

K-1 陸域生態系の吸収源機能評価に関する研究

(1) 人為的活動による森林・木材・土地利用における炭素収支変動の評価

独立行政法人森林総合研究所

森林管理研究領域

天野正博

森林管理研究領域

環境計画研究室

杉村 乾

林業経営・政策管理領域

林業システム研究室

松本光朗

立地環境研究領域

養分環境研究室

高橋正通

木材特性研究領域

物性研究室

外崎真理雄

成分利用研究領域

島田謹爾

北海道支所

田中永晴

東北支所

横田康裕

愛媛大学

農学部

末田達彦

愛媛大学

農学部

林 和男

東京大学

農学生命科学研究科

有馬孝禮

早稲田大学

人間科学部

森川 靖

東京大学

農学生命科学研究科

広嶋卓也

平成11～13年度合計予算額 117,214千円

(うち、平成13年度予算額 36,757千円)

〔要旨〕京都議定書で認められた森林の炭素吸収量の排出削減目標への算入のために、森林の蓄積および成長量を客観的かつ正確な方法で実測する必要がある。LIDAR はこれまでのリモートセンシングでは直接計測ができなかった樹冠高を求められるセンサーである。この LIDAR と、同時取得される林冠画像を用い、林分の林冠高、林分蓄積、立木密度を推定する手法を開発した。森林土壌については、畑地や土砂災害後の無立木地への新規植林による土壌炭素の蓄積速度を実態調査から推定し、その結果を参考に、既存の土壌炭素動態モデルについて検討した。また、日本の森林土壌に適合した土壌炭素動態モデルの基本構造の検討も行った。森林の炭素吸収量の推定手法として、林業統計を利用した手法は現実的なものであるが、同時に解決すべき問題点も見られる。このことから、問題点の指摘と改善、それによる推定を試みた。その結果、1995年における我が国の森林炭素蓄積量は12億4千万t、正味の炭素吸収量は2250万t/年と推定された。木材利用の二酸化炭素削減効果のうち、炭素貯蔵効果を評価するため、木材一次製品の約7割が出荷されている建築部門について試算を行った。その結果として、建築物中木材炭素量は、1974年の1.6億t-Cから2000年には2.4億t-Cと単調に増加していること、また各年の二酸化炭素吸収量に当たる変動量については、木造率の低下により減少傾向にあるものの2000年では200万t-C程度あることが分かった。CDM植林プロジェクトによる炭素吸収量を評価するのに必要なベースラインについて検討するとともに、インドネシアの東カリマンタン州内のS社の産業造林事業地を事例として、大規模造林活動が地域社会に与える影響および造林活動がもたらすCO₂のリーケージ/ポジティブ・スピルオーバーを明らかにした。

[キーワード] LIDAR、土壌炭素動態モデル、森林の炭素吸収量、木材の炭素貯蔵能力、CDM植林

1. はじめに

当サブテーマでは多くの研究が実施されているので、各研究テーマを以下の順に分けて報告を行う。

- (A) リモートセンシングとバイオマス計測
- (B) 亜寒帯林のバイオマス計測に関する研究
- (C) 森林土壌の炭素固定能の評価
- (D) 林業統計からみた我が国の炭素蓄積量
- (E) 森林生態系バイオマス量の推定モデルの開発
- (F) 木材部門における炭素固定能力の評価
- (G) アジア太平洋地域での CDM による炭素収支の評価
- (H) 新規森林造成に伴う社会経済的影響の評価
- (I) 拡張減反率の木材需給均衡モデルへの適応

2. 研究内容

- (A) リモートセンシングとバイオマス計測

1. はじめに

京都議定書では、第 3 条第 3, 4 項において森林による炭素吸収量を排出削減目標に算入することが認められた。第一約束期間に向け森林が適切に整備された場合には我が国に認められた算入上限値に達する炭素吸収量の確保が森林により可能となる一方、現状の水準で森林整備が推移した場合にはそれを大きく下回るおそれがあると考えられている。約束期間における実際の森林の炭素吸収量は、その時点での実測により算定されなければならない。そのため、我が国の森林の炭素吸収量を客観的かつ高精度に計測する手法が必要である。既往の技術として、森林の現地調査のみでは十分なサンプルを取得できず、空中写真判読は客観性に欠け、衛星データは我が国の森林では十分な精度が得られなかった。近年の航空機搭載型レーザー測距儀(LIDAR: LIght Detection And Ranging)の進歩・普及により、林冠高が広域かつ正確に直接計測できるようになり、森林資源のモニタリングや林分構造の解析に応用されてきている¹⁾²⁾。同時取得されるデジタル林冠画像とともに従来の空中写真に置き換えられた現地調査と広域衛星観測との中間に位置するサンプリング手段として、LIDAR は第一約束期間における我が国の炭素吸収量の実測手法としての利用が期待される。

2. 研究目的

本研究の目的は、航空機搭載型の LIDAR を用いて日本国内の針葉樹人工林の現存量推定を行うための基礎技術を開発することである。本研究での LIDAR の 1 点 1 点は単木樹冠のどこかの高さを示しているが、点の密度は大小の針葉樹単木の樹冠形を十分に再現するほど高くない。そこで、林分の林冠高は計測点の樹冠高の統計処理により推定し、かつ水平的な立木密度はデジタル林冠画像を用いて推定する手法を開発する。

3. 研究方法

(1) LIDAR データ

LIDAR は航空機の位置と航空機から発射されるレーザーで計測される地表面までの距離・方位とから地表面形状を三次元で計測するものである。レーザーを進行方向と垂直にスキャンすることによって、面的な地形の図化が行える。地表面に樹木がある場合には、樹冠面から反射したレーザーによる樹冠面の高さと、樹冠を透過し地表面で反射したレーザーによる地表高とを分離し、高さの差を取ることによって、林冠高の分布を求めることができる。また、樹冠面からの反射点数と地表からの反射点数の比から樹冠疎密度が求められる。

(2) LIDAR データによる林冠高と蓄積の推定

LIDAR 観測を行った苫小牧国有林のうち30年生までの若齢人工林の現地調査を行い林分蓄積を推定して、LIDAR による林冠高分布と林分のパラメータとの関係を解析する。苫小牧国有林の人工林は、平坦な地形と大規模な造林面積が特徴である。植栽および間伐は道路と垂直に直線状に行われている。現地調査は、植栽・間伐パターンを考慮しながら約0.03haのプロットを取り、林木のサイズ(樹高(約5本に1本)、胸高直径(毎木))および配置(立木位置、植栽パターン、間伐パターン)を計測する。樹高と胸高直径の関係より樹高直線性を求め、さらに単木の樹高・胸高直径より2変数材積表より樹種ごとに単木材積を求め、林分材積を推定する。LIDAR による林冠高は、判読によりプロット地点を含むほぼ均一と思われる領域0.1~0.25haを各プロットごとに選び、その中の観測点の林冠高の最小値、第1四分位点、平均値、中央値、第3四分位点、最大値を、すべての点を用いた場合と植生点のみを用いた場合についてそれぞれ求める。

(3) 同時取得林冠画像による林分密度推定

立木密度は、森林蓄積を推定するために、平均上層樹高に次ぎ重要なパラメータである。空中写真林分材積表や林分密度管理図においても、樹高に加え立木密度を用いると、蓄積推定は向上する。単木樹冠の分離はLIDARよりも同時撮影された樹冠画像のほうが安価である。異なる林分を多く含む広域で立木密度を推定するために、連続的かつ局地的に立木密度を推定する方法として、測定間隔により測定範囲を変化させるバリオグラムを用いる。バリオグラムは ρ は与えられた信号 a 上の一定間隔 h だけ離れた点同士の差の二乗和として式(1)で表される。通常、 h とともに ρ は単調増加し一定の値に漸近する。この漸近値は信号全体の分散であると考えられる。バリオグラムを用いて林冠画像から林分構造を得る試みは多くなされている³⁾⁴⁾。

$$\rho(h) = 1/N(h) * \sum x(a(x) - a(x-h))^2 \quad (1)$$

信号に波動成分があると、その波長で振動しながら収束する。林冠画像は個体の樹冠の陰陽の繰り返しであるから、立木間隔に相当する波長で振動することが考えられる。その波長を抽出することにより、立木間隔、つまり立木密度を得る。通常バリオグラムは、各 h に対し所与の信号全域に渡り ρ を計算するため、林相の変化など信号に変化がおきた場合にはその影響を平均化してしまい、信号の変化を表せない。そこで、バリオグラムの範囲を信号上のある点 x を中心とする一部分に限り、 ρ を $\rho(h, x)$ と表すことにする。この $\rho(h, x)$ から算出される波長 $w(x)$ が x における局地立木間隔である。

対象地域は、北海道森林管理局管内の苫小牧国有林および奥定山溪国有林である。苫小牧国有林

は、樽前山麓の平坦な台地上に広がり、主に大規模の針葉樹人工林施業が行われている。遠隔探査データに現れる地形の効果が非常に少ないことから、森林植生に関する遠隔探査研究が多く行われている。奥定山溪国有林は、石狩川支流豊平川の源流域で標高は約 600～1300m、針広混交林の天然林で高密度路網を利用した択伐林施業が行われてきている。標高や斜面などのほか、択伐の強度、時期、更新状況などにより、樹高、林冠疎密度、針広混交率などが原生林よりも変化に富み、林冠の三次元構造を解析するのに適している。

4. 結果・考察

(1) LIDAR データの取得

苫小牧では 1999 年 9 月 9、10 日、奥定山溪では 1999 年 9 月 13 日に、それぞれ幅約 1km×長さ約 10km の範囲のデータ取得を行った。主な観測パラメータを以下に示す。

対地高度：約 600 m、スキャン角度：±10 deg、スポットサイズ：直径約 0.18 m

平均パルス密度：進行方向 1.47 m/測点、スキャン方向 1.42 m/測点

図-1 に 5m メッシュでの樹冠疎密度を示す。各メッシュ内の樹冠疎密度 C は式(2)により求めた。

$C = \text{林冠面の観測点数} / (\text{林冠面の観測点数} + \text{地表面の観測点数})$ (2)

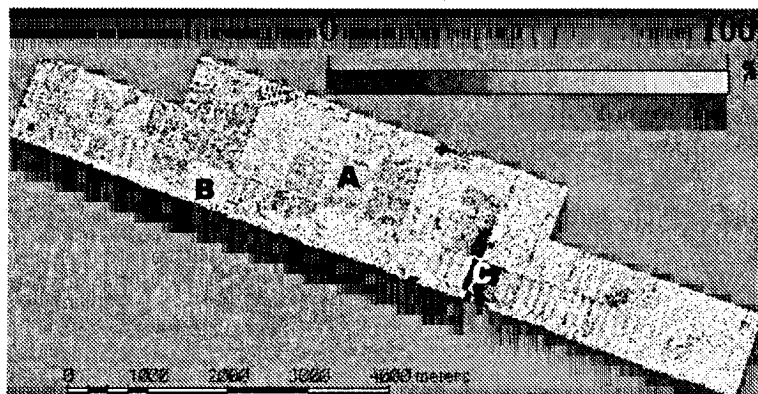


図-1(1) 林冠率(苫小牧) A:カラマツ人工林, B:トドマツ人工林, C:新規造林地

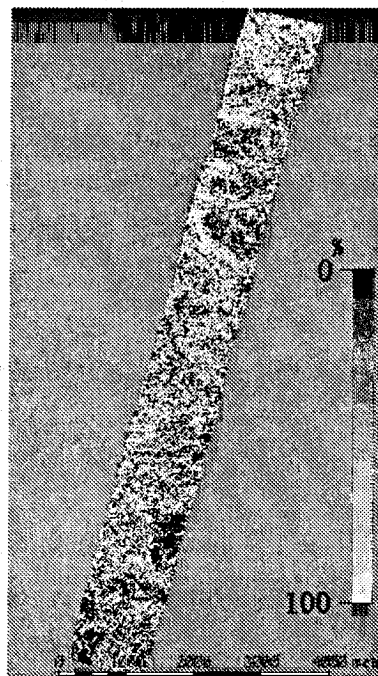


図-1(2) 林冠率(奥定山溪)

苫小牧では、エゾマツ・トドマツ人工林の林冠率は高く、カラマツの林冠率は低いことが判読できる。また、新しい植栽地では林冠率はほぼ 0 であることもわかる。奥定山溪では、苫小牧よりも全体的に林冠率は低かった。

(2) LIDAR データによる林冠高と蓄積の推定

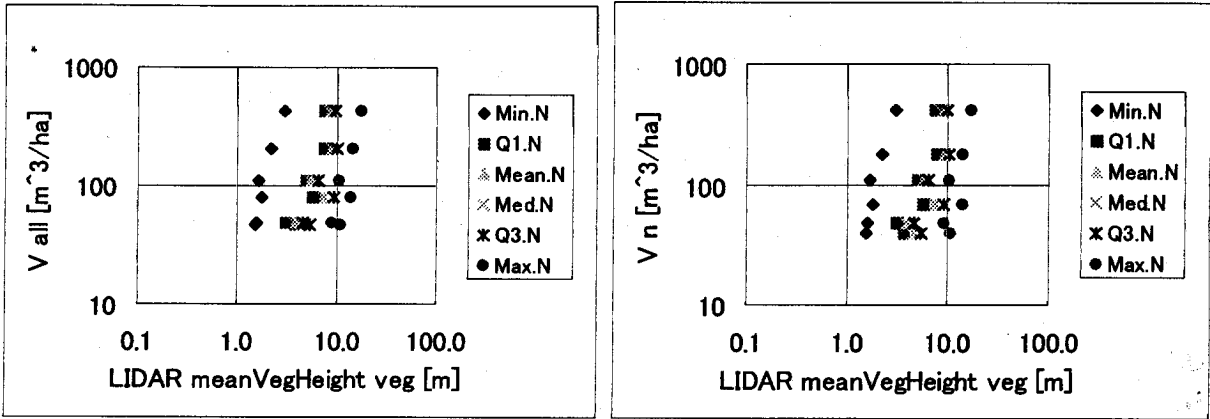
① LIDAR による林分平均樹高の推定

林冠高は林冠面のあらゆる点の高さの分布であり、極大点である樹高の分布よりは過少な分布となる。LIDAR による林分林冠高(全計測点および植生点につきそれぞれ最小値、第 1 四分位点、平均値、中央値、第 3 四分位点、最大値)から林分平均樹高(全立木および植栽木のみ)へ回帰したところ、

林分林冠高と林分平均樹高のどの組み合わせにおいても第 1 四分位点、平均値、中央値からの回帰は有意(危険率 5%)となり傾きはおおよそ 1 となった。

② LIDAR と林分蓄積の関係

胸高直径および樹高から推定された林分蓄積と LIDAR による林冠高の対数軸上での関係を図-2. に示す。植生点のみによる林冠高と全立木および植栽木の蓄積とに明白な直線関係が見られる。植栽木材積と第 1 四分位点、平均値、中央値と林分蓄積の対数軸上での回帰したところ、すべてで有意(危険率 5%)となり、第 1 四分位点からが最もよかった($\log(\text{林分蓄積})=2.28\log(\text{林冠高第 1 四分位点})+.407$, $r^2=.66$)。



(1) 全立木の材積 (2) 植栽木のみの材積
図-2. LIDAR 林冠高と林分蓄積

(3) 林冠画像による林分密度推定

今回の同時取得画像はデジタル画像でなく従来の空中写真のため、サンプル点の周囲についてスキャナで読み込みデジタル化した。林道と平行方向(HZ), および林道と垂直方向(VT)にそれぞれ局所バリオグラムを算出し、その波長を推定し、プロット調査による立木密度から写真上のそのプロット内の立木密度の平均値への、対数軸上での回帰を行った。立木密度は、立木が方形に配置されていると仮定して立木間隔の二乗の逆数として算出した。その結果を図-3 に示す。

HZ と VT では、VTの方が決定係数が高い。これは、林道に垂直に列状伐採が入っている林分があるため、林道に平行な HZ では立木間隔の代わりに伐採列間隔にバリオグラムが大きく反応してしまい、間隔を過大(密度を過小)に推定しているものと考えられる。また、立木密度が高い林分では過小に推定している傾向がある。これは、立木の間隔が狭すぎ樹冠を個体に分解できない場合によるものと考えられるが、このような場合には林冠全体が平らになり、肉眼判読によっても、高密度 LIDAR 観測によっても分別不可能となる。一方、低密度の場合には過大に推定する場合がある。これは、単木樹冠の中の枝を個体として分別してしまう場合があるからである。

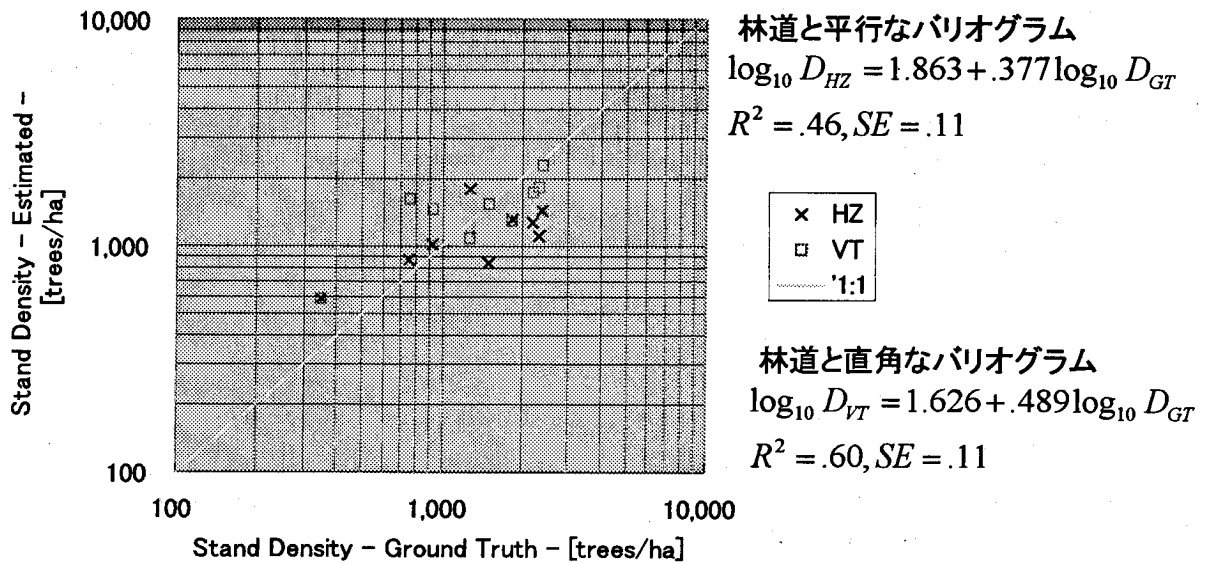


図-3. バリオグラムによる立木密度推定

5. 本研究により得られた成果

(1) LIDAR データより樹冠高を求め、その林分内の第 1 四分位点により林冠高および林分蓄積の推定された。

(2) デジタル林冠画像を用い、サイズ可変バリオグラムを用いて林分の境界に関わらず局地的な立木本数密度を求めた。

6. 引用文献

- 1) Naesset, E., Estimating Timber Volume of Forest Stands Using Airborne Laser Scanner Data, Remote Sensing of Environment 61(2): 246-253, 1997
- 2) Nelson, R., Krabill, W., Maclean, G., Determining Forest Canopy Characteristics Using Airborne Laser Data, Remote Sensing of Environment 15: 201-212, 1988
- 3) Cohen, W.B., Spies, T.A., Bradshaw, G.A., Semivariograms of Digital Imagery for Analysis of Conifer Canopy Structure, Remote Sensing of Environment 34:167-178, 1990
- 4) St-Onge, B.A., Cavayas, F., Estimating forest stand structure from high resolution imagery using the directional variogram, Int. J. Remote Sensing 16(11): 1999-2021, 1995

(B) 亜寒帯林のバイオマス計測に関する研究

1. はじめに

森林蓄積、バイオマス、炭素蓄積、葉面積など植生の定量的な特質を間接的に計測するためのものとも決定的な要因は植生高である。衛星画像ではその情報が欠落し、航空写真ではその判読に多大な手間を要することが、従来のリモートセンシングによる広域的な森林を対象とした精密計測の最大の問題であった。本研究で広域測定の手段としたレーザー航測法は、航空機に搭載したレーザー測距儀で地表植生の縦断プロフィールを計測する新しい遠隔探査技術で、航空機による計測という広域性に加え、高解像度で高精度の植生高が連続して得られるので、リモートセンシングによる森林の計測精度を画期的に改善するものである。研究の対象を亜寒帯林としたのは二つの理由による。第一に、亜寒帯林は地球上もっとも手付かずの状態に残された森林で、人為的な破壊が著しい温帯林や熱帯林に比べ、地球環境資源としての森林本来の特性を知ることができるからである。第二に、亜寒帯林はその南北に位置するプレーリーおよびツンドラとともに、温暖化が特に顕著と予測されている地域であり、温暖化によって植生が姿を変える前の状態を押さえておく事は、今後さらに加速すると予測されている温暖化とその具体的な影響を定量的に把握するために不可欠である。

