

第4章 途上国の森林の防災・減災等の機能強化に資する技術等の開発

4.1 背景と目的

4.1.1 森林の防災・減災機能（F-DRR）を最大化する治山技術の可能性

経済の急速な成長に伴い、不適切な土地利用が進行することで山地災害が頻発する事例は、日本を含め世界各地で確認されている。特に、産業活動の活発化や人口の急増を伴う経済成長期には、伝統的な土地利用のルールが軽視され、災害リスクの高い地域が開発されやすくなる。わが国においても、明治期の近代化や戦後復興期には、木材や薪炭の需要増大により山地が過度に利用され、山地災害が多発した歴史がある。これを教訓に、日本では「砂防」と「治山」の両事業を通じた防災対策が進められてきた。

砂防事業は、主にコンクリート構造物（グレーインフラ）を整備し、土砂災害から人命・財産を直接保護することを目的としている。一方で、治山事業は森林の保水機能を活用したグリーンインフラとして発展し、流域全体の防災・減災機能（F-DRR: Forest-based Disaster Risk Reduction）を最大化する技術体系を構築してきた。治山技術は、山地災害のリスクを低減するだけでなく、居住地周辺や沿岸域に整備された防災林（保安林）を通じ、洪水・高潮・津波・強風といった自然災害に対するバッファゾーンとしての役割も果たしている。

近年、経済発展が著しい東南アジアの開発途上国では、多雨気候の影響を受ける地域で斜面崩壊や洪水が頻発し、気候変動による災害規模の拡大が懸念されている。ベトナムでは、2024年9月に超大型台風「ヤギ」が北部に上陸し、過去70年間で最も強力な台風として甚大な被害をもたらした。国際連合人道問題調整事務所（OCHA）の報告によれば、死者321名、行方不明者24名、負傷者1,978名が確認され、被害は26省、360万人に及んでいる。さらに、住宅28万3千棟が損壊、12万2千世帯が避難し、農地35万ヘクタールが浸水、家畜4万4,556頭、家禽575万羽が流失するなど、食糧生産にも深刻な影響が出た。

本災害では、強風・豪雨による直接的な被害に加え、流域全体の水位上昇や土砂流出の増大が、二次的な洪水・土砂災害を誘発した可能性が高い。特に、山岳地域の斜面崩壊や低地の冠水被害が顕著であり、現地の被害状況や過去の事例を踏まえると、流域管理の不備が被害拡大の一因となったと考えられる。

こうした状況に対し、治山技術による森林整備は、急傾斜地の土砂流出を抑制し、洪水リスクを軽減することで、防災・減災対策の一環として重要な役割を果たす。特に、森林の保水機能を強化することで、降雨時の急激な流出を抑え、洪水ピークを緩和する効果が期待される。

そのため、治山技術は山地災害対策にとどまらず、洪水を含めた国土全体の総合的な防災戦略の一部として導入されるべきである。

一方で、治山技術の効果を最大限に発揮するためには、適切な土地利用計画や土地利用制限、住民の防災・環境意識の向上が不可欠である。例えば、防災林が整備されても、適切な利用制限がなければ違法伐採や無秩序な開発が進み、防災機能の低下につながる可能性がある（いわゆる「コモンズの悲劇」）。そのため、治山技術の適用には、ゾーニングを含めた総合的な防災計画の策定が必要となる。

これらの防災施策を実効性のある形で進めるには、科学的知見に基づくゾーニングが重要な役割を果たす。ゾーニングの適用には、地域ごとの地形・地質や土地利用の変遷を詳細に把握することが不可欠である。しかし、広域かつ精密なデータを収集することは従来の調査手法では困難であるため、リモートセンシングによる衛星データ解析や、AIを活用したリスク評価の自動化が効果的な手段となる。

本課題では、日本の治山技術が蓄積してきた山地災害予測技術と、リモートセンシングやAIなどの最新の情報技術を融合させることで、開発途上国における森林の防災・減災機能を活用した防災技術の実装に貢献することを目指す。

4.1.2 本課題の目的

本課題は、開発途上国であるベトナム社会主義共和国（以下、ベトナム）において、日本の治山技術の適用可能性を評価し、同国の自然環境および社会経済的条件に適応した技術の開発を目的とする。特に、山岳地域と沿岸地域に焦点を当て、それぞれの災害リスクと地域ニーズに応じた治山技術の導入方法を検討し、その実用化を通じて持続可能な防災戦略の確立を目指す（図 4-1-2-1）。



図 4-1-2-1 途上国の森林の防災・減災等の機能強化に資する技術等の開発フロー

4.1.3 現地カウンターパートとの協力体制の構築

本課題を効率的に遂行するため、現地カウンターパートとして、ベトナム北西部山岳域の山地災害及び沿岸域の高潮災害に関する調査研究を推進するベトナム森林科学アカデミー (Vietnamese Academy of Forest Sciences) と令和 2 年度に MOU を締結し、以降、調査・研究における協力体制を構築している。

ベトナム森林科学アカデミーは、同国の農業農村開発省 (the Ministry of Agriculture and Rural Development; MARD) 傘下の特別科学組織 (Special scientific organization) であり、首都ハノイに本部を置く。同機関は、ベトナムにおける森林に関する研究・開発・拡大を推進し、科学研究、技術移転、大学院教育、国際協力などの活動を担っている。

4.2 日本の森林整備・治山技術を効果的に現地のニーズに合わせて適用するための手法の開発

4.2.1 ベトナム北西部山間地における山地災害及び自然・社会環境に関する調査の流れ

ベトナムの山岳地域では、気候変動に伴う極端な豪雨の頻発や、市場経済の拡大による森林から農地への無秩序な土地改変が進行し、斜面崩壊をはじめとする山地災害が多発している。これに伴い森林の荒廃が深刻化し、山地の持続的な利用が困難な状況にある。本事業では、これらの災害を防止・軽減することを目的として、森林の防災・減災機能を最大限に発揮させる日本の治山技術を、ベトナムの自然環境や社会経済的条件を考慮しながら効果的に適

用するための手法を開発する(図 4-2-1-1)。

この目的を達成するために、ベトナム北西部の荒廃した山岳林地を対象として現地踏査を行い、斜面崩壊の発生場や発生形態、植生被覆との関係を把握する。また、林地の荒廃が不適切な森林路網の整備に起因する場合も多いため、林道などの整備状況についても調査を実施する。さらに、森林の伐採や農地転換、居住地域の変遷といった土地利用の実態を現地調査や文献調査により明らかにし、地域住民の山地災害に対する意識についても把握する。加えて、治山事業計画の策定に必要となる地形・地質・降水量などの広域データセットの整備状況を調査し、GIS 基盤データとしての活用可能性を評価するための品質確認を行う。

昨年度までに、リモートセンシング技術を活用した地形・森林データの解析を完了し、斜面崩壊リスクマップを作成した。このリスクマップを基に、土地利用の現状と山地災害との関係を明確にし、防災計画への活用可能性を検討した。今年度は、これらの成果を踏まえ、日本の治山技術の適用と改良を進めるとともに、具体的な防災戦略の実装を進める。特に、リスクマップを基盤とした土地利用計画の技術指針を作成し、治山事業計画の科学的根拠を強化することを目指す。また、リスクマップ作成に必要なデータの適用性を評価し、解析手法の違いによる影響を検討するとともに、開発途上国での利用に適したデータの特性とその留意点を整理し、リスクマップの活用指針を示す。

さらに、沿岸地域においては、高潮や波浪による浸水・侵食リスクが高いことから、防災林としてのマングローブの保全と再生が重要な課題となる。これまでの調査成果を踏まえ、最適なマングローブの配置や修復手法を特定し、保全・再生技術を開発する。また、マングローブの消波・減災機能を定量的に評価し、持続可能な管理手法を構築することで、実用的な技術指針を策定する。

本事業を通じ、ベトナムの自然環境および社会経済条件に適応可能な治山技術と沿岸防災技術を開発し、持続可能な防災戦略の策定に貢献する。

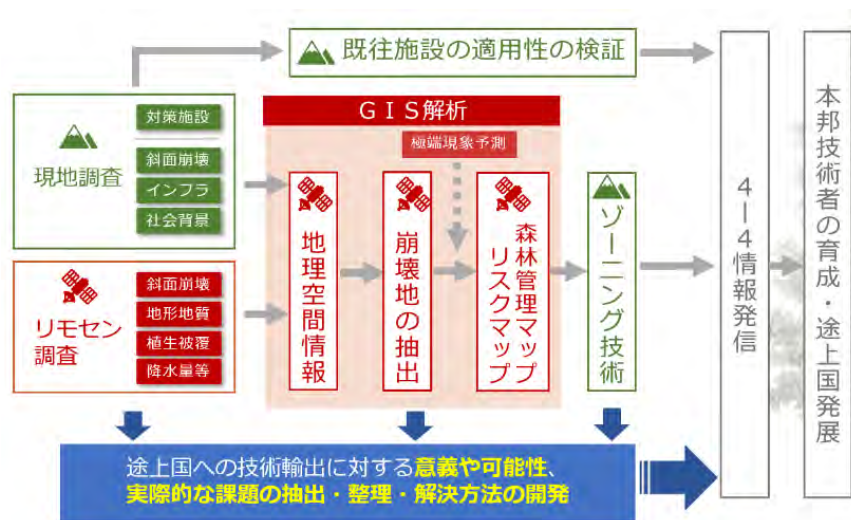


図 4-2-1-1 課題 4.2 及び 4.3 の調査開発フロー

4.2.2 ベトナム北西部における山地災害と防災対策に関する現地調査

4.2.2.1 ベトナム北西部の中山間地域における斜面崩壊の実態と土地利用の関係

2024 年 6 月及び 2025 年 2 月～3 月の現地調査では、Che Cu Nha コミュニの崩壊地（地すべり型崩壊）、および 2023 年 9 月 7 日の豪雨で表層崩壊が群発した Ho Bon コミュニの崩壊地を調査した。



図 4-2-2-1 Che Cu Nha 崩壊地と Ho Bon(Trong Gau Bau)崩壊地の位置

4.2.2.1 (1) Che Cu Nha コミュニにおける斜面崩壊

近年に拡大が続いていることを踏まえ、崩壊地の動き(移動量)を調べた。滑落崖近傍の不動点と考えられる地点を測量の原点として、崩壊地内に設置した杭までの斜距離、傾斜角お

よび方位角をレーザーテクノロジー社の TruPulse360 を用いて測量した。

2024 年 2 月に崩壊地内に設置した杭は、2024 年 6 月の調査では殆ど移動していなかった。但し、今回の測量では資機材面での制約があり、国内調査で一般的な精度を確保した調査には至らなかった。また、いくつかの杭は 2024 年 6 月の調査では見つからなかった。これは、測量開始から現在までに大規模な移動が生じた訳ではなく、現地住民が崩壊地内をトウモロコシ畑として土地利用した影響が大いにあると考えられる(図 4-2-2-2)。Che Cu Nha の地区の崩壊地は大規模であるものの、その周辺には保全対象となる家屋がないため、行政等による斜面对策は全くされていない。また、崩壊地内の地表は乱れており、稲作などに利用するためには整地する必要があることから、斜面に地植えでき、傾斜地でも生育可能なトウモロコシが選定されたと予想される。

大規模な崩壊地内という悪条件の土地であったとしても、農地として利用できるのであれば、現地住民は斜面の保全よりも農地利用を選択する可能性が高い。これは中山間地という平地の少ない土地条件が少なからず影響している可能性がある。ベトナム国内の平野部では米の二期作が主流であるものの、中山間地域に位置する Mu Cang Chai 地域では、Kim 川沿いに広がるわずかな平坦地のみ、二期作ができる。Mu Cang Chai 地域の農地の大部分を占める棚田では、雨期にしか稲の耕作ができないため、米の栽培時期と重ならないトウモロコシなどの穀物は貴重な収入源となる。土地利用に制約があるため、山地斜面の保全に対する現地住民の認識が希薄となっていることが、現地観察から示唆された。

その一方、2025 年 2 月～3 月の現地調査では、2024 年 9 月にベトナム北部に上陸して各地に甚大な被害をもたらした台風 11 号(Typhoon Yagi)により Che Cu Cha 地区では 9 月 7 日の 159mm、9 月 8 日に 158mm の日雨量を観測し(本プロジェクト観測データ)、現地調査による観察(2024 年 2 月に崩壊地内に設置した杭は一本も確認できなかった)、及び衛星画像による追跡から、その大雨によって崩壊地が拡大及び再活動していることが分かった(図 4-2-2-3)。その詳細は今後の分析によって明らかにしていきたい。



図 4-2-2-2 Che Cu Nha 崩壊地の移動量調査の様子。調査杭の背後にはトウモロコシ畑が広がっている。



図 4-2-2-3 Che Cu Nha 崩壊地の台風 11 号前後での変化。崩壊地上部での拡大及び内部での再活動が認められる。

4. 2. 2. 1 (2) Ho Bon コミューンにおける斜面崩壊調査

Ho Bon コミューンでは、2023 年 8 月 5 日の豪雨によって各地で斜面崩壊や洪水が発生

した。同年8月8日のベトナム現地の新聞 *tuổi trẻ news* (The News Gateway to Vietnam) によれば、当時の被害は以下のように伝えられている。

ベトナム北部の Yên Bái 省 Mu Cang Chai 地区にある Ho Bon コミューンは、2023 年 8 月 5 日夜に発生した鉄砲水により壊滅的な被害を受け、2 日経過した現在も孤立している。多くの村やコミューンの中心部が岩や泥に覆われ、国道 32 号線の複数箇所です砂崩れが発生し交通が寸断されたほか、Ho Bon 水力発電所にも被害が及んだ。被害は甚大で、1 名が行方不明となり、家屋 20 棟が全壊、約 100 棟が 50～80% の損害を受け、94 名の住民が避難を余儀なくされた。また、家畜 20 頭、バイク 70 台、車 2 台、大量の食料が流出し、電力・通信網も完全に停止している。特に被害の大きかった Trong La 村では、連続する鉄砲水と土砂崩れにより、医療施設の一部と十数軒の住宅が流失した。コミューン中心部では倒木が道路を塞ぎ、岩や泥が住居や Ho Bon 人民委員会の庁舎、学校に流入し、医療施設はすべての出入り口や機能室、医療設備が損傷し、医薬品の不足が深刻化している。地方政府は緊急会議を開き、3 つの作業チームを編成して被害を受けたコミューンを支援し、一時的な住居や食糧、金銭的支援を提供するとともに、最低 3 日を要する交通回復作業を開始した。また、ベトナム電力公社 (EVN) は 8 月 9 日までに送電線の復旧を目指しているが、天候次第では遅れる可能性がある。被災地では依然として道路が倒木や土砂で塞がれ、住民が移動できない状況が続いており、住民は流された家財道具を探し回り、学校や人民委員会の庁舎にも泥や岩が流入するなど、生活再建には時間を要するとみられる。特に Ho Bon コミューン人民委員会の庁舎は 1 階部分が完全に破壊され、木々や瓦礫が散乱している。政府や支援団体による救助・復旧活動が進められているが、天候次第ではさらなる被害拡大の可能性もあり、引き続き警戒が必要である。

<https://tuoitrenews.vn/news/society/20230808/commune-in-vietnams-yen-bai-isolated-after-flash-floods-wreak-havoc/74861.html>



図 4-2-2-4 Ho Bon コミューンにおける調査地の位置

2024 年 2 月に詳細調査を実施した標高 1000m を越える Trong Gau Bua 集落周辺を再訪し(令和 5 年度森林技術国際展開支援事業報告書 4.2.2.1 参照)、山地の源頭部近傍で発生した表層土層が崩落した崩壊地の植生や根系の状況を調査した(図 4-2-2-4)。

Ho Bon コミューンを含む本地域の植生は概ね尾根付近に広葉樹類またはマツ類が分布しており、斜面下部には広葉樹類または草本類が分布していた。地盤は基本的に固い粘土層で、土壌層が薄く木本類の根の侵入が困難な状況とみられる。現地を確認を行ったところ、表層土壌(約 50cm)より深いところに侵入している根はほとんど見られなかった。一方で、現地の温暖な気候は木本類、草本類の速やかな成長を促していると考えられる。結果として、崩壊跡地の早期緑化の効果を果たしており、表土層の移動を抑制していると考えられる。懸念事項として、植生がマツ類であることが挙げられる。マツ類は、土地条件の悪いところでも生育する一方で、引き抜き抵抗力としては弱いとされている。そのため、豪雨時の斜面崩壊リスクは高めと考えられる。また、地盤も固いことから、根系の侵入、特に深さ方向への侵入が通常よりも緩やかで、樹木根系による斜面崩壊防止機能を発揮するには通常よりも時間がかかると想定される(図 4-2-2-5)。



図 4-2-2-5 表層崩壊の発生状況と土砂、立木の流出状況。崩壊の深さは 70～80cm 程度。

樹木根系による斜面崩壊防止機能は、森林の持つ公益的機能の一つである。内閣府が実施した「森林と生活に関する世論調査」において、森林の有する多面的機能のうち森林に期待する働きについて、山地災害防止を挙げる回答は常に上位に位置している。地球温暖化に伴う短時間の記録的な豪雨による自然災害は増加傾向にあり、災害リスク軽減という観点から森林の持つ公益的機能への期待は大きい。

一般的に、樹木根系による斜面崩壊防止機能は、土層内の想定すべり面に侵入する鉛直根、斜出根の抵抗力によって崩壊を防止する効果（杭効果）と、横方向に伸びる水平根が周囲の樹木から伸びる根と絡み合うことで崩壊を防止する効果（ネット効果）がある。

既往の研究成果として、北村・難波（1981）は、樹木の成長に伴う根の引き抜き抵抗力の増加量と伐採後に腐朽する根株の引き抜き抵抗力の低下量を調べ、伐採後 10～20 年後に最も崩壊リスクが高まるとした（図 4-2-2-6）。阿部（1997）は、スギの鉛直方向に伸びる根の直径と本数を深さ別に推定可能な根系分布モデルを開発し、樹木根系の斜面崩壊防止機能について定量的な評価を行った。北原（2010）は水平根の効果に着目し、水平根が崩壊縁に沿って圧倒的に露出していることから、水平根の機能を正しく評価することが重要としている。

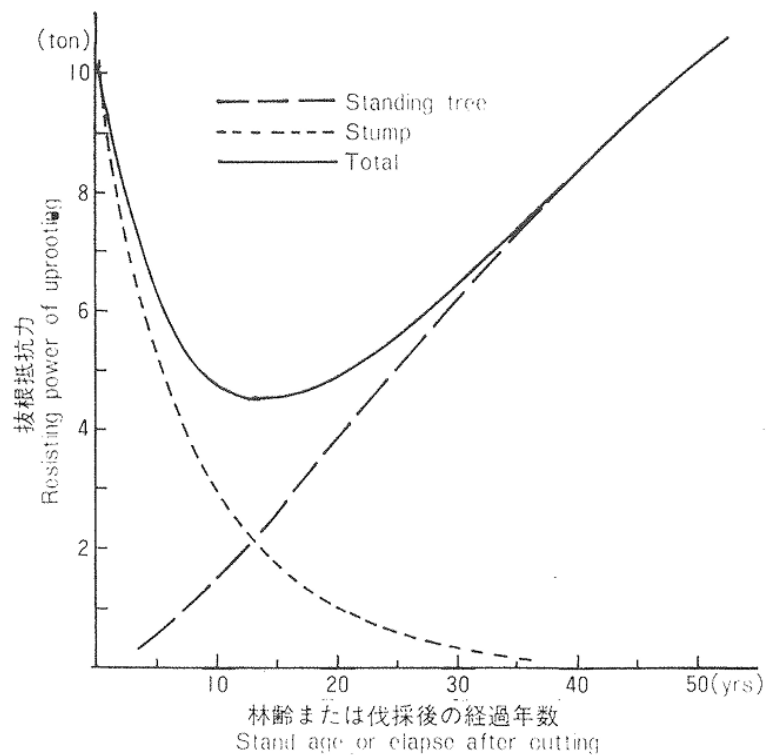


図 4-2-2-6 林齢または伐採後の経過年数と抜根抵抗力の関係(スギ)(北村・難波、1981)

樹木根系による斜面崩壊防止機能の調査方法においては、根を引き抜いたときの値と根の直径との相関関係を調べる引き抜き試験と、どのような場所に根が侵入し、どのくらい太い根が存在しているかを調べる分布調査がある。根の引き抜き試験については根の直径 D と引き抜き抵抗 P との関係が調べられてきており、 $P=aDb$ (a, b : 係数) の相関関係が成り立つ。北原(2010)は既往の成果を取りまとめ(表 4-2-2-1)、樹種別に大まかに記すと、スギ、ヒノキと広葉樹のケヤキとナラ類は強く、アカマツとカラマツはやや弱いとした。根系分布調査に関しては荏住(2010)の成果が有名であるが、実際には樹木の生育している環境、特に土壌層の厚さと斜面傾斜による影響が大きい。また一部の樹種に関しては定量化が試みられているが、大半は根の図面と特徴を示しているのみで、樹木根系の崩壊防止機能の定量化に用いるには難がある。

表 4-2-2-1 引き抜き試験で得られた引き抜き抵抗力の回帰式中の a, b 値(北原 2010)

	a	b	直径10mm の引き 抜き抵抗力(N)	引用文献
スギ	31.6	1.34	688	森岡ほか 1989
スギ	42.2	1.48	1274	石垣ほか 1989
スギ	126.8	1.08	1524	同(資料数少ない?)
スギ	19.4	1.60	772	阿部ほか 1996
ヒノキ	12.3	1.80	776	野毛ほか 2002*
ヒノキ	23.0	1.68	1101	相馬ほか 2004*
ヒノキ	29.4	1.44	810	岩名ほか 2009*
トドマツ	8.58	1.71	440	神原ほか 2002(垂直根のみ)
アカマツ	10.7	1.70	536	北原ほか 2002*
アカマツ	11.7	1.59	455	久保田ほか 2006*
カラマツ	12.3	1.46	357	久保田ほか 2005*
スギ, 広葉樹	27.4	1.45	772	塚本 1987(樹種で差がない)
広葉樹	11.1	1.74	610	北原ほか 2002*
コナラ	39.3	1.41	1010	石垣ほか 1989
コナラ	28.4	1.56	1031	松下ほか 2009*
ミズナラ	20.7	1.56	752	久保田ほか 2006*
クヌギ	14.5	1.72	761	松下ほか 2009*
クリ	21.1	1.49	652	松下ほか 2009*
ケヤキ	34.3	1.87	2543	松下ほか 2009*
ミズキ	25.3	1.54	877	松下ほか 2009*
リョウブ	18.5	1.51	599	松下ほか 2009*
ウワミズザクラ	20.4	1.51	660	松下ほか 2009*
カスミザクラ	14.9	1.47	440	松下ほか 2009*
ウリハダカエデ	17.5	1.49	541	松下ほか 2009*
ヒトツバカエデ	23.7	1.53	804	松下ほか 2009*
ケヤマハンノキ	9.73	1.74	535	加藤ほか 2008*
ヤシャブシ	17.0	1.54	589	加藤ほか 2008*
ニセアカシア	7.28	1.94	634	加藤ほか 2008*
ヤマハギ	9.67	1.68	463	加藤ほか 2008*
マダケ(ひげ根)	13.5	1.73	—	岩波ほか 2006*

(マダケのひげ根は 5 mm まで。地下茎は断面直径と関係なく 1 本あたり平均 6.25kN)

* 信大での研究例

樹木根系による斜面崩壊防止機能の定量化にあたって最終的には、根系分布調査結果に基づき、ある深さに侵入する直径階級別の根の本数と引き抜き抵抗力試験結果を組み合わせ、その合力を算出し、推定を行う。文献によって表記が異なるが(Cr、 ΔS 、 ΔC 等)、無限長斜面安定計算式の土の粘着力の値に加算する形で評価を行うのが一般的である。これまでスギの定量的評価については行われてきているが、その他の樹種については研究事例が少なく、樹種比較については今後の課題となっている。

