

J-1 人工衛星データを利用した陸域生態系の三次元構造の計測とその動態評価に関する研究

(1) 生態系の構造計測手法に関する研究

① 光学センサーによる植生三次元構造の計測手法の開発

研究代表者 国立環境研究所・社会環境システム部・情報解析研究室 田村正行

環境庁国立環境研究所

社会環境システム部	情報解析研究室	清水 明、趙 文経
大気圏環境部	高層大気研究室	杉本伸夫、松井一郎

(委託先)

北海道大学農学部	日浦 勉
岩手大学工学部	飯倉善和
山梨県環境科学研究所	宮崎忠国、杉田幹夫

平成9～11年度合計予算額 59,823千円
(平成11年度予算額 20,167千円)

[要旨] 陸域生態系の地球環境における役割の解明に資するために、人工衛星データを用いて植生の種類、構造、バイオマス、スペクトル反射特性、及び季節・経年変化等を計測する手法の開発を行った。まず、森林構造パラメータの計測に関して、航空機搭載レーザースキャナーによる森林樹高計測方法、植生三次元構造の地上計測方法、及び樹木形状の三次元計測方法の開発を行った。また、衛星画像データの高度処理方法に関して、衛星画像における歪み補正方法に関する検討とサブピクセルカテゴリーの検出方法の検討を行った。さらに、地上検証方法に関して、ラジオコントロールヘリコプターによる現地検証データ取得方法の開発とイメージング・スペクトロメータの開発を行った。

[キーワード] 樹高、航空機搭載レーザースキャナー、樹木形状、幾何補正、大気・地形補正、ミクセル分解、イメージング・スペクトロメータ

1. はじめに

地球温暖化、森林減少、砂漠化などの地球環境問題に対処するために、生物・地球圏国際共同研究計画（IGBP）をはじめとして、大規模な国際共同研究が各国の科学者の協力の下に進められている。また政治の舞台でも、平成9年に京都で開催された気候変動枠組条約会議のように、各国の利害を乗り越えて共同で地球環境を守ろうという体制が整いつつある。しかしながら地球環境の変動メカニズムには依然として未知の部分が多い。なかでも、陸域生態系の地球環境における役割の解明は、重要な課題の一つである。

陸域生態系の変化を把握しその地球環境における役割を解明する上で、リモートセンシング画像データ、とくに人工衛星データの有用性が認識されつつある。人工衛星を利用することにより広域の地表面を定期的に観測し、現在起こりつつある変化を実証的に検証することが可能である。

また、地球環境を駆動する生物地球化学的プロセスをモデル化する際に、衛星データを入力データあるいは検証データとして用いることにより、精度の高いモデル開発が可能になる。さらに、大陸レベルで二酸化炭素など温暖化ガスの収支を推定する上で、陸域生態系の分布や変動に関する衛星データは不可欠である。

本研究サブテーマでは、主に光学センサーを用いて植生の種類、構造、バイオマス、スペクトル反射特性、及び季節・経年変化等を計測する手法の開発を行ってきた。これら諸量は、植生の純一次生産量、二酸化炭素収支、病変、環境ストレス等を推定する上で基礎となるものである。本研究サブテーマで3年間に実施した主要な研究項目としては次のものがあげられる。

(1) 森林構造パラメータの計測方法の開発

- ・ 航空機搭載レーザースキャナーによる森林樹高計測
- ・ 植生三次元構造の地上計測
- ・ 樹木形状の三次元計測

(2) 衛星画像データの高度処理方法の開発

- ・ 衛星画像における歪み補正方法に関する検討
- ・ サブピクセルカテゴリーの検出方法の検討

(3) 地上検証方法の開発

- ・ ラジオコントロールヘリコプターによる現地検証データ取得方法の開発
- ・ イメージング・スペクトロメータの開発

以下では、これら研究項目の成果について説明する。

2. 森林構造パラメータの計測方法の開発

2.1 航空機搭載レーザースキャナーによる森林樹高計測

樹高は、森林のバイオマス、生産ポテンシャル、炭素収支等を推定する上で基礎となる重要なパラメータであり、精度の高い推定方法の開発が望まれている。しかし、樹高は、胸高直径などと異なり地上での実測が困難なことが多く、広範囲にわたる分布データを得るためには多大な労力と時間が必要となる。このような問題を解決するものとして、航空機や衛星に搭載したレーザーシステムによる樹高計測が注目を集めている。

航空機搭載型レーザーシステムによる樹高計測には、当初、プラットフォーム直下のデータを進行方向に沿って取得するレーザープロファイラーが主として用いられた。現在までに、樹高計測結果の検証、レーザーパルスの透過率と樹冠閉鎖率との関係の検討、バイオマスの推定などが行われている(Nelson他^{1) - 3)}。さらに近年になって、レーザービームをプラットフォームの進行方向と直交する方向に走査して、地表のデータを面的に取得するレーザースキャナーも開発され、樹高の計測とその評価(Magnussen他⁴⁾)や樹高とキャノピー密度の計測によるバイオマスの推定(Næsset⁵⁾)等に利用されている。

本研究サブテーマでは、森林バイオマス推定のための基礎データを得ることを目的として、北海道大学苫小牧演習林において、レーザースキャナーによる樹高計測実験を実施した。ここではその成果について述べる

2.1.1 樹高計測の仕組み

レーザースキャナーシステムは、航空機に搭載したGPS受信機、レーザー測距儀、姿勢計測装置等を用いて計測対象域内の3次元データを求めるものである。レーザースキャナーの概念図を図1に、また今回使用したシステム（Optech社製ALTM1020）の主要な諸元を表1に示す。

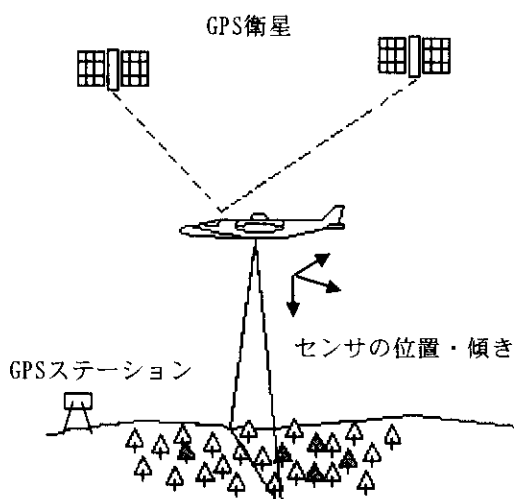


図1 レーザースキャナー概念図

表1 レーザースキャナーシステム諸元

飛行高度	300~1,000m
走査角	~±20°
スキャン頻度	28 Hz/sec@20° 50 Hz/sec@10°
レーザー光波長	1047nm
レーザー光照射頻度	100~5,000Hz
レーザー光ビーム幅	0.3mrad
レーザークラス	クラス4

このシステムは、次の3つのサブシステムから構成されている。

(1) GPSによる航空機プラットフォームの位置計測

航空機プラットフォームの位置計測には、地上基準局との相対測位による連続キネマティック方式を用いている。地上基準局には既設の基準点を用いることができるが、GPS観測をおこなうために上空視界を考慮した選定が必要である。今後、電子基準点が使用可能になれば現地作業が簡便になることが期待される。

(2) レーザー測距儀による対地距離の計測

レーザー測距儀による距離計測は、基本的に地上光波測距儀の原理と同様に、レーザーパルスが対象物に反射して戻ってくる時間により距離を計測する。レーザースキャナーの場合は、プラットフォームの進行方向と直行する方向に対してレーザーを走査することにより、二次元的広がりをもった走査幅で地上までの距離を計測することが可能となる。

(3) 航空機の姿勢計測

レーザースキャナーは航空機という移動体をプラットフォームとすることから、その姿勢を3軸方向（ヘディング、ローリング、ピッチング）で計測することが精度維持の上で不可欠である。ALTM1020では、姿勢を計測する方式として、3軸ジャイロからなるIMU（慣性計測装置）とGPSを組み合わせたものを利用している。

今回使用したシステムでは、レーザー光は最大5,000Hzという高頻度で発射され、左右にスキャンされる。航空機の進行にともないフットプリント（レーザー光が地上の物体や地表面に当たった円形の面。今回のシステムでは飛行高度1,000mからの直下視の場合で直径30cmとなる。）は、進行方向とほぼ直交する直線上に並ぶことになる。各フットプリントの間隔は、地表面の状態や

必要とされるデータの精度に合わせて、航空機の対地速度、飛行高度、レーザー光照射頻度、スキャン頻度などの設定により調節することが可能である。

レーザー光の照射位置（航空機プラットフォームの位置）データ、照射方向データ、およびレーザー光が地上との間を往復する時間間隔から計算される対地距離データを統合することで、各フットプリントの3次元座標値が求められる。そして、これらの3次元データを適当な方法で内挿することにより、メッシュ状の地形データや地上物体の形状データが作成される。

2.1.2 樹高計測への利用

森林部においては、レーザースキャナーから発射されたレーザーパルスは、樹冠、幹、地表面等により反射され、センサー受光部に戻ってくる。受信したレーザーパルスに、時間軸上での信号処理を行うことにより、最初に戻ってきたファーストパルスと最後に戻ってきたラストパルスを抽出することができる（ALTM1020では計測モードの設定によって一回の計測で、いずれか片方が測定される）。例えば、レーザー光の一部が樹冠部で反射され、残りが地面で反射された場合、ファーストパルスモードで測定されたデータから樹冠部（必ずしも樹冠トップとは限らない）の形状を、ラストパルスモードのデータから地面の形状を求めることができる。

また、森林部においてレーザー光の全てが樹冠で反射されるケースや、逆に全て地面で反射されるケースもあり、そのような場合はファーストパルス、ラストパルスは一致し（検出される反射パルスは1つだけ）、樹冠形状あるいは地面形状に相当することになる。

以上のような測定原理により、ファーストパルスモードで測定したデータには、樹冠と地面両方のデータが混在するものの、割合としては樹冠のデータが多く含まれることになる。一方、ラストパルスモードで測定したデータには、やはり両者が含まれるが、割合としては地面のデータが多く含まれることになる。そこで、森林部をファーストパルスモード及びラストパルスモードで測定し、両データに対して統計的な区分処理をおこなうことにより、樹冠形状データと地面形状データを分離して抽出することができる。