2. 研究目的

本研究では、航空レーザー測距法による広域的な森林特性測定技術の開発と、北米とシベリア亜寒帯林のバイオマスと葉面積の広域測定を目的とした。亜寒帯林のバイオマスは陸上生態系でもっとも大きな炭素のストックであり、葉面積は陸上生態系と大気間の炭素のフローを決める最大の要因だからである。さらに、樹木の葉は蒸散を通じた水・潜熱の放出により気候に大きな影響を与え、それゆえ葉面積指数という形で温暖化予測の大気大循環モデルにも組み込まれているにもかかわらず、森林の炭素蓄積と同様、広域におよぶ精密な測定はなされてはおらず、その必要性が痛感されている。

3. 研究方法

北米では、カナダ、アルバータ州中部 (53.5° N, 113.5° W) からサスカチュワン州北端 (58.2° N, 109.4° W) に至る南北 600 km のトランセクトを研究の対象とした (図 1)。その南側 1/4 はアスペンパークランドなるプレーリーと亜寒帯林の移行帯、北側 3/4 は純然たる亜寒帯林である。シベリアではその中心部、エニセイ河中流域の支流バクタ川沿いに設けた 200 km のトランセクト (62.5° N, 89.0° E-63.5° N, 92.0° E) を研究の対象とした (図 2)。いずれのトランセクトもまず、航空レーザー測距を行い、詳細な植生プロフィールを得るとともに航跡を確定したうえで、航跡直下に地上検証用のプロットを設けてその立木蓄積、バイオマス、葉面積を実測した。プロットの数 は 20 km に一点を目安とし、北米トランセクトに対しては 30 ヶ所、シベリアトランセクトに対しては 10 ヶ所を取

った。プロットのサイズは、基本的に樹高を一辺とした正方形である。各プロットでは全立木の胸高直径を測定するとともに、4、5本のサンプル木を伐倒し、幹・枝・葉という器官別にバイオマスと葉面積を実測したうえで、これらを併せて胸高直径を独立変数とした単木のバイオマス式と葉面積式を調整した。さらに、これらの回帰式を悉皆調査した胸高直径に適用してプロット単位の値を得たうえで、単位面積あたりの値に変換した。

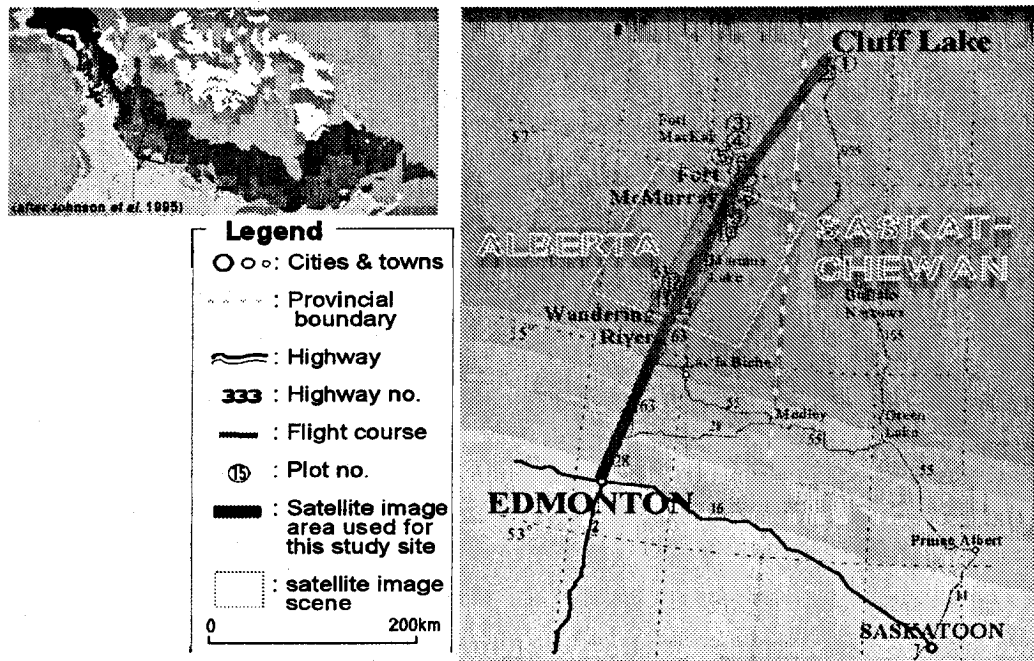


図1 カナダの対象地域： アルバータ州中部-サスカチュ

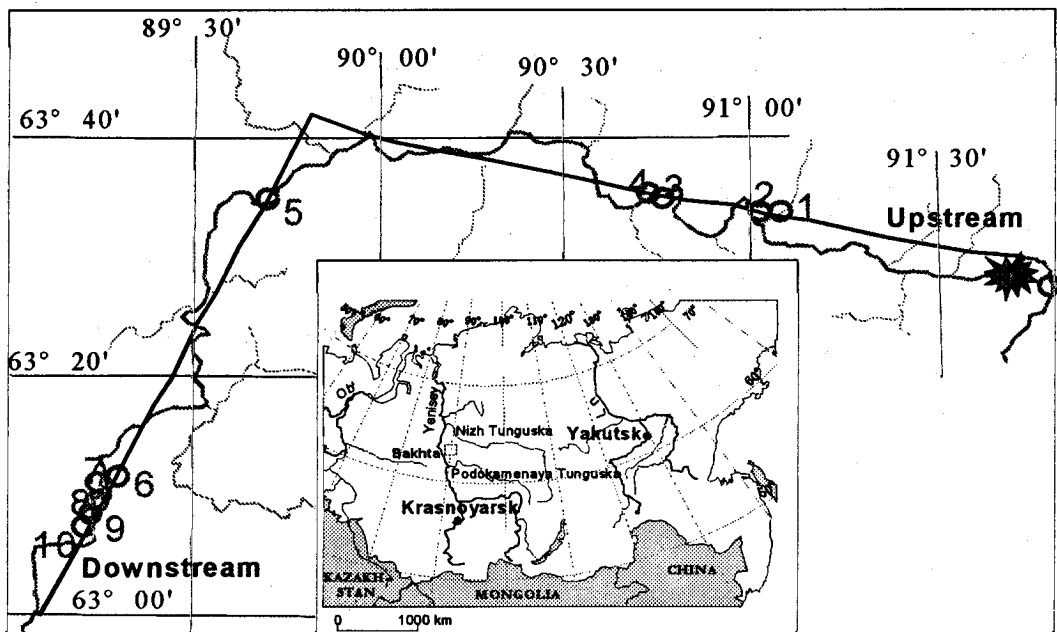


図2 シベリアの対象地域： バクタ川流

これらプロットの実測と航空レーザー測距で得た森林縦断プロフィールの対比からバイオマスと葉面積指数の広域分布を求めたが、前者については積分法と応用標準木法の二通り、後者についてはバイオマス比例法、積分法、平均自由行程法の三通り推定法を開発した。もっとも基礎的な方法である積分法とバイオマス比例法で得た北米トランセクトのバイオマスと葉面積指数の広域分布の結果を図3、4に示した。積分法は、森林バイオマスがプロフィールの積分（断面積）に比例するという原理に、バイオマス比例法は葉面積指数がバイオマスと比例するという原理に基づく。一般に葉面積指数はある限度以上のバイオマスに対して飽和するので、後者の比例関係は一般には成立しないが、北米亜寒帯林の場合、頻繁に起こる自然の火災により森林が若く保たれ、林齢が100年を越えるような林は珍しいので、この比例関係が維持されている。他の広域推定法の有効性を示すため、図5、6に応用標準木法と積分法で求めたシベリアトランセクトのバイオマスと葉面積指数の広域分布を示した。前者は、単木材積と立木密度との積としてバイオマスを求める地上サンプル調査法を理論的に発展させたもので、レーザー航測で得られた森林高のアロメトリー式により単木材積を、レーザー光発信に対する林冠反射の頻度の比から立木密度を求める方法であり、後者は葉面積指数を直接プロフィールの断面積に回帰する方法である。

4. 結果と考察

前述のように、北米トランセクトはアスペンパークランドなるプレーリーと亜寒帯林のエコトーンと亜寒帯林そのものをカバーしているが、広域測定の結果（図3、4）、①アスペンパークランドと亜寒帯林の間には量的にも明瞭な境界が認められること、②アスペンパークランドの主要構成樹種で

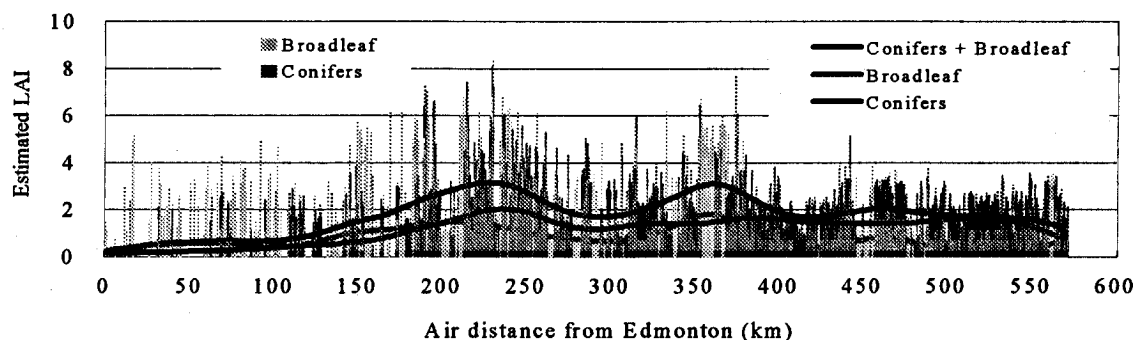


図3 カナダトランセクトのLAI分布

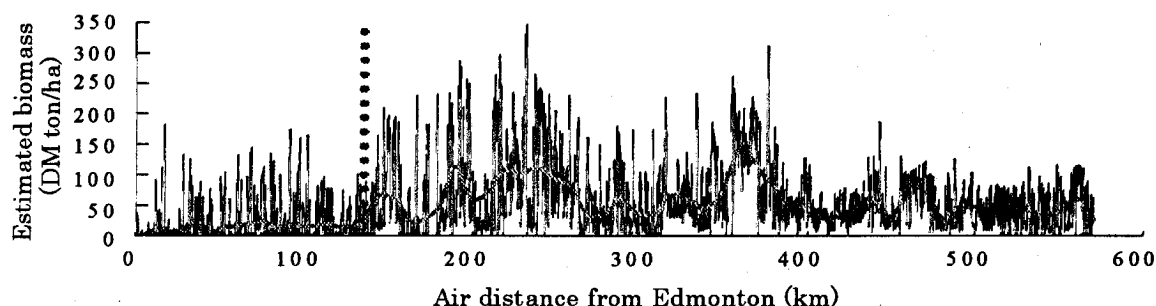


図4 カナダトランセクトのバイオマス分布

ある *Populus tremuloides* は、亜寒帯にも多く存在するが、北に向かうにつれ減少すること、③亜寒帯林のバイオマスとLAIの分布中心は南に偏り、バイオマス・LAIともに分布中心から南北両側に漸減

すること、④亜寒帯林部分の平均バイオマスと LAI がそれぞれ 59.3 乾重 t/ha と 1.96 (無次元) で、プロット測定の単純スケールアップによる従来の推定が過大なこと、などが明らかになった。また、バイオマスと LAI の分布が南北の気温勾配によく追従していることから、温暖化は亜寒帯林の分布を動かすであろうと結論した。他方、シベリアトランセクトにおいては、バイオマスと葉面積指数の分布は北米同様気温の勾配に従うが、他に山頂部と低地平坦部で少なく山腹斜面で大きいという現象を見つけた(図 5、6)。山頂部の貧弱な森林は地球上何処にでも見られる現象であるが、低地の平坦部でも貧弱な森林が現れるという現象はめずらしい。この異様な森林分布は広くシベリアを覆う永久

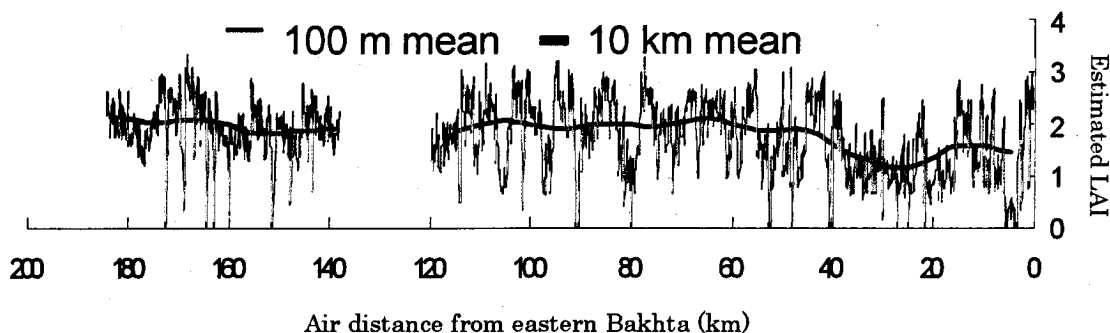


図 5 シベリアトランセクトの LAI 分布

凍土によるもので、水はけのよい山腹斜面では、夏季に融解する活動層の発達が良いのに対し、低地平坦部では悪いために起こると推察した。従って、シベリアでも温暖化は亜寒帯の分布を動かすが、北米の同緯度の森林とは異なり、永久凍土の活動層が深くなるというメカニズムも大きく関与することになると結論した。

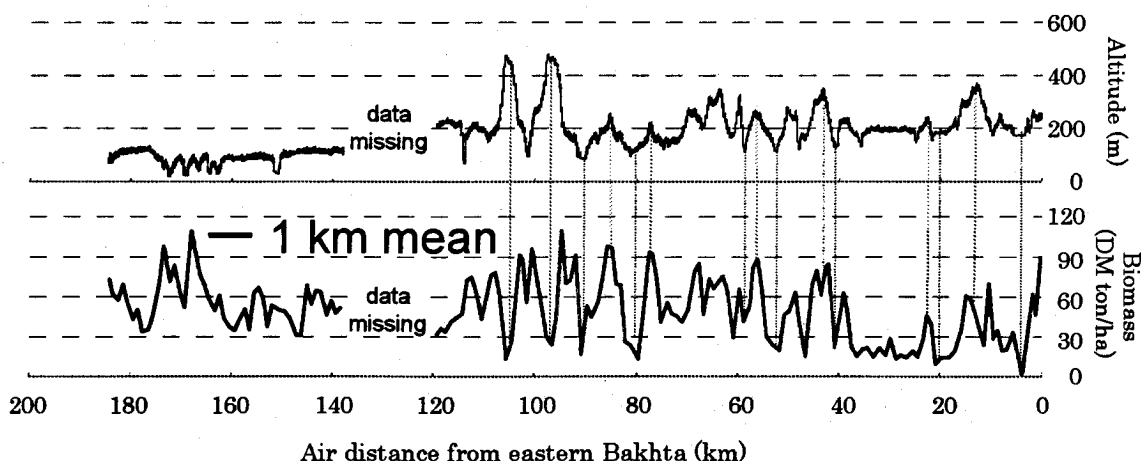


図 6 シベリアトランセクトの地形とバイオマス分

5. 本研究により得られた成果

レーザー光の樹冠遮断を利用した森林高の測定は 1980 年代中葉に北米で始められたものであるが (Aldred & Bonnor 1985)、北米では植生や森林の広域測定は衛星画像に頼る風潮が強く、その後の発

展ははかばかしいとは言えない。近年、地球温暖化にかかわる研究発表が急増している American Geophysical Union においても、2001 年冬季大会では衛星画像解析による植生変化の研究発表が数十件あったのに対し、航空レーザー測距法によるものはわずか4件、うち2件が本グループの発表で、残り2件がアメリカの発表だったが、その内容は小さな林分を対象とした樹高の測定など(Peterson 2001)、いまだ初期の研究の域を脱し得ていなかった。

わが国でも本グループ以外では、この一、二年にやっと長さ数キロの短いトランセクトの森林レーザー航測が始まったところで、いずれも樹高測定など初期的段階を脱し得ていない(山本 2002)。その点、本グループの研究は、①森林高や立木密度などレーザー航測から直接得られる森林要素の測定を超え、バイオマス、LAI、炭素蓄積など最終目的量の推定に至っている、②これらの最終目的量の推定も一通りではなく、複数の異なる方法論を開発し、その相互比較により測定精度を検討し得る状態にある、③測定の対象も短い実験トランセクトではなく、北米とシベリアの亜寒帯林の中心部に数百キロにおよぶ本格的な研究トランセクトを敷設済み、④航空レーザー測距法の欠点である航跡に沿った線状推定を衛星画像の併用により面情報に拡張済みであることなど世界の研究をリードできているものと自負している。

(C) 森林土壌の炭素固定能の評価

1. はじめに

京都議定書において各国の CO₂ 削減割当量の達成に吸収源の吸収量を利用する仕組みが取り入れられた。しかしながら、陸域生態系の炭素循環に関する科学的知見や吸収源による吸収量推定の技術が未熟な現状では、吸収源の取り扱いと吸収量の評価について、様々な問題点が残されており、今後さらに吸収源に関する議定書の解釈、吸収量算定の方法論を中心として国際交渉が継続される予定である。このため、京都議定書の有効性が検証できる、吸収源のより正確な国際的評価システムの確立が求められている。この中でも、特に人為活動がどの程度炭素収支に貢献するかを検討することが急務である。陸域生態系の炭素循環の中で、土壌中の炭素動態は重要なプロセスである。土壌中の炭素収支は環境条件の変化、とりわけ人為による生態系の攪乱と土地利用の変化に著しく影響される。このため人為活動が、森林土壌中の有機物の移流、拡散および集積過程に与える影響を解明し、森林土壌中の炭素動態を正確に評価・予測する必要がある。特に、京都議定書に定められた炭素吸収源としての森林の役割の中で、最も期待されるのが新規造林である。植林活動によって森林土壌に固定される炭素の動態が注目される中、畑地など森林以外の土地利用形態を森林に転換した場合の土壌中の炭素動態を明らかにし、土壌炭素増加量を評価することが重要である。そのためには日本の森林土壌に適した精度の高い評価・予測ができる土壌有機物動態モデルが必要である。

2. 研究目的

本研究では京都議定書3条3項の「新たな活動が炭素吸収や排出抑制にどのくらい貢献しているか」および4項「森林土壌の炭素固定機能」について、森林土壌の炭素貯留がどの程度貢献するかを明らかにするために、人為活動による土地利用の改変としての新規植林および伐採・植林に伴う森林土壌の炭素動態の実態とその評価法を検討する。具体的には、畑地や土砂災害後の無立木地への新規植林

による土壌炭素の蓄積速度について実態調査から推定する。その結果を参考に、既存の土壌炭素動態モデルについて検討し、日本の森林土壌に適合した土壌炭素動態モデルを選定する。

3. 研究方法

(1) 植林にともなう土壌炭素蓄積の実体調査

ヤマハンノキおよびサワラ緑化植栽後 12 年目の御岳岩屑流堆積地、山梨県森林総合研究所苗畑のスギ(2 年生)および、同富士吉田支所内苗畑のアカマツ(3 年生)、広葉樹(6 年生)、ヒメコマツ(18 年生)、スギ(33 年生)の各植栽地、さらに森林総合研究所千代田試験地苗畑のスギとヒノキ(幼齡、10 年生、25 年生)の植栽地、畑地、草地において土壌の炭素蓄積量の実体を調査し、森林成立に伴う変化を解析した。

(2) 土壌炭素動態モデルの検討

実態調査で得られた結果を基に既存の土壌炭素動態モデル CENTURY について、日本の森林土壌への適合性を検討した。また、体積有機物層の分解を中心に、モデルに必要なパラメータについて検討を行った。この結果からモデルの構造の基本的な方針を決定した。

