

Ⅲ-4 ディファレンシャル測位の精度検定

Ⅲ-4-1 方法

テストサイトは東京大学農学部附属北海道演習林で、演習林内及び付近の対空標識・三角点を主な測位ポイントとした。1m程度の精度が期待されたので、あらかじめ正確な地理座標の判明している点が必要だったためである。既報で用いた林内ポイントの一部についても測位を行ったが、これは森林内での測位可能性を調べるためである。調査は1993年10月12～16日に15点（のべ17回）、1994年6月27～30日に17点（のべ25回）行った。使用機材は（有）マゼランシステムズジャパンのGPS NAV 5000 PRO（1993年）、同Mark V（1994年）および外部アンテナ各2セットである。1994年の調査で使用した機種は前年使用した機種の改良版であり、受信機内部に8時間程度の測位データを保持できるようになったため、データロガーが不要となり機動性が増したものである。

測位は、まず現地において、受信する衛星を4機指定し一定時間の測位を行いながら測位データをコンピュータファイルとして保存する。現地から帰ってから、そのファイルを使ってコンピュータで解析を行い、測位ポイントの地理座標を算出するという方法で行う。受信衛星指定の参考とするために、受信機付属のソフトウェアで出力した衛星位置表と衛星組み合わせ表をあらかじめ作成し持参した。

1993年の調査では、開空状況や2局間の通信、データロガーの電源の関係から、演習林の東山作業所敷地内に固定局（CP）を設けることにした。この東山CPの地理座標については、近くの道道工事の敷地境界標から通常の測量で決定した値と、付近の三角点をCPとしてディファレンシャル測位法によって測位した値を比較した結果、両者の差が0.54mであったので後者を真値として用いることにした。GPS受信機のデータロガーとしてCPではDOS/Vノートパソコンを、移動局（RP）ではパームトップコンピュータを使用した。この調査では使用機種の干渉測位方式であるcarrier phase differentialでどの程度の精度と測位効率を得られるかについて主に検証した（露木1994b）。

1994年は、1993年のCP以外に演習林内および付近の三角点をCPとして利用した。受信機の改良により電源の配慮をする必要がなくなり配置の自由度が増したので、東山CPより正確な地理座標を持つ三角点をCPとして使用できるようになり、そのほうが最終結果にもよい影響を与えるからである。この調査では、トランスローケーション方式の精度と効率を調べるために、pseudorange differentialとposition differential以外に、単独測位の調査の際使用したTransPak IIを組み合わせたディファレンシャルについても検討した。また、前回調査の経験が必要と考えられた、GPS衛星軌跡を極座標上にプリントア

ウトするソフトウェア（© Trimble Navigation 製 SATVIZ）を入手し、衛星位置表の代わりに使用した（図Ⅲ-4-1）。これにより、測位の際の衛星配置が直感的に把握できるようになり、使用衛星の決定に非常に役立った。

Ⅲ-4-2 測位精度

(1) 干渉測位の測位精度

a. 測地系の影響

使用した受信機に付属のデータ処理ソフトを使って carrier phase differential 法（CPD）で測位点の座標計算を行った。計算結果は緯経度で表示されるので、これを 19 座標系での座標値に変換して精度の計算を行った。1993 年の調査について、正確な真値の判明している 10 点についての結果を表Ⅲ-4-1 に示す。F-5 と C-2 の 2 点の南北方向を除くと ±3m 程度の誤差に収まっていることがわかる。水平成分のみ（2D）と標高を加えた 3 次元（3D）の真値との距離誤差平均を見ても上記の 2 点を除くと 1.54m、1.84m という値であり、既報の単独測位値より 1 桁精度がよいことがわかった。

以上の計算は、計算結果の緯経度を日本の測地座標系である東京測地系であるとして行ったものである。しかし GPS では WGS-84 測地系が使用されており、表示されている緯経度はこの測地系における値である。ディファレンシャル測位法は 2 地点の相対的な位置関係を測定する方法なので、測定精度が 10m 程度のラフな場合はこれら 2 つの測地系の違いはあまり影響を与えないが、1m 程度になると座標計算に及ぼす影響が大きくなると考えられる。さらに真値として用いている三角点などの標高は、ジオイド高で与えられているが、厳密に測地座標系の変換を考えるとエリプソイド高で標高を表さなければならぬ（図Ⅲ-2-5）。

そこで、これらがどの程度変換値に影響を与えるかを、東山固定局座標の算出を例にとって計算した（図Ⅲ-4-2）。ここでは相の沢三角点を既知点（コントロールポイント）とし、東山局を未知点（リモートポイント）としている。なお、エリプソイド高の算出に必要なジオイド面とエリプソイド面との差（ジオイド）は、その値が地域によって異なっているが正確な数値は明らかではない。今回は文献（土屋他 1991）の分布図からテストサイト付近の値を読みとった値（-38m）を用いた。

この結果を見ると、測地系を考慮に入れると明らかに結果が異なるが、エリプソイド高とジオイド高の違いはほとんど見られないことが確認された。以上より、標高についてはエリプソイド高への変換を行わずジオイド高を使用し、上記の計算結果の緯経度を一度東京測地系の緯経度に変換して、これから 19 座標系の座標値を計算し直し、精度の再評価をおこなうことにした。なお、これらの座標変換は自作のプログラムで行った（露木 1992、1994a）。

b. 精度の検討

測地系を考慮した計算結果を表Ⅲ-4-2に示す。表Ⅲ-4-1で大きな誤差のあった2点は相変わらずであるが、その他の点については明らかに誤差が小さくなっている。2Dと3Dの平均距離誤差は上記の2点を除くとそれぞれ0.81m、1.27mとなり、ほぼ1mの精度を達成していることがわかった。これら2点の精度低下の原因としては、測定ミスまたは真値そのものの誤りが考えられるが、特定することができなかつたので再測定が必要であるという結論になった。

そこで、1994年の調査では上記の2点について、CPを変えて再測位を行った。その結果を表Ⅲ-4-3に示す。この表では1993年での測位結果を真値としてあるが、測定時間の少なかったC-2の2回目を除いては2Dで0.3~0.8m、3Dで0.5~0.9mの誤差となり、前回測位の正しさが証明されたと考えられる。1993年の調査後この2地点については演習林独自の調査でも誤差のあることが判明しており、検討の結果、対空標識として座標計算された点が実際の杭の位置と離れたところにあることがわかった。地図上でその方向と長さを見積もったところ、F-5では真北よりやや東側に約17m、C-2ではほぼ真北に約27mとなり、前回の誤差の原因が真値として使用した値の間違いであったことが明らかになった。

表Ⅲ-4-3には、1994年のその他のCPD測位結果もあわせて示した。表Ⅲ-4-2表Ⅲ-4-3で測定条件の欄にあるCPDOPとは、CPDで測位をおこなう際のDOPであり、この値が75以上では良好な精度は期待できないとされている(Magellan 1993)。その右欄の# Fixは計算処理に使用された計測値の数で、計測はおよそ1秒に1回行われるので測定秒数と読み変えてもかまわない値である。なお、CPDでは同じ衛星の組み合わせで連続10分以上の測位が必要とされている(Magellan 1993)が、筆者らの経験で最低7分以上あればよいことがわかっている。これらの測定必要条件を無視した表Ⅲ-4-3のポイント全体の測定精度(距離誤差)は平均2D: 7.3m、3D: 7.7mとなるが、上記の条件に当てはまるポイントのみの平均は2D: 0.6m、3D: 0.8mであり、1993年の精度よりややよい値となった。これはCPの精度の向上が関係していると考えられる。基線長との比較も行ったが、基線長の大小と誤差との間に関係は見られなかった。むしろ基線長に関わらず一定の誤差が生じている。

以上の結果より、測位必要条件を満たせば、CPDでは安定して2D: 0.8m、3D: 1.3m程度の誤差で測位が可能であることがわかった。しかし、この精度を達成するために必要な条件を森林内で満たすことは非常に困難である。最大の原因は、CPDをおこなうための衛星配置にある。この測位法では、搬送波のドップラーシフトを利用して基線解析をおこなうため、測位に必要な4機の衛星のうち3機は天空付近で異なった方向に進み、残りの1機は仰角の低い位置で上昇中である必要がある。このうち森林内では特に仰角の

低い衛星を捉えることが非常に困難で、測位に必要な7分間の連続データを得ることができないことが多い。

(2) トランスロケーション測位の測位精度

a. トランスロケーションの方法

測位に必要な条件をゆるめた場合、利用できる測位法はトランスロケーション法である。そこで、1994年の調査では、主にこの測位法の精度を検証した。今回用いたトランスロケーション測位の手法は、psuedorange differential (PSD)、position differential (POD)、simple differential (SID)の3種類である。前2者は、Mark V受信機に付属のデータ処理ソフトで利用できるディファレンシャル測位法で、PSDは衛星とのpsuedorangeのdouble differenceをとり基線ベクトルを求める方法、PODは2地点間での単独測位の測位結果をそれぞれ平滑化してから平均し、基線ベクトルを求める方法である。3番目はCPでの単独測位結果と真値とのズレを観測期間の個々の測位データについて計算し、同時刻のRPでの測位結果にそのズレを加え、平均したもので、SIDは筆者がつけた仮の名である。これら3種類の測位方式を、同じ1組のデータファイルに対して異なった処理をおこなうことによって比較する。また、前2者はMark V同士のデータでなくては扱えないが、SIDは測位データをGPS受信機外部に出力可能ならば機種を混ぜても計算できるため、既報で利用したTransPak IIにデータロガーをつけてテストすることにした。したがって移動局ではMark VとTransPak IIの2台のアンテナを同一点に立て測位を行った(図III-4-3)。

機種を混ぜたSIDを行った理由は、何でもよから手持ちのGPS受信機でディファレンシャル測位を行って、単独測位よりもよい精度を得ることはできないか、という発想による。異機種を用いたディファレンシャル測位にはRINEXフォーマットが標準となっているが、廉価版のGPS受信機では利用できないことが多い。そこで、外部出力される最低限の測位データは、測位時刻、緯度、経度、標高であるとして、2地点でのこのデータを手計算で時刻同期させ、SID計算を行った。したがって両地点で同一の衛星が測位に使用されたか否かは不明である。

また、比較のためにRPでの単独測位結果の平均値(AVE)も計算した。

b. 精度の検討

・同機種を用いたディファレンシャル

トランスロケーション3方式及びAVEの結果を表III-4-4に示す。この表で測定条件の欄のPDOPは、単独測位のDOPを表す値で、2Dでは4以下、3Dでは6以下での使用が望ましいとされている。なお、単独測位では、4機の衛星がなす立体の体積が大きいほど精度劣化が少なくDOPが小さくなる。また、# FixはPSDでは5分以上が必要

とされている (Magellan 1993)。そこで、PSD についてはこの両者の、POD は前者の条件を満たしたポイントのみの平均値と標準偏差も計算した。これらの値を用いて測位法による精度比較をおこなうと、 $PSD > POD \approx SID > AVE$ という結果となった。

PSD では、平均誤差 2D: 3.0m、3D: 5.1m と CPD の 4 倍程度で、計算結果のばらつきも少なく安定している。しかしトランスロケーション法のうちでは測位条件が厳しく、表Ⅲ-4-4 では 2 点のデータ (C-2 ①、D-8) が使用できない。前者は CPD 測位のためのデータなので PDOP が悪く使用できないのは当然であったが、後者は全測定時間としては 5 分以上あったうち、PSD に使えるデータが 87 個しかなかった例である。

POD は平均誤差 2D: 8.1m、3D: 30.0m であるが、PDOP が条件を満たしているのに誤差が特に大きい D-8 以外は、PSD の誤差より数 m 大きいだけのものが多い。しかし、誤差の分散は明らかに PSD より大きく、安定性に劣る。

SID は計算方法が POD と類似しているせいもあり、平均誤差 2D: 11.5m、3D: 30.7m や誤差のパターンも似たものとなっている。この 2 者の手法上の主な違いは衛星一致の有無である。Mark V では常に 5 機の衛星からの psuedorange を測定しており、POD で 2 地点のデータを同期させるときはその中から共通の 4 機を 1 秒ごとに選び、各点の位置を計算し直してから基線解析をおこなう。SID では測位時点の単独測位結果のみでディファレンシャルを行っているために、2 地点でどの衛星が測位に使用されたかを考慮していないが、指定した 4 機のうち 1 機が別のものにも変わるだけなので、組み合わせが全く異なっているということではない。

AVE は単独測位の平均値であるが、平均誤差 2D: 26.7m、3D: 88.7m で POD や SID の 3 倍程度の誤差となった。

・異機種ディファレンシャル

CP を Mark V、RP に TransPak II としたときの SID では、平均誤差は 2D: 38.7m、3D: 86.7m で、Mark V の AVE よりやや悪い程度の精度となった。しかしこの値は TransPak II の単独測位の平均値 2D: 74.1m、3D: 101.22m より小さい値であり、ディファレンシャルを行った成果はあったと見るべきであろう。しかし詳細に比較すると、ディファレンシャルによって誤差の少なくなったものもあるが、かえって大きくなってしまったものも見受けられる。

TransPak II は、8ch レシーバなので可能な場合は 4 機以上の衛星を使って単独測位を行うこと、測位の際に衛星を指定できないこと、どの衛星が測位に使用されたかわからないことが Mark V との違いである。したがって、RP で Mark V とアンテナを並べても、両機種で異なった衛星の組み合わせで測位を行っている場合がある。ディファレンシャル測位は、誤差要因を相殺してエラーを減らすので、2 地点で衛星の組み合わせが異なった場合、誤差の相殺ができなくなる可能性がある。

・衛星を一致させるということ

そこで、1994年の測位データの中から典型的なものについて詳しく検討する。衛星の一致している例としてポイント F-5 ①を、一致していない例としてポイント C-3を取り上げる。図Ⅲ-4-4(a)は、Mark VのF-5 ①の測位データのうち、東西方向の測位座標値がどのように変動したかを表した図である。太線はCPでの測位値、細線がRPでの測位値を、+がSIDの補正值を表す。これをみると、座標値そのものは異なっているが、CPとRPでの変動パターンがほぼ一致していることがわかる。そのため、測位値では35mちかくある変動幅が補正值では8m以下になり安定し、東西成分の誤差平均も12.6mから1.8mへと減った。このポイントは、トランスロケーション3手法の精度がほとんど変わらないが、この手法で期待できる精度がこの程度であることを示していると考えられる。

これに対して図Ⅲ-4-4(b)は、C-3の東西方向の測位データを示したものである。CPにはMark V、RPにはTransPak IIを使用している。(a)とは異なり、2地点の測位値の変動パターンは全く一致しない。また、RPでの測位開始後に測位値が急に変化しているところがあるが、この部分は使用衛星の組み合わせが一時変化したものと考えられる。衛星の組み合わせが異なると、このように同一地点でも測位結果が急変する。いずれにせよ2地点での衛星が一致しないと変動パターンが異なるので、誤差要因の相殺ができず、かえって東西成分の誤差平均が-22.7mから-71.1mへと増大してしまった。

測位値の変動の理由は、測位誤差の原因としてさまざまあげられている(Magellan 1993)が、そのうち最大のものはSAである。ディファレンシャル測位を利用する大きな理由は、SAを除去することにあるといって過言ではないが、衛星の組み合わせが異なると、SAの影響が異なるのでディファレンシャルを行う意味がなくなり、かえってエラーを増やすことになってしまう。今回の実験で、衛星一致の重要性の確認を行うことができた。異機種でのディファレンシャルを行う最低条件は、2地点で使用衛星の指定を行い一致させることである。

Ⅲ-4-3 作業効率

(1) 単独測位の作業効率

単独測位の場合は、測定地点に到着し受信機のスイッチを入れ、衛星を補足した後長くても5分ほどの測位で十分であるので、1点あたり10分未満で終了する。1992年の調査では実質4日の調査期間に60回(15回/日)の測定をおこなうことができた。しかし、Ⅲ-3-2で検討したように、受信機の表示が大きく変動するので、測定者は測位時間中は常に受信機のディスプレイから目を離すことができず、また測位値の決定は測定者の判断に任せられる部分が多いので注意を要する。

(2) 干渉測位の作業効率

単独測位と比較すると、ディファレンシャル測位には明らかに時間を要する。CPDの場合は、アンテナのセットアップと使用衛星の検討に5分、測定に10～15分、撤収に5分、データロガーの必要な機種は測位データのバックアップなどに5分、合計1点あたり20～30分は必要となる。

また、CPDを利用するためには、前述のように上空の4機のGPS衛星が特定の配置をしていることが必要となるが、時間帯によってはその配置状態の衛星が存在しない、あるいは測定地点の地形により使える衛星が陰になるなどして、測位不能の場合がある。そのようなことのないようにあらかじめ測定計画を十分に検討しておくなくてはならないのだが、それ以外にも障害物による受信の中断や電波状態の悪化によって連続10分のデータ収集ができないことがある。このような場合は2局間で連絡しあって再受信が必要となるので、ここでもロスタイムが発生する。例えば、1993年の調査では1点の測定に1時間以上費やした地点があった。1993年の調査では実質3.5日で17回（5回/日）と測定効率は単独測位の3分の1となった。

(3) トランスロケーション測位の作業効率

1994年におこなったトランスロケーション法での測位は、1.5日間に18回の測定をおこなった。内訳は1日目は午後のみで森林内のポイントを主に6ポイントのべ8回、2日目は対空標識を主に9ポイントのべ10回であった。地理的に近いポイントをまとめて測位したせいもあるが、10回/日以上以上の測位が可能である。これはちょうど単独測位とCPDの中間の測定効率にあたる。CPDより作業時間が短縮された理由は、受信しやすい衛星を選べるので衛星決定に時間がかからなかったことと、電波の中断による再受信を必要とすることが少なかったことでロスタイムが減ったことである。

(4) 森林内でのディファレンシャル測位

測位点の周囲の状況にディファレンシャル測位がどの程度影響されるかについては、単独測位とくらべるとかなり条件が厳しくなることがわかった。ここで精度評価に使用したポイントは前述のように三角点や対空標識であるが、これらの点は林道の交差点や空き地など比較的上空が開けている地点に設置されているため、注意深く開空方向を見極め衛星を選べば、測位に際して衛星の補足ができないことはなかった。しかしこれ以外に測位を行った林内ポイントのなかで、天頂付近のみ開空していた地点や全くの林内では、衛星補足を十分な継続時間おこなうことができず、CPD測位には失敗した。これらの地点は既報で単独測位可能だった地点である。

