下構造の連続性を確認することでより精度の高い 3D モデルを作成し、より詳細な岩盤分布を把握できた可能性があるが、今後の課題としたい。

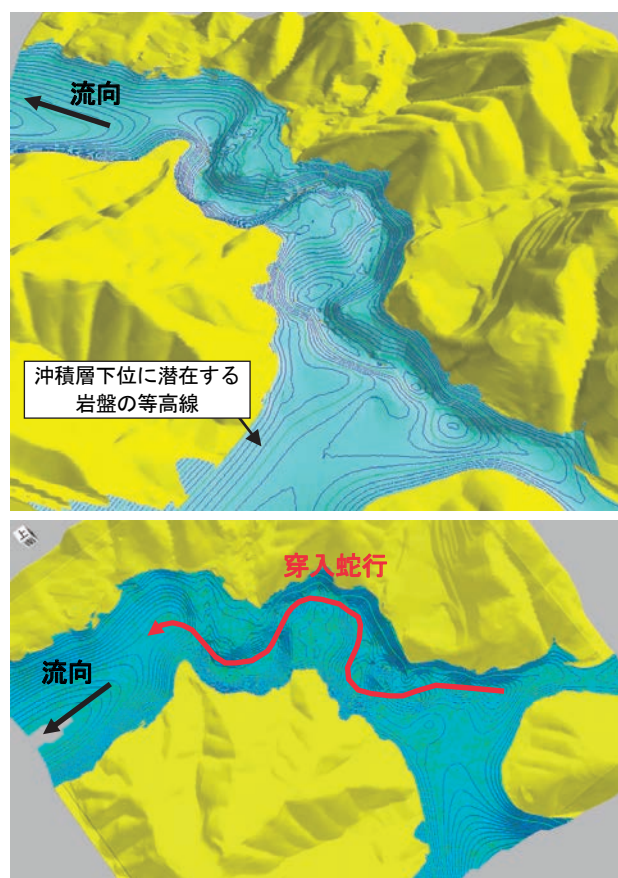


図-7 岩盤の推定 3D モデル

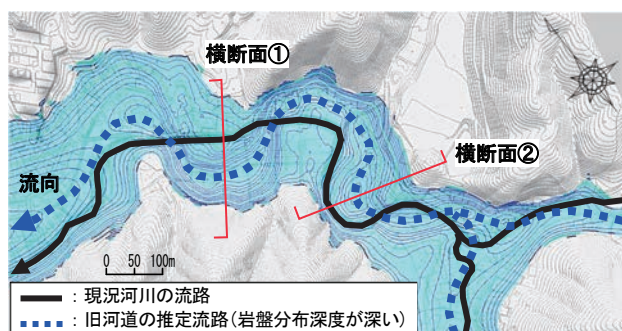


図-8 旧河道の推定流路

図-9, 10 に代表的な地点の推定横断面図を示す(断面位置は図-8 参照)。横断面①では、現況河川が谷底平野の中央付近を流れるのに対し、旧河道は左岸寄りに位置している(図-9)。一方、横断面②では、現況河川が谷底平野の左岸寄りを流れるのに対し、旧河道は中央付近に位置している(図-10)。いずれの断面も、現況河川と旧河道の位置は大きく異なっている。

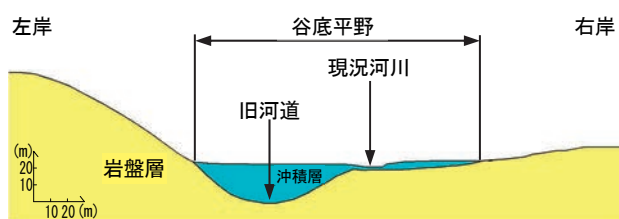


図-9 推定横断面図(横断面①)

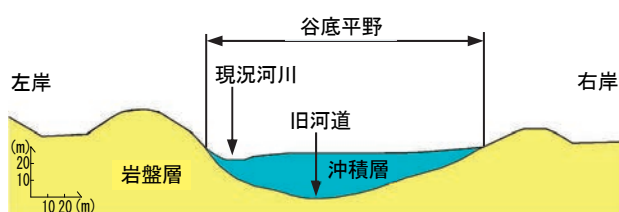


図-10 推定横断面図(横断面②)

また、図-11, 12 は既設橋梁の架替えが計画されている箇所(図-2 参照)の地質調査結果である。当初、左岸側でボーリング、右岸側でスクリーウエイト貫入試験が実施されており、岩盤は左右岸で概ね水平に分布しているとされていた。経緯は不明だが、ボーリングで確認した岩盤分布深度と同レベル付近でスクリーウエイト貫入試験が貫入不能になったことから岩盤と推定したものと思われる(図-11)。しかし、続く調査で右岸側のボーリングを行ったところ、右岸側における実際の岩盤(橋梁設計における支持地盤)分布深度は想定よりも約 8m 深いことが明らかとなった(図-12)。

追加ボーリングでは、スクリーウエイト貫入試験終了深度付近に砂礫の分布を確認しており、礫当たりによる貫入不可であったと考えられる。

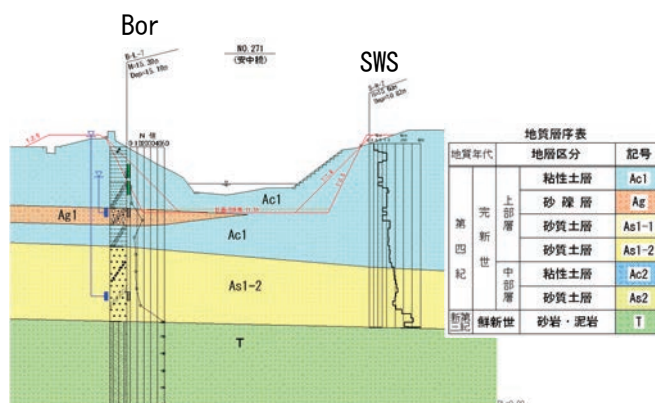


図-11 橋梁計画箇所における地質断面図(当初)

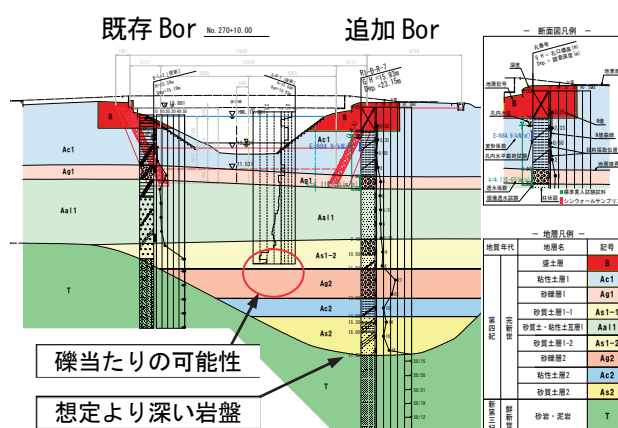


図-12 橋梁計画箇所における地質断面図(追加)

左右岸で支持地盤の深度が大きく異なる

5. まとめ

当該地のような埋積谷においては、潜在する岩盤に起伏があり、谷底平野の中央部に旧河道(岩盤の最深部)が位置しているとは限らない。このことにより、例えば橋梁や盛土の設計・施工においては、現況河川の左右岸や上下流で支持地盤の深度が大きく異なっていたり、軟弱地盤の層厚が大きく変化していたりすることが地質リスクとなり得る。また、今回のように硬い地盤が浅い深度で出現することによる施工上のトラブルも考えられる。施工中におけるトラブルは、工程の延長、追加調査、設計・工法の見直し、さらには事業費の増大に繋がる。このような地域における地質調査では、周辺の地形や既存資料も踏まえ、事業目的に応じた適切な調査内容を提案するとともに、精度の高い地質調査を行い、設計・施工に関わる地質リスクを正確に把握することが重要である。

環境配慮行動を促す体験型環境教育の試み

～沖縄県久米島での実施を中心に～

小櫻慶吾¹⁾・藤野裕弘²⁾

1) 関東支店 技術二部

2) 東海大学大学院 教授

1. はじめに

環境問題は現代社会が抱える最も重要な問題の1つである。例えば、近年、人間活動の拡大に伴って排出された温室効果ガスに起因して、地球温暖化が進むおそれがあり、環境の変化が生態系に影響を及ぼし、生物の生息域や農業、健康など人類の生活に、深刻な影響を与えることが懸念されている。こうした地球温暖化、オゾン層の破壊、熱帯林の減少などの地球的規模の環境問題や、都市化、生活様式の変化に伴うごみの増加水質汚濁、大気汚染などの都市・生活型公害問題は、世界各国共通の課題となっており、これに加え先進国では、市民の生活スタイルの再検討が大きな課題とされている。特に将来の社会の担い手として、若い世代が環境に配慮した行動意図（環境意識）を形成し、環境配慮行動を実施することが強く期待されている。この環境配慮行動を促す手段の1つとして、子どもを対象とした環境教育が重視されている。

環境教育は、1970年代の公害問題に対する取り組みとして始められ、現代では学校教育にとどまらず、企業教育、生涯学習など様々な分野に広がり、関心も高まっている。現に教育課程編成の基準となっている学習指導要領においても、平成20年1月中央教育審議会「幼稚園、小学校、中学校、高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善について」（答申）では、エネルギー・環境問題は、人類の将来の生存と繁栄にとってはもちろんのこと、資源の乏しい我が国にとっても重要な課題と位置付け、持続可能な社会を構築することを強く求めた。これを受け、新学習指導要領においては今後、児童生徒が環境についての理解を深め、環境を大切に、環境の保全に配慮した行動がとれるようにするため、各教科・領域等で環境に関する内容の充実を図ることが必要である、ということが明示されており、社会科や理科、技術・家庭科など関連の深い教科を中心に環境教育に関する内容の充実が図られている。以上のように環境教育の充実によって、環境配慮行動がとれる人材育

成を目指している。

しかしながら、環境問題の多くで、個々人の環境保全に対する意識や認識の高さに比べ、実際の行動場面ではその実行率が相対的に低くなることが明らかにされている。すなわち、タテマエとしての環境保全の認識と、ホンネとしての環境配慮行動が乖離するのであり、このことが環境問題の解決をより困難なものにしている。広瀬(1995)によると、このような両者の乖離は、環境問題に貢献したいという個人的態度である目標意図と、実際の行動場面において環境に配慮した具体的な行動をとろうという行動意図が、それぞれ異なる要因であるために生じると指摘している。両意図が異なる原因の1つとして、目標意図が、個々人にとって具体的経験を伴わない、抽象的で概念的な記述的知識(それが何であるか)であり、行動意図が、個々人にとって具体的な行動の意図を示す手続き的知識(それを得るにはどうすればよいか)であるという、個人の知識体系による相違を指摘している。

上記のように、環境についての認識が個々人の経験に依存して多様であるため、環境教育については一般的な知識や映像を見せることだけでは不十分であるといえる。特に子どもを対象とした環境教育では、身近で実際に起きていることを体験することを中心とした実践教育、あるいは少なくとも体験を含んだものが望ましいと考えられる。なぜなら、環境の多様さを知識として学ぶよりも、まず自分が認識できる環境を体験的に理解し、自分の経験の積み重ねの中から環境の多様さを学ぶのが、最も理解しやすいと考えるためである。この体験活動の重要性について、平成20年学習指導要領の改訂で総合的な学習の時間においては、改定の要点として「体験活動と言語活動の充実」を掲げ、体験活動を行うことを重視し、積極的に学習活動に取り入れることとしている。さらに、改定の要点(1)に新たに「探求的な学習となること」を目指し、『問題の解決や探究活動に取り組むことを通して』と示し体験活動で終わることや、知

識・技能を一方的に教え込むだけの学習活動ではないということが明確化されている。問題解決的な学習活動の際に体験活動の重要性を示しつつも、体験活動だけで終わることの内容に示唆している。

「身近で実際に起きていることを体験する」、すなわち地元が抱えている環境問題を題材とする環境教育の実施は「地域愛着」を形成させるといった文献はいくつか見られる。この地域愛着の形成に関して、学習指導要・領総合的な学習の時間総則でも「地域の生活現実に関わる主体的で問題解決型な学びと実践が地域愛着を育む」とされている。

また、この地域愛着は U ターン志向に影響を与えるとされており、地域への愛着が高いほど、U ターンの可能性も高くなる。日本は人口減少と高齢化が問題となっており、高齢化によって人口減少による影響を上回る「働き手」の減少が生じ、その結果、総人口の減少以上の経済規模の縮小を招くおそれもある。地方は、これに加え若者が都市部へ流出してしまうという問題も抱えており、地域経済社会の維持をさらに困難にさせている。この解決に向け、全国の自治体では、都市部から地方へ移住した人を対象に、U ターン・I ターン補助金を支給するという施策が展開されているが、都市部へ流出する流れは弱まっていない。都市部で環境教育を実施し、大量生産・大量消費・大量廃棄のライフスタイルを見直し、環境配慮行動を促すことも重要であるが、U ターンと地方の抱える環境問題解決のために、地方で環境教育を実施するのも同様に重要である。本研究では後者である、地方の環境問題を扱うことで、環境配慮行動と地域愛着から形成される U ターン志向を促すような、地方の持続可能性に資する環境教育プログラムを検討した。

2. 環境教育とは

2.1 環境教育の3つの要素

一言で環境教育といっても、さまざまな意味合いで使われており、諏訪は環境教育を、環境の中で（通じて）の教育(at, through)、環境についての教育(about)、環境のための教育(for)、の3つに分類している。これらは、対象者の発達段階や中心となる環境教育の狙いによって使い分けがなされている。

環境の中で（通じて）の教育（through）は、教育のための場所や手段として環境を捉えている。この環境教育では、体験することが重視さ

れ、感性、問題解決能力、人間関係、国際問題など、幅広い分野が学ぶ狙いとされる。具体的には、山や海、川など、自然を対象としたキャンプやハイキング、また工場や地域などを対象とした工場見学やゴミ拾いなどの、体験活動が挙げられる。中川ら（2005）は、長期キャンプと短期キャンプが参加者の生きる力に及ぼす効果について検証し、長期キャンプでは「判断力」や「自然への関心」などが、短期キャンプでは「社会的スキル」が、キャンプ後有意に向上しその後一ヶ月維持されことを明らかにした。また、佐藤ら（2005）は、野外教育プログラムによる体験学習が、高校生の人間関係における緊張感を緩和し、クラスイメージについての好意的変化に影響を及ぼすだけでなく、クラスへの帰属意識を高め、自然認識と環境保護意識の涵養に有効であることを明らかにした。

環境についての教育(about)は、教育の対象として環境を捉えている。つまり環境にかかわりのある事柄について、知識や理解を深めることをねらいとした教育といえる。地球が今どうなっているのかというグローバルな問題から、我々の出したゴミがどう処理されているのか、身の回りの自然にどんな力があるのかという身近な問題までがその対象となり、講義形式だけでなく、調査や実験、ゲーム、e-Learning システムを用いるなど、多くの方法で実施され効果をあげている。

環境のための教育(for)、教育の目的として環境を捉えている。つまり、環境を我々が配慮しなければならない対象として考え、そのための態度や行動を学ぶことを目的とした教育といえる。この環境教育では、「環境配慮行動をしないとどうなるか。具体的にはどんな行動をすればよいのか。した場合の効果はどれくらいか」などが教えられる。しかし、このような情報提供によって、環境に配慮する態度は高くなるものの、環境配慮行動には結びつかないことは、過去の研究や環境教育関係者のコメントから明らかである。

第1項でも述べたように、現場で実際に起きていることを個別に体験することを中心とした実践教育、あるいは少なくとも体験を含んだものを実施すると、対象者は環境配慮行動がとれるようになりやすいと示唆されている。地元の抱えている環境問題を題材とした（以降地元環境教育と称す）をプログラムの実施は、環境教育の中では、「環境の中での教育（at, through）」、「環境についての教育(about)」、「環境のための

教育(for)」の3つの分類のうち前者2つが該当する。つまり、環境配慮行動を促すための環境教育としては「環境の中での教育(at,through)」と「環境についての教育(about)」が適していると言える。これは、地域愛着や人工回帰を目的とした環境教育でも同様の事が言えるであろう。

2.2 発達段階から見る環境教育

では、これらの環境教育はどの年代を対象にし、実施すれば効果的であるのか。阿部(1992)によると、これらの教育が有効であるとされている対象者の発達段階は幼児期から学齢期(1歳~15歳)とされている。

この幼児期から学齢期を、文部科学省が提示しているこどもの発達段階に置き換えると、学童期(小学校低学年・高学年)と、青年前期に該当する。これらの時期の特徴と課題について、「子どもの発達段階ごとの特徴と重視すべき課題(子どもの発達段階に応じた支援の必要性)」のなかで次のように述べている。

学童期の小学校低学年は、家庭における子どもの徳育にかかわる課題として、都市化や地域における地縁的つながりの希薄化、価値基準の流動化等により、保護者が自信を持って子育てに取り組めなくなっている状況がある。さらに小学校低学年の時期においては、こうした家庭における子育て不安の問題や、子ども同士の交流活動や自然体験の減少などから、子どもが社会性を十分身につけることができないまま小学校に入学することにより、精神的にも不安定さをもち、周りの児童との人間関係をうまく構築できず集団生活になじめない、いわゆる「小1プロブレム」という形で、問題が顕在化することが多くなっていることを特徴とし、重視すべき課題として自然や美しいものに感動する心などの育成(情操の涵養)が挙げられている。

学童期の小学校高学年では、現在の我が国における小学校高学年の時期における子育ての課題としては、インターネット等を通じた擬似的・間接的な体験が増加する反面、人やもの、自然に直接触れるという体験活動の機会の減少があげられる。これを踏まえ、課題として、体験活動の実施など実社会への興味・関心を持つきっかけづくり、など高学年でも自然体験をさせるべきであるというような記載がされている。

青年前期は、第2次性徴期による身体的な変化や、小学校から人間関係や学校制度など環境が劇的に変化する。この時期に思春期に入り、

親や友達と異なる自分独自の内面の世界があることに気づきはじめるとともに、自意識と客観的事実との違いに悩み、様々な葛藤の中で、自らの生き方を模索しはじめる時期である。このような急激な環境の変化と思春期が重なってしまうことで、心身ともに不安定な状態になり、学校に行くのがつらくなったり、体調を崩してしまったりする、いわゆる「中1ギャップ」という形で問題が顕在化するという特徴を持つ。その為、課題として「自然体験」を実施せよといったような文言が、青年前期には記載されていない。

以上の事から、環境配慮行動を促すための自然体験を含める環境教育を実施する対象は学童期(小学生)の高学年が適切であるといえる。

3. 実施内容

3.1 沖縄県久米島の概要と連携

環境配慮行動を、「環境になるべく負荷を与えないようにするための日常的な行動、あるいは環境保護に貢献するような日常的な行動」と定義する。具体的な環境配慮行動とは表に示す9つであり、指標の選定においては、小野(2010)の先行研究を基に作成した。この指標の中から「リサイクル・ごみの分別をする」、「買い物の際にビニール袋をもらわないようにする」、「ものを長く使う・大切に使う」は一括りにすると「ごみ問題」に関連しており、これらは小学校3・4年生の社会・家庭科で学習する内容であるため出前授業としても扱いやすい為、ごみ問題を扱った授業を実施するものとした。

表1. 環境配慮行動の指標

9つの環境配慮行動の指標
1. 使用しない電気を消す
2. 冷暖房の温度を控えめにする
3. お湯や水を出しっぱなしにしない
4. 洗剤やシャンプーなどの化学製品を使いすぎない
5. リサイクル・ごみの分別をする
6. 買い物の際にビニール袋をもらわないようにする
7. 長く使えるものを選ぶ・大切に使う
8. エコ商品・環境にやさしい商品を購入する
9. 環境保護団体に寄与をする

試行実施地である沖縄県久米島は、日本の南にある琉球列島の中の1つである。沖縄本島から西に約100kmに位置する、人口約7,400人のサンゴ礁に囲われた離島である。久米島の抱える大きな環境問題としては、赤土問題、サンゴ礁の減少、漂着ごみ問題が挙げられる。ただし、権田著「久米島の人と自然」では、赤土とサンゴ礁に纏わる環境教育は、地元団体が既に実施

ており、学校教育の総合的な学習の時間の年間計画の 1 つとしても扱われていることが述べられていた。一方で、漂着ごみをテーマとした環境教育実施例の記載は見受けられなかった。

