

第4章 途上国の森林の減災・防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 気候変動や土地改変に伴う山地災害、高潮被害等の世界的な激甚化

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次評価報告書(2013)は、気温、海水温、海面水位、雪氷量減少などの観測から気候システムの温暖化には疑う余地はないことを指摘している。1950年頃以降、台風、ハリケーン、サイクロンを含む低気圧の異常な発達等に伴って、山岳地域の山地災害及び沿岸域の高潮災害の災害外力(ハザード)となる豪雨の強度増加や頻度上昇、潮位の異常上昇などの多くの極端現象が地球規模で観測されている。IPCCのRCPシナリオによる将来予測では、これらの極端現象は今後も21世紀にわたってより強く、また頻繁となると指摘されており、今後世界的な災害の激甚化が危惧されている。こうした気候変動に伴う極端現象は先進国のみならず開発途上国においても影響を受け、特に雨季に大雨が降る低緯度のアジア地域の開発途上国では、豪雨の強度や頻度が高まることが懸念されている。

一方、経済発展の著しい開発途上国では、人口の急増や生産力増大のために林地から農地等への人為的な改変がしばしば行われる。山岳地域における無秩序な森林伐採や排水機能を考慮しない道路開設は斜面の脆弱性を増大させ、豪雨時の斜面崩壊や表面侵食等の山地災害を引き起こすだけでなく、山麓に生活する人々の生計の手段である農地や家屋に被害が及び、時に人命をも奪う深刻な災害となる。また、沿岸域でのマングローブは、高い消波効果を発揮するだけでなく、マングローブの根系が護岸の役割を果たして海岸侵食を軽減することから、これを伐採して養殖池や農地、水田を開発することにより護岸の機能が失われ、高潮発生時に浸水被害が内陸部へ拡大する結果を招いている。こうした無秩序な土地改変は自然システムの脆弱性や暴露を高め、ハザードの増大と相まって極端現象に対する災害リスクを一層増大させている。

4.1.2 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

国家の経済が急速に成長する際に、不適切な土地利用が原因となって山地災害が頻発化する事例は日本を含め世界各地で認められる。一般的に産業活動が活発化し人口が急増する経済成長期には伝統的な土地利用のルールが軽視される傾向が強く、災害リスクの高い土地が利用されることで山地災害の発生につながりやすい。わが国も明治期の近代化や第二次大戦後の復興に伴う木材や薪炭の需要増大が山地の過度な利用を生み、山地災害の多発化を招いたことがある。こうした歴史を教訓に、わが国では現在にわたるまで「砂防」と「治山」の両事業による防災施策が講じられるようになった。前者の砂防事業は主にコンクリート製の防災施設の整備（グレーインフラ）を整備して荒廃流域の保全及び土石流等の土砂災害から人命や財産を直接的に守ることを目的とするのに対し、後者の治山事業は森林の維持造成を通じて山地のレジリエンスを高めて災害から国民の人命や財産を守り（グリーンインフラ）、また水源かん養、生活環境の保全・形成等を図ることを目的とする。我が国の治山事業は、その豊かな経験を糧に森林整備と補助的な施設を組み合わせることで森林の防災・減災機能（Forest-based Disaster Risk Reduction; F-DRR）を最大化する独自の治山技術を発達させた。治山技術は山地災害に対するレジリエンスを高めるだけに留まらない。居住地周辺や沿岸域に整備された土砂流出防備林、水害防備林、防潮林、防風林、飛砂防備林などの防災林（保安林）は土砂流出や洪水、津波、高潮、強風など自然の猛威から生活空間を保護してくれるバッファゾーンとなる。このように、治山技術で整備された森林の防災・減災効果はきわめて幅広く多岐に渡るうえ、コンクリート構造物に過度に依存することがないため、今後本格的な災害対策を進めようとする開発途上国にとって過剰な財政負担への懸念を抑えられるという観点から適用可能性が高いと期待される。

近年の経済発展が著しい東南アジアの開発途上国は多雨気候のため歴史的に斜面崩壊のみならず洪水による被災者も極めて多く、将来の気候変動による土砂・洪水災害の大規模化が危惧されている。その例として、ベトナム社会主義共和国では 2020 年の 10 月から 11 月にかけて異例の数の台風や熱帯低気圧が続けざまに上陸、接近し、山岳地域及び沿岸地域に深刻な山地災害や洪水災害をもたらした。国際連合人道問題調整事務所（OCHA）によれば、一連の災害は同国に 243 人の死者・行方不明者の他、約 150 万人に直接的被害をもたらしたと発表されている。治山技術による山地域の森林整備は山地からの土砂流出量の低減を通じて河床上昇による洪水被害を緩和するため、山地災害のみならず水害までも含めた国土全体の総合的な防災対策に大きく貢献できると期待される。治山技術はさらに森林の炭素固定による REDD を通じた温暖化対策への貢献も期待できるという点でも優れている。

治山技術はこのような多岐にわたる利点を持つ一方で、適切な土地利用計画や土地利用

制限、住民の防災・環境意識を向上するための啓蒙を伴わないと効果を発揮しにくい技術体系でもあるという一面を併せ持つ。例えば、居住地の周辺に防災林が整備されても、適切な利用制限が無いと私的な乱獲が放置されて防災林の破壊につながることもある(いわゆるコモンの悲劇)。しかし、世界的に SDGs(持続可能な開発目標)が重視される今日にあっては、このような土地利用計画や啓蒙を必要とするという治山技術の特性は、むしろ、住民の防災意識の向上につながりやすいという利点にもなりうる。

とくに災害が起こりやすいモンスーンアジア地域では、適切な土地利用の制限は局所的・短期的には経済活動を制限する側面もあるが、長期的な国家的視点で見れば、住民の安全につながることは疑いようがない。わが国でも、災害リスクの高い場所での宅地開発が災害につながっていると指摘される事例はきわめて多いが、防災・減災対策の策定がこれから本格化する発展途上国にあって、計画的な土地利用と防災意識の普及啓発を必須とする治山技術を、沿岸地域においてはマングローブ等による高潮被害に対する沿岸域の防災・減災機能の評価と保全策を早期に導入しておき、土地の持つ災害リスクについて意識を深めておくことは、将来的に防災予算の低減や民生の安定にもつながるもので、未来への投資という点でも費用対効果は極めて高いと考えられる。

政府と住民の間の合意可能性が高く実効性の高いゾーニングを行うには、科学的知見にもとづいて、土地に潜む災害リスクを出来るだけ正確に評価するとともに、迅速・かつ効果的な形で住民に周知する必要がある。そのためには、地域の生態系や社会的文化的な背景の理解を踏まえ、近年発達が著しい情報技術の活用が不可欠であり、とくにリモートセンシングや、AI の技術を導入することで、ゾーニング技術を高度化することが期待できる。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に、リモートセンシングや AI などの最新の情報技術を組み合わせて、途上国に対して森林の防災・減災機能を活用した防災技術の実装に貢献するものである。

4.1.3 本課題の目的

開発途上国のベトナム社会主義共和国(以下、ベトナム)の山岳地域と沿岸地域を調査対象地域に設定し、同国の森林や山岳地域及び海岸地域に関する歴史、社会経済を踏まえた上で、日本の治山技術を同国に効果的に適用させるための技術開発を行う。山岳地域においては、森林の防災・減災機能を強化する日本の治山技術やリモートセンシング技術を現地に適用し、有効性の検証と課題の改善を通じて適用技術を開発する。沿岸域においては、高

い消波効果を発揮するマングローブ林の高潮時における防災・減災機能を評価するとともに、マングローブ林保全に関する技術的指針を提示する。

4.1.4 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 MOU を締結し、調査・研究における協力体制を構築した。

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) として首都ハノイに本部を置く機関であり、同国における森林研究、開発及び拡大に関する科学研究、技術移転、大学院教育、国際協力等を実施している。

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 ベトナム北西部山岳地域における山地災害及び周辺域の自然・社会環境に関する現地調査

調査対象国であるベトナムの山岳地域では、気候変動に伴う極端な豪雨の強度・頻度の増大や、市場経済の拡大等による森林から農地等への無秩序な土地改変によって、斜面崩壊をはじめとする山地災害が多発し林地の荒廃が進んでいる。同国の山地災害を防止・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国に効果的に適用するために必要な手法を、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。本目的の達成のため、ベトナム北西部山岳地域の荒廃林地を対象に現地踏査を実施し、斜面崩壊等の発生場や発生形態、植生被覆との関係等を把握する。また林地の荒廃には不適切な森林路網の作設に起因することも多いことから、林道等の整備状況についても調査する。さらに対象地域における森林の伐採、農地転換、居住地域の変遷など土地利用の実態や地域住民の山地災害に対する意識等を現地調査や文献調査によって把握する。この他、治山事業計画の策定に必要となる、同国の地形・地質・降水量等の広域データセット

の整備状況を調査し、GIS 基盤データへの供用可能性を明らかにするための品質確認を行う。本課題の調査フローを図 4-2-1-1 に示す。本課題 4.2 はリスクマップ作成に関する課題 4.3 と強く連携することから、同図は課題 4.3 を含めたかたちとなっている。このようにして得られた、林地の荒廃、林道の整備、土地利用の情報を課題 4.3 に受け渡すことにより、リモートセンシング技術による斜面崩壊リスクマップ及び森林管理マップの作成の一助とする。また課題 4.3 と連携して山地災害リスクと木材生産の収益性に基づいて、土地利用の判断基準となるような森林のゾーニング技術を開発する。

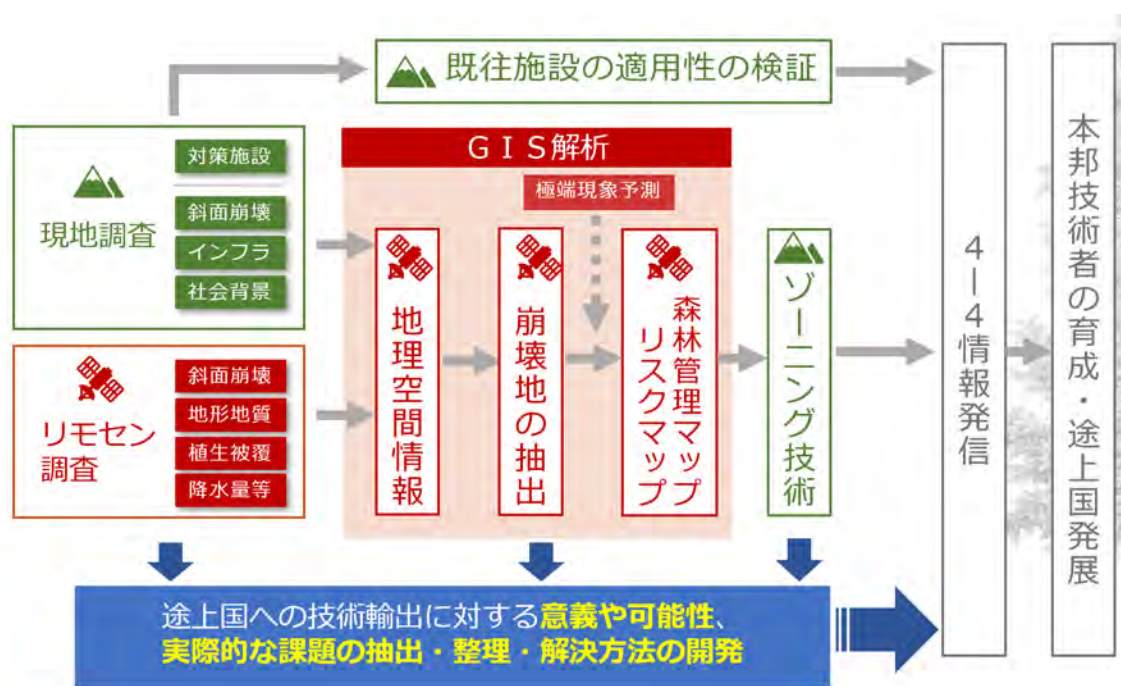


図 4-2-1-1 課題 4.2 及び 4.3 の調査開発フロー

現地調査を主体とする課題 4.2 (緑色部) とリスクマップ作成を主体とする課題 4.3 (赤色部) は高い連携の元で実施される

4.2.2 ベトナム北西部における国土と山地災害の概要

4.2.2.1 ベトナム国土の地理と北西部の地形

大陸部東南アジア (インドシナ半島) の東縁に南北約 1600 km に亘り立地するベトナムの国土は、地理的な特徴から 8 つの地域 (北東部、北西部、紅河 (ホン河) デルタ、中北部海岸、

中南部海岸、中部高原、南東部、メコン河デルタ)に分けられている(図 4-2-2-1)。その地域群の中で山地が最も卓越するのは北西部である。また、北東部の中国国境、中北部海岸のラオス国境、中部高原にも山地がみられる。北西部に立地する 6 省(ホアビン省、ソンラ省、イエンバイ省、ラオカイ省、ライチャウ省、ディエンビエン省)は、大陸部東南アジアの地質構造を境することで知られるホン河断層の南西側に広がる地域で、北西－南東方向の地質構造に支配されたホン河河谷、ダー河河谷、マー河河谷が平行に配列する。ホン河の南西側、ダー河までの地域には稜線部の標高が 2500 m を超える山地が発達する(最高峰ファンシーパン山 Mt. Fansipan は標高 3147 m)。衛星画像判読の予察、及びベトナム森林科学アカデミーの提案を基に、現地調査及びリスクマップ分析の対象地として北西部に 4 地区(イエンバイの 2 地区、ライチャウ地区、モンゾン地区)を設けた(図 4-2-2-1 の赤枠)。各地区の地形の概要は後出の「斜面崩壊」の項で述べる。

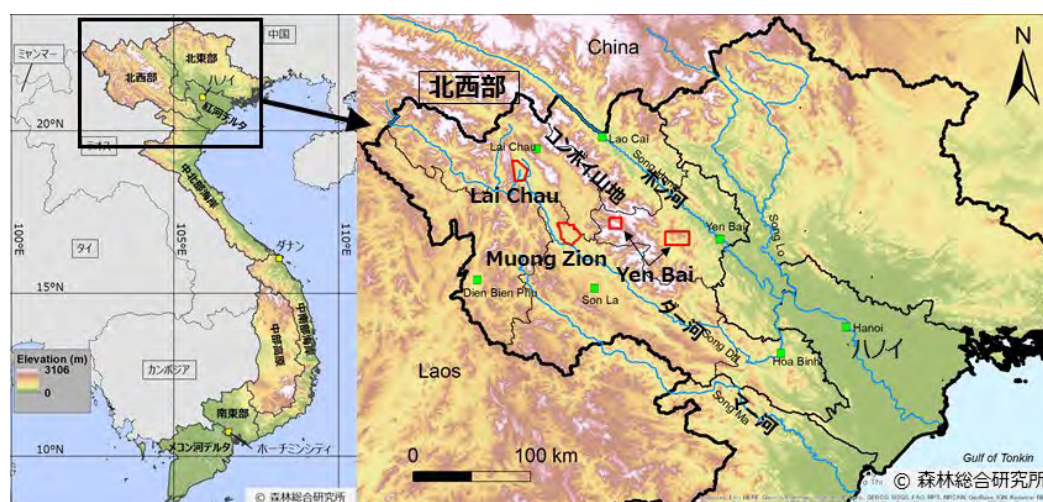


図 4-2-2-1 ベトナム及びその北西部の地形と調査対象地域

4.2.2.2 ベトナム北西部の地質

ベトナムにおいて最も詳細な地質空間情報と考えられる 20 万分の 1 の地質図を、北西部の範囲で入手し、デジタル化した(図 4-2-2-2)。ベトナム北西部の北限であるホン河断層(the Red River fault)は、中国南部とインドシナを画する主要な地質境界であり、チベットからベトナムにかけて 900~1000 km に亘って延びる右横ずれのトランスフォーム断層である。河川形のずれを基にした分析では、新第三紀鮮新世から現在までに 300 m 程度ずれたと見られるが、現在は大きな地震の頻発はみられない。この断層に沿っては約 10~20 km の幅で

変成岩(片麻岩)が分布している区間があり、その最も南の変成岩体が中国国境からラオカイ省にかけて連なり形成しているのがコンボイ山地である。コンボイ山地の南側には中生代の火成岩や火砕岩が分布し、高標高の山地を形成している。火成岩・火砕岩分布域の南(南西)は地形的にはダー河の河谷になり、更に南のマー河の河谷まで古生代終盤から中生代前期にかけて堆積した層相変化に富む堆積岩(モラッセ状堆積岩)が広く分布し、その中には石灰岩が頻繁に含まれ、また部分的に変成岩もみられる。この堆積岩分布域は複数の断層帯が走る褶曲構造を呈しており、その構造運動は中世代の三畳紀後期からジュラ紀初期にかけて2度ほど起こったと考えられている。

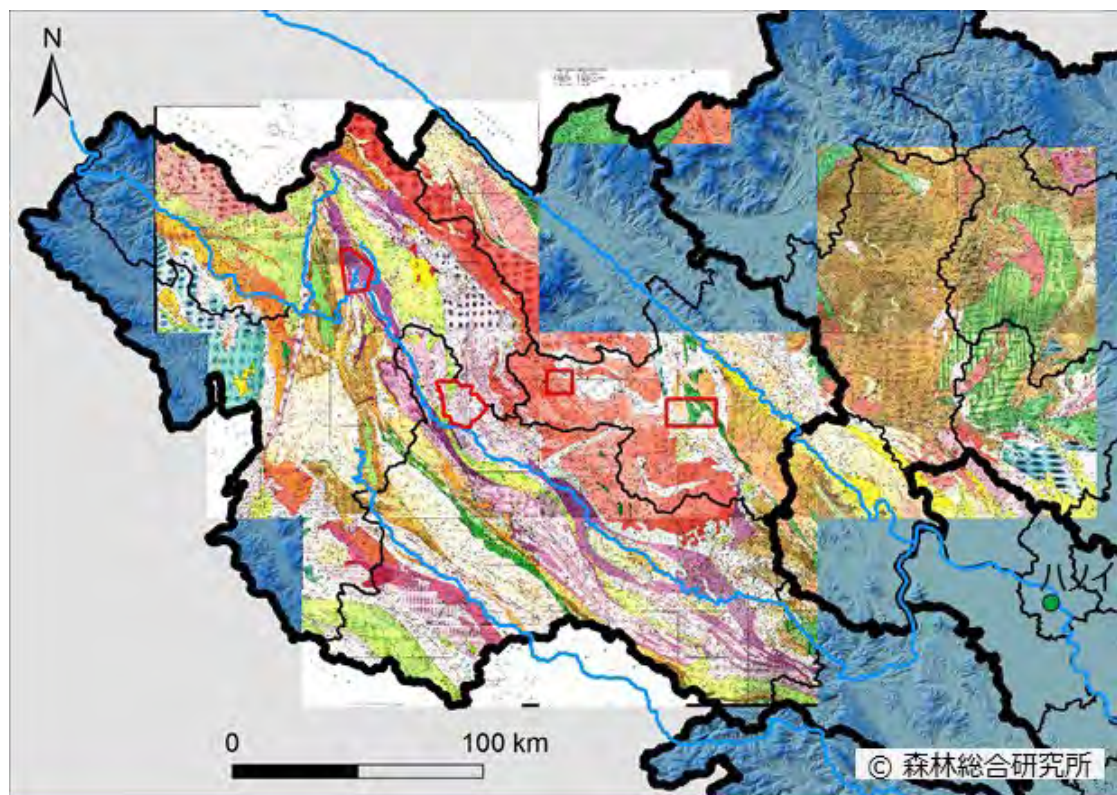


図 4-2-2-2 ベトナム北西部(及び北東部)において 1/200,000 地質図が得られた範囲

赤枠が現地調査対象地

4.2.2.3 ベトナム北西部での斜面崩壊

課題 4.3(リスクマップ班)と共同で、ベトナム北西部における斜面崩壊の分布を衛星画像を基に探索し、複数の地域において斜面崩壊発生地域を9ヶ所で特定した(図 4-2-2-3)。また、それぞれの場所で時系列衛星画像を用いて斜面崩壊発生時期も検討した(図 4-2-2-4～図