2.1.3 樹高計測実験およびデータ処理の概要

計測対象としたのは、北海道大学苫小牧地方演習林である。同演習林は苫小牧市街地に隣接する、標高5～95mの火山灰の平坦な台地上に位置し、約2700haの森林のうち25%が針葉樹の人工林で、残りはミズナラ・イタヤ類をはじめとする広葉樹林となっている⁶⁾。林内には高さ25m、半径40mの範囲をカバーする林冠観測用ゴンドラが設置してあり、周囲の樹高の計測がおこなわれている。

航空機レーザースキャナーによる樹高計測は、1998年秋季および1999年夏季に実施し、演習林の西側2/3程度をカバーするデータを取得した。計測に用いたプラットフォームはセスナ207、レーザー光照射頻度は5,000Hzである。

当初、1998年秋季の計測のみで樹冠のデータおよび標高データの両方を取得する予定であったが、現地は予想以上に落葉が進んでおり、秋季の計測では樹冠データを充分に取得することができなかった。そこで、1999年夏季の計測では樹冠データを取得することに主眼をおき、ファーストパルスモードのみで計測を実施した。計測条件を表2に示す。

レーザースキャナーシステムで、フットプリントの3次元座標値として算出される値は、地盤高（標高）および樹冠高（地盤高+樹高）である。これらは、ランダムなポイントデータである

ので、それぞれをメッシュデータ化（連続した三角形で面の形状を近似したモデル：Triangular Irregular Networkを作成し、それをメッシュ化）したうえで、樹冠高から地盤高を差し引いて樹高データを算出し、2mメッシュの樹高分布図とした。

作成した樹高分布図を図2に示す。なお、ここで作成した樹高分布図は、樹冠高データは1999年7月のもの、地盤高データは1998年11月のものを用いている。

2.1.4 計測結果の精度検討

樹高分布図の作成には、前節で述べたように地盤高のデータも使用されるため、ここではレー

表2 計測条件

データ	1998年		1999年	
	11/6	11/8	7/27	7/27
対地高度	1070m	470m	500m	950m
走査角	±10°	±20°	±20°	±20°
スキャン頻度	15回/se	27回/se	15回/se	10回/se
モード	c	c	c	c
	F*,L**	F	F	F

*F：ファーストパルスモード、

**L：ラストパルスモード

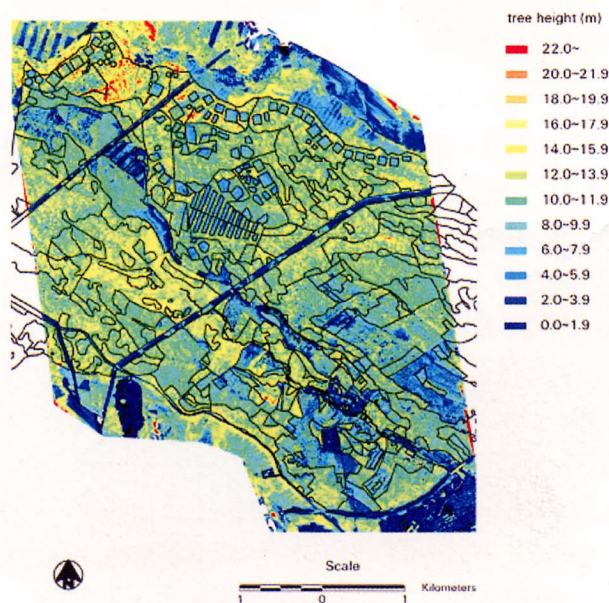


図2 樹高分布図（2mメッシュ）

ーザースキャナーによる地盤高データと樹高データの両方について精度の検討を行った。

(1) 地盤高データの精度検討

① 数値地図との比較

国土地理院発行の数値地図による標高データ(50mメッシュ)とレーザースキャナーによる地盤高データ(2mメッシュ)について、プロファイルを比較した。プロファイルを比較したトランセクトを図3に、プロファイルを図4に示す。

長さ約4000mのトランセクト全体で、RMS誤差は3.58mであり、全体の傾向はほぼ一致していた。数値地図では表現しきれていない細かい地形が、レーザースキャナーではより詳細に捉えられていると考えられる。



図3 プロファイルを比較したトランセクト

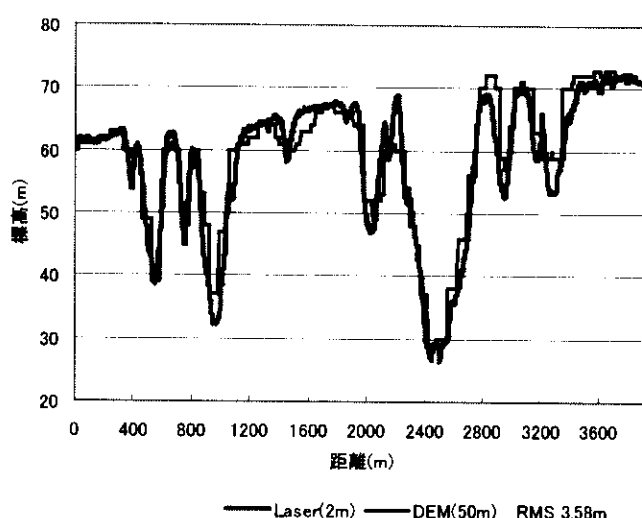


図4 レーザースキャナー測定結果と数値地図による地盤高データの比較

② 三角点との比較

演習林内には、位置及び標高が既知である三角点が6点存在する。これらの標高データとレーザースキャナーによる地盤高データ(2mメッシュ)との比較を行った。三角点の属性情報を表3に、また、比較の結果を図5に示す。両者のRMS誤差は0.14mであり、高い精度で地盤高が測定されていることが分かる。

(2) 樹高データの精度検討

① 地上実測データとの比較

検討の対象とした区域は、前述の林冠観測用ゴンドラを中心とする半径約40mの範囲の密な広葉樹林で、上層木の樹冠占有面積比率は70%以上である(北海道大学苫小牧地方演習林経営図)。比較には次のデータを使用した

(a) レーザースキャナーによる樹高の3次元座標データ(レーザー光フットプリントの樹冠高デー

表3 比較に用いた三角点

種別	点名	緯度	経度	標高 (m)
三等*	幌内	42 ° 40 ′ 15 ″ .9 42	141 ° 36 ′ 1 ″ .460	52.15
四等*	南幌内	42 ° 41 ′ 7 ″ .45 7	141 ° 35 ′ 5 ″ .983	67.25
四等	高丘	42 ° 40 ′ 39 ″ .0 36	141 ° 34 ′ 5 ″ .499	74.042
四等	下熊ノ沢	42 ° 41 ′ 47 ″ .1 95	141 ° 36 ′ 43 ″ .24 6	56.24
四等	熊ノ沢	42 ° 42 ′ 16 ″ .7 54	141 ° 35 ′ 39 ″ .03 3	71.22
四等	丸山	42 ° 42 ′ 23 ″ .3 28	141 ° 34 ′ 28 ″ .39 8	86.01

*三等：三等三角点，四等：四等三角点

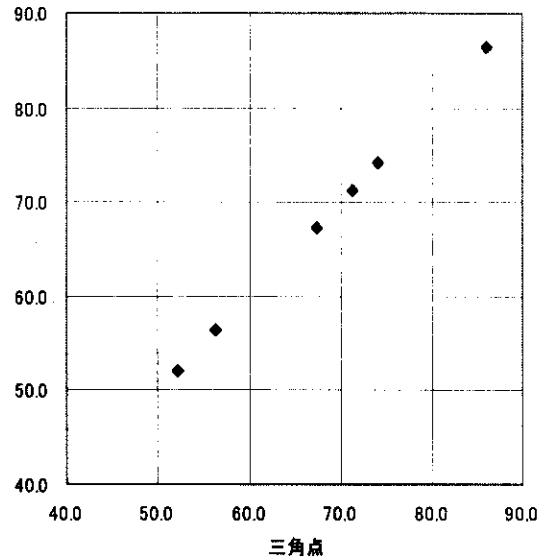


図5 レーザースキャナーによる地盤測定データと三角点データの比較

タから対応する位置の地盤高データを差し引いて作成。樹冠高データはTINによるメッシュ化する前のデータを使用。)

(b) 林冠観測用ゴンドラを中心とする半径40mの範囲の樹木の实测樹高データ (1998年測定)

なお、实测データの水平面位置座標は、樹冠トップの位置ではなく樹木の根元の位置となっている。これらは必ずしも一致するとは限らず、实测データは計測位置の水平方向ずれに起因する誤差を含む可能性がある。そこでデータの比較に際しては、水平方向に±1m程度のずれを許容することにした。具体的には、南北方向、東西方向に平行な2m幅の長方形の範囲(南北方向10、東西方向9)について、(a)、(b)両データを比較した。比較結果の一例を図6に示す。横軸はUTM座標である

レーザースキャナーの誤差は、公称値によれば、水平誤差が飛行高度の1/1000以下、高さ誤差が0.15m以下である。また、山地における地形計測では約0.36m(水平誤差と高さ誤差の両者を含んだ標準偏差)という結果が報告されている⁷⁾。ただし、樹冠は地形よりも起伏が細かく、複雑な形状を持つため、水平誤差の高さ誤差への影響は、より大きくなる可能性があると考えられる。