また漂着ごみの処分方法については、廃棄物として廃棄物処理法の規定に基づき適正に収集・運搬、処分がなされる必要がある。特に離島では、ごみ焼却施設等の処理施設がなく、家庭から排出されたごみであっても他の市町村で処理している場合や、処理施設があっても海岸漂着物の質や量の問題から対応できない場合もあることから、地域外への運搬、地域外での処分方法について、関係者間（廃棄物を受け入れる自治体を含む）で十分調整を図る必要がある。処分方法が本州よりも複雑化している場合が多い。さらに、漂着ごみに多量の塩分もしくは砂が付着しているのではないかと懸念から処理施設での受入が制限される場合もあるので、処分先の市町村や民間の処理施設の受け入れ条件について考慮する必要がある。加えて、「砂や塩が付着していると、処分方法が家庭ごみとは異なる場合がある」ということは、一般的に学校教育として扱われない内容である。実際に、環境省が配布している、平成 29 年度漂着ごみ対策総合検討業務海洋ごみ学習用教材の中にも、マイクロプラスチックや 3R の内容には触れているが、処分方法の差については言及されていない。

以上の事から、本研究の「地元の環境問題を題材とした環境教育」の実施では、漂着ごみをテーマにすることとした。

沖縄県は冬季に北寄りの季節風の影響を強く受け、多くのごみが漂着することが知られている。久米島の 2021 年 2 月の漂着ごみ回収では、合計で 40,315ℓ ものごみが回収された。久米島の漂着ごみ回収は、ほとんどが人力で行っており、重機を使用することがない。また、2020 年度には島内に小型焼却炉が設置されたが、1 度に焼却できる量に限りがあることや、農業系のごみに対して優先的に稼働させているため、漂着ごみの処理に関してあまり改善が進んでいないという現状を抱えている。

本研究では、児童たちが環境配慮行動をとりやすくなるよう、地域で実際に起きている環境問題を体験することを中心とするため、海ごみ（漂着ごみ・海底ごみ・浮遊ごみの総称である）をメインテーマとした出前授業を実施した。対象校は、2021 年度は久米島町立大岳小学校の 1 校、2022 年度は久米島町大岳小学校と仲里小

学校の 2 校である。実施にあたり、地域の実態をよく知る、地元の NPO（久米島ホテル館）と連携し、そのアドバイスを基にプログラムを構築した。

久米島ホテル館は 2000 年に開館し、ホテルだけでなく周辺の河川などに生息する昆虫やエビ、魚やそれら相互のつながりを含めた自然環境を学習できる場として、来館者へのレクチャーや生物の飼育を行っている施設である。また、同館は地元の小学生の自然観察や体験学習の場としても活用されている。多くの人々に利用され、久米島の観光と文化の発展に貢献する施設である。

3.2.2 2022 年度の授業概要

2022 年度の実施では、9 月 20 日に仲里小学校の 5, 6 年生（18 名）、9 月 21 日に大岳小学校の 5 年生（11 名）に対して、授業を実施した。授業のフローチャートを図に示す。

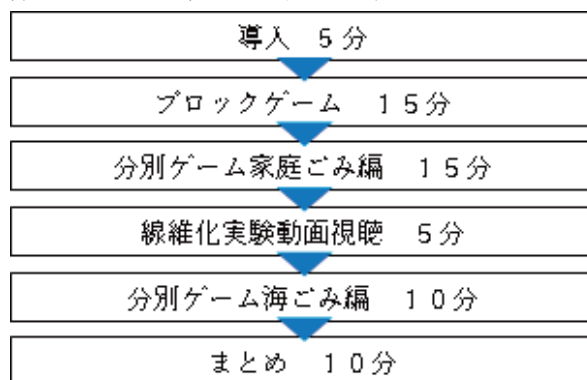


図 1. 2022 年度実施授業フローチャート

2021 年度の実施を踏まえ、ブロックゲーム、分別ゲームのルールを一部変更し、新たにペットボトル繊維化再生実験を組み込んだ。

2022 年度は、2021 年度の実施とは異なり、海岸漂着ごみを拾う体験は行わなかった。理由として、昨年度の実施以降、連携先である久米島ホテル館が外部との連携を進め、マイクロプラスチック問題に関する授業の一環で、既に漂着ごみ拾いを行っていたからである。児童たちが漂着ごみ拾いの経験がある事を前提に、室内でも海ごみの分別が行えるように分別ゲームに海ごみ編を加えた授業を実施した。また、リサイクルの学習では、ペットボトル繊維化再生実験動画を用意し、リサイクルがどのような様子で行われているかについて「見える化」を行った。この「見える化」を行う事によって、分別の重要性や海ごみ問題の深刻さを理解させることを目的として授業を展開した。

3.3 調査方法及び項目

今回実施した授業の効果検証として、授業前

と授業後にアンケートを実施し、その回答の変化から評価を行う。また、対象者数が少数であり、統計的に解析を行うのは困難である回答方法に記述形式のものを多く取り入れたアンケートを実施した。2022 年度、大岳小学校と仲里小学校での出前授業で用いたアンケートの質問項目を表に示す。

表 2. 2020 年度久米島事前アンケート

2022年度 久米島出前授業 事前アンケート 質問事項と回答方法	
質問事項	回答方法
問1 久米島に興味がある又は好きな場所がありますか。	自由回答、複数回答可
問2-1 久米島の歴史や文化に興味はありますか。	①とてもある②少しはある③どちらとも言えない④あまりない⑤全くない、から1つ選択。
問2-2 具体的には	自由回答、複数回答可
問3-1 久米島の自然について興味はありますか。	①とてもある②少しはある③どちらとも言えない④あまりない⑤全くない、から1つ選択。
問3-2 具体的には	自由回答
問4 ごみを捨てる時に気を付けている事はありますか。	自由記述
問5 「分別」という言葉を聞いてどのような印象を持ちますか。	「大切だ、楽しい、当たり前だ、面倒くさい、難しい、しなくてもいい、やり方が分からない、分別という言葉聞いたことがない」から選択。 (複数選択可)
問6 海ごみについて、何か知っていることがありますか。	自由記述
問7 家庭ごみ、海ごみを減らすにはどうすればいいと思いますか。	自由記述

表 3. 2022 年度久米島事後アンケート

2022年度 久米島出前授業 事後アンケート 質問事項と回答方法	
質問事項	回答方法
問1 授業を通して「分別」という言葉にどのような印象を持ちましたか。	全て自由記述
問2 これからごみを捨てる時に、気を付けようと思ったことはありますか。	
問3 家庭ごみと海ごみの処分の違いについて、印象に残ったことを教えてください。	
問4 家庭ごみ、海ごみを減らすにはどうすればいいと思いますか。	
問5 「ブロックゲーム」の感想を教えてください。	
問6-1 分別ゲーム「家庭ごみ編」の感想を教えてください。	
問6-2 分別ゲーム「海ごみ編」の感想を教えてください。	
問7 授業全体の意見や感想を教えてください。	

事前問 1～問 3 は、他の出前授業と文言を統一し、地域ごとの愛着形成について比較するために設置した。その他の設問は前年度と同様に、授業を通しての意識変化や体験型学習プログラムの評価を行うために設置した。

4. 使用教材

4.1 分別ゲーム

2021 年度からの変更点として、「海岸打ち上げごみ拾い体験」を実施しなくても、分別ゲームだけで家庭ごみと海ごみの処分の差を学べるよう、海ごみ編を追加した (図)。分別ゲームで海ごみを扱うメリットとして、家庭ごみとの分別の差を一目で理解できるようことがあげられる。



図 2. 分別ゲームの概要

家庭ごみ編は、分別表を読み込めば正しく分別ができる作りになっているが、海ごみ編は分

別のヒントとなるものが一切無いので、児童らに「仮に砂や塩が付着し、汚れていたら分別の仕方が変わるのだろうか」ということを想像させながら行う。

分別終了後は、家庭ごみ編との差 (付箋を貼っている位置) を比較させる。

4.2 動画教材：ペットボトル繊維化実験

ペットボトルは、ポリエステル繊維と同じ原料 (ポリエチレンテレフタレート=PET) で作られており、回収されたペットボトルから再生した原料を使って、ポリエステル繊維を作ることができる。児童らは、「ペットボトルから服にリサイクルすることができる」ということを、理屈上で「なんとなく知っている」ケースが多いのではないかと。しかし、実際どのような過程を経て、服としてリサイクルされるのかについて、知っている、想像を働かせている、などといった児童は少ないように思う。以上の事から、ペットボトルが繊維状になる様子を、動画教材を利用して「見える化」させる事で、普段何気なく捨てているものがリサイクルできるということを再確認させ、分別することに対して、より強く意識づけを行うことを目的としている。

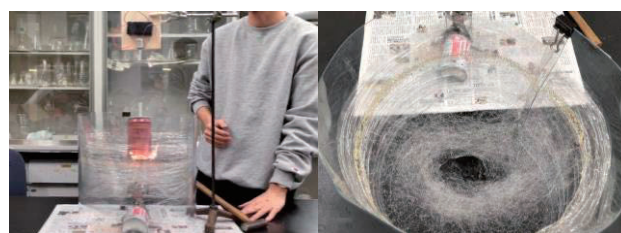


図 3. ペットボトル繊維化実験概要

5. 結果及び考察

ごみを捨てる時の意識調査について、事前アンケートでは「分別」という言葉を用いた回答は少なかったが、「ものを分けて捨てる」と回答した児童は 29 名中 14 名と半数程度であった。事後アンケートでは「分別」という言葉を用いて回答した児童が 18 名にまで増加した。これらのことから、授業を通して分別という言葉の復習や、分別をすることの大切さを伝えることができたと考えられる。また、事前では「特に意識している事はない」、「分からない」と回答した児童は 9 名見られたが、事後では「分からない」等の回答は 1 人にまで減少した結果となり、ごみの分別に対して関心の薄い児童らに対しても、意識付けができた。その要因として、体験型プログラムを通して、ゲーム感覚で楽しく学べたことや、周囲の仲間たちと協力し合ったこ

とが影響していることが考えられる。

ごみを減らすための意識調査について、事前では「ビーチクリーン」や「海ごみを拾う」と回答した児童が 9 名であったが、事後では 1 名にまで減少した。代わりに事後アンケートでは過半数以上が「5R（又は 5R に含まれていること）を意識して生活する」と回答した形となった。また、一部の児童は「外国と協力する」、「世界に海ごみの状況を発信する」と回答した。事前アンケートに見られた「ごみを拾う」という行為は、広瀬の指摘するところの「環境問題に貢献したいという個人的態度である目標意図」であり、海が汚れているから綺麗にしたいという、行動を伴った目標意図であるが、海ごみを減らす方法には触れておらず、事後対応的な思考である。事後アンケートに見られた「5R」や「海外と協力」といった回答は「実際の行動場面において環境に配慮した具体的な行動をとろうという行動意図」であり、海ごみになりうるごみの量を減らそうという、大元に差し迫った思考である。このような意識変化が見られたことから、環境配慮行動を促せたのではないかと考えられる。

海ごみに対する意識調査で、事前アンケートでは 29 名中 12 名と約半数の児童が「海のごみは外国から漂着している事」といったような回答をしている。次点で「プラスチックごみの漂着量が多いこと」や「生物に影響がある」といったかいとうが多く得られた。これは、久米島が抱えている環境問題について多くの児童が正しく理解できているということが読み解ける結果となった。事後アンケートでは「砂や塩が付着した海ごみの処分方法は、家庭ごみと大きく異なる事を知った」といったような回答が非常に目立ち、29 名中 25 名とほぼ全員が処分の差について意見した結果となった。また、授業全体の感想を含め、処分方法の差について「驚いた・びっくりした」という表現を用いて回答をしたのが、29 名中 15 名と過半数を超える結果となった。このことから、家庭ごみと海ごみの処分方法が異なることを予期できておらず、強く印象に残ったということが伺える。

分別ゲーム家庭ごみ編の感想では、「分別のおさらいができた」といった意味合いの回答が目立つ結果となった。実際、「全問正解できた」、「1 問だけ間違えて悔しかった」といった回答が見られるように、家庭ごみ編の正答率は非常に高かった印象であった。正答率が高かった理由として、分別表を正しく読み取れる力がついて

いる事や、「みんなと話し合いながら出来てよかった」とあるように、グループワークで行ったことが起因していると考えられる。グループワークとして「分別」に取り組むことで、児童らへのクラスへの帰属意識を高めるとともに、クラスとして「分別」に明るい印象を持たせることができたのではないかと考えられる。



図 4. 分別ゲーム家庭ごみ編の様子（仲里小）

この協同的な学習を体験させるということは、子どもたちが愛着を育みあう絶好の機会であるといわれている。猪熊（2017）は、愛着を育まれている子どもから育まれていない子どもへ問題解決を通した学習を通して育みあう可能性が高いと指摘している。

分別ゲーム海編の感想では、ほぼ全員が「家庭ごみとの処分の差」に関する感想を持った形となった。これは「海ごみに対する意識調査」と同じ傾向が見られる。これらのことから、海ごみ編を加えた分別ゲーム 2022 年度版は、学校で教わる授業の内容や、漂着ごみ拾い体験だけでは認識できない点を補完できていると考えられる。従って、漂着ごみ拾い体験と分別ゲームを合わせて行うことが効果的であり、来年度以降も引き続き実施することが望ましい。



図 5. 分別ゲーム海ごみ編の様子（大岳小）

アンケートには「ペットボトル繊維化再生実験」に関する設問を設けなかったにも関わらず、アンケート全体で、繊維化実験に対する感想が幾つか見られた。これは、繊維化実験の動画を視聴させ、出来上がった繊維に触れさせるといった体験内容である。この動画に対して、児童

だけでなく現地の教員の方々からの反応が非常に良好であった。



図 6. 線維化実験動画教材視聴の様子

6. おわりに

環境教育が問題解決の担い手の育成を目指すことを考えると、環境教育活動による意識変容を持続、発展させることによって、気付き、関心から知識、技能、態度、意欲、実行力へと、より高次の段階に向けて意識を変えていく必要がある。

授業の実施前後の意識を比較したアンケート調査によって、環境教育活動による意識変容が検証できたと考えられる。しかしながら、活動前後の比較のみでは、環境教育活動によって生じた意識変容の持続性については明らかにすることができない。

以上を踏まえ、本研究で扱った授業スライドや教材のすべてにマニュアルを作成し、NPO 会員の学生に引継ぎを行った。今後継続的に出前授業が実施されることで、より高い学習効果が得られるものと考えられる。

参考文献

- 1) 阿部治, 1992, 環境教育の背景・役割・動向, 環境教育推進研究会編『生涯学習としての環境教育実践ハンドブック』, 第一法規出版
- 2) 猪熊泰堂, 2017, 地域愛着を育む総合的な学習の時間に関する研究—問題解決学習に基づいた分析を通して—
- 3) 大友章司, 2004, 環境リスク行動の 2 つの意思決定プロセスと非環境配慮的行為者のイメージが行動決定に及ぼす影響について, 日本環境学会論文集, 13 巻 2 号, p25-34
- 4) 小野純平・島田幸司・天野耕二, 2010, 負担別環境配慮行動の直接的・間接的要因に関する探索的研究, 環境システム研究論文, 環境システム研究論文集, 38 巻, p9-15
- 5) 加藤潤三・池内裕美・野波寛, 2004, 地域焦点型目標意図と問題焦点型目標意図が環境配慮行動に及ぼす影響—地域環境としての河川に対する意思決定過程—, 社会心理学研究論文集, 20 巻 2 号, p134-143

- 6) 権田雅之, 深山直子, 山野博哉, 2015, 久米島の人と自然, 小さな島の環境保全活動, 築地書館
- 7) 佐藤豊・石沢順子, 2005, 高等学校における野外教育プログラムの効果—「総合的な学習の時間」に向けて, 野外教育研究, 8 巻 2 号, p45-57
- 8) 小学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説, 総合的な学習の時間編, 文部科学省
- 9) 中川もも・他 4 名, 2005, 長期・短期キャンプが小中学生の生きる力に及ぼす効果, 日本野外教育学会, 8 巻 2 号, p31-43
- 10) 漂着ごみの調査結果 (資料調査, ヒアリング調査) 2022 年 6 月 23 日閲覧
https://www.pref.okinawa.jp/site/kankyo/seibi/ippan/documents/r3_3_bankoku_betten2.pdf
- 11) 広瀬幸雄, 1994, 環境配慮行動の規定因子について, 社会心理学研究, 10 巻 1 号, p44-55
- 12) 平成 20, 21 年改訂学習指導要領, 解説等「幼稚園, 小学校, 中学校, 高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善について」(答申), 文部科学省
- 13) 平成 29, 30, 31 年改訂学習指導要領・学習指導要領解説, 文部科学省
- 14) 内閣府, 平成 27 年版子供・若者白書, 第 2 節体験活動, 2023 年 1 月 10 日閲覧
https://www8.cao.go.jp/youth/whitepaper/h27honpen/pdf/b1_03_02.pdf
- 15) 布谷知夫, 2006, 身近な課題から始める環境教育, 日本生態学会誌, 56 巻 2 号, p158-165

ストレプト藻類 RAF 様キナーゼの機能解析

山崎優斗¹⁾

1) 日本物理探査株式会社 関東支店

1. 序論

普段我々が目にする植物(陸上植物)は、水中に生息していた祖先の藻類が陸上に進出したものであると考えられている。陸上は変化の大きい環境であり、陸上植物はときに乾燥状態に置かれたり、洪水によって冠水ストレスにさらされたりすることもある。こういった水環境の変化がもたらす水ストレスへの適応機構を確立することは、藻類が陸上への進出を果たすうえで必須であったといえる。

このような陸上環境への適応において、植物は植物ホルモンを介して水ストレス耐性を獲得する仕組みである「応答機構」を発達させてきた。

1.1 陸上植物における水ストレス応答

(1) 高浸透圧応答

乾燥状態では細胞内が脱水され、植物は高浸透圧ストレスを受ける。このストレスへの応答では植物ホルモンのアブシジン酸(ABA)が耐性を獲得するシグナル伝達を担っている。

ABA を介した高浸透圧応答では、プロテインキナーゼ SnRK2 の活性化が重要である(図 1)。平常時における SnRK2 は、GroupA protein phosphatase 2c (PP2CA)によって脱リン酸化され、不活性な状態にある(Umezawa et al. 2009, Nakashima et al. 2013)。植物がストレスを受けると、細胞内で ABA が合成・蓄積され、それを ABA 受容体 PYR/PYL/RCAR が受容して PP2CA と複合体を形成して PP2CA のホスファターゼ活性が抑制される。こうして脱リン酸化による負の制御を受けていた SnRK2 がリン酸化することで活性化し (Soon et al. 2012)、下流の bZIP 型転写因子である ABA-responsive Element Binding Proteins (AREB)をリン酸化する。リン酸化された AREB は ABA 応答性プロモーターの ABA-Responsive element (ABRE)に結合し、遺伝子発現を調節することで高浸透圧耐性を獲得する (Umezawa et al. 2009, Nakashima et al. 2013)。

SnRK2 の直接的な活性化因子はグループ B3 RAF 様 MAPKKK に属する ABA and abiotic stress responsive Raf-like kinase (ARK)であるこ

とがわかっている。ARK はヒメツリガネゴケの ABA 非感受性 UV 照射株から原因遺伝子として単離された (Saruhashi et al. 2015)。ARK は ABA の蓄積や浸透圧ストレスによって自己リン酸化して活性化する。この活性化はキナーゼドメイン内の Ser1029 が自己リン酸化することで起こる。自己リン酸化によって活性化した ARK は下流の SnRK2 をリン酸化し、活性化する (Mousona et al. 2021)。また、ヒメツリガネゴケの ETR 四重変異体では ABA や高浸透圧に応答した ARK の活性化が起こらない (Toriyama et al. 2022)。ARK の活性化には後述するエチレン受容体 ETR が必要である。

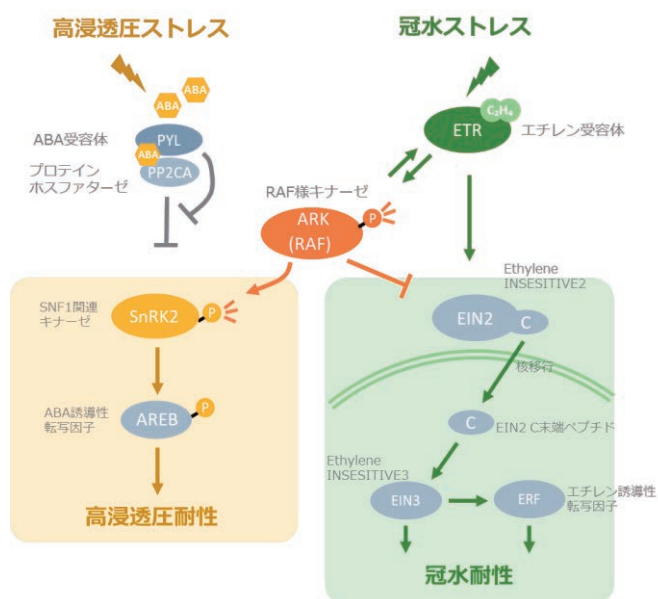


図1. 陸上植物における水ストレス応答機構

矢印は活性化を、横線付き棒は抑制的な反応を表す。

(2) 冠水応答

植物は、水に水没した状態に対する応答機構を持ち、植物ホルモンエチレンが関与しているとされる。この例としては浮きイネの伸長反応がある。浮きイネは洪水によって冠水状態に陥ると、急激に草丈を伸ばすことで葉を水上に留めようとする応答機構を持つ。この応答では水没したイネがガス状の植物ホルモンであるエチレンを細胞内に蓄積することが契機となっている(Kuroha et al. 2018)。このようなエチレンシ

グナルによる水没への応答はヒメツリガネゴケでも見られ、陸上植物で保存された機構であると考えられている(Yasumura et al. 2012). エチレンシグナルの具体的な伝達経路は被子植物シロイヌナズナにおいて明らかになってきた. エチレン非存在下では, Constitutive Triple Response 1 (CTR1) が活性化しており, シグナル因子 Ethylene Insensitive2 (EIN2)をリン酸化することで不活性な状態に保っている(図 1). 冠水状態で細胞内のエチレンが増加すると, ER 膜上に存在するエチレン受容体 ETR がエチレンを受容し, CTR1 を不活性化する. これによって活性化した EIN2 の C 末端ペプチドが切り出されて核内に移行し, EIN3 を活性化することでエチレンシグナルが伝達される(Ju et al. 2012).

