

農林水産省平成26年度委託プロジェクト研究

気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト

研究成果発表会講演集

地球温暖化の中で 森林を活かす



独立行政法人 森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

巻頭言

すでに地球温暖化は進んでおり、もはや避けられるような状況ではありません。IPCCの最新の報告である第5次報告書は「気候システムの温暖化には疑う余地はない。大気と海洋は温暖化し、雪氷の量は減少し、海面水位は上昇し、温室効果ガス濃度は増加している。」と強調しています。私たちは、地球温暖化を前提に生きていかなければなりません。その状況の中で温暖化対策を進める必要があります。

このような視点から、当研究成果発表会は「地球温暖化の中で森林を活かす」と題し、農林水産技術会議委託プロジェクト「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト」の中の森林に関わる課題で得られた最新の成果を報告し、今後を展望していくことを目的として開催することと致しました。

地球温暖化対策には、温暖化の原因である温室効果ガスの濃度を下げるといった緩和策と、温暖化による悪影響を回避するという適応策があります。当発表会では、森林分野の緩和策については将来予測をふまえて対策を検討するという研究成果を中心に報告を致します。また、適応策については、温暖化影響の観測と病虫害や気象害等に関する研究成果を報告致します。

また、IPCC報告が示すように、地球上の二酸化炭素排出の1割が途上国の森林減少・劣化によるものであることから、これを防ぐことによって排出削減を行う国際枠組み「REDDプラス」の構築が進められています。これも重要な緩和策です。現在、REDDプラスを効果的に実行するための森林炭素の効率的な観測技術の開発が求められており、今回はその成果を報告致します。

森林総合研究所は、これまで地球温暖化問題に関わる研究開発と併せ、その行政や社会への貢献を続けてきました。IPCC報告の執筆や、京都議定書報告のための森林による二酸化炭素吸収量の算定方法の開発などがその例です。現在は、平成27年に策定予定の我が国の適応計画に向け、関係委員会に参加しています。また、REDDプラスについても、2010年にREDD研究開発センターを開設し、国内外でREDDプラスの早期実施に貢献しています。

当研究成果発表会「地球温暖化の中で森林を活かす」で報告される最新の成果が、森林分野の地球温暖化対策について、科学技術の進展を通して、社会や施策に貢献することを願ってやみません。

独立行政法人 森林総合研究所

理事長 鈴木和夫

農林水産省平成 26 年度委託プロジェクト研究
気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
研究成果発表会講演集

地球温暖化の中で森林を活かす

日時：平成 26 年 11 月 11 日（火）13 時 00 分～17 時 15 分
会場：東京大学弥生講堂（東京都文京区弥生 1 丁目 1-1）

目 次

プロジェクトの概要	1
講 演	
森林分野の CO ₂ 吸排出量の将来予測と緩和策	
松本 光朗（研究コーディネータ 温暖化影響研究担当）	3
森林への影響と適応策 ～植生、災害、病害虫～	
高橋 正通（研究コーディネータ 国土保全・水資源研究担当）	17
REDD プラスのために熱帯林とその炭素蓄積の変化を計測・予測する	
鷹尾 元（森林管理研究領域 資源解析研究室長）	
玉井 幸治（水土保全研究領域 水保全研究室長）	27
ポスター発表	39
研究成果紹介パンフレット	
健全な海岸林をめざして（気象環境研究領域）	69
温暖化により被害の拡大が危惧される森林病害虫（北海道支所）	77
カツラマルカイガラムシの被害予測と薬剤防除法 （森林昆虫研究領域・山形県森林研究研修センター・長野県林業総合センター ・福島県林業研究センター）	87
研究成果文献リスト	95

プロジェクトの概要

農林水産技術会議 委託プロジェクト研究「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト」では、農業、森林・林業、水産業における影響の評価、緩和策、適応策に関して 16 件の地球温暖化プロジェクトを進めています。その中で、森林総合研究所は 7 件のプロジェクトを担当しており、本成果発表会では、そのうち今年度終了する以下の 4 件のプロジェクトについて成果を発表します。

1. 森林及び林業分野における温暖化緩和技術の開発 (平成 22～26 年度)
【目的】温暖化緩和策の開発とともに、森林・林業・木材生産による炭素量変化の予測モデルを開発し、最適な温暖化施策を提案する手法を開発する。
2. 森林・林業分野に与える影響評価と適応技術の開発 (平成 22～26 年度)
【目的】温室効果ガスのモニタリングと炭素吸収・水資源への影響予測、適応策として生物害の影響評価と適応技術を開発する。
*なお、極端気象に係る進行中のプロジェクトの課題についても一部紹介する。
3. 高精度リモートセンシングによるアジア地域熱帯林計測技術の高度化 (平成 24～26 年度)
【目的】衛星画像と航空機データを組み合わせ、的確かつ高精度な地上炭素蓄積量推定手法を開発する。
4. アジア地域熱帯林における森林変動の定量評価とシミュレーションモデルの開発 (平成 24～26 年度)
【目的】土地利用施策等のシナリオに応じて炭素排出量変動を予測するシミュレーションモデルを開発する。

講演

森林分野の CO₂ 吸排出量の将来予測と緩和策

(独) 森林総合研究所 研究コーディネータ 温暖化影響研究担当

松本 光朗

1. はじめに

森林分野の温暖化緩和策には、森林による吸収と木材利用による排出削減という2つの異なったアプローチがある。この2つは深く関連しており、切り離して取り扱うことはできない。では、そのなかで、中長期的な視野で、森林分野ではどのような緩和策を進めるべきだろうか。この報告では、森林分野の地球温暖化緩和策について整理したうえで、森林・林業・木材利用を統合した森林炭素統合モデルを開発し、その将来予測により森林分野の緩和策を議論する。

2. 森林分野の温暖化緩和への貢献

森林は大気中の二酸化炭素 (CO₂) を吸収し、それを数十年から数百年にわたり体内に炭素を蓄積する。林木の炭素は、最終的には枯死や腐朽あるいは焼却によりその多くが大気に還っていくが、またその CO₂ を次世代の森林が吸収して育っていく。森林と大気の間で炭素は巡り回るが総量としては変わりが無い。土壌を含む森林としては長期間、安定的に炭素を吸収し蓄積しており、大気中の CO₂ 濃度は抑えられている。したがって、森林は地球温暖化の主因である大気中の CO₂ 濃度を調整する役割を持っている。

また、森林の循環を通して得られた木材を上手に利用することにより、CO₂ の排出削減を行うことができる。建築物や家具として炭素を貯蔵する【炭素貯蔵効果】、製造時に多くのエネルギーが必要な金属製品等の代わりに木材製品を使うことにより製造時の排出を節約する【省エネ効果】、木材を燃料としてエネルギーを作ることにより化石燃料からの排出を削減する【化石燃料代替効果】が、地球温暖化緩和への木材の機能であり役割である。

このように、森林分野の地球温暖化への貢献は、森林・林業・木材利用という一連の流れのなかで、森林による吸収と木材利用による排出削減という両面からのアプローチによるものであることが大きな特徴であり、この特徴を活かした緩和策が求められる。

3. 京都議定書報告の森林

京都議定書は、先進国の温室効果ガスの排出削減目標の国際的な約束であり、我が国の京都議定書の温室効果ガス削減目標は、第一約束期間である2008～2012年において、基準年(1990年)と比較して6%削減というものであった。約束期間内にリーマンショックによる景気減速や原発停止による火力発電の増加という想定外の出来事もあったが、産学官一体となった努力により達成される見込みである。最終報告は審査中ではあるが、達成は間違いない。



図1. 京都議定書報告の森林による吸収量の推移
日本国温室効果ガスインベントリ報告書¹⁾から作図

この目標達成には森林の吸収量が大きな役割を担っている。算定ルールでは、基準年以降に間伐などの森林施業がなされた森林の吸収量を、基準年の排出量に対し 3.8%を上限として算入できる。そのため、林野庁は間伐促進等の温暖化対策を進め、結果的にそれを達成した。

京都議定書第2約束期間においても、このルールは大きくは変わらず、間伐を中心と施策が進められている。しかし、中長期で考えれば、今後人工林の多くは主伐期に入り、主伐中心の施策に移行せざるを得ない。現行の算定ルールにおいても、主伐による炭素蓄積量の減少はCO₂排出として算定される。このような状況の中で、どのような施策を取るべきだろうか。

4. 森林分野の緩和策

1) IPCC が示す緩和策

IPCC 第5次報告書第3作業部会報告は、森林分野の最もコスト効率の高い緩和策として、新規植林、持続可能な森林経営、及び森林減少の抑制を挙げ、その重要性は地域によって大きく異なると報告している。また、木材利用による緩和策として、バイオマス利用による化石燃料の代替や、木材製品による金属などのエネルギー集約型製品の代替を掲げている。

このうち、森林減少の抑制は世界的に見て最も大きな森林分野の緩和策ではあるが、その対策の必要性は途上国に集中している。国内においては、持続可能な森林経営を通じた吸収量の増加と、バイオマス利用を含めた木材利用が、重要な緩和策として考えられる。

2) 我が国での森林・林業での緩和策

我が国での適用可能な緩和策を紹介しながら、当プロジェクトの成果を併せて報告する。

(1) 伐採・再造林

炭素に注目すると、森林の伐採は森林から炭素を持ち出し、木材利用のサイクルに乗せるものと見なすことができる。そのため、伐採量の大小は、森林による吸収量や木材利用による排出削減量に大きく影響をもたらす。さらに、人工林では伐採後に再造林することが将来の吸収量を約束するものであり、その再造林率を上げることは効果的な緩和策となる。

(2) 間伐

間伐遅れの人工林は、直径に対する樹高の比（形状比）が高く、細長い林木が多く集まる林分になり、風害などの被害を通じたCO₂の排出をもたらす危険性が高くなる。また、林内は暗く林床植生が乏しいため、土壌流出の危険性が高まる。人工林への適切な間伐は林木の直径成長を促し、形状比を抑えて風害などの被害を抑制し、林床植生を生育して土壌流出を軽減する効果を持つ。つまり、森林の健全性を維持することを通してCO₂排出を低減する緩和策となる。

(3) 優良品種・新品種の利用

温暖化により、現在の植栽されている樹種・品種の人工林の適地が移動することが予測されている。そのため、温暖化に耐性を持ち、成長も良い品種を利用することは、重要な緩和策と同時に適応策となる。その見地から、本プロジェクトにおいてはスギ優良品種の選抜、北海道におけるクリーンラーチの利用について研究を進めてきたので、その成果を紹介する。

スギ優良品種の選抜（ポスター K-05） 地球温暖化に林木育種サイドから対応するため、森林総合研究所林木育種センターでは「炭素固定能の高いスギ品種」を開発してきた。炭素固

定能の高いスギ品種は成長に優れかつ材密度が高いスギであり、日本全国で選抜されたスギ精英樹 3760 個体の調査結果から選抜されたものである。これら炭素固定能の高いスギ品種は日本全国で 49 品種が開発されており、関東および中部地区で 17 品種が開発されている。本プロジェクトにおいてはその品種の一つである「上都賀 7 号」を用いて解析を行った。

上都賀 7 号は供試した各試験地において優れた成長を示し、また材密度も高いことから炭素固定能の高いスギ品種であることが明らかとなった (図 2)。従来種苗から上都賀 7 号へ植え替えた場合のシミュレーションを行った結果、緩やかな伐採増加シナリオ (5-3) 参照) において最も顕著な植え替え効果が認められた。このことから林業を振興すると同時に炭素固定能の高い品種を利用することで、全体として炭素固定量を増加させることができると考えられた。

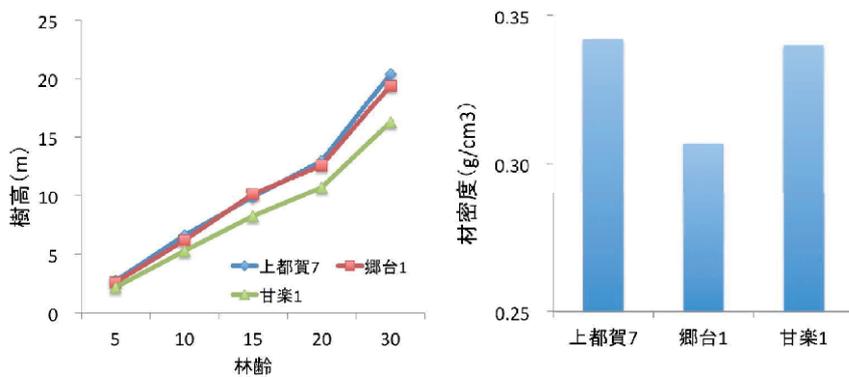


図 2. 試験地 1 における各クローンの樹高成長 (左) および材密度 (右)

クリーンラーチ (ポスター K-06) クリーンラーチは、グイマツクローン「中標津 5 号」を母親、カラマツを父親とする種間交雑品種で (図 3)、炭素固定能が高いことから北海道で選抜された。材の強度が高く、幹が通直であり、優れた材質を示す。本プロジェクトにおいて、このクリーンラーチの利用について、実行可能性の評価と普及のための技術開発を行った。

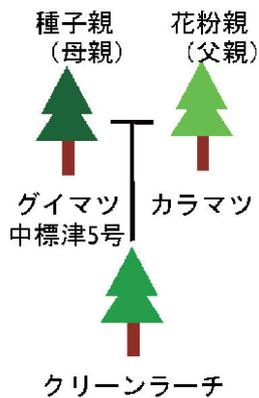


図 3. クリーンラーチの系統図

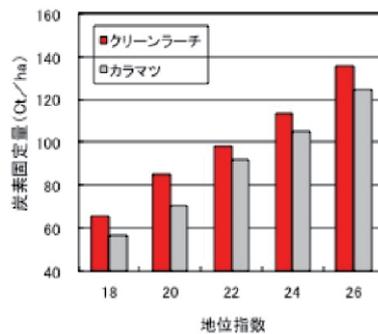


図 4. カラマツとの成長の比較

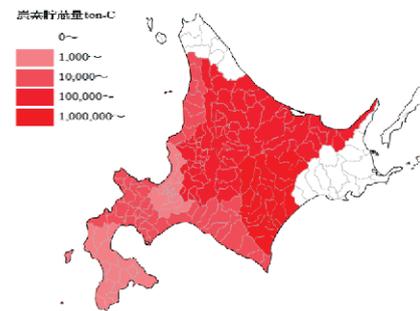


図 5. 2050 年の炭素固定量の予測
全道計 286 万 tC (1050 万 tCO₂)

クリーンラーチは北方系樹種を母樹とするが、炭素吸収速度はカラマツよりも良いことが分かった (図 4)。また植栽試験地のデータから構築した成長量モデルの解析から将来温暖化して

も北海道のほとんどの地域で炭層固定量が現在より増加することが分かり、将来の CO₂ 削減効果が期待できることが分かった。既に植栽用苗木の生産が行われており、さらに間伐特別措置法による特定母樹の指定を受け新たな採種園造成計画を策定し、増産を進めている。

本プロジェクトでは、挿し木による大量生産に対応するため、挿し木床の土詰め工程や挿し木苗木の植え替え工程の機械化を図った。また、植栽したクリーンラーチによる早期炭素固定を促進するために光合成速度と光環境の関係から成長モデルを作成し、最適な帯状更新モデルを開発した。採種園造成計画や本プロジェクトによる苗木生産の効率化ならびに道庁が試算した将来の造林面積に基づき推定した 2050 年のクリーンラーチによる炭素固定量は 2864 千 ton-C となった (図 5)。

エリートツリー 本委託プロジェクトの中の研究「新世代林業種苗を短期間で作出する技術の開発」では、人工林の 4 割を占めるスギを対象に従来よりも格段に成長に優れた「新世代林業種苗」を短期間で作出する革新的な技術を開発している。このようなエリートツリーの育苗は、成長に優れ幹が大きいなど炭素を吸収する能力が高く、あわせて材質・形質の優れたもので、植林面積が同じでも炭素吸収量が向上するなど、緩和策として期待が高い。さらに、成長に優れると同じ面積でも収穫量が増えるうえ、下草刈りを減らせるなどコスト削減により林業経営で有利になる。研究開発の成果に期待したい。

3) 木材利用での緩和策

(1) 建築・家具での木材利用量・木材利用率の向上

建築・家具で使われる木材の量と木材利用率の向上は、木材による炭素量の増加をもたらす炭素貯蔵効果による緩和策となる。

我が国では、約 60 年前には建築着工床面積の 9 割近くが木造であり、多層階のオフィスビル・店舗・工場等の非居住用建築物も近代木造により建てられていた。高度経済成長や建築学会の「木造禁止決議」などで着工木造率は減少したが、3 割を下回ることはなく、ここ 30 年は 35%前後で推移している。家具の個数木製率も同様な傾向にある。近年は「公共建築物等木材利用促進法」や建築学会等の「建築ビジョン 2050」などで非居住用建築物も木造でという機運が生まれている。着工床面積の 7 割は木造で容易に建築可能な 3 階建て以下であり、規制緩和等により木造率の拡大が可能である。家具もまた同様である。木造・木製率の増加は木材利用の炭素貯蔵・省エネ代替・化石燃料代替効果により、CO₂ 削減が期待できる。

近年、木材利用量と木材利用率の向上に関わる技術として、CLT (Cross Laminated Timber : 直交集成板) と呼ばれる木材製品の開発・利用が急がれている。これは、ひき板を並べた層を、板の方向が層ごとに直交するように重ねて接着した大判のパネルで、ビルなどの大規模な建築物にも利用できるように木材利用の促進が期待されている。CLT に関しては、当農林水産技術会議委託プロジェクト研究の下、「伐採木材の高度利用技術の開発」と題したプロジェクトで実用化・普及のための研究開発を進めている。

(2) 土木での木材利用量と木材利用率の向上

土木分野においても木材利用率の向上は、社会での木材による炭素量の増加をもたらす炭素貯蔵効果による緩和策となる。

従来、土木分野において「木」は主要な資材であったが、戦後の森林資源が枯渇していた時

代に「木材利用合理化方策」が閣議決定され、コンクリートや鉄への代替が進んだ。しかし近年は「公共建築物等木材利用促進法」にも木製ガードレール・遮音壁が利用促進対象として記載され、土木学会木材工学委員会・森林学会・木材学会が2020年までに、現在100万m³程度と推計される土木木材利用を400万m³とするロードマップを提言するなど、土木木材利用の復興が進みつつある。木製代替が可能な土木構造物には木橋や木製治山ダムなど多種にわたるが、利用ポテンシャル的に大きいのは、木製ガードレールなどの道路関連施設と、軟弱・液状化地盤対策としての丸太打設工法などの地中利用である。各種土木構造物の省エネ代替によるCO₂排出削減効果の研究も進んでいるが、特に丸太打設は地下水位以下では腐朽しないため炭素貯蔵効果による削減も期待でき、林野庁による実証事業が各県で進められている。

(3) バイオマス利用

バイオマス利用は、化石燃料代替効果によりCO₂排出削減をもたらす。すでに、再生可能エネルギー電力固定価格買取制度（FIT）を背景に、林地残材、建築廃材等による木質バイオマスの利用は強力に推し進められている。木材工業残材は既に95%程度有効利用され、「建設リサイクル法」等により木材利用系残廃材もエネルギー利用を中心としたリサイクルが進んでいる。利用形態はチップ、ペレット、薪によるストーブやボイラーでの発熱・発電や、火力発電所での石炭混焼などが代表的なものである。バイオマス利用を拡大するには、残廃材のフローの増加が必要であり、根本的には木材利用の拡大が必要である。

5. CO₂吸排出量の将来予測（ポスター K-07）

1) なぜ将来予測が必要か

地球温暖化は数十年を経て徐々に進み、森林の管理は少なくとも数十年を単位とする。そのため、森林分野の地球温暖化の影響や対策は、数十年から百年といった中長期的に捉えざるを得ない。また、緩和策の効果も中長期的に現れることから、緩和策の効果の評価するにも、将来予測を行う必要がある。さらに、モデルによる将来予測が可能となれば、我々が望む将来の目標を掲げ、それに向かってどのような緩和策を取れば良いのかを検討するバックキャストリングも可能となる。このように、森林分野の緩和策を検討するには、中長期的な将来予測により効果を比較検討することが必要となる。

2) 森林・林業・木材利用を通じた森林炭素統合モデル

先の議論の通り、森林分野の緩和策を検討する場合、森林による吸収量と木材利用による排出削減量の両者进行评估する必要がある。しかし、森林による吸収と木材利用による排出削減は深く関連しており、将来予測では森林と木材を切り離して取り扱うことはできない。この時、林業は森林と木材を繋ぐ役割として捉えられる。このような視点から、地球温暖化の影響や対策の効果を反映する、森林・林業・木材

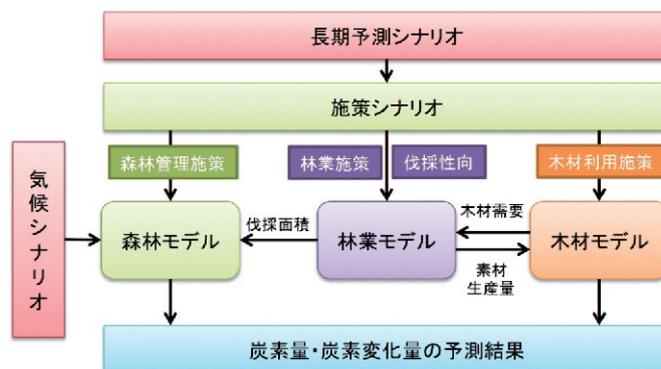


図6. 森林・林業・木材を通じた森林炭素統合モデル

を通した森林炭素統合モデル（以下、統合モデルと称す）を開発した。

統合モデルは、環境要因や立地要因から森林の生産量を推定する森林モデル、伐採面積や伐採量を予測する林業モデル、そして製品別に木材利用量を予測する木材モデルから成る（図6）。施策シナリオを背景に林業モデルが素材生産量を推定し、それを素材生産量の推定値などを森林モデルと木材モデルに受け渡し各モデルで推定を行うという構造となっている。

（1）森林モデル

予測の初期値となる現在の森林資源情報については、1 km 四方の3次メッシュを利用し、森林簿情報を基礎とする国家森林資源データベースと森林資源モニタリング調査から森林データベースを作成した。森林モデルは植生モデルと土壌モデルから成り、資源と気候に応じた成長と炭素増加と算出すると同時に、シナリオに基づいた伐採と炭素減少を算出し、森林データベースを順次更新していくという構造を持つ（図7）。森林タイプは、スギ、ヒノキ、カラマツ、天然林（主に広葉樹）、その他（マツ、エゾマツ、トドマツ）という区分としている。また、広葉樹天然林については、リモートセンシングと地上調査から森林分布図を作成し（図8）、これを利用して常緑林と落葉林を区分し、炭素蓄積量推定に反映した。

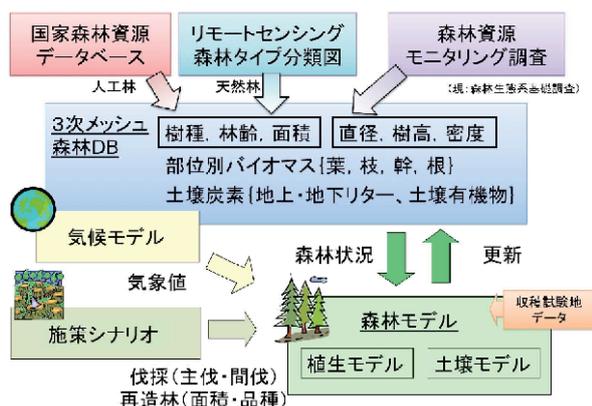


図7. 森林モデルと森林データベースの関係

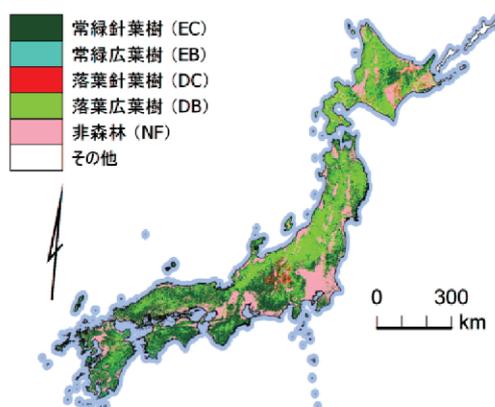


図8. リモートセンシング（Landsat TM&ETM+）画像と地上調査による森林分布図（ポスター K-03）

（2）木材モデル（ポスター K-04）

建築、家具、紙、土木それぞれについて、炭素貯蔵効果、省エネルギー効果、化石燃料代替効果を定量的に評価するためのモデルを開発した。

わが国の木材はパルプ用材を除くと多く（60～70%）が建築向けに利用されており、続いて家具、梱包材、土木向けなどが多いと推測される。また紙も木材製品の一種であり非常に多くの量が社会利用されている。このうち製品寿命の長い建築および家具、製品寿命は短いものの量が膨大である紙に加え、将来需要増が見込まれる土木を加えた4部門を木材利用モデルの対象とした。

どの部門についても木材投入量はある程度統計を用いて把握できるものの廃棄量の把握が難しく、現状のストック量を推計することが困難であるため、本モデルは投入量からストック量を推計する構造となっている（図9）。これまでの成果では国産材・輸入材の別は検討していないが、林業モデルからの出力をもらうことで今後検討する予定である。

推計の概要は以下の通りである。炭素貯蔵効果については、建築における年々の木材ストック量を算出し、炭素量に換算することにより、国内における伐採木材製品の利用による炭素吸収・排出量を評価した。省エネルギー効果については、表1のように、木造・木製にすることによる、排出量の原単位を求めて推定した。また、化石燃料代替効果については、エネルギー利用された木材量から発熱量を推定し、それを重油換算して推定した。

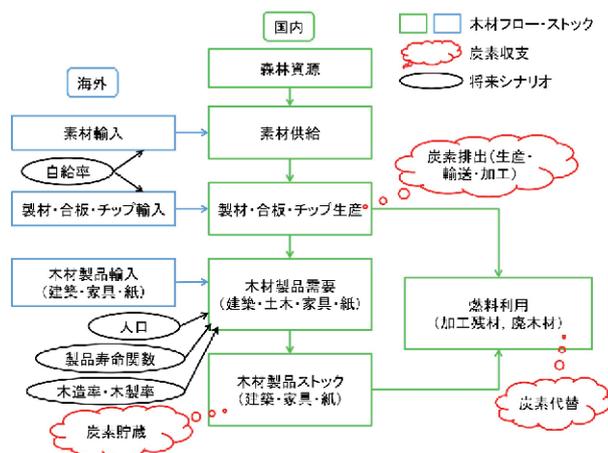


図9. 木材モデルの構造

表1. 住宅と非住宅の代替効果の比較

単位： 千トンC	増加分	減少分	変化量	延べ床面積あたり 変化量(kg-C/m ²)
住宅	883	-1,070	-187	-31.6
非住宅	793	-1,033	-240	-34.9
				32.8 ※着工面積を用いて加重平均

3) 施策シナリオ

将来予測の結果は、これから行う施策によって大きく変化する。そのため、林業と木材利用に注目し、伐採を控えて資源を温存する「資源温存シナリオ」、現状の施策を延長する「現状シナリオ」、緩やかに林業・木材利用の振興を進める「緩やかな伐採増加シナリオ」、森林所有者の意向を反映した「所有者意向シナリオ」、新森林林業基本計画に沿った積極的な林業生産を行う「新基本計画シナリオ」といった5つの施策シナリオを作成した(表2)。ただし、これらのシナリオは全て施策によってコントロールできるものではなく、実際には、林業および競合する資材に関する技術発展や、世界の政治経済状況、それに森林所有者の意識変化によっても大きく変化する。ここでは、予測を行うための施策と連動したシナリオと理解してもらいたい。

以下、施策シナリオとそれにもとづく具体的な指標について解説する。

(1) 林業の指標

現状シナリオでは、将来、齢級構成が高齢化しても主伐面積が近年の実績値と変わらずに、森林の高齢化が継続し、生産量の増加はわずかであるとした。人工造林面積も近年の実績値から変化しないものと想定した。

緩やかな伐採増加シナリオでは、既存人工林の伐採齢級を分散させながら、最終的には200年生までにフル活用することを想定して、80年生までに約2割、100年生までに1/3程度を皆伐するような伐採計画とした。生産量は2050年までには初期の2倍以上に増加する。

一方、資源温存シナリオでは、木材自給率を一定に維持し、木材需要の減少に合わせて、国産材生産量も減少するものとした。5つのシナリオのうち、最も伐採量が少なく、森林の蓄積を温存するシナリオである。

所有者意向シナリオでは、森林組合に加入する森林所有者に対する意向調査結果をふまえて、樹種や地方によって異なるが、2011~2030年の20年間に15~30%、2031~2050年には25~30%

の人工林が皆伐されるものとした。年伐採面積率は 0.75～1.5%となり、現状に比べて極めて高く、5つのシナリオの中で最も伐採が多いシナリオとなった。

表 2. 5つの施策シナリオと指標

シナリオ名	林業の指標			木材利用の指標	
	主伐面積	再造林率	新品種利用	建築・家具	土木
資源温存	現状面積から減少	現状率から増加	無	現状木造・木製率 (35%)	現状利用量 100万m ³
現状	現状面積(年0.3%程度)	現状造林面積	無	現状木造・木製率 (35%)	現状利用量 100万m ³
緩やかな伐採増加	2050年までに2倍以上 (人工林を80年生までに2割、 100年生までに1/3程度皆伐)	現状率	無	2050年までに 木造・木製率50%	2050年までに 利用量300万m ³
所有者意向	2011-2030年に15-30% 2031-2050年に25-30% (樹種別、地方別でアンケート 調査結果を補正して作成)	アンケート結果 カラマツ7割 スギ・ヒノキ5割程度	無	2050年までに 木造・木製率70%	2050年までに 利用量600万m ³
新基本計画 (積極的林業・ 木材利用)	2020年素材生産量3900万m ³ 2030年5000万m ³ 主伐大幅増、間伐材利用大幅 増、伐捨て間伐材大幅減	上昇	有 2050年までに 70%に増加	2050年までに 木造・木製率70%	2050年までに 利用量600万m ³

新基本計画シナリオは、平成 23 年 7 月に策定された森林・林業基本計画および平成 26 年 4 月から平成 41 年 3 月までの全国森林計画に整合するように作成したシナリオである。伐捨て間伐材から利用間伐材への移行と、主伐の増加により、国産材生産量を 2020 年に 3900 万 m³、2030 年に 5000 万 m³に増加させ、造林面積も 15 年間の年平均 63000ha に増加させるシナリオで、5つのシナリオのうちでは、所有者意向シナリオに次いで 2 番目に伐採が活発なシナリオである。2030 年以降も 2030 年と同様の活発な伐採・造林が 2050 年まで続くものとした。

間伐材の利用率については、すべてのシナリオで対象林齢の上昇に伴って高まることを想定しているが、とりわけ新基本計画シナリオでは 2020 年に間伐材積の 8 割が利用されるよう急速に利用率が高まるものとした。

なお、これらのシナリオの実行可能性を考えるため、再造林林率を 50%以上にする条件を調べたところ、現状の生産性を前提すれば、スギでは木材価格が 10000 円/m³ (伐期 70 年) 以上、ヒノキでは 17000 円/m³ (伐期 70 年) 以上、カラマツでは 9000 円/m³ (50 年伐期) 以上であると考えられた。今後、生産性の向上、低コスト化が進めば条件は変化する。

(2) 木材利用の指標

木材利用の指標としては、建築・家具部門における木造・木製率と土木分野での木材利用拡大に注目して 3 種類の指標を設定した。

建築床面積・家具生産個数の木造・木製率はこの 30 年 35%前後で推移しており、また土木木材利用量の推計では年間 100 万 m³程度である。この値を現状と同等として「資源温存シナリオ」と「現状シナリオ」の指標として用いた。

また、「公共建築物等木材利用促進法」により、非居住用建築物の木造化や土木木材利用の復興が期待される。木造で建築可能な 3 階建以下の着工床面積は約 7 割で、中層・中大規模建築の木造化も期待でき、家具においても木製の制限は特にない。土木学会木材工学委員会・森林学会・木材学会では、2020 年における土木木材利用を 400 万 m³に拡大するロードマップを提言している。それらを考慮し、2050 年における建築・家具の木造・木製率 70%、土木木材利用 600 万 m³といった指標を積極的な振興として「所有者意向シナリオ」と「新基本計画シナ

リオ」に用いた。

さらに、上記2種類の指標の中間的な値である木造・木製率50%、土木木材利用300万m³を「緩やかな伐採増加シナリオ」に用いた。

4) 予測結果

先に示した5つの施策シナリオをもとに、森林炭素統合モデルを使って2050年までの予測を行い、その結果を図10にまとめた。ここで、森林・林業・木材利用を通じた緩和効果の評価方法として、森林による炭素蓄積変化量、木材の炭素貯蔵効果による炭素蓄積変化量、木材の省エネ効果による排出削減量、化石燃料代替効果による排出削減量を総和した総炭素変化量を用いる。総炭素変化量は炭素トン/年の表記だが、これをCO₂換算する場合は、分子量の比である44/12を乗ずる。

森林の炭素変化量は、資源温存・現状シナリオにおいて大きく、伐採増加・所有者意向・新基本計画シナリオにおいて比較的lowかった。これは、伐採量に応じた差であり、伐採によって炭素が持ち出される事が反映されたものである。また、各シナリオにおいて炭素変化量の多少の上下はあるものの、2050年に向けて大きく減少・増大するものは無かった。なお、各シナリオは同じように炭素変化量が上下しており、これは気候シナリオの気温や降水量の年々変動が森林の成長に変動を与えているものと考えて良い。

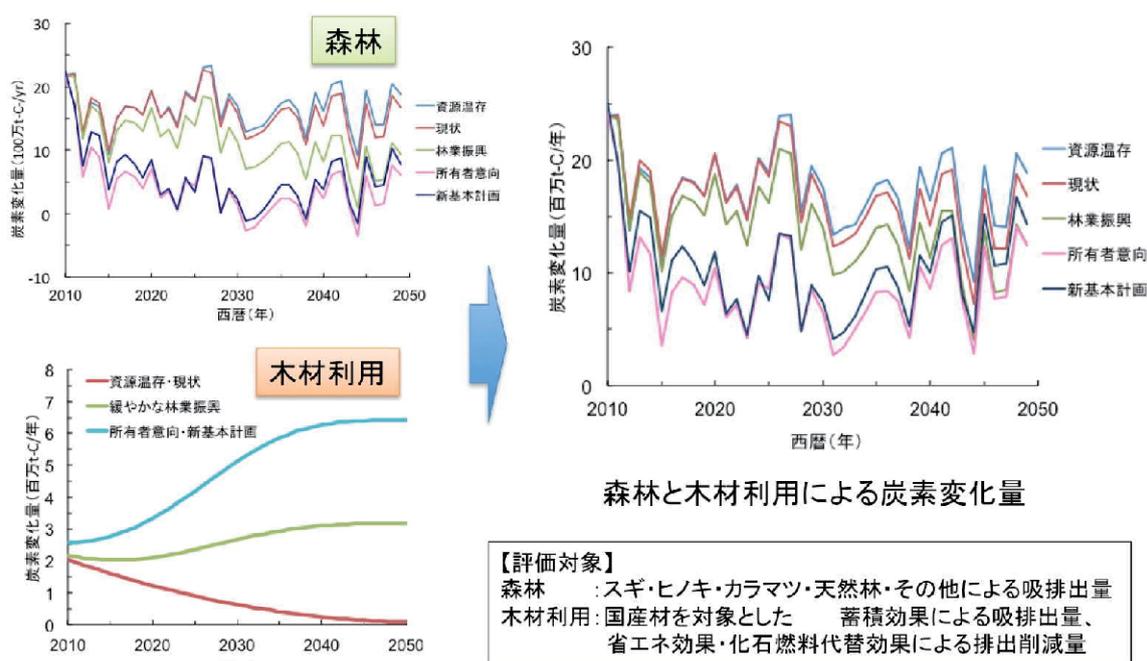


図10. 森林と木材利用による炭素変化量

左上は森林での炭素変化量、左下は木材による炭素変化量（炭素貯蔵効果）と排出削減量（省エネ効果及び化石燃料代替効果）の合算値。右は森林と木材利用による値を全て合計した炭素変化量を示す。

一方、木材利用のシナリオの指標は3種類であり、それが大きく炭素変化量の予測に差をつけた。資源温存・現状シナリオでは年を追うごとに小さくなっているが、これは森林の伐採量が小さいことが木材炭素からの排出をもたらし、連動して省エネ・化石燃料代替による排出削減も小さくなるためである。一方、木材利用を積極的に進める所有者意向・新基本計画シナリ

オは、特に排出削減量が多いことが分かった。

総炭素変化量の年変化は、木材利用による効果が加わったため、森林による吸収量と比較して各シナリオの差が小さくなった。特に 2040 年以降になると差が小さくなり、2050 年時のシナリオの順序は高いものから資源温存シナリオ、現状シナリオの順だが、緩やかな伐採増加シナリオと新基本計画シナリオの差がほとんど無くなることが分かった。

図 11 には、2030 年時、2050 年時の各シナリオの炭素変化量の内訳を示した。各シナリオにより、炭素変化量の内訳は大きく変化することが分かった。資源温存・現状シナリオにおいては、森林による吸収量、特に天然林による吸収量が大きく、緩やかな伐採増加シナリオの森林吸収量は現状シナリオの 55%、新基本計画シナリオでは 47% となった。資源温存・現状シナリオにおいては、木材炭素が排出源となっているが、これは人口減少による木材需要の減少によるものである。所有者意向シナリオは、伐採量が非常に大きくなるために、森林は排出源に転じる予測となった。一方、緩やかな伐採増加シナリオや新基本計画シナリオでは省エネルギー効果と化石燃料代替効果による排出削減量が非常に大きくなった。その結果、2050 年の森林による吸収量と木材利用による排出削減量を足し上げた総炭素変化量については、緩やかな伐採増加シナリオでは現状シナリオ比較して 75%、新基本計画シナリオでは 88% と大差なかった。

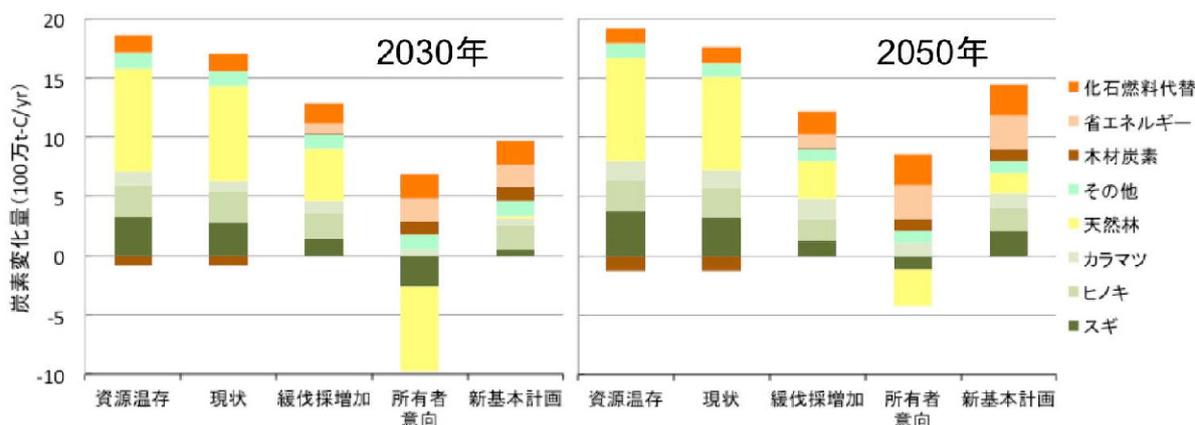


図 11. 炭素変化量の将来予測の内訳

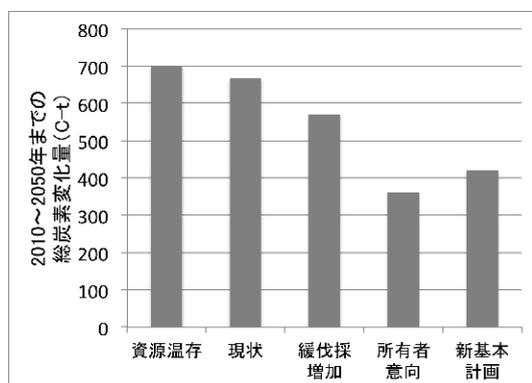


図 12. 2010~2050 年の総炭素変化量の積算値

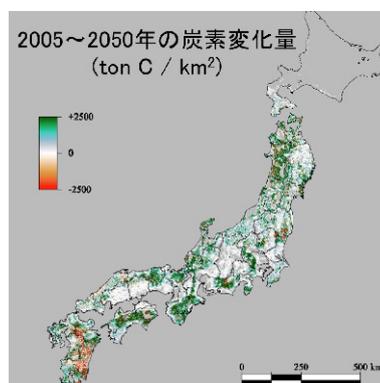


図 13. 森林本計画シナリオにおけるスギの炭素量変化

さらに、図 12 には 2010～2050 年の炭素変化量の累積値をシナリオ別に示した。このグラフからは、資源温存および現状シナリオの優位性は同じであるが、その次に緩やかな伐採増加シナリオが位置しその値は現状シナリオの 85%とわずかな差であった。新基本計画シナリオは、現状シナリオの 63%となったが、その理由として伐採の大きさと更新された林分がまだ若齢であることが考えられる。新基本計画では再造林率の向上と優良品種の利用促進を緩和策として採用するが、その効果は更新された林分の多くが旺盛な成長期に入る頃に顕著となるだろう。この研究では 2050 年までを予測期間としているが、新基本計画シナリオの特徴や優位性が現れるのはそれよりも後になることが推察される。中長期の予測や比較を行う場合、予測の期間によって評価が変わることを認識しておく必要がある。

なお、森林炭素統合モデルは地理的分布についても考慮しており、全国的な分布が分かりやすく表現できる特徴を持つ。図 13 には新基本計画シナリオでのスギの炭素変化量の分布を示している。全国的に炭素蓄積量は増えているが、九州や本州の林業地においては伐採が進み、炭素蓄積量が減少することを示している。東北地方日本海側や紀伊半島、四国での炭素量増加が予測されているが、これらの地域では現状の伐採性向を基礎にすれば、将来の伐採増加が見込めないことが背景にあり、林業のポテンシャルを表していると理解できる。

5) 議論

予測結果は、以下のようにまとめられる。

- ・いずれのシナリオにおいても、森林による吸収量は中期的には安定し、森林が排出源側に転じることはない。
- ・緩和を考慮した木材利用による CO₂ 排出削減効果は、森林による吸収量と匹敵する。
- ・施策シナリオにより森林吸収量と木材利用による排出削減量の内訳は大きく変化する。
- ・伐採量の増加は森林の吸収量を減少させるものの、緩和を考慮した木材利用の推進により排出削減量が増加し、吸収量低下の多くをカバーする。
- ・比較の時点や方法、また予測の長さで比較の結果は変わる。

実際の施策の選択は、地球温暖化緩和効果ばかりでは無く、地域振興や産業振興の視点、さらに他の森林の機能の評価を加えて総合的に判断することになる。例えば、ここで評価した緩和効果と、地域振興や産業振興といった視点を持てば、緩やかな伐採増加シナリオや新基本計画シナリオの周辺が、緩和効果としては現状シナリオと大きな差は無く、同時に林業振興、木材産業振興が進められるという点で現実的な目標となるのではないか。

6. 関連する研究成果

プロジェクトにおいては、上記のような総合的な緩和策の検討と並行し、緩和策に繋がる調査研究を行ってきた。その成果を紹介する。

1) 森林土壌からの温室効果ガスの吸排出 (ポスター K-02)