引用文献

- 阿部和時(1997)樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究、森林総研研報 373、p.105-181
- 苅住昇(2010)最新樹木根系図説、誠文堂新光社、p.2044
- 北原曜(2010)森林根系の崩壊防止機能、水利科学 311、p.11-37
- 北村嘉一、難波宣士(1981)抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能、林試研報 313、p.175-208

4.2.2.1 (3) Ho Bon コミューン住民の 2023 年 8 月土砂災害発生時の住民行動と意識

Ho Bon コミューン住民が 2023 年 8 月の豪雨災害発生時にどのような行動を取ったのか、また防災や森林に対してどのような意識を持っているのかを把握するため、2025 年 2 月に聞き取り調査を実施した(図 4-2-2-7)。調査対象は、標高の高い地域に居住する住民 1 名である。Ho Bon コミューン上流域村の人口は 715 人(146 世帯)で、年間人口増加率は 1.5～2%と全国平均(約 1%)を上回る。主な生計手段は農業であるが、若年層の一部は高収入を求めて村を離れる傾向にある。

調査の結果、住民は近年の気候変動を実感しており、特に気温の上昇、豪雨・寡雨の増加、雷の頻度の上昇を認識している。2023 年 8 月の豪雨災害は過去最大規模とされ、2024 年の台風 Yagi よりも深刻な被害をもたらした。豪雨により斜面崩壊や洪水が発生し、Ho Bon コミューンでは川沿いの道路(No.32)の橋が破壊され、土石流の被害が発生した。停電や携帯電話の不通も発生し、下流域では高齢者 1 名が洪水で死亡した。住民は高台に避難し、一晩待機した後、翌日には水が引いた。上流域では死者は発生しなかったが、住民は地すべりや斜面崩壊のリスクを認識し、安全な場所へと避難する行動を取った。

一方で、防災知識の習得は十分に進んでおらず、特に森林の防災機能についての理解が限定的であることが分かった。住民の多くは「大雨が続くと土壤に水が浸透し、重量が増加して崩れる可能性がある」と考えており、そこに森林の防止機能が働きうことは想像していないようだった。また、住民は伝統的な土地選定の考え方に信頼を置き、安全性と水の確保のバランスを考慮しながら居住地を決定している。しかし、水の確保が容易な谷部は地形的に危険性が高く、慎重な選定が求められる。

政府は水管理プログラムを展開し、畜産業の発展を促進する「新農村開発プログラム(New Rural Development Program)」を実施している。本プログラムでは、収入、インフラ、環境対策の基準を満たすと「新農村コミュニティ(New Rural Commune)」として認定され、追加支援を受けられる。しかし、支援を継続的に受けるためには基準の維持が求められる。現在、Ho

Bon コミューンの本プログラム内での位置付けは不明である。

本調査を通じて、Ho Bon コミューン上流域村の住民は気候変動の影響を強く感じており、降雨パターンの変化や災害の激甚化を経験していることが明らかになった。しかし、防災知識の普及が十分ではなく、特に森林の防災機能に関する理解が不足している点が課題として挙げられる。住民は伝統的な知識を活用しながら居住地を選定しているが、気候変動への適応には新たな防災教育が不可欠である。また、政府の援助プログラムは畜産業や水管理に重点を置いているものの、災害対策の側面が十分ではなく、防災教育の充実が求められる。特に、災害リスクの高い地域における森林の適切な管理と、住民の防災意識向上を目的とした教育プログラムの導入が今後の課題となる。本報告を通じて、地域の防災力向上に向けた取り組みの必要性が改めて浮き彫りとなった。



図 4-2-2-7 聞き取り調査の実施場所

4. 2. 2. 2 ベトナム北西部の中山間地域における土砂流量観測

上流部から流出した土砂(図 4-2-2-8)が下流部の災害リスク(河床の上昇)や環境リスク(泥砂礫の堆積、そのことによる生態環境の変化)を高めるといった負のインパクトを与えていることはベトナム北部でも指摘されているが、その対策を進める際に鍵となる上流部流域における実態把握は、調査に時間・労力・経費がかかり技術的にも決して単純ではないことも影響し、

立ち遅れている現状にある。本調査では、Yên Bái 省 Mu Cang Chai 郡の Mu Cang Chai 水文気象観測所に 2022 年 9 月に設置した水位計及び濁度計を用いた観測を継続した(図 4-2-2-9)。また、観測所に依頼して収集した採水試料をハノイの VAFS 分析室にて分析した(図 4-2-2-10)。



図 4-2-2-8 雨季の Mu Cang Chai 県ナム川中流部での濁流(2024 年 6 月)



図 4-2-2-9 Mu Cang Chai 水文気象観測所に設置した水位計及び濁度計



図 4-2-2-10 VAFS 分析室での採水試料分析

調査対象としたのは Yên Bái 省 Mu Cang Chai 郡 (Mu Cang Chai District, Yên Bái Province) のキム川 (Nam Kim) 流域である (図 4-2-2-11)。同流域はダー河の支流域であり、面積約 200km²、標高約 970～約 2000m の高地に立地し (図 4-2-2-11-B)、平均年降水量は 1730mm (1991-2020 年) である。地表地質は流紋岩及び流紋岩質凝灰岩が卓越し、頁岩がしばしば挟まれる (図 4-2-2-11-C)。キム川下流部から中流部まで谷に沿って急斜面が両岸に連続し (低位急傾斜部)、急斜面の上位には旧地形面と考えられる厚い風化層 (場所によって赤色を呈する土壌) が分布する尾根状の緩斜面が見られ (緩傾斜部)、その更に上位に傾斜 30～40 度の急斜面が続く (高位急傾斜部) (図 4-2-2-11-D)。上流部は比高が小さくなり、斜面傾斜も概して緩くなる。地形にはこうした斜面形配置や線構造などのパターンが認められ、かつての地殻変動が関わる地質構造にも影響された地形発達が示唆される。流域の山地斜面には古くからモン族が暮らし、低位急傾斜部及び緩傾斜部に棚田 (灌漑により灌水) 及び段々畑／棚畑を作り、水稻、キャッサバ、トウモロコシなどを栽培してきた。一方、流域の谷部にはタイ族が古くから暮らし、谷底の平坦面で水稻などを栽培してきた。主として緩傾斜部及び高位急傾斜部に分布する森林には薪炭材確保や農地転換のために住民が様々な強度で伐採した (時には劣化した) 森林が見られる。

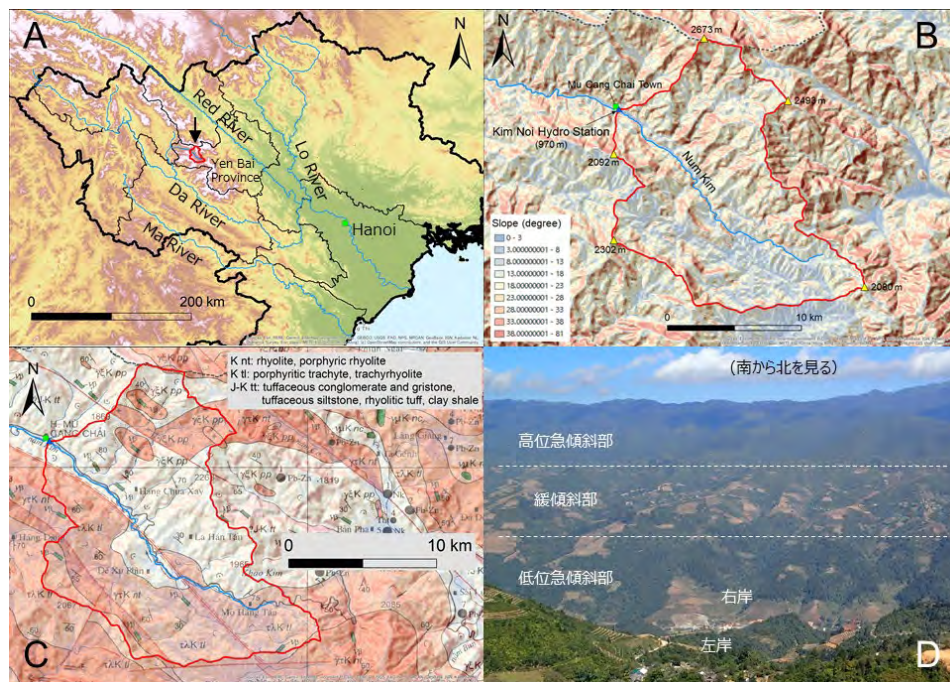


図 4-2-2-11 キム川流域の概要

2024 年 2 月～2025 年 2 月 (2024 水文年) に観測したデータ (図 4-2-2-12) では、雨季の降雨流出は 3 月末に始まり 10 月中旬まで続いたことが分かる。本水文年には観測点における水位が 2.0m を超える出水イベントが 3 回あり、その一つが 9 月上旬にベトナム北部に上陸して各地に被害を及ぼした Typhoon Yagi (台風 11 号) の降雨に伴う出水イベントである (斜面崩壊に関する 4.2.2.1 節を参照)。濁度に関しては、4 月下旬から 6 月上旬にかけての雨季初期の出水イベントにおいて 30000 度 (カオリン; 浮遊土砂濃度では少なく見積もって (暫定値) $8.3 \sim 10.2 \text{ kg/m}^3$) を超える濁度が 5 回観測された一方、Typhoon Yagi (台風 11 号) の出水イベント含め 7 月以降のより流量が大きな出水イベントでは 20000 度を超えることはなかった。このように雨季初期の出水イベント時の濁度が雨季中盤から後半のイベントに比べて高かったことは 2023 水文年と同様である。これは乾季の間に斜面に貯留されていた土砂が雨季の雨で流出し雨季の途中で貯留分が枯渇したことが原因と考えられ、キム川流域は **supply-limited** の土砂移動環境にあると言える。

こうした土砂流出がどのような土地利用で起こっているのかを特定するため、昨年度に引き続き本年度も調査流域内での一斉サンプリング・計測 (図 4-2-2-13) を実施した結果、人工地形改変地 (図 4-2-2-14) からの流出が本年度も顕著に発生していることが明らかになった。

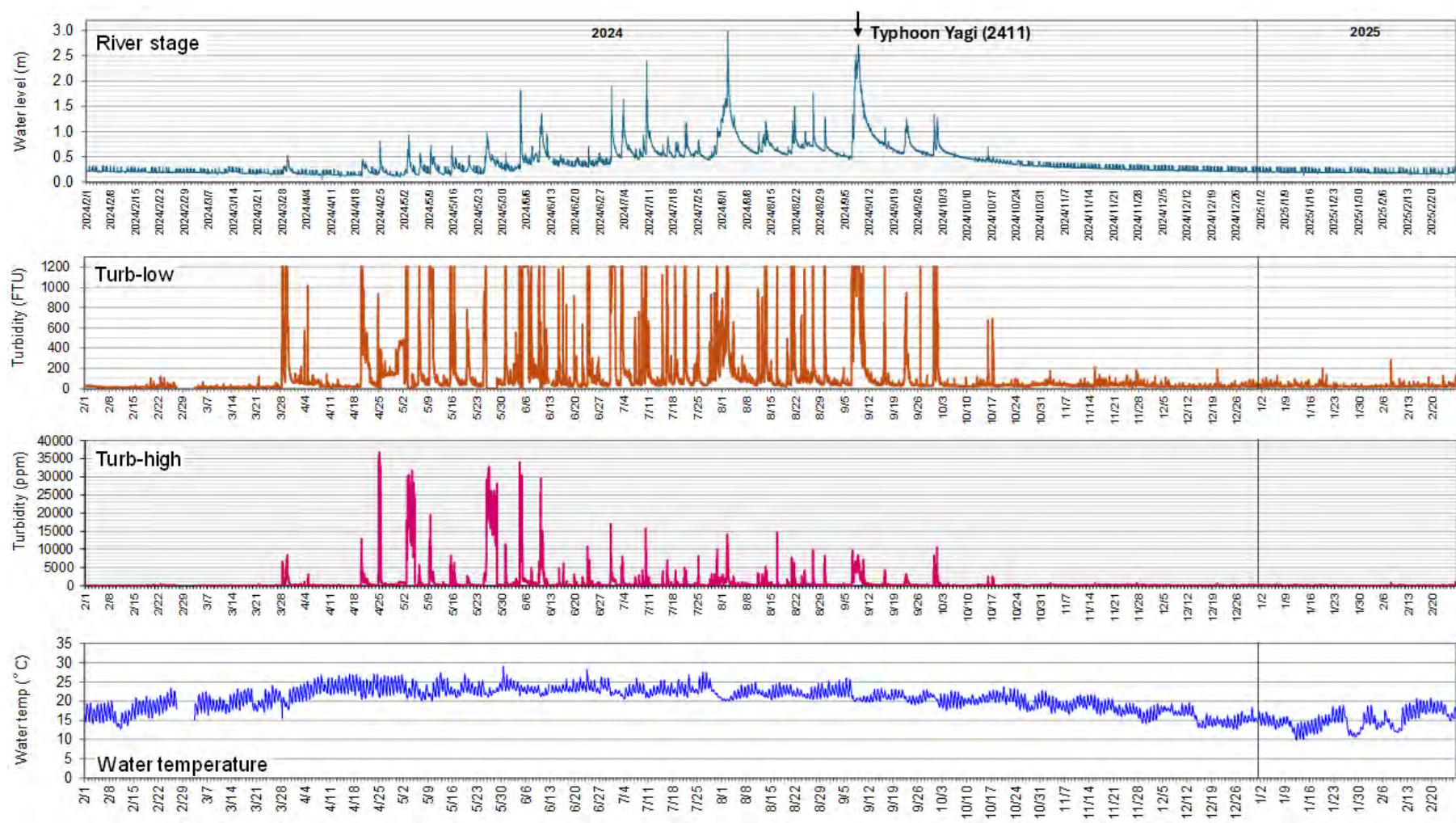


図 4-2-2-12 Mu Cang Chai 水文気象観測所での水位、濁度、水温の観測データ(2024 年 2 月 1 日～2025 年 2 月 26 日)



図 4-2-2-13 調査流域内での一斉サンプリング・計測の様様



図 4-2-2-14 土砂流出の起源地となっている人工地形改変地

4.2.2.3 ベトナム北西部山岳地における道路法面崩壊の発生に係る諸条件調査

ベトナム北西部山岳地において、道路は住民の生活を支える重要なインフラとなっている。一方で、道路沿いの斜面では侵食・崩壊等多発しており、道路が山地斜面の安定に与える影響を科学的に評価する必要がある。道路は、その上側（切土側）斜面と下側（盛土側）斜面の両方の安定性に影響を与える。2023 年度は、道路の上側斜面の崩壊メカニズムを解明するため、道路周辺の斜面の土層構造や透水性等の調査を実施した。その結果、本調査地の道路の上側斜面に多発する崩壊の多くは、厚さ1m 程度の表土層が滑落したものであると考えられた。2024 年度の調査ではさらにデータ収集を進めてこの仮説を補強するとともに、道路排水がその下側斜面に及ぼす影響にも着目して調査を行った。

4.2.2.3 (1) 調査対象道路の概要

2023 年度に引き続き、調査対象は Yên Bái 省 Mu Cang Chai 県 Lao Chai コミュニティ内の道路とした(図 4-2-2-15)。2023 年度は、Mu Cang Chai 県の中心地である Mu Cang Chai コミ

ューンと、県南部のコミュニンとの往来に頻繁に利用されている舗装道路を対象とし、その上側斜面で発生する表層崩壊に着目した。2024 年度は、道路排水が下側斜面に与える影響を検討するため、その舗装道路から分岐した未舗装道路も調査対象に加えた。この道路は、周辺住民の生活、農作業、家畜の放牧等に利用されている。舗装道路では側溝と暗渠の組み合わせによる路面排水が行われているのに対し、この未舗装道路では排水構造物は設置されておらず、路面の凹凸によって自然に排水が行われ、道路の下側斜面では排水の流下によるガリー侵食が散見された。



図 4-2-2-15 調査対象道路

4.2.2.3 (2) 道路の上側斜面における崩壊の発生メカニズム

2023 年度に実施した土壌断面観察および簡易動的コーン貫入試験の結果から、本調査地の道路沿い上側斜面の典型的な地下構造は、厚さ 1m 程度の表土層の下に風化基岩層が存在するものと考えられた(図 4-2-2-16)。これを踏まえ、2023～2024 年度の 2 か年に渡り、各深度から土サンプルを採取し、三軸圧縮試験や透水試験を実施した。三軸圧縮試験の結果、各深度における粘着力およびせん断抵抗は図 4-2-2-17 に示すとおりであり、表土層の中でも深い部分や、風化基岩層から採取したサンプルは非常に高い粘着力を示した。せん断抵抗角についても、表土層の浅部に比べ、表土層の深部や風化基岩層で高かった。飽和透水係数については、表土層では 10^{-4}m/s のオーダーであったが、風化基岩層では 10^{-5}m/s のオーダーであり、ワンオーダーの差があった(図 4-2-2-18)。これらの結果から、本調査地の道路上側斜面で多発する崩壊は、透水性が高く比較的せん断強度が低い表土層の滑落であるという仮説が補強された。表土層が滑落する一方で、切土法面自体は特段の法面保護工がなくても崩壊していない例が多く見られたが、これは風化基岩層の高い粘着力と低い透水性によると考えられた。

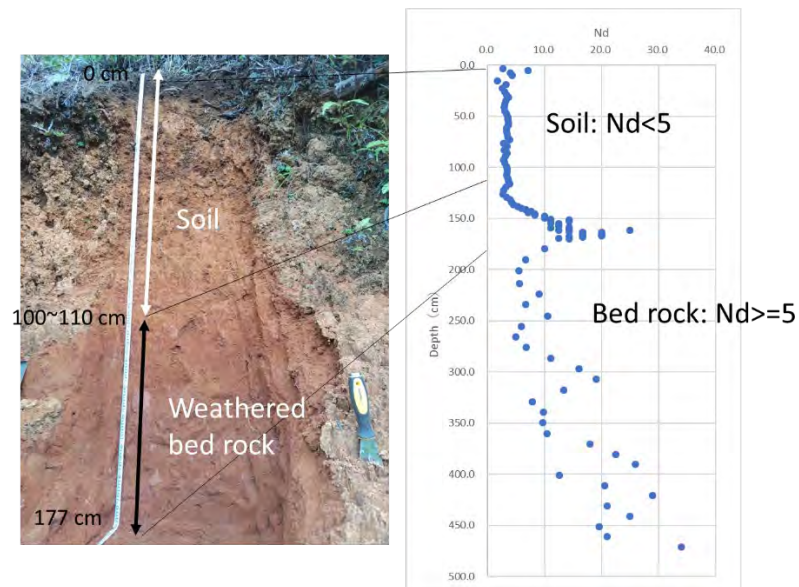


図 4-2-2-16 舗装道路上側斜面の土壌断面と、各深度の Nd 値

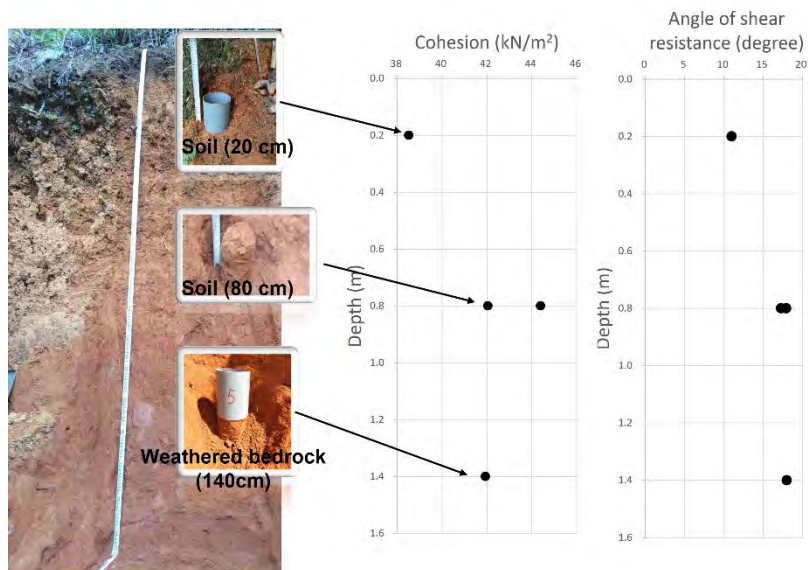


図 4-2-2-17 各深度から採取したサンプルの粘着力、せん断抵抗角

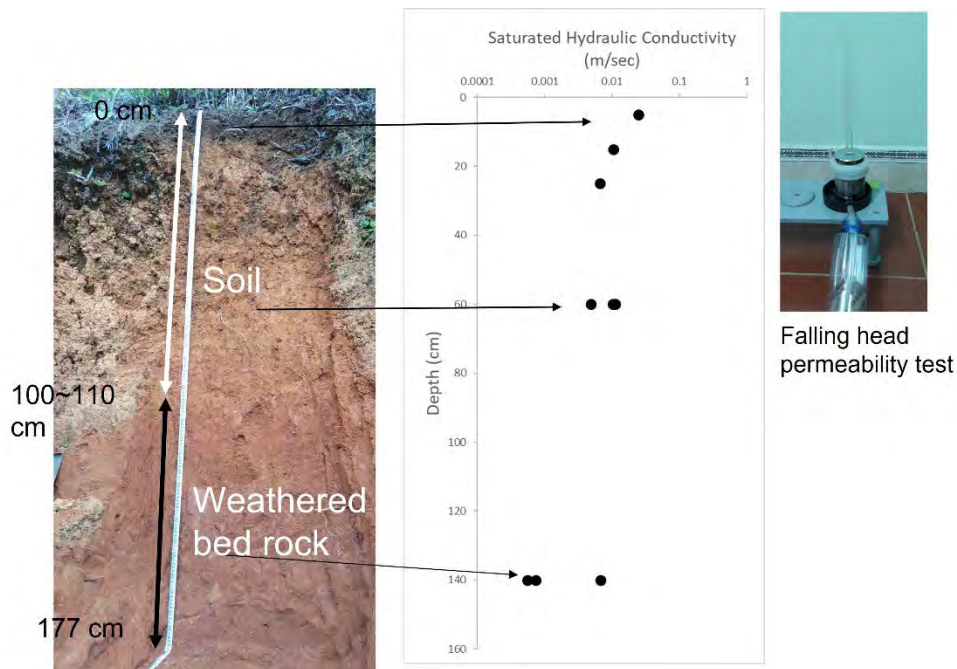


図 4-2-2-18 各深度から採取したサンプルの飽和透水係数

このような道路上側斜面の崩壊形態は、日本の林道や作業道で頻繁に見られる図 4-2-2-19 に示すような切土法面崩壊の形態とは異なっている。日本では、破碎された粘着力の低い風化基岩層や厚い土層が道路開設によって切土法面として露出し、それが崩壊する例が多く見られる。その一方で、樹木根系で束縛された表土層は原位置に留まっている場合も多い。このような切土法面崩壊のリスク低減策としては、切土法面勾配を緩くする、切土法面を植生で被覆する、構造物を設置するなど、切土法面自体にアプローチする方法が一般的である。しかし、そのような切土法面崩壊対策をそのまま適用しても、この地域で多発している道路上側斜面の崩壊には効果が低いと考えられる。このような道路上側斜面の表土層の滑落には、道路上側斜面の勾配、表土層の厚さ、根系による束縛効果の有無などに強く影響されることが考えられ、これらの因子を考慮したリスク評価が重要になると考えられる。