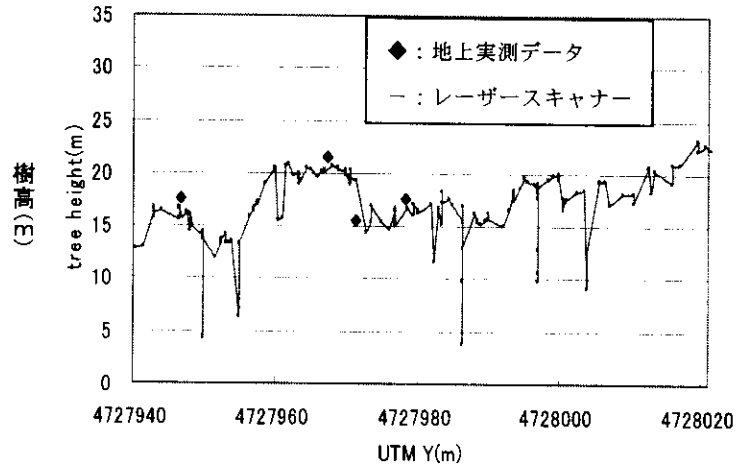


図6 レーザースキャナーデータと
ゴンドラデータの比較

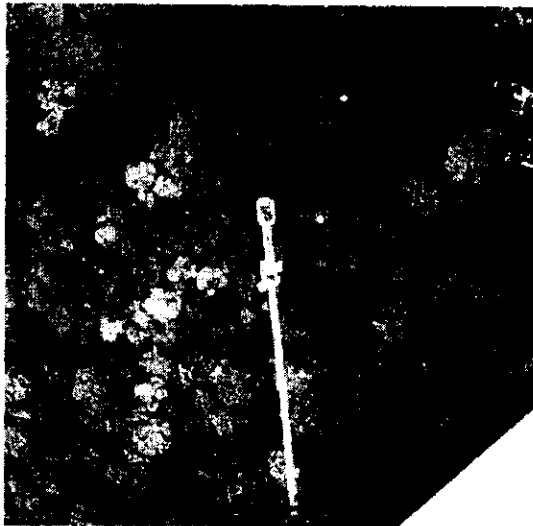


図7 ゴンドラ周辺の空中写真
(円内がゴンドラによる観測範囲)

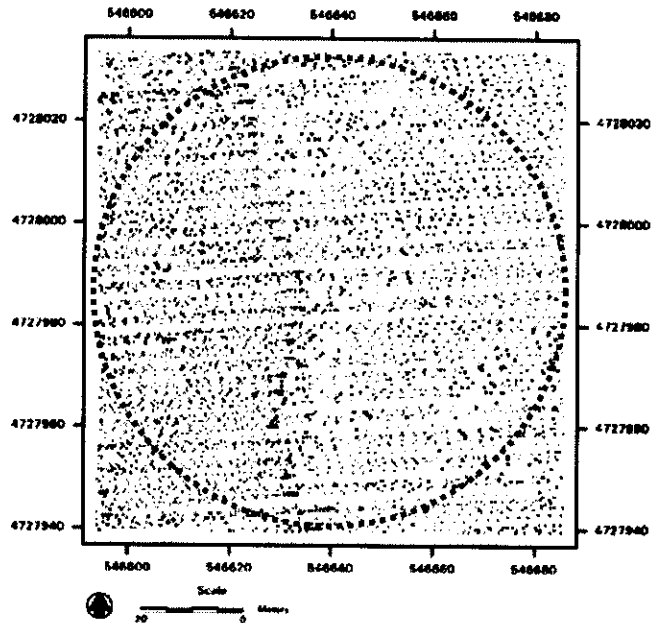


図8 ゴンドラ周辺のレーザーフットプリント

これらのことから、今回の実験での誤差の許容幅を1mとして、レーザースキャナーデータと実測データの比較をおこなった。その結果、全実測ポイント89点のうち67点(75%)が許容範囲内にあり、実測データよりもレーザースキャナーデータの値が高かったのは16点(18%)、低かったのは6点(7%)であった。

(3) バルーンからの空中写真との比較

レーザースキャナーがどの程度樹冠の構造を捉えているかを検討するために、高度約250mのバルーンから撮影された空中写真とレーザースキャナーのフットプリントデータの比較をおこなった。図7に空中写真を、図8に同じ場所のレーザーフットプリントを示す。両者を比較することにより、フットプリントが樹冠の形状を良好に再現していることが確認できた。

2.1.5 森林樹高計測のまとめ

航空機搭載型レーザースキャナーによる樹高計測について、北海道大学苫小牧演習林での実験結果を例として、概要を紹介した。レーザースキャナーを利用することにより、広い範囲の樹高分布を良好な精度で測定することが可能であり、森林の研究および経営上大きなメリットがある。今後、森林構造の計測、バイオマス分布、生産ポテンシャル、炭素収支の推定等、広い応用分野が考えられる。

本稿で用いた実測樹高データは、北海道大学苫小牧演習林の日浦勉氏より、また、バルーンによる空中写真は北海道大学低温科学研究所田辺慎一氏よりご提供いただいたものである。記して謝意を表す。

2. 2 植生三次元構造の地上計測

2.2.1 落葉広葉樹二次林の地上部現存量

北海道大学苫小牧演習林の落葉広葉樹二次林において、リモートセンシングによる解析の基礎データとして、植生現存量、純生産量、そして林冠構造を調べた。この森林では、上層ではミズナラ・キハダが、そして下層ではサワシバ・アズキナシが優占していた。最大樹高と最大直径は、それぞれ16.7 mと25.8 cmだった。胸高直径3cm以上の木本個体の地上部・地下部の総現存量は130.4 t/haで、地下部に対する地上部の比率は5.16だった、一年間の地上部の純生産量は合計6.13 t/ha（葉：2.47t/ha、幹・枝：4.15t/ha）であった。この森林の総葉面積は5.1ha/haで、図9に示すように林冠層と稚樹/草本層の2ヶ所にピークが認められた。葉面積は高さ0-2 mの範囲内では、草本植物は全体の葉面積の84.1%を占めていた。約64%の葉面積は高さ10m以上の樹冠上部に集中していた。相対光量子密度は樹冠上部からの積算葉面積に比例して減少し、一方、葉の乾重当たりの葉面積は増加した。木本個体の葉の純生産量は樹高に比例して増加したが、地上部木部の純生産量は指数関数的に増加した。これは、樹高10m前後の個体の葉量当たりの純生産量が最も低いことを示唆している。これらの結果から、葉群の垂直分布が樹冠内での光の通過を規定することにより、木本個体の生産量と成長を規定していることが示唆された⁸⁾。

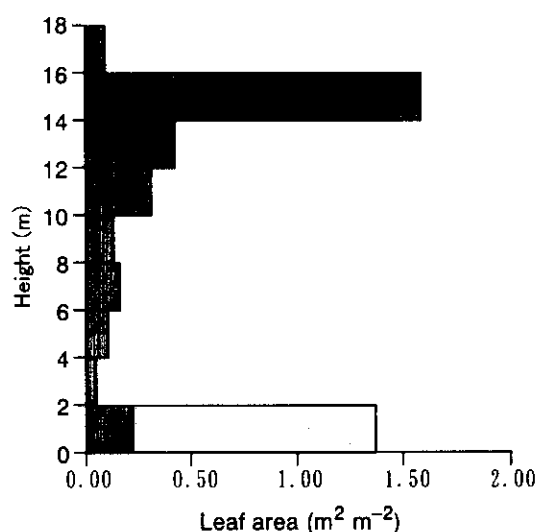


図9 落葉広葉樹二次林の葉面積の垂直分布

2.2.2 葉群分布の推定とその精度の検証

森林の微気象や生物群集のハビタットに影響を与える葉群の三次元構造を評価するために、成熟した落葉広葉樹林においてジャングルジムシステムを用いて様々なスケールでマッカーサー&ホーン法を直接測定と併せて検証した。結果を図10に示す。葉群構造が複雑になるに連れ推定精度の決定係数は減少した。サンプリングポイント数を64で一定にした場合推定精度はスケールによって変化しなかった。したがって葉群多様度が高い場所ではサンプリングスケールに応じてサンプルポイント数を決める必要がある。反対に、単位面積あたりのポイント数を一定にした場合、決定係数はスケールが大きくなるに連れ高くなりやがて頭打ちとなった。したがって推定精度を保つ最低限度のスケールを決めることが可能となり、1.8m x 1.8mあたり64ポイントの場合、約80平方メートルで0.855の決定係数が得られた。この方法を用いることによって、目的に応じた様々なスケールで葉群の3次元構造を推定精度も考慮しながら再現することが可能となった⁹⁾。

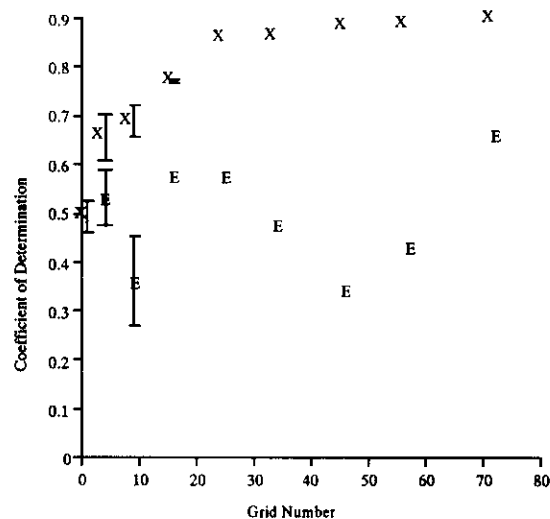


図10 サンプリングのスケールによる推定精度の変化。

X：単位面積あたりサンプル数一定、E：サンプル総数一定。

2.3 樹木形状の三次元計測

リモートセンシングで観測される地表物の電磁波反射率あるいはマイクロ波後方散乱係数をモデル化する上で、地表物の三次元形状を正確に計測する必要がある。とりわけ樹木はリモートセンシングの重要な観測対象のひとつであるが、その形状は複雑であり、正確な形状計測を難しくしている。

樹木や植物の形状には自己遮蔽が非常に多いので、現在三次元形状計測の主流となっている距離画像計測では測定が困難である。距離画像計測では矩形面・円筒面においてはその凹凸を高精度に計測することができるが、矩形面・円筒面以外の部分を計測するには、距離画像の統合手法が必要になるので、樹木形状全体を矩形面・円筒面に区分し、それぞれの部分を三次元計測する作業が必要で非常に煩雑となるからである。

樹木の形状計測には、物体の外輪郭を物体形状の特徴として用いる形状計測手法が有効であると考えられる。この計測手法の代表例としては shape-from-silhouettes、shape-from-contour、