土壌からの 3 種類の温室効果ガス (二酸化炭素 CO₂、メタン CH₄、亜酸化窒素 N₂O) の発生・吸収量について、30 カ所以上の数年間にわたる観測結果と気候データを使用して広域推定モデルを作成した。このモデルには、地温・土壌水分予測サブモデルを組み込んでいるため、様々な気候変動予測にも使用可能である。このモデルを日本の森林に適用し、土壌からの 3 種類の温室効果ガス発生・吸収量の広域マップを作成した (図 14)。また、このモデルを利用して、

過去の気候下における発生量推定をおこなったところ、すべてのガスで増加傾向であることが明らかとなった（図 15）。

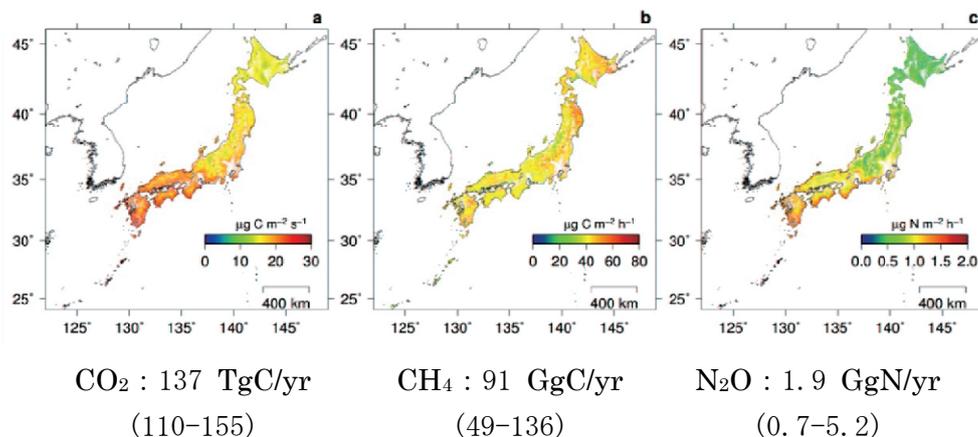


図 14. 森林土壌からの温室効果ガス発生・吸収量広域推定
CO₂、N₂O は排出量、CH₄ は吸収量、括弧内は 95%信頼区間

すべてのガスで増加傾向 — 1980 年から 2009 年の平均に対して

CO₂ : 0.23 %/yr CH₄ : 0.44 %/yr N₂O : 0.27 %/yr

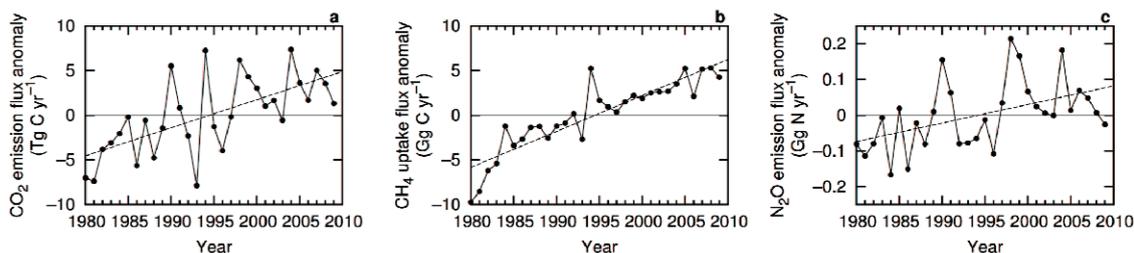


図 15. 広域推定モデルを用いた過去の温室効果ガス発生・吸収量の推定

さらに、MIROC シナリオによる気候変化予測と IPCC の大気濃度変化予測を使用し、将来のこれらガス発生・吸収量の予測をおこなった。その結果、CO₂、N₂O の排出量は単純な増加傾向であるのに対し、CH₄ の吸収量は 2050 年あたりから減少することが予測された（図 16）。

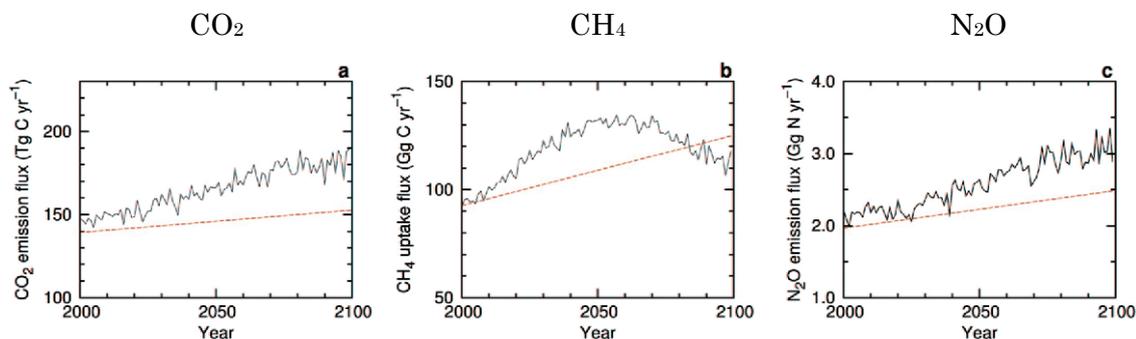


図 16. 広域推定モデルを用いた将来の温室効果ガス発生量の予測

シナリオデータ : MIROC-H の A1B シナリオ (CMIP3)、大気中メタン濃度シナリオ (IPCC, 2000)
モデル化 : Hashimoto et al. 2011 のガスモデルへシナリオを投入, 1 km グリッド, 月単位
オレンジの破線は 1980 年から 2009 年の推定値の線形トレンド

これは、大気中のメタン濃度がこの時期より低下することが予測されており、それに対応したものである。

これらのモデルは広域予測、かつ気候変動に対応できるモデルとなっており、現状では気候変動枠組条約や京都議定書での報告義務がない CH₄ と N₂O に関しても、対応できる体制を整えたものである。

2) CO₂ とオゾンの濃度上昇の影響 (ポスター K-01)

石油や石炭などの化石燃料を燃やすことで、空気中の CO₂ とオゾンの濃度が年々上昇している。CO₂ とオゾンが高くなった未来の環境では、樹木はどのように育つのだろうか。その疑問に答えるため、実際に野外で CO₂ とオゾンを与える試験 (図 17) を行い、樹木の成長への影響を調べた。意外にもミズナラ、コナラでは、予想されていたオゾンによる成長量の低下は見られず、CO₂ とオゾンが同時に上昇した環境で顕著な成長促進が見られた (図 18)。

CO₂ 濃度の上昇は樹木の成長を促進することで森林の炭素削減機能を高めると考えられている。オゾンはその機能を抑制すると考えられていたが、樹種によっては、オゾン濃度の上昇により高 CO₂ 環境での炭素削減機能が飛躍的に高まる可能性が示された。



野外で二酸化炭素とオゾンを与える施設

二酸化炭素濃度

コントロール：約 380 ppm (現在の濃度)

高二酸化炭素処理：約 550 ppm (2050 年頃の予測値)

高オゾン処理は

コントロールの約 2 倍の濃度に設定

図 17. 野外実験施設写真と濃度設定

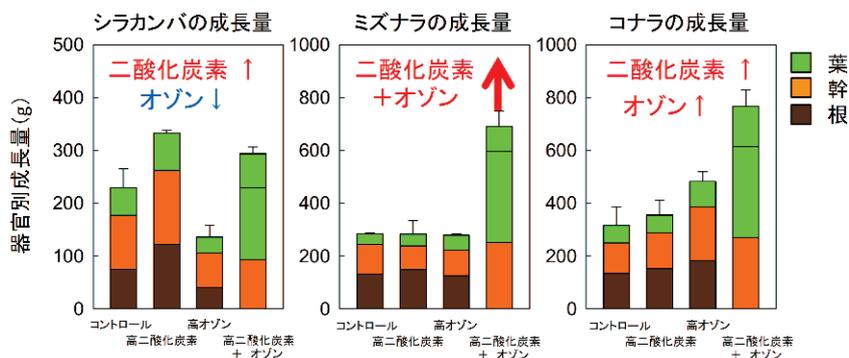


図 18. 高二酸化炭素・高オゾン処理が落葉広葉樹 3 種の成長に与える影響。

* シラカンバは 1 生育期、ミズナラ、コナラは 2 生育期処理後の成長量

オゾンは葉の光合成 (成長の基となる稼ぎ) を低下させる。オゾンに対する植物の防御反応の一つとして、根の成長を抑えるかわりに、新しい葉や枝を増やして光合成の低下を補う作用が知られている。オゾンの影響を和らげる物質であるイソプレンを作ることができるミズナラ、コナラでは、オゾンによる光合成への影響を受けにくい一方で、オゾンに対する防御反応として葉や枝が増えたことから、CO₂ の上昇による光合成の促進効果と相まって顕著な成長促進が見られたと考えられる。

3) 緑陰の遮熱効果 (ポスター K-08)

気候変動適応策への提案の一環として、身近にある都市近郊林等の緑陰を利用し、暑熱による熱中症等の健康被害を回避する方法を啓蒙することを目的とした研究を行った。

ここで、緑陰の涼しさを表す指標として「WBGT 湿球黒球温度」を利用することを提案した。温熱環境を表すには気温に加え、湿度、風速、輻射(放射)熱を考慮して総合的に評価する必要がある。WBGT 湿球黒球温度は、黒球温度計(グローブ温度計)と乾湿計の値から下記の計算式で算出し、WBGT は暑さ指数とも呼ばれている²⁾。

WBGT = 0.7NWB + 0.2GT + 0.1NDB 屋外で日射がある場合

WBGT = 0.7NWB + 0.3GT 室内あるいは屋外で日射が無い場合

NWB : 輻射熱を防ぎ自然気流に暴露された湿球温度、GT : 黒球温度

NDB : 自然気流の暴露された乾球温度

図 19 に盛夏の日向、屋内、緑陰の気温と WBGT の値を示した。気温に差はないが、WBGT の値は日向>屋内>緑陰の順となった。このように、WBGT は緑陰の遮熱効果を適切に表現するとともに、緑陰の暑熱を緩和する機能が酷暑猛暑の際の有効なシェルターとして乳幼児や高齢者等の健康被害を軽減できることを示した。

7. おわりに

これまで、森林分野の緩和策については、森林による CO₂ 吸収量のみが評価されてきた。京都議定書第 1 約束期間以降は、国際ルールが変わったことにより、木材の炭素貯蔵効果までは評価されるようになった。しかし、木材利用による CO₂ 排出削減効果については、概念的な議論や単独での評価はされてはいたが、このように森林と木材が関連づけられて評価されることは無かった。今回、森林・林業・木材を通した森林炭素統合モデルにより、初めて森林・林業・木材利用を一貫して森林分野の緩和効果を評価する方法を開発し、施策により大きく差異が生じることを明らかにした。

また、森林炭素統合モデルの開発に並行して、それに関係する形でオゾンによる影響の評価、森林土壌による温室効果ガス吸排出量の推定、リモートセンシングと地上調査による森林分布図の作成、優良品種の選抜と活用、緑陰による遮熱効果の評価といった研究について成果が得られた。今後、このような技術が実際の社会に活用されるよう働きかけたい。

引用文献

- 1) 国立環境研究所地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) (2014) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書, 独立行政法人国立環境研究所.
- 2) 環境省環境保健部環境安全課 (2014) 暑さ指数 (WBGT) : 熱中症予防のための指標, 熱中症環境保健マニュアル, 60-61.

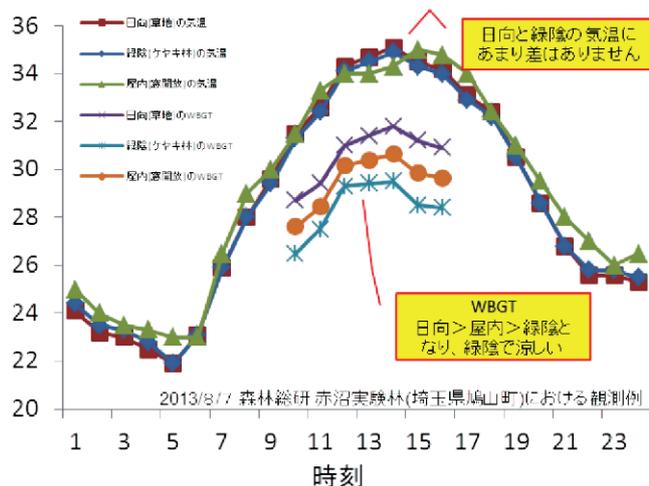


図 19. 盛夏日の日向、屋内と緑陰の気温と WBGT

森林への影響と適応策 ～植生、災害、病虫害～

(独) 森林総合研究所 研究コーディネータ 国土保全・水資源研究担当
高橋 正通

1. 気象観測による温暖化傾向

地球温暖化が日常の話題に上るようになって久しい。集中豪雨や大型台風の襲来、それに伴う水害や山地災害のニュースでも、地球温暖化の影響といわれるようになった。日々の寒暖や季節感から温暖化を実感することは多いものだが、その影響が森林に及んでいることを科学的に観測した例はそれほど多くはない。

気象庁の観測によると、日本の平均気温は 1898 年以降 100 年あたり 1.15℃の割合で上昇しており、猛暑日や熱帯夜の日数が増加している⁽¹⁾。その上昇傾向には波があり、1940 年代までや 1980 年頃は比較的变化が小さかったが、1960 年代や 1980 年後半からは高い上昇傾向がつついている(図 1)。降水量については、温暖化により蒸発散が多くなって大気中の水蒸気が増えるので、世界的には増加傾向がみられる。しかし日本の場合、一定の増加傾向は分かりにくく、降水日数は減少傾向を示している。ただし、日降水量 100mm 以上や 200mm 以上の極端に降水量の多い豪雨日数が増加している(図 2)。さらに、気温が高い年や雨の多い年が続いたと思うと、一転して冷夏や渇水の年が出現するような、最大と最小の振れ幅が大きくなってきた。地球の気候変動は気象観測のデータで十分実証されている。

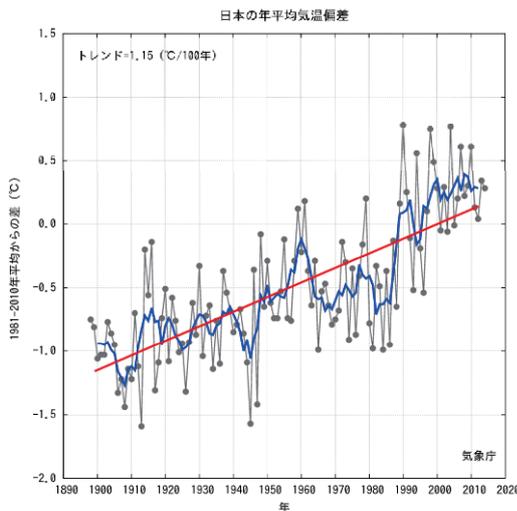


図 1 日本の年平均気温の変化⁽¹⁾

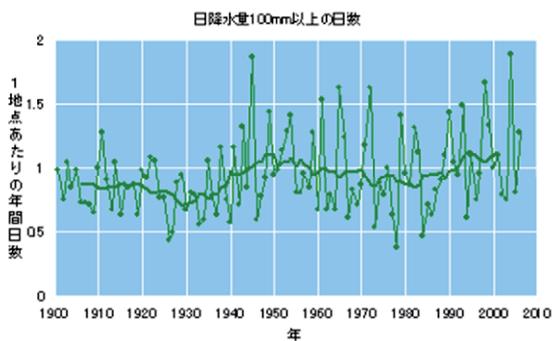


図 2 日降水量 100mm 以上の日数変化⁽¹⁾

地球温暖化の原因といわれる二酸化炭素 (CO₂) などの温室効果ガス濃度上昇と気温の上昇とは対応して進行しているが、その因果関係は非常に複雑なので懐疑論がある。しかし、気象観測や別々の科学者チームが独自に開発した数値モデルの結果などから、大多数の支持を得ている。CO₂の発生は石油の消費など人間活動によるものが多いので、発生量は経済状況やエネルギー源の種類などに左右される。経済発展や対策の異なる複数のシナリオにより将来の気候を予測すると、温度上昇パターンの異なる結果が得られる。その意味では将来予測は不確実性の高いものであるが、いずれの対策をとっても 22 世紀までに温暖化を完全に止めることはでき

ないと判断されている。そのため、温暖化の緩和策だけでなく、温暖化に適応する方策も重要と認識されるようになった。すでにイギリスやオランダなどでは政府レベルの行動計画が策定されており、わが国でも平成 27 年夏の閣議決定に向けた検討が進められている。

本レポートでは、はじめに農林水産省の委託事業として森林総合研究所が中心となって実施してきた地球温暖化に係る研究の中から、森林がうける影響の評価、影響の回避策、そして適応に向けた研究例を紹介する。ただし、山地災害や水資源への影響については、当初のプロジェクト計画を拡充して取り組むこととなったので、今回は途中経過の紹介にとどまる。最後に、研究例は多くはないが、研究成果を踏まえて温暖化適応策について考察する。

2. 温暖化による森林植生の変化の実態 (ポスター T-01)

気象観測やモデルによる研究から、地球温暖化の影響は高緯度や高標高になるほど大きいと予測されている。日本の植生に及ぼす影響としては、湿潤で冷涼な気候域に分布するブナの生育に適する地域（適域）が将来減少するという予測がある⁽²⁾。すでに北極や南極の結氷面積の減少や山岳地の氷河の後退など各地で温暖化の影響が報告されている。日本の気温は過去 100 年間で約 1℃以上上昇したが、森林のどこかにその証拠が確認できないだろうか。

本プロジェクトではアカガシを中心とする常緑広葉樹の成長に着目した⁽³⁾。森林植生は伐採など人為影響を受けると数十年以上影響が残るので、伐採されにくい寺社が管理する老齢天然林を選んだ。上部に落葉樹林、中腹に常緑樹林が分布する筑波山南斜面に 20ha の調査区を設け、現地調査を組み合わせながら、1961 年から 2005 年の間に撮影された空中写真を用いて、常緑広葉樹の樹冠面積を調べた (図 3)。その結果、アカガシなどの常緑広葉樹の占める樹冠総面積が徐々に大きくなり、33 年間に 44% 増加したことがわかった (図 4)。筑波山の気温の変化から、アカガシの分布上限の標高が過去 100 年間に約 150m 上に移動し、山頂も生育可能な範囲に入ったことがわかった。温暖化の結果、アカガシ等の樹冠面積が拡大したものと考えられた。



図 3 筑波山の航空写真における 20ha 調査区と等高線 (50m 間隔) 白は常緑広葉樹の樹冠を示す

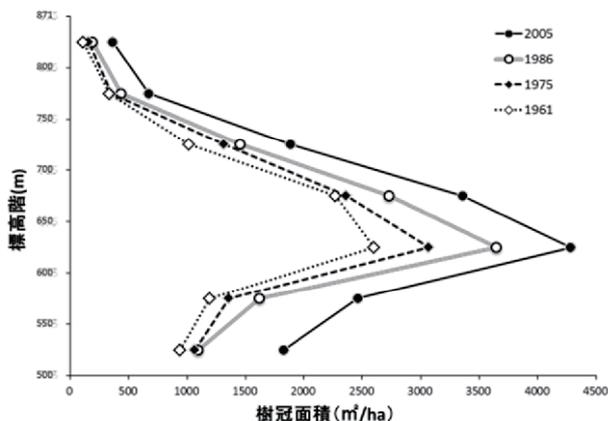


図 4 標高毎の常緑広葉樹の樹冠総面積の変化

3. 2010年の温暖化した日本の森林

このまま温暖化が進むとわが国の森林はどのような状態になるだろう。IPCC 第4次報告では、CO₂排出量を左右する経済発展やエネルギー源の違いを考慮したシナリオが多数作成され、それぞれのシナリオに対して将来の気候の予測が行われた(図5)。そのうち日本政府の方針に近いA1Bシナリオという「エネルギー源のバランスを重視した高成長型社会」で気候の変化を予測すると、21世紀末には温室効果ガスが現在の2倍程度となり、北海道で3℃以上、東北から西日本では2～3℃、沖縄・奄美では1.5℃程度上昇するとされている⁽¹⁾。降雨分布も予想されており、この予測値をもとに、森林のいろいろな分野への影響を解析してみた。

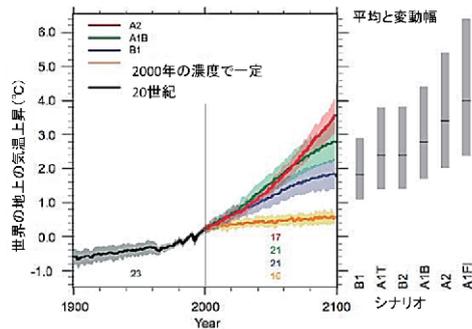


図5 IPCC 4次報告における気候変動の将来予測。エネルギー源や経済状況の異なる将来シナリオ(B1, A1T, B2, A1Bなど)によって気温上昇の予測は異なり、予測値のばらつきも大きい。しかし、どのような対策をとっても気温の上昇は避けられない。

(1) 春先の葉の展開時期(ポスター T-02)

桜の開花日が毎年変わるように、植物は気候の変化に敏感に反応する。温暖化に伴い春先の気温上昇が早くなると、落葉広葉樹の開葉時期も早くなる可能性がある。岐阜県の山地において、気温の変化、開葉の野外観測、リモートセンシングによる画像解析などを交え、開葉を決める気象要因を解析した。その結果、5℃以上の気温の積算値と開葉時期とは関係が深いことがわかった⁽³⁾。この関係を利用して、A1Bシナリオの気候将来予測を当てはめると、50年後には2週間程度、100年後には約4週間も開葉が早まると予想された(図6)。また高地よりも低地のほうが開葉時期は顕著に早期化することも予想された。2090年代の岐阜県では3月上旬に落葉広葉樹の開葉が始まることになる。この変化により、行楽シーズンだけでなく、植林時期の変化や光合成ができる期間が長くなることにより樹木の成長へも影響が及ぶ可能性が考えられる。

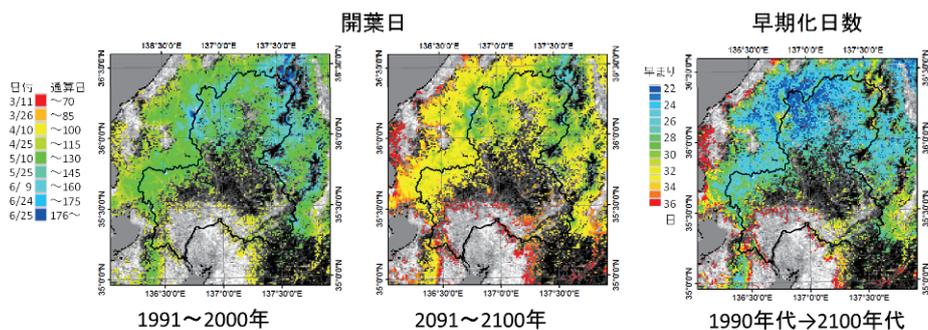


図6 岐阜県周辺の落葉広葉樹の1990年代の開葉日(左図)、2090年代の開葉日予測(中央)と早まる日数(右図)

(2) 森林の病害虫の拡大 (ポスター T10)

温暖化は森林の昆虫の活動にも影響を及ぼす。温度を変えて森林の害虫を育てると、昆虫の成育が変化する。例えば、北海道でエゾマツの衰退木などを加害するヤツバキクイムシは通常1年に1~2回出現するが、温暖化した21世紀末頃には年3回現れる地域が道内の半分ほどに広がると予想される(図7)⁽⁴⁾。また、イヌマキなどを食害するキオビエダシヤクは越冬できる地域が西日本から東日本へ広がったり、菌床シイタケの害虫であるムラサキアツバは1年間に発生できる回数が増加し、被害が拡大すると予想された。ナラ属の害虫であるカツラマルカイガラムシの被害も福島県を例に予測すると、全県に被害が拡大すると予想された。本プロジェクトではカツラマルカイガラムシ被害の拡大を防ぐための薬剤処理のマニュアルを作成した⁽⁵⁾。カツラマルカイガラムシは食用クリにも感染するので、早めに対処し被害拡大を防ぐよう本マニュアルが広く利用されることを期待したい。

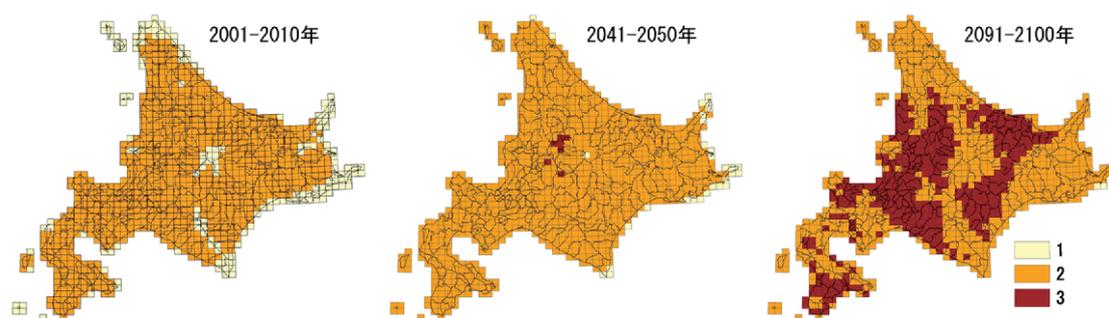


図7 北海道における温暖化に伴うヤツバキクイムシの世代数(1年間に発生する回数)の増加

(3) しいたけ生産への影響 (ポスター T11)

わが国のきのこの市場規模は年間2500億円と林業の市場規模と並ぶほど大きく、原木しいたけは山村の貴重な収入源となっている。しいたけの菌害としてはトリコデルマ属やヒポクレア属によるものが温暖化によって増えると考えられる。またキノコバエ類の被害拡大も予想されている。しいたけは、九州が主要な生産地となっており、温暖化対策は緊急の課題といえる。簡単な対策としては寒冷紗などで林内の温度を下げる栽培管理が挙げられるが、将来に備え耐病性の菌株の開発など総合的な対策が望まれる(図8、図9)。

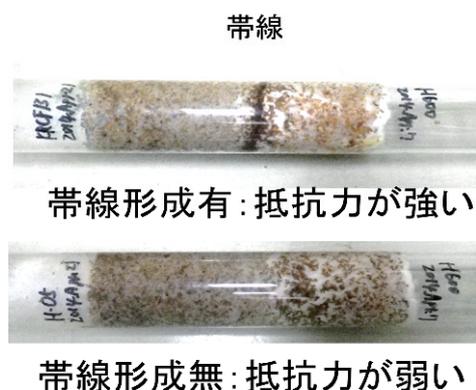


図8 対峙培養(病原菌とシイタケ菌を両側から培養)による病原菌耐性シイタケ菌株の開発(帯線ができると耐性がある)



図9 寒冷紗による原木シイタケの栽培環境の改善

(4) 森林の吸収源への影響 (ポスター T-03)

温暖化は森林のCO₂の吸収量には影響を与えないのだろうか。我々は北海道から九州まで全国6か所のさまざまな森林に樹高を超える観測タワーを建てて、樹上のCO₂の動きから森林の吸収量を評価している(図10)⁽⁶⁾。森林生態系全体のCO₂吸収量は光合成による固定量から樹体や土壌からの呼吸分を差し引いたものとして求められる。観測によると、森林1ha当たり毎年2~5炭素トンを吸収していることが分かった(図9)。

将来の予測を行うため、CO₂の吸収と排出に関わる各種反応を組み込んだBiome-BCGモデルをつかって札幌の森林における2100年までの吸収量を推定したところ、温暖化により光合成は増加したが呼吸も増加し、森林のCO₂吸収量は現在よりもわずかに大きい程度と予想された。

ただしこの推定は気温や降水量の予測値で求めたもので、大型台風等による風害被害や害虫の大発生などは考慮されていない。我々のこれまでの観測期間中には、岩手県安比のブナ林でブナアオシャチホコが葉の大半を食害した時の観測や、札幌に大型台風が襲来し、樹木も観測タワーも倒れる大被害を与えた時の観測データが含まれている(図11)⁽⁷⁾。これによると、食害後にCO₂吸収が大幅に低下したり、台風による風倒後、倒木や土壌有機物の分解によってCO₂放出が増加し、数年にわたり森林がCO₂の放出源になった様子が観測されている。このような森林の衰退や被害は、森林の吸収量評価にも重大な影響を及ぼす。カナダではマウンテンパインビートルという甲虫の被害が拡大し⁽⁸⁾、最終的に京都議定書における森林吸収源の算定をあきらめざるを得なかった。

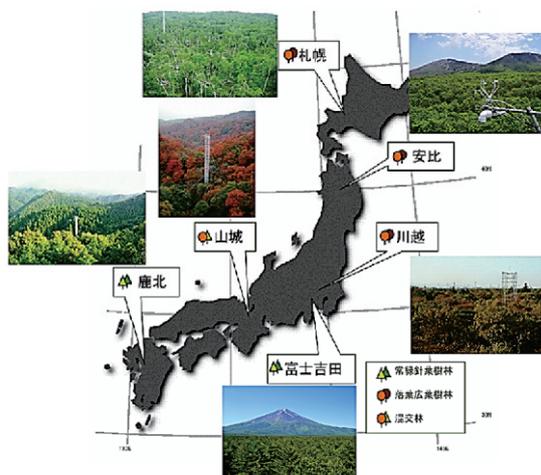


図10 森林総合研究所のCO₂フラックス観測タワーの位置

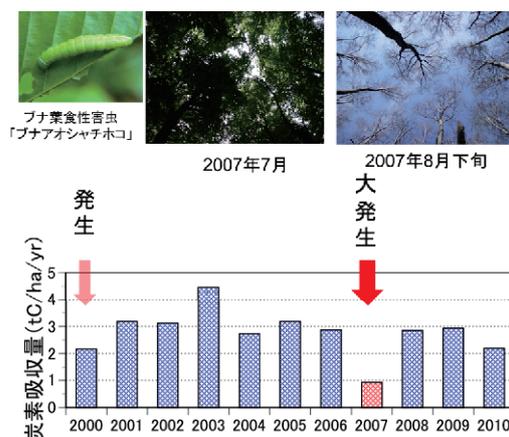


図11 ブナアオシャチホコによる食害の写真と発生年のブナ林の炭素吸収量の低下 (岩手県安比タワーサイト)

4. 極端現象による災害への備え (ポスター T-04、T-05)

集中的な豪雨や大型台風の襲来により崩壊などの山地災害や強風による被害などが増加している。温暖化に伴い出現する極端な異常気象を極端現象と呼んでいる。徐々に進行する温暖化に対し、たびたび発生する極端現象は、時に人災を伴い、対策が急務である。一方で治山工事などは対策費が巨額で工事に時間がかかる。どの程度の費用をかけて何の対策を優先的に進めるかの議論と国民の理解が必要である。低コストの対策としては森林の機能を利用した対策等も期待したい。すなわち、斜面土壌の安定性にとって、斜面の傾斜や降水量、土壌への雨の浸

透性、土壌下層のすべり面の存在などの物理的な条件は重要であるが、森林の場合、地中に張り巡らされた樹木根の土壌保持効果など森林の機能も重要な要因と考えられる。

(1) 森林の崩壊防止機能 (ポスター T-04、T-05)

崩壊防止機能の最も典型的な例は樹木を伐採した斜面との比較である。森林の有無が斜面崩壊の発生にどの程度影響するかについて、斜面崩壊が起きやすい花崗岩地域で調査した。九州の熊本・宮崎県境の市房山周辺で1970年代に大規模に伐採された地域で、伐採後の斜面について、撮影時期の異なる航空写真を用いて2005年までに発生した斜面崩壊の場所と植生との関係を調べた(図12)。その結果、伐採後植林せず放置されたり植栽木の弱齢の斜面では多数崩壊が発生したが、それに比べ森林のある斜面の崩壊面積は1/5以下に抑制されていた(図13)。また、降雨時間と強さと崩壊の発生との関係を調べたところ、皆伐地では伐採前に比べ、1/3程度の雨量で斜面崩壊が発生していることがわかった。この解析は、降雨に対する樹木根系の土壌保持の効果を定量的に示したものである。最近は大面積で皆伐されることはなくなったが、脆弱な地質では伐採面積をより小さくしたり、間伐を主体に森林を管理することで崩壊リスクを低減できることが示唆された。

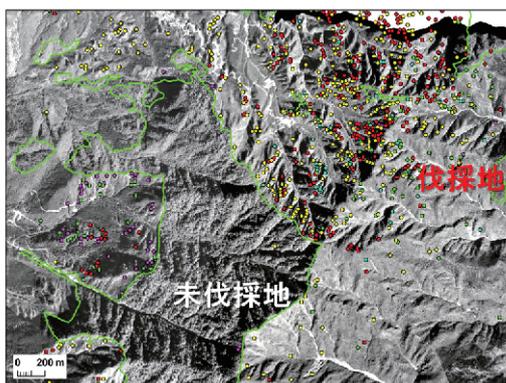


図12 1985～1990年に発生した崩壊地○。中央は非伐採地。

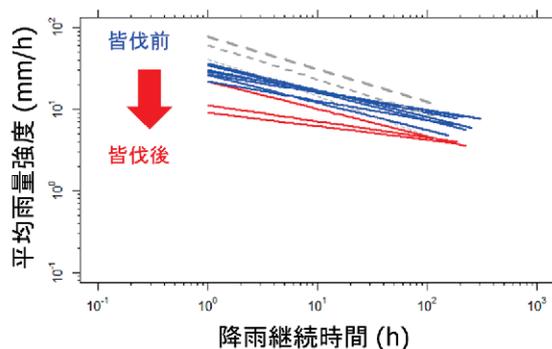


図13 市房山における平均雨量強度と降雨継続時間に対する崩壊発生基準線の変化。青線が森林伐採前、赤線は森林伐採後。

(2) 治山施設の崩壊防止効果 (ポスター T-06)

最近、降雨パターンが変化しているので、これまで経験したことのない大雨が、これまで崩壊の発生したことのない場所に起こる可能性がある。下流に住宅があるような山地災害危険区域などでは堰堤などの治山施設が造られ、災害に備えている。この効果がどの程度あるかを3次元の地形モデルや大型の屋内実験装置を使って解析した(図14、図15)。その結果、治山堰堤を入れることで斜面の安定性が高まり、崩壊が発生する時間が長くなった。また既存の治山堰堤を嵩上げする方法も有効であることがわかった。緊急の対策として、既存の堰堤を嵩上げすることは、コストを低減させる方法として役立つようである。

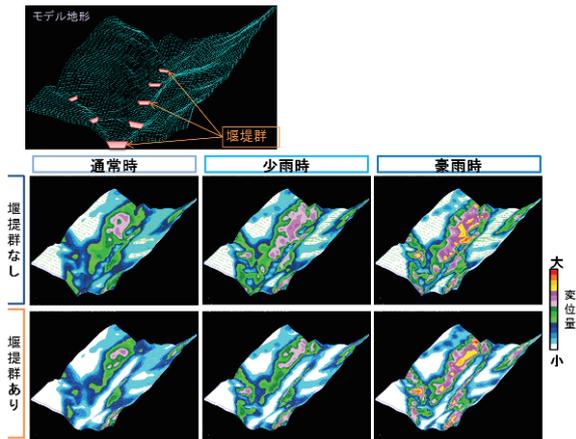


図 14 山地斜面の 3 次元地形をモデル。堰堤群がある方が降雨時の斜面の変位量は小さく、安定性が高い



図 15 集中豪雨による斜面の崩壊を再現する大型の斜面模型実験。毎時 100mm の豪雨では 2,891 秒で崩壊が発生した。

(3) 水源林への影響 (ポスター T-07、T-08)

温暖化の一方で、降水量の変化も予想される。気象庁のモデル (MRI) の A1B シナリオによると西日本では渇水の頻度も高くなる。岡山県南部に位置する森林総合研究所の竜ノ口山森林理水試験地ではこれまで 75 年以上、山地からの水流出をモニタリングしており、降水量や樹木の成長と水流出の関係などが詳細に調べられている。その結果を用い数値モデル HYCYMODEL により今後 50 年間で予測すると、少雨と森林の蒸発散や樹冠による雨の遮断により渇水の頻度が高くなることが予想された (図 16)。一方で、植栽後間もない場合と十分に繁茂した森林の場合では森林からの水の流出規模が異なることが示唆された。森林の管理の方法を工夫することにより、渇水や洪水の対策にある程度効果的であると考えられた。

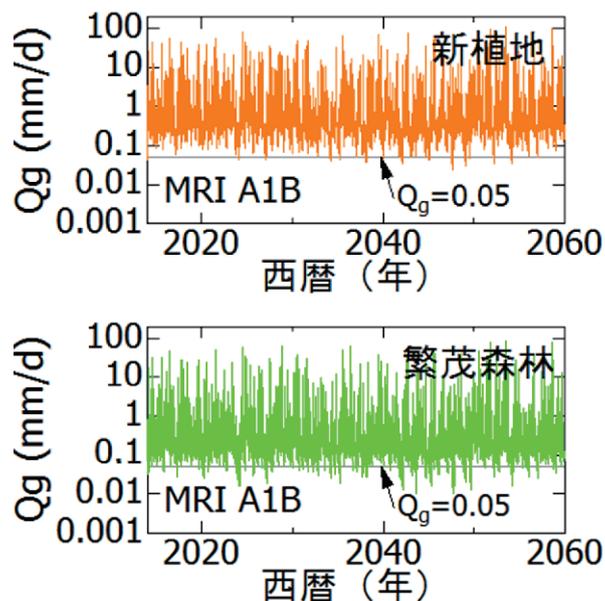


図 16 モデルによる竜ノ口山森林理水試験地の水流出予測。植栽後間もない場合 (上図) と森林が繁茂している場合 (下図) の比較。 Q_g (1 日の流出量 mm) = 0.05 以下の場合には渇水状態に相当する。

(4) 海岸林への影響 (ポスター T-09)

大型の台風や低気圧の接近により海岸付近は高波や高潮、塩害や飛砂に見舞われる。最近、海岸林の整備が進み飛砂などの影響は小さくなったが、台風の大型化に対しては、海岸林の継続的な維持管理は欠かせない。全国の海岸林の整備ではクロマツを密植して成林させてきたが、その後、手入れされずに過密な状態となっている場合が多い(図 17)。間伐や広葉樹の導入などの手入れが望まれているが、海岸林の間伐方法は定まっておらず、手つかずの林が多い。むやみに間伐を入れるとそこが風の通り道になったり、風倒が広がり、海岸林の機能が低下する恐れがある。そこで、風洞実験や現場の風速や塩分分布を調査し、海岸林の間伐方法を検討した。その結果、海岸からの海風に直交するように海岸林を筋状に3列残して1列を間伐することにより、風や飛砂、塩害を防止しつつ、成長を促し海岸林の防災機能を高めることができることを確認した(図 18)。パンフレットを作成して、海岸林管理の技術者に情報を提供している⁽⁹⁾。



図 17 過密状態の海岸林

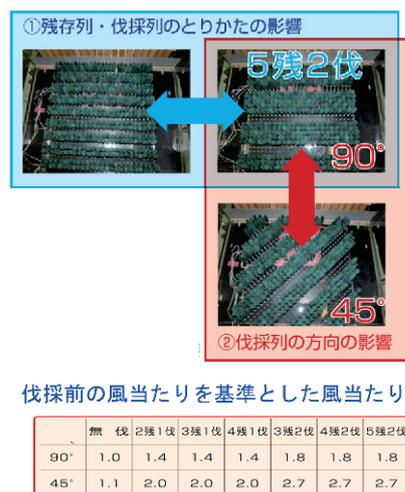


図 18 海岸林の間伐列の方向と風当たりの強度を測定する風洞試験

5. 考察

森林の場合、気候変動に対する反応は比較的緩慢なので、その影響の検出には時間がかかるが、今回のプロジェクトでは、過去の温暖化の影響をうけて筑波山南斜面の常緑広葉樹の樹冠面積が拡大していることを確認できた。森林植生はゆっくりではあるが一定の方向に着実に変化している。森林の温暖化の影響を確認するには時間がかかるが、同じように、適応策の効果が表れるのにも時間がかかると思われる。対策を早めに取りないと被害が拡大して対策費がかさんだり、最悪の場合、制御できなくなる可能性も考えられる。

病虫害対策では、被害要因や伝搬経路の解明は拡散防止策を決めるために必須である。しかし、温暖化に対し樹木が生理的に適応できず衰退が進むような場合、弱った樹木は病虫害被害をうけやすく、その対策は容易ではない。人工林ならば、適当な時期に伐採し木材を利用する

とともに、温暖化した気候に適した樹種や改良品種に順次植え替えるのが適当であろう。林業経営における森林管理は通常 40～50 年、長伐期になると 100 年以上のサイクルで経営計画を立てることを思うと、林業家にとって 21 世紀末の未来はそれほど遠い将来ではない。林業家が自分の山林の地質を理解し、斜面の状態を見ながら崩壊の危険性を回避しつつ木材を収穫し、経営を成り立たせていくことは、基本的ながらも重要な対策となるように思う。その上で、川下への被害予防策として、治山施設の導入や異常を早期に発見する観測システムの開発などが望まれる。

私たちは森林からさまざまな恩恵をうけており、それを多面的機能や生態系サービスなどと呼んでいる。多面的機能には、空気の浄化や、山地災害の防止、水源の確保、野生生物のすみかなど日常生活では目に見えなくても重要な恩恵が多い。日本学術会議は 2001 年にその目に見えない価値を年間 70 兆円と試算している⁽¹⁰⁾。この試算からずいぶん時間がたつので価値の見直しが必要と考えるが、公益的な価値の評価額はかなり大きいことがわかる。温暖化によって失われる森林の恩恵を定量し、影響の大きさ、重要度や対策にかかる経費等を客観的に明らかにし、政策判断や住民が選択肢を検討するための判断材料を提供することは、温暖化の適応技術の開発や対策の検討とともに重要だと思う。一方で、人は自分の身に被害が及ばないと影響を軽く考える傾向にあるので、日本の国土の 7 割をしめる森林の機能を日々訴えていくことが森林の関係者の役割であろう。

引用文献

- (1) 気象庁 (2013) 地球温暖化予測情報 第 8 巻 IPCC 温室効果ガス排出シナリオ A1B を用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測
- (2) 田中信行ら (2006) 天然林の分布を規定する気候要因と温暖化の影響予測：とくにブナ林について、地球環境 11 11-20
- (3) 田中信行・栗屋善雄 (2012) 地球温暖化は森林にどう影響するか？ 研究成果発表会「農林水産業は気候変動にどう対応するか？～気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発」29-38、2012 年 12 月 10 日 於：東京国際フォーラム
- (4) 尾崎研一ら (2014) 北海道における地球温暖化によるヤツバキクイムシの世代数変化予測、森林防疫 63(4) 142-150
- (5) 森林総合研究所ほか (2014) カツラマルカイガラムシの被害予測と薬剤防除法、第 3 期中期計画成果 9
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/3rd-chuukiseika9.pdf>
- (6) 大谷義一ほか (2010) 国内森林生態系の二酸化炭素吸収量の長期観測-森林総合研究所フラックス観測ネットワーク (FFPRI FluxNet) -, 砂防学会誌 62(5) 45-48
- (7) 山野井克己 (2012) 台風影響などさまざまな要因による森林の炭素吸収量の変動、研究成果発表会「農林水産業は気候変動にどう対応するか？気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発」(農業環境技術研究所プロジェクト運営事務局)、P-31 (ポスター発表)
- (8) Kurz WA ほか (2008) Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452, 987-990
- (9) 森林総合研究所 (2014) 健全な海岸林をめざして、第 3 期中期計画成果 16、
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/3rd-chuukiseika16.pdf>

(10) 日本学術会議（2001）地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価
について、<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/shimon-18-1.pdf>