4-2-2-12)。その結果、これらの崩壊は概ね 2014 年から 2019 年の間に発生していることが分かった。例えば、イエンバイ省西部②(図 4-2-2-5)では、多数の表層崩壊が標高 1500 から 2000 m 付近の、森林が広範囲で伐採され草地となっている深成岩分布域で発生したとみられる。この崩壊は 2016 年夏から 2018 年夏の間に発生した。

また、ライチャウ省中央部⑨(図 4-2-2-12)では、幅 100 m 程度、長さ 650 m 程度の崩壊域を持つ深層崩壊が、広範囲に森林伐採が見られる標高 600 m 内外の玄武岩分布域で発生したとみられる。その崩壊は崩壊地源頭部に立地していた集落を消滅させ、流出した土砂は河谷に沿って崩壊域の下流約 4 km の区間に亘って堆積した。時系列衛星画像から、この崩壊は 2018 年の夏に発生したことが分かった。

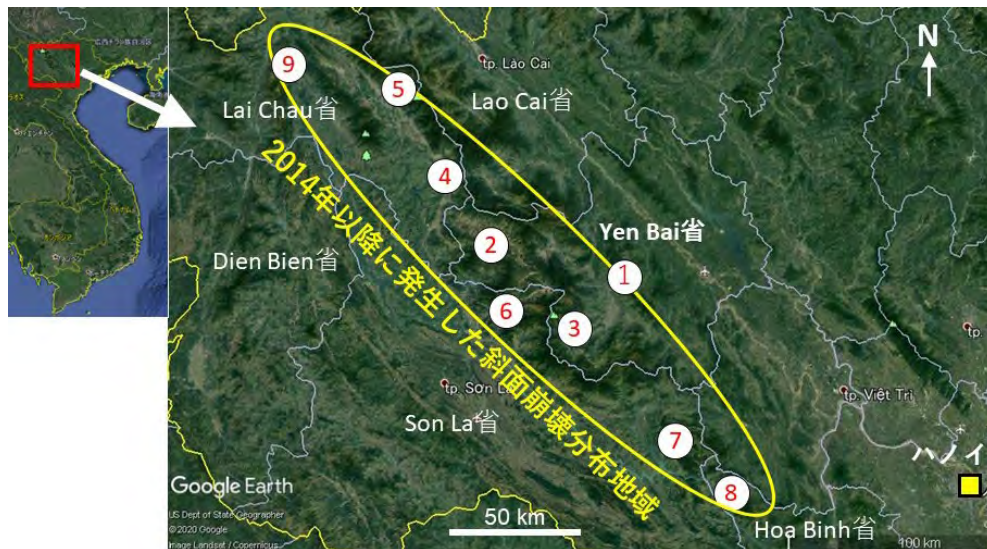


図 4-2-2-3 ベトナム北西部における 2014 年以降の斜面崩壊発生地域の分布



図 4-2-2-4 イエンバイ省中央部①の崩壊発生前後の衛星画像及び崩壊発生後の景観

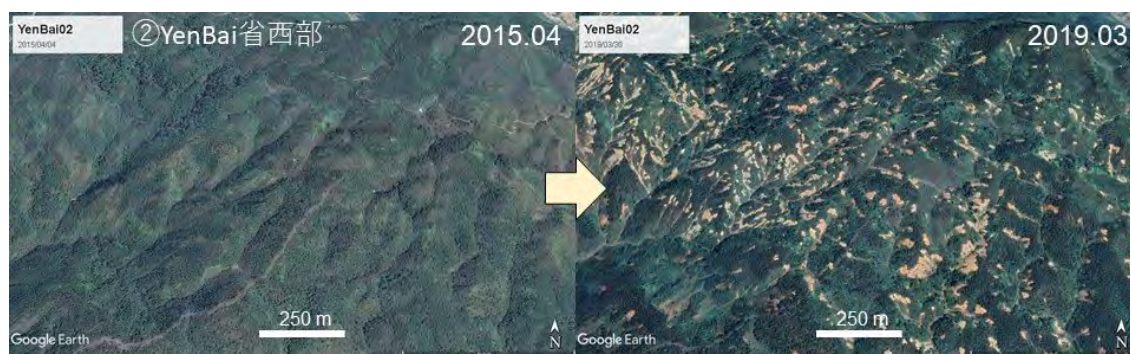


図 4-2-2-5 イエンバイ省西部②の崩壊発生前後の衛星画像

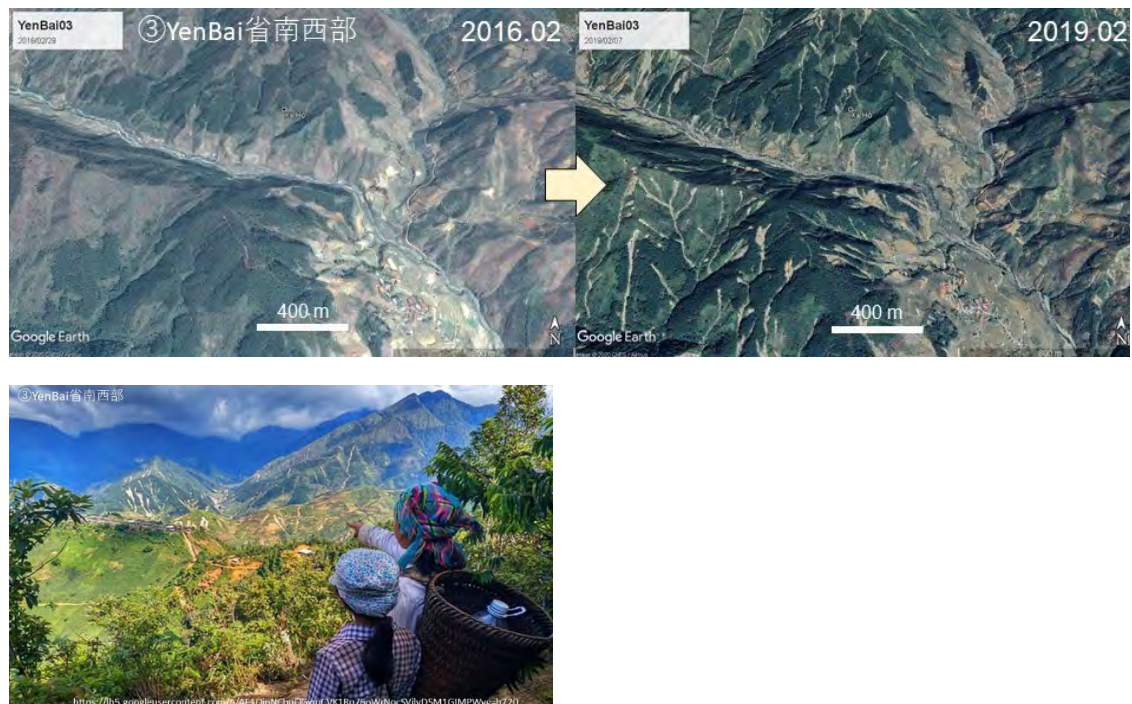


図 4-2-2-6 イエンバイ省南西部③の崩壊発生前後の衛星画像及び崩壊発生後の景観



図 4-2-2-7 ライチャウ省南東部④の崩壊発生前後の衛星画像



図 4-2-2-8 ライチャウ省東部⑤の崩壊発生前後の衛星画像



図 4-2-2-9 ソンラ省北東部⑥の崩壊発生前後の衛星画像



図 4-2-2-10 ソンラ省東部⑦の崩壊発生前後の衛星画像



図 4-2-2-11 ホアビン省北西部⑧の崩壊発生前後の衛星画像



図 4-2-2-12 ライチャウ省中央部⑨の崩壊発生前後の衛星画像

4.2.2.4 ベトナム北西部での表面侵食

山がちな景観が広がる北西部では山地斜面が利用されてきた歴史と現状があり、雨季に繰り返される豪雨時には斜面崩壊だけでなく表面侵食(ガリー、リル、ウォッシュによる表面侵食)が起こり(図 4-2-2-13)、多量の土砂が流出して下流の河谷(ダム湖を含む)を埋積している(図 4-2-2-14)。流域から流出する土砂によるダム湖の埋積は国レベルでの課題となっており、ダム湖の水で水力発電をしている電力会社は政府に対して特別税として森林環境サービス Payment for Environmental Service (PES) を支払い、その資金が森林環境・村落振興ファンドとして村レベルまで下りてくるシステムが構築されている。

このように治山技術の東南アジア地域への展開では、斜面崩壊への対応に留まらず、現地の社会経済状況に応じた現場ニーズを適切に汲み取り、表面侵食対策を含めた山地の資源管理に資する技術も見据えて検討することが肝要であると考えられる。今後現地調査が実現する際は、この点を踏まえて調査を実施していく予定である。



図 4-2-2-13 ソンラ省モンゾン地区(調査対象地)の伐採跡地及び濁流河川.

(撮影:ベトナム森林科学アカデミー)

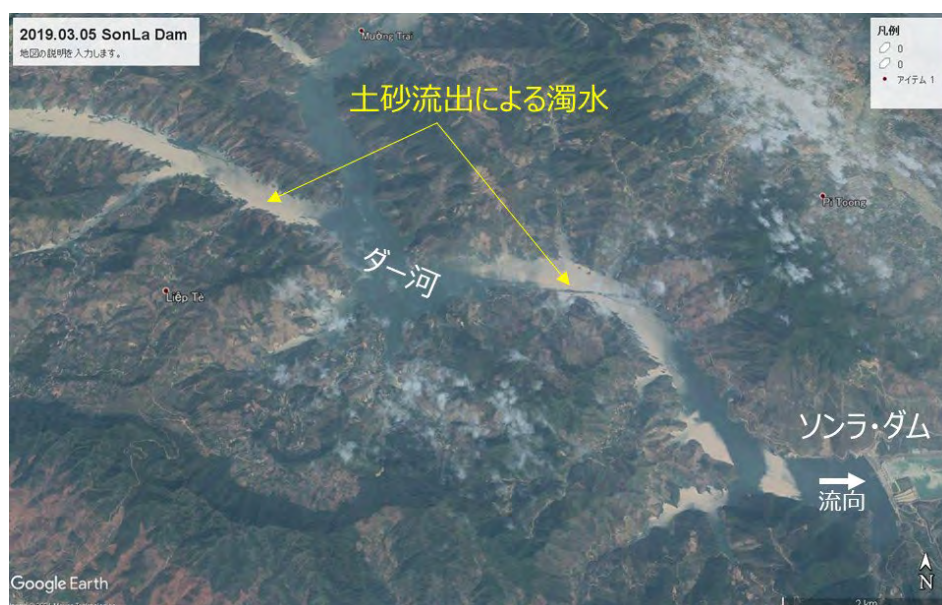


図 4-2-2-14 ダー河本流を堰き止めるソンラ・ダム(2012 年完成)の上流側に見られる濁水域(2019 年 3 月 5 日撮影画像)

ソンラ・ダムは調査対象地区のソンラ省モンゾン地区の下流約 30 km に位置し、水力発電能力は東南アジア最大級である。

4. 2. 2. 5 ベトナム北西部の気象気候

ベトナム北西部は温帯湿潤気候であり、ソンラ市での年雨量は 1400-1500 mm 程度(図 4-2-2-15)、最暖月である 5 月の最高気温 31.8℃、最低気温 25.9℃、最寒月である 12 月の最高気温 21.8℃、最低気温 15.5℃である(図 4-2-2-16)。台風及び収束帯(熱帯擾乱の南風と中緯度モンスーンの北風)による大雨が 4 月～9 月の雨季を中心として降ることがあり、その大雨の発生頻度にはエルニーニョ南方振動が影響しているとの指摘がある。また、全球大気モデルに基づくシミュレーションでは、地球温暖化に伴う気候変動によりベトナム北部では台風に伴う雨季の大雨が 21 世紀の前半及び終盤では、20 世紀終盤に比べて、増加するとの予測されている。斜面崩壊の誘因となる大雨に関する面的な詳細データについては、JAXA の GSMaP データ(図 4-2-2-17)、日本政府の協力により整備と運用が開始されているレーダ雨量データを念頭においたデータ収集と分析が今後の重要な課題である。

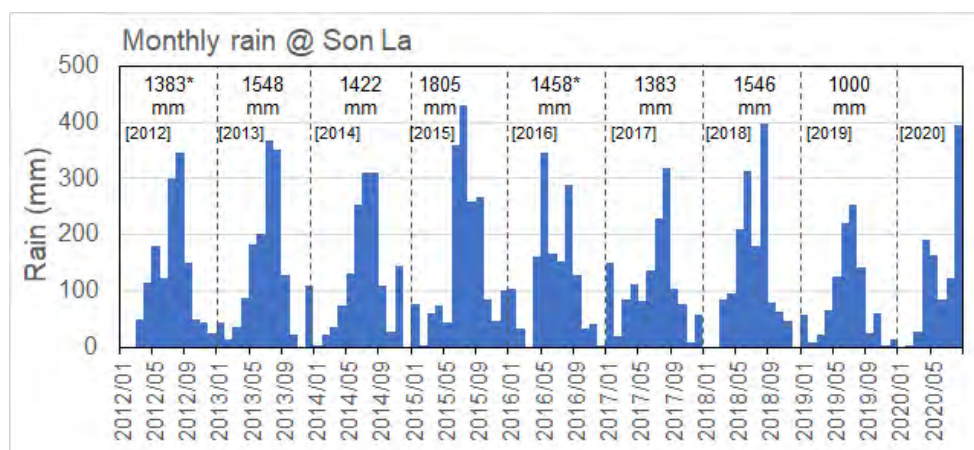


図 4-2-2-15 ソンラ省ソンラの月雨量データ

気象庁ホームページにて得たデータを集計

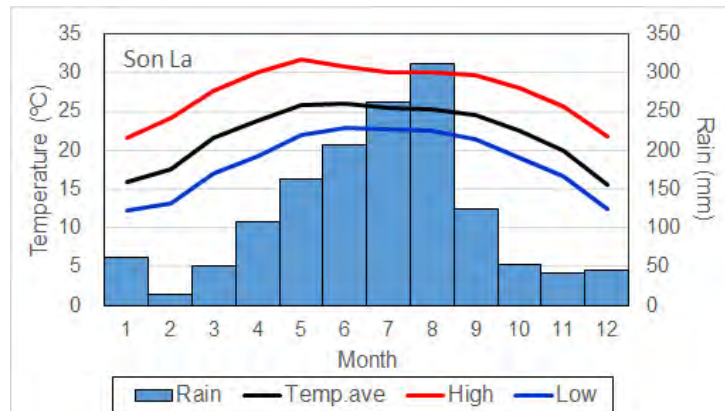


図 4-2-2-16 ソンラ省ソンの月別気温及び降水量(2012ー2020 年の平均値)

気象庁ホームページにて得たデータを集計

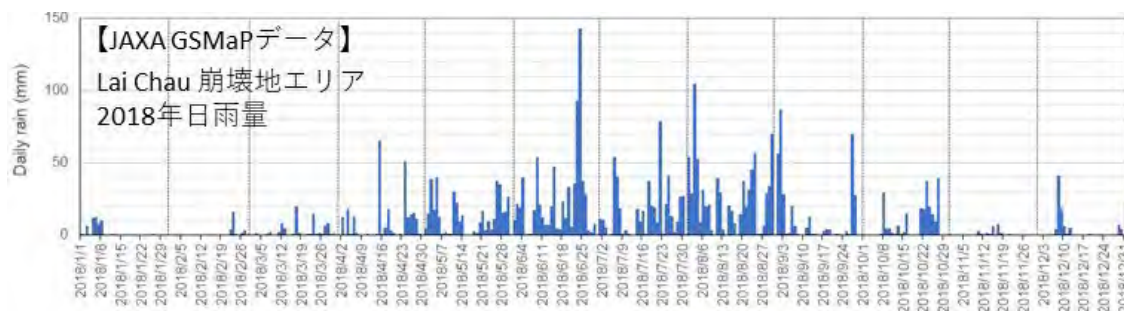


図 4-2-2-17 ライチャウ省中央部⑨の崩壊地エリアにおける 2018 年の日雨量データ

JAXA GSMap から取得

4.2.3 Son La 省 Muong Gion Commune における山地災害と周辺環境

4.2.3.1 Muong Gion Commune の概要

ベトナム北西部山岳地における斜面崩壊及び周辺環境に関する共同調査地をカウンターパートであるベトナム森林科学アカデミーと協議し、ソンラ省 (Son La Province)、Quynh Nhai District 内にある Muong Gion Commune (モンゾンコミュニン、以下、MGC) に設定した。MGC はベトナムの首都ハノイから西北西へ約 230 km 離れたダー川 (Sông Đà) の東側に位置する人口 11,881 人 (2019 年)、面積 187.02 km² の Commune であり、人口密度は約 64 人/km² で日本の北海道とほぼ同じである。MGC の森林面積は 89.32 km²、森林

面積率は 47.8%であり、ベトナムの平均的な被覆率(41.9%、2019 年)に近い。MGC 内には、長さ 18 km の National road(国道)279 号、10 km の Provincial road 107 号、25 km の Inter-district road、40 km の Inter-Commune road、そして 35 km の New rural road が走っており、MGC 内の 19 カ所の village を結んでいる。MGC の現地住民の生計は主に農業生産と畜産であり、その年平均世帯収入は 2,800 万 VND(2019 年)、貧困率は 14%である。



図 4-2-3-1 ベトナム北西部 Muong Gion Commune の位置

4.2.3.2 Muong Gion Commune 調査プロットにおける斜面崩壊の実態

Muong Gion Commune で発生した斜面崩壊の特徴を明らかにするため、現地カウンターパートのベトナム森林科学アカデミーが中心となり現地調査を実施した。調査対象は図 4-2-3-2 に黄色ピンで示された 1995 年から 2020 年までの期間に発生した 21 箇所の斜面崩壊である。調査期間の制約等から今回は道路沿いで発生した斜面崩壊のみを対象とした。現地写真を図 4-2-3-3～図 4-2-3-5 に示す。写真観察によると、斜面崩壊の形態は概ねすべり面深度の浅い「表層崩壊」に位置づけられる。ただし、なかには例えば Plot 21 のようにガリーやリルが卓越した「表面侵食」の形態も認められる。また法面の崩壊が見られる箇所では道路開設工事の影響を少なからず受けていると推察される。

Plot 2、19、20 の 3 箇所には治山施設が設置されている。1995 年に斜面崩壊が発生した Plot 2 では法面に複数段の石積みブロックが見える。これは斜面末端部に置くことで地すべり滑動力に対する抵抗力を増加させる押え盛土工(抑制工)の一種と考えられる。日本の多くの押さえ盛り土工では盛土裏面の水位低下を狙って排水ボーリングが付設されるが、Plot 2 で排水状況は不明である。2005 年に斜面崩壊が発生した Plot 19 及び Plot 20 では法尻部に木柵が道路と並行に設置されている。これは斜面の不安定な表土層を固定させて表面侵食を防止する柵工のひとつと考えられる。このように、ベトナムでは治山技術が一部の現場に適用されている状況は認められたものの、多くの斜面崩壊に対しては、道路という重要な保全対象が近傍に走っているにも関わらず、斜面崩壊の発生から相当の期間経過後も特段の対策はなされていない実態が明らかになった。今後、日本の簡易な治山施設を現地へ導入する際には、こうした現況、及び治山施設の資材調達やコストに関する情報収集が重要である。

