

4

第4章 森林の防災・減災 機能強化のための 技術



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、土地の持つ災害リスクについて理解と意識を深め、計画的な土地利用と森林保全による予防治山を行うことは、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。

本章では、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する方法と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の機能の評価する方法を紹介する。

Recipe - P04 斜面崩壊リスクマップの作成

Recipe - P05 日本の森林整備・治山技術の適用

Recipe - P06 マングローブの防災・減災機能

斜面崩壊リスクマップの作成

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についてAI等最新技術を活用し信頼性の高い危険度を評価しておくことが必要である。リスク評価に際しては、影響すると判断された要因がどの程度、重要であるかを検討しておく。Google Earth Engineでは、斜面崩壊の発生や土地利用変化をオープンソースの時系列の衛星データを用いて斜面崩壊がその地域でどのような降雨で引き起こされるのかを抽出することができる。斜面崩壊のリスクマップは、森林の攪乱や斜面崩壊発生時の雨量の評価も加味しながら、リモートセンシングデータとそのデータを用いて得られる空間情報、公開データを用いて作成する。

土砂災害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（図P04-1）。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

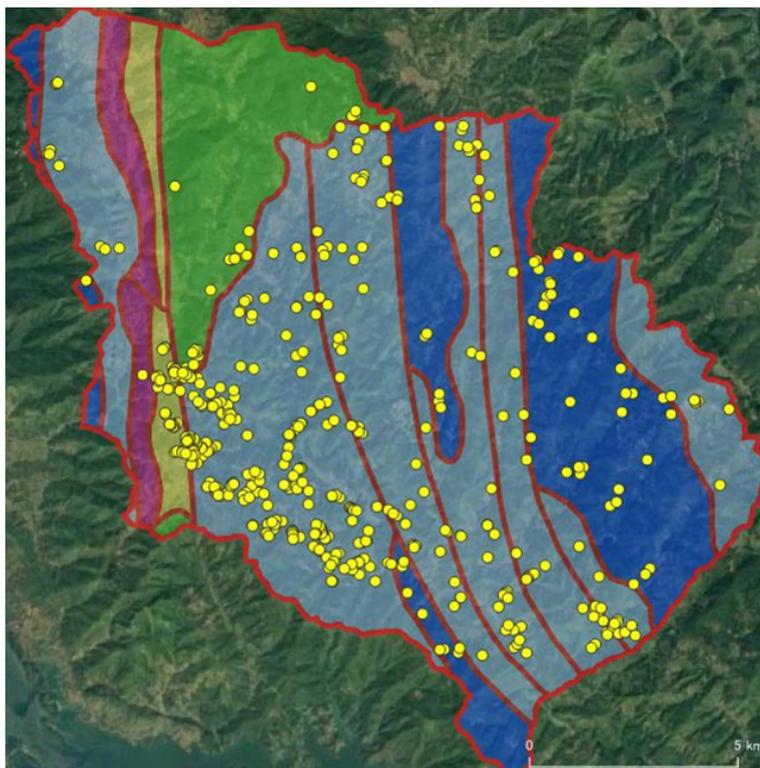


図 P04-1 2017 年豪雨で発生したベトナム北西部での斜面崩壊

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。そのため、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た信頼性の高い危険度把握の技術の開発が必要である。

土砂災害のリスク評価

リスクマップの作成に際しては、既存の空間情報を利用してリスク評価を行う必要がある。オープンソースの衛星データをダウンロードせずに Google のクラウド環境において無料で解析でき、結果だけをダウンロードできる Google Earth Engine は、特に時系列での解析が必要な斜面崩壊地の抽出や土地利用変化の同定において非常に有力なツールとなる。また、それぞれの地域においてどの程度の雨量で斜面崩壊が発生するかといった情報も、リスクを評価する上で欠かせない情報である。



- 白亜紀の砂岩、石英、まれに石灰岩、礫岩、砂岩、シルト岩からなる小石を含む礫岩
- 三畳紀の一部凝灰岩と混在している砂岩、シルト岩、石灰質シルト岩、粘土岩
- 三畳紀の石灰岩、泥灰岩、薄灰色の多孔質石灰岩
- 三畳紀のシルト岩、砂岩、粘板岩
- 三畳紀の黒色粘板岩、シルト岩、砂岩