この原因は、受信機が十分な時間連続して衛星からの電波を捕らえ続けることができないことにある。現地を受信状況を観察していると、上層樹冠にいくらかでもギャップがあ

れば、上空の衛星を捕らえることは可能であるが、仰角の低い衛星は、その衛星方向が完全にあいていないと、ときれときれの受信となり、結果的には測位不能となってしまう。これらの経験から、樹木の葉はそれほど量が多くなければ受信には影響を及ぼさないが樹幹や太い枝は電波遮断に有効であると考えられる。

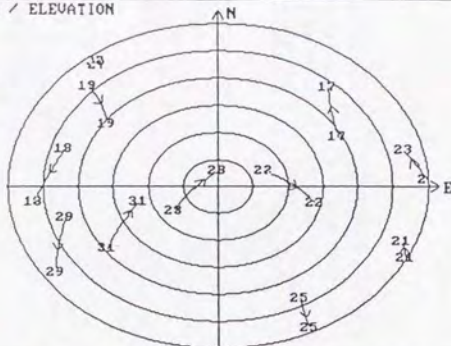
したがって、完全に鬱閉した森林内では GPS 測位は不可能だが、ギャップのある部分を選べば、上空の衛星のみを使う PSD あるいは POD を利用してディファレンシャル測位が可能であるということができる。開空状況と衛星配置との関係を素早く把握するためには、衛星軌跡のプリントアウトが非常に有効である。クリティカルな開空状態でどうしても CPD をおこなわなくてはならないような時は、前もって測位ポイントにおいて全天写真を撮影しておき、衛星軌跡と重ねて測位可能な時間帯を知る方法も採用可能であろう。

なお、受信可能な衛星を全て補足することのできるマルチチャンネルレシーバを CP に使用すれば、移動局との間で連絡を取り合っ衛星を合わせる必要性がなくなるので作業時間の短縮にもなるし、CP の無人化も可能となり作業人員の節約にもなる。

SATELLITE AZIMUTH / ELEVATION

09:00 - 09:59 JST

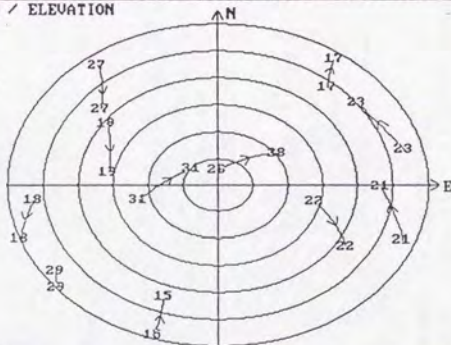
00:59 UTC



SATELLITE AZIMUTH / ELEVATION

10:00 - 10:59 JST

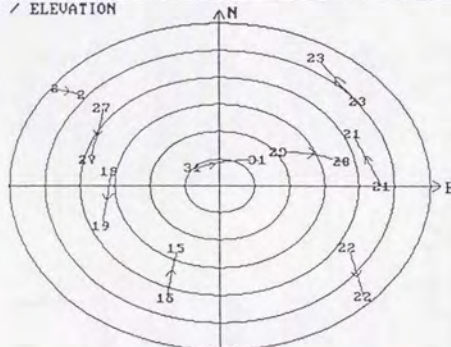
01:59 UTC



SATELLITE AZIMUTH / ELEVATION

11:00 - 11:58 JST

02:58 UTC



0 1 2 3 4 5 6 7
 N43°13.01720' E142°26.54673' 6-30-94 Mask:0.0° Aln:06-17-94

図Ⅲ-4-1 衛星位置のプリントアウト

コントロールポイント座標値
(相の沢三角点)

リモートポイント座標値
(東山固定局)



注) この図で入力値の東京測地系ジオイド高の値が国土地理院による測量成果である。
東京測地系ジオイド高でHに加算または減算している値(2.5または1.4)はそれぞれの測点でのアンテナ高。
エリブノイド高でHに加算または減算している値(-38)はテストサイトでのジオイド。

図 3-4-2 測地系座標系変換を行った座標計算



図Ⅲ-4-3 移動局でのGPS測位の様子

17Sys. E

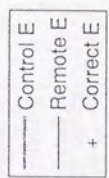
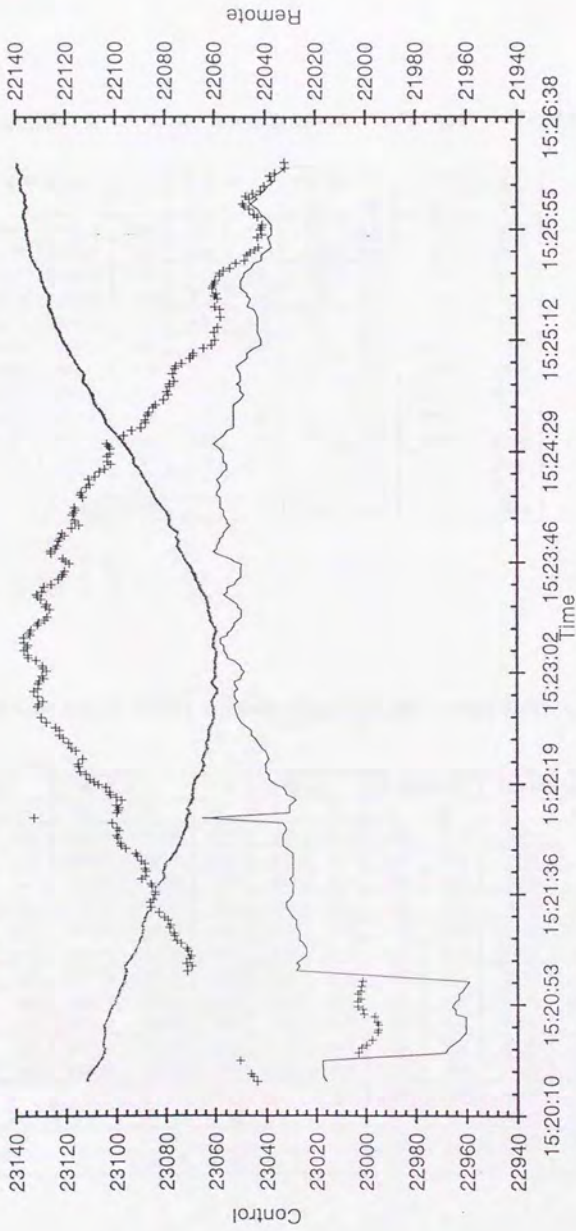
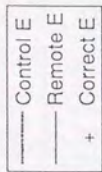


図 III - 4 - 4(a) ポイント F-5 ①東西成分の測位データ

17Sys. E



図Ⅲ-4-4(b) ポイントC-3東西成分の測位データ

表Ⅲ-4-1 東京測地系で計算した carrier phase 測位精度 (1993年測定分)

ポイント名	基線長 (m)		成分誤差 (m)			距離誤差 (m)		誤差割合 (ppm)	
	2D	3D	N	E	H	2D	3D	2D	3D
経才鶴	18500.88	18513.01	-0.46	-1.52	-0.81	1.59	1.78	85.84	96.30
白鳥川	11459.93	11460.23	-0.84	-0.61	-0.96	1.04	1.41	90.59	123.38
D-8	12946.27	12948.98	-1.27	-0.78	0.03	1.49	1.49	115.12	115.12
D-10	10063.78	10068.45	-0.42	-1.18	1.76	1.25	2.16	124.46	214.55
F-5	7688.52	7689.88	15.28	4.07	1.06	15.81	15.85	2056.67	2060.92
相の沢	2348.16	2359.12	-0.21	0.82	0.07	0.85	0.85	360.48	360.03
C-3	9019.81	9019.93	-1.24	0.13	0.09	1.25	1.25	138.23	138.59
C-2	8944.67	8946.18	25.12	-0.81	-0.94	25.13	25.15	2809.84	2811.33
A-1①	4813.41	4813.54	-0.56	2.66	-1.88	2.72	3.31	564.74	686.62
A-1②	4813.41	4813.54	-0.65	2.44	-1.60	2.63	2.99	524.60	621.03
る	8243.39	8245.21	-1.04	-0.40	-0.77	1.11	1.35	135.17	164.27
全 平 均						6.10	6.34	710.61	743.05
F-5, C-2を除いた平均						1.54	1.84	237.69	279.99

表Ⅲ-4-2 WGS-84 測地系で計算した carrier phase 測位精度 (1993年測定分)

ポイント名	測定条件		基線長 (m)		成分誤差 (m)			距離誤差 (m)		誤差割合 (ppm)	
	CPDOP	# Fix	2D	3D	N	E	H	2D	3D	2D	3D
経才鶴	18.7	604	18501.16	18513.24	-0.07	0.37	-0.36	0.38	0.52	20.36	28.14
白鳥川	37.7	598	11460.03	11460.32	0.37	0.23	-0.80	0.44	0.92	38.02	79.49
D-8	30.2	542	12946.49	12949.17	-0.48	-0.03	0.55	0.48	0.73	37.15	56.42
D-10	22.5	604	10064.01	10068.65	0.18	-0.45	1.66	0.48	1.73	48.16	171.75
F-5	17.4	587	7688.69	7690.03	15.89	4.40	1.21	16.49	16.53	2144.44	2149.83
相の沢	24.7	444	2348.48	2359.33	-0.18	0.81	0.11	0.83	0.84	353.32	354.77
C-3	38.1	598	9019.96	9020.07	-0.35	0.91	0.20	0.97	1.00	108.09	110.34
C-2	19.4	600	8944.78	8946.27	25.96	-0.55	-0.66	25.97	25.97	2902.90	2903.36
A-1①	27.9	591	4813.10	4813.23	-0.39	1.71	-1.72	1.75	2.46	364.40	510.37
A-1②	26.6	433	4813.10	4813.23	-0.42	1.57	-1.63	1.63	2.30	337.66	478.22
る	40.1	585	8243.53	8245.32	-0.22	0.18	0.90	0.28	0.94	34.48	114.47
全 体			平 均				5.74	6.09	663.69	711.30	
			標 準 偏 差				9.17	8.99	982.17	960.66	
F-5, C-2を除いた場合			平 均				0.81	1.27	149.07	211.55	
			標 準 偏 差				0.55	0.71	154.14	186.18	

表Ⅲ-4-4 トランソスケーション法の測位精度

機 種	NAV 5000 PRO Mark V										TransPak II																
	PSD					POD					AVE					SID					AVE						
	測 定 条 件	# Fix	2D	3D	距離誤差 (m)	測 定 条 件	# Fix	2D	3D	距離誤差 (m)	測 定 条 件	# Fix	2D	3D	距離誤差 (m)	測 定 条 件	# Fix	2D	3D	距離誤差 (m)	測 定 条 件	# Fix	2D	3D	距離誤差 (m)		
ポ イ ン ト 名																											
F-5①	2.9	724	3.34	4.17	3.1	689	3.10	4.80	654	2.92	4.58	690	21.93	45.66													
F-5②	2.9	797	1.57	4.67	3.1	519	2.59	6.61	519	2.16	6.38	858	7.38	49.57													
C-2①	10.5	731	3.71	6.04	13.0	596	20.71	204.58	688	47.64	151.98	727	32.83	100.17													
D-8	4.3	87	41.16	78.11	4.9	267	157.78	192.40	328	20.77	49.66	350	77.91	133.31													
C-5	2.8	733	1.56	1.57	3.3	741	3.54	4.46	696	0.53	2.54	761	23.44	86.68													
D-10	2.8	324	1.99	11.19	3.2	322	1.66	9.55	305	1.73	10.16	344	23.59	82.78													
C-4①	3.5	342	3.62	3.73	4.0	347	35.43	36.76	318	20.12	43.30	349	15.19	58.04													
C-4②	3.5	647	5.91	6.78	16.6	149	9.93	29.64	581	18.15	52.73	601	16.51	98.76													
C-3	4.0	364	6.35	7.46	5.6	365	7.60	8.17	349	8.47	9.81	389	48.79	149.89													
Σ	2.5	356	1.00	3.32	3.0	367	2.06	4.40	340	1.72	3.49	368	12.46	87.92													
全 体	平均		6.56	11.81			22.42	45.81			11.53	30.66		26.99	88.40												
	標準偏差		11.61	22.15			46.09	76.35			14.40	44.91		20.25	32.27												
PDOP<4(2D)	平均		3.03	5.09			8.06	29.96																			
PDOP<6(3D)	標準偏差		1.96	2.94			13.42	61.81																			
# Fix<300(PSD)																											

表Ⅲ-4-3 WGS-84 測地系で計算した carrier phase 測位精度 (1994 年測定分)

ポイント名	測定条件		基線長 (m)			成分誤差 (m)			距離誤差 (m)			誤差割合 (ppm)				
	CPDOP	# Fix	CP 名	2D	3D	N	E	H	2D	3D	2D	3D	2D	3D		
F-5①	21.1	717	経度鶴	12250.51	12261.72	0.00	-0.50	-0.01	0.50	0.50	40.81	40.79				
F-5②	14.8	884	経度鶴	12250.51	12261.72	-0.53	-0.65	-0.12	0.84	0.85	68.46	69.10				
C-2①	18.5	727	経度鶴	13149.81	13159.56	-0.15	0.27	0.84	0.31	0.89	23.49	68.01				
C-2②	28.4	513	経度鶴	13149.81	13159.56	-0.55	0.79	0.68	0.96	1.18	73.20	89.56				
D-8	300.9	209	長峰	3572.80	3576.90	20.80	-26.67	-5.37	33.82	34.25	9466.54	9574.11				
C-5	85.9	134	長峰	1275.93	1276.14	-0.37	-0.04	0.67	0.37	0.77	291.67	600.58				
D-10	958.1	321	長峰	3633.32	2329.58	0.81	-6.97	-3.58	7.02	7.88	1931.27	2164.37				
C-4①	109.3	342	長峰	2941.45	2943.39	-2.82	33.24	7.57	33.36	34.21	11341.13	11621.81				
C-4②	30.1	643	長峰	2941.45	2943.39	0.18	-0.01	-0.59	0.18	0.62	61.29	209.60				
C-3	167.4	120	長峰	1761.38	1761.99	1.19	1.73	-1.09	2.10	2.37	1192.12	1342.70				
る	75.7	355	長峰	2549.63	2550.88	-0.09	0.90	-0.11	0.90	0.91	354.75	357.19				
全 体																
標準偏差													7.31	7.67	2258.61	2376.16
平均													13.14	13.30	4092.67	4143.20
標準偏差													0.56	0.81	53.45	95.41
標準偏差													0.34	0.26	20.82	66.14
CPDOP>75, # Fix<420 を除いた場合																

Ⅲ-5 測位検定のまとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

・単独測位は受信機の性能によっても異なるが、最も良い場合で 2D: 30m 程度、平均的には 50 ~ 100m 程度の平均誤差で測位が可能である。しかし、受信経過をメモリーできない機種では、測位値の決定に測定者の適切な判断が必要となり、これが誤差の大きな原因となりうる。

・干渉測位の CPD では、2D: 0.8m、3D: 1.3m 以下の平均誤差で測位をおこなうことが可能である。この精度は単独測位の 30 倍以上であるが、反面作業効率は 3 分の 1 以下である。測位環境にも厳しい制約がかかってくるため、あらかじめ測位地点の選定をおこなうこと、現場では周囲の状況と衛星配置状態の照らし合わせを行いすばやく使用可能衛星を判断すること、といった作業が必要となる。

・ギャップのある森林内では、PSD または POD といったトランスロケーション法で測位をおこなうことは可能である。しかしその精度は、PSD では 2D: 3.0m、3D: 5.1m で CPD の 1/4、POD はさらに悪く安定性にも欠ける。作業効率は受信状況にもよるが、単独測位の 2/3 程度で、測位条件も CPD ほど厳しくないのでラフな測量には適当である。

・サブメーターの誤差を議論するためには、測地座標系の変換が必要となるが、標高についてはジオイドとエリプソイドの差はほとんどないことが確認された。

・トランスロケーション測位では、2 地点での使用衛星を一致させないと単独測位よりも精度が悪化する場合がある。

したがって、森林を含む地域でサブメーターの精度の測量をおこなう場合は、CPD で主な地点を測位しておき、その間は従来の地上測量を併用すると行った手法が最も現実性の高いやり方となると考えられる。

たとえば、東京大学北海道演習林では、林況調査のための測量をコンパスを用いて行うとき、1 回の測量距離が 3 ~ 4km となるが、基準点を利用した誤差の最大を 1/300 としているので、10m 程度の誤差を持つといえる。しかし、測量線の間 GPS で測位した基準点を密に配置することによって、その誤差を小さくすることが可能となる。

また、30 ~ 50m 程度の解像度のリモートセンシングデータ解析のためのグランドトゥールズに用いるためには、単独測位結果を利用すると 1 ピクセルの特定は難しいが、2 × 2 ピクセル以内には収まるため、実用的にはディファレンシャル測位よりは利用しやすいと考えられる。

Ⅲ-6 トレーニングエリアの抽出

Ⅲ-6-1 方法

上での検討をふまえ、GPSでの単独測位結果のみを利用して、リモートセンシングデータ上でトレーニングエリアの抽出を試みた。使用したリモートセンシングデータはLandsat TMデータで、あらかじめ1ピクセル25mでUTM座標系に座標変換を行ってある。ここでは4時期のデータ（1984年9月17日、1985年5月31日、1988年7月26日、1990年4月27日）を利用して、季節の違いによるデータの変化についても見ることにした（露木他、1993）。

トレーニングエリアとして選んだ林分は、風害・虫害などの被害林分5点と健全林分4点である。GPSにより夏冬2回単独測位した場合は2回の平均値を、夏の場合はその値をUTM座標系の座標値に変換し、それを画像の座標値に変換した。なお、GPS測位値は、精度の高かったTransPak IIの値を採用した。座標値に変換した後、GPSの測位誤差の大きさも考慮して、変換値に含まれるピクセル±1ピクセルの範囲（3×3ピクセルのエリア）をトレーニングエリアとして機械的に画像より抽出し、その統計量を計算した。