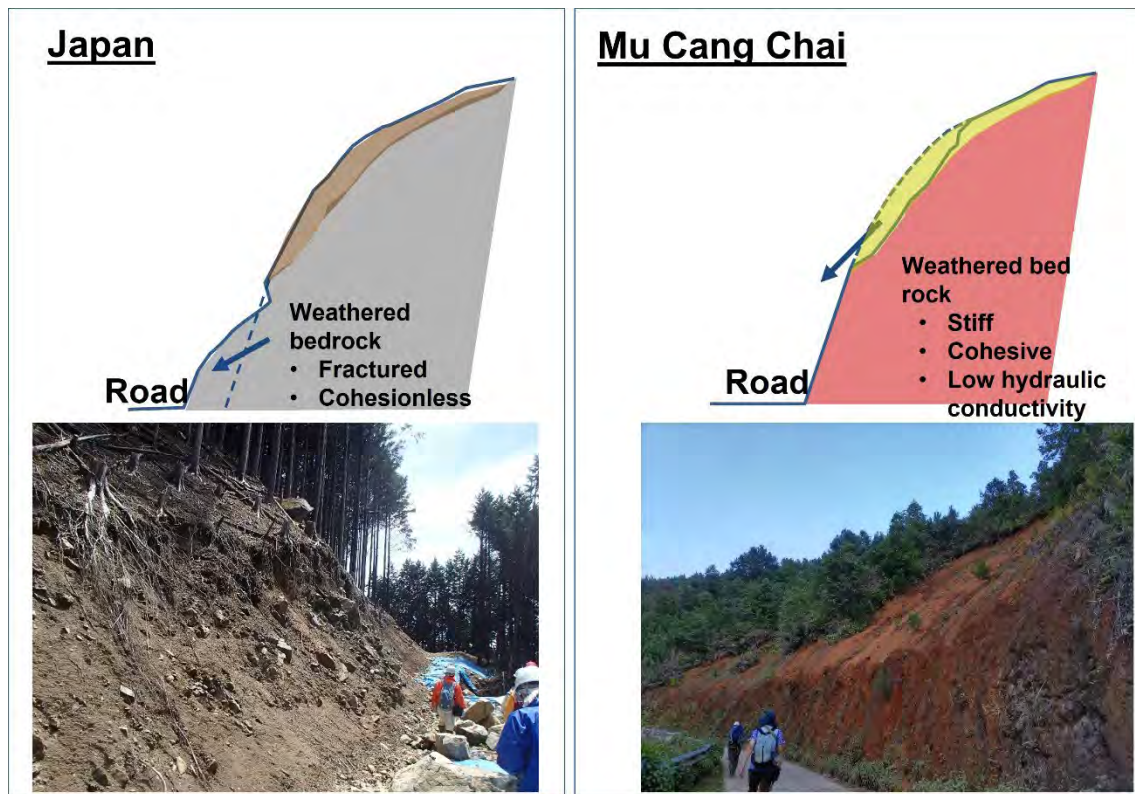


図 4-2-2-19 日本でよく見られる切土法面崩壊と、本調査地で見られる道路上側斜面の崩壊との違い

4. 2. 2. 3 (3) 道路排水が下側斜面に及ぼす影響

2024 年度から新たに調査対象とした未舗装道路において、道路排水が斜面に排水される位置（排水ポイント）を調査した（図 4-2-2-20）。この未舗装道路では、排水構造物が設置されておらず、路面の凹凸に従い多数のポイントで自然に排水が起こっていた。約 420m の区間に 45 か所の排水ポイントが確認されたが、一定間隔ではなく、谷型斜面を通過する区間で多くの排水ポイントが見られた。谷型斜面を通過する区間では、路面上に降る雨だけでなく切土法面や上側斜面からの流入水も加わり、路面上を流れる地表流の量が多くなるためと推察される。

図 4-2-2-20 に示すように、各排水ポイントにおけるガリー（侵食溝）の深さは、排水先斜面の状況によって大きく異なっていた。植生で被覆された斜面に排水が流入している場合には顕著な侵食が見られなかったが、裸地化した斜面上に排水が流入しているポイントでは、深さ 1m 以上のガリーが形成されていた。



図 4-2-2-20 道路から下側斜面への排水位置と、各排水ポイントで見られた侵食溝の深さ

図 4-2-2-21 は、道路路面、道路排水によって形成されたガリーの底部、裸地化した斜面、植生で被覆された斜面で現場浸透能試験を行った結果である。植生で被覆された斜面の浸透能は、10-4m/s のオーダーであったが、ガリー底部や裸地化した斜面の浸透能は、締め固められた道路路面と同程度の 10-5m/s のオーダーであった。

現地の方の話では、道路沿い斜面に見られる裸地は 2017 年の豪雨で引き起こされた崩壊によるものであるとのことであった。裸地化した斜面の土壤断面観察を行ったところ、緻密なシルト～粘土を多く含む層が地表に露出している状態であった(図 4-2-2-22)。もともと表層にあった有機物を多く含む透水性の高い層は、崩壊によって失われたり、上部から流れてきた粘土質の土に覆われたりしたと考えられる。裸地化し粘土質の層が露出した斜面は透水性が極めて低く、道路排水が地表流のまま流下し続け、激しい侵食を引き起こしたと考えられる。調査対象とした未舗装道路は 2017 年の豪雨の後に開設されたということであり、崩壊の発生に道路が寄与したわけではないが、崩壊地を横切るように開設された道路が、崩壊跡地からの土砂流出を助長していると考えられた。

一方、植生で被覆された透水性の高い斜面では、道路排水が土中に速やかに浸透すると考えられる。そのため激しい侵食は見られないが、道路排水の浸透により土の飽和度が上昇し、表層崩壊のリスクが高まることが懸念される。このように、道路排水は、排水先となる斜面の状況により、異なるメカニズムで斜面の安定性に影響を及ぼすと考えられ、両メカニズムを考慮に入れてリスク評価を行う必要がある。

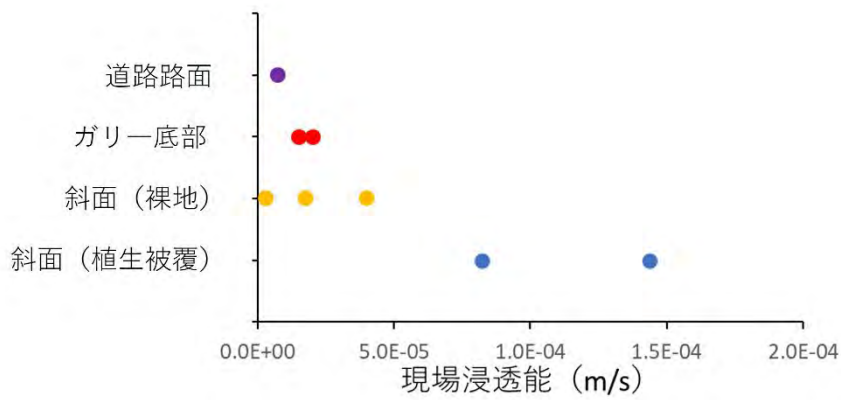


図 4-2-2-21 道路路面や斜面における現場浸透能試験結果



図 4-2-2-22 裸地化した道路下側斜面の土壌断面

4. 2. 2. 4 災害リスク低減と地域ニーズに基づく土地利用計画の提示

近年、気候変動の影響により、豪雨や異常気象による土砂災害の発生リスクが高まっている。特に開発途上国の山岳地域では、斜面崩壊や土石流などの災害が地域社会やインフラに深刻な影響を及ぼしており、防災・減災に資する土地利用のあり方が重要な課題となっている。こうした背景のもと、本研究ではリモートセンシング技術を活用した地形・森林データの解析を通じて、斜面崩

壊リスクマップを基盤とした土地利用の関係を明らかにしてきた。

本年度は、これまでの成果を基にリスクマップを活用した土地利用計画の技術指針を策定し、途上国における治山事業計画の科学的根拠を強化することを目的とする。特に、森林の防災・減災機能を最大限に活用しながら、地域の社会・経済的要因を考慮した持続可能な土地利用のあり方を提示することを目指す。そのため、以下の点について重点的に検討を行った。

まず、途上国でリスクマップを作成する際の留意点として、地形・森林データの精度や取得可能性、解析手法の適用性を評価した。特に、現地の測量データが不足している場合や、リモートセンシングデータの解像度が限られる状況において、どのようなデータを用いるべきかを整理し、実用的な手法を検討した。併せて、異なる解析手法がリスク評価に与える影響について比較し、技術の適用性を高める方策を示した。

次に、山岳地の土地利用に対する地域住民の認識に着目し、防災対策を効果的に進めるための社会的受容性を分析する。多くの途上国では、農地の拡大や資源採取が優先される一方で、森林の防災機能に対する理解が十分でないことが課題となっている。このため、住民の土地利用に関する意識調査を行い、森林の保全や造成が地域の安全に与える影響についての認識を高める方策を検討した。

以上を踏まえて、斜面崩壊の危険性を示すリスクマップと地域住民の土地利用意向を組み合わせ、森林を維持・造成する優先区域を科学的根拠に基づいて設定した。具体的には、リスクマップを用いて崩壊のリスクが高い地域を特定し、住民の希望を考慮しながら、森林の維持・造成が最も有効な場所を選定した。この方法により、技術的な判断だけでなく、地域の実情に即した持続可能な土地利用計画を策定することが可能となる。

最後に、現地行政機関との意見交換では、作成した森林の維持・造成を優先する区域を提示し、それに基づいた土地利用計画の適用可能性について協議を行った。リスクマップと地域住民のニーズに基づいて設定した優先区域を行政機関に示し、その妥当性や運用の可能性について意見を求めることで、政策への組み込みを図った。

本項では、これらの技術的・社会的・政策的検討を踏まえ、防災と地域ニーズを統合した土地利用計画の方向性を示し、治山事業や地域開発のための具体的な適用方法を提案した。

4.2.2.4 (1) 途上国でリスクマップを作成する際の留意点

本事業では、昨年までの報告において斜面崩壊のリスクを評価し、それに基づいたリスクマップを作成・提示してきた。リスクマップを作成するにあたっては、使用可能なデータや作成するデータセットが、対象とするリスク評価およびその結果のマップ化に適用可能であるかどうかを事前に判断する必要がある。また、リスク評価およびマップ作成の過程では、使用する機械学習の手法、適用するデータセットの項目、解析時の設定などによって結果が変動するため、結果の解釈および利用には慎重な対応が求められる。本稿では、開発途上国における斜面崩壊リスクの評価に利用可能なデータと、それらを活用する際の留意点について、本事業で得られた知見を基に考察する。特に、本事業で実施したリスク評価およびリスクマップ作成に用いたデータについて、リスク評価に必要なデータの種類とその作成方法、および作成したリスクマップの利用にあたっての留意点を整

理して述べることで、リスク評価およびリスクマップ作成の精度を向上させるためのデータの選定や解析手法の適用について、より適切な指針を示すことを目的とする。

1) 災害(斜面崩壊)分布および履歴の把握

斜面崩壊のリスクを評価するにあたり、対象地域における斜面崩壊の履歴およびその分布を把握することは重要である。これを実現するための手法として、有償・無償の光学衛星データを活用し、崩壊地を抽出することが可能である。崩壊地の抽出(判読)には、以下の 3 つの方法が考えられる。

1. 光学衛星画像の目視判読

Google Map などで公開されている光学衛星画像を目視で判読し、その結果を QGIS などの GIS ソフトを用いてポリゴン(ベクトル)データ化する方法である。この手法は、判読作業に習熟すれば明らかに崩壊地と判定できるデータを取得できるため、精度や信頼性が高い。ただし、判読作業には時間と労力を要するため、大規模な地域を短期間で解析するには不向きである。

2. 自動抽出技術を活用した光学衛星データの解析

Sentinel-2 などの無償の光学衛星データを用い、Google Earth Engine による自動抽出技術を活用する方法である。本事業においても、本技術を活用し、短時間で広域の崩壊地データを取得する手法を開発してきた(詳しくは「令和 2 年度 森林技術国際展開支援事業報告書 4.3 章」および「森林を活用した防災・減災のための Cookbook 第 5 章」を参照)。この手法は目視判読と比較して効率的であるが、利用する衛星の解像度に依存するため、小規模な崩壊地の抽出が困難である。また、耕作地や道路法面などの人為的に改変された裸地を誤って崩壊地として抽出することが多いといった課題がある(図 4-2-2-23、詳しくは「令和 5 年度 森林技術国際展開支援事業報告書 4.3 章」を参照)。そのため、自動抽出されたデータをそのままリスク評価に使用することには課題があり、目視判読や現地調査による検証を経たうえで利用することが望ましい。

3. 開発途上国で整備された電子データの活用

対象国の行政機関や研究機関が作成した斜面崩壊の分布データが利用可能な場合、それを活用することも考えられる。ただし、これらのデータがどのように作成・判読されたものであるかを事前に確認し、データの精度や信頼性を評価した上で、リスク評価への適用可否を判断することが必要である。

以上のように、斜面崩壊の履歴および分布を把握するための手法には、それぞれメリットと課題がある。リスク評価に用いるデータを選定する際には、目的に応じて適切な手法を選び、必要に応じて複数のデータソースを組み合わせることで、より信頼性の高い評価を行うことが求められる。

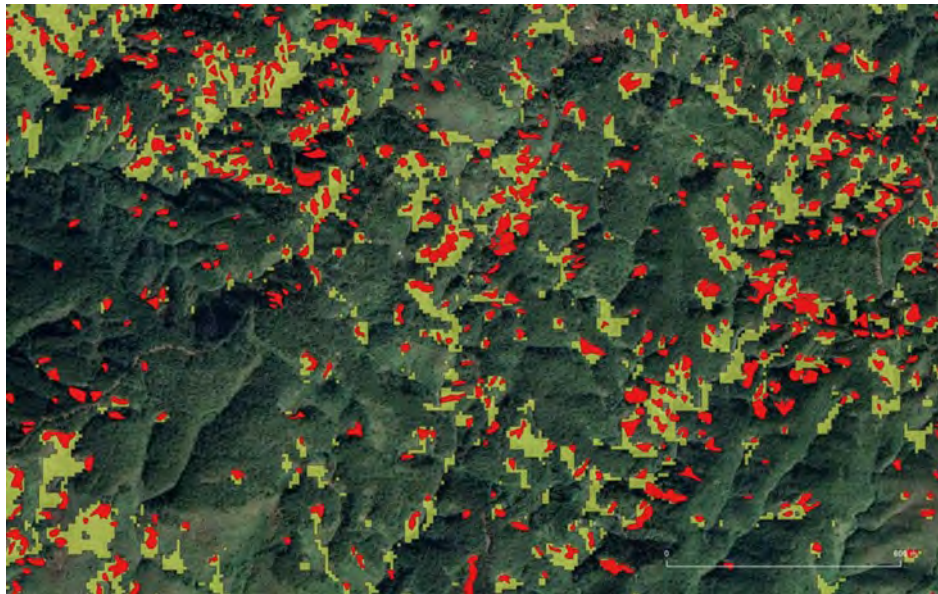


図 4-2-2-23 崩壊地の目視判読結果(赤)と自動抽出結果(黄色)の比較

2) 崩壊斜面の土地利用(森林伐採)履歴の把握

本事業で対象としている斜面崩壊は表層崩壊であり、既往の研究により、森林(樹木)の根系の発達崩壊抑制に寄与することが報告されている。日本における研究では、森林伐採後に植林された森林が壮齢林となり、樹木根系の崩壊抑制効果を発揮するまでに 10～15 年以上を要するとされる。また、樹木根系の効果は、斜面の傾斜や地質条件といった他の崩壊要因と比較しても大きいことが示唆されている。このため、斜面崩壊リスクを評価する際には、対象斜面の森林の状況、特に壮齢林か若齢林かを把握することが重要となる。本事業では、以下の方法を用いて、森林伐採履歴を把握し、整理した上でリスク評価に活用した。

1. 光学衛星画像データの目視判読

Google Map などで公開されている光学衛星画像を目視で判読し、QGIS 等の GIS ソフトを用いてポリゴン(ベクトル)データ化する方法である。この手法では、目的に応じた区分を設定できるが、判読には一定の習熟が必要であり、恣意的になりやすいことや、作業に時間と労力を要することに留意する必要がある。

2. 時系列解析を用いた森林の攪乱履歴の把握

Landsat 等の無償の衛星画像データを活用し、本事業で得られた時系列解析技術(詳細は「森林を活用した防災・減災のための Cookbook 第 5 章」および Shimizu et al. (2023)を参照)を用いて森林の変遷を分析する方法である。この手法により、過去 30 年にわたる森林の攪乱履歴を把握し、現在の森林が伐採後何年経過したかを推定できる(図 4-2-2-24)。一方で、無償の衛星画像データは解像度が 10m～50m と比較的粗いため、解析結果が詳細な土地利用履歴を十分に反映していない可能性がある。近年では、有償の高解像度衛星画像(例:Pleiades、解像度 30～50cm)を利用することで、より詳細な情報を得ることが可能になっているが、古い時期のデータは存在しないため、長期間の土地利用履歴を把握することは難しい。このため、リスク評価に用いる際には、目視判読や現地調査による確認が不可欠である。

3. 公開されている土地利用データの活用

ベトナムでは、JAXA が衛星画像を解析して作成した土地利用区分図(解像度 10m)が公開されており、2007 年、2016 年、2020 年のデータが利用可能である(図 4-2-2-25)。しかし、この区分図では森林域が「森林」として一括分類されているため、森林の年齢区分(壮齡林・若齡林など)を考慮したリスク評価を行うには、本事業の成果として得られた森林攪乱発生分布データと組み合わせるなどの工夫が必要となる。また、このデータも実際の土地利用を正確に反映していない可能性があるため、現地調査や高解像度衛星画像の目視判読と併用し、現場の状況を確認する必要がある。

4. 開発途上国が整備した土地利用図の活用

開発途上国が自国で作成した土地利用現況図や計画図が存在する場合、それを活用することも考えられる。しかし、データの分類基準や用語が日本と異なる場合があるほか、区分が現状を正確に反映しているとは限らないため、リスク評価に使用する際には、目視判読や現地調査による検証を行うことが必須である。

開発途上国では、日本のように詳細な森林データを入手することが困難である。また、開発途上国では、斜面を農地として利用する、あるいは燃料や資材の採取のために森林を伐採し、その後植林せずに放棄するなど、日本とは異なる土地利用が一般的である。このため、斜面の土地利用状況を把握し、目的に応じた分類を整理した上で、斜面崩壊のリスク評価に活用することが求められる。

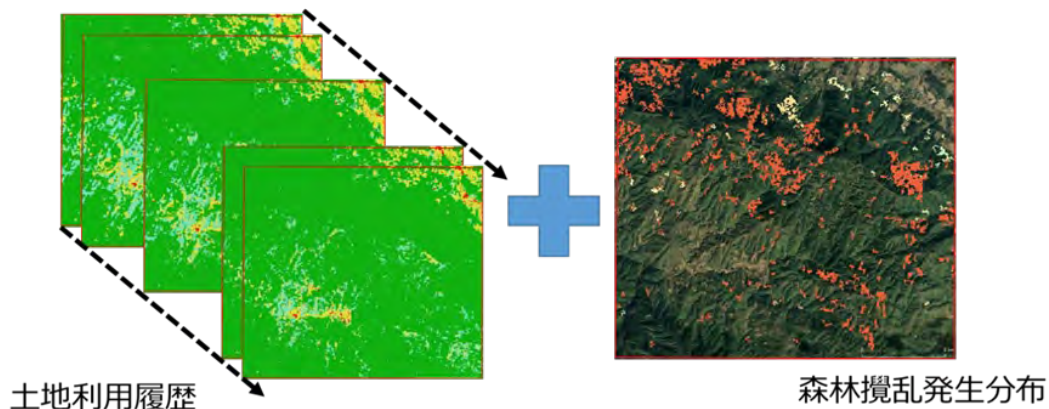


図 4-2-2-24 土地利用履歴と森林攪乱発生分布の組み合わせ

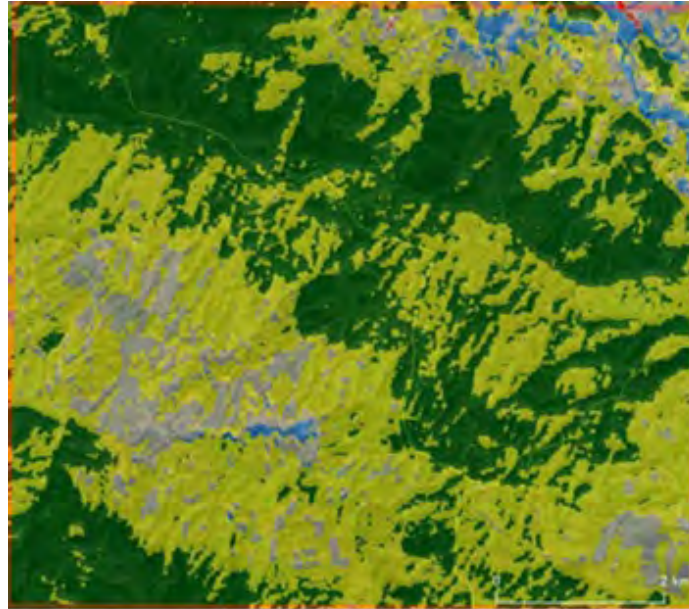


図 4-2-2-25 JAXA 公開のベトナム国の土地利用図(2016 年)

3) リスク評価に使用する GIS データ類

斜面崩壊のリスク評価には、地形(標高、傾斜、方位など)、地質、河川の近傍といった自然要因、または道路などの人為改変の影響を考慮する必要がある。開発途上国で入手可能なこれらの情報源として、以下のデータが挙げられる。

1. 地形情報

斜面の標高や傾斜を把握するためには、衛星データから作成された地形情報(DEM: Digital Elevation Model)が利用できる。本事業では、ALOS 衛星画像を用いて作成された 12.5m 解像度の DEM を使用し、傾斜や方位を算出し、標高データとともにリスク評価に活用した(図 4-2-2-26)。DEM は無償または有償で入手可能であり、広範囲の地形情報を取得できる利点がある。

一方で、ALOS 衛星データから作成される DEM は、UAV(ドローン)等による現地計測データと比較すると、地表の起伏量が小さくなる傾向があり、その結果、傾斜が相対的に緩く算出される場合がある。このため、リスク評価の際には、地形情報(特に傾斜)が過少評価される可能性があることを考慮し、現地調査などで事前に検証することが望ましい。

2. 地質情報

地質は斜面崩壊の重要な要因の一つであり、可能な限り地質情報を入手してリスク評価に反映することが望ましい。電子データとして整備されている場合は、それを利用できる。また、電子データが存在しない場合でも、紙地図があればデジタル化して活用することが可能である。ただし、国によっては地質データが整備されていない場合もあるため、その際は他の要因を用いたリスク評価を行う必要がある。

3. 河川・道路分布情報

斜面崩壊は、河川や道路の近接状況に影響を受けることがあり、これらの情報もリスク評価において重要である。開発途上国では、電子データ化された情報や紙地図が利用できる場合があるが、

一部の道路が記載されていない可能性があるため、データの利用には注意が必要である。

情報が入手できない場合には、光学衛星画像を用いて目視判読し、GIS でポリラインデータを作成することが可能である。ただし、この方法では、使用する衛星画像の解像度や撮影時期、判読者の習熟度によって評価結果が変動する可能性がある。そのため、可能な限り現地調査を実施し、データの信頼性を事前に検証することが望ましい。

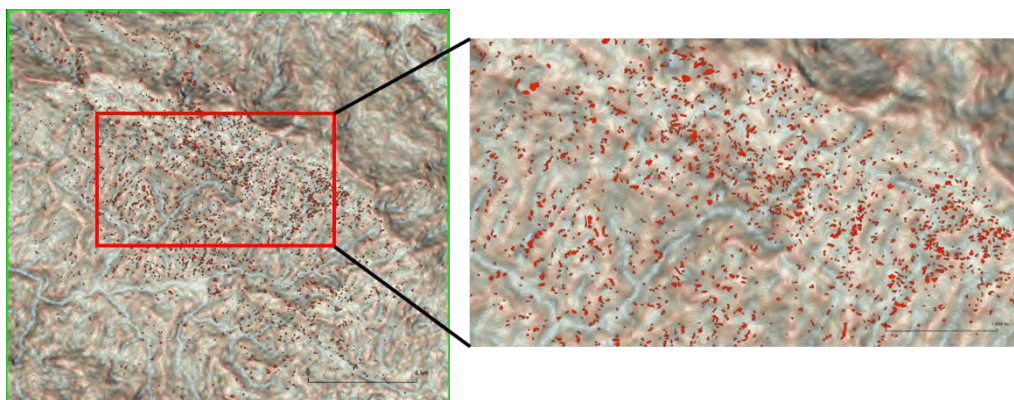


図 4-2-2-26 ALOS12.5mDEM より作成した CS 立体図。図には目視判読した崩壊地(赤)を重ねた。

4) リスク評価および作成したリスクマップを利用する際の留意点

本事業では、前述のデータを用い、ランダムフォレスト(教師あり分類)を用いた機械学習モデルを構築し、崩壊発生地点の推定とリスク評価を行い、その結果をマップ化した(図 4-2-2-27; 詳しくは「令和 5 年度森林技術国際展開支援事業報告書 4.3 章」を参照)。