REDD プラスのために熱帯林とその炭素蓄積の変化を計測・予測する

(独) 森林総合研究所 森林管理研究領域 資源解析研究室長 鷹尾 元
(独) 森林総合研究所 水土保持研究領域 水保全研究室長 玉井 幸治

1. はじめに

発展途上国の森林、なかでも熱帯林は急速に失われている。森林の破壊などによる温室効果ガスの排出は工業などを含めた全世界の排出量の2割に達するとも言われている。そこで、先進国が技術と資金を提供し、発展途上国が森林の保護・増進に取り組み、排出の削減量に応じ途上国に対して経済的報奨が支払われる仕組み、「途上国の森林減少・劣化に由来する排出の削減等 Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries; and the Role of Conservation, Sustainable Management of Forests and Enhancement of Forest Carbon Stocks in Developing Countries」、通称「REDD プラス」の枠組み作りが国連気候変動枠組条約 UNFCCC を中心に行われている。

REDD プラスは政治的、経済的、社会的、そして科学的に様々な側面、例えば、その国に既にある制度や統治機構と新たな取り組みの整合性、炭素の正当な経済的評価や収入の公平な分配、森林の所有権や伝統的利用方法と REDD プラス活動の整合性、そして正確な炭素量の評価や森林のその他の機能や価値とのバランスなどを持つ。

そのうちでも、森林の炭素蓄積量とその変化を REDD プラスで実現可能な方法でより正確に実施できる手法の開発はどの国でも重要な要素の一つである。なぜなら、森林から大気へ放出される炭素量の正確な把握こそが、地球温暖化の緩和手段としての REDD プラスを実施するうえで最も基本的な情報だからである。

REDD プラスでは、国レベル（または暫定的に準国レベル）で、排出削減・吸収増進努力を行った結果、努力を行わなかった場合に対してどれだけ排出量が減少または吸収量が増加したかが排出削減量として評価され、それに対して経済的報奨が支払われる（図1）。そのために、森林からの炭素排出量を透明で検証可能な方法により推定する必要がある（図1の実線）。一方、

努力が行われなかった場合の排出量は経常の事業（Business as usual; BAU）による排出量と呼ばれ、これが REDD プラスによる排出削減量を算出するための基準、いわゆる森林参照レベル（forest reference level; RL）あるいは森林参照排出レベル（forest reference emission level; REL）となる（図1の点線）。しかし、REDD プラス

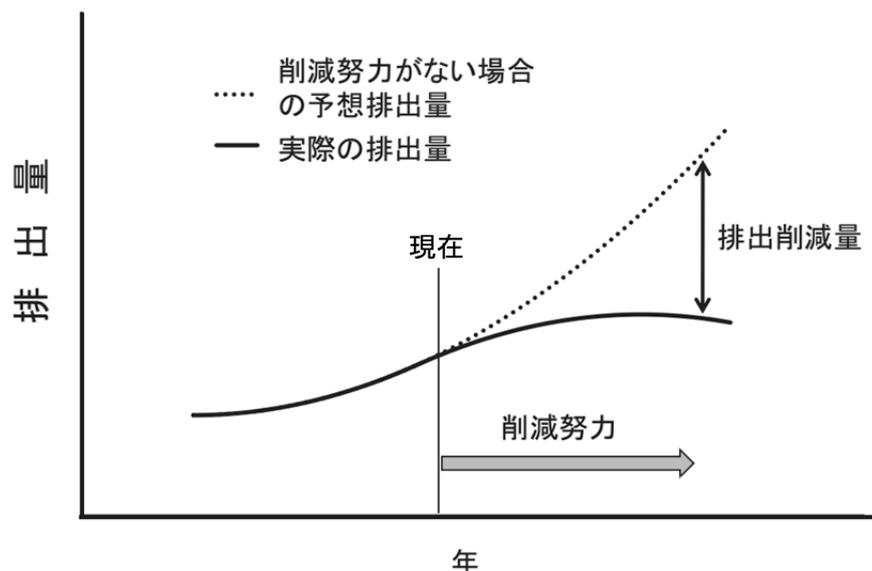


図1. 排出量削減の考え方
(森林総研¹⁾より引用)

の活動を行えば BAU による排出量は実際には発生しないはずである。そこで、参照（排出）レベルは REDD プラスが始まる前の BAU であった過去の排出量のトレンドを解析して将来の参照（排出）レベルを決めなければならない。さらに、森林減少・劣化の原因とその影響の大きさが明らかになれば、それを除去する REDD プラス活動によりどれだけ排出削減が見込めるか予測ができる。

つまり、森林炭素蓄積量をより正確かつ効率的に計測することと、過去の排出量のトレンドを基に BAU の場合と REDD プラス活動を実施した場合の森林炭素排出・吸収量をそれぞれ予測することは、森林炭素蓄積量の経年変化により森林から大気への炭素の排出量を正しく推定し、排出削減量を正しく評価するために不可欠な過程である。森林総合研究所はこれらの問題に対処するために、平成 23 年度から 4 年間に渡り、農林水産技術会議委託プロジェクト温暖化プロジェクトのうち D-1 系「高精度リモートセンシングによるアジア地域熱帯林計測技術の高度化」と D-2 系「アジア地域熱帯林における森林変動の定量化とシミュレーションモデルの開発」を実施した。ここではその主な成果を紹介する。詳細についてはポスター発表および原著論文を参照されたい。

2. 森林炭素蓄積の計測

2. 1. 概要

D-1 系「高精度リモートセンシングによるアジア地域熱帯林計測技術の高度化」では、東南アジアにおける主要な森林タイプである熱帯雨林と熱帯落葉林において、新しいリモートセンシング技術を用いた正確で効率的な森林炭素蓄積量計測技術を開発する。

森林から大気への炭素の排出・吸収量は、ある期間の森林の炭素蓄積の変化量として求められる（蓄積変化法）(式 1)。森林に貯留される炭素のうち、ここでは量および変化の大きいバイオマスの炭素量を計測する。その際、森林のすべての立木を測れないので、リモートセンシングにより森林のタイプごとの面積を求めるとともに、森林のタイプごとに単位面積当たりの炭素蓄積量を複数の標本プロットで計測して推定し、それらを掛け合わせて全体の炭素蓄積量を推定する（式 2）。しかし、発展途上国では標本プロットさえ十分な数を確保するのが困難な場合もある。

$$\text{炭素排出・吸収量}_{t_1,t_2} = \text{炭素蓄積量}_{t_2} - \text{炭素蓄積量}_{t_1} \quad (1)$$

$$\text{炭素蓄積量} = \sum_i (\text{面積}_i \times \text{面積当たり炭素蓄積量}_i) \quad (2)$$

ここで、 t_1 、 t_2 はそれぞれ期首と期末を、 i は森林タイプを表す。

そこで、本課題では、地上調査ならびに航空機および衛星リモートセンシング技術を組み合わせて、高分解能衛星画像等から林相や林冠構造を判別して森林劣化などこれまで区分しにくかった森林の状態を区分する技術と、航空機レーザー計測により森林炭素蓄積量を正確に推定し地上の標本プロット調査を補完する技術を開発した（図 2）。

高分解能衛星画像は地上分解能が 60cm から 1 m 程度のものが入手可能である。これにより、林冠を構成する上層木の個体の樹冠が画像上で見分けられる。航空機レーザー計測とは航空機に搭載したレーザー測距計（Light Detection and Ranging; LiDAR）と航空機の位置と姿勢を精密に計測する GPS-IMU とを組み合わせて地表の高さの分布を精密に計測するものである。

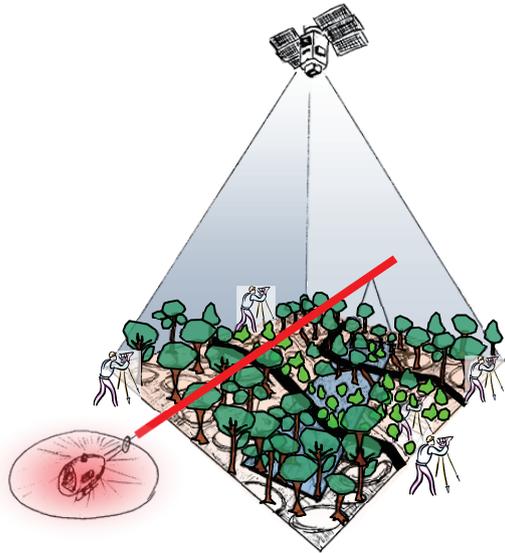


図2. 地上調査と航空機・衛星リモートセンシングを組み合わせた新たな森林炭素蓄積量の推定技術

2. 2. マレーシア・サバ州の熱帯雨林

研究対象地はサバ州の最南端にあり、Sabah Forest Industries Sdn Bhd (SFI 社) が管理する択伐施業林および皆伐後の二次林と、地元住民が焼畑耕作を行う州有林などからなる(図3)。標高約 1000~2000m の急峻な地形である。ここで、LiDAR 計測を 2012 年 10 月に実施した。また、高分解能衛星画像 IKONOS-2 の 2010 年 2 月 28 日に撮影された画像を用いた。さらに、主に 30m×30m のプロット調査を 50 か所で行った。

図4に LiDAR 計測により得られた三次元点群(部分)を示す。密でかつ不均一な林冠の特徴を表している。平均林冠高など、三次元点群による林冠の高さの分布から算出されるパラメータによりその林分の炭素蓄積量は精度良く推定されることが、先行研究で明らかになっている。ここでは、それらのパラメータに加えて、レーザーパルスの林冠透過率(1 m²中に照射されたレーザーパルスのうち林床からある高さまで到達したパルスの割合)を推定モデルに加えたところ、炭素蓄積量がより高い精度で推定できることが明らかになった²⁾(図5)。このモデルは老齢林や劣化林、強い劣化林など、異なる構造を持つ林分に対して共通で用いることができる。一方、林冠透過率自体はこれらの構造の違いを反映していることが示唆された。このように、LiDAR から林分の構造によらず森林炭素蓄積量を推定できることとなり、その分布を推定するうえで高精度化と効率化を達成した。

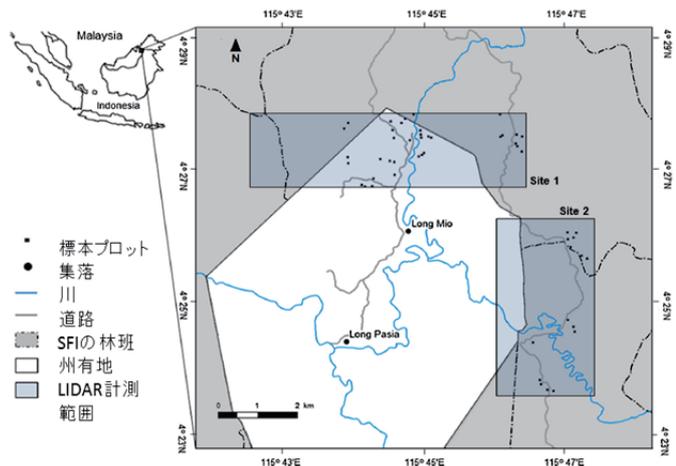


図3. マレーシア・サバ州の研究対象地 (loki et al.²⁾を一部改変)

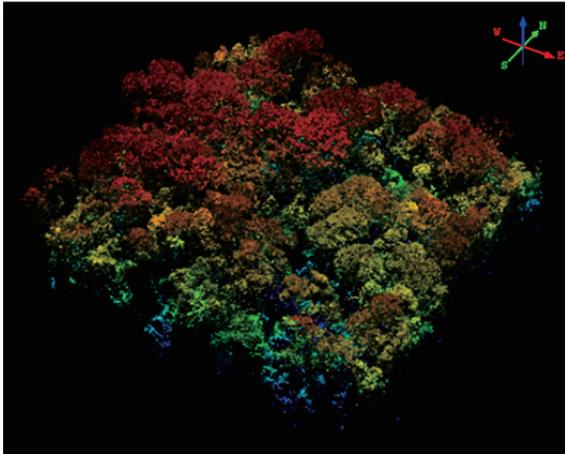


図4. レーザーパルスの三次元点群（部分）
マレーシア・サバ州青から赤へ林冠高が高くなる。

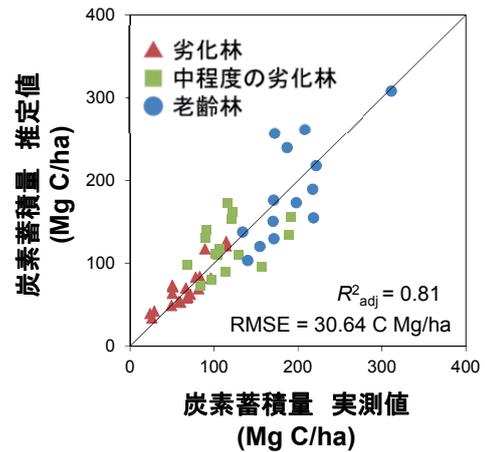


図5. LiDARによる林冠高と林冠透過率から得られた森林炭素蓄積推定モデル

高分解能生成画像で上空より林冠を観測すると、その林分の構造の違いにより上層木個体の樹冠の大きさと密度が異なり、その結果として異なるテクスチャが現れる。そこでテクスチャを画像処理して個体樹冠を抽出できる（図6）。高分解能衛星画像はLiDAR計測とは異なり、林冠の高さの情報は得られない。また、林冠下の胸高直径も見ることができない。しかし、大きい立木が大きい樹冠を持ち、またその反対も起きると予想されることから、抽出された単木の樹冠面積と地上で計測した胸高直径の関係を調べたところ、強い相関があった（図7）³⁾。さらに、衛星画像上での林冠の反射スペクトルの違いにより原生林と劣化林を効率よく分類することも明らかになり、原生林と劣化林のそれぞれについて樹冠面積から胸高直径を、そして立木個体のバイオマスが推定できた。LiDAR計測による炭素蓄積推定はより高精度だが高価なため広い範囲で計測するのは困難であり、一方高分解能衛星画像は精度では劣るが広い範囲を一度に計測可能であるので、これらの方法を組み合わせることにより広い範囲での高精度の炭素蓄積推定が可能となると期待される。

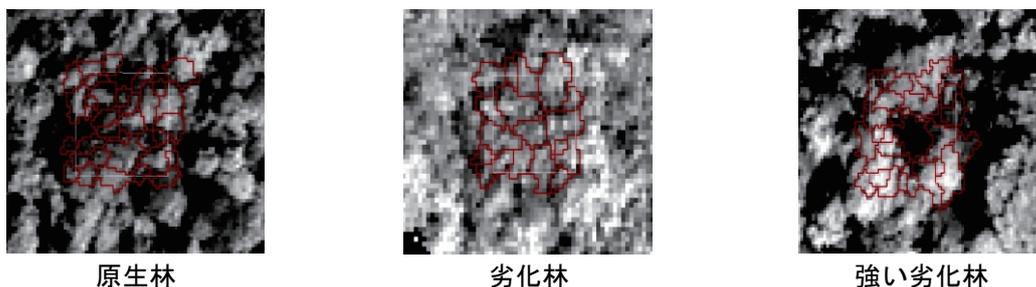


図6. 林冠の構造により異なる画像のテクスチャ
赤線は抽出された単木樹冠の境界線

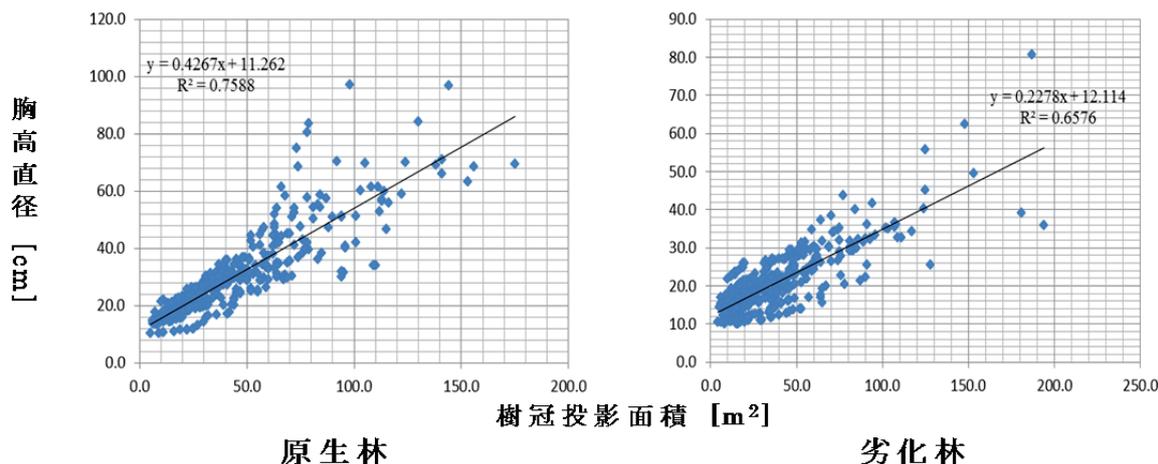


図7. 単木の樹冠投影面積と胸高直径の関係

2. 3. カンボジア・コンポントム州の熱帯季節林

研究対象地はコンポントム州中部の熱帯季節林（落葉樹林）を中心に常緑樹林や焼畑後の二次林などが混交する景観である（図8）。農地への転換や違法伐採による森林減少と劣化が急激に進んでいる（次章参照）。ここでは、2012年1月と2014年1月に合計2回LiDAR計測を行った。また、高分解能衛星画像は2011年には11月30日と12月19日にQuickbird画像を、2013年には11月28日にQuickbird画像と12月22日にWorldView2画像を取得した。さらに、0.12～0.25haの固定プロット65点での調査を2011～12年と2013年に2回実施した。

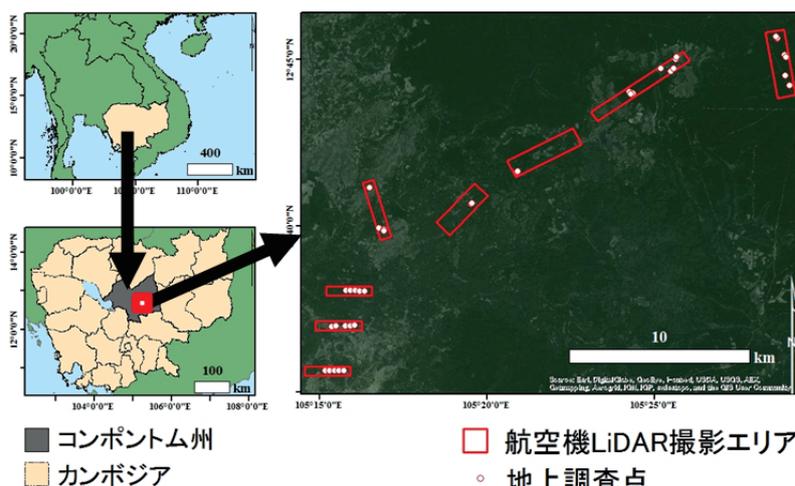


図8. カンボジア・コンポントム州の研究対象地 (Ota et al.⁴⁾ を一部改変)

図9にLiDAR計測により得られた三次元点群（部分）を示す。図4とは異なり、熱帯季節林の疎な林冠の状態を表している。ここでもLiDARによる林分平均樹高よりバイオマス量を推定した（図10）。その結果、バイオマス量も構造も非常に異なる様々な森林において一つのモデルで正確に求められることが明らかになった。さらに、2014年の2度目の計測

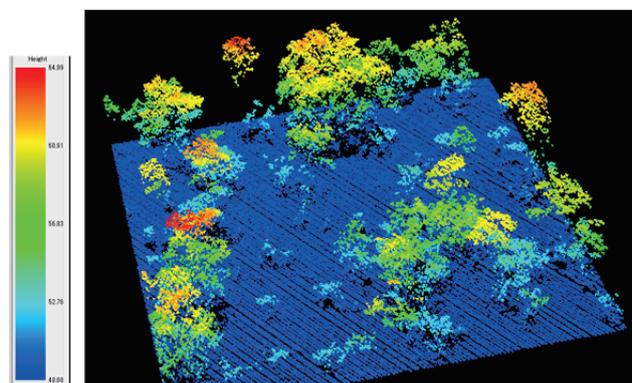


図9. レーザパルスの三次元点群（部分）
カンボジア・コンポントム州

データでも当てはまることから再現性もあることも明らかになった。

森林内の立木が違法伐採などで少しだけ取り除かれて森林劣化が発生した場合、炭素蓄積は減少しても森林ではあり続けるので、衛星画像を用いてその変化を感知するのはこれまで困難であった。高分解能衛星画像なら単木の樹冠が見えることに着目し、本課題ではパターンマッチングという手法を

用いて高分解能衛星画像上の樹冠の位置とサイズを正確に推定し、2時期の画像を比較して期首では存在していたが期末では消失した樹冠を抽出することにより、林冠上に現れている上層木の単木の伐採を精度よく抽出することに成功した(図11)。普段、地元住民しか立ち入れない森林内で発生する単木的な森林劣化を定量的に抽出することにより、違法伐採による森林劣化の現状とその原因の解明に貢献できる。以上のように、2時期のリモートセンシングデータを組み合わせることにより、バイオマス量の推定の一貫性と、新しい変化抽出手法によるこれまで困難であった森林劣化の抽出に成功した。森林劣化の現状とその原因の究明に貢献できるものと期待される。

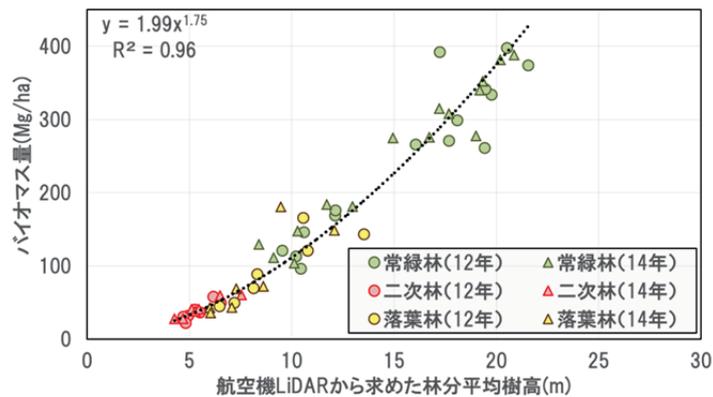


図 10. LiDAR によるバイオマス量の推定

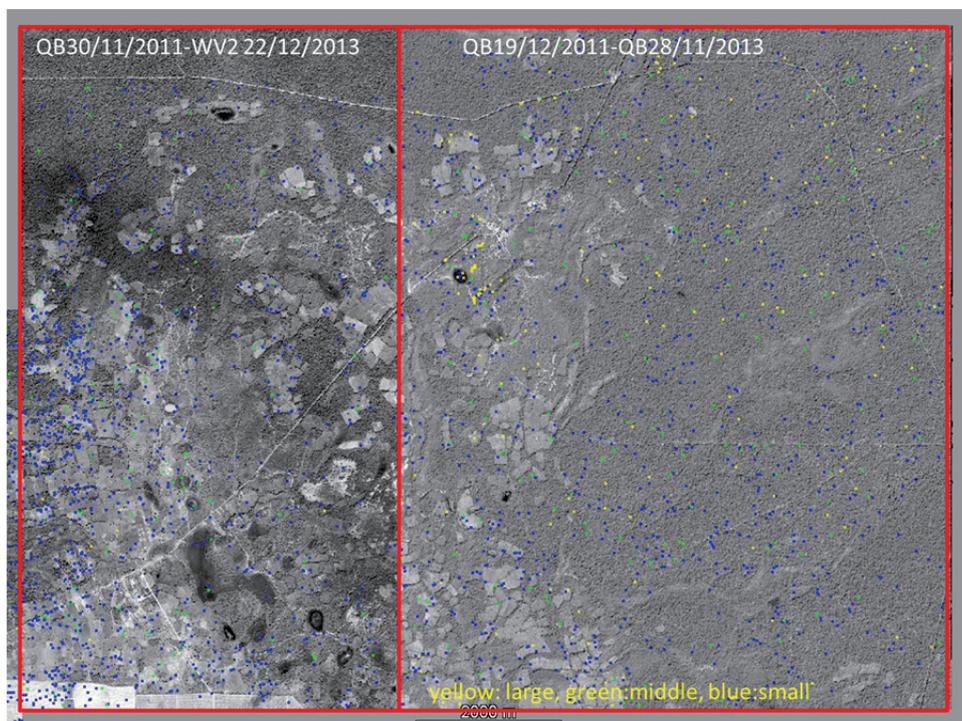


図 11. 二時期の高分解能衛星画像の比較により抽出された単木樹冠の消失

3. 森林炭素蓄積の変化の予測

3. 1. シミュレーションモデルの目的とその意義

D-2系「アジア地域熱帯林における森林変動の定量化とシミュレーションモデルの開発」では、土地利用施策等のシナリオに応じた炭素排出量の変動を予測するシミュレーションモデルの開発を目的としている。図12は、シミュレーションモデルの概念図である。左側の「現状」（図12a）のような土地利用状況の地域があるとする。この地域の土地利用がどのように変化するかを「シナリオ」に応じて予測したのが右側にある3つの「予測」である。右上（図12b）が、REDDプラスの取組によって「森林減少が生じなくなる」シナリオに応じた土地利用予測である。森林減少が生じないので、図12aの「現状」と同じ状態が維持されている。図12cは、逆にREDDプラスの取組をなんら行わなかった場合（レファレンスシナリオ）に応じた土地利用予測である。2箇所において森林がキャッサバ畑に変化している。図12dは、REDDプラスの取組によって森林減少がレファレンスシナリオの「50%に抑制された」シナリオに応じた土地利用予測である。図12dにおいて森林からキャッサバ畑へと変化した2ヶ所の面積が、図12cでは50%になっている。それぞれのシナリオに応じて予測した土地利用状況での炭素蓄積量を予測するのが、本課題で開発するシミュレーションモデルである。

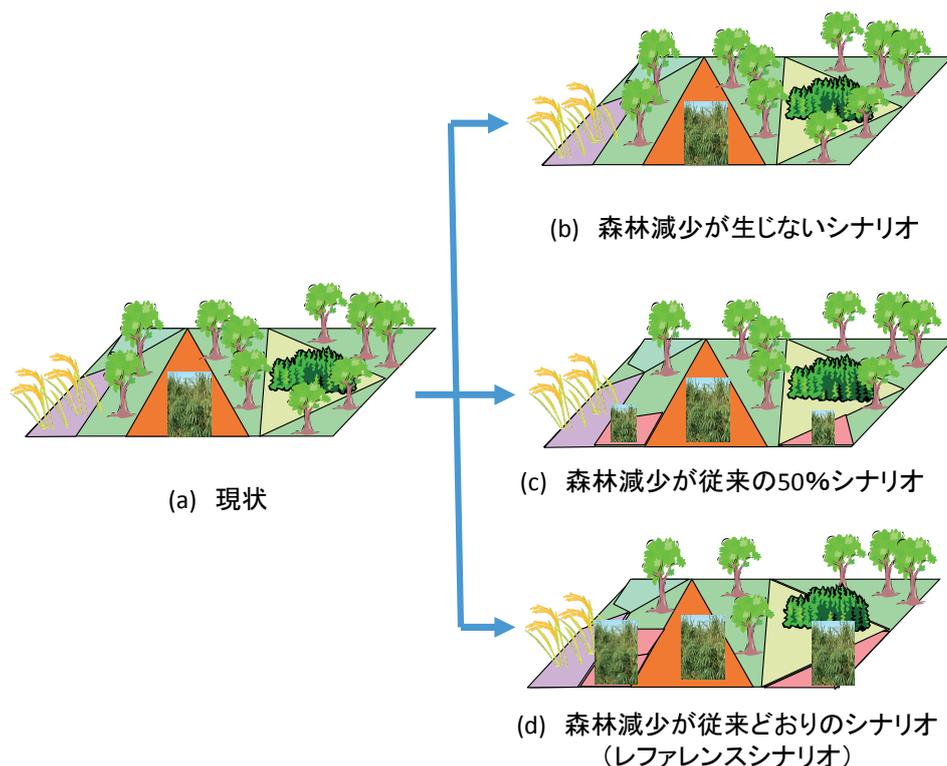


図12. 炭素排出量変動シミュレーションモデルの概念

本シミュレーションモデルには、多様な活用法が期待される。まず、リファレンスシナリオの精度向上である。図12dは、REDDプラスの取組を行わなかった場合であるリファレンスシナリオによる炭素排出量の変動予測に科学的根拠をもたらす。ひいてはREDDクレジット算出精度を向上させることにつながる。さらに、政府等による政策決定支援ツールとしての活用も期待できる。たとえば、REDDクレジットをどの程度に設定するのが効果的か？ 逆にどの程

度まで森林減少を許容するのか？という決定を政府等が行う場面があろう。その際に、様々なシナリオに基づく炭素蓄積量の変動をシミュレートすることで、政策決定のための客観的な情報を提供できる。また、政府機関などによる森林の保全や開発のためのゾーニングの効果把握にも活用できる。ローカルスケールでは、森林減少は一般に道路や集落からの距離が近い場所で生じやすいとされる⁵⁾。そこで、炭素排出量抑制の観点から見て望ましい道路ルートを選定や集落設置場所の選定などにも活用が期待できる。

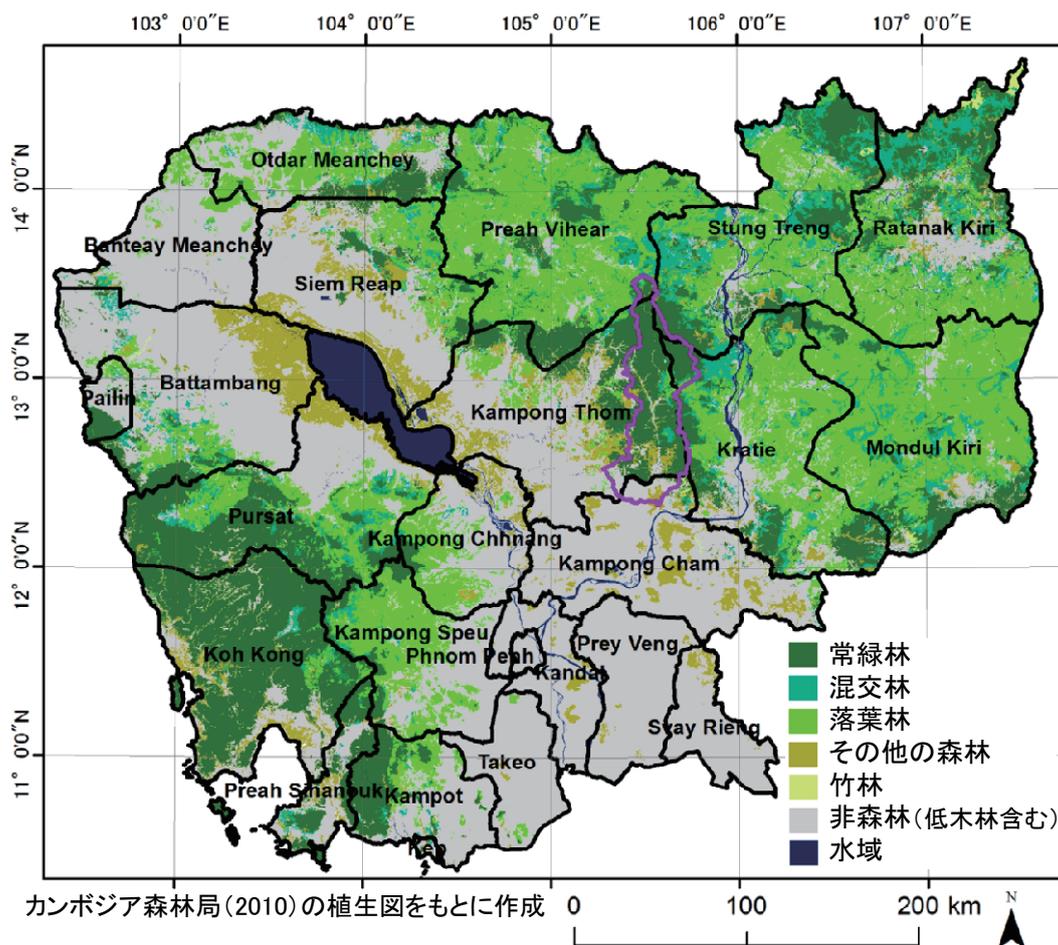


図 13. カンボジアの植生図と対象地の位置

3. 2. 対象地域

シミュレーションモデル開発の対象地として、カンボジア国コンポントム州のチニット川流域（図 13；面積 3,659km²）を選定した。選定理由は、

- 1) 乾燥常緑林を中心に、比較的森林がまとまって残っていたこと。
- 2) コミュニティ林業地の指定が進み、研究林や REDD プロジェクト等の森林保護系ゾーニングが計画中之であること。
- 3) 一方で近年、プランテーションによる大規模開発と住民による小規模開発が共に、著しいこと。
- 4) そのため、森林減少の特徴把握と、開発・保護両面のゾーニング施策効果の把握に適していること。

による。

本課題では対象地を限定しているが、開発したシミュレーションモデルは、入力するデータセットが整備された地域であれば、東南アジア一般に広く適用可能である。

3. 3. シミュレーションモデル構造の概要

対象地域の炭素蓄積量の予測は、土地利用の変化予測マップにおける森林タイプ別に、平均炭素蓄積量×面積の積算によって求める（図 14）。

土地利用の変化予測マップは、森林減少ポテンシャルマップとシナリオから得られる。そして森林タイプ別の平均炭素蓄積量は、D-1系で取り扱った地上調査やリモートセンシングによる手法が活用できるが、この課題では個々の森林が吸収・排出する二酸化炭素量を評価する手法をも併用した。2)において説明する。

1) 土地利用の変化予測マップ

1) - ①森林減少ポテンシャルマップ

対象地域内のどこがより開発されやすいか順位付けを行う「森林減少ポテンシャルマップ」を作成した（図 15）。暖色系の場所ほど、相対的に開発されやすい地域を示している。このマップは、実際に過去に小規模開発された場所と、林縁からの距離、道路、集落、河川や水域データ、数値標高データから捉えた地形条件、ゾーニングなどとの関係を統計解析した結果から作成した。なお、対象地域では、主にゴム園プランテーションへの大規模開発と、住民による主に商品作物キャッサバ畑への小規模開発が共に著しい。このポテンシャルマップでは、ローカルな地理的条件が重要となる小規模開発を対象とした。一方、大規模開発は、その規模や地域の決定には政府機関の許可が必要となるため、後述する「シナリオ」作成の過程に組込んだ。

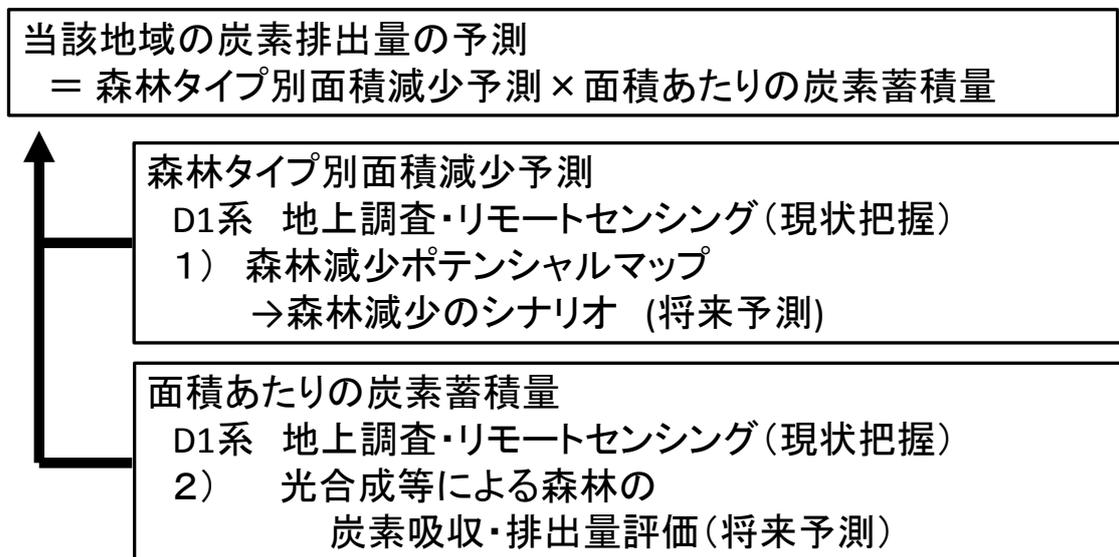


図 14. 炭素排出量変動シミュレーションモデル構造の概要

1) ②シナリオ

作成した「シナリオ」は、これまでと同様の森林減少がある BAU シナリオと、森林減少が加速または抑制されるシナリオである。さらに、「コミュニティ林業地」、「REDD プロジェクト地」、「ELC (経済開発区)」の新規設定など、政府機関などの決定による大規模開発に関連した土地管理ゾーニングに関わるシナリオを設定した。これらの「シナリオ」を作成してシミュレーションモデルを適用することで、政府などによる「土地管理」政策の効果を客観的に予測可能になり、政策決定支援ツールとしての活用が期待できる。

また、対象地域における小規模開発には、キャッサバ栽培が多くみられる。そのためキャッサバ価格や REDD クレジットの額に応じて、森林減少の速度の異なるシナリオを作成した。

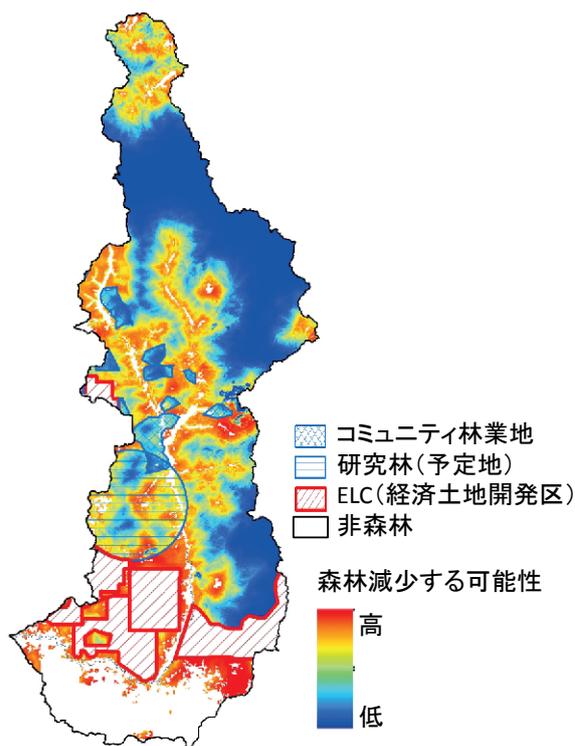


図 15. 森林減少ポテンシャルマップの例

2) 炭素吸収・排出量の評価手法の開発

森林群落は、呼吸により二酸化炭素を排出する一方で、光合成により二酸化炭素を吸収して成長する。特に植栽直後のゴム林の成長量は著しい。植栽から数年で林冠は閉鎖し、ゴムの採取が可能となる。乾燥常緑林に比べるとその炭素蓄積量は少ないものの、二酸化炭素の吸収量は大きい⁶⁾。そのため、乾燥常緑林からゴム林への転換が著しい対象流域における炭素の蓄積量や排出量を予測するには、ゴム林を含めた森林の光合成による二酸化炭素吸収・排出量を評価する必要がある。その手法を開発するのが、この中課題である。樹木は、光合成を行うために葉の気孔を通して二酸化炭素を吸収する一方、土壌の乾燥などのために樹体内の水分が不足するような時には気孔を閉じて蒸散による大気への水分損失を防ごうとするため、光合成を行えなくなる。東南アジアのうちカンボジアやタイなどには、11月から翌年の4月の間は、ほとんど降雨の無い乾季が存在するため、水文環境が光合成に及ぼす影響はより顕著である。対象流域内の森林は主に、乾燥常緑林、乾燥落葉林、ゴム林の3つのタイプがある。それぞれの森林で水分環境と光合成との特性が明らかになった。乾燥常緑林では、乾季といえども雨季に匹敵する蒸散を行っており、土壌の乾燥による光合成の抑制は認められなかった⁷⁾。樹木が、10m程度にもなる堆積層に貯留された水分を乾季に利用しているためと考えられた。ゴム林は、乾燥常緑林よりもはるかに多い水を蒸散している。そのため乾季には樹体内の水分が不足し、光合成が抑制されることもあることが明らかになった。これらの知見を含めて、森林の単位辺りの炭素蓄積量を予測し森林の炭素吸収・排出量の評価手法を開発した。その手法では、ゴム林の成長が植栽後約30年程度から頭打ちとなる現象も再現されるなど、その信頼性が確認された。

4. おわりに

本課題では、REDD プラスの実施に不可欠な森林炭素蓄積量の計測および予測について、マレーシア・サバ州とカンボジア・コンポントム州における事例研究により、新たな手法を提案した。これらの手法の開発の過程は他の地域においても適用可能であると期待される。今後、これらの手法を取り込んだ計測・予測のシステム化が、REDD プラス実施をする際に求められるであろう。

私たちはこれらの手法を学会に発表し、日本で関係者に報告するばかりでなく、研究対象地でも情報の発信を積極的に行ってきた。マレーシア・サバ州では、課題担当者の一員であるマレーシア国立サバ大学(州都コタキナバル市)において2014年5月に国際セミナーを開催した。サバ州政府や林業会社、NGO、そしてサバ大学の学生が出席し、お互いの経験と意見を交わした。リモートセンシングによる遠隔地の森林の正確な把握は大変注目され、サバ大学は現地林業会社に対してより具体的な指導を行うことになった。

カンボジアでは、本課題の実施に当たり許可と協力を得たカンボジア政府森林局に対して研究成果の具体的内容を報告するために、2014年7月に首都プノンペン市にある政府森林局において技術ワークショップを開催した。ここでは、成果の概要とその意味合いを森林局幹部に報告するとともに、森林局の担当職員に実際にデータに触れることにより理解を深めてもらいこのデータと解析技術の実際に森林管理への適応可能性について議論した。

これらの活動を通じ、日本の内外に成果を広め、そこからのフィードバックなどを考慮してさらに REDD プラスへの適用性を高めていくことが今後必要となる。

引用文献

- 1) 森林総合研究所 (2012) REDD-plus Cookbook, 152 pp.
- 2) Ioki, K. et al. (2014) Estimating above-ground biomass of tropical rainforest of different degradation levels in Northern Borneo using airborne LiDAR, *Forest Ecology and Management*, 328: 335–341
- 3) Phua, M-H., et al. (2014) Estimation of Above-ground Biomass of a Tropical Forest in Northern Borneo Using High-resolution Satellite Image. *Journal of Forest and Environmental Science* 30 (2): 233-242
- 4) Ota, T. et al. (2014) Estimation of Airborne Lidar-derived Tropical Forest Canopy Height, *Remote Sensing*, 6: (in press)
- 5) Mitsuda, Y. and Ito, S. (2011) A review of spatial-explicit factors determining spatial distribution of land use/land-use change. *Landscape and Ecological Engineering*, 7, 117-125.
- 6) Kumagai, T., Mudd, R. G., Miyazawa, Y., Liu, W., Giambelluca, T. W., Kobayashi, N., Lim, T. K., Jomura, M., Matsumoto, K., Huang, M., Chen, Q., Ziegler, A. and Yin, S. (2013) Simulation of canopy CO₂/H₂O fluxes for a rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation in central Cambodia: the effect of the regular spacing of planted trees. *Ecological Modelling*, 265, 124-135.
- 7) 玉井幸治、延廣竜彦、荒木誠、壁谷直記、清水貴範、飯田真一、清水晃 (2014) カンボジア中央部の低地常緑林の蒸発散特性—高木層が消失した場合の蒸発散量と温度環境に及ぼす影響予測—, *水理科学*, 337, 133-151.