驚くべきことに, シロイヌナズナにおける CTR1 は前述のヒメツリガネゴケの ARK と相同な遺伝子であることが判明した(Yasumura et al. 2012). このことから陸上植物では高浸透圧と冠水という真逆の応答シグナルが ARK(RAF)及び ETR という共通の伝達因子を介して互いに調節する関係性にあると考えられている.

1.2 RAF 様キナーゼの構造と機能

被子植物シロイヌナズナでは MAPKKK はグループ A, B, C に分けられる. このうちグループ B 及び C が RAF 様キナーゼと呼ばれ, グループ B の RAF 様キナーゼはさらに B1 から B4 のサブグループに分けられる(Ichimura et al. 2002). 高浸透圧応答では主に B2, B3-RAF が働いているとされ, 先述の ARK もグループ B3-RAF に属する.

グループ B-RAF はタンパク質の C 末端側にグループ間で高度に保存されたキナーゼドメインを共通に持つが, N 末端側にはグループ毎に特徴的なドメインを持つ. 典型的に, B3-RAF はキナーゼドメインに加えて N 末端側に EDR ドメインを持ち, B2-RAF は N 末端側に PAS ドメインを持つ. ヒメツリガネゴケの ARK は B3-RAF に属するが, B3 に特徴的な EDR ドメインに加えて B2 に特徴的な PAS ドメインも併せ持つ(図 2). この 3 ドメインをもつ RAF はヒメツリガネゴケの他にも小葉類から接合藻類といった, 基部的な植物において見られ(Stevenson et al. 2016), ストレプト藻類シャジクモ (*C. braunii*)にも存在する.

B3-RAF の EDR ドメインは, エチレン受容体 ETR との相互作用において重要とされる. 酵母 2 ハイブリッドアッセイでは EDR ドメインを含む ARK の 440-871 と PpETR7 が直接相互作用

する一方, EDR ドメインの一部が欠失した ARK472-871 では相互作用が起こらなかった(Toriyama et al. 2022). さらに, EDR ドメインを欠失した ARK は *ark* 株の ABA 応答を回復させることが出来なかった(猿橋 博士論文 2015).

また, EDR ドメインの 440-471 番目のアミノ酸を欠失した ARK では ABA 非存在下における活性が強まることから(猿橋 博士論文 2015), この部分に活性を抑える制御ドメインの存在が示唆されており, EDR ドメインは ETR による RAF の活性調節にも関与している可能性がある. このように ARK と ETR の相互作用において EDR ドメインは不可欠な存在である.

PAS ドメインはタンパク質相互作用に関わっているとされる. シロイヌナズナの B2-RAF では, PAS ドメインを介して二量体を形成しているとされる(Lee et al. 2015, Nguyen et al. 2019). 一方 ARK では構造解析により, ARK が PAS ドメインを介して二量体を形成する可能性を示す結果があるが, PAS ドメインを切除した場合でも ABA 応答性遺伝子の発現上昇活性には影響を与えないとされており, 機能上の意義は明らかになっていない(Stevenson et al. 2016, Saruhashi et al. 2015).

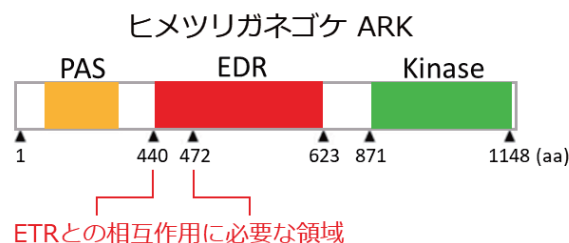


図 2. ARK の構造模式図

ARK は 1148 アミノ酸からなるタンパク質である. 分子内に PAS(黄), EDR(赤), Kinase(緑)というドメイン構造を持つ.

1.3 ストレプト藻類は水ストレス応答因子を持つ

ABA 応答をはじめとした水ストレス応答機構は植物が陸上のストレスに適応するために重要な役割を果たすことから, これらの応答機構は植物進化において淡水性の藻類が陸上進出するにあたり徐々に獲得されていったものであると考えられている. このことから, 藻類におけるストレス応答因子の研究が植物の陸上進出の解明に繋がる可能性がある.

緑色植物は大きく分けて二つのグループに分けられる(図 3). 一つは陸上植物及びそれに近縁な藻類(ストレプト藻類)で構成されるストレプト植物であり, もう一つはクラミドモナスといっ

た緑藻類やアオサなどを含むグループである緑藻植物である。近年のゲノム解析の伸展により、陸上植物において水ストレス応答に関わるとされてきた因子と相同な遺伝子が藻類においても存在することが分かってきた。とりわけストレプト藻類では多くの遺伝子が保存されており、藻類 *Klebsormidium nitens* の解析では ABA 受容体 PYL を除く RAF, SnRK2, PP2C, 転写因子 AREB/ABF といった主要な高浸透圧応答の構成遺伝子が存在していることが示された(Hori et al. 2014)。緑藻植物クラミドモナスにおいても RAF や祖先的な SnRK2, PP2C のような因子が保存されていることが分かっている(Komatsu 2020)。

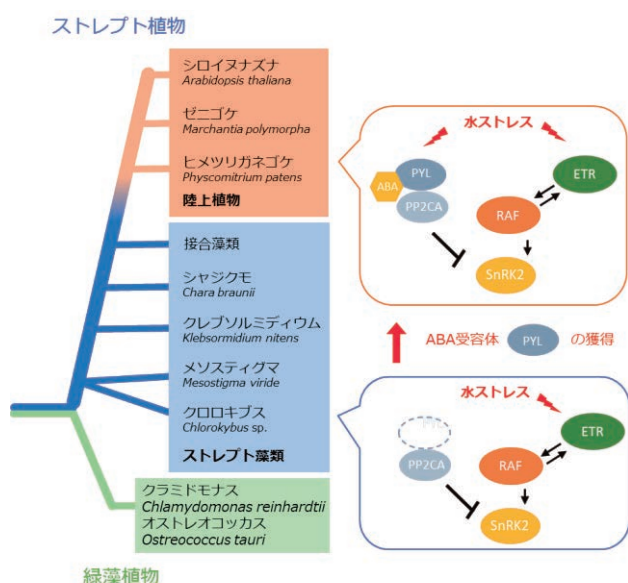


図3. 緑色植物の系統樹と水ストレス応答因子の保存

緑色植物は陸上植物とそれに近縁な藻類のグループであるストレプト植物とそれ以外の藻類が属する緑藻植物に大別できる。ABA 受容体 PYL は陸上植物で獲得され、ABA を介した高浸透圧応答経路を持つのは陸上植物のみであると考えられているが、一部の接合藻類で PYL 様の遺伝子が見つかった。PYL 以外の水ストレス応答因子である SnRK2, PP2C, RAF, ETR についてはストレプト藻から被子植物に至るまで広く保存されている。

これらの因子が機能的に保存されているかを明らかにする試みも進められており、*K. nitens* の *KnSnRK2* 遺伝子がヒメツリガネゴケの SnRK2 の四重変異体で失われた ABA 応答を回復させることを示した(Shinozawa et al. 2019)。また、Komatsu らは *K. nitens* の PP2CA 遺伝子 (*KnABI1*) をヒメツリガネゴケに導入する実験を行い、*KnABI1* が *PpABI1* と同様に ABA 応答を抑制することを示した(Komatsu et al. 2020)。

エチレンシグナル経路に関しては、ストレプト藻類においてエチレンの合成やシグナル伝達因子の多くが保存されている (Ju et al. 2015)。

陸上植物の姉妹群である接合藻類に属する *Spirogyra* では ETR や EIN2, EIN3, 転写因子 ERF といった主要なエチレンシグナル因子が保存されているのに対し、*K. nitens* では、エチレン受容体 ETR や EIN3 を持つが、EIN2 の機能上必須である C 末端ドメインを欠き、転写因子 ERF を持たない。接合藻類 *Spirogyra* ではエチレンがホルモンとして働いている証拠が示されており、*Spirogyra* に対する外因性エチレンの添加は細胞の伸長を引き起こした(Ju et al. 2015)。また、エチレン結合の競争的阻害剤の添加によってこの伸長は阻害された。このように少なくとも陸上植物に近い系統においては水ストレス応答因子がシグナル伝達因子として機能している可能性がある。

2. 目的

序論で述べたようにストレプト藻類には植物の水ストレス応答因子の相同遺伝子が数多く保存されている。しかし高浸透圧応答と冠水応答の両方に関わるとされる RAF については、藻類における機能や役割が明らかになっていない。本研究はストレプト藻類 RAF の水ストレス応答における機能を明らかにすることを目的として、以下の実験を行った。

4.1 では RAF が ABA 応答性遺伝子を発現させる条件を明らかにするため、ヒメツリガネゴケ *ark* 変異体に対して藻類の様々な B3, B2-RAF 遺伝子を導入したレポーターアッセイを行った。4.2 では、ストレプト藻類 *K. nitens* の *KnRAF1* と *KnETR1* が機能的に相互作用していることを明らかにすべくヒメツリガネゴケ *ark/etr* 株を用いて共発現レポーターアッセイを行った。4.3 では *K. nitens* の RAF が周辺の水ストレス応答因子と直接的に相互作用していることを明らかにすべく *K. nitens* の *KnRAF1* と *KnETR1* の酵母 2 ハイブリッドアッセイ及びを行った。4.4 では、*KnRAF1* の機能の保存性についてさらに調べるため、ヒメツリガネゴケの *KnRAF1* 過剰発現株を作出し、成長観察やウエスタンブロット解析を行った。

3. 材料と方法

3.1 材料

藻類ヒメツリガネゴケ (*Physcomitrium patens*) の原糸体組織を用いた。培養は 1 mM CaCl₂, 5 mM 酒石酸アンモニウムを含む BCD 寒天培地に滅菌したセロハンを敷き、ホモジェナイズした原糸体組織を播いた。25℃, 白色光連続照射の条件で 7-10 日間培養し、実験に用いた。また、本研究で用いた株は次の通りである。

ark 株: ARK null 変異体(AR133 株), Arg1043 が Stop コドンに変異

ark/etr 株: ARK 及び *PpETR1,3,6,7* が欠損, ARK の Val50 でフレームシフトし, 129 番目のアミノ酸で Stop コドンが生じている

ARK-GFP/WT 株: WT に *proActin-ARK-GFP* を導入した過剰発現株

KnRAF1-GFP/AR133 株: AR133 に *proActin*

-KnRAF1-GFP を導入した過剰発現株

3.2 RAF, ETR を組み込んだプラスミドの作製

RAF, ETR の cDNA を, ベクターとの接続配列を含むプライマーを用いて各生物の mRNA に由来する逆転写物, あるいは合成ポリヌクレオチド鎖から PCR にて増幅し, In-Fusion HD Cloning kit(Clontech)でベクターに組み込んだ。用いた遺伝子とベクターの組み合わせを以下の表に示した。

表 1. レポーターアッセイに用いたコンストラクト

遺伝子名	PCR 鋳型	ベクター	プロモーター
<i>Klebsormidium nitens</i>			
<i>KnRAF1</i> (<i>rna-KFL 006220040</i>)	cDNA	pTN-GFP	Actin
<i>KnRAF2</i> (<i>rna-KFL 000130260</i>)	cDNA	pTN-GFP	Actin
<i>KnETR1</i> (<i>rna-KFL 005240070</i>)	cDNA	Ubi-fLUC	Ubi
<i>Chara braunii</i>			
<i>CbRAF1</i> ※ ¹ (<i>rna-CBR g22230</i>)	cDNA	pTN-GFP	Actin
<i>CbRAF2</i> (<i>rna-CBR g55470</i>)	cDNA	pTN-GFP	Actin
<i>Mesostigma viride</i>			
<i>MvRAF1</i> (<i>Mv03397-RA.1</i>)	ゲノム DNA※ ²	pTN-GFP	Actin
<i>Chlorokybus sp.</i>			
<i>CkRAF1</i> (<i>Chrsp23S03757</i>)	合成 DNA	pTN-GFP	Actin
<i>Physcomitrium patens</i>			
<i>ARK</i> (<i>Pp3c12_3550V3.1</i>)	cDNA	pFL-GFP	Actin

※¹ N 末端側の機能不明領域を除く 1304-2423 a.a.を用いた。

※² ゲノム DNA からイントロン含む配列を増幅し, エキソン部分を増幅するプライマーセットを用いて PCR することでイントロンを除去した。

表 2. 酵母 2 ハイブリッド法に用いたコンストラクト

遺伝子名	PCR 鋳型	ベクター
AD <i>KnRAF1</i> ※ (<i>rna-KFL 006220040</i>)	cDNA	pGADT7
BD <i>KnETR1</i> (<i>rna-KFL 005240070</i>)	cDNA	pGBKT7

※ N 末端部とキナーゼドメイン部に分割してそれぞれ用いた。

3.3 酵母 2 ハイブリッドアッセイ

(1) 酵母の形質転換

-80 °C の冷凍庫から取り出した凍結酵母(PJ69-

4a,PJ69-4 α)をチップで突き, YPDA 寒天培地に画線で広げ, 28 °C で 24 時間培養した。YPDA 液体培地を滅菌したファルコンチューブに 5 mL ずつ分注し, 白金耳を用いて培養した酵母を液体培地に溶かした。28 °C, 180 rpm のウォーターバスで 18-24 時間震盪培養した。吸光度計にて培養した酵母液の OD₆₀₀ を測定した。残りの酵母を新しいエッペンチューブに取り, Flash で集菌して上清を捨て, 希釈後の濃度が OD₆₀₀ = 5 となるように YPDA 液体培地を加え, ボルテックスでペレットを溶解した。新しいチューブに形質転換試薬・プラスミド混合液を調製し, BD コンストラクトには pj69-4a, AD コンストラクトには PJ69-4 α の酵母液を 5 μL 加え, ピペッティング及びボルテックスで懸濁した後, 42 °C で 2 時間インキュベートした。その後, 滅菌水 30 μL を加え希釈し, BD/pj69-4a を-W 選択培地に, AD/PJ69-4 α を-L 選択培地上に撒いて 28 °C で 24~72 時間培養した。生えてきたコロニーについて PCR を行い, 形質転換が確認されたものを新しい選択培地に画線し, 28 °C で 24-48 時間培養した。

(2) 接合

1.5 mL チューブに滅菌水を適量分注し, 形質転換した酵母を白金耳ですくって溶かし, タッピングまたはピペッティングで混合した。新しいチューブに, 接合する 2 種類の酵母を 50 μL ずつ分注し, 混合した。これを 10 μL 取って YPDA 寒天培地に滴下し, 28 °C で 24 時間培養した。その後, 白金耳で生じたコロニーの 1/2~1/4 を取って寒天選択培地-LW に画線し, 28 °C で 24-48 時間培養した。

(3) 試験培地での培養

滅菌したファルコンチューブに液体選択培地-LW を 5 mL ずつ分注し, 接合した酵母を溶かして 28 °C, 180 rpm で 18-24 時間震盪培養した。培養の後, 吸光度計で培養液の OD₆₀₀ を測定した。新しいチューブ内で培養液を OD₆₀₀=0.6 となるように液体選択培地-LW で希釈した。試験培地(-LWHA 及び-LW)に 5-10 μL をドロップし, その後シャーレを少し乾かしておいた。28 °C で 3-5 日間インキュベートし, 酵母の生育を確認した。

3.4 ウェスタンブロット解析

(1) タンパク質サンプルの作製

コケへの ABA 処理は 7 日間培養したコケ原系体プレートに ±10 μM ABA 水溶液を 5 mL 加えることで行った。処理後のコケに生重量の 3 倍の抽出バッファーを加え, 乳鉢にて摩砕した。

遠心後、上清のタンパク質濃度を Bradford にて測定し、2.5 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ になるように抽出バッファーで希釈した。これにサンプル液量の 1/2 倍量の 3x SDS バッファーを加え、100°C で 1 時間煮沸したものをタンパク質サンプルとした。

(2) SDS-PAGE とウエスタンブロット解析

SDS-PAGE 用ゲルの各ウェルに 16 μL のサンプル、5 μL のマーカー (PM2500) をアプライし、120 V 定電圧で 120 分間電気泳動した。

電気泳動後、SDS ゲルをブロットバッファーに入れ、30 分間振盪した。ゲルの大きさにカットした PVDF 膜をメタノールでリンスし、同様にブロットバッファーに入れて振盪した。振盪後、SDS ゲルと PVDF 膜を濾紙とファイバーパットで挟み、タンク式転写装置にセットして冷却しながら 30 V 定電圧で 16 時間転写した。

転写した PVDF 膜を TBS-T で 5 分間 2 回洗浄した。これをブロッキング液に入れて 1 時間振盪した。ブロッキングの後、1 次抗体液に入れて室温で 1 時間振盪した。1 次抗体は、GFP 抗体 (MBL) を 1 : 1000 に希釈して使用した。KnRAF1 及び ARK のリン酸化の検出にはリン酸化ペプチド (FLTSKpSSAGTPEWMAPE) を抗原として作製し、同ペプチドを用いてアフィニティー精製、リコンビナント ARK を用いて吸収精製を行ったウサギポリクローナル抗体 (抗 ARK Ser1029 リン酸化抗体、石崎 修士論文 2017) を 1 : 25 に希釈して使用した。1 次抗体反応後、TBS-T で 5 分間×5 回洗浄し、2 次抗体液に入れて室温で 1 時間振盪した。2 次抗体は、ヤギ抗ウサギ IgG (H+L) HRP Conjugate (MBL) を 1 : 10000 に希釈して使用した。2 次抗体反応後、TBS-T で 5 分間×5 回洗浄した。

PVDF 膜にケミルミ・ワンを 1 cm^2 に対して 0.125 mL になるように滴下し、1 分間反応させた。反応後、余分な反応液を取り除き、クリアポケットで挟んで X 線フィルムと一緒にカセットに入れ、感光させた。感光後、X 線フィルムを現像液に 5 分間浸した。その後、X 線フィルムを流水で洗浄し、固定液に浸して現像した。

(3) CBB 染色

電気泳動後の SDS ゲルを CBB 染色液 (関東化学) に入れて一晩染色した。その後、水に入れてバックグラウンドが見えなくなるまで脱色した。

3.5 形質転換体の作出

形質転換処理は AR133(*ark*)株を元株として、ドリセラーゼ処理したプロトプラストにポリエチレングリコール法 (PEG 法) にて KnRAF1-GFP pTN コンストラクトを導入することで行った。

形質転換処理後、10 μM ABA 入りの BCDAT 培地に移し、25 °C で一晩培養した。その後セロハンごと 0.5 M NaCl 入りの BCDAT 培地に移し、25 °C で一晩培養した後、通常の BCDAT 培地に移して 2 週間培養後、生き残った株を単離して形質転換体とした。

4. 結果

4.1 ストレプト藻類 RAF のレポーターアッセイ

ヒメツリガネゴケ *ark* 変異体である AR133 株に対しストレプト藻類 RAF の過剰発現コンストラクトを導入し、ABA 誘導性の *Em-GUS* をレポーターとして ABA 応答性遺伝子の発現量を測定した (図 4)。

クレブソルミディウム (*K. nitens*) では EDR ドメインを持ち、B3 に属する *KnRAF1* が +ABA において有意に高い GUS/FLUC の値を示し、*ark* を相補したのに対し、EDR ドメインを持たない *KnRAF2* は GUS/FLUC の値がコントロールと同程度で、*ark* を相補しなかった (図 4-a)。シャジクモ (*C. braunii*) では、N 末端側 1303 アミノ酸を欠失した *CbRAF1* (1304-2423) 及び *CbRAF2* を導入した (図 4-b)。 *CbRAF1* (3910-7269)、*CbRAF2* ともに、-ABA、+ABA 下でコントロールと比較し有意に大きい GUS/FLUC の値であったが、+ABA の値は -ABA に比べより大きくなっていた。