4. 結果・考察

(1) 植林にともなう土壌炭素蓄積の実体調査

いずれの調査地においても、植栽後の年数が経過した土壌で炭素蓄積量が多い傾向となり、新規植林による土壌への炭素貯留が認められた。緑化植栽後 12 年目の御岳岩屑流堆積地の場合、細土の炭素含有率は全体で 0.4~1.7% の範囲にあり、深くなるほど含有率は減少していく傾向にあった。岩屑流の細土画分の炭素含有率が 0.4% と仮定すると、土壌炭素貯留量は 12 年間でサワラ植栽列が 8.1MgC/ha、ヤマハンノキ植栽列が 7.7MgC/ha ほど増加したと推定された。また、土壌中の細根の量は細土画分の炭素貯留量の増加分に匹敵するほど存在していた。山梨県の苗畑の場合は、有機炭素蓄積量は植林後 5~10 年までは急速に増加し、その後は植栽年数とともにゆるやかに増加していく傾向が見られた。植林後初期の土壌炭素蓄積速度は非常に大きかった。有機炭素が急速に蓄積した理由は、調査地の土壌が有機物含量の少ない B 層土壌なので、リターフォールや枯死根など植物由来の有機物が土壌に速やかに吸着されるためと考えられた。千代田試験地苗畑の場合も、土壌表層の炭素含有率はスギ、ヒノキとも植栽してから時間が長く経過している林分ほど大きかった(図 1)。また、幼齡林と畑地および草地の土壌表層炭素含有率にはほとんど差がなく、炭素貯留量にも差がみられなかった。25 年間の平均炭素貯留量を計算すると、スギ林で $54\text{g C m}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 、ヒノキ林で $24\text{g C m}^{-2}\text{yr}^{-1}$ となり、植林によって炭素貯留量が増加していることが明らかとなった。

(2) 土壌炭素動態モデルの検討

森林土壌の炭素蓄積に大きく影響するパラメータとして堆積有機物層(Ao 層)を検討した。Ao 層の存在は森林土壌の特徴であり、環境変動や人為影響を顕著に受ける炭素貯留形態である。A0 層の堆積重量とその炭素貯留量は 2 次式で近似できた。新鮮落葉の炭素量はほぼ 50% であるが、その分解の仕方により炭素濃度は異なり、分解が速い場合は炭素濃度が低く、分解速度が遅く厚い Ao 層は炭素濃度が高い傾向となった。主要樹種の Ao 層炭素貯留量(MgC/ha)は 2.2 (ヒノキ林)~21.4 (本州亜高山針葉樹林)と森林タイプにより大きな差が見られ、寒冷な地域で貯留量が多い傾向を示した。

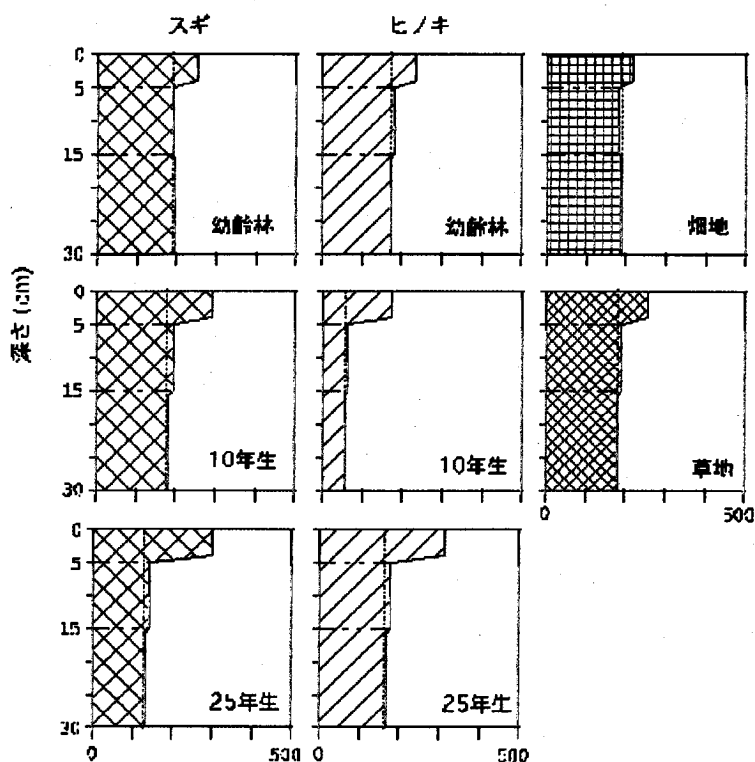


図1 林齢、植生による土壌炭素蓄積量($\text{gC m}^{-2} \text{cm}^{-1}$)の違い

さらに、A0 堆積量を動的平衡と仮定して、A0 層炭素貯留量と一般的なリターフォール量の集計データ 1), 2) を用いて、A0 層の分解速度の指標となる分解係数を試算した。その結果、分解速度はヒノキ、照葉樹>クロマツ、スギ、ミズナラ>落葉広葉樹、北方人工林>亜高山、北方天然林の順で小さくなり、樹種による変異が大きく、針葉樹人工林の落葉は分解しやすい傾向となった。寒冷地で分解率が小さい傾向があることは、リターフォール量が寒冷地で多い傾向はないことから、温度条件が有機物分解に大きく影響していることを現している。既存の土壌炭素動態モデルについて検討を行い、その中から特に CENTURY³⁾ について日本の森林土壌への適合性を検討した。実態調査を行った御岳岩屑流堆積地における緑化植栽後 12 年目の土壌炭素貯留の結果を使い、植林初期の土壌有機物動態について CENTURY モデルによる計算を行い、その結果を実際のデータと比較した。計算の結果、12 年間で植物遺体を含む土壌炭素の総量は 1.4 Mg ha^{-1} の増加となった。実測値による計算では約 8 Mg ha^{-1} の増加なので、1/5 以下の過小評価であった。計算に必要なパラメータから、日本において地域や樹種により大きく変化すると考えられるものを選択し、その値最大値もしくは最小値近くに変化させることにより、土壌炭素の増加傾向の違いを調べ、モデルの中でどのパラメータが土壌炭素動態に大きく影響するか検討した。しかし、パラメータの変化では実測値に近い計算結果を出すことはできなかった。また、入力するパラメータや初期値がこれまで日本の森林で一般に実測されてきたものだけでは間に合わず、より多くのデータが必要であった。これらの結果から、CENTURY のような既存のモデルを京都議定書対応として日本の森林土壌に適用することは困難であると判断し、よりシンプルで、短期間の評価に適したモデルを開発することとした。短期間の人為影響の評価という目的と、行政からの限られた情報という制約を考慮し、パラメータを極力減らし、変化の大きい土壌最表層だけを対象とし

た単純な構造とした(図 2)。基本的な骨格はリターの供給と分解、土壌有機物の供給と分解のみの単純なものである。今後は実測値との比較からパラメータの細部を詰める必要がある。

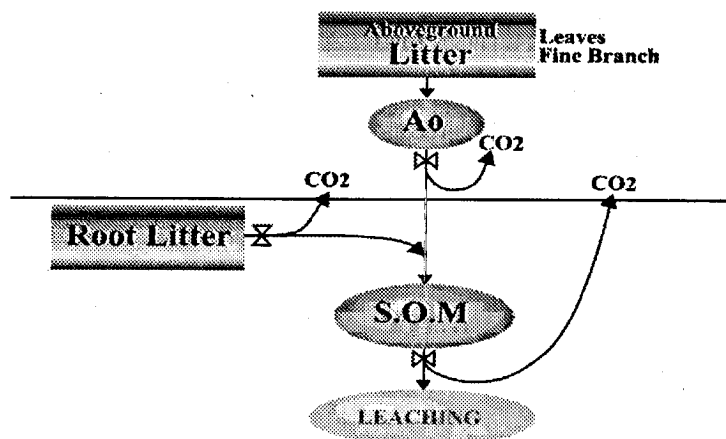


図2 モデルの骨格

5. 本研究により得られた成果

新規植林にともなう土壌炭素蓄積の実体調査では、植栽後の年数が経過した土壌で炭素蓄積量が多い傾向となり、新規植林による土壌への炭素貯留が認められた。特に、植林後初期の土壌炭素蓄積速度は非常に大きいことが判明した。土壌炭素動態モデルの検討では、堆積有機物層の分解が温度条件に大きく影響されていることが判明した。既存のモデルでは実測値に近い計算結果を出すことはできず、京都議定書対応として日本の森林土壌に適用することは困難であると判断された。短期間の人為影響の評価という目的と行政からの限られた情報という制約を考慮し、パラメータを極力減らし、変化の大きい土壌最表層だけを対象とした、リターの供給と分解、土壌有機物の供給と分解のみの単純な構造のモデルを提案した。

6. 引用文献

- 1) 堤利夫(編) 1989 森林生態学 朝倉書店 166pp
- 2) 斉藤秀樹 1981 森林におけるリターフォール研究資料 京都府立大学農学部演習林報告 25 78-89
- 3) Parton, W. J., Schimel, D. S., Cole, C. V. & Ojima D. S. 1987 : Analysys of factors controlling soil organic levels of grassland in the Great Plains. Soil Sci. Soc. Am. J 51, 1173-1179

(D) 林業統計からみた我が国の炭素蓄積量

1. はじめに

森林は二酸化炭素を吸収し炭素として蓄える機能を持ち、地球温暖化を防止する役割を担っていることから、京都議定書への対応をはじめとして、森林の炭素蓄積量や吸収量を正確に把握することの重要性はますます高まっている。その推定手法の中でも代表的な方法である林業統計に基づく手法に注目し、これについて検討を行った。

2. 研究目的

森林の炭素吸収量の推定については様々な方法があるが、迅速かつ低コストな推定方法としては既存の森林・林業に関する統計情報を利用した手法は現実的なものである。しかし、同時に解決すべき問題点もあり、その指摘と改善を試みた。

3. 研究方法

林業統計から炭素量への換算に関わる基礎式について、その変数、パラメータについて検討し、その問題点と改善案を提示した。また、改善案に従い、改めて森林による炭素蓄積量および炭素吸収量の推定を行った。これらの結果に関連して、林業統計をさらに効果的に活用するための方策について考察した。

4. 結果と考察

(1) 林業統計と炭素量推定の基礎

わが国において国家レベルの炭素量推定に利用される林業統計は、10年ごとに行われる世界農林業センサス（以下、林業センサス）と、おおよそ5年ごとに発表される林野庁による森林資源現況の2つである。森林の炭素量推定のために林業統計を用いる場合、もともと林業用に収集・集計された材積量から炭素量への変換計算が不可欠となる。このことが林業統計を用いる場合の最も大きな特徴といえることができ、利点も問題点も多くはここに起因している。基本的に材積量から炭素重量への変換は、基本的に以下の計算式で行われる。

$$\begin{array}{ccccccc} \text{炭素重量} & = & \text{材積量} & \times & \text{拡大係数} & \times & \text{容積密度} & \times & \text{炭素含有率} & (1) \\ (t) & & (m^3) & & (m^3/m^3) & & (t/m^3) & & (m^3/m^3) \end{array}$$

ここで、拡大係数は幹材積と枝葉根を含めた林木全体の材積の比を表す。一般に使われている拡大係数の値は、針葉樹では1.7、広葉樹では1.8前後である。容積密度は体積1 m³あたりの乾重量を表し、これにより材積量から重量へ換算される。日本における主要樹種の容積密度の平均値は0.45 t/m³であり、針葉樹の容積密度の平均値では0.38 t/m³、広葉樹で0.49 t/m³である。¹⁾また、炭素含有率はバイオマス乾重量に対する炭素量の割合を表している。炭素含有率としては樹種に関わらず一般的

に 0.50 とされている。

(2) 問題点と改善方法

林業統計を用いた推定手法に対しては、換算式のパラメータの確定の難しさ、森林計画対象地を森林としている林業統計と森林被覆を森林としている COP や IPCC²⁾における定義の違い、といった問題点があげられる。これに対し以下のような改善を検討を行った。パラメータの中でその確定が最も難しいのが拡大係数である。森林生態学では成長に伴いに各部位の比率が変化することが知られていることから、拡大係数も変動することになる。³⁾このことから、スギ・ヒノキ林を対象に林齢と部位別割合の関係を元に、年齢級を変数として拡大係数を推定する拡大係数モデル(図 1)を求め、換算式に利用することとした。

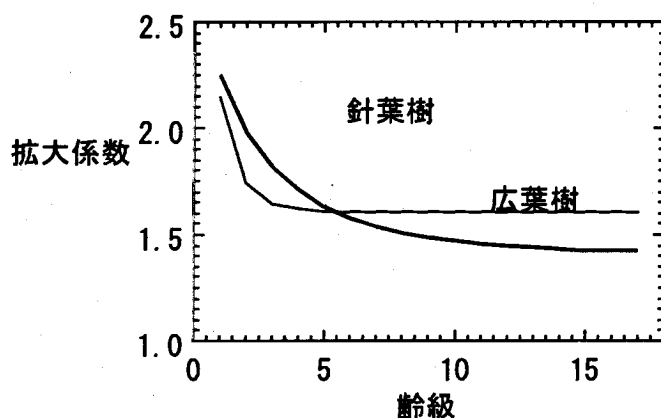


図 1 拡大係数モデル

森林の定義に関しては、国土数値情報と林業統計の比較により対処した。国土数値情報の一つである土地利用面積ファイルには約 1km 四方に当たる 3 次メッシュを単位として森林面積が記載されている。ここでの森林の定義は森林被覆に基づいたもので、COP や IPCC の定義に相当するものである。この比較の結果、土地利用面積ファイルにおける森林面積は、林業センサスの森林面積より 6.3% 多かった。したがって、林業情報における森林面積にその 6.3% を加算することにより、COP や IPCC における森林の定義に相応した森林面積を推定することができる。

また、森林資源現況から年齢別 ha 当り蓄積を求め、その値に理論的成長曲線の 1 つであるゴンペルツ曲線を当てはめたと、全体として良い当てはまりが得られた。この成長曲線の当てはめから、林業統計においては幼齢林の材積において過小に計上されている傾向が見られた。この成長曲線はわが国の森林における標準的な成長曲線ということができ、幼齢林の過小評価の修正に役立ち、さらにこれにより森林による炭素吸収量の推定も併せて可能となる。

(3) 改善手法による推定結果

以上の改善を加え、1995 年における林業統計（森林資源現況）⁴⁾を利用して、改めて森林炭素蓄積・吸収量を推定した。その結果、わが国の森林炭素蓄積量は 12 億 4 千万 t、炭素吸収量は 3140 万 t と推定された。森林炭素蓄積量の内訳を見ると人工林が 5 億 8 千万 t、天然林が 6 億 6 千万 t であり、炭素吸収量は人工林 2370 万 t/年、天然林 770 万 t/年であった。ここで推定された森林炭素吸収量 3140 万 t/年には伐採による炭素排出が含まれておらず、正味の炭素吸収量ではないことに注意する必要がある。1995 年の伐採量から換算すると、伐採による炭素排出は 890 万 t/年と推定され、⁵⁾したがって、正味の炭素吸収量はそれらの差である 2250 万 t/年と推定された（図 2）。

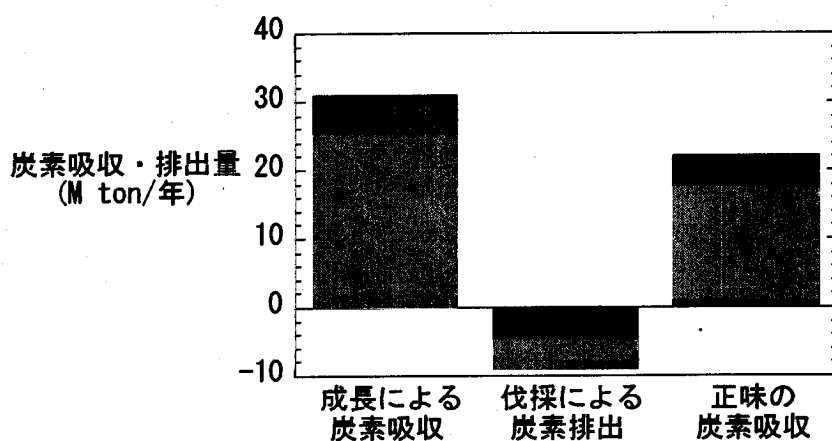


図 2 改善された推定手法による正味の炭素吸収量

（4）さらに林業統計を活用するために

林業統計の利用に関して改善を試みたが、未だ残されている問題点は少なくはない。特に今後は COP、IPCC といった対応のため、数値のみならず精度についても併せて提示することが求められてくるだろう。

このような問題に対する効果的な解決策の一つは、林業統計と他の調査手法や情報との連携を取ることである。リモートセンシング、標本調査、そして国土数値情報のような別個の情報の活用は、林業統計の性格や精度を検討する上で重要である。これらはお互い相反するものではなく、林業情報を利用した森林炭素量の推定精度を導き、さらにその改善に結びつけることができるだろう。そして、根本的には森林情報、特にその基盤となっている森林簿情報の精度の向上が求められる。

5. 本研究により得られた成果

林業統計を利用した森林の炭素吸収量の推定手法について、その問題点を整理し、改善案を提示した。その改善手法により改めて森林炭素蓄積・吸収量を推定した。1995 年現在、わが国の森林炭素

蓄積量は12億4千万t、正味の炭素吸収量は2250万t/年と推定された。また、林業統計を活用するための方策として、リモートセンシングなど他の調査手法や情報との連携を取ることが効果的である点をあげた。これらの成果は、今後COPおよびIPCC対応を進めていく場合、我が国の情報と推定手法が持つ特徴を正しく認識するために有効な成果となる。

6. 引用文献

- 1) 林業試験場 (1982) 木材工業ハンドブック, 丸善
- 2) IPCC(1996) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual, IPCC
- 3) 福田未来・家原敏郎・松本光朗 (2001) スギ、ヒノキでの林齢による部位別現存量割合の評価, 日林学術講 112, 185
- 4) 林野弘済会 (1972, 1982, 1992) 林業統計要覧 時系列版, 林野弘済会
- 5) 林野庁 (2000) 林業統計要覧 2000, 林野弘済会

(E) 森林生態系バイオマス量の推定モデルの開発

1. はじめに

森林の炭素吸収量を推定するためには、全国規模での検証可能なモデルの開発が必要である。その際、(a)数少ない地点で収集した詳細なデータをもとに精密なモデルを構築し、その結果を全国規模に拡張するアプローチと、(b)全国に及ぶ林分調査データを収集し、簡素であるが、多数の地点で検証可能なモデルを開発するアプローチの2つが考えられる。(a)については、選定した地点が平均的な吸収量を示すことを確認したうえで全国規模の推定を行う必要があるが、平均的な吸収量を確認するためには全国にわたるデータが必要である。さらに、Desanker et al. (1996) によれば、実測値に近い推定をするためには、複雑なモデルを用いる場合も地域ごとの補正が必要である¹⁾。したがって、本課題では後者のアプローチの方がより実用的であると判断し、簡素なモデルの構築を試みた。

2. 研究目的

森林による炭素吸収量は林分面積あたりの材積成長量をもとに推定することができる。そこで、全国各地にまたがる林分調査データを収集し、広域的に材積成長量を推定するためのデータベースを構築した。このデータベースをもとに炭素吸収量を推定する簡便な方法の一つは、全国をいくつかの地域に分けて材積成長量の平均値を算出することである。ただし、この推定が有用であるためには調査地点が平均的な立地条件に分布している必要がある。そこでまず調査地点の標高を県別に比較した。もし有意な差が示されれば、調査データの平均値をもとに炭素吸収量を推定することによってバイアスが生じるので、何らかのモデルにもとづいて補正する必要がある。次に、この点を確認したうえで、材積、気温、降水量、純放射量などを用いた重回帰分析にもとづくモデルを作成した。ここで、気候条件のみを用いたのは、土壌条件に関する有用な情報はきわめて限られ、データベースを構築するには不十分であるためである。最後に、回帰モデルの問題点を検討したうえで、既存のプロセスモデルの利用可能性を検討し、回帰モデルを組み合わせたハイブリッドモデルを構築した。

3. 研究方法

(1) 国有林収穫試験地（以下N試験地）、林野庁による民有林調査地（P調査地）及び酸性雨モニタリング調査プロット（S調査地）における林分調査データ及び2次メッシュ気候データ（10kmグリッド単位の月別気温、降水量、純放射量）をもとに、都道府県別にデータベースを構築した。そして、林分調査地の標高分布を確認するため、都道府県ごとに2次メッシュ気候データの標高との比較を行った。

(2) 気温、降水量、純放射量などをもとに、一斉林の材積成長を林分単位でシミュレーションするための簡便なモデルを作成した。そして、日本海側を北九州（福岡、佐賀、長崎）、山陰（兵庫北部～山口）、北陸（新潟～京都北部）、西東北（秋田、山形）、太平洋側を東東北、関東、東海・南近畿（静岡～和歌山）、南四国・南九州に分けて、各プロットでのスギの成長量を推定した。その際、各試験地における材積成長の推定値と最も近いグリッドの気候データを用いて重回帰分析をもとに係数値を決定した。

(3) いくつかのプロセスモデルを検討し、ハイブリッドモデルの骨格とパラメータを決定した。次に、N試験地のデータを用いてハイブリッドモデルのパラメータの係数を決定するとともに、問題点と今後の改良すべき点について考察した。