Ⅲ-6-2 抽出結果

トレーニングエリアを画像上で表示して見てみると、健全林分（図Ⅲ-6-1）については「施業・健全1」を除いて正常な林分上に位置している。「施業・健全1」の右下に裸地が含まれているが、これは現地でも林分のすぐ脇に土場があり、GPSによる測位点も土場に近かったためこのような結果になったのだと思われる。被害林分（図Ⅲ-6-2）については、「前山大型1326」、「同1333」を除いて植生の薄い林分上に位置している。「前山大型」は、森林衰退現象把握のために設けられた固定標準地であるが、衰退林分の大きさは1カ所50m四方程度と割合小さく、3×3のトレーニングエリアが周囲の林分も含んでいる可能性が高いので健全林分と近い値を示していると考えられる。

トレーニングエリアの各バンドの平均値をプロットしたのが図Ⅲ-6-3、図Ⅲ-6-4である。これらの図では実線が被害林分、点線が健全林分を表している。上で述べた3点を中間として、どの時期も被害林分と健全林分がほとんどすべてのバンドで上下に分かれることがわかる。特に健全林分に比べて被害林分ではバンド4とバン

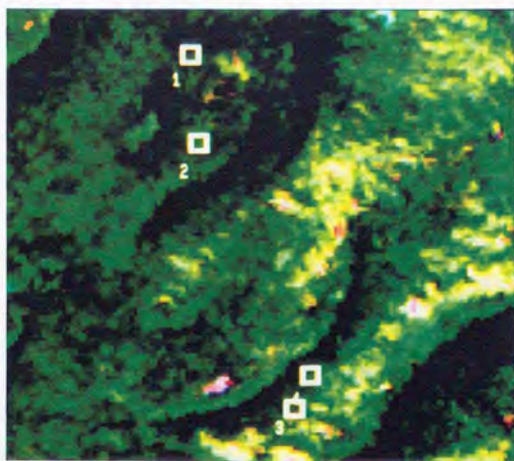
ド5の差が小さい。そこでこの2つのバンドの比を計算してみると、単バンドの場合よりも、「前山大型」と健全林分の分離がより可能であることがわかった(図Ⅲ-6-5)。

季節による変化について、単バンドでは健全林分より被害林分の変化のレンジが大きい。バンド比(バンド4/5)では被害林分が7月の最大値に向けて単調増加しているのに対し、健全林分では5月での増加が小さく極小値の存在することがわかる。NDVIについても計算したが、この値の方が両者の分離がよかった。

Ⅲ-6-3 まとめ

今回は測位結果を機械的に変換し一定の大きさのトレーニングエリアを抽出して考察を行ったにもかかわらず、2カテゴリーではあるがほぼ満足できる結果を得ることができた。実際の作業では現地の状態やリモートセンシングデータの様子をみながらさまざまな形やサイズにすることでできるので、より適切なトレーニングエリアを選定することが可能となる。

GPSを利用してトレーニングエリアのグラントゥールズを行うことは充分実用的である。1ピクセルを特定することはGPSの測位精度を考慮すると不安な面もあるが、TMデータでは2×2程度以上のエリアであればかなり確実に把握することができることがわかった。



健全 1 前山大型 1335



健全 2 前山大型 1324

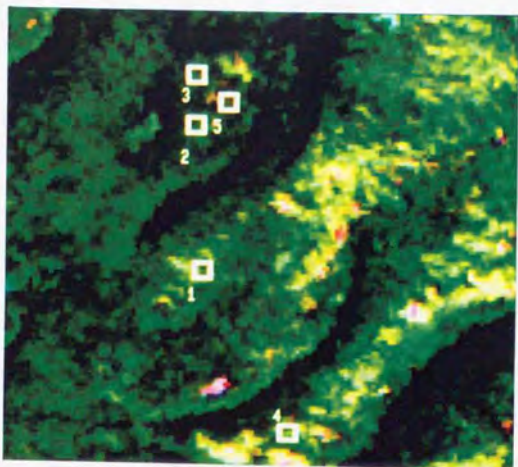


健全 3 施業・健全 1



健全 4 施業・健全 2

図Ⅲ-6-1 健全林分のトレーニングエリアと現地の様子



被害2 前山大型 1326



被害3 前山大型 1333

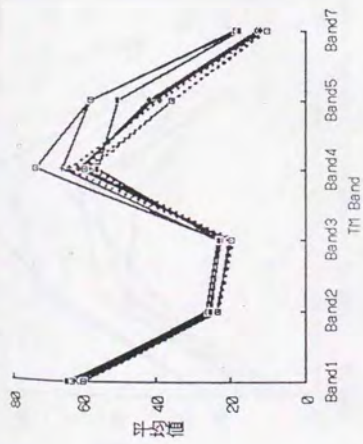


被害4 施業・風害

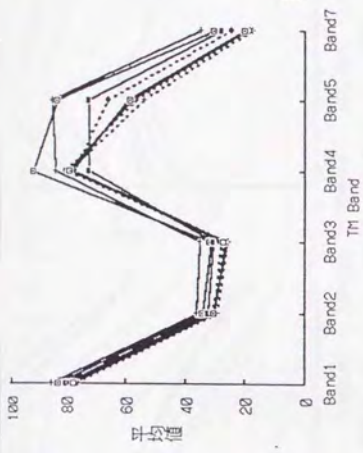


被害5 保存・虫害

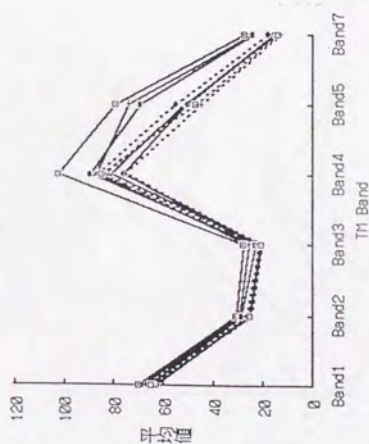
図Ⅲ-6-2 被害林分のトレーニングエリアと現地の様子



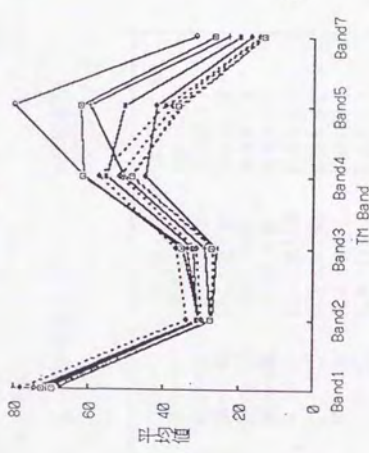
(b) 1985年 5月31日



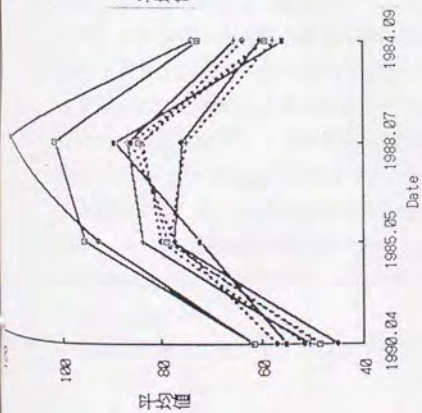
(c) 1988年 7月26日



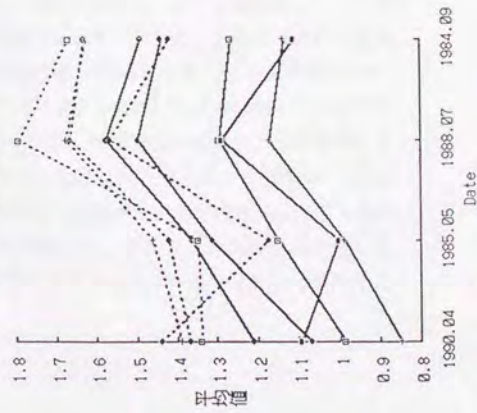
(d) 1990年 4月27日



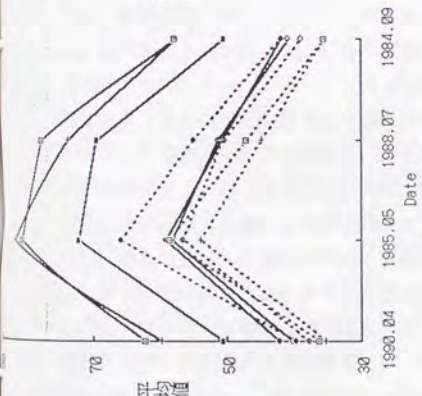
図III-6-3 トレーニングエリアのスペクトル特性



(a) バンド4



(b) バンド5



(c) バンド7

図III-6-4 バンド別 CCT カウントの季節変化

グラフ	林分名	T M写真プロットNo.
+	保存・風害	被害林分1
○	前山大型1326	被害林分2
●	前山大型1333	被害林分3
□	施業・風害	被害林分4
■	保存・虫害	被害林分5
+.....+	前山大型1335	健全林分1
○.....○	前山大型1324	健全林分2
●.....●	施業・健全1	健全林分3
□.....□	施業・健全2	健全林分4
(実線)	被害林分、点線	健全林分

図III-6-5 バンド比 (バンド4/5) の季節変化

第IV章 高解像度カラー衛星画像マップの試作

IV-1 はじめに

IV-1-1 研究の目的

森林の資源把握や環境モニタリングにリモートセンシング技術を利用してゆこうとする場合に、かならず問題となるのが既存の管理方法や技術との整合性や役割分担である。こういった問題はリモートセンシング技術を適用してゆこうという側から発生するのではなく、技術が持ち込まれる先、つまり現場側から発生することが多い。これは当然と言えば当然であって、リモートセンシングの長所や限界、その性質さえ十分知らないところへ突然そのようなものを持ち込まれた方にとって戸惑いが起きないわけではない。いわばリモートセンシング側のPR不足である。いきなり持ち込むのではなく、リモートセンシングについてのイメージからまず作ってゆく必要がある。

そこで、東京大学農学部附属演習林秩父演習林とその周辺について衛星画像マップを作成し、地域の全体的な環境の把握と衛星データのイメージ作りに役立てることとした。航空写真とはまた違った衛星データの特徴をつかみ、リモートセンシングデータに親しむことによって今後の技術導入の一助とすることが狙いである。今回は、Landsat TM画像とSPOT HRV-P画像データを使って5万分の1の縮尺で林班界とオーバーレイしたカラー地図の製作を行った。TMは可視から近赤外まで6つのバンド（さらに熱赤外に1バンドある）を持ち現在のところ植生状態の把握に最適なセンサーであり、SPOT HRV-Pは現在デジタル形式で一般的に入手できる最高の解像度（10m）を持つセンサーであるので、衛星からはここまで見えるのだということをアピールするためには最適な組み合わせである。ただし、TMデータは解像度が30mであるので、RGB-HSV変換という手法などを利用して、10m解像度の白黒データの情報をカラー画像に持たせるという操作を行った。

本研究では、秩父演習林全体を含む地域についての画像マップの作成を行ったが、全域のデータ処理はFREDAMでは一度に行うことが難しい。そこで、一部分を切り出してFREDAMで作成手法を決定し、その後全域をワークステーションのシステムで処理することにした。

作成した衛星画像マップは巻末に添付した。

IV-1-2 使用データ

(1) 衛星データ

本研究を行う以前に整備した秩父演習林付近の衛星リモートセンシングデータは、Landsat TMについては4シーン、SPOT HRV-Pは1シーンであった。衛星画像マップで演習林付近の自然環境の現況を把握するためには、最新の画像を利用して作成する必要がある。そこで、1992年の夏から秋にかけてSPOTデータの撮影依頼（プログラミングリクエスト）を出し、最新のデータの取得を試みたが、天候に恵まれず雲のないデータを得ることができなかった。SPOT衛星は26日帰りの軌道を持っているが、ポインティングミラーにより、軌道直下 $\pm 27^\circ$ の範囲の観測を行うことができるようになっていたため、平均して3日に1回程度の観測のチャンスがある（宇宙開発事業団他1989）。しかし、斜め観測をした場合、特に秩父のような起伏の激しい地域の場合、撮影された画像が正射投影とはならず、これを補正するには精密な地形データと衛星位置情報、変換アルゴリズムが必要となり、地図や他の衛星データと重ね合わせるのに大量の前処理を行わなくてはならない。現在これらの変換を行うプログラムが整備されていないので、90年5月のSPOTデータは観測角が $9^\circ 17'$ であったために、通常の地理補正では精度良く地図と重ね合わせることができなかった。そこで、今回のプログラミングリクエストでは直下観測の条件をつけたが、このために観測のチャンスが減りデータの取得を行うことができなかったと考えられる。上記のプログラムの整備は今後の課題である。そこでこれまでに撮影された中で、直下観測に近く雲のない91年4月撮影のデータを購入した。

Landsat TMについては、プログラミングリクエストや斜め観測の機能がない。そこで、対象地域に雲がなく太陽高度のできるだけ高い最新のデータとして、92年4月のデータを購入した。表IV-1-1に整備したリモートセンシングデータの一覧を示す。TMについてはこれらの5つのシーンについて検討を行い、季節的には4月のおわりで広葉樹に葉はないが、雲がなく、SPOTの撮影時期に最も近い92年4月のデータを画像マップ作成に使用することにした。画像作成に使用するバンドについて、植生を緑色で表現することのできる通常のナチュラルカラー（R:G:B＝バンド3:2:1）やフォールスカラー（R:G:B＝バンド7:4:2など）では、この時期の広葉樹林は葉がないため緑色で表現されない。そこで、R:G:B＝バンド3:5:1とすることによって広葉樹林も緑で表現することにした。

(2) DTMデータ

本研究以前に整備されていた「中津峡」、「三峰」、「雁坂峠」、「雲取山」（いずれも1:25,000地形図の図幅名）の4図幅では大血川の1、2林班の一部が欠けるために、今回「武蔵日原」を新たに購入し、5図幅を接続した（1,350ピクセル×750ライン）。

これらのデータは緯度経度をそれぞれ0.8°、1.0°ごとに等分割した緯経度メッシュである（東京大学農学部附属演習林 1992）。

(3) 林班界データ

東京大学農学部附属演習林研究部の協力のもとに、整備の進んでいるGISを利用して林班界を5万分の1の縮尺で出力した。

林班界データ	緯度	経度	面積	形状	色	注
林班界データ	緯度	経度	面積	形状	色	注
林班界データ	緯度	経度	面積	形状	色	注
林班界データ	緯度	経度	面積	形状	色	注
林班界データ	緯度	経度	面積	形状	色	注
林班界データ	緯度	経度	面積	形状	色	注
林班界データ	緯度	経度	面積	形状	色	注
林班界データ	緯度	経度	面積	形状	色	注
林班界データ	緯度	経度	面積	形状	色	注
林班界データ	緯度	経度	面積	形状	色	注
林班界データ	緯度	経度	面積	形状	色	注

表IV-1-1 整備したリモートセンシング衛星画像一覧

観測年月日	衛星	センサ	シーン名	太陽高度	太陽方向	観測角
1984.10.26	Landsat-4	TM	D138-035			
1987. 9. 1	Landsat-5	TM	D138-035-4	51°	129°	
1988. 4. 28	Landsat-5	TM	D138-035-4	56°	124°	
1989.10.24	Landsat-5	TM	D138-035-4	35°	148°	
1990. 5. 9	SPOT-1	HRV-P	329-278	66° 07′	137° 17′	9° 17′
1991. 4. 4	SPOT-2	HRV-P	329-278	55° 29′	148° 18′	2° 32′
1992. 4. 23	Landsat-5	TM	D138-035-4	54°	124°	

IV-2 高解像度カラー画像の作成

IV-2-1 画像処理の流れ

衛星画像マップ作成のために今回行った画像処理の流れを図IV-2-1に示す。データとして Landsat TM、SPOT HRV-P と DTM を使用し、地理補正、斜面輝度補正、画像強調、RGB-HSV 変換、画像合成、HSV-RGB 変換の各処理を行った。前述のように FREDAM では全域を一度に処理することが困難なので、 512×480 ピクセルのエリアを選定し、この部分で斜面補正以降の処理を行い、処理手法の検討を行った。途中結果の写真として示すのもこの範囲の画像である。ここでの結果を参照して、今度は全域から $1,024$ ピクセル \times $1,024$ ラインをテストエリアとして切り出し、3種類の画像マップを試作し、比較を行った。最終的にはこの中から1つの処理手法を選択し全域の画像マップを作成した。

以降は個々の画像処理をキーとして図IV-2-1の説明を行う。なお、図中の①～が以降の説明中の番号と対応する。また、表IV-2-1に各種画像処理のパラメーター一覧を示した。

IV-2-2 地理補正

今回は4種類の画像に対し5回の地理補正を行った。補正後の座標系はすべて UTM である。全域を一度に処理するために、この作業はワークステーションで行った。

① TM → 地理補正済 TM

対象地域を含む $1,400$ ピクセル \times 970 ラインを磁気テープより切り出し、 $1:25,000$ 地形図を使用して GCP を選定した。この地理補正は、これまでの TM データと重ねるために通常の補正と違い2段階で行っている。第1段階の地理変換には22個のGCPを採用し、変換の際の残差 (RMS) は 0.536 ピクセル、第2段階は18個のGCPで残差は 0.764 ピクセルであった。なお、変換は最近接画像内挿法 (ニアレストネイバー法) を用い、 1 ピクセル $25m$ である。変換画像のピクセルライン (x, y) を UTM 座標 (N, E) に変換する式は以下の通りである (UTM 座標の単位は m)。

$$N = -25y + 3,993,067$$

$$E = 25x + 290,519 \quad \dots (IV-1)$$

② DTM → DTM25m

IV-1-2(2) で述べたように、調整した DTM は緯経度メッシュとなっており、このま

までは UTM 座標系とは重ならない。そこで、DTM4 隅の緯経度の UTM 座標値を計算し、この値を使って UTM 座標系 25m メッシュの DTM として再編成した。変換の際の内挿はキュービックコンボリューションで行った。この変換により DTM を①で作成した TM 画像と重ね合わせることができる。

③ DTM → DTM10m

②と同様の変換を 1 メッシュ 10m として行った。この変換で DTM と④で作成する SPOT 画像が重なる。

④ SPOT → 地理補正済 SPOT

対象地を含む 3,000 ピクセル×2,100 ラインを磁気テープより切り出し、1:25,000 地形図を用いて選定した 29 個の GCP を利用して座標変換を行った。残差は 1.49 ピクセルで、ニアレストネイバー法で UTM 座標系に 1 ピクセル 10m として変換を行った。変換画像のピクセルライン (x, y) を UTM 座標 (N, E) に変換する式は以下の通りである。

$$\begin{aligned} N &= -10y + 3,989,625 \\ E &= 10x + 292,565 \quad \dots (IV-2) \end{aligned}$$