クロロキブス (*Chlorokybus* sp.) の *CkRAF1* は -ABA、+ABA いずれの条件でもコントロールと比較して有意に大きい GUS/FLUC の値であった (図 4-c)。

メソスティグマ (*M. viride*) の *MvRAF1* は条件に関わらずコントロールと同程度の GUS/FLUC の値であり、*ark* を相補しなかった。

4.2 *KnRAF1* と *KnETR1* の共発現レポーターアッセイ

ark/etr 変異体に対しクレブソルミディウムの *KnRAF1*、*KnETR1* の過剰発現コンストラクトを導入し、*Em-GUS* を用いたレポーターアッセイを行うことで ABA 応答性遺伝子の発現量を測定した (図 5)。

アッセイの結果、*KnRAF1* と *KnETR1* が同時に導入された組み合わせでは、+ABA においてコントロールと比較して有意に大きい GUS/rLUC の値となり、*ark/etr* を相補した。*KnRAF1* のみが導入された場合の GUS/rLUC 値はコントロールと同程度であったが、*KnETR1* のみが導入された場合にはコントロールと比較して +ABA における GUS/rLUC の値が大きくなる傾向があった。

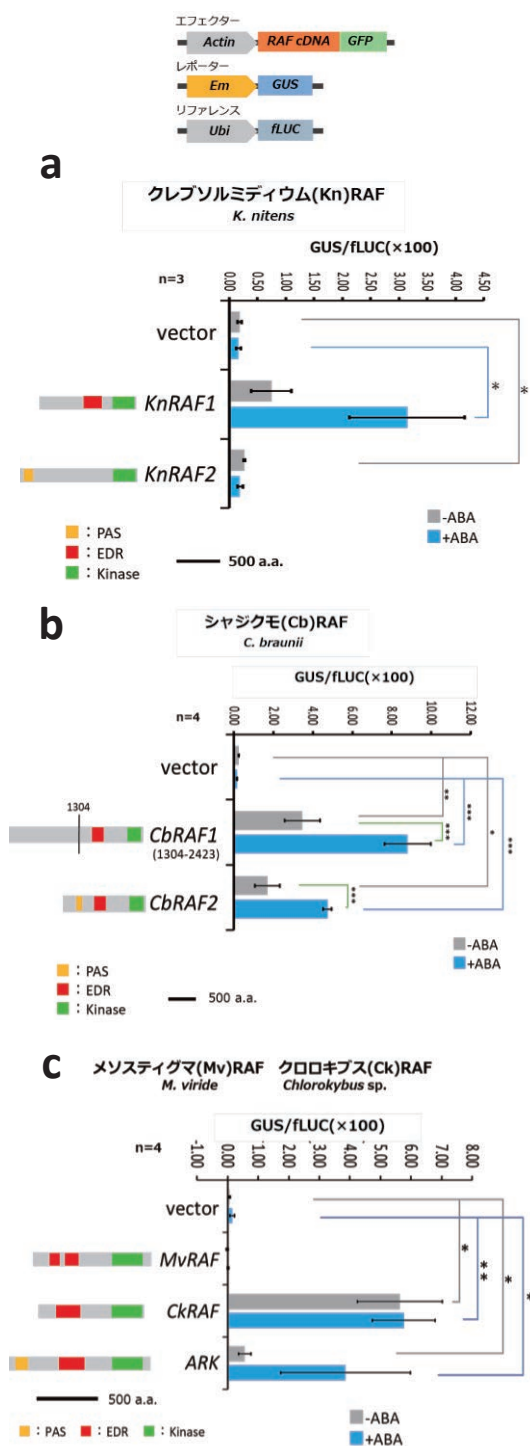


図 4. ストレプト藻類 RAF のレポーターアッセイ

RAF の cDNA を過剰発現ベクター pTN-GFP の *Actin* プロモーター下流に導入し、エフェクターとして用いた。コントロールとして cDNA の入っていない pTN-GFP を用いた(vector)。エフェクターを *Em-GUS*, *Ubi-FLUC* とともにパーティクルガンで AR133(*ark*)株に導入し、 $\pm 10 \mu\text{M}$ ABA 入りの培地で一晚培養後、GUS/FLUC の測定を行った。また、グラフ左のバーダイアグラムは RAF の構造を示し、黄色、赤色、緑色はそれぞれ PAS, EDR, キナーゼのドメインを表す。黒いバーは 500 アミノ酸残基の長さを表す。CbRAF1 は C 末端側(1304-2423 a.a.)を用いている。

*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, エラーバーは SD.

a) 藻類 *K. nitens* の RAF, $n = 3$ b) 藻類 *C. braunii* の RAF, $n = 4$
c) 藻類 *M. viride*, *Chlorokybus sp.* の RAF, $n = 4$

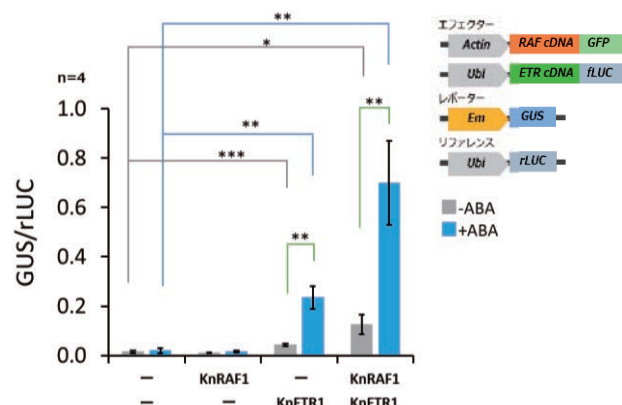


図 5. KnRAF1, KnETR1 の共発現レポーターアッセイ

RAF の cDNA を過剰発現ベクター pTN-GFP の *Actin* プロモーター下流に導入したもの、及び ETR の cDNA を過剰発現ベクター Ubi-FLUC の Ubi プロモーター下流に導入したものをエフェクターコンストラクトとして用いた。コントロールとして cDNA の入っていない pTN-GFP, Ubi-FLUC を用いた。エフェクターを *Em-GUS*, *Ubi-rLUC* とともにパーティクルガンで *ark/etr* 株に導入し、 $\pm 10 \mu\text{M}$ ABA 入りの培地で一晚培養後、GUS/rLUC の測定を行った。

*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, $n = 4$, エラーバーは SD.

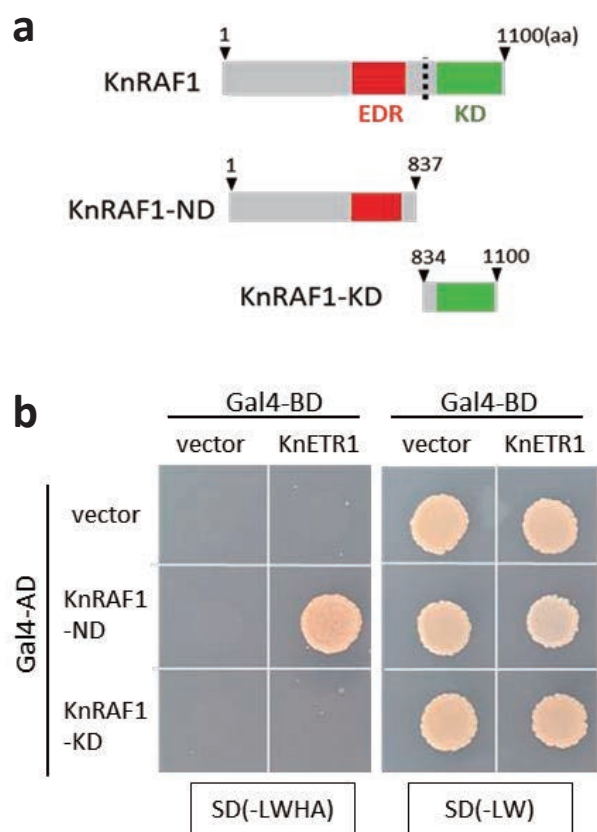


図 6. 酵母 2 ハイブリッドアッセイによる KnRAF1 と KnETR1 の相互作用解析

a. AD コンストラクトに用いた KnRAF1-ND, KnRAF1-KD の模式図
b. 形質転換酵母を 28°C , 180 rpm で培養後、培養液の濃度を $\text{OD}_{600} = 0.6$ に希釈し、-LW または -LWHA の合成最小培地に $10 \mu\text{L}$ ずつスポットし、 28°C で 4 日間培養した。

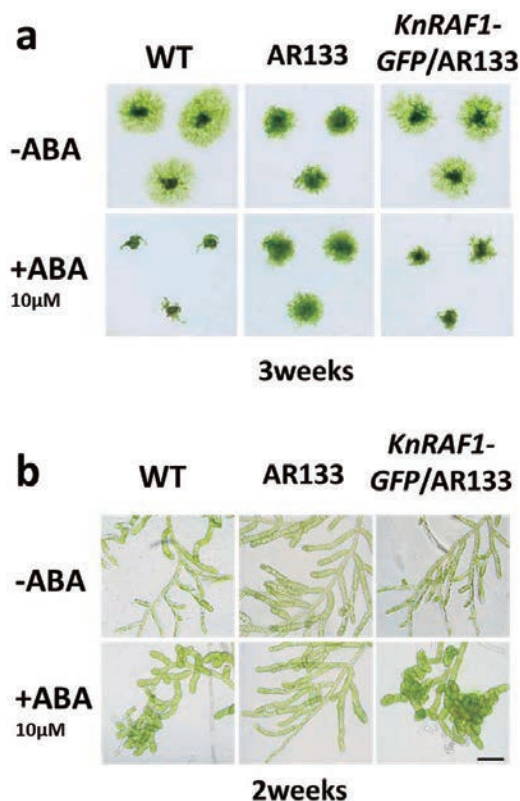


図 7. ±ABA における *KnRAF1-GFP/AR133* 株の観察

- 原系体をピンセットでごく少量つまみ、±10 μM ABA 入りの BCDAT 培地上にのせて 3 週間培養した。
- 原系体を 2 枚のセロハンで挟み、±10 μM ABA 入りの BCDAT 培地上にのせて 2 週間培養した。スケールバーは 100 μm を表す。

4.3 酵母 2 ハイブリッドアッセイを用いた *KnRAF1* と *KnETR1* の相互作用解析

酵母 2 ハイブリッドアッセイでは Gal4-AD-*KnRAF1* と Gal4-BD-*KnETR1* の相互作用を、アミノ酸要求性の回復を調べることで判定した。

その結果、EDR ドメインを含む *KnRAF1* の N 末端ドメイン(ND)と *KnETR1* の組み合わせでロイシン、アデニン要求性が回復した(図 6)。

4.4 *KnRAF1* 過剰発現株の作出とウェスタンブロット解析

ヒメツリガネゴケ *ark* 変異体である AR133 株に PEG 法を用いて *proActin-KnRAF1-GFP* を導入し、塩処理によるスクリーニングを行うことで *KnRAF1-GFP/AR133* 株を得た。*KnRAF1-GFP/AR133* は ABA 処理によって成長が抑制され、ブルードセルが形成されるなど、野生株に近い形質を有していた(図 7)。

KnRAF1 キナーゼドメインのリン酸化を調べるため、±ABA で 15 分間処理をした *KnRAF1-GFP/AR133* 株と *ARK-GFP/WT* 株の原系体からタンパク質を抽出し、抗 ARK Ser1029 リン酸化

抗体と抗 GFP 抗体を用いてウェスタンブロット

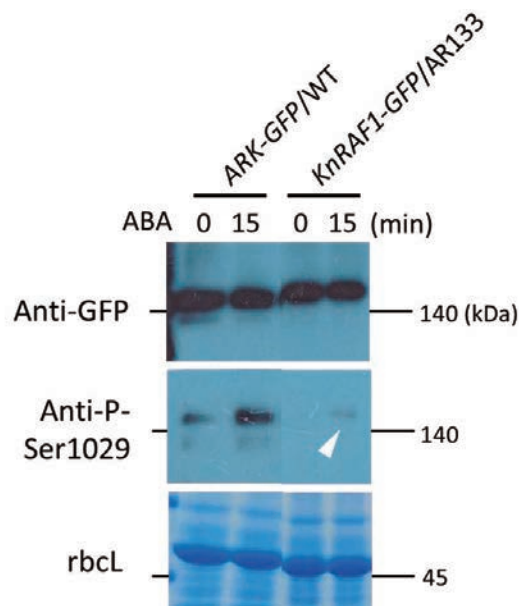


図 8. ウェスタンブロット解析による *KnRAF1* リン酸化の検出

原系体に±10 μM ABA で 15 分間処理を行った後にタンパク質を抽出し、一次抗体として抗 GFP 抗体または抗 ARK P-1029 リン酸化抗体(Anti-P-Ser1029)を用いたウェスタンブロット解析を行った。RuBisCo 大サブユニット(*rbcL*)の染色にはクマシーブリアントブルー(CBB)を用いた。*KnRAF1-GFP/AR133* で見られたバンドを白い矢尻で示した。

解析を行った(図 8)。

その結果、抗 ARK Ser1029 リン酸化抗体を用いた解析では *ARK-GFP/WT* のものと比べて弱いものの、ABA 処理によって *KnRAF1* のリン酸化が検出された。

5. 考察

5.1 ストレプト藻類 RAF では EDR ドメインが耐性獲得に重要である

ストレプト藻類 RAF では、EDR ドメインを持つ *CbRAF1*, *CbRAF2*, *KnRAF1*, *CkRAF1* が ABA 応答性遺伝子の発現量を上昇させた一方、EDR ドメインを持たない *KnRAF2* および EDR ドメインが分断された *MvRAF1* は発現量を上昇させなかった。陸上植物の RAF において EDR ドメインは ETR と相互作用する為に必要な領域であり、ストレプト藻類 RAF についても EDR ドメインが ETR との相互作用、活性化において重要であることを示唆する。

進化的にストレプト藻類の基部に位置するメソスティグマには陸上植物の ETR と相同遺伝子が保存されていない (Ju et al. 2015)。 *MvRAF1* において、ETR との相互作用に重要な EDR ドメインが分割されているのは、ETR との相互作用が確立されていないためであると考えられる。また、メソスティグマと同様にストレプト藻類

の基部に位置するクロロキブスについても ETR の相同遺伝子を持たず, RAF と ETR の相互作用が確立されていないと考えられる. *CkRAF1* は *MvRAF1* と異なり分断されていない EDR ドメインを持ち, +ABA に加えて-ABA でも ABA 応答性遺伝子を活性化させた. これは ETR による RAF の抑制制御が確立されていない, 高浸透圧シグナル経路が成立した初期の関係を反映している可能性がある.

5.2 藻類クレブソルミディウムでは主要な高浸透圧ストレス応答因子が機能的に保存されている

本研究のレポーターアッセイと変異体解析では, 藻類クレブソルミディウムの *KnRAF1* がヒメツリガネゴケの *ark* を相補し, ABA 依存的にリン酸化した. また, 共発現レポーターアッセイと酵母 2 ハイブリッドアッセイは *KnRAF1* と *KnETR1* の機能的な相互作用を示した.

これらの結果は ETR-RAF-SnRK2 という高浸透圧シグナルの主要な経路がクレブソルミディウムにおいて確立されていることを示唆する.

先行研究では, ヒメツリガネゴケ *ppsnrk2* 変異体を用いたレポーターアッセイにおいて *KnSnRK2* が ABA 応答を回復させた(Shinozawa et al. 2019). また, Komatsu らはヒメツリガネゴケ野生株を用いたレポーターアッセイで *KnABI1* が *PpABI1A* と同様に ABA 応答性遺伝子の発現を抑制することを示した(Komatsu et al. 2020). 以上を踏まえると, 藻類クレブソルミディウムでは高浸透圧応答シグナルが機能的に保存されていると考えられる. クレブソルミディウムは気生藻として陸上で生息することが知られていることから(Hori et al. 2014), ストレス応答因子が陸上環境への適応に関与していることを示唆する.

今後の課題としては, ストレス応答因子の活性化を通し, 実際に藻類が耐性を獲得していることを検証する必要がある. また, 藻類 RAF が冠水ストレス応答へ与える影響については未だ不明であり, これを調べることで冠水応答シグナルの成立についても明らかとなることが期待される.

参考文献

- 1) Akihisa Shinozawa, Ryoko Otake, Daisuke Takezawa, et al (2019)
SnRK2 protein kinases represent an ancient system in plants for adaptation to a terrestrial environment, Communications Biology, 2, 30.
- 2) Chuanli Ju, Bram Van de Poel, Endymion D. Cooper et al. (2015)
Conservation of ethylene as a plant hormone over 450 million years of evolution, Nature Plants volume 1, 14004
- 3) Chuanli Ju, Gyeong Mee Yoonb, Jennifer Marie Shemansky et al. (2012)
CTR1 phosphorylates the central regulator EIN2 to control ethylene hormone signaling from the ER membrane to the nucleus in Arabidopsis, Proceedings of the National Academy of Sciences, 109 (47) 19486-19491
- 4) Fen-Fen Soon, Ley-Moy Ng, X. Edward Zhou et al. (2012)
Molecular Mimicry Regulates ABA Signaling by SnRK2 Kinases and PP2C Phosphatases, Science, 335, 6064, 85-88
- 5) Kazuo Nakashima, Kazuko Yamaguchi-Shinozaki et al. (2013)
ABA signaling in stress-response and seed development. Plant Cell Reports, 32, 959-970
- 6) Kazuya Ichimura, Kazuo Shinozaki, Guillaume Tena et al. (2002)
Mitogen-activated protein kinase cascades in plants: a new nomenclature, TRENDS in Plant Science, 7, 7
- 7) Kenji Komatsu, Daisuke Takezawa, Yoichi Sakata et al. (2020)
Decoding ABA and osmotic stress signalling in plants from an evolutionary point of view
Plant, Cell & Environment. , 43, 2894-2911.
- 8) Koichi Hori, Fumito Maruyama, Takatomo Fujisawa, et al. (2014)
Klebsormidium flaccidum genome reveals primary factors for plant terrestrial adaptation, Nature Communications, 5, 3978.
- 9) Masashi Saruhashi, Totan Kumar Ghosh, Kenta Arai, et al (2015)
Plant Raf-like kinase integrates abscisic acid and hyperosmotic stress signaling upstream of SNF1-related protein kinase2.
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112, 6388-6396
- 10) Mousona Islam, Takumi Inoue, Mayuka Hiraide et al. (2021)
Activation of SnRK2 by Raf-like kinase ARK represents a primary mechanism of ABA and abiotic stress responses, Plant Physiology, 185: 533-546
- 11) Quy Thi Cam Nguyen, Sun-ji Lee, Seo-wha et al. (2019)
Arabidopsis Raf-Like Kinase Raf10 Is a Regulatory Component of Core ABA Signaling
Molecules and Cells, 42, 646-660
- 12) Sean R. Stevenson, Yasuko Kamisugi, Chi H. Trinh (2016)
Genetic Analysis of Physcomitrella patens Identifies ABSCISIC ACID NON-RESPONSIVE, a Regulator of ABA Responses Unique to Basal Land Plants and Required for Desiccation Tolerance, The Plant Cell, 28, 6, 1310-1327
- 13) Sun-ji Lee, Mi Hun Lee, Jeong-Il Kim (2015)
Arabidopsis Putative MAP Kinase Kinases Raf10 and Raf11 are Positive Regulators of Seed Dormancy and ABA Response, Plant Cell Physiology, 56, 1, 84-97
- 14) Taishi Umezawa, Naoyuki Sugiyama, Masahide Mizoguchi et al. (2009)
Type 2C protein phosphatases directly regulate abscisic acid-activated protein kinases in Arabidopsis, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106, 17588-17593
- 15) Takeshi Kuroha, Keisuke Nagai, Rico Gamuyao et al. (2018)

Ethylene-gibberellin signaling underlies adaptation of rice to periodic flooding, *Science* 361, 181–186

- 16) Tsukasa Toriyama, Akihisa Shinozawa, Yuki Yasumura et al. (2022)
Sensor histidine kinases mediate ABA and osmostress signaling in the moss *Physcomitrium patens*, *Current Biology* 32, 1–12
- 17) Yuki Yasumura, Ronald Pierik, Mark D. Fricker et al. (2012)
Studies of *Physcomitrella patens* reveal that ethylene-mediated submergence responses arose relatively early in land-plant evolution, *The Plant Journal* ,72, 6, 947-959
- 18) 猿橋正史, 博士論文 (2016)
Group B MAPKKKを介したABAシグナル伝達機構の解析著