図 P04-2 地質と斜面崩壊発生箇所

リスク評価に際しては、影響すると判断された要因がどの程度、重要であるかを検討しておく必要がある。要因の重要度を判断する方法としては、衛星画像より抽出した崩壊地（目的変数）に対し、衛星画像から得られた土地利用区分、道路の影響、標高、及び算出した傾斜、方位、地質図より得られた地質情報といった情報を崩壊要因（説明変数）として（図 P04-2）、機械学習（決定木、ランダムフォレスト）により重要度を算出する方法が考えられる。その際、決定木やランダムフォレストといった機械学習では、使用するデータセットの項目や解析の際の設定項目により結果が変わってくる。このため、結果の取り扱いには注意が必要であり、これらを基にしてリスク評価を行う場合には、このことに留意するとともに、評価結果（作成されたリスクマップ）を実際に利用する前に、現地において検証を行う必要がある。一方で、それぞれの結果において、ある程度の傾向が認められる場合には、概ね信頼性が認められるものとする。

なお、リスク評価を行っても現地のニーズに即さない可能性もある。これを回避するためには、現地の災害に対する意識の把握、現地の社会、経済条件とのバランスを考慮し、最良のものを提示する必要がある。このため、地域住民との意見交換等を通して、リスク評価を実施していくことが必要である。

斜面崩壊地抽出における Google Earth Engine の利用

Google Earth Engine は、Google のクラウド環境と豊富なツールが用意された API を利用してオープンソース衛星データを無料で解析・利用できるサービスである。Google Earth Engine を用いて崩壊地を抽出するためには、まず、土地被覆分類に用いる入力データを準備する。入力データは、崩壊発生の原因となる豪雨の前後の衛星データ（例えば、Sentinel-2 データ）と土地被覆分類のための教師データである。斜面崩壊の前後に対し、各バンドで、ある一定期間の時系列データから雲を取り除いた画像を作成し、これらのデータから正規化植生指数、正規化水分指数の画像も作成する。また、崩壊前後の正規化植生指数の差分画像、正規化水分指数の差分画像も作成する。これらのデータに対して、土地被覆分類のための教師データを用いた機械学習モデルによって土地被覆分類図を作成し、新規斜面崩壊地を抽出する。

機械学習による土地利用と森林攪乱の推定

森林には斜面崩壊を抑制する機能があるが、これまで森林であった場

所が農地や開発地などの異なる土地利用に転換されると、こうした機能が失われると考えられる。しかし、多くの開発途上国では過去の土地利用の変遷が十分に把握されていないのが現状である。そこで、過去のデータが利用可能な衛星画像を時系列解析に用い、植生の時系列変化情報を取り出して、学習データと機械学習モデルを利用することにより、森林撈乱と土地利用を毎年の頻度で推定するとよい。これにより得られる土地利用の変遷は、災害を低減する森林管理（ゾーニング）技術の開発に資する土砂災害等のリスクを評価する上で重要な情報になる。

斜面崩壊発生時の雨量の評価

降雨による斜面崩壊は、透水層の空隙への雨水の浸入と透水層と不透水層間の地下水の増加により発生する。斜面崩壊がその地域でどのような降雨で引き起こされるのかは、関連する災害リスクの評価の重要な指標のひとつである。開発途上国では地上の気象観測施設やレーダー観測システムが未整備のため、崩壊発生時の雨量を評価することが困難であったが、近年、衛星観測による衛星全球降水マップが公開され、斜面崩壊が発生する危険性の高い降雨を判定できる可能性が出てきた。長期の衛星観測雨量データから斜面崩壊が発生した時の雨量と降雨パターンを探索することにより、斜面崩壊の危険性の高い雨量と降雨パターンが明らかになる。