VI(volume intersection)法などがある。これらの形状計測手法の原理は物体表面のテクスチャや反射率などと無関係であり、対象物体に対する制約が少なく、照明むらなどの撮影条件の影響も受けにくい。また、対応点のマッチングを原則として行わない、三角測量の原理を用いないのでカメラのキャリブレーションが比較的容易である、極端に逸脱した結果が求まることがない、データが部分的に欠落することがない、などといった特徴がある。対象物体の外輪郭は一種の閾値処理によって比較的容易に得られ、色空間中で背景色と前景色が比較的離れていれば、外輪郭を安定して抽出することが可能である。ここでは対象物体を孤立した単一の葉のない樹木に限定し、VI法によって樹木の三次元形状を復元する。

(1) 計算機合成による樹木のシルエット画像の作成

植物学的な成長規則に基づく植物生成モデラーであるAMAPを用いて樹木データを作成した。この樹木データから、平行射影（正射影）による大きさ512×512の2値シルエット画像を作成し、入力データとした。測定対象である樹木を中心に、樹木の周囲でカメラの撮影方向を変えながら撮影することを想定し、全周でN=12方向の多視点シルエット画像を作成した。これらの画像は一定の角度（ $360/N=30$ 度）おきに作成されている。図11にシルエット画像の例を示す。



図11 樹形シルエット画像の例



図12 (a)復元された樹形ボリュームデータと(b)元データ

(2) VI (Volume Intersection) 法による樹木形状ボリュームデータの作成

512×512の大きさのN枚のシルエット画像から、大きさ512×512×512の2値ボリュームデータを作成する。VI法ではシルエット画像を画像面に対して垂直に射影した無限の長さの柱体を考え、すべての柱体の論理積をボリュームデータ上で作り、その結果をボリュームデータに格納する。ここで、対象とする樹木の内部と判定されたボリュームの単位（ボクセル）の値は1、そうでないと判定されたボクセルの値は0とした。図12に、(a)得られたボリュームデータと、(b)元データを示す。この結果から、元データの樹木の幹および枝振りの様子が明確に復元されていることが分かる。

(3) 樹木のモデル化

上記で決定された樹木形状のボリュームデータを基に、樹木形状をモデリングすることが可能である。例えば、樹木の幹および枝を一般化円筒面で近似できると仮定することにより、幹および枝のモデルを形成できる。樹木形状をモデルで表現することにより、枝の角度分布などを計測することが可能になる。樹木の幹、枝、葉面に関する角度分布情報は、例えばマイクロ波後方散乱モデルへの入力パラメータになっているにもかかわらず、その値が実測されることは少ない。今後さらに樹木形状測定結果のモデリングを進めていくことが必要である。

3. 衛星画像データの高度処理方法の開発

3.1 衛星画像における歪み補正方法に関する検討

衛星画像を用いて陸域生態系の空間構造を計測し、その動態を評価するためには、①衛星画像に含まれる種々の歪みを補正し、②分光反射率などの物理量に変換し、かつ③物理量と植生タイプおよび空間構造との関連を明らかにする必要がある。本研究では、光学センサー（主にLANDSAT/TM）に含まれる幾何的な歪みと放射量歪みを検討し、その実用的な補正方法を提案した。また、ラスタデータに変換した現存植生図と各種歪み補正後の衛星画像との対応関係を調べることで、現存植生図の更新を効率的に行う方法を検討した。

3.1.1 幾何補正

宇宙開発事業団が提供しているシステム補正後の標準処理データで、補正されない系統的な幾何的な誤差の中に、大気中の光の屈折や地形の起伏がある。前者については、LANDSAT/TMの場合、その影響は非常に小さい（観測の両端で約30cm）。地形起伏の影響は正射投影画像を作成する場合に問題となる。LANDSAT/TMでは、観測の両端で走査方向に起伏1,000mに対して約140mの位置ずれを生じる。正射投影画像を作成するには、適切な空間解像度の数値標高モデル（座標変換と内挿法の問題）が必要となる。本研究では、この問題を国土地理院発行の数値標高モデルを利用することで解決した¹⁰⁾。具体的には以下のような手法を開発した。

(1) 衛星画像と整合性のあるDEM (Digital Elevation Model) の作成

数値地図50mメッシュ（標高）は日本全国をカバーしているDEMであるが、格子点は緯度と経度に基づいて与えられている。一方、衛星画像や地形図はUTM座標系に投影されるのが一般的である。したがって、このDEMをLANDSAT/TMの処理に利用するには、投影変換式に基づいた画素の再配列が必要となる。投影変換式については、解析的な解が求められており、実用的な近似式が国土地理院から公表されている。画像の再配列では、いわゆる逆変換によりUTM座標系の格子点をの経

緯度座標系上の格子点の対応点を求める。このとき、対応点が入力座標の格子点と一致しないことから、周りの格子点を用いた内挿が必要となる。

本研究では、投影変換の数値計算における丸め誤差、打ち切り誤差、および各種近似方式などの誤差要因とその大きさを具体的に検討した。この解析に基づいて、数10cmの誤差が許される場合のより実用的な変換アルゴリズムを提案した。また、再配列に用いる内挿の評価方法として、斜度の統計的な整合性を提案した。統計的な整合性の評価には真値を用いる必要がないことから、適応的に内挿法やそのパラメータを決定する場合に有効と考えられる。提案する方法を用いて評価した結果、30mの空間解像度をもつLANDSAT/TM画像に対しては、これまでも使われてきた共1次法が適切なことが示された。しかし、解像度が50m付近の場合には、母数付き3次畳込み法の母数を適切に設定することにより、斜度の統計的な整合性を保つことができることも明らかとなった。なお、斜度は変換後の画像が原画像とくらべて、どの程度鮮鋭化や平滑化が行われているかを知る指標として有効であった。

(2) 太陽入射角を利用した地上制御点GCP (Ground Control Point) の自動決定

幾何補正には多数のGCPが必要となるが、これを地形図などから人間が選択するのは精度的にも経済的にも問題があった。GCPを自動的に決定する方法としては、地図上の海岸線を衛星画像の水域との境界にマッチングさせる方法が知られている。しかし、海岸線が利用できない地域も多い。また、海岸線は空間的に偏って存在していることが多く、内陸での精度が問題となる。特に、正射投影を行う場合、海岸線のデータのみでは、起伏による影響およびその補正の効果は把握できない。地形に起伏がある場合、太陽入射照度が地点(画素)毎に異なる。均一の土地被覆では、画素のデジタルナンバーと太陽入射照度の相関が高いことが期待できる。これまでの研究で、山岳の森林地帯においてバスラディアンズなどの散乱の影響の小さい近赤外バンドと太陽入射照度の相関が高いことを確認している。

本研究では、海岸線と相補的な関係にあると考えられる太陽入射照度を利用したGCPの取得法を提案し、その有効性を実データを用いて検証した。対象としたデータは、LANDSAT/TMのいわゆる標準処理データである。本方法は、地図座標系上でパターンマッチングを行うため、理解が容易であり、実用的であると考えられる。しかし、システム補正後の衛星画像を再投影しているため、GCPの同定に必要な相関係数のコントラストが十分得られないことも考えられる。GCPの精度を向上させるには、緯度経度上で与えられるDEMを衛星座標上に直接変換してマッチングをとった方が平滑化などの過程が少なく済むという意味で精度の向上が期待できる。

本方法は、土地被覆が局所的に一様な地点が十分多く存在していることを前提としている。このため土地被覆が複雑な地域では、マッチングが成立しないケースが多くなる。この場合には、探索する場所を増やすことや選択の基準を緩める必要がある。

(3) 視野域の計算

DEMを利用してある地点(視点)から見通せる領域(視野域)を判定することは、地理情報システムに要求される基本的な機能の一つである。視野域を用いればアンテナなどの施設の立地や軍事作戦などの移動経路を合理的に決定することができる。また、起伏の激しい地表面に入射する電磁エネルギーには視野域からの放射エネルギーが含まれる。したがって、地表面での熱収支を厳密に計算する場合や、衛星画像から地表面の反射率を求める場合において、視野域の同定は重要な問題となる。

本研究では、DEMから、視野域を生成する明解で効率的なアルゴリズム（被覆法）を提案した。これまでのアルゴリズム（視線法）では対象までの視線を遮る地表面の存在をチェックしていたが、提案したアルゴリズムでは視点を含む3点からなる平面（被覆平面）によっておおわれる部分を不可視領域と判定することにより最終的に視野域を判定する。被覆平面を視点到近い地点から順に構成することにより不可視領域の重複した設定をさけることができることを理論的に示した。

3.1.2 大気・地形効果補正

大気・地形効果補正において解決すべき問題には幾何補正に加えて、①デジタルナンバーから放射輝度値への絶対校正、②センサーに起因する雑音（スキヤンストライプなど）、③大気モデル（エアロゾルを含む）、④放射伝達シミュレーション（環境放射照度の計算を含む）、⑤地表面における反射特性のモデル化（BRDFを含む）等があり、多くの未解決な問題を含んでいる。しかし、未解決な問題があるからといって、大気・地形効果補正なしに衛星データを利用するのは、起伏の大きい地域では意味をなさない。できる範囲で良質の衛星データあるいは標準的な処理方法を提供していくことが、陸域生態系の空間構造を計測する上で重要である。

本研究では、太陽高度が高い季節で大気の状態が安定している場合には、オフセット成分（パストラディアンズなど）の除去と太陽入射照度の補正の組み合わせ（修正コサイン法）により、相対的にはかなりの補正が期待できることを示した¹¹⁾。図13に、大気・地形効果補正を行う前(a)と後(b)のTM画像（近赤外3バンドの合成）を示す。対象地域は岩手県北上山地である。補正前に比べて補正後は地形による陰影が大幅に軽減されているのが分かる。

3.1.3 現存植生図の更新

環境庁の自然環境保全基礎調査に基づく現存植生図は、地域の環境動態を考える上で重要な情報である。しかし、現地調査によるデータの更新には多くの労力と費用が必要とされるため、衛