市民による絶滅危惧種ツシマヤマネコ保全活動の取り組み

—減少要因に対する保全の実践—

岡田 美夢¹⁾

1) 日本物理探鑛株式会社 中部支店

1. 序論

ツシマヤマネコ(学名: *Prionailurus bengalensis euptilurus*)は、東南アジアから朝鮮半島にかけて大陸に広く分布するベンガルヤマネコの1亜種であり、日本では長崎県対馬にのみ生息する。2007年度版環境省レッドリストで絶滅危惧ⅠA類に分類され、日本の野生哺乳類で最も絶滅が危惧されている動物の一つである。2015年から2019年に行われたツシマヤマネコ第5次生息調査によると、生息個体数は約70又は110頭と推定された(環境省, 2020)。野生動物は、個体数が100頭を下回ると絶滅の危険性が極度に高くなると言われ、ツシマヤマネコは非常に危険な状態である(大塚ら, 2009)。ツシマヤマネコの減少要因として、前田(2015)は好適生息地の減少、交通事故、外来生物による影響などを挙げた。伊澤・土肥(1991)は生息環境の改変・破壊が最も大きな、致命的な問題とし、本田(2018)は減少要因の中でも交通事故が深刻な原因であると指摘している。また、大神(2011)は、広葉樹木の伐採による生息環境の悪化や農業の衰退によるエサ資源の減少など人間生活の変化がヤマネコの生息地を脅かしているとした。これらの先行研究から、生息数の減少に大きな影響を与える減少要因として好適生息環境の減少と交通事故に着目した。行政は生息環境の悪化や交通事故を防ぐため、ツシマヤマネコ保護増殖事業を実施している(図1)。生息域内保全では、生息環境の保全・改善、交通事故対策、傷病個体の保護等が行われている。本研究では、好適生息環境の減少と交通事故の二つの要因に対する市民活動について整理する。対馬市は、市民活動を市民の自発的な意思に基づき、かつ広く市民生活の向上を目的とした非営利で公益的な活動と定義した。市民活動は市民の視点から自発的に課題解決に取り組む活動として、1980年代半ば頃から、福祉、環境、まちづくりなどの様々な分野に広がった。藤田(2019)によると市民参加は、財源・マンパワーの不足を補うという環境行政側の意図のもとに導入された。市民の価値観が多様化し、市民ニーズが多様化・複雑化するなかで、その社会的役割は増している(川崎市, 2001)。

本稿では、長崎県対馬市上県町佐護地区におい

て、ツシマヤマネコの保全に取り組む NPO やボランティア団体を事例に、その市民活動がツシマヤマネコ保全、減少要因にどのような役割を果たしているのか明らかにする。

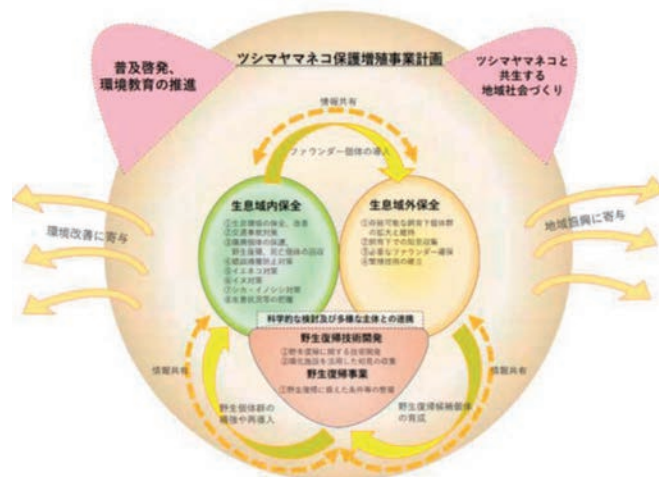


図1 ツシマヤマネコ保護増殖事業のイメージ
「ツシマヤマネコ保護増殖事業実施方針(令和4年度改定版)」(ツシマヤマネコ保護増殖連絡協議会, 2022)

2. 調査方法および調査団体

2.1 調査方法

本研究では、佐護地区でヤマネコの保全活動に取り組む3団体を対象にインタビュー調査と現地調査を実施した。NPO 法人ツシマヤマネコを守る会(以下、「守る会」)、ツシマヤマネコ応援団(以下、「応援団」)、佐護ヤマネコ稲作研究会(以下、「研究会」)である。調査の概要を表1に示す。これらの調査によって、各団体の保全活動の詳細や実態を把握した。調査結果を踏まえ、市民活動がヤマネコ保全と減少要因にどのような役割を果たしているのか検討する。

表1 インタビュー調査の概要

	対象団体名	実施日	対象者	実施方法
1	応援団	2021/9/9	副代表, 事務局	遠隔(Zoom)
2	守る会	2021/10/6	会長, 事務局	
3		2021/10/16	会員4名	対面
4		2021/10/17	会員3名	
5	応援団		副代表	
6	研究会	2021/12/3~5	会員	
7	応援団	2021/12/4	代表, 副代表, 事務局, 他団員2名	遠隔(Zoom)
8	研究会	2022/9/5	事務局, 代表	
9		2022/10/25	農家5名	対面
10		2022/10/26	農家1名	

2.2 調査団体

本節では、文献調査とインタビュー調査により明らかになった設立経緯、活動内容を記述する。3団体の組織概要(活動目的、会員数、年齢構成、居住地)を表2にまとめた。

(1) ツシマヤマネコを守る会

守る会は、絶滅の危機に瀕するツシマヤマネコを守ることを目的として1993年に設立され、2007年にNPO法人化された。設立のきっかけは、高知県のニホンカワウソが絶滅したという報道であった(インタビュー調査2より)。「対馬では1980年代から急速に環境が悪化し、ヤマネコの数も減少していた。今度はツシマヤマネコがニホンカワウソのように激減し絶滅してしまうのではないかと、何とかしなければ。」という強い思いが会の立ち上げを後押しした。設立当初13名だった会員は、現在約300名に及ぶ。40代以上の年齢層が多く、20～30代は少ない傾向にある。対馬島内に定住する会員が全体の12%ほどであり、会員のほとんどが島外から守る会を支えている。活動内容は、主に給餌活動、ヤマネコ保護区の設置、水場づくり、動物たちの園で行う耕作である。

(2) ツシマヤマネコ応援団

応援団は、ツシマヤマネコと対馬の自然を守ること、ツシマヤマネコをはじめとする対馬の野生動物を守り、次世代に引き継ぐことを目的として2003年に設立された。設立以前、佐護地区にある対馬野生生物保護センター(以下、保護センター)の案内やヤマネコの痕跡調査員を個人的に引き受けていた地域住民がいた。こうした住民らが保護センターで何度か顔を合わせる中でセンターの協力員としてボランティアグループをつくる提案があった(インタビュー調査1より)。そのため、設立当初はヤマネコの保護活動よりセンター業務の手伝いを主としていた。応援団という団体名は、「センターの職員を応援しよう」という意味も込められている。保護センター職員数が増え、業務が分業化したことで、応援団は舟志の森づくりや交通事故対策プロジェクトに取り組み、活動の輪を広げている。設立当初5名だった応援団は、現在約80名が所属している。年齢制限がないため、0歳から78歳と幅広い年齢層で構成される。家族会員として家族で共に入会する場合やUターンで対馬に帰ってきた場合に入会した若い層も増えているが、全体的に団員の高齢化が進んでいる。活動開始時は保護センター付近の住民が主に所属していたが、現在は島外の会員もいる(インタビュー調査1より)。活動内容は、主に交通事故対策、とらやまの森プロジェクト、広報活動、対馬野生

物保護センターのイベント補助である。

(3) 佐護ヤマネコ稲作研究会

研究会は、脈々と受け継がれてきた「自然との共生」の知恵とは何か、もう一度百姓の原点に立ち返り、みんなにとっての「うれしい」を実現することを目的として2009年に設立された。設立のきっかけは、当時の佐護地区長に環境省職員が「地域の人たちを含めてヤマネコ保護ができないか。」と話したことである(インタビュー調査6より)。水を張った田んぼのカエルを食べるなど、米作りの中でヤマネコは生きてきた。そのため、田んぼに毎年水を張ることでヤマネコの餌になるカエルやネズミを田んぼに呼ぶことができる。そこで、農家や専門家、行政職員、地域住民で構成される組織の設立が考案された。設立当初は佐護区でツシマヤマネコ米を作る農家3名、保護センターの職員、市職員、県職員を含む11名で構成された。現在、所属する農家は8名となり、年齢層は60～70代が多いが、40、50代の農家もいる(インタビュー調査8より)。活動内容はヤマネコが暮らしやすい田んぼづくりと地元農家の活性である。具体的には佐護ツシマヤマネコ米の栽培、生きもの調査、オーナー制度、地域住民との交流や各種イベントでのPRである。

表2 各団体の概要

	守る会	応援団	稲作研究会
目的	ヤマネコを守る	ヤマネコと自然を守り、次世代へ継承	ヤマネコと共に暮らしていくため
会員数	約300名	約80名	約18名
年齢構成	40代以上が多い	0～80代と幅広い	60、70代が多い
居住地	島内が12%	島内外問わず	島内

2.2 調査団体 まとめ

3団体は、「ヤマネコを守る」という活動目的は共通だが、活動経緯や活動内容は異なる。目的が同じでもヤマネコを守るための手段やアプローチの仕方が異なるため、佐護地区内でそれぞれが独立して活動している。一方で各団体は独立しているものの、団体の所属者は主に佐護地区で生活する地域住民であるため、団体間において個人同士が友人、顔見知りの関係という場合が見られた。地域従来のネットワークがあるため、団体に所属していない地域住民とも距離が近く、つながりがあった。そのため、既に形成された人間関係の中で保全活動について幅広く情報を発信、収集している。だが、各団体に所属する会員の高齢化が進み、新たな人員確保に向けた取り組みが課題である。

3. 好適生息環境の減少

本章では、生息環境の現状と環境省や保護センターが行う行政の保護対策、各団体の取り組みを整理する。

3.1 生息環境の現状

ヤマネコは、薪炭林でどんぐりの実などを食べるネズミや水を張った田んぼのカエルを食べるなど、人の暮らしと深く関わりながら生息した歴史を持つ。昔は水田でよく目撃されたため、農家には「田ネコ」と呼ばれた（インタビュー調査6より）。また、魚の打ち上げ時、沿岸部に姿を現したため、漁師には「瀬ネコ」と呼ばれていた。だが、現在は水田や沿岸部での目撃数が減少し、その姿を見ることは難しい。餌環境として重要な場所である水田や畑、森林が減少しているためだ。対馬の耕作地面積は三分の一程度に減少し、水田の二分の一程度は圃場整備された（日本大学生物資源科学部全国農村サミット運営委員会, 2014）。加えて、林業の衰退に伴い、管理の行き届かない森林が増えている。高度経済成長期以降、対馬の過疎化は歯止めがかからず、自然への人の働きかけは弱まり、生物多様性は乏しくなった。開発によって生息環境が破壊されたというより、生息地としての質そのものが低下している。人の手によって維持されていたといっても過言ではないヤマネコの生息環境が悪化している今、その環境を取り戻すのは人の手でしかない。

3.2 生息環境に対する保護対策

好適生息環境の減少により、生息環境の保全、改善が実施されている。好適生息環境の減少に対する保護対策は、保護地域の指定・管理、保護地域外で生物多様性保全に資する地域の指定・管理、大規模な開発行為との調整である。

・保護地域の指定・管理

2015年に国指定舟志ノ内鳥獣保護区及び舟志ノ内特別保護地区が指定された（環境省, 2015）。佐護区に位置する標高 50～200m 程度の山間地で佐護川を始めとする複数の川が流れ、その周囲には森林が広がっている。多様な環境がパッチ状に入り組んだような環境であり、山間部におけるヤマネコの優れた生息好適地として重要である。環境省や保護センターは、保護区において適正な管理を行い、生息地の保護及び整備を図っている。

・保護地域外で生物多様性保全に資する地域の指定・管理

環境省は、民間の取組等によって生物多様性の保全が図られている地域について「自然共生サイ

ト（仮称）」として認定する仕組みを 2022 年度から試行した（環境省, 2022）。自然共生サイト（仮称）は、民間団体が生物多様性保全を目的として管理している場所に加え、手入れがされている里地里山や企業敷地、環境教育に活用されている森林や草原といった多様なエリアのうち、管理の結果として生物多様性の保全が図られている区域が該当する。

・大規模な開発行為との調整

2013 年、ヤマネコの生息密度が高く、生物多様性保全等にとって重要な森林地域が競売にかけられる事態が起こった（インタビュー調査3より）。対馬市においてこのような広大な森林地が競売に出されることは初めてであった。外国資本による落札が懸念されるため、本市では債権者並びに森林所有者との交渉により、競売を差し止め、任意売買で取得した。本件は、全国の注目を集め、山林取得や保全に対する寄付が相次いだ。生息地及びその周辺での土地利用や事業活動の実施に当たって、重要な餌場や移動経路といった生息に必要な環境条件を確保するための配慮が払われるよう、関係機関との連携及び情報共有を図りつつ事業者との調整が行われている。

3.3 生息環境に対する市民活動

好適生息環境の減少に対する市民活動は、保護区の設置、とらやまの森再生プロジェクト、舟志の森づくり、佐護ツシマヤマネコ米の栽培である。

・保護区の設置、整備（守る会）

行政による保護区の設置だけでなく民間団体による保護区の設置、整備が進められている。守る会では、佐護瀬の浜地区の民有地（84,959 m²）を買収し、独自の保護区を設置した。現在は虫食い状態で耕地を買収しているが、うまく進んでいない（インタビュー調査 2 より）。地域住民の大半は協力的だが、買収が進まない要因がいくつか挙げられる。条件のいい土地を所有する人は手放すことに抵抗がある場合や土地の所有者が不明もしくは連絡が取れない場合である。また、保護区の予定地は山や森林のため、大きな高木や人工林の高木がある場所は地価が上がり買収が進みづらい状況にある。だが、民有地の買収を地道に進めることで、2013 年に起きた競売の再発を防ぎ、生息地とその周辺の開発行為に対する抑止力になるのではないだろうか。大規模な開発行為との調整は行政だけでなく、守る会のような市民団体もその役割を担っているといえる。

守る会が設置した保護区内では好適生息環境を保つために耕作活動が行われている。耕作活動

では、2003年から約70aの耕作放棄地を借りあげ、大豆やソバ作りに取り組んでいる。ヤマネコの餌になる小動物が増えるよう実った作物は収穫せずにそのままネズミやモグラといった小動物の餌として残す。ヤマネコの生息環境を維持するため、餌資源になる小動物や対馬で行われてきた耕作にも目を向け広く活動している。

・とらやまの森再生プロジェクト(応援団)

応援団では、2004年からとらやまの森再生プロジェクトに取り組んでいる。植林地の伐採後、そのまま放置すると土砂崩れや森林の遷移が進まず、荒地地となる。加えて、対馬ではスギ・ヒノキの植林が盛んだったため、他の樹木の種子が落ちておらず、新しい木が生えづらい。そこで、伐採後の森の再生を目指し「昔から対馬に生えていた木を植えよう」と、どんぐりから苗を育て植樹している。インタビュー調査 7 より、応援団の団員はヤマネコの保全活動について以下のように述べた。

「自分たちの代で何かを無くして、後につなげる。そういうのはなるべくしたくないなあ。特に田舎で育った、親が子のためにね、財産を残して、山とか畑を残してまたそれが段々と続いていく。」

「(ヤマネコが)対馬にしかないいちゅうのは自慢かないうこともあるけど、(対馬に)おるやつはおった状態で自分の子どもとか孫に繋げていきたいなあいうだけの気持ちやけね。」

インタビュー調査から、団員は自分たちがこれまで受け継いできた対馬の自然、野生動物を途絶えさせることなく次の世代につなげたいと考えていることが分かった。とらやまの森再生プロジェクトもこうした思いが原動力となり、対馬由来の苗を育てている。2.2 調査団体で前述した通り、応援団の目的である「ヤマネコをはじめとする対馬の野生動物を守り、次世代に引き継ぐこと」が団員間で共有され、活動の基盤になっていることが分かった。

・舟志の森づくり(応援団)

舟志の森づくりは、ヤマネコが多く生息していた豊かな森を再生し、人と自然が共生する環境を生み出すことを目的とした森づくり計画である。2007年、「舟志の森づくり推進委員会」が応援団、企業、舟志地区、環境省、対馬市によって設立された。基本的には舟志地区ボランティアが植林地管理を行い、管理にかかる費用は企業から出資される(宮内, 2017)。社有林内の現況を調査し、スギ・ヒノキの良質な材が生産できる土地では間伐等

の適正な管理を行う。一方で地形などの要因で良質な材の生産が見込めない土地ではスギ・ヒノキの全伐後、応援団が育てたどんぐり苗を植樹した。どんぐり苗が成長して実をつければ、ヤマネコの餌であるネズミが増えるなど生き物の豊かな森ができ、ヤマネコにとって生息しやすい環境となる。対馬の森はネズミが利用するどんぐりを育て、ネズミがどんぐりを土中に貯食することによって森が更新されている。森全体の管理計画は、対馬市自然共生班と保護センターで行う。森づくりは時間がかかり根気のいる作業だが、地域住民の熱意とそれを支える企業、行政の力がこの活動を繋いでいる。このように、人員の確保や地域に密着した活動によって、応援団は保全活動を支えている。

・佐護ツシマヤマネコ米の栽培(研究会)

水田はヤマネコの重要な餌場であると同時に、稲で身を隠す休息場、仔育て場の機能を有する。だが、米づくりは米価の低迷や従事者の高齢化などによる耕作放棄地の増加や農薬の多用といった問題を抱えている。

研究会はヤマネコと共生する稲作を目指し、ヤマネコの生息環境に配慮した「佐護ツシマヤマネコ米(以下、ヤマネコ米)」づくりに取り組んでいる。研究会に所属する農家は対馬出身で祖父母や親から田畑を受け継いでいる(インタビュー調査 9 より)。U ターンで就農した農家は「佐護に広がる田畑、自然を残したい。祖父や父がしてきた仕事を」と話した。受け継いだ田畑や佐護の自然を残したいという思いが米づくりと研究会の活動を支えている。

米づくりにおいて、特定栽培米の基準より厳しい減農薬・減化学肥料の栽培基準を設けている。基準項目には必須事項と努力事項があり、必須事項には削減対象農薬の使用回数を慣行農法の5割以上削減等、努力事項には早期湛水の実施等がある。早期湛水は、田植え前に田んぼに水を入れることで田んぼのプランクトンやミミズが増える。また、早く発芽した雑草を土の中に閉じ込めることで抑草の効果も期待できる。研究会は、栽培方法を模索しながら、水田の維持に努めてきた。

また、研究会の活動は、団体内だけでなく、地域の農家にも影響を与えている。研究会の発足以前は、減農薬に取り組む農家が居なかったため、害虫被害を防ぐために農薬を大量に使用していた。昔は農薬の粉が風で大量に舞い上がり、佐護平野の水田全体に煙が上がっていたほどであった(インタビュー調査 9 より)。だが、研究会の農家が減農薬を始め、少ない農薬量で害虫の被害が抑えら

れることが分かった, 研究会に所属していない近隣の農家も農薬量や散布回数を減らすようになった. 研究会の活動によって, 近隣農家の農薬に対する行動が変わり, 佐護平野全体に減農薬や生息環境に配慮した米づくりを広めている.

好適生息環境の減少 まとめ

佐護地区では各団体が生息環境の維持・再生に取り組み, 生息地としての質を向上させている. 守る会は民有地の買収を進めることで生息地の開発を防ぎ, 応援団はセンターや企業と協力し, 苗木の育成や森林の遷移を促してきた. 研究会は, 減農薬による米づくりを行い, 近隣農家の農薬に対する意識に変化を与えた. こうした活動は, 「ヤマネコを守りたい」という思いに加え, 「佐護に広がる田畑や自然を残したい, 次の世代に受け継ぎたい」という思いによって支えられていることが分かった.

好適生息環境の減少を一つの減少要因として扱ったが, 餌資源の不足, 耕作放棄地の増加, 林業の衰退, 高齢化等の要因が複雑に絡み合うため, 様々な要因に細分化できる. このように, 要因が複雑化する中でその一つ一つと向き合い, 長期的に保全活動を行うのは容易ではない. 佐護地区では, 同地域内に活動フィールドや活動内容が異なる団体が存在することで, 多様な主体が行政だけでは補えない情報や人脈を活かした密な保全活動を実現している.

また, 3 団体の共通した取り組みとして, ヤマネコの餌資源に関する取り組みが挙げられる. 守る会のソバ作り, 応援団のどんぐり苗, 研究会の環境に配慮した米づくりは, 具体的な活動内容は異なるものの, 小型哺乳類や昆虫の生息環境, 餌資源の増加に繋がっている. 自然環境を整え, 餌となる小型哺乳類が生息できる環境を整えることが, ヤマネコの生息環境を守ることにつながり, 対馬の豊かな自然環境全体の保全に繋がっている.