4. 結果・考察

(1) データベースの構築とモデルの必要性

林分調査データは、平均樹高、ha当たり断面積、本数、材積、林齢などから構成されている。異なる時期の調査データが利用できれば、差分によって材積成長量を直接推定することが可能であるが、P調査地とS調査地での利用可能な調査データは1時期のみである。さらに問題な点は、いずれの調査データにおいても除伐・間伐量が記録されていないので、これらのデータから材積成長量を推定すると、除伐・間伐量が大きい調査地の成長量が過小に評価されることになる。これらの問題を解消するために、異なる調査時期の間の伐採量が記載されているN試験地のデータを用い、材積と平均樹高、ha当たり断面積、本数、林齢の間の関係を統計的に解析した。その結果、林分平均樹高のみで材積（樹幹蓄積量）を以下の一次式で推定できることがわかった。

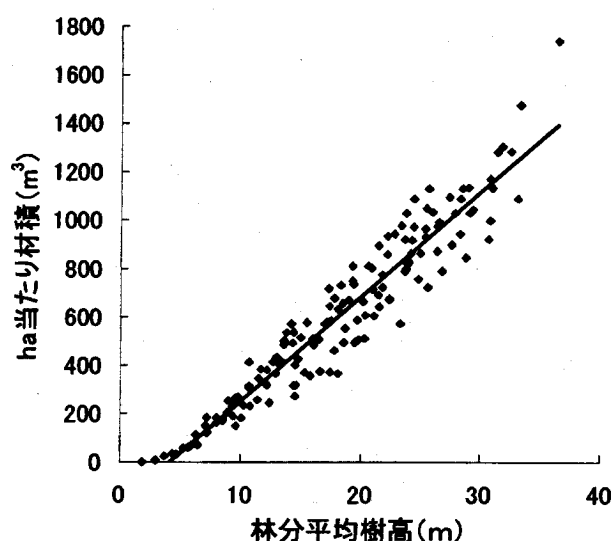


図1 平均樹高と材積との関係

$$\text{ha 当たり材積}(V) = 43.2 \times \text{林分平均樹高}(H) - 179.4 \quad (R^2 = 0.91)$$

(ただし、樹高 12m 以下のとき、 $V^2 = 3.01H^2 - 3.96H$ を用いる)

次に、林分調査地の標高分布を調べたところ、南関東・東海と近畿以西に位置する県では調査地の標高が相対的に高く、北に位置する県では相対的に低い傾向が明らかであった。気温は標高にかなり左右されるので、気温が成長量に影響するならば、調査データの平均値をもとに炭素吸収量を推定すると一定のバイアスを生じるおそれがある。したがって、このようなバイアスを補正するためのモデルを準備することが必要である。さらに、林分調査データと気象データを整理したところ、成長量を推定するためのモデルを構築する際、以下の点に留意すべきであることが示された。

- (a) 成長期は低緯度地域の方が長く、光合成量は潜在的に低緯度地域の方が大きい。
- (b) 気温は概して低緯度地域の方が高いので、呼吸量が多い。
- (c) 成長期の降水量は、低緯度地域の方が大きい。
- (d) 材積成長量の指標となる樹高に関して、低緯度・高緯度間で有意な差はない。

以上のことから、土壌条件に特に大きな違いがなければ、概して低緯度地域で呼吸量が多いこと、地域によっては蒸発散量が多いこと（水分ストレス）が成長量に影響していると考えられる。

(2) 重回帰モデル

P及びS調査地のデータは継続的に測定されたものでないため、各プロットにおける成長量を直接計算することができない。そこで、任意に区分した地域内のデータを用いて樹高と材積の関係を直線または二次曲線で回帰し、各プロットにおけるha当たり材積を樹高から推定した。また、同一のデータセットを用いて各地域内での林齢と材積の関係をロジスチック曲線または直線で回帰し、平均的な成長曲線とした。

次に、以下の関係式から各プロットにおける材積成長量を推定した。すなわち、

$$\text{年成長量} = (\text{プロットの材積推定値}) / (\text{プロットと同一林齢の平均材積}) \\ \times (\text{プロットと同一林齢での平均年成長量})$$

さらに、月別気温を標高補正し、成長期（気温5度以上の期間）降水量を算出したうえで、筑後モデル（内嶋・清野，1985）にもとづく乾燥度指数を導入したモデルを作成した。すなわち、

$$\text{成長量 } dV/dt = A \cdot f_1(V) \cdot f_2(WI) \cdot f_3(R) \cdot \exp(-\delta(R/P)^2)$$

（Vは材積，WIは温量示数，Rは純放射量，Pは成長期降水量， $\exp(-\delta(R/P)^2)$ は乾燥度指数，Aおよび δ は定数）

ここで、 $f_1(V)$ 、 $f_2(WI)$ 、 $f_3(R)$ については、 $(R/P)^2$ を含む重回帰式を作成することによって係数を決定した（ $f_1(V) = \alpha(b-V)V$ 、 $f_2(WI) = \beta(a-WI)WI$ 、 $f_3(R) = \gamma R$ ）。その結果（表1）、日本海側北部では気温と降水量、日本海側南部では純放射量が成長量と有意な相関を持つことが示された。また、乾燥の影響は山陰・北九州のみで有意であると推定された。各地域内での成長量を推定する際には、成長量に対して有意な相関を持つ気候要因の偏回帰係数を用いればよい。たとえば、西東北であれば、
成長量 $= 8.83 \times 10^{-3} \cdot V^{0.657} \cdot (1148 - V)^{0.661} \cdot WI^{-0.998} \cdot Pg^{0.515}$ となる。

表1 各地域における成長量と気候要因との回帰分析

	偏回帰係数 β						定数	
	WI	a-WI	Pg	Rn	$(R/P)^2$	V	b-V	
西東北 n = 100, R = .843	-.998*	—	.515**	—	—	.657** (b=1148)	.661**	-4.73
北陸 n = 157, R = .653	-5.19**	-6.22* (a=232)	1.66**	—	—	.576** (b=1741)	.771*	35.2
山陰・北九州 n = 127, R = .509	-2.34**	—	—	2.51*	-912	.475** (b=980)	.510**	-1.72
東北 n = 229, R = .471	—	—	-.878**	—	—	.517** (b=1328)	.487**	2.08
関東 n = 221, R = .473	-2.50**	—	—	1.64	—	.371** (b=1051)	.576**	2.08
東海・南近畿 n = 148, R = .332	-.597	—	-.375*	—	—	-.131	—	8.82
南四国・南九州 n = 92, R = .493	—	—	—	—	-730*	.459** (b=1406)	.513	-3.10

WI：温量示数（℃），Pg：成長期降水量（mm），Rn：成長期純放射量（kWh/m²）

（これらは、5度以上の月について総和したもの；ただし後2者は日補正した値を用いた）

（R/P）²：乾燥度，V：材積，a，b：定数，**，*：それぞれ1%，5%の有意性を示す）

(3) ハイブリッドモデルの構築

回帰モデルは一定地域内で林分調査データが存在しない区域における成長量を推定したり、調査地点の立地条件の偏りを補正したりするのに有効な手法である。しかし、外挿できないため、高緯度域での高標高地点、低緯度域での低標高地点などにおける推定値を得るのには不向きである。そこで、以下の手順でハイブリッドモデルを作成した。まず既往のいくつかのモデル²⁾³⁾⁴⁾をもとに、

材積成長量（調査地での林分平均成長量）

= 係数×光合成日数×水分ストレス×（純放射量と光利用率）

－係数×（葉量と気温からなる呼吸関数）－係数×（材積と気温からなる呼吸関数）

＋定数

という基本形を作り、等式の左辺を従属変数、右辺側を独立変数項とみなして、重回帰分析によって係数を求めた。光合成日数は日平均気温 5℃以上の日数、水分ストレスは筑後モデル⁵⁾のパラメータを用いた。重回帰分析に用いた式は以下のとおりである。

成長量 = 係数 A × $f(R_n, r) \times (1 - \exp(-0.25 \times \text{葉量 } t/\text{ha})) \times \text{成長期純放射量}$

－（係数 B × 葉量 + 係数 C × 材積）×呼吸係数×月平均気温℃

＋定数項

（呼吸係数 = $\exp(\ln Q_{10}(t)/10.0)$, $Q_{10}(t) = 2.35665 - 0.05308 \times T + 0.00238 \times T^2 - 0.00004 \times T^3$ (T = 気温℃); $f(R_n, r) = \exp(-0.216(RDI)^2)$ は放射乾燥度 $RDI = R_n/I_r$ にもとづく制限関数, 水の蒸発潜熱 $I = 597.31 - 0.563T$ (蒸発面の温度), 純放射量 R_n , 降水量 r (cm))

また, Cannell⁶⁾または福田ら⁷⁾のデータをもとに材積から葉量を推定した。

$L' i = 100 - 91.4(1 - 0.503 \times \exp(-0.0981 i))$

$V' i = 85.2(1 - 0.585 \times \exp(-0.108 i))$

林齢 i における葉量 $L i$ = 変換係数 × 材積 $V i \times L' i / V' i$

($L' i$: 林齢 i における葉量の総バイオマスに対する割合 (%), $V' i$: 材積 $V' i$ (%))

最後に, N試験地 22 地点における異なる林齢の総計 222 のデータをもとに係数を決定した。その結果, 成長量は水分ストレスを除いた光合成のパラメータと呼吸係数との間で有意な相関が得られ, 以下の式が導き出された。葉量と材積を用いた呼吸量のパラメータが有意な相関を持たなかったことは, 呼吸量を推定する際に両者を分けることに有意性がないことを示している。

成長量 = $0.85 \times (1 - \exp(-0.25 \times \text{葉量 } t/\text{ha})) \times \text{成長期純放射量}$

－ $1.22 \times \exp(\ln Q_{10}(t)/10.0) + 28.55$

計算結果の一部を図 2 に示す。低緯度域は光合成量が大きい, 呼吸量も大きいことから, 成長量が低緯度に行くにしたがって大きくはならないことがわかる。なお, 今回は用いたデータの地点数が少ないので, 得られた式を用いて広域にわたる推定を行うには不十分である。今後, P調査地やS調査地など, 多地点のデータを用いて式を算出することが必要である。

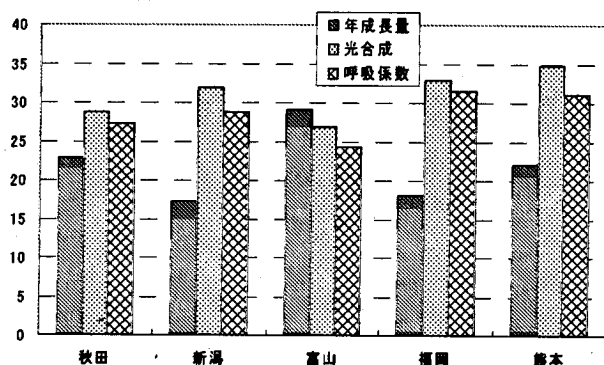


図2 地域別に見た40年生での年成長量、光合成指数、呼吸係数の比較(3つのパラメータの単位は互いに異なる)

5. 本研究によって得られた成果

- (1) 森林による炭素吸収量の推定について、より正確な推定値を得るためにはモデルによる補正が必要であることがわかった。
- (2) 一定地域内での炭素吸収量を推定するための回帰モデルを開発した。
- (3) 回帰モデルでカバーできない地域での炭素吸収量を推定するためのハイブリッドモデルを開発した。

6. 参考文献

- 1) Byrne, G. F., Landsberg, J. J. and Benson, M. L. (1986) The relationship of above-ground dry matter accumulation by *Pinus radiata* to intercepted solar radiation and soil water status. *Agriculture and Forest Meteorology* 37, 63-73.
- 2) Cannell, M. G. R. (1982) *World Forest Biomass and Primary Production Data*. Academic Press, London, 391pp.
- 3) Chiba, Y. (1998) Simulation of CO₂ budget and ecological implications of sugi (*Cryptomeria japonica*) man-made forests in Japan. *Ecological Modelling* 111, 269-281.
- 4) Desanker, P. V., Reed, D. D. and Jones, E. A. (1996) Evaluating forest stress factors using various forest growth modeling approaches. *Forest Ecology and Management* 69, 269-282.
- 5) 福田未来・家原敏郎・松本光郎 (2001) スギ、ヒノキでの林齢による部位別現存量割合の評価. 第112回日本林学会学術講演集, 185.
- 6) McGuire, A. D., Joyce, L. A., Kicklighter, D. W., Melillo, J. M., Esser, G. and Vorosmarty, C. J. (1993) Productivity response of climax temperate forests to elevated temperature and carbon dioxide: a North American comparison between two global models. *Climatic Change* 24, 287-310.
- 7) 内嶋善兵衛・清野 裕 (1985) 日本における自然植生の純一次生産力の分布. 農林水産会議事務

(F) 木材部門における炭素固定能力の評価

1. はじめに

新規造林等の余地がほとんどない我が国においては、二酸化炭素吸収は持続的な木材生産が行われている森林でしか起こらない。木材利用による二酸化炭素削減効果については IPCC レポート等に詳しいが、特に木材製品の耐久的利用による炭素貯蔵効果については 2002 年からその評価手法等を巡って本格的な交渉が始まる予定であり、各国が数値の報告を求められている。エネルギー集約的な他材料代替による省エネ効果については議論が成熟していないが、化石エネルギーの代替効果については、我が国でも遅ればせながら本年より新エネルギーの中に木材等のバイオマスエネルギーが位置づけられた。本研究ではこれら木材利用の効果について評価することを試みた。

2. 固定資産調書による建築物中木材炭素量の評価

(1) 研究目的

建築部門は 1998 年の推計¹⁾で紙パルプを除く、製材・合板などの木材一次製品の約 71%が出荷され、製品である建築物の耐用年数が長期にわたることも含めて、木材の耐久的利用の内で最大のものである。各年における建築物中の木材炭素ストックの変動量を定量的に評価するためには、以下の二つの手法が考えられる。

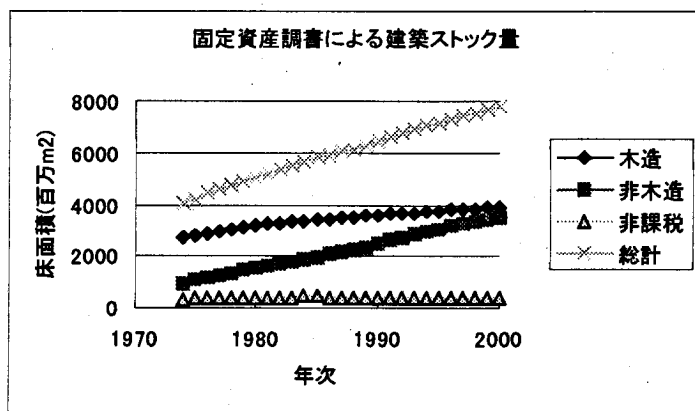
$$\text{建築物中木材炭素ストック変動量}(t-C) = \text{工法別建築ストック変動量}(m^2) \times \text{工法別木材使用量}(m^3/m^2) \times \text{木材中炭素量}(t-C/m^3) \text{ --- (1)}$$

$$\text{建築物中木材炭素ストック変動量}(t-C) = (\text{建築用木材製品投入量}(m^3) - \text{新築・解体木材廃棄量}(m^3)) \times \text{木材中炭素量}(t-C/m^3) \text{ --- (2)}$$

既報²⁾では(1)式の「工法別建築ストック変動量」について、1996 年の「建築統計年報」から木造・非木造の着工量と滅失量の差をとって算出した。しかし滅失量については無届けの除却が相当量にのぼり、信頼性が低いことが明らかで、大きな誤差要因となっている。

「工法別木材使用量」については各種調査結果を示したが、十分なサンプリングといえるかは疑問が残り、結果のばらつきが大きいこととともに、建築年代による投入量の変化が存在していることを指摘した。

また(2)式の「建築用木材製品投入量」について 1997 年の「木材需給

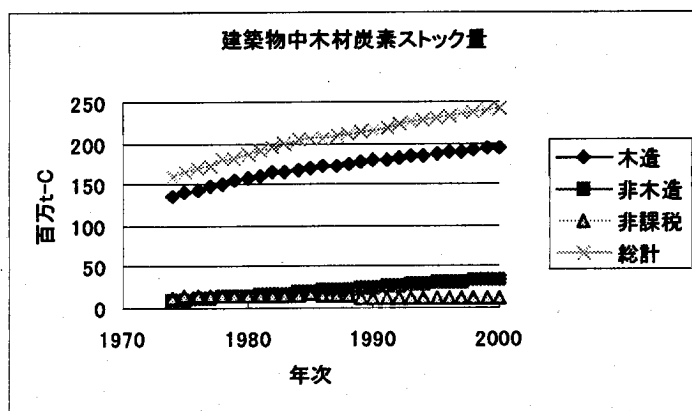


と木材工業の現況」などから推計を行い、着工量などから推定される木材投入量と近い値が得られたが、木材廃棄量に関する信頼できるデータが存在しないという問題があった。今後は「建設リサイクル法」の施行に伴い、建築廃棄物の定量的把握が進むことが期待され、(1)、(2)の両式を用いたクロスチェックが可能になることも考えられる。

(2) 研究内容

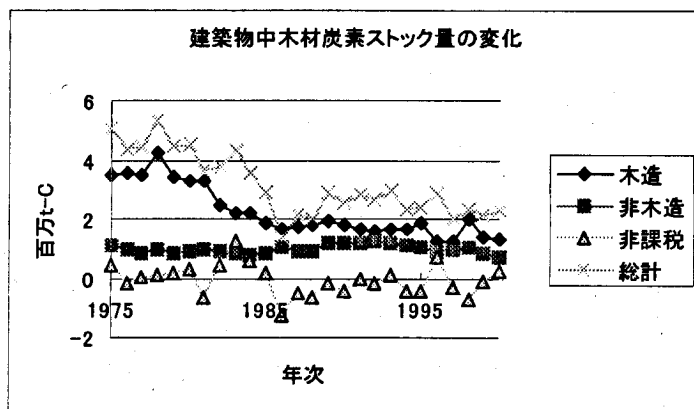
自治省(現総務省)税務局固定資産税課が各年に発行している「固定資産の価格等の概要調査」³⁾の家屋に関する調査は、固定資産税の徴収のために行われているもので、市町村レベルでの全数調査であるとともに把握率も高いものと考えられる。各データは各年の1月1日現在において現存している建築物であるとされる。調査結果には新增分家屋などにおいて建築用途別、また非木造の中にもより詳細な工法別のデータも存在するが、対応した用途別・工法別の木材使用量原単位の解析は未だに不十分であるため、総括表の中にある木造・非木造(木造以外)・非課税の3カテゴリーのデータにつ

いて解析した。収集したデータの内、年次が連続している1974~2000年のものを用いて解析した結果を示す。非課税家屋は宗教法人や官公庁などの建築物であるが、木造・非木造の区分データが無く、また税制の改正などにより同じ建築物でも非課税区分への出入りが存在する。建築ストック量を見ると、床面積について総計量は単調に増加しているが、木造の増加率より非木造の増加傾向が大きい。2000年には我が



国の建築ストック総量は約78億㎡となっている。非課税建築物はこの間各年毎の増減があるが、おおむね4億㎡前後で一定しているといえる。建築ストック量から木材炭素ストック量への変換は、建築床面積1㎡あたりの工法別木材使用量として木造0.2㎡/㎡、非木造0.04㎡/㎡というこれまで用いてきた暫定値をそれぞれ木造・非木造の建築ストック量に掛け合わせた。非課税建築物については木造比率などが明らかではないため、その時点での課税対象となっている木造・非木造の比率で振り分けた。木材中炭素量については同じく、絶乾比重0.5、炭素比率50%という暫定値、すなわち木材1㎡あたり0.25t-C/㎡という値を用いた。建築面積当たりでは木造0.05t-C/㎡、非木造0.01t-C/㎡となる。建築物中木材炭素ストック量は、総計で1974年の1.6億t-Cから2000年の2.4億t-Cへと単調に増加している。1995年における我が国の森林等の全木質バイオマス中の炭素量は約12.8億t-Cとされている⁴⁾ので、その約19%にあたる量が建築物中の木材に固定されていることになる。その大部分は課税対象の木造建築物中のもので、2000年において約81%を占めている。非木造中の木材炭素量も単調に増加しているが、比率的には少ない。非課税建築物では木造比率の仮定により近年は減少傾向にある。上述の炭素ストック量の推計結果から、各年の差をとって建築物中木材炭素ストック変動量を得ることができる。これがプラス側であれば、その年に大気中の二酸化炭素を積極的に減少させたということになる。総計で見ると1974年には500万t-C程度あった固定効果が近年では200万t-C程度まで落ち込んでいる。2000年における変動量は京都議定書における1990年の我が国の温室効果ガス排出量3億3,400万t-Cの約0.7%にあたる削減効果である。非木造建築物中の木材炭素ストック変動量は、非木造建築ストックが単調に増加しているため年間約100万t-Cと一定している。

