

炭素吸収量の認証と排出量取引に向けた高精度リモートセンシング手法の開発に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

地球温暖化研究プロジェクト 炭素吸収源評価研究チーム

山形与志樹・小熊宏之

平成13～15年度合計予算額 141,814千円
(うち、平成15年度当初予算額 38,060千円)

〔要旨〕本研究では京都議定書の実施に向けて、炭素吸収量の認証や排出量取引を実施する際に必要とされる森林生態系の炭素吸収・固定量を計測するためのリモートセンシング手法の開発に取り組んでいる。

平成14年度までの研究において、光合成速度を推定する上で重要なパラメータである光利用効率(LUE)との関係が明らかになったリモートセンシング指標 PRI(Photochemical Reflectance Index)について、有効性を検証するために PRI と LUE の季節変化を追跡し、カラマツ葉の活葉期においては LUE と PRI の相関が危険率 0.1%未満で有意であることを確認した。

次に、地上バイオマスの計測技術の高度化を目的に、地上設置レーザセンサを用いた新たな計測手法を開発し、地上部のバイオマスを毎木調査と同程度の精度を満たす手法を開発した。これと併せて、これまでに不可能であった林床植生を含む森林内の葉面積や植物体全体の密度の三次元分布を求めることに成功した。更に、プロジェクトレベルでの森林管理による炭素吸収量の認証手法を確立することを目的として積極的に森林管理を実施している民有林においてケーススタディを行った。

〔キーワード〕 FSC、エコカーボンアカウンティング、PRI、レーザスキャナ、LAI

1. はじめに

京都議定書において、温室効果ガス吸収源としての森林による吸収源活動において、吸収量評価に伴う不確実性に関する取り扱いが国際的に議論される中、透明かつ検証可能な活動監視の情報を提供できる手段として、リモートセンシング手法の活用が期待されている。本研究では、京都議定書の実施に向けて展開する最新の国際動向に即しつつ、最新のセンサ・情報技術を駆使して、炭素吸収量を高精度に計測するリモートセンシング手法の開発に平成13年度から取り組んできた。15年度は、これまで行ってきたリモートセンシングによる森林光合成活動の推定とバイオマス推定の高度化を目的とした2テーマの研究に加え、プロジェクトレベルでの森林管理による炭素吸収量を、リモートセンシングを用いて定量的に認証する手法を確立することを目的として、日本国内において積極的に森林管理を実施している民有林に着目し、認証のためのケーススタディを行った。よって15年度における本研究は、3つのサブテーマによって実施された。そこで本報告は、研究目的、研究方法及び結果と考察についてはサブテーマ毎にまとめ、最後に総括するもの

とした。

2. 葉群スケールにおけるリモートセンシング情報 PRI と光合成活性との関係

(1) 研究目的

本研究は、森林による温室効果ガス吸収量を評価する上で必要不可欠である森林の光合成活の日変化、季節変化をリモートセンシングによって計測する手法の確立を目的としている。平成14年度までの研究によって、光合成活性の日変動などといった生化学的情報の評価に対しては、植生リモートセンシング手法として一般的な植生指数 (NDVI) を適用するには限界があることを明らかにし、次いで光合成活性を示す指標として期待されている PRI (Photochemical Reflectance Index) が、夏におけるカラマツ葉の光合成活性を示すパラメータとの間に相関関係が存在していることを明らかにした。そこで今年度はカラマツの活葉期を通じた葉群レベルでの PRI の変動を調査し、PRI と光合成パラメータとの関係を求めるとともに、両者の関係の季節変動を調べることを目標とした。

(2) 研究方法

NDVI よりも短い時間スケールでの光合成活性を評価する指標として、葉内のキサントフィルサイクル活性や光合成の光利用効率を反映した PRI (Photochemical Reflectance Index) が提案されている¹⁾。この指標は、531nm と 570nm の分光反射をもとにして計算される。平成14年度の研究では、8月の活葉期における観測実験を通じ、PRI とカラマツ葉の日中の光合成における光利用効率 LUE (Light Use Efficiency: 単位入射光あたりの純光合成速度) との間に高い相関関係が存在していることを明らかにし、更に日中の強光に対応した光化学系 II の活性低下 (活性調整) を評価する上でも PRI が有効であることを示した²⁾。

本年度は、北方林の CO₂ 吸収量のモニタリングにリモートセンシングを実用化するための基礎研究として、PRI とカラマツの光合成活性の関係が夏から秋にかけてどのように季節変化するかについて調査を行った。

研究対象には、北方林の主要造林樹種であるニホンカラマツ (*Larix kaempferi*) を選び、葉内色素の光応答を反映したリモートセンシング指標である PRI と、光合成における光利用効率の関係を7月から11月まで、国立環境研究所実験園場内にて定期的に調査した。晴天日である7月26日、9月25日、10月29日および11月19日において、4年生カラマツ林の樹冠部位を対象とし、連続分光放射計とレファレンスとしてスペクトラロン標準反射板を用いた分光反射率及び Li-Cor 社製ロング光量子計による光合成有効光量子束密度 (PPFD) と Li-Cor 社製の開放型光合成蒸散測定装置 (Li-6400) を用いた針葉の純光合成速度 (P_n) を1時間ごとに連続測定し、解析を行った。CO₂ 固定 (純光合成速度) における光利用効率 (LUE) を P_n と PPFD の除算値として算出し、531nm および 570nm における樹冠反射率 (R) を用い、以下の式にしたがって、PRI を算出した。

$$PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$$

(3) 結果・考察

図1に、日中の PPFD、純光合成速度および PRI の観測結果を示す。いずれの観測月においても、カラマツ針葉の純光合成速度は、午前中は、PPFD の増加に伴って増加する傾向にあった (図1 a, b)。

しかし、強い日射条件下 (PPFD > 1000 mol m⁻² s⁻¹) では、光合成速度は飽和し、特に日射の強かった7月には、日中の純光合成速度の低下が認められた (図1 b)。このような強光下の光合成速度の飽和や低下は、NDVI に定数と日射量に乗じた従来の推定手法では評価が困難である。一方、PRI は日中の PPFD の変動と共に日変動し、黄葉が認められた11月では、PRI は日中に増加する傾向にあったが、黄葉前の10月までは、PPFD の増加に伴い、日中に低下するパターンを示した (図1 c)。PRI の日中平均値は、夏から秋にかけて低下する季節変化を示した。

光合成速度を推定する上で重要な指標である LUE と PRI の関係を調べた結果、いずれの観測月でも LUE と PRI は、危険率 0.1% 未満で有意な相関関係にあった (図2)。直線回帰による解析を行った場合、その回帰直線の傾きと切片は観測月によって変動し、回帰直線の X 軸切片の値は、黄葉が認められる前にあたる9月から低下した (図3 a)。この X 切片の変動は、PRI 自体の季節変化によるものと思われる。これに対して、PRI に対する LUE の応答性を示す回帰直線の傾きは、7-10月では大きな変化はないが、黄葉時期にあたる11月には大きく変動し、正負が逆転した (図3 b)。この傾きの変化は、PRI が間接的に反映する光化学系活性と炭素固定反応系のバランスを示していると予想されるため、葉内の光合成酵素量や、窒素量などが関係しているかもしれない。

これまでの多くの野外研究例は、植物の光合成活性の高い緑葉の時期を対象とした分光観測であり、本研究のような黄葉時期の関係の逆転や、葉のエイジングに伴う LUE/PRI の応答性の季節変動については、明らかにされていない。これまで、PRI によって検出される光化学系や CO₂ 固定にお

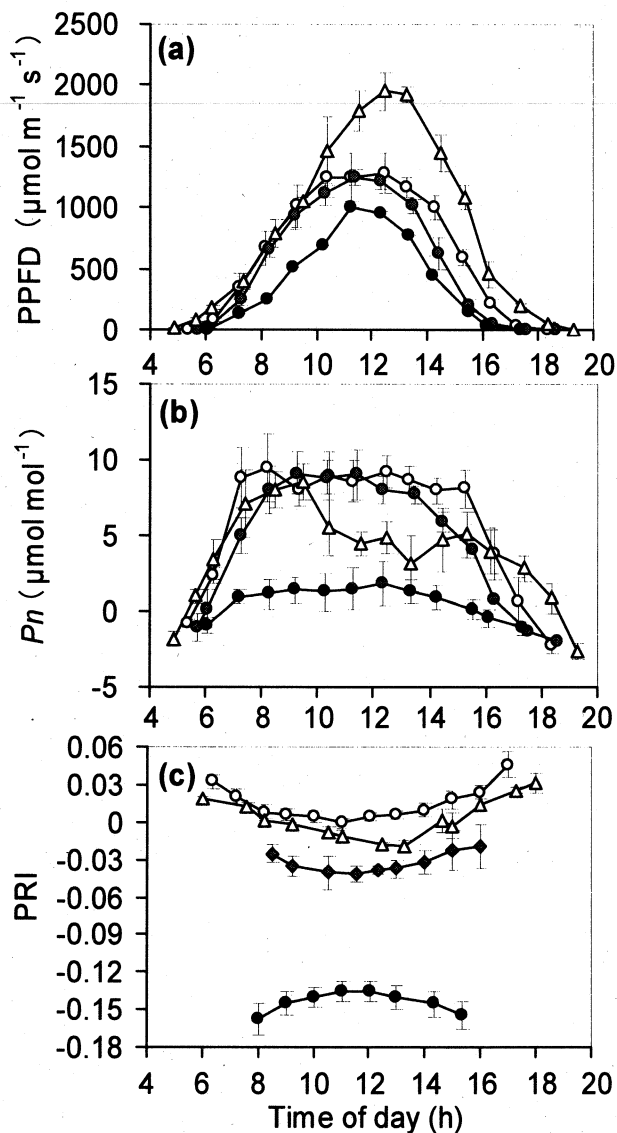


図1. 各観測月における (a) PPFD、(b) 純光合成速度、(c) PRI の経時変化 (n=6). 凡例: 7/2 (Δ), 9/25 (○), 10/29 (●), 11/19 (●).

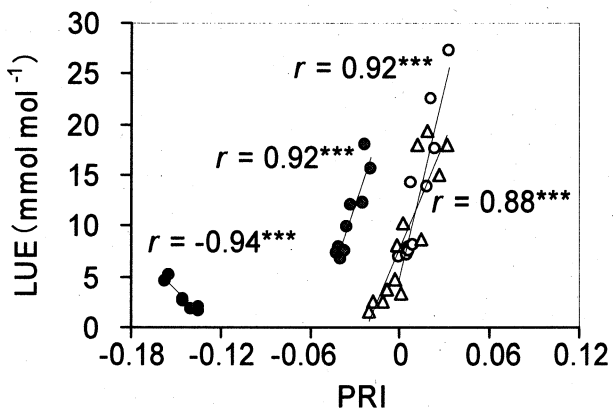


図2. カラマツ針葉の LUE と PRI の関係. 有意水準 *** p < 0.001 (Pearson's correlation test). 凡例は図1参照.

ける光利用効率は、その日変動パターンの整合性などの定性的な研究が行われてきたが、今後は、その植物生理的な季節応答性の解明と同時に、季節変化を考慮した定量モデルが重要な研究課題であると思われる。

本研究の結果から、リモートセンシングで得られる PRI によって、カラマツの光合成速度を推定する上で重要な指標である LUE が、その活葉期では、従来の NDVI では困難であった日変動レベルにおいて推定できることが明らかになった。また、その関係は季節によって変化することも判明したため、この季節変動を考慮した推定モデル式を作成することで、今後、リモートセンシングによる PRI から年間を通じた光合成活性の推定が可能になると思われる。

3. カラマツ群落におけるPRIの季節変化

(1) 研究目的

前節では、実験圃場におけるリモートセンシング指標PRIと光合成活性情報の関係を求めたが、実際の自然環境下における適用の可能性を調べるために、苫小牧フラックスリサーチサイトにおけるカラマツ樹冠上で、開葉期の4月から落葉期にかけて常時分光計測を行った。

(2) 研究方法

分光計測には、英弘精機製の全天分光放射計 MS-700 を 2 台使用し、フラックス計測タワー最上部（地上高 40m、カラマツ樹冠上からは約 25m）に上下方向に装着し、全天の下向き分光放射量と、カラマツ樹冠から反射された上向き分光放射量をそれぞれ計測した。この MS-700 は分光半値幅 10nm で 350nm から 1050nm の間を 256 バンドに連続分光して観測する。植生が光合成に用いる波長領域（400-700nm）の放射光束の密度を示す光合成有効光量子束密度（PPFD）を、Li-Cor 社製 LI-190SB により同タワーにおいて同時計測し、PRI と PPFD との関係を求めた。なお、本解析では日中のデータのみを対象とするために PPFD が $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{S}^{-1}$ 以上のデータを用いている。

解析期間は、開葉時の 4 月 18 日から落葉時の 11 月 30 日までとし、森林樹冠からの反射光を観測している下向きの分光日射計の 30 分平均値を、全天の分光放射量を観測している上向きの分光日射計の 30 分値で除することで分光反射率を算出した。それを下記計算式中の波長を中心とした前後バンドを合わせて 3 バンド分とした平均値を用い、各種植生指数を算出した。

$$\text{PRI} = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570}) \quad (R \text{は反射率。添字は中心波長(nm)})$$

$$\text{NDVI} = (R_{858} - R_{645}) / (R_{858} + R_{645})$$

$$\text{EVI} = \{(R_{858} - R_{645}) / (R_{858} + C_1 R_{645} - C_2 R_{469} + L)\} (1 + L)$$

$$C_1 = 6.0, C_2 = 7.5 \text{ and } L = 1.0$$

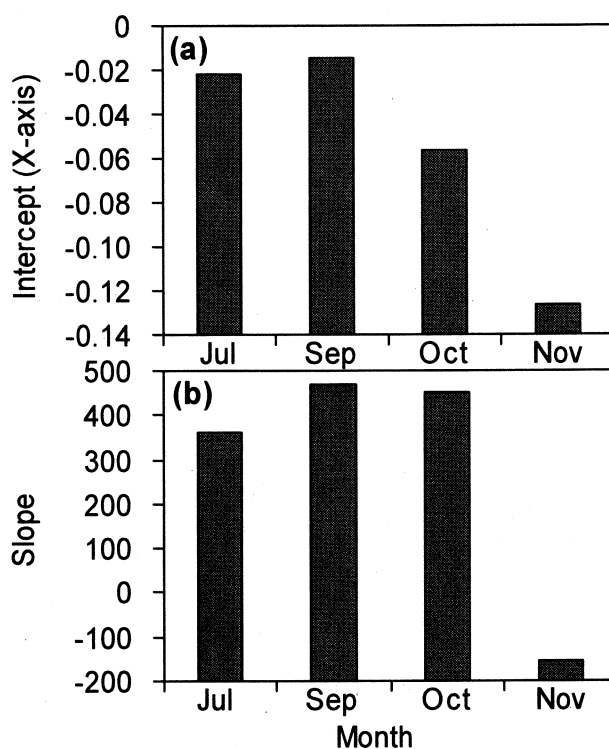


図3. 直線回帰パラメータの時期変化.