環境省は自然共生サイトの認定を開始し, 地域における生物多様性の保全再生に資する活動を支援する. 認定制度が整備され, 各団体の保全活動が認定基準を満たせば, 支援を受けることでより活動の幅を広げることができると考えた. 3 団体はヤマネコの保全活動を継続的にやり, 対馬の生物多様性に貢献してきた. そのため, 自然共生サイトの基準次第では認定地として候補に挙がる可能性が高いと考えた. 本章で整理した市民活動は NPO 法人や農業従事者, 企業といった多様な主体が携わる. 今後, 自然共生サイトを認定していく上で多様な主体をどのように支援していくのか, 支

援制度を充実させる必要がある.

4. 交通事故

4.1 交通事故の現状

対馬は島の大半が森林で覆われた起伏に富んだ山がちな地形であり, 125 の集落の大部分は海岸沿いの入り江に点在している. この集落を繋ぐための道路や林業道路が島内を網目状に通っており, ヤマネコは生息地内を移動する際に必然的に道路上を横断する. そのため, 常に交通事故の危険性と隣り合わせの暮らしを強いられる. 保護センターによると, ヤマネコの交通事故は 1992 年以降 127 件の発生が確認され, そのうち 117 頭が死亡している(2021 年 8 月 31 日現在). 交通事故では繁殖に寄与している個体や今後, 繁殖に寄与する若齢の個体が失われるため, ヤマネコの存続を脅かす大きな要因となっている.

4.2 交通事故に対する保護対策

・交通事故対策

交通事故を防止するため, ヤマネコの移動経路を確保するためのカルバート(暗渠)の設置・改良などの構造物への対策を推進している(ツシマヤマネコ保護増殖連絡協議会, 2022). 注意標識の設置, 警察等と連携した交通事故防止キャンペーン, ハザードマップの配布等によるドライバーへの普及啓発を実施し, 事故件数の減少や事故発生時の迅速な通報及び個体の収容による死亡率(死亡件数/事故件数)の低減を図っている.

・傷病個体の保護・野生復帰

傷病や衰弱, その他の理由により保護センターに保護収容された野生個体は, 獣医師等による治療・リハビリテーションを行い, 野外での生活が可能な状態に回復した場合には, 原則として野生復帰させる.

4.3 交通事故に対する市民活動

・交通事故対策プロジェクト(守る会)

ヤマネコの交通事故を防ぐことを目的として, 応援団では 2007 年に交通事故対策プロジェクトを立ち上げた. 交通事故はヤマネコの生息密度が高い地域において, 交通量が多く, スピードを出しやすい国道で発生する傾向がある. そこで, 交通事故発生地点を中心に 55 基の飛び出し注意看板を設置し, 看板周辺の草刈に取り組んでいる. ヤマネコが道路に飛び出しそうな場所には, 飛び出しを防止するためにワイヤーメッシュ柵を設置した.

また, カルバートの清掃を行っている. カルバートは, 動物の動線と車の動線を分離させるために設けられ, ヤマネコの移動経路, 小動物用道路として維持管理されている. 雨によって大木や土

砂が堆積しカルバートの出入口が塞がれると利用しづらくなる。応援団では、堆積した土砂を掘り取って水路を作り、水はけをよくした。掘り取った土砂を利用して土のうを作り、段差に並べることで動物たちが利用しやすい通路づくりを行っている。カルバートの出入口に自動撮影カメラを設置したところ、ヤマネコが利用する姿を確認できた。

・ツシマヤマネコ交通安全ポスター展(守る会)

2012 年からツシマヤマネコ交通安全ポスター展を開催し、2022 年には第 11 回目を迎えた。小中学生の部と一般の部に分けられ、対馬島内に在住する市民が対象である。島内の子どもたちがポスターを描くことによって、大人たちがヤマネコについて考え、意識してもらうことが狙いである。保護センター職員は、「孫が描いたポスターのヤマネコを見て連絡した人もいたため、ポスターをきっかけにヤマネコの情報を得ることができた。」と話した(インタビュー調査 1 より)。また、団員は活動していく中でヤマネコを見たとき声をかけられることや保護センターへ寄せられる目撃情報も増えてきたと話した(インタビュー調査 7 より)。また、地域住民がヤマネコについて知る機会が増え、活動の成果が表れていると感じると述べた。パトロールやポスター展による呼びかけによって、保護センターは傷病個体の保護や住民から交通事故の通報を受けやすくなった。応援団から地域住民に呼びかけたことでヤマネコの交通事故が保護センターに通報されやすくなったためである。応援団設立のきっかけが「保護センターの職員を応援する」ことであったように、応援団の交通事故対策プロジェクトは保護センターの活動を支援している。応援団は、保護センターが取り組む交通事故対策、傷病個体の保護を円滑に進められるよう地域と保護センターの架け橋となっていると考えた。村山(2008)は、対馬島外の出身者が多いセンター職員にとって応援団は、地元への考え、地理的な情報、ヤマネコの救護情報を伝えてくれる貴重な仲間であり、彼らなしでは保護活動が考えられないとした。また、インタビュー調査 6 より、毎年、集落内にある桜の花見や食事などにセンター職員を誘っていたことが分かった。このように地域住民は、任期が 2,3 年ほどで入れ替わるセンター職員が対馬での生活に馴染めるよう声を掛けている。応援団は、保全活動だけでなく、職員個人の生活や地域住民との交流においても無くしてはならない存在なのではないだろうか。

5. 考察

3 団体は、ヤマネコの餌資源、生息環境の維持・再生を測ることで、ヤマネコを食物連鎖の頂点とする生態系全体を保全している。さらに、生態系全体の保全が対馬の自然環境、景観を守ることに繋がっている。各団体の活動を支えているのは、「ヤマネコを守りたい」という思いに加え、「佐護に広がる田畑や自然を残したい、次の世代に受け継ぎたい。」という活動動機であった。

また、各団体の取り組みは、人口減少による一次産業の衰退、従事者の高齢化や耕作放棄地の増加といった地域が抱える課題にも関連している。組織に所属する個人が日常生活の中で地域課題の緊急性に直面し、危機感や不安感を抱くことで活動への参加意欲を高めている側面もあると考えた。自分たちが地域を守らなければ、山林や田畑の放棄地が増え、シカやイノシシはさらに増加するという緊急性である。こうした思いで活動しているため、好適生息環境の減少に対する取り組みが積極的に行われていると考えた。

応援団は保護センターの補助的な役割も担っていた。保全活動に関する呼びかけや日常生活において、島外出身者が多いセンター職員と地域住民の間に立ち、かけ橋となっている。地域従来のネットワークを活かしながら、地域住民に広く呼びかけ、情報を集め、時間をかけて継続した活動を行ってきた。

減少要因には、餌資源の不足、林業の衰退、高齢化等の要因が複雑化し、様々な要因に細分化できる。このように、要因が複雑化する中で一つ一つの要因と向き合い、長期的に活動することは容易ではない。佐護地区では、同地域内に活動フィールドや活動内容が異なる団体が存在することで、多様な主体が行政だけでは補えない情報や人脈を活かした密な保全活動を実現している。市民活動は、環境省や保護センターの手が回らない地域の情報、財源・マンパワーを補い、ヤマネコの生息環境を守るものである。

環境省が開始した自然共生サイトの認定は、地域における生物多様性の保全再生に資する活動を支援する。本章で整理した市民活動は NPO 法人や農業従事者、企業といった多様な主体が携わる。今後、自然共生サイトを認定していく上で多様な主体をどのように支援していくのか、支援制度を充実させる必要がある。

6. 地域外支援者の拡大に向けた取り組み

ヤマネコの保護・増殖には、高齢化と人口減少に拍車がかかる対馬の住民の力だけでは自ずと

限界があり、島外支援にも期待の目が向く(大塚ら, 2009). 各団体に所属する会員も高齢化が進み、存続のために地域外からの支援が必要である. 本章では、地域外から支援を受けるために各団体が行っている活動について整理した. 団体が活動する対馬市外に住み、多様な方法で団体の活動を支える支援者を地域外支援者とする.

6.1 クラウドファンディング(守る会)

イノシシやシカの深刻な食害により下草や海岸線付近の草地がなくなったことで、保護区の奥まで瀬風が入り、木々の立ち枯れが発生した(図2). 海岸部に流れ着く漂着ゴミも風に乗って保護区に入り込み、生息環境を悪化させている. 悪化を食い止めるため、植樹費用をクラウドファンディングで募った所、40日間で355名から支援を受け480万円の支援金が集まった(インタビュー調査3より). 塩害に強い樹木を植えることで、潮風や漂着ゴミを遮断し、保護区の植生を保護している.



図2 2012年頃の海岸線の草地の様子(左)
2016年頃の様子(右)

「NPO法人「ツシマヤマネコを守る会」会報ヤマネコだより 2021年10月増刊号」(NPO法人ツシマヤマネコを守る会, 2021)より引用

6.2 オーナー制度(研究会)

オーナー制度は、ヤマネコが利用する田んぼのオーナーになり、農業とヤマネコの共生に向けた取り組みを応援する制度である. 契約価格は一口100㎡で30,000円であり、オーナーには特典としてヤマネコ米30kgと稲作通信が送られ、田んぼイベントに参加できる. 研究会の事務局は、「2022年度オーナー制度のオーナー数は131口であり、年齢層は全体を把握していないが、50, 60代が多い印象を受けた.」と話した(インタビュー調査8より). また、オーナーの居住地は対馬市外が多く、都市部に暮らしながらも自然や生き物に興味がありそれらを守りたい気持ちを持つ消費者と、対馬で地元の環境を守りながら美味しい安全なお米を作りたいと願う生産者を繋ぐことができる制度である.

6.3 動物園イベント(3団体共通)

毎年10月8日はツシマヤマネコの別名「と(10)

らや(8)ま」にかけてツシマヤマネコの日である. この日は、保護センターや全国各地の動物園がヤマネコの現状やその保全活動等を知ってもらうことを目的にイベントを開催している. 京都市動物園ではやまねこ博覧会が開催され、参加協力団体によるブース出展、やまねこ講演会が行われた. ブースには、対馬市(応援団と併合)、一般社団法人MIT(研究会と併合)、守る会がそれぞれ出展した.

応援団では、動物園イベント時に活動紹介と舟志の森づくりに関するPRを行っている. こうしたイベントでの活動紹介をきっかけに入団する人もいれば、保護センターにある応援団の紹介を見た人が入団を申し込む場合もある(インタビュー調査1より). イベント時に入会した会員間では、毎年開催されるイベントが顔を合わせ交流する情報交換の場となっている. 島外の団員は対馬で活動できないことが多いが、「何か協力したい」、「活動の足しになれば」と寄付のような形で会費を払う傾向があった.

一般社団法人MITは、研究会の物販や事務局を担当しているため、イベントではグッズ販売やヤマネコ米の販売、研究会の活動PRを行っていた.

守る会ではヤマネコのグッズ販売や活動PR、クラウドファンディングへの申し込みを呼びかけた. やまねこ博覧会でインタビュー調査を行った7名の会員は、対馬島外に住み全国各地から動物園イベントに訪れていた(インタビュー調査3, 4より). 入会理由として、動物園イベントで守る会の講演を聞いた際に「自分に何かできることはないかと思った. 守る会に入って応援したい.」と話す会員がいた. また、3.1で述べた競売事件によって、ヤマネコの現状を知り入会した会員もいた. ヤマネコに関心を持ち、イベント時に他の会員と意見交換することで入会を決めた会員は少なくない.

地域外支援者の拡大に向けた取り組み まとめ

各団体は、オーナー制度や動物園イベント等に参加し、地域外支援者の拡大に取り組んでいる. 地域外支援者は、距離的・時間的な制約によって、ヤマネコの生息地である対馬での日常的な活動が難しい. 一方で、全国各地で開催される動物園イベントへの参加によって地域外の活動を支え、SNS、総会での交流によって情報を共有し、クラウドファンディング、会費によって団体の財源を支えている. 市民活動は、地域内に留まらず、地域外にも支援者がいることで人員、情報、予算的に支えられ、活動できている. また、各団体は団体への関わり方、参加頻度、参加方法が異なる会員

を持ち、地域と地域外をつなぐネットワーク、ゆるやかな繋がりを構築している。

序論で先述した図 1 では、ツシマヤマネコ保護増殖事業計画を支えるものとして普及啓発と環境教育の推進が挙げられた。図 3 は図 1 の普及啓発、環境教育の推進に加え、地域外支援者の拡大を加えたものである。普及啓発を通して、新たにヤマネコについて知ってもらうことや正しい知識を広めることも重要である。だが、それだけでは保全活動を行う団体が活動を持続するのは難しい。地域内に留まらず、地域外にも団体を支える支援者がいることで人員、情報、予算的に余裕を持って活動することが可能になっているのではないだろうか。また、各団体は団体への関わり方、参加頻度、参加方法が異なる会員を持ち、地域と地域外をつなぐネットワークを構築している。OECMによる生息環境の管理や交通事故対策等の自然保護活動に対する支援をはじめ、地域外支援者の拡大に向けた取り組みも重要になると考えた。

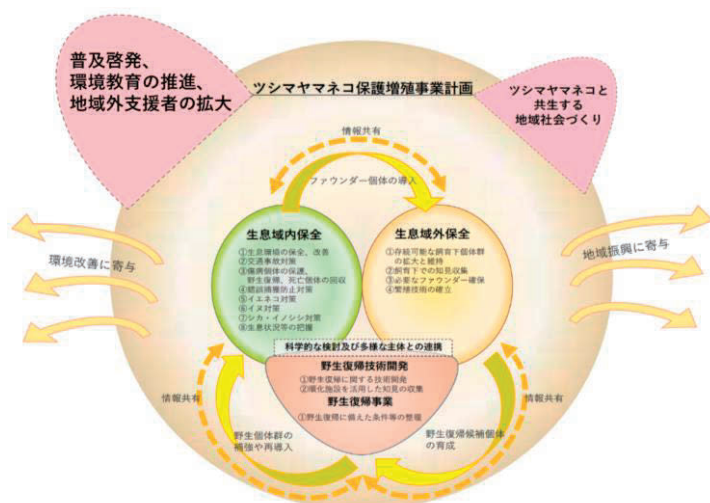


図3 ツシマヤマネコ保護増殖事業のイメージ改訂版

7. 結論

ヤマネコの減少要因は、1つの要因をとっても単純ではない。この要因に対してこれだけ対策すればいいという正解もない。要因が複雑化しさらに様々な要因に細分化される。好適生息環境の減少であれば餌資源の不足、耕作放棄地、イノシシやシカによる下層植生の衰退、森林の管理不足が挙げられる。このように、要因が複雑化・多様化する中でその一つ一つに向き合い、長期的に保全活動を行える人員は多くない。そうした中で NPO やボランティア団体として活動する市民活動は、貴重な存在である。一筋縄ではいかない保全活動において、調査対象の3団体はこれまで粘り強い

活動を続け、ヤマネコの生息環境における保全活動に貢献してきた。ヤマネコの保全活動において市民活動は、環境省や保護センターの手が回らない地域の情報、財源・マンパワーを補い、地域の人脈を活かした密な保全活動を実現している。

各団体は団体への関わり方が異なる会員を持ち、地域と地域外をつなぐネットワーク、ゆるやかな繋がりを構築している。また、地域内に留まらず、地域外にも支援者がいることで人員、情報、予算的に支えられ、活動できている。だが、活動者の高齢化や資金不足といった課題を抱えているため、今後行政は市民団体への支援を模索していく必要がある。

本研究により、以上のような知見を得ることができたが、これらの多くは長崎県対馬市上県町佐護地区における団体特有の目的、活動内容、所属する個人によるものであり、得られた結果を他地域の市民活動に一般化することは難しい。

また、本研究では、保全活動に取り組む3団体にインタビュー調査を実施したが、行政の保護対策について保護センター職員や行政関係者にインタビュー調査を実施できていない。行政は各団体が取り組む活動をどのように捉え、その上でどのような見通しを立てているのかという点については今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 本田裕子, 2018, ツシマヤマネコの交通事故対策をめぐるボランティア活動と環境教育の意義について, 環境情報科学論文集, Vol.32(第32回環境情報科学学術研究論文発表会), 329-334
- 2) 藤田研二, 2019, 環境ガバナンスと NGO の社会学 生物多様性政策におけるパートナーシップの展開, 株式会社ナカニシヤ出版
- 3) 日本大学生物資源学科学部全国農村サミット運営委員会, 2014, 全国農村サミット 2013 地域資源の活用による地域活性化と大学の役割, 農林統計協会
- 4) 伊澤雅子・土肥昭夫, 1991, イリオモテヤマネコ・ツシマヤマネコ保護対策の現状, 哺乳類科学, 31, 1, 15-22
- 5) 環境省, 2015, 国指定舟志ノ内鳥獣保護区舟志ノ内特別保護地区指定計画書(環境省案)
<<https://www.env.go.jp/content/900522479.pdf>> (2022年11月29日閲覧)
- 6) 環境省, 2020, 最新のツシマヤマネコ生息状況等調査(第五次調査)の結果概要について
<https://kyushu.env.go.jp/pre_2020/327.html> (2023年5月24日閲覧)
- 7) 環境省, 2022, 第1回地域連携フォーラム OECM の現状と概要
<https://epc.or.jp/wp-content/uploads/2022/03/j-gbf_regional-forum01_220322_02-oecm.pdf> (2022年12月30日閲覧)
- 8) 川崎市, 2001, 川崎市市民活動支援指針—市民との協働のまち

づくりのために—

<<https://www.city.kawasaki.jp/250/cmsfiles/contents/0000016/16590/sisin.pdf>> (2023 年 5 月 22 日閲覧)

9)前田剛, 2015, ツシマヤマネコの交通事故の現状と対策, ワイルドライフ・フォーラム, 19, 2, 6-8

10)宮内泰介, 2017, どうすれば環境保全はうまくいくのか—現場から考える「順応的ガバナンス」の進め方, 株式会社新泉社

11)村山晶, 2008, 日本の絶滅危惧種保護プロセスの確立とツシマヤマネコ保護活動, 日本獣医生命科学大学, 57, 73-79

12)長崎県対馬市, 2022, 住基月報地区別集計表 人口世帯数(令和 4 年 12 月 31 日現在)」

<<https://www.city.tsushima.nagasaki.jp/material/files/group/70/20221231zinkousetaisu.pdf>> (2023 年 1 月 2 日閲覧)

13)NPO 法人ツシマヤマネコを守る会, 2021, NPO 法人「ツシマヤマネコを守る会」会報 ヤマネコだより 2021 年 10 月増刊号

14)大神郁朗, 2011, ツシマヤマネコの保全, 日本野生動物医学学会誌, 16, 1, 33-37

15)大塚生美・趙賢一・關正貴, 2009, 種の保存と森林管理: ツシマヤマネコ保護の取り組み, ランドスケープ研究: 日本造園学会会誌, 72, 4, 390-393

16)佐護ヤマネコヤマネコ稲作研究会,

<www.yamanekomai.com> (2021 年 7 月 27 日閲覧)

17)対馬市,

<<https://www.city.tsushima.nagasaki.jp/gyousei/soshiki/shimadukuri/chiiki/shiminkyodo/kisochisiki/758.html>> (2023 年 5 月 17 日閲覧)

18)ツシマヤマネコ保護増殖連絡協議会, 2022, ツシマヤマネコ保護増殖事業実施方針(令和 4 年度改定版)

<<https://kyushu.env.go.jp/content/000039474.pdf>> (2022 年 11 月 29 日参照)

19)ツシマヤマネコ応援団,

<<http://yamanekoouendan.web.fc2.com/>> (2021 年 7 月 27 日閲覧)

20)ツシマヤマネコ応援団, 2004, ニュースレターNo.6 ツシマヤマネコの棲む島から

21)ツシマヤマネコ応援団, 2008, ツシマヤマネコ応援団ニュースレター ツシマヤマネコの棲む島から No.24

22)ツシマヤマネコ応援団, 2007, ツシマヤマネコ応援団ニュースレター ツシマヤマネコの棲む島から No.19

23)ツシマヤマネコ応援団, 2010, ツシマヤマネコ応援団ニュースレター ツシマヤマネコの棲む島から No.20

24)ツシマヤマネコ応援団, 2013, ツシマヤマネコ応援団ニュースレター ツシマヤマネコの棲む島から No.37

25)ツシマヤマネコ応援団, 2017, ツシマヤマネコ応援団ニュースレター ツシマヤマネコの棲む島から No.47

26)ツシマヤマネコを守る会, <<https://tsushimayamaneko.org>> (2021 年 7 月 27 日閲覧)

27)対馬野生生物保護センター, ツシマヤマネコ エコドライバーをめざして～ドライバーの皆さまへのお願い～

<<https://kyushu.env.go.jp/twcc/accident/index.html>> (2023 年 5 月 23 日閲覧)