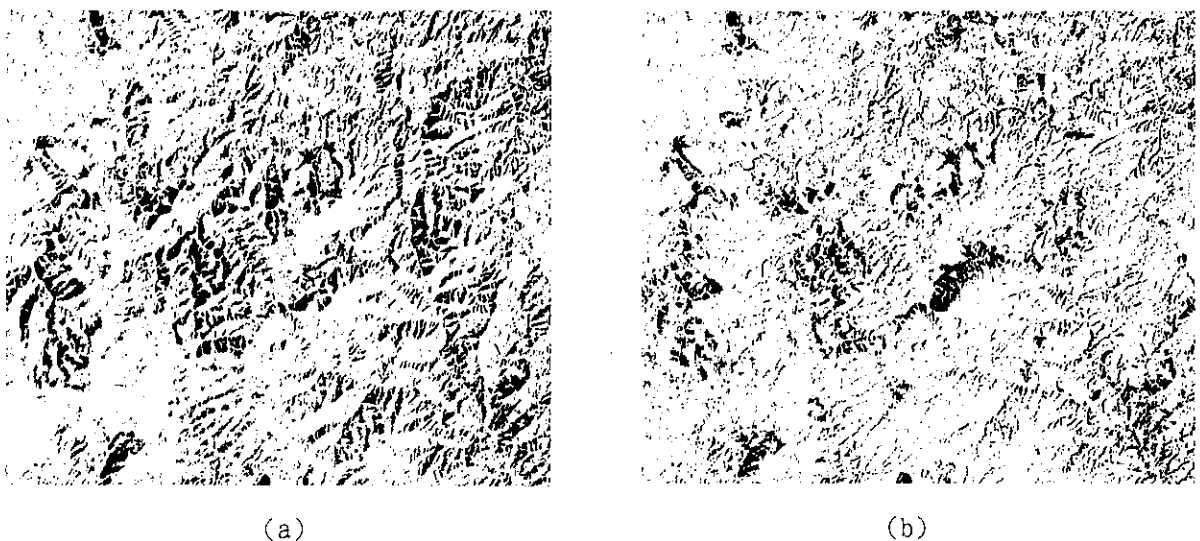


図13 大気・地形効果の補正を行う前(a)と後(b)のLANDSAT/TM画像（近赤外3バンドの合成）。対象地域は岩手県北上山地。

星画像の利用が期待されている。衛星画像と現存植生図の対応関係を検討するためには、データの形式と位置（座標系）をあわせる必要がある。本研究では、現存植生図（ベクターデータ）をラスタ化して衛星画像と精密に重ね合わせた¹²⁾。その上で、衛星画像の教師無し分類(ISODATA)を行い、対応関係を解析した。その結果、両者の高い整合性が確かめられた。

3. 2 サブピクセルカテゴリーの検出方法の検討

リモートセンシングで得られる多重分光画像を利用した土地被覆解析を行う際、これまで最尤法、最短距離法などによる教師付き分類手法が一般的に用いられてきた。これらのカテゴリ分類手法は、個々のピクセルに対して特定のカテゴリを一意的に割り当てるため、センサーのIFOV(瞬時視野、Instantaneous Field of View)で捉えられる領域以上の空間的な広がりをもって存在するカテゴリを判別するうえでは有効である。しかし、IFOV内に不特定多数のカテゴリが混在し、且つ、それらの存在比が空間的に連続に変化しているような場合、観測データの各ピクセルは、そこに含まれる複数のカテゴリの分光特性が合成されたミクセルとなっているため、これらを特定のカテゴリに対応付けることは困難である。そのため、このようなミクセルを多く含む多重分光画像を用いた、より詳細な土地被覆情報を抽出するための方法として、ミクセルを構成するカテゴリの存在比を推定する、カテゴリ分解手法がこれまで多くの研究者によって提案されてきた。

しかしながら、これまでに提案されてきたカテゴリ分解手法の多くは、ミクセルを構成するカテゴリの分光ベクトルが既知であることを前提条件としているため、事前にシーン中に含まれるカテゴリの分光ベクトルを特定できない場合、十分な推定精度を期待することはできない。

以上のような背景のもとで、本研究では、不特定多数のカテゴリがサブピクセルカテゴリとして混在する多重分光画像において、着目する1つのカテゴリ(解析対象カテゴリ)のトレーニングデータのみを用いて、その他のカテゴリの分光特性は未知としたまま、画像中の各ピクセルから解析対象カテゴリを自動的に検出し、その存在比を推定する手法について検討を行った。本手法は、Huguenin¹³⁾らのSubpixel Classification Methodにおいて想定されている2つの前提条件に基づいたものだが、検出された解析対象カテゴリの分光ベクトルとトレーニングデータの分光ベクトルとの類似性を評価する方法において、Hugueninらの手法に改良が加えられている。

ここでは、本手法の前提となっている2つの条件と本手法についての基本的な考え方を紹介するとともに、テスト用データに対する適用結果から、本手法の妥当性について検討を行う。

3.2.1 基本的な考え方

本手法は、次の2つの条件を前提としている。

【条件A】

任意の観測分光ベクトルは、解析対象カテゴリとバックグラウンド(BG)成分(解析対象カテゴリ以外のカテゴリの合成成分)の存在比を係数とし、それぞれの分光ベクトルの1次結合で表現できる。(係数については、シーン中に含まれる全てのカテゴリが観測波長帯について光学的に十分厚い場合、対象ピクセルに占める解析対象カテゴリの面積比率に相当すると解釈し、そうでない場合には、単に対象ピクセルに対応する領域からの放射輝度に対する、解析対象カテゴリからの放射輝度の貢献度を表す値であると考え。)

【条件B】

任意のピクセルのBG成分の分光ベクトルは、同一シーン中のその他のピクセルの観測分光ベクトルで表現できる。

この前提条件に基づいた本手法の基本的な考え方をまとめると、以下の I ~ IV 項のようになる。

I. 観測分光ベクトルの混合モデル

条件 A が成立するとき、観測分光ベクトルの混合モデルは次式で表せる。

$$P_i = k_i M_c + (1 - k_i) B_i \quad (1)$$

ただし、 $0 \leq k_i \leq 1$ である。本式において、 P_i はシーン中の第 i ピクセルの観測分光ベクトル、 M_c は解析対象カテゴリの分光ベクトル、 B_i は第 i ピクセルの BG 成分の分光ベクトルであり、 k_i および $1 - k_i$ は第 i ピクセルに混在する解析対象カテゴリおよび BG 成分の存在比を表すスカラーである。ここで、 M_c は全てのピクセルにおいて一定であり、一方、 P_i 、 k_i および B_i はピクセル毎の変数である。いま、観測チャンネル数を n とすると、 P_i 、 M_c および B_i はそれぞれ次のような n 次元ベクトルとなる。

$$\begin{aligned} P_i &= [p_1, p_2, \dots, p_n] \\ M_c &= [m_1, m_2, \dots, m_n] \\ B_i &= [b_1, b_2, \dots, b_n] \end{aligned}$$

II. 残差成分の算出

式 (1) の関係に基づき、観測分光ベクトル P_i から、割合 $1 - k_i$ で BG 成分の分光ベクトル B_i を除去し、残差成分の分光ベクトル R_i を算出するための次式を導く。

$$R_i = (P_i - (1 - k_i) B_i) / k_i \quad (2)$$

ここで、 R_i は観測チャンネル数を n とすると、次のような n 次元ベクトルとなる。

$$R_i = [r_1, r_2, \dots, r_n]$$

条件 B が成立するとき、式 (2) は次のように書き換えられる。

$$R_i = (P_i - (1 - k_i) P_j) / k_i, \quad (i \neq j) \quad (3)$$

III. 残差成分と解析対象カテゴリの類似度の評価

算出された残差成分の分光ベクトル R_i と解析対象カテゴリの分光ベクトル M_c との類似度を式 (4) により評価し、類似度 f_{cc} が最大となる R_i を求める。

$$f_{cc} = \frac{R_i \cdot M_c}{|R_i| |M_c|} \quad (4)$$

ここで、 \cdot はベクトルの内積を表す。

次に、類似度 f_{cc} が最大となるときの残差成分の分光ベクトル R_i と解析対象カテゴリの分光ベクトル M_c とのユークリッド距離 f_{ed} を式 (5) により求める。

$$f_{ed} = |R_i - M_c| \quad (5)$$

なお、解析対象カテゴリの分光ベクトル M_c には、一般的な教師付き分類手法の場合と同様に、シーン中から抽出したトレーニングデータの平均分光ベクトルを採用する。

IV. 閾値による内外判定

式 (4)、(5) により求められる類似度 f_{cc} および f_{ed} を利用した閾値による内外判定（閾値内に収まるかどうかの判定）を行い、これを満足した場合、処理対象ピクセルからの BG 成分の除去

が成功したと見なし、このときの k_i をもって、処理対象ピクセルにおける解析対象カテゴリの存在比とする。閾値を満足しない場合、処理対象ピクセルには、解析対象カテゴリは含まれていないと判断する。以上のようにして、ピクセル毎に解析対象カテゴリを検出し、その存在比を推定する。

3.2.2 テスト用データへの適用

本手法は条件Bを前提としているが、シーン中に含まれるカテゴリ数の増加とともに、BG成分の分光特性が多様化し、条件Bの成立が困難となり、その結果として本手法による検出精度が低下することが予想される。そこで、テスト用データに対して本手法を適用し、本手法による解析対象カテゴリの検出精度とシーン中に含まれるカテゴリ数との関係を確認する。

(1) テスト用データの作成

テスト用データは、1994年9月2日 (JST9:28-9:34)、航空機搭載センサCASI (Compact Airborne Spectral Imager) のSpatialモードにて取得された多重分光画像データを基に作成した。CASI (Spatialモード) の各種諸元を表4に示す。観測範囲は釧路湿原の高層湿原域を含む短冊状の領域 (図14) であり、この領域内にはハンノキ、スゲ、ヨシおよびミズゴケなどの湿原域における代表的な植生が分布している。

なお、DN値は、事前に実施されたキャリブレーション結果から導かれたRSC (放射感度係数) を用いて分光放射輝度値に変換されている。変換後のデータはSRU (Spectral Radiance Unit : $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{nm}$) 単位で記録されており、 $1\text{DN}=0.001\text{SRU}$ である。今回は、可視域に感度を持つch.1~ch.7による分光観測データを利用し、当該領域における代表的な5つのカテゴリ、ハンノキ (Alnus)、スゲ (Carex)、ヨシ (Phragmites)、ミズゴケ (Spha