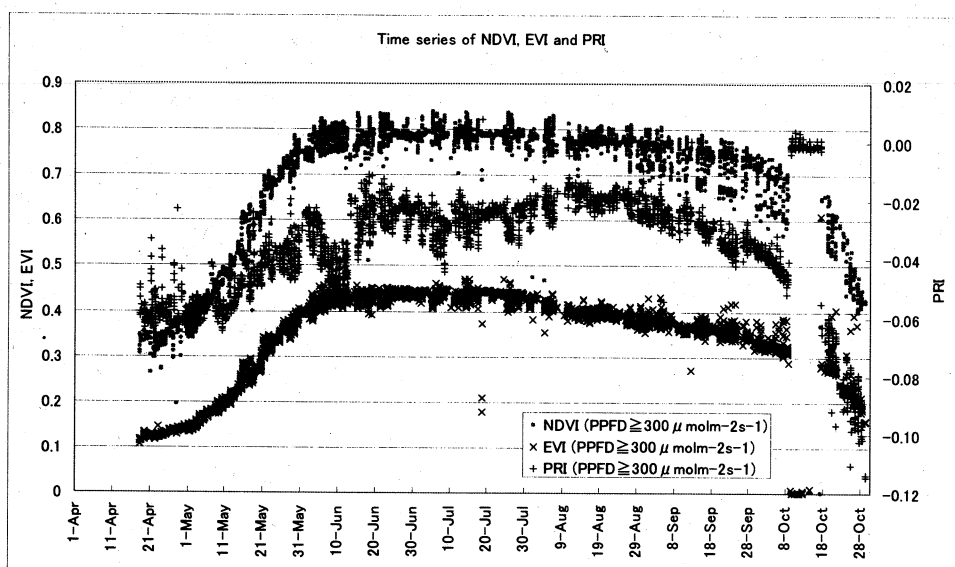


図4. 植生指数(30分値)の季節変化

(3) 結果・考察

図4にPRIとNDVI (Normalized Vegetation Index) 及びEVI(Enhanced Vegetation Index)の30分値の季節変化を示した。PRIはPPFDと共に日変動しつつ、他の2つの植生指数とも異なる季節変化を示した。また、NDVIやEVIに比較して、春先の上昇が緩やかであることと、一方で落葉期にはNDVIやEVIに比較して早期に低下が始まる傾向が認められた。更に6月初旬には著しくPRIが低下する現象が認められた。同時期は晴天が連続し、日中のPPFDが $1800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の高い日が連続していたことに加え、開葉直後ゆえにカラマツの新葉が未成熟な時期でもあることから、樹冠の表層レイヤーにおける強光阻害が影響したものと推察される。

図5は日変動の一例として、

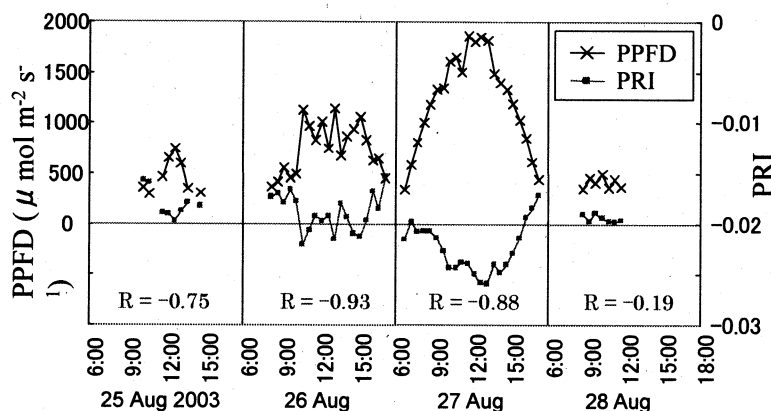


図5 PRIとPPFDの日変動

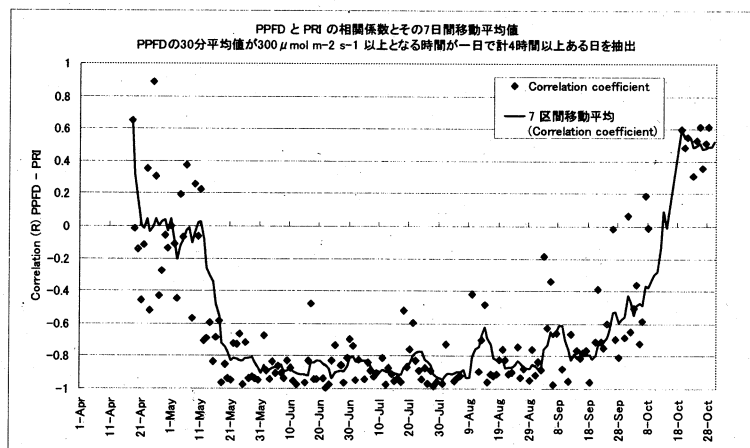


図6 PRIとPPFDの相関関係の季節変化

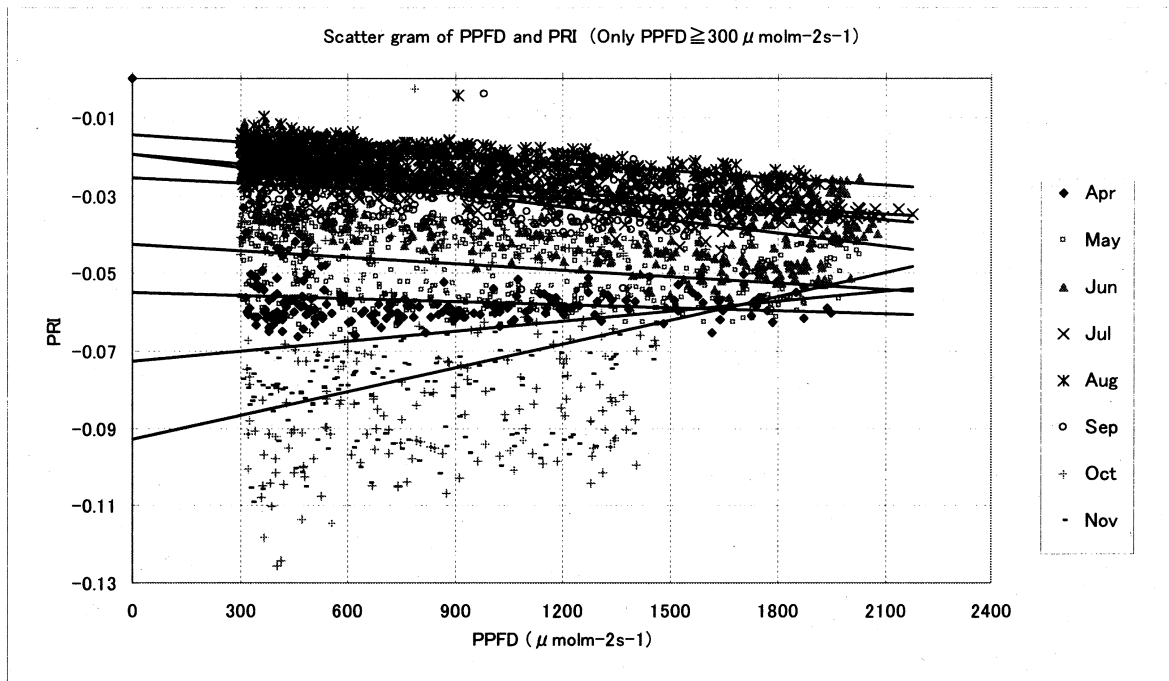


図7 全観測期間のPPFDとPRIの30分値をプロットした散布図

8月25日～28日におけるPRIとPPFDの日変動を比較した。雨天の8月26日を除いて、PPFDとPRIには負の相関関係が認められた。この関係はカラマツ樹冠の短枝葉の成長が著しい5月中旬以降から顕著となり、5月15日から9月24日の期間では、両者には-0.8程度の高い負の相関関係が存在していた(図6)。

図7は、全観測期間のPPFDとPRIの30分値をプロットした散布図で、月別に凡例を分けてある。PPFDとPRIの回帰直線を月別に求めると、4月から9月までの間には負の相関関係が存在し、Y軸に対する回帰直線の切片と回帰直線の傾きは月毎に変化していることが認められる。切片に着目すると、開葉前の4月に切片は最小となり、その後8月までは増加し、9月にはやや低下する。一方回帰直線の

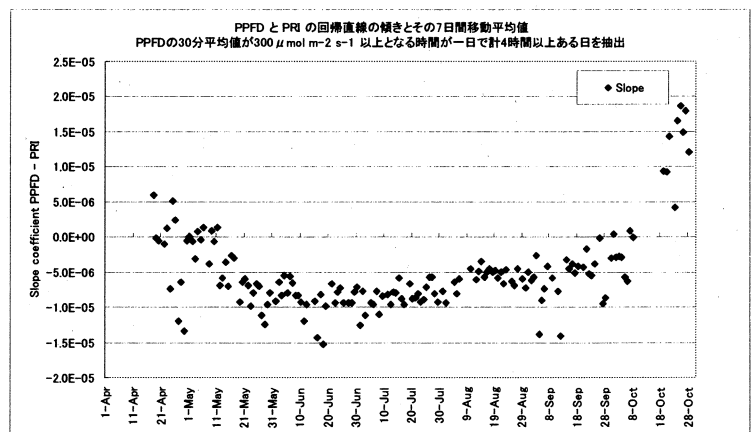
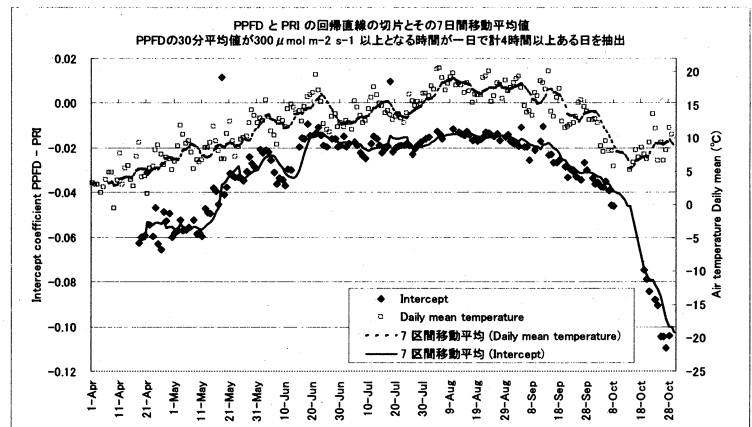


図8 (上) 日別のPPFDとPRIの回帰直線から計算される切片の値と、その7日間移動平均値の季節変化
(下) 日別のPPFDとPRIの回帰直線の傾き

傾きは、4月に最小となり6月に最も大きくなり、それ以降9月まで低下する傾向が認められた。以降、この回帰直線と切片の季節変動について検討する。

図8(上)には、日別のPPFDとPRIの回帰直線から計算される切片の値と、その7日間移動平均値の季節変化を示した。切片の値は5月中旬に急上昇し、以降増減しながら8月に最大となり、それ以降は低下する。比較する気象要因として、カラマツ樹冠上部に相当する地上高14mの日平均気温の7日間平均を算出し、併せて図中に入れて両者の変動を比較すると、カラマツ葉の展葉期以降の5月中旬以降、両者の変動に良い対応を見ることができる。5月15日から9月24日においては、両者の間には相関係数0.76の正の相関が得られた。中路ら³⁾は、人工気象チャンバー実験により、気温の上昇とともにポプラ単葉のPRIが増加することを示したが、今回の結果は自然環境下でのカラマツ林でも同様な傾向が認められたものと考えられる。

次に、図8(下)は、日別のPPFDとPRIの回帰直線の傾きを示したものである。傾きの値は図7からも明らかなように活葉期には負の値を取り、日々の変動はあるものの、6~7月にもっとも傾きが大きくなり、それ以降は傾きが少しずつ低下していく傾向が認められた。この回帰直線の傾きは日中のPPFDの増加に対するPRIの低下の度合いによって決定される値であることから、これはカラマツ葉内の生化学的な要因の季節変化に対応したものであることが推察される。

以上により、カラマツ短枝葉の成長が顕著になる5月中旬以降のPRIの季節内変化には気温が関係し、日々の日変化はPPFDである事が示唆された。

4. レーザ計測技術による森林バイオマス推定の高度化

(1) 研究目的

リモートセンシングによって、森林の分光反射特性から森林のCO₂固定量を推定するためには、森林における日射の伝達量を明らかにする必要がある。日射の伝達量は森林の構造と密接に関係しているため、森林の三次元構造を把握する必要がある。加えて、森林管理、森林施業などによる吸収源活動の評価のためには、森林内の三次元的なバイオマスの分布を定量的に把握する必要があるが不可欠であり、喫緊の課題とされていた。ここで、森林の構造を測定する一般的な方法として、Plant Canopy Analyzer (Li-Cor, LAI-2000) や魚眼レンズを使って撮影した全天空画像が用いられる。これらの方法はいずれも、森林を通過する日射の割合から森林の間隙率 (Gap Fraction) を測定することで、葉面積指数 (LAI) と平均葉傾斜角 (MTA) を測定している (Warren Wilson, 1960⁴⁾)。しかし、林床からの測定だけでは森林の構造を空間的に測定することができず、また、晴天や曇天などの日射条件によって測定結果が影響を受けるなどの問題がある。こうした問題を解決するため、ここではレーザ距離センサを用いた森林の構造を測定する方法の開発を目的として研究を行った。