固定効果の落ち込みは木造建築ストックの増加率が鈍っていることによっている。非課税建築物中の変動量は平均してゼロに近いが、ばらつきが大きいいため誤差要因として大きい。非課税建築物の実際の推移状況と木造率について今後の検討が必要である。



3. 木材の絶乾密度に関する考察

前項では、木材の絶乾密度を 0.5t/m^3 と仮定し、木材中に固定されている炭素量を算出した。しかし、実際に国内で使用されている木材には様々な樹種のものがあり、その密度を一律 0.5t/m^3 とすることには、疑問が残る。今後の推計精度を上げるために考えられる一要素として、国内で使用されている木材の樹種とその供給量を調査し、平均絶乾比重を概算することを試みた。平成3年の木材の総供給量は1億 m^3 余りであり、その75%が輸入材、25%が国産材となっている。また、輸入材のうち、75%は丸太として輸入されるものであり、製材の形で輸入されるものは6.4%、チップ・パルプが43.1%となっている。これらのうち、国産材については「用途別、樹種別国産材素材生産量」として、生産された木材の約7割を占める針葉樹の樹種別生産量と広葉樹全体の生産量が統計的に把握されている。また輸入材については、丸太、製材の樹種別入荷量が北米材、北洋材等についてはよく把握されている。しかし非常に多様な樹種が存在し、樹種名も各国での通称、学名などが入り乱れている南洋材については、輸入樹種の把握は困難であり、統計的な調査は平成3年まで、丸太に関して行われたものがあるのみである。また、木材チップとしては、従来から北米より針葉樹チップ、オーストラリアからユーカリを中心とした広葉樹チップが主に輸入されており、平成元年前後からは、米国東部地区オークを中心とした広葉樹チップ、チリのユーカリ、ビーチ、ラジアータパインを中心とした広葉樹・針葉樹チップも増加しているとのことであるが、より詳細なデータは得なかった。そこで本調査では、調査対象を平成3年の1年間とし、同年に国内に供給された木材のうち、国産材及び輸入材のうちの丸太に関する既存の統計よりこれらの樹種別の輸入比を求め、国内で使用される木材の平均絶乾比重としてどのぐらいの数字を用いて木材中の炭素固定量を推計するのが妥当かという検討を行うこととした。平成3年に丸太として輸入された材の内訳は、北米材8.5%、南洋材9.1%、北洋材3.8%、ニュージーランド材1.4%、チリ材0.4%、その他の地域からの輸入材が0.3%となっている。なお、その他地域には中国、欧州諸国、アフリカ諸国などが含まれると推測されるが、詳細は不明である。国産材については農水省統計局「素材需給量統計」、輸入材については日本検数協会「樹種別入荷傾向」より樹種別材積比率を求め、文献値⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾より絶乾比重を得た。

材種		絶乾比重
国産材		0.46
輸入材	北米材	0.41
	南洋材	0.53
	北洋材	0.42
	NZ材	0.48
	チリ材	0.49
平均		0.46

平成3年の国内における丸太の樹種別供給量を調査し、調査し得た供給量のうちの構成比によって重み付けした平均絶乾比重を求めた結果を示す。広葉樹も多く含まれる南洋材が0.5を越えた以外は0.5以下となっており、材種別の構成比を考慮した平均絶乾比重は0.46となった。この比重を用いると、比重を0.5として算出した場合に比べて木材中の炭素量は1%程度少なく評価されることとなる。ただし、参照した比重の文献値についてはそれぞれの文献によるばらつきが大きかった。

4. 住宅への木材投入原単位

住宅への木材の投入原単位は、住宅内に固定されている炭素量を評価するために重要であるばかりでなく、やがては解体される住宅から排出される木材量を推測するためにも大変重要な値である。特に、住宅は法律が変化したり、新しい技術や材料が導入されれば工法が変化する。また住み手の考え方やライフスタイルでも住宅は変化する。そこで、一戸建て住宅の工法別の木材投入原単位を過去と現在について調べた。

【調査方法】

(1) 過去：古い住宅の場合、設計図面が残っていないため分別解体による調査しか投入量を求めることはできない。そこで、1953年に在来軸組み工法によって建築された2階建て住宅の分別解体を全くの手作業で行い、部材一本ずつ寸法を丁寧に測定し、構造用、造作用、下地用に分けて木材投入量を求めた。また重量を求めるため各部材から多数の密度用のサンプルを採った。

(2) 現在：愛媛県内で在来軸組み工法住宅を建てている住宅会社のうち、3社が1994年～1999年に新築した在来軸組み工法住宅計24戸について、木拾い表と組立図を使って構造用木材投入量を測定した。組立図からは真の構造用木材使用量（投入構造材積）を求め、木拾い表からは使用した構造用木材量（木拾い構造材積）を求め、両者の比をとった。構造材以外の造作材や下地材の木材量は、組み立て図がないため木拾い表から木拾い材積を求め、構造材との比率を求めた。その比率を、前述の3社に当てはめ木拾い材積を求めた。また、造作材、下地材の歩留まりは構造材と同様として、投入量を計算した。

【結果と考察】

(1) 解体住宅に使用されていた木材量

今まで、公表されている解体材量は必ずしも正確ではなかった。今回は、貫なども解体する前に壁を落として寸法を測定するなどして、全ての木材について一本ずつ寸法を測定しているため、投入量は非常に精度が高いと思われる。しかも密度も求めており、重量も求めており、今までにない正確なデータである。解体住宅に投入されていた木材量は全部で25.9 m³であり、延べ床面積を考慮した原単位は0.168 m³/m²であった。内訳は構造材が0.103 m³/m²(61.3%)、造作材が0.0492 m³/m²(29.3%)、下地材が0.0157 m³/m²(9.4%)であった。使用されていた木材の全乾密度は総平均で0.45であった。スギだけで見ると0.4であった。今回分別解体された廃材は、紙やパーティクルボード、燃料などのチップとして完全にリサイクルされたが、再利用されたものはなかった。しかし構造材の中には、部材として再利用できる材が多くあったように思われる。

(2) 現在の住宅への木材投入量

24棟の在来工法の構造材の木拾い材積と投入材積はそれぞれ0.12～0.15 m³/m²、0.10～0.13 m³/m²であり、歩留まりは83.7?87.5%であった。年度ごとに平均した木拾い原単位と投入原単位の経年変化を調べてみると、住宅への木材投入量は地震や税制などの社会現象に影響されることが分か

った。

造作材や下地材をふくめた木拾い原単位は、 $0.18 \sim 0.24 \text{ m}^3/\text{m}^2$ で平均 $0.21 \text{ m}^3/\text{m}^2$ であり、投入原単位は、 $0.16 \sim 0.21 \text{ m}^3/\text{m}^2$ で平均 $0.18 \text{ m}^3/\text{m}^2$ となった。従って木拾い材積を使って住宅での炭素固定量を計算すると15%程度オーバーエスティメイトすることになる。

5. 木材のリサイクル利用による炭素貯蔵

現在、森林の伐採は二酸化炭素(CO₂)の放出と評価されている(木造住宅や木製品は伐採後も炭素貯蔵されているが、その評価については第2約束期間以降になっている)ので、伐採を抑制する方向に理解しがちである。また伐採した後の木材はすでにCO₂放出評価済みとしてみなされると、森林における木材の伐採量に関わる問題としてのみ捉えられ、伐採後の木材の貯蔵に係る建築物の寿命やリサイクル、さらに最終的な燃焼時におけるエネルギー回収利用によるCO₂削減などといった都市の問題として取り上げられない可能性がある。CO₂の吸収源が強調されるあまり木材の「炭素貯蔵効果」「省エネルギー効果」「エネルギー代替効果」の3効果を機能させないことは本末転倒の誘導になりかねない。とくに後者2者は木材が他材料を代替することを意味し、森林における炭素吸収源の活力を推進させる資源循環型社会形成の根源に係わる問題といえる。

木製品の生産過程、木質再資源化については、次のような視点が必要となる。

(1)木質材料、木製品はその製造エネルギーによる炭素放出量に比較して、炭素貯蔵量が大い。製造エネルギーは言葉を代えれば、炭素貯蔵するために要したエネルギーといえる。

(2)製造工程において用いられた木質燃料は、直接的な炭素放出量では化石燃料に劣る。しかしながら、木質燃料は化石資源を節約するばかりでなく、伐採時にすでに放出と評価されていることから炭素放出0とみなすことができる。このため化石燃料使用時との放出量の差はより大きくなる。

(3)木質系リサイクル製品においてもその用途が重要であり、生産量も需要量に支配される。エネルギー利用についても使用する場との連携が鍵であり、施設の技術、機能先行の対応では解体材などの木材の再資源化への問題は解決しない。

本報告は木質(生物)資源の特性である炭素放出(エネルギーと燃焼)と貯蔵(エネルギーと原材料、製品、再生品)の評価をもとに、リサイクルの各種形態について炭素収支を検討したもので、都市における炭素貯蔵とそれに関わる炭素放出表示のための基礎資料を目指したものである。

表1は解体廃木材20000m³(密度0.5として重量10000ton、炭素換算5000tonC、およそ40坪の木造住宅ほぼ1000件分に相当)を以下のような各条件で処理したときの、CO₂放出量、焼却後の灰の量、再利用による炭素貯蔵、化石燃料代替エネルギーなどを比較したものである。

- ①廃木材をすべて焼却
- ②廃木材をすべてボードに再生、必要とされるエネルギーは化石燃料
- ③廃木材をボード原料とボード製造の木質燃料としてバランスするように配分
- ④廃木材の1/2をボードに再生、必要エネルギーは廃木材で、残りは焼却
- ⑤廃木材の1/2をボードに再生、必要エネルギーは化石燃料、廃木材の1/2は焼却
- ⑥廃木材をすべて木質燃料として再使用
- ⑦廃木材を1/2を古材、1/2を燃料として再利用

表1. 全炭素収支評価

焼却・燃焼放出:有 炭素貯蔵:有 化石燃料代替:有

	木材焼却 炭素C放出 tonC	ボード原料 炭素C貯蔵 tonC	化石燃料 製造C放出 tonC	木質燃料 製造C放出 tonC	炭素 収支 tonC	灰 ton	化石燃料 消費代替 tonC
①すべて焼却	-5000				-5000	-500	0
②ボード原料+化石燃料		5000	-2000		3000	0	-2000
③ボード原料+木質燃料		2777		-2223	554	-222	1112
④1/2ボード+化石燃料+焼却	-2500	2500	-1000		-1000	-250	-1000
⑤1/2ボード+木質燃料+焼却	-500	2500		-2000	0	-250	1000
⑥すべて燃料				-5000	-5000	-500	2500
⑦1/2古材+木質燃料		2500		-2500	0	-250	1250

算出の方法は以下の通りである：木材を焼却処分したときは単純にその燃焼分の炭素量を放出とした。木質燃料として使用したときはその燃焼分の炭素量が放出されるが、化石燃料の節約効果(消費代替)が生まれる。木材の熱効率は化石燃料の1/2程度であるので、節約できる化石燃料の炭素放出を1/2とした。ボードの1m³あたり(炭素換算で250kgC)の製造エネルギーの炭素換算として、化石燃料を使用したときは100kgC、木質燃料を使用したときはその熱効率を1/2として200kgCとした(なお、最近の調査実態による数値と比較してこの数値はかなり大きい)。灰の量は最終処分地の面積に関わるものであり、ここでは木材重量に対して5%(炭素に対して10%)としている。

これらをみると単純な焼却が資源浪費とCO₂放出という大きな環境負荷になっていることが明らかである。炭素収支という視点からみると②が優れている。しかしながら、③の廃木材をボードとそれに要する必要エネルギー源としてバランスするように配分することが循環型の基本的な考え方になるであろう。現実には④、⑤が当面可能な対応と思われるが、長期的な見通しに立った施設整備や人材配置などの施策や運用の重要性が伺える。現在森林の伐採はCO₂の放出と評価されているので、それ以後の木材に係わる行為は炭素収支には直接関係がないことになっている。その評価に基づいて表1を書き直すと表2になる。

表2 木材評価なし(放出済み) 現行

焼却・燃焼放出:無 炭素貯蔵:無 化石燃料代替:無

	木材焼却 炭素C放出 tonC	ボード原料 炭素C貯蔵 tonC	化石燃料 製造C放出 tonC	木質燃料 製造C放出 tonC	炭素 収支 tonC	灰 ton	化石燃料 消費代替 tonC
①すべて焼却	0				0	-500	0
②ボード原料+化石燃料		0	-2000		-2000	0	-2000
③ボード原料+木質燃料		0		0	0	-222	0
④1/2ボード+化石燃料+焼却	0	0	-1000		-1000	-250	-1000
⑤1/2ボード+木質燃料+焼却	0	0		0	0	-250	0
⑥すべて燃料				0	0	-500	0
⑦1/2古材+木質燃料		0		0	0	-250	0

再利用するために要した化石燃料由来の炭素放出のみが評価対象となる。木材は焼却しても、原料や燃料に使用しても評価対象にならないので、①、③、④、⑥、⑦など、いずれも炭素収支は0である。すなわち、炭素収支の優劣によるリサイクル選択の余地はない。また、表1で全炭素収支がプラス評価としてもっとも大きかった②は化石燃料からの炭素放出量をもっとも大きくなる。結論的にいうならば、この現行の評価法をとるならば、リサイクルを基本的に否定し、推進させないこととなる。あえてリサイクルをさせる理由は灰の削減となり、そのために原料として利用し(ボードとしての貯蔵)、木質燃料や焼却を抑えることになる。これは見かけ上リサイクルの推進のようにみえるが、基本は処分地問題である。処分費の負担という流れから予想されることはむしろ不法投棄、不法処分の可能性である。取締強化により原料に向かう可能性があるが、原料が必要とされる状況、すなわちリサイクル品が使用される状況が整わないと行き場を失う。これは我が国の現況に近い。木質燃料として使用する場合は化石燃料の削減になるので、それを評価することも可能である。これはバイオエネルギーとしての利用を推進する根拠となるが、リサイクルとしての原料利用を推進しない方向にいく可能性が強く、灰の問題が単純な焼却と同様に生じる。木材工業における木質燃料の利用は従来から資源、エネルギー廃材処理などの合理性を求めて行われてきたところでもあるが、エネルギー単独の問題として扱われてきた訳ではない。燃料チップの現況をみるならば化石燃料との価格差とボイラーなどの運転、管理との関係から現在の仕組みの中で、代替効果に多くを期待すること無理があることは明らかである。現行では伐採後の木材がすでにCO₂の放出評価済みとしてみなされているが、廃棄時(すなわち燃焼時)に炭素放出とする評価法もある。木質燃料利用、焼却を炭素放出として評価すると、木材を燃焼させることを抑える効果は考えられるが、それがボードなどの原料使用に向かうかは不明である。すなわち、それは本来リサイクルの視点で捉えられるものではなく、木造住宅の耐用年数の増加、解体の抑制としてとられるもので、木質燃料としての使用や化石燃料の削減に寄与しない可能性は大きい。

6. 本研究により得られた成果

我が国の建築物中木材炭素量が木造率が低下する中でも近年200万t-C程度増加し、木材利用の

炭素貯蔵効果によって大気中の二酸化炭素削減に貢献していることが、「固定資産調書」というある程度「透明性」が高い資料によって示された。

しかしながら木材中炭素量に係る絶乾密度・建築物の木材使用量原単位については、まだまだ精度の点で問題が残りの、十分に「検査可能」とは言い難い。

木材利用の効果は貯蔵効果以外にもあり、木材利用の振興をはかるべきであるが、現行の評価ではインセンティブとは成り難く、政策的誘導をはかるためにも、より一層の研究努力によりその実効性を示し続ける必要がある。

7. 引用文献

- 1) 恒次祐子ら (2001) 資源利用小委員会活動報告書 1999-2000、日本建築学会地球環境委員会資源利用小委員会
- 2) 外崎真理雄ら (1999) 平成 10 年度温室効果ガスの人為的な排出源・吸収源に関する研究、環境庁地球環境総合推進費終了研究報告書
- 3) 自治省税務局 (各年版) 固定資産の価格等の概要調書
- 4) ECE/FAO (2000) Forest Resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand, United Nations
- 5) 緒方健「南洋材の識別」
- 6) 林業試験場木材部編「世界の有用木材 300 種」
- 7) 林業試験場木材部編「南洋材 1000 種」
- 8) U.S. Department of Agriculture「Wood Handbook: Wood as an Engineering material」

(G) アジア太平洋地域での CDM による炭素収支の評価

1. はじめに

京都メカニズムの CDM に関わる開発途上国の炭素固定量評価は、わが国の二酸化炭素排出削減量をまかなううえで重要視されている。しかしながら、開発途上国における人工林の具体的な数値は極めて少ない。また吸収源活動がなかった場合の自然植生による炭素固定量、すなわちベースラインについてはその研究事例がほとんど存在せず、具体的な調査と情報収集が急務となっている。

2. 研究目的

京都メカニズムで認められた先進国の開発途上国における植林活動による二酸化炭素吸収量を調査し、具体的な数値情報としてとりまとめる。本研究では、代表的な早生樹種を用いた産業造林及び荒廃地の緑化を目的とする環境造林においてその樹木の炭素固定量を評価する。

3. 研究方法

人工林について、4-6 本の試料木を伐倒し、幹、枝、葉、根について乾燥重量を求める。試料木の胸高直径と各器官重量との相対成長関係を求め、この関係式と対象林の胸高直径の分布から林分のバイオマス及び平均成長量を求める。数値は炭素量として変換する。

対象樹種は、*Acacia mangium*, *A. auriculiformis*, *Eucalyptus globulus*, *E. camaldulensis*, *Cassia siamea*, *Azadirachta indica*, *Dalbergia latifolia*, *Peronema canescens* 及び *Switenia macrophylla* である。また主に草原、低木林、二次林など人工林以外の自然植生における炭素固定量をベースラインとして測定した。草地においては全量の刈り取り調査、二次林においては人工林と同様の測定方法を用いた。

4. 結果・考察

本研究の調査林分における地上部年間炭素固定量は 1.4～16.3 tC/ha/yr であった。ただし、産業植林としてオーストラリアで大規模に植栽されている *E. globulus* の 16.3 tC/ha/yr という値は、立地の好条件が重なった場合にのみ得られる例外的な値であり、他の多くの場合が 10 tC/ha/yr 以下の値を示した（表 1.1, 表 1.2）。

表1.1 産業植林の炭素固定量

樹種	場所	林齢 年	密度 本/ha	バイオマス		平均成長量
				地上部 tC/ha	地下部 tC/ha	地上部 tC/ha/年
<i>A. mangium</i>	Madang, PNG	7	506	54.6		7.8
	Song Be, Vietnam	6	1289	20.2		10.1
	Benakat, Indonesia	6	822	65.9	10.8	11.0
<i>A. auriculiformis</i>	Song Be, Vietnam	6	1500	47.9		5.0
<i>E. camaldulensis</i>	Song Be, Vietnam	6	1089	30.5		5.1
<i>E. globulus</i>	Manjimup, Australia	8	1225	128.5	18.5	16.1
<i>E. grandis</i>	Melmoth, South Africa	8	1333	66.9	8.9	9.5

表1.2 環境造林の炭素固定量

樹種	場所	林齢 年	密度 本/a	バイオマス		平均成長量	base line
				地上部 tC/ha	地下部 tC/ha	地上部 tC/ha/年	固定量 tC/ha/年
<i>Cassia siamea</i>	Ponbok, Indonesia	3	935	25.8		8.6	2.6～3.2
<i>Azadirachta indica</i>	Ponbok, Indonesia	3	1111	22.8		7.6	2.6～3.2
<i>Dalbergia atifolia</i>	Ponbok, Indonesia	3	1025	17.7		5.9	2.6～3.2
<i>A. auriculiformis</i>	Song Be, Vietnam	6	1500	47.9		5.0	
<i>P. canesxens</i>	Benakat, Indonesia	10	446	14.3	3.2	1.4	1.6～2.8
<i>S. macrophylla</i>	Benakat, Indonesia	20	1100	132.7	40.3	6.6	1.6～2.8
二次林	Samarinda, Indonesia						2.9～5.7
草地	Samarinda, Indonesia						0.6～1.3