ポスター発表

二酸化炭素とオゾンの濃度が高くなる未来の環境では ミズナラ、コナラの成長が促進される

北尾光俊(森林総研)、飛田博順(森林総研)

石油や石炭などの化石燃料を燃やすことで、空気中の二酸化炭素とオゾンの濃度が年々上昇しています。二酸化炭素とオゾンが高くなった未来の環境で、樹木はどのように育つのでしょうか。樹木の成長への影響を調べた結果、ミズナラとコナラでは二酸化炭素とオゾンで成長が促進されることがわかりました。

1 二酸化炭素とオゾンを与えて樹木を育てます



野外で二酸化炭素とオゾンを与える施設

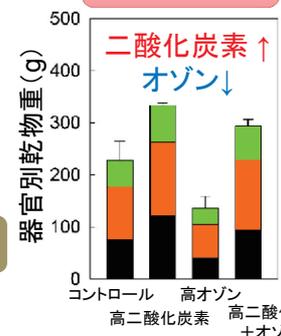
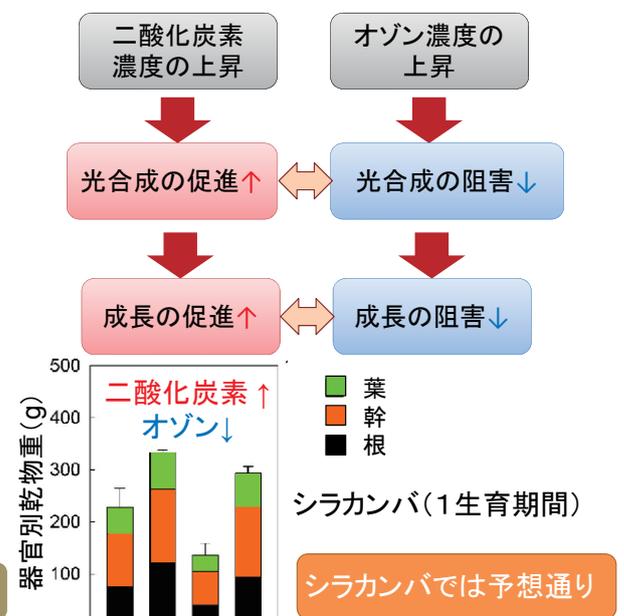
二酸化炭素濃度
コントロール:約380 ppm (現在の濃度)
高二酸化炭素処理:約550 ppm
(2050年頃の予測値)

高オゾン処理は
コントロールの約2倍の濃度に設定



開放型二酸化炭素・オゾン暴露装置

2 予想される成長への影響は?

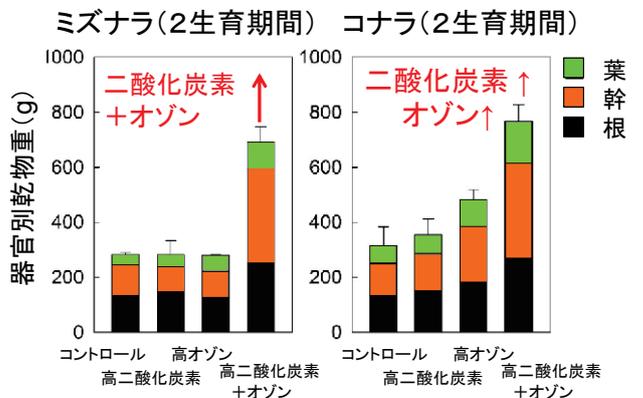


3 ミズナラ、コナラの成長は予想と大きく違いました

コナラ(2生育期間)



ミズナラ(2生育期間)



ミズナラ、コナラでは、二酸化炭素だけが上昇する場合よりも、オゾンが同時に上昇することで成長が顕著に促進されました。原因は解明中です。

新たな土壌炭素モデルの構築と必要パラメーターの取得

石塚成宏・三浦寛・橋本昌司・平井敬三・阪田匡司・
長倉淳子・野口享太郎・橋本徹・小野賢二・谷川東子・
酒井寿夫・森下智陽・重永英年・酒井佳美(森林総研)

日本の森林土壌における炭素動態の広域評価と変動予測のために、炭素を定量・検証可能なパーツに分けて、土壌炭素モデルを構築しました。根株などの重要な炭素貯蔵量は、今までまったく測定されていませんでしたが、本研究によってその実態が明らかになりました。

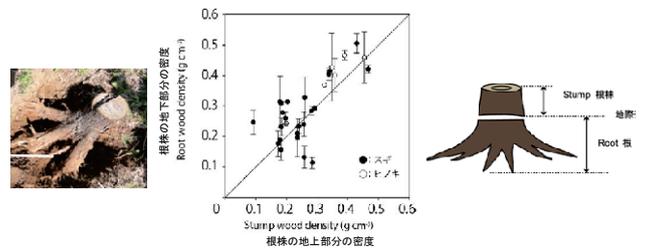
森林の5つの炭素プール



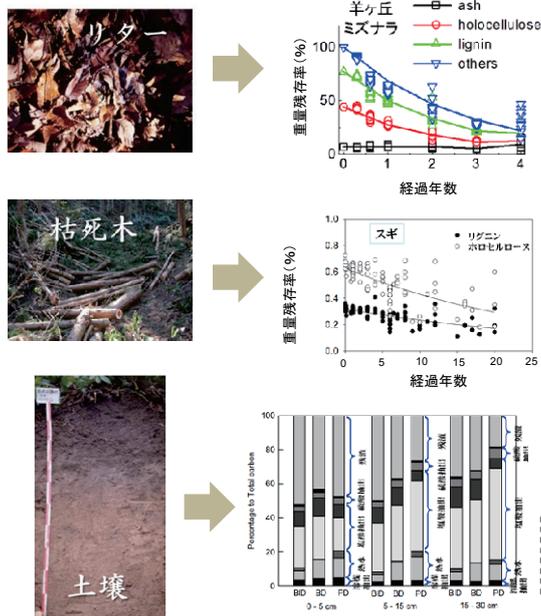
生体バイオマス

枯死3プール

2 放置された根株の分解を調べました

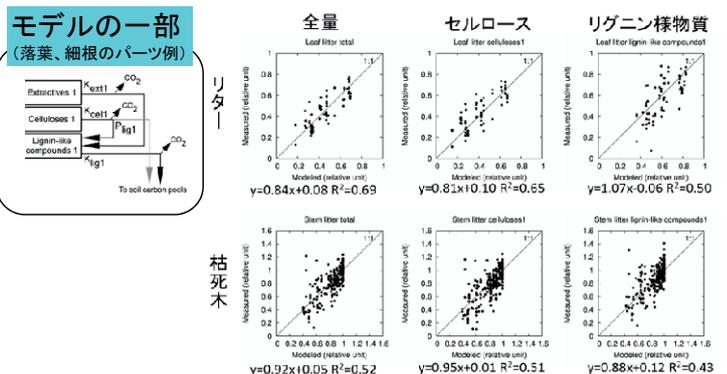


1 土壌炭素の成分別分解様式を明らかにしました



枯死木は、大きく倒木・立枯木・根株の3つに分けられます。このうち根株の量や分解についてはほとんどわかっていませんでした。我々の調査により、**根株の地上部分と地下部分では分解に大きな差はない**ことがわかりました。

3 成分別に分解するモデルを構築しました



リグニンは難分解性でより残りやすいと言われており、我々の研究でもその傾向は確認されましたが、従来から考えられているほど**分解性に大きな違いはない**ことがわかりました。

これらのデータを利用して、分解モデルを作りました。各プールは定量可能なため、検証データを今後充実させることが可能です。

日本の土壌分布や気候を反映した独自の土壌炭素モデルを構築しました。これを統合モデルに組み込み、様々なシナリオに対応した変動予測や広域評価が可能になりました。

森林の炭素吸収量評価のための全国森林タイプ図の作成

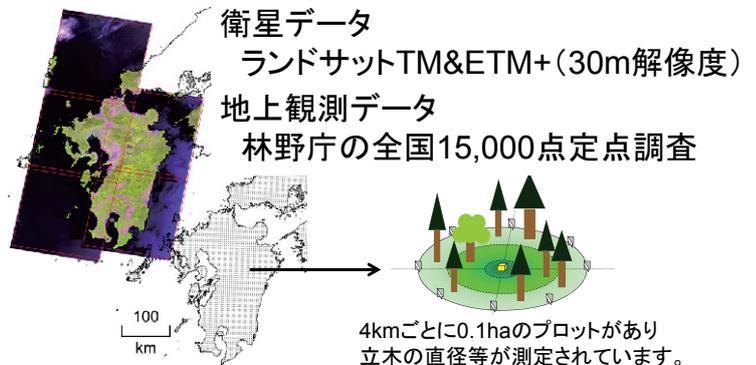
田中真哉・西園朋広・齋藤英樹(森林総研)・小谷英司(森林総研東北支所)
北原文章(森林総研四国支所)・高橋與明・家原敏郎(森林総研九州支所)

地球温暖化防止に関して、今後は国ごとに森林の炭素量変化を隈無く評価することが、国際的に議論されています。そこで、衛星データと多数の地上データを用い、全国の森林タイプ図の作成を行いました。成果を、炭素変化量推定モデルに提供し、全国の森林炭素変化量推定に貢献しました。

1

森林タイプの分類

地上観測データを教師・参照データとし、多季節の衛星データと統計的分類手法を用いて森林タイプ図を作成しました。予備解析による検討から、サポートベクターマシン(教師付き分類)とISODATA(教師無し分類)という統計的分類手法を地域ごとに使い分けることとしました。

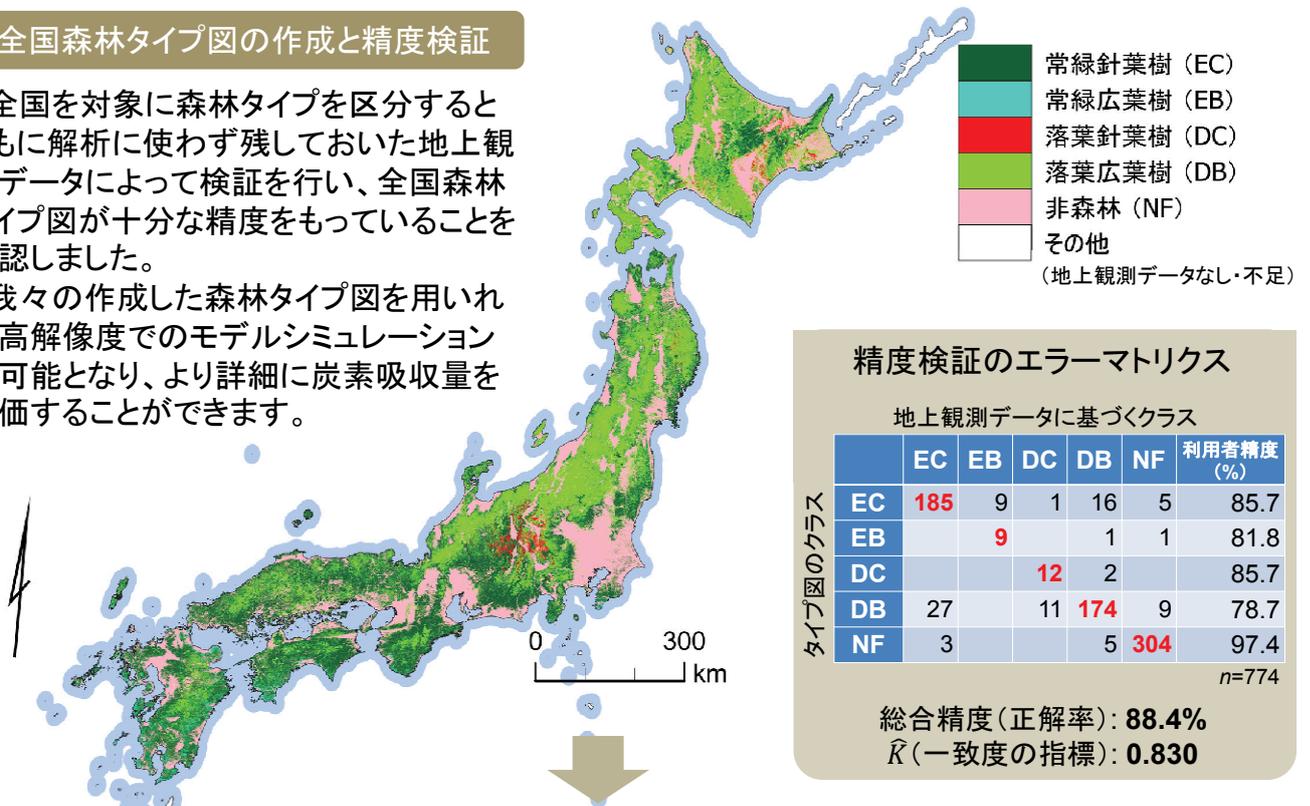


2

全国森林タイプ図の作成と精度検証

全国を対象に森林タイプを区分するとともに解析に使わず残しておいた地上観測データによって検証を行い、全国森林タイプ図が十分な精度をもっていることを確認しました。

我々の作成した森林タイプ図を用いれば高解像度でのモデルシミュレーションが可能となり、より詳細に炭素吸収量を評価することができます。



精度検証のエラーマトリクス

地上観測データに基づくクラス

	EC	EB	DC	DB	NF	利用者精度 (%)
EC	185	9	1	16	5	85.7
EB		9		1	1	81.8
DC			12	2		85.7
DB	27		11	174	9	78.7
NF	3			5	304	97.4
n=774						

総合精度(正解率): 88.4%

\hat{R} (一致度の指標): 0.830

森林タイプ図を森林の炭素量の統合モデルへ提供 → 炭素変化量の全国推計に貢献

木材伐採・更新と木材利用に係る 炭素収支シミュレーションモデルの開発

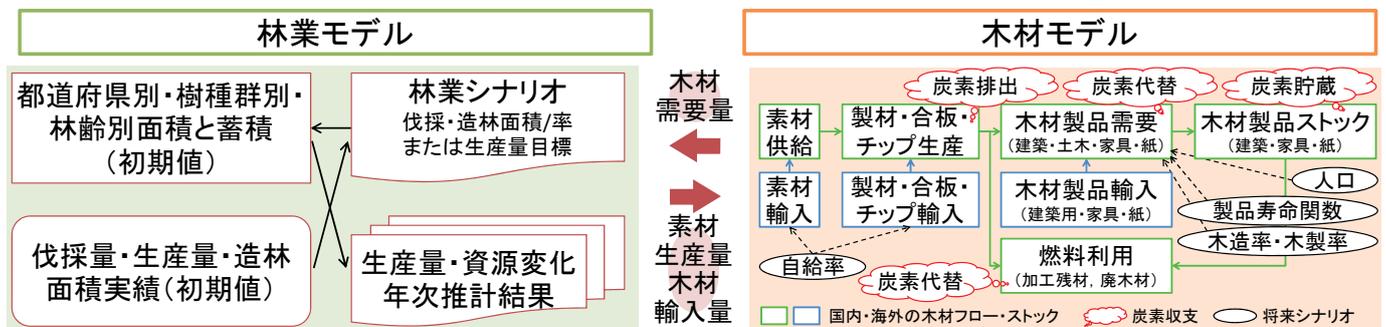
岡裕泰, 恒次祐子, 外崎真理雄, 久保山裕史, 田村和也, 田中亘, 林雅秀(森林総研),
 広嶋卓也(東京大学), 滝口泰弘(ウッドマイルズ研究会), 松野泰也(東京大学),
 平野陽子(ドット・コーポレーション), 加用千裕(東京農工大学)

本課題では林業ならびに木材利用についてのシミュレーションモデルを開発しました。

- 現状シナリオに比べて「緩やかな伐採増加シナリオ」では生産量が約2倍, 「基本計画シナリオ」では約3倍になることが分かりました。
- 木材を積極的に利用するシナリオでは3効果(炭素貯蔵効果, 省エネルギー効果, 化石燃料代替効果)により大きな排出削減効果が得られる結果となりました。

1 林業モデル・木材利用モデルの概要

林業, 木材利用シナリオの詳細はポスターK-07をご参照ください。

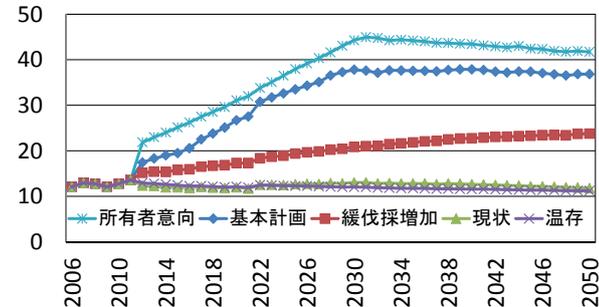


2 林業モデルによる伐採量, 供給量の推計

森林所有者があえて答えた将来の伐採見通し

	20年以内	21-40年以内	41年以降	皆伐しない	生育不良
スギ	31%	31%	19%	19%	9%
ヒノキ	23%	32%	25%	20%	11%
カラマツ	50%	29%	13%	9%	7%
人工林計	33%	29%	18%	19%	9%

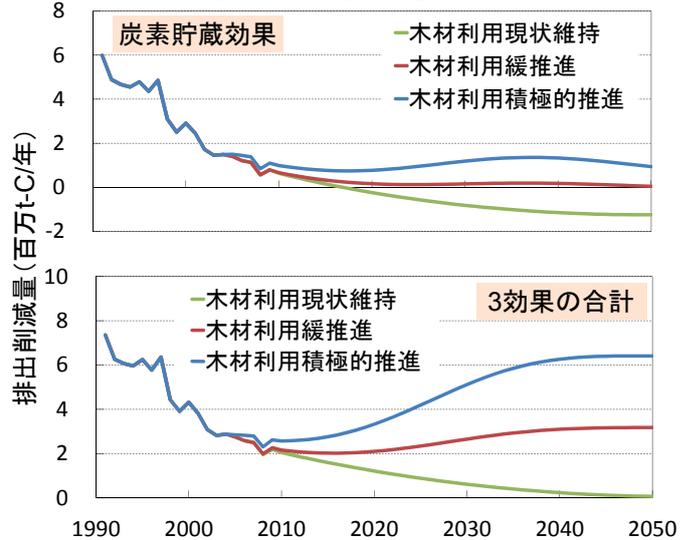
(100万m³) シナリオ別主要3樹種合計生産量



現状シナリオ(林齢80年生までの累計皆伐面積が人工林面積の約1割に留まる)に比べ80年生までに約2割皆伐する緩伐採増加シナリオでは生産量が約2倍, 約3割主伐する基本計画シナリオでは約3倍となりました。

3 木材モデルによる排出削減効果の推計

シナリオ別木材利用による排出削減効果



現状維持シナリオでは効果は小さいですが, 木材利用推進により削減効果が得られ, 特に積極的な推進シナリオ(2050年まで建築・家具の木造・木製率が70%, 土木利用が600万m³に到達)では3効果により大きな削減量を得られる結果となりました。

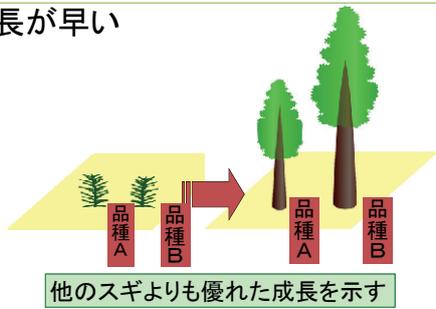
炭素を多く固定できるスギ品種の評価とその効果

井城泰一、平岡裕一郎(森林総研 林木育種センター)

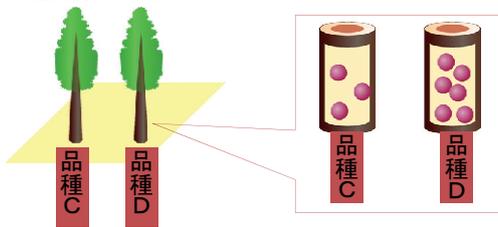
本研究課題では、林木育種センターで開発された炭素を多く固定できるスギ品種の一つである「上都賀7号」について評価した。上都賀7号は各試験地において優れた成長を示し、また材密度も高い値を示した。また在来種苗から植え替えた場合、施業により顕著な炭素固定量を示した。

1 炭素を多く固定する品種とは？

・成長が早い

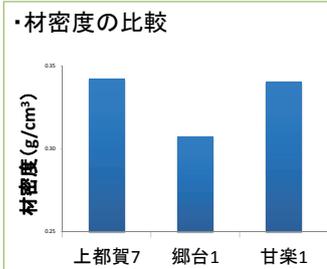
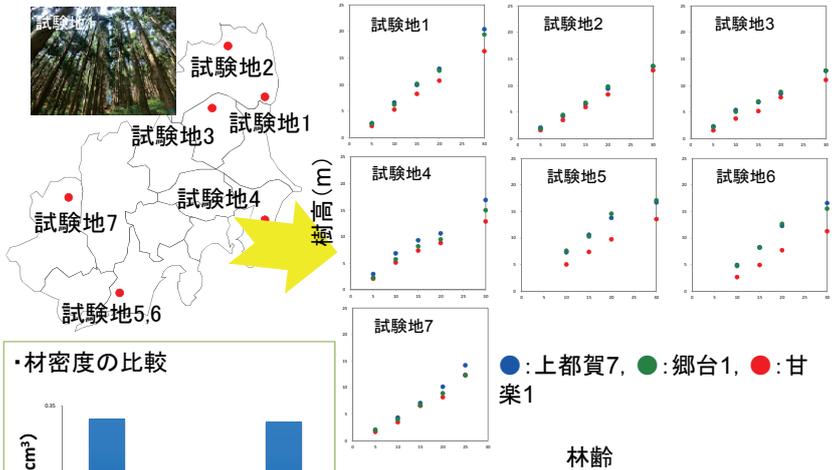


・材密度が高い



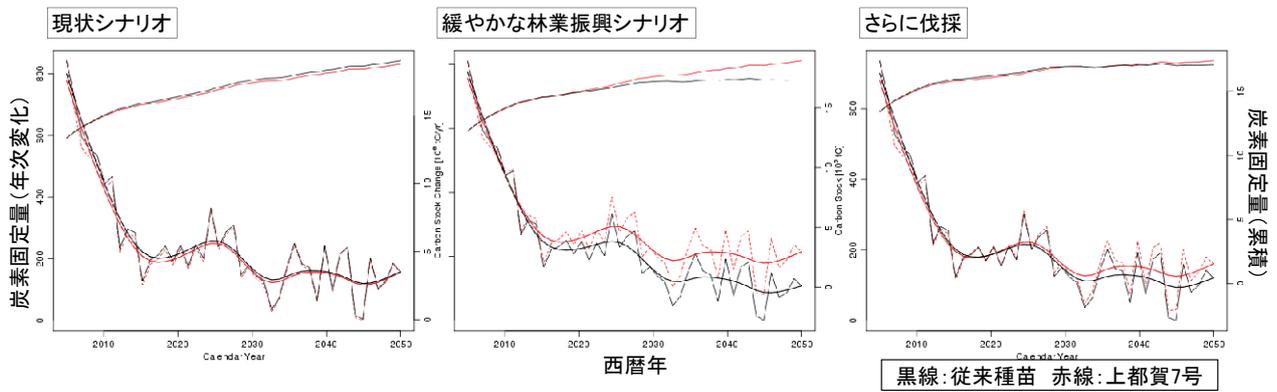
2 能力を評価する試験地

・炭素を多く固定する品種「上都賀7」を含む同じクローンが共通して植栽



・「上都賀7号」は各試験地で優れた成長を示した。また、材密度も高い値を示した

3 炭素を多く固定することができる品種に植え替えた場合のシミュレーション



従来種苗から「上都賀7」に植え替えた場合、「緩やかな林業シナリオ」において炭素を固定する量が顕著に増加した

炭素固定能の高いグイマツF1品種を活用した 吸収機能向上技術の開発

来田和人・大野泰之(道総研林業試験場)
原山尚徳・上村章・韓慶民(森林総研北海道支所)・宇都木玄(森林総研)

炭素固定能の高い造林品種「クリーンラーチ」はカラマツと北方系樹種のグイマツをかけあわせて作るため、地球温暖化すると炭素固定能が低下する懸念がありました。しかし、光合成の温度特性や成長モデルを解析したところ、温度上昇が光合成に及ぼす影響はカラマツと同等で、地球温暖化しても北海道のほとんどの地域で炭素固定量が現在より増加することがわかりました。

1 炭素固定能の高い品種「クリーンラーチ」とは



表-1 試験地における成長量と材質の測定結果

樹種	材積** m ³ /ha	材容積 密度** g/cm ³	炭素固 定量** t-C/ha	ヤング 係数*** GPa	幹曲り 率*** %
クリーンラーチ	361	0.469	84.6	13.1	17.3
カラマツ精英樹*	364	0.450	82.5	11.9	24.4

*成長が早いことから選抜されたカラマツの系統
**道東1試験地、道央2試験地における31年生の結果
***道東2試験地における31年生と34年生の結果

クリーンラーチは炭素固定能が高いとして選抜された

木材利用上も優れた特徴を持つ

図-1 クリーンラーチは千島、樺太に分布するグイマツの「中標津5号」を母樹、本州中央部にカラマツを花粉親とする種間交雑種

2 光合成の温度特性

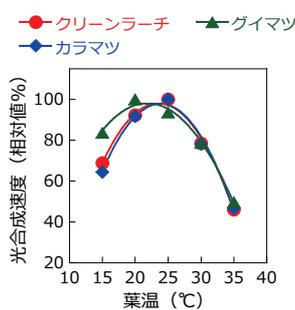
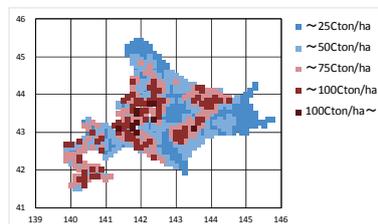


図-2 3年生ポット苗木の葉温別光合成速度

北方系の樹種を母親とするクリーンラーチだが、光合成の温度特性は高温域までカラマツと同じ

3 2050年における温暖化の影響

2001年の気象条件が継続したときの炭素固定量



気象条件が温暖化シナリオA1Bのときの炭素固定量の増減量

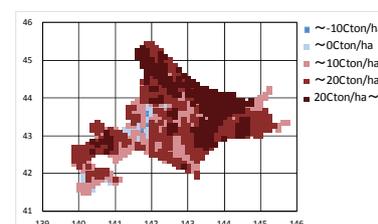


図-3 温暖化がクリーンラーチの炭素固定量に与える影響

2050年、40年生林分の条件で計算

5~39年生9か所の成長量データ、材の容積密度数(比重)、気象観測所気象データから成長モデルを構築

温暖化が進行
→ほとんどの地点で炭素固定量が増加

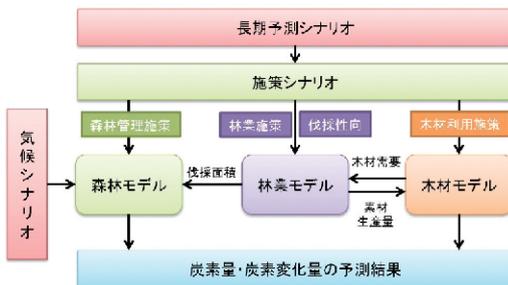
将来予測から見た森林分野での温暖化緩和策のベストミックス

松本光朗・岡裕泰・外崎真理雄・恒次祐子・鹿又秀聡・嶋瀬拓也(森林総研)
光田靖(宮崎大学)・加用千裕(東京農工大学)

森林分野の温暖化緩和策は、森林・林業・木材利用の一連の流れの中で、最適な組合せ(ベストミックス)を考える必要があります。施策シナリオを設定し、森林炭素統合モデルを使って将来予測した結果、林業生産と木材利用を推進するシナリオが温暖化対策としても効果的であり、特に木材利用による二酸化炭素の排出削減には大きな役割があることが分かりました。

1 森林・林業・木材利用を統合した炭素モデル

森林分野の温暖化緩和策は、森林による二酸化炭素吸収と木材利用による排出削減を合わせて考える必要があります。そこで、森林、林業、木材利用を統合して取り扱い、将来予測が可能な森林炭素統合モデルを開発しました。



森林炭素統合モデルの構造

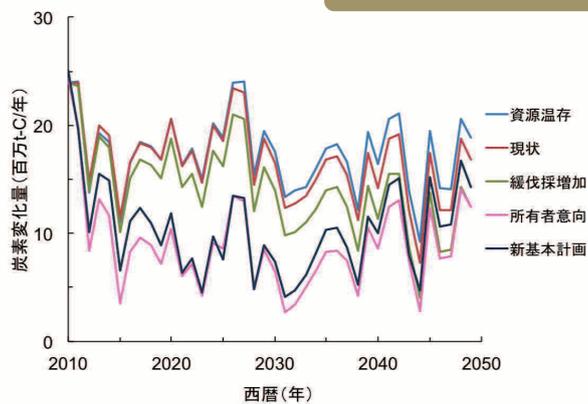
2 将来予測をするための施策シナリオ

将来予測をするため、これから行う温暖化対策について、5つの施策シナリオとその指標を開発しました。特に、林業生産と緩和を考慮した木材利用に注目して指標を示しました。

5つの施策シナリオと指標

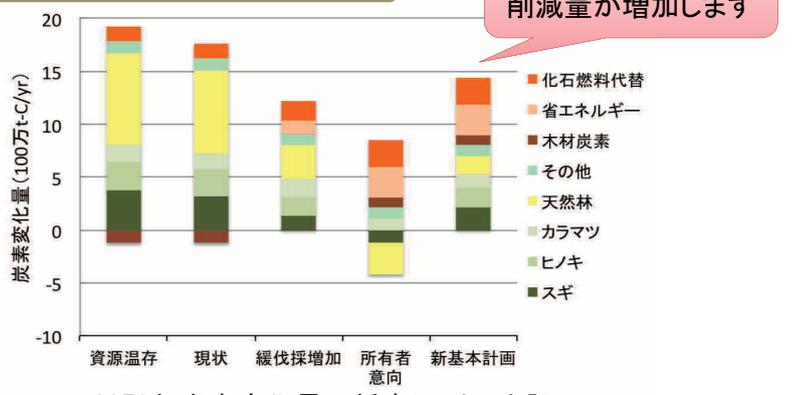
シナリオ名	林業の指標			木材利用の指標	
	主伐面積	再造林率	新品種利用	建築・家具	土木
資源温存	現状面積から減少	現状率から増加	無	現状利用率(35%)	現状利用量100万m ³
現状	現状面積(年0.3%程度)	現状造林面積	無	現状木造・木製率(35%)	現状利用量100万m ³
緩やかな伐採増加	2050年までに2倍以上(人工林を60年生まで1/2割、100年生まで1/3程度皆伐)	現状率	無	2050年までに木造・木製率50%	2050年までに利用量300万m ³
所有者意向	2011-2030年に15-30% 2031-2050年に25-30% (樹種別、地方別でアンケート調査結果を補正して作成)	アンケート結果 カラマツ7割 スギ・ヒノキ5割程度	無	2050年までに木造・木製率70%	2050年までに利用量600万m ³
新基本計画(積極的林業・木材利用)	2020年木材生産量3900万m ³ 2030年5000万m ³ 主伐大幅増、間伐材利用大幅増、伐捨て間伐大幅減	上昇	有 2050年までに70%に増加	2050年までに木造・木製率70%	2050年までに利用量600万m ³

3 将来予測の結果からみた緩和策のベストミックス



森林と木材利用による炭素変化量

【評価対象】
森林:スギ・ヒノキ・カラマツ・天然林・その他による吸排出量
木材利用:国産材の利用に伴う蓄積効果による吸排出量、省エネ効果・化石燃料代替効果による排出削減量



2050年炭素変化量の将来予測の内訳

林業生産と木材利用を推進する2つのシナリオは、温暖化対策としても効果的なことが分かりました。この周辺にベストミックスを見つけられそうです。

森林・緑陰を暑熱シェルターとして利用する — 熱中症を防止するための身近な気候変動適応策 —

岡野通明 (森林総研)

街道筋に並木道を造成したり、植物を柵に仕立てた緑陰を作って暑い日中に涼を取ることは、古来より経験的に行われてきました。この緑陰の効果を、WBGT(暑さ指数)の利用することで適切に評価できることを明らかにしました。WBGTを用いることで、身近にある都市近郊林等の緑陰を利用し、暑熱による熱中症等の健康被害を回避する方法を広く啓蒙することができます。

1 緑陰・木陰の涼しさを表す指標は？

WBGT 湿球黒球温度を指標とします。黒球温度計(グローブ温度計)と乾湿計の値から算出します。温熱環境を表すには気温に加え、湿度、風速、輻射(放射)熱を考慮して総合的に評価する必要があります。WBGTは暑さ指数とも呼ばれています。



$$WBGT = 0.7 NWB + 0.2 GT + 0.1 NDB$$

屋外で日射のある場合
室内または屋外で日射のない場合
 $WBGT = 0.7 NWB + 0.3 GT$

○ NWB (natural wet bulb temperature) は自然湿球温度(自然蒸発と蒸散作用による冷却効果)、GT (globe temperature) は黒球温度(グローブ温度計)、NDB (natural dry bulb temperature) は自然乾球温度(直射日光を遮られた乾球温度)です。

2 緑陰・木陰はどのくらい涼しいのですか？

様々な樹種、小林分(木立)で観測してみました。明るい緑陰でも、日向に比べてWBGTは2~4℃低下します。5~6℃も低くなることもあります。熱中症の危険度を1~2ランク下げるほど涼しくなります。

対照草地からの気温とWBGTの平均的偏差の例
(2011年~2014年8月の晴天時 10:00~16:00)

	気温	WBGT
対照草地	—	—
単木の陰(テーダマツ)	-0.4℃	-2.4℃
緑陰(ケヤキ林)	-0.8℃	-3.4℃

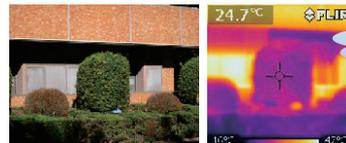
3 なぜ緑陰・木陰は涼しいのですか？



葉の層が効果的に日射を遮ります

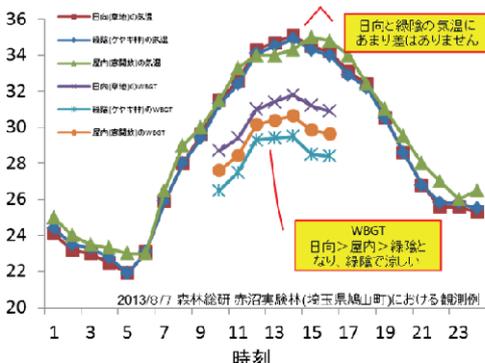
葉の層は蒸散による気化熱によりあまり熱くなりません

開放的な樹々の間を風が通り抜けれます



葉の層は比較的冷たい

涼しい緑陰木陰ができる



○WBGT(暑さ指数)を用いることで、緑陰を適切に評価できます。

○暑熱期には、窓を開けて冷房運転しない屋内より、緑陰のほうがWBGTが下がり、身体への熱負荷が少なくなる事例が観測されています。

○緑陰には暑熱を緩和する機能があるので、酷暑猛暑の際の有効なシェルターとして利用できます。

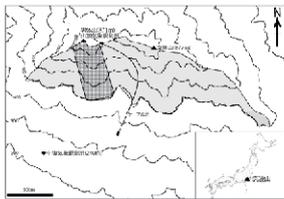
○緑陰は体温調節の機能が弱い乳幼児や高齢者、また障害者等の環境弱者に涼しさを提供し、暑熱による健康被害を減らすことができます。

○WBGT(暑さ指数)の利用により、緑陰の効果の適切な評価を通して、健康被害の回避と温暖化適応に貢献します。

筑波山における空中写真に基づく常緑広葉樹の過去44年間の分布変化と気候温暖化影響評価

田中信行、安田正次、中園悦子、大丸裕武(森林総研)

筑波山南斜面の老齢自然林の1961年から2005年にかけて撮影された空中写真を用いて常緑広葉樹の変化を検出した結果、各標高で増加したことが明らかになりました。常緑広葉樹林の分布北限と一致する寒さの指数(CI)=-10と、常緑広葉樹アカガシ個体の分布北限と一致する最寒月の日最低気温平均値(TMC)=-4.7に相当する標高は、過去100年間で147m、146mそれぞれ上昇しました。この森林は、8世紀以降社寺林として保護されてきたことから、この分布変化は植生遷移よりも過去の温暖化の影響が大きいと考えられます。



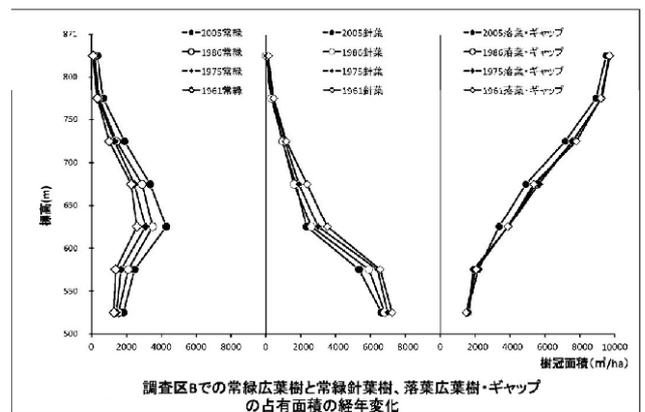
調査プロットおよび気候観測所の位置



2005年冬期撮影

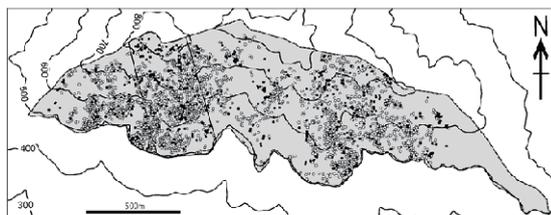
2

常緑広葉樹冠の面積の経年変化



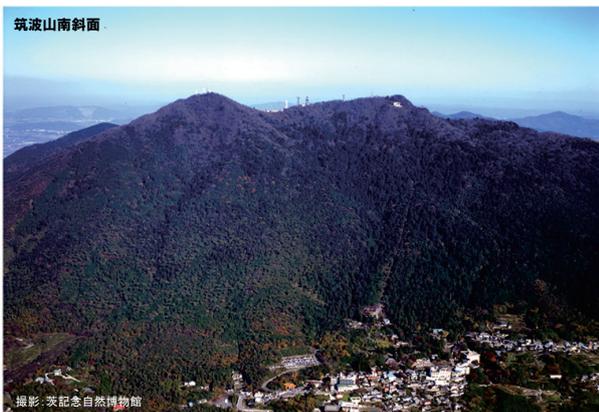
1

常緑広葉樹の樹冠の出現と消失



プロットAの常緑広葉樹の分布変化

各点は樹冠ポリゴンの重心位置。出現状況により次の3つに分類
 ○: 1961年から2005年の間に連続して存在する樹冠(1820個)
 ●: 1961年から2005年の間に出現した樹冠(500個)
 ▲: 1961年から2005年の間に消失した樹冠(18個)

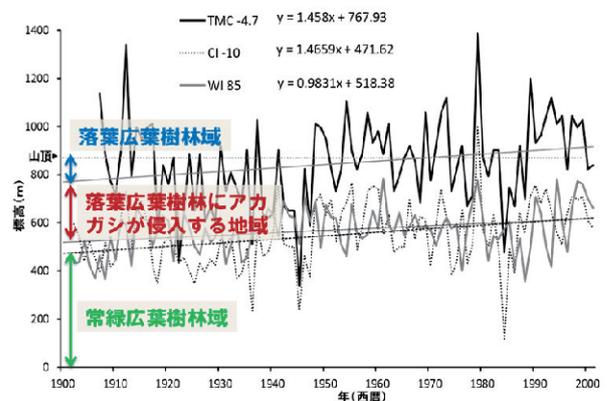


筑波山南斜面

撮影: 茨記念自然博物館

3

過去の気候変化



温暖化で落葉広葉樹林の開葉は早まるか？ — 岐阜県の事例 —

粟屋善雄(岐阜大学)

岐阜県を対象に気候モデルによる気温の将来予測データを利用して、温暖化による落葉広葉樹林の開葉の変化を推定しました。開葉は1990年代に比べ50年後に14日、100年後に28日早まると予想されました。標高の高いエリアより低いエリアで開葉の早期化が顕著に進むと考えられます。

1

背景と目的

- ・ 温暖化により植物の生育期間が変化する
- ・ 開葉は5°Cを超える気温の積算値と関連が深い

→

1. 日平均気温により開葉日を判定するモデルを作成
2. 開葉日の経年変化を予測して温暖化の影響を評価

2

開葉日の判定方法

- ・ Terra衛星MODISデータで2007年の開葉日を解析
- ・ 解析結果と気温の関係から開葉日判定モデル作成(表1, 図1)
- ・ 気象モデルMIROCで予測した日平均気温を用いて開葉日を判定

表1 開葉判定の条件

休眠終了	日平均気温10°C 2日
リセット	日平均気温4°C以下
休止	急激な気温低下 → 8°Cで再開
積算	5°C以上の日 $\Sigma(T-5)$
積算気温	120°C以上

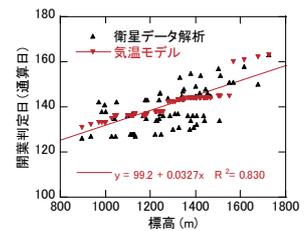


図1 開葉日判定モデルの検証

3

開葉日の変化

開葉日の判定(10年平均):
1990年代, 2040年代, 2090年代
経年変化(2時点の差):
1990年代~2040年代
1990年代~2090年代

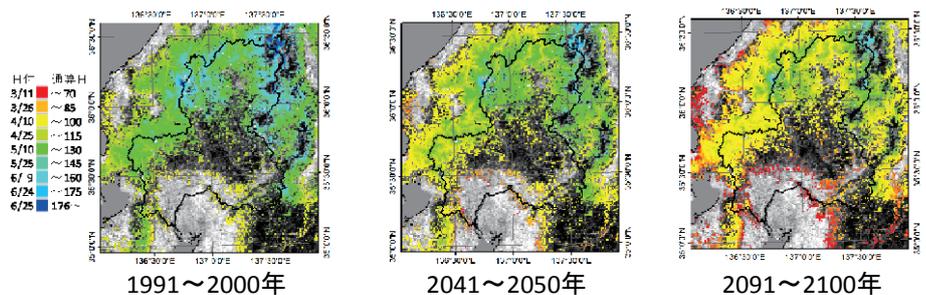


図2 10年間の平均開葉日

結果の概要

- ・ 1990年代(現在)は低地では元旦から数えて(通算日)100日頃, 高地では160日頃に開葉(図2)
- ・ 2090年代は低地では70日頃, 高地では140日頃に開葉(図2)
- ・ 開葉は平均で, 50年後に約2週間, 100年後に約4週間早まる(図3)
- ・ 高地より低地で開葉の早期化が顕著(図3)
- ・ 開始(低地)~終了(高地)の期間が長期化

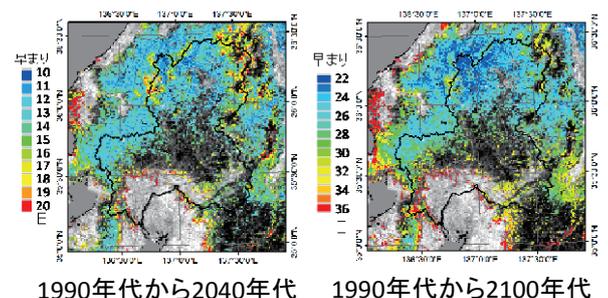


図3 開葉日の経年変化(温暖化の影響)

謝辞
農林水産省研究情報センターにTerra衛星MODISデータを提供していただき、永谷泉氏にはMODISデータの幾何補正をしていただいた。森林総合研究所の澤野真治氏にはMIROCデータの切り出しをお願いした。記してお礼申し上げます。

温暖化による森林生態系炭素吸収量の変動予測

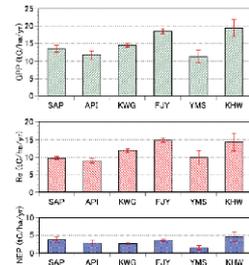
山野井克己・溝口康子・安田幸生・宇都木玄・
深山貴文・高梨聡・小南裕志・北村兼三(森林総研)・
中野隆志(山梨県富士山科学研究所)

国内のさまざまな森林にタワーを建てて炭素吸収量をモニタリングしています。場所や年による変化はありますが、日本の森林は多くの炭素を吸収しています。将来の炭素吸収量をモデルで解析したところ、北海道の落葉広葉樹林では、温暖化によって樹木の成長が良くなり炭素吸収量は増加すると予測されました。

1 さまざまな森林での炭素吸収量



森林総研フラックス観測ネットワーク



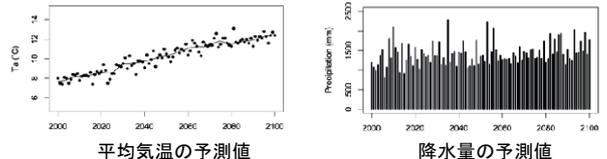
さまざまな森林での炭素収支
GPP: 総生産量=光合成量
Re: 総呼吸量=維持呼吸+成長呼吸+有機物の分解
NEP: 純生態系生産量=GPP-Re=生態系の炭素吸収量

- 10年間の観測でそれぞれの森林の炭素吸収量(収支)が明らかになってきました。
- 炭素吸収量は年ごとの気象条件(気温, 日射量, 積雪期間など)に影響されます。
- 炭素吸収量の年々の変動の原因は複雑で、観測値のみから単純に将来を予測することは困難です。

2 予想される温暖化や環境変化

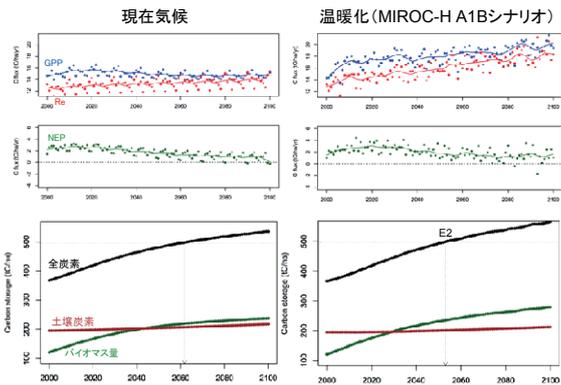
温暖化シナリオに基づく札幌サイトの気候変化の予測値

MIROC-H A1Bシナリオ
高成長型社会シナリオ 各エネルギー源のバランスを重視
CO₂濃度: 750ppm 気温: 1.7-2.8-4.4℃



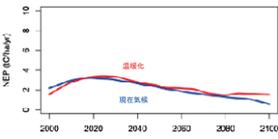
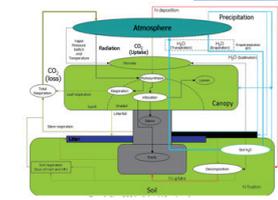
札幌の場合、100年後には平均気温が4℃あまり、降水量はわずかに増加が予想されています。

3 温暖化の炭素吸収量への影響予測



札幌サイトでの温暖化による炭素吸収量(炭素収支)と蓄積量の予測

生態系プロセスモデル Biome-BGC



札幌サイトでの炭素吸収量の比較

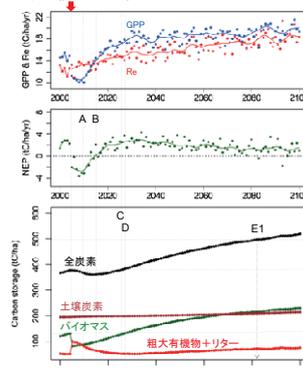
GPP: 現在気候では変化は小さいものの、将来はわずかに減少します。温暖化した場合は増加傾向を示し、100年後まで続きます。
Re: 現在気候ではわずかに増加傾向が継続します。温暖化した場合は増加率が大きくなり、大きな増加傾向が続きます。
NEP: 現在気候では2020年頃を、温暖化した場合は2030年頃をピークに、炭素吸収量は減少傾向を示します。
両者の違いは少ないものの、温暖化した場合に炭素吸収量が多くなります。
炭素蓄積量: 森林生態系の全炭素蓄積量は温暖化した場合の方が多くなります。その主たる要因は、樹木によるバイオマスの蓄積が多くなるためです。

4 温暖化により増加が予想される攪乱影響

(実際の札幌サイトで何が起り、将来は?)