斜面崩壊に対するリスクマップの作成

開発途上国においては、斜面崩壊に対する危険度の評価を行うための空間情報が未整備であるため、崩壊発生危険度を把握することが難しい。そこで、リモートセンシングデータとそのデータを用いて得られる空間情報、公開データを用いて、機械学習モデルにより推定した森林撈乱と土地利用変化をもとに斜面崩壊に対するリスクマップを作成する。リスクマップの作成の一つの方法として、衛星画像より目視判読した崩壊地に対し、デジタル標高モデル（Digital Elevation Model : DEM）とDEMから算出した傾斜と方位、土地利用、道路、地質を説明変数として、機械学習により重要度を算出する方法がある。ランダムフォレストを用いて教師あり分類を行い、その結果をもとに構築されたモデルからリスク評価の結果をマップ化する。

日本の森林整備・治山技術の適用

治山技術はコンクリート構造物に過度に依存することがないため、災害対策を進めようとする開発途上国にとって財政負担の観点から適用性が高い。ただ、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発を伴わないと効果を発揮しにくい技術でもある。森林を活用した防災・減災を図るためには、適正な土地利用配置が必要であり、そのためのゾーニングが重要である。ただ森林を活用した防災・減災を図る場合でも、簡易な治山施設の設置は必要である。また、土地利用配置の変更で全ての危険個所での災害リスクを軽減することはできないため、そのような箇所にも治山施設を適切に設置することも必要である。

日本の森林整備・治山技術の適用の必要性

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（図 P05-1）。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



図 P05-1 一面農地利用されているエリアでの山地災害の事例

を教訓に、わが国では現在に至るまで「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。前者の砂防事業は防災施設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、また水源涵養、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性が高いと期待される。

治山技術と土地利用計画

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げざまに接近、上陸し、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プラス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発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نز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発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。

夏季の大量の降水を特徴とし、自然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。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は、土地の持つ災害リスクについての知識と意識を深め、山地においては森林の維持造成を通じた治山技術を、沿岸域においては高潮被害に対する防災・減災のための海岸林の保全策を早期に導入することは、将来的には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。

森林整備・治山技術導入の準備

(1) リモートセンシングによる斜面崩壊地と崩壊リスクの確認

Recipe - P04 で作成する斜面崩壊地と斜面崩壊リスクのマップを用いて、森林整備・治山技術を導入しようとしている地域での崩壊発生状況と危険度を把握する。

(2) 地域住民への意識調査

地域で自然災害の防災・減災を図るには地域住民の理解と参加が不可欠である。その際、地域住民の防災・減災に対する意識が、防災・減災の対策への参加に結びつく。そこで、政府に対する防災・減災機能対策への期待を掘り起こすための調査や、自然災害が発生する可能性や自然災害が発生した場合の経済的被害に対する考えや生命や生活に対する影響、防災対策に対して、その効果の程度やかかるコストの予想、自分自身でその対策を取るかどうかといった調査を実施し、地域住民の防災・減災に対する意識を明らかにする。

(3) 現地での概況把握

- ・河川の濁度

河川の濁度は、上流部流域での土地利用改変の影響を受けやすい。また、斜面や溪流の侵食によって上流域から流出した土砂が河床に堆積して河床高度を上げることで洪水氾濫リスクが高まる。このため、河川の濁度を観察して、上流部の土砂流出の状況を把握する。

- ・道路法面と排水施設

開発途上国では、道路開設による切土で造成された法面は保護対策のなされない状態で放置される場合が多く、また道路の排水についても、横断溝を設置せずに、側溝水はすべて溪流横断部の暗渠で排水されることが多いため、流末箇所侵食や側溝が詰まって大量の雨水が道路に流出した場合、斜面崩壊の誘因となる。そこで、対象となる地域の道路法面と排水施設の管理状態を観察する。

(4) 道路開設による斜面崩壊リスクの定量評価

斜面の諸条件（地形、土層の厚さ、透水性、土の物理性等）をパラメータとした斜面への降雨浸透とそれによる土のせん断強度低下を再現する数値解析を、道路が開設された場合とされていない場合の両ケースに適用し、斜面の安全率の推移を比較・検証する。

(5) 防災・減災のための森林ゾーニング

- ・事前防災のための土地利用配置と森林管理

森林を活用した防災・減災を図るためには、まず、適正な土地利用配置が必要であり、そのためのゾーニングが重要である。特に人の生活する地域や重要なインフラの上部、下部の土地利用に留意する必要がある。併せて、森林がしっかりと防災・減災の機能を果たすように、間伐方法や輪伐期など適正に森林管理を行い、機能を高めていく必要がある。