⑤ 地理補正済 TM → TMc

1 ピクセル 25m の TM 画像と 1 ピクセル 10m の SPOT 画像を重ねるために、TM 画像を再び変換した。GCP は、(IV-1, 2) 式より DTM に外接する長方形の 4 隅の UTM 座標値を計算し、これらの点を重ね合わせるという方法を用いて選定した。というのは、すでに両画像とも UTM 座標系に乗っているの、基本的には拡大するだけで十分だからである。この変換による内挿には 2.5 倍の拡大が含まれるのでキュービックコンボリューションを使用した。

IV-2-3 斜面輝度補正

⑥ 斜面方位・傾斜の計算

DTM より、各ピクセルの最大傾斜方向と傾斜角を図 IV-2-2 に示す式にしたがって計算した (大貫 1981)。ここで Z_{ij} は座標 (i, j) における標高値、 m は 1 ピクセルの大きさ、 α は斜面傾斜角、 ϕ が斜面方位である。斜面傾斜角画像、斜面方位画像を図 IV-2-3、図 IV-2-4 に示す。

⑦ 斜面輝度補正

衛星リモートセンシングを山岳地帯の森林に適用する場合に常に大きな問題となるのが、起伏のある地形に起因する日照条件の差 (影) である。土地利用の差ではなく、森林内の差という微妙な違いを把握するためには、この地形効果を無視することはできない。これを回避する手法として、バンド間の比演算を行う方法や、熱バンドを利用する方法などがよく行われる。しかしこれらの方法では、情報量の減少といったデメリットを覚悟しなけ

ればならない。また、波長帯によって地形効果は異なっているので、本研究のようにカラーマップの作成を行うために RGB 3バンドの鮮明な画像を必要とする処理には向いていない。斜面の向き別に解析を行う方法も用いられることがあるが、本研究の対象地となっている秩父演習林付近は起伏が激しく急傾斜地が多く、作業量が莫大となる。衛星リモートセンシングデータでみると、太陽高度の低い季節に撮影された北向き斜面の中には真っ暗に近い部分も見受けられる。今回の衛星画像マップ作成にあたって最も配慮したのが、このような地形効果の除去である。演習林全域にわたって地形データが整備されたので、この DTM を利用してピクセル単位の相対日射量を計算することによって、地形効果の除去（斜面輝度補正）を行うことにした。

相対日射量は、森林の林冠をランバート則に当てはまるなめらかな反射体と仮定し、斜面の法線と太陽光の入射方向との関数で表現される（大貫 1981、日本リモートセンシング学会 1989）。すなわち、斜面の法線ベクトル \vec{u} 、太陽光の入射ベクトル \vec{s} を

$$\begin{aligned} \vec{u} &= (x_1, y_1, z_1) & x_1 &= \sin\alpha \cdot \sin\phi' \\ & & y_1 &= \sin\alpha \cdot \cos\phi' \\ & & z_1 &= \cos\alpha \\ \vec{s} &= (x_2, y_2, z_2) & x_2 &= \cos\theta \cdot \sin\phi \\ & & y_2 &= \cos\theta \cdot \cos\phi \\ & & z_2 &= \sin\theta \end{aligned}$$

とおくと、斜面と太陽光のなす角 β は、

$$\begin{aligned} \cos\beta &= x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2 \\ &= \sin\alpha \cdot \sin\phi' \cdot \cos\theta \cdot \sin\phi + \sin\alpha \cdot \cos\phi' \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi + \cos\alpha \cdot \sin\theta \\ &= \sin\alpha \cdot \cos\theta \cdot \cos(\phi - \phi') + \cos\alpha \cdot \sin\theta \end{aligned}$$

とあらわされる（図 IV-2-5）。

一方、地表面の反射率 ρ は、

$$\rho \approx \frac{1}{\cos\beta} k (L - L_a) \quad \dots (IV-3)$$

k : 定数

L : センサーに届く放射輝度

L_a : 大気のパスラジアン

としてモデル化されている。衛星リモートセンシングデータの補正では、 L_a に対象地域内の最小輝度値を使用することが多い。そこで、(IV-3)式にしたがって TM データの斜面輝度補正を行ったところ、バンドによっては北向き斜面と南向き斜面の輝度値が逆転するオーバーコレクションとなることがわかった。波長帯の違いによって地形の影響する程度が異なっているのである。そこでまず、斜面の向きの違いが各バンドでどのようにあ

らわれているかを調べるために、北向き・南向きの2つの斜面方位について、表IV-2-2に示すようなカテゴリのトレーニングエリアを合計43個とり（川村1992を改変）、バンド6を除いた6バンドについて平均値を計算した。また、同じトレーニングエリアを用いてSPOTデータ、相対日射量データの平均値の計算も行った。なお、この相対日射量の値は $\cos \beta$ の定義域である-1から+1を0から255に量子化したものである。SPOT撮影時の太陽位置をもとに計算した相対日射量画像を図IV-2-6に示す。この値を見ると、TMについては波長が長くなるに従って南北の差が大きくなり、また北より南斜面の分散が大きい傾向があらわれている。また $\cos \beta$ は、斜面が太陽の入射ベクトルと平行になる $\beta = 0$ 以下でマイナスとなり、(IV-3)式に直接代入することができない。そこで今回は斜面輝度補正として

$$x' = \frac{x}{\text{相対日射量} \times A + B} + C$$

A, B, C : バンド別の定数

という式を作成し、変換前と変換後の南向き斜面の平均値が変化しないこと、変換後の北向き斜面の値と南向き斜面の値がほぼ等しくなること、補正の程度は相対日射量の大きさを越えないことなどを条件として、A, B, Cを決定することにした。詳細な土地利用分類を行うための補正（CIVCO 1991, COLBY 1991など）と違って、印刷効果を重視した補正法として上述の式を採用することにした。3つの定数は適当な数値を試行錯誤的に設定し、上記の条件を満たすようにした。その結果を表IV-2-3に示す。SPOTとTMバンド1~3については係数Aを1以下にすることによって前述の条件がほぼ満たされている。バンド4~7については、南北の差がバンド1~3ほどは近づいていないが、これはパスラジアンスを考慮していないことが一因であると考えられる。補正前後のTM画像、SPOT画像を図IV-2-7、図IV-2-8に示す。これを見ると、どちらも北向き斜面の輝度が上がり、陰影の濃い未補正の画像に比べて平坦な印象を受ける。しかし、TM画像では沢沿いの北向きの斜面にベルト状に黒い筋が残ってしまっている。これは太陽高度が低いために尾根の影が反対側の斜面に映っていることによるものである。上で述べた輝度補正のアルゴリズムは地表面の1点1点の斜面と太陽位置の関係のみを考え、周囲の地形は考慮の対象外となっているために、このような影の映り込みを補正することはできない。SPOTは太陽高度が高かったためにこのような現象はほとんど見えない。

IV-2-4 画像強調

⑧ 画像強調

SPOT画像、TM画像とも、オリジナル画像（斜面輝度補正後でも）は輝度値の平均は比較的低く暗いので、このままでは画像として表示することはできない。また、この後の

RGB-HSV 変換では色情報を利用するので、その前に画像の色調を整えておく必要がある。そこで、それぞれの画像（バンド）に対し

$$x' = a(x - b)$$

x : オリジナル輝度値

x' : 変換後輝度値

a, b : バンド別定数

であらわされる線形変換を行った。図IV-2-7、図IV-2-8は強調後のものである。

IV-2-5 RGB-HSV 変換

25m 解像度のランドサット TM 画像に解像度 10m の SPOT HRV-P の性質をもたせるために、今回は RGB-HSV 変換を利用した。以下この変換手法について説明を行う。そのためにまず、色彩を数学的に表現するための色の配列法であるマンセル表色系と HSV 変換手法について述べる（FOLEY et al. 1984、高木他 1991）。

(1) マンセル表色系

これはアメリカの画家マンセル（A.H.MUNSELL）が提唱した色の配列法である。色を心理量を基準として、色相・彩度・明度の3属性で定義している。

○色相：マンセルは赤・青・緑といった色の違いを区別する属性として色相（hue）を定義している。まず、R（赤）、Y（黄）、G（緑）、B（青）、P（紫）の5つの色を基本色相とし、これらを1つの円（色相環）の円周上に円を5等分するように配置する。次にその5つの基本色相の間に YR、GY、BG、PB、RP なる色を配置する。そして最後に、相隣合う色相の間を10等分し、全体で100色相を構成する。この時、各色相は基本色相の記号 R、Y、G、B、P およびそれらの中間色相 YR、GY、BG、PB、RP と1から10までの数字を組み合わせて呼ばれる。

○明度：色の明るさを示す尺度として明度（value）を定義する。反射率0%の理想の黒の明度を0、反射率100%の理想の白の明度を10とし、そのあいだの明度を心理的に10等分し、0.1, 2, …, 10と数字で表現する。一般に人間の明るさの感覚は、反射率に比例してはいない。たとえば、人間は反射率20%程度のものを中間の明るさとして認識する。マンセルの明度尺度は、ほぼ反射率の平方根に比例している。

○彩度：色のあざやかさの程度を示す尺度として彩度（chroma）を定義する。各色相、明度ごとに無彩色（灰色）を彩度0と定義して、もっともあざやかな色（単色）までを心理学的に等間隔に区切り数字で表現する。彩度の最大値は、色相、明度によって異なる。

彩度を中心からの距離で表した色相環を明度ごとに作成し、これを明度の低いものから順に同心円上に積み上げると、マンセルの3属性は、円筒形の色立体として表現できる

(図IV-2-9)。世の中のすべての色はこの色立体のどこかに位置づけられ、その色はマンセルの3属性により表現される。

(2) HSV変換

ディスプレイなどの画像表示装置で色の指定を行う場合にはRGB各原色の濃度を指定するのが一般的であるが、この方法で思い通りの色を得るには熟練を要する。そこで、RGBの持つ原画像の色情報を色相・彩度・明度で表現し、そこで画像の色調を整え、その後再びRGB表現に戻して画像表示を行う、という手法が用いられる。この変換(RGB→色相(S)・彩度(H)・明度(V:value))をHSV変換という。なお、HSV変換にはさまざまな方式が提案されており、変換方式によってはHSI、IHSまたはHSL(L:lightness)変換と呼ばれる。ここでは、HSV変換と呼ぶことにする。

今回使用したHSV変換式は、Smithによる6角錐カラーモデルによる変換である。RGB直交座標系において、3軸に接する立方体を考えるとR、G、Bとその補色C(シアン)、M(マゼンタ)、Y(イエロー)は図IV-2-10に示すような位置関係にある。このRGB立方体の主対角軸を明度軸Vとし

$$v = \max \{ R, G, B \}$$

と定義する。ここで、V軸に直交する平面にRGB立方体を平行投影すると正6角形が形成される。ある点Pが与えられたとき、点Pを通りV軸に直交する平面上で色相Hと彩度Sを図IV-2-11のように定義する。こうしてRGBとHSVの間に図IV-2-12に示すような6角錐カラーモデルが形成される。相互の変換方法を以下に示す。ただし、R、G、B、S、Vの値域は[0, 1]であり、Hは[0, 2π]の値を持つものとする。

○ HSV変換

vは次式により定義される。

i) V=0のとき、SとHを以下のように定める。

$$S = 0, H = \text{不定}$$

ii) V≠0のとき、まず、Sを次式で定義する。

$$S = \frac{V - v}{V}$$

ただし $v = \min \{ R, G, B \}$

次にr, g, bを以下のように定める。

$$r = (V - R) / (V - v)$$

$$g = (V - G) / (V - v)$$

$$b = (V - B) / (V - v)$$

最後に H を以下のように定める。

$$R = V \text{ のとき } H = \frac{\pi}{3} (b - g)$$

$$G = V \text{ のとき } H = \frac{\pi}{3} (2 + r - b)$$

$$B = V \text{ のとき } H = \frac{\pi}{3} (4 + g - r)$$

○ HSV 逆変換

i) $S = 0$ のとき、 H の値にかかわらず、 R, G, B を以下のように定義する。

$$R = G = B = V$$

ii) $S \neq 0$ のとき、まず以下のように h, P, Q, T を求める。

$$h = \text{floor} \left(\frac{H}{\pi/3} \right)$$

ただし、 $H = 2\pi$ のとき $H = 0$ 。 $\text{floor}(x)$ は x 以下の最大の整数を与える関数。

$$P = V(1 - S)$$

$$Q = V\{1 - S(H - h)\}$$

$$T = V\{1 - (1 - H + h)\}$$

つぎに、 h の値により R, G, B を以下のように定める。

$$h = 0 \text{ のとき } R = V, G = T, B = P$$

$$h = 1 \text{ のとき } R = Q, G = V, B = P$$

$$h = 2 \text{ のとき } R = P, G = V, B = T$$

$$h = 3 \text{ のとき } R = P, G = Q, B = V$$

$$h = 4 \text{ のとき } R = T, G = P, B = V$$

$$h = 5 \text{ のとき } R = V, G = P, B = Q$$

⑨ RGB-HSV 変換

R:G:B に強調済みの TM バンド 3:5:1 を割り当て、上で示した HSV 変換式で 3 成分に変換した。3 成分の画像を図 IV-2-13 に示す。

⑩ SPOTc (I)

HSV-RGB 変換において、変換後の画像に最も影響を与えるのがV成分である。通常、このような手法で解像度の悪いデータに解像度のよいデータを重ねるときは、V成分に解像度の高いデータを割り当てる (CARPER et al. 1990、CHAVEZ et al. 1991、WELCH et al. 1987)。そこで、まず最もオーソドックスな方法として、V成分に強調後の SPOT 画像をそのまま割り当て、変換を行った。その結果を図IV-2-14に示す。(なお、aは部分、bは解析データ全体である。以下同様。)この結果を見ると、解像度は上がったように見えるが、SPOT HRV-Pの観測波長帯(0.51~0.73 μm)が植生の反射の最も高い近赤外域より短いところにあるため、植生部分の変化が乏しく、コントラストが小さくなっている。また、針葉樹林の部分は非常に暗くなっている。これはCARPER et al. (1990)の述べている結果とも一致する。

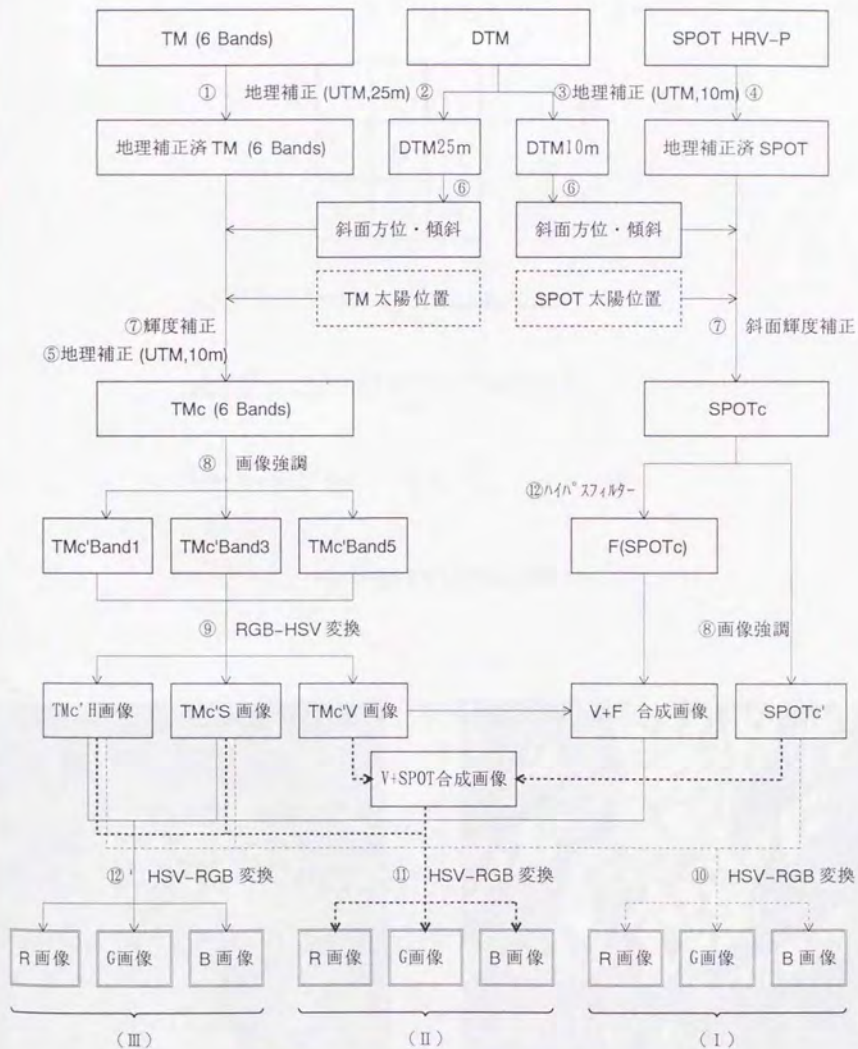
⑪ V+SPOT 合成画像 (II)

(I)の欠点をカバーするため、V成分にTMで作成したV画像とSPOTcを合成したものを割り当てた。もとのTM画像の植生部分のコントラストとSPOTの解像度をある程度ずつ取り入れようとするものである。合成画像を図IV-2-15に、結果を図IV-2-16に示す。目的通り、植生部分の表現力は豊かになっているが、(I)に比べて解像度は劣るように見える。