台風攪乱2004年 札幌サイトの40%の風害



台風攪乱を含む炭素収支と蓄積量の予測

- このような攪乱は決して珍しい現象ではありません。
- 札幌サイトのように風倒木を残置した場合、失われた炭素量は20~30年程度で回収されます(CやD)。
- 攪乱により失われた炭素量は回復できずに、長く影響することがわかります(E1>E2)。

九州、市房山北部の山地斜面における崩壊発生と森林伐採の関係について

村上 亘(森林総研)、齋藤 仁(関東学院大学)、大丸裕武(森林総研)

近年の温暖化による豪雨頻度の増大とそれに伴う斜面崩壊の発生が懸念されます。一方で、崩壊リスクの評価には気候変化のほかに伐採等による植生変化も考慮する必要があります。これまでの研究から、花崗岩地域の山地斜面において**森林伐採後に崩壊が多発したこと、伐採後にすみやかに植林をした斜面では崩壊が抑えられたことが明らかになりました。**

1 調査地および調査内容 本研究では、九州の熊本県と宮崎県の境界に位置する市房山北側で過去30年間に発生した崩壊について、崩壊と森林伐採や植栽との関連性を調査しました。調査対象の地質は新第三紀の粗粒～中粒の花崗閃緑岩です。対象範囲を撮影した空中写真から崩壊箇所を抽出するとともに、植生状況を分類し、対象期間中の植生状況と崩壊発生との関連性について検討しました(図1)。

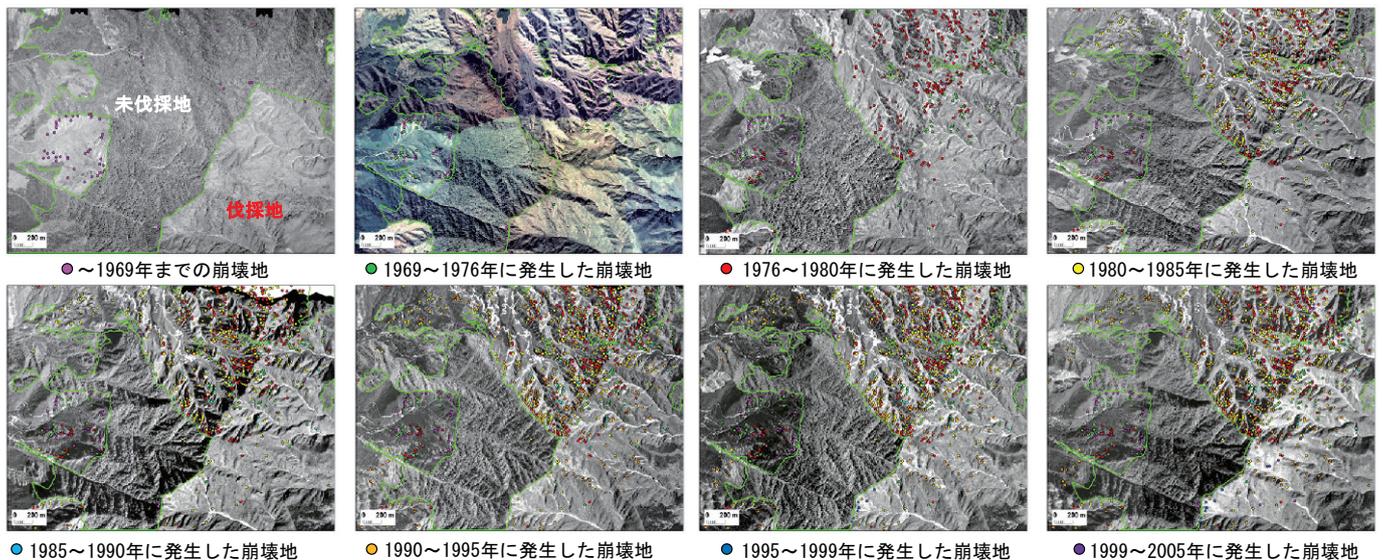


図1 植生状況の変遷と崩壊発生個所の推移

2 調査結果 調査範囲では1969年～1976年に大規模な伐採および植林が行われ(図2)、その後の1980年以降、伐採斜面では多数の崩壊が発生しましたが、伐採が行われていない斜面では崩壊はほとんど発生しませんでした(図3)。また、伐採後に植林された斜面では崩壊の発生が抑えられることもわかりました(図3)。このことから、花崗岩のような崩壊しやすい地質の斜面では大面積皆伐を行わないこと、伐採後はすみやかに植林することなどの注意が必要と考えます。なお、崩壊と期間中の降水量との関係については**T-05**において報告しています。

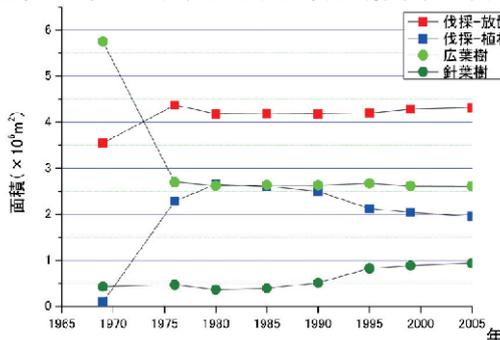


図2 植生状況の変遷

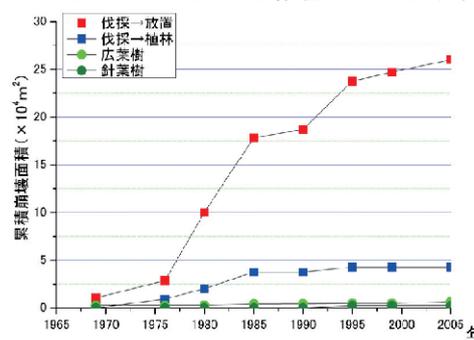


図3 植生状況ごとの崩壊面積の推移

花崗岩山地における斜面崩壊の発生と降雨量および確率降雨との関係 —九州山地・市房山と阿武隈山地を対象として—

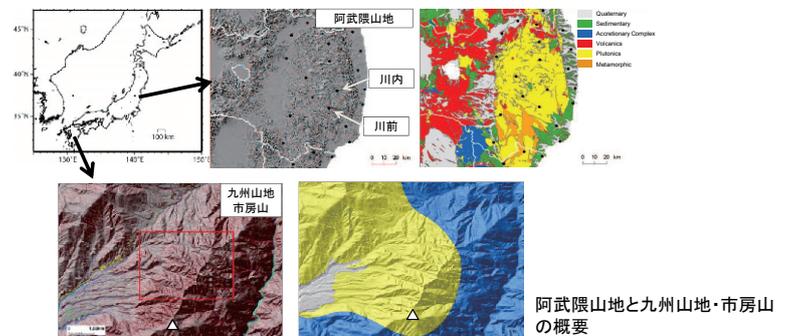
齋藤 仁(関東学院大)、村上 亘・大丸裕武(森林総研)、小口 高(東京大)

九州山地・市房山と阿武隈山地において斜面崩壊が発生する基準雨量を解析しました。その結果、両地域では基準雨量の絶対値は異なるものの、皆伐がない場合の再現期間は5年以上でした。また市房山では、皆伐により基準雨量が1/3程度に低下し、再現期間が1年以下となったことが判明しました。

1 背景と目的

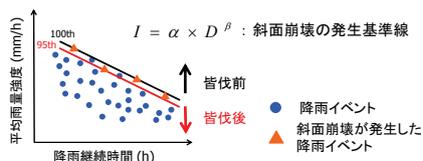
- 花崗岩山地では、降雨に起因した集団発生的な斜面崩壊が繰り返し起きてきました。また地球温暖化に伴い、現在西日本にみられるような多雨気候が、東北日本や北日本にも出現すると予測されています。今後の防災のために、花崗岩地域で斜面崩壊の発生履歴を明らかにし、降雨量との関係を解析することは重要といえます。
- 本研究では、花崗岩からなるが異なる気候・地形条件を持つ九州山地・市房山と阿武隈山地を対象に、斜面崩壊が発生する基準雨量と、確率雨量(豪雨の再現期間)を解析しました。また市房山については、森林伐採が斜面崩壊の発生に与えた影響を考察しました。

2 対象地域



- 阿武隈山地は、年間降水量が約1500mm、地質は阿武隈花崗岩類(前期白亜紀)、北上花崗岩(前期白亜紀)からなります。市房山周辺の年間降水量は約3000mm以上、地質は市房花崗岩(中—後期中新世)からなります。

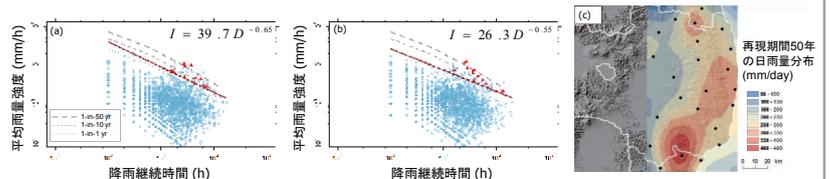
3 解析手法



平均雨量強度 (mm/h) - 降雨継続時間 (h) を用いた解析の概要

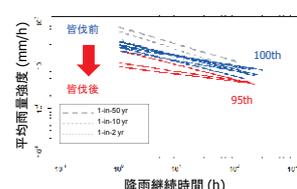
- 空中写真、先行研究、災害報告書等から、1960年以降に発生した斜面崩壊の事例を収集しました。
- 市房山では、過去の多時期の空中写真を判読し、それぞれの期間における皆伐地域と斜面崩壊地をマッピングしました(発表番号T-04、村上ほか「九州、市房山北部の山地斜面における崩壊発生と森林伐採の関係について」参照)。
- 降雨量データ(1952年～:国土交通省、1978年～:AMeDAS)を用いて、斜面崩壊の発生基準雨量を解析しました。ここでは一般的な指標である、平均雨量強度(I , mm/h)と降雨継続時間(D , h)との関係を用いました(上図)。その際には、対象地域で発生した全降雨イベントと斜面崩壊が発生した降雨イベントとを解析しました。なお、一連の降雨は、24時間の無降雨継続時間で区切られるイベントです。

4 結果と考察



阿武隈山地・川内(a)と川前(b)における斜面崩壊の発生と平均雨量強度(mm/h) - 降雨継続時間(h)、および確率雨量(c)との関係

- 過去の災害事例から、皆伐がない場合の斜面崩壊の発生基準雨量は、 $I = 39.7 * D^{-0.65}$ (川内)、 $I = 26.3 * D^{-0.55}$ (川前) と推定されました。これらの降雨イベントの再現期間は約5年以上でした。特に斜面崩壊が集中的に発生するような極端な降雨イベントの再現期間は約50年以上でした。
- 川内村で広範囲に斜面崩壊が発生した1971年の豪雨では、植生高が大きな森林域でも崩壊が多発しており、脆弱な地質や地形条件が斜面崩壊の分布に大きく影響したと考えられました。



市房山における、皆伐前後での斜面崩壊の発生基準雨量の比較と豪雨の再現期間

- 市房山での皆伐後の斜面崩壊の発生基準雨量は、皆伐前と比べて1/3程度に低下したと考えられました。また斜面崩壊を発生させる降雨の再現期間は、皆伐前では約5年以上であるのに対して、皆伐後では1年以下となったことが明らかになりました。

温暖化適応策としての山地災害対策技術の開発

岡田康彦・宮前崇・黒川潮(森林総研)

大型模型を用いた物理実験、及び数値実験により、極端な集中豪雨時の斜面安定に対する治山構造物の効果を検討しました。物理実験では治山構造物をいれると斜面が崩壊に至る時間が長くなること、数値実験では斜面の変形する面積が減少することがわかり、その斜面災害防止効果を確認できました。

1 大型の斜面模型を用いた実験



大型の斜面模型

緩い斜面部に土を多く堆積させた実験の様子

全長9mの大型斜面模型に土を詰めて、1時間当たり100mm、200mmの降雨を与える実験をしました。

また、毎時100mmの降雨実験では、治山構造物(えん堤)により緩い斜面に土が堆積した条件を再現した実験も実施しました。

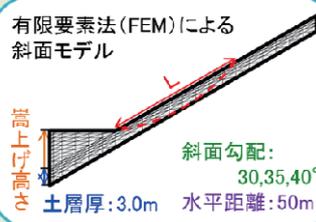
毎時100mmの実験では、2,891秒で斜面が崩壊しました。毎時200mmでは1,471秒と、毎時100mmの半分の時間で崩壊が発生しました。一方、治山構造物がある実験では、3,586秒と崩壊するまでの時間がかかなり大きくなり、その効果を確認できました。

山地斜面を対象に、3次元の地形モデルを作製しました。2つの溪流内に複数の治山構造物(堰堤)を設置した場合も併せて作製し、治山構造物による斜面安定化の効果解析しました。

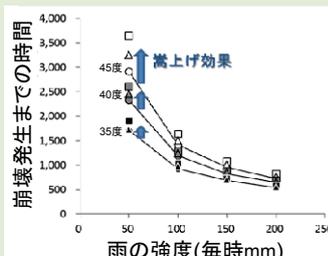
土がほとんど湿っていない条件(通常期)、少し湿った条件(少雨時)、完全に飽和した条件(豪雨時)の3条件で、斜面の変形を検討したところ、治山構造物により変形量や変形が進む斜面の面積が減少し、斜面安定に寄与する結果が得られました。

2 治山構造物の斜面安定化の効果

山地の溪流の治山構造物の高さを高く(嵩上げ)したり、えん堤部を設置することによる斜面安定化の効果について、2次元および3次元の数値シミュレーション解析を実施しました。



2次元の解析モデル

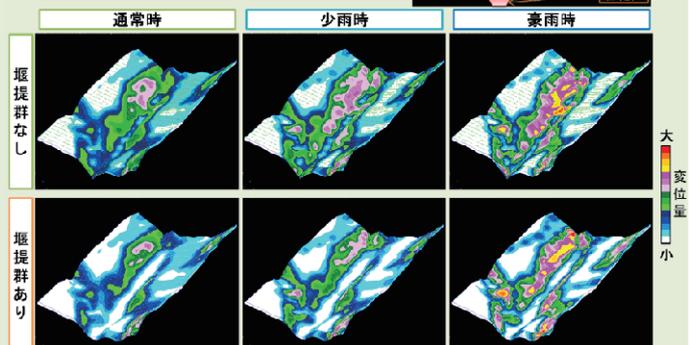
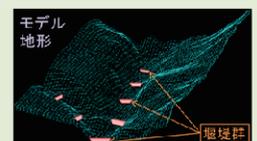


2次元解析の結果

治山構造物の設置に伴う斜面下位の土の堆積条件、雨の強度、斜面の勾配を変えて計算を実施しました。

35度、40度、45度いずれの傾斜においても、また、いずれの雨の強度においても、治山構造物の高さを増して(嵩上げ)堆積土量を大きくすると、崩壊が発生するまでの時間が長くなる結果が得られました。

3次元の解析モデルと結果



将来の山地流域からの水資源供給-森林有無の差

細田育広・澤野真治(森林総研)

気候シナリオデータに基づく今後50年間の温暖寡雨地域における水流出を推定したところ、繁茂した森林流域は新植地流域に比べて深刻な渇水が生じやすいことが予想されました。その反面、洪水は軽減されることが予想され、水利用面と防災面を両立させる森林管理の重要性が示唆されました。

1 水流出に対する気候変動の影響

- 農業生産等の水資源として欠かせない山地森林からの水流出に対する地球規模の気候変動の影響を予測しています。
- 降水条件の厳しい温暖寡雨地域の森林小流域*1における新植地と繁茂森林の流況を概ね再現できる水流出モデルを用い、2060年までの気候シナリオデータ*2を入力として、水流出の変動にどのような差があるのかを検討しました。

*1 1937年から現在も継続観測中の竜ノ口山森林理水試験地南谷

*2 IPCC AR4(2007) PCMDI CMIP3 に基づく2008～2060年の予測値を使用

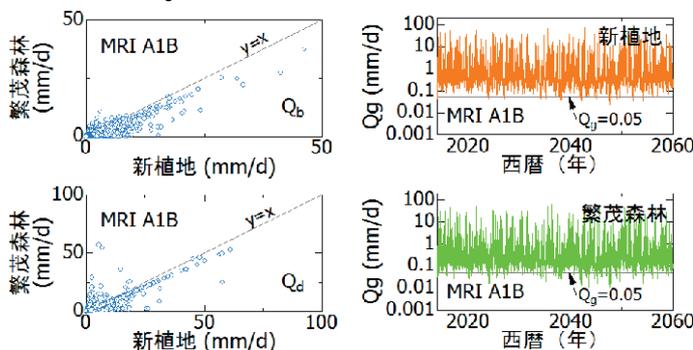
2 繁茂森林は水利用面で不利

- 基底流出*3・直接流出*4ともに新植地の方が多(したがって総流出*5も多い)。
- 繁茂森林の方が渇水頻度は高く、水量の低下も大きい(したがって深刻な渇水が生じやすい)。

*3 雨が降っていない時の流出(Q_b)

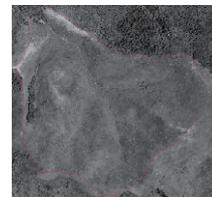
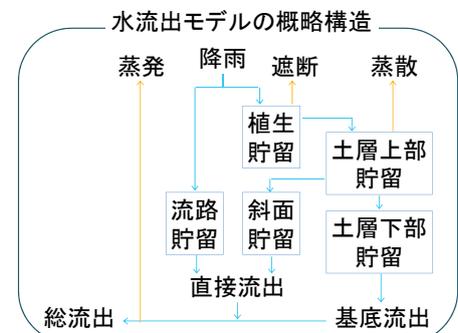
*4 直近の降雨によって増加した流出(Q_d)

*5 総流出 $Q_g = Q_b + Q_d$



ここではCMIP3の中では対象流域における積算降水量が最少のMRI A1B(気象庁気象研究所によるA1B気候シナリオデータ)に基づく計算結果を示しています。 $Q_g=0.05\text{mm/d}$ は対象流域における渇水量の目安を示します。

水資源供給量を確保しつつ洪水緩和・斜面安定を図るためには
適正な森林管理が必要



新植地(1961年)

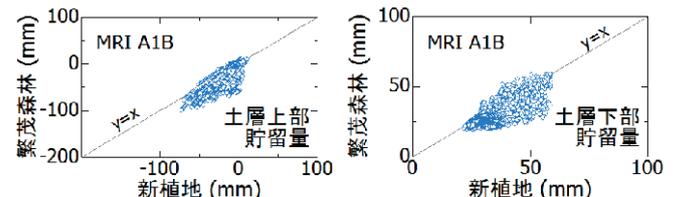


繁茂森林(2007年)

(国土地理院撮影空中写真から調製。赤線は流域界。)

3 繁茂森林は防災面で有利

- 繁茂森林は蒸発散量が多いため、新植地と比べて流域土層が乾燥し、直接流出が減少する(洪水軽減に寄与)。
- 流域土層が乾燥しているほど、斜面土層の間隙水圧が上昇しにくい(斜面安定に寄与)。



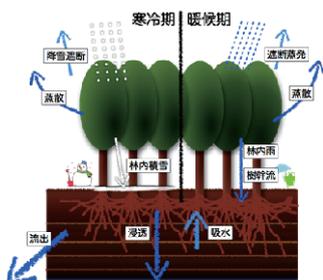
森林から供給される水資源を予測する

澤野真治(森林総研)

気候の変化は、日本の水源地帯である山岳地の森林の水循環に影響を及ぼす可能性があり、下流の利用可能な水資源量に影響します。そこで、気候変化により森林から供給される水資源がどのような変化するかを予測するために、広域での森林の水循環モデルを作成しています。

1 広域森林水循環モデル

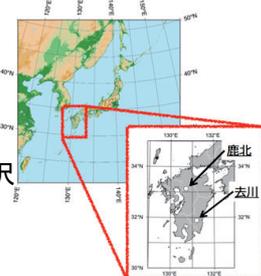
森林から供給される水資源量を予測するために、森林に降ってきた雨や雪がどのように森林の内部に到達し、森林が使う水の量や森林から出ていく水を予測するモデルを作成しています。



2 モデルの検証データ

■ 鹿北試験地III号沢

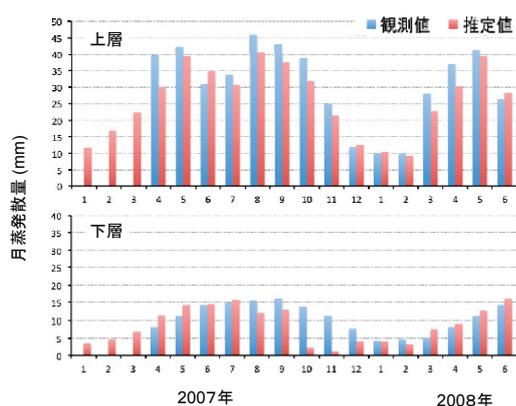
- 熊本県山鹿市鹿北町
- 標高: 165 m
- 流域面積: 約50m²
- 植生: スギ・ヒノキ



■ 去川長期理水試験地III号沢

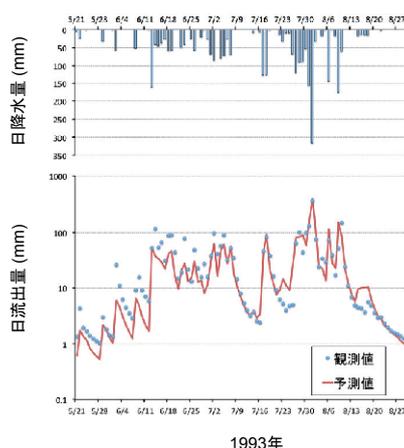
- 宮崎県宮崎市高岡町
- 標高: 202-288 m
- 流域面積: 8.2ha
- 植生: スギ・コアサシ・イヌガシ

3 森林が使う水の量を予測する



観測によって得られた森林の上層部及び下層部における水の利用量(蒸発散量)の季節変化を再現することができました。

4 森林から出ていく水の量を予測する



森林からの流出量が雨によって増えていく様子や、雨が止んだ後に減っていく様子を再現することができました。

森林からの流出量を全国で予測するために、今後は森林へ雪が積もっていく様子や融けていく様子を再現するためのモデルを作成します。このようにして作成された広域の森林水循環モデルを用いて、気候の変化が及ぼす森林から供給される水資源量への影響の大きさを評価します。

健全な海岸林をめざして

坂本知己・鈴木覚・野口宏典・後藤義明・宮前崇(森林総研)

気候変動による**台風の強大化、高潮の危険性の増大**などが予想されるので、海岸林の立木密度を**本数調整**によって適切に間引き、健全な林帯に導くことが必要です。海岸線に平行に1列伐採して複数列を残す方法であれば、海側の樹木に守られ陸側の残りの樹木に伐採の影響は及びにくく、有効な本数調整法と考えられました。

1 密度管理で健全な海岸林を

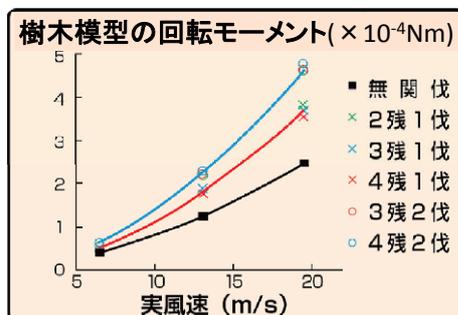
- クロマツ海岸林の多くは、本数調整の遅れによって過密化が進み、樹高のわりには幹が細く枝が枯れ上がっています(①)。気候変動に伴う台風の強大化、高潮の危険性の増大などに備えて、幹が太く枝葉がしっかりした健全な林帯に導くことが必要です。そのためには、適切に本数を調整することが必要ですが、伐採によって残された樹木が受ける海風が強くなることに留意する必要があります。



① 過密な状態：枝が枯れ上がり幹が細い

2 風洞実験から見た列状伐採

- 密に植えられた海岸林の本数調整では、作業性から列状伐採が有効です。残存木が受ける風の力が残存列と伐採列の配置によってどのように影響するか、また、海風に対する伐採列の向きの影響を風洞実験で確かめました。
- 伐採列が1列の場合に比べて伐採列を2列にすると風の入り込み方は増えますが、残存列数は風の入り込み方に影響しませんでした(②、③)。また、伐採列に対して直交する風より斜めから入る風の方が、残存木への風当りは強くなりました。



② 伐採の仕方と風当たり

③ 伐採前の風当たりを基準とした風当たり

	無 伐	2 残 1 伐	3 残 1 伐	4 残 1 伐	3 残 2 伐	4 残 2 伐	5 残 2 伐
90°	1.0	1.4	1.4	1.4	1.8	1.8	1.8
45°	1.1	2.0	2.0	2.0	2.7	2.7	2.7

3 現地観測から見た列状伐採

- 海岸林に1.2 m幅の列状伐採帯と5 m幅の作業道がある場合の風速、空中塩分量、着葉塩分量を測定しました(④)。
- 林冠高付近の風速比は、内陸ほど低下する中で、作業道では増加しましたが、それでも海側の前縁に近い測定点の値よりも低いものでした。
- 空中塩分の分布は風速の分布に似ていましたが、作業道での増加は見られませんでした。
- 着葉塩分量に列状伐採の影響が確認されましたが、3列残したうちの陸側の2列の樹木は1列目に守られていました。



④ 風速と空中塩分量の現地測定状況

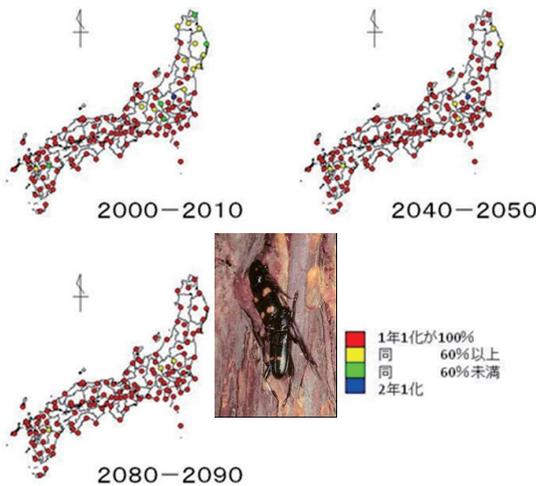
- 海風に直交する1伐3残の列状伐採による密度管理を進めることで健全な海岸林になります。

温暖化により被害拡大が危惧される森林害虫

尾崎研一・松本和馬・浦野忠久・北島博・上田明良・佐藤重穂(森林総研)、喜友名朝次(沖縄県森林資源研究センター)、久保慎也(鹿児島県森林技術総合センター)、新谷喜紀(南九州大学)、武田藍(千葉県農林総合研究センター)、齊藤正一(山形県森林研究研修センター)、岡田充弘(長野県林業総合センター)、蛭田利秀(福島県林業研究センター)、安田弘法(山形大学)

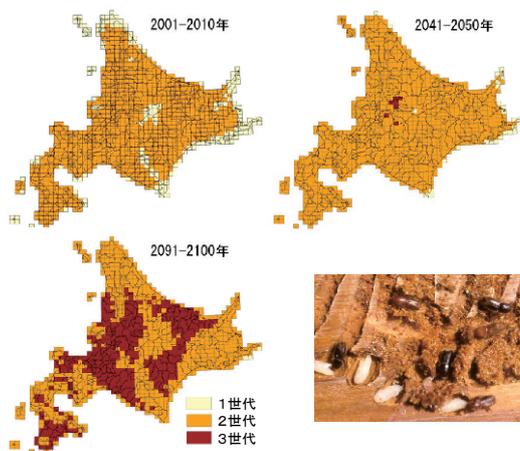
地球温暖化による、森林害虫の世代数や発生回数の増加、分布域や被害地の拡大を予測しました。予測には気候シナリオデータ(MIROC-H、A1Bシナリオ)による2100年までの気温変化を使用しました。その結果、いずれの種においても温暖化による被害の拡大が予測され、対策が必要なが分かりました。

1 スギカミキリの世代数増加



北東北で現状2年1世代が1年1世代になる。

4 ヤツバククイムシの世代数増加

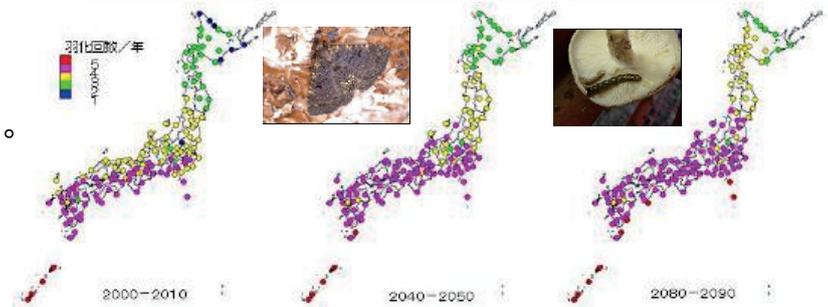


北海道:1年に3世代の地域が出現する。

2 キオビエダシヤクの分布域拡大

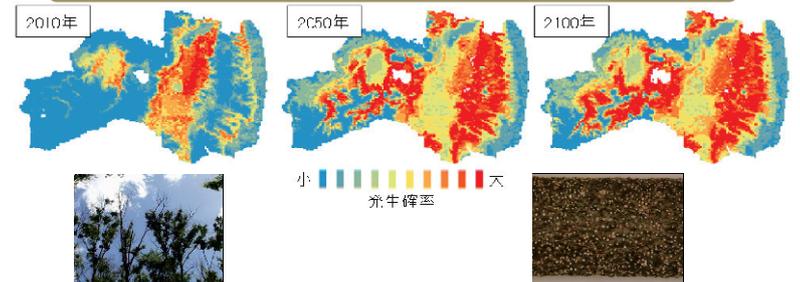


3 ムラサキアツバの発生回数増加



1年に3・4回発生する地域が北上する。

5 カツラマルカイガラムシの被害地拡大



福島県:高標高地に被害が拡大する。

地球温暖化のシイタケ原木栽培における病虫害への影響と適応策に関する研究

宮崎和弘・末吉昌宏(森林総研九州)

地球温暖化の進行に伴い、シイタケの栽培現場で害菌や害虫類による被害拡大が懸念されます。そこで、我々は被害実態の把握を行うと共に、地球温暖化の適応策として、ほだ場への寒冷紗施用効果の検証等を行いました。その結果、ほだ場の気温の上昇やほだ木内の温度上昇を抑える効果を確認しました。

1 地球温暖化の影響による害菌被害の増加

近年、九州のシイタケ原木栽培現場で害菌類の一種であるヒポクレア・ペルタータおよびヒポクレア・ラクテアによる被害報告が増加しています。夏場の高温と降雨量の増加が影響していると考えられます。



ヒポクレア・ペルタータ被害ほだ木 (佐賀県佐賀市)



ヒポクレア・ラクテア被害ほだ木 (宮崎県諸塚村)

注:ヒポクレア・ペルタータおよびヒポクレア・ラクテアはともにシイタケ菌糸に寄生する菌寄生菌の一種



2000年 2010年 2014年
九州地域におけるヒポクレア・ペルタータおよびヒポクレア・ラクテアの被害報告の変遷(被害報告が増加傾向にある)(図中赤丸で示した生産地で被害の発生を確認)

2 キノコバエ類被害への影響

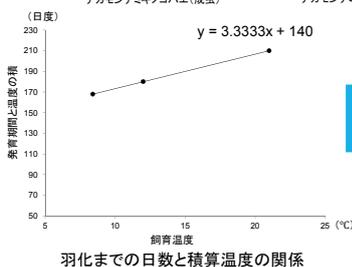
キノコバエ類の発生は、子実体の食害や製品への異物混入といった問題を引き起こします。飼育実験から、温暖化の進行に伴って被害を受ける期間が長くなることが予想されました。



ナカモンナミキノコバエ(成虫)



ナカモンナミキノコバエ(幼虫)



地球温暖化の進行に伴い、2週間~2ヶ月ほど羽化が始まる時期が早くなることが予想されました。

3 適応策としてのほだ場への寒冷紗の施用効果

シイタケの栽培環境への温暖化の緩和策として、人工ほだ場上部への寒冷紗の施用効果について検証しました。



人工ほだ場への寒冷紗施用試験(上から見た図)



人工ほだ場への寒冷紗施用試験(下から見た図)
左:寒冷紗有
右:寒冷紗無

寒冷紗有区および寒冷紗無区に温湿度計およびほだ木材内に埋め込んだ温度センサーを設置し、寒冷紗の施用効果を検証しました。

表-1 寒冷紗施用の気温への影響

測定地点	平均気温(°C)		最高温度30°C以上日数(日)	
	平成24年	平成25年	平成24年	平成25年
人工ほだ場(寒冷紗無)	24.9	25.9	64	77
人工ほだ場(寒冷紗有)	24.8	25.7	56	63

測定期間: 6月~9月

表-2 ほだ木材内の平均温度と最高到達温度

試験区	平均温度(°C)	最高到達温度(°C)
寒冷紗無	25.9	34.8
寒冷紗有	25.5	31.8

試験期間: 2013年6月7日~8月13日

人工ほだ場の上部に寒冷紗を施用することで、30°Cを越える日数を減らしたり、ほだ木材内の温度上昇を抑える効果があることが確認されました。

寒冷紗の施用により、害菌や害虫による被害を軽減させる効果が期待されます。

宇宙から熱帯林の変化を監視する



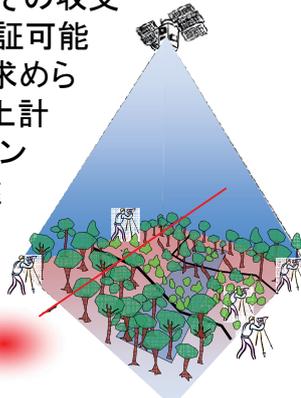
平田泰雅、古家直行、齋藤英樹、鷹尾元 (森林総研)、
溝上展也、太田徹志 (九州大学)、加治佐剛 (鹿児島大学)、
LENG Chivin、PAK Chealy (カンボジア森林局)



私たちは、様々なリモートセンシング技術を組み合わせて熱帯林の炭素蓄積量とその変化を効率よく計測する研究開発に取り組みました(D-01~06)。中でも、森林による二酸化炭素の吸収・放出量を推定するために不可欠な、森林減少や森林劣化を定量的に把握する新たな手法をここではご紹介します。

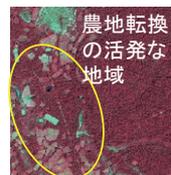
0 森林を多段階で観測する

「途上国の森林減少・劣化に由来する排出の削減等」、いわゆるREDD-プラスでは、森林に蓄積された炭素とその収支を正確で効率的、かつ検証可能な方法で計測することが求められています。私たちは地上計測と様々なリモートセンシング技術を組み合わせて遠隔地の森林を計測する技術を開発しました。(D-01~06参照)

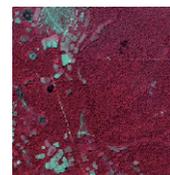


1 森林減少を監視する

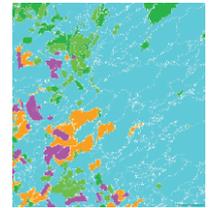
森林が失われたかどうか、上空から見れば一目瞭然です。異なる時期に取得した画像を重ね合わせて変化が起きた場所を自動抽出しました。変化を画素単位ではなく、変化が同時に起きた一塊の土地を「オブジェクト」としてまとめて取り扱うことにより、反射スペクトルの変化だけではなく、その規模や形などから、変化の原因についてより深く考察できるようになりました。



2013年11月28日



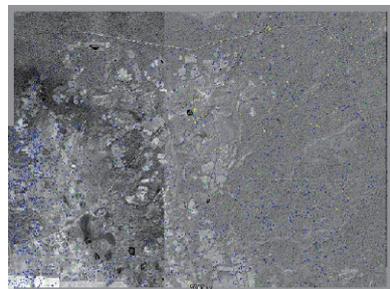
2011年12月19日



伐採劣化 回復(弱) 回復 無変化

2 森林劣化(違法伐採、択伐)を監視する

森林内の立木が違法伐採などで少しだけ取り除かれた場合、炭素蓄積は減少しても森林であり続けるので、従来の方法でその変化を感知するのは困難でした。高分解能衛星画像なら単木の樹冠が見えることに着目し、異なる時期に取得した画像を正確に重ね合わせてその期間中に失われた樹冠を抽出し、森林の劣化状況を判定することに成功しました。カンボジアで地上調査により検証した結果、林冠に達した高木の消失の検出率は十分に高く、そして有用樹種が選択的に伐採されていることがわかりました。森林劣化を広域で定量的に評価する有用なツールとなるでしょう。



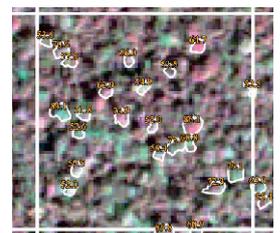
広域推定された単木樹冠消失



現場での違法伐採の発生状況

樹種名	度数	割合(%)
Anisoptera costata	117	26.53
Dipterocarpus costatus	111	25.17
Vatica odorata	70	15.87
Sindra siamensis	39	8.84
Eugenia spp.	29	6.58
Other	75	17.01

伐採木の樹種



検知伐採木の検証

D-02



飛行機から熱帯季節林の地上バイオマス量を測る!!