斜面崩壊の規模や運動特性の一覧を表 4-2-3-1 に示し、合わせてこの表から得られる崩壊地の長さ、崩土の流下距離、崩土体積の度数分布を図 4-2-3-6～図 4-2-3-8 にまとめた。崩壊地の長さは最短 10～最長 150m とバラツキが大きい、ただし、崩壊地の長さは、日本においても発生域一流走域一堆積域の区分をせずにまとめて表記されることも多く、実態と齟齬が生じる場合も多い。よって今後は現地でのより詳細な調査が望まれる。崩土の流下距離は最短 1～最長 120m、崩土体積は最少 2,250m³～最大 1,000,000m³で、これらも同様に発生域一流走域一堆積域の区分判定に関する再検証が必要である。特に Plot 12 は崩壊地の長さが 10m に対して崩土体積は 1,000,000m³と過大な結果となっている(表 4-2-3-1 では当該体積は誤記の可能性が高いと思われることから括弧書きとした)。

法面及び上部斜面の植生は、草地、シダ、竹、灌木類が多いが一部は畑作地になっている。

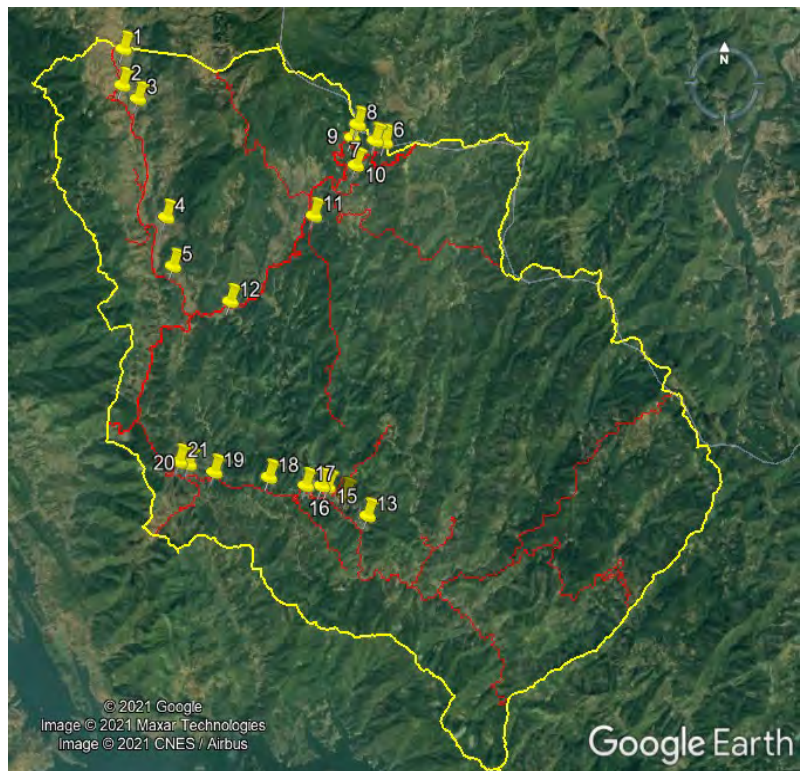


図 4-2-3-2 Muong Gion Commune における斜面崩壊調査プロットの位置(黄色ピン 1～21)

Plot 1		Plot 2	
Plot 3		Plot 4	
Plot 5		Plot 6	
Plot 7		Plot 8	

図 4-2-3-3 Moung Gion Commune における斜面崩壊(Plot 1～Plot 8)

撮影位置は図 4-2-3-2 の黄色ピン番号に対応

Plot 9		Plot 10	
Plot 11		Plot 12	
Plot 13		Plot 14	
Plot 15		Plot 16	

図 4-2-3-4 Moung Gion Commune における斜面崩壊(Plot 9～Plot 16)

撮影位置は図 4-2-3-2 の黄色ピン番号に対応

Plot 17		Plot 18	
Plot 19		Plot 20	
Plot 21			

図 4-2-3-5 Moung Gion Commune における斜面崩壊(Plot 17～Plot 21)

撮影位置は図 4-2-3-2 の黄色ピン番号に対応

表 4-2-3-1 Moung Gion Commune における斜面崩壊の規模、運動形態、及び土地利用履歴

ID	調査項目	プロット1	プロット2	プロット3	プロット4	プロット5	プロット6	プロット7	プロット8	プロット9	プロット10	プロット11	プロット12
1	崩壊地の長さ (m)	40	30	30	60	80	60	40	100	80	50	80	10
2	崩土の流下距離 (m)	6-8	6-7	6-7	10	140	10	10	140	1	10	10	100
3	崩土の粒径 (cm×cm)	10x10	10x10	10x10	10x10	20x20	20x20	20x10	10x10	10x10	10x10	20x20	20x20
4	道路斜面の植生	トウモロコシ畑、草地、低木			竹、シダ、草地		マツ人工林、草地、灌木		シダ、草地、灌木	トウモロコシ畑	シダ、草地、灌木		
5	土地利用履歴	移動耕作地			裸地	TXP	RTG (マツ類)	RTG (マツ類)	TXP	耕作地	TXP	TXP	TXP
6	斜面崩壊の発生年	2020	1995	2016	2016	2016	2010	2010	2010	2020	2010	2010	2014
7	崩土の体積 (m³)	4,000	2,250	2,700	9,600	128,000	48,000	64,000	60,000	96,000	60,000	80,000	(1000000)
8	斜面崩壊の主誘因	暴風雨											暴風雨、流水

ID	調査項目	プロット13	プロット14	プロット15	プロット16	プロット17	プロット18	プロット19	プロット20	プロット21
1	崩壊地の長さ (m)	50	70	150	30	100	150	80	70	90
2	崩土の流下距離 (m)	100	120	120	100	100	10	60	100	60
3	崩土の粒径 (cm×cm)	40x50	30x40	10x15	10x15	10x15	10x15	10x10	10x10	30x40
4	道路斜面の植生	灌木、シダ、竹	灌木、竹、シダ、草地	シダ、草地、灌木	灌木、シダ、草地	シダ、灌木	灌木、シダ、草地	シダ、草地、灌木	チガヤ	灌木、草地
5	土地利用履歴	TXP	TXP	TXP	耕作地	TXP	裸地	耕作地	耕作地	TXP
6	斜面崩壊の発生年	2005	2005	2005	2005	2005	2005	2005	2005	2005
7	崩土の体積 (m³)	150,000	8,000	300,000	45,000	180,000	42,000	112,000	72,800	18,900
8	斜面崩壊の主誘因	暴風雨、流水			暴風雨、流水					

Remarks:

TXP 再生二次常緑林
RTG 人工林 (マツ)

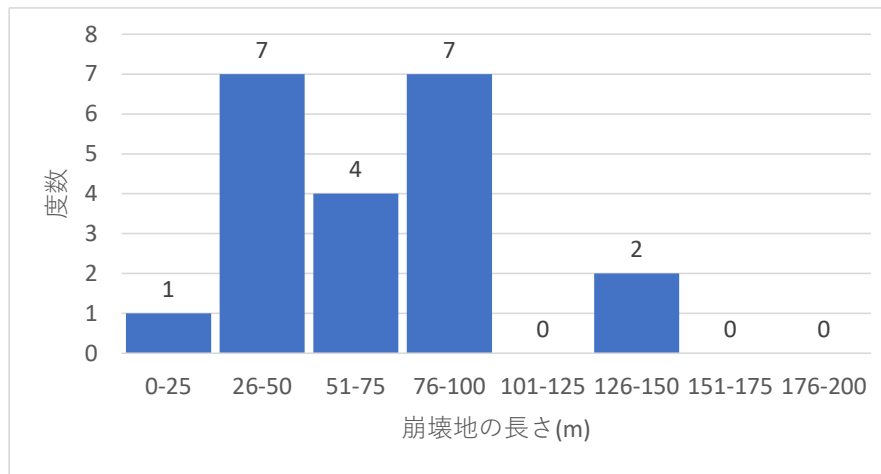


図 4-2-3-6 Muong Gion Commune における斜面崩壊の度数分布(崩壊地の長さ)

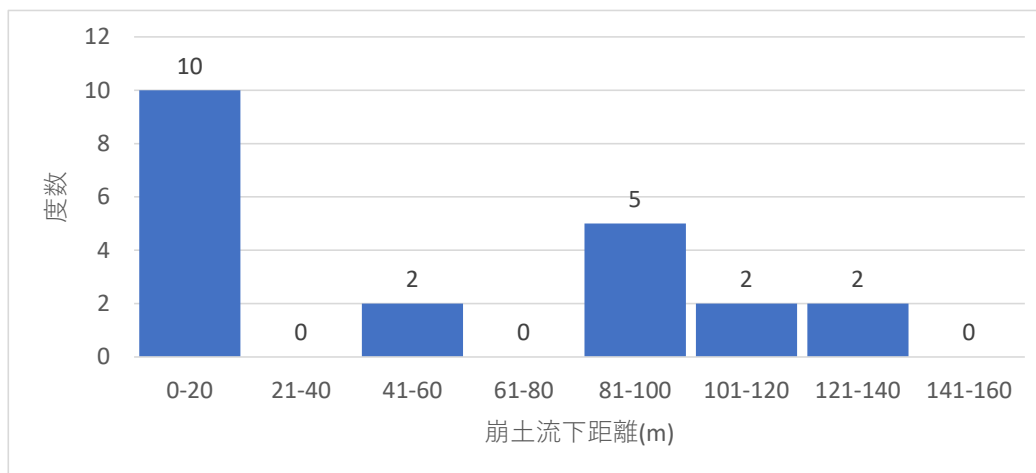


図 4-2-3-7 Muong Gion Commune における斜面崩壊の度数分布(崩土流下距離)

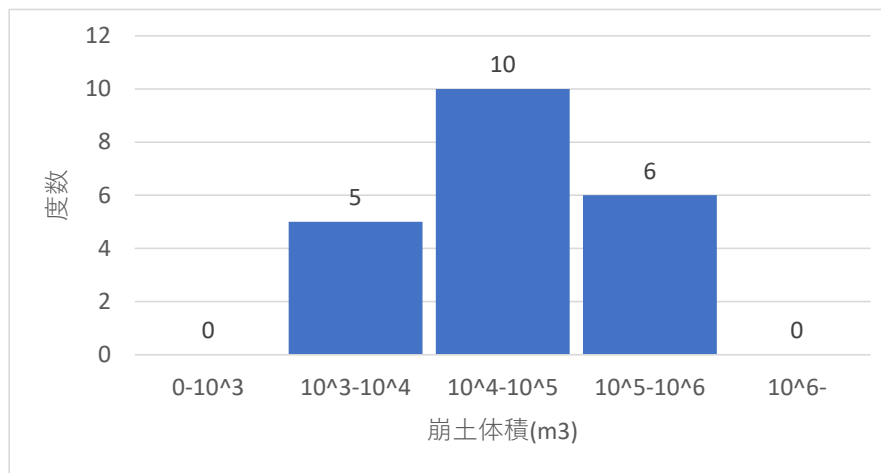


図 4-2-3-8 Muong Gion Commune における斜面崩壊の度数分布(崩土体積)

4.2.3.3 Muong Gion Commune 斜面崩壊調査プロットにおける道路開設状況

21 箇所の崩壊調査プロットでは近傍に道路が開設されており、少なからず道路開設の影響が考えられる。以下に、開設されている道路の概要を述べる。

1) 開設道路の概要および日本との比較

調査プロットに開設されていた道路区分は、7 箇所が Highway (National road)、5 箇所が Inter-provincial road、9 箇所が Inter-district road となっている(表 4-2-3-2)。各道路の幅員は、上の道路区分の順に 4m、3.5m、3.5m となっており、通行する車両は、いずれも一般車両となっている。これらの幅員を日本の林道と比較すると、いずれも 2 級林道から林業専用道クラスに相当する幅員¹⁾(全幅員)となっており、最大で 10 トン積み程度の大型車両が通行可能と考えられる。

排水溝については、同順に 0.8m×1.2m、0.8m×1.2m、0.4m×0.8m(いずれも深さ×幅、以下同)となっており、素掘りタイプの排水溝が見られる。日本の林道では、舗装区間ではコンクリート製の U 型側溝などが使用され、特に必要な場合を除いて流量計算を行わず、0.3m×0.3m 程度のサイズを施工することが多い。素掘り側溝については、未舗装区間で側溝の侵食のおそれがない場合に使用されることがあり、大きいものでは 0.3m×0.9m の規格とすることもあるものの、本調査プロット内の排水溝はそれよりも大きなサイズとなっている。これは、のり面からの崩土などにより有効断面が小さくなり、排水機能が低下することを見込んで、サイズを大きくしたものと考えられる。

舗装材料については、Highway (National road)および Inter-provincial road ではアスファルト、砕石、コンクリートが、Inter-district road ではアスファルトが使用されており、日本と同様である。山側(切土側)のり面の斜面傾斜は、50%～80%(約 25 度～40 度)で、普通土でも約 50 度とされる日本のり面の傾斜²⁾より緩くなっている。しかし、山側斜面を切土せずに自然斜面のままとしている可能性もある。

崩壊は、いずれも道路から 1～5m の至近斜面で発生しており、道路開設が少なからず崩壊に影響したことが考えられる。

¹⁾日本では通常、2 級林道は、車道幅員 3.0m、路肩幅員が片側 0.5m で全幅員 4.0m、林業専用道は、車道幅員 3.0m、路肩幅員が片側 0.25m で全幅員 3.5m となっている。これらの道は、10 トン積みトラックの通行が可能な規格を有する。

²⁾日本における切土のり面の傾斜は、普通土で 1:0.8(約 50 度)、緊結度の高い土砂で 1:0.6(約 60 度)、岩石で 1:0.3(約 70 度)がそれぞれ標準となっている。

表 4-2-3-2 Muong Gion Commune における道路特性一覧

ID	Items	プロット1	プロット2	プロット3	プロット4	プロット5	プロット6	プロット7	プロット8	プロット9	プロット10	プロット11	プロット12
1	道路の種類	**	**	**	**	**	***	***	***	***	***	***	***
2	道路の位置	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG
3	幅員 (m)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4	4	4	4	4	4	4
4	路線延長 (km)	24	24	24	24	24	54	54	54	54	54	54	54
5	斜面傾斜 (%)	60	60	60-70	50-60	80	80	80	70	70	60	80	60
6	道路端から崩壊発生箇所までの距離 (m)	2.5	2.5	2.5	2	2	5	1	2	1	1	2	1
7	主な通行車両	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通
8	舗装材料	アスファルト、砕石、コンクリート											
9	排水溝 (深さx 幅) (m)	0.8 x 1.2	0.8 x 1.2	0.8 x 1.2	0.8 x 1.2	0.8 x 1.2	0.8 x 1.2	0.8 x 1.2	0.8 x 1.2	0.8 x 1.2	0.8 x 1.2	0.8 x 1.2	0.8 x 1.2

ID	Items	プロット13	プロット14	プロット15	プロット16	プロット17	プロット18	プロット19	プロット20	プロット21
1	道路の種類	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2	道路の位置	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG
3	幅員 (m)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.6
4	路線延長 (km)	34	34	34	34	34	34	34	34	34
5	斜面傾斜 (%)	60	70	50	50	85	80	80	85	70-80
6	道路端から崩壊発生箇所までの距離 (m)	1	2	1	1	1	1	1	2	1
7	主な通行車両	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通	一般交通
8	舗装材料	アスファルト								
9	排水溝 (深さx 幅) (m)	0.4 x 0.8	0.4 x 0.8	0.4 x 0.8	0.4 x 0.8	0.4 x 0.8	0.4 x 0.8	0.4 x 0.8	0.4 x 0.8	0.4 x 0.8

記号

- * Inter-district road
- ** Inter-provincial road 107
- *** Highway 279
- MG Muong Gion commune

4.2.3.4 Muong Gion Commune における社会経済状況

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。この目的の達成のためには、対象地域における人口や地域住民の生計手段、土地利用の実態等を現地調査によって把握する必要がある。そこで本年度は、本事業が研究対象とするベトナム北西部 Muong Gion Commune (以下、MGC) の荒廃林地を対象に、社会科学分野の事前予備調査を行った。

同調査の対象とする村を抽出するために、MGC を構成する全 19 の village について、以下の 4 指標を用いて 10 点満点で評価を行った。この合計得点の高い上位 10 village (図 4-2-3-9) を調査対象村とした。

- 植林・森林再生の経験
- 自然のリスクや災害に対する意識
- Landslide (斜面崩壊) リスク
- 研究調査活動を行うためのアクセスの良さ



図 4-2-3-9 Muong Gion Commune における事前予備調査対象の 10 village の地理的分布

これら 10 village において、(1)社会経済基礎情報、(2)インフラ情報、(3)土地利用区分、(4)住民が認識する土地利用変化とその要因、(5)災害の種類と被災内容について、文献調査および主要情報提供者へのインタビュー、フォーカスグループディスカッションといった手法を用いて、事前予備調査を実施した。以下、項目ごとに概要を報告する。

(1) 社会経済基礎情報

サンプル village の人口については、中央値が 524.5 人だが、人口が最も多い Xa と少ない Huoi Teo はそれぞれ 1,283 人、152 人と、バラつきがある (SD=341.5)。サンプル village の住民の平均年収は 1,000 米ドル前後である (図 4-2-3-10)。住民の主な収入源は農作物生産および家畜生産となっている (図 4-2-3-11)。主な農産物は、米(水稻、陸稻)、トウモロコシ、キャッサバ、大豆、ピーナッツ、セサミ、サツマイモ、サトウキビである。

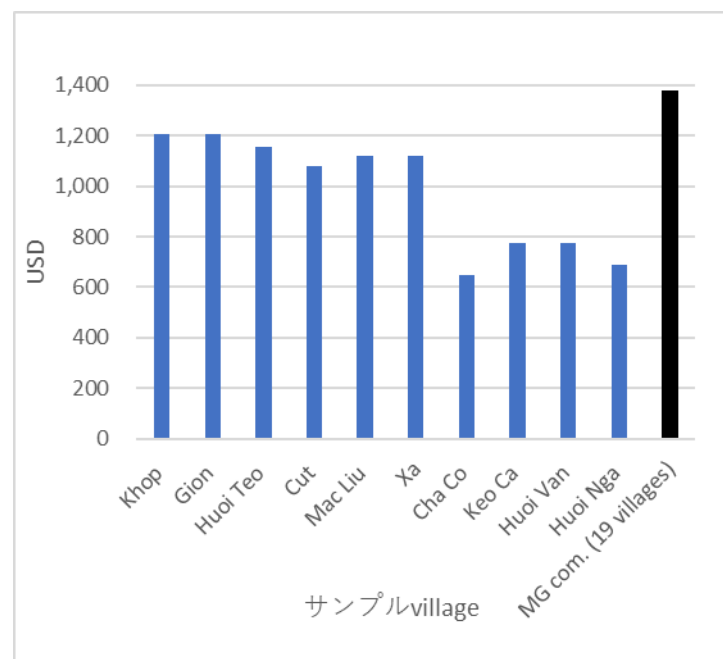


図 4-2-3-10 サンプル village の住民の平均年収 (1USD=23,200VND)