表4 CASIセンサーの仕様

Number of channel:10	
Pixel size:about 1.9m(swath)*about 2.2m(track)	
Number of pixel:550	
Number of line:8,200	
Spectral bands	
Band : Wavelength[nm]	
1 : 459.9 - 470.9	6 : 674.7 - 685.8
2 : 549.9 - 559.2	7 : 694.4 - 705.6
3 : 594.3 - 605.4	8 : 715.9 - 725.3
4 : 635.3 - 644.7	9 : 744.7 - 754.2
5 : 655.0 - 664.3	10 : 824.3 - 835.6

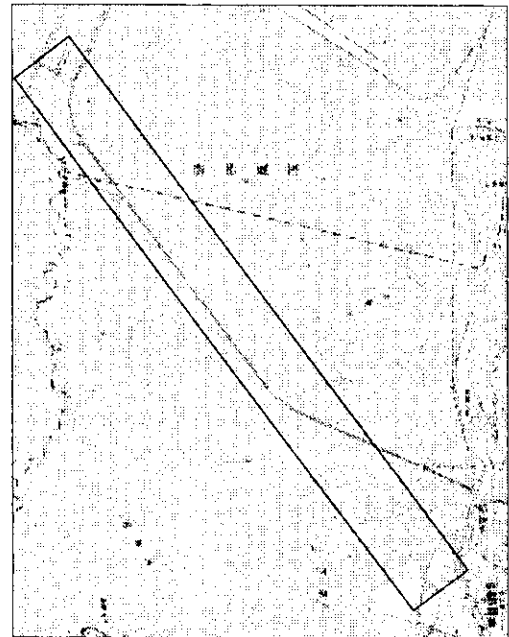


図14 観測領域 (長方形の範囲)

gnum) および水 (Water) についての代表分光ベクトルを求めた (図15、表5)。

なお、代表分光ベクトルを求めるにあたっては、現地調査資料、航空写真および既存の植生分類図に基づいてCASI画像の判読を行い、各カテゴリについてそれが優占すると推定される画像中の1000~2000ピクセルをトレーニングピクセルとして選択し、これらの平均分光ベクトルを求め、これをもって各カテゴリの代表分光ベクトルとした。

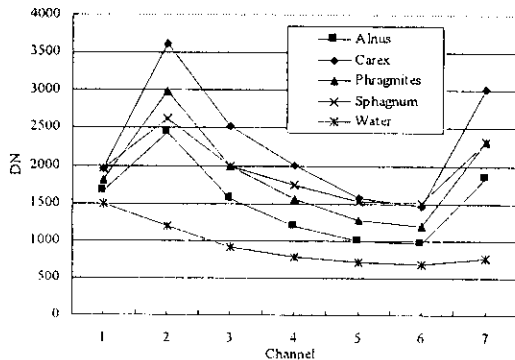


Fig 2 Spectral profiles of each category

図15 各カテゴリのスペクトル特性

表5 各カテゴリの代表分光ベクトル

Category	ch.	Min	Max	Mean	Std. Dev.
Alnus	1	1479	1826	1658.990	55.018
	2	2172	2671	2432.841	91.238
	3	1380	1736	1560.784	60.650
	4	1050	1348	1191.476	51.457
	5	854	1129	998.317	42.781
	6	822	1096	963.274	42.130
	7	1494	2153	1842.636	103.804
Carex	1	1718	2219	1954.826	65.063
	2	3365	3914	3621.449	100.957
	3	2330	2720	2517.333	64.058
	4	1818	2215	2001.941	63.480
	5	1425	1798	1582.194	62.061
	6	1290	1731	1458.867	67.173
	7	2790	3284	3013.865	80.610
Phragmites	1	1555	2014	1801.343	62.559
	2	2436	3311	2993.030	102.923
	3	1677	2239	1997.700	54.154
	4	1371	1801	1561.340	55.279
	5	1130	1435	1269.965	55.062
	6	1026	1383	1195.149	60.231
	7	1942	2744	2315.805	77.710
Sphagnum	1	1822	2073	1952.436	44.776
	2	2520	2722	2616.727	35.931
	3	1904	2074	1995.477	26.642
	4	1643	1855	1737.205	27.352
	5	1449	1645	1533.000	27.698
	6	1434	1650	1518.344	31.015
	7	2227	2479	2326.059	37.081
Water	1	1328	1594	1494.453	43.626
	2	1125	1307	1194.383	26.725
	3	857	986	912.458	18.494
	4	724	830	772.971	16.586
	5	666	776	717.593	16.704
	6	635	751	680.069	16.063
	7	694	866	761.997	24.722

得られた各カテゴリの代表分光ベクトルを用いて、ハンノキを解析対象カテゴリ、その他4つのカテゴリをBG成分の構成要素とし、これらを式(1)と以下の式(6)によって合成することで、解析対象カテゴリの存在比 k_i が既知となるテスト用データを作成した。

$$B_i = \sum_j a_j X_j$$

$$\sum_j a_j = 1 - k_i, \quad a_j \geq 0$$

(6)

ここで、 X_j はBG成分を構成するj番目のカテゴリの代表分光ベクトルであり、 a_j はBG成分におけるそのカテゴリの存在比を表すスカラーである。

各カテゴリの存在比は次のように設定した。解析対象カテゴリ (ハンノキ) の存在比 k_i は、5%ステップで0~100%に設定し、全ての処理対象ピクセルにおいて既知となるようにした。一方、BG成分を構成するカテゴリの存在比については、カテゴリ数jを1~4 (表6) に変化させ、それらのBG成分における存在比 a_j を式(7)の制約条件のもとで乱数を発生させることで設定した。

作成したテスト用データはいずれも、ライン数：100、ピクセル数：50、チャンネル数：7の多重分光画像データとした。解析対象カテゴリ（ハンノキ）は、初めの60ラインまでのピクセルには含まれておらず、残り40ラインのピクセルに5%~100%の存在比で含まれている。

(2) 処理結果

横軸に正解となる解析対象カテゴリの存在比、縦軸に本手法により推定された存在比をとり、各テスト用データについての処理結果をプロットし、図16に示した。図16は、BG成分を構成するカテゴリ数がそれぞれ(a)1種、(b)2種、(c)3種、(d)4種である場合の処理結果に対応する。

図中の対角線は、正解となる値と推定値が等しくなる点を結んだ直線であり、この対角線上にプロットされた点は、それが正しい推定結果であることを示している。なお、この処理を行う際の閾値は、次のように設定した。

$$f_{cc} > 0.9 \quad \text{and} \quad f_{ed} < \sqrt{\sum_n \sigma_n^2}$$

ここで、 σ_n は、解析対象カテゴリ（ハンノキ）のトレーニングデータの第 n チャンネルにおける標準偏差である。

表6 バックグラウンドのカテゴリー数

BG Category #	Category of Interest	Background Category
1	Alnus	Carex
2	Alnus	Carex Phragmites
3	Alnus	Carex Phragmites Sphagnum
4	Alnus	Carex Phragmites Sphagnum Water

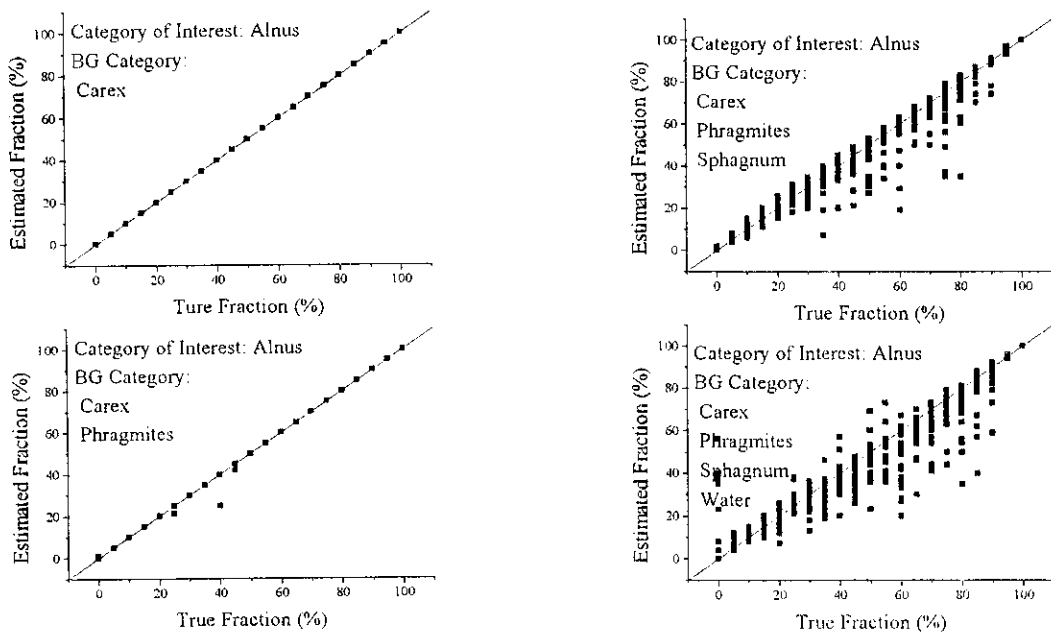


図16 推定されたハンノキのサブカテゴリー比率と正答との比較。

(3) 考察

テスト用データへの適用結果から、BG成分を構成するカテゴリ数の増加とともに、解析対象カテゴリの検出精度が低下する傾向を読み取ることができる。今回、作成したテスト用データは、各ピクセルにおいて条件Aは完全に成立している。また、分光特性のカテゴリ内変動は発生しないため、これに起因する検出精度の低下は考慮しなくてもよい。したがって、BG成分を構成するカテゴリ数の増加とともに、BG成分の多様性が高まり、条件Bが破綻するピクセルが発生し、その結果として解析対象カテゴリの検出精度が低下したと解釈できる。また、誤差の傾向として、過大評価よりも過小評価された点が比較的多く見られるが、その原因は、処理対象ピクセルの分光ベクトルからBG成分の分光ベクトルを除去する際、解析対象カテゴリをある程度含むピクセルの分光ベクトルをBG成分の分光ベクトルとして取り扱ったためである。