(2) 研究方法

レーザ距離センサは、センサから発射したレーザ光線が測定対象によって反射され、再びセンサに戻ってくるまでの時間から測定対象までの距離を測定する事が可能である。また、レーザの進路上に測定対象がない場合は通過したと判断される。この特徴を利用し、レーザ光線が森林を通過する確率からGap Fractionを測定する事で、日射の条件に左右されずに森林の空間的な構造を測定することが可能となる。そこで、森林の空間的な構造を明らかにするため、地上設置型レーザ距離センサによる林床からの測定を行い、解析アルゴリズムを開発すると同時に、林床の測

定から得られた森林の空間的な構造を用いて日射の伝達量を計算し、森林による日射の吸収量と森林内の日射の空間的な分布を推定した。

本研究では、森林の構造を三次元格子状に分割したセルの配列で表現し、各セル毎に LAI、MTA を求めた (図 9)。以下に、各セル毎に LAI、MTA を測定する方法を述べる。

はじめに述べた、レーザ光線の樹冠通過率である Gap Fraction は次の式から求められる。

$$T(\theta i) = \exp\{-LG/\cos(\theta i)\} \quad \dots \textcircled{1}$$

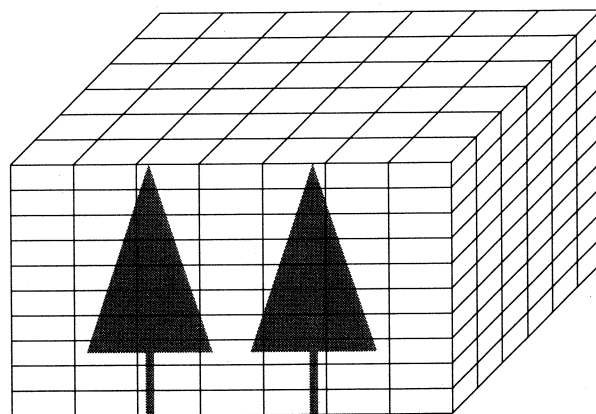


図 9 森林の構造を三次元格子状に分割してできるセルの配列で表現したモデル。各セル毎に LAI と MTA を定義する

ここで、 $T(\theta i)$ は Gap Fraction であり、垂直に対して θi の角度で発射したレーザ光線が森林を通過する確率、 L は LAI、 G は θi のレーザ光線に対して垂直な平面への単位葉面積の平均投影面積である。式①は、群落が水平方向に十分な広がりを持つ場合に有効であるが、本研究が目指すセル単位の空間を考えた場合、側面からのレーザ光線の出入りを考慮して Gap Fraction を測定する必要がある。そこで、セルを水平な薄い n 個の層に分割する事を考え、分割したそれぞれの層では側面からレーザ光線の出入りがないようにする。そして、それぞれの層について Gap Fraction を測定し、 n 個の層で Gap Fraction の積和をとる事でセル単位の Gap Fraction を求めた。

$$T(\theta i) = \prod_{h=1}^n T_h(\theta i) \quad \dots \textcircled{2}$$

ただし、 $T_h(\theta i)$ はセルを分割してできる層 h の Gap Fraction である。Gap Fraction から LAI と MTA を計算する方法は、Norman and Campbell(1989)⁵⁾ (以下、N&C 法) によって詳しく述べられている。

データ取得実験として 2003 年 4 月から、北海道苫小牧市の国有林内にある苫小牧フラックスリサーチサイト (苫小牧 FRS、北緯 $42^{\circ} 44'$ 、東経 $141^{\circ} 31'$) のカラマツ林で、地上設置型のレーザ距離センサを使った森林の構造の測定を行った。苫小牧 FRS のカラマツ林は、林齢が約 45 年、立木密度 1087 本 ha^{-1} 、平均樹高が 13.8m である。

測定に使用したレーザ距離センサ (Riegl, LD90-3100HS) は距離だけしか測定できないため、 $x y z$ 座標を測定できるように、レーザ距離センサを回転ステージ (中央精機、ARS-936-HP & ARS-136-HP) に取り付け、さらにもう一台の回転ステージと直行するように取り付けることで水平方向と垂直方向の 2 軸の回転角度を測定できるようにした。レーザ光線の発射角度は、垂直方向について天頂角 $10^{\circ} \sim 70^{\circ}$ の範囲を 5° 間隔に、水平方向については、天頂角を固定した状態あレーザ光線を発射した。レーザ光線は、1 秒間に約 13 本発射し、1 回の測定に 15 分程度必要とした。なお、レーザ距離センサは、測定範囲が 50m~150m、測定精度が $\pm 20\text{mm}$ 、ビームの広がり角が 2.0mrad (取説より) であり、回転ステージは、分解能が 0.004° /ステップ、位置決め精度

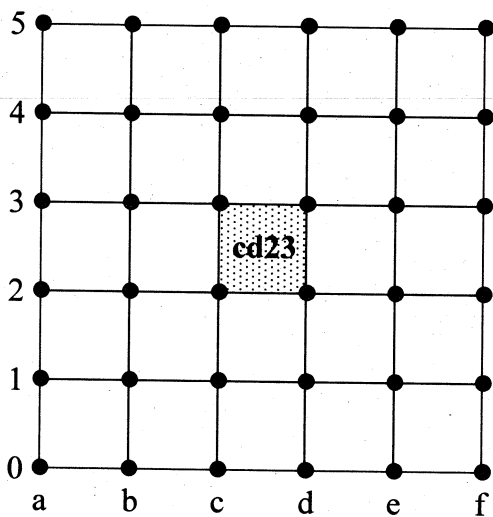


図 10 レーザ距離センサの設置点 (●) と、LAI と MTA の測定区画 (アミかけ)

が±0.033° だった。

測定は、サイト内に設定した 50m×50m の実験エリアで行い、実験エリア内に 10m 間隔でレーザ距離センサの設置点を設け、36 点でレーザ計測を行った (図 10)。LAI と MTA は、4 つのレーザ距離センサの設置点に囲まれた 10m×10m の区画を、高さ方向に 1m 間隔で分割してできる各セルにおいて計算した。

セルの三次元配列で再現した森林における日射の伝達量の計算は、森林に入射させた光線がルによって吸収・散乱・透過される過程を計算し、さらに散乱光についても同様の計算を繰り返すことで推定した。1 回の計算で、光線の本数は 50m×50m の範囲に 0.1m 間隔で 250000 本与えた。また、光線の入射角度と光線の強度は全ての光線で同じ値に設定した。

セルによる吸収・散乱・透過の計算は、図 11 に示した手順で計算した。光線がセルを通過する距離については、光線の始点座標と光線のベクトルから、光線が含まれるセルの壁面と光線の交点を計算し、2 点間の距離として求めた。次に、光線がセル内部で散乱されるか、あるいは散乱されずに透過するかの判定を行った。まず、光線がセルを通過する距離を用いて、式③から光線がセルを透過する確率を計算した。

$$T(\theta_i) = \exp(-uGl) \quad \dots \textcircled{3}$$

ただし、 u はセルの葉面積密度 (LAD : Leaf Area Index、 m^2/m^3)、 l は光線がセルを通過する距離である。次に、0 から 1 の範囲で乱数を発生させ、光線がセルを透過する確率よりも小さいときには透過、大きいときには散乱されると判定した。光線がセルを透過すると判定された場合、光線が含まれるセルの壁面と光線の交点を新しい始点として、次のセルについて同様の判定を行った。光線がセルによって散乱されると判定された場合、0 から 1 の範囲で乱数を

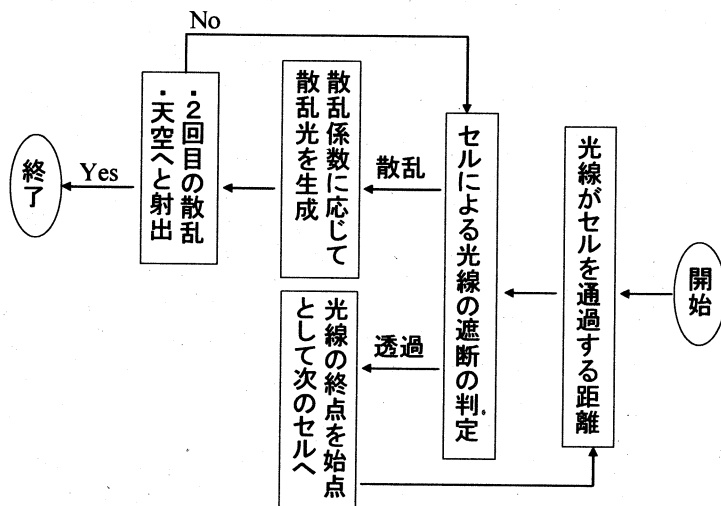


図 11 セルによる光線の吸収・散乱・透過の計算手順

発生させ、光線がセルを通過する距離との積をとることで、散乱される点の座標を求め、散乱された点の座標を新しい始点として散乱光を発生させた。散乱光は、1 回の散乱で 100 本生成し、それぞれの散乱光のベクトルは乱数を用いて決定した。計算が終了する条件として、光線が 2 回目の散乱を受けた場合と、光線が天空へと射出された場合とした。光線が 2 回目の散乱を受けた

場合は、光線はセルによって全て吸収されるとした。

セルによる日射の吸収量は、光線がセルによって散乱されたと判定された場合に、セルの散乱係数と光線の強度から計算して推定した。また、森林内の日射の伝達量はセルによって散乱されずにセルを通過した光線の強度から推定した。

(3) 結果・考察

レーザ距離センサを使用した測定では、葉と枝・幹を区別して測定する事ができず、測定結果は LAI ではなく PAI (Plant Area Index) として求められたため、以下の説明は全て PAI に関する結果である。

① 林床からの測定で得られる群落構造の空間分布

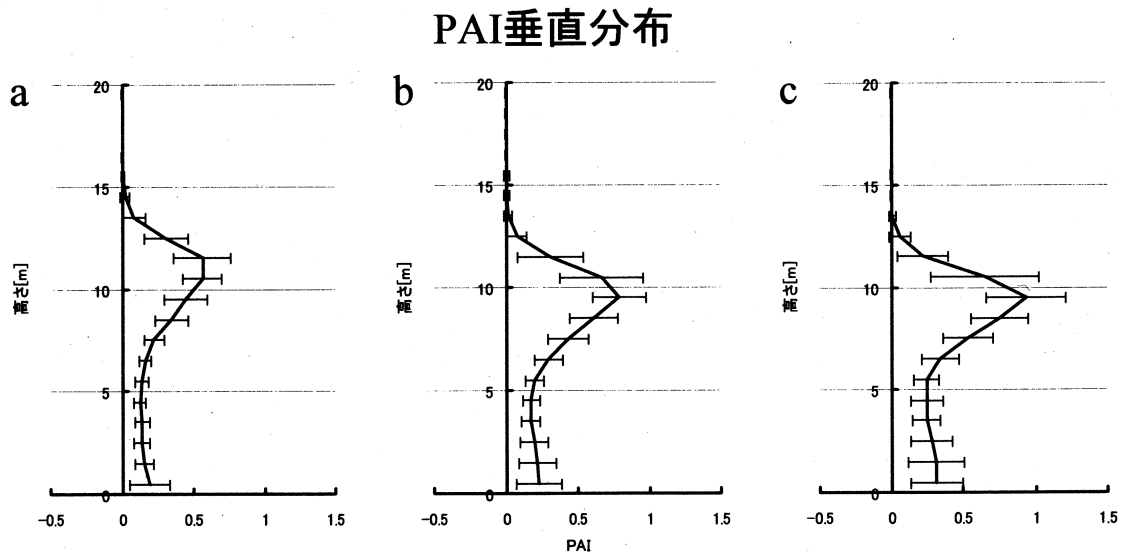
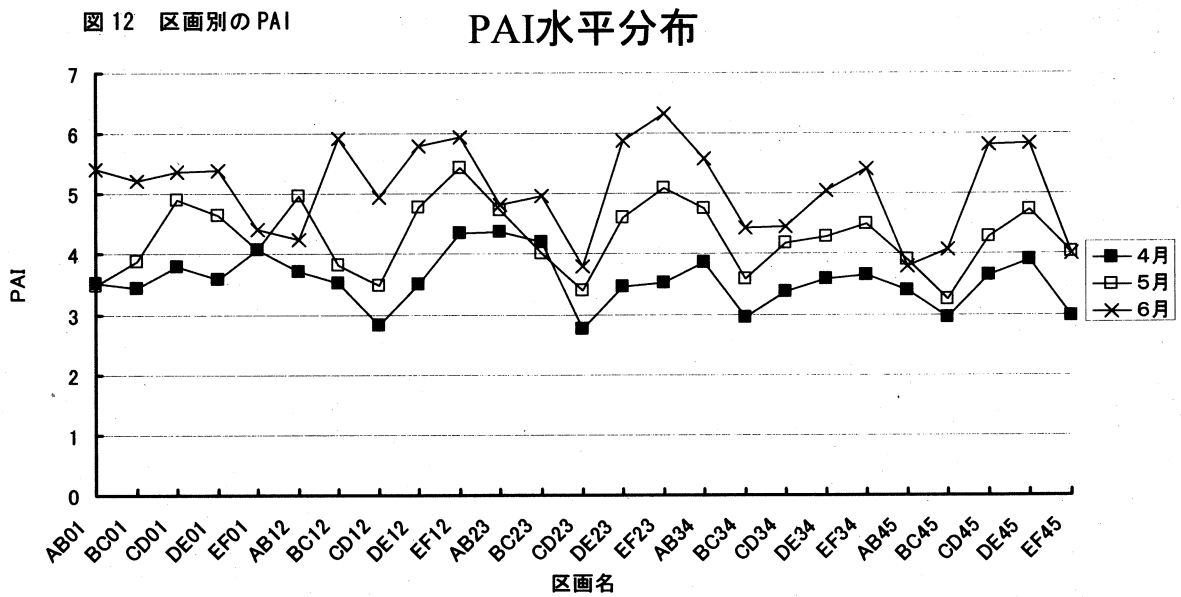