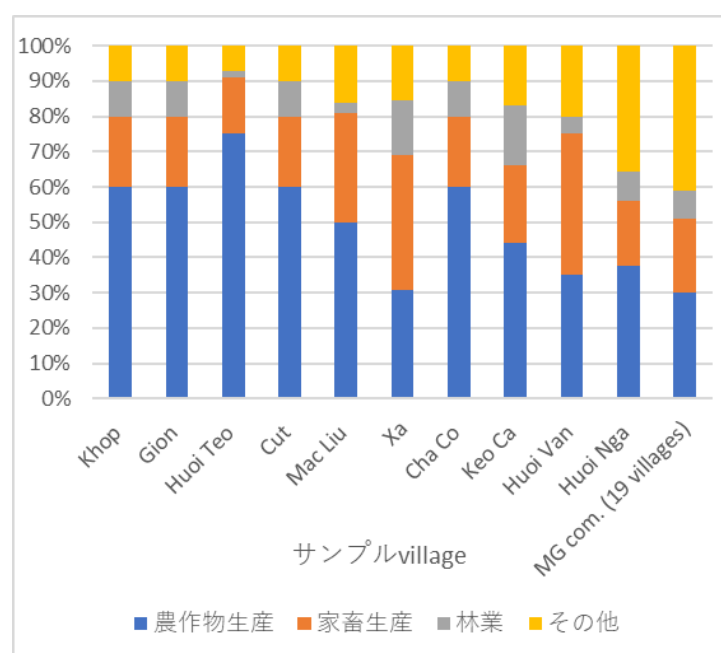


図 4-2-3-11 村民の平均年収の収入源内訳

(2) インフラ情報

MGC には国道 (National road No. 279) と Provincial road No. 107 が敷設されており、これらは Inter-district road、Inter-commune road と兼用されている (表 4-2-3-3)。現時点で、図 4-2-3-2 で示した斜面崩壊及び道路調査が行われた village は、Khop、Gion、Cut、Mac Liu の 4 つである。水稻農耕を支える灌漑施設については、Khop、Gio、Xa には公共の灌漑ダムが、Huoi Teo と Cut には水路が建設されているものの、その他の村については個人で購入・作成した給水管等を利用して水を引いている。Medical station (診療所) はサンプル village に存在せず、Primary school (小学校) は Gion と Huoi Teo を除き各 village に存在する。

表 4-2-3-3 サンプル village における主要道路の有無

Village	国道	Provincial road	Inter-district road	Inter-commune road	New rural road	図 4-2-3-2 調査地点
Khop		✓ (No.107)		✓ (No.107)	✓	✓
Gion		✓ (No.107)		✓ (No.107)	✓	✓
Huoi Teo				✓	✓	
Cut	✓ (No.279)	✓ (No.107)	✓ (No.279)	✓ (No.279)	✓	✓

Mac Liu	✓ (No.107)	✓ (No.107)	✓ (No.107)	✓	✓?
Xa	✓ (No.107)		✓ (No.107)	✓	
Cha Co				✓	
Keo Ca					
Huoi Van			✓ (No.107)	✓	
Huoi Nga		✓ (No.107)	✓ (No.107)	✓	

✓:あり、括弧は道路の番号

(3) サンプル village の土地利用区分

サンプル village の土地利用区分は、住宅・特別利用地、農地、森林(生産林、保安林)、その他に分けられる(図 4-2-3-12)。どのサンプル Village においても最も大きい割合を占める区分は森林であり、各サンプル village の森林被覆率は表 4-2-3-4 の通りである。

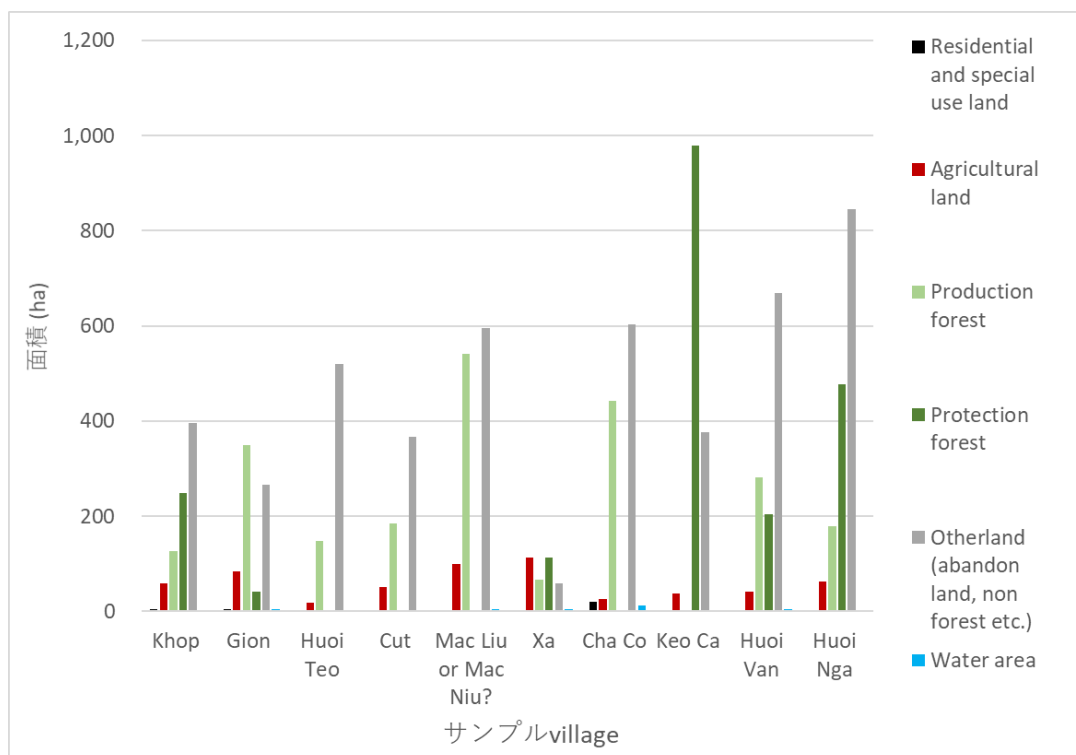


図 4-2-3-12 サンプル village の土地利用区分

表 4-2-3-4 サンプル village の森林被覆率

Khop	Gion	Huoi Teo	Cut	Mac Liu	Xa	Cha Co	Keo Ca	Huoi Van	Huoi Nga
45%	52%	22%	30%	43%	50%	40%	70%	40%	42%

(4) 住民が認識する土地利用変化とその要因

2010~2020 年の間にサンプル village における住民が認識した森林と農地の面積変化は表 4-2-3-5 の通りである。森林面積については、ほぼすべてのサンプル village において住民は拡大したと認識している。この拡大の主な理由は JICA の持続可能な自然資源管理プロジェクト (Sustainable Natural Resources Management, SNRM) またはベトナム政府の 661 プログラムによる、植林(マツ、Pinus massonianna)、天然植生更新補助、森林保護パトロール活動による。すべてのサンプル village にて SNRM が実施されている。農地面積変化についての住民の認識は、village ごとに異なる。農地面積拡大は、灌漑システムや最新機器の導入といった農業生産性向上のための方策の実施が功を奏した結果であり、農地面積縮小の理由には、土地劣化による生産性の低下や農業に投入する労働量が低下したことなどが挙げられた。

表 4-2-3-5 サンプル village の住民が認識した森林と農地の面積変化とその要因

Village	森林面積	森林面積変化の理由	農地面積	農地面積変化の理由
Khop	↑	SNRM/JICA (2016-2019)	→	
Gion	↑	661 (2010)、 SNRM/JICA (2016)	→	
Huoi Teo	↑	SNRM/JICA (2017-)	→	
Cut	↑	661 (2008-2010)、 SNRM/JICA (2016)	→	
Mac Liu	↑	SNRM/JICA (2017-2018)	↓	土地劣化 (生産性低下)
Xa	↓ (2010-2015) ↑ (2016-2020)	宅地化 SNRM/JICA (2017-2018)	↑	灌漑システム
Cha Co	↑	SNRM/JICA (2016-2019)	↑	水田拡大
Keo Ca	↑	SNRM/JICA (2016-2019)	↓ (高台) ↑ (平地)	土地劣化 (生産性低下) 最新機器導入 (生産性向上)
Huoi Van	↑	SNRM/JICA (2017)	↓	農業分野の労働力不足 (他分野への移行)
Huoi Nga	↑	SNRM/JICA (2016-2019)	↓	土地劣化 (休耕地化)

↑ : 面積の拡大、↓ : 面積の縮小、→ : 面積維持

(5) 災害の種類と被災内容

2010~2020 年の間にサンプル village における住民が経験した災害は表 4-2-3-6 の通りである。すべてのサンプル village が経験した Hailstone(ひょう)を除き、経験した災害の種類は village ごとに異なる。これら災害の中で本事業が取り扱う「ベトナム北西部 MGC での治

山技術」と関係の深い主な災害は、Flood（洪水）、Flash flood（フラッシュフラッド）、Landslide（斜面崩壊）、Forest fire（森林火災）であると考えられる。これら 4 災害による、サンプル村にての主な被災内容は、水田、居住地、道路の破壊とそれに伴う修復費用や交通渋滞の発生、森林の消失等であった（表 4-2-3-7）。

表 4-2-3-6 サンプル village が経験した災害

Village	Flood	Flash flood	Land slide	Forest fire	Hails tone	Cyclone	Hoar frost	Frost	Disease	Cold weather	Whirlwind
Khop		✓	✓		✓	✓					
Gion		✓		✓	✓	✓	✓		✓		
Huoi Teo		✓			✓	✓		✓		✓	
Cut	✓		✓		✓	✓	✓			✓	
Mac Liu		✓			✓	✓					
Xa	✓		✓	✓	✓	✓					
Cha Co					✓	✓				✓	
Keo Ca					✓	✓				✓	
Huoi Van					✓					✓	✓
Huoi Nga					✓					✓	✓

✓:あり

表 4-2-3-7 サンプル village における Flood（洪水）、Flash flood（フラッシュフラッド）、Landslide（斜面崩壊）、Forest fire（森林火災）の主な被災内容

Village	Flood	Flash flood	Land slide	Forest fire
Khop		●2017 年 8 月、90 世帯の農地（水田等 27,280m²）に深刻な影響 ●2020 年 6 月、27 世帯に影響（600m² の苗代と 1,641m² の水田が破壊）。	●詳細記録なし	
Gion		●5ha の農地を破壊		●年間 2～3ha 発生し、大気汚染や森林消失を引き起こす
Huoi Teo		●2017 年、16 世帯 1,790m ² の水田に被害		

Cut	●土で埋まった水田を ショベルカーを借上 げ改修	●交通渋滞 ●道路の修復
Mac Liu	●水田と池に被害	
Xa	●2020 年 6 月、27 世 帯 3,000m ² の土地に 深刻な影響	●2016 年に Pu Kho および Huoi Co Xo で発生 ●Pu Kho と Tenh Huon において毎 年散発的に発生

4.2.4 まとめおよび今後の検討事項

日本の治山技術をベトナムに効果的に適用する手法を開発するため、多様なデータソースの活用及びカウンターパート(VAFS)との連携、情報交換によってベトナム北西部の国土と山地災害に関する知見を収集し、これを分析した。

ベトナム北西部は、同国で最も山地が卓越する地域である。災害履歴等に基づき設定された 4 調査地区の時系列衛星画像から 9 箇所の斜面崩壊地を抽出した。斜面崩壊の多くは概ね 2014 年から 2019 年の間に発生した表層崩壊だが、一部には最大で長さ 650 m、幅 100 m 程度の深層崩壊も含まれた。イエンバイ省(Yen Bai)西部で発生した表層崩壊群は草地で発生しているため、今後は森林伐採の影響の検討が必要である。また現地では、斜面崩壊のみならず表面侵食に伴う多量の土砂流出の問題、すなわちダム湖の埋設、河床上昇による土石流やフラッシュフラッド災害の深刻化などの問題が鮮明化した。従って、日本の治山技術の同国への展開においては、現地ニーズを適切に汲み取りつつ、斜面崩壊の他に表面侵食対策も含めた山地の資源管理に資する技術も必要と考えられた。

カウンターパート(VAFS)との協議により、ベトナム北西部の調査対象 4 地区の 1 つであるソンラ省 Muong Gion Commune を共同調査地に設定し、VAFS が主体となって道路沿いで発生した斜面崩壊、道路開設状況、および地域の社会経済状況に関する現地調査を実施した。

現地調査の対象となった 21 箇所の斜面崩壊は概ね「表層崩壊」であり、一部は道路開設の影響を受けていると推察された。数カ所では道路法面に押え盛土工や柵工に相当する治山施設が散見されたが、多くの斜面崩壊地では道路という重要な保全対象が存在するにもかかわらず、長期間にわたって特段の対策はなされていなかった。道路脇には素掘りタイプの大型の排水溝が認められた。これは崩土の堆積により排水機能が低下することを見込んで、サイズをあらかじめ大きくしたものと考えられる。日本の簡易な治山施設を現地へ導入するためには、こうした治山施設や道路施設のニーズ、資材調達、コストに関する情報収集が今後さらに

重要になると考えられる。

Muong Gion Comune 内にある 10 箇所の village をサンプルとして選定し、文献調査やインタビュー等によって各 village の社会経済状況や現地住民の意識等を調査した。サンプル village における住民の主要収入源は農作物生産および家畜生産で平均年収は 1000 米ドル前後である。また森林被覆率は 22%~70%とバラツキがあるが、森林面積についてはほぼすべてのサンプル village の住民は拡大したと認識している。拡大理由は JICA の持続可能な自然資源管理プロジェクト(SNRM)やベトナム政府の 661 プログラムなどの外部の働きかけによるものと考えられる。サンプル village において治山技術の関連の深い災害経験は Flood(洪水)、Flash flood(フラッシュフラッド)、Landslide(斜面崩壊)であった。

4.3 リモートセンシング技術を活用したリスクマップ作成

4.3.1 リスクマップに対するニーズと課題

気候変動により台風の巨大化や豪雨頻度・強度の増加、それにともない山地地形の国々では土砂災害の多発が懸念される。開発途上国においては限られたリソースで災害対策を立てる必要があることから、災害の発生の可能性と人間の営みを勘案した危険度を評価しておくことが必要である。しかし、開発途上国では危険度評価を行うために必要となる空間情報が未整備のため危険度評価が困難である。また、地上での情報収集には限界がある。このため、人口分布や生態系の防災・減災機能を既存の衛星画像といったリモートセンシングデータからどのように抽出するかが課題であり、AI 等最新技術を活用し信頼性の高い危険度把握の技術の開発が必要である。

本課題では、対象地域においてリモートセンシング技術および現地調査によって収集された既往の崩壊履歴および地形、地質、森林被覆、降水量等の各種情報を GIS 上で重ね合わせ、解析処理することにより、対象地域の斜面崩壊リスクマップおよび森林管理マップを作成することを目的とする。

本年度は、ベトナム国におけるリモートセンシングデータの情報や斜面崩壊、林地荒廃および森林管理に関する現地情報を入手し、GIS 上で重ね合わせられるように取得データの整理をするとともに、Google Earth Engine を用いて、衛星画像から低コストで効率的に新規発生崩壊地を検出する手法を開発した。

4.3.2 調査対象地

本課題ではベトナム北西部山地を調査対象地とした。斜面災害の発生状況を確認するため、近年の崩壊の発生状況を Google Earth Pro の衛星画像から把握した(図 4-3-2-1;対象地域における斜面崩壊の現況については 4.2 において報告)。その結果、Yen Bai 省中西部から Son La 省東部、および Lai Chau 省東部の山岳地帯では概ね 2014 年から 2018 年の豪雨の際に斜面崩壊の発生が顕著に認められた。このため、本課題では Yen Bai 省中西部を中心に解析を行うこととした(図 4-3-2-2a、4-3-2-2b)。

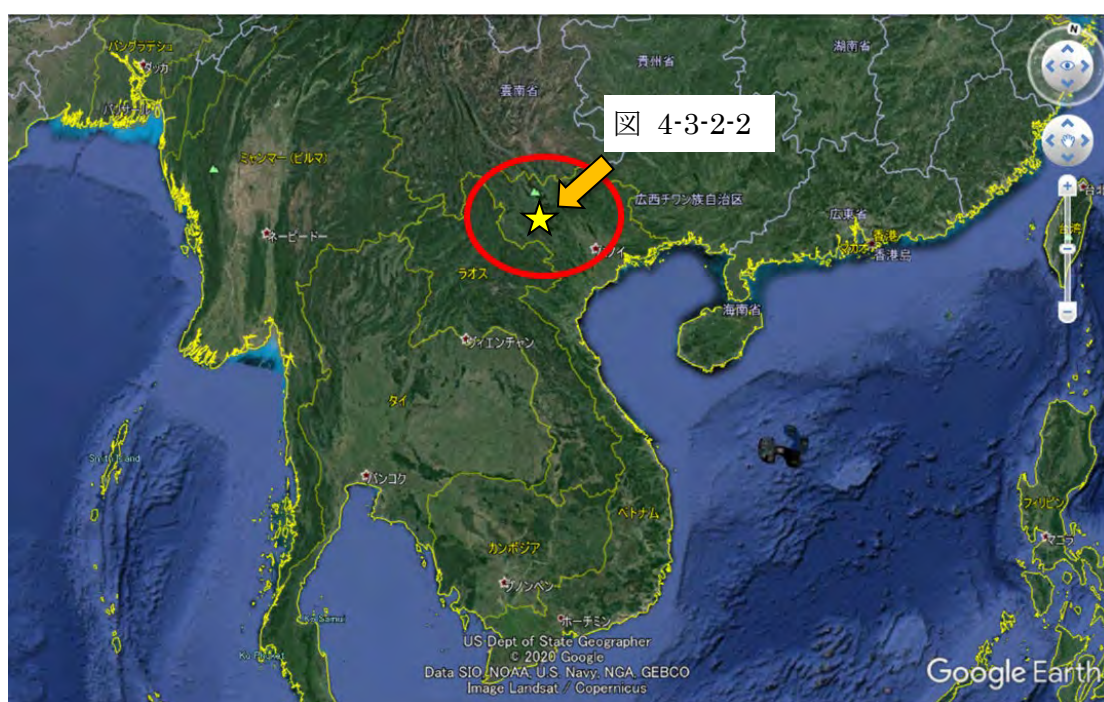


図 4-3-2-1 対象地域

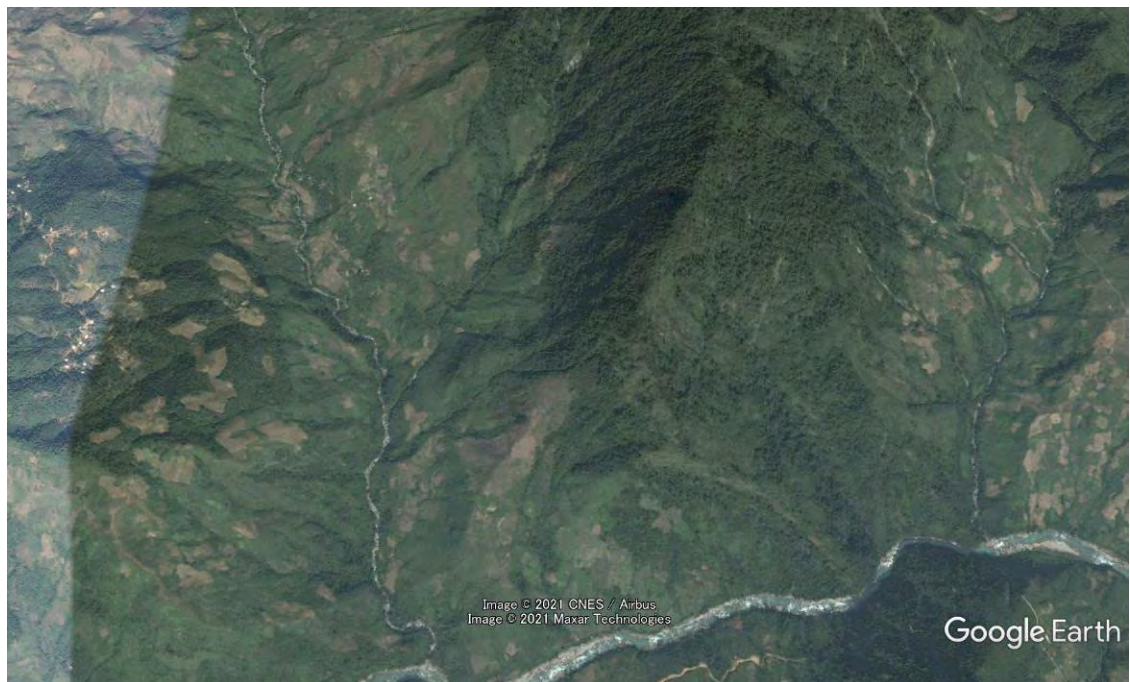


図 4-3-2-2a Google Earth Pro から取得した YenBai 省中西部の衛星画像

(画像取得日 2016 年 3 月:災害発生前)