3.2.3 まとめ

本研究では、1つの解析対象カテゴリの分光ベクトルのみを既知として、不特定多数のカテゴリが混在するピクセルの中から解析対象カテゴリを検出し、その存在比を推定する手法について、その前提条件と基本的な考え方を示した。また、ピクセル中のBG成分を構成するカテゴリ数が異なるテスト用データに本手法を適用し、検出精度の変化を調べた。その結果、BG成分を構成するカテゴリ数の増加とともに、解析対象カテゴリの検出精度が低下する傾向が確認された。この傾向は、本手法で前提としている条件Bの破綻に由来すると考えられるため、この前提条件の是非について、さらに詳細な検討が必要であることが判明した。

今後の課題としては、本手法で前提としている条件A・Bに関する問題、トレーニングデータの代表性の問題、分光特性のカテゴリ内変動の問題などを踏まえ、残差成分の分光ベクトルと解析対象カテゴリの分光ベクトルの類似性の評価方法、閾値の設定方法等について検討を進めたい。

本解析に用いたデータは宇宙開発事業団と環境庁国立環境研究所との共同研究「気候遷移地域における環境変化解析手法の研究」において取得されたものである。ここに記して、関係各位に感謝の意を表す。

4. 地上検証方法の開発

4. 1 ラジオコントロールヘリコプターによる現地検証データ取得方法の開発

地表面の構成物は3次元構造を持っていることと衛星観測の空間解像度が低いことから、地上同期観測を行う場合、ある程度の視野を確保でき、さらに3次元構造の上から観測できる高さから観測できることが要求される。一般的にはチェリーピッカーなどの高所作業車などが観測に用いられる。しかし、森林の中心の樹冠部や水面の観測ができない。また、熱帯林など樹高が50mを越える場合、林縁でさえ観測することが困難である。そこで、本研究ではラジオコントロールヘリコプターに同期観測に必要なセンサーを搭載し、樹高50m超の樹冠部やセンサー校正に必要な水面部の観測を可能にした。システム構築時にもっとも厳しい条件は搭載可能重量が7kg以下という制限であった。観測ユニットの構成と重量を表7に示す。観測システム全体を図17に示す。

(1) 八ヶ岳における観測実験

図18は八ヶ岳の観測サイトの概況を宇宙開発事業団の観測タワーから捉えたものであり、樹高およそ20mのカラマツ林である。図19と図20は開発した観測装置がとらえたカラマツ林の樹冠の画



図17 観測機材

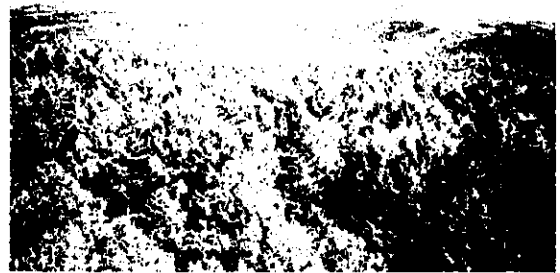


図18 八ヶ岳サイト

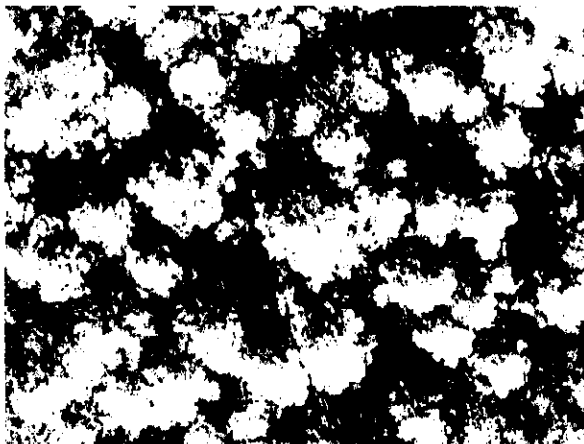


図19 樹冠画像

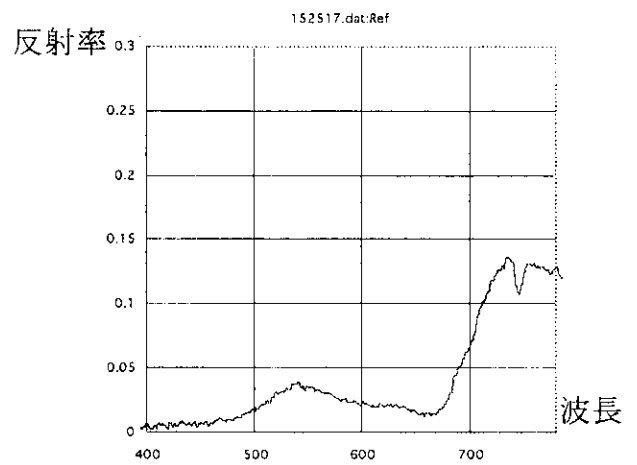


図20 分光データ



図21 川辺川画像



図22 解析画像

表7 機材重量一覧

機材名	付属するもの	重量 (g)
P C	GPS card	1 8 0 0
放射計		1 6 0 0
白板		2 0 0
デジタルビデオカメラ	画像出力用ボックス	7 5 0
G P Sアンテナ	ケーブル	2 0 0
SONY Li-ionバッテリー×2	バッテリー収納用ケース	5 0 0
B Sトランスミッター	電池ボックス、ビデオケーブル	2 5 0
無線モデム	バッテリー、アンテナ	7 0 0
ファイバーケーブル	カットフィルタ	6 0 0
		6 6 0 0

像と分光データである。画像ではカラマツの個体が確認でき、キャノーピーストラクチャーが確認できる。また、分光データもクロロフィルの特徴をよく捉えている。確認できた。高解像度衛星データやハイパースペクトルのデータの検証データとして有効であることが確認できた。

(2) 川辺川の観測実験

川辺川上流部の河川敷の観測を行った。目的は、上流ダムの洪水調節実施後に河川敷の砂礫の直径の分布が変化するかどうかを把握するためである。そのためには高解像度の画像データが必要である。対象が急峻な谷間にあり、一般的な機材では観測が不可能であり、航空写真はコスト的に不可能である。そこで35mmフィルムで複数の写真の撮影を開発機材で行い、後にモザイク処理を行った。図21は幾何補正モザイク写真を示し、図22は画像処理により砂礫径を強調した結果である。これにより砂礫径の分布状態を正確に記録できることがわかった。高解像度衛星データの検証データとして有効であることが確認できた。

(3) まとめ

開発機材は高解像度衛星やハイパースペクトル衛星の地上同期観測に非常に有効であることがわかった。また、搭載したDGPSのデータによって位置精度75cm以上を実現した。これにより超高解像度衛星の地上同期観測にも有効に利用できる可能性が確認できた。既存の高所作業車よりも機動性の点でも有利であることが確認できた。今後、衛星リモートセンシング分野や環境観測分野で本開発装置が有効に利用されることが判明した。ラジオコントロールヘリコプターを用いた観測装置における最大の問題点は、ヘリのオペレータ確保にある。

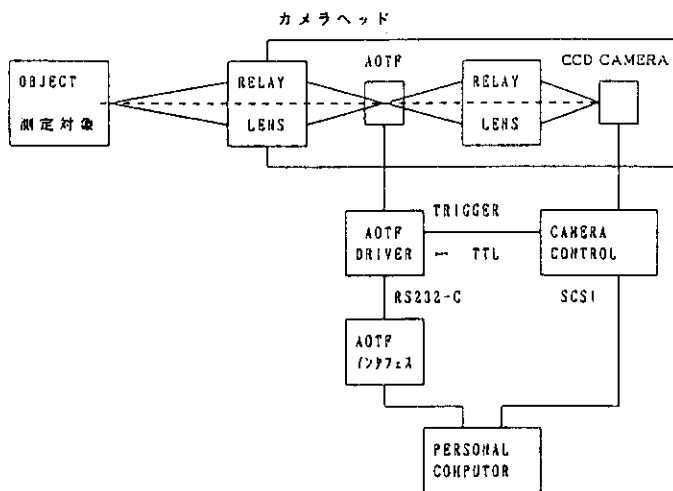


図23 イメージング・スペクトロメータのブロック図

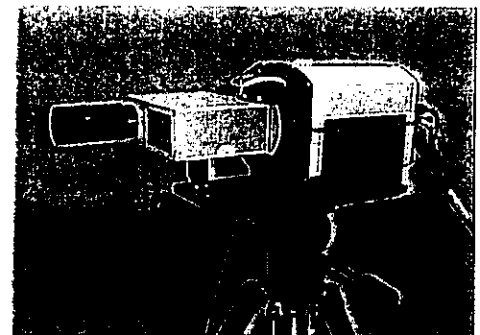


図24 カメラヘッドの外観

表8 イメージング・スペクトロメータの仕様

Wavelength range	400~1,000 nm
Spectral resolution	5.2nm @ 830nm
Measurement distance	0.98~∞ m
CCD pixel size	1,317 x 1,035



(a) 680 nm

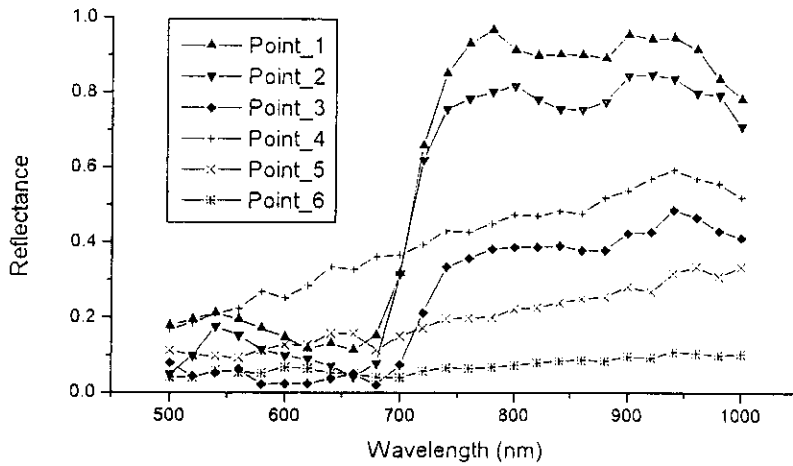


(b) 700 nm

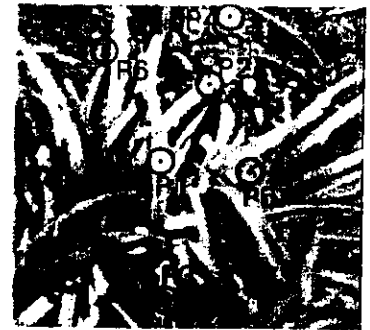


(c) 720 nm

図25 マルチスペクトル画像



(a) スペクトル反射率



Sampling points of spectral profiles

(b) サンプル点

図26 スペクトル反射特性(a)とサンプル点(b)