太田徹志(九州大学)、加治佐剛(鹿児島大学)、溝上展也、吉田茂二郎(九州大学)、鷹尾元、平田泰雅、古家直行(森林総研)、佐野滝雄(アジア航測)、Sokh Heng, Ma Vuthy, (カンボジア森林局)、伊藤江利子、鳥山淳平、門田有佳子、齋藤英樹、清野嘉之(森林総研)、Chann Sophale, Ket Nang(カンボジア森林局)

熱帯林を効率的に測る技術が求められています。そこで、航空レーザを用い、空から地上バイオマス量(面積あたりの木の重さの合計値)を測る方法の有効性を調べた結果、空から広い範囲の熱帯林のバイオマス量を正確に測れることがわかりました。進入が困難かつ危険な熱帯林で役に立つでしょう。

1 対象地

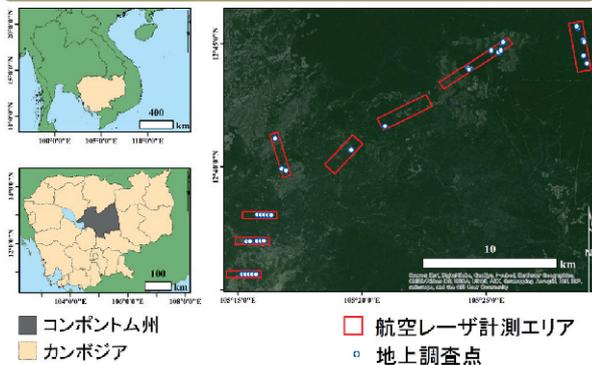


図-1 研究対象地

研究の対象地はカンボジアのコンボントム州です。現地調査, 航空レーザ計測, とともに2012年, 2014年の2回ずつ行いました

2 航空機LiDAR

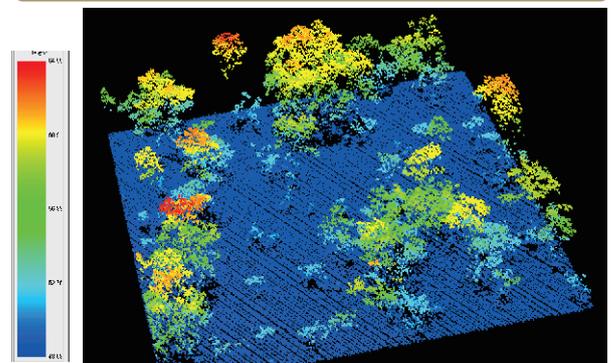


図-2 航空レーザの例

航空レーザは航空機から発射するレーザ光線を利用して、地表面の3次元構造を求める技術です。図は森を撮影した例を示します。青が地面, 緑~赤が木を示します。

3 現在の森の地上バイオマス量を測る

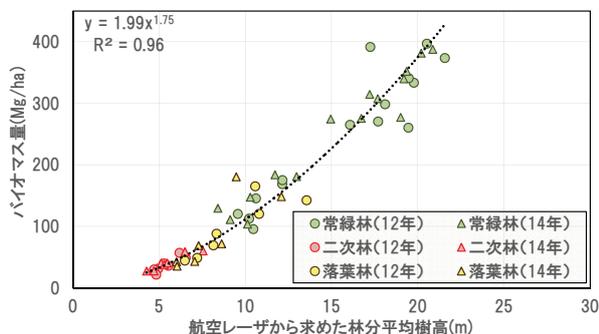


図-3 航空レーザとバイオマス量の関係

航空レーザから求めた指標は、森林の地上バイオマス量と強い関係があることがわかりました。この関係を用いることで、森林の地上バイオマス量を推定することが可能です。

4 森林の変化を測る

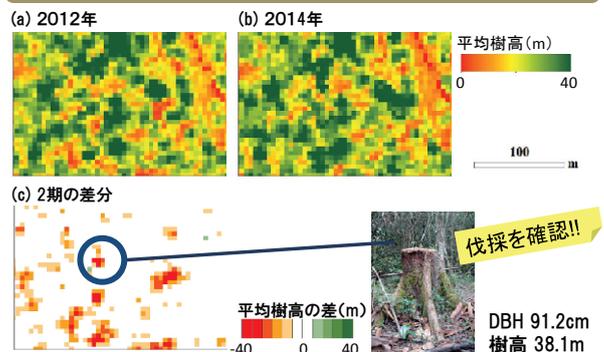


図-4 航空レーザーを用いた森林変化の把握

2時期の航空レーザを用いることで、木が伐採された箇所を発見することが出来ました。このことから、航空レーザから森林の変化を推定できると言えます。



ボルネオ島の熱帯雨林にはどれくらいの炭素が貯まっているのか？



伊尾木慶子・露木聡・Wilson Wong(東京大学)、Mui-How Phua(マレーシアサバ大学)、鷹尾元・齋藤英樹・平田泰雅(森林総合研究所)、宮作尚宏・平瀬麻衣(株式会社パスコ)

私たちはボルネオ島の熱帯雨林を対象として、航空レーザ計測による炭素蓄積量の推定技術の開発に取り組んでいます。これまでの研究で、レーザデータから得られる樹冠高や透過率の変数を使い、人為的攪乱を受けた熱帯雨林の炭素蓄積量を高い精度で推定できることが明らかになりました。

1 熱帯雨林の炭素蓄積量推定

世界の森林の中でも、熱帯雨林は樹種が多く、発達した階層構造を持つことが大きな特徴です。しかし、住民による焼畑や伐採などの人為的攪乱も至る所に見受けられます。私たちはボルネオ島の熱帯雨林を対象とし、航空レーザ計測の技術を用いて精度の高い森林炭素蓄積量の推定技術を開発しています。この技術は、地上で実測した限られた個数のプロット調査などの情報を面的にスケールアップする際に使われることが期待されています。

2 研究対象地のようす

ボルネオ島にある研究対象地は、急峻な地形を含む山岳地帯にあり、製紙会社が管理している森林とサバ州の州有林です。天然林の他に、住民による焼畑利用や企業による皆伐までさまざまな攪乱が見られます。

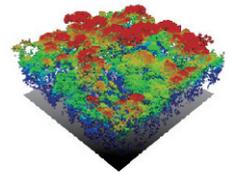


製紙会社皆伐跡地

焼畑耕作跡地

天然林

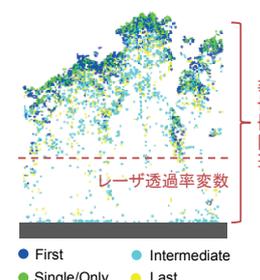
います。しかし、複雑な構造を持った熱帯林での研究はまだ限られており、高精度かつ汎用性のある推定技術の開発が求められています。



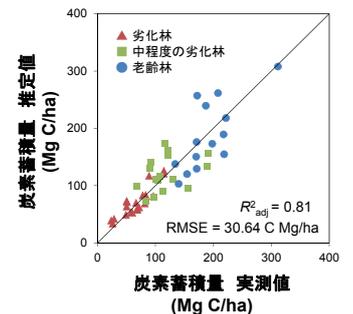
航空レーザ計測から得られた点群データ

4 炭素蓄積量推定モデルの開発

推定モデル作成のため、三次元点群データから樹冠高の変数と樹冠のレーザ透過率の変数を抽出しました。今回の結果から、これまで炭素蓄積量推定に有効であるとされてきた樹冠高変数のみでなく、レーザ透過率の変数を用いることで、熱帯雨林の炭素蓄積量を高精度で推定することが可能であることが明らかになりました。



変数の抽出



$$\ln(C) = 1.43 \ln(\text{CHM}_{\text{mean}}) - 0.33 \ln(\text{LP7}) - 0.39$$

調査プロットとの回帰による炭素蓄積量推定モデル

3 航空レーザ計測による炭素蓄積量推定

航空レーザ計測では三次元の点群データを得ることができます。特に森林の高さを把握できるという利点から、炭素蓄積量推定に有効に利用できることが世界各地の森林で実証されて

また、レーザ透過率の変数は人為的攪乱による樹種構成の違いを推定することにも使えることがわかってきました。今後も熱帯地域での航空レーザ計測技術の応用が進むよう、さらに研究を続ける必要があります。

高分解能の画像で空から熱帯林の構造を知る

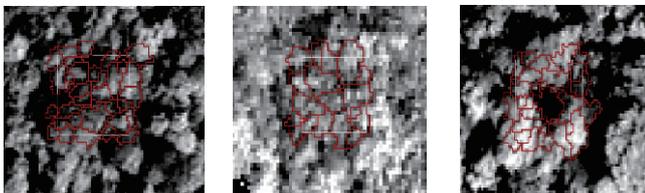
Phua Mui How, Zia Yin, Alexius Koron (マレーシア国立サバ大学)、Wilson Won、露木聡、伊尾木慶子(東京大学)、齋藤英樹、平田泰雅、鷹尾元(森林総研)



高分解能衛星画像や空中写真から、熱帯林の林冠を構成する一本一本の木の樹冠を見分けられます。これらの樹冠の大きさや色から、その森林が攪乱を受けたかどうか、そして林木のサイズのおおよその分布が分かるようになりました。これにより、直接訪れるのは難しい森林の状況を予め知ることができます。

1 空から見た「林冠」

マレーシア・サバ州(ボルネオ島)の熱帯雨林(D-03参照)では、人為の影響のほとんどない原生林のほか、択伐(抜き伐り)による劣化林、強度の択伐や焼畑後に更新した強い劣化林が入り混じり、それらの林冠を空から観測するとサイズの異なる樹冠径の分布が観測されます。



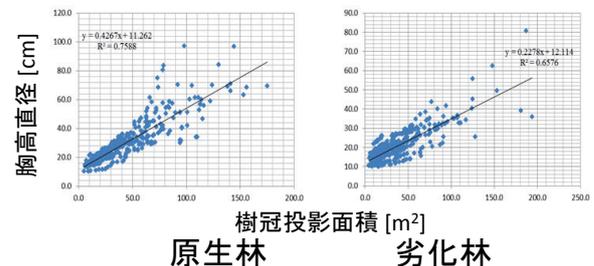
原生林

劣化林

強い劣化林

2 大きい木の樹冠は大きい

空から林木の幹の直径は判りません。しかし、樹冠のサイズから直径やおおよその大きさが推定できることがわかりました。原生林と劣化林ではその関係が異なりますが、林冠からのスペクトル反射の違いにより原生林と劣化林を分類できることもわかりました。

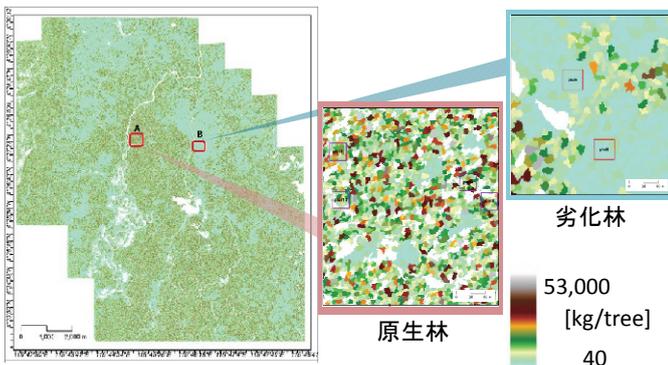


原生林

劣化林

3 空から推定した林木のバイオマスの分布

空から推定した林木のサイズをもとに、バイオマスの分布を広域で精度よく推定することに成功しました。



広域で推定した林木のバイオマスの分布

4 研究成果の共有

私たちの研究成果を紹介するセミナーを2014年5月にサバ州コタキナバル市で開催しました。サバ州政府や林業会社、NGO、そしてサバ大学の学生が出席し、お互いの経験と意見を交わしました。リモートセンシングによる遠隔地の森林の正確な把握は大変注目され、サバ大学は現地林業会社に対してより具体的な指導を行うことになりました。



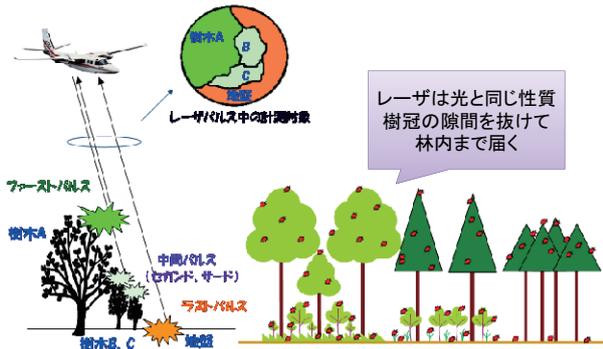
航空レーザ計測で熱帯季節林の姿を捉える

佐野滝雄、藤井紀綱、大野勝正、高本光太郎、田崎弘太郎、沼田洋一(アジア航測)、溝上展也、太田徹志(九州大学)、加治佐剛(鹿児島大学)、鷹尾元(森林総合研究所)

東南アジア等に広がる熱帯季節林は常緑樹や落葉樹が混生したとても多様な森林ですが、大規模な土地開発や違法伐採などにより、減少の一途をたどっています。その実状を精緻に把握するための技術開発として、森林減少が深刻なカンボジアで航空機を利用したレーザ計測による調査を実践しました。

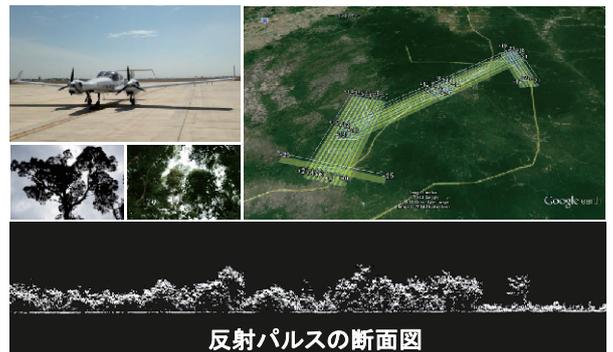
1 航空レーザ計測とは？

航空機から地上に向けてレーザ光を発射して地表面からの反射光を検知し、その往復時間から距離を測定します。レーザ光を1発放つと地表付近の樹木などにも当たり、複数の反射パルスが返ってきます。



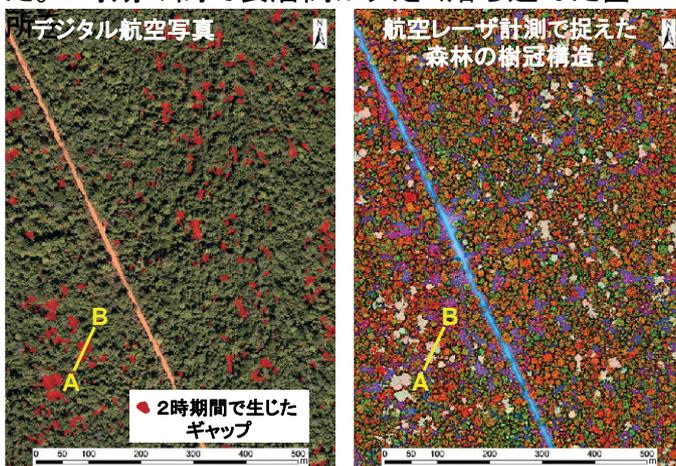
2 航空レーザ計測で森林の形を捉える

航空機から1秒間に20万発以上のレーザ光を発射して、森林域の反射パルスをつめました。下図に示すとおり、森林の表層だけでなく、その下に生育する樹木の階層構造や地盤面を把握することができました。

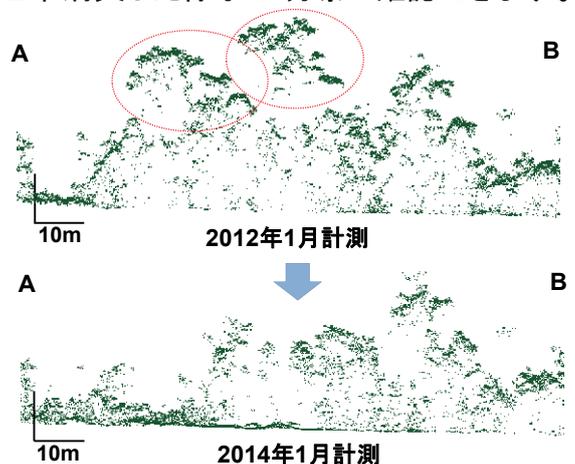


3 2時期の比較で森林の変化を捉える

航空レーザ計測を2時期実施して、森林の表層から反射したパルスの高さを比べてみました。2時期の間で表層高が大きく落ち込んだ箇所



平面的に図示すると、伐採によって抜き取られた箇所が手に取るようにわかります。さらにギャップが生じた箇所の断面を見ると、高木が2本消失した様子が明瞭に確認できます。



熱帯雨林における三次元森林構造の航空機計測技術の開発

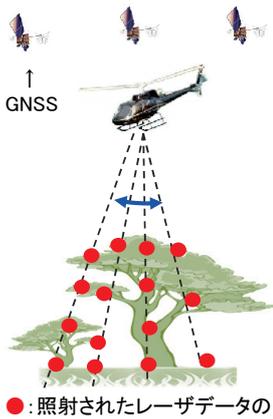
宮作尚宏・平瀬麻衣(株式会社パスコ)、
伊尾木慶子・露木聡・Wilson Wong(東京大学)、
鷹尾元・齋藤英樹・平田泰雅(森林総合研究所)



熱帯雨林における森林炭素蓄積モニタリング用に航空レーザ計測の利用が期待されています。林冠が密生した範囲を含めて高密度な計測を実施し、この結果を基に熱帯雨林に適した計測手法を検討しました。現時点では取得データより低密度化した状態でもバイオマス推定が可能である事が分かりました。

1 航空レーザ計測とは

航空機に搭載した機器より、レーザ光を照射し、地表面や地物(樹木や建物等)の面形状を高密度かつ高精度に計測する測量システムのことです。



【機器構成】

- ・レーザ計測装置
上空よりレーザ光を帯状に照射しながらデータを取得します
- ・GNSS/IMU(*)
レーザを照射した瞬間の機体の位置と姿勢(傾き)は、GNSSとIMUにより算出されます

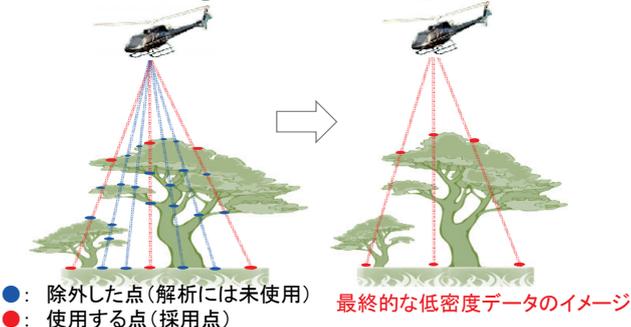
(*)
GNSS : Global Positioning System
全地球測位システム
IMU : Inertial Measurement Unit
慣性計測装置。IMUは機器の中に設置

●: 照射されたレーザデータの点

3 低密度化へのシミュレーションイメージ

【目的】航空レーザ計測は、高密度なデータを取得する事が可能です。今回は低コスト化と今後の広域計測を考慮し、熱帯雨林における航空レーザのデータは、どこまで低密度化することが可能であるかを検証しました。

【検証方法】①データ取得 ②取得データを照射単位で間引き処理 ③中間点を除く処理 ④低密度化データ作成 ⑤バイオマスの推定(東京大学)



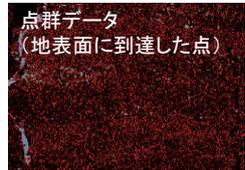
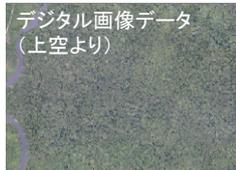
●: 除外した点(解析には未使用)
●: 使用する点(採用点)

最終的な低密度データのイメージ

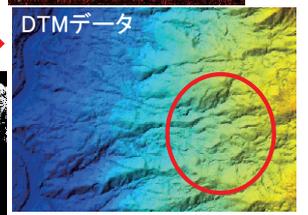
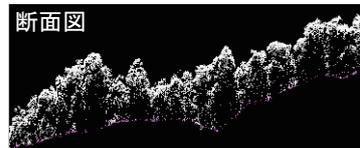
2 計測対象エリアと計測計画

対象範囲	マレーシア SABAH地区
使用機体	Bell 206 B3
レーザ機器	RIEGL LMS-Q560
使用デジタルカメラ	Canon 1D Mark III
対地高度	400m
視野角(Field Of View)	45°
パルスレート	240 kHz
	実際に使用した機体(左)とレーザ機器(右)

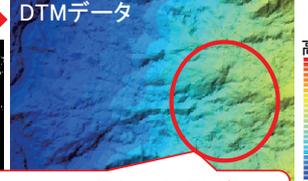
4 取得データと低密度化へのイメージ



【取得したデータをそのまま使用した場合】



【低密度化した場合】



●: DTMを作成した地表面に到達したレーザデータの点

熱帯雨林の中に、急峻な地形が存在することが分かります

5 今後の課題、展開

- ・低密度データ作成方法の確立
- ・バイオマス推定に適した低密度の航空レーザ計測データとしての密度を確定
- ・熱帯雨林における航空レーザ計測仕様の整理

問い合わせ先:(株)パスコ 宮作 尚宏 e-mail:nuakoa2400@pasco.co.jp
(株)パスコ 平瀬 麻衣 e-mail:measia4569@pasco.co.jp

カンボジア中央部における近年の森林減少と炭素蓄積変化

松浦俊也、倉島孝行、宮本麻子、佐野真琴(森林総研)、
 レン・チビン、パク・チェリー、チャン・ソパル(カンボジア森林局)

カンボジア中央部における過去4時期(2002, 2006, 2010, 2014年)の森林分布図を用いて土地被覆変化を解析しました。大規模ゴム園開発や住民によるキャッサバ等の小規模農地開発により、2010年以降に森林減少が加速し、炭素蓄積が大きく低下したことが分かりました。

1

対象地と解析方法

■ コンポントム州東部のチニット川流域
 ■ 2タイプの森林減少が進行中

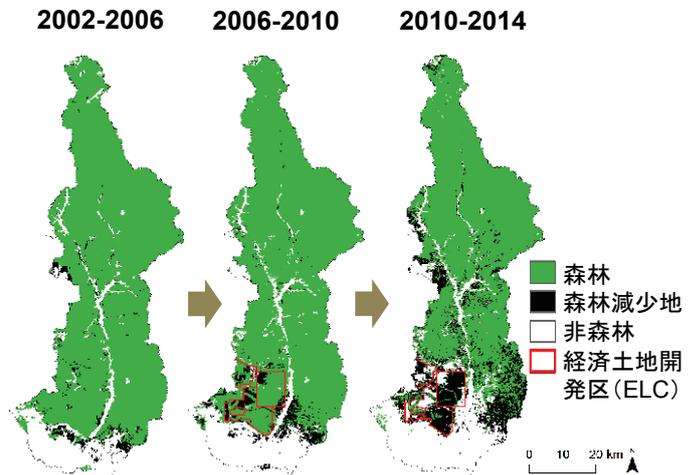
森林分布図2010
 (©カンボジア森林局)

- 常緑林
- 混交林
- 落葉林
- その他の森林
- 竹林
- 非森林(低木林含む)
- 水域

(1) 経済土地開発区(ELC)で大規模ゴム園開発
 (2) 住民による小規模農地開発(商品作物キャッサバが中心)

2

加速する森林減少

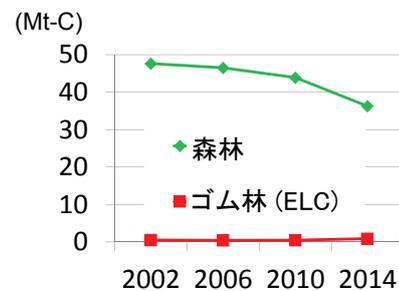
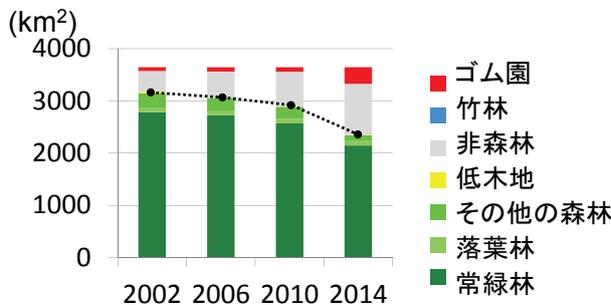


- Landsat衛星画像の判読や自動分類にて作成された4時期の森林分布図から森林減少を把握しました。
- 森林タイプ(常緑林、落葉林、齢級別ゴム林)毎の地上部バイオマスの平均炭素蓄積と面積を掛け合わせました。

- 経済土地開発区内では、大規模ゴム園開発が進みました。
- 一方、区外では住民による小規模農地開発が拡がりました。

3

森林面積の減少による炭素蓄積の低下



- 2010年以降、森林減少は加速しました。

- 森林減少により、炭素蓄積量の低下(炭素排出の増大)が進みました。

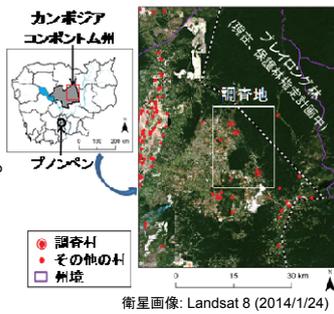
熱帯林開墾最前線村の生業と世帯収入構造の変化: REDD+における住民支援策のために看過されるべきではない現実

倉島孝行、松浦俊也、宮本麻子、佐野真琴(森林総研)、ティス・ボラ、チャン・ソパル(FWRDI)

REDD+事業では住民支援策が実施されますが、その際に考慮されるべき生業実態、特にグローバル化の影響が詳らかにされていません。有益な支援策を促すために、森林開墾村で生業・収入の経時比較研究を行い、農業構造変化が収入増を生む一方で、格差拡大にも繋がっている実態を明らかにしました。

1 調査地の特徴と調査・分析方法

- REDD+事業計画の中
中部カンボジアの3カ村
(435世帯:2012年)。
住民の商品畑作物栽培
のための開墾が進行中。



- 2012年を調査対象年とした
各村全世帯の30%以上への
(146世帯)質問表調査。
- 2003年を調査対象年とした
McKenneyら[2004]との比較。



3 平均世帯収入と最大の収入源

- 9年で収入1.8倍に。両年とも農業が最重要でしたが、
畑作(2012年ほぼキャッサバ)収入が稲作を逆転しました。

対象年	2003 ¹ (N=85)		2012 ^{2,3} (N=146)	
	平均 (USD)	合計比 (%)	平均 (USD)	合計比 (%)
水田稲作	199	37	93	10
畑作	66	12	412	43
家畜飼育	32	6	29	3
樹液採取	116	22	156	16
野生動物採取	20	4	27	3
他林産物採取	91	17	3	0
木材伐採	NA	-	11	1
ビジネス/ 賃労働	9	2	226	24
漁労	4	1	NA	-
合計	538	100	957	100

1. McKenneyら[2004]; 2. Kurashimaら[投稿中]; 3. カンボジアのCPIより物価上昇分を調整

2 調査地内世帯が従事していた生業活動

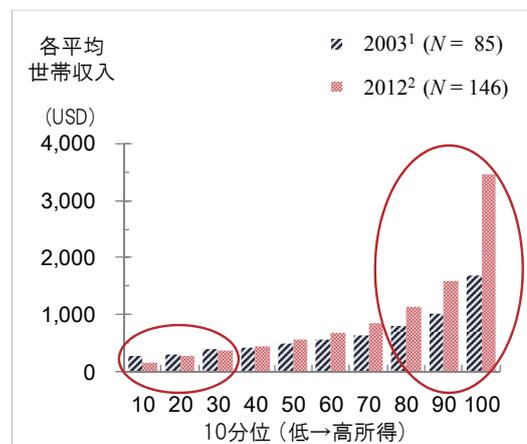
- 賃労働やビジネスを始めた世帯も多くありましたが、
ほぼ全世帯が両年において農業に従事していました。

対象年	活動	2003 ¹	2012 ²
		(N=85) (%)	(N=146) (%)
農業生産	稲作・畑作	94	97
	家畜飼育	59	69
林産物 採取	樹液採取	72	61
	燃材採取	79	NA
	他林産物採取	69	64
漁労/ 賃労働	漁労	39	NA
	賃労働	12	64
ビジネス	雑貨・仲買商	NA	32

1. McKenneyら[2004]; 2. Kurashimaら[投稿中]

4 10階層に分けて見た各平均世帯収入

- 9年間で高所得層の収入は大きく増加しましたが、
逆に低所得層では実質的な減少さえ確認できました。



1. McKenneyら[2004]; 2. Kurashimaら[投稿中]; 各値はカンボジアのCPIより物価上昇分を調整

ゴムノキの水利用とその特徴

小林 菜花子¹, 熊谷 朝臣¹, 宮沢 良行², Mudd RG³, 溝上 展也⁴, Giambelluca TW³
 (1. 名古屋大学地球水循環研究センター, 2. 九州大学東アジア環境研究機構,
 3. ハワイ大学地理学科, 4. 九州大学農学研究院)

ゴムノキは成長が早いうえ、炭素を多く含む樹液を産出するため、大気中の二酸化炭素を大量に固定することが期待されます。しかし、それには大量の水が必要です。調査の結果、気孔を制御することによって、水の損失を防ぎつつも、高い成長速度を維持するゴムノキの生態が明らかになりました。

1 ゴムノキとは

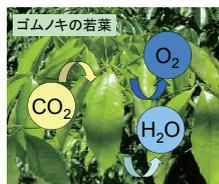


ゴムノキはアマゾン原産の樹木ですが、植林地のほとんどは東南アジアにあります。樹液は天然ゴムの原料となり、主にタイヤ生産に用いられます。日本の天然ゴムの輸入量は中国、米国、インドに次いで世界第4位です。

ゴムノキの成長には、高温・多雨な環境と十分な日射量を必要とします。しかし近年では、低温や乾燥に強いクローンの品種改良が進み、植林の拡大に拍車がかかっています。

2 なぜ水利用とその特徴を調べるの？

植物は太陽エネルギーと水、二酸化炭素から炭水化物を合成し(光合成)、成長や呼吸に利用します。大気中の二酸化炭素は葉表面の気孔という小さな穴を通して取り込まれますが、このとき体内の水が蒸発によって失われてしまいます(蒸散)。



植物にとって、体内の水が急激に失われたり、根周辺の水分がなくなることは致命的です。気孔を閉じ気味にすることで蒸散を抑えられますが、同時に十分な光合成もできなくなってしまいます。

植物には気孔を強く制御して水を節約するものと、制御をせずに成長を急ぐものがあります。ゴムノキがどちらのタイプかを知ることは、光合成量を予測する上で欠かせないのです。

3 水利用量の季節変化と気孔開度

研究対象としたゴム林は、カンボジア中央部に位置します(図1)。ここは明瞭な雨季(5-11月)と乾季(12-4月)のあるのが特徴です。気温や湿度、降水量などの気象要素のほか、樹木が土中の水を吸う速度(樹液流速)を測定し、ここから蒸散量を算定します。

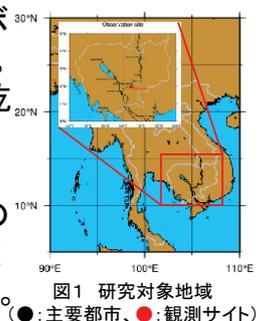


図1 研究対象地域
 (●: 主要都市, ●: 観測サイト)

観測された蒸散量は、雨季に多く、乾季に少ない傾向にありました(図2)。幹の成長量や樹液の産出量も、この傾向と一致します。

ゴムノキの水利用の特長を知るため、気孔開度と大気・土壌の乾燥・湿潤度との関係を調べました(図3)。気孔開度は大気・土壌どちらの乾燥に対しても減少しますが、他の樹木と比べ、大気に対しては平均的、土壌に対しては鈍感な応答がみられました。乾季でも光合成を続けられる反面、蒸散を継続して土壌の乾燥を促進してしまう可能性が示唆されました。

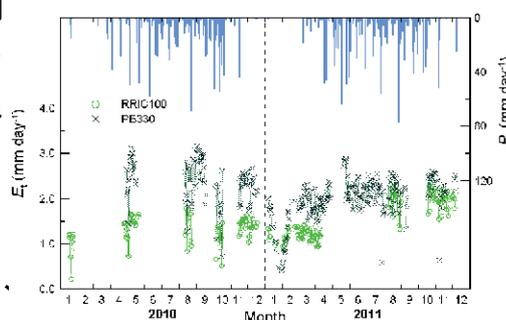


図2 ゴムノキの日積算蒸散量(E_t)の時系列(2010-2011年)。RRIC100とPB330は調査したクローンの名称。バーは降水量(P_t)を示す。

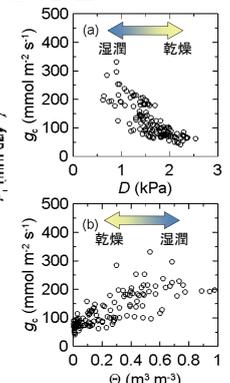


図3 気孔開度(g_s)と大気の乾燥度(D)、土壌の湿潤度(θ)の関係。

熱帯乾燥常緑林における土壌含水率と土壌呼吸量の関係

玉井幸治、大貫靖浩、清水 晃、清水貴範、飯田真一、壁谷直記(森林総研)

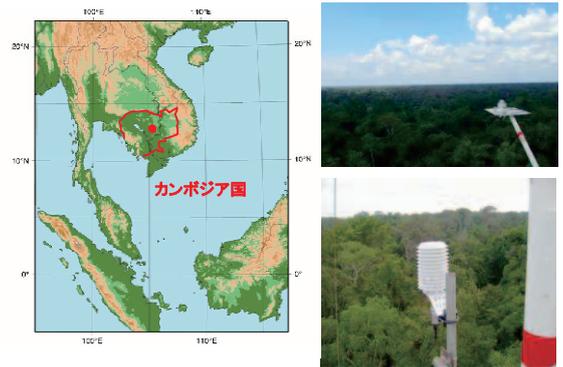
森林は光合成により二酸化炭素(CO₂)を吸収する一方で、呼吸によりCO₂を放出しています。土壌呼吸は土壌からCO₂が放出される現象です。カンボジア国の熱帯乾燥常緑林では、気候変動による降水量の減少によって土壌が乾燥した場合、CO₂の吸収源から放出源に転じる危険性のあることが解りました。

1 森林の二酸化炭素収支と土壌呼吸(表1)

森林タイプ	収支(吸収-放出)		放出		引用
	NEP(純生産量)	GPP(光合成総生産量)	植物体地上部での呼吸量	土壌呼吸量	
カラマツ林(中央シベリア、Tura)	2.9	7.3	2.9	5.1	Osawaら、2009から算出
カラマツ林(北海道、苫小牧)	6~7	57~65	14~23	36~39	及川ら、2013の図から算出
ミズナラ林(岐阜、高山)	11~17	31~53	0~15	23~28	及川ら、2013の図から算出
アカマツ林(山梨、富士吉田)	15~28	46~60	19~29	13~15	及川ら、2013の図から算出
熱帯多雨林(マレーシア、Pasoh)	2.9~5.5	117.3~120.2	56.1~58.3	56.1~58.3	Kosugiら、2008から算出

2 観測を行った熱帯乾燥常緑林

場所:カンボジア国コンポントム州
(北緯12度44分、東経105度11分)



観測場所の位置(●)と、森林の様子

熱帯林では収支(NEP)の値に比べて土壌呼吸量の値が大きいいため、数%のわずかな土壌呼吸量の変化で収支が正(森林はCO₂の吸収源)になったり、負(森林はCO₂の放出源)になったり、
します。

注:1)それぞれの項目の測定方法の違い、2)表に示していない細かい収支項目、3)各項目ごとに複数年の最小・最大値を記述、などにより表中の(収支)と(吸収-放出)の値が等しくなっていません。

3 土壌呼吸量の特性

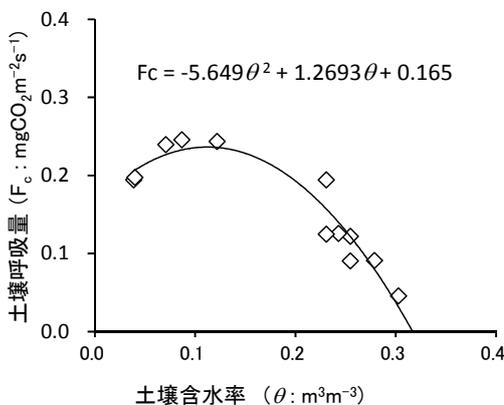


図1 カンボジア国コンポントム州の乾燥常緑林における土壌含水率と土壌呼吸量の関係

特性

- ・土壌含水率による土壌呼吸への影響は大きいものです。
- ・土壌含水率が約0.11m³m⁻³の時に、土壌呼吸量は最大です。

気候変動の影響について(表2)

- ・気候変動により、雨季の降水量の減少が指摘されています。
- ・降水量の減少によって雨季の土壌が乾燥した場合、土壌呼吸量は1.2~3倍も増加する試算値が得られました。
- ・その場合、乾燥常緑林はCO₂の吸収源から放出源に変わる危険性があります。

表2 雨季に土壌が乾燥した場合の土壌呼吸量の試算値

	現状	降水量減少時
土壌含水率 (m ³ m ⁻³)	0.20~0.30	0.15~0.25
土壌呼吸量 (mgCO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	0.04~0.19	0.13~0.23

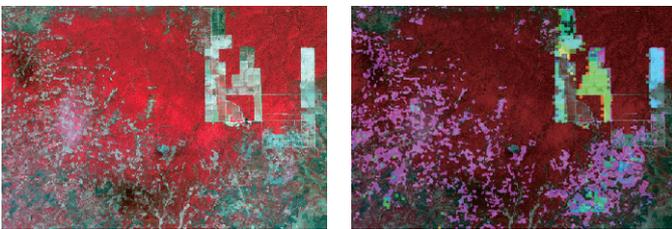
カンボジア国の森林開発の動向

中園悦子、竹内渉(東大生産研)、沢田治雄(アジア工科大学)

カンボジア国の森林は国土の50～60%を占めていますが、この森林は毎年広範囲に渡って伐採されています。MODIS、PALSARなど複数の衛星データを使うことで、2002年から2010年にかけての伐採面積、また伐採跡地のうち植林された地域の割合を推定することができました。

1 一年ごとの伐採箇所の特定

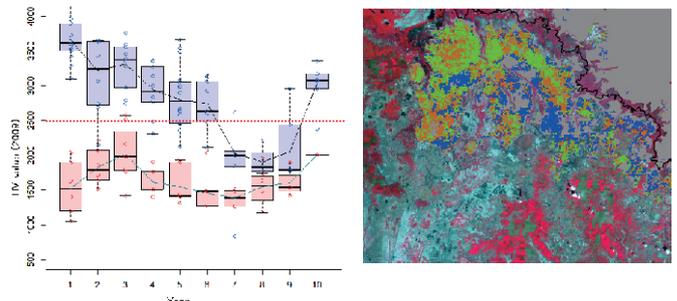
2002年に作成されたカンボジア国全体の森林分布図から、当時の常緑広葉樹林の範囲を調べました。この図と2002～2010年のMODISデータから作成された土地被覆図を比較し、一年ごとの伐採地を抽出しました。また、より小さな伐採地の抽出のために、2007～2010年のPALSARデータを使用しました。



左: 広域伐採地(画像右側)とパッチ状の伐採地(画像左側)
右: MODISで判読できる伐採地(青～黄緑)と、PALSARで抽出された伐採地(ピンク)

2 森林伐採後の土地利用

伐採跡地の土地利用を農地と植林地に分けて、その割合を求めました。2009、2010年のPALSARデータから伐採後の植林地と農地のサンプルデータを取って比較したところ、伐採から数年経つと、農地と植林地を分離できることがわかりました。

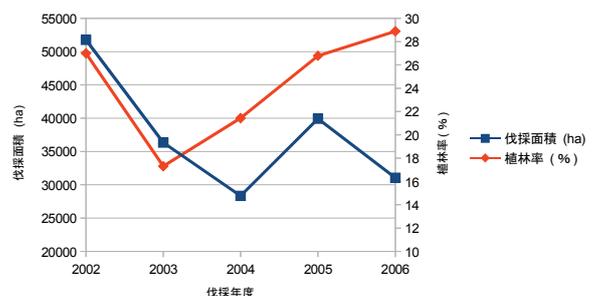


左グラフ(青: 植林地、赤: 農地)から閾値を読み取り(赤線)、右画像のように農地(茶色)と植林地(緑)、伐採跡地(青)を分離した。

3 森林面積の変化と植林地の割合

衛星データから、カンボジア国の常緑広葉樹林は、2002年から2010年の間に4225km²伐採されたと推定されました。これはカンボジア国面積の2.33%にあたります

また、2002年から2006年の間に伐採された箇所について、植林された割合を推定したところ、全体で25%程度であることがわかりました。これらの値を年度ごと・州ごとに算出されており、伐採・植林の時間的・場所的な傾向について知ることが可能です。



伐採面積(青)と植林率(赤)の年度ごとの変化。

研究成果パンフレット

* 健全な海岸林をめざして (ISBN 978-4-905304-36-4)

* 温暖化により被害の拡大が危惧される森林病虫害 (ISBN 978-4-905304-26-5)

* カツラマルカイガラムシの被害予測と薬剤防除法 (ISBN 978-4-905304-25-8)
を再掲載しています。

研究成果紹介パンフレット

温暖化影響対策としての海岸防災林の機能強化技術の開発



健全な海岸林をめざして

Prologue

クロマツ海岸林の多くは、本数調整の遅れによって過密化が進み、樹高のわりには幹が細く枝の枯れ上がった不健全な状態となっています。気候変動による台風の巨大化、高潮の危険性の増大などが予想されるなか、適切な本数調整によって健全な林帯に導くことが必要です。私たちは、クロマツ海岸林の本数調整を積極的に進めるための研究をしています。

C O N T E N T S



クロマツ枝葉が風から受ける影響

～風環境の変化から判定する樹木の本数調整～



防災機能の強化につながる列状伐採方法

～風洞実験で強風の影響を評価する～



列状伐採すると樹木が受ける海風は？

～現地測定による列状伐採が残存木の風当たり不及ぼす影響～



独立行政法人 **森林総合研究所**

Forestry and Forest Products Research Institute

第3期中期計画成果16（森林機能発揮-10）

クロマツ枝葉が風から受ける影響

クロマツ海岸林の多くは、植栽後の本数調整の遅れによって過密化し、幹は細く、枝が枯れ上がった不健全な状態になっています。本数調整が遅れる理由の一つに、伐採後、残存木の風環境の悪化によって、林帯が衰退するのではないかという不安が挙げられます。私たちは、クロマツ枝葉が風から受ける力を風洞実験により測定しました。

目的

過密化が進んだことで樹木の生育が悪くなる。でも、風環境が悪化することを考えると、伐採はためられる…。この不安を解消するために必要なのは、本数調整に伴って残存木の風環境が変化した場合に、樹木が風から受ける力が、どのように変化するかを予測することでしょう。そこで、予測の信頼度を高めていくために日本の海岸林を代表する樹種であるクロマツを対象として、枝葉が風から受ける力は風速の変化からどのように影響を受けるのかを調べました。

方法

風洞（幅1.2m、高さ1.6m、長さ10m）の中に、葉の着いたクロマツの枝（枝長0.5m）を1本設置して、異なる風速の風を吹かせた時に、クロマツの枝葉が受ける力を測定しました。

力の測定には分力検出器を用いることとし、分力検出器を風洞の床に設置し、分力検出器の上にクロマツを固定しました。

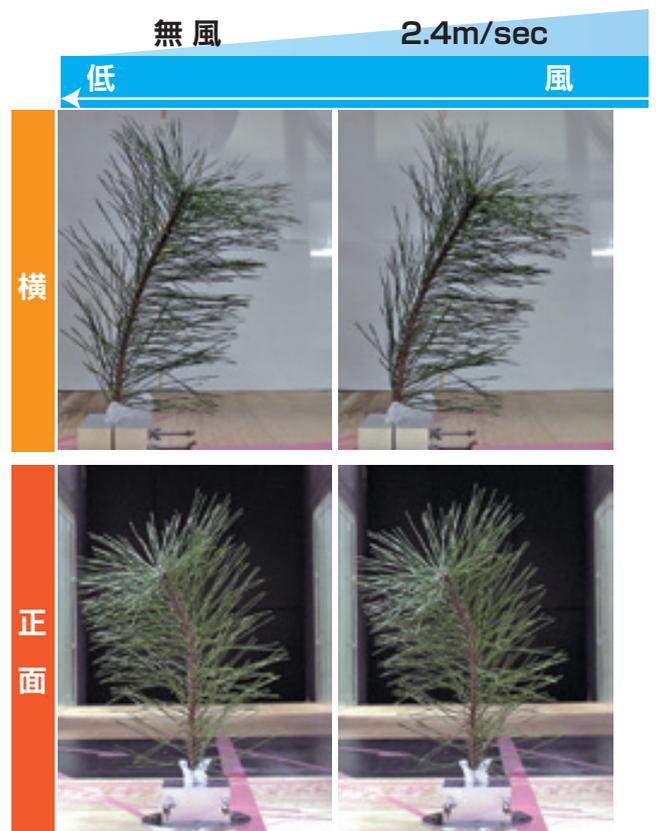


図1 風を受けた時のクロマツの枝葉の変化

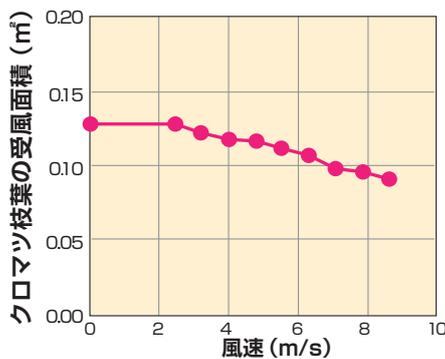


図2 枝葉の受風面積と風速の関係

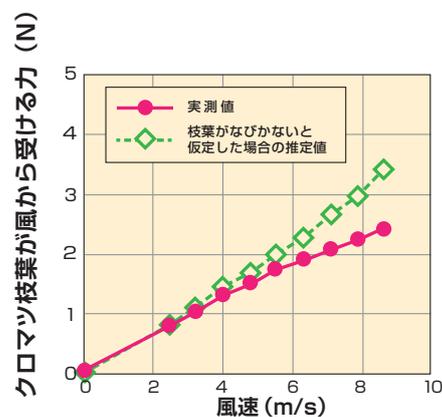


図3 クロマツ枝葉が風から受ける力と風速の関係

～風環境の変化から判定する樹木の本数調整～

野口 宏典（気象害・防災林研究室）



風洞装置



結果

風を受けることによって、クロマツ枝葉が変形する様子を観察しました（図1）。風を受けると枝は曲がり、葉はなびきます。風の方向に投影したクロマツ枝葉の面積（受風面積）は、2 m/s程度の弱い風に対しては無風時と変わりませんが、そこから風速を上昇させると、次第に減少していきました（図2）。