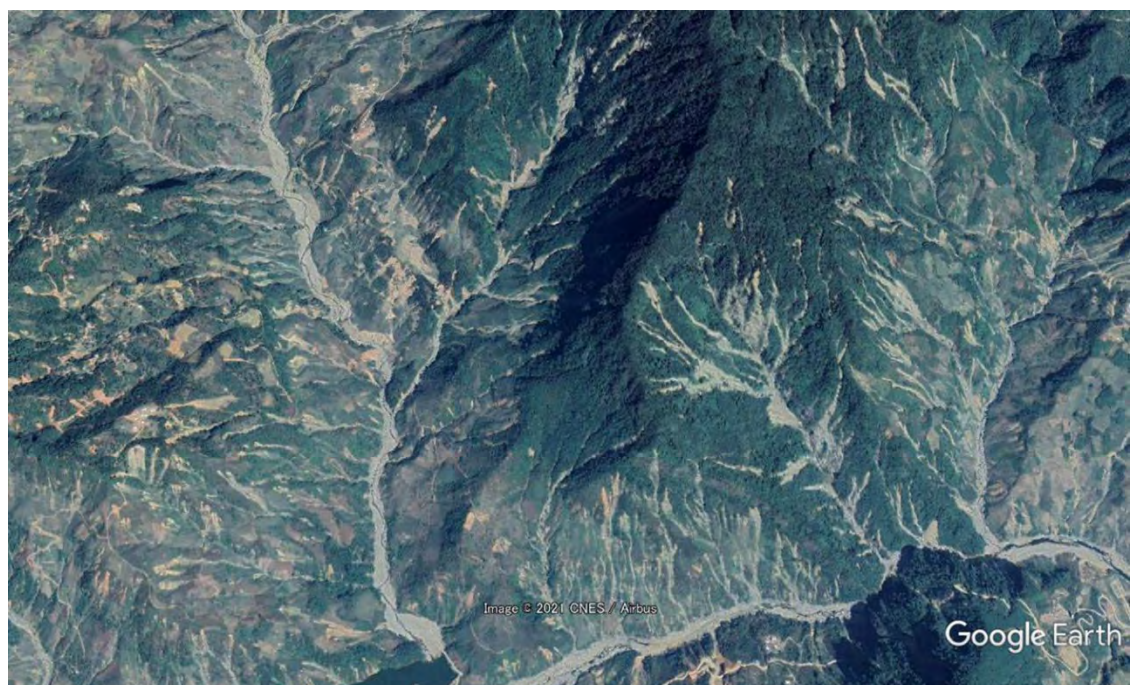


図 4-3-2-2b Google Earth Pro から取得した YenBai 省中西部の衛星画像

(画像取得日 2019 年 2 月:災害発生後)

4.3.3 調査（解析）方法

調査（解析）方法については図 4-3-3-1 のワークフローで示すとおりである。衛星画像は広域で撮影され、汎用的な使用が容易な Sentinel-2(分解能 10-60m)を使用した。今回の解析手法については、試行として崩壊の教師データが存在する国内の災害を対象にランダムフォレストによる土地被覆解析を行った。今回の解析手法による崩壊地については、林野庁が作成した該当地域の崩壊地のポリゴンシェープファイルと比較し、検出率を算出することで検証した。国内での検証は、平成 30 年 7 月豪雨によって甚大な被害を生じた東広島市の山地斜面で行った。国内の教師データを用いて検証した土地利用解析フローは、少なくとも同じ衛星（ここでは Sentinel-2）が撮影した画像を使う限り、ベトナムにおいても適用可能であると考えられるので、この解析フローをベトナムの対象地域に適用して土地利用を解析した。解析結果については、高解像度衛星から目視で判読した崩壊地データを用いて検証した。今回、判読に使用した衛星画像は Pleiades(分解能:2m)であり、画像をパンシャープン化した、分解能 0.5m の画像から崩壊地を判読した。判読した崩壊地からポリゴンシェープファイルを作成し、解析結果の検証に使用した。

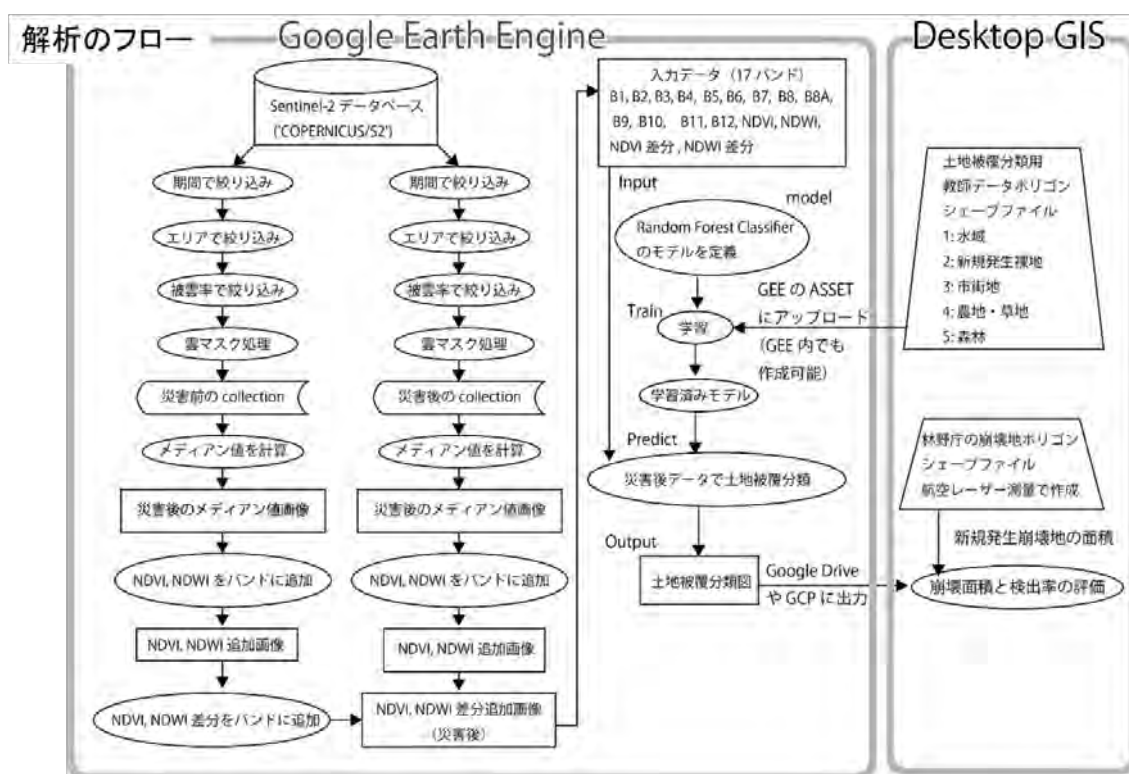


図 4-3-3-1 解析方法（ワークフロー）

4.3.4 調査（解析結果）：国内での検証結果

平成 30 年 7 月豪雨によって甚大な被害を生じた広島県東広島市の山地斜面において、図 4-3-3-1 に示すワークフローの手順により Sentinel-2 が撮影した災害前後の画像から、崩壊地の抽出を行った。抽出結果については、林野庁が判読した、実際に発生した崩壊地（ポリゴンデータ）と比較し、どの程度、検出できたのかを検証した。対象とした地域を図 4-3-4-1 に示す。解析では、教師データとして崩壊地（新規発生裸地）のほか、農地・草地、市街地、森林、水域を画像データの任意のエリア（図 4-3-4-1 参照）より与え、災害前後の画像データを解析することで、崩壊地を新規発生裸地として抽出した。解析結果については図 4-3-4-2 に示す。今回の解析により抽出された斜面崩壊を検証するために、実際に発生した崩壊面積と検出された新規発生裸地を比較した（図 4-3-4-3）。図 4-3-4-4 には今回の解析で抽出した崩壊地と実際の崩壊地の個数（上段のグラフ）および抽出割合（下段のグラフ）を示す。国内での解析では、小規模な崩壊地の検出は難しいものの、崩壊面積が 500m^2 以上の崩壊地については半分以上、検出できていることが確認された。この検証結果は、精密な崩壊分布図を作成することは難しいものの、災害の現況把握として使用することは十分に可能であることを示すものであると考える。

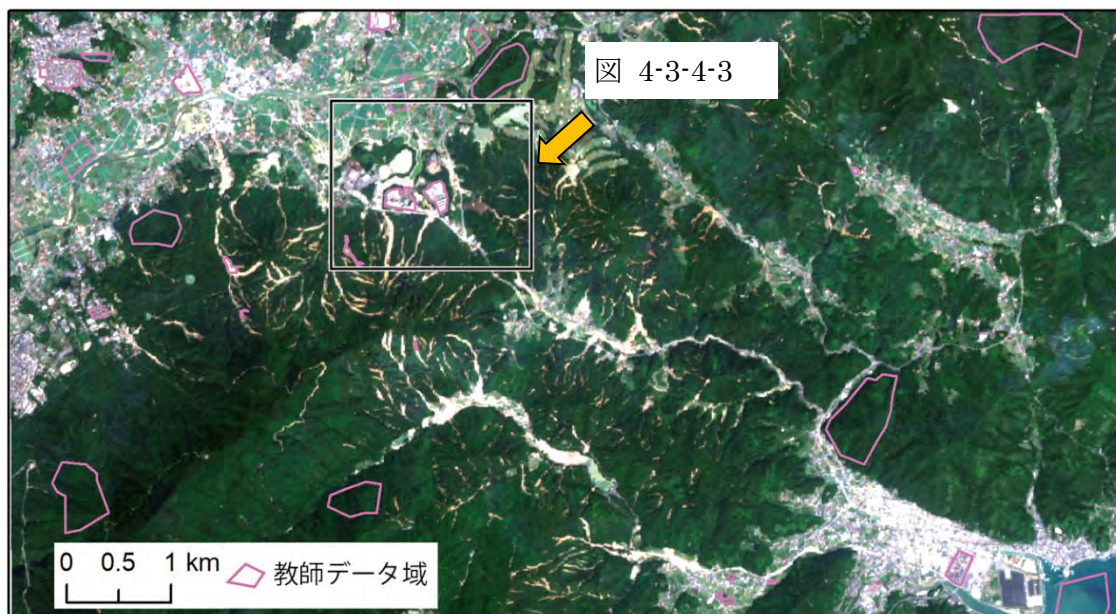


図 4-3-4-1 国内での解析範囲（広島県東広島市）



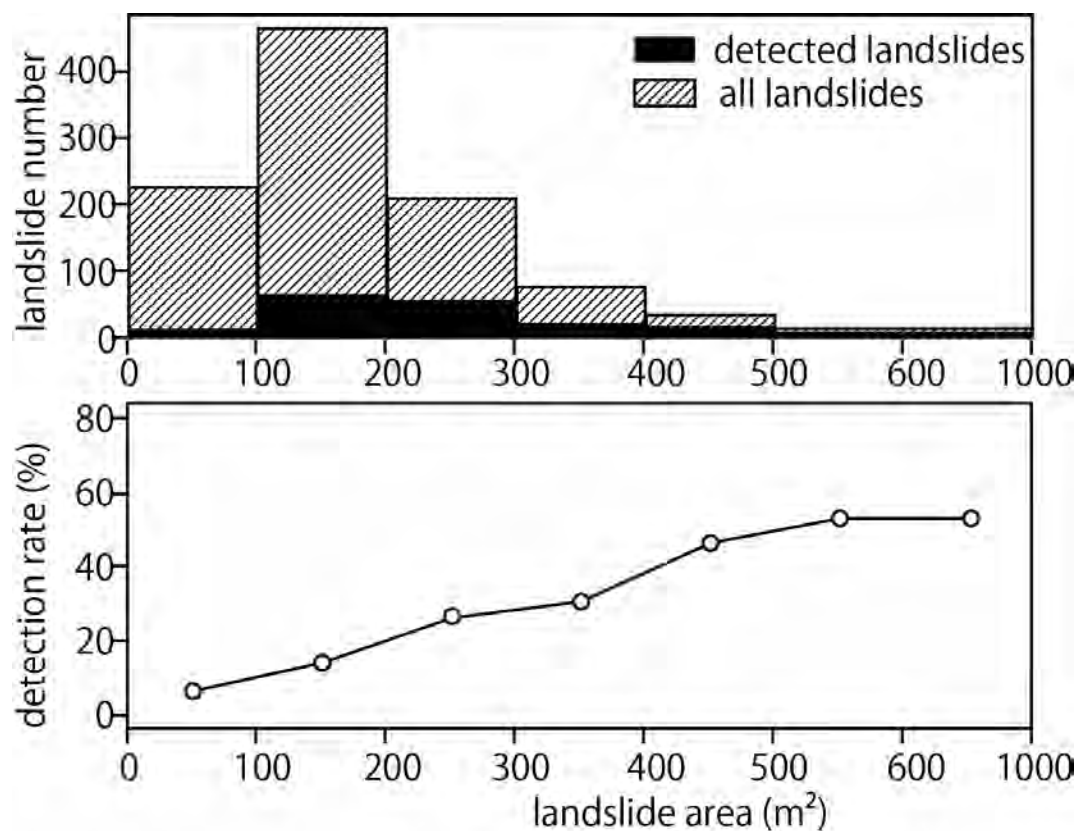


図 4-3-4-4 実際の崩壊地との比較

上段:崩壊の大きさ別に抽出した崩壊地と実際の崩壊地(個数)の比較
下段:抽出割合(%)

4.3.5 調査（解析）結果：ベトナムでの適用結果

4.3.4 で報告した国内での検証結果を受け、図 4-3-2-1 および図 4-3-2-2 に示すベトナムの Yen Bai 省中西部を対象として崩壊地を検出した。結果の一部については図 4-3-5-1 および図 4-3-5-2 に示す。解析により抽出された崩壊地の検証は、災害前後の高解像度衛星 Pleiades のパンシャープン画像(解像度 0.5m)より災害で新たに発生した裸地(崩壊地)を目視で判読し、判読結果と解析結果を比較することで検証した。具体的には、解析した範囲の一部、東西 3km、南北 2km の範囲を調査区として設定し(図 4-3-5-3)、設定範囲の災害前後の高解像度衛星 Pleiades のパンシャープン画像を比較して、目視判読で抽出した新規発生裸地(崩壊地)をデジタイズしてポリゴン化し、さらに 10m 解像度のラスター化したもの(図 4-3-5-4)を解析結果と比較することで検証した。検証結果を図 4-3-5-5 に示す。検証結果が

ら、国内での検証結果と同様に、幅 30m 以下の小規模な崩壊についての検出は難しいものの、地域の災害の発生状況の概要を把握することは、解析例を増やして分類精度の向上を図ることにより、Sentinel-2 の衛星画像でも十分に対応できることが考えられた。