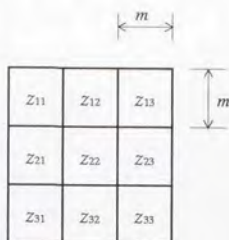
⑫' ハイパスフィルター

(II)ではSPOTの高解像度を取り入れるために、単純に画像の合成を行った。この方法は、SPOTの観測波長帯の影響が結果にあらわれるため、どうしても植生部分の明るさが小さくなることは避けられない。そこで、SPOT画像の高周波成分をハイパスフィルターによって取り出し、TMのV画像からこれを減算することによって、観測波長帯の影響を受けずに高解像度の情報のみをV画像に取り入れることを試みた。ハイパスフィルターとして、画像の2次微分フィルターであるラプラシアンフィルターを利用した。フィルターのサイズには 3×3 、 9×9 の2種類(図IV-2-17)を検討した。2種類のフィルターをSPOT画像に対して適用した結果を図IV-2-18に示す。これを見てわかるように、 3×3 の場合にはもとの画像のノイズを拾いだしているように見えるのに対し、 9×9 では、地形や土地利用の境界などを強調したものになっている。つまり、前者は1ピクセル(10m)単位で計算しているために、この地域の土地利用の境界を取り出すためにはフィルターサイズが小さすぎたことになる。後者は3ピクセル(30m)単位に平滑化したフィルタリングで、この場合には適切なサイズであったことがわかる。これは、CHAVEZ et al. (1991)がフィルターサイズとして 3×3 よりも 7×7 がよい結果を示したのと一致する。

後者を採用し、TMのV画像からフィルター画像を減算した。これは、同一画像のオリジナルとフィルター画像の減算では鮮鋭化と呼ばれている手法である。CHAVEZ et al. (1991)はフィルター画像との加算を行っているが、ここでは鮮鋭化を念頭において減算を行った。なお、減算にあたって、単純に減算を行うと境界成分が非常に目立つものになるため、2つの画像の係数を適当に変化させて結果を検討しながら行った。合成画像を図IV-2-19に、結果を図IV-2-20に示す。これはオリジナルとフィルターを2:-1の割合で合成したものである。その結果、色彩的には最も変化に富んだものとなった。尾根筋でのエッジ成分が強調されすぎているきらいがあるが、これ以上フィルター成分を少なくするとTMに埋もれてしまうのでこの程度が限界であった。



図IV-2-1 衛星画像マップ作成のための画像処理の流れ



$$B_1 = \frac{(z_{11} + z_{12} + z_{13}) - (z_{31} + z_{32} + z_{33})}{6m}$$

$$B_2 = \frac{(z_{13} + z_{22} + z_{33}) - (z_{11} + z_{21} + z_{31})}{6m}$$

$$\tan \alpha = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}, \quad \tan \phi' = \frac{B_2}{B_1}$$

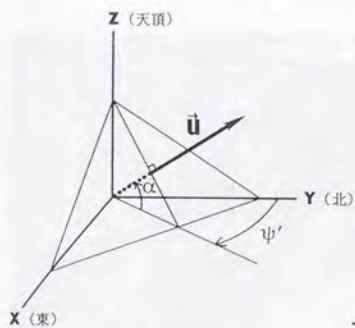
图IV-2-2 斜面倾斜角 (α) 与斜面方位 (ϕ')



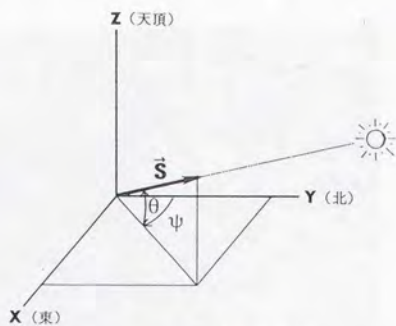
图IV-2-3 斜面倾斜角画像



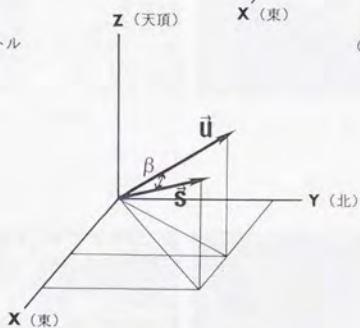
图IV-2-4 斜面方位画像



(a) 斜面の法線ベクトル

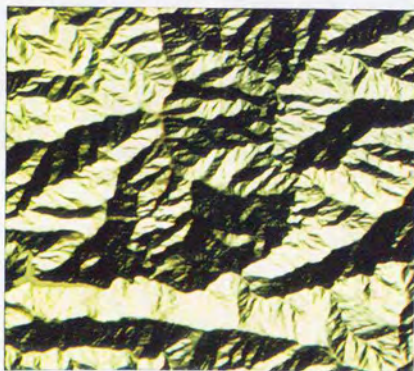


(b) 太陽光の入射ベクトル

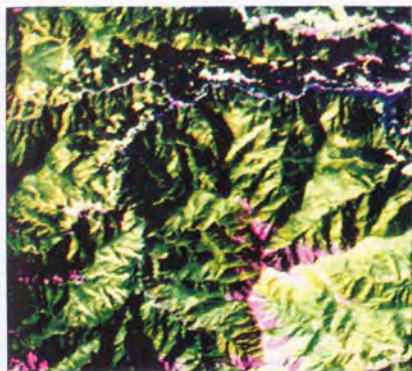


(c) 法線と入射ベクトル

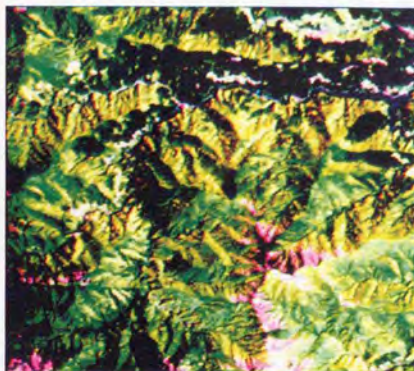
図IV-2-5 相対日射量の計算



図IV-2-6 相対日射量画像



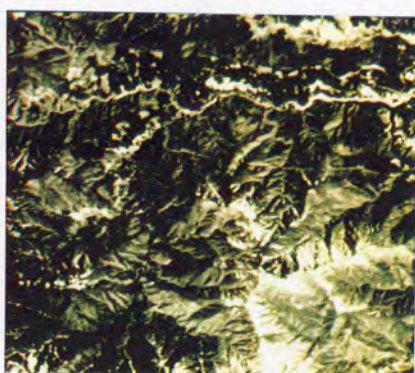
図IV-2-7a 未補正 TM 画像



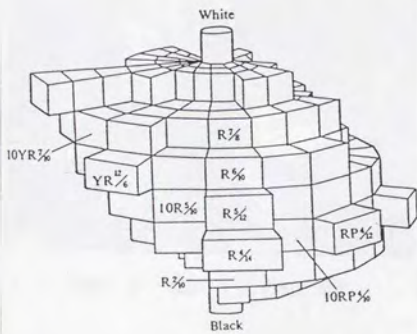
図IV-2-7b 補正済み TM 画像



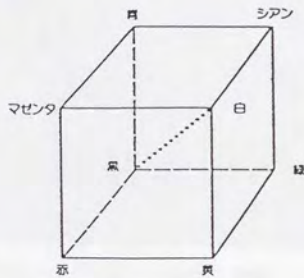
図IV-2-8a 未補正 SPOT 画像



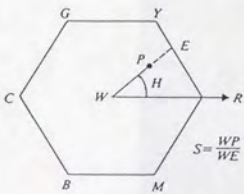
図IV-2-8b 補正済み SPOT 画像



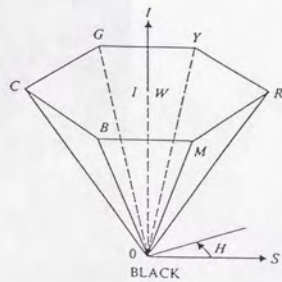
図IV-2-9 マンセル色立体



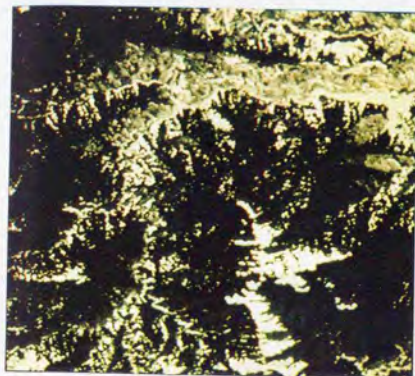
図IV-2-10 RGB カラー立方体



図IV-2-11 HとSの定義



図IV-2-12 HSV6 角錐カラーモデル



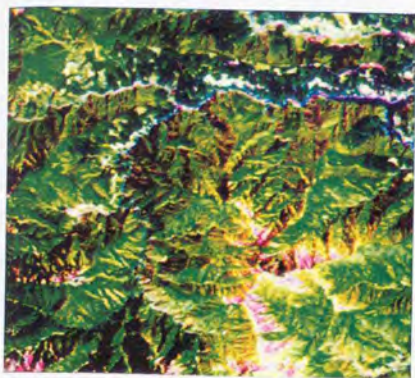
图IV-2-13a H (色相) 图像



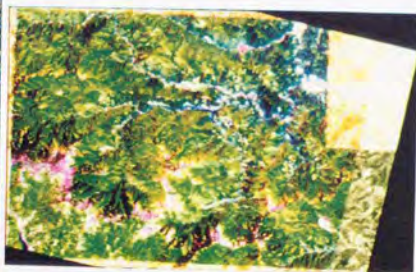
图IV-2-13b S (彩度) 图像



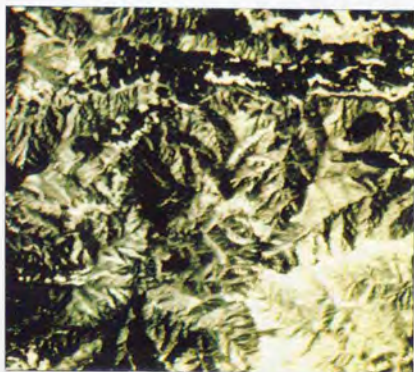
图IV-2-13c V (明度) 图像



图IV-2-14a SPOT 变换图像



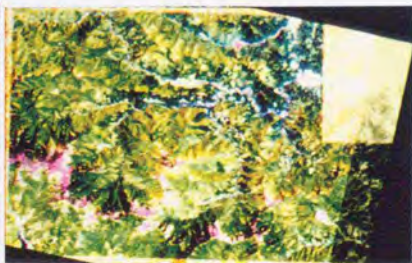
图IV-2-14b SPOT 变换图像(全体)



图IV-2-15 V+SPOT 合成图像



图IV-2-16a V+SPOT 变换图像



图IV-2-16b V+SPOT 变换图像(全体)

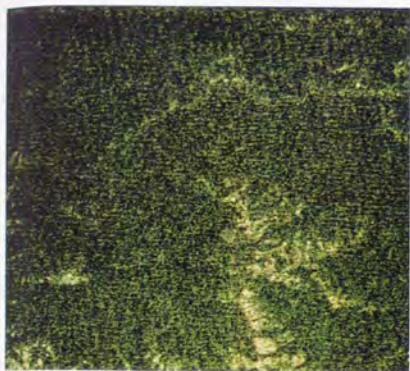
0	1	0
1	-4	1
0	1	0

(a) 3 × 3 ラプラシアン
フィルター

0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	1	1
1	1	1	-4	-4	-4	1	1	1
1	1	1	-4	-4	-4	1	1	1
1	1	1	-4	-4	-4	1	1	1
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0

(b) 9 × 9 ラプラシアンフィルター

図IV-2-17 ハイパスフィルターとして使用したオペレーター



図IV-2-18a 3×3フィルタ画像



図IV-2-18b 9×9フィルタ画像



図IV-2-19 V + F 合成画像



図IV-2-20a V + F 変換画像



図IV-2-20b V + F 変換画像 (全体)

表IV-2-1 画像処理に使用したパラメータ

入力画像名	処理	パラメータ	出力画像名
TMc Band3	画像強調	最小値:21, 最大値:50	TMc' Band3
TMc Band5	"	" :25, " :120	TMc' Band5
TMc Band1	"	" :57, " :83	TMc' Band1
SPOTc	"	" :15, " :55	SPOTc'
SPOTc, TMcV	画像合成	SPOTc:1.0, TMcV:0.5	V+SPOT
V+SPOT	画像強調	最小値:50.0, 最大値:315.0	V+SPOT'
F(SPOTc), TMcV	画像合成	F(SPOTc):-0.5, TMcV:1.0	V+F
V+F	画像強調	最小値:-16.0, 最大値:288.0	V+F'

表IV-2-2 斜面輝度補正係数算出のためのトレーニングエリア平均値

平均値	相對日射量		SPOT 未補正					SPOT 補正					T.M. 未補正					T.M. 補正				
	10m	25m	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band7	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band7	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band7		
カゴヤ	166.54	172.75	31.60	64.53	25.68	27.57	36.10	50.92	23.29	37.47	67.80	30.00	34.92	50.57	70.56	32.23						
広葉樹-北	231.18	238.94	40.60	69.53	30.73	36.17	57.66	95.87	43.08	41.77	70.20	31.11	36.51	58.38	96.32	43.33						
大杉人工-北	225.43	219.28	33.38	62.61	25.82	25.38	47.82	45.68	16.85	34.90	63.98	27.26	27.41	52.41	50.37	18.65						
ヒキ人工-南	250.09	247.43	33.71	64.66	27.66	27.23	56.21	50.46	18.35	33.37	64.95	27.54	26.78	54.96	48.97	17.81						
ヒキ人工-北	183.42	197.52	29.95	63.26	25.67	26.53	41.41	49.33	21.26	34.16	65.47	28.38	30.71	50.69	59.75	25.74						
ヒキ人工-南	243.89	246.41	37.79	67.29	29.31	31.35	61.13	76.54	31.70	37.84	67.62	29.22	30.87	60.08	74.39	30.77						
カゴヤ人工-北	189.78	176.35	34.54	64.41	26.44	29.43	40.76	54.43	23.97	38.81	67.53	30.64	36.77	55.84	73.91	32.54						
カゴヤ人工-南	241.96	245.28	38.89	68.69	30.17	34.10	60.20	91.54	39.84	39.12	69.09	30.15	33.73	59.40	89.58	38.97						
針葉樹-北	177.54	184.32	29.48	61.55	24.97	25.32	40.76	39.79	15.31	34.08	64.22	28.41	30.72	53.48	51.80	19.96						
針葉樹-南	247.54	241.52	36.20	65.37	28.49	30.15	58.20	65.82	26.39	36.02	65.90	28.68	30.16	58.24	65.41	26.24						
混交林-北	196.37	193.93	31.30	62.61	25.85	26.04	45.10	44.54	16.72	34.68	64.94	28.79	30.50	56.30	55.13	20.68						
混交林-南	247.42	244.42	44.15	67.17	30.19	32.85	69.82	81.05	31.48	43.92	67.59	30.22	32.57	68.81	79.54	30.97						
崩壊地-北	184.35	205.04	37.74	65.32	26.92	28.93	35.43	50.43	22.42	42.95	67.30	29.27	32.62	41.95	59.25	26.34						
崩壊地-南	221.23	222.53	50.92	74.97	34.22	40.42	51.93	83.68	41.08	53.33	76.46	35.95	43.27	57.04	90.98	44.77						
北平均	185.93	191.05	32.17	63.56	25.85	27.03	40.54	48.37	20.48	36.52	66.06	29.02	32.14	51.39	61.23	26.01						
SD	21.07	19.84	2.81	1.67	0.88	1.73	5.60	6.41	4.06	3.24	1.98	1.22	3.08	4.70	9.46	5.91						
南平均	240.15	241.02	40.08	68.19	30.06	33.23	59.20	78.76	33.60	40.54	68.77	30.35	33.43	59.43	78.72	33.69						
SD	13.00	12.03	7.13	4.61	3.04	6.14	7.98	22.21	12.97	7.59	4.89	3.50	6.92	7.19	22.61	13.38						
全体平均	217.45	220.10	36.77	66.25	28.30	30.63	51.39	66.04	28.11	38.86	67.64	29.79	32.89	56.07	71.40	30.48						
SD	31.76	29.39	6.92	4.31	3.16	5.69	11.66	22.99	12.07	6.41	4.13	2.84	5.62	7.39	20.11	11.46						
補正係数			A					B					C									
			0.5					127.5					250									
			0.15					16.75					255									
			0.5					127.5					245									
			0.5					0.75					1									
			1					0					0									
			242					242					240									

$$\text{補正式 } x' = \frac{x}{\text{相對日射量} \times A + B} + C$$

IV-3 衛星画像マップの作成

IV-2-6で試作した3種類の画像について、印刷効果を確認するために仮印刷を行った。画像をモニターで見た場合の印象と、印刷した場合の印象ではまったく異なる場合があるからである。仮印刷ははじめに述べたテストエリアで行い、1:50,000での出力結果で比較を行った。

仮印刷を見てみると、ブラウン管とインクの発色の違いにより、全体的に印刷の方が落ちついた色合いとなり、特に緑色はモニターでは黄緑かかった明るい緑色なのに対して印刷はくすんだ感じになっている。そのほかの特徴はIV-2-6で述べたものがほぼそのまま表れている。つまり(Ⅰ)は解像度は上がったように見えるものの森林内の違いがあまり明確ではなく、また、発色は赤みがやや強くなっておりヘイズかかったように見える。(Ⅱ)は森林の違いが割合よく表れているが解像度の点で他の2つより劣ったように見え、また、裸地や道路が白くつぶれ細部がよくわからない。(Ⅲ)は解像度と森林の違いの表現の点では上のふたつの欠点を克服しているが、山頂の雪や沢沿いのエッジが必要以上に強調されていて、やや違和感を覚える。また、画像全体の明るさが他のふたつより小さく、コントラストはあるものの暗い印象を受ける。

以上の点などについて検討を行った結果、最終的にはエッジが目立つくらいはあるものの(Ⅲ)の画像を利用して衛星画像マップの印刷を行うことにした。

衛星画像マップとして印刷したことによって、演習林とその周囲を一目で見渡すことができるようになったので、大まかな植生の分布状況や周囲との関係を直感的に把握できる。また、ここで作成されたデジタル画像データはUTM座標系にほぼ正確に乗っているので、他の座標系(緯度経度や19座標系)に変換したり、出力の縮尺を変えることによって大縮尺の地図と重ねたりすることが可能である。また、GISや景観シミュレーションシステムに画像データやDTMデータを渡すことによって他分野で利用することも容易にできる。印刷物、デジタルデータとも有効に活用できると考えている。

新たなアルゴリズムの開発や試行錯誤しながらの処理手法の決定にFREDAMを利用し、その結果を大面積に適用するのにワークステーションの市販のシステムを利用する、相互補完的な二つのシステムの使用法をここでは具体的に示した。