本手法では、使用するデータセットの項目や解析時の設定により結果が変動するため、リスク評価に利用する際には慎重な取り扱いが求められる。一方で、複数の学習モデルや異なるデータセットにおいて一貫した傾向が確認される場合には、概ね信頼性のある評価結果とみなすことができる。

また、リモートセンシング技術のみでは把握できない情報が、斜面災害のリスク評価において重要となる場合がある。特に、小規模な地域(コムーネレベル: $10^2 \sim 10^3 \text{km}^2$)でのリスク評価を行う際には、現地調査(社会経済的な要因も含む)を実施し、土地利用状況を適切に把握することが不可欠である。このような現地の実態を考慮しながら、リスク評価およびリスクマップの活用を進める必要がある。

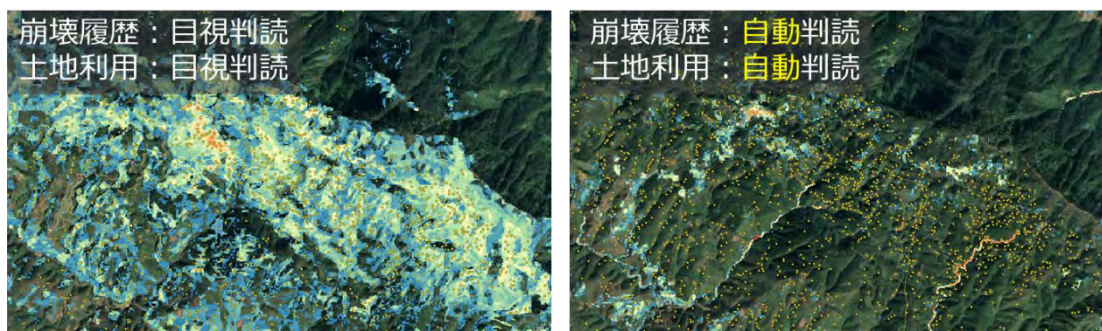


図 4-2-2-27 判読方法の違いによるリスクマップの違い。点は実際の崩壊地、暖色系のエリアほど高リスク。自動判読(右)は効率的だが、精度に課題が残る。

4.2.2.4 (2) 土地利用に関する地域住民の認識

Muong Gion における土地利用の変遷は、地域住民の生活や経済活動と密接に結びついており、農業と森林再生の間でダイナミックな変化を遂げている。住民は、耕作と土地の休閑を繰り返しながら生計を立てており、長年の経験に基づいて土地管理の判断を行っている。

地域の主要な農業形態としては、タイ族が主に米を、モン族がキャッサバを栽培している。耕作地は2～4年間利用された後、休閑地となり、自然回復によって二次林へと移行する。過去には土地の回復に10年を要したが、近年では5～7年で再利用されるケースも増えており、農業技術や土地利用の変化が影響していると考えられる。

また、焼畑農業は禁止されているものの、伝統的な土地利用の慣習は根強く残っている。住民は土地の利用可能性を評価しながら、二次林や保護林・生産林から薪や木材を採取し、森林資源の活用を続けている。一方で、荒地を森林へと回復させるには10～15年を要するため、持続可能な森林管理の必要性が認識されつつある。

こうした背景のもと、地域住民の土地利用に対する意識は、農業の継続と森林の再生のバランスをどのように取るかという課題に直面している。短期間での土地利用を優先する一方で、長期的な森林保全の必要性も理解されており、政策や技術の支援を受けながら持続可能な土地管理の方策を模索している。

4.2.2.4 (3) 土地利用計画において優先的に森林の維持・造成を図る区域の提示

森林は、土砂災害の抑制や水源の保全、生態系の維持など、多面的な機能を持つことから、適切な土地利用計画のもとでその維持・造成を進めることが重要である。特に、斜面崩壊のリスクが高い地域では、森林の防災・減災機能を活かすことで、災害リスクを低減し、地域の安全を確保することができる。

本課題では、これまでの研究成果を活用し、斜面崩壊リスクマップを基に災害危険度の高い区域を特定するとともに、地域住民の土地利用意向を考慮し、科学的根拠に基づいた森林の維持・造成の優先区域を設定する。これにより、技術的な視点に加え、地域の実情を踏まえた持続可能な土地利用計画を策定することを目指す。

1) 対象区域の設定

森林の維持・造成を優先する区域の提示の対象としたのは、図 4-2-2-28 内に黄色枠で示された Mu Cang Chai の Kim Noi、Lao Chai、De Su Phinh コミューンを含む面積約 60km²、標高約 1500～2000m の区域である(図 4-2-2-29)。この区域を対象とした理由は、2017 年の豪雨により多数の斜面崩壊が発生し、防災上の観点から森林の維持・造成が特に求められる地域であるためである。

図 4-2-2-30 は、昨年度までの調査で実施した衛星写真の目視判読による斜面崩壊の発生地点である。これに加えて、対象区域内の地形、地質、土地利用等の条件をもとに、図 4-2-2-31 斜面崩壊リスクマップが作成されている。一連の作成手順については、「令和 5 年度森林技術国際展開支援事業報告書 4.3 章」を参照されたい。



図 4-2-2-28 土地利用提示のための対象区域(黄色枠、Mu Cang Chai、Kim Noi コミューンほか、位置座標は N21°49'、E104°05')

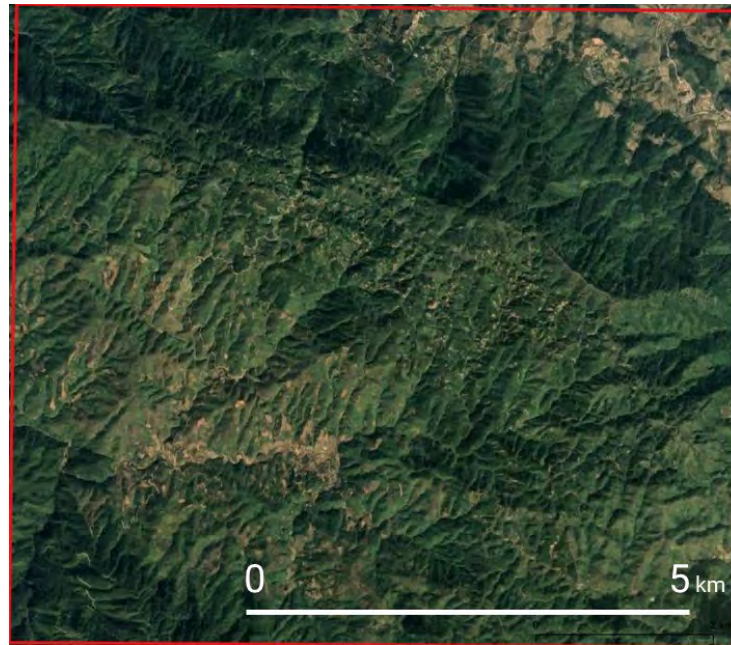


図 4-2-2-29 優先的な森林維持・造成区域の提示に向けた対象区域の衛星画像(黄色枠部分を拡大、面積約 60km²)。区域内に斜面崩壊が広く分布していることが分かる。

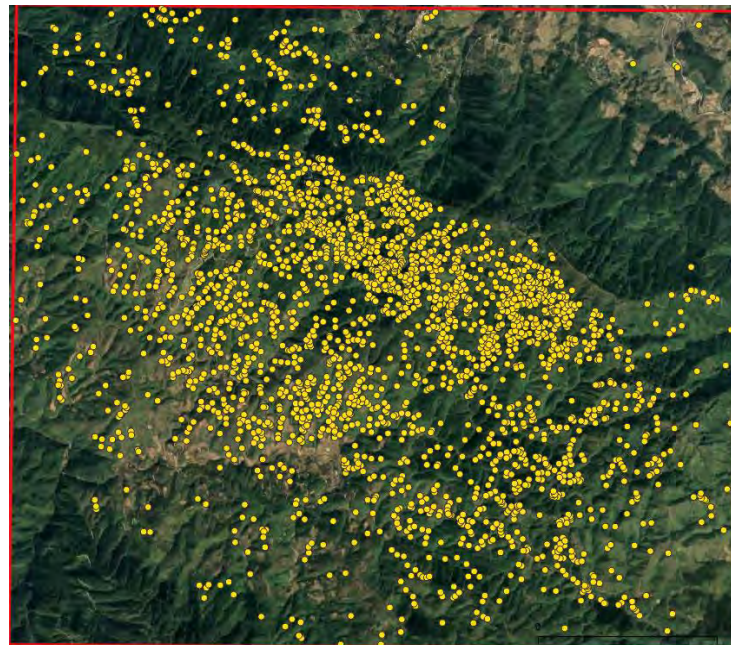


図 4-2-2-30 目視判読された斜面崩壊地の位置(黄色点)

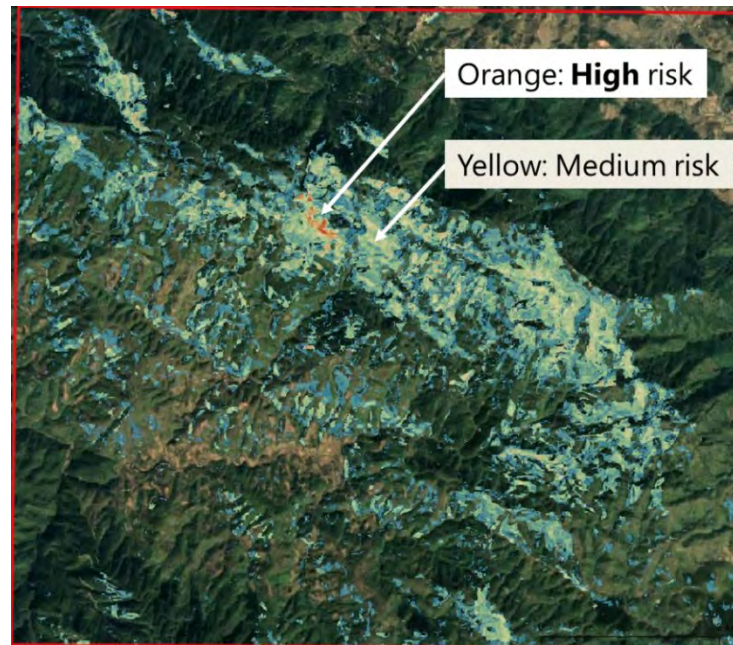


図 4-2-2-31 斜面崩壊リスクマップ。オレンジ色のエリアでは斜面崩壊リスクが最も高く、次いで黄色エリアが高い。

2) ベトナムにおける土地利用計画の現状と森林区分

本事業の対象国であるベトナムには、土地利用（現況）図および土地利用計画図が作成されている。管理の観点から森林については、Production Forest、Protection Forest、Special Forest の 3 区分に分類されている（図 4-2-2-32）。Mu Cang Chai 保護林管理委員会（Management Board of Protection Forests, Mu Cang Chai）によると、Protection Forest の伐採や開発には、省レベルでの許認可が必要であり、一方、Special Forest はより厳格な制限が設けられており、伐採や開発は極めて困難とされる。この点から、Special Forest は日本の森林法に基づく「保護林」や、自然公園法に基づく「特別保護地区」に類似する概念と考えられる。Protection Forest は、2014 年の天然林伐採禁止措置に伴い指定された区域である。指定以前は農地などとして利用されていたが、指定後に放棄された斜面が多く、2025 年時点では若齢林や灌木林が優占している。このため、Protection Forest は本来の森林としての成熟度が低く、森林生態系の回復過程にある区域と位置付けられる。

図 4-2-2-33 は、Yên Bái 省 Mu Cang Chai 地区において 2017 年に発生した崩壊地の分布と、土地利用図上の区分を重ねたものであるが、崩壊が Protection Forest に多く見られる傾向がある。その理由として、Protection Forest は 2014 年の天然林伐採禁止措置に伴い指定された区域であり、それ以前は棚田等として利用されていたことが挙げられる。すなわち、崩壊が発生した時点では、指定からわずか 3 年程度しか経過しておらず、多くの斜面では森林の回復が進行途中であったため、十分な保護機能を発揮できる状態にはなかったと考えられる（図 4-2-2-34）。現地調査でも、かつて農地として利用されていた斜面が放棄された後、まだ森林が十分に成立していない状況が確認されている。

さらに、ベトナム北西部の山地斜面における土地利用の形態は、民族ごとに異なることがこれま

での調査で明らかになっている(図 4-2-2-35、図 4-2-2-36)。同じ Protection Forest に分類される斜面であっても、過去には棚田として利用されていたもの、焼畑が行われていたものなど、その土地利用履歴には大きな違いがある。森林が成立している斜面であっても、その過去の利用形態は一樣ではない。これらの違いは斜面のリスク評価に影響を及ぼす可能性が高く、単に現時点の土地利用状況のみを基に評価するのではなく、過去の土地利用履歴を考慮し、リスク評価の要因項目に適切に反映させることが重要である。

以上のように、土地利用図上の区分や用語のみを基にリスク評価を行うと、実態を正しく反映しない結果を導く恐れがある。したがって、リスク評価においては、土地利用図の記載内容をそのまま受け入れるのではなく、それが制定された背景(ここでは 2014 年以降の指定)を正確に把握する必要がある。加えて、目視判読や現地調査を通じて、地域ごと・民族ごとの斜面利用の実態を考慮した現況の区分整理を行った上で、適切にデータを活用することが不可欠である。

これらの点を踏まえると、Protection Forest は過去の土地利用の影響を受けており、森林の回復が不十分な斜面が多く含まれている。そのため、災害リスクを低減しながら森林を健全に再生させるためにも、優先的に森林の維持・造成に取り組むべき区域とする。

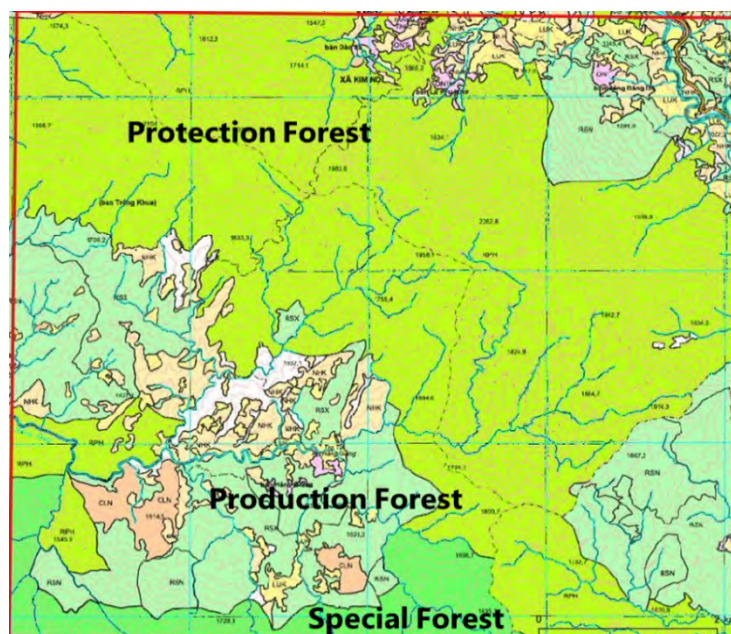


図 4-2-2-32 ベトナムにおける現行の土地利用図(Mu Cang Chai 県 Kim Noi Commune ほか)。森林はその管理のために 3 カテゴリーに区分される(Special Forest、Protection Forest、Production Forest)

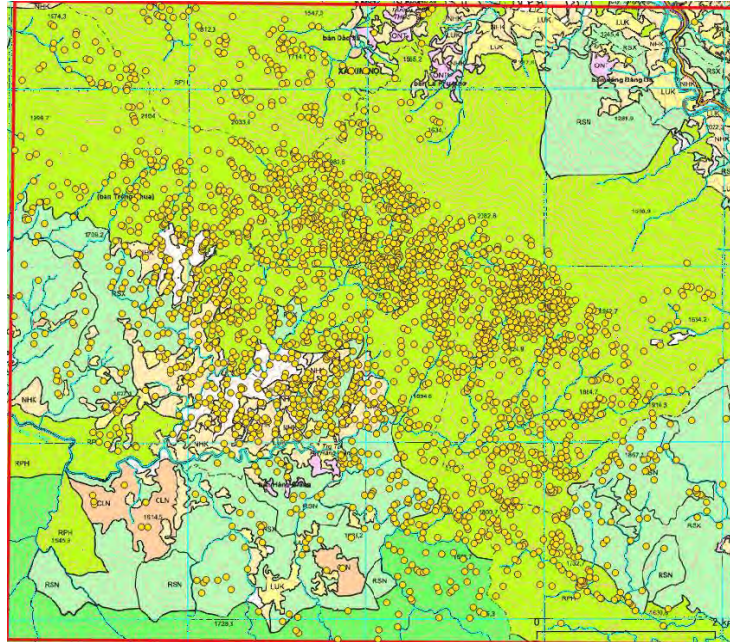


図 4-2-2-33 土地利用現況図に 2017 年に現地で発生した斜面崩壊地(黄色ポイント)の重ね合わせ。Protection Forest に分類される斜面での崩壊の発生多い印象となるが、Protection Forest の実際は図 4-2-2-34 の写真で示すように耕作放棄地や幼齢林が多い斜面である。



図 4-2-2-34 Yên Bái 省 Mu Cang Chai 県の Protection Forest と分類された斜面の実際と発生した斜面崩壊。崩壊箇所は階段状の地形をしており、棚田、畑地等の利用後、放棄、森林化した場所と判断される。斜面に成立する森林はまだ若齢であり、根系が崩壊の抑制を発揮できていない。



図 4-2-2-35 Yên Bái 省 Mu Cang Chai 県の棚田の風景。モン族の居住地域では急斜面でも棚田を造成して、利用している。



図 4-2-2-36 Son La 省 Muong Gion Commune の山地斜面。タイ族の居住地域では河川沿いか扇状地の水利条件の良いところを水田として利用し、山地斜面は焼き畑、草地といった利用がされている。現在、山地斜面の焼き畑は規制され、森林化が進んでいる。

3) 優先的に森林を維持・造成する区域の設定

Protection Forest を森林の維持・造成を優先的に進めるとする基本方針のもと、特に重要な

優先区域を選定する。優先区域の設定にあたっては、災害リスクの軽減と地域住民のニーズという二つの観点を考慮する。

まず、災害リスクの軽減の観点から、作成したリスクマップを用いて斜面崩壊リスクの高い **Protection Forest** を特定し、これを第一の優先区域とする(図 4-2-2-37)。この区域では、森林の維持・造成を通じて土砂災害の発生を抑制し、地域全体の安全性を向上させることが期待される。

次に、地域住民のニーズに基づく優先区域の選定を行う。過去の調査では、地域住民の 95% が森林の防災・減災機能に期待を寄せていることが明らかとなっている。特に集落周辺の森林は、防災機能の強化だけでなく、地域コミュニティの理解と協力を得やすいことから、これを優先区域として設定する。具体的には、集落の中心地点から半径 500m 以内の **Protection Forest** を対象とする(図 4-2-2-38)。さらに、住民のヒアリング調査によれば、未舗装道路が多いため、大雨時には通行が困難となり、避難行動が制約されることが指摘されている。これを踏まえ、防災機能の向上を目的として、道路沿いの区域(上下幅 50m)も優先区域に設定する(図 4-2-2-39)。この区域における森林の維持・造成は、斜面の安定性向上だけでなく、緊急時の避難経路の確保にも寄与すると考えられる。

以上のように、**Protection Forest** 内における優先区域は、①斜面崩壊リスクが高い区域、②集落周辺(半径 500m 以内)の区域、③道路沿い(上下幅 50m)の区域の三つの基準に基づき設定する(図 4-2-2-40)。これにより、森林の維持・造成を通じた防災機能の強化と、地域住民のニーズを両立させることを目指す。

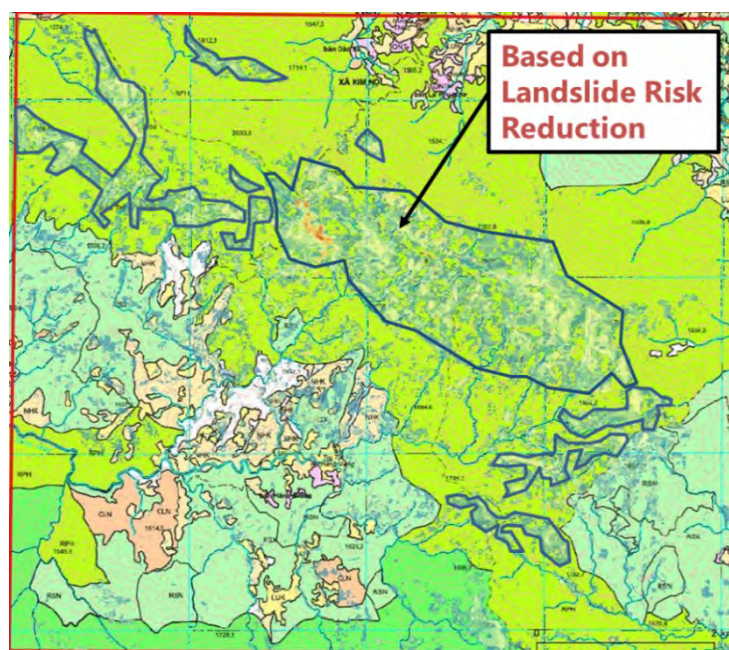


図 4-2-2-37 **Protection Forest** と斜面崩壊リスクの高いエリア重ね合わせ。両者の重なる区域は、防災の観点から優先的に森林を維持・造成すべき区域となる。

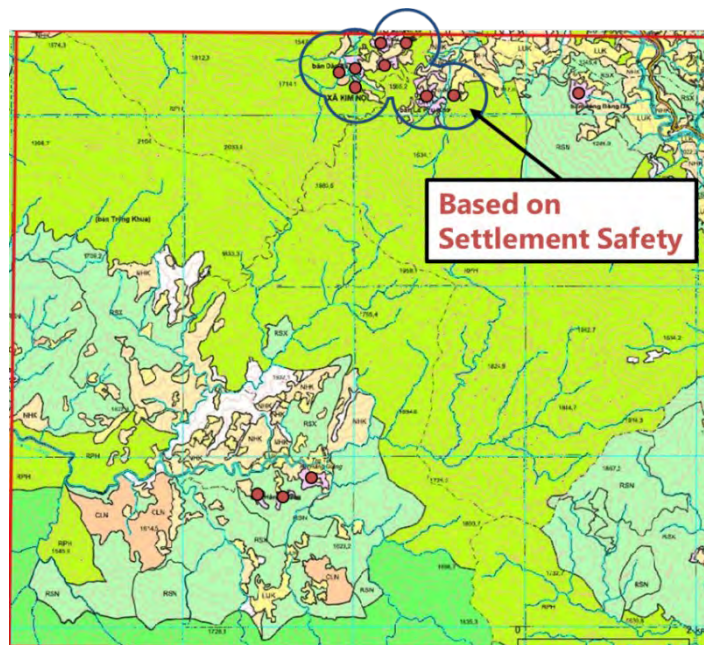


図 4-2-2-38 Protection Forest の集落から半径 500m 以内の区域。防災面での効果が
高く、コミュニティの理解も得られやすいことから、優先的に森林を維持・造成すべき区
域となる。