28)山口鉄男・浦田明夫, 1970, 対馬におけるツシマヤマネコの分布, 長崎大教養部紀要(自然科学), 11, 25-39

震源断層面のすべり分布を考慮した南海トラフ巨大地震の被害推定

後藤 健斗¹⁾

1) 日本物理探査株式会社 中部支店

1. 序論

1.1 目的

南海トラフ巨大地震はマグニチュード9クラスの地震と想定されている。近年では東北地方太平洋沖地震がマグニチュード9の地震として記憶に新しい。南海トラフ巨大地震と東北地方太平洋沖地震では震源距離が数倍以上違うため、南海トラフ巨大地震の地表の振動エネルギーは東北地方太平洋沖地震と比較して更に大きくなると考えられる。しかし内閣府の南海トラフ巨大地震モデル検討会の被害推定は、東北地方太平洋沖地震と同程度の震度予測になっている。この問題に対し尾中・上園(2019)は、内閣府が採用した東北地方太平洋沖地震の震源断層モデルが陸側に大きく飛び出した不自然な形状であること、そして震度予測に用いられた司・翠川(1999)の距離減衰式では、断層最短距離が100km以内の最大加速度を過小評価していることが原因と考えた。距離減衰式とは地震の揺れの加速度と震源距離の関係を示す式である。そこで尾中・上園(2019)は、東北地方太平洋沖地震で観測された最大加速度と断層最短距離の関係から近似式を求め、これを新たな距離減衰式として南海トラフ巨大地震に当てはめることで、南海トラフ巨大地震で予測される最大加速度を計算した。しかし尾中・上園(2019)では、断層面の大きさや断層のすべり分布を考慮していなかった。これらを踏まえ、本研究では震源断層モデルの取り方及び距離減衰式に焦点を当て、南海トラフ巨大地震の被害推定を行う。

1.2 被害推定を行う手法

(1) 概要

震度分布の作成については強震断層モデルを使用し、強震波形計算による手法と経験的手法の2つが行われている。両者の計算結果のうち、震度が大きい方を各地点の震度として採用しており、震度分布の評価に当たっては、強震波形計算のみでなく、

経験的手法も考慮して震度を吟味するのが適切と考えられている。なお、本研究では経験的手法に着目し研究を行った。

(2) 経験的手法について

震源からの距離に従い、地震の揺れがどの程度減衰するかを示す経験的な式(距離減衰式)を用いて震度を推計する手法であり、断層の破壊方向・地殻構造などの影響を正確には表現できないが、これらの結果を包括した概観的な震度分布を推計しているとも見ることができる。以下に求められた震度分布を示す。

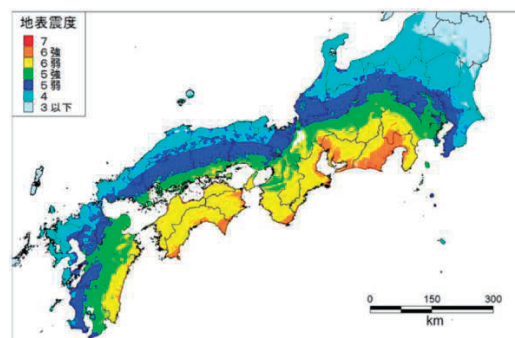


図1 経験的手法から求められた震度分布図
(内閣府より引用)

1.3 距離減衰式

(1) 距離減衰式の基本

地震が発生した場所から遠くなればなるほど、地震の揺れが弱くなる現象を距離減衰という。距離減衰式とは、地震の揺れの強さと震源からの距離との関係を式に表したものである。「地震のマグニチュード」や「震源からの距離」などを計算式に入力すると、震源からの距離に応じて、「地震の揺れ」や「震度」が計算されるという仕組みである。ただし実際には、マグニチュードと震源からの距離だけではなく、地震の発生した深さや、震源の特性、揺れを知りたい地点での地盤の柔らかさによっても、地震の揺れは大きく変わるため、注意が必要である。

(2) 司・翠川(1999)の距離減衰式について

内閣府が発表している南海トラフ巨大地震被害想定
の震度分布図には強震波計算による手法と経験的
手法が使用されているが、経験的手法の中で使用さ
れている距離減衰式には司・翠川(1999)のものが扱
われているとある。司・翠川(1999)の距離減衰式を
以下に示す。

$$\log A = b \cdot \log(X+c) - kX$$

$$b = aM_w + hD + \sum d_i S_i + e + \varepsilon$$

b は距離減衰曲線の絶対値を支配する項、 A は地
震動の最大振幅値、 X は断層最短距離[km]、 D は震
源深さ、 S は断層タイプ、 e は定数項、 ε は標準偏
差、 M_w はモーメントマグニチュード、 a 、 h 、 d は
回帰係数をそれぞれ示す。

また司・翠川(1999)が使用した東北地方太平洋沖
地震における震源断層モデルを下に示す。

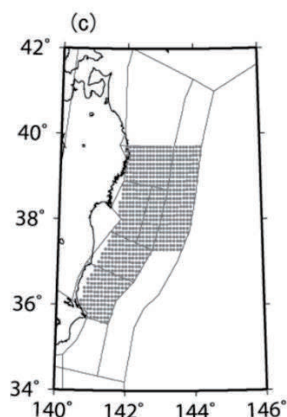


図2 司・翠川(1999)の東北地方太平洋沖地震にお
ける震源断層モデル

(司・翠川(1999)より引用)

司・翠川(1999)の距離減衰式は等価震源距離と最
短断層距離の2種類のものが記されているが、今
回は断層最短距離のものを示す。モーメントマグニ
チュードのほかに、地盤特性などが含まれる。また、
式を基に距離減衰曲線が導かれている。

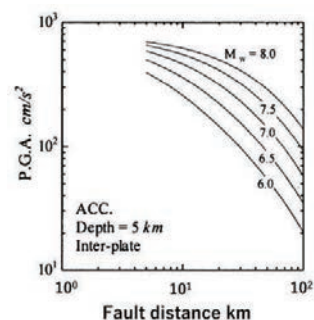


図3 司・翠川(1999)による断層最短距離の場合の
最大加速度における距離減衰曲線

(司・翠川(1999)より引用)

さらに、距離減衰曲線に関してはさまざまな研究
が行なわれており、震源の深さや、地震の種類によ
って異なった式が存在する。どの研究においても距
離減衰曲線の優位性は確かめられておらず、課題が
多くある分野ではあることが示唆されている。

(3) (片岡ほか, 2006)の距離減衰式

司・翠川(1999)の距離減衰式と同様に、(片岡ほ
か, 2006)は最大加速度 $PGA[cm/s^2]$ を使用した距離
減衰式を作成している。以下に(片岡ほか, 2006)の
距離減衰式を示す。

$$\log_{10} Y_{ij} = a_1 M_w + a_2 D - bX + \alpha$$

$$- \log_{10}(X + d \cdot 10^{0.5 M_w}) + c_j + e$$

X は断層面最短距離[km]、 Y_{ij} は i 番目の地震の j
番目の観測点における地震動強さ、 c_j は j 番目の観
測点の地点補正值、 e は標準偏差、 a_1 、 a_2 、 b 、 α 、
 d は回帰係数である。

1.4 南海トラフ巨大地震被害想定

現在、内閣府が想定している南海トラフ巨大地震
のマグニチュードは9クラスのものであり、マグ
ニチュード9の地震としては東北地方太平洋沖地
震が記憶に新しい地震である。内閣府は想定される
南海トラフ巨大地震の規模・被害と東北地方太平洋
沖地震との比較を行なっている。また、2003年に
中央防災会議で想定した規模、被害とも比較を行な
っている。以下に表として示す。予想震源域と震度
分布図についても下で示す。

表 1 予想されている南海トラフ巨大地震と東北地方太平洋沖地震及び、2003 年段階での想定と比較 (内閣府より引用)

被害想定と比較

○被害が最大となるケース と東北地方太平洋沖地震 との比較

	マグニチュード ^{※1}	浸水面積	浸水域内人口	死者・行方不明者	建物被害 (全壊棟数)
東北地方太平洋沖地震	9.0	561km ²	約62万人	約18,800人 ^{※2}	約130,400棟 ^{※3}
南海トラフ巨大地震	9.0(9.1)	1,015km ² ^{※3}	約163万人 ^{※3}	約323,000人 ^{※4}	約2,386,000棟 ^{※5}
倍率		約1.8倍	約2.6倍	約17倍	約18倍

○被害が最大となるケースと2003年東海・東南海・南海地震想定*との比較

※ 平成15年度調査対象地、南海トラフに「関する」門限値は未定。南海トラフの発生確率については、国土交通省「南海トラフ巨大地震に関する調査報告書」を参照。南海トラフの発生確率の算出に用いた数値は、国土交通省「南海トラフ巨大地震に関する調査報告書」を参照。				
マグニチュード ⁽¹⁾	浸水面積	浸水域内人口	死者・行方不明者	建物倒壊 (全壊棟数)
2003年想定	8.7(8.8)	—	—	約24,700人 ⁽²⁾ 約940,200棟 ⁽³⁾
南海トラフ巨大地震	9.0(9.1)	1,015km ² ⁽⁴⁾	約163万人 ⁽⁵⁾	約323,000人 ⁽⁶⁾ 約2,386,000棟 ⁽⁷⁾
倍率	—	—	約13倍	約2.5倍

※1: ()内は津波のMw、※2:平成24年6月26日緊急災害対策本部発表、※3:堤防・水門が被害物に対して正常に機能する場合の想定浸水区域、※4:地震動(強弱)、津波ケース(ケース①)、時間帯(冬・深夜)、風速(km/s)の組合の被害、※5:地震動(強弱)、津波ケース(ケース⑤)、時間帯(冬・夕方)、風速(km/s)の組合の被害、※6:時間帯(昼)の組合の被害、※7:時間帯(18時)の組合の被害



図4 南海トラフ巨大地震の想定震源断層域
(内閣府より引用)

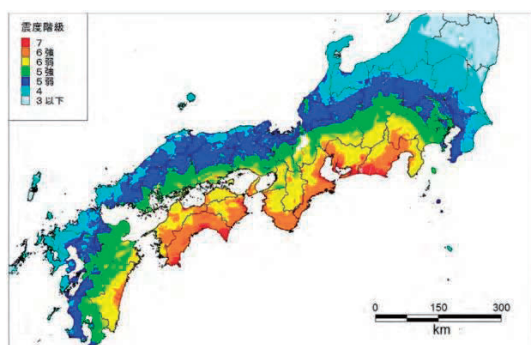


図5 南海トラフ巨大地震で想定される震度の最大分布
(内閣府より引用)

1.5 過去の研究

(1) 尾中・上園(2019)卒業論文について

地震の振動エネルギーは震源からの距離の 2 乗に反比例することは物理的な常識である. 東北地方

太平洋沖地震と南海トラフ巨大地震では震源距離が数倍以上違うため地震のエネルギーは 10 倍程度以上になると考えられる。しかし内閣府の南海トラフ巨大地震モデル検討会の被害想定が東北地方太平洋沖地震と同程度の震度予測になっている。尾中・上園(2019)は、被害想定で用いられている司・翠川(1999)の距離減衰曲線が断層最短距離 100km 以内で最大加速度を過小評価していることが原因とした。これらを踏まえ尾中・上園(2019)は、東北地方太平洋沖地震から得られた最大加速度と断層最短距離の関係から近似曲線を求め、その曲線の式を新たな距離減衰式として、南海トラフ巨大地震で予測される断層最短距離から最大加速度を計算した。この結果を内閣府の被害想定と比較したところ震度 7 が観測される地域は増加しており、より甚大な被害が起きる可能性が示唆された。以下に 6 次式近似を距離減衰式とした場合(ケース 2)の南海トラフ巨大地震震度分布を示す。

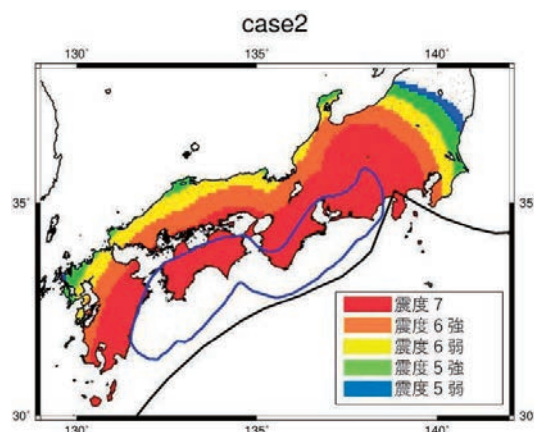


図6 南海トラフ巨大地震震度分布
(尾中・上園(2019)より引用)

(2) 司・翠川(1999)及び、尾中・上園(2019)の問題点

司・翠川(1999)及び、尾中・上園(2019)の問題点は三つある。

一つ目は近似曲線がデータにフィットしていない点である。司・翠川(1999)の近似曲線はもともと M8.0 までのマグニチュードにしか対応しておらず、それを M9.0 に対応するために変更しているためデータと大きなずれを生んでいる。また尾中・上園(2019)の近似曲線は一見するとデータにフィット

しているが、六次式近似のため断層最短距離が長い場合に対応していない。

二つ目に使用している震源断層モデルが本土に近い点である。観測点とそれに対応した震源データ位置を青線で結んだ図を以下に示す。

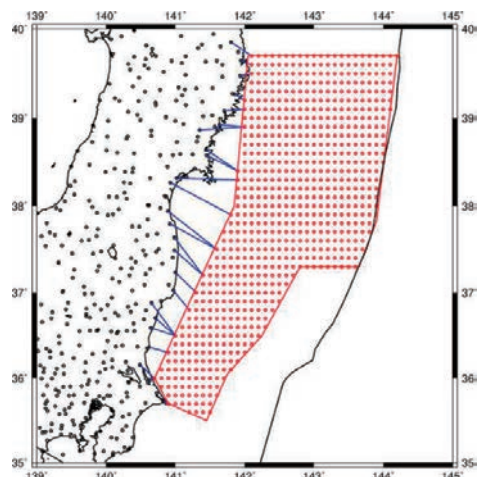


図7 司・翠川(1999)の震源断層モデルと観測点に対応した震源データ

図からわかるように観測点の断層最短距離は震源断層モデルの最西端に集中している。これ自体は経験的手法上致し方無いが、問題はこの最西端が本土に近い点である。この震源断層モデルでは本土に接する程近く、これでは被害想定に問題が生じてしまう。

三つ目に観測点からの断層最短距離とすべり分布である。司・翠川(1999)及び、尾中・上園(2019)の震源断層モデルの場合、海岸線の観測点の断層最短距離が全て震源断層モデルの最西端に集中してしまっている。つまり震源断層モデルの最西端のデータしか使用していないことになる。問題はこの震源断層モデルの最西端のすべり分布である。すべり分布は基本的に震源に近いほどすべり量は大きくなり、震源断層モデルの端にいくほどすべり量は小さくなるはずである。よって最西端のすべり量は限りなく0に近い。しかし、司・翠川(1999)及び、尾中・上園(2019)ではすべり分布を一様に行っているため、最西端の0に等しいすべり量を大きく見積もっている。地震の振動エネルギーは震源断層面積と平均すべり量に比例するため、地震の振動エネルギーを過小評価してしまっている。これを南海トラフ巨大地

震に使用しているため、M9.0クラスの南海トラフ巨大地震をM8.2～8.3程度に過小評価してしまっているのである。

以下に司・翠川(1999)の近似曲線を基に作成した東北地方太平洋沖地震の最大加速度分布図と実際に観測された最大加速度分布図を示す。

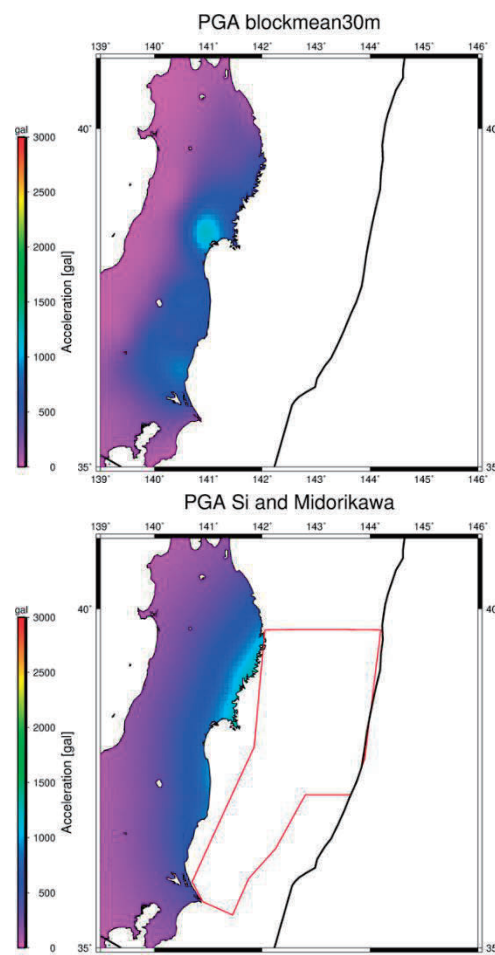


図8 東北地方太平洋沖地震で実際に観測された最大加速度分布図(上)と司・翠川(1999)の距離減衰式で作成した最大加速度分布図(下)

図から、司・翠川(1999)の距離減衰式は、再現性が低いことがわかる。この再現性の距離減衰式を南海トラフ巨大地震に使用していることが大きな問題である。

2. 方法

詳しくは省略するが、Lay *et al.*(2011)および尾中・上園(2019)を参考に東北地方太平洋沖地震の震源断層面を作成し、距離減衰式を新たに作成した。Lay *et al.*(2011)とは、内閣府が被害想定を行う上

で参考にした東北地方太平洋沖地震の論文の一つである。なお、震源断層面を決める際、すべり量が5m, 11m, 17m になるような断層面を定めた。距離減衰式から導き出した最大加速度分布図を震度分布図に変換し、内閣府の被害想定と比較した。

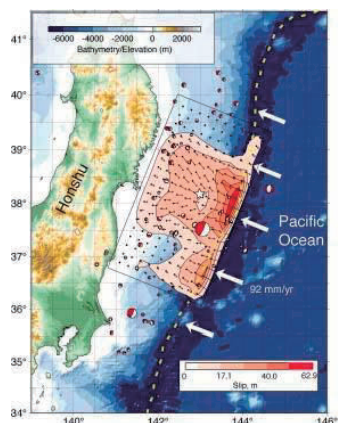


図9 Lay *et al.*(2011)の東北地方太平洋沖地震におけるすべりモデル
(Lay *et al.*(2011)より引用)

3. 結果と考察

3.1 東北地方太平洋沖地震における、K-NET による観測地の断層最短距離と、三成分合成値における最大加速度の関係

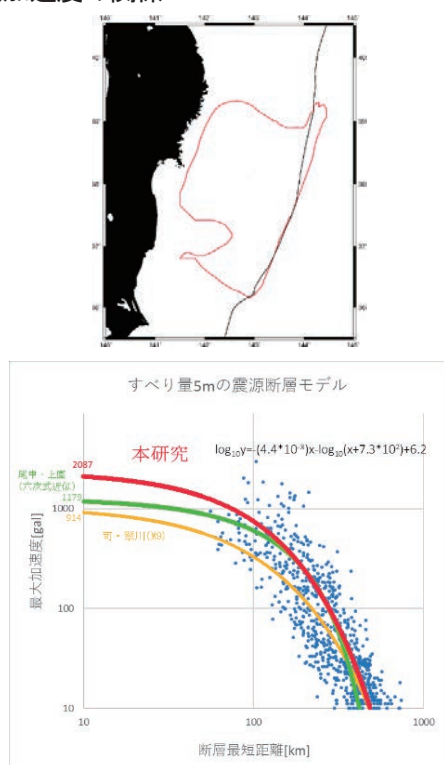


図10 すべり量5mの震源断層モデル(上)と最大加速度と断層最短距離の関係図(下)

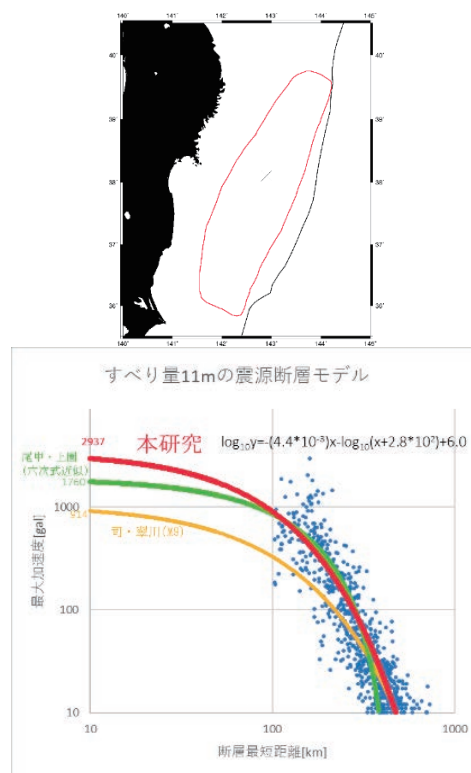


図11 すべり量11mの震源断層モデル(上)と最大加速度と断層最短距離の関係図(下)