風速の上昇に伴い、クロマツ枝葉が風から受ける力は上昇しましたが、風速の上昇に対する上昇率は風速が高くなると小さくなる傾向が見られました（図3）。一方で、枝葉が風から受ける受風面積あたりの力は風速の上昇に伴い上昇し、風速の上昇に対する上昇率も風速が高くなると大きくなる傾向が見られました（図4）。枝葉が風から受ける受風面積あたりの力から、枝葉がなびかないと仮定した場合のクロマツ枝葉が受ける力を推定することができ、この推定値と枝葉がなびいた場合の実測値を比較した結果、枝葉がなびくことにより、風速4 m/sで10%、風速6 m/sで15%、風速8 m/sで25%程度減少し、風速が高くなると減少の割合が大きくなることわかりました（図3）。

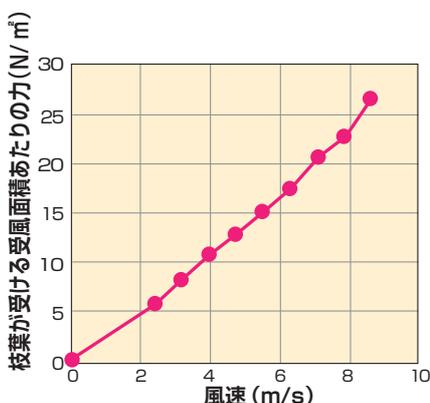


図4 クロマツ枝葉が風から受ける受風面積あたりの力と風速の関係

現場での活用

この実験によって、風速の変化によりクロマツ枝葉の受風面積はどう変形するのか、また、クロマツ枝葉が風から受ける力はどのように変化するのが明らかになりました。この結果をいかして数値シミュレーションの信頼度を高め、海岸のクロマツ林の本数調整等による、その風環境の変化や、環境変化後の風を受ける力の変化を推定することができます。その推定結果は、本数調整方法の改善などに役立つと期待できます。

防災機能の強化につながる列状伐採方法

人工林を健全に保つには、林の一部を伐採して込み具合を調整する必要があります。しかし、伐採したところへ強風が入り込み、樹木が倒れるなどの風害を受ける可能性があります。風害を防止できる伐採方法をみいだして健全な林を整備し、防災機能を発揮させる必要があります。

目的

近年は伐採や搬出コストを下げるため、列状に樹木を切る列状伐採が広まりつつあります。では、列状伐採した時の風害リスクは、どのようなものでしょうか。この研究は、列状伐採の伐採方法と被害の受けやすさとの関係を樹木模型で明らかにすることを目的としました（図1）。

残存木が受ける風力について、①残存列と伐採列の取り方がどのように影響するか。②風向きに対する伐採列の方向がどのように影響するか、この2点について調べました（図2）。

方法

実際の樹木の60分の1の大きさに樹木模型を作成し（図1）、それらを風洞に並べて実験を行いました。また、風の吹き方を実際の森林に合わせ、現実の森林で樹冠上に20m/sの強風が吹いた状態を再現しました。

列状伐採には、伐採列や残存列の取り方に様々なタイプがあります。この実験では1伐2残、1伐3残、1伐4残、2伐3残、2伐4残、2伐5残の6通りと、無伐採の測定を行いました。例えば1伐2残は、2列残して1列を伐採する方法を繰り返します。また、伐採列と風向きとの関係を検討するため、風向きと直交する方向（風向きに対して90°）に伐採列を取った場合と、風向きに対して45°に伐採列を設定した場合とを実験しました。

被害の受けやすさの指標に、伐採後の残存木に作用する回転モーメントを用いました。回転モーメントとは、根を起点にして、樹木を回転させようとする作用の強さを表します。樹木模型に働く回転モーメントを計測するために、一部の模型に「ひずみゲージ」を取り付けました（図1）。風が樹木模型に当たると風下側にたわみます。その時の幹のたわみ具合をひずみゲージで測定します。ひずみの大き



図1 樹木模型
（右：ひずみ測定あり、
左：ひずみ測定なし）



図2 目的の概要

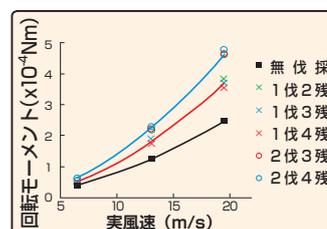


図3 残存列・伐採列の取り方ごとの回転モーメントの推移

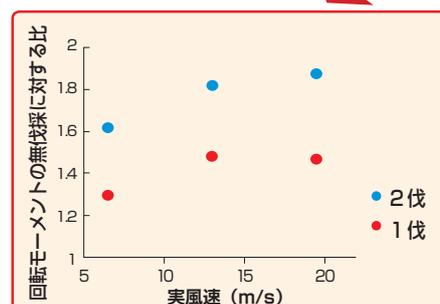


図4 伐採列数ごとの無伐採に対する回転モーメントの比

～風洞実験で強風の影響を評価する～

鈴木 寛 (気象害・防災林研究室)



列状伐採後の様子

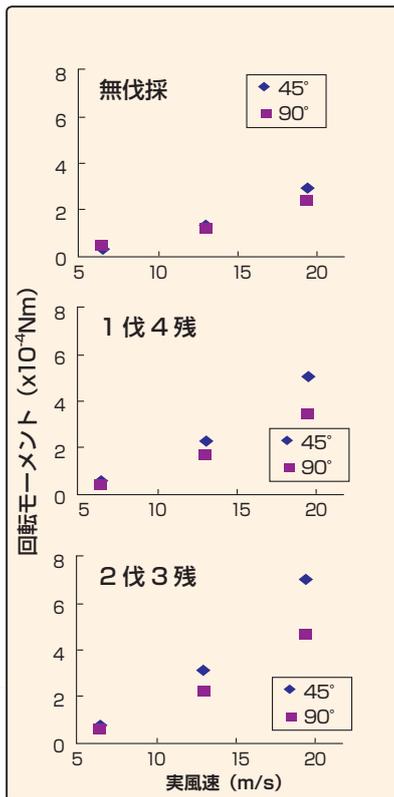


図5 伐採列 45°と90°のひずみ量の推移

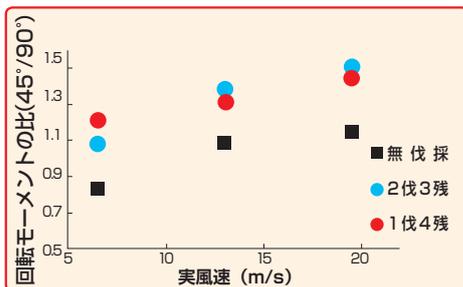


図6 45°のひずみ量の90°のひずみ量に対する比

表1 伐採列数・伐採列方向ごとの回転モーメントの推定 (無伐採、90°=1.0、20m/s)

	無伐採	1伐2残	1伐3残	1伐4残	2伐3残	2伐4残	2伐5残
90°	1.0	1.4	1.4	1.4	1.8	1.8	1.8
45°	1.1	2.0	2.0	2.0	2.7	2.7	2.7

さと回転モーメントとの間には比例関係があるので、強風環境においた時のひずみ量から回転モーメントがもとめられます。

結果

無伐採と比べ、いずれの伐採方法も回転モーメントが増加しており、伐採列に強風が入り込んで残存木に風力を及ぼしていることがわかります(図3)。しかし、伐採列が1列か2列かによって違いがあり、1伐よりも2伐の回転モーメントが大きいことがわかりました(図4)。また、残存列数は影響していないこともわかりました。

伐採列の角度の影響を2伐3残、1伐4残、無伐採と比較しましたが、いずれも45°の方が、90°の時よりも回転モーメントが大きくなりました(図5)。回転モーメントの大きさは、2伐3残>1伐4残>無伐採の順でした。

1伐、2伐における回転モーメントの無伐採に対する比(図4)と、45°の回転モーメントの90°の回転モーメントに対する比(図6)とから、伐採列数および伐採列の方向ごとの回転モーメントを推定しました。2伐で、伐採列が風向きに対して45°の時の回転モーメントがもっとも大きく、無伐採と比べて2.7倍の回転モーメントが作用すると考えられました(表1)。以上のように、現実の海岸林ごとの風の強さや樹木の配置を共に解析することによって風害リスクを低減する伐採方法を選択できます。

現場での活用

強風の影響を「受けやすい・受けにくい」パターンを知ることで、安全に列状伐採が行えます。適切な間伐を施して樹木を健全に保ち、なおかつ風害に負けない林にすることが防災機能の強化につながります。

列状伐採すると樹木が受ける海風は？

密植している海岸林の本数調整では、作業空間を確保する必要があります。そこで、最初は1列を伐採して3列を残す、「1伐3残」の列状伐採を勧めてきました。伐採をすると、残された樹木への風当たりが強くなることが予想されます。しかしながら、この実態はよくわかっていませんでした。

目的

本数調整が遅れる一因には、残された樹木（残存木）が直接海風を受けるようになることで林帯が衰退してしまうのではないかと不安があります。風洞実験の結果（4～5ページ）からは、広く空けないことが重要と考えられました。そこで、列状伐採後の残存木に当たっている海風の状況を強風時に現地で実際に測定して明らかにすることにしました。

方法

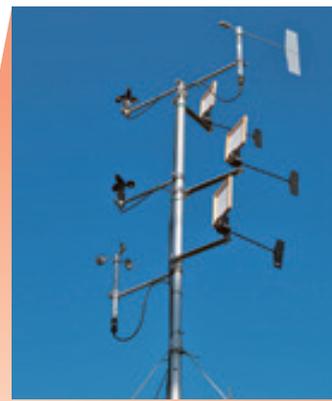
残存木に当たっている海風の状況を明らかにするため、海岸線に平行に林内に設けた1.2mの列状伐採帯と5m幅の作業道において、風速と空中塩分量、ならびに着葉塩分量を測定しました。塩分量を測定したのは、塩分によって樹木の生育が損なわれることがあるからです。

風速と空中塩分は、林冠高（葉のまとまりの上端の高さ）付近を中心に測定しました。風速の測定には三杯式風速計を用いました。空中塩分量の測定には、ガーゼを張った空中塩分捕捉器を強風時に60～90分間、海風に正対させ、そこに付着した塩素イオン量を求めました（図1）。着葉塩分量を求めるための葉は、クロマツの最上段の海側の枝から採取しました。

結果

風速

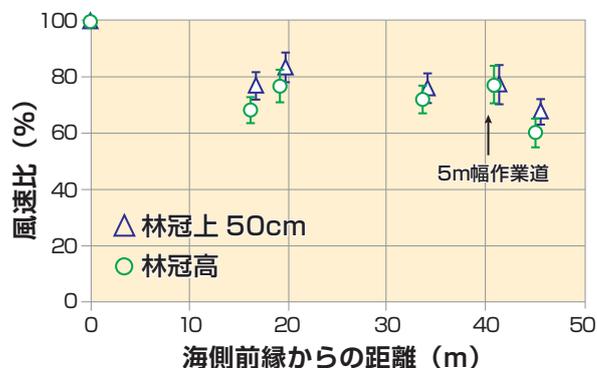
伐採帯における強風時の林冠高付近の風速比は、内陸ほど低下する中で、5m幅の作業道では増加しましたが、それでも海側の前縁に近い測定点の値よりも低いものでした（図2）。風速の点では、1列伐採しても残存木への風当りは問題ないようです。



三杯式風速計(左)と空中塩分捕捉器(右)



図1 風速と空中塩分量の現地測定状況



風速比：基準点（地上6m）に対する林冠高付近の風速の割合
基準点の風速 10.0～12.1m/s（5分間平均）
最大瞬間風速 15.6～20.5m/s

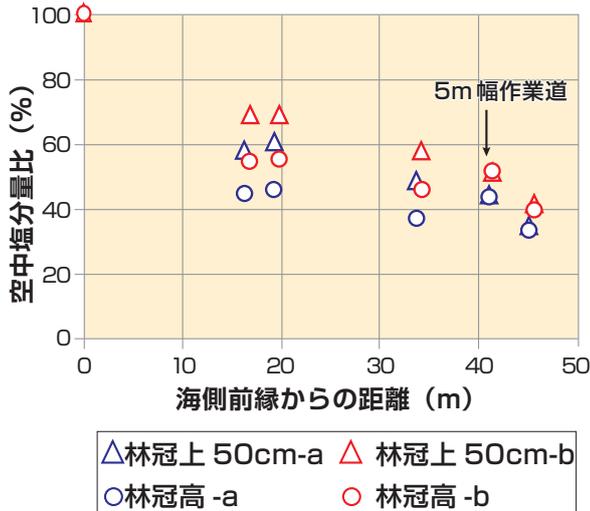
図2 風速

～現地測定による列状伐採が 残存木の風当たりりに及ぼす影響～

坂本 知己 (気象害・防災林研究室)



5m幅の作業道



空中塩分量比: 基準点 (地上 6m) に対する林冠高付近の空中塩分量の割合
 基準点の風速
 a 6.5 ~ 7.9m/s (5 分間平均)、最大瞬間風速 14.6m/s
 b 5.5 ~ 7.1m/s (5 分間平均)、最大瞬間風速 12.5m/s

図 3 空中塩分量

空中塩分量

強風時の空中塩分についても、内陸ほど低下するという風速と同様の傾向が見られましたが、林冠上0.5mでは5m幅の作業道での増加傾向は見られませんでした(図3)。空中塩分量の点でも、1列伐採しても残存木への風当たりは問題ないようです。

着葉塩分量

着葉塩分量は、伐採していない箇所と比べて伐採帯林縁木の方が多く(2011年4月)、また、伐採帯の海側の林縁木よりも伐採されて海側が空いた陸側林縁木の方が多く(2013年3月)、列状伐採の影響が見られました。このことは、すぐ海側にある樹木の効果が大きいことを示しています。

なお、5m幅の伐採帯の陸側では、前縁に近い測定点より高い値もありましたが、1.2mの伐採幅であれば、海側の前縁に近い測定点の海側林縁木の値と同等でした(図4)。内陸側で列状伐採をしても、必ずしも風当たりのより強い海側と比べて着葉塩分量が多くなったわけではありません。

着葉塩分量に列状伐採の影響が確認されましたが、1伐3残を採用した場合、3列残ったうちの、海側の1列に守られる、陸側の2列の残存木には問題ないようです。

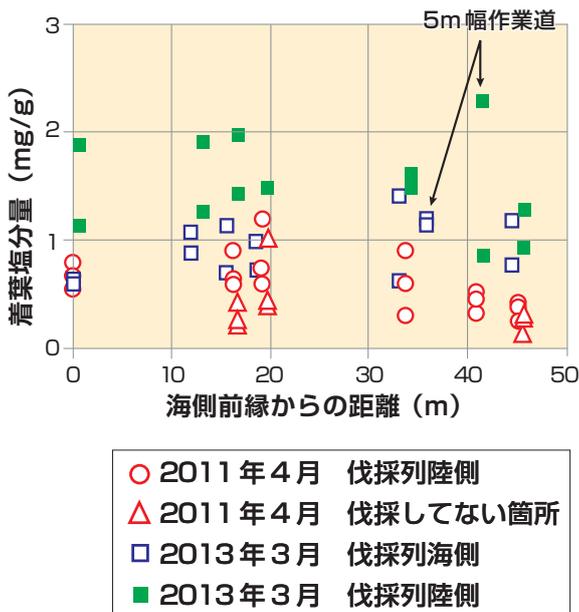


図 4 着葉塩分量

現場での活用

1伐3残の列状伐採による本数調整は、3列の残存列のうち少なくとも陸側の2列の残存木の生存に影響しないものと考えられます。最初の本数調整を安心して進めてよいと考えられます。なお、本数調整のための列状伐採に比較して広く空けることになる作業道は、植栽時にあらかじめ設置しておくことが望ましいでしょう。

Epilogue



過密な状態：枝が枯れ上がり樹高のわりに幹が細い

クロマツ海岸林で本数調整が遅れている一因は、伐採によって残された樹木が受ける海風が強くなり林帯が衰退することへの不安でした。今回の研究から、1列伐採して複数列を残す方法であれば、少なくとも海側の列に守られる陸側の残りの列に伐採の悪影響はないと考えられました。この結果は、厳しくなることが予想される海風環境の変化に備えて、適切に本数調整が進められて健全な海岸林が防災機能を発揮することにつながります。今後も引き続き適切な本数調整手法の開発を進めていきます。

温暖化影響対策としての海岸防災林の機能強化技術の開発

独立行政法人 森林総合研究所
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地

編集・発行 気象環境研究領域
発行日 2014(平成26)年2月

編集刊行係
TEL 029-829-8135
e-mail:kanko@ffpri.affrc.go.jp

※本誌掲載内容の無断転載を禁じます。

お問い合わせ先

リサイクル適性 
この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。

温暖化により被害の拡大が危惧される 森林病虫害



独立行政法人 森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

第3期中期計画成果 10(森林機能発揮-5)

はじめに

温暖化とは地球表面の温度が長期的に上昇することです。地球の気温は今後100年間で1.8~4.0℃上昇すると予測されています。そのためこれからの森づくりを考える時、温暖化は重要な問題です。

地球温暖化が農業病害虫に与える影響はよく調べられていますが、森林病害虫については、温暖化の影響はほとんど調べられていません。温暖化により被害の拡大が危惧される病害虫を抽出して、温暖化による被害拡大を予測し、被害の拡大が予測されるものについて対応策を検討する必要があります。

ここでは林業害虫であるトドマツオオアブラムシ、ヤツバキクイムシ、スギカミキリ、キオビエダシャクと、栽培きのこの害虫であるムラサキアツバ、林業病害を引き起こすマツノザイセンチュウ近縁種群、南根腐病菌を対象に温暖化の影響を調べた研究を紹介します。

執筆者

尾崎研一 森林総合研究所北海道支所 森林生物グループ長

北島 博 森林総合研究所森林昆虫研究領域 チーム長

松本和馬 森林総合研究所東北支所 産学官連携推進調整監

神崎菜摘 森林総合研究所森林微生物研究領域 森林病理研究室

太田祐子 森林総合研究所森林微生物研究領域 チーム長



トドマツオオアブラムシ

トドマツオオアブラムシはトドマツ幼齡人工林の主要な害虫です。本種は4～8月の平均気温が高い場所で世代数が増加すると、枯損などの被害が発生しやすくなることが知られています。そこで温暖化の影響を年間の世代数の変化から予測しました。

まず、本種の発育と温度の関係から世代数を推定する方法を考案しました。この方法を用いて北海道内各地の世代数を推定したところ、年間の世代数が5世代以上の場所で被害が起きることが分かりました。そこで、北海道内の気温分布から被害の危険地帯を地図化したところ、危険地帯は現状では北海道全体の18%ですが、気温が1℃上昇すると46%、2℃上昇すると75%の地域に拡大し、3℃の上昇ではほとんど全域が危険地帯になりました。（図1）。

温暖化への対応策として、温暖化後の防除適期を3～6月の気温から推定できるようにしました（詳しくは、尾崎研一（2012）森林防疫、61巻、2号、23-28ページをご覧ください）。



トドマツオオアブラムシ

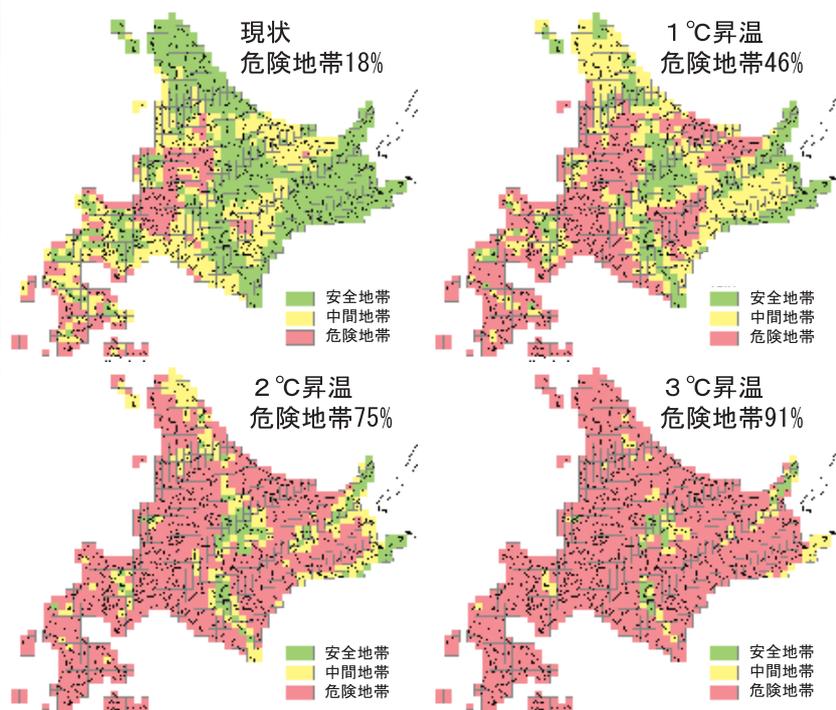


図1 気温の上昇に伴う被害の危険地帯の拡大予測

ヤツバキクイムシ

ヤツバキクイムシはエゾマツ、アカエゾマツなどのトウヒ類の穿孔性害虫で、風倒や伐採の後に大発生し生立木を枯損させます。本種は通常、1年2世代ですが、世代数は気温によって変わり、世代数が多いほど大発生しやすいと考えられます。そこで、温暖化によって世代数がどのように変化するのかを予測しました。

本種の全発育期間を通した発育ゼロ点と有効積算温量を明らかにしました。これらを用いて世代数を推定する方法を考案しました。この方法と気候シナリオデータを用いて北海道内の世代数を計算しました（図1）。その結果、現状は85%の地域が年2世代で、それ以外の地域は年1世代でした。しかし、2000年代半ばには年3世代の地域が出現し、それが2000年代の終わりには40%に拡大すると予測されました。

年3世代の地域では被害の増加が予想されるため、切り捨て間伐は避け、伐倒木や風倒木は早期に林外に搬出することが被害回避に有効です。



ヤツバキクイムシ



エゾマツの枯損被害

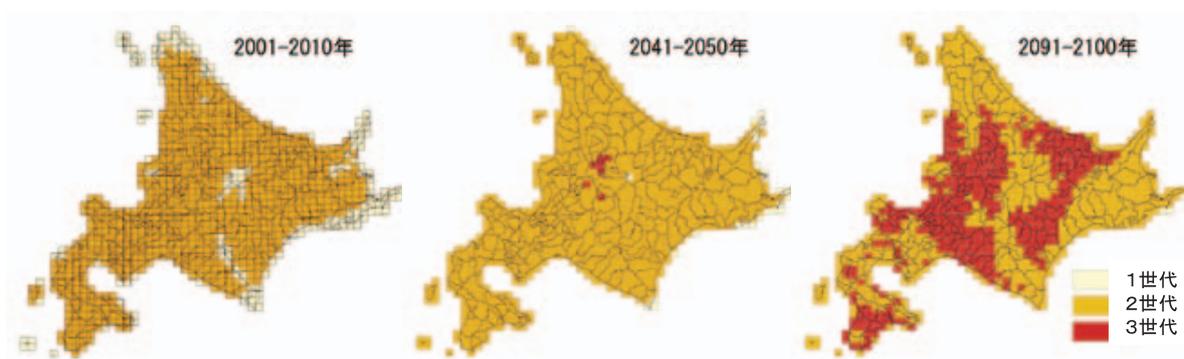


図1 気候シナリオデータ（MIROC-H、A1Bシナリオ）を用いたヤツバキクイムシ世代数の変化予測

スギカミキリ

スギカミキリは、幼虫がスギやヒノキの生立木を食害する害虫です。多くの個体が1世代を1年で完了しますが、2年かかるものもあります。そこで、温暖化によって2年1世代の割合が減り、1年1世代が増える可能性を予測しました。

本種幼虫を長日（明るい時間が長い）条件下で飼育すると、25℃では全ての幼虫が蛹になりますが、低温だと蛹にならない個体が増えました。すなわち、温度が低いと2年1世代になると考えられました。これを用いて、日本各地における1年1世代と2年1世代の割合を予測しました。その結果、1年1世代の割合が過大評価されている可能性はありますが、北東北で現状2年1世代が存在する地域でも、2000年代後半にはすべて1年1世代になると考えられました（図1）。

現在2年1世代である地域でも、今後抵抗性品種を導入するなどの対策が必要です。



スギカミキリ成虫



はちかみと呼ばれる被害跡

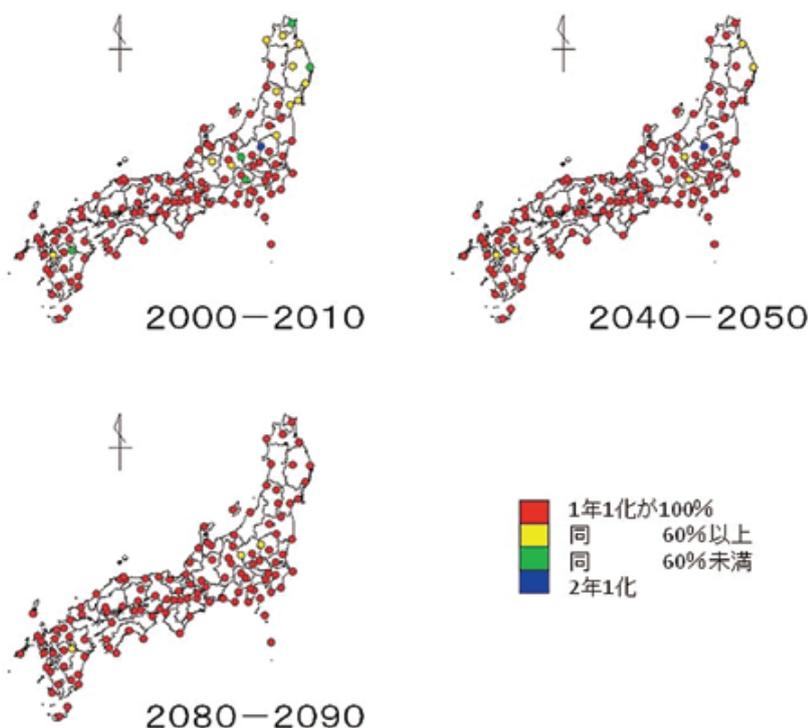


図1 気候シナリオデータ（MIROC-H、A1Bシナリオ）を用いたスギカミキリ1世代に必要な年数の予測

キオビエダシャク

キオビエダシャクは、幼虫がイヌマキやナギの葉を激しく食害する害虫です。鹿児島県以南で時々大発生していましたが、これは国外からの一時的な飛来によるものでした。ところが、1979年以降は沖縄県で毎年発生するようになり、2001年から九州南部にも定着しています。そのため、今後温暖化によって分布域が北に拡大する可能性があります。

本種は九州では主に落葉下の蛹で冬を越します。そこで沖縄県から千葉県までの8カ所で土を入れた容器内に蛹を置き、落葉をかぶせて11月下旬から3月上旬まで野外に放置し、生存率を調べました。その結果、越冬可能な北限は1月の平均最低気温0°Cで近似できるとわかりました(図1)。この結果をもとに気候シナリオデータを用いて越冬可能域を予測しました(図2)。ただし、宮崎県以北での実験では越冬後に羽化する成虫の翅が正常にのびないことが多く、越冬後に正常な成虫が多数発生して個体群が維持できる範囲はもう少し南にあると考えられます。

分布の拡大が予測される地域では本種の発生に注意し、被害が生じた場合には幼虫の捕殺または薬剤散布が有効です。

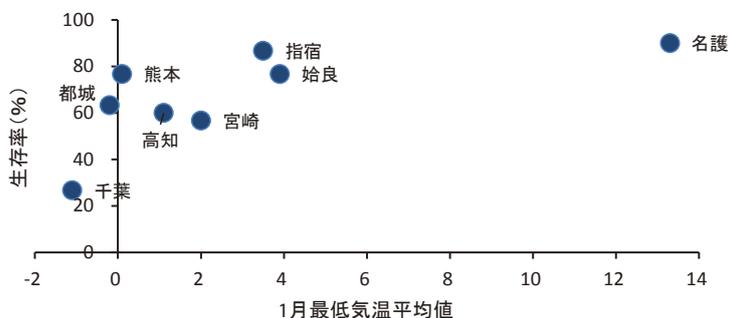


図1 2013年1月の日最低気温の平均値と越冬生存率の関係

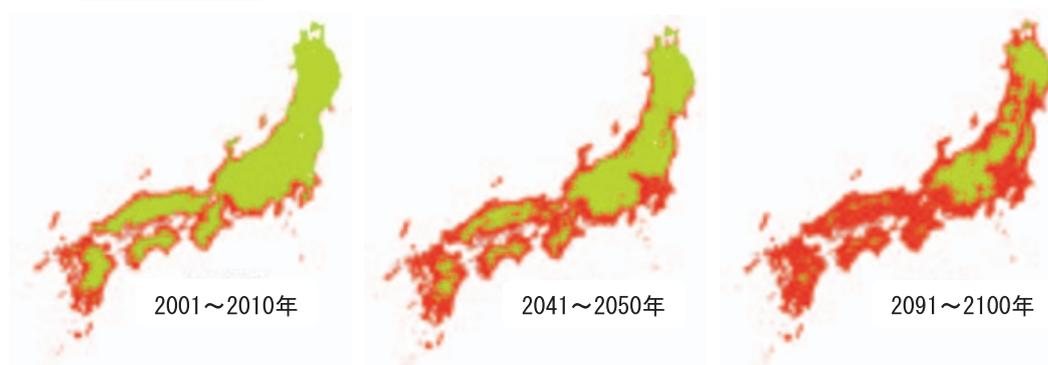


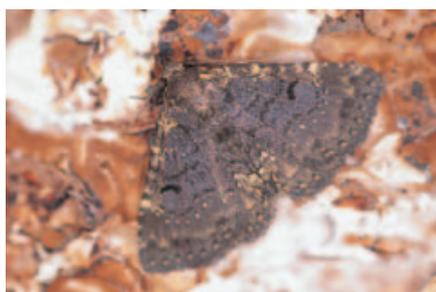
図2 気候シナリオデータ (MIROC-H、A1Bシナリオ) を用いたキオビエダシャクの越冬可能域の拡大予測

ムラサキアツバ

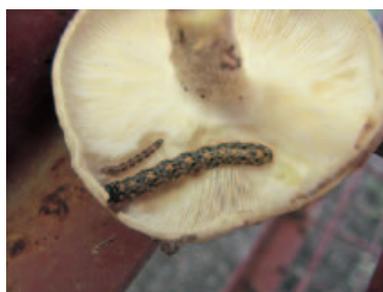
ムラサキアツバは、幼虫がシイタケの子実体や菌床を食害する害虫です。野外で発生した成虫が栽培施設に侵入して、増殖すると被害が発生します。発生回数が増えると侵入や被害の危険性が高まるため、温暖化による成虫の発生回数の増加を予測しました。

温度と発育期間との関係や、越冬のために発育を停止する時期を明らかにしました。これらの知見を用い、日本各地における成虫発生回数を予測しました。その結果、これまで成虫の発生は年2回とされていましたが、現状でも北関東以南で3～4回発生していることがわかりました。さらに、2000年代後半には各地の発生回数は増加し、山形県、宮城県以南では1年に4回、北海道西部でも1年に3回成虫が発生すると予測されました（図1）。

成虫の発生回数が増加する地域では、発生時期を予測して、栽培施設への成虫の侵入を防ぐことが重要になります。



ムラサキアツバ成虫



シイタケを食害する幼虫

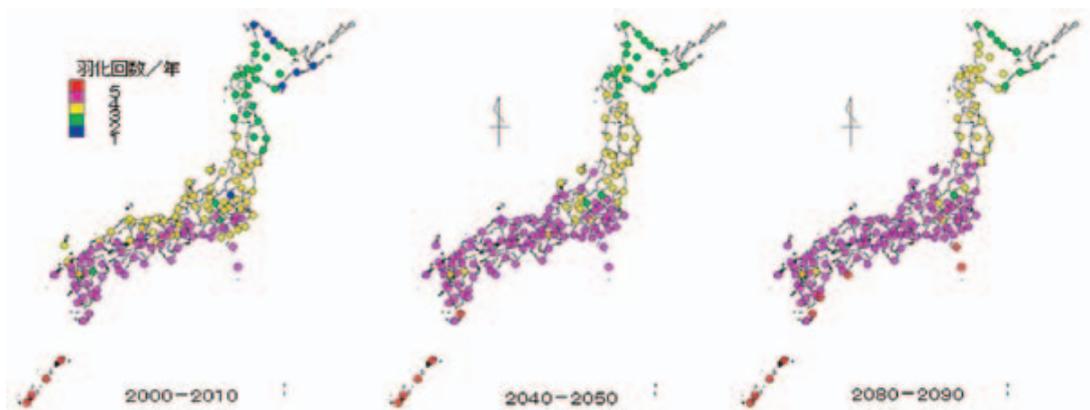


図1 気候シナリオデータ（MIROC-H、A1Bシナリオ）を用いたムラサキアツバ羽化回数の予測

マツノザイセンチュウ近縁種群

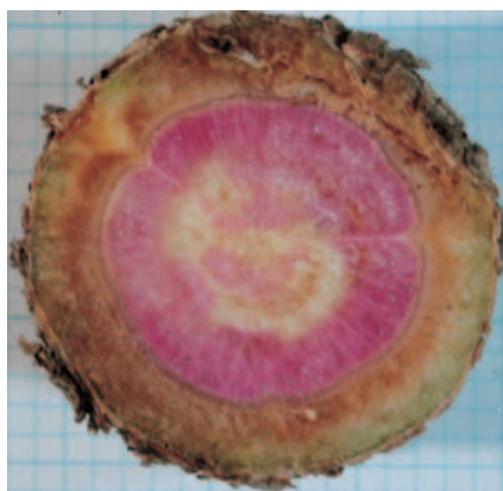
マツノザイセンチュウによって引き起こされるマツ材線虫病は日本の森林において最も重要な病害のひとつです。そして、この病気は高温や乾燥といった環境要因によって被害がより拡大することが知られています。また、主な病原体であるマツノザイセンチュウ以外に、その近縁種であるニセマツノザイセンチュウにも弱い病原性があることが知られており、これら以外の近縁種についてもその潜在的危険性を評価する必要性がありました。そこで日本国内産マツノザイセンチュウ近縁種群に関して、それらの通常の気温条件、および高温条件下でのアカマツ、クロマツに対する病原性について検討しました。この結果、いくつかの種類において、ごく弱い病原力が認められましたが、簡易温室を用いた高温条件下での接種試験でもマツの枯死は認められず、2℃程度の気温上昇では急激なリスク拡大の可能性は低いと考えられます。



マツノザイセンチュウ



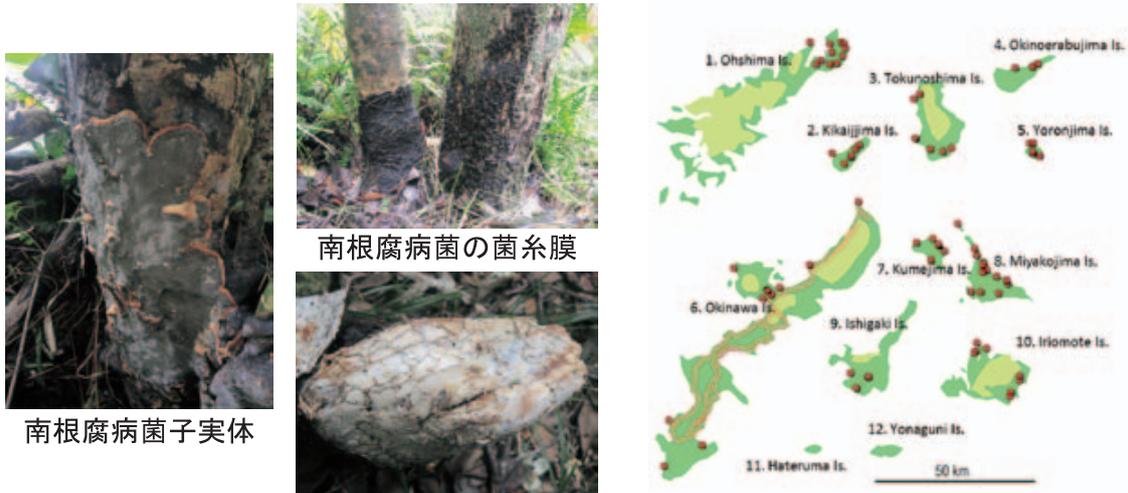
マツ材線虫病被害の様子



マツノザイセンチュウ近縁種による組織病変（左：健全；右：枝断面中央部の白い部分に軽度の通水阻害が発生）

南根腐病菌

南根腐病菌（みなみねぐされびょうきん、病原菌の和名はシマサルノコシカケ）はサルノコシカケの仲間のキノコで、樹木の根や根株を腐らせ枯死させる病原菌です。熱帯から亜熱帯域に分布する多犯性の病原菌です。日本では南西諸島、小笠原諸島の街路樹、生け垣、防風防潮林、公園の緑化木など、人為的影響の大きな場所で被害が発生しています。分布域を調査した結果、病害発生地の北限は奄美大島であることが明らかになりました(図1)。温度試験の結果、菌は10度で成長を停止し、2度で死滅することが明らかになりました。この知見を用いて温暖化による分布可能域の拡大を予測したところ、2040年代には種子島まで、2090年代には鹿児島県南部まで分布が拡大すると予測されました(図2)。接種試験の結果、本菌は九州以北に分布するスギ、ヒノキなど主要造林樹種にも病原性がありました。したがって、温暖化の影響を受けて分布域が北に拡大した場合、大きな被害になるおそれがあります。分布の拡大が予測される地域では、本病の発生に注意し、病害木を発見したら根株ごと速やかに撤去する必要があります。



南根腐病菌による材の腐朽

図1 南西諸島の病害発生地

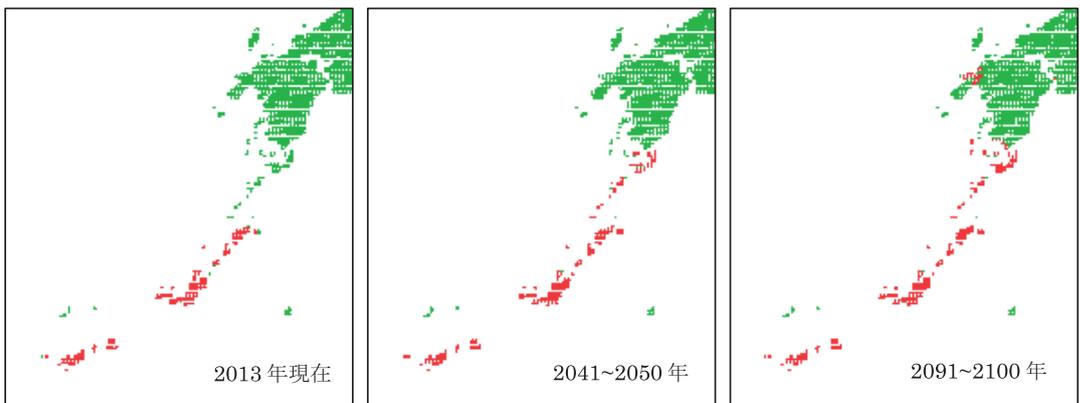


図2 気候シナリオデータ（MIROC-H、A1Bシナリオ）を用いた南根腐病分布可能域の拡大予測

独立行政法人 森林総合研究所北海道支所
〒062-8516 札幌市豊平区羊ヶ丘7

編集・発行 北海道支所

発行日 2014（平成26）年3月1日

お問い合わせ先 連絡調整室

電話 011-590-5503

e-mail: www-ffpri-hkd@gp.affrc.go.jp

※本誌記載内容の無断転載を禁じます

本パンフレットは、農林水産技術会議委託プロジェクト研究「地球温暖化が森林及び林業分野に与える影響評価と適応技術の開発」（実施機関：森林総合研究所）による援助を受けています。

リサイクルの適正表示：紙へのリサイクル可

カツラマルカイガラムシの 被害予測と薬剤防除法

地球温暖化は多くの生き物に様々な影響を与えます。昆虫と農林業との関わりで言えば、これまで日本で生活できなかった南方性の昆虫が温暖化により日本本土へと分布を広げ、新たな害虫として問題化することが予想されます。一方、古くから国内に生息する害虫の中にも、温暖化によってこれまでとは異なる地域で異なる樹木や作物に被害をもたらす可能性もあります。このパンフレットではそのような害虫の 1 種であるカツラマルカイガラムシについて、温暖化シナリオに基づいた将来の被害予測を行うとともに、被害の拡大を食い止めるため薬剤の樹幹注入による防除法について実践的な解説を行います。



独立行政法人 森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute

森林総合研究所 第3期中期計画成果9（森林機能発揮－4）

カツラマルカイガラムシによる森林被害



拡大しつつある被害

2000年頃から東日本（東北、甲信越地方）において、カツラマルカイガラムシによる広葉樹林の被害が発生しています（図1）。これはコナラ・クリなどを中心とした落葉広葉樹（下層植生も含む）に枝枯れ、枯死が生じるもので（表紙上段写真）、2013年までの累積被害面積は山形県で2,941ha、山梨県（2008年で被害終息）1,479haに及んでいます。被害木の枝にはカツラマルカイガラムシがびっしりと付いているのが観察されます（表紙左下写真）。被害は1林分内で約3年間続きます。

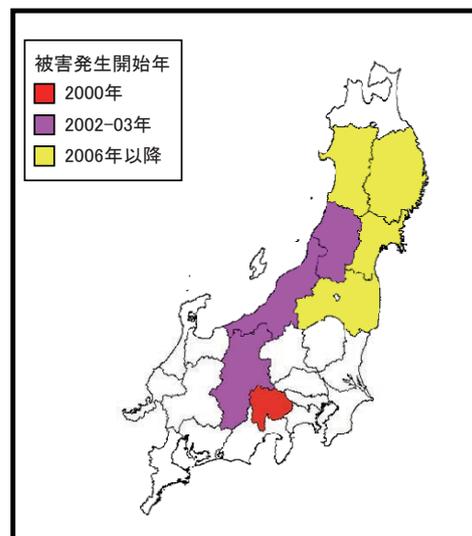


図1. カツラマルカイガラムシ被害地域の拡大状況

加害する昆虫

カツラマルカイガラムシ（*Comstockaspis macroporana* (Takagi)）はカメムシ目マルカイガラムシ科に属する昆虫です。幼虫および雌成虫はろう状の物質（介殻）に覆われており、直径は最大2mmほどしかありません（写真1）。介殻をはがすと現れる虫体は黄色もしくはオレンジ色で、雌成虫は卵胎生のため幼虫を直接産みます（写真2）。雌はこの生まれた直後の1齢幼虫のみが歩行可能で、それ以外は生涯1箇所です植物の組織にストローのような口を差し込み、栄養を摂取しながら固着生活を送ります。年2回（6～7月および9～10月）1齢幼虫が出現し、周囲へと拡散します。人間によって運ばれたと見られる飛び火的な被害拡大も認められています。



写真1. カツラマルカイガラムシ



写真2. 雌成虫と1齢幼虫

カツラマルカイガラムシ被害の予測



被害地分布の推移

カツラマルカイガラムシの広葉樹林における被害は、現在東北地方を中心とする東日本の7県に広がっています。福島県では2006年に初めて被害が確認されましたが、その後急速に拡大し、2010年に会津、中通り地方における被害はピークとなりました(図2)。その多くは2012年までに終息しましたが、新たな場所での被害発生は少ないながら続いています。

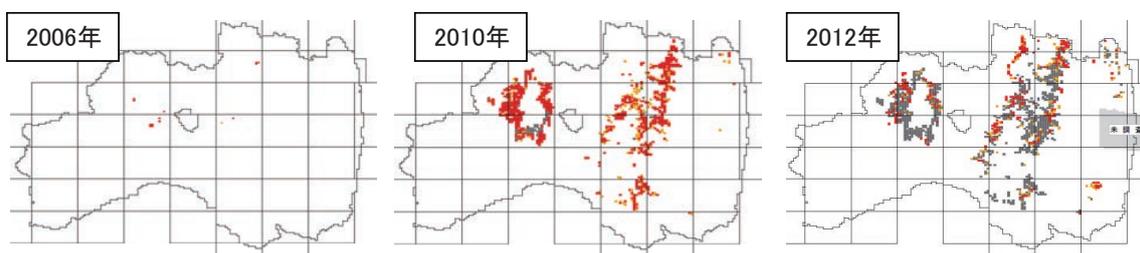


図2. 福島県におけるカツラマルカイガラムシ被害分布の推移(1kmメッシュ図)
(■激害(0.2ha以上)、■微害(0.2ha以下)、■被害終息)