第V章 FREDAMを利用した変化抽出

V-1 はじめに

リモートセンシングのデータ解析が得意とする分野に、経年変化の抽出がある。これまでさまざまな手法が用いられてきたが、第V章では他の解析システムには見られないが、FREDAMにインストールされている2つの変化抽出手法の応用例について述べる。1つはCVA法による横浜付近の都市近郊林変化の抽出であり、もう1つはタイにおけるユーカリ造林地の変化を、新たに提案するDifference Index法により解析した。どちらの対象も、現在社会的関心の高い問題で、リモートセンシング技術を利用しなければ簡単に把握できないものである。このような解析は、本来リモートセンシングの専門家のみが行えばよいものではなく、関心を持ったり情報を必要とする人がだれでも行えるようになってるのが理想である。変化抽出にはこれまでさまざまな手法が採用されてきている(V-3-3(1))が、FREDAMではそのために、直感的に理解しやすいこの2つの手法を取り入れ、なるべく使いやすいシステムになるようめざした。

V-2 CVA法による都市近郊林変化の自動抽出

V-2-1 CVA (Change Vector Analysis) 法

CVA法 (Change Vector Analysis method; 変化ベクトル解析法) は、Malila (1980) の開発した手法である。図V-2-1の概念図が示すように、この手法の原理はきわめて簡単である。1点1点のデータにおいて2つの特徴量を考え、2時期の変化をこの特徴量を用いてベクトル (変化ベクトル) で表してみる。そして、そのベクトルの大きさがある基準の大きさ (閾値) を越えたとき変化が起き、越えない場合は変化がなかったと考える。また、変化ベクトルの方向が変化の内容を表している、とするものである。時期Iに過去のデータ、時期IIに現在のデータを使えば、その間にどのような性質の変化が起きたかがわかる。その後同じ手法を用いて森林の変化抽出を行った Colwell (1981) もランドサット MSS を利用している。さらにこの手法は露木 (1984)、沢田他 (1985) によって、季節の異なった MSS データにおいても森林の変化抽出が従来手法に比べて精度よく行われることが明らかになっている。

CVA法の最大の利点は、土地利用分類を行わなくても特定の変化を抽出することが可能なことにある。そのため、他の手法とくらべて解析プロセスが単純となり、画像解析の非熟練者でも使いやすい。V-2節では、この特徴を最大限に利用して変化の自動抽出手法をシステム化した。

この手法で重要なのが、ベクトルを表す特徴量として何を使うかである。単純なのは、リモートセンシングデータのいくつかのバンドの中から適当な2つを取り出してくることであるが、それでは他のバンドが無駄になってしまう。ランドサット MSS データを主成分分析すると多くの場合、第1主成分にはデータの明るさを表す指標 (ブライツネス)、第2主成分には植生の存在を表す指標 (グリーンネス) が得られる。Malila (1980) などが行った手法は、2時期のデータそれぞれに主成分分析を行い、その第1第2主成分を利用するやり方である。これに対して Michalek et al. (1993) はランドサット TM データバンド1~3を用いて、2時期における各バンドの増減の組み合わせ (表V-2-1) を考え、これを sector code とし、code ごとに変化の意味づけを行っている。この例では使用バンドが3つなので sector code が8つで済んでいるが、バンドが多くなったときは2のバンド数乗に場合の数が増加するので全ての code について意味づけをおこなうことが難しくなってくる。森林域を対象とする場合には利用バンド数が多いことや、一般向けに理解を求めするには処理プロセスを直感的に把握できる必要があることを考え、本研究では主成分分析を利用した手法で解析を行うことにした。

V-2-2 CVA法による解析

(財) RESTECよりFDで購入したランドサットTMデータは、1984年8月16日と1992年8月22日にランドサット5号により撮影されたものである。前者のデータを後者に重ね合わせるように共1次式を用いて地理変換を行った。残差は最大0.8ピクセルであった。2時期の画像および対象地域の地図を図V-2-2に示す。次にバンド6を除くこれら2時期のデータに対し主成分分析を行った。分析結果を表V-2-2に示す。表にあるように、どちらのデータも第2主成分までで約95%の寄与率があり、第1主成分が各バンド係数正でブライトネスを、第2主成分は可視バンド係数負、赤外バンド係数正のグリーンネスを表すことがわかった。

そこでこの2つの主成分を特徴量として採用し、CVAを行った。図V-2-3は変化ベクトルの終点の頻度分布を表したものである。この分布に対し、グラフの原点を中心に1.5度毎に片側の正規分布を仮定して標準偏差(σ)を求め、この値に対しフーリエ変換によるスムージング処理を行った。そして1.5度毎にスムージング結果(σ')を基準として正規化を実行し、変化ベクトルの大きさを求めた。図V-2-4は変化ベクトルを表す画像である。(a)はベクトルの大きさのみの情報で、明るいほどベクトルが大きいことを表している。(b)は角度で、図V-2-3で12時の方向を0度として時計回りに角度を表し、これも角度が大きいほど明るくなっている。

これまでの研究結果(Colwell 1981; 露木 1984; 沢田他 1985)では植生の消失(裸地化)はブライトネス増大・グリーンネス減少、植生の回復(植生化)はその反対で表されるので、この図で前者は第IV象限、後者は第II象限を占めていることになる。また、10~20年以下の期間を考えた場合、土地利用について変化のないほうが大部分を占め、変化が起きた方を異常値とすることができる。変化の有無を判定する閾値はこのことを考え、グラフの原点を中心に一定角度(1.5度)毎の領域に含まれるベクトルの頻度の標準偏差を計算し、この値を基準とすることによって決定する。閾値の設定は抽出結果に直接影響を与える非常に重要な作業であるが、ここでは過去の経験から標準偏差の2倍(2σ)とし、これを越えたものを変化ありとした。

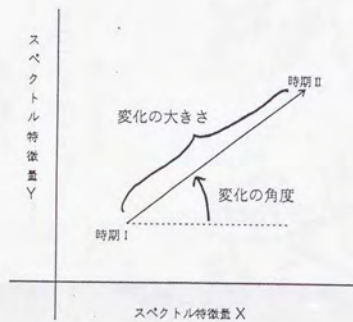
V-2-3 変化抽出の結果

図V-2-5が8年間に植生の消失したと推定される部分、つまりベクトルの大きさ 2σ 以上で角度 $90\sim 180$ 度の部分、を赤く表示し、1984年の画像と重ねたものである。詳細に見てみるといくつかのまとまりを見つけることができる。図V-2-2の画像と比較しながら検討してみる。まず画面中央の円海山東斜面に横浜横須賀道路の出口のようなものができているのが目立つ。これは1990年作成の国土地理院の地形図にはまだ記載

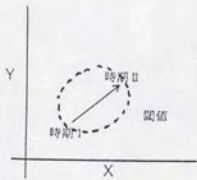
されていない変化であるが、最新の道路地図で調べると釜利谷ジャンクションと金沢自然公園インターチェンジであることがわかった。次は富岡町（画面右上）に3カ所ほど緑被がなくなり、住宅団地に変わっていることがわかる。さらに米軍弾薬貯蔵地内（画面中下）に大きな裸地ができたこと、舞岡町（画面左上）や小雀町（画面左中）にも森林の伐採後宅地に変わった部分を見つけることができる。その他にも10ピクセル以上のまとまりがいくつか見いだされる。

反対に、図V-2-6は植生の回復したと推定される部分である。図V-2-5とくらべると目立って大きなまとまりは少ない。画面右中に最大のかたまりがあるが、これは1984年が裸地化した直後だったものが8年後にやや植生回復が起きた部分である。それ以外のやや大きなまとまりも同様と考えられる。8年間という期間では、全くの裸地が鬱蒼たる森林になるということは考えられないが、この地域では植生の回復より消失面積の方が大きいと推測される。

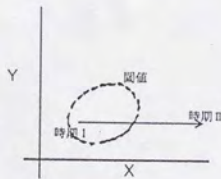
ここでは、都市近郊林の減少を前提とした変化の自動抽出を行い、ランドサットTMデータから緑被の変化を捉えることができた。このようにこの手法は、対象地域の土地利用が不明な場合でも、植生の消失（あるいは増加）を自動的に把握できるので、地域の植生面積変化の大まかな傾向を簡単に捉えるには有効であると考えられる。しかし、他の変化抽出の手法と同様に、2時期のデータの地理補正の精度やピクセルの問題を考えると、小面積の変化を正確に把握することは難しいと考えられる。



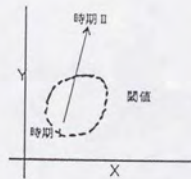
(a) 変化ベクトル



(b) 変化が小さいまたはない場合



(c) 変化があった (タイプ A)



(d) 変化があった (タイプ B)

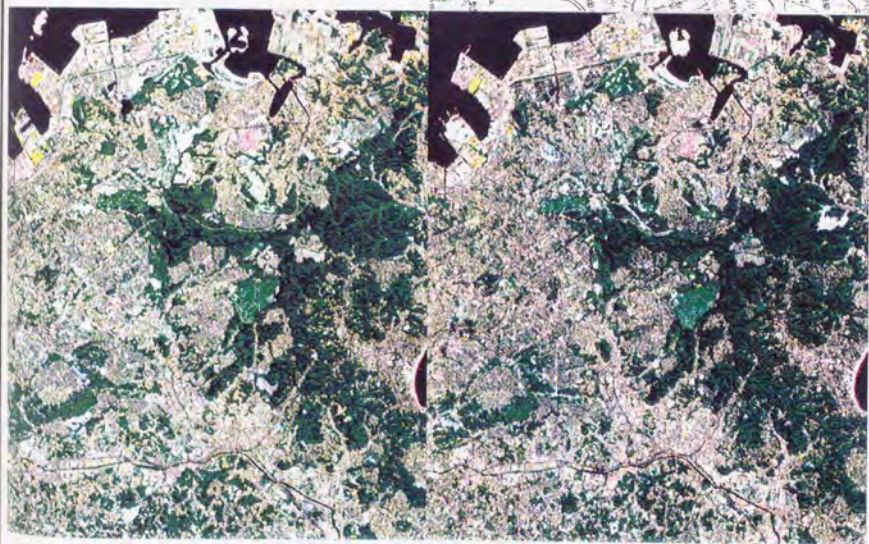
図 V -2-1 CVA の概念

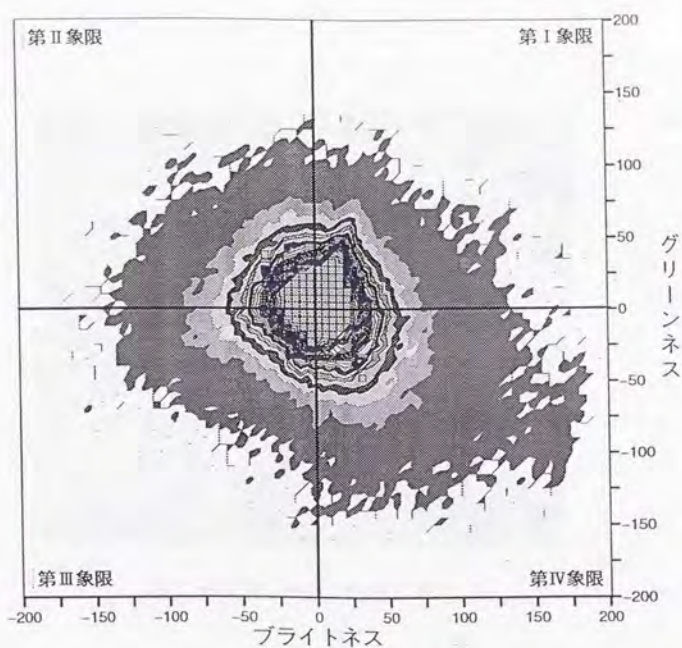
図V-2-2 対象地域のランドサット画像および地図

1984年8月16日撮影
Landsat TM

1992年8月22日撮影
Landsat TM

対象地域の地図





図V-2-3 変化ベクトルの頻度分布



(a) 変化ベクトルの大きさ



(b) 変化ベクトルの角度

図V-2-4 変化ベクトル画像



図 V -2-5 '88 → '92 の植生消失部分 (赤)

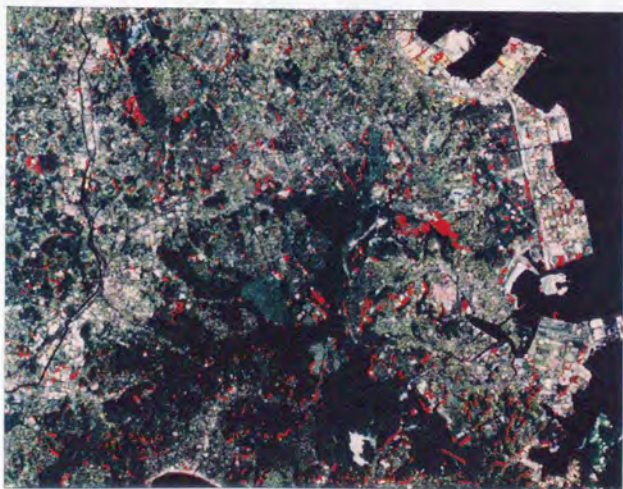


図 V -2-6 '88 → '92 の植生回復部分 (赤)

表V-2-1 CVA処理のための sector code の定義
(Michalek et al., 1993 より)

Sector code	TM 変化方向		
	Band 1	Band 2	Band 3
1	-	-	-
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	+
5	+	-	-
6	+	-	+
7	+	+	-
8	+	+	+

ここで+は時期Ⅰから時期Ⅱにかけて値が増加したこと、
-は減少したことを意味する

表V-2-2 主成分分析結果

(a) 1984年8月16日

TM バンド		Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
データ個数		204,800	204,800	204,800	204,800	204,800	204,800
平均		84.3	35.7	38.6	53.4	61.7	29.5
S.D.		14.2	8.5	13.5	20.3	23.5	14.3
相関係数	Band 1	1.0000	0.9671	0.9561	0.0643	0.5580	0.7930
	Band 2		1.0000	0.9844	0.1905	0.6562	0.8394
	Band 3			1.0000	0.1324	0.6340	0.8456
	Band 4				1.0000	0.7449	0.3600
	Band 5					1.0000	0.8580
	Band 7						1.0000
主成分		COMP1	COMP2	COMP3	COMP4	COMP5	COMP6
固有値		4.3770	1.3309	0.2161	0.0408	0.0251	0.0100
累積寄与率		0.7295	0.9513	0.9873	0.9941	0.9983	1.0000
固有ベクトル	B1	0.4342	-0.3162	-0.2893	-0.7486	0.0831	-0.2460
	B2	0.4565	-0.2113	-0.3081	0.2170	-0.0043	0.7778
	B3	0.4515	-0.249	-0.1652	0.6169	-0.0166	-0.5705
	B4	0.1882	0.7709	-0.4843	-0.0416	-0.3565	-0.0832
	B5	0.4012	0.4424	0.3148	0.0018	0.7376	0.0130
	B7	0.4505	0.0534	0.6786	-0.1009	-0.5671	0.0440
相関係数	B1	0.9084	-0.3648	-0.1345	-0.1512	0.0132	-0.0246
	B2	0.9550	-0.2438	-0.1432	0.0438	-0.0007	0.0778
	B3	0.9446	-0.2884	-0.0768	0.1246	-0.0026	-0.0571
	B4	0.6968	0.8893	-0.2251	-0.0084	-0.0565	-0.0083
	B5	0.8393	0.5104	0.1463	0.0004	0.1169	0.0013
	B7	0.9424	0.0616	0.3155	-0.0204	-0.0899	0.0044

(b) 1992年8月22日

TMバンド	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7	
データ個数	204,800	204,800	204,800	204,800	204,800	204,800	
平均	100.8	41.0	39.4	68.1	73.3	34.4	
S.D.	22.4	12.1	15.9	24.1	22.9	15.2	
相関係数	Band 1	1.0000	0.9645	0.9528	-0.1217	0.5369	0.8024
	Band 2		1.0000	0.9840	0.0100	0.6330	0.8331
	Band 3			1.0000	-0.0676	0.6031	0.8413
	Band 4				1.0000	0.6067	0.1191
	Band 5					1.0000	0.8206
	Band 7						1.0000
主成分	COMP1	COMP2	COMP3	COMP4	COMP5	COMP6	
固有値	4.2260	1.4241	0.2622	0.0466	0.0325	0.0087	
累積寄与率	0.7043	0.9417	0.9854	0.9931	0.9986	1.0000	
固有ベクトル	B1	0.4525	-0.2436	-0.2929	-0.7483	0.1661	-0.2500
	B2	0.4701	-0.1367	-0.3513	0.2022	-0.0287	0.7715
	B3	0.4658	-0.1890	-0.2147	0.6033	-0.0741	-0.5760
	B4	0.0633	0.8054	-0.4572	-0.0911	-0.3482	-0.0932
	B5	0.3823	0.4839	0.3533	0.0845	0.6982	0.0175
	B7	0.4550	0.0583	0.6410	-0.1406	-0.5978	0.0396
相関係数	B1	0.9303	-0.2907	-0.1500	-0.1615	0.0299	-0.0233
	B2	0.9664	-0.1631	-0.1799	0.0436	-0.0052	0.0718
	B3	0.9576	-0.2255	-0.1100	0.1302	-0.0133	-0.0536
	B4	0.1302	0.9612	-0.1241	-0.0197	-0.0627	-0.0087
	B5	0.7859	0.5775	0.1809	0.0182	0.1258	0.0016
	B7	0.9354	0.0695	0.3282	-0.0303	-0.1077	0.0037

V-3 Difference Index 法によるタイ・ユーカリ林の変化抽出

V-3-1 はじめに

現在、驚異的な成長率で経済発展が続いているタイは、一方では深刻な森林破壊に悩まされてもいる。1961年から1988年までの27年間に8,100万rai（1300万ha）もの森林が減少し、国土面積（513,000平方キロ）の28%まで落ち込んでしまった。タイ政府は1985年以来森林面積の回復（国土面積の40%にする）をめざして各種の施策を打ち出してきた。1989年の森林閉鎖令（全面的な森林商業伐採の禁止）はそのひとつの表れであるが、複雑な土地の所有形態や農民の入り込みなどさまざまな理由によって目標は達成されていないのが実状である。政府の構想のひとつに、民間資本を利用した緑化がある。王室林野局（RFD）の計画では、2,700万rai（430万ha）の経済林を企業や農民の手で造林を進めようとしている（田坂1992）。この経済林は木材や林産物の供給を目的としており、紙・パルプ・ファイバーボードの原料としてユーカリがその主な植林樹として挙げられた。