- ・事前防災のための治山施設

事前防災のためのゾーニングによる土地利用配置の変更には合意形成が必要であり、森林の造成には一定の時間を要する。その間の災害リスクを軽減するために、森林を活用した防災・減災を図る場合でも、簡易な治山施設の設置が必要となる。また、土地利用配置の変更で全ての災害リスクを軽減することはできないため、そのような箇所にも治山施設を適切に設置するように計画する。

マングローブの防災・減災機能

海面上昇や大型台風の頻発による沿岸域の災害リスクが増していることから、マングローブの防災・減災機能の発揮に大きな期待が寄せられている。波や風から受ける外力が個々の樹木の抵抗力を上回れば、樹木に被害が発生するため、樹木の破壊限界を理解した上で、防災インフラとしての海岸防災林の配置を検討することが重要である。マングローブの防災・減災機能を広域に評価するためには、林帯幅を求めるためのマングローブの広がりや、波の方向に対するマングローブの投影面積を算出する必要がある。マングローブは樹種により生育適地の立地条件に対する許容範囲が大きく異なることから、予備的な植栽試験を行って生育適地の条件を吟味した後に本格的な植栽に移行するのがよい。

INFO

1) 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

INFO

2) 佐藤一紘 (1992) マングローブ林、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

INFO

3) 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

INFO

4) 松田義弘 (2011) マングローブ環境物理学 東海大学出版 378pp

INFO

5) International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (2011) Breaking the waves. Impact analysis of coastal afforestation for disaster risk reduction in Viet Nam, Geneva 51pp.

防災・減災機能発揮のための保全の必要性

マングローブは熱帯・亜熱帯沿岸域の潮間帯に分布し、海域と陸域の間にある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の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・減災機能を担っている。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・減災機能の発揮についての関心が一層高まっている。

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・侵食防備など沿岸域の防災・減災を担ってきたことは周知である^{1), 2), 3), 4)}。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侵食防止や、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、防災・減災のための気候変動適応策の一翼としての期待が高まっている^{5), 6), 7)}。

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が進行しており（図 P06-1）⁸⁾、さらには海



図 P06-1 マングローブを開発して造成したエビ養殖池
(左：集約的な養殖、右：粗放な養殖)

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⁹⁾。

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、マングローブの防災・減災機能を把握し、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。

マングローブの波や風に対する根返り耐性

マングローブは、波や風等の流体に対し抵抗体として働き、波や風からの外力を減衰させる。波や風から受ける外力が樹木の抵抗力を下回れば、樹木は抵抗体として働き続けるが、反対に外力が上回れば、幹折れしたり、根返りを起こしたりして、樹木に被害が発生する。マングローブは、しばしば、強風、高潮、高波などの外力によって被害を受けるため、沿岸域においてマングローブ及びそれらの多面的機能を維持するためには、これらの樹木の破壊限界を理解した上で、防災インフラとしての海岸防災林の配置を検討することが重要である。

マングローブの根返り耐性を定量評価するための引き倒し試験から、風や波に対する根の抵抗力の指標である限界回転モーメントが樹種や樹木サイズに依存することが明らかになっている。泥質の堆積物上に生育し、水中や泥の中に水平に広がるケーブル根を持つタイプのマングローブである *S. caseolaris* や *S. apetala* では、幹周囲に多くの支柱根を持ち、砂質堆積地に生育している *R. stylosa* よりも強い根返り耐性を示している。沿岸域の保全のためにマングローブを植林する場合、樹種の選択に

INFO

6) International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (2011) Planting protection. Evaluation of community-based mangrove reforestation and disaster preparedness programme, 2006-2010, Geneva 67pp.