図 13 4月 (a)、5月 (b)、6月 (c) における、PAI の垂直分布

図 12 に、4 月、5 月、6 月の区画別 PAI を示した。ここで、4 月の測定は融雪直後に行っており、下草を含めて葉はほとんど展開していない状態だった。ほとんどの区画で、4 月に PAI が高く枝や幹の多い区画では季節とともに葉面積の増加も大きく、反対に PAI の低い区画では葉面積の増加が小さいことが分かった。実験エリア全体の 4 月、5 月、6 月の PAI の平均はそれぞれ 3.5、4.4、5.1、標準偏差はそれぞれ 0.4、0.6、0.8 だった。

次に、25 区画全てについて、同じ高さのセルの PAI を平均して垂直分布で表した結果を図 13 に示した。高さ別に PAI をみていくと、4 月の段階で約 11m の高さでもっとも PAI が高かったのに対して、5 月と 6 月では約 9m の高さでもっとも PAI が高くなっていた。PAI のピークが低くなっていく理由として、葉の展開によって枝が垂れ下がった状態になる事が考えられる。ただし、レーザ光線を使用した測定では、葉が展開するにしたがって上層へと到達するレーザ光線の数が減少するため、測定精度が低下することも考えられ、原因については今後の課題とした。PAI がもっとも小さいのは約 5m の高さで、5m よりも下層の植生では PAI の増加がみられた。

表 1 に、4 月、5 月、6 月の区画別の MTA を示した。MTA は、季節とともに小さくなっており、実験エリア全体の 4 月、5 月、6 月の平均はそれぞれ 57.4°、49.4°、38.2° となり、季節とともに葉が垂直に近づく結果となった。なお、MTA の標準偏差は 4 月、5 月、6 月でそれぞれ 5.7°、7.1°、7.0° だった。MTA についても、セル単位で計算することが可能だが、MTA がマイナスになるセルや、90° 以上になるセルが多くみられたため、区画別に平均した結果をセルの代表値とした。

	AB01	BC01	CD01	DE01	EF01	AB12	BC12	CD12	DE12	EF12	AB23	BC23	CD23	DE23	EF23	AB34	BC34	CD34	DE34	EF34	AB45	BC45	CD45	DE45	EF45
4月	59.2	63.6	62.0	59.5	65.9	50.7	50.0	62.9	53.9	61.0	59.8	66.7	56.4	51.7	59.4	53.8	53.7	53.6	57.1	62.2	57.2	65.1	57.2	43.5	50.3
5月	36.1	45.5	59.9	46.5	40.5	47.0	54.9	61.4	48.2	53.1	35.2	41.9	49.1	55.9	53.4	47.9	52.4	54.3	51.1	53.8	60.4	54.2	40.2	43.3	48.7
6月	44.7	28.8	46.1	36.6	42.9	31.0	17.4	37.0	44.7	39.1	37.9	37.5	39.0	40.0	42.2	31.0	50.7	40.1	36.2	48.5	39.8	31.1	40.9	38.7	33.4

表 1 区画別の MTA

吸収垂直分布

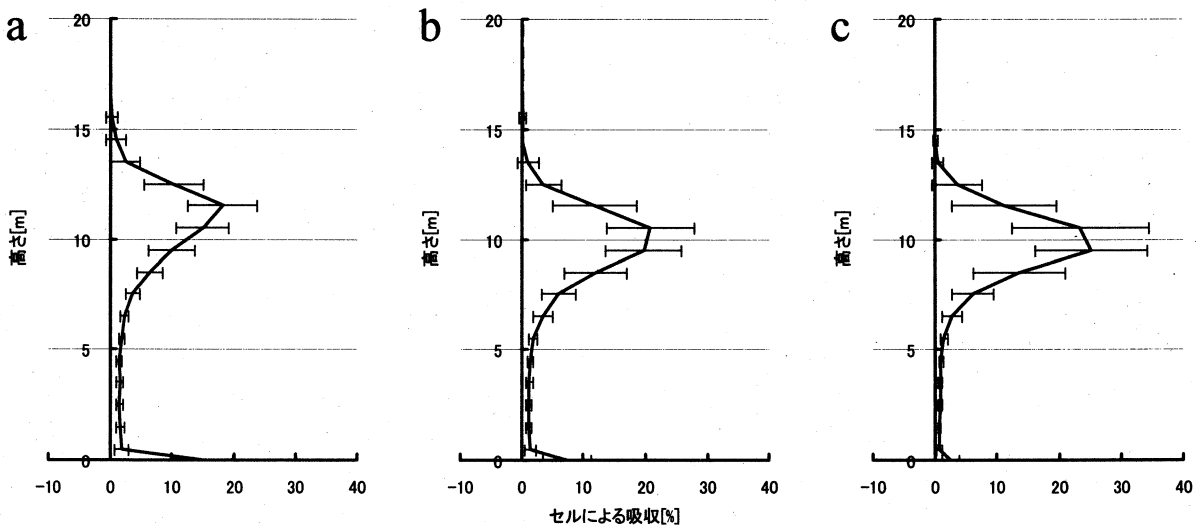


図 14 4 月 (a)、5 月 (b)、6 月 (c) における、セルと地表面の日射吸収割合

②セルによる日射の吸収量

図 14 に、セルによる日射の吸収量の垂直分布と地表面での吸収量を示した。ただし、日射の入射天頂角を 0 度とし、森林の上面からの入射を 100%としたときの割合として示した。また、セルの散乱係数を 15%、地表面による散乱係数を 20%として計算した。セルによる吸収量は PAI の垂直分布と同じような分布をしめしており、葉の多い場所では吸収が大きい事が示された。ただし、上層でほとんど吸収されるため、下層における吸収がほとんど見られなかった。地表面に到達する日射は、4月では約 15%だったが、5月と6月ではそれぞれ 7%、3%と小さくなり、下層に到達する日射が減少いく様子が再現できた。

③日射の伝達量の垂直分布

図 15 に、下向きの日射に対する垂直分布を示した。日射の入射角、セルと地表面の散乱係数については図 14 と同じ条件にした。日射は、PAI が大きくなる高さで急激に減衰しており、季節とともに下層に到達する割合が少なくなっている様子が再現され、6月では地表面にほとんど到達しておらず、図 14 の結果と一致している。

日射垂直分布

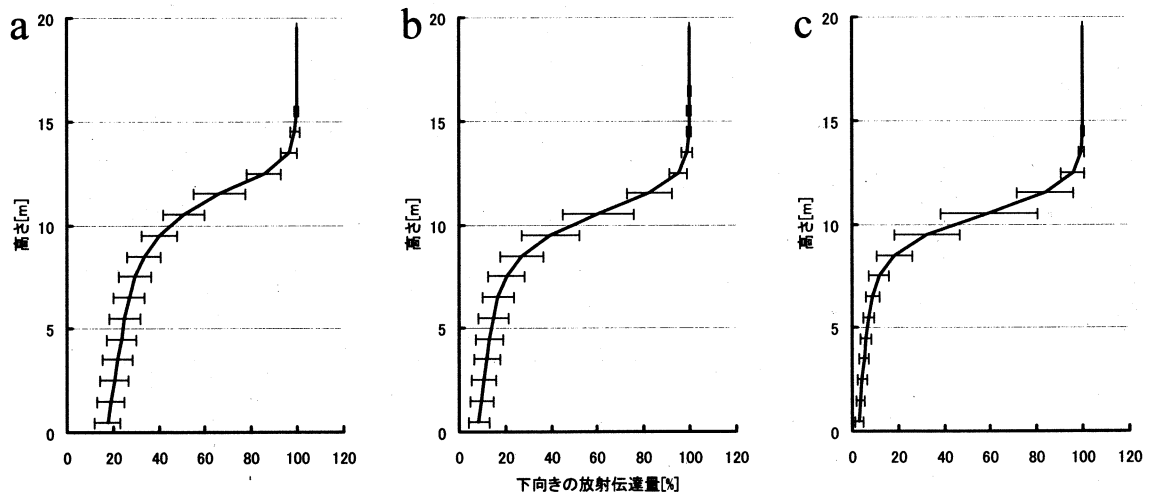


図 15 4月 (a)、5月 (b)、6月 (c) における、下向き日射量

5. 地上レーザスキャナによる森林バイオマス計測手法の開発

航空機搭載型のレーザプロファイラにより、森林の樹高計測を高精度かつ広範囲に行うことが可能となってきた。しかしながら、上空からのリモートセンシングのみでは、上層木よりも下に存在する不可視木や、林床部での小木などのバイオマスの評価を直接的に行うことは不可能であり、課題とされてきた。よって森林バイオマスを評価するためには、上空からの上層木の樹高計測と対応した地上での全バイオマスの計測を行い、両者の関係を求めていくことで、上空からの樹高計測のみから地上の全バイオマスを推定することが可能となる。これまでの地上におけるバイオマス計測は人力によって行われ、時間と労力を要したことから、高速、簡便かつ高精度の地上部バイオマス推定手法の開発が必要とされてきた。このような要求から、魚眼レンズを使って撮影した全天空画像⁶⁾やレーザポインター⁷⁾、レーザプロジェクタ⁸⁾、さらには地上レーザスキ

ャナを用いた森林バイオマス計測手法が提唱されつつある^{9) 10)}。このような背景から、ここではレーザスキャナによる林分バイオマス（材積）の推定手法を確立するために、①計測で得られたレーザ点群データを元に円柱近似することによってモデル化する手法を試み、胸高直径及び立木位置を同時に求める方法と、②林分材積を算出する手法として知られているビッターリッヒ法を発展させた箕輪法¹¹⁾にレーザデータを適用し、林分材積を求めるといった2つのアプローチを試みた。以下に詳細について述べる。

① 点群モデルを用いた計測手法の開発

(1) 研究目的

地上設置レーザスキャナによる林分材積の推定は、データ取得の容易さから最も有望な方法の一つであると考えられ、幾つかの解析手法が提唱されつつある。しかしながら既存の方法では、立木断面のエッジを抽出する方法でスキャナ本体の設置高と同じ高さの立木直径の計測に成功しているものの、スキャナの設置高以外は計測できないため、傾斜地での胸高直径の計測や上部直径などの計測には利用できないなどの問題がある¹²⁾。そこで、本課題ではスキャナにより計測された点群を円柱でモデル化する手法を試み、胸高直径および立木位置の計測精度の検証を行うこととした。

(2) 研究方法

実験は、茨城県つくば市にある国立環境研究所敷地内のアカマツ林 (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) において行った。林内に 60m×45m のプロットを設定し、DBH（胸高直径）8cm 以上の個体について立木位置、DBH を測定した。また、DBH 階級別の代表木について樹高を測定した。DBH は調査者の胸高（地上約 1.2m）の位置にてエスロン製巻尺を用いて測定し、立木位置はトータルステーションを用いて計測した（図 16）。トータルステーションの反射鏡は立木胸高位置

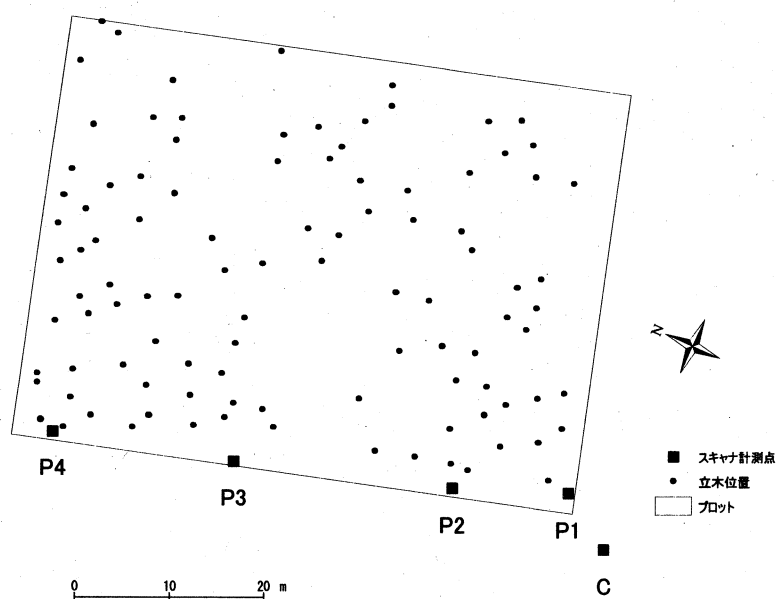


図 16 立木位置およびスキャナ観測点

の一定方位に密着させ計測した後、DBH を用いて立木中心位置を算出した。樹高の測定にあたっては、樹高測定器（OPTI-LOGIC 社製 LASER RANGEFINDER 400LH）を用いた。

調査地の ha 当たり本数・材積は 374 本 ha⁻¹・278m³ha⁻¹であった。林床は、定期的な草刈りにより強度に刈り払われているため、立木の根元までの見通しは良い。

レーザデータの取得には、限られた範囲を高精度に取得できる Cyra Technologies 社の

Cyrax2500（以下 Cyrax と略す）と、広範囲のデータ取得を高速に取得することができる RIEGL 社 LMS-Z210（以下 RIEGL と略す）を使用した。今回計測された点群データは Cyrax・RIEGL

共に Cyrax2500 用処理ソフトウェアである Cyclone3.0 によって 3D モデル化処理を行った。

スキャナ計測における、機種による差異、スキャン解像度による差異を検証するために Cyrax と RIEGL を調査地の図 16 上の点 C および点 P1 に設置し計測を行った。RIEGL については計測時の角度分解能による差異を検証するため、 0.2gon ($=0.18^\circ$)・ 0.08gon ($=0.072^\circ$) の 2 つのモードにて計測を行った。また、1 点からの計測では立木の陰になり、背後の立木が測定されないことが予測される。このため、複数点からの計測によって、計測可能木・精度にどのように変化するか検討するため、RIEGL について 4 点 (P1・P2・P3・P4) に設置して 0.2gon モードで計測を行った。また、z 座標は P1 の観測高を 1.2m (胸高) として、各点の測定を行った。データの解析には、Cyclone および ArcView、ArcGIS を用いた。具体的な手順を次に示す。