しかし、実際にどの程度のユーカリ造林が実行されたかについて、最近のデータをRFDでも把握していない。そこで、この研究では、ユーカリ造林地の変化をランドサットデータを用いたりモートセンシング技術によって、どの程度把握することができるかについて解析を行った。

V-3-2 グラントゥールースと分類

(1) テストサイトの概要

Amphur Pleang Yao（プレンヤオ地区）はタイ中央平原の南部のChangwad Chachoengsao（チャチェンサオ県）に属し、首都Bangkokから約90km西方、車で2時間のところにある（図V-3-1）。このamphurは面積237km²、人口41,000人（1984年）で、大部分が標高100m以下に存在しなだらかな地形を持ち、肥沃な地域となっている。1984年のMOAC（Ministry of Agriculture and Cooperatives of Thailand）の統計では、180km²の農地面積のうち、39%が稲作に、46%が畑地、16%が果樹・造林地となっている。この地域の主要な作物は米、キャッサバ、サトウキビ、ゴム、パイナップルと大豆であった。熱帯モンスーン地帯で、雨期は5～10月、冬は11～2月、夏が3～5月である。年平均降水量は1,162mmである（Makarabhirom 1994）。

1960年以前のこの地域は森林であったが、おもにキャッサバやサトウキビの契約栽培

のために森林の伐採が行われ、1977年にこの地域の土地が土地改良プロジェクトに組み込まれた後は開拓がいっそう進行した。しかし、最近ではキャッサバやサトウキビ、パイナップルのような換金作物を繰り返して栽培したために土地の生産性が減少し、そのため政府はこれらの作物に代わって、カシューやゴム、竹、ユーカリや果樹などの樹木の栽培を農民に助言している。

1992年にタイ政府は「他の農作物が育たない土地にユーカリ造林を奨励すること」という閣議決定を行った（海外農業開発協会1993）が、それ以前からユーカリを含む早生樹種の造林（農地への造林を含む）を奨励し実行していた。農民と製紙会社やパルプ会社との契約造林もかなり広い範囲で行われつつあり、また、換金作物の市況価格の変動の大きいことから最近では農民が自発的に農地にユーカリなどの造林を行う例も増えている。テストサイトを含む地域はタイの中でも初期にユーカリの商業的造林を行ったエリアである。タイで造林に用いられているユーカリは *Euaclyptus camaldulensis* が主である。*Eucalyptus deglupta* も一部で植えられているが、タイ人の印象では前者の方が在来の樹種の雰囲気になじみやすいことや、生育が早いこと、無施肥でも成長することなどがあり、*camaldulensis* が用いられている。

(2) グランドトゥルース

実際に変化抽出を行う地域は、(1)の amphur からランドサット TM サブシーン（D128-051-001、1988年2月20日および1991年1月27日撮影）の画像を使ってユーカリ造林地の多く含まれるエリアを512ピクセル×480ラインに限定して抽出した（図V-3-2）。なお、2時期のランドサットデータはあらかじめ画像同士の地理補正を行い重なり合うように処理を行った。サブシーン全体の地理補正を行うため、この作業はワークステーションを利用した。1ピクセルのサイズはほぼ正確に30m四方なので、対象地域は約15km×14km（約22,000ha）である。この部分の画像のカラーハードコピーを1:50,000の縮尺で作成し、地図と重ね合わせたものを現地調査へ持参した。

現地調査は、対象地域を含むやや広いエリアについて、1992年2月と10月に2回実行した。調査の際にはRFD（Royal Forest Department of Thailand：タイ王室林野局）の職員に同行してもらい、一部の地域では農民へのインタビューを行い、ユーカリ造林についての考えを調査した。それぞれの調査ポイントでは、GPSの単独測位機能を利用して地理座標の取得、写真撮影を行った。GPSのデータ取得は緯度経度で行ったが、地図並びの画像上での位置記録のためにUTM座標に変換した。グランドトゥルースを行った地点のリストおよび画像上の位置を表V-3-1および図V-3-3に示す。また、現地の様子を示す写真を図V-3-4に示す。

図V-3-2で読みとれるように、この地域の土地利用の単位は比較的大きく、またGPSでの測位も適切に行われたので、グランドトゥルースポイントは画像上で正確に把

握ることができた。そのため、ランドサット画像のグリッドを UTM のグリッドと重ね合わせる地理補正は行わなかった。

(3) ユーカリ

ユーカリはオーストラリアが原産国で、タイに早く 40 年ほど前に輸入された。タイの中で一番はじめにユーカリの植林を試験的に行ったのはタイ北部の Chiang Mai 北西部にある Doi Suthep-Pui 国立公園内で、ここには 30 年生以上のユーカリが生育している (図 V-3-5)。全国的に広がったのは最近 10 年のことである。上述のように、タイでは *Eucalyptus camaldulensis* が一般的で、これは葉が細長く明るい緑色で樹幹は白っぽい。

施業は、最初の植え付けのあと 2 カ月、4~6 カ月で下草刈りを行い、そのあとはほぼ年 1 回である。施肥は行わない。苗木は、地域の森林協同組合やパルプ (製紙) 会社が供給 (販売) している。パルプ会社がクローンによる苗木の生産を行い農民に販売している例があった。2m × 2m 間隔、1rai (0.16ha) あたり 400 本植栽する例が多く、植栽後 1 年間はとうもろこしなどの作物をユーカリの間に植えて (inter-cropping) いる例 (図 V-3-6) もある。約 4~5 年で樹高が 10 数 m、直径約 10cm となり伐採される。更新は萌芽によっておこなわれるが、4 回以上の萌芽更新は材の質が落ちる (図 V-3-7) ため行わず、根株を掘り起こさなくてはならない。現在そこまでの林は少ないので問題とはなっていないが、近い将来には掘り起こし費用の負担問題が起きてくると考えられる。農民へのインタビューの中では、ユーカリの造林地は以前はキャッサバやサトウキビの畑であったところが多い。これらの作物は市場価格の変動が激しくリスクが大きく、多くの労働力を必要とすることがユーカリに変えた主な理由であった。

タイでユーカリ造林が問題となったのは、ユーカリが土壌を劣化させたり、水分の消費が激しい、造林地周囲の池に毒性の物質を流すなどの指摘が、環境論者や環境保護団体からなされたことから始まった。大学や研究機関の研究報告ではそのようなことはない結論づけられているが、単一の樹種を大面積に植林した場合の危険性は残っている。また、ユーカリから発散される物質のため他の植物が入り込みにくく、(そのため除草などの手間がかからないのであるが) 生態系が単純なものとなり、鳥の声ひとつ聞こえない林になってしまっている。タイ東北地方では、政府のユーカリ植林が農地や 2 次林などに強制的に行われたことから、激しい反対運動が起きている (田坂 1992)。今回の対象地域では、農民と企業の契約栽培が主であるので、こういった問題は見られなかった。

(4) 画像分類

画像分類を行うために、ランドトゥールスの結果を参照しながら 1991 年のランドサットデータ上にトレーニングエリアを設定した。その中からこの地域の主な造林樹種であ

る *Eucalyptus camaldulensis*、*Eucalyptus deglupta*、ゴムおよびチーク、そしてその他の植生（小川兩岸の植生が主）について、各バンドでの平均 CCT 値を図 V-3-8 に示す。なお、*Eucalyptus camaldulensis* は密度により 2 種類に区分した。この図を見ると、ユーカリはバンド 5 での値が低いことによる特徴を持ち、他の植生と区別することができる。また、チークはバンド 5 が高く、ゴムはバンド 4 が高いことが特徴である。*Eucalyptus camaldulensis*(spars) は "dens" と "vegetation" とほぼ中間的な反射特性を持っている。これは下層植生や地面の反射が混合した結果であろう。チークについては 1 年のこの時期（乾期）は葉を減らし、雨期にくらべて葉の色がやや黄みがかって見えるので、その特徴が画像上にも表れていると考えられる。ゴムは雨期にくらべてそれほど目立った外観上の変化はなかった。

これらのトレーニングエリアを用いて、最尤法により画像の分類を行った。1991 年の画像は乾期の撮影なので、畑地の大部分は植生がなく、一部は枯れた雑草が焼かれて黒くなっている。そのため、ユーカリのような常緑樹の把握には都合がよい。というよりは、雨期の最中のデータは雲による被覆のためほとんど満足なデータを手に入れることができない。落葉樹の把握には不利な条件である。分類結果を図 V-3-9 に、トレーニングエリアの分類精度を表 V-3-2 に示す。

V-3-3 Difference Index 法による変化抽出

(1) Difference Index 法

これまでさまざまな手法がリモートセンシングデータの変化抽出のために考案されてきた。これらのうち主なものを図 V-3-10 に整理した。(a) は分類画像の比較を行う方法で、最もオーソドックスであるが、2 時期の分類精度が変化抽出に非常に影響を与えてしまう。変化抽出を主目的とする解析には、なるべく使用を避けた方がよいと考えられる。(b) は特徴量の変化を見る手法で、さまざまな植生指数が用いられることが多い。目的とする変化がどの指数に最もよく反映されているかを見極める必要がある。(c) は V-2 で使用した CVA である。(b) が 1 次元を 2 次元に拡張した手法であるともいえる。(d) は 2 時期の回帰を行い変化部分を解析する手法である。2 時期の季節をそろえて解析を行わないとフェノロジーによる変化が抽出されてしまう。このほかにも、2 時期のデータをまとめて分類したり、主成分分析を行うことも行われる。しかしいずれの手法も、画像全体の変化を解析するためのものなので、今回のように特定の土地利用だけの変化に注目したい場合には都合の悪いことがある。すなわち、(a) では変化前後の全ての分類項目についての確実な情報が必要であること、他の 3 者については変化として抽出された部分の判読がさらに必要なことである。このように、注目している土地利用以外の情報まで結果的には得ることになるのは、効率的ではないと考えられる。

ここで目的としているのは、1988年から1991年までの3年間に、対象地域でユーカリ造林地がどの程度増加しているかを知ることである。前述のように、1992年2月（ランドサット画像取得のほぼ1年後）に現地調査を行い、1991年時点でのおもな土地利用についてはほぼ把握できている。そこで、今回はユーカリのみの変化を抽出するために、新たな手法を適用した。

この手法は、基本的には各ピクセルの2時期のCCT値の差をとり、ある閾値以上の部分を変化部分とするものである。しかし、土地利用項目のCCT値の分散がそれぞれ異なるため、単純に差分をとるだけでは不十分である。そこで、上述の分類結果を用いて各ピクセルの属する分類項目の標準偏差で正規化することにより、変化の起きた可能性（Difference Index: DI）を表すことにした。ユークリッドの距離を用いた距離法で、DIは次の式で計算する。

$$\text{Difference index(DI)} = \frac{1}{s} \sqrt{\sum_{k=1}^{nband} \left(\frac{\text{CCT}(T_2)_{ijk} - \text{CCT}(T_1)_{ijk}}{\text{STDEV}_{m,k}} \right)^2}$$

ここで、 i ; ピクセル

j ; ライン

k ; バンド

s ; 定数

$nband$; バンド数

T_1 ; 時期 I データ

T_2 ; 時期 II データ

m ; $\text{CCT}(T_2)_{ij}$ の属するクラス

$\text{STDEV}_{m,k}$; クラス m バンド k の標準偏差

(2) DIの適用

表V-3-2の各クラスのバンド別標準偏差を表V-3-3に示す。プログラミングに用いたNes-BASICの制限から、計算に使用できるバンド数が5であったので、ダイナミックレンジの小さいTMバンド1と性質の異なるバンド6を除いたバンド2,3,4,5,7の5バンドでDIを計算することにした。また、計算結果は0~255にバイトデータ化し、画像で確認できるようにした。DI画像を図V-3-11に示す。

DIで重要なのは閾値の設定である。これについては画像を確認しながら試行錯誤で行うことにした。とりあえず、仮の閾値をDI=130としたときの画像を図V-3-12に示す。(a)は画像全体で変化のなかった部分 ($131 \leq \text{DI} \leq 255$ 部分をマスク)、(b)は変化のあった部分 ($0 \leq \text{DI} \leq 130$ をマスク)、(c)はユーカリおよびゴム (クラス1~5)

の変化のなかった部分、(d)はその変化した部分である。閾値を大きくすれば、変化ありと判定する基準が厳しくなるため変化部分は減り、反対に閾値を小さくすれば変化部分の面積は多くなる。DI=90 および DI=190 とした場合の変化部分の画像を図V-3-13 および図V-3-14 に示す。この2つの画像の最大の違いは中央部分の大きな裸地の有無である。この部分は Gateway City という新興工業団地で、92年の段階ではいぜん造成中で裸地と同様の部分である。この部分は88年の段階では画像からは畑地と推定される。図V-3-13ではこの部分が変化として抽出されているが、閾値を大きくとった図V-3-14では変化としては出ていない。これは、DIの閾値を変えたことにより、前者は同一クラス内での変化 (within-class change) を、後者はクラス間の変化 (inter-class change) を抽出したからであると考えることができる。DI=130の閾値をとった図V-3-12では、この部分が完全な形では変化として抽出されていないが、これは88年段階での土地利用が部分的に造林地などになっているからである。

DIの閾値を150、170、190に変えたときに、ユーカリおよびゴムの抽出ピクセル数の違いを表V-3-4に示した。91年の分類結果ではこの地域にユーカリ造林地面積は約2,500haであった。DI閾値を150、170、190と変えると、88年からの3年間の造林地の増加面積がそれぞれ約530ha、390ha、300haと変化する。ゴムは3年間の変化は見られない。閾値の決定には本来なら変化部分のグランドトゥルースをあらためて行わなくてはならないが、今回は現地調査での聞き取りと画像上での判断を行い、DI=170とすることにした。変化部分の画像を図V-3-15に示す。例えば、画像の左中にまとまった造林地があるが、これは現地調査の際に樹齢が3年(表V-3-1ポイント8)となっていた部分で、正しく抽出されている。

しかし、この手法は、現在(今回の場合は91年時点)での土地利用を基準としているために、現在の土地利用が過去(今回の場合は88年)と同一であるかを見ているに過ぎない。すなわち、現在の土地利用がユーカリの造林地でない部分が過去に造林地であっても、それを知ることができないということである。したがって、表V-3-4で示された増加面積は、この期間の地域全体の造林地の純粋な増加面積(純増面積)ではなく、この期間に造林された面積(新規面積)を示しているのである。(図V-3-16)

(3) DI法利用の得失

この手法では、2時期のデータのうち片方の土地利用分類をもとに、もう一方がどれくらい異なっているかを計算している。そのためどちらか一方の分類作業は必ず確実に行わなければならない。通常は今回の例のように、実際の土地利用のようすがよくわかっている新しい方のデータを基準として、過去の状況を判断することになる。これは対象物が増加していると考えられるときに適用できる。しかし反対に、過去のデータを基準とした場合は、減少している対象物について適用することが考えられる。例えば、森林破壊が続

いている場合、ある期間にどの程度の減少があったかを容易に把握することができる。(ただしその期間に新たに造成された部分は知ることができない(図V-3-17)。)

しかし、上述のように、最大の問題はDI閾値の設定で、この値の取り方で抽出面積が大きく変わってしまう。この点は他の変化抽出の手法と同様である。また、分類作業の精度が結果に影響するのは、1つの土地利用の変化を見ようとするときには、どのような手法を用いても避けられない。さらに、クラス毎の標準偏差を用いて正規化しているので、各クラスの分散をなるべく一定にする必要がある。

(4) まとめ

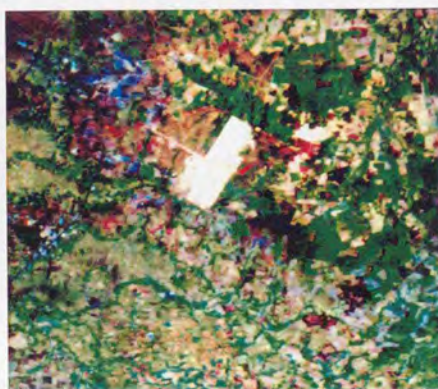
画像分類を行うとき、ランドサット画像取得の時点で伐採直後や更新後の期間が短い場合に、その部分は裸地または畑地や他の植生と分類されてしまう。上述のようにユーカリは更新期間が短く、どちらかというと樹木より農作物に近い周期で生育-伐採が繰り返されている。そのため、生育期間の長い樹種の人工造林地に対する分類と違って、ユーカリ造林地の面積が過小推定されている可能性は非常に高い。ここでは入手データの都合から、3年の期間がある2つのランドサット画像からユーカリ造林地の変化を推定したが、こういったサイクルの短い樹種を対象として精度を上げるためには、1年毎に解析を行うのが望ましい。