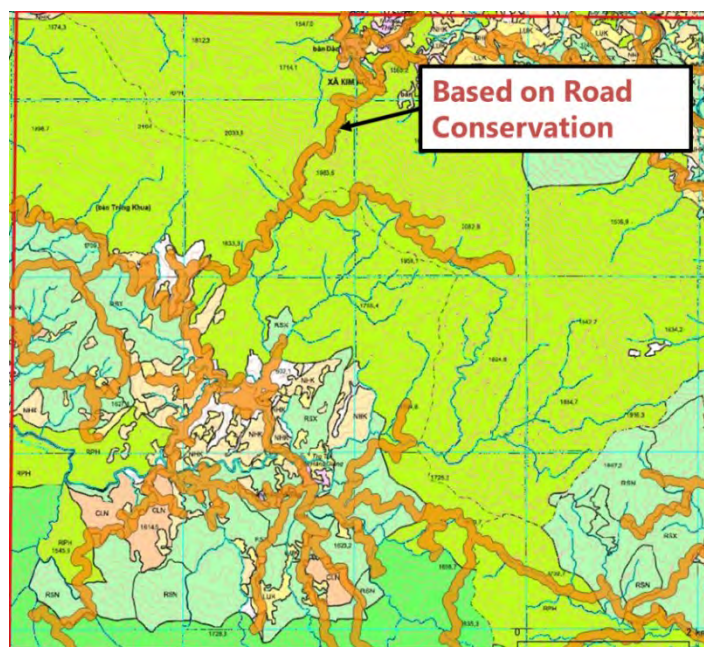


図 4-2-2-39 Protection Forest を通過する道路の両側 50m 幅帯。豪雨時の重要な避難
ルートとなることから、防災の観点から優先的に森林を維持・造成すべき区域となる。

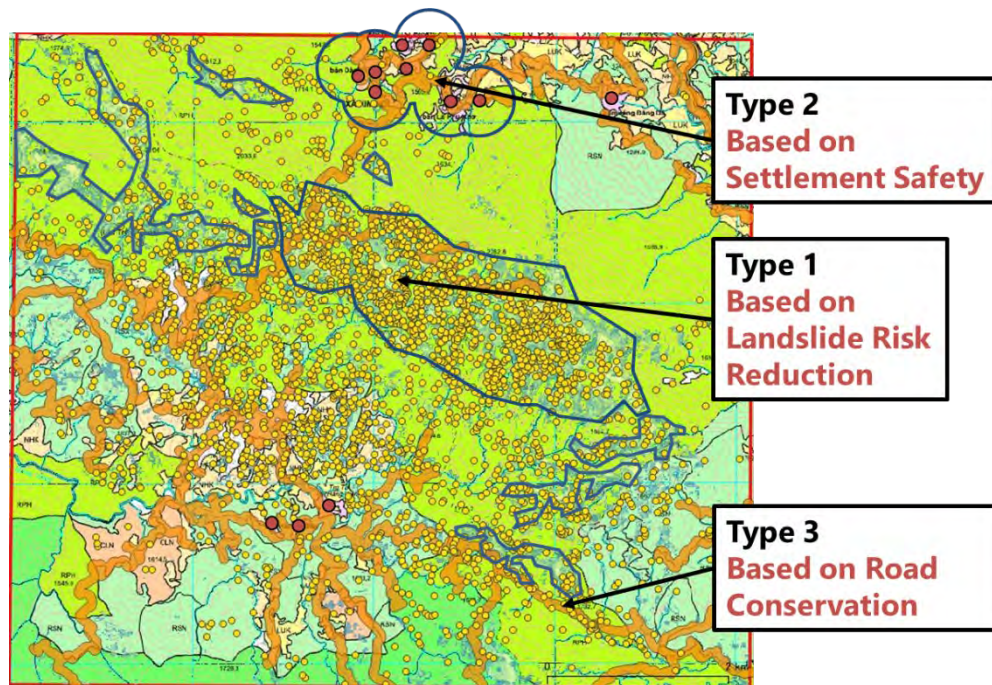


図 4-2-2-40 Protection Forest における優先的に森林を維持・造成すべき区域(高斜面崩壊リスク、集落周辺、道路沿いの統合版)。

4) 土地利用計画に関する行政機関との意見交換

本課題で作成した優先的に森林を維持・造成する区域の設定手法について、Mu Cang Chai 保護林管理委員会 (Management Board of Protection Forests, Mu Cang Chai) を訪問し、森林の維持・造成に関する考え方について意見交換を行った(図 4-2-2-41)。同委員会は、森林の保全と管理を担い、地域住民への伐採規制の指導を実施している。森林再生に関しては天然更新を基本とし、条件が厳しい土地では植林も行うが、植林規模は予算の増減によって大きく変動する。例えば、2023 年は 350 ヘクタールの植林を実施したが、2024 年は予算削減により 30 ヘクタールに縮小した。土地利用計画は省レベルで策定され、管理委員会は森林管理の観点から意見を提供する立場にあるが、独自の対策を実施する権限は持っていない。



図 4-2-2-41 優先的に森林を維持・造成する区域に関する意見交換を実施した Mu Cang Chai 保護林管理委員会

Mu Cang Chai 県保護林管理委員会は、地域の森林と災害リスクの現状について、森林の劣化とそれに伴う環境リスクの増大を認識している。特に Kim Noi コミューンでは、人為的な影響によって森林の質が低下し、斜面の安定性が損なわれることで、災害リスクが高まっていると考えている。

斜面崩壊の主な要因として、地形条件、森林の劣化による脆弱な土壌、短時間での多量降雨が挙げられており、これらが相互に作用して斜面の崩壊を引き起こしている。また、道路建設の影響が周辺地域にとどまらず、遠隔地の地盤にも影響を及ぼしていることが指摘されている。また、森林リハビリテーションに関しては、外部からの資金提供があっても専任の担当者が不在であり、十分な取り組みが行われていないことが課題となっている。これにより、森林の回復が進まず、災害リスクの軽減にも十分な効果が得られていない可能性がある。さらに、開発事業による環境影響については、Che Cu Nya で大規模な土砂捨てが確認されており、これは政府の高速道路建設計画の一環として、既存の北部高速道路へ接続するための工事に関連している。土砂処分は合法的に許可されているものの、その方法として川へ投入し、水流によって下流へ運搬する手法が採用されており、環境への影響が懸念されている。

全体として、管理委員会は森林の劣化や斜面崩壊リスクの増大を認識し、森林の維持・再生に取り組んでいるが、予算や人員の制約により十分な対策を講じることが難しい状況にある。また、開発事業による環境負荷が広範囲に及んでおり、今後の森林保全や災害リスク管理に影響を及ぼす可能性がある。

本事業で設定した優先的に森林の維持・造成を実施する区域を提示したところ、管理委員会は其の適切性を認め、特に Kim Noi コミューンが Mu Cang Chai 県内で最も森林劣化が進み、斜面崩壊リスクが高い区域であるとの認識は一致していた。また、斜面崩壊リスクマップの評価とも整合し、既に一部の区域では植林事業が開始されていることが確認された。このことから、我々が設定した優先区域は、現地の認識や既存の対策とも整合性が取れており、適切であると判断された。

4.3 海面上昇による高潮被害に対するマングローブの沿岸域防災・減災機能の評価

4.3.1 気候変動下においてマングローブへの期待が高まる沿岸域防災・減災

4.3.1.1 背景

マングローブは熱帯・亜熱帯沿岸域の潮間帯上部にのみ生育し、海域と陸域の間で緩衝帯としての役割を果たしている。すなわち、マングローブは、高い一次生産能を背景とした膨大な炭素貯留機能(地球温暖化緩和機能)や、木材や燃料の生産、海陸双方に由来する生物への住み処提供など多様な生態系サービスに加え、防風・防潮・波力減衰等沿岸域の防災・減災を担っている。一方で、近年の地球規模での気候変動の進行を背景にした海面上昇や大型台風の頻発により、これまでよりも大きな高波や強い暴風が発生し、沿岸域の災害リスクが増していることから、マングローブ生態系を含む沿岸部における防災・減災機能の発揮に大きな関心が集まっている。

IPCC の第 6 次評価報告書第 1 作業部会貢献文書(IPCC 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis)では「人間の影響により大気、海洋、陸地が温暖化したことは明白である」とされた。すなわち、観測や複数の気候モデルシミュレーションの結果から、近年、世界平均海面水位の上昇が加速しており、1902～2010 年の間 0.16m 上昇し、2006～2015 年の海面上昇速度は 3.6mm/年と報告された(環境省 2021)。これは、直近 100 年間では例がないスピードで、20 世紀における海面水位の上昇率に比べ、約 2.5 倍に相当するとのことである。地球規模での気候変動によって、海面上昇は着実に進行し、中心気圧が低下し大規模化した台風の発生も多発すると予測されている。このような気象環境の変化により、高波・暴風等による沿岸域における災害リスクの高まりが懸念される中、沿岸域潮間帯に分布するマングローブも存立の危機に曝されている。

一方で、潮間帯にのみ生育可能なマングローブは、クロマツ等の陸性の樹木で構成される海岸林と同様に、古来、防風・防潮・波力減衰・浸食防備など沿岸域の防災・減災を担ってきた(海津 1998、佐藤 1992, 2010、松田 2011)ことは周知である。2004 年のインド洋大津波では、マングローブは津波被害の低減に貢献し、改めて注目を集めた(Forbes & Broadhad 2007、Yanagisawa et al. 2009 など)。気候変動による海面上昇や大型台風による沿岸災害リスクの高まりが懸念される現在、熱帯・亜熱帯地域の沿岸部に分布するマングローブには、気候変動による海面上昇に伴う沿岸域の浸食防止や、海水温の上昇に起因して強大化が想定される台風による高潮リスクの軽減など、国土保全・沿岸護岸のための防災・減災を含む気候変動の適応策の一翼としての期待が高まっている(International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies 2011a, b, Huxham et al. 2017)。

しかし、現状は、港湾開発や魚介の養殖池造成、商業伐採などによりマングローブの消失や劣化は近年進行しており(宮城ほか 2003)、さらには海岸侵食や表層侵食が顕在化している地域もみられる。このため、海面上昇のリスクに曝されている沿岸域のハザードを低減する行動として、近

年、マングローブの再植林による沿岸域の保全活動が積極的に推進されている(環境省 2021)。

こうしたことを背景に、海面上昇による高潮被害に対する沿岸域の防災・減災に関しては、激甚化する高波や強風に耐えうるマングローブの閾値やマングローブによる防災・減災機能を定量的に理解したうえで、予測されるリスクに対するマングローブ保全策を構築することが急務となっている。

4.3.1.2 自然を活用した解決策 (Nature-based Solutions: NbS) とマングローブ保全・再生に関する国内外の動向

自然を活用した解決策 (Nature-based Solutions: NbS) とは、気候変動、防災、水・食料資源の持続的利用、生物多様性の維持、貧困対策などの様々な社会的課題の解決のために、地形、地質、水循環、動植物など、その場所の自然の特性を踏まえたアプローチで進める活動の総称(環境省自然環境局 2022)で、国際自然保護連合 (IUCN: International Union for Conservation of Nature) や世界銀行などの実務者が提唱した概念である。NbS には、①複数の社会課題の同時解決に繋がる、②住民の暮らしの質 (Quality Of Life) や地域の魅力向上に寄与する、③国レベルの、あるいは世界的な社会課題解決にも貢献できる、④初期導入コストを抑えられる、⑤状況の変化に合わせて柔軟に対応できる、⑥自由度が高い選択肢と将来に豊かな資源とを残せる(後悔の少ないアプローチ)などの利点が挙げられている。上述のように、20 世紀後半からの急速な開発や土地利用の転換により膨大な面積のマングローブが劣化し、喪失した。その一方で、マングローブの保全・再生の活動が世界各地で積極的に行われてきた(表 4-3-1-1 および表 4-3-1-2)。特に、近年の社会的課題解決に対して NbS を推進する世界的な潮流を背景に、マングローブの保全・再生についても「災害リスク軽減」や「気候変動への緩和・適応」を目的とした NbS として活動に取り組まれる事例が増えている。そこで、日本の民間団体等によって、これまでに組織的に熱帯・亜熱帯地域で展開されてきたマングローブの保全・再生に関する NbS の取り組みの一部をレビュー・整理し、表 4-3-1-1 と表 4-3-1-2 に提示する。

4.3.1.2 (1) 気候変動緩和、沿岸生態系保全を目的としたマングローブを活用した NbS 事例

2009 年の国連環境計画 (UNEP: United Nations Environment Programme) の報告書では、沿岸域のマングローブを含む海洋生態系において光合成によって取り込まれた炭素を「ブルーカーボン」と呼び、このブルーカーボンを新たな吸収源対策の選択肢として提示した (Nellemann et al. 2009)。マングローブは他の生態系に比べ高い炭素蓄積能を有する (Donato et al. 2012、Alongi et al. 2020 など) ことから、マングローブは気候変動対策の観点から世界的に大きな社会的関心を集めている。

2015 年の気候変動枠組条約 COP21 (The twenty-first session of the Conference of the Parties: 第 21 回締約国会議) では、2020 年以降の国際的な気候変動対策の枠組みとして、先進国・途上国問わず全ての国が参加する公平かつ実効的な法的枠組みであるパリ協定が採択された。パリ協定では全ての参加国と地域に、2020 年以降の温室効果ガス削減目標である「国が

決定する貢献(Nationally Determined Contributions:NDC)」を定めることが求められている。各国が表明した NDC に関して、浅海域あるいはブルーカーボンの活用を言及している国は多く、緩和効果については 28 カ国、適応効果については 59 カ国に上る(堀・桑江 2017)。さらに、米国やオーストラリアなどでは、IPCC の湿地ガイドラインに基づき温室効果ガス吸収量を算定し、国家温室効果ガス(Greenhouse Gas:GHG)排出・吸収インベントリに計上している。日本政府は、マングローブによる吸収を差し引いた GHG 排出量を報告していたが、21 年度分からはブルーカーボンとしての吸収量を差し引いて GHG インベントリに計上するようになった。

こうした背景の下、1980 年代以降、気候変動対策や沿岸生態系保全を目的としたマングローブ保全・再生に関する NbS の取り組みが、世界各国で多数取り組まれてきた(表 4-3-1-1)。「持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals:SDGs)」では、マングローブの保全・再生に向けた取り組みは「13. 気候変動に具体的な対策を」だけでなく、地域住民、地域社会との協働を通じて「14. 海の豊かさを守ろう」や「15. 陸の豊かさを守ろう」、さらには「1. 貧困をなくそう」や「2. 飢餓をゼロに」、「11. 住み続けられるまちづくりを」などにも貢献する。そうしたことから、これまでに、東京海上グループやリコージャパン、商船三井などの日本企業や ACTMANG (Action for Mangrove Reforestation:マングローブ植林行動計画)や ISME(International Society of Mangrove Ecosystems:国際マングローブ生態系協会)などの民間団体がマングローブ保全・再生活動に積極的に取り組んでいる。

表 4-3-1-1 気候変動対策、沿岸生態系保全を目的としたマングローブ保全・再生に関連する NbS 取り組み事例

国名	プロジェクト名	NbSの取組概要	実施母体	実施期間	出典
アラブ首長国連邦、オマーン国、クウェート国、サウジアラビア王国、パキスタン・イスラム共和国	アラビア湾岸のマングローブ植林	砂漠にマングローブを育てるための植林	砂漠に緑を	1983～1988	向後(1988), 向後(2014)
インドネシア共和国	インドネシアにおけるマングローブ植林のボランティア活動	マングローブ林の保護・再生のための植林	日本財団	1985～1991	日本財団HP
パキスタン・イスラム共和国	パキスタンでのマングローブ生態系保護のための植林、苗畑整備およびパキスタン・ミヤニ渓におけるマングローブ植林協力	マングローブ生態系保護のための植林	ISME (International Society of Mangrove ecosystems : 国際マングローブ生態系協会)	1994～1997	馬場・北村(1999), 国際マングローブ生態系協会HP
エクアドル共和国	サンチアゴ マタヘ河口域におけるマングローブ植林	劣化マングローブ林の修復・再生	ACTMANG (Action for Mangrove Reforestation : マングローブ植林行動計画)	1994～2003	望月(2002)
ベトナム社会主義共和国	カンザー地区におけるマングローブ植林	劣化マングローブ林の修復・再生	ACTMANG	1995～	望月(2002)
セネガル共和国	西アフリカにおけるマングローブ生態系回復のための植林事業	マングローブ苗畑造成および植林	ISME	1997	馬場・北村(1999), 国際マングローブ生態系協会HP
フィリピン共和国	SDGsの活動を広げるマングローブ植林	沿岸域環境再生のためのマングローブ植林	イカオ・アコ	1997～現在	リコー・ジャパンHP, イカオ・アコHP
アラブ首長国連邦	アラブ首長国連邦アブダビ首長国におけるマングローブ植林	植林計画の事前調査、試験的マングローブ植林、新たな植栽方法検討に係る調査	ISME	1999～2001	国際マングローブ生態系協会HP, ジャパン石油開発HP
ミャンマー連邦共和国	イラワジデルタにおけるマングローブ植林	乱伐と違法な水田開発による荒廃マングローブ林の再生	ACTMANG	1999～現在	望月(2002)
タイ王国	マングローブ植林プロジェクト (ラノーン)	エビ養殖池等への転換地からのマングローブの再植林	OISCA (The Organization for Industrial, Spiritual and Cultural Advancement-International : オイスカ)	1999～現在	東京海上グループHP, オイスカHP
ベトナム社会主義共和国	カンザー地区におけるマングローブ植林	マングローブ再植林事業および保育・管理作業、成長経過モニタリング作業	南游の会	2001～現在	南游の会HP
ブラジル連邦共和国	草の根パートナー型事業"ブラジル北部の沿岸の荒廃マングローブ生態系復元事業"、住民主導によるマングローブ生態系修復への協力、ブラジル連邦共和国パラ州ブラカンサ郡内における住民主導によるマングローブ生態系修復	荒廃したマングローブ林の再生および環境教育事業	ISME、JICA (Japan International Cooperation Agency : 国際協力機構)	2005～2007、2008、2009	国際マングローブ生態系協会HP
マレーシア	マレーシア・サバ州におけるマングローブ植林活動	違法伐採による劣化マングローブ林の再生および野生生物保護・生物多様性保全の観点からのマングローブ植林	ISME	2011～現在	国際マングローブ生態系協会HP, 東京海上グループHP
セネガル共和国	プティ・コートおよびサルーム・デルタのマングローブ保全および持続的利用のための調査・管理計画策定	マングローブの持続的管理に係る調査およびマングローブ林持続的管理計画策定	JICA	2012～2014	国際協力機構(2015)
インドネシア共和国	SDGsの活動を広げるマングローブ植林	劣化マングローブ林の再生	ワイエルフォレスト株式会社	2006～現在	リコー・ジャパンHP, ワイエルフォレストHP
モーリシャス共和国	生態系保全・再生と持続可能な利活用への技術支援と人材育成	マングローブ生態系の保全再生と持続可能な利活用および人材育成	ISME	2022～現在	国際マングローブ生態系協会HP, 商船三井HP

4.3.1.2 (2) 沿岸災害リスク軽減を目的としたマングローブを活用した NbS 事例

気候変動に伴う海面上昇や強大化した台風の頻発により沿岸域の災害リスクが増加しつつある状況の中、海岸林やマングローブ、サンゴ礁などで構成される沿岸生態系が持つ防災・減災機能への期待が高まっており、マングローブを含む沿岸生態系の保全・再生に対しても関心が集まっている。マングローブを含む沿岸生態系が持つ波の減衰機能に関しては波の観測やモデルを使った数値シミュレーションにより定量評価が行われており、マングローブ前縁に分布するサンゴ礁による海底の高まりやマングローブの複雑な樹形(特に支柱根、呼吸根)によって波のエネルギーが減衰されることが報告されてきた(Kamil et al. 2021、Guannel et al. 2016、Spalding et al. 2014 など)。また、2004 年インド洋大津波などの経験から、マングローブが津波被害の軽減に効果があったとの報告もある(Forbes and Broadhead 2007、Yanagisawa et al. 2009)。

こうした科学的知見を背景に、近年、沿岸災害のリスク軽減を目的としたマングローブの保全・再生に関する NbS の取り組みは、マングローブ生態系の分布コア地域である熱帯アジア地域を中心に活発となっている(表 4-3-1-2)。企業や民間団体の CSR (Corporate Social Responsibility: 企業の社会的責任) 活動の内容も、単なる劣化マングローブの保全・再生から気候変動対策、そして沿岸域の防災・減災へと、時代の変遷とともにその目的が多様化してきていることがみてとれる。ただし、マングローブなどの自然を活用した沿岸域の防災・減災には限界があることから、従来沿岸域の防災・減災に一役を担ってきた堤防や防波堤、消波ブロックなどのコンクリート構造物と組み合わせてマングローブや海岸林などの防災林を配置することが提案されている(鶴田他 2021)。また、それらを組み合わせて配置する事例も見られます(図 4-3-1-1)。これは、これまでコンクリート構造物(グレーインフラ)のみで対応してきた災害などの脅威に対し、その一部を防災林(グリーンインフラ)にも担ってもらい、なおかつ平時には自然の恵みを享受しようというものである。グレーインフラ、グリーンインフラ双方の特性(メリット、デメリット)を理解し、相互に補完しあう形で適切に組み合わせて導入することが肝要であり、グレー・グリーンインフラのベストミックスのための技術開発が各国で模索されている。



図 4-3-1-1 沿岸域におけるグレー・グリーンインフラ組み合わせ事例

左: 消波ブロック+マングローブ、右: 堤防+クロマツ林

表 4-3-1-2 沿岸災害軽減や沿岸保全を目的としたマングローブ保全・再生に関連する NbS 取り組み事例

国名	プロジェクト名	NbSの取組概要	実施母体	実施期間	出典
タイ王国	タイ電力公社森林再生プロジェクト	水源林、マングローブ、コミュニティフォレスト等の植林と保全・再生・維持管理を通じた企業イメージ向上のためのCSRプロジェクト	NDPMC (National Disaster Prevention and Mitigation Committee : タイ国家防災・減災委員会)、RFD (Royal Forest Department : タイ王室林野局)	1982～現在	森林総合研究所REDDプラス・海外森林防災研究開発センター(2022)
バングラデシュ共和国	マングローブ植林プロジェクト (チッタゴン)	サイクロン災害の軽減を目的とした、荒廃マングローブ林の再生	OISCA	1992～現在	東京海上グループHP, オイスカHP
インドネシア共和国	マングローブ植林プロジェクト (インドネシア)	高波等による海岸浸食防止を目的としたマングローブ植林	OISCA	1990～現在	東京海上グループHP, オイスカHP
フィジー諸島共和国	マングローブ植林プロジェクト (フィジー)	海岸浸食防止を目的としたマングローブ植林	OISCA	1993～現在	東京海上グループHP, オイスカHP
ベトナム社会主義共和国	ベトナム災害対策事業	海岸部へのマングローブ植林やその維持管理を通じて、住民によるマングローブ林の保護効果に関する理解共有の深化と、住民生計の向上、およびマングローブ林による保護効果の向上など	デンマーク赤十字社、日本赤十字社、ベトナム赤十字社	1997～2017	森林総合研究所REDDプラス・海外森林防災研究開発センター(2021)
モルディブ共和国	モルディブ共和国でのマングローブ植林活動、島嶼国での住民の命と生活を守るための海岸防災林の造成	海岸線保全を目的としたマングローブ植林	ISME	2002～2004、2006～2008	国際マングローブ生態系協会HP
ミャンマー連邦共和国	エーヤワディ・デルタ住民参加型マングローブ総合管理計画	エーヤワディ・デルタ内にマングローブ苗木の植栽、マングローブ林の持続的な管理と住民生活の貧困緩和のための体制構築	JICA	2004～2007	森林総合研究所REDDプラス・海外森林防災研究開発センター(2021)
フィリピン共和国	南ルソンマングローブ植林プロジェクト	台風、高潮災害軽減を目的としたマングローブ植林	OISCA	2004～現在	東京海上グループHP, オイスカHP
インド共和国	インド・グジャラート州のマングローブ植林活動	海岸浸食の緩和、雇用機会の提供、生物多様性の保全を目的としたマングローブ植林	ISME	2009～現在	国際マングローブ生態系協会HP, 東京海上グループHP
キリバス共和国	キリバス共和国・タラワ環礁でのマングローブ植林活動	海面上昇に伴う海岸浸食の緩和を目的としたマングローブ植林	ISME	2010～現在	国際マングローブ生態系協会HP, コスモ石油HP
インドネシア共和国	マングローブ生態系保全と持続的な利用のASEAN地域における展開	マングローブ管理センターの行政組織化、マングローブの持続的管理、環境教育、エコツーリズム、リモートセンシング等の技術普及のための管理体制等の構築	JICA	2011～2014	森林総合研究所REDDプラス・海外森林防災研究開発センター(2021)
タイ王国	Ecosystem Protection Infrastructure and Community Projects (EPIC : 生態系保護インフラと地域社会プロジェクト)	サイクロン、高潮、津波等の沿岸災害に対する強靱性の構築を目的とした、エビ養殖等で劣化したマングローブ林のコミュニティベースでの再生	IUCN (International Union of Conservation of Nature and Natural Resources : 国際自然保護連合)	2012～2017	森林総合研究所REDDプラス・海外森林防災研究開発センター(2022)
フィリピン共和国	災害に強い、森に守られた地域社会づくりプロジェクト	台風による大波軽減を目的としたマングローブ植林 (レイテ島) と、水源林再生のための植樹	OISCA	2015～2018	オイスカHP
フィリピン共和国	台風の影響を受けた沿岸生態系の生物多様性保全による持続可能な沿岸保護プロジェクト	マングローブと沿岸森林資源に焦点を当てた災害後の復旧技術支援、マングローブの苗木生産と植林技術ガイドの提供、海洋保護区とマングローブ林エコパーク化の推進等	DENR (Department of Environment and Natural Resources : フィリピン政府環境天然資源省)、GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit : ドイツ国際協力公社)	2018～2021	森林総合研究所REDDプラス・海外森林防災研究開発センター(2022)
インド共和国	インド沿岸域の自然生態系の保全回復と機構への強靱性強化	マングローブや海藻等の自然生態系の保全・回復と気候に適応可能なバリューチェーンの構築	GCF (Green Climate Fund : 緑の気候基金)	2019～2025	森林総合研究所REDDプラス・海外森林防災研究開発センター(2022)