ア. スキャナ計測の実施

イ. 点群のデータから、地上高 0.2m~2.2m を抽出

ウ. 抽出した点群データを、円柱モデルで近似

エ. 近似した円柱の直径を胸高直径とする。また、円柱の中心線と $z=1.2\text{m}$ 平面との交点座標を立木位置とする。

オ. 毎木調査による立木データに対して、スキャナ計測による立木データのうち最も近い立木を対応する立木とする。

カ. 上記オ. の結果、以下のものは除外する。

- ・対応するデータセット間の距離が 1 m 以上のものは異なる立木と判断し、除外する。
- ・計測結果の DBH が 1m 以上の場合は、異常値として除外する。

キ. 残ったスキャナ計測立木の x、y、DBH に対して、対応する毎木調査による計測立木の x、y、DBH を真値とみなし、双方間の誤差を求める。

計測の精度の評価には誤差の標準偏差を、確度の評価には誤差の平均を用いた。

(3) 結果と考察

レーザスキャナによる取得データの一例を図 17 に示す。

この例では、P1 および P2 からの観測結果をそれぞれ赤と青の点群で三次元表示している。立木の胸高部分のみならず樹幹上部、枝、樹冠の一部まで座標が取得されていることがわかる。ただし、立木の陰になり計測できない部分もある。黄色で示した円柱は、0.2~2.2m 部分の点群を円柱モデルで近似した結果である。

機種および分解能の違いによる計測結果を表 2 に、胸高直径の各計測値と実測値の比較を図 18 に示す。

胸高直径の測定誤差は、観測点から計測対象立木までの距離 (以下対象範囲とする) にかかわらず Cyrax の確度が 1cm 以内、精度が 3.3cm 以内となっている。これに対し、RIEGL は対象範囲 20m 未満で確度 1cm 以内、精度も 4.3cm 以内となっているものの、20m 以上の範囲で確度・精度と

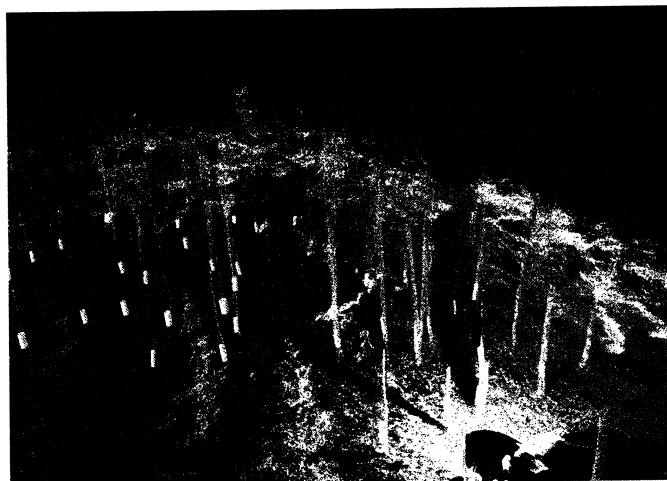


図 17 レーザスキャナによる観測結果の例

機種および分解能	対象範囲	計測本数	計測本数率	位置精度 (cm)	DBH測定誤差 (cm)	
					確度	精度
Cylax	~ 20m	8	72.7%	1.7	-1.0	0.1
	20m ~ 40m	9	45.0%	3.3	-0.1	3.3
	40m ~ 60m	10	22.2%	2.8	0.5	2.1
Regle 0.08gon	~ 20m	13	72.2%	4.2	0.6	4.3
	20m ~ 40m	8	27.6%	2.6	2.4	8.4
	40m ~ 60m	5	11.1%	7.7	15.5	4.3
Regle 0.2gon	~ 20m	13	72.2%	4.3	0.7	3.3
	20m ~ 40m	7	24.1%	2.3	4.0	1.9
	40m ~ 60m	2	4.3%	5.1	-2.7	6.5

表2 機種別の計測結果

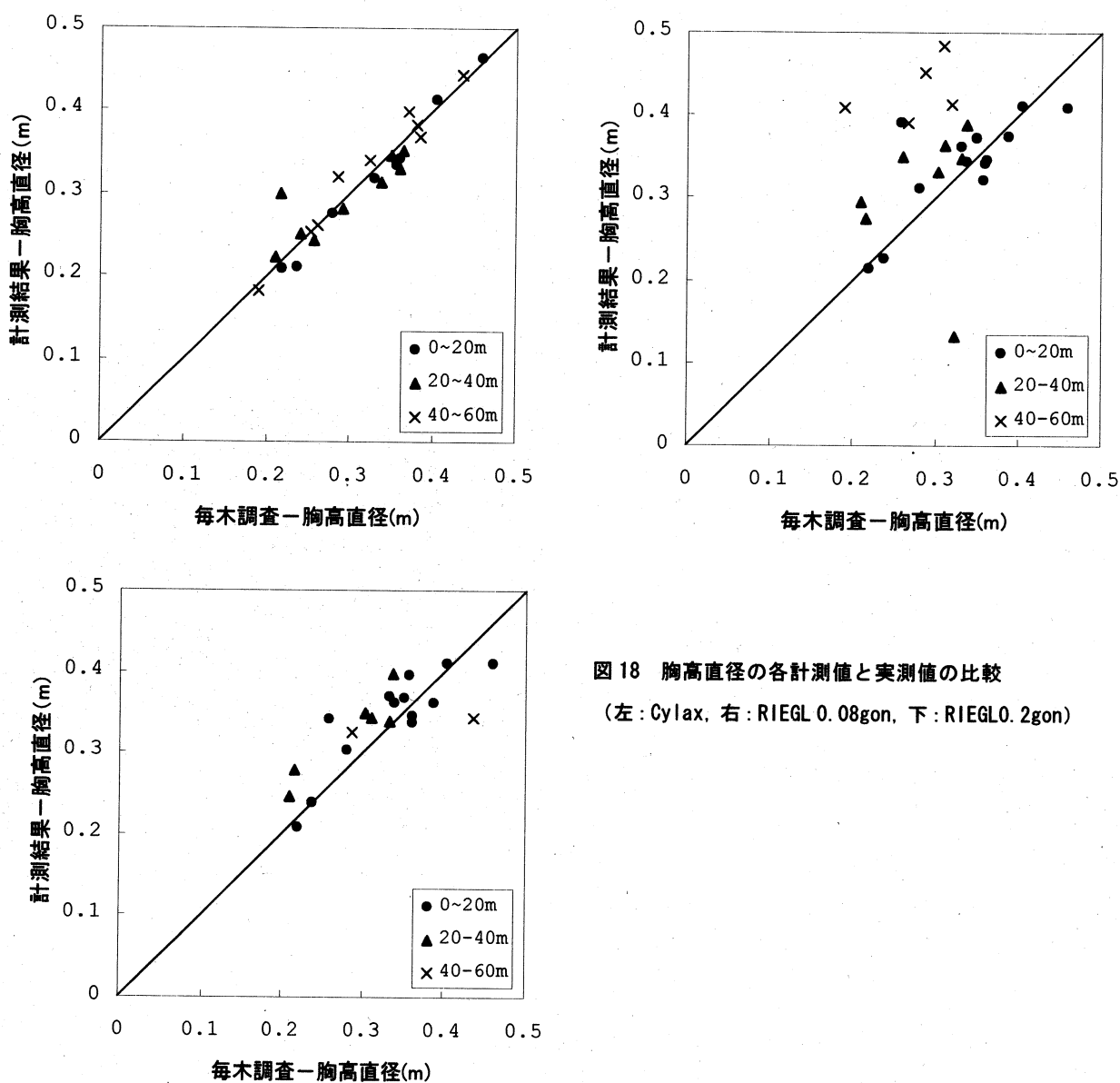


図18 胸高直径の各計測値と実測値の比較
(左: Cylax, 右: RIEGL 0.08gon, 下: RIEGL 0.2gon)

機種	対象範囲	計測本数	計測本数率	位置精度 (cm)	DBH測定誤差 (cm)	
					確度	精度
P1	～ 20m	13	72.2%	4.3	0.7	3.3
	20m ～ 40m	7	24.1%	2.3	4.0	1.9
	40m ～ 60m	2	4.3%	5.1	-2.7	6.5
P2	～ 20m	10	47.6%	5.8	1.3	2.9
	20m ～ 40m	13	29.5%	2.5	4.8	5.8
	40m ～ 60m	4	12.1%	1.8	13.2	6.0
P3	～ 20m	14	56.0%	2.4	3.4	2.3
	20m ～ 40m	25	39.1%	4	4.0	5.1
	40m ～ 60m	0	0.0%	-	-	-
P4	～ 20m	15	55.6%	2.8	3.7	2.6
	20m ～ 40m	6	19.4%	3.9	8.7	7.1
	40m ～ 60m	2	4.8%	8.1	5.6	3.1

表3 RIEGL0.2gonモードによる地点別の計測結果

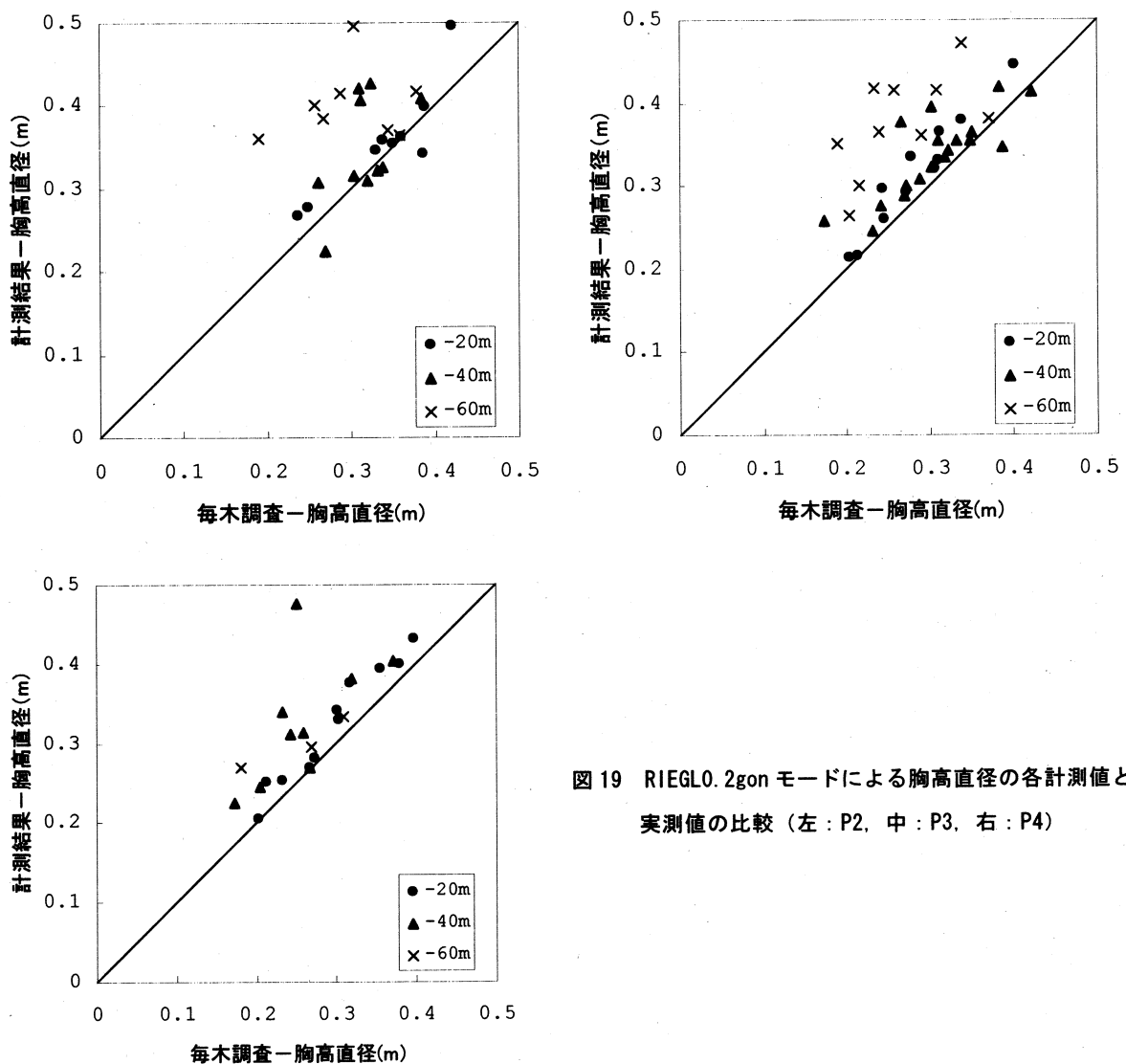


図19 RIEGL0.2gonモードによる胸高直径の各計測値と実測値の比較 (左:P2, 中:P3, 右:P4)

も低下している。また、RIEGLの0.2gonと0.08gonを比較すると、0.08gonの方は計測可能木が多かったが、精度は悪くなっていた。0.2gonでは解像度の荒さから立木と判断できなかったものの中にも、0.08gonでは立木と判断できるものが存在したが、このような立木は小径木や他の立木の背後にあり、一部しか計測されていないものが多いため、精度の悪化を引き起こしたと考えられる。

計測本数率は、いずれも対象範囲20m未満で約70%観測できてはいるが、それ以上の範囲では半数以上が観測できていなかった。位置精度は、2cm~8cm程度であり、特にCyraxでは4cm以内に収まっていた。

次に、測定地点の違いによる計測結果を表3に、胸高直径の各計測値と実測値の比較を図19に示す。

胸高直径は、対象範囲20m以内では精度が3.3cm以内であるが、対象範囲が広がるとP1を除き、確度・精度ともに低下している傾向が見られる。計測本数率は対象範囲20mまでで、P1が約70%であり、他は約50%となっている。これはP1が林地と開放地の境界部であり視通が良いため、計測本数率が上がったと思われる。