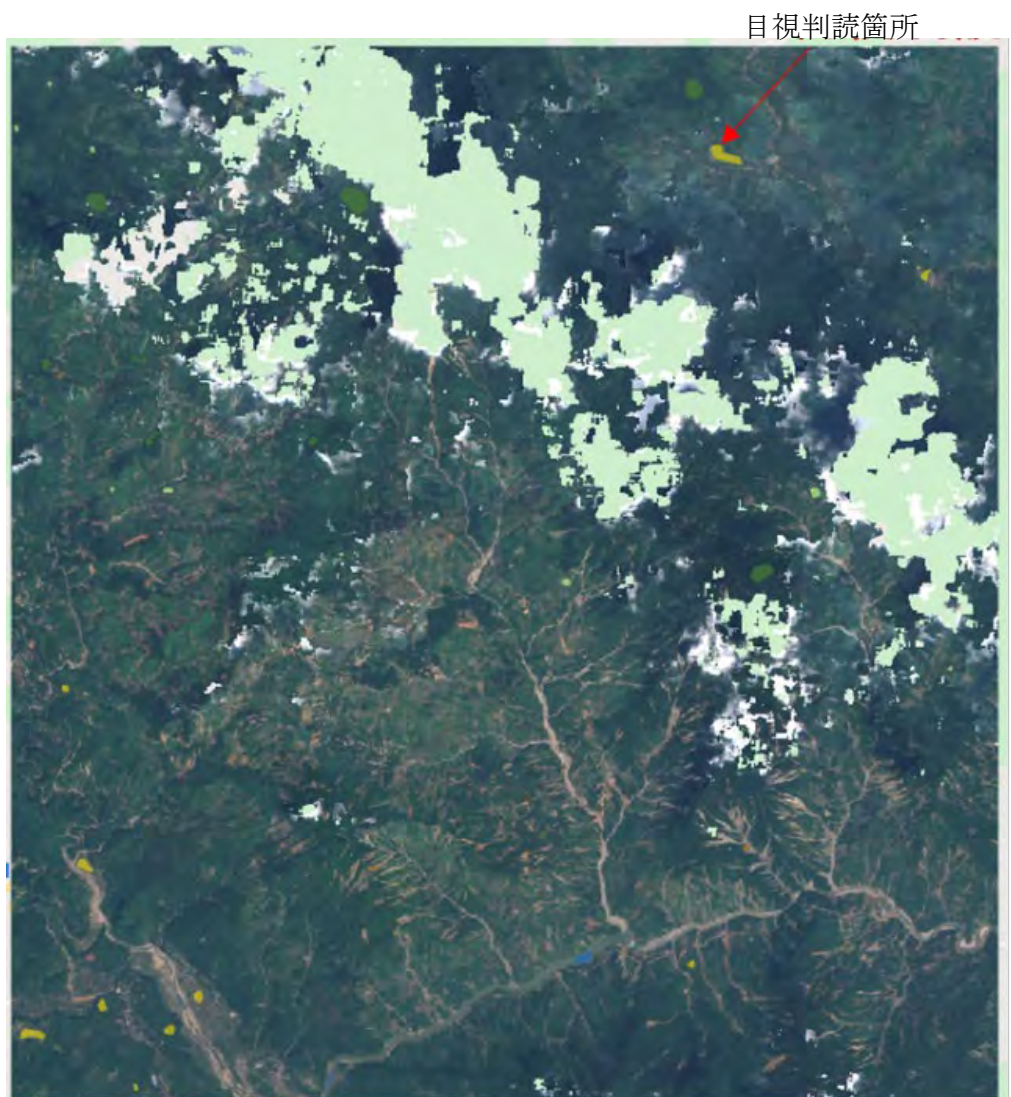
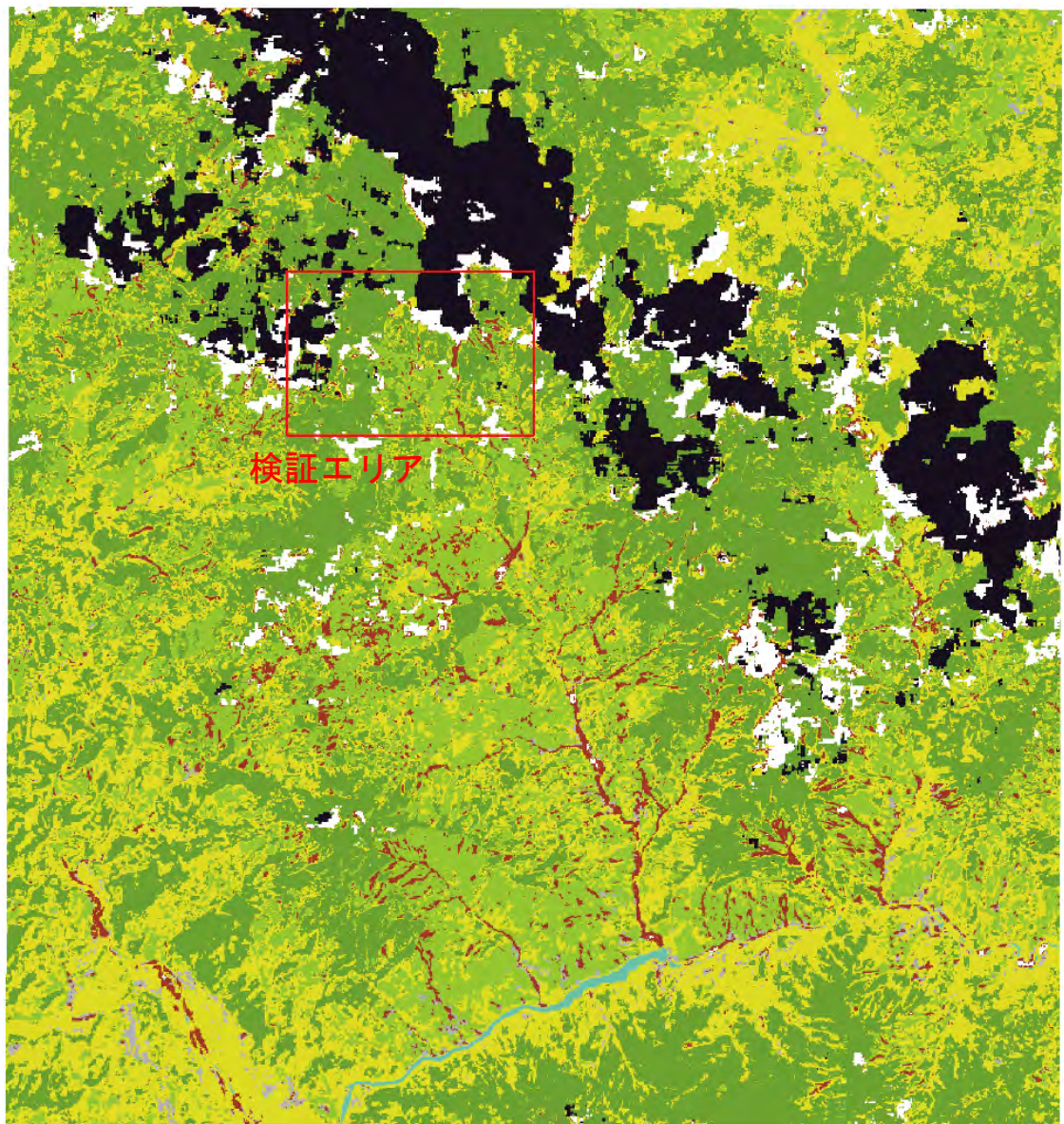


図 4-3-5-1 解析に使用した災害後の YenBai 省中西部の Sentinel-2 画像



凡例

■ 雲マスク	□ 雲	■ 新規発生裸地	■ 農地	■ 草原	■ 森林	■ 水域	■ 市街地
--------	-----	----------	------	------	------	------	-------

図 4-3-5-2 解析結果

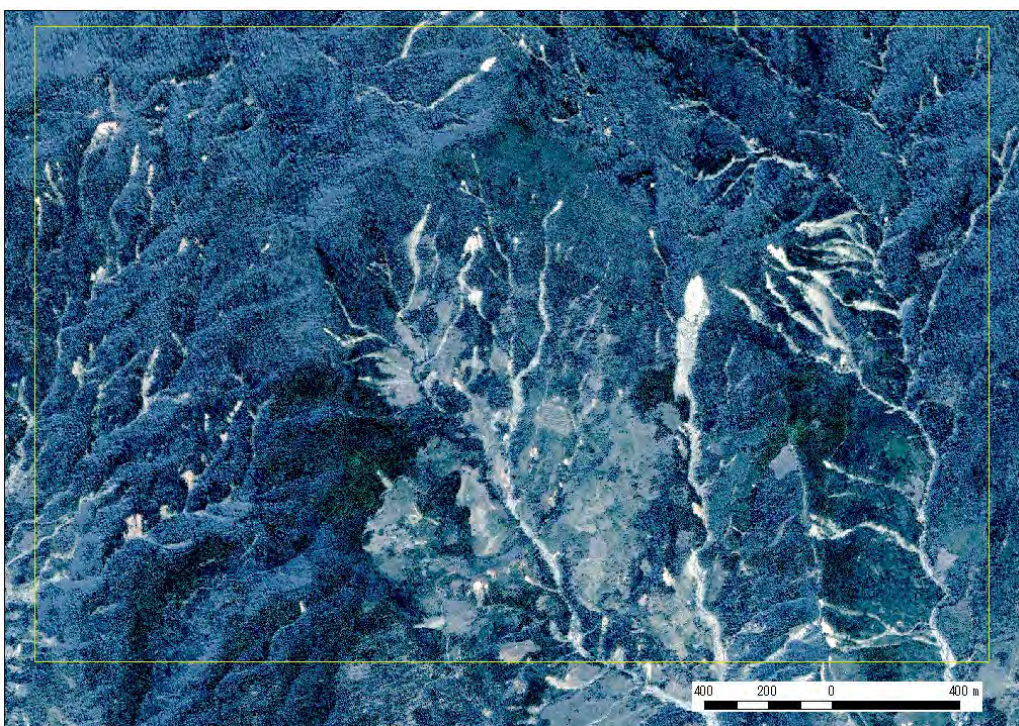
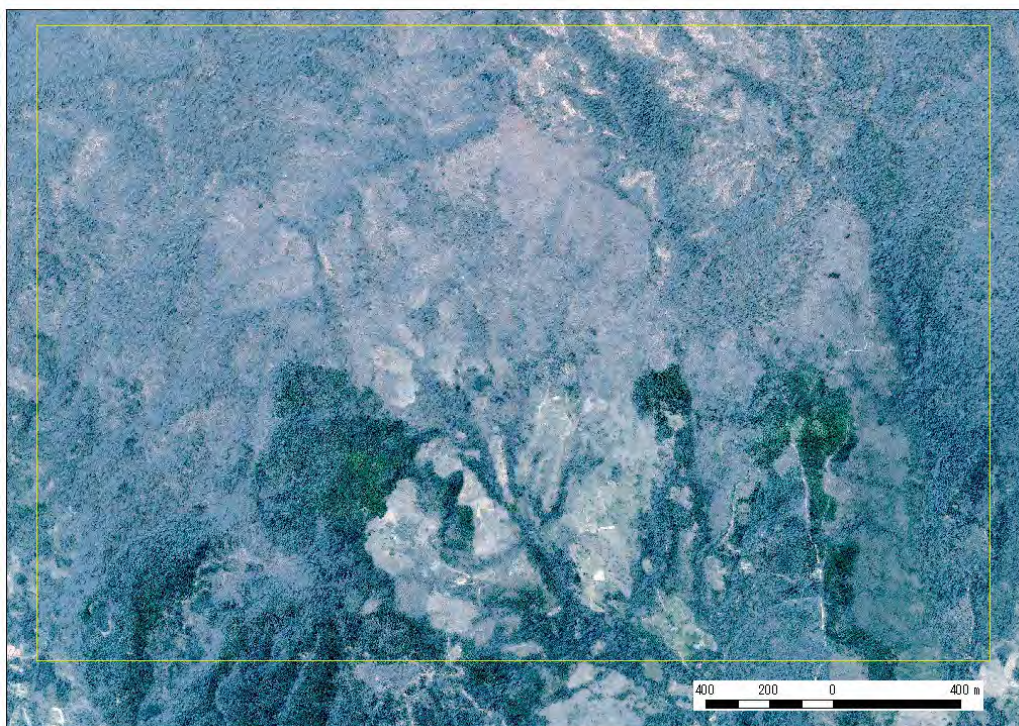
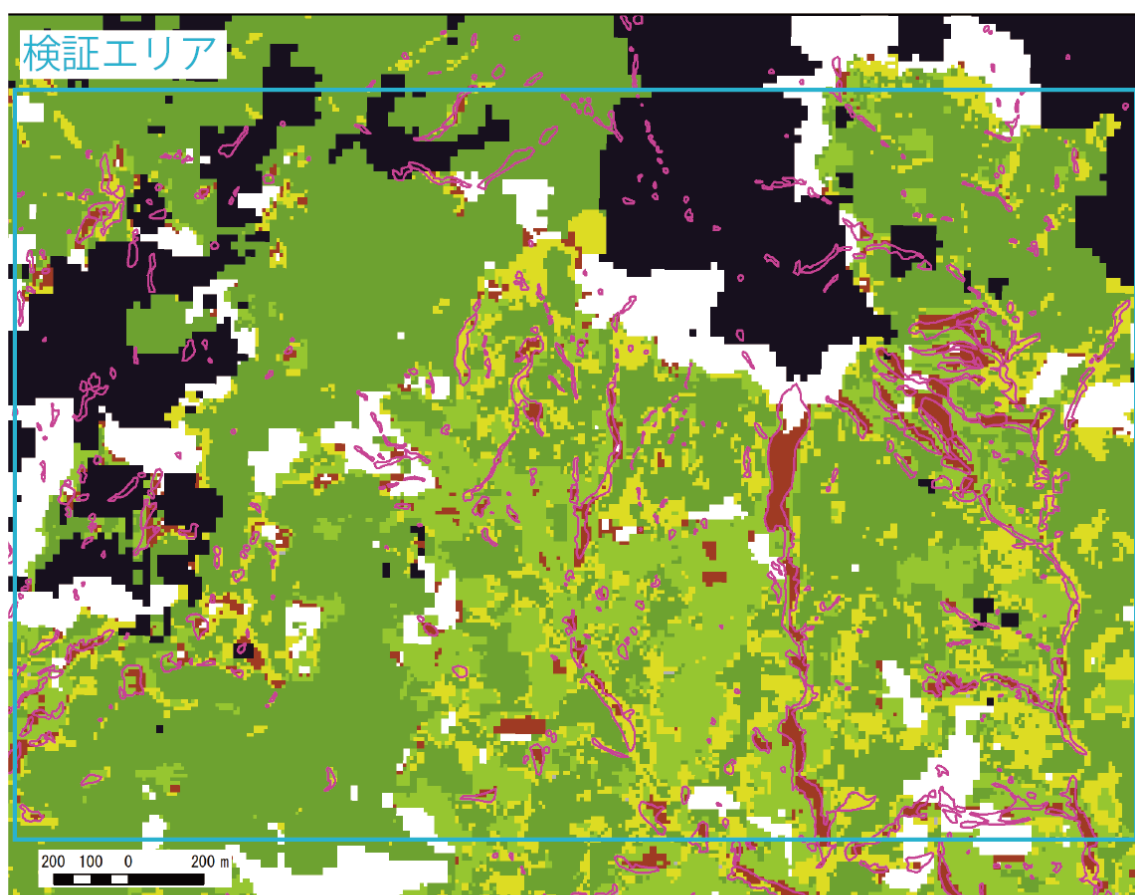


図 4-3-5-3 検証エリアにおける災害前(上)と災害後(下)の Pleiades パンシャープン画像

検証エリアの位置は図 4-3-5-1、および図 4-3-5-2 に示した。



凡例

■ 雲マスク □ 雲 ■ 新規発生裸地 ■ 農地 ■ 草原 ■ 森林 ■ 水域 ■ 市街地

図 4-3-5-4 検証エリアにおける土地分類結果と Pleiades 画像から判読した崩壊地(赤紫枠)

検証エリアの位置は図 4-3-5-1、および図 4-3-5-2 に示した.

		予測	
		裸地以外	裸地
Pleiades 判読	裸地以外	55878	1928
	裸地	1261	933

		予測値・推定値	
		陰性	陽性
真値・実測値・正解	陰性	TN 真陰性	FP 偽陽性
	陽性	FN 偽陰性	TP 真陽性

正解率 (accuracy) = 0.949

$$\text{accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

適合率 (precision) = 0.425

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

再現率 (recall) = 0.326

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

図 4-3-5-5 検証結果

4.3.6 残された課題

図 4-3-5-1 および図 4-3-5-2 でも示されるが、ベトナムでは衛星の撮影画像に雲が多いことが多い。今回の解析手法では、災害前後のそれぞれ決められた期間内に撮影された複数の Sentinel-2 画像から雲のない範囲を合成 (composite) し、差分をとって解析しているが、どちらかの画像に雲があると差分計算ができないため、その場合には解析不能エリアが出る。解析不能エリアをなるべく生じさせないためには、解析期間を長く取るなどして雲のない画像を災害前後で合成し、解析する必要がある。一方で、図 4-3-6-1 は図 4-3-2-2a、2b と同じ場所の図 4-3-2-2b の画像が撮影されてから 1 年半ほど経過したころの画像であるが、図 4-3-2-2b で見られた崩壊地の多くが緑でおおわれていることから、ベトナムでは崩壊地での植生回復が早いことが示唆された。このことから、とくに災害後に撮影された衛星画像の解析期間を長く取りすぎると、植生の状態が変化して、崩壊地の検出精度が大きく低下する可能性がある。この問題を解決するためにはより高頻度に撮影が行われる Planet 衛星の導入や、雲の影響を受けない SAR 系の衛星データから崩壊地の抽出する方法を検討する必要があると考える。

ベトナム北部の災害については JAXA をはじめとする国内外の様々な機関が衛星データを利用した解析、研究に取り組んでいることから、これらの機関との災害データベース等との連携および差別化が重要となると考える。このためには現地のカウンターパートと連携し、例えば現地の情報で検証された崩壊発生情報をデータベース化して、半自動的に崩壊地の衛星データの解析を行いながら、崩壊地データベースの品質をお互いに協力しながら向上させてい

くことが有効であると考え(図 4-3-6-2 参照)。

また、斜面災害のリスクを評価するにあたっては、諸元となる地形、地質、気象情報のほかに、現地の土地利用(植生被覆)状況を把握することも必要である。これらの情報の収集整備が、上述する課題と併せて、今後と課題となると考える。これらの情報を利用することは、今後の現地検証による崩壊多発化の原因解明および対策を有効に進めることになると思うが、そのためにはやはり現地のカウンターパートと連携し、協力して進めていくことが不可欠であると思う。



図 4-3-6-1 Google Earth Pro から取得した YenBai 省中西部の衛星画像

(画像取得日 2020 年 11 月、図 4-3-2-2a、2b と同じ場所)

データベースと衛星データ解析の連携技術(開発中)

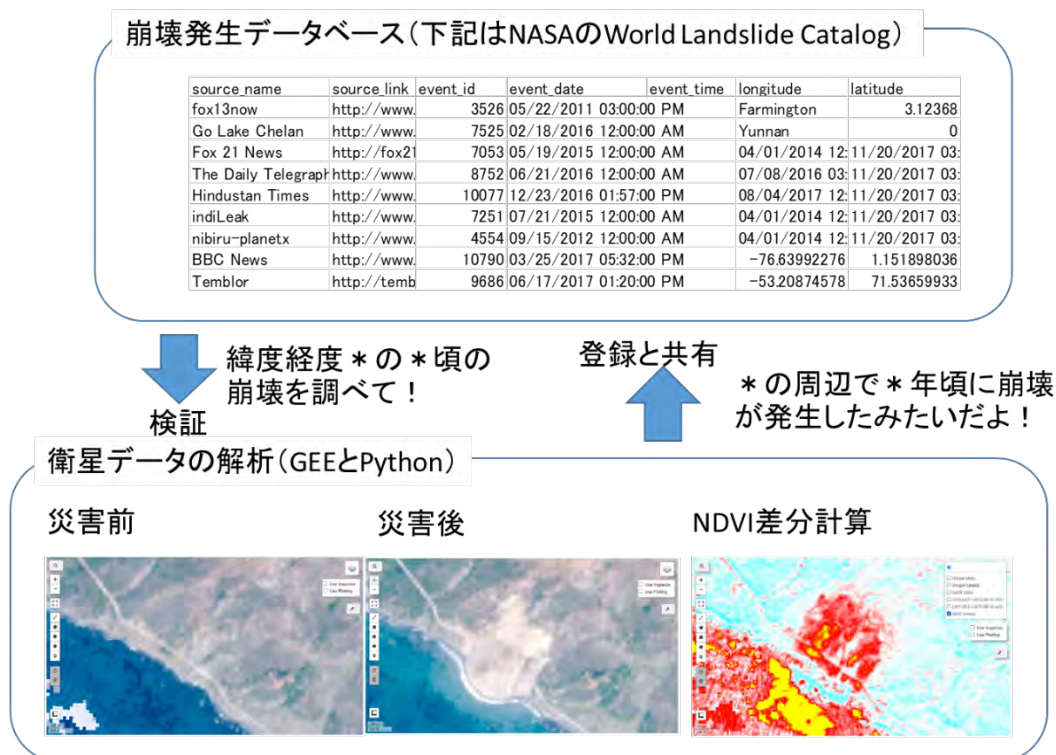


図 4-3-6-2 データベースと衛星データ解析の連携技術

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

4.4.1 地球規模の気候変動下におけるマングローブ林を取り巻く状況と課題

マングローブ林は地域住民に利用されつつ様々な生態系サービスを提供している(Ewel et al. 1998)。一方で、マングローブ生態系の炭素蓄積機能は、その格段に高い生産性の下、同一気候帯に成立する陸域生態系より高いとされ(United Nations Environment Programme 2009, Alongi, 2020)、マングローブ林の保全と再生は気候変動緩和策の有効な手段の一つであると考えられている(Alongi, 2018)。加えて、マングローブ林は、気候変動による海面上昇や、海水温度の上昇に起因して巨大化が想定される台風による高潮リスクの軽減、沿岸域の浸食防止など、国土保全のための防災・減災を含む気候変動の適応策の一翼としても期待されている部分がある(International Federation of Red Cross and Red