地球温暖化に伴う被害地分布の予測

昆虫の発育と温度には深い関わりがあります。カツラマルカイガラムシの現在の被害地分布は、コナラの優占する比較的標高の低い地域において認められます。しかし地球温暖化によって高標高域の気温が上昇すると、そこに自生するミズナラ、ブナなどの樹種がカイガラムシの標的となり、新たな被害が発生する恐れがあります。そこで福島県の温度、植生データ、カツラマルカイガラムシの発育と温度の関係をもとに、温暖化シナリオデータ(MIROC-H, A1Bシナリオ)に沿って将来の分布予測をしました(図3)。その結果、被害が今後も続くと仮定した場合、今世紀後半には阿武隈山地など、現在被害の見られない高標高地において被害が拡大するものと推定されました。

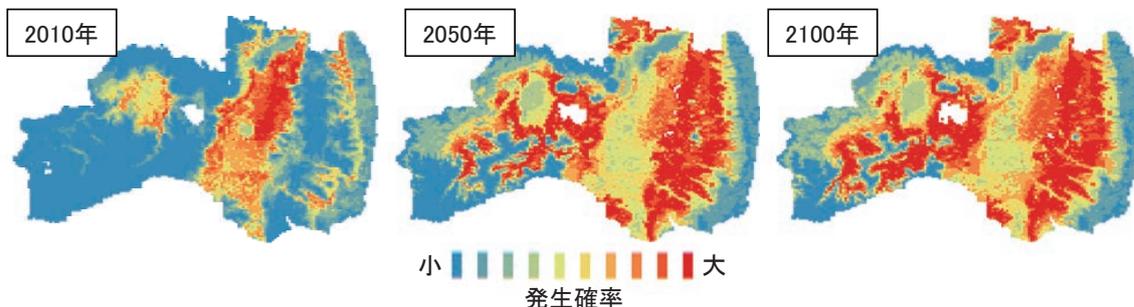


図3. カツラマルカイガラムシの福島県における2010年、2050年および2100年の潜在分布域(飼育個体から得た温度反応(発育ゼロ点および有効積算温度)、標高、降水量および植生と温暖化シナリオデータ(MIROC-high resolution, A1Bシナリオ)から最大エントロピー法を用いて1kmメッシュで推定しました。)

カツラマルカイガラムシ被害の薬剤防除法



殺虫剤の樹幹注入による防除法

カイガラムシは高い枝先に多く生息するので、樹高が高い森林の樹木や栽培クリに対しては、殺虫剤の樹幹注入によって被害を防ぐ事ができます。

使用する薬剤

農薬登録（農林水産省登録第 20838 号）された殺虫剤は、(株)ニッソーグリーン製のマツグリーン液剤 2 です(写真 3)。

施用時期

公園や森林の樹木、栽培クリへの薬剤の樹幹注入は、1 齢幼虫が羽化する前の 5 月上旬から 6 月上旬までに実施すると効果的です。

薬剤の調整

マツグリーン液剤 2 を 50 倍に水希釈して、200ml のノズル付きアンプル(写真 4)に希釈液を必要数充填します。

注入孔の穿孔

ノズル付きアンプルの注入孔は、殺虫剤を注入する樹木の胸高直径を計り(写真 5)、注入孔数を表 1 に基づいて決めます。注入孔の穿孔部位は地上 50~100cm とし、7mm または 8mm の木工用のショートビットにより(写真 6)、樹幹に対して斜め 45 度、深さ約 50mm で、背負い式動力ドリルかインパクトドライバ（写真 7）であけます。

薬剤の樹幹注入

ノズル付き 200ml ボトルを注入孔に挿入し、右回りに押し込みます(写真 8)。この時、ボトルの端をたたくと、ノズルの先端にドリルの木屑がつまるので、必ず回しながら押し込んで下さい。

ノズル付き 200ml ボトルを注入孔に挿入したら、ボトルの端の上面を目打ちで開けて、空気がボトル内に入るようにしてください(写真 9)。これによって、薬液を自然圧で樹幹に注入できます。

ボトルの回収

注入孔に挿入した薬剤は、一昼夜で完全に樹幹に注入されます。注入翌日には、200ml ボトルを注入孔から抜いて回収してください(写真 10)。

栽培クリでの使用

この方法は栽培クリの被害防除にも使用できます。山形県内のクリ園における施用試験の結果、試験木を加害したカツラマルカイガラムシのほぼ 100%を殺すことができました。一方、クリの実の成分分析を行った結果、殺虫成分であるアセタミプリドの含有量は 0.01ppm 以下と、食品衛生法のポジティブリストに定める検出量以下であったことから、食用として安全であることが確認されました。

表 1. 胸高直径を基にした樹幹注入孔数

胸高直径(cm)	孔数	胸高直径(cm)	孔数	胸高直径(cm)	孔数
15～20cm未満	4	40～42cm未満	11	70～72cm未満	29
		42～44cm未満	12	72～74cm未満	29
		44～46cm未満	14	74～76cm未満	30
20～25cm未満	5	46～48cm未満	15	76～78cm未満	30
		48～50cm未満	17	78～80cm未満	31
		50～52cm未満	18	80～82cm未満	31
25～30cm未満	6	52～54cm未満	20	82～84cm未満	32
		54～56cm未満	22	84～86cm未満	32
		56～58cm未満	24	86～88cm未満	33
30～35cm未満	7	58～60cm未満	25	88～90cm未満	33
		60～62cm未満	26	90～92cm未満	34
		62～64cm未満	27	92～94cm未満	34
35～40cm未満	8	64～66cm未満	27	94～96cm未満	35
		66～68cm未満	28	96～98cm未満	35
		68～70cm未満	28	98～100cm未満	36



写真3. ニッソーグリーン製
マツグリーン液剤2



写真4. ノズル付き200mlボトル



写真5. 注入対象の樹木の
胸高直径を測定



写真6. 直径8mmの
木工用ショートビット



背負い式ドリルによる穿孔



インパクトドライバによる穿孔

写真7. 注入孔の穿孔



写真8. 200mlボトルを注入孔
に挿入



写真9. ボトルの端に目打ちで
穴をあけて自然圧で薬液注入



写真10. 注入ボトルの回収

森林での効果的な施用方法

広い面積を持つ森林では、全ての樹木に樹幹注入して被害を予防する事は作業量や経費の点で問題があります。そこで、被害の進行をストップさせ未被害の森林を守るためには、被害木と隣接する未被害の樹木について、谷から峰までの区域で幅 30m 程度にある胸高直径 15cm 以上の樹木の全てに薬液を樹幹注入すると被害の拡大を抑制する事ができます（図 4）。

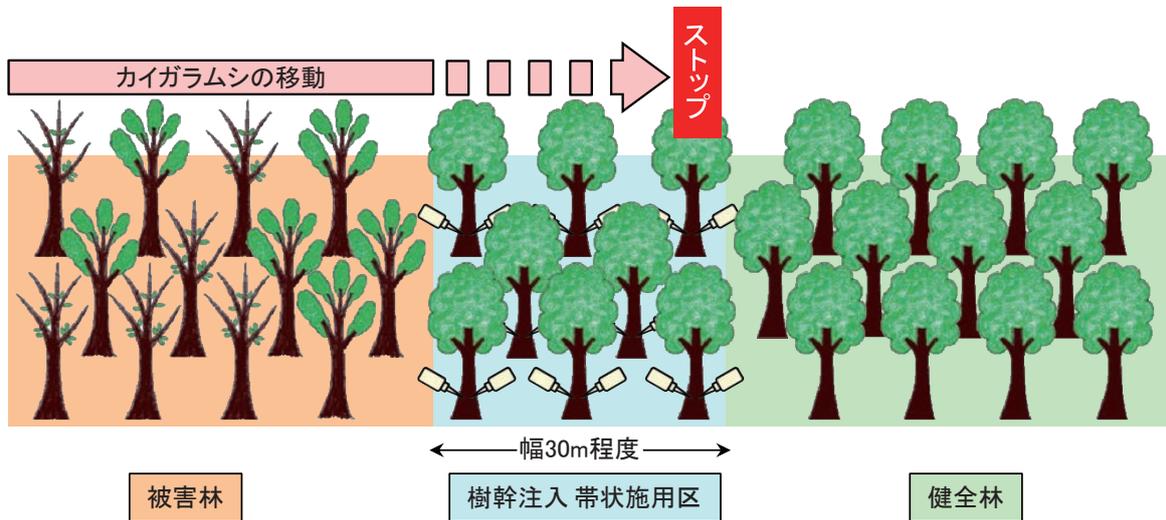


図4. カツラマルカイガラムシ防除のための殺虫剤樹幹注入の带状施用法のイメージ

山形県内の 4 箇所に試験地を設置し、2006 年から 2010 年にかけて殺虫剤樹幹注入の带状施用法の効果試験を行いました（表 2）。その結果、試験開始時点では一部に葉枯れが認められた林分でも、3 年以内にはほぼ健全な状態に回復しました。

表2. 山形県内で殺虫剤樹幹注入の带状施用を実施した試験地の供試木の様態

市町名	地区名	設置 年度	供試 本数	樹種	供試木の様態(平均値)						
					2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012 (年)
山形市	蔵王半郷	2006	28	コナラ	4.3	4.8	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
天童市	舞鶴山	2007	40	コナラ他		3.8	4.9	4.9	5.0	5.0	5.0
		2008	59	コナラ他			4.8	5.0	5.0	5.0	5.0
		2009	44	コナラ他				5.0	5.0	5.0	5.0
		2010	40	コナラ他					5.0	5.0	5.0
米沢市	戸塚山	2008	38	コナラ他			4.6	4.8	5.0	5.0	5.0
		2009	46	コナラ他				4.0	5.0	5.0	5.0
遊佐町	菅里	2008	96	コナラ他			3.9	4.8	5.0	5.0	5.0

注) 供試木の様態 : 5 正常, 4 一部葉枯れ, 3 半分葉枯れ, 2 全部葉枯れ, 1 枯死

樹幹注入に必要なコスト

薬剤樹幹注入法を森林で帯状施用した場合と、栽培クリに単木的に施用した場合の経費について、表3にまとめました。

表3. 薬剤樹幹注入法によるカツラマルカイガラムシ防除に必要な経費

区分	細目	単位	単価	金額(円)	
薬剤費	マツグリーン液剤2	4ml	3円/ml	12	
	200mlボトル代金	1本	84円/本	84	
	小計(ボトル1本当たり)			96	
森林での帯状施用	労務費	薬剤調合	100ボトル/時	1000円/時	10
		ドリル穿孔	800ボトル/時	1680円/時	21
		ボトル運搬	500ボトル/時	1680円/時	3.4
		樹幹注入	400ボトル/時	1680円/時	4.2
		小計(ボトル1本当たり)			38.6
	200mlボトル1本当たり合計			135	
	コナラ1本(5ボトル注入) 当り			675	
	コナラ30本で帯状施用の場合	直接工事費		20,250	
		雑費		2,025	
		合計		22,275	
平均的栽培クリ	薬剤費	マツグリーン液剤2	4ml	3円/ml	12
		200mlボトル代金	1本	84円/本	84
		小計(ボトル1本当たり)			96
	労務費	薬剤調合	100ボトル/時	1000円/時	10
		ドリル穿孔	2000ボトル/時	1680円/時	0.8
		ボトル運搬	1000ボトル/時	1680円/時	1.7
		樹幹注入	500ボトル/時	1680円/時	3.4
		小計(ボトル1本当たり)		15.9	
		200mlボトル1本当たり合計		112	
		45cm栽培クリ1本(14ボトル注入) 当り		1,568	

帯状施用の主な対象となる森林

薬剤樹幹注入法の帯状施用が優先的に行われるべき森林として、以下のような場所を挙げることができます。

1. 住民の生活と密接に関わっている森林
 - 1) 住宅の背後の森林：枯死木が3割程度発生しますので危険回避が必要です。
 - 2) 道路・鉄道・電線などライフラインと近接する森林：1)と同様の理由です。
 - 3) 森林としての保全が必要な保安林：一時的ではあれ、上層林冠が消滅しますので、機能低下を防ぐ必要があります。
2. 修景上保全が必要な森林
 - 1) 景観として成立している観光地：山形県では山寺立石寺(山形市)周辺で予防をして効果がありました。
 - 2) 緑陰が期待される森林公園やキャンプ場：人々の憩いの場が保全される必要があります。長野県では須坂市の臥竜公園で施用し、被害拡大を食い止める効果がありました。



独立行政法人 森林総合研究所
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地
編集・発行 森林総合研究所 森林昆虫研究領域
山形県森林研究研修センター
長野県林業総合センター
福島県林業研究センター
発行日 2014(平成26)年 3月1日
お問い合わせ先 編集刊行係
電話 029-829-8135
e-mail: kanko@ffpri.affrc.go.jp
※本誌掲載内容の無断転載を禁じます。
このパンフレットは、農林水産技術会議委託プロジェクト研究「地球温暖化が森林及び林業分野に与える影響評価と適応技術の開発」(実施機関:森林総合研究所)による成果の一部を掲載しています。

リサイクル適正の表示:紙へのリサイクル可

研究成果文献リスト

研究成果文献リスト

角括弧内の [アルファベット-数字] は、文献に対応する課題番号（ポスター発表欄を参照）を示す。

[K-01]

北尾光俊 (2011) 樹冠内の光環境を考慮して評価したヨーロッパパプナ成木の光合成へのオゾン影響. 日本生態学会誌 61(1), 83-87.

Matyssek, R., Wieser, G., Ceulemans, R., Rennenberg, H., Pretzsch, H., Haberer, K., Löw, M., Nunn, A.J., Werner, H., Wipfler, P., Oßwald, W., Nikolova, P., Hanke, D.E., Kraigher, H., Tausz, M., Bahnweg, G., Kitao, M., Dieler, J., Sandermann, H., Herbinger, K., Grebenc, T., Blumenröther, M., Deckmyn, G., Grams, T.E.E., Heerdt, C., Leuchner, M., Fabian, P., Häberle, K.-H. (2010) Enhanced ozone strongly reduces carbon sink strength of adult beech (*Fagus sylvatica*) – Resume from the free-air fumigation study at Kranzberg Forest, Environmental Pollution 158, 2527-2532.

Olbrich, M., Knappe, C., Wenig, M., Gerstner, E., Haberle, K.-H., Kitao, M., Matyssek, R., Stich, S., Leuchner, M., Werner, H., Schlink, K., Muller-Starck, G., Welzl, G., Scherb, H., Ernst, D., Heller, W., Bahnweg, G. (2010) Ozone fumigation (twice ambient) reduces leaf infestation following natural and artificial inoculation by the endophytic fungus *Apiognomonium errabunda* of adult European beech trees, Environmental Pollution 158, 1043-1050.

[K-02]

Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., Hirano, Y. (2011), Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics, Forest Ecology and Management, 262, 2008-2023.

Hashimoto, S., Morishita, T., Sakata, T., Ishizuka, S. (2011), Increasing trends of soil greenhouse gas fluxes in Japanese forests from 1980 to 2009. Scientific Reports, 1, DOI: 10.1038/srep00116.

Hashimoto, S., Morishita, T., Sakata, T., Ishizuka, S., Kaneko, S., Takahashi, M. (2011), Simple models for soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes calibrated using a Bayesian approach and multi-site data, Ecological Modelling. 222(7), 1283-1292.

Kawahigashi, M., Ono, K., Iimura, Y., Fujitake, N. (2013) Comprehensive study of humic substances: Implications for environmental changes, Humic Substances Research 10, 1-9.

Kodani, E., Matsumura, N., Tarumi, A. (2011) Analyzing the effects of environmental factors on the site indexes of Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) manmade coniferous forest stands in the Shikoku National Forest using GIS, J.Forest Planning 17(1), 3-9.

Ono, K., Hiradate, S., Morita, S., Hirai K. (2013) Fate of organic carbon during decomposition of

different litter types in Japan, *Biogeochemistry*, 112(1-3), 7-21.

酒井寿夫 (2011) 堆積有機物層の分解過程における炭素・窒素の動態について, 森林総合研究所四国支所年報 52, 16-17.

酒井佳美, 高橋正通, 石塚成宏, 稲垣善之, 松浦陽次郎, 雲野明, 中田圭亮, 長坂晶子, 丹羽花恵, 澤田智志, 北条良敬, 玉木泰彦, 白井珠美, 武田宏, 相浦英春, 山内仁人, 島田博匡, 岩月鉄平, 山場淳史, 山田隆信, 前田一, 室雅道 (2011) 日本の枯死針葉樹材の分解度による材密度の推定, 森林総合研究所研究報告 10(3), 135-146.

Sakai, Y., Ugawa, S., Ishizuka, S., Takahashi, M., Takenaka, C. (2012) Wood density and carbon and nitrogen concentrations in deadwood of *Chamaecyparis obtusa* and *Cryptomeria japonica*, *Soil Sci. Plant Nutr.* 58, 526-537.

Sakai, Y., Ishizuka, S., Takenaka, C. (2013) Predicting deadwood densities of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* forests using a generalized linear mixed model with a national-scale dataset, *For. Ecol. Manage* 295, 228-238.

阪田匡司, 橋本徹, 小野賢二, 森下智陽, 石塚成宏, 平井敬三 (2014) 雪期と非積雪期における森林土壌からの温室効果ガスフラックスの違い, 関東森林研究 65(2), 315-318.

[K-03]

Nishizono, T. (2010) Effects of thinning level and site productivity on age-related changes in stand volume growth can be explained by a single rescaled growth curve, *Forest Ecology and Management* 259, 2276-2291.

西園朋広, 田中真哉, 北原文章, 小谷英司, 高橋與明, 家原敏郎, 齋藤英樹 (2012) 国家森林資源調査データに基づく地域レベルの平均蓄積推定. 衛星データを利用した事後層化による推定精度の改善, 関東森林研究 63(2), 61-64.

Tanaka, S., Takahashi, T., Saito, H., Awaya, Y., Iehara, T. Matsumoto M., Sakai, T. (2012) Simple method for land-cover mapping by combining multi-temporal Landsat ETM+ images and systematically sampled ground truth data: A case study in Japan, *Journal of Forest Planning* 18(1), 3-9.

田中真哉, 高橋與明, 齋藤英樹, 西園朋広, 家原敏郎, 北原文章, 小谷英司, 粟屋善雄 (2013) 東北地方における Landsat ETM+データを用いた林分材積推定と大気・地形効果補正の検討, 森林計画学会誌 47, 29-34.

[K-04]

Hiroshima, T. (2011) Calculation of yields on a national level by combining yields of each prefecture using the Gentan probability. *J For Res* 16(2), 98-107.

Hiroshima, T. (2011) Nationwide yield prediction by adding up yields of prefectures, *Journal of forest planning* 16 (Special Issue), 199-205.

Kayo, C., Tsunetsugu, Y., Noda, H., Tonosaki, M. (2014) Carbon balance assessments of harvested wood products in Japan taking account of inter-regional flows, *Environmental Science & Policy* 37, 215-226.

久保山裕史, 上村佳奈 (2012) 木質バイオマスの経済的な供給ポテンシャルの推計, *山林* 1538, 20-27.

田中真哉, 高橋與明, 家原敏郎, 齋藤英樹, 栗屋善雄 (2011) 多時期の衛星データとサポートベクターマシンを用いた森林／非森林の分類精度の比較, *関東森林研究* 62, 79-82.

田中真哉, 高橋與明, 西園朋広, 家原敏郎, 齋藤英樹, 栗屋善雄 (2012) 九州地方における衛星データ, 数値標高モデルおよび気象データを併用した森林分布図作成手法の検討, *関東森林研究* 63, 15-18.

[K-06]

原山尚徳, 上村章, 北岡哲, 宇都木玄, 大野泰之, 来田和人 (2012) カラマツ属3種のポット苗における光合成速度の温度および蒸気圧欠差に対する反応, *北方森林研究* (60), 29-30.

原山尚徳, 大野泰之, 上村章, 来田和人, 北岡哲, 宇都木玄, 来田和人 (2013) カラマツ類ポット苗における光合成特性の季節変化, *北方森林研究* (61), 57-58.

来田和人, 内山和子, 黒丸亮, 今博計 (2011) グイマツ雑種 F1 のさし木増殖技術の改良, *北海道の林木育種* 54(1), 10-15.

宇都木玄, 飛田博順, 上村章, 北岡哲, 黒丸亮 (2011) クリーンラーチ (グイマツ雑種 F1) の初期成長と被陰の影響, *日本森林学会北海道支部論文集* 59, 13-15.

宇都木玄, 原山尚徳, 北岡哲, 上村章 (2011) クリーンラーチ (グイマツ雑種 F1) の初期成長と被陰の影響—列状伐採後のカラマツ造林を目指した, 光環境と成長を考える—北海道の林木育種 54(1), 16-19.

Watanabe, M., Watanebe Y., Kitaoka, S., Utsugi, H., Kita, K. and Koike, T. (2011) Growth and photosynthetic traits of hybrid larch F1 (*Larix gmelini* var. *aponica* × *L. kaempferi*) under elevated CO₂ concentration with low nutrient availability, *Tree Physiology*, doi10.1093:1-11

[K-07]

林雅秀, 岡裕泰, 田中亘 (2011) 森林所有者の意思決定と社会関係: 取引費用経済学の視点から, *林業経済研究* 57(2), 9-20.

Kitahara, F., Mizoue, N., Yoshida, S. (2010) Effects of training for inexperienced surveyors on data quality of tree diameter and height measurements, *Silva Fennica* 44(4), 657-667.

Kitahara, F., Mitsuda, Y., Inoue, A., Kajisa, T. (2013) Classification of natural forest types for forest resource monitoring survey data. *Journal of Forest Planning* 18(2), 111-116.

光田靖, 細田和男, 家原敏郎 (2014) 人工林長期継続調査データを利用した林分成長モデルのパラメータ推定, *統計数理* 61(2), 307-322.

光田靖, 鹿又秀聡, 松本光朗 (2011) 2050年までのスギ林の炭素吸収量を予測する, 森林総合研究所第2期中期計画成果集重点課題アア a, 森林への温暖化影響予測及び二酸化炭素吸収源の評価・活用技術の開発, 14-15.

Mitsuda, Y., Kanomata, H., Matsumoto, M. (2013) Developing a national-level system for simulating the carbon dynamics of hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) planted forests in Japan, *Journal of Forest Planning*, 18(2), 105 - 110

Mitsuda, Y., Kanomata, H., Matsumoto, M. (2013) Effects of initial stand age distribution on simulations of the national-scale carbon dynamics of sugi (*Cryptomeria japonica*) planted forests. *Forest Resources and Mathematical Modeling*, 12(0), 21-34.

光田 靖・鹿又秀聡・松本光朗 (2014) 森林炭素動態シミュレーションシステムを用いた気候変動が森林炭素吸収量に及ぼす影響評価の試行, *統計数理* 61(2), 181-188.

Mitsuda, Y., Hosoda, K., Iehara, T., Matsumoto, M. (2011) Preliminary analysis on the use of a process-based forest growth model of *Cryptomeria japonica* planted forest to represent the effects of canopy structure change, *Forest Resource and Mathematical Modeling* 10, 1-10.

Mitsuda, Y., Kitahara, F., Kodani, E. Hirata, Y (2012) Modeling tree mortality using the Cox proportional hazards model based on data derived from permanent plots of *Cryptomeria japonica* planted forest, *Forest Resource and Mathematical Modeling*, 11, 103-119.

光田靖, 井上昭夫, 北原文章, 門田春夫, 弘田孝行 (2012) 過密人工林分における地上部バイオマス推定に関する誤差要因の検証—40年生ヒノキ人工林における伐倒調査による事例研究—, *森林計画学会誌* 46, 15-24.

Nishizono, T., Kitahara, F., Iehara, T., Mitsuda, Y. (2014) Geographical variation in age-height relationships for dominant trees in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forests in Japan, *Journal of Forest Research* 19(3), 305-316.

嶋瀬拓也 (2011) 素材の国内交流に伴う移動距離とその決定要因, *日本森林学会北海道支部論文集* 59, 117-120.

嶋瀬拓也 (2012) 国内合板工業における国産材利用の拡大と工場の立地変動:2000 年から 2011 年にかけて合板工場から木材輸入港までの距離に生じた変化, 北方森林研究 60, 81-84.

嶋瀬拓也 (2013) 森林資源の成熟は林産工場立地の誘因となるか?—国内合板工業を事例に—, 森林総合研究所北海道支所年報平成 24 年版, 12.

[T-01]

Nakao, K., Matsui, T., Horikawa, M., Tsuyama, I., Tanaka, N. (2011) Assessing the impact of land use and climate change on the evergreen broad-leaved species of *Quercus acuta* in Japan, Plant Ecology 212, 229-243.

田中信行, 中尾勝洋, 津山幾太郎, 松井哲哉 (2013) 自然生態系の適応策, 田中充・白井信雄編, 気候変動に適応する社会, 技報堂出版, 114-119.

田中信行 (2013) 気候温暖化の自然林への影響と適応策, グリーンテクノ情報 9(3), 15-19.

[T-02]

Abdullah, H., Akiyama, T., Sibayama, M., Awaya, Y. (2011) Mapping LAI of cropland using ground observaiton data and classified QuickBird images, システム農学会誌 27(1), 1-8.

Abdullah, H., Akiyama, T., Sibayama, M., Awaya, Y. (2011) Estimation and validation of biomass of a mountaneous agroecosystem by means of sampling, spectral data and QuickBird satellite image, Int. J. Sustainable Development & World Ecology 18(5), 384-392.

栗屋善雄, 永谷泉, 河合洋人, 張鵬飛 (2012) MODIS データを利用した森林の葉開日の推定アルゴリズムの開発, 中部森林研究 60, 89-90.

福田夏子, 栗屋善雄, 児島利治 (2012) LiDAR と Quickbird のデータを用いた植生タイプ分類—高山市大八賀川流域の事例—, システム農学 28(4), 115-122.

[T-03]

阿部俊夫, 山野井克己, 北村兼三, 中井裕一郎, 鈴木覚, 坂本知己, 高橋正義 (2010) 定山溪森林理水試験地観測報告(2002年1月~2007年12月), 森林総合研究所研究報告 10(2), 109-129.

後藤義明 (2010) 海水の空中散布がクヌギに与える影響, 森林火災対策協会報 30, 9-13.

後藤義明 (2011) 林野火災にしやすい森林とは? 森林火災対策協会報 31, 4-7.

後藤義明, 鈴木覚 (2011) 日本における林野火災の発生傾向に関する検討, 関東森林研究 62, 227-230.

Jomura, M., Kominami, Y., Ataka, M. (2012) Differences between coarse woody debris and leaf litter in the response of heterotrophic respiration to rainfall events, *Journal of Forest Research* 17(3), 305-311.

Kitamura, K., Nakai, Y., Suzuki, S., Ohtani, Y., Yamanoi, K., Sakamoto, T. (2012) Interannual variability of net ecosystem production for a broadleaf deciduous forest in Sapporo, northern Japan, *Journal of Forest Research* 17(3), 323-332.

Kominami, Y., Jomura, M., Ataka, M., Tamai, K., Miyama, T., Dannoura, M., Makita, N., Yoshimura, K. (2012) Heterotrophic respiration causes seasonal hysteresis in soil respiration in a warm-temperate forest, *Journal of Forest Research*, 17(3), 293-304.

溝口康子 (2012) 富士吉田アカマツ林における生態系純生産量の季節変化と年々変動, 北海道支所年報平成 24 年版, 10.

Mizoguchi, Y., Ohtani, Y., Takanashi, S., Iwata, H., Yasuda, Y., Nakai, Y. (2012) Seasonal and interannual variation in net ecosystem production of an evergreen needleleaf forest in Japan, *Journal of Forest Research* 17(3), 283-295.

溝口康子, 山野井克己, 宇都木玄, 飛田博順 (2014) 札幌森林気象試験地における台風攪乱後の林床光環境の変化, *北方森林研究* 62, 89-100.

中井裕一郎 (2013) 森林のフラックス観測 (林業動静年報-森林保全・環境編), *山林* 1550, 60-68.

竹内由香里 (2011) 気温の測定頻度による日平均値の比較および長期傾向値への影響, *森林総合研究所研究報告* 9(4), 163-166.

玉井幸治 (2010) Comparison of Discharge Duration Curves from Two Adjacent Forested Catchments, -Effect of Forest Age and Dominant Tree Species-, *Journal of Water Resource and Protection* 2, 742-750.

宇都木玄, 山野井克己 (2011) 台風攪乱による北方森林生態系の CO₂ 収支の変化, *北の森* だより 7, 4-5.

安田幸生 (2013) 森林は二酸化炭素を吸っている？吐いている？ *フォレストウインズ* 54.

Yasuda, Y., Saito, T., Hoshino, D., Ono, K., Ohtani, Y., Mizoguchi, Y., Morisawa, T. (2012) Carbon balance in a cool-temperate deciduous forest in northern Japan: seasonal and interannual variations, and environmental controls of its annual balance, *Journal of Forest Research* 17(3), 253-267.

山野井克己, 溝口康子, 安田幸生, 大谷義一, 中井裕一郎, 北村兼三, 高梨聡, 小南裕志, 深山貴文, 荻野裕章, 中野隆志, 清水貴範, 玉井幸治 (2011) 微気象学的方法による森林生態系純生産量の評価, 農林水産技術会議事務局「地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響と緩和及び適応技

術の開発」研究成果 483, 60-64.

山野井克己 (2012) 台風による攪乱, 日本農業気象学会北海道支部編著「北海道の気象と農業」, 366-370

山野井克己 (2012) 台風などさまざまな要因による森林の炭素吸収量の変動, 気候変動プロジェクト成果発表会「農林水産業は気候変動にどう対応するか?」, 農林水産省農林水産技術会議事務局他, 89.

山野井克己, 溝口康子, 大谷義一, 北村兼三, 中井裕一郎, 安田幸生 (2012) 森林観測ネットワークで気候変動の影響を探る-タワーを用いた二酸化炭素吸収量 (CO₂) の把握- 平成 24 年版研究成果選集, 30-31.

[T-04]

大丸裕武 (2011) 2009 年 7 月に防府市及び山口市で発生した山地災害 (現代の災害に現れた過去のハゲ山荒廃の影響), 水利科学 321, 62-71.

大丸裕武 (2011) 2009 年に山口県防府市周辺で発生した崩壊の歴史的背景, 砂防学会誌 64(4), 52-55.

村上亘, 落合博貴 (2010) シリーズ「近年の土砂災害」-2006 年 8 月 18 日岩手山南麓御神坂沢で発生した土石流災害-, 水利科学 313, 71-84.

[T-05]

多田泰之 (2010) 「国土の変遷と災害」をはじめめるにあたって, 砂防学会誌 63(4), 40-43.

多田泰之, 大丸裕武, 三森利昭 (2013) 古今近畿水害の特徴とその差異, 砂防学会誌 65 (5), 58-64.

Yamakawa, Y., Masaoka N., Kosugi, K., Tada Y., Mizuyama Y. (2013) Application of the electrical resistivity imaging for measuring water content distribution in hillslopes, Journal of Disaster Research 8(1), 81-89.

[T-06]

野口正二 (2011) 森林内の積雪深を左右する要因, みどりの東北 88, 4.

野口正二 (2011) インターバルカメラを使用した林内の積雪深の観測, 東北の雪と生活 26, 67-68.

[T-08]

片柳薫子, 木村園子ドロテア, 木庭啓介, 伊藤昭彦, 澤野真治, 飯泉仁之直, (2012), セミナー報告 第 4 回モニタリングと広域評価を考える会「Scaling Up and Down -モニタリングとモデリングの接点を探る-」, 日本土壌肥科学雑誌 83, 84.

[T-09]

坂本知己, 萩野裕章, 野口宏典, 島田和則, 後藤義明 (2011) 過密クロマツ海岸林の本数調整事例, 海岸林学会誌 10(1), 7-14.

鈴木 寛 (2011) アジアパシフィックシンポジウム「自然現象や人為的改変による危険性に対する脆弱性評価」参加報告, 北方林業 63, 17-20.

[T-10]

蛭田利秀 (2011) 林業研究センターだより カツラマルカイガラムシの被害とは? 林業福島 563, 5-6.

Kanzaki, N., Kawaguchi, E., Aikawa, T., Maehara, N. (2010) On *Bursaphelenchus yongensis* Gu, Braasch, Burgermeister, Brandstetter & Zhang, 2006 in Japan, Nematology 12, 803-806.

Kanzaki, N., Aikawa, T., Maehara, N., Ichihara, Y. (2011) An inoculation experiment of Japanese *Bursaphelenchus* nematodes on Japanese black and red pine, *Pinus thunbergii* and *P. densiflora*, Journal of Forest Research 16, 325-330.

北島博 (2013) ムラサキアツバ幼虫の人工飼料による飼育, 日本応用動物昆虫学会誌 57, 192-194.

岡田充弘, 近藤道治, 武田芳夫, 浦野忠久, 小山泰弘 (2013) 長野県におけるカツラマルカイガラムシによる被害分布の推移, 中部森林研究 61, 151-152.

尾崎研一 (2012) 地球温暖化によるトドマツオオアブラムシの世代数増加と被害拡大予測, 森林防疫 61(2), 64-69.

Sahashi, N., Akiba, M., Ishihara, M., Ota, Y., Kanzaki, N. (2012) Brown root rot of trees caused by *Phellinus noxius* in the Ryukyu Islands, subtropical areas of Japan. Forest Pathology 42, 353-361.

斉藤正一, 上野 満 (2011) カツラマルカイガラムシによる広葉樹被害とクリへの殺虫剤の樹幹注入効果, 林業と薬剤 195, 8-16.

斉藤正一, 上野 満, 鈴木千由紀 (2012) カツラマルカイガラムシによる広葉樹被害の特徴とクリへの殺虫剤の樹幹注入効果 (2), 林業と薬剤 199, 1-10.

斉藤正一, 上野満 (2013) カツラマルカイガラムシによる広葉樹被害の特徴とクリへの殺虫剤の樹幹散布効果, 林業と薬剤 203, 1-9.

上田明良, 尾崎 研一 (2012) ヤツバキクイムシの発育への温度と日長の影響 森林総合研究所研究報告 11, 43-50.

浦野忠久, 比留間脩 (2013) カツラマルカイガラムシの発育ゼロ点および有効積算温度の推定, 関東森林研究 65(1), 65-68.

[T-11]

宮崎和弘 (2011) きのこと対策のための病害虫対策について 1, 特産情報 7月号, 38-41.

宮崎和弘 (2011) きのこと対策のための病害虫対策について 2, 特産情報 8月号, 36-39.

宮崎和弘 (2011) きのこと対策のための病害虫対策について 3, 特産情報 10月号, 44-46.

宮崎和弘 (2011) シリーズ森ときのこと 9 -きこの病気-, 山林 12月号, 44-47.

宮崎和弘 (2012) きこの病害の生態と防除方法, 日本きこの学会 20, 110-115.

宮崎和弘 (2012) DNA解析を利用したきこの害菌類の調査, 信州のそ菜 683, 8-11.

宮崎和弘, 中武千秋, 甲斐 充, 有森由美 (2013) 九州地域で発生しているヒポクレア属菌の被害調査と特性評価について, 九州森林研究 66, 158-161.

宮崎和弘, 中武千秋 (2014) シイタケ原木栽培における夏場の高温状態の発生に及ぼす影響と寒冷紗施用による環境改善効果について, 九州森林研究 67, 83-84.

[D-02]

加治佐剛 (2013) Recipe-T07 クラスの定義, 平田泰雅ら編「REDD-plus COOKBOOK」, p96-97, (独) 森林総合研究所REDD研究開発センター, ISBN 978-4-905304-13-5.

溝上展也 (2013) Recipe-P10 固定調査プロット法を用いた方法, 平田泰雅ら編「REDD-plus COOKBOOK」, p96-97, (独) 森林総合研究所REDD研究開発センター, ISBN 978-4-905304-13-5.

溝上展也 (2013) Recipe-T12 固定調査プロットの必要数と配置, 平田泰雅ら編「REDD-plus COOKBOOK」, p96-97, (独) 森林総合研究所REDD研究開発センター, ISBN 978-4-905304-13-5.

太田徹志 (2013) Recipe-T11 面積変化の推定, 平田泰雅ら編「REDD-plus COOKBOOK」, p96-97, (独) 森林総合研究所REDD研究開発センター, ISBN 978-4-905304-13-5.

Ota, T. et al. (2014) Estimation of Airborne Lidar-derived Tropical Forest Canopy Height, Remote Sensing 6 (in press)

[D-03]

Ioki, K., Tsuyuki, S., Hirata, Y., Phua, M-H., Wong, W., Ling, Z-Y., Saito, H., Takao, G. (2014) Estimating aboveground biomass of tropical rainforest of different degradation levels in Northern Borneo using airborne LiDAR, Forest Ecology and Management 328, 335-341.

[D-04]

Phua, M-H., Ling, Z.Y., Wong, W., Korom, A., Ahmad, B., Besar, N. A., Tsuyuki, S., Ioki, K., Hoshimoto, K., Hirata, Y, Saito, H., Takao, G. (2014) Estimation of above-ground biomass of a tropical forest in northern Borneo using high-resolution satellite image, *Journal of forest Science*, (in press).

[D-07]

宮本麻子, 松浦俊也, 倉島孝行, 佐野真琴 (2013) カンボジアの土地利用と森林配置の特徴, *関東森林研究* 64, 5-8.

[D-08]

小林 慎太郎, 山本 由紀代, 丹治 肇, 齋藤 勝宏 (2012) カンボジアにおける経済開発と貧困削減—産業連関分析からの展望, *産業連関 —イノベーション& I-Oテクニーク—* 20, 49-58.

倉島孝行, 松浦俊也, 宮本麻子, 佐野真琴 (2013) カンボジア中部の森林地域をめぐる動態と現在: 土地利用と精度変化のプロセス, *海外の森林と林業* 86, 21-26.

倉島孝行, 松浦俊也, 宮本麻子, 佐野真琴 (2014) 中部カンボジアのレジン採取家—その実態と国際保全レジームへの組込みに向けた考察課題, *関東森林研究* 印刷中.

[D-09]

Chiwa, M., Enoki, T., Higashi, N., Kumagai, T., Otsuki, K. (2013) The increased contribution of atmospheric nitrogen deposition to nitrogen cycling in a rural forested area of Kyushu, Japan, *Water, Air, and Soil Pollution* 224, Article 1763.

Katayama, A., Kume, T., Komatsu, H., Saitoh, T., Ohashi, M., Nakagawa, M., Suzuki, M., Otsuki, K., Kumagai, T. (2013) Carbon allocation in a Bornean tropical rainforest without dry seasons, *Journal of Plant Research* 126, 505-515.

Kobayashi, N., Kumagai, T., Miyazawa, Y., Matsumoto, K., Tateishi, M., Lim, T.K., Mudd, R.G., Ziegler, A.D., Giambelluca, T.W., Yin, S. (2014) Transpiration characteristics of a rubber plantation in central Cambodia, *Tree Physiology* 34, 285-301.

小林菜花子 (2014) カンボジアにおけるゴムプランテーションの水・炭素収支に関する研究概要, *海外の森林と林業* 91, 26-30.

Kumagai, T., Kanamori, H., Yasunari, T. (2013) Deforestation-induced reduction in rainfall, *Hydrological Processes* 27, 3811-3814.

Kumagai, T. and Kume, T. (2012) Influences of diurnal rainfall cycle on CO₂ exchange over Bornean tropical rainforests, *Ecological Modelling* 246, 91-98.

Kumagai, T., Mudd, R.G., Miyazawa, Y., Liu, W., Giambelluca, T.W., Kobayashi, N., Lim, T.K., Jomura, M., Matsumoto, K., Huang, M., Chen, Q., Ziegler, A. Yin, S. (2013) Simulation of canopy CO₂/H₂O fluxes for a rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation in central Cambodia: the effect of the regular spacing of planted trees, *Ecological Modelling* 265, 124-135.

Kumagai, T. and Porporato, A., (2012) Strategies of a Bornean tropical rainforest water use as a function of rainfall regime: isohydric or anisohydric?, *Plant, Cell and Environment* 35, 61-71.

Kume, T., Tanaka, N., Kuraji, K., Komatsu, H., Yoshifuji, N., Saitoh, T. M., Suzuki, M., Kumagai, T. (2011) Ten-year evapotranspiration estimates in a Bornean tropical rainforest, *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 1183-1192.

Miyazawa, Y., Tateishi, M., Komatsu, H., Kumagai, T., Otsuki, K. (2011) Are measurements from excised leaves suitable for modeling diurnal patterns of gas exchange of intact leaves?, *Hydrological Processes* 25, 2924-2930.

Yoshifuji, N., Komatsu, H., Kumagai, T., Tanaka, N., Tantasirin, C., Suzuki, M. (2011) Interannual variation in transpiration onset and its predictive indicator for a tropical deciduous forest in northern Thailand based on 8-year sap-flow records, *Ecohydrology* 4, 225-235.

[D-10]

Iida, S., Ito, E., Shimizu, A., Nobuhiro, T., Shimizu, T., Kabeya, N., Tamai, K., Araki, M., Chann, S., Keth, N. (2013) Year-to-year differences in sap flow and crown-level stomatal conductance of two species in a lowland evergreen forest, *JARQ* 47, 319-327.

Iida, S., Shimizu, T., Kabeya, N., Nobuhiro, T., Tamai, T., Shimizu, A., Ito, E., Ohnuki, Y., Abe, T., Tsuboyama, Y., Chann S., Keth, N. (2012) Calibration of tipping-bucket flow meters and rain gauges to measure gross rainfall, throughfall, and stemflow applied to data from a Japanese temperate coniferous forest and a Cambodian tropical deciduous forest, *Hydrological Processes* 26, 2445-2454.

Iida, S., Shimizu, T., Tamai, K., Ito, E., Kabeya, N., Shimizu, A., Ohnuki, Y., Keth, N., Chann, S. (2013) Intra- and Interspecies differences in transpiration in a lowland deciduous forest in Cambodia, *Acta Horticulturae* 991, 417-423.

Kenzo, T., Yoneda, R., Sano, M., Araki, M., Shimizu, A., Tanaka-Oda, A., Chann, S. (2012) Variations in Leaf Photosynthetic and Morphological Traits with Tree Height in Various Tree Species in a Cambodian Tropical Dry Evergreen Forest, *JARQ* 46, 167-180.

玉井幸治, 延廣竜彦, 荒木誠, 壁谷直記, 清水貴範, 飯田真一, 清水晃 (2014) カンボジア中央部の低地常緑林の蒸発散特性—高木層が消失した場合の蒸発散量と温度環境に及ぼす影響予測—, *水理科学* 337, 133-151.

[D-11]

Avtar, R., Takeuchi, W., Sawada, H. (2011) Full Polarimetric PALSAR based Land Cover Monitoring in Cambodia for Implementation of REDD, Policies International Journal of Digital Earth, DOI:10.1080/17538947.2011.620639.

Avtar, R., Sawada, H., Takeuchi, W., Singh, G. (2012) Characterization of Forests and Deforestation in Cambodia Using ALOS/PALSAR Observation, Geocarto International 27, 119-137.

中園悦子, 沢田治雄, 遠藤貴宏 (2012) MODIS の森林減少情報を用いたカンボジア森林被覆図の更新, 生産研究 64, 581-584.

独立行政法人 森林総合研究所

〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地

編集・発行 研究コーディネータ（温暖化影響研究担当）

発行日 2015年1月30日

お問い合わせ先 編集刊行係

電話 029-829-8135 E-mail : kanko@ffpri.affrc.go.jp

※本誌掲載内容の無断転載を禁じます。

リサイクル適性 

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。