次に、複数の観測点の点群データを用いて解析した計測結果を表4に、胸高直径の各計測値と実測値の比較を図20に示す。

観測点	対象範囲	計測本数	計測本数率	位置精度 (cm)	DBH測定誤差 (cm)	
					確度	精度
P1	60m × 45m	22	21.8%	4.1	1.9	4.6
P1・P2	60m × 45m	42	41.6%	4.9	3.6	5.4
P1・P3	60m × 45m	51	50.5%	3.5	2.8	4.9
P1・P4	60m × 45m	46	45.5%	5.2	2.9	5.0
P1~P4	60m × 45m	69	68.4%	3.8	3.6	4.3
P1~P4	60m × 20m	44	84.8%	4.2	2.3	3.5

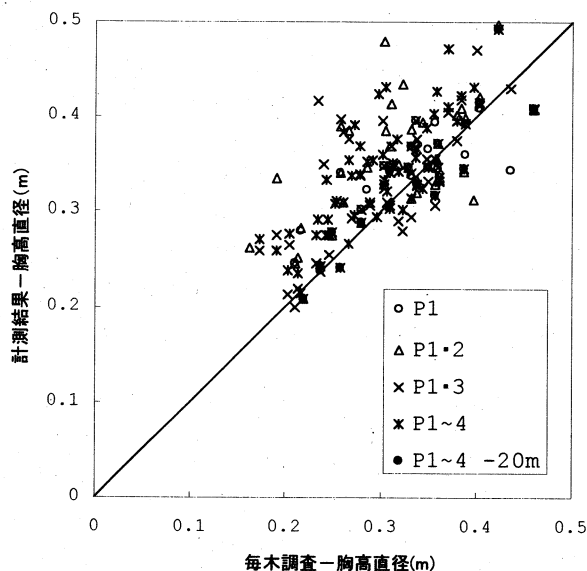


図20 RIEGL 0.2gonモードによる胸高直径の各計測値と実測値の比較

表4 RIEGL0.2gonモードによる複数観測点の点群データを用いた計測結果

複数計測点からの観測により、計測本数率が向上しており、4箇所からの計測では、68.4%が計測可能であった。胸高直径の確度は3.6cm、精度は4.3cmとなった。また、計測対象範囲をそれぞれの計測点から20m未満とすることにより、計測本数率は84.8%になり、胸高直径の確度・精度も向上した。

以上のことから、胸高直径は、Cyraxの場合対象範囲が60m程度でもある程度の精度を持つが、RIEGLの0.08gon、0.2gonの場合のいずれも対象範囲を20m程度とするのが望ましいと考えられる。また、複数の観測点からの計

測の場合も、対象範囲を各計測点から 20m 程度とすることで、計測本数率・胸高直径測定精度の向上を図ることができた。しかし、この場合でも計測本数率は約 80%であり、また、確度がプラス方向にずれる傾向がある。

・レーザ計測から得られた胸高直径を用いて材積・炭素重量を算出し、精度検証を行った。
材積は樹高曲線を作成（図 21）し、下記の材積式^{1 3)}を用いて求めた。

$$\log v = 1.863288 \log d + 1.004738 \log h - 4.249808 \quad (4 \leq d < 32)$$

$$\log v = 1.895653 \log d + 0.811988 \log h - 4.060353 \quad (32 \leq d < 42)$$

$$\log v = 2.002385 \log d + 0.888616 \log h - 4.347438 \quad (42 \leq d)$$

炭素重量の算出にあたっては、松本ら^{1 4)}の推定方法に従い容積密度の平均値、拡大係数を用い次式で求めた。

$$W_c = \rho_v \times V \times E \times C$$

W_c : 炭素重量 (tC)

ρ_v : 容積密度 (t/m³、アカマツ 0.405)

V : 幹材積 (m³)

E : 拡大係数 (針葉樹: 1.7)

C : 炭素含有係数 (tC/t: 0.5)

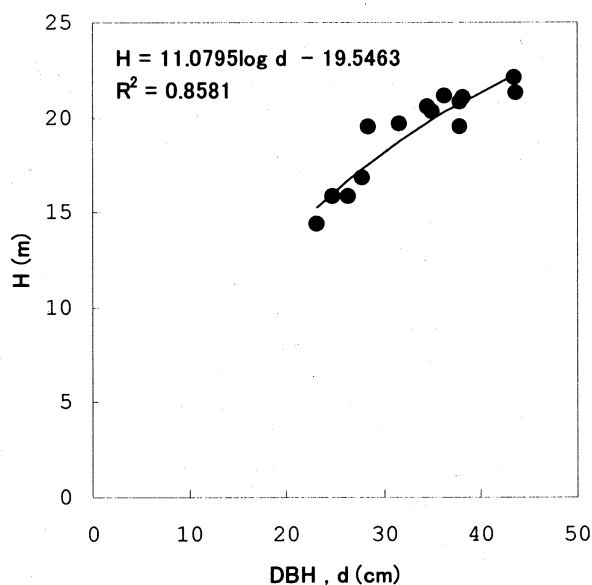


図 21 調査地の樹高曲線

・ha 当たり本数・材積・炭素重量の推定結果を表-5に示す。プロット全体での推定結果は、材積・炭素重量が 75%と過小に計測されていた。プロットの中で計測点に近い 20m 部分のみに限った場合の結果は、101.9%となった。

これらの結果から、DBH の計測精度については、Cyrax が高い精度で計測可能であった一方で、RIEGL の場合は解像度にかかわらず、スキャナ本体から 20m 範囲内では

高い精度で計測可能だが、20m 以上の範囲では精度の低下と確度もずれる傾向が明らかになった。RIEGL の場合、解像度が 0.08gon の場合でも 50m 地点でのレーザのピッチ間隔は 6.3cm に、0.2gon の場合は、15.7cm になる。この様な機器の制約の中、今回得られた測定誤差は 15.7cm 以下に納まっており、複数観測点からの点群データの合成および円柱による近似の方法は、精度向上に効果があったと考えられる。

確度のずれの原因としては、機器の系統的誤差、モデル化時の誤差が考えられるが、林らのエッジ法ではこのような確度のずれは報告されていない。よって、機器の誤差ではなく、モデル化時の誤差である可能性がある。Cyclone におけるモデル化は、点群データにモデルを近似させる

ことで行う。たとえば、観測点からの距離が 50m で DBH30cm の立木を 0.08gon 解像度で測定した場合、立木上水平方向に照射されるレーザの点数は 4~5 点である。点群の数が少ないと、個々の計測点の誤差が、モデルの近似結果に大きな影響をおよぼすと考えられる。また、計測対象物が立木という表面に凹凸があり形状も一定していない物体であることから、モデル化時に誤差が発生した可能性もある。このことから、今後林分調査に適応した点群モデル化手法を検討する必要があると考えられる。

立木位置座標については、誤差数 cm であったが、通常の巻き尺を使った立木位置測定ではこれ以上の誤差が生じると思われるので、本手法は有効な手段であると考えられる。

材積・炭素重量の推定については、プロットの中で、計測点に近い 20m 部分のみに限った場合、精度が向上していた。しかしこれは、本数の過小評価傾向と胸高直径の過大評価傾向で相殺された結果であると考えられ、必ずしも精度良く計測されたとは考えられず、今後の検討が必要であろう。

次に、Cyrax と RIEGL の林分調査への適応性を考える。立木位置調査については、Cyrax と RIEGL のどちらを用いても精度良く計測できると考えられるが、胸高直径を計測する場合は Cyrax 程度の高精度・高密度が必要であると思われる。ただし、Cyrax は視野角が狭いため広範囲の林分調査には RIEGL の方が適している。近年、RIEGL の精度・密度を高めた製品が発売されており、双方の特徴を兼ね備えたものとして期待される。また今回の結果ではスキャナ本体から 20m 範囲内では高い精度で計測可能であった。均一な林分では、この範囲内の調査でもある程度の精度は得られると考えられる。しかし、不均一な林分では、この範囲では不十分であると予測される。その様な林分で調査する場合は、調査時にあらかじめ空中写真等で林分状態を観察しておき、ランダムな点にスキャナを設置するのか、規則的に配置して大きなプロットとして調査を行うのか計画をたてる必要があると考えられる。

② 上部直径測定法による森林バイオマス推定方法の開発

(1) 研究目的

前節では、レーザによる点群データから毎木の胸高直径と位置を計測し、これから林分のバイオマス量を推定する試みについて述べた。しかし、この方法を用いて広範囲に測定を行おうとした場合、樹高曲線作成の必要性や複数点からの測定結果の接合精度の問題等があり容易に計測できないことが予測される。そこで、これらの問題に対応するため、ビッターリッヒ法の発展形である、箕輪の上部直径による林分材積推定法¹¹⁾ (以下箕輪法) をレーザスキャナ計測に応用する手法を開発した。

(2) 研究方法

箕輪法はビッターリッヒ法を基に展開された理論である。ビッターリッヒ法とは胸高断面積合計を測定する手法であり、その測定方法は次の通りである。ある十分に広い林地において、無作為に点を落とし、その点に立って周囲の立木の胸高直径を視角 α のスリットで観測する。そして、胸高直径が、その視角 α より大きな立木の数を数える。いま、この値に関して 1 点当たりの期待値を B とする。すると、この林分 (面積 T) の胸高断面積合計 G は、

$$G = BT \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad \dots \quad \textcircled{1}$$

によって推定できる¹⁵⁾。

さらに、これを三次元空間に拡張し林分材積を求めようとした理論の1つが箕輪法である(図22)。やはり十分に広い林地において、無作為に点を落とし、その点に立って一定の仰角 β で全周囲を見通し、見えた立木の切断径 $d(h)$ と切断高 h を測定することで、直接林分材積を推定する方法であり、全林材積は次式で求めることができる。

$$V = \sum v = \frac{T}{8 \cot^2 \beta} \cdot \sum E \left(\frac{d^2(h)}{h} \right) \quad \dots \quad \textcircled{2}$$

ここで、 V :全林材積 v :当該林木の幹材積、 T :全林面積 N :立木本数、 h :切断高 $d(h)$:切断径である。本報告では、 $T=1\text{ha}$ とすることで、 ha 当たり材積を求めることとした。

調査地は、北海道苫小牧市の国有林内にある苫小牧フラックスリサーチサイト(苫小牧 FRS、北緯 $42^\circ 44'$ 、東経 $141^\circ 31'$)のカラマツ造林地(1958年植栽)を対象とした。林内には、他にエゾマツ、広葉樹が侵入している。林床はオシダ、シネワラビなどのシダ植物に、低木のフッキソウが混生する植物によって占められ、一部クマイザサが優占している。

測定には、地上レーザスキャナであるRIEGL社製LMS-Z210を用いた。本装置の計測距離範囲は、 $2\text{m} \sim 350\text{m}$ 、計測精度は $\pm 25\text{mm}$ 、視野角は 330° (水平) $\times \pm 40^\circ$ (垂直)、角度分解能は 0.072° である。スキャナ計測は2003年4月に行った。計測ポイントは、対象地内に 10m 間隔で $4 \times 6 = 24$ カ所に規則的に設定した。各計測点においてスキャナを胸高位置(地上 1.3m)に設置し、視野角:水平 $330^\circ \times$ 垂直 $+40^\circ$ 、角度分解能:水平 $0.072^\circ \cdot$ 垂直 0.144° の情報を取得した(図22)。一点あたりの計測にかかる時間は約8分程度で、この計測のみであれば三脚設置も含め約15分程度である。取得した情報は、マシンビジョン画像解析プログラムを用い、領域成長法により樹幹部を抽出し(図23)、仰角を $2.5 \sim 37.5^\circ$ まで 5° 間隔にした場合の樹幹直径・測定高を自動計測した。材積の算出にあたっては箕輪法を用い、さらに水平視野角が 360° に足りないことを補正するため、算出した値に $360/330$ を乗ずることで材積の補正を行った。なお、この方法で算出される材積は、スキャナ設置高、つまり胸高より上部の林分材積となる。

また、スキャナ計測の精度を検証するために、同林分において2001年11月に計測された毎木

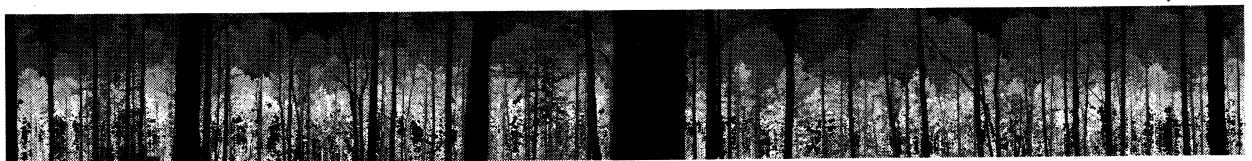


図22 距離画像

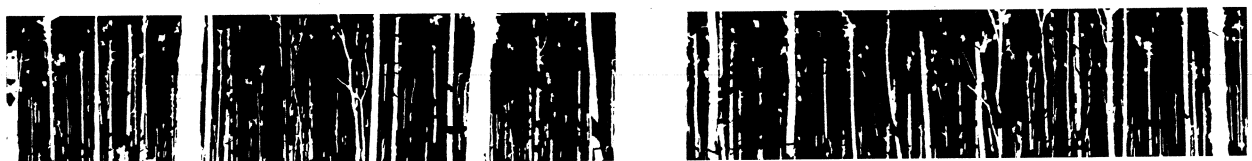


図23 樹幹抽出画像

調査データを用いた。調査は 100m×100m のプロットを設定し、調査区内の胸高直径 5cm 以上の立木に対し、樹種と胸高直径・立木位置の測定を行った。胸高直径の測定は直径割巻尺を用い mm 単位で測定を行った。樹高については、各径級の代表木を測定し、樹高曲線式を作成して全木にあてはめることにより求めた。また、立木幹材積は胸高直径・樹高より幹材積表を用いて求めた。カラマツについては北海道立木幹材積表^{1 6)}を、エゾマツ・広葉樹については立木幹材積表^{1 2)}を用いた。胸高より上部の林分材積は上記により求めた材積から、胸高から下の幹を円柱と仮定し、その材積を引くことにより求めた。

$$V_u = V - \pi \cdot (DBH/2)^2 \cdot \dots \cdot \textcircled{3}$$

ここで、 V_u : 胸高より上部の林分材積、 V : 林分材積、 DBH : 胸高直径である。なお、本報告では以降、胸高より上部の林分材積を林分材積と略すこととする。なお、本調査地の林分材積は $128.49\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ 、立木密度は 1087本 ha^{-1} 平均、樹高は 13.8m であった。