4.3.2 波や風に対するマングローブの根返り耐性：砂丘海岸林を構成する樹種との比較

4.3.2.1 背景および令和5年度の調査結果、令和6年度の研究目的

マングローブは海水や汽水に浸る環境を生息場所としている。そのため、マングローブは根の酸素不足を回避するための「呼吸根」と呼ばれる特殊な根系構造をもっている。たとえば、オヒルギ (*Bruguiera gymnorhiza*) は膝を折ったような形の膝根、メヒルギ (*Kandelia obovata*) は幹周囲の根元に板状の板根、ヤエヤマヒルギ (*Rhizophora stylosa*) は幹から放射状に伸ばしたタコ足状の支柱根、ヒルギダマシ (*Avicennia alba*) とマヤブシキ (*Sonneratia alba*) は地中のケーブル根から伸ばしたタケノコのような形状の筍根等、それぞれ複雑かつ特徴的な形状をしている。こうした複雑な呼吸根の形状は、水の摩擦を増し、水流に対する抵抗となるため、効果的に波の力を減衰させる。さらに、呼吸根だけでなく、マングローブの幹や枝、葉も海風に対する抵抗となって、防風効果を発揮する。高波(高潮)や津波、強風等の外力に対しても、マングローブも含めた、海岸林を構成する樹木は、抵抗体として働き、人間が生活する内陸部への浸水を低減する。2004年のインド洋大津波では、マングローブが津波被害の低減に貢献し、改めてその防災・減災機能は注目を集めた。こうしたことを背景に、クロマツ等の陸生の樹木で構成される海岸林と同様に、マングローブも防風・防潮・波力減衰等沿岸域の防災・減災機能を担っていることが広く認識されている。

一方で、マングローブを含む海岸林は、コンクリートの堤防等の強固な人工構造物ではないため、当然ながら上述の防災・減災機能にも限界がある。すなわち、波や風に樹木が耐え得る「限界値」を上回ると、樹木に「根返り」等の物理的な被害が発生する。波や風による根返りに対して樹木が耐え得る「限界値」、すなわち、根返り耐性は、樹種によって異なるとされる。気候変動に伴う台風の大型化等沿岸災害リスクの高まりが懸念されている現在、持続的に防災・減災機能を発揮できる海岸林を整備する必要があるが、そのためには、高波や強風等に対する樹種ごとの根返り耐性を理解した上で、海岸林の適切な整備指針を検討することが重要である。

樹木の根返り耐性は、調査対象の樹木の幹に取り付けたロープをハンドウィンチで牽引して樹木を引き倒す「引き倒し試験」によって調査する(Nicoll et al. 2005)。この引き倒し試験では、調査対象の樹木が根ごとひっくり返った、もしくは幹を支えている根が損傷した(折れた、もしくはちぎれた)際の牽引力を測定し、それを樹木の「根返り」に対する耐性を表す数値として評価する。引き倒し試験は、これまで陸域の森林を対象に数多く行われてきたが、マングローブを対象とした研究事例はほとんど報告がない。

そこで、令和5年度の当該プロジェクトでは、沖縄県西表島およびベトナム共和国スアントウイ国立公園において、波や風を直接うけやすい海岸線前縁部でマングローブを構成する数種(ヤエヤマヒルギ、ベニマヤブシキ (*S. caseolaris*)、ナンヨウマヤブシキ (*S. apetala*) 等)を対象に引き倒し試験を行い、その結果を報告した。すなわち、支柱根をタコ足状に伸ばすヤエヤマヒルギは、ケーブル状の根を地下の堆積物中に伸ばしてそこから筍根を発達させているベニマヤブシキやナン

ヨウマヤブシキよりも抵抗力が高く、波や風に対して「根返り」を起こしにくいことが明らかとなった(Ono et al. 2024)。

令和 6 年度においては、同じく海岸線前縁部でマングローブを構成するオヒルギ、およびマングローブ後背の地盤高が高い箇所に生育するモクマオウ(*Casuarina equisetifolia*)を対象に引き倒し試験を行った。以下では、令和 6 年度に得られた結果を令和 5 年度に実施済みの試験結果と比較し、樹種ごとの根返り耐性を評価する。あわせて、陸域の海岸林でこれまで行われてきた陸性の樹種の根返り耐性結果(野口ら 2014)とも比較し、マングローブの根返り耐性も評価した。

4.3.2.2 マングローブ種とモクマオウにおける根返り耐性

図 4-3-2-1 に、ヤエヤマヒルギ、オヒルギ、ベニマヤブシキ、ナンヨウマヤブシキ、メヒルギ、ヒルギモドキのマングローブ 6 種と、モクマオウにおける地上部バイオマス(Total Aboveground Biomass【生重:kg】)と根返り耐性特性の関係を示した。ヒルギダマシについては、調査個体数が 1 個体のみであったため、比較・検討の対象としなかった。

各樹種の回帰直線の傾きについて、ベニマヤブシキ、ナンヨウマヤブシキ、メヒルギはモクマオウと同じレベル(0.08 程度)であった。一方、ヤエヤマヒルギとオヒルギはそれらに比べて 3~4 倍高い値を示した。このことから、ヤエヤマヒルギとオヒルギの根返り耐性は、モクマオウや残りのマングローブ種に比べて 3~4 倍程度大きいと解釈できる。ただし、オヒルギの調査個体数は 3 個体と限定的である点に留意する必要がある。

4.3.2.3 陸域海岸林の構成樹種を対象とした既往の引倒し試験結果との比較

潮間帯のマングローブと陸域の海岸林では、立地・環境条件(堆積物・土壌、気象条件、樹木の生理的・生態的・物理的性質など)が大きく異なっているが、両者には、防潮林や防風林としての機能など、一般的に沿岸域で期待される多面的機能は共通している。日本では、マングローブは鹿児島県から南西諸島にかけての亜熱帯沿岸域にしか自生していない。そのため、陸域の沿岸域の多くでは、アカマツ(*Pinus densiflora*)やクロマツ(*P. thunbergii*)、広葉樹(タブノキ:*Machilus thunbergii*、ケヤキ:*Zelkova serrata*、ミズナラ:*Quercus crispula*など)が植林され、沿岸災害を軽減するための森林が整備されている。ここでは、潮間帯に生育するマングローブの根返り耐性を、引き抜き実験が数多く行われている陸域の海岸林の樹木の根返り抵抗と比較した。

陸域の海岸林では、樹木のサイズが大きくなると根返り耐性を指標する最大回転モーメントが増加する傾向があることが多くの研究で報告されている(今井・鈴木 2005、近藤ら 2006、野口ら 2014、Todo et al. 2019、Nanko et al. 2019)。これらの研究で得られた知見は、マングローブを対象に本事業で得られた結果と一致していた。同じ大きさの樹木間で、根返り耐性を比較すると、西表島のヤエヤマヒルギやオヒルギは根返り耐性が高く、ベトナムのスアントウイ国立公園のベニマヤブシキ、ナンヨウマヤブシキ、メヒルギおよびモクマオウはそれらに比べて低かった(図 4-3-2-1)。野口ら(2014)は、海岸砂丘の陸域海岸防災林における樹種間の根張り抵抗性を比較し、クロマ

ツの根返り耐性は広葉樹よりも低い傾向にあることを示した。野口ら(2014)は、この結果を樹種間の根の分布や根の剪断強度の違いからくる針葉樹と広葉樹の根系の抵抗力の違いに起因していると考えた。また、野口ら(2014)が実施した既往研究における陸域の海岸林を構成する樹種(クロマツ、ミズナラ、ケヤキ)を対象とした根返り耐性と地上部バイオマスとの関係を、図 4-3-2-1 の結果に重ね合わせて比較した結果が図 4-3-2-2 である。地上部バイオマスに基づく比較では、ヤエヤマヒルギの根返り耐性が最も大きく、次いで、オヒルギ、ケヤキ、ミズナラ、クロマツという順であった。その他、ベニマヤブシキ、ナンヨウマヤブシキ、メヒルギ、モクマオウなどの種の根返り耐性は同レベルであった。以上の結果は、同じ樹木サイズ(地上部バイオマス)で比較した場合、ヤエヤマヒルギとオヒルギは、陸域海岸林の構成種らと同等か、あるいはそれ以上に、外力(潮や風など)に対する根返り耐性が高いことを示唆している。本事業における調査結果は、日本南西部とベトナム北部の2箇所で、7樹種59個体のみを対象に行われたものであるため、将来的にはより広範な調査を行う必要がある。

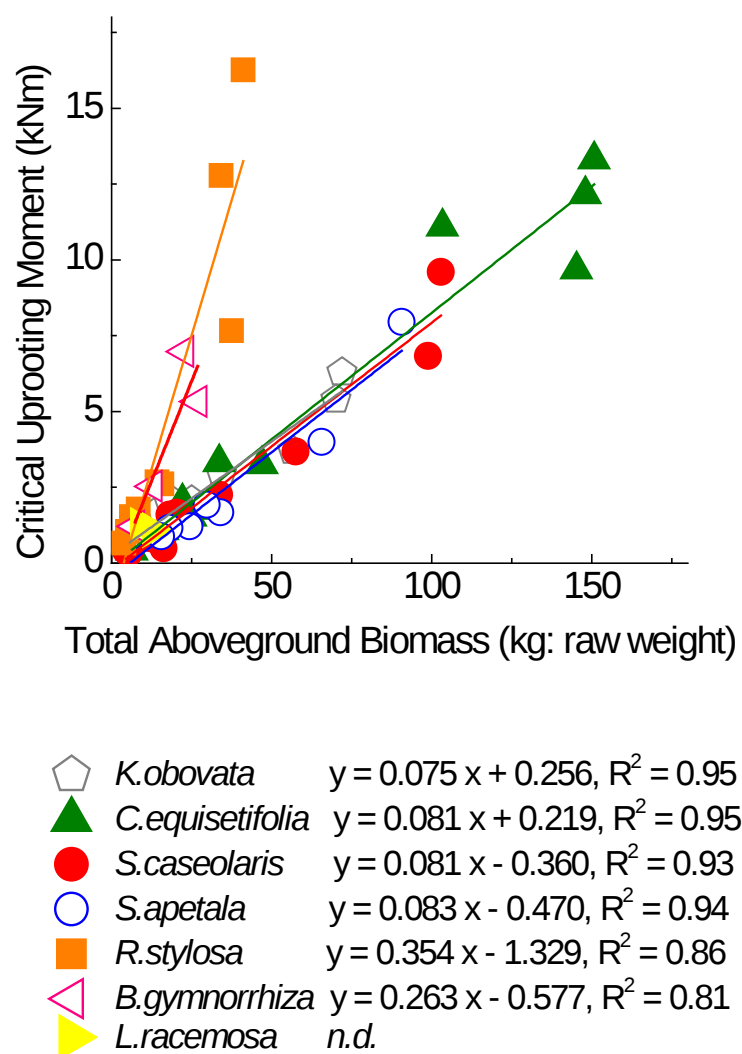


図 4-3-2-1 マングローブ種とモクマオウの根返り耐性特性の比較

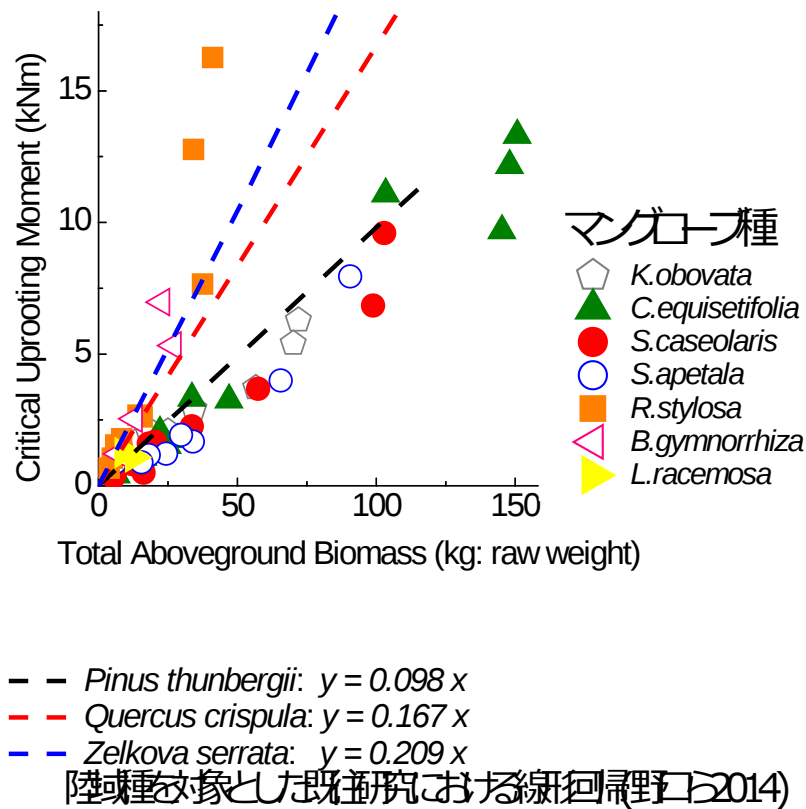


図 4-3-2-2 陸域海岸林の構成種の根返り耐性と図 4-3-2-1 の結果との比較

4.3.3 マングローブに対する住民の意識調査（ベトナム・スアントウイ国立公園の事例）

4.3.3.1 はじめに

気候変動や自然災害を含む社会的課題への対策を目的としたマングローブの保全・植林プロジェクトの成功には、そのマングローブの役割を地域住民がどう認識しているかを把握することが不可欠である。一般的に「自然を活用した解決策」(Nature-based Solutions、以下、NbS)⁴の長期的な成功は、それが一般大衆に受け入れられるかどうかにかかっており、そのためには、従来のグレイインフラに比べ、施策、個人、社会的背景に関連する要因を体系的に検討することがより重要になる(Anderson and Renaud 2021)。

NbS の一つであるマングローブの長期的な管理には、現地の利害関係者、とくに地域住民とのコミュニケーションと相互理解が不可欠である。マングローブの民族生物学・社会経済学・管理についての総説(Walters et al. 2008)によれば、マングローブ再生プロジェクトの成功は、地域社会や自治体の支援および関与の度合いに強く依存しており、地域住民を植林労働力の供給源としてのみ利用し、回復した生態系の様々な利用方法の長期的な管理に関与させない場合、成功

⁴ 環境省の令和 5 年版環境・社会・生物多様性白書によれば、自然を活用した解決策(NbS: Nature-based Solutions)は、「自然が有する機能を持続可能に利用し、多様な社会課題の解決につなげる考え方」であり、国連では「自然を活用して気候変動や自然災害を含む社会的課題に対応し、人間の幸福と生物多様性の両方に貢献するもの」と定義されている。

は厳しいとされている。さらに、コミュニティベースの mangrove 管理の現状と持続可能性に関するレビュー (Datta et al. 2012) では、沿岸の貧しい住民や声なき人々は、 mangrove に依存し、強い文化的絆と伝統的知識を持っている場合があり、彼らを排除した管理は成功しづらいとされている。このため、地域住民が特定の便益を得るために mangrove を利用している場合、その利用方法に配慮しながら気候変動への適応や自然災害の防災・減災機能を強化する方法を探ることが重要である。

本事業では今年度、「 mangrove 保全・再生の手引き—高潮災害軽減の観点から—」を発売したが、その第 6 章(以降、「 mangrove 保全・再生の手引き第 6 章」)では、我が国の気候変動や自然災害を含む社会的課題への対策を目的とした mangrove の保全・植林プロジェクト関係者が、地域住民の意向や社会・経済状況にも考慮したプロジェクトを設計できるようにするために、地域住民への意識調査とプロジェクト実施に必要な人的資源などの評価方法について概説している。ここでは、その内容に関連し、ベトナム・スアントウイ国立公園 (Xuan Thuy National Park: 以下、XTNP) (図 4-3-3-1) 周辺にて実施された、地域住民が期待する mangrove の防災・減災における役割についての意識調査について、「 mangrove 保全・再生の手引き第 6 章」の「**ステップ 1 : 利害関係者のニーズの把握**」の構成に沿って報告する。本調査は、 mangrove 保全・植林プロジェクトそのものではないため「**ステップ 2 : mangrove の保全と植林と再生に必要な人的資源等の評価**」は実施していない。ただし、下記の世帯調査から得られた情報の中には、「**資源の種類の特定と評価**」や「**資源不足を補うための戦略の検討**」を行う上で重要な情報が含まれる。こうした情報は、今後、VAFS を通じて XTNP 管理事務所に提供され、現地の mangrove 保全・植林活動に活用される。



図 4-3-3-1 スアントウイ国立公園(Xuan Thuy National Park:XTNP)の絵図

出所:スアントウイ国立公園事務所のパンフレットをスキャンし一部加工。

XTNP はベトナム北部のナムディン(Namdinh)省ザオトウイ(Giaothuy) 地区にある湿地で、紅河デルタ(Red River Delta)のバラット(Balat) 河口に位置する。XTNP はラムサール条約に登録された国際的にも重要な湿地であり、総面積は 15,100ha で、コアゾーン(7,100ha)とバッファゾーン(8,000ha)に分かれ、コアゾーンは生態系保全や環境教育、エコツーリズム開発、科学研究に、バッファゾーンはコアゾーンを含めた同公園の環境保護と住民の生計向上に主眼が置かれている(Nguyen et al. 2019)。

4.3.3.2 調査目的の設定

本事業の主な目的の一つは、日本の治山技術をベトナム国に適用するうえで必要な手法を、同国の自然環境条件や社会情勢を考慮しながら開発することである。その中でマングローブについての手法開発を検討するためにふさわしい調査対象地として、VFASと協議の上 XTNP が選定された。この意識調査の目的は、XTNP 周辺の住民に自然災害がもたらす影響を予防・軽減するためにマングローブが果たせる役割やその効果について、地域住民の意識を把握することとした。

4.3.3.3 調査方法と調査対象の選定

本事業では、複数年にわたる調査期間を想定していたため、最終的に統計解析を目的としたサンプル世帯へのアンケート調査（以下、世帯調査）を実施することを念頭に、初年度（令和 2 年度）から準備を進めた。世帯調査を設計するために、VAFS と協議の上、事前調査で対象地域を決め、同地域における人口や地域住民の生計手段、土地利用の実態などの概要を把握する必要があつ

た。

一回目の事前調査では、XTNP 周辺の三つのコミューン (Giao Thien、Giao An、Giao Lac コミューン、図 4-3-3-1) 内にある全 23 の village (以降、村) の中から、防潮堤 (図 4-3-3-1、図 4-3-3-2) 及び紅河との位置関係、主な収入源、マングローブの保護活動の実施者が住民自身か行政当局かという三つの基準を用いて、VAFS により調査対象の村が 6 つ選定された。一つ目の選定基準として防潮堤及び紅河との位置関係を挙げた理由は、対象地域の中には防潮堤の外 (海側) に位置する村もあり、沿岸災害の潜在的リスクに直接関係するためである。二つ目の選定基準として村の主な収入源に着目した理由は、収入源の違いがマングローブの植林や保全に参加する意欲を左右するのではないかと考えられたためである。三つ目は、村により森林管理官が保護活動を実施している場合と、マングローブ保護活動の契約を交わした世帯が保護を実施している場合があるため、これらの違いも村選定の際に考慮した。これら 6 つの村において、経済基礎情報、②インフラ情報、③土地利用区分、④住民が認識するマングローブの変化とその要因、⑤住民のマングローブ植林・保全への参加意欲、⑥主な被災内容と災害リスク軽減の可能性評価について、文献調査およびキー・インフォーマント・インタビュー (Key informant interview)、フォーカス・グループ・ディスカッション (focus group discussion) を用いて情報収集を実施した。詳しくは事業報告書 (国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 2022) (国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 2023) を参照のこと。



図 4-3-3-2 防潮堤

一回目の事前調査で、Giao Thien、Giao An、Giao Lac コミューンの一人当たりの平均年収入額はそれぞれ約 6,500 万、5,350 万、5,113 万ドンで (Commune People's Committee, 2021)、主な収入源は、稲作 (図 4-3-3-3)、エビやアサリの養殖業 (図 4-3-3-4、4.3-3-5)、小ビジネスであることがわかった。調査対象地を含む紅河河口域デルタのマングローブに関する調査研究をまとめた書籍 (Phan 2004) や、キー・インフォーマント・インタビュー、フォーカス・グループ・ディスカッションで得られた情報をまとめると、マングローブの変化とその要因は次のようになる: どのコミューンにおいても 1980 年代までにエビの養殖池等の開発により、マングローブが減少した。1990 年代以降、デンマーク赤十字、日本赤十字社、ベトナム政府 (MARD、国防省)、日本政府 (文部科学省) 等のマングローブ植林プログラムによりマングローブ面積は回復してきたが、近年は自然要因・人的要因により枯死・侵食が始まっている。

二回目の事前調査では、前回把握できなかったマングローブ保全活動と魚介資源生産・採取

活動のバランス、防災・減災のための沿岸域管理の在り方などの点について、キー・インフォーマント・インタビューを実施した。VAFS が選定した 5 村(前回調査時の 6 村が 5 村に再編)の村長に、質問 1.マングローブが存在しなかった場合に深刻な影響をもたらすと考えられる災害は何か、質問 2.何割の世帯が養殖池や干潟を利用しているか、を尋ねた。質問 1.については、嵐(Storm)が挙げられた。マングローブが存在しない場合、嵐によって養殖池の土盛りが破壊され、池の中のエビが外に出やすくなるほか、強い波により水がかき回され、池の濁度が高まる(水質が悪化する)ことが懸念されていた⁵。質問 2.については、各村、数%~20%程度の世帯がエビ・魚の養殖池やアサリ養殖用に干潟(sand flats)を利用しているという情報が得られた。さらに、XTNP 管理事務所の職員にマングローブの植栽地と樹種の選定に関する社会的要件についてヒアリングを行った。XTNP でのマングローブ植林活動では、マングローブを植える前に既にエビの養殖池があったという前提条件がある(先述の説明参照)。そして、マングローブ植林後、天然魚介類が増え、これが主に貧困層の生計維持に寄与しているとの報告もある(Phan et al. 2004、Le et al. 2004)。この前提の下で、植栽地の選定を行うには、①地域住民の便益の考慮(植林活動に対する報酬額、防潮堤の保護効果、養殖池の保護効果、養殖池のエビへの餌や住民の生計の糧としての利用)、②有利な政策メカニズム(泥地での植林は、自治体によって管理されているため、当局による植林方針がない限り、実施できない)、③地元自治体の同意(地元住民に多くの利益をもたらし得るため、利害関係者間の対立が起きないようにする必要がある)、④十分な予算・資金的支援といった要件が確認された。また、補足的な要件としては、地元の人々は、マングローブの根茎の違いにより天然海産物の保護効果が異なると認識しているので、マングローブの樹種についても好みがあるのではないかという情報も頂いた。