近年、熱帯地域で多く植栽されている *A. mangium* は地域、林齢にかかわらずほぼ一定の値を示し、11 林分の測定結果の平均値(地上部)は 8.8 tC/ha/y であった。これらの林分の多くは 10 年生以下の林分であることから、今後は産業植林として複数回ローテーションが実施された林分や、地下部を含めた炭素固定量の測定が望まれる。過度の焼き畑でアランアラン (*Imperata cylindrica*) 草地となった劣化土壌での環境造林では、植栽後 20 年を経過した *S. macrophylla* の年間炭素固定量は 6.6 tC/ha/yr であった。成長の良好な早生樹種林分の炭素固定量にはやや劣るものの、中、長期伐期種の林分における長期間の炭素固定の可能性が示唆された（図 1）。環境造林についてはその事例が少なく、また、古いものでも 20 年生前後である。今後は樹種、植栽目的、植栽地域の環境条件など、様々な条件下での継続的な調査が必要である。

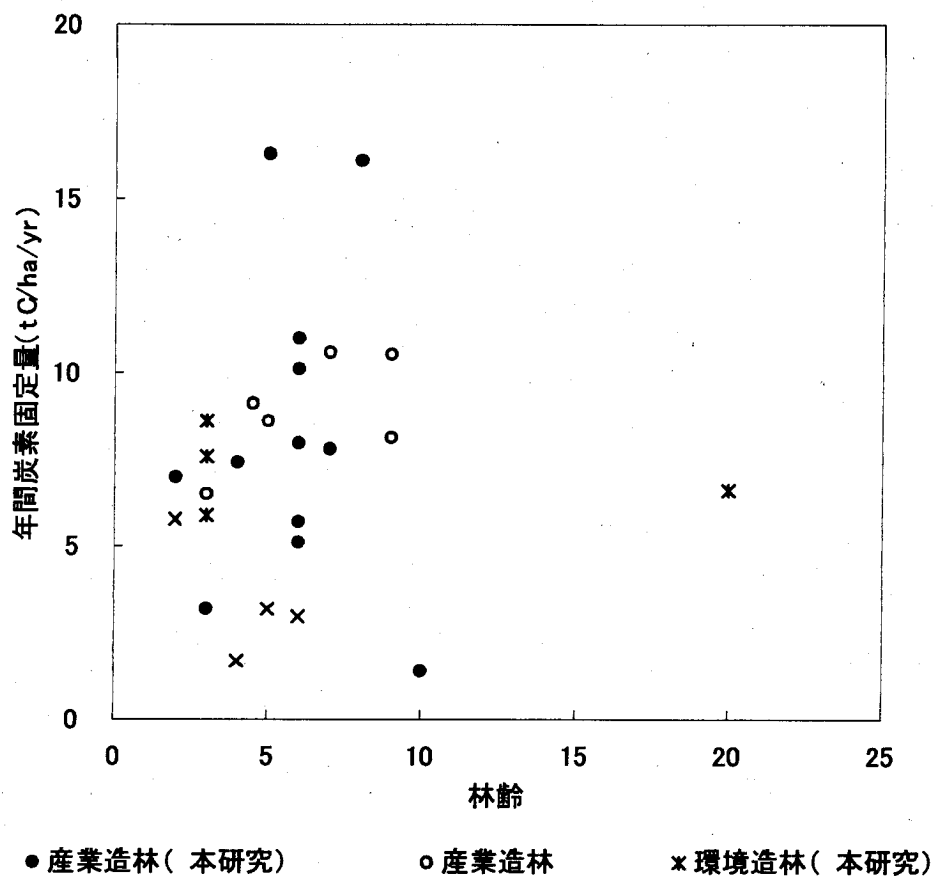


図1 植林タイプ別の人工林における年間成長量(地上部)

参照 Hardiyanto *et al.* (2000)²⁾, Lim *et al.* (1988)⁵⁾, Kano *et al.* (1989)⁴⁾, Ara *et al.* (1989)¹⁾ and JCFF (2000)³⁾

ベースラインの炭素固定量は、二次林が最も大きく 2.9～5.7 tC/ha/yr であった。一方、モンソーンアジア地域の劣化土壌で代表的なアランアラン草原の炭素固定量は 0.6～1.3 tC/ha/yr であった。また、多年生草本や低木林の炭素固定量は平均 2.6～3.2 tC/ha/yr であり、人工林の造成によってその地域の炭素固定量が増加していることを確認した。1990 年の日本国内における二酸化炭素排出量は 1.236×10^9 tCO₂ である。このうち京都メカニズムを適用できる 1990 年比 1% を炭素換算した数値は 3.37×10^6 tC となる。本研究の結果を基に、この量を全て吸収源活動によってまかなう場合に必要となる植林面積を推定した。その結果約束期間(2008～2012 年)の中間年である、2010 年時点において 581,000ha の植林面積が必要となった。本研究は、日本国政府が対応を迫られている二酸化炭素は移出削減政策にかかわる数値情報の提供として重要な成果をあげた。これらの数値は、今後の国際会議においても科学的根拠をもった数値情報として活用されることが予想される。

5. 本研究により得られた成果

アジア・太平洋地域で植栽されているほぼ全ての樹種について、胸高直径とバイオマスの相対成長式を作成した(表2)。今後、データベースとして整備される。CDMを産業植林地で行なう場合、人工林地上部で年間9 tC/ha程度見込まれることが明らかとなった。この数値はアジア地域でCDMを実施する場合の吸収量算定の基礎情報となった。

表2 胸高直径(D)と各器乾重量(W)との相対関係($W=a(D^b)^2$)の例

樹種	<i>Acacia mangium</i>		
	a	b	r^2
葉	0.005	1.182	0.710
枝	0.002	1.566	0.790
幹	0.172	1.110	0.930
皮	0.159	0.768	0.840
樹種	<i>Eucalyptus globulus</i>		
	a	b	r^2
葉	0.047	0.965	0.840
枝	0.020	1.139	0.960
幹	0.035	1.351	0.960
皮	0.013	1.203	0.940
根	0.238	0.773	0.760

6. 参考文献

- 1) Ara S, Gafur M. A. and Islam K. R. (1989) Growth and Biomass Production Performance of *Acacia auriculiformis* and *Eucalyptus camaldulensis* Reforested in The Denuded Hilly Lands. Bangladesh J. Bot 18(2), 187-195.
- 2) Hardiyanto E. B., A. Ryantoko and S. Anshori. (2000) Effects of Site Management in *Acacia mangium* plantation at PT. Musi Hutan Persada, South Sumatra, Indonesia. Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests. 41-49.
- 3) 海外産業植林センター (JOPP) (2000) 平成 11 年度産業植林 CO2 固定化評価等に関する調査研究報告書、165-171
- 4) Kamo K, Ishizuka M and Ohsmi K. (1989) Growth analysis of fast-growing species and Benguet pine stand. 熱帯農研集報 65, 65-79.
- 5) Lim Meng Tsai. (1988) Studies on *Acacia mangium* in Kemasul Forest, Malaysia. I. Biomass and productivity. Journal of Tropical Ecology 4, 293-202.

(H) 新規森林造成に伴う社会経済的影響の評価

1. はじめに

「京都議定書」における吸収源の取り扱いについては定義を含め多くの技術的問題が残されているが、日本やアメリカなどでは、「クリーン開発メカニズム (CDM: Clean Development Method)」、とりわけ森林プロジェクト(森林造成によるCO2の吸収)への期待が高く、効果の計測方法などを早急に整理することが求められている。さらに、事業が周辺の自然環境や地域社会に及ぼす影響を考慮

— 45 —

4. 結果・考察

(1) 産業造林事業の実施方法

①インドネシアの産業造林

インドネシア政府は、原木の安定供給による木材産業（特にパルプ産業）の強化を主目的として産業造林事業を強力に推進している。事業規模は、アジアでも最大規模をほこり、最大で30万haとなる。主にアカシア・マンギュームなどの早生樹を植林し、伐期は最短で7年程である³⁾。産業造林とともに産業造林連結型移住事業（Transmigrasi HTI）や森林村落社会開発プログラム（PMDH：Pembinaan Masyarakat Desa Hutan）⁴⁾が実施される。前者は、産業造林での労働力を安定確保するために新しい村を作り労働者を集める事業で、政府と産業造林事業体が共同して実施する。森林村落社会開発プログラムは、全ての事業体の義務とされており、事業対象地域内の村でインフラ整備や資金・物資の提供を行い、住民の生活を支援することになっている。

②S社の産業造林事業

S社の産業造林事業は、1992年に開始された。事業対象地域の広さは約24,500haだが、S社は湿地や急傾斜などの造林不適地、川沿いの保護林、更には地元住民の利用地（焼畑や果樹園など）を事業対象外とし、実際の造林対象面積はこれらを除いた約16,000haとなっている。2000年現在の造林実績は5,473haであり、現在も人工林を拡大している最中である。

1995年から産業造林連結型移住事業を政府と共同で実施しており、S社の事業地で働くのはほとんどがこの移住村の居住者である。移住事業が始まる前は、近隣の住人が働いたが、今はほとんど働いていない。なお、移住村居住者にも、十分に仕事が生産されているわけではない。

S社は、移住村のM村で森林村落社会開発プログラムを実施しており、発電器や重油の供与、小学校の教員や発電器の管理人への報酬補助、苗木の供与、医療サービスの提供を行っている。残りの2つの村では、他の林業会社が援助を担当しており、S社は早生樹苗木の供与のみを実施している。

この木は、大きくなったらS社が買い取ることになっている。

(2) 事業地の土地利用

① 産業造林開始前の土地利用

産業造林開始前の土地利用の模式図を図3に示す。川沿いに集落があり、集落内では家庭菜園や果樹園などがある。集落の近隣や移動の便が

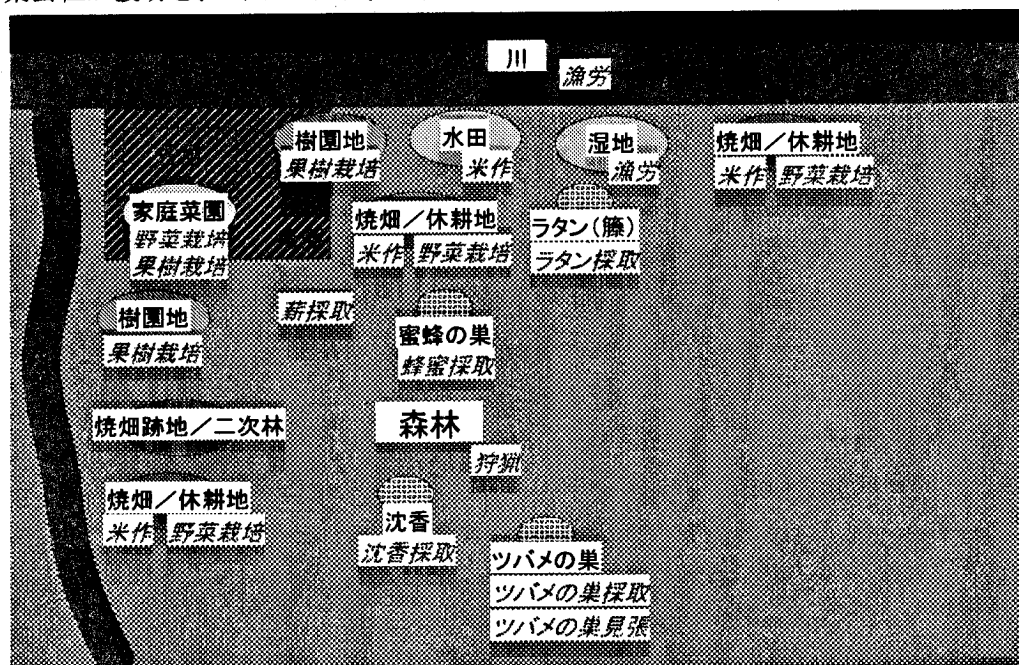


図3 産業造林開始後の土地利用
斜体字はそれぞれの場所での生産活動を示す

よい場所、肥沃な場所に焼畑およびその休耕地がある。焼畑耕作は、通常、定まった複数の土地を循環利用するが、もしある耕作地が休耕期間をもうけても地力が回復しないときには放棄し、別の場所を開墾し循環利用に組み入れる。焼畑跡地では植生が回復し二次林になる。移動の便がよい焼畑跡地は、果樹園として使われることもある。

川や湿地では、魚やエビを捕り主に自家消費するが、他の村人やS社に売ることもある。移動や水の便がよく比較的平らなところでは、水田耕作もおこなわれる。森林では、薪の採取や狩猟のほか、ツバメの巣や沈香、ラタン、蜂蜜を採取する。薪以外の森林産物は住民にとってよい現金収入源であり、特にツバメの巣は非常に高値で売買される。ツバメが巣を作る岩山の洞窟には所有者がいるが、洞窟が村から離れていることが多く、洞窟の監視やツバメの巣の採取を他の住人に請け負わせることも多い。沈香も集落近くの採取木は所有者が決まっており、それぞれが自分の木から採取しているが、森の奥で何日も探し歩いて採取することもある。

②事業開始後の土地利用

産業造林開始後、土地利用は図4のようになった。S社は、先述のように地域住民が利用している土地を事業対象地から外し、集落から離れた住民が利用していない場所で植林を進めている。産業造林連結型移住事業の村も、集落から離れた、地元住民が利用していなかった森林を伐開して建設された。

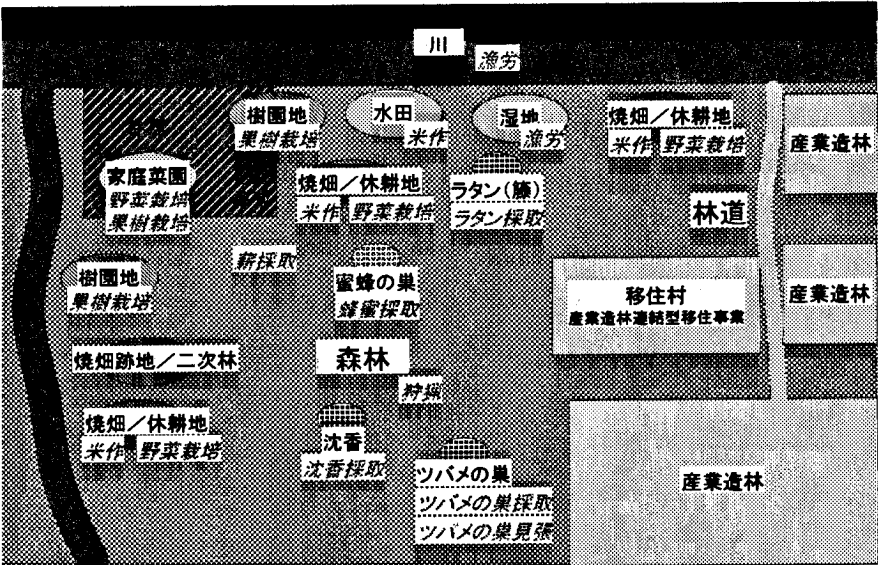


図4 産業造林開始後の土地利用
斜体字はそれぞれの場所での生産活動を示す

(3)産業造林がもたらした影響（ベースラインをふまえて）

S社の産業造林事業が地域にもたらした影響について整理する。

①事業用地の確保

住民の既存の利用地は、植林対象から外されたため、ほとんど変化がみられなかった。しかし、住民の未利用地（利用予備地）や森林産物採取地は減少した。

ア 影響の概要

(ア) K村

K村における焼畑開墾地予備地の減少については、現状では影響は小さい。その理由として、もともと人口が少ない上に、ツバメの巣や沈香、ラタンなどの高価な森林産物の採取により生計を支える住民もあり、焼畑用地の需要が低かったことがまず指摘できる。また、現在の利用地がまだ循環利用可能であること、K村周辺は造林事業対象外であるため未利用地や焼畑跡地が残っていること、人口流入がほぼ止まっていること、焼畑耕作から水田耕作や果樹栽培へのシフトが見られることなどから、新規の開墾地が不足するケースは現状では少ない。焼畑耕作からのシフトについては、水田耕作や果

樹栽培の長所短所と比較検討しただけではなく、異常乾期／森林火災（1997～1998年）により焼畑及び開墾予備地が焼けて地力が低下したこと、水田普及プログラムが実施されたこと（特に1998年）も大きく影響している。しかし、近年、貨幣経済の浸透や長引く経済不況を受け、現金収入確保のためにオイル・パームやコーヒー、果物などの換金作物栽培を行う者が増加している。この動きが拡大すれば現在の未利用地や焼畑跡地だけでは不足することも起こりうる。森林産物採取地の減少については、まず、K村周辺で行われていた薪や蜂蜜、沈香、ラタンなどの採取、狩猟には現状では影響はない。また、ツバメの巣がある岩山周辺は造林対象外である。産業造林によってK村から離れた沈香やラタンなどの採取地、狩猟場所が減少したが、村から離れた森林の利用圧は低いため、現状ではそれほど深刻な影響は見られない。また、ラタンに関しては国際市場での価格低下を受け販路を失い、2000年以降採取されていない。しかし、外部から森林産物採取を行うために「出稼ぎ」にくる者が増加しており、地域全体としては森林産物採取の需要が増大しており、現在利用頻度の低い森林への利用圧が高まる可能性もある。森林産物採取の競争は、とりわけ1997年の経済危機以降激しくなっており、場合によっては盗掘、強奪というケースもある。こうした競争についていけない地域住民による換金作物栽培や水田耕作、焼畑耕作、狩猟などが増加する可能性もある。また、造林作業は、2000年時点で全体の半分にも達しておらず、今後作業が進むにつれ、土地利用の競合が変化するかどうかに関して注視が必要である。

(イ) B村

B村住民は、1990年代前半に交通の便を求めて奥地から現在の川沿いの場所に移住してきた。そのため奥地の未利用地への需要は低下し、この点では未利用地減少の影響は殆ど見られない。しかし、現在のB村周辺の土地は湿地が多く、湿地でないところでも一部産業造林が実施されていたこともあり、集落近辺で焼畑用地が十分には確保できなかった。この点で、B村住民は、多少は産業造林の影響を受けている。住民の多くは、湿地での水田耕作を前提に移住を選択した。森林産物採取に関しても、B村住民の移住により奥地での森林産物採取への需要が低下し、その点では産業造林の影響は小さかった。現在のB村周辺における森林産物採取に関しては、造林地があることでその分採取地が少なくなっており、多少の影響は被っているが、現状では深刻なものはない。近年、水田耕作技術への馴染みの薄さ、肥料や農薬の購入資金の不足、病虫害、期待以下の収量、一度の失敗による挫折感、洪水被害などが原因で水田耕作をやめる者も出ている。また、K村と同じく、貨幣経済が浸透する一方で、森林産物採取の競争が激しさから代替手段を探す者も増加してきた。そうした中、B村では、現金収入の低い住民の多くが、2000年中頃から2001年8～9月頃にかけて違法伐採に従事した。木材運搬作業は人力に頼るため、伐採対象は川の周囲の狭い範囲となり、伐採地の奥地化は早かった。B村周辺での伐採が終わると、造林地では伐採できないため事業地の後背地を伐採した。2001年9月以降、下流の町で違法材の取り締まりが厳しくなり販路を失った結果、違法伐採は急速に下火となった。現在、B村住民は代替手段を模索している。狩猟や漁猟などでしのぐ者が多いが、持続的可能性が懸念される。なお、S社はB村周辺の造林地を明け渡し、B村住民の農用地とすることに合意した。

イ リークージ／ポジティブ・スピルオーバーの抽出

S社は、既存集落（K村、B村）住民が利用中の農用地については造林対象地から外すことにしており、この点については現在のところリークージやポジティブ・スピルオーバーはほとんど生じていない。一方、造林地の造成により、住民の未利用地ならびに森林産物採取地が減少したが、これも現在のところ大きなリークージやポジティブ・スピルオーバーは生じていない。とはいえ、換金作物へ

の需要や森林産物採取の動向に変化が見られており、将来的には土地利用構造が変化することが予見されている。地域住民がどのような行動を選択するかは不明だが、造林事業との土地競合の度合いを変化させ、それに伴い何らかのリーケージあるいはポジティブ・スピルオーバーが生じる可能性がある。違法伐採は現在では下火となっているがその一例であった。違法伐採そのものはS社がもたらしたのではなく、ベースラインとして計上すべきものであるが、S社の存在が事業地内での違法伐採面積を減少させポジティブ・スピルオーバーを生む一方、造林地奥地での伐採によるリーケージを発生させるなど、CO2の間接的収支の計算にカウントされる対象であった。

②賃労働の機会

ア 影響の概要

1992年から1995年までは地元住民に労働機会が提供されていたが、1995年以降は移住村（M村）居住者がほぼ独占している。しかし、産業造林での賃労働は、森林産物採取などに比べて収入が安定しているものの、金額面では魅力が薄いこと、近くの木材伐採事業地でも働けることなどから、既存集落住民に特段の不満はみうけられなかった。