(3) 結果・考察

図 24 に仰角と各点の推定材積を示す。分散分析を行ったところ仰角が 2.5° の時の材積が他の推定値にくらべて有意に低い値となった。箕輪法においては、ある仰角で見通した場合に見える立木すべての計測を行う必要がある。計測ポイントから見通すべき距離は次式で求めることができる。

$$l = h_{cr} / \tan^{-1} \beta \cdot \dots \cdot \textcircled{4}$$

ここで l : 見通すべき距離、 h_{cr} : 平均樹冠高、 β : 仰角である。本林分では、平均樹高は 13.8m なので、 2.5° の場合、見通すべき距離は約 316m となる。これは、本計測装置の計測限界に近く、またこの距離であると分解能も立木を測定するには不足すると考えられる。このため、計測されない立木が多くなり、推定材積が過小評価されたと考えられる。一方、仰角 32.5° 、 37.5° の時の推定値は他に比べて有意に高い値となる傾向が見られた。樹冠抽出画像を観察すると、仰角の高い部分において、林冠部分が幹と誤抽出される傾向が強いため、推定値が過大評価されたものと考えられる。

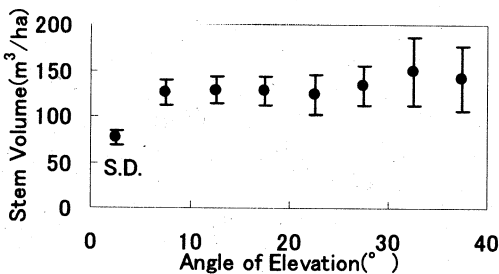


図 24 仰角と推定材積

次に、有意な差がみられなかった仰角 $7.5^\circ \sim 32.5^\circ$ の材積推定値の平均を各計測ポイントにおける材積推定値とした場合、それぞれの計測ポイントにおける推定値と毎木調査による林分材積の間の誤差は、 $RMSE=14.44$ 、誤差の平均は -1.01 、誤差の標準偏差は 14.71 となった。24 箇所の $RMSE$ で林分材積に対して約 11% の誤差があるものの、平均は 1% 以下の誤差となっていた。ビッターリッヒ法⁹⁾を用いる

際には、ha 当たり 5~8カ所測定するのが望ましいとされているが⁵⁾、本手法においても測定ポイントも同程度設けることで、誤差を小さくできることが期待される。

本報告により、地上レーザスキャナ計測に箕輪法を適用する方法が、林床植物の存在するカラマツ造林地においても有効であることがわかった。本手法の特徴としては、複数点からの観測デ

ータを結合するための GCP の測量が必要なく、また円柱モデリングなどの複雑な処理が必要ないため、外業や内業の大幅な労力削減が可能となること、また、材積表や樹高曲線・形状比等をあらかじめ用意することなく直接材積を推定できることである。このため汎用性があり、今後の発展が期待できる手法と考える。これまでは、平地林分を対象とした計測であったが、今後は、斜面林分へ本手法を適用するため、傾斜地での箕輪法の理論拡張や地上レーザスキャナ運用方法の検討をする必要がある。

6. リモートセンシング手法を活用した認証手法確立に向けたケーススタディ

(1) 研究目的

京都議定書で認められた森林管理を実施して、温暖化対策として森林炭素収支の適切な管理の実施が必要である。しかし、わが国では木材価格の下落により、放置され適切な管理が実施されていない森林が増えている。この問題を解決していくためには、適切な森林管理の実施に対してインセンティブを付与していくことが重要な方策の一つであり、適切な管理の実施に対して認証を行うことが考えられる。そのためには、適切な森林管理の実施を一定の基準のもとで評価する手法、さらにそのような森林管理の結果もたらされる炭素固定・バイオマス利用による温暖化防止効果、生物多様性、水土保持等のエコシステムサービスのパフォーマンスを定量的に測定する手法を開発しなくてはならない。本サブ課題では、今後のリモートセンシング手法を活用した認証手法を確立する際の予備的な検討を目的として、ケーススタディを実施した。

(2) 研究方法

ケーススタディは、特定サイトにおける適切な森林管理の実践を一つのプロジェクトと見立て、その森林管理による温暖化防止等の効果やそのプロジェクトへの投資効果を定量的に測定し評価する。そのプロジェクトの実施方法や期待される効果、及びその測定手法をまとめた書類（PDD）を作成することを目的として、そのために必要となるモデルサイトに関する以下の基礎的情報を収集した。

1. 森林管理の実施内容
2. 森林資源インベントリ
3. 気象データ
4. 木質バイオマスエネルギーへの取り組み
5. 生物多様性
6. その他 PDD 作成、炭素固定量等の測定に必要なサイト情報

ケーススタディの対象となったサイトは、三重県北牟婁郡海山町の2ヶ所の森林である。1ヶ所は、日本で初めてFSCの森林認証を取得した速水林業が管理する森林（大田賀山林）であり、環境と経済を両立させる森林経営を古くから実践している。その比較対照としたもう1ヶ所の森林は、海山町が管理する町有林である。間伐等の管理はある程度実施されているものの、林冠はほぼ閉鎖し林床は非常に暗くなっている。この2ヶ所は、いずれもこれまでの森林管理の履歴がはっきりしているため、管理手法の違いが、炭素ストックや生物多様性等のどのような違いをも

たらずかを明らかにすることが可能である。

(3) 結果・考察

① サイト間の比較

速水林業の山林と町有林でそれぞれ実地調査を行った結果、ほぼ同じ立地条件（斜面の向き、気候など）にも関わらず、前者の方が圧倒的に、土壌のA0層、A層の厚みがあり、土壌炭素ストックの量にも大きな違いが見られた。また生物多様性についても、前者が後者を大きく上回った。

F S Cの認証を取得するには、適切に間伐が実施され、下層植生が十分に繁茂している状況を実現してはならない。F S Cの認証を取得している速水林業では、林床の下層植生の豊かさが、土壌の炭素ストックの量と生物多様性を高くすることに大きく寄与していると考えられる。

② 炭素吸収量の認証と森林認証について

ア. 既存の炭素認証とF S Cの森林認証について

炭素吸収量を認証するシステムについては、すでにビジネス化されているものがいくつかある。例えばF S Cの認証機関になっているS G Sは、炭素認証サービスも実施している。日本でも、S G Sの日本法人が、国際航業と提携し、レーザープロファイラーによる測定を含む炭素認証サービスを商品化しているが、まだ実施事例は出ていない。

S G Sがイギリスで実施している炭素認証サービスは、基本的にドキュメントベースで実施されている。1. 森林資源のインベントリーを適切に管理し更新しているかどうか、2. インベントリーにもとづく炭素ストックの推計手法が適切かどうかを審査し、それらが適切であると判断されたら、炭素吸収量を認証するというものである。1. の審査については、F S Cの審査にも含まれる内容である。なぜなら、資源量の正確な把握は、森林資源の持続的利用の必要条件とされているからである。

S G Sの日本法人が実施しているのは、ドキュメントベースの審査にレーザープロファイラーによる検証を加えることで、より科学的に炭素吸収量の定量化を行おうとするものである。レーザープロファイラーによる調査は、対象林分に対して数年に渡って毎年実施し、炭素ストックの増加量から吸収量を算出するという方法である。しかし、コストがかかるということと、京都議定書にもとづく国内の炭素吸収量の扱いについて不明確な部分が多いことから、まだ国内でそのようなサービスを購入する主体はないようである。コストの面を考慮するならば、イギリスで実施されているようなドキュメントベースの審査による認証システムが現実的なものかもしれない。

イ. エコカーボンアカウンティングに向けて

本調査には、今後、本格的な研究の開始を予定している「持続可能な森林経営がなされている森林における炭素吸収量」を認証するエコカーボンアカウンティングのシステム構築に向けての基礎的調査という位置づけがある。今後、そのようなシステムを構築する際に、持続可能な森林経営であることを認証するF S Cのシステムとどのように連携できるかを、本調査の結果から検討した結果、下記のような知見を得た。

- ・ F S Cの認証を取得しているということで、持続可能性については証明されているとすることができる。またその審査過程においては、森林資源のインベントリーを適切に整備しているかどうか審査されている。

- ・今回ケーススタディの対象とした速水林業では、イベントリーの管理は正確に実施されており、立木の幹材積と毎年の成長量は、独自の収穫表に基づいて把握されている。イベントリーが正確であることは、収穫時の材積が、イベントリーで把握されているものとあまり乖離していないことから判断できる。
- ・しかし、F S Cの認証取得をしている場合は、イベントリーの管理が適切であると断じることができない。他の認証取得例では、県や国有林が作成している収穫表に基づいて材積や成長量の管理がなされているだけで、収穫時の材積とイベントリーが大きく乖離している場合がある。これは、収穫時の材積にもとづいて収穫表を修正するという作業が行われていないからである。このような資源量の把握について厳密性を欠いている場合でも、それをもって認証取得できないということにはならないが、より正確な資源の把握に努めるように審査報告書においてリコメンデーションが出されているケースも多い。このような点については、リモートセンシングを活用した正確な資源量の把握手法の開発と利用が必要である。
- ・結論的には、F S Cの認証システムに、イベントリーからの炭素の推計手法についての審査システムを付加することによって、エコカーボンアカウンティングのシステムを開発することが可能と考えられる。しかし、イベントリーの管理については、よりリモートセンシング技術を活用した定量的な計測手法をF S Cの認証システムに加える必要があると判断された。

③炭素吸収量や環境機能の変動に関する測定手法について

炭素吸収量についてはイベントリーの管理をどれだけ正確に行っているかを評価することで、おおよその炭素吸収量の把握は可能である。しかし、それが正しいかどうかについて検証するには、今後の、レーザープロファイラーや空中写真からの定量的な森林資源量の把握に基づいた推計が重要である。また、管理の違いが生物多様性に影響しているという結果が得られたが、汎用的な生物多様性の測定手法についてはさらなる検討を要する。

7. 本研究により得られた成果

本研究は平成13年度から開始された研究である。3年間における研究成果と解決すべき課題を以下に述べる。

- 1) 苫小牧フラックスリサーチサイトのカラマツ林における森林樹冠上での連続分光計測を行い、各種植生指数を算出し同時に計測されているCO₂フラックス、森林植生の葉面積指数(LAI)等との比較を約2年間継続して行った。その結果、これまで植生リモートセンシングにおいて一般的に用いられてきた正規化差分植生指数(NDVI)は、春先においては雪解けや林床植生に影響を受け、カラマツの開葉以前にNDVIが上昇してしまうこと、CO₂の吸収が増大する時期とNDVIの変化は概ね一致はするが、一方で落葉期にかけては、カラマツの光合成活性が低下してCO₂の吸収が低下し続ける時期でもNDVIの変化は僅かに減少が見られるのみで、落葉に合わせて植生指数が低下することが明らかになった。炭素吸収源としての森林活動における季節変動を、植生指数NDVIあるいはこれを改良したEVI等でモニタリングすることを想定すると、大まかな変動パターンは追跡が可能ではあるものの、本来葉面積指数などバイオマスの変化を観測するための植生指数では、日変動など短期的な光合成

能力変動を追跡することや、緑葉が存在しているものの光合成能力が低下している状態までを捉えることには限界があり、光合成活性を反映するリモートセンシング指標の必要性が明らかになった。

- 2) 葉内色素の光応答を反映したリモートセンシング指標 PRI(Photochemical Reflectance Index)に着目し、光合成活性の評価に向けた有効性を検討した。まず、葉群スケールにおいて葉群に近接した分光反射率の計測と光合成速度等の計測をカラマツの生育期間を通して行い、両者を比較した。リモートセンシングで得られる PRI によって、カラマツの光合成速度を推定する上で重要な指標である LUE が、その活葉期では、従来の NDVI では困難であった日変動レベルにおいて推定できることが明らかになった。また、その関係は季節によって変化することも判明したため、この季節変動を考慮した推定モデル式を作成することで、今後、リモートセンシングによる PRI から年間を通じた光合成活性の推定が可能になると思われる。更に 15 年度からは連続分光反射率を常時カラマツ樹冠上で取得して、群落全体の PRI を算出することが可能となり葉群スケールでの結果と比較した。その結果、単葉・葉群スケールで得られた PRI の変動が群落上でも捉えられる事が判明した。群落上の分光反射特性から、群落の光合成活性を反映した光利用効率が観測出来ることから、航空機、衛星等のリモートセンシングでの適用が期待される。平成 15 年度の CO₂ スラックスデータが入手できた段階で、群落全体の光利用効率や CO₂ フラックスと PRI との比較を行い、有効性を確認する予定である。
- 3) 地上バイオマス推定精度の向上と、更に森林内の光環境を三次元的に把握し、前述の PRI を組み入れた光合成モデルと結合する目的で、レーザ距離計測技術を発展させた森林三次元構造計測手法を開発した。これまでは、例えば森林の葉面積指数を推定する際には魚眼レンズ写真の画像処理から推定する方法や、林内における日射量の減衰から推定する方法などが用いられてきたが、これらの方法では測定時の天候条件に左右され、更に高さ方向での葉面積指数といった三次元的な空間分布特性を把握することは不可能であった。今回開発したレーザ光による計測技術により、森林を 10m×10m×1m の立体を単位として、その中での枝・幹・葉全体の植物体の密度を始め、葉面積密度や平均葉群傾斜角を求めることが初めて可能となった。これを元に、林内における高さ別の到達日射量を計算することが可能となった。この方法は地上設置型のレーザ距離計のみならず、上空からのレーザ計測へも適用可能であることから、将来的には上空からのリモートセンシングにより林内の三次元構造の推定手法に発展させる予定である。
- 4) 同じく地上設置型のレーザキャナを用いて森林地上部でのバイオマス(材積)を求める手法を開発した。既存の同様の試みは、複数点からの観測が必要であること、複数点からの観測データを結合するための手作業や、あるいは幹・枝部分を円柱に近似させるための複雑な処理が必要不可欠であり、更には材積表や樹高曲線・形状比率等のパラメータを予め用意する必要があり実用的ではなかったが、本研究において開発された手法によって直接バイオマスや材積を推定できることが可能となり、汎用性もあることから、実用化に向けた今後の発展が期待される手法である。今後は傾斜林分での適用性について検討を進める必要がある。
- 5) 京都議定書で認められた森林管理を実施して、温暖化対策として森林炭素収支の適切な管理の実施が必要である。この適切な管理の実施に対して認証を行うことが考えられるが、適