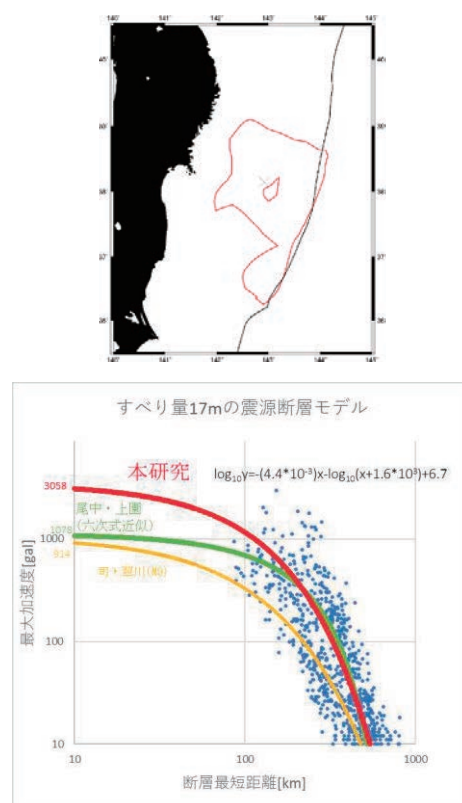


図12 すべり量17mの震源断層モデル(上)と最大加速度と断層最短距離の関係図(下)

最大加速度と断層最短距離の関係図から、いずれの震源断層モデルでも、本研究で使用した近似曲線が最も適当であることがわかった。司・翠川(1999)の距離減衰式、及び尾中・上園(2019)の六次式近似では、断層最短距離が短ければ短いほど過小評価していることが図から読み取ることができる。

3.2 本研究で求められた関係式を用いた、東北地方太平洋沖地震の最大加速度分布図

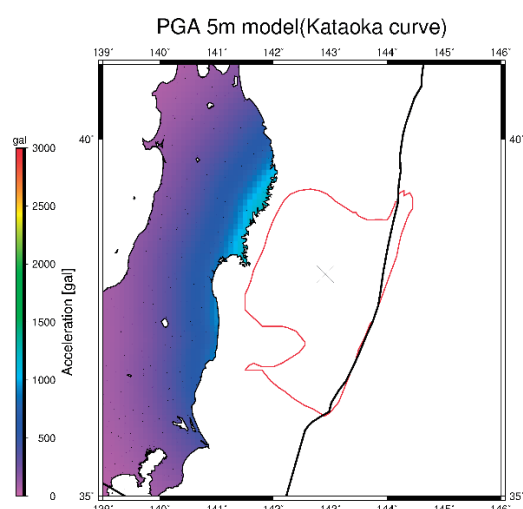


図 13 本研究で作成したすべり量 5m の震源断層モデルにおける東北地方太平洋沖地震最大加速度分布図

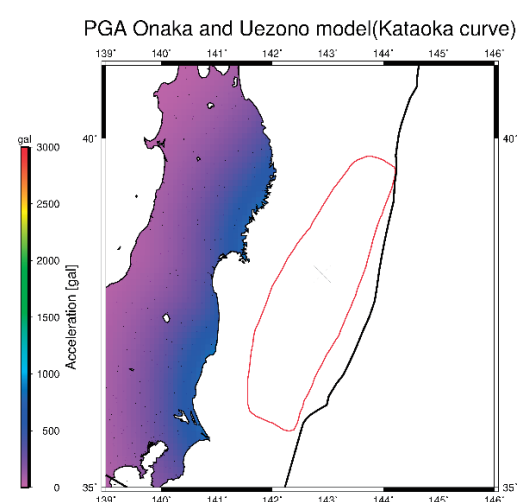


図 14 本研究で作成したすべり量 11m の震源断層モデルにおける東北地方太平洋沖地震最大加速度分布図

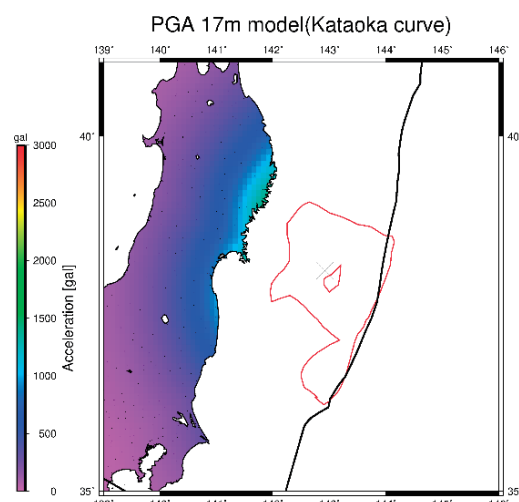


図 15 本研究で作成したすべり量 17m の震源断層モデルにおける東北地方太平洋沖地震最大加速度分布図

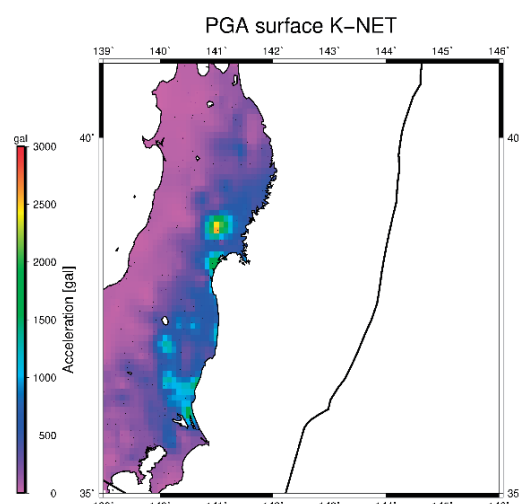


図 16 東北地方太平洋沖地震最大加速度分布図(実データ)

実際に観測された最大加速度分布(図 16)と比較すると、最も実際の最大加速度分布に近いものは、すべり量 17m の震源断層モデルであることが分かる。

3.3 本研究で求められた関係式を用いた、南海トラフ巨大地震の最大加速度分布図

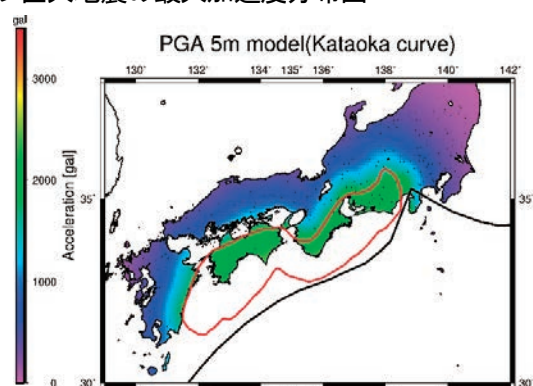


図 17 本研究で作成したすべり量 5m の震源断層モデルにおける南海トラフ巨大地震最大加速度分布図

最大値は、2087gal となった。

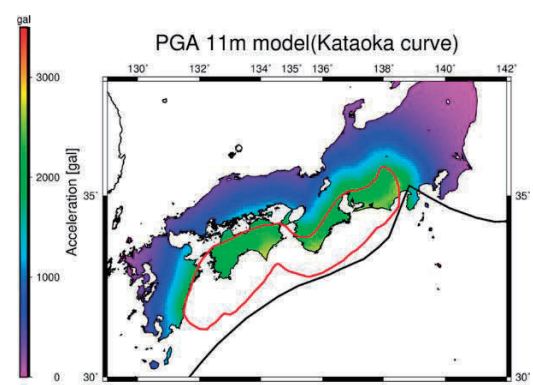


図 18 本研究で作成したすべり量 11m の震源断層モデルにおける南海トラフ巨大地震最大加速度分布図

最大値は、2937gal となった。

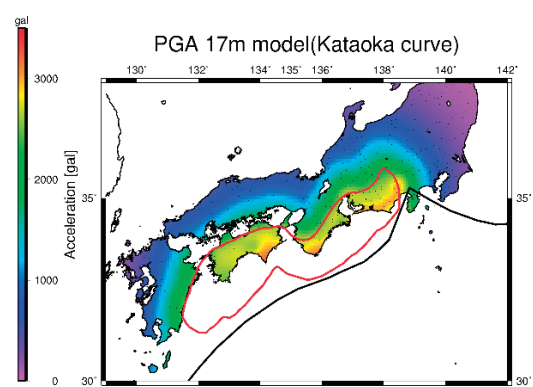


図 19 本研究で作成したすべり量 17m の震源断層モデルにおける南海トラフ巨大地震最大加速度分布図

最大値は、3058gal となった。

3つの結果を比較すると、すべり量 17m の震源断層モデルの最大加速度分布で最も大きな最大加速度 3058gal が推定された。東北地方太平洋沖地震で観測された最大加速度は 2933gal であり、過去最大の最大加速度は、2008 年 6 月 14 日の岩手・宮城内陸地震で 4022gal が観測されている。よって本研究のように 3058gal と大きな最大加速度を観測する可能性は十分にあると言える。

3.4 本研究で作成した南海トラフ巨大地震震度分布図

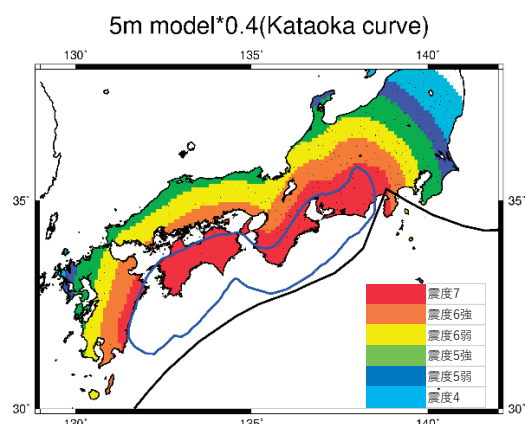


図 20 本研究で作成したすべり量 5m の震源断層モデルにおける南海トラフ巨大地震震度分布図

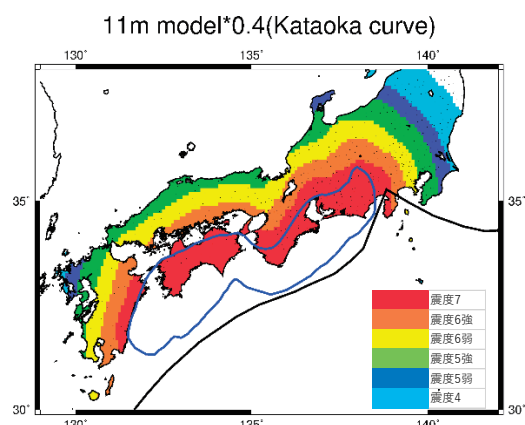


図 21 本研究で作成した尾中・上園(2019)の震源断層モデルにおける南海トラフ巨大地震震度分布図

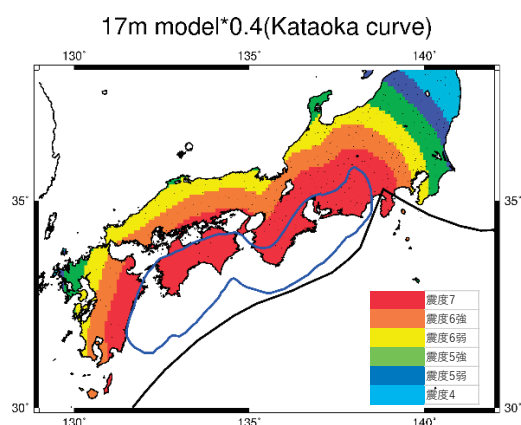


図 22 本研究で作成したすべり量 17m の震源断層モデルにおける南海トラフ巨大地震震度分布図

3つの震度分布図はいずれも、内閣府の被害推定と比較して各地域において1～2段階高い震度を示した。すべり量 17m の震源断層モデルの震度分布では、震度 7 を観測する地域が内閣府の被害想定約 100 倍となり、西日本の大部分が震度 7 を観測することが読み取れた。3つの震度分布図のうち、最も規模が小さいすべり量 5m の震源断層モデルの震度分布であっても、震度 7 を観測する地域は内閣府の被害想定約 70 倍となった。

本研究で作成した(片岡ほか, 2006)を参考にした近似曲線を使用した南海トラフ巨大地震の被害推定は、内閣府の被害想定よりも大きな震度を計測するという結果となった。しかし、この結果は東北地方太平洋沖地震のデータのない、断層最短距離の短い範囲を近似曲線で表しているため、本来どの程度の最大加速度及び震度を観測するか判断することは難しい。

4. 結論

本研究では、内閣府の南海トラフ巨大地震被害推定及び内閣府の南海トラフ巨大地震被害推定の再計算を行った尾中・上園(2019)の被害想定が、断層面の大きさやすべり分布が考慮されていないことで、地震の大きさを過小に推定していると述べた。これを詳細に調べてみると、震源距離が短い場所のデータがないことでどれだけ確からしいのか不明であること、データに対して近似曲線が適当でないこと等が分かった。

これを踏まえ、M9.0 クラスの地震が想定されているため、同程度のマグニチュードであった東北地方太平洋沖地震のデータを使用し、(片岡ほか, 2006)の距離減衰式に断層面積と平均すべり量の補正を掛け、簡易的な方法で新たな距離減衰式を作成した。その結果、内閣府が被害想定に使用した司・翠川(1999)の距離減衰式及び尾中・上園(2019)が作成した六次式近似曲線はデータに対して適当でないことが分かった。本研究で作成した近似曲線がデータに対して最も調和的となった。さらに作成した震度分布では、内閣府の被害推定と比較して各地域において1～2段階高い震度を示しており、内閣府の被害推定よりも大きな被害が出る可能性を示唆した。ただし、最大加速度が大きいことで被害も大きくなるとは絶対的には言えないため、注意が必要である。

参考文献

[雑誌]

- 1) 片岡正次郎・佐藤智美・松本俊輔・日下部毅明 (2006): 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式. 土木学会論文集 A, 62, 740-757
- 2) 尾中優介・上園健斗(2019): 南海トラフ巨大地震被害推定の問題点と最大加速度の再計算. 東海大学学士論文
- 3) 司宏俊・翠川三郎 (1999): 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式. 日本建築学会構造系論文集, 523, 63-70.
- 4) Ide Satoshi, A. Baltay, and G. C. Beroza (2011): Shallow Dynamic Overshoot and Energetic Deep Rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, 1426-1429
- 5) Lay Thorne, C. J. Ammon, H. Kanamori, M. J. Kim, and L. Xue (2011): Outer trench-slope faulting and the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, 713-718
- 6) Lay Thorne, C. J. Ammon, H. Kanamori, L. Xue, and M. J. Kim (2011): Possible large near-trench slip during the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, 687-689
- 7) Lee Shiann - Jong, B. S. Huang, M. Ando, H. C. Chiu, and J. H. Wang (2011): Evidence of large scale repeating slip during the 2011 Tohoku - Oki earthquake, 1-6

- 8) Suzuki Wataru, S. Aoi, H. Sekiguchi, and T. Kunugi
(2011): Rupture process of the 2011 Tohoku - Oki mega - thrust earthquake (M9.0) inverted from strong - motion data, 1-6
- 9) Yagi Yuji and Y. Fukahata (2011): Rupture process of the 2011 Tohoku - Oki earthquake and absolute elastic strain release, 1-5
- 10) Yoshida Keisuke, A. Hasegawa, T. Okada, T. Iinuma, Y. Ito, and Y. Asano (2011): Stress before and after the 2011 great Tohoku - Oki earthquake and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan, 1-6
- 11) Yoshida Yasuhiro, H. Ueno, D. Muto, and S. Aoki
(2011): Source process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with the combination of tele seismic and strong motion data, 565-569

[単行本]

- 1) 公益社団法人 日本地震工学会 (2014) : 東日本大震災合同調査報告 共通編 1 地震・地震動. 丸善出版, 125pp-128pp.

[web ページ]

- 1) 気象庁 南海トラフ地震とは
<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/nteq/nteq.html>
- 2) 国土交通省国土地理院 東北地方太平洋沖地震の陸域及び海域の地殻変動と滑り分布モデル
<https://www.gsi.go.jp/cais/topic110520-index.html>
- 3) 政府 地震調査研究推進本部 南海トラフで発生する地震
https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_kaiko/k_nankai/
- 4) 内閣府 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ (第一次報告) 追加資料 東北地方太平洋沖地震、2003 年東海・東南海・南東海地震想定との比較
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20120905_01.pdf
- 5) 内閣府 南海トラフ巨大地震モデル検討会 巻末資料
https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/kanmatsu_shiryou.pdf
- 6) 内閣府 平成 23 年防災白書 図 1-1-2 震源域における断層面のすべり分布
<https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h23/bousai2011/html/zu/z002.htm>
- 7) 防災科学技術研究所 強震観測網 (K-NET, KiK-net)
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake/>

編集後記

今年度当社は、関西と関東の二か所で展示会に出展しました。様々な業種の方と対話をすることで、個人的には、当社の技術を多くの方に知っていただくいい機会ができたと感じています。またこの展示会を通して土木エンジニアという仕事は、広い視野を持ち、最先端技術を取り入れ、異常気象や地震などの災害や変化し続ける自然環境に適応させるために、進化していかなければならないと痛感しました。

本 20 輯は、京都大学大学院の勝見先生に「建設発生土をめぐる課題と対応」について、株式会社鴻池組 技術研究所の大山さまに「自然由来でヒ素を溶出するトンネル掘削土砂に対する酸化マグネシウム系材料を用いた不溶化处理および不溶化处理土の長期溶出挙動」について、執筆していただきました。ご寄稿いただきありがとうございました。

皆様のお時間のある時にお目通しいただければ幸いです。

企画本部 篠田 里子

地質工学 第 20 輯

令和 5 年 12 月 15 日発行

編集 日本物理探査株式会社 企画本部

印刷所 前田印刷株式会社

NGP 日本物理探鑛株式会社

本 社 〒143-0027 東京都大田区中馬込二丁目 2 番 12 号 TEL 03(3774)3211 FAX 03(3774)3180
URL : <http://www.n-buturi.co.jp>
E-mail : gijutsu@n-buturi.co.jp

東 関 東 支 店	〒310-0804 水戸市白梅三丁目 10 番 5 号 コーラルトップ 108	TEL 029(231)7315 FAX 029(231)7316 E-mail : mito@n-buturi.co.jp
関 東 支 店	〒143-0027 東京都大田区中馬込二丁目 2 番 12 号	TEL 03(3774)3161 FAX 03(3774)9353 E-mail : kanto@n-buturi.co.jp
札幌営業所	〒060-0061 北海道札幌市中央区南 1 条西 16 丁目 1-323 春野ビル 3F	TEL 011(558)3121 FAX 011(558)0900 E-mail : sapporo@n-buturi.co.jp
東北営業所	〒980-0021 仙台市青葉区中央四丁目 8 番 15 号	TEL 022(393)4155 FAX 022(393)4156 E-mail : tohoku@n-buturi.co.jp
埼玉営業所	〒336-0021 さいたま市南区別所 5-15-2	TEL 048(700)3184 FAX 048(700)3100
千葉営業所	〒273-0011 船橋市湊町 2-12-24 湊町日本橋ビル 6F	TEL 050(6861)3024 FAX 050(6865)6843
神奈川営業所	〒221-0856 横浜市神奈川区三ツ沢上町 7-8 ジュネス 203	TEL 045(550)4865 FAX 045(314)6499
北 陸 支 店	〒950-0983 新潟市中央区神道寺三丁目 11 番 19 号	TEL 025(241)2960 FAX 025(241)2959 E-mail : hokuriku@n-buturi.co.jp
中越営業所	〒940-2033 新潟県長岡市上除町 1128-3	TEL 0258(94)4420 FAX 0258(94)4421
中 部 支 店	〒465-0094 名古屋市名東区亀の井二丁目 134 番地	TEL 052(753)9662 FAX 052(753)9664 E-mail : chubu@n-buturi.co.jp
三重営業所	〒511-0041 桑名市外堀 22 番地 ITO ビル 102	TEL 0594(32)7725 FAX 0594(32)7726
関 西 支 店	〒543-0033 大阪市天王寺区堂ヶ芝一丁目 3 番 24 号 LN 堂ヶ芝ビル 2F	TEL 06(6777)3517 FAX 06(6773)5488 E-mail : kansai@n-buturi.co.jp
四国営業所	〒760-0012 高松市瀬戸内町 19 番 25 号	TEL 087(863)6191 FAX 087(863)6192 E-mail : shikoku@n-buturi.co.jp
中 国 支 店	〒731-0138 広島市安佐南区祇園 3-48-13	TEL 082(850)0073 FAX 082(850)0080 E-mail : cyugoku@n-buturi.co.jp
九 州 支 店	〒803-0814 北九州市小倉北区大手町 7 番 38 号 大手町ビル 3F	TEL 093(581)8281 FAX 093(581)8267 E-mail : kyushu@n-buturi.co.jp
福岡営業所	〒812-0016 福岡市博多区博多駅南三丁目 13 番 17 号	TEL 092(474)3087 FAX 092(474)3107
沖縄事務所	〒904-2155 沖縄県沖縄市美原 4-7-1 春マンション 103	TEL 098(923)1915 FAX 098(923)1916