INFO

7) 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

INFO

8) 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

INFO

9) 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

は樹種ごとの根返り耐性も考慮する必要がある。

マングローブの防災・減災機能の広域評価

台風などによる急激な気圧の低下により高潮が発生した場合、マングローブがあると、マングローブの立木に波が当たる際に発生する渦による波の力の減衰（渦粘性効果）により、堤防を乗り越える波を抑え、被害を軽減することができる。マングローブの防災・減災機能を広域に評価するためには、林帯幅を求めるためのマングローブの広がりや、波の方向に対するマングローブの投影面積を算出するための林分の平均直径、平均樹高、樹種ごとの樹形、立木密度などが必要となる。これらの情報を地上調査から広域に取得するのは困難であり、リモートセンシングを用いた手法が求められる。衛星データによりマングローブを抽出し、その地域で可能性のある波の方向ごとにある一定の幅での堤防や陸地との境界までのマングローブの面積を算出する（図 P06-2）。林分高や立木密度を推定することにより、各波の方向に対する一定幅での全立木の投影面積を推定することが出来る。この投影面積が大きいほどマングローブの防災・減災機能が高くなる。この防災・減災機能の評価手法は、実用性を考慮した手法であり、機能の相対的評価が可能である。それと共に、高波の越堤が発生した箇所の情報を集積することにより、この指標からどの箇所に対策を優先的に実施するのがよいか明確になる。

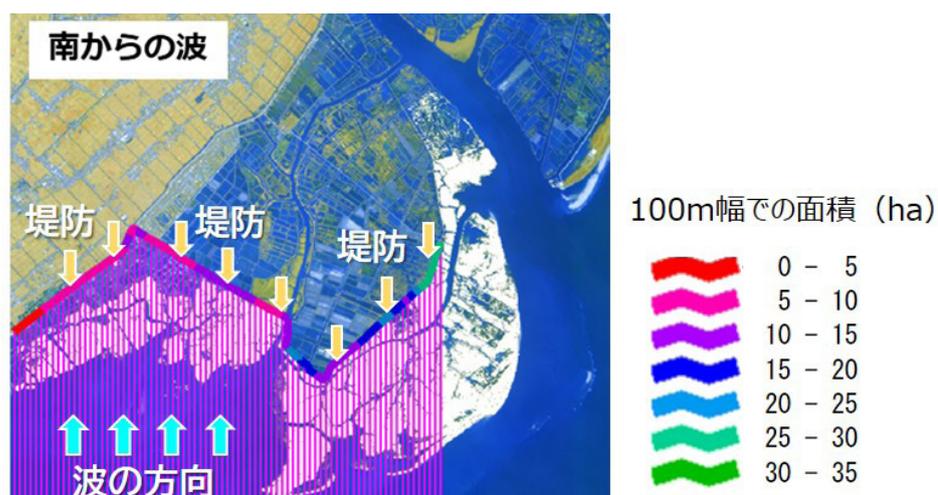


図 P06-2 波の方向に対する堤防までの 100 m 幅のポリゴンに含まれるマングローブの面積

マングローブ植林における留意点

マングローブの生育適地は地盤高や潮汐環境により規定されるが、それらは樹種により異なる。ただし、生育できる立地条件に対する許容範囲が広いことから、予備的な植栽試験を行って生育適地の条件を吟味し、その後、本格的な植栽に移行するのがよい。マングローブの定着・生育への阻害要因は、波による苗木の流亡や損傷、地盤の侵食、土砂堆積による苗木埋没であるため、沿岸域荒廃地での植林の際には事前の地盤環境や潮汐動向の把握が重要である。

マングローブを植栽し、着実にマングローブの再生を進めるためには、植栽のための健全な実生苗や胎生種子の確保（図 P06-3）、さらには確実に実生苗を得るための採種、及び採種後の種子の取り扱いが鍵となる。苗畑では潮汐を利用して自然灌水で育苗するケースが多いので、平均海面よりも若干低い地盤高に合わせて地盤を均し、苗畑を設定する。干潮時に苗床に海水が停滞しないよう留意する。海水が停滞すると、日射により塩分濃縮や水温上昇が起こり、根系傷害や苗の枯死を誘引する恐れがある。

マングローブの植栽では、苗木を用意しやすく、取り扱いも容易なヒルギ科などのマングローブ実生苗ばかりを選んで植栽することで、同一樹種による単純林となってしまうよう留意する。残存している樹種と同様な潮汐環境の立地環境を見極めて、どこにどの樹種を植えるかを注意深く検討し、決定する。



図 P06-3 いろいろな種のマングローブ果実と胎生種子