このように、二回の事前調査を経て、住民が考える防災・減災の観点からのマングローブ植林の便益や植林の成否に影響しうる項目について、5 村での本格的な世帯調査を設計する上での事前情報が得られ、これらの情報をもとに世帯調査のデザインについて VAFS と検討を開始することができた。



図 4-3-3-3 水田

⁵ また、「はっきりとは分からないがマングローブと関係しそうな問題」として、5 人の村長のうち 3 人は、養殖地への海水(塩水)侵入が問題であると回答した。乾季は降水量が少なく、紅河上流からの淡水量も少ないため、高潮による海水(塩水)が養殖地に流入し、塩分濃度が上昇することが養殖業に影響を及ぼしているとのことだった。他の 2 人の村長からは、高潮と大雨の組み合わせが深刻な被害をもたらすとの回答を頂いた。雨季は高潮と大雨により潮位が上昇するため、海水の侵入を防ぐために用水路のゲートを閉めなければならない村もあり、そのため、大雨が降ると水田に溜まった雨水が海に流れ出ず、水田に洪水が発生するという問題が生じているとのことだった。



図 4-3-3-4 エビの粗放的養殖池とマングローブ



図 4-3-3-5 養殖アサリ

世帯調査でのサンプル世帯の選定には、多段階サンプリング (multistage / staged sampling) と層化サンプリング (stratified sampling) を組み合わせて使用した。まず、全 23 村の中から事前調査で対象とした 5 村を世帯調査の対象村とし(第一段階)、比例割り当て法を用いた層化サンプリングを使用した(第二段階)。用いた層は、防潮堤の内側(陸側)に住んでいる世帯(A 層)と外側(海側)に住んでいる世帯(B 層)とし、3 つのコミューンの人民委員会から 5 村の全世帯のリストを集め、A 層と B 層に分類した。この世帯調査開始前の時点での 5 村の総世帯数は 2,087 世帯で、そのうち A 層は 1,799 世帯(全体の約 86%)、B 層は 288 世帯(約 14%)だった。層化サンプリングを行うには、目標の総サンプル数を達成しながら各層の割合を維持する必要がある。予算額や調査期間も考慮し、目標の総サンプル数は 300 世帯程度(約 13%)とし、各層それぞれ約 260 世帯、約 40 世帯を無作為に抽出することとなった。

4.3.3.4 質問項目の設計

世帯調査は、サンプル世帯を訪問しアンケート用紙(以下、質問紙)を用いて実施された。質問紙の設計や質問の作成にあたり、これまでの 2 回の事前調査の結果や先行研究を参考にされた。質問項目には、回答者の性別と年齢、世帯の基本情報(世帯構成、教育水準、生計活動)、自然災害(洪水や嵐など)に被災した経験、自然災害の脅威についての認識(重大性、脆弱性)と対策についての認識(効果、コスト、自信)、自然災害におけるマングローブの役割(防潮堤、農地、養殖池、養殖用の干潟の保護効果)、マングローブの保全や植林活動への参加の意向、マングローブ樹種の好みなどが含まれた。質問内容が理解しやすく、地元の人々がスムーズに答えられるように、事前にサンプル調査対象外の世帯を訪問しテストを複数回行い、質問内容を改善された。

4.3.3.5 調査の実施

2023 年 9 月～2024 年 2 月に世帯調査が実施された(図 4-3-3-6)。調査中、留守である、遠方で働いている、全世帯のリストには記載されていたが調査当日には既に転居している、また、イ

ンフォームド・コンセントを確保する過程で調査に参加したくないなどの理由で調査に参加しなかった世帯があった。そこで、ソフトウェアを用いた無作為抽出により他の世帯と入れ替え必要なサンプル数が確保された。最終的に、311 世帯から回答が得られた(表 4-3-3-1)。全回答者の 54%が女性だった。



図 4-3-3-6 世帯調査の様子

表 4-3-3-1 サンプル村の総世帯数とサンプル世帯数

サンプル 村番号	総世帯数	防潮堤内の世帯		防潮堤外の世界		サンプル世帯数		
		世帯数	%	世帯数	%	堤防内	堤防外	合計
1	434	416	96	18	4	62	3	65
2	527	527	100	0	0	79	0	79
3	492	492	100	0	0	73	0	73
4	285	15	5	270	95	2	40	42
5	349	349	100	0	0	52	0	52
合計	2087	1799	86.2	288	13.8	268	43	311

4. 3. 3. 6 XTNP 国立公園近隣での世帯調査結果の概要

2012 年から現在までの約 11 年の間に⁶、自身の家屋、農地、養殖池、養殖用の干潟、その他のいずれか 1 つでも洪水または嵐により被害を受けたと回答した世帯数は 54 世帯で、全サンプル世帯の 17.3%だった。洪水と嵐の被災対象で最も多かったのが農地で、次に多かったのが洪水は養殖池、嵐は家屋だった(表 4-3-3-2)。

表 4-3-3-2 サンプル世帯の 2012 年から 2023 年現在までの洪水と嵐の被災対象と件数

	家屋	農地	養殖地	養殖干潟	その他
洪水	9	30	12	3	0
嵐	24	25	5	4	3

($n = 54$ 、ただし複数回答可)

図 4-3-3-7 は、「仮に日常生活にあるマングローブが消失した場合、自らの生活、健康、家、農

⁶ 事前調査によると、2012 年に 3 つのすべてのコミュニンは嵐による被災を経験しており、同年には最初の防災プロジェクトが開始された。インタビュー対象者の歴史的事実の記憶に頼ることには限界があるが、生活パターンの変化など顕著なライフイベントは、12 年後まで一貫して報告される可能性が高い事例も報告されていることから(Beckett et al., 2001)、今回の想起データは調査目的に対してある程度信頼できると考え、世帯調査ではこの 2012 年から現在までを自然災害経験の分析対象期間とした。

地、養殖池、養殖干潟、防潮堤が洪水や嵐の被害を受けるだろう」という考え方に、どの程度賛同するかを、5:強く思う～1:強く思わないまでの 5 段階で回答頂いた結果である。仮に日常生活にあるマングローブが消失した場合、自らの生活や健康、家屋、自身の農地が洪水や嵐の被害を受けるだろうという考え方に「強く思う」と回答した世帯は、どれも過半数を超えていた。また、サンプル数は少なくなるが、マングローブが消失した場合、防潮堤の内側にある自身の養殖池と外側にある自身の養殖池は洪水や嵐の被害を受けるだろうという考え方に、それぞれ 4 割強(内側)、7 割強(外側)が「強く思う」と回答した。養殖干潟については、7 割弱が洪水や嵐の被害を受けるだろうという考え方に「強く思う」と回答した。また、回答者の 8 割強が、マングローブがないと防潮堤が洪水と嵐により損害を受けるだろうという考え方に「強く思う」と回答した。一方、残りの回答者からは、今住んでいる家や防潮堤は頑丈であるのでそうした被害は受けにくいだろうという意見もみられた。最近の家屋がより堅固に建てられ、最近は防潮堤や排水設備が比較的良好整備されてきたため、回答者の大半が家族や地域コミュニティが以前よりは自然災害に対して脆弱でなくなったと認識していた。

図 4-3-3-8 は、現在のマングローブの保全と植林が洪水や嵐の影響を軽減する効果およびマングローブ保全・植林活動への参加意向について質問した結果である。調査対象の住民の 7 割以上が、現存するマングローブを保全することや、さらなる植林を進めることが洪水と嵐の影響を軽減する効果があると強く認識していた(「強く思う」のみ)。また、将来、機会があればマングローブの保全・植林活動に参加したいかの質問には約 5 割が「強く思う」と回答し、「ややそう思わない」または「強く思わない」と参加に否定的な回答をした世帯が約 4 分の1あったが、その理由には高齢や健康上の理由を挙げる回答者も少なくなかった。なお、防潮堤の外側に住んでいる世帯の方が内側に住んでいる世帯よりも保全・植林活動への参加に肯定的である傾向があった(表 4-3-3-3)。

また、マングローブの保全と植林にそれぞれ好ましい樹種について尋ねたところ、*Kendelia obovata*、*Rhizophora stylosa*、*Aegiceras corniculatum* の 3 種を好む傾向がみられた(図 4-3-3-9)。これら 3 種が住民から好まれやすい理由としては、住民が、防災・減災効果に加え水産物の供給源として期待しているためだった(図 4-3-3-10、図 4-3-3-11)。

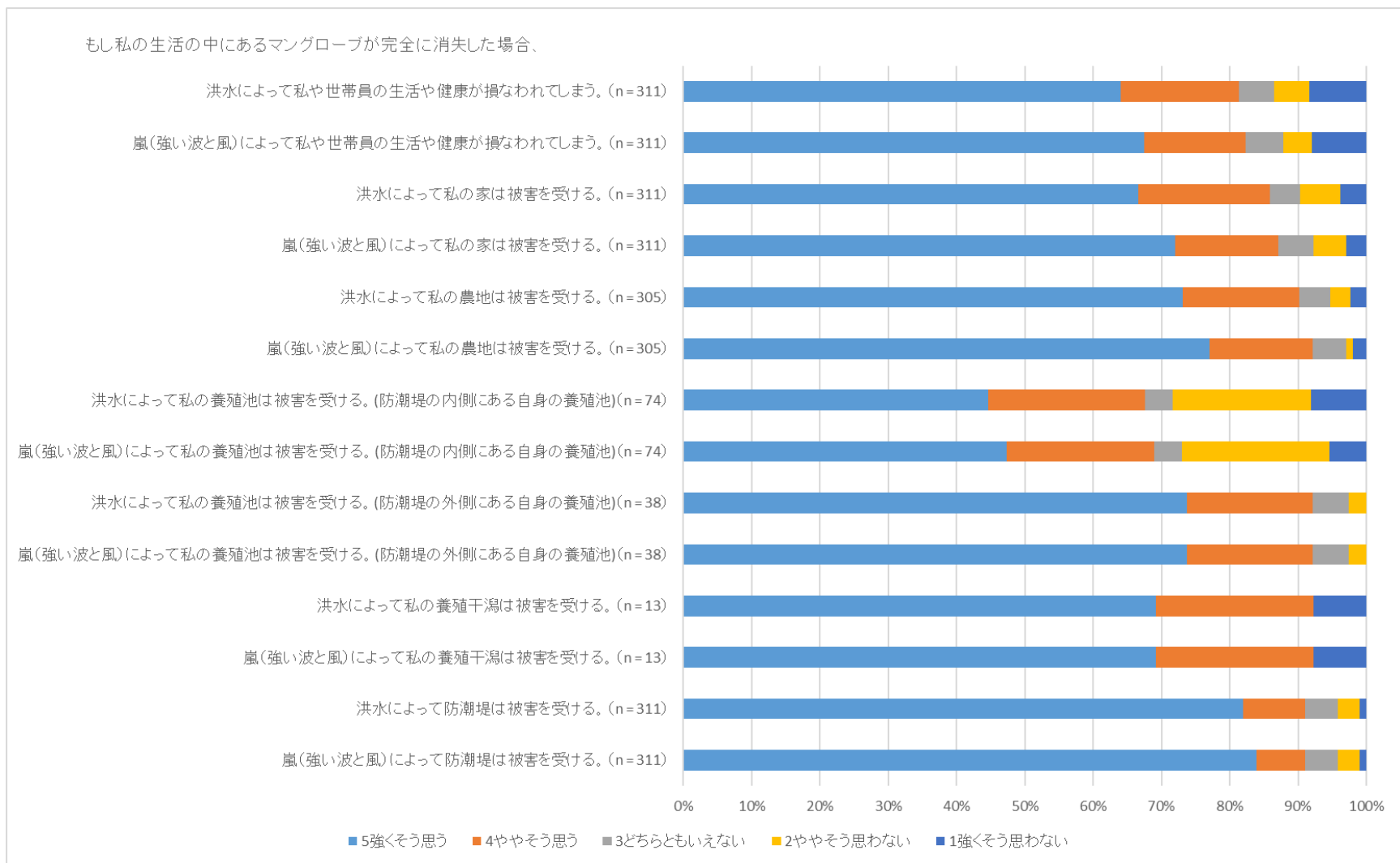


図 4-3-3-7 生活、健康、家、農地、養殖池、養殖干潟、防潮堤を洪水や嵐から守るマングローブの役割

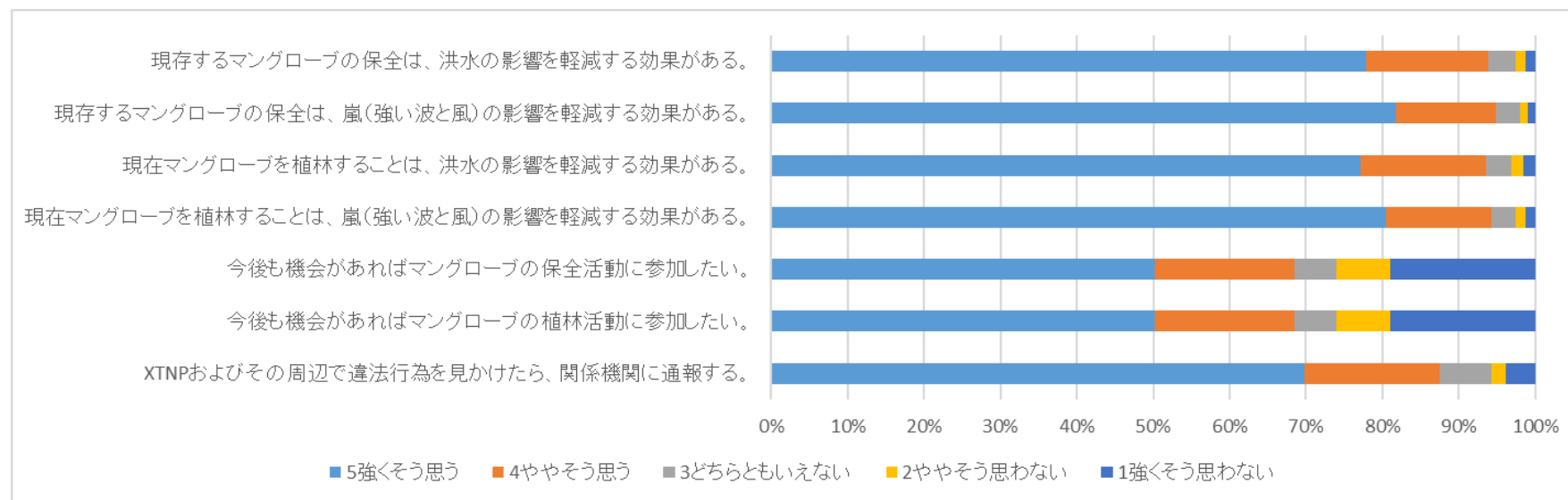


図 4-3-3-8 現在のマングローブの保全と植林が洪水や嵐の影響を軽減する効果およびマングローブ保全・植林活動への参加意向 (n = 311)

表 4-3-3-3 ベトナム・スアントウイ国立公園周辺における住民のマングローブの植林活動に対する意向 (n = 311)。防潮堤の外側に住んでいるグループの方が内側に住んでいるグループよりも植林活動への参加に肯定的である世帯の割合が高い傾向があった(防潮堤の外側に住んでいる世帯と内側に住んでいる世帯のうち、「強く思う」または「やや思う」と回答した世帯の間のカイ二乗検定、 $p < 0.05$)。

		今後のマングローブ植林活動に	
		肯定的である (5, 4)	肯定的とは言えない (3, 2, 1)
居住地は防潮堤の	外側	37	6
	内側	176	92

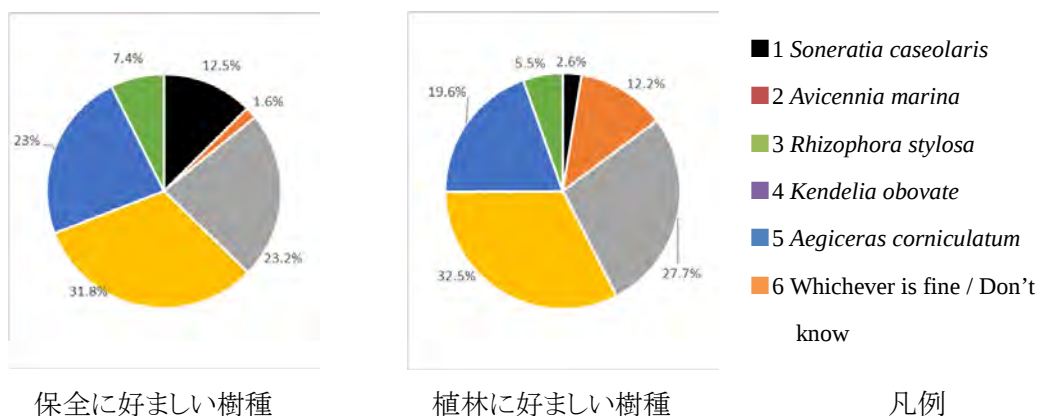


図 4-3-3-9 サンプル世帯へのマングローブの保全と植林にそれぞれ好ましい樹種のヒアリング結果 (n = 311、一種のみ回答)

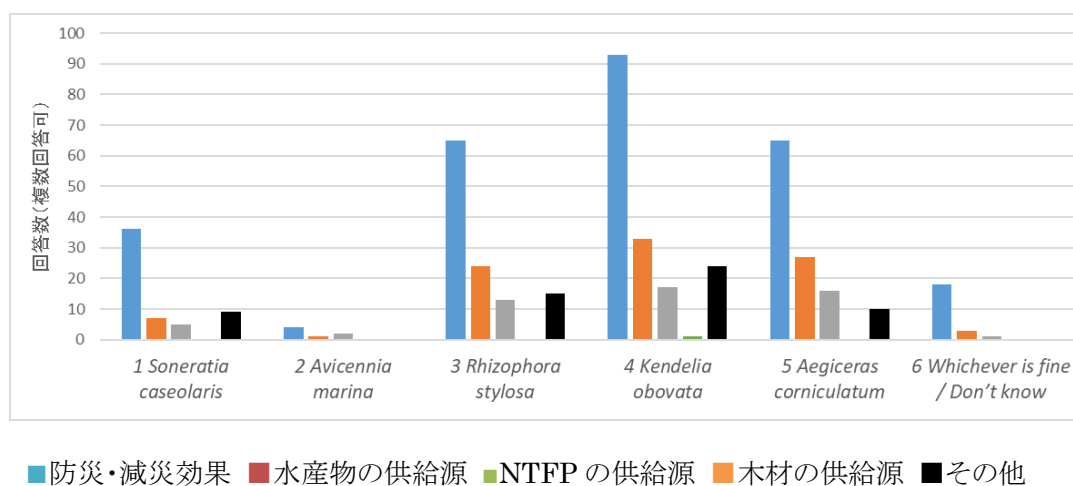


図 4-3-3-10 保全するのに好ましい樹種とその理由 (n = 311、理由は複数回答可)

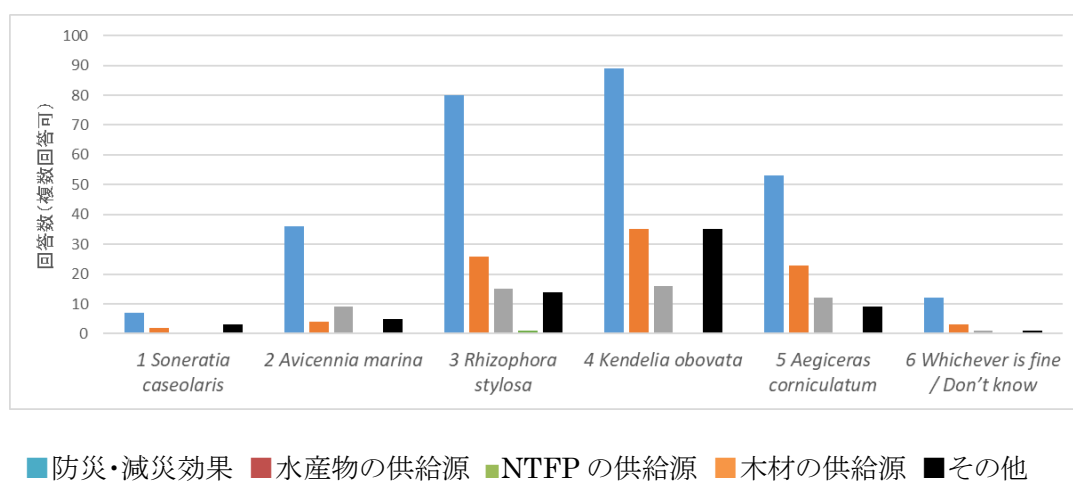


図 4-3-3-11 植林するのに好ましい樹種とその理由 (n = 311、理由は複数回答可)

4.3.3.7 おわりに

3 回の調査から得られた、XTNP 周辺のマングローブ保全・植林活動を地域住民等の意向や社会・経済状況にも考慮したものとするために考慮すべき点は、以下の通りにまとめられる：

●地域住民が「どの程度マングローブに経済的・文化的に依存して生活しているか」について」の現地の背景・文脈の理解

- ▶XTNP でのマングローブ植林活動では、マングローブを植える前に既にエビの養殖池があったという前提条件があること。
- ▶どのコミュニティにおいても 1980 年代までにエビの養殖池等の開発により、マングローブが減少し、その後、様々なマングローブ植林プログラムによりマングローブ面積は回復してきたが、近年は自然要因・人的要因により枯死・侵食が始まっているという経緯

●行政当局の意向

- ▶この前提の下で、植栽地の選定を行うには、次の 4 要件が XTNP 管理事務所スタッフへのインタビューで確認された。
 - ①地域住民の便益の考慮（植林活動に対する報酬額、防潮堤の保護効果、養殖池の保護効果、養殖池のエビへの餌や住民の生計の糧としての利用）
 - ②有利な政策メカニズム（泥地での植林は、自治体によって管理されているため、自当局による植林方針がない限り、実施できない）
 - ③地元自治体の同意（地元住民に多くの利益をもたらし得るため、利害関係者間の対立が起きないようにする必要がある）
 - ④十分な予算・資金的支援

●住民の自らの生活や健康、家屋とマングローブとの関係性の理解

- ▶仮に日常生活にあるマングローブが消失した場合、自らの生活や健康、家屋に被害が出ると考えている世帯は 8 割以上。

●住民の収入源とのマングローブの関係性の理解

- ▶住民の主な収入源は、稲作、エビやアサリの養殖業、小ビジネスであるため、仮に日常生活にあるマングローブが消失した場合、水田を含む農地や養殖池が洪水や嵐の被害を受けるだろうという考え方に肯定的な住民が過半数を超えていた。
- ▶NTFP 採取も生計維持として重要な場合がある。これに関し、植林樹種には、現地住民の好みも考慮するとさらにモチベーションが上がるかもしれない。

●住民のマングローブ保全・植林活動参加意欲と住民属性の関係性の理解

- ▶住民のマングローブ植林への意欲については、当該住民が堤防の内に居住しているかどうかで、変わる可能性がある。

- ▶ マングローブ植林活動の参加に否定的な回答をした住民の中には、その理由に高齢や健康上の理由を挙げる回答者も少なくなかったことから、アウトリーチ活動には対象年齢も考慮する必要がある。