イ リーケージ／ポジティブ・スピルオーバーの抽出

土地利用型の生産活動から賃労働への移行により森林利用圧が低下し、ポジティブ・スピルオーバーが生じる可能性があるが、賃労働の機会が既存集落住民にほとんど提供されておらず、その効果もほとんどない。

③住民支援プログラム

ア 影響の概要

現状では、S社は既存集落（K村、B村）に対しては苗木の供与のみを実施している。一部の住民は、販売目的や環境整備目的（被陰樹）で、焼畑跡地や家庭菜園に植林した。しかし、苗の供給のみ（これも滞りがち）で、買い取り保証や技術支援が住民からすれば不十分なため、現在のところ植林実績は低調である。

イ リーケージ／ポジティブ・スピルオーバーの抽出

植林活動は現状では低調であり、ポジティブ・スピルオーバーとしても規模は小さい。

④移住村住民の活動

ア 影響の概要

移住村住民は、原則として産業造林事業における賃労働で生計を維持することになっている。しかし、諸般の事情によりS社が計画通りに事業を進めることができず、賃金収入が十分ではないため、移住村住民は、移住村近辺で森林産物の採取や狩猟、水田の開墾（正確な面積は不明。200ha以上）を行っている。現在のところ、こうした活動は移住村周辺で行われているため、既存集落住民への影響は小さい。

イ リーケージ／ポジティブ・スピルオーバーの抽出

移住村（M村）住民による水田開墾や果樹園造成により、森林伐開が進みリーケージが発生している。果樹園造成は現在のところその規模が小さくリーケージの規模も小さいが、水田耕作は規模が大きくリーケージとしてカウントされなければならない。また、こうした森林開発や森林産物採取の活動が既存住民との間で土地利用競合を高め、地域の土地利用構造を変化させることで何らかのリーケージあるいはポジティブ・スピルオーバーを発生させることも考えられるが、現状では土地利用競合はほとんど見られない。

⑤その他

ア 影響の概要

S社は野菜や魚を地元住民から購入することもあり、一部の住民にとっては良い現金収入源となっているが、量は少ない。また、産業造林事業開始以後、移住村（M村）への政策的移住が行われ、その後自発的移住（移住村から引き揚げた者の跡に自発的に入植）が続くが、既存集落（K村、B村）への流入はない。

イ リークージ／ポジティブ・スピルオーバーの抽出

S社の食料調達による農作物生産量の増加により土地需要が増加し、森林を伐開するというリークージが考えられるが、生産量増加の規模が小さく、現状ではリークージは小さい。また、同じくS社の食料調達による漁獲量の増加により、農業生産から漁労へとシフトが高まり、森林への利用圧が弱まるというポジティブ・スピルオーバーが考えられるが、漁獲量の増加の規模が小さく、ポジティブ・スピルオーバーとしても小さい。

5 本研究によって得られた成果

産業造林事業による影響およびリークージ／ポジティブ・スピルオーバーは、事業の実施方法とそれを受け止める地域の社会経済状況や自然環境条件の相互作用の結果として顕れることが整理された。そのため事業の実施方法が同じでも、事業地によって地域の状況が違えば影響の顕れ方も異なり、また時間の経過とともに地域の状況が変化すれば影響の内容もまた変化することが示唆される。さらに、資源利用の持続性など時間をおいて顕れるものもある。そのため、リークージ／ポジティブ・スピルオーバーの把握・予測のためには、森林・土地利用形態などの直接事業と関係することだけではなく、社会構造や周辺地域の経済状況、自然状況なども調査し、地域住民の生活のリアリティ（「文化生態的複合」）を把握することが重要である。また、文化生態的複合を事前に把握しつくすことの困難さと地域社会の動的特性から、社会経済的調査を定期的に、あるいは何か大きな社会変化や自然災害が発生したさいには随時行い、常にリークージ／ポジティブ・スピルオーバーの現状を把握するようにつとめることが必要である。そして、リークージの減少／ポジティブ・スピルオーバーの増加のために状況に柔軟に対応することが求められる。

6 引用文献

- 1) (財)地球環境センター (1999) 温室効果ガス排出・吸収量算定マニュアル (森林・廃棄物処理プログラム編) . 27pp
- 2) 野田直人 (2001) 社会林業—理論と実践. 126pp, (財)国際緑化推進センター
- 3) 横田康裕, 井上真 (1995) インドネシアにおける産業造林型移住事業: 南スマトラにおける事例調査を中心として. 演習林報告 95, 東京大学農学部附属演習林, 209-246
- 4) Martinus Nanang & Maokoto Inoue (2000) .Local Forest Management in Indonesia: A Contradiction Between National Forest Policy and Reality. International Review for Environmental Strategies, 1(1), (pp.175-191). Japan: IGES

(I) 拡張減反率の木材需給均衡モデルへの適応

1. はじめに

木材需給均衡モデルは、1987年の「林産物需給の長期見通し」において国産材需給量の推移を予測するために天野らが開発したもので、マーケットメカニズムに基づき、丸太価格を媒介に供給サブモデルと需要サブモデルを結合する構造を有する。本研究では供給サブモデルのみに注目し、そこでは①丸太価格などを説明変数とする線形回帰式により経済林の比率を計算し、②経済林に対して減反率を適用する、という2段階の過程を経て木材供給量を推定する。この構造によると、丸太価格など経済要因の変化は経済林の比率の変化として現れ、その結果、木材供給量が変化する。本モデルの減反率分布は伐採齢の平均と分散に基づき推定されるため、経済要因の変化を直接的に反映することができない。

一方、減反率の理論は近年発展をみせ、ポアソン過程におけるカウント数の平均増加率として時間依存型関数¹⁾、時間一状態依存型関数³⁾を用いたものが発表された。以下、これらの減反率をとくに拡張減反率と呼ぶことにする。拡張減反率を用いた分析では、木材価格など経済要因の変化は減反率分布の平均・分散・歪みの変化として現れることが確認された¹⁾。

2. 研究目的

これらの流れを受け、本研究では、木材需給均衡モデルへ拡張減反率を適用し経済要因の変化を減反率分布へ反映できるようにするための方法を考察した。

3. 研究方法ならびに考察

(1) 拡張減反率の考察

上述の通り、拡張減反率では平均増加率に異なる関数型を選択できるが、時間一状態依存型関数として選択できるものは、Mitscherlich、Logistic、Gompertz、RichardsといったS字形成長曲線に限られる。そこで、本研究では関数型の自由度が高い、時間依存型のものを取り上げる。この関数を $g'(t)$ とすると、 i から $i+1$ 時点での減反率 q_i は、

$$q_i = \int_i^{i+1} g'(t) e^{-g(t)} \frac{g(t)^{k-1}}{(k-1)!} dt \quad \cdots \textcircled{1}$$

ただし、

k : 1以上の整数

と表される。ただし、時間依存型の拡張減反率には、 $\sum_{i=1}^{\infty} q_i$ が必ずしも1にならないという特徴があり²⁾、 $g(t)$ の選択には注意を要する。

一般に、ポアソン過程では独立性の仮定から、区間 $(t, t+h]$ のカウント数は t に依存せず区間の幅 h のみによって決まる。すなわち、

$$P\{N(t+h)-N(t)=1\} = \lambda h + o(h)$$

$$P\{N(t+h)-N(t)=0\} = 1 - \lambda h + o(h)$$

$$P\{N(t+h)-N(t) \geq 2\} = o(h)$$

ただし、

$N(t)$: t 時点でのカウント数、

λ : 任意の正の定数、

$o(h)$: $h \rightarrow 0$ で $o(h)/h \rightarrow 0$ なる任意の関数

これはベルヌーイ試行の定常性にあたるが、①式では λ が $g'(t)$ に置き換わるのでこの性質は失われる。定常状態のポアソン過程から導かれる待ち時間の分布はガンマ分布となるため従来の減反率で

$\sum_{i=1}^{\infty} q_i = 1$ となることが保証されるが、拡張減反率における非定常状態のポアソン過程から導かれる

$\sum_{i=1}^{\infty} q_i$ の値は $g(t)$ の関数型と k の値に応じて変化する。ここで $\sum_{i=1}^{\infty} q_i < 1$ なる $g(t)$ において k を固定し

た場合を考える。このとき $g'(\tau) \leq 0$ なる τ が存在し ($\because$ 任意の τ で $g'(\tau) > 0$ なら $\sum_{i=1}^{\infty} q_i = 1$ が成り立つのでこの対偶を考えればよい)、

$$P\{N(\tau + \Delta t) - N(\tau) = 1\} = g'(\tau) \Delta t + o(\Delta t) = o(\Delta t) \doteq 0$$

$$P\{N(\tau + \Delta t) - N(\tau) \geq 2\} = o(\Delta t) \doteq 0$$

となるので区間 $(\tau, \tau + \Delta t]$ でカウント数は増加しない。これは τ の値によってはカウント数が k に達しないことを意味する。すなわち k に達する (= 伐採する) か否かは時刻 τ に依存して決定する。

$\sum_{i=1}^{\infty} q_i$ 1 に充たない $\sum_{i=1}^{\infty} q_i$ の意味をどのように解釈するかは、伐採の判断基準である $g(t)$ の選び方に依存

するが、Yoshimoto は、 $g(t)$ として経済的基準である $PNV(t)$ (現在純価値) を利用することにより $\sum_{i=1}^{\infty} q_i$

を経済林の比率と解釈した。通常、ある林分が経済林に属するか否かは、木材価格、生産コスト、林道からの距離などの経済要因に依存して決定するのに対し、上記の議論では経済林に属するか否かは、

$\sum_{i=1}^{\infty} q_i$ 時間のみに依存して決定する。このことから $\sum_{i=1}^{\infty} q_i$ は通常の経済林の概念とは異なることがわかる。

ゆえに、 $g(t)$ として経済学的な関数を利用する際には、 $\sum_{i=1}^{\infty} q_i = 1$ を充たすものを選び、拡張減反率に

固有の経済林の概念を排除した方が無難である。とくに木材需給均衡モデルは別途、経済林の比率を与える構造になっているためこの要件は必須となる。

そこで、 $\sum_{i=1}^{\infty} q_i = 1$ を満たす $g(t)$ の十分条件を考える。①式の累積密度関数（保存率）は、

$$F_{wk}(t) = \sum_{j=k}^{\infty} e^{-g(t)} \frac{g(t)^j}{j!}$$

と表されるので、 q_i を $i-1$ から i 時点における減反率と再定義すれば

$$\sum_{i=1}^{\infty} q_i = [F_{wk}(t)]_0^{\infty}$$

ここで $g(0)=0$ なら $F_{wk}(0)=0$ となる。また、

$$\sum_{j=k}^{\infty} e^{-g(t)} \frac{g(t)^j}{j!} = 1 - \sum_{j=0}^{k-1} \frac{1}{j!} \frac{g(t)^j}{e^{g(t)}} \quad \text{と書き換えられるので}$$

$t \rightarrow \infty$ で $g(t) \rightarrow \infty$ ならば、任意の $j \geq 0$ で $\frac{g(t)^j}{e^{g(t)}} \rightarrow 0$ となり $\sum_{i=1}^{\infty} q_i = 1$ が成り立つ。

すなわち、 $\sum_{i=1}^{\infty} q_i = 1$ を満たす $g(t)$ の十分条件は、

$$g(0)=0 \text{ かつ } \lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = \infty \quad \dots \textcircled{2}$$

である。

(2) $g(t)$ の考察

ここまでの議論から、木材需給均衡モデルへ拡張減反率を適用し経済要因の変化を減反率分布へ反

映できるようにするためには、 $g(t)$ として $\sum_{i=1}^{\infty} q_i = 1$ を満たす経済学的な関数を選択する必要があること

がわかった。さらに $g(t)$ に応じて閾値パラメータ k の値を推定する必要もある。拡張減反率において k の値は、伐採が起きる際の $g(t)$ の値を意味するため、減反率分布ひいては伐採量に大きな影響を及ぼす。国レベルのシミュレーションを想定した木材需給均衡モデルでは k の値を全国的な伐採性向との関連で推定する必要があるが、一般にそれは困難である。そこで k の値を推定する代わりに木材需給均衡モデルの内生変数の値で置き換えることを考える。ここでは木材需給均衡モデルの詳細な構造には触れないが、様々な内生変数の中から k に適したものとして、丸太価格を取り上げる。丸太価格は上述のとおり供給サブモデルと需要サブモデルそれぞれから算出される用材量を均衡する役割を果たす。また、これにより $g(t)$ では丸太価格の変化を時間の関数として表す必要がある。

ここで非定常な木材価格の変動を i 時点における逐次的時系列モデルで

$$P_i(t) = T(t) + I_i \quad \dots \textcircled{3}$$

と表すことにする。ただし簡単のため季節性、周期性などの変動は無視する。 $T(t)$ はトレンド項で

以下のような1次式を仮定する。

$$T(t) = \alpha t + \beta$$

I_i は期待値 0 の定常な ARMA(p, q) 過程に従う確率変数である。与えられた $P_i(t)$ の時系列データより③式を推定するには、まず I_i の部分を攪乱項とみなして最小二乗法により α と β を推定し、次に残差 $\hat{I}_i = P_i(t) - (\hat{\alpha}t + \hat{\beta})$ の系列に対して、自己相関・偏自己相関分析、最尤法に基づく ARMA(p, q) モデルのあてはめを行えばよい。

木材需給均衡モデルでは減反率分布は分期ごとと変わるものとみなされている（すなわち、減反率のパラメータは分期ごとに外生的に与えられる）ため、拡張減反率の $g(t)$ は分期 i ごとに異なる関数となる。③式の推定の結果、 $\hat{\alpha} > 0$ であったとすれば第 i 分期の $g_i(t)$ を

$$g_i(t) = \hat{\alpha}t$$

とし、木材需給均衡モデルで内生的に決まる、第 i 分期の均衡丸太価格 $P011_i$ に対して、第 i 分期の閾値パラメータ： k_i を

$$k_i = P011_i - \hat{\beta} - \tilde{I}_i$$

ただし、

$\tilde{I}_i$: 第 i 分期における I_i の最適予測値（外生変数）

とすることにより②の条件をみたす拡張減反率を木材需給均衡モデルへ適用することができる。

4. 本研究により得られた成果

本研究により木材需給均衡モデルの内生丸太価格を拡張減反率に組み込むことが出来れば、価格の変化に対する木材需給量の変化をより精確に表現できることとなり、ひいては炭素税、補助金政策といった経済要因の変化による炭素収支の変化をより詳細に検討できるようになる。

5. 引用文献

- 1) Yoshimoto, A. (1996) Economic analysis of harvesting behavior using the modified Gentan probability theory. J. For. Res. 1: 67-72
- 2) Yoshimoto, A. (2001a) Gentan probability analysis with a state-dependent discrete forest growing model. J. For. Res. 6: 101-110
- 3) Yoshimoto, A. (2001b) Application of the Logistic, Gompertz, and Richards growth functions to Gentan probability analysis. J. For. Res. 6: 265-272

[国際共同研究等の状況]

早稲田大学大学院人間科学研究科と国際林業研究センター（ボゴール、インドネシア）と箇所間協定を結び、環境造林における炭素固定量評価について共同研究を進めることとした。

早稲田大学人間科学部生態学研究室とムラワルマン大学熱帯降雨林研究センター（サマリンダ、東カリマンタン、インドネシア）と箇所間協定を結び、森林火災後のベースライン調査、人工林の炭素固定量調査を共同で行なうこととした。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表（学術誌・書籍）

(B) 亜寒帯林のバイオマス計測に関する研究

- ① Tsuzuki, H., Abraham, E. R. G., Kusakabe, T., Yamamoto, T. and Sweda, T. Timber cruising over extensive forest area with airborne laser altimeter. Proc. IUFRO Int'l. Symp. Global Concerns for Forest Resource Utilization: 746-754. 1999.
- ② Sweda, T., Yamamoto, T. and Shibayama, Z. Airborne Infrared-laser Altimetry of Forest Canopy Profile for Extensive and Accurate Assessment of Timber Resource and Environmental Function of Forests. Proc. IUFRO Int'l Symp. Global Concerns for Forest Resource Utilization, 736-745. 1999.
- ③ Yamamoto, T., Shibayama, Z., Hayashi, K. and Sweda, T. Mensurational Estimation of Forest Leaf Area and Its Modeling. Proc. IUFRO Int'l Symp. Global Concerns for Forest Resource Utilization, 848-853. 1999.
- ④ Abraham, E.R.G. and Sweda, T. Uncertainty in wide-range estimation of forest inventory and leaf area index with airborne laser altimetry. Proc. International Symposium on Spatial Data Quality: 457-467. 1999.
- ⑤ Kusakabe, T., Tsuzuki, H., Hughes, G. and Sweda, T. Extensive Forest Leaf Area Survey Aiming at Detection of Vegetation Change in Subarctic-Boreal Zone. Polar Bioscience 13: 133-146. 2000.
- ⑥ Sasaki, N., Takejima, K., Kusakabe, T. and Sweda, T. Forest cover classification using Landsat Thematic Mapper data for areal expansion of line LAI generated through airborne laser profile. Polar Bioscience 14: 110-121. 2001.
- ⑦ Kusakabe, T., Tsuzuki, H., Sweda, T. and Danilin, I. Extensive Airborne Laser Altimetry Measurement of Forest Resources and Functional Measures in Boreal Forest. Proc. 9th Symp. on Joint Siberian Permafrost Studies btw. Japan and Russia in 2000: 260 - 266. 2001.
- ⑧ Tsuzuki, H., Kusakabe, T. and Sweda, T. Wide-Range Estimation of Forest Biomass in Permafrost Zone of Central Siberia. Proc. 9th Symp. on Joint Siberian Permafrost Studies btw. Japan and Russia in 2000: 267 - 274. 2001.
- ⑨ Tsuzuki, H., Kusakabe, T. and Sweda, T. Carbon Budget Uncertainty of Siberian Boreal Forest in Global Warming. Proc. Second Int'l. Workshop on Global Change: Connection to the Arctic,

2001: 83-87. 2001.

⑩末田達彦・都築勇人・日下部朝子. 航空レーザー測距によるカナダ・シベリア亜寒帯林のバイオマスと葉面積の広域推定. 林業技術 716: 14 - 15. 2001.

⑪Sweda, T., Tsuzuki, H. and Kusakabe, T. Wide-range monitoring of forest biomass and leaf area using airborne laser altimetry. Proc. Int'l. Workshop on Carbon Sinks and the Present State of Research in Forest Sector: 44 - 59. 2001.

⑫Kusakabe, T., Tsuzuki, H. and Sweda, T. Inherent Bias in Regional Estimate of Leaf Area Index Resulting from Simple Scaling-up of Point Estimates. Proc. 5th Int'l. Symp. on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. 2002 (in press).

⑬Tsuzuki, H., Kusakabe, T. and Sweda, T. Uncertainty of Point Measurement in Regional Estimation of Forest Biomass as Compared with Line Estimate with Airborne Laser Altimetry. Proc. 5th Int'l. Symp. on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. 2002 (in press).

⑭Abraham, E. R. G., Kusakabe, T., Tsuzuki, H. and Sweda, T. Relationship between Mean Free Path and Leaf Area in Boreal Forest Canopies. J. For. Plann. 8. 2002 (in press).

⑮Kusakabe, T. and Tsuzuki, H. Airborne Laser Altimetry of Boreal Forests for Extensive Mensuration of Biomass and Leaf Area. Proc. 15th Ehime University United Graduate School Summer Seminar. 2002 (in press).

(C) 森林土壌の炭素固定能の評価

① 高橋正通: 北海道農業と土壌肥料 1999、日土肥北海道支部編、北農会、280-282(1999) 森林土壌の環境保全機能」

② 高橋正通: 森林立地 42, 61-69, (2000)
「森林土壌の有機物と炭素貯留量の推定」

③ 高橋正通: 林業技術 716, 16-17(2001)
「森林土壌の炭素蓄積と施業による変化」

④ 高橋正通: 森林科学 33, 24-29 (2001)
「森林土壌の炭素固定メカニズム」

(D) 林業統計からみた我が国の炭素蓄積量

① 松本光朗・鹿又秀聡、日本林学会大会学術講演集、112, 182(2001)
「日本の森林炭素蓄積分布図の作成」

② 松本光朗: 森林科学、33, 30-36(2001)
「日本の森林による炭素蓄積量と炭素吸収量」

③ 松本光朗: 林業技術、716, 18-19(2001)
「林業統計を利用した炭素蓄積推定手法の改善」

④ 松本光朗: 「陸域生態系の吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状」 国際ワークショップ報告書、71-80(2001) 「林業統計を利用した炭素蓄積量推定手法の改善」

⑤ 福田未来、家原敏郎、松本光朗: 日本林学会関東支部論文集、53, 59-60(2000)

「アカマツ、カラマツにおける部位別現存量と林齢との関係」

(F) 木材部門における炭素固定能力の評価

- ① 外崎真理雄：木材工業、54(11)、P.511-515(1999)

「環境材料としての木材」

- ② 外崎真理雄：陸上生態系による温暖化防止戦略、博友社、P.45-62(2000)

「第3章 木材利用等による炭素貯留方策 1.木材利用」

- ③ 外崎真理雄：ウッディライフを楽しむ 101 のヒント、日本林業技術協会、P.20-21, 22-23, 32-33(2001)

「木材を使って森を元気に、木材を使えば二酸化炭素が減る、省エネは「木の家」から」

- ④ 外崎真理雄、恒次祐子：「陸域生態系の吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状」国際ワークショップ報告書、国立環境研究所・地球環境センター、p91-97(2001)「建築物中の木材炭素ストック量の評価」

- ⑤ Y. Hiramatsu, Y. Tsunetsugu, M. Karube, M. Tonosaki, T. Fujii : Mater. Trans., 43, 332-339(2002) "Present state of wood waste recycling and a new process for converting wood waste into reusable wood materials."