4. 2 イメージング・スペクトロメータの開発

イメージング・スペクトロメータとは、観測対象の画像を多数のスペクトルバンドに分けて取得する装置のことである¹⁴⁾。リモートセンシングのグラントルース等に用いられる一般のスペクトロメータは、観測視野内の平均的なスペクトル特性が得られるのみであるが、イメージング・スペクトロメータを用いると、観測視野内のスペクトル特性の空間変動や、個々の構成要素のスペクトル特性を詳細に調べることができる。ここでは、AOTF(Acousto-Optic Tunable Filter)とCCDカメラを組み合わせることで二次元イメージング・スペクトロメータを開発し、植生の反射率を測定した。

(1) 測定システム

本装置は図23のように、AOTFで入射光から特定の通過波長を選択し、CCDカメラで映像化することにより二次元マルチスペクトル画像を取得する。AOTFは、固体素子中を伝播する超音波と光の干渉を利用して入射光の波長選択を行うバンドパスフィルターである。通過光の波長は超音波の

周波数に依存するので、その周波数を変えることにより取り出す光の波長を選択することができる。本装置では、AOTFとCCDカメラはパソコンによりコントロールされ、データ取得は自動的に行われる。図24に本装置のカメラ部の外観、表8に本装置の仕様を示す。

(2) 測定例

図25にリュウノヒゲを観測対象とし、680nm, 700nm, 720nmの波長帯域で得られた画像を示す。これらは、白板をレファレンスとしそれに対する相対的な反射率の値を画像化したものである。ただし、白板の反射率の絶対校正は行っていないので、ここでの値はやや高めになっている可能性がある。図26(a)は図26(b)に示す画像中の各点における反射率をプロットしたものである。点1~3は植生表面上の点で、それぞれ最も太陽光を受けている部分、やや斜めになっている部分、影の部分である。点4~6は土壌表面の点で、それぞれ白く光っている部分、平均的な色調の部分、植生の影になっている部分である。本装置を使うと、このように測定領域内の個々の構成要素の反射率を詳しく調べることができる。

(3) まとめ

AOTFとCCDカメラを組み合わせて、二次元イメージング・スペクトロメータを作成し、植生反射率の測定実験を行った。本測定装置には、まだいくつかの改善すべき問題 - 迷光、色収差、波長による画像位置のずれ等 - が残されている。今後これらの点を解決し実用に耐えるものにする計画である。

5. 参考文献

- 1) Nelson, R., Krabill, W., and Maclean, G., Determining forest canopy characteristics using airborne laser data, *Remote Sensing of Environment*, Vol.15, pp.201-212, 1984.
- 2) Nelson, R., Krabill, W., and Tonelli, J., Estimating forest biomass and volume using airborne laser data, *Remote Sensing of Environment*, Vol.24, pp.247-267, 1988.
- 3) Nelson, R., Oderwald, R., and Gregoire, T.G., Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume, and biomass, *Remote Sensing of Environment*, Vol.60, pp.311-326, 1997.
- 4) Magnussen, S., and Boudewyn, P., Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators, *Canadian Journal of forest Research*, Vol.28, pp.1016-1031, 1998.
- 5) Nasset, E., Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data, *Remote Sensing Of Environment*, Vol.61, pp.246-253, 1997.
- 6) 北海道大学農学部附属演習林・苫小牧地方演習林 (<http://www.agr.hokudai.ac.jp/exfor/outline/toma/outl-tom.htm>).
- 7) 高橋博将, 豊山孝子, レーザープロファイラーを用いた地形計測の精度検証, *APA*, 73-6: 48-55, 1999.
- 8) 高橋耕一, 吉田憲吾, 鈴木牧, 清野達之, 谷友和, 田代直明, 石井正, 菅田定雄, 藤戸永志, 浪花彰彦, 工藤岳, 日浦勉, 甲山隆史, 北方落葉広葉樹二次林における現存量、順生産量と林冠構造, *北海道大学農学部演習林研究報告*, Vol.56, pp.70-85, 1999.
- 9) Fukushima, Y., Hiura, T., and Tanabe, S., Accuracy of the MacArthur-Horn method for estimating a foliage profile, *Agricultural and Forest Meteorology* Vol.92, pp.203-210, 1998.

- 10) 飯倉善和, 横山隆三, ランドサットTM画像の正射投影とその評価, 写真測量とリモートセンシング, Vol.37, No.4, pp.12-22, 1998.
- 11) 飯倉善和, 横山隆三, ランドサットTM画像の大気および地形効果の補正, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.19, No.1, pp.2-16, 1999.
- 12) 佐藤, 飯倉, 横山, 植生図を用いたTM画像分類項目の自動割当て, 第26回日本リモートセンシング学会, 1999.
- 13) Huguenin, R. L., Karaska, M. A., Van Blaricom, D., and Jensen J. R., Subpixel Classification of Bald Cypress and Tupelo Gum Tree in Thematic Mapper Imagery, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.63, No.6, pp.717-725, 1997.
- 14) Elachi, C., *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*, Wiley Interscience, 1987.

〔研究成果の発表状況〕

(1) 口頭発表

- ① 田村正行, 清水明, 山形与志樹, 安岡善文: 第23回リモートセンシングシンポジウム (1997)
「二次元イメージング・スペクトロメータの開発」
- ② 田村正行, 趙文経, 友定充洋, 安岡全文: 第24回日本リモートセンシング学会 (1998)
「NOAA/AVHRRによる西シベリア湿原の環境計測」
- ③ 田村正行, 小熊宏之, 安岡善文: 第25回日本リモートセンシング学会 (1998)
「二次元イメージング・スペクトロメータによる植生反射率の計測」
- ④ 趙文経, 田村正行, 王権, 友定充洋: 第25回日本リモートセンシング学会 (1998)
「NOAA/AVHRRデータによる東アジアの地表面アルベドの算定」
- ⑤ 林真智, 沼田洋一, 斉藤和也, 安岡善文, 田村正行, 加藤雅胤: 第25回日本リモートセンシング学会 (1998), 「ASTERデータによる湿地分布図作成手法の開発」
- ⑥ 牧田史子, 田村正行: 第25回日本リモートセンシング学会 (1998)
「釧路湿原周辺域の土地改変による湿原植生への影響推定」
- ⑦ 真屋学, 沼田洋一, 斉藤和也, 早川清二郎, 田村正行: 第26回日本リモートセンシング学会 (1999) 「レーザープロファイラーによる樹高計測手法の開発」
- ⑧ 島崎彦人, 小熊宏之, 田村正行: 第26回日本リモートセンシング学会 (1999)
「サブピクセルカテゴリの検出方法の検討」
- ⑨ 佐藤, 飯倉, 横山: 第26回日本リモートセンシング学会 (1999)
「植生図を用いたTM画像分類項目の自動割当て」

(2) 論文発表

- ① M. Tamura, Y. Yasuoka: Proc. 5th Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies (1997). "Observation of Vegetation and Surface Temperatures in West Siberian Wetlands by NOAA/AVHRR data"
- ② 田村正行: 電気評論'97 12, 48-49 (1997)
「NOAA衛星による東アジア・太平洋地域の環境変化の監視」

- ③沼田洋一、山形与志樹、小熊宏之、田村正行、安岡善文：日本リモートセンシング学会誌、17(4) 50-56(1997)、「全球湿地分布図作成のための衛星画像管理システムの開発」
- ④沼田洋一、勝田成久、下垣豊、山形与志樹、小熊宏之、田村正行：写真測量とリモートセンシング、36(4)、75-81(1997)「GPS/GISを利用したR/Sのための地上観測支援システムの開発」
- ⑤M. Tamura and Y. Yasuoka: Proceedings of SPIE, Vol. 3499, pp.105-110 (1998)
"Extraction of wetland areas in west Siberia using NOAA/AVHRR data"
- ⑥田村正行：オプトロニクス、Vol.17, pp.143-146 (1998)
「光学リモートセンシングと地球環境計測」
- ⑦M. Tamura and Y. Yasuoka: IGBP Report 46 Global Wetland Distribution and Functional Characterization(Dork Sahagian & John Melack ed, Int.Geosphere-Biosphere Programme, 92 p.), 22, 44-45(1998), "Optical Coarse Spatial Resolution Sensors"
- ⑧W. Zhao, H. Takahashi, M. Tamura: Proc.Int.Peat Symp., 87-89(1998)
"Analysis of surface albedo of wetland with LANDSAT TM data and a new estimation model: a case study in Kusiro mire, Hokkaido, Japan"
- ⑨M. Tamura, H. Shimazaki, M. Tomosada, F. Makita, W. Zhao, Y. Yasuoka: Proc.19th Asian Conf.Remote Sensing, L-5-1-L-5-6(1998), "Differentiation of Wetland Areas in the West Siberian Lowland using NOAA/AVHRR Imagery"
- ⑩大久保彰人、高木潤治、黒柳直彦、波多江直之、田村正行：日本リモートセンシング学会誌、Vol.19, No.1, pp.30-44 (1999)「衛星データと同期調査による広域土壌水分の推定」
(3) 出願特許、受賞など
- ①島崎彦人、小熊宏之、田村正行：「サブピクセルカテゴリの検出方法の検討」、第26回日本リモートセンシング学会優秀論文発表賞 (1999)