Crescent Societies 2011, Huxham et al. 2017)。しかし、現状は、大規模な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林の消失や劣化が進行しており(Alongi 1998)、さらには高潮被害が顕在化している地域もみられる。このため、マングローブの再植林による沿岸域の保全活動が活発化してきているが、マングローブの生育適地の特殊性から、胎生種子の定着や植栽した実生の活着が阻害され、植林後の生育が良好でなかった事例も報告されている(International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies 2011)。これは、どのようなエリアにどのような樹種を植栽して回復させるのがよいのかというマングローブの「適地適木」に関する知見が不足していることに起因している。こうした背景から、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、沿岸生態系における気候変動の緩和・適応策の鍵となるマングローブ林の機能の評価とともに、これまでのマングローブ林の修復植林活動実績を整理し、マングローブ林の保全や修復に関する技術的指針の提示が急務となっている。

4.4.2 ベトナム社会主義共和国におけるマングローブ林の分布や現況とそれらの変遷

マングローブ林は、塩性湿地や海草藻場とともに、熱帯～亜熱帯域の沿岸生態系を構成する主要な生態系である。東南アジアにおけるマングローブ林は、世界のマングローブ林面積の約 28%を占めている(Veettil et al. 2019)。

本課題において研究対象地域としているベトナム社会主義共和国(以下、「ベトナム」という。)には、2015 年現在、27 万 ha のマングローブ林が分布するとされる(FAO 2015)。面積ではインドネシアやマレーシア、インドなどには及ばないレベルであるが、ベトナムのマングローブ林は総延長 3260 km の海岸線の相当部分を占有し、生態学的にも、経済的にも、また環境保全・減災の観点からも重要な役割を持つ生態系として認識されている。また、ベトナムにおける大半のマングローブ林は、地球規模でみても非常に重要な河川デルタ、すなわち、北部地域は紅河デルタと、南部地域はメコン川デルタに主に成立している(Veettil et al. 2019)。

既往研究におけるベトナムのマングローブ林の炭素蓄積量はいくつかの報告(Alongi 2012, Dung et al. 2016, Tue et al. 2014, Nam et al. 2016, Hieu et al. 2017, Hien et al. 2018)があるが、それらの結果を図 4-4-2-1 に示した。また、Alongi(2020)を参考に全球平均値との比較も図 4-4-2-1 に示した。ベトナムにおけるマングローブ林地上部バイオマス炭素(Above-ground biomass organic carbon: AGBC_{org})、地下部バイオマス炭素(但し、1m 深

まで) (Above-ground biomass organic carbon: BGBC_{org}, 1 m in depth)、土壌炭素 (Soil organic carbon: SC_{org}) および全炭素蓄積量 (Total organic carbon stock: TC_{org} stock) の平均値は、それぞれ 120 (42.2–298.1)、21.8 (8.7–52.7)、583.0 (146.8–811.7) および 803.5 (310.3–1014.9) Mg C_{org} ha⁻¹ であった。マングローブ林の AGBG_{org}、BGBC_{org} (1 m in depth)、SC_{org} および TC_{org} stock の全球平均値は、それぞれ 109.3±5.0 (1.9–537.7)、80.9±9.5 (0.3–866.0)、565.4±25.7 (37.0–2102.7) および 738.9±27.9 (46.3–2205.0) であることから、ベトナムにおけるマングローブ林の炭素蓄積量は、BGBC_{org} (1 m in depth) を除いて、全球平均値とほぼ同様の値を示した。BGBC_{org} (1 m in depth) が低いのは、調査点数が少ないことに加え、地下部バイオマス量の調査には手間と労力を要し、困難を極めるため、定量精度にいくぶんの難があるためと推察された。このことは、ベトナムのデータに留まらず、全球データについても同様である。

また、ベトナムにおけるマングローブ林の消失・劣化とその後の修復について、その変遷を追跡するのは、入手できる資料が限定されることから容易なことではない。以下では、Hong and San (1993)、Nam et al. (1993)、向後・向後 (1997)、安食 (2002)、宮城ら (2003)、FAO (2007, 2015)、井上・藤本 (2014)、田村 (2016)、Veettil et al. (2019)などを参考に、マングローブ面積の変遷を追ってみたい。

かつて、ベトナムは東南アジアの中でも有数の豊富なマングローブ林に恵まれた国であった。ベトナム戦争以前の 1940 年代初頭には約 40 万 ha のマングローブ林が分布していたが (Maurand 1943)、インドシナ戦争などに伴う乱伐により 1962 年には 29 万 ha までに減少した (安食 2002)。さらに、その後のベトナム戦争での枯葉剤やナパーム弾の使用によって、10 万 ha 以上のマングローブ林が破壊された (Hong and San 1993, Veettil et al. 2019) とされ、1975 年には 20.5 万 ha とさらに減少したと報告されている (安食 2002, 宮城ら 2003)。ベトナムは政府主導の下、マングローブの修復植林が精力的に展開されてきたが (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies 2011a, 2011b)、それはこうした事情によるものである (安食 2002, 宮城ら 2003)。南北統一以降、政府主導の植林事業が立ち上げられ、この活動を支援する形で、デンマークや日本の赤十字社、および国際赤十字赤新月社連盟を初めとするさまざまな NGO 団体などの植林活動 (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies 2011a, 2011b) が功を奏し、1980 年には 26.9 万 ha (FAO 2007, 田村 2016)、1983 年には 25.3 万 ha まで回復、増加した (安食 2002, Veettil et al. 2019)。

一方で、1980 年代後半には、政府によるエビ輸出の奨励もあり、従来の伝統的養殖法と異なる半集約的エビ養殖 (鈴木 2003, 井上・藤本 2014) が導入された。特に 1986 年に導入されたドイモイ政策以降、この半集約的養殖法が急増し (安食 2002, International

Federation of Red Cross and Red Crescent Societies 2011, 井上・藤本 2014)、それに伴うマングローブ林の伐採、転用により、マングローブ林は再びその面積を減少させることとなり、1987年には16.1万ha(安食 2002)、2005年には15.7万ha(FAO 2007, 田村 2016)まで減少した。以降については、2010年に26.2万ha、2015年に27万haへと増加に転じている(FAO 2015)。

以上、ベトナムにおけるマングローブ林面積の時系列変化については、図 4-4-2-2 に示した。

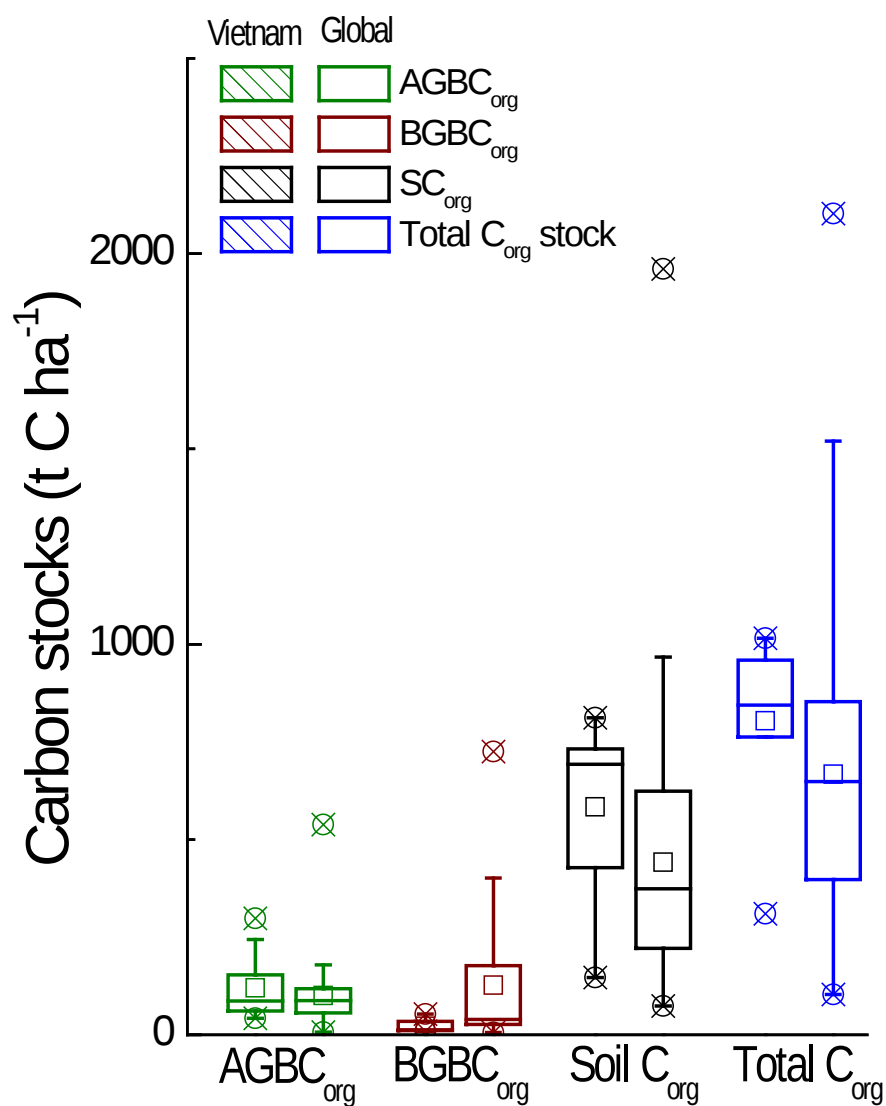


図 4-4-2-1 既往研究報告をベースとしたベトナムおよび全球データにおけるマングローブ林の地上部バイオマス炭素 (Above-ground biomass organic carbon: AGBC_{org})、地下部バイオマス炭素 (但し、1m 深まで) (Above-ground biomass organic carbon: BGBC_{org}, 1 m in depth)、土壌炭素 (Soil organic carbon: SC_{org}) および全炭素蓄積量 (Total organic carbon stock: TC_{org} stock) データの比較

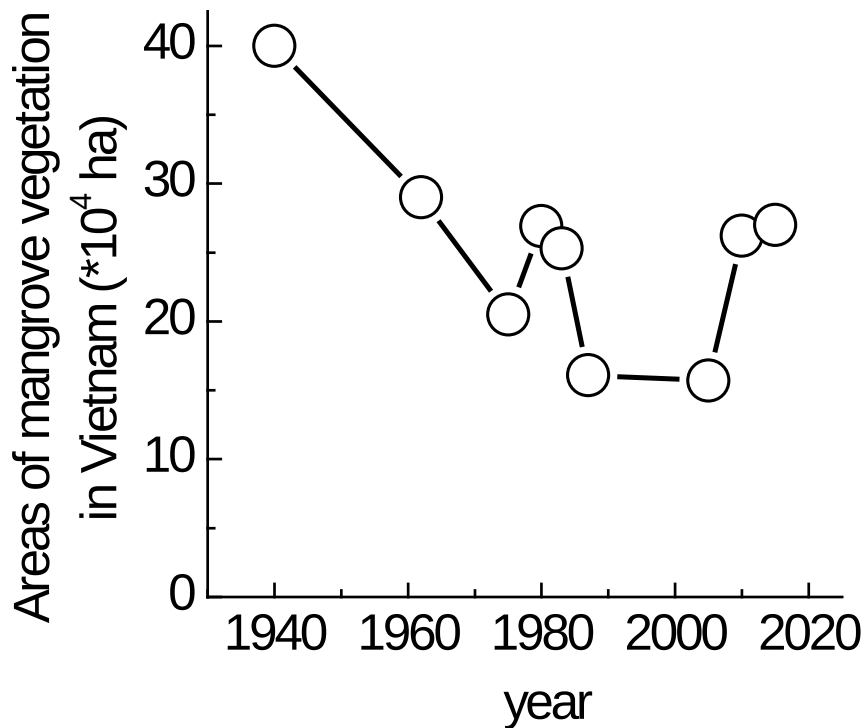


図 4-4-2-2 各種既往報告を基にしたベトナムにおけるマングローブ林面積の時系列変遷

4.4.3 保全活動によるマングローブ植林の実績

今年度は、ベトナム赤十字社がデンマーク赤十字社(DRC)、日本赤十字社(JRC)などの支援を受けて実施してきた「commune ベースのマングローブ林再生と災害対策プログラム」について、赤十字社(本部・ジュネーブ)が 2011 年に評価を実施して評価報告書を出版しており、これを参照して事例研究を実施した。

本報告書によると、ベトナム北部沿岸部の 8 つの Provinces の中の 166 の commune を対象に、9,462ha が植林され(うちマングローブ林 8,961ha)、約 100km の堤防が保護された(International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies 2011)。

1994 年から 2010 年に 880 万ドルを投じて実施された本プログラムの効果について、評価チームは定性的な手法(主要情報提供者へのインタビュー、フォーカスグループディスカッション、現地訪問)と定量的な手法(家計調査、定量的なデータレビュー)の混合手法により、適切な社会経済調査サンプリング手法を用いて、調査を実施した。家計調査は 26 commune の 372 人の回答者を対象とし(プログラム対象 commune 312 人(その内訳:マングローブ植林

参加者 223 人、非植林参加者 89 人)、コントロール(非対象 commune 60 人)を対象として行われた。

防災・減災に関するインパクトとしては、同じような条件の台風による被害を比較したところ、例えば Toch Tri Commune では、1989 年に発生したレベル 9 台風よりも、2010 年のレベル 10 の台風の被害は半分にとどまったと報告されており、同様の台風が起きることを想定して、その堤防決壊の物理的な被害を回避することができたことから計算された便益は 8 万～29 万 5,000 米ドルであったと計上されている。また、経済的損失の回避を計算すると、エビ養殖場と水田への損失回避は Thai Do Commune では 4,990,700 米ドル、Giao An Commune では 14,875,000 米ドルと計算されており、これらにより投じたコストに比して、地域経済社会に著しく高い便益をもたらしたと評価されている。

4.4.4 ベトナムにおけるマングローブ植林の状況―スワントゥイ国立公園の事例

4.4.4.1 スワントゥイ国立公園の概況

本事業では、ベトナム北部にあるスワントゥイ国立公園(Xuan Thuy National Park: 以下、「XTNP」と言う。)を、沿岸域の防災・減災に関するマングローブ林の機能評価の調査対象とした。XTNP は、ベトナム北部の Nam Dinh Province の Tonkin 湾内紅河河口部(北緯 20 度 13 分 37.6 秒、東経 106 度 31 分 42.0 秒)に位置する。ここは、ベトナム初のラムサール条約登録湿地にもなっている(Ramsar Sites Information Service 2021)。XTNP には 15,000 ha もの面積のマングローブ群落が分布しており、植栽されたマングローブと自然定着したマングローブが混在する(Tinh and Tuan 2015)。

主な構成樹種は以下の 3 種:メヒルギ(*Kandelia obovata*)、ナンヨウマヤプシキ(*Sonneratia caseolaris*)、フタバナヒルギ(*Rhizophora apiculata*)である。当該地の年平均気温は 23.4～24.5℃の範囲で、最寒期(12～1 月)の月平均気温は 16.0～17.1℃、最暖期(7 月)には月平均気温が 29.4℃を超える。平均年降水量は 1,750～1,800 mm year⁻¹の範囲で、雨季(5～10 月)と乾季(11～4 月)が明瞭であるとされる(Nam Dinh Province Statistics Office 2016)。一日の干満潮における潮位差は、最大時には 3.54 m 程度、最小時には 0.37 m を示すとされる(Centre for Oceanography 2016)。

4.4.4.2 XTNP におけるマングローブ林分布の変遷

グーグルアースによる現在(2019年9月25日撮影)のXTNPの空中写真を図4-4-4-1に示す。Tonkin湾の紅河河口南方沿岸部に水路の入り組んだマングローブ群落広がっている様子を確認できる。空中写真を見る限り、ここでのマングローブ林の保全対象は、マングローブ林の北方にある、魚介の養殖池や農地、さらに内陸部にある住宅地などに加え、ラムサール登録湿地であるXTNPを構成するマングローブ林そのものであると言える。

本項では、こうした防災・減災上の保全対象を有し、その機能の発揮が期待されているXTNPのマングローブ群落はどのように形成されてきたのか、U.S. Geological Surveyが提供する過去の衛星データを基に、1975年から辿って見ることにした(図4-4-4-2a-e)。1975年の当該地域の空中写真を示す図4-4-4-2aには、紅河河口部から南西に伸びて形成されている砂州が確認できるが、図4-4-4-1で確認された現在分布しているマングローブ群落らしき植生分布は確認できない。1987年(図4-4-4-2b)になると、紅河河口部の両岸にマングローブの植生が分布するようになり、その周囲にも土砂の堆積が認められ、徐々に地盤が形成されている様子を確認できた。1999年(図4-4-4-2c)になると、マングローブ群落の分布は、紅河河口部のより沿岸側に移行し、陸域側の箇所はマングローブ群落から改変され養殖池や農地などに土地利用が変更されてきた様子が見られた。2013年(図4-4-4-2d)には、沿岸域および西側部分の地域にもマングローブ群落が拡大していく様子が見られ、概ね2019年(図4-4-4-1および図4-4-4-2e)の分布状況に近くなっている様子を確認できた。

空中写真によるマングローブ林分布の時系列変化は、4.4.2で記述したベトナム全土におけるマングローブ変遷の状況と類似していた。すなわち、1980年代までの植林そのものによるその分布面積の拡大と、その後の土地改変によるマングローブ林の消失、さらにより積極的な植林活動に伴う分布の拡大の視覚的変遷が示された。当該地域のグーグルアースによる空中写真を拡大してみると、植栽事業によって植栽されたマングローブの実生木が整然と整列して植えられている様子が各所に確認できる。以上の結果は、国土保全や沿岸域の護岸に対し、こうしたマングローブの植栽活動の果たす役割は大きく、また、比較的短期間で大きな国土保全効果をもたらしていることを示唆していると言えよう。



図 4-4-4-1. スワントウイ国立公園(Xuan Thuy National Park)周辺の空中写真

出典:Map data ©2020 Google Earth(2019 年 9 月 25 日撮影)

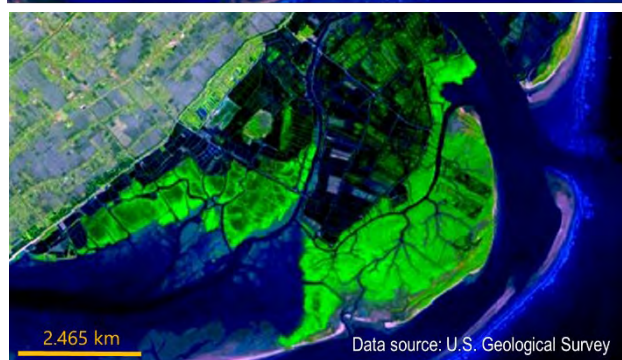
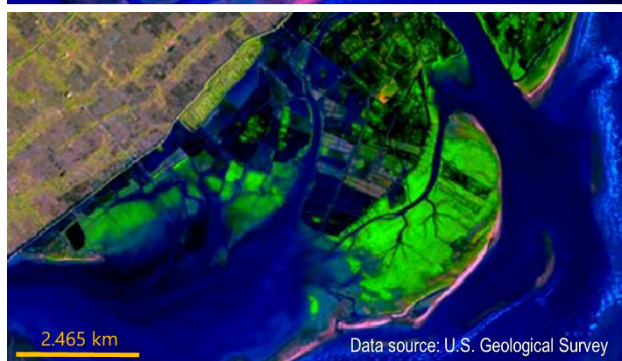
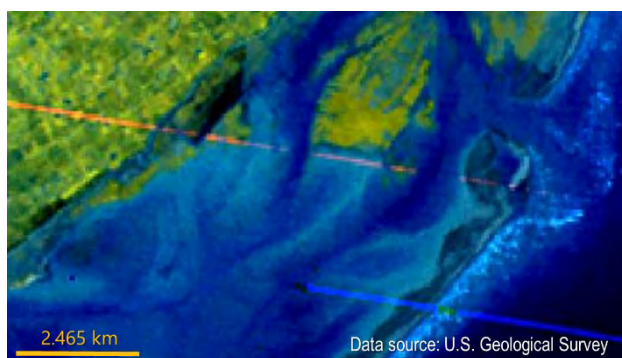