- ⑥ Y. Tsunetsugu, M. Tonosaki, M. Karube, M. Harada, T. Hayashi : J. Adv. Sci., 13, 3(2002) "Ideal utilization of forest resources for sustainable society." (in press)

- ⑦ 林和男：森林文化研究、20、149-157 (1999)

「木材利用による二酸化炭素排出軽減の可能性」

- ⑧ 山田健二、杉森正敏、林和男：愛媛大学演習林報告、Vol.41、13-20 (2002)

「木造住宅の分別解体の実践-木材データ集」

- ⑨ 林和男、杉森正敏、山田健二：「陸域生態系の吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状」国際ワークショップ報告書、81-90 (2002)

「木材利用における二酸化炭素排出軽減への寄与」

- ⑩ 有馬孝礼：木材工業、55-11、541-544 (2000)

「木質廃棄物リサイクル」

- ⑪ 青井秀樹、有馬孝禮：森林文化研究、21、127-135 (2000)

「住宅の使用年数と木造率の変化が炭素固定に及ぼす影響」

- ⑫ 青井秀樹、有馬孝禮：木材工業 56-12、611-616 (2001)

「新設住宅の耐用年数の延長と木造率の増加が新設住宅着工戸数および炭素固定に与える影響」

- ⑬ 有馬孝禮、青井秀樹：「陸域生態系の吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状」国際ワークショップ報告書、国立環境研究所・地球環境センター、p99-114(2001)「木造住宅およびリサイクル利用による炭素貯蔵と耐用年数」

(G) アジア太平洋地域での CDM による炭素収支の評価

- ① 森川 靖：樹木医学研究、3、1、43-47(1999)、森林の二酸化炭素固定機能の評価

- ② 山田麻木乃、花水恭二、川添哲也、丹下健、森川靖：熱帯林業 46:23-30(1999)、産業植林早生樹種の炭素固定量評価(1)西オーストラリアの Eucalyptus globulus 人工林.

- ③ 山田麻木乃、鶴見和恒、原口直人、川添哲也、山ノ下 卓、丹下健、森川靖：熱帯林業 47:33-39(2000)．産業植林早生樹種の炭素固定量評価(2) ベトナムの *Acacia Mangium*, *A. Auricliiformis*, *Eucalyptus camadulensis* 人工林．
- ④ 山田麻木乃、松田 学、丹下健、森川靖：熱帯林業 48:18-24(2000)．産業植林早生樹種の炭素固定量評価(3) 南アフリカの *Eucalyptus grandis* 人工林．
- ⑤ 山田麻木乃、花水恭二、大道 隆、丹下健、森川靖：熱帯林業 49:20-33(2000)．産業植林早生樹種の炭素固定量評価(4) パプアニューギニアの *Acacia Mangium* 人工林及び総まとめ．
- ⑥ 森川 靖：林業技術、716: 22-26(2001)．モンスーンアジアを中心とする植林地の炭素固定評価－クリーン開発メカニズムと関連して－．
- ⑦ 森川 靖：「陸域生態系の吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状」国際ワークショップ報告書、115-143(2001)、(独) 国立環境研究センター
- ⑧ Inoue et al.: Carbon accumulation of man made forests in monsoon Asia as the CDM project. Proceedings of "BIO-REFOR: Sustainable Forest Management System and Biodiversity" October 7-8(2001). Tokyo (in press)
- ⑨ Morikawa, Y.: Carbon sequestration of man-made forests in relation to CDM. Proceedings of 9th Japan-US Workshop on Global Change, Carbon Cycle Management in Terrestrial Ecosystem. "Tokyou, Japan, October 9-11(2001)(in press)
- ⑩ 森川 靖：人間活動と森林、早稲田フォーラム、80: 89-95(2002)

(H) 新規森林造成に伴う社会経済的影響の評価

- ① 横田康裕 (2000)：新規森林造成に伴う社会経済的影響の評価，人為活動による森林・木材分野の炭素収支変動評価，天野正博編，森林総合研究所，p96-105
- ② 横田康裕(2001)：大規模造林が地域の社会経済に与える影響，「陸域生態系の吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状」国際ワークショップ報告書，天野正博・山形与志樹編，国立環境研究所地球環境研究センター，p147-154

(I) 拡張減反率の木材需給均衡モデルへの適応

- ① 広嶋卓也、天野正博：第 111 回日本林学会大会学術講演集、111, 533(2000)
「森林セクター炭素収支モデルの開発」

(2) 口頭発表

(B) 亜寒帯林のバイオマス計測に関する研究

- ① 日下部朝子・都築勇人・末田達彦．カナダ亜寒帯林における植生移動の検証をめざした広域葉面積調査－航空レーザー測距法の応用－．第 110 回日本林学会大会．1999．
- ② Abraham, E.R.G. and T. Sweda. Mean Free Path Analysis of air4borne Infrared Laser altimetry-generated Vegetation Profile for Estimating Leaf Area Index (LAI) over Extensive Forest Area. 第 110 回日本林学会大会学術講演集 1: 7-8. 1999.
- ③ 都築勇人・日下部朝子・末田達彦．航空機搭載のレーザー測距儀による広域森林蓄積の推定－カナ

ダ亜寒帯林・愛媛大学米野々演習林を事例として - . 第 110 回日本林学会大会学術講演集 1 : 477 - 478. 1999.

④Sweda, T., Abraham, E. R. G., Kusakabe, T., Tsuzuki, H., Fukushima, Y. and Mabuchi, K. Regional LAI Estimation with Airborne Laser Altimetry for Use as GCM Boundary Condition. WCRP 3rd International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle. Beijing, June 16-19, 1999.

⑤Sweda, T. Report to Alberta Environmental Protection on 1998 Ground Truth Survey for Forest Canopy Laser Profiling in Northern Alberta. 8 pp. 1999.

⑥Tsuzuki, H., Kusakabe, T., Sasaki, N. and Sweda, T. Estimation of biomass for Canadian boreal forest using airborne laser altimetry. 22nd Polar Biological Symp.. 1999.

⑦Kusakabe, T., Takejima, K., Tsuzuki, H. and Sweda, T.. Linear Estimation of Leaf Area Using Airborne Laser Altimetry and Its Aerial Expansion with LANDSAT TM Data for Boreal Forest of Canada. 22nd Polar Biological Symp. 1999.

⑧Danilin, I. M. and Sweda, T. Laser Profiling for Forest Vegetation Change Study. Assessment Methods of Forest Ecosystem Status and Sustainability Workshop Abstracts: 51-52. 1999.

⑨Sweda, T., Kusakabe, T., Tsuzuki, H. and Emmanuel, A.R.G. Airborne Laser Altimetry as a Powerful Tool for Monitoring the Carbon Budget in Boreal Forests. International Conference on the Role of Boreal Forests and Forestry in the Global Carbon Budget. Edmonton, 2000.

⑩Kusakabe, T., Tsuzuki, H., Abraham, E. R. G. and Sweda, T. Vertical Distribution of Leaf Area Index to the Summit of Mt. Ontake as Estimated with Airborne Laser Altimetry. 23rd Polar Biological Symp. 2000.

⑪Katamura, F., Sasaki, N., Sugita, S. and Sweda, T. Changes in fossil pollen from the Bakhta River watershed, central Siberia. 23rd Polar Biological Symp. 2000.

⑫Sweda, T., Kusakabe, T., Tsuzuki, H. and Danilin, I. Laser profiling survey of forest biomass and leaf area in Central Siberia. 23rd Polar Biology Symp. 2000.

⑬Tsuzuki, H., Kusakabe, T. and Sweda, T. Forest biomass in the middle reaches of the Yenisei River, central Siberia. 23rd Polar Biological Symp. 2000.

⑭Sweda, T., Kusakabe, T., Tsuzuki, H. and Danilin, I. Laser profiling survey of forest biomass and leaf area in Central Siberia. 23rd Polar Biological Symp. 2000.

⑮竹島喜芳・佐々木尚子・末田達彦. LANDSAT TM データを用いたカナダ亜寒帯林の植生区分と葉面積推定. IGBP/GAIM 通信 19 : 8. 2000.

⑯日下部朝子・都築勇人・佐々木尚子. ふれあい SCIENCE2000 地球温暖化の保全に果たす森林の役割 Field Manual. 末田達彦編. 愛媛大学農学部附属演習林・日本学術振興会. 2000 年.

⑰日下部朝子・都築勇人・Abraham, E. R. G・末田達彦. 木曽御嶽における森林葉面積の鉛直分布. 第 112 回日本林学会大会. 2001.

⑱都築勇人・日下部朝子・末田達彦. シベリア、エニセイ河中流域亜寒帯林のバイオマス. 第 112 回日本林学会大会. 2001.

⑲Kusakabe, T., Tsuzuki, H., Sweda, T. and Danilin, I. Extensive Airborne Laser Altimetry Measurement of Forest Resources and Functional Measures in Boreal Forest. 9th Symp. on Joint

Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 2000. 2001.

⑳ Tsuzuki, H., Kusakabe, T. and Sweda, T. Wide-Range Estimation of Forest Biomass in Permafrost Zone of Central Siberia. 9th Symp. on Joint Siberian Permafrost Studies btw. Japan and Russia in 2000. 2001.

21 Tsuzuki, H., Kusakabe, T. and Sweda, T. Carbon Budget Uncertainty of Siberian Boreal Forest in Global Warming. Second Int'l. Workshop on Global Change: Connection to the Arctic, 2001. 2001.

22 日下部朝子・都築勇人・末田達彦. レーザー航測による中央シベリア亜寒帯林のバイオマスおよび葉面積指数の広域測定. 第22回 IGBP/GAIM 研究会. 2002.

23 Kusakabe, T., Tsuzuki H. and Sweda, T. Distribution of Forest Leaf Area Index in Central Siberian Taiga. 24th Polar Biological Symp. 2001.

24 Tsuzuki, H., Kusakabe, T. and Sweda, T. Geographical distribution of forest height and cover density in boreal zone of central Siberia. 24th Polar Biological Symp. 2001.

25 Ikezoe, H., Tsuzuki, H., Kusakabe, T., Shimokawa, G. and Sweda, T. Riverbank effect on tree growth in permafrost region of Siberia. 24th Polar Biological Symp. 2001.

26 Danilin, I. M., Medvedev, E. M. & Sweda, T. The Method of Laser Sensing with the Object of Forest Inventory and Monitoring. Proc. International Conference on Classification and Dynamics of Forests of the Far East (Vladivostok): 144-147. 2001. (In Russian with English abstract)

27 Kusakabe, T., Tsuzuki, H., Abraham, E. R. G. and Sweda, T. Measurement of Forest Leaf Area over an Extensive Transect with Airborne Laser Altimetry for Global Change Studies. American Geophysical Union. 2001.

28 Tsuzuki, H., Kusakabe, T. and Sweda, T. Estimation of Carbon Stock in Boreal Forest of Northern Alberta Using Airborne Laser Altimetry. American Geophysical Union. 2001.

(C) 森林土壌の炭素固定能の評価

① 酒井寿夫、森澤猛：第111回日本林学会大会

「御岳岩屑流堆積地における緑化植栽後12年目の土壌炭素貯留」

② 稲垣昌宏・酒井寿夫・野口享太郎・高橋正通・田中格：第112回日本林学会大会

(2001)「人為的活動による土壌有機炭素・窒素変動の評価 - 畑地から森林への変換事例 -」

③ 酒井佳美、高橋正通、田中永晴：第112回日本林学会大会(2001)

「落葉広葉樹材の分解速度」

④ 高橋正通：炭素循環の解析と予測に関する研究の現状と展望(2001)

「森林生態系における土壌炭素収支-プロセスから広域評価へ-」

⑤ 高橋正通：陸域生態系の炭素吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状「国際ワークショップ(2001) 「炭素吸収源としての土壌の役割」

⑥ 高橋正通、酒井寿夫、稲垣昌宏、阪田匡司、野口享太郎：日本土壌肥料学会(2002)

「植林に伴う土壌有機物蓄積」

⑦ 酒井寿夫、稲垣昌宏、野口享太郎、阪田匡司、高橋正通、M.A.Yatskov：第113回日本林学会大

会(2002)

「植林にともなう表層土壌の有機炭素変動の評価 - 苗畑のスギ、ヒノキ植栽地における検討から - 」

⑧ 酒井佳美、田中永晴、高橋正通：第 113 回日本林学会大会(2002)

「北海道主要樹種の根の初期分解速度」

(F) 木材部門における炭素固定能力の評価

① 外崎真理雄：第 7 回地球環境シンポジウム講演論文集、土木学会、P. 13-19(1999)

「木材資源の循環と地球温暖化抑制」

② 外崎真理雄：第 23 回「木材の実用知識」講習会資料集、日本木材加工技術協会、P. 12-24(1999)

「環境資源としての木材」

③ 外崎真理雄：シンポジウム「どうする！木質系廃棄物」資料、森林・木質資源利用先端技術推進協議会、p1-6(2002)「我が国における木質系廃棄物の現状」

④ Y. Tsunetsugu, M. Tonosaki, M. Karube, M. Harada, T. Hayashi : International Conference on ECOMATERIALS, Hawaii. USA, 2001

“Ideal utilization of forest resources for sustainable society.”

⑤ 山田健二、杉森正敏、林和男：第 52 回日本木材学会大会、岐阜、4 月、451. (2002)

「建築物における純木材使用量」

⑥ 新藤万里子、林和男、杉森正敏：第 52 回日本木材学会大会、岐阜、4 月、445. (2002)

「木材および木質材料の発熱量と元素組成」

⑦ 林和男、杉森正敏、山田健二、和田耕一、藤田誠：第 51 回日本木材学会大会、東京、4 月、622. (2001)「地域資源を多用する木造住宅建築の実践的推進活動」

⑧ 山田健二、林和男、杉森正敏、天野正博、野田英志、山田千代子：第 51 回日本木材学会大会、東京 4 月、666. (2001)

「在来軸組み住宅の分別解体による木材使用量」

⑨ 山田健二、林和男、杉森正敏：日本木材学会中国・四国支部第 13 回研究発表会、岡山、10 月、94-95. (2001)「木造住宅の分別解体の実践」

⑩ 山田健二、林和男、杉森正敏：日本木材学会中国・四国支部第 12 回研究発表会、久万、9 月(2000)「住宅に投入される真の木材使用量」

⑪ 林和男、三好誠治、山本寛治、梶原康太郎、藤田誠：日本木材加工技術協会第 17 回年次大会、鹿児島、11 月(1999)

「愛媛県上浮穴地方における木造構造物の例」

⑫ 林和男、近藤康正：第 49 回日本木材学会大会、東京、4 月(1999)

「木造住宅の寿命調査」

⑬ 有馬孝礼：第 51 回日本木材学会大会東京(2001)

「木質資源利用の生産段階および社会システムと炭素収支評価との関係」

⑭ 有馬孝礼：Zero Emission Symposium 2001, Tokyo, Japan、(2001)

「木材資源利用と CO2」

⑮ 有馬孝礼：第 52 回日本木材学会大会、岐阜、(2002)

「木材利用における炭素収支評価」

(G) アジア太平洋地域での CDM による炭素収支の評価

- ① Inoue et al. : Estimating above ground carbon of *C. siamea*, *A. indica*, *D. latifolia* plantations and regenerated vegetations, Baseline, in Lombok Island, Indonesia. Poster presentation in "International Workshop of Landuse, Landuse Change, Forestry and Clean Development Mechanism" CIFOR, 6-8 March, 2001, Bogor, Indonesia
- ② 森川 靖. 2002、口頭講演：人工林の炭素固定量評価法及びモンスーアジア地域での固定量.
「CDM・炭素吸収源国際フォーラム」、国際緑化推進センター主催、2002 年 2 月 19 日、国立オリンピック記念青少年総合センター
- ③ 井上仁ほか：東南アジアで CDM を実施する場合の人工林の炭素固定量評価。第 11 回熱帯生態学会、東京（要旨集 63 ページ）（2001）

(I) 拡張減反率の木材需給均衡モデルへの適応

- ① 広嶋卓也、天野正博：第 111 回日本林学会大会（2000）
「森林セクター炭素収支モデルの開発」
- ② 広嶋卓也：森林資源管理と数理モデル第 2 回シンポジウム（2002）
「木材需給均衡モデルへの拡張減反率の適用方法」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

(D) 林業統計からみた我が国の炭素蓄積量

- ① 東京新聞（2001 年 8 月 30 日、全国版）

(F) 木材部門における炭素固定能力の評価

- ① 外崎真理雄：林野庁委託事業報告書 環境低負荷型木質資源利用促進調査、P. 108-111 (2000) 「木材工業製品のインベントリー分析結果について」
- ② 外崎真理雄：人為活動による森林・木材分野の炭素収支変動評価、環境庁地球環境研究総合推進費 陸域生態系の吸収源機能評価に関する研究、森林総合研究所、P. 48-52 (2000) 「木材利用部門における炭素固定能力の評価」
- ③ 外崎真理雄：建築における資源循環のモデル化 資源利用小委員会活動報告書 1999-2000 年度、日本建築学会地球環境委員会資源利用小委員会、P. 27 (2001)
「木質資源利用と環境問題」
- ④ 外崎真理雄：再利用・廃棄技術調査・開発事業報告書、日本住宅・木材技術センター、p37-42 (2001)

「その他の木質廃棄物」

⑤ 外崎真理雄、恒次祐子：林業技術、716号、p20、21(2001)

「建築物中の木材炭素ストック量の評価について」

⑥ 外崎真理雄：木材工業、56(12)、p632-635(2001)

「環境の時代」の木材利用」

⑦ 外崎真理雄、恒次祐子：研究の“森”から、森林総合研究所、No. 100(2002)

「建築物中の木材利用はどれくらい二酸化炭素を削減しているか

⑧ 外崎真理雄：第7期研究分科会報告書、木材の変動対策および利用、日本木材学会、P. II 89-100(2002)「環境問題と木材利用」

⑨ 外崎真理雄：木材工業、57(6)、p256-259(2002)

「ニュージーランドの木質系廃棄物事情」

⑩ 恒次祐子：建築における資源循環のモデル化 資源利用小委員会活動報告書 1999-2000年度、日本建築学会地球環境委員会資源利用小委員会、P. 28-31(2001)

「木質系材料のマテリアルフロー」

⑪ 林和男：平成11年度愛媛大学公開講座『地域規模の環境資源としての森林』10月(1999)「木材利用による地球温暖化抑制の可能性」

⑫ 林和男：21環境研究協会夏期研修会講演、7月28日、2000

「木材利用による二酸化炭素排出削減の可能性」

⑬ 林和男：ふれあいサイエンス(科研費)での講演8/11(2000)

「森林および林産物の炭素貯留機能」

⑭ 林和男：平成11年度学長裁量経費報告書、第5章木材利用による二酸化炭素排出軽減の可能性 (P67-86)「森林セクターの持つ地球温暖化軽減機能の定量化」

⑮ 林和男：「陸域生態系の吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状」国際ワークショップ、早稲田大学、8月(2001)

「木材利用による二酸化炭素排出軽減への寄与」

⑯ 林和男：地球自然エネルギーセミナー2月10日、松山(2002)

「エネルギーとしての木質バイオマス」

⑰ 林和男：こかげ、No. 50、5-7(2001)「木材利用推進以外に森林は守れるか」

⑱ 林和男：ユーカリ会報、No. 28、10-11(2002)

「再生可能な森林資源の循環利用」

⑲ 林和男：日本木材学会第7期研究分科会報告書第2分冊「木材の変動対策および利用」3.3, p101-108(2002)「木材のエネルギー利用」

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

(D) 林業統計からみた我が国の炭素蓄積量

当研究の知見を基礎として、IPCC グッドプラクティスガイダンスのリードオーサーとして参加している。