以上の調査結果から、概ねXTNP周辺の地域住民は、自身の生活スタイルを維持するためにはマングローブが必要であると認識していると推察される。さらに、属性の異なる地域住民がどの程度マングローブに経済的・文化的に依存して生活しているかを理解し、それに基づき、彼らが気候変動への適応や自然災害の防災・減災の観点からマングローブを保全・植林する重要性をどの程度認識しているかを詳しく理解することが、プロジェクト成功への第一歩となるといえる。

4.3.4 マングローブの波減衰機能向上を目的とした施肥の効果検討

4.3.4.1 背景および令和6年度の研究目的

マングローブは、防災・減災機能を有する沿岸生態系の一部として、波のエネルギーを減衰させる役割を果たしている。実際に、インドやフィリピンでは、サイクロンや台風の際にマングローブが被害の軽減に寄与したと報告されている。マングローブの防災・減災機能は主にその量によって決まるとされており、林帯幅の拡大やバイオマスの増加が波の減衰効果を高めることが知られている。そのため、これらの要素を向上させるための適切な管理手法の確立が求められている。

施肥は、マングローブの成長を促進し、バイオマスを増加させる有効な手段の一つと考えられる。実際に、世界の文献を収集して実施したメタ解析では、施肥によってマングローブのバイオマスが大幅に増加することが明らかになった(Mori ら、未発表データ)。さらに、このメタ解析により、気候帯の違いにかかわらず施肥がマングローブの成長に与える影響は大きいことが示され、養分がマングローブ成長の重要な制限因子であることが示唆されている。

しかし、マングローブは汽水域で生育するため、根は水中にあり、通常の施肥方法では養分がすぐに流出してしまう。そのため、施肥は通常、緩効性肥料を水底に埋め込む方法で実施されている。この手法は研究実験では実施可能であるものの、実際のマングローブ植林の現場で広く適用するには現実的ではない。一方、農業分野では、葉面に施肥を散布する葉面施肥が有効な施肥手段として活用されている。マングローブは汽水環境下で生育するため、根は塩分濃度の高い環境にさらされており、その影響で根からの養分吸収が制限される可能性がある。そのため、葉面施肥による栄養補給は、マングローブの成長促進に大きな効果をもたらす可能性がある。そこで、本研究では、葉面施肥がマングローブの成長に及ぼす影響を

評価することを目的とする。

4.3.4.2 ポット実験の条件、葉面施肥の方法および予報的結果

以下の 9 つの条件でポット実験を実施した。

海水濃度が薄い条件（海水濃度の約 20%）

①無施肥

②通常施肥 A：尿素 20ppm、リン酸二水素カリウム (KH_2PO_4) 14ppm

③葉面施肥：尿素 375ppm、リン酸二水素カリウム (KH_2PO_4) 549ppm

海水濃度が濃い条件（海水濃度の約 40%）

④無施肥

⑤通常施肥 A 尿素 20ppm、リン酸二水素カリウム (KH_2PO_4) 14ppm

⑥通常施肥 B：尿素 100ppm、リン酸二水素カリウム (KH_2PO_4) 72ppm

⑦葉面施肥：尿素 375ppm、リン酸二水素カリウム (KH_2PO_4) 549ppm

⑧通常施肥 A：尿素 20ppm、リン酸二水素カリウム (KH_2PO_4) 14ppm＋葉面施肥：尿素 375ppm、リン酸二水素カリウム (KH_2PO_4) 549ppm

⑨通常施肥 B：尿素 100ppm、リン酸二水素カリウム (KH_2PO_4) 72pp＋葉面施肥：尿素 375ppm、リン酸二水素カリウム (KH_2PO_4) 549ppm

ポット実験には川砂を使用し、ヤエヤマヒルギ実生を生育させた(図 4-3-4-1)。令和 6 年 7 月葉面施肥には刷毛を用い(図 4-3-4-2)、できる限り施肥がポット内に入らないように配慮した。統計的な分析の結果、施肥の影響は有意ではなかった。実験期間が 2 か月間(令和 6 年 10 月～令和 6 年 12 月)と短かった可能性があるため、今後は長期間の実験を実施する必要があると考えられる(図 4-3-4-3 および図 4-3-4-4)。



図 4-3-4-1 ポット実験の様子



図 4-3-4-2 葉面施肥の方法

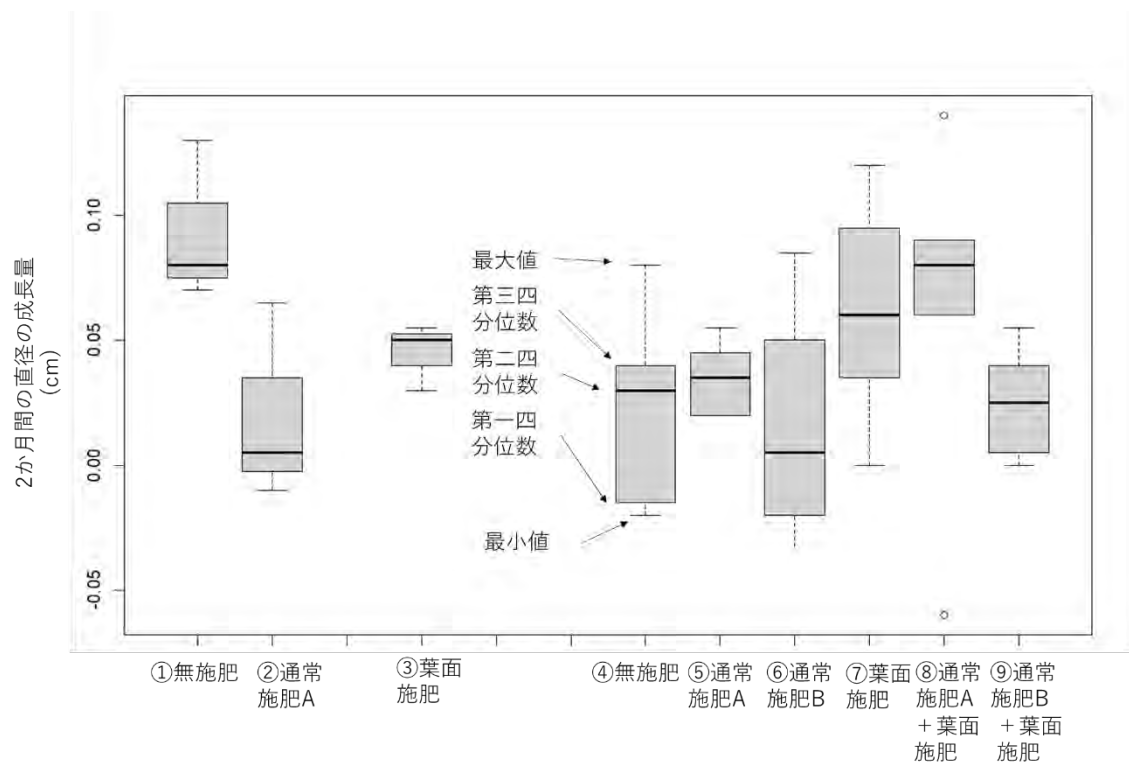


図 4-3-4-3 2 か月間の直径の成長量に対する施肥の影響

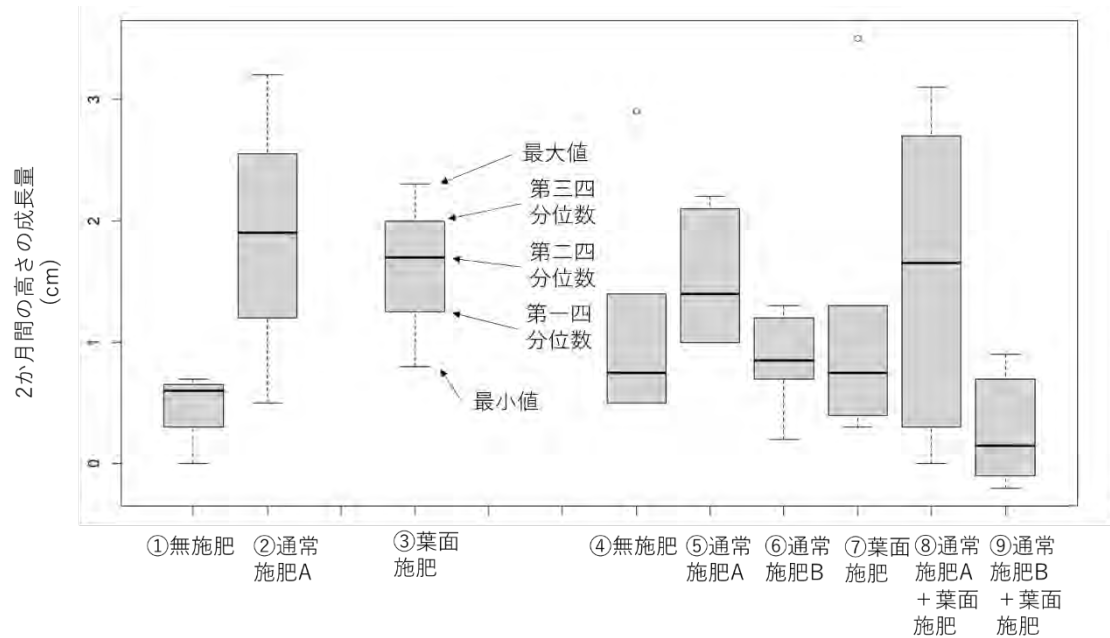


図 4-3-4-4 2 か月間の高さの成長量に対する施肥の影響

4.3.5 まとめ

今年度の当該課題では、①気候変動緩和、沿岸生態系保全を目的とした、マングローブを活用した NbS の国内外の活動動向レビュー、②樹木引き倒し試験による波や風に対するマングローブ根回り耐性特性の樹種間比較、③沿岸域防災・減災インフラとしてのマングローブに対する住民意識調査(ベトナム XTNP 国立公園周辺の事例)に取り組んだ。

マングローブを活用した NbS 活動動向レビューでは、1980 年代に開始された中東アジアでの取り組み(株式会社「砂漠に緑を」が実施)以降、気候変動対策や沿岸生態系保全を目的としたマングローブ保全・再生活動が、世界各国で多数取り組まれてきた。同様に、海岸浸食、サイクロン・台風・高潮・津波災害軽減、海面上昇対策等、沿岸域での災害軽減を目的としたマングローブ保全・再生活動も多数の活動実績が認められた。今回網羅できた活動は、1980 年代から現在までで 34 プロジェクト、18 事業体、19 ヶ国に上った。

マングローブ(ヤエヤマヒルギ、オヒルギ、ベニマヤブシキ、ナンヨウマヤブシキ、メヒルギ)と陸域海岸林構成種(モクマオウ、クロマツ、ケヤキ、ミズナラ)に関する地上部バイオマスに基づく根回り耐性特性の樹種間比較では、樹種によらず樹木サイズが大きくなると風や波に対する根回り耐性が大きくなること、根回り耐性はヤエヤマヒルギが最も高く、次いで、オヒルギ、ケヤキ、ミズナラ、クロマツの順で、その次に、ベニマヤブシキ、ナンヨウマヤブシキ、メヒルギ、モクマオウが同等のレベルで並ぶことが分かった。すなわち、同じ樹木サイズで比較した場合には、ヤエヤマヒルギとオヒルギは、陸域海岸林構成種らと同等かそれ以上に高い根回り耐性を有することが示唆された。

マングローブに対する住民意識調査からは、XTNP 国立公園周辺の住民は、現在の自身の生活スタイルを維持するためにはマングローブが必要であるとの認識を有しており、当該地においてマングローブ保全・再生活動を進める上では地域住民や行政の意向や社会経済的状况を理解し、十分に留意してプロジェクトを立案、推進すべきであることが提言された。

マングローブの葉面施肥試験では、試験期間が短く、施肥効果を検出できなかったことから、より長期間の実験を実施する必要があると考えられた。

また、今年度は、当課題 5 年間の成果の一部を活用して、マングローブ保全・再生活動に関心を持つ行政、NPO 等の機関関係者等を対象とした「マングローブ保全・再生の手引きー高潮災害軽減の観点から」マングローブ保全・再生の手引き ー高潮災害軽減の観点から」を発刊し次の URL に掲載した。

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/5th-chuukiseika26.html>

引用文献

- Alongi DM (2020) Global significance of mangrove blue carbon in climate change mitigation. *Sci.* 2:67; doi:10.3390/sci2030067
- Anderson CC, Renaud FG (2021) A review of public acceptance of nature-based solutions: The ‘why’, ‘when’, and ‘how’ of success for disaster risk reduction measures. *Ambio* 50:1552–1573
- Angelsen A., Larsen HO, Lund JF, Smith-Hall C, Wunder S (2011) Measuring livelihoods and environmental dependence: Methods for research and fieldwork, Earthscan. Center for International Forestry Research (CIFOR), London.
- Beeston M, Camero C, Hagger V, Howard J, Lovelock C, Sippo J, Tonneijk F, Bijsterveldt VC, van Eijk P (2023) Best practice guidelines for mangrove restoration.
- Commune People’s Committee (2021) Reports on socio-economic situation in 2020 of the communes.
- Datta D, Chattopadhyay RN, Guha P (2012) Community based mangrove management: A review on status and sustainability. *J. Environ. Manage.* 107:84–95.
- Donato DC, Kauffman JB, Mackenzie RA, Ainsworth A, Pfleeger AZ (2012) Whole-island carbon stocks in the tropical Pacific: Implications of mangrove conservation and upland restoration. *J. Env. Manag.* 97:89-96
- Ellison AM (2000) Mangrove restoration: Do we know enough? *Restor. Ecol.* 8:219–229
- Elster C. (2007) Reasons for reforestation success and failure with three mangrove species in Colombia. *For Ecol Manage.* 131(1–3):201–14.
- Forbes K, Broadhad J (2007) The role of coastal forests in the mitigation of tsunami impacts. *FAO* 30 pp
- Guannel G, Arkema K, Ruggiero P, Verutes G (2016) The power of three: Coral reefs, seagrasses and mangroves protect coastal regions and increase their resilience. *PLOS ONE*
- Huxham M., Dencer-Brown A., Diele K., Kathiresan K., Nagelkerken I., Wanjiru C. (2017) Chapter 8: Mangroves and People: local ecosystem services in a changing Climate. In Rivera-Monroy, V. H., Lee, S. Y., Kristensen, E. Twilley, R. R. (Eds.). *Mangrove ecosystems: a global biogeographic perspective on structure, function and services*. Springer Nature, 245-274
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (2011a) *Breaking the waves. Impact analysis of coastal afforestation for disaster risk reduction in Viet Nam*, Geneva 51pp.
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (2011b) *Planting protection. Evaluation of community-based mangrove reforestation and disaster preparedness programme, 2006-2010*, Geneva 67pp.
- IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*
- Kairo JG, Dahdouh-Guebas F, Bosire J, Koedam N. (2001) *Restoration and*

- management of mangrove systems - A lesson for and from the East African region. *South African J Bot.*:67(3):383–9.
- Kamil EA, Takaijudin H, Hashim AM (2021) Mangroves as coastal bio-shield: A review of mangroves performance in wave attenuation. *Civil Eng. J* 7:1964-1981
- Le KT, Nguyen HT, Phan HA. (2004) Local awareness about mangroves and institutions surrounding coastal resource use in Thai Binh and Nam Dinh coastal areas. In: *Mangrove Ecosystem in the Red River Coastal Zone: Biodiversity, Ecology, Socio-economics, Management and Education*. Hanoi: Agricultural Publishing House; p. 383–92.
- Lewis RR (2000) Ecologically based goal setting in mangrove forest and tidal marsh restoration. *Ecol. Eng.* 15:191–198.
- Lewis RR. (2005) Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests. *Ecol Eng.* 24(4 SPEC. ISS.):403–18.
- Nanko K, Suzuki S, Noguchi H, Ishida Y, Levia DF, Ogura A, Hagino H, Matsumoto H, Takimoto H, Sakamoto T (2019) Mechanical properties of Japanese black pine (*Pinus thunbergii*) planted on coastal sand dunes: resistance to uprooting and stem breakage by tsunamis. *Wood Science and Technology* 53:469-489.
- Nellmann C, Corcoran E, Duarte CM, Valdés L, De Young C, Fonseca L, Grimsditch G (2009) Blue carbon. A rapid response assessment. United Nations Environment Programme 78pp
- Nguyen TTN, Tran HC, Ho TMH, Burny P, Lebailly P. (2019) Dynamics of farming systems under the context of coastal zone development: The case of xuan thuy national park, Vietnam. *Agric.*9:5–7.
- Nicoll BC, chim A, Mochan S, Gardiner BA (2005) Does steep terrain influence tree stability? A field investigation. *Can. J. For. Res.* 35: 2360-2367.
- Ono K, Noguchi H, Linh NTM, Tùng ĐT, Tri TQ, Takahata K, Mori N, Baba S, Miyagi T, Yanagisawa H, Phúông VT, Hirata Y (2024) Resistance to uprooting among mangrove trees at the Urauchi River Mouth, Japan, and the Red River Delta, Vietnam: A mechanical analytical comparison based on an *in-situ* tree-pulling experiment. *森林立地* 66:16-26.
- Pham TT, Vu TP, Hoang TL, Dao TLC, Nguyen DT, Pham DC, Dao LHT, Nguyen VT, Hoang NVH (2022) The Effectiveness of Financial Incentives for Addressing Mangrove Loss in Northern Vietnam. *Front. For. Glob. Chang.* 4:1–16.
- Phan NH. (2004) *Mangrove Ecosystem in the Red River Coastal Zone: Biodiversity, Ecology, Socio-economics, Management and Education*. Hanoi: Agricultural Publishing House. 509pp.
- Phan NH, Nguyen DM, Quan TQD, Tran VT. (2004) Planning the management or vegetation in the mangrove areas of Giao Thuy District ~ for sustainable development. In: *Mangrove Ecosystem in the Red River Coastal Zone: Biodiversity, Ecology, Socio-economics, Management and Education*. Hanoi. p. 433–40.
- Poverty Environment Network (2007) PEN Technical Guidelines - version 4 - May 2007. Centre for International Forestry Research

- Primavera JH, Esteban JMA, (2008) A review of mangrove rehabilitation in the Philippines: Successes, failures and future prospects. *Wetl. Ecol. Manag.* 16:345–358.
- Spalding MD, McIvor AL, Beck MW, Koch EW, Möller I, Reed DJ, Rubinoff P, Spencer T, Tulhurst TJ, Wamsley TV, van Wesenbeeck BK, Wolanski E, Woodroffe CD (2014) Coastal ecosystems: A critical element of risk reduction. *Conservation Letter* 7:293-301
- Todo C, Tokoro C, Yamase K, Tanikawa T, Ohashi M, Ikeno H, Dannnoura M, Miyatani K, Doi R, Hirano Y (2019) Stability of *Pinus thunbergii* between two contrasting stands at differing distances from the coastline. *Forest Ecology and Management* 431:44-53.
- Walters BB, Rönnbäck P, Kovacs JM, Crona B, Hussain SA, Badola R, Primavera JH, Barbier E, Dahdouh-Guebas F (2008) Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: A review. *Aquat. Bot.* 89:220–236. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2008.02.009>
- Woodhouse (2022) Lessons and guidance for policy from MAP's community-based ecological mangrove restoration best practice, in: XV World Forestry Congress: Building a Green, Healthy and Resilient Future with Forests. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Seoul
- Yanagisawa H, Koshimura S, Goto K, Miyagi T, Imamura F, Ruangrassamee A, Tanavud C (2009) The reduction effects of mangrove forest on a tsunami based on field surveys at Pakarang Cape, Thailand and numerical analysis. イカオ・アコ HP <http://ikawako.com/> (2024/5/10 閲覧)
- 今井健太郎、鈴木明菜 (2005) 沿岸樹木のパイプモデルを用いた表面積、体積評価法とその倒伏耐力. *水工学論文集* 49:859-864.
- 海津正倫 (1998) ガンジスデルタの地形と高潮災害. *地形雑誌* 107:137-141
- オイスカ HP <https://oisca.org/projects/> (2024/5/10 閲覧)
- 環境省 (2021) IPCC AR6 特別報告書 環境省地球環境局総務課脱炭素化イノベーション研究調査室 企画・監修 22pp
- 環境省自然環境局 (2022) 生態系を活用した気候変動適応策 (EbA) 計画と実施の手引き 国立環境研究所編 37pp
- 環境省 (2023) 令和 5 年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書.
- 向後元彦 (1988) 緑の冒険－砂漠にマングローブを育てる－ 岩波新書 223pp
- 向後元彦 (2014) マングローブ植林－沙漠と湿潤熱帯の経験から 日緑工誌 39:486-492
- 国際協力機構(JICA) (2015) インドネシア共和国 マングローブ生態系保全と持続的な利用の ASEAN 地域における展開 プロジェクト終了時評価調査報告書 89pp
- 国際マングローブ生態系協会 HP <http://mangrove.or.jp/index.html> (2024/5/10 閲覧)
- 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 REDD プラス・海外森林防災研究開発センター (2021) 森林を活用した防災・減災の取組 Country Report 2020 年度 インドネシア共和国、タイ王国、ミャンマー連邦共和国 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 REDD プラス・海外森林防災研究開発センター編

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 REDD プラス・海外森林防災研究開発センター (2022) 森林を活用した防災・減災の取組 Country Report 2021 年度 タイ王国、インド共和国、フィリピン共和国 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 REDD プラス・海外森林防災研究開発センター編

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 (2022) 林野庁補助事業令和 3 年度森林技術国際展開支援事業報告書.

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 (2023) 林野庁補助事業令和 4 年度森林技術国際展開支援事業報告書.

コスモ石油 HP <https://ecolozoo.cosmo-energy.co.jp/ecotour> (2024/5/10 閲覧)

近藤観慈、小山美香、野々田稔郎、林拙郎 (2006) 海岸クロマツ林の津波を想定した外力に対する根系抵抗力. 日本森林学会大会学術講演集 117:G03

佐藤一紘 (1992) 6. 海岸浸食防備およびその他の機能. 日本の海岸林: 多面的な環境機能とその活用 (村井宏他編) ソフトサイエンス社 513pp

佐藤一紘 (2010) 海面利用科学と海水科学—マングローブによる海上林から見えるもの— 日本海水学会誌 64:82-90

ジャパン石油開発 HP <https://www.jodco.co.jp/csr.html> (2024/5/10 閲覧)

商船三井 HP <https://www.mol-mauritius-fund.jp/> (2024/5/10 閲覧)

鶴田修己、鈴木高二朗、柳澤英明、森信人 (2021) 海岸保全施設としてのグリーンインフラのライフサイクルコストの検討 土木学会論文集 B3(海洋開発) 77:I_181-I_186

東京海上グループ HP <https://www.tokiomarine-nichido.co.jp/world/greengift/mangrove/> (2024/5/10 閲覧)

南遊の会 HP <http://www.namdu.jp/> (2024/5/10 閲覧)

日本財団 HP <https://nippon.zaidan.info/kinenkan/history30/4/4603.html> (2024/5/10 閲覧)

野口宏典、鈴木覚、南光一樹、竹内由香里、金子智紀、新田響平、渡部公一、坂本知己 (2014) 海岸砂丘地に植栽された広葉樹およびクロマツの倒伏抵抗特性の引倒し試験による評価. 海岸林学会誌 13:59-66.

馬場繁幸、北村昌三 (1999) マングローブ植林のための基礎知識—マングローブ林の再生のために— 国際緑化推進センター編 139pp

堀正和、桑江朝比呂 (2017) ブルーカーボン: 浅海における CO₂ 隔離・貯留とその活用 地人書館

松田義弘 (2011) マングローブ環境物理学 東海大学出版 378pp

宮城豊彦、安食和宏、藤本潔 (2003) マングローブ—なりたち・人びと・みらい—. 古今書院 193pp

望月章 (2002) マングローブ植林と NGO 活動—ベトナム、エクアドル、ミャンマー、プロジェクトを自邸として— ランドスケープ研究 66:97-101

リコージャパン株式会社 HP <https://www.ricoh.co.jp/sales/about/sustainability/special/2022> (2024/5/10 閲覧)

ワイエルフォレスト HP <https://ylforest.co.jp/> (2024/5/10 閲覧)