切な森林管理の実施を一定の基準のもとづき評価する手法、さらにそのような森林管理の結果もたらされる炭素固定・バイオマス利用による温暖化防止効果、生物多様性、水土保持等のエコシステムサービスのパフォーマンスを定量的に測定する手法が必要である。そこで今後のリモートセンシング手法を活用した認証手法を確立する際の予備的な検討を目的として、日本で初めてF S Cの森林認証を取得した森林においてケーススタディを実施した。結論的には、F S Cの認証システムに、インベントリーからの炭素の推計手法についての審査システムを付加することによって、エコカーボンアカウンティングのシステムを開発することが可能と考えられる。しかし、インベントリーの管理については、よりリモートセンシング技術を活用した定量的な計測手法をF S Cの認証システムに加える必要があると判断された。

8. 引用文献

- 1) Gamon, J. A. Peñuelas, J. and Field, C. B., 1992: A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41, 35-44.
- 2) 中路達郎・武田知己・向井 譲・小池孝良・小熊宏之・藤沼康実(2003) : カラマツ針葉の色素濃度および光合成活性と分光反射指標の関係, 日本林学会誌, 85(3), 205-213
- 3) 中路達郎・武田知己・小熊宏之・藤沼康実(2003): 分光計測による樹木の光合成活性の推定 - 光利用効率推定への気温の影響 -, 農業環境工学関連 5 学会 2003 年合同大会講演予稿集, 428.
- 4) Warren Wilson, J., 1960: Inclined point quadrats. *New phytol.*, 59, 1-8
- 5) Norman, J. M. and Campbell G. S., 1989: Canopy Structure. In: *Plant Physiological Ecology. Field methods and instrumentation*, 301-325
- 6) 米 康充(1995) : 魚眼レンズ撮影による森林調査—平地林における立木位置, 胸高直径, 樹高の測定—, 日林論, 106, 167-168.
- 7) 菅藤 武(1999) : 赤色レーザーポインターを利用した樹幹の任意高指示・測定装置および任意直径の遠隔的測定装置の考案, 林誌, 81(1), 85-88.
- 8) T. Tanaka, J Yamaguchi, and Y. Takeda(1998) : Measurement of forest canopy structure with a laser plane range-finding method -development of a measurement system and applications to real forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91, 149-160.
- 9) 大政謙次・吉見健司・沖 一雄・日坂 章・植西マイケル高照(2001) : 可搬型イメージングライダーによる樹木のリモートセンシング—樹冠高の推定—, 日本リモートセンシング学会 学術講演会論文集, 30, 131-132.
- 10) 吉村充則(2001) : 冠プロセスと空間スケール, 科学, 1210-1216.
- 11) 箕輪光博(1976) : 上部直径にもとづく林分材積の推定, 日林誌, 58(3).
- 12) 林 真智・沼田洋一・小熊宏之・山形与志樹(2001) : リモートセンシングデータを利用した林分構造の計測, 写真測量とリモートセンシング 40(3), 41-46.
- 13) 林野庁計画課(1970) : 立木幹材積表東日本編, 日本林業調査会, 東京.
- 14) 松本光朗(2001) : 日本の森林による炭素蓄積量と炭素吸収量, 森林科学, 33, 30-36.
- 15) 南雲秀次郎・箕輪光博(1990) : 測樹学, 現代林学講義(10), 243 .

16) 中島広吉(1938)：北海道立木幹材積表－メートル法の部－，林友会北海道支部，札幌．

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

- ① 山形与志樹、小熊宏之、土田 聡、関根秀真、六川修一：日本リモートセンシング学会誌 (Journal of Remote Sensing Society of Japan)、21, 1, 43-57 (2001)
「京都議定書で評価される吸収源活動のモニタリングと認証に関わる
リモートセンシング計測手法の役割」
- ② 林 真智、沼田洋一、小熊宏之、山形与志樹：写真測量とリモートセンシング、40, 341-346 (2001)
「リモートセンシングデータを利用した林分構造の計測」
- ③ 山形与志樹、小熊宏之：日本リモートセンシング学会誌、21, 4, 322-329 (2001)
「時系列センサフュージョン画像を用いた最新分類手法精度比較」
- ④ K. Oki, H. Oguma, and M. Sugita：Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 68, 1, 77-82 (2002)
“Subpixel Classification of Alder Trees Using Multitemporal Landsat Thematic Mapper Imagery”
- ⑤ 小熊宏之、島崎彦人、山形与志樹：写真測量とリモートセンシング、41, 2, 4-14 (2002)
「森林樹冠率の推定におけるミクセル分類手法の有効性に関する研究」
- ⑥ 土田 聡、小熊宏之、岡田周平、香西克俊、根岸正浩、山本泰志：日本リモートセンシング学会誌、22, 4, 456-477 (2002)
「野外放射計校正のための放射輝度実用標準」
- ⑦ 山形与志樹、小熊宏之、関根秀真、土田 聡：日本リモートセンシング学会誌、22, 5, 494-509 (2002)
「吸収源を用いた地球温暖化対策とリモートセンシングの役割」
- ⑧ 沖 一雄、小熊宏之：日本リモートセンシング学会誌、22, 5, 510-516 (2002)
「リモートセンシングデータを用いた特定森林樹冠率の推定
－釧路湿原におけるハンノキの推定－」
- ⑨ 関根秀真、山形与志樹、小熊宏之：日本リモートセンシング学会誌、22, 5, 517-530 (2002)
「吸収源プロジェクト実施地域を対象とした衛星データによるARD活動モニタリング」
- ⑩ 米 康充、小熊宏之、山形与志樹：日本リモートセンシング学会誌、22, 5, 531-543 (2002)
「京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発
－航空機Lidarによるカラマツ林の樹冠計測と材積・炭素重量計測精度の検証－」
- ⑪ 大政謙次、浦野 豊、小熊宏之、藤沼康実：日本リモートセンシング学会誌、22, 5, 550-557 (2002)
「可搬型Scanning Lidarデータを用いたカラマツ林の樹林マッピングと胸高直径
及びバイオマスの推定」
- ⑫ 小林史歩、六川修一、山形与志樹、小熊宏之：日本リモートセンシング学会誌、22, 5, 571-587 (2002)
「カラマツ葉の生化学物質含有量推定に関する研究－LIBERTYモデルに基づく検討」

- ⑬ 小熊宏之、土田 聡、藤沼康実：日本リモートセンシング学会誌、22, 5, 588-597 (2002)
「森林モニタリング用ハイパースペクトラルカメラシステムの開発」
- ⑭ 中路達郎、武田知己、向井 譲、小池孝良、小熊宏之、藤沼康実：日本林学会誌、85, 3, 205-213 (2003)
「カラマツ針葉の色素濃度および光合成活性と分光反射指標の関係」
- ⑮ 中路達郎、木平英一：日本林学会誌(記事)：85, 29-30 (2003)
「BIOGEOMON 2002」
- ⑯ 米 康充、小熊宏之、山形与志樹：森林計画学会誌、37, 1, 21-30 (2003)
「京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発
—地上レーザスキャナによる点群モデルを用いた計測手法の検討—」
- (2) 口頭発表
- ① 大政謙次、浦野豊、小熊宏之、藤沼康実：農業環境工学関連4学会2002年合同大会 (2002)
「可搬型Scanning Lidarデータを用いたカラマツ林の樹林マッピングと胸高直径及びバイオマスの推定」
- ② 武田知己、平野高司、浦野慎一：農業環境工学関連4学会2002年合同大会 (2002)
「ヒマワリの形状モデルを用いた群落のPPFD分布の推定」
- ③ 小林史歩、六川修一、山形与志樹、小熊宏之：日本リモートセンシング学会第33回学術講演会 (2002)
「放射伝達モデルに基づく生化学物質含有量逆推定」
- ④ 中路達郎、武田知己、藤沼康実、小熊宏之：日本生態学会 (2003)
「カラマツ針葉の光合成活性評価へのPRIの利用」
- ⑤ 中路達郎、武田知己、藤沼康実、小熊宏之：第114回日本林学会 (2003)
「カラマツ針葉の光合成活性評価へのPRIの利用」
- ⑥ 小熊宏之、中路達郎、藤沼康実：第114回日本林学会 (2003)
「リモートセンシングによるカラマツ林の計測」
- ⑦ 米 康充、小熊宏之：第114回日本林学会 (2003)
「地上レーザスキャナを用いた森林計測手法の検討」
- ⑧ 小熊宏之、中路達郎、藤沼康実：第114回日本林学会 (2003)
「リモートセンシングによるカラマツ林の観測」
- ⑨ 武田知己、米 康充、小熊宏之、藤田 玲、山形与志樹：第114回日本林学会 (2003)
「レーザースキャナを使用したカラマツ林の葉面積密度の測定」
- ⑩ 田中博春、小熊宏之：第114回日本林学会 (2003)
「フラックスタワーデータを用いた各種植生指標の季節変化の検討」
- ⑪ 田中博春、小熊宏之：日本地理学会2003年度春季学術大会 (2003)
「全天分光日射計を用いた各種植生指標とCO₂フラックス・葉面積指数の季節変化
—苫小牧フラックスリサーチサイトタワーデータでの検証—」
- ⑫ 田中博春、小熊宏之、鳥山 敦、山形与志樹、藤沼康実、三枝信子、王 輝民：日本地理学会2003年度春季学術大会

- 「定点撮影カメラによる森林のフェノロジー判定と植生指標・葉面積指数の季節変化」
- ⑬ 中路達郎、武田知己、小熊宏之：日本リモートセンシング学会（2003）
- 「ハイパースペクトル観測によるカラマツ群落の生理情報の抽出」
- ⑭ 武田知己、米 康充、小熊宏之、藤田 玲、藤沼康実：日本写真測量学会平成15年度年次学術講演会（2003）
- 「レーザスキャナを使用したポイントクラウド法によるカラマツ林の群落構造の測定」
- ⑮ 田中博春、小熊宏之、鳥山 敦、藤沼康実、三枝信子、王 輝民：日本写真測量学会平成15年度年次学術講演会（2003）
- 「植生指標とCO₂フラックス・LAIの季節変化」
- ⑯ 米 康充、小熊宏之、守田英明、金子 潔：日本写真測量学会平成15年度年次学術講演会（2003）
- 「空中写真を用いた天然林特徴抽出手法の研究」
- ⑰ 武田知己、米 康充、小熊宏之、藤田 玲、藤沼康実：農業環境工学関連5学会2003年合同大会（2003）
- 「レーザー距離センサーを使用した森林の三次元構造の測定と放射伝達量の推定」
- ⑱ 中路達郎、武田知己、小熊宏之、藤沼康実：農業環境工学関連5学会2003年合同大会（2003）
- 「分光計測による樹木の光合成活性の推定 - 光利用効率推定への気温の影響 -」
- ⑲ 米 康充、小熊宏之：日本写真測量学会（2003）
- 「地上レーザスキャナを用いた森林計測手法の検討(II)」
- ⑳ 田中博春、小熊宏之、藤沼康実：日本リモートセンシング学会（2003）
- 「森林キャノピー上におけるPRIとPPFDの季節変化」
- ㉑ 武田知己、小熊宏之、藤沼康実、米 康充：日本リモートセンシング学会（2003）
- 「サイドロッキングライダによる森林のLAD計測技術の開発」
- ㉒ T. Takeda, H. Oguma, Y. Yone, Y. Yamagata and Y. Fujinuma : 6th APGC Symposium, Tukuba. Japan, 2004
- “Comparison of Leaf Area Density Measured by Laser Range Finder and Stratified Clipping Method.” (アブストラクト提出済み)
- ㉓ Y. Yone, H. Oguma, Y. Yamagata and Y. Fujinuma : 6th APGC Symposium, Tukuba. Japan 2004
- “Development of Measurement System for Evaluating Forest Ecosystems - Measurement method of Over-ground Biomass Growth by Using Airborne Lidar- ” (アブストラクト提出済み)
- ㉔ T. Nakaji, T. Takeda, Y. Fujinuma and H. Oguma : 6th APGC Symposium, Tukuba. Japan, 2004
- “Change of PRI-LUE relationships during autumn senescence of young Japanese larch trees” (アブストラクト提出済み)
- ㉕ T. Takeda, H. Oguma, Y. Yone, Y. Yamagata, and Y. Fujinuma : FPEC, Fukuoka. Japan, 2004
- “Evaluation of measuring canopy gap by laser range finder” (アブストラクト提出済み)
- ㉖ Y. Yone, H. Oguma, Y. Yamagata, Y. Fujinuma and K. Sasa : FPEC, Fukuoka. Japan, 2004

“Analysis of Regeneration Pattern in a Natural Forest of Northern Japan Using”
(アブストラクト提出済み)

㊦ T. NAKAJI, H. OGUMA and Y. FUJINUMA: FPEC, Fukuoka, Japan, 2004

“Influence of elevated air temperature on the relationship between photochemical reflectance index (PRI) and photosynthetic light use efficiency of poplar leaves”
(アブストラクト提出済み)

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

国立環境研究所地球環境研究センター発行地球センターニュースVol. 14 No. 2(160号)において、「宇宙航空研究開発機構との共同研究「高次リモートセンシング情報による森林パラメータ推定手法の研究」について」を執筆し、苫小牧地域におけるリモートセンシング研究について述べた。

今後、学会及び紙上ならびにホームページにおける成果発表を推進し、成果の広報、普及を努める。