図 4-4-4-2 スワントウイ国立公園(Xuan Thuy National Park)周辺の時系列衛星画像

出典:U.S. Geological Survey

a:1975年5月19日、

b:1987年3月7日、

c:1999年12月21日、

d:2013年12月27日、

e:2020年6月21日

4.4.4.3 XTNP におけるマングローブ植林活動の履歴

前項において記したように、XTNP は、過去 40 余年間続けられてきたマングローブ植林によって、その分布域を紅河河口の内陸側からより沿岸部へと拡大してきた。さらには、沿岸部へのマングローブ群落の分布域拡大に伴って、内陸部のマングローブ林は養殖池や農地への土地改変がなされた様子も確認された(図 4-4-4-1 および図 4-4-4-2)。そこで本項では、XTNP 周辺におけるこれまでの植林活動内容やその履歴に関する具体的な内容を把握することを目的として、XTNP 内およびその周辺部のマングローブ植林地 11 箇所を調査地(Site A–Site K)として選定し、そこに 10 m×10 m のサブプロットを 3 つずつ設定して(図 4-4-4-3)、それらの箇所におけるこれまでの植林活動の状況、履歴など、植林活動に関する各種情報を調査し、整理した。その結果を表 4-4-4-1 に示した。なお、この調査はベトナム森林科学アカデミー(Vietnam Academy of Forest Sciences: VAFS)の Dr. Vu Tan Phuong らによって実施された。

当該調査地におけるマングローブ植栽年次は、1985 年～88 年(Site I)から 2016 年(Site A、B、C)までの期間に及んでおり、年時幅の取れた試験地が設定できた。植栽事業の実施母体は多岐に亘っており、またそれは植栽年次や場所によって異なり、デンマーク赤十字社、農業農村開発局(Department of Agriculture and Rural Development:DARD)、および Nam Dinh Province の沿岸マングローブ林保全・開発プロジェクト(2015 年度～2020 年度)が実施しているようである。植栽前の土地の状態は、全ての箇所が裸地であり、Site A と E および F は泥質干潟であった。構成樹種は、ナンヨウマヤブシキ(*S. casolaris*)、メヒルギ(*K. obovata*)、ヤエヤマヒルギ(*R. stylosa*)、オヒルギ(*B. gymnorrhiza*)、ヒルギダマシ(*Avicennia marina*)であった。植栽密度も場所によって様々であり、3,300～10,000 本 ha⁻¹ の範囲であった。樹種選定や植栽密度の決定の根拠は現段階では不明である。これらの調査地における近年の受災履歴については、2008 年に低温害(Terrible cold)、2012 年に暴風害(Severe storm)、2016 年に洪水害(Flooding)があったとの報告がある。それぞれの災害をもたらした気象状況については未解明であり、今後も情報収集を継続する。また、植栽からの経過年数が長い Site E、F については、潮汐波力による浸食と、海砂の堆積が見られるとされている。どの程度の地盤高変化が見られているのか、また、これらは現在も継続しているのかについては不明であり、これについても継続調査を行う。



図 4-4-4-3 スワントウイ国立公園(Xuan Thuy National Park)周辺に設定した調査地の位置
図

表 4-4-4-1 スワントウ国立公園 (Xuan Thuy National Park) 周辺に設定した調査地における植林活動の履歴

Research pilot site	Planting year	Land use history	Species composition	Planting density (trees.ha ⁻¹)	Foot sink depth (cm)	Tidal flooding depth (m)	Disaster history	Mangrove plantation project
Site A	2016	Bare land, tidal mud flat	<i>Sonneratia casolaris</i> (Bản chua) + <i>Kandelia obovata</i> (Trang)	3,300	15	1.3	Terrible cold in 2008; Severe storm in 2012;	Protection and development of coastal protection mangrove forest in Nam Dinh for the period 2015 - 2020
Site B	2016	Bare land	<i>Sonneratia casolaris</i> (Bản chua) + <i>Kandelia obovata</i> (Trang)	3,300	8	1	Flooding in 2016	
Site C	1997; 2016	Bare land	<i>Sonneratia casolaris</i> (Bản chua) 2016 + <i>Kandelia obovata</i> (regenerated)	10,000	10	0.9	Terrible cold in 2008; Severe storm in 2012	Red Cross (sponsored by Denmark); Protection and development of coastal protection mangrove forest in Nam Dinh for the period 2015 - 2020
Site D	2015; 2016	Bare land	<i>Sonneratia casolaris</i> (Bản chua) + <i>Kandelia obovata</i> (Trang)	3,300	8	1.2	Terrible cold in 2008; Severe storm in 2012; Flooding in 2016	Protection and development of coastal protection mangrove forest in Nam Dinh for the period 2015 - 2020
Site E	1997	Bare land, tidal mud flat	<i>Kandelia obovata</i> (Trang)	10,000	10	1.3	Terrible cold in 2008; Severe storm in 2012; Coastal erosion due to impact of tidal amplitude and sea wave; Sand invasion	Red Cross (sponsored by Denmark)
Site F	1985-1987	Bare land, tidal mud flat	<i>Kandelia obovata</i> (Trang)	NA	10	1.3		
Site G	1997; 1998	Bare land	<i>Kandelia obovata</i> (Trang) (1997) + <i>Rhizophora stylosa</i> (Được vôi) (1998)	10,000	7	0.5	Terrible cold in 2008; Severe storm in 2012; Flooding in 2016	
Site H	1997	Bare land	<i>Kandelia obovata</i> (Trang) + <i>Rhizophora stylosa</i> (Được vôi)	10,000	8	0.7	Terrible cold in 2008; Severe storm in 2012	Red Cross (sponsored by Denmark)
Site I	1985-1988	Bare land	<i>Kandelia obovata</i> (Trang)	NA	8	1		
Site J	1997	Bare land	<i>Rhizophora stylosa</i> (Được vôi) + <i>Kandelia obovata</i> (Trang) + <i>Sonneratia casolaris</i> (Bản chua) + <i>Bruguiera gymnorhiza</i> (Sù)	10,000	10	1.3		
Site K	2011; 2015	Bare land	<i>Bruguiera gymnorhiza</i> (Vết dù) (2011); <i>Rhizophora stylosa</i> (Được vôi) + <i>Avicennia marina</i> (Mắm biển) (2015); <i>Sonneratia apetala</i> (Bản kh ông cánh) (2019)	3,300	5	0.7	Terrible cold in 2008; Severe storm in 2012	Department of Agriculture and Rural Development (state budget)

4.4.4.4 XTNP の各調査地におけるマングローブ林の林分状況

当該課題で設定した 11 箇所の調査地におけるマングローブ林の林況については、本項で予報的に報告する。当該調査地に関しては、Site F の汀線前線部を除く全ての箇所では概ね良好な生育 (Good growth) を示したという。各調査地の平均樹高、平均根元直径、平均胸高直径は、それぞれ 1.0～6.2 m、3.8～10.7 cm、2.7～9.4 cm の範囲を示した。これら樹木サイズデータのばらつきは、樹種特性や植栽後の経過年数、植栽箇所の立地環境を反映したものと推測されるので、今後、詳細に解析を進める。現存した生立木の密度は、1,600～15,700 本 ha⁻¹ と幅がみられた。表 4-4-4-1 に示した植栽密度と比べると、Site A、B、C、D、E については植栽時から生立木の密度が低下したが、Site G、H、J、K では密度の増加がみられた。後者については、自然実生の定着などが考えられる。

なお、各調査地におけるドローンによる空中写真 (高度 60 m より撮影) を図 4-4-4-4 に示す。既述のように Site F の汀線前線部を除く全ての箇所では概ね良好な生育 (Good growth) を示すとの報告であったが、ドローンの写真画像をみるかぎりでは、一部の調査地 (Site A) では生葉が脱落し、林冠が疎になっている様子や、枯死木や倒木が散見される箇所もみられた。これらの発生要因について、潮風害、高潮害などの気象害によるものなのか、地盤の浸食や土砂の堆積等、立地、地形要因によるものなのか、今後、追加調査を行い、明らかにする必要がある。



図 4-4-4-4 スワントウイ国立公園(Xuan Thuy National Park)周辺に設定した調査地のドローンによる空中写真画像(続く)

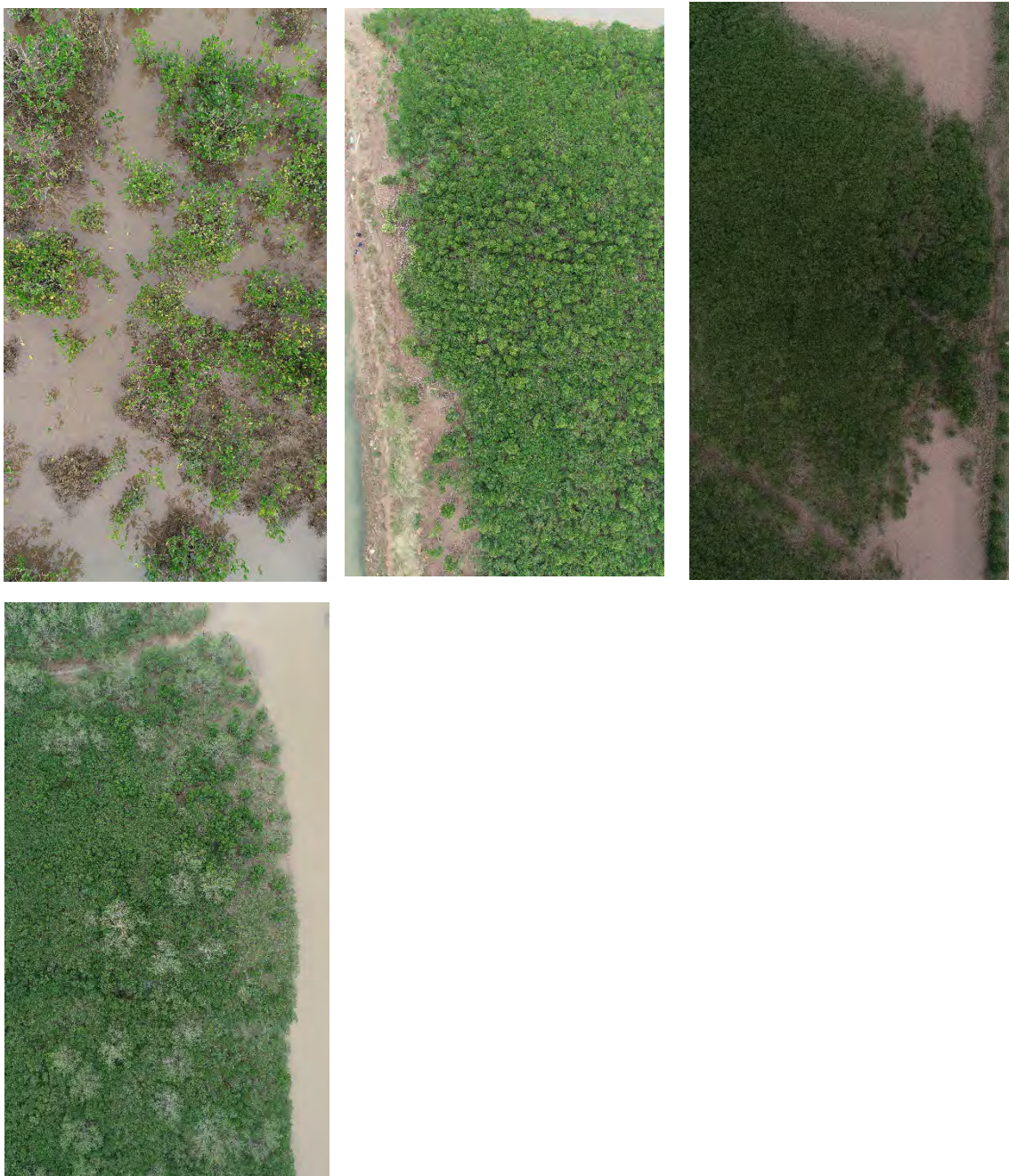


図 4-4-4-4 (続き)

4.4.5 まとめおよび今後の検討事項

本項では、既往の文献レビューやVAFSとの連携、情報交換等により、ベトナムを例に東南アジアにおけるマングローブ林の現状や現況を把握し、地球規模でのマングローブの分布状況と比較して考察した。

ベトナムにおけるマングローブ林に関しては、インドシナ戦争やベトナム戦争に伴う乱伐、破壊や、南北ベトナム統一後の魚介(特にエビ)の養殖推奨、港湾開発、土地利用の改変などにより、その分布面積の減少傾向が続いた。その一方で、政府主導の精力的なマングローブ修復植林活動が功を奏し、ベトナム戦争前(1940 年以前)のレベルには達し得ないものの、2000 年代以降、その分布面積は増加傾向に転じていることを示した。すなわち、温暖化や気候変動に起因した海面上昇、台風等の巨大化に伴う沿岸域の防災・減災や国土保全の一翼を担う、マングローブ生態系の保全や修復に関する技術指針を検討する上では、ベトナムのマングローブ林の状況は有用であり、有益であることを指摘した。

また、国際赤十字社による報告書を元に、ベトナムにおける保全活動によるマングローブ植林の実績を検討した。その結果、植林されたマングローブ林が堤防決壊等の物理的被害を回避することで得られる便益は Toch Tri Commune で 8~30 万米ドル、さらにエビ養殖池や水田などの破壊、損傷を免れることにより回避される経済損失は Thai Do Commune で 500 万米ドル、Giao An Commune で 150 万米ドルと計算されており、修復植林に投じたコストと比べると、マングローブ林は地域経済社会に著しい便益をもたらしていることを述べた。

以上のように、ベトナムにおいては、沿岸保全および防災・減災のためのマングローブ修復植林が精力的に取り組まれており、かつ沿岸部における災害に対する被害軽減にマングローブ林が果たす役割は大きいことが示唆されている一方で、それを裏付ける科学的データは現在もなお不足している。マングローブ林の分布面積は、行政データや空中写真における視覚的な比較によって、増加していることは間違いないと判断できるが、詳細に解析してみると、樹冠を構成する生葉が疎らであったり、植栽木がなんらかの原因で枯死し、倒木が発生していたりする箇所も散見された。これらを引き起こす原因が何なのか、低温害や暴風害、潮風害などの気象害によるものか、潮汐波力による浸食や堆砂や土砂の堆積などの立地的要因なのか、あるいは、マングローブの伐採・利用、漁獲活動等の人為活動や社会経済活動の影響に起因するのか、などは、現状、不明である。

このことから、今後は、ベトナム北部のスワントゥイ国立公園などのこれまでの実績・事例に関して、各種現地調査からデータを集積し、マングローブの保全のために必要となる、生態、立地、社会経済的要因を解明するとともに、沿岸域の防災・減災にかかるマングローブ林の機

能について評価・解明するための、継続調査が求められている。

参考文献

- 安食和宏(2002)ベトナム南部カンザー地区におけるマングローブ植林事業の展開と住民生活. 人文論叢:三重大学人文学部文化学科研究紀要 19:1-12
- Alongi D.M. (2012) Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Manag.* 3:313-322
- Alongi D.M. (2018) Blue carbon: Coastal sequestration for climate change mitigation. *Springer briefs in climate studies*. Springer Japan. 88pp.
- Alongi D.M. (2020) Global significance of mangrove blue carbon in climate change mitigation. *Sci* 2:67. <https://doi.org/10.3390/sci2030067>
- Centre for Oceanography (2016) Tide tables. Vol. 1. Natural Science and Technology Publishing House, p. 176
- Dung L.V., Tue N.T., Nhuan M.T., Omori K. (2016) Carbon storage in a restored mangrove forest in Can Gio Mangrove Forest Park, Mekong Delta, Vietnam. *Forest Ecol. Manage.* 380:31-40
- Ewel K.C., Twilley R.R., Ong J.E. (1998) Different kinds of mangrove forests provide different goods and services. *Global Ecology and Biogeography Letters* 7:83-94
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2007) The world's mangroves 1980-2005. FAO forestry paper 153: FAO, Rome, 77pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2015) Global Forest Resources Assessment 2015. Desk reference. FAO, Rome, 244pp.
- Hien T.H., Marchand C., Aimé J., Nhon D.H., Hong P.N., Tung N.X., Cuc N.T.K. (2018) Belowground carbon sequestration in a mature planted mangroves (Northern Viet Nam). *Forest Ecology and Management* 407:191-199
- Hieu P.V., Dung L.V., Tue N.T., Omori K. (2017) Will restored mangrove forests enhance sediment organic carbon and ecosystem carbon storage? *Reg. Stud. Mar. Sci.* 2017, 14, 43-52.
- Hong, P.N., San, H.T., 1993. Mangroves of Vietnam. The IUCN Wetlands Programme, Bangkok 173pp.
- 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

- 井上理咲子、藤本潔(2014)ベトナム南部カンザー地区のマングローブ域に暮らす人々の生業活動の現状と持続可能性. 南山大学紀要「アカデミア」人文・自然科学編 7:151-169.
- 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 programe, 2006-2010, Geneva 67pp.
- 向後紀代美、向後元彦(1997)ベトナムにおけるマングローブ植林支援－地球規模の修復モデルの構築をめざして－TROPICS 6:247-282
- 宮城豊彦、安食和宏、藤本潔(2003)マングローブーなりたち・人びと・みらいー. 古今書院 193pp
- Maurand P.(1943)L'Indochine Forestière. Inst. Rech. Agron. Indochine, Paris, pp. 2-3.
- Nam V.N., My T.V., Jensen M.(1993)Mangrove for production and protection. A Changing Resource System:Case Study in Can Gio District, Southern Vietnam. FAO, Bangkok. 57pp.
- Nam Dinh Province Statistics Office(2016)Nam Dinh Statistical Yearbook 2015, Thong Ke Publisher: 386; ISBN: 978-604-75-0374-2.
- Ramsar Sites Information Service(2021)Xuan Thuy Natural Wetland Reserve. <https://rsis Ramsar.org/ris/409> (2021年3月3日閲覧)
- 鈴木伸二(2003)ベトナム国のエビ養殖と流通. 多屋勝雄編:アジアのエビ養殖と貿易. 119-137. 成山堂書店
- 田村正行(2016)マングローブ林の面積変化を衛星画像で観る 日本リモートセンシング学会誌 36:407-409
- Tue N.T, Dung L.V., Nhuan M.T., Omori K.(2014)Carbon storage of a tropical mangrove forest in Mui Ca Mau National Park, Vietnam. Catena 121:119-126
- Tinh, P.H., Tuan, M.S., 2015. Vulnerability to climate change of mangroves in Xuan Thuy National Park, Vietnam. J. Agric. Biol. Sci. 10 (2), 55-60.
- United Nations Environment Programme(2009)Blue carbon: The role of healthy oceans in binding carbon. 78pp.
- Veettil B.K., Ward R.D., Quange N.X., Trang N.T.T, Giang T.H.(2019)Mangroves of Vietnam: Historical development, current state of research and future threats. Estuarine, Coastal and Shelf Science 218:212-236
- Nam V.N., Sasmito S.D., Murdiyarso D., Purbopuspito J., MacKenzie R.,(2016)

Carbon stocks in artificially and naturally regenerated mangrove ecosystems in the Mekong Delta. *Wetl. Ecol. Manage.* 24: 231-244.