図V-3-1 テストサイトの位置



(a) 1988年2月20日撮影 Landsat TM



(b) 1991年1月27日撮影 Landsat TM

図V-3-2 解析に使用したランドサット画像

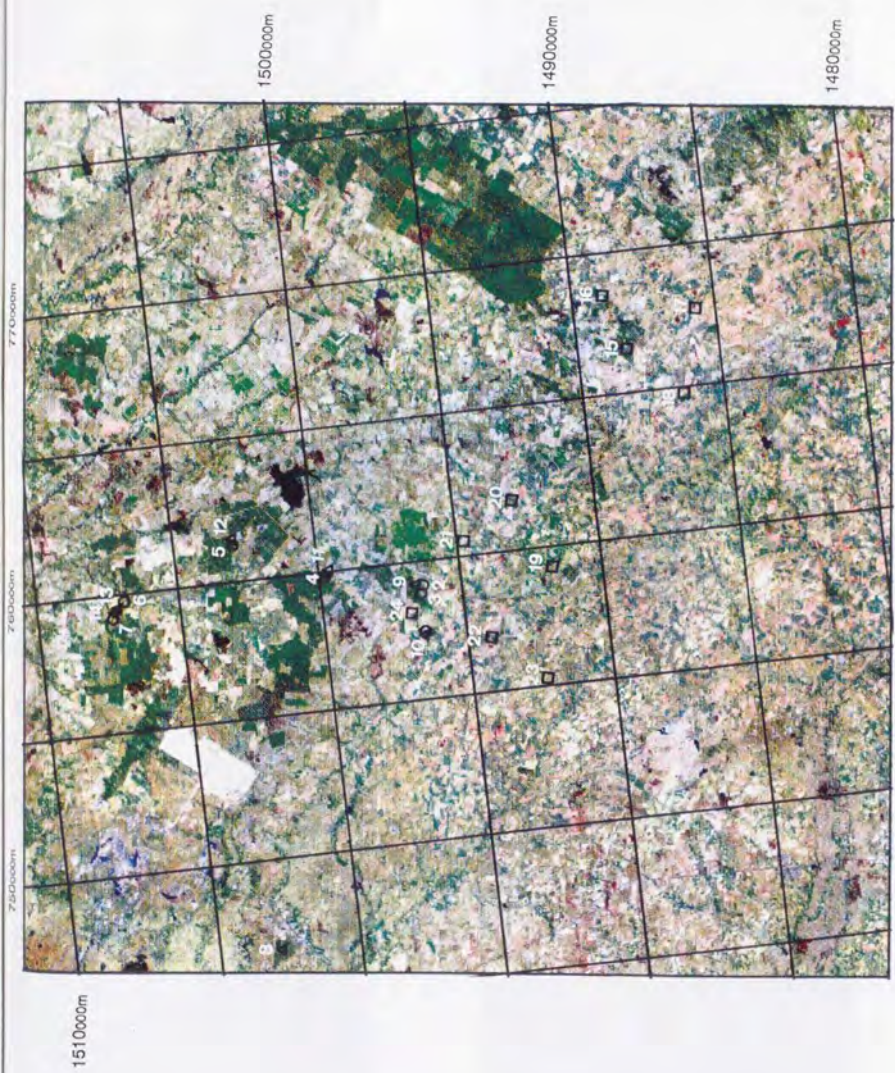


図 V - 3-3 GPS を利用したグラウンドトータルース地点



图 V -3-4(a) *Eucalyptus carmaltdulensis* (dense) 造林地
(point No.12)



图 V -3-4(b) *Eucalyptus carmaltdulensis* (sparse) 造林地
(point No.8)



图 V -3-4(c) *Eucalyptus deglupta* 造林地 (point No.4)



图 V -3-4(d) Teak 造林地 (point No.14)



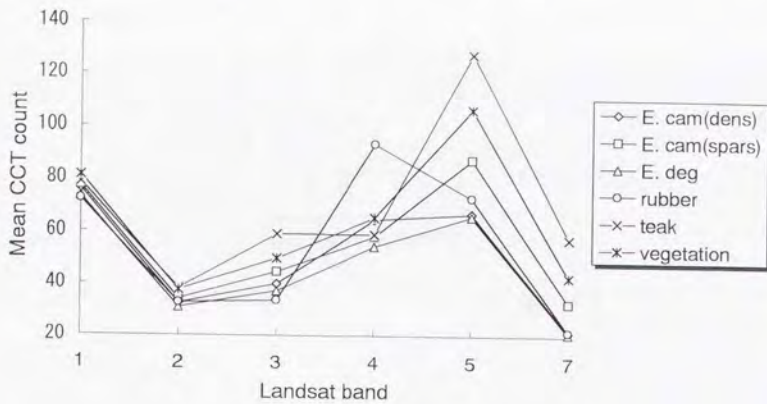
図V-3-5 Doi Suthep-Pui 国立公園事務所前の
30年生以上のユーカリ



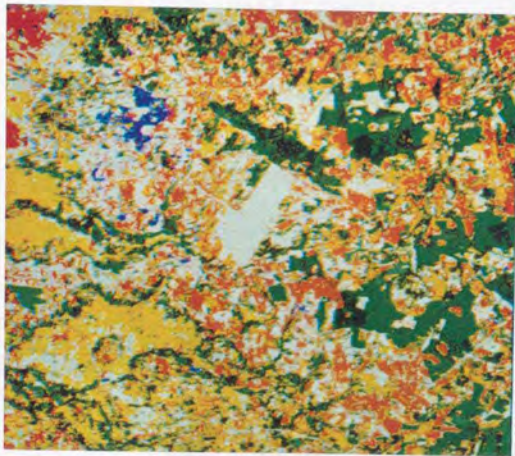
図V-3-7 4回目の傍芽更新後のユーカリの様子



図V-3-6 ユーカリととうもろこしの混植



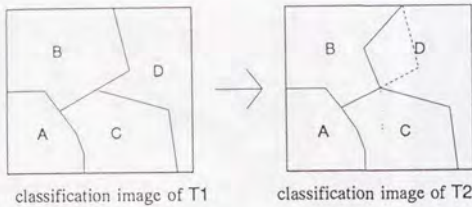
図V-3-8 代表的な植生のランドサット各バンドの平均値



Legend



図V-3-9 土地利用区分結果

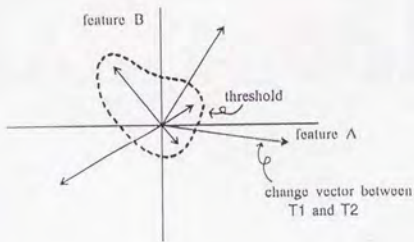


(a) 分類画像の比較

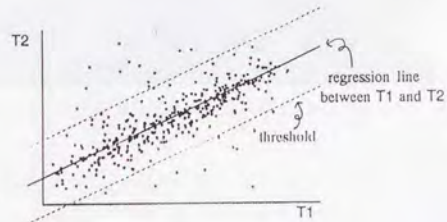
$$VI = \frac{IR \text{ reflectance} - R \text{ reflectance}}{IR \text{ reflectance} + R \text{ reflectance}}$$

$$\text{Change} = VI_{T2} - VI_{T1}$$

(b) 特徴量の計算 (VI など)



(c) CVA 法



(d) 回帰による変化抽出

図 V-3-10 変化抽出のさまざまな手法

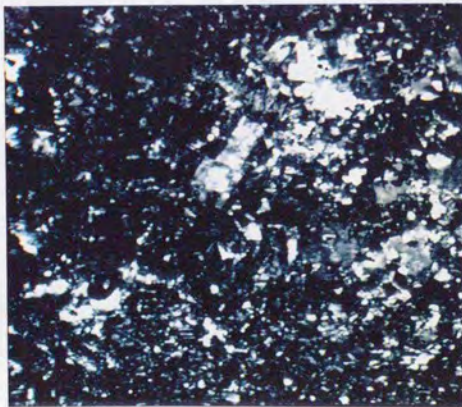
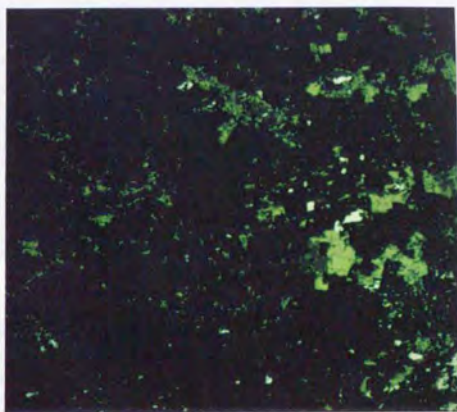


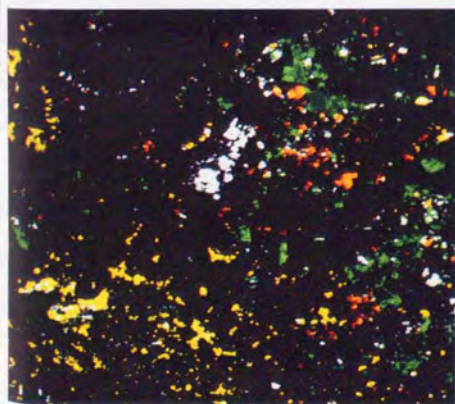
図 V-3-11 DI 画像



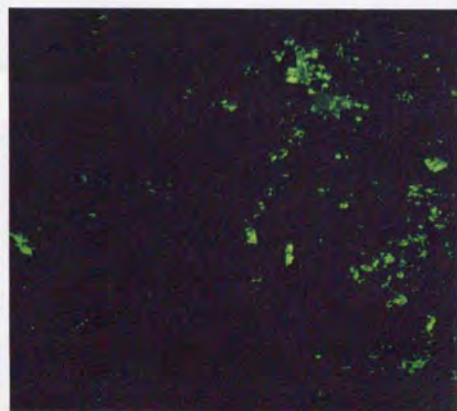
(a) 画像全体の無変化部分 ($0 \leq DI \leq 130$)



(b) クラス1～5のみ無変化部分 ($0 \leq DI \leq 130$)

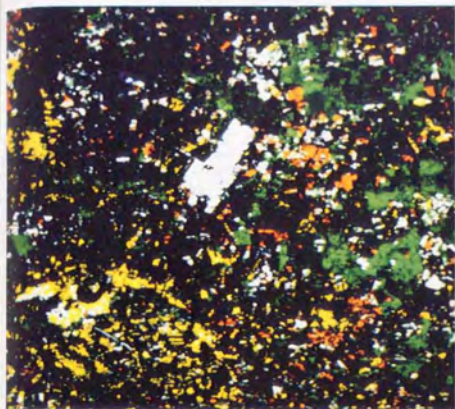


(c) 画像全体の变化部分 ($131 \leq DI \leq 255$)

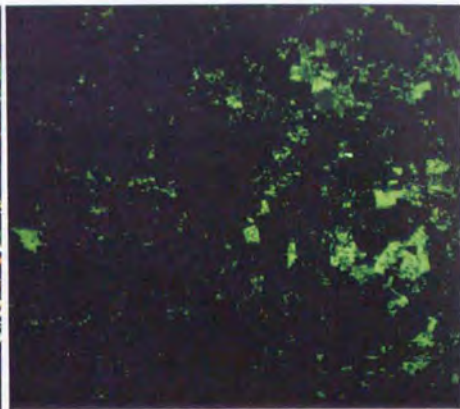


(d) クラス1～5のみ変化部分 ($131 \leq DI \leq 255$)

図V-3-12 DI閾値を130とした場合の抽出エリア画像

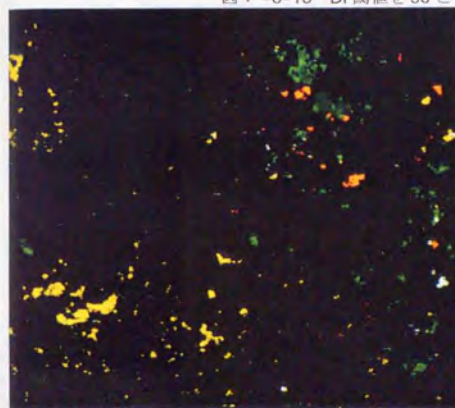


(a) 画像全体の変化部分 ($91 \leq DI \leq 255$)

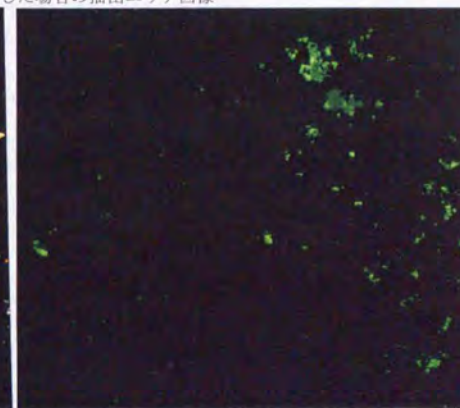


(b) クラス1～5のみ変化部分 ($91 \leq DI \leq 255$)

図V-3-13 DI閾値を90とした場合の抽出エリア画像

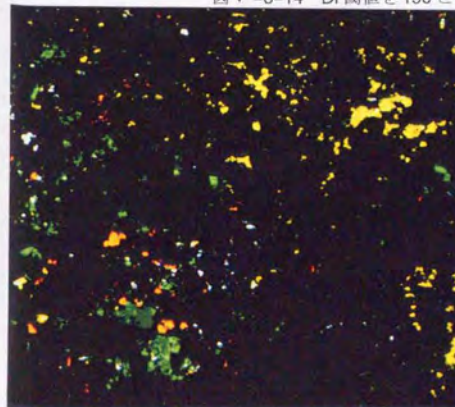


(a) 画像全体の変化部分 ($191 \leq DI \leq 255$)

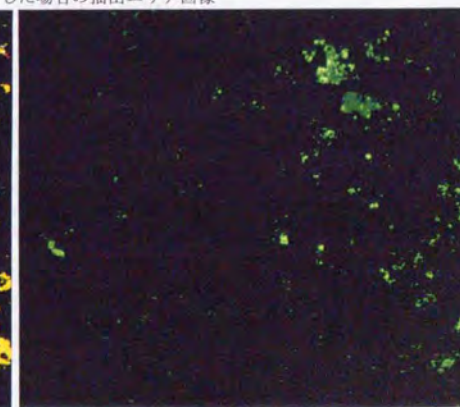


(b) クラス1～5のみ変化部分 ($191 \leq DI \leq 255$)

図V-3-14 DI閾値を190とした場合の抽出エリア画像



(a) 画像全体の変化部分 ($171 \leq DI \leq 255$)



(b) クラス1～5のみ変化部分 ($171 \leq DI \leq 255$)

図V-3-15 DI閾値を170とした変化抽出画像

表 V -3-1 GPS を使用した現地調査地点一覧

No.	調査日	Latitude N		UTM E		Remark
		Longitude E		UTM N		
1	Feb. 26, 1992	13° 31'30.6"	757585.43	E. cam (1 year)		
		101° 22'48.4"	1496320.74			
2	Feb. 26, 1992	13° 31'29.5"	759032.50	Rubber and E. cam		
		101° 23'36.5"	1496301.03			
3	Feb. 26, 1992	13° 31'31.1"	758707.18	E. cam		
		101° 23'25.7"	1496347.04			
4	Feb. 26, 1992	13° 33'25.1"	759951.07	E. cam and E.deg		
		101° 24'08.2"	1499864.02			
5	Feb. 26, 1992	13° 35'02.1"	761244.84	Cathorina and E. cam		
		101° 24'52.2"	1502858.96			
6	Feb. 26, 1992	13° 37'14.2"	759653.15	Teak		
		101° 24'00.6"	1506904.53			
7	Feb. 26, 1992	13° 37'31.6"	759082.64	Teak and E. cam		
		101° 23'41.8"	1507433.85			
8	Oct. 21, 1992	13° 34'59.8"	746923.28	E. cam (3 years)		
		101° 16'55.9"	1502650.31			
9	Oct. 21, 1992	13° 31'37.5"	759198.58	E.cam and rubber		
		101° 23'42.1"	1496548.60			
10	Oct. 21, 1992	13° 31'31.5"	757521.99	E. cam. (2 years)		
		101° 22'46.3"	1496347.79			
11	Oct. 21, 1992	13° 33'21.4"	760030.39	E. cam (2 years)		
		101° 24'10.8"	1499751.05			
12	Oct. 21, 1992	13° 35'02.7"	761256.69	Cathorina and E. cam		
		101° 24'52.6"	1502877.53			
13	Oct. 21, 1992	13° 37'24.7"	759400.42	Teak		
		101° 23'52.3"	1507224.85			
14	Oct. 21, 1992	13° 37'27.4"	759035.81	Teak		
		101° 23'40.2"	1507304.26			
15	Oct. 22, 1992	13° 27'02.6"	766736.81	Village No.2, E. cam (2 years)		
		101° 27'49.9"	1488171.58	Feb. 1992 harvested		
16	Oct. 22, 1992	13° 27'23.1"	768469.60	Village No.8, E. cam (8 month)		
		101° 28'47.7"	1488819.26	prev. E. cam		
17	Oct. 22, 1992	13° 25'44.9"	767777.79	Village No.9, E.cam (10 month)		
		101° 28'23.7"	1485793.11	prev. suger cane and cassava		
18	Oct. 22, 1992	13° 26'06.2"	764572.59	Village No.9, E. cam(clone, 3 month)		
		101° 26'37.4"	1486416.01	prev. suger cane		
19	Oct. 22, 1992	13° 29'00.7"	759287.73	Village No.1, E. cam		
		101° 23'43.5"	1491728.87			
20	Oct. 22, 1992	13° 29'38.0"	761779.39	Village No.5, E. cam (4 month)		
		101° 25'06.7"	1492900.05	prev. E. cam		
21	Oct. 23, 1992	13° 30'44.0"	760474.96	Village No.7, E. cam (2 ~ 3month)		
		101° 24'24.0"	1494916.32	prev. E. cam		
22	Oct. 23, 1992	13° 30'19.2"	756969.05	Village No.4, E.cam (2 years)		
		101° 22'27.2"	1494119.69			
23	Oct. 23, 1992	13° 29'20.1"	755256.91	Village No.6, E.cam (2 years)		
		101° 21'29.7"	1492286.27			
24	Oct. 23, 1992	13° 31'45.5"	757965.96	Village No.3, clear cut		
		101° 23'01.2"	1496782.52	prev. E. cam		

表V -3-3 クラス毎のバンド別標準偏差

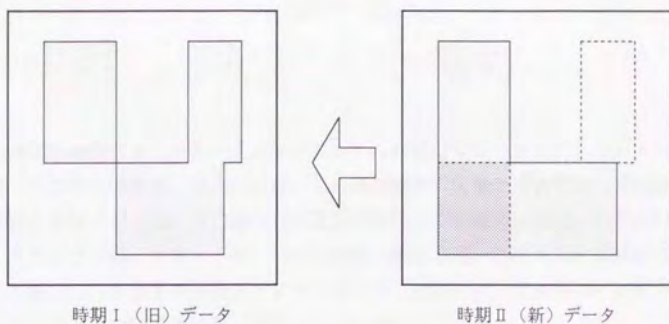
Class	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
1 euc_cam	2.290	1.213	6.627	5.995	60.031	15.352
2 euc_cam2	2.228	0.829	6.107	3.341	38.123	11.408
3 euc_deg	3.141	1.719	10.122	8.009	65.639	25.820
4 rubber	16.371	8.531	52.866	72.538	229.030	126.680
5 veg_euc1	1.822	0.963	4.092	3.653	26.924	7.190
6 road1	1.705	2.008	14.355	18.973	266.400	37.378
7 bare	38.984	21.436	89.574	50.691	238.987	149.635
8 bare_2	12.159	6.889	43.863	14.603	136.724	81.606
9 field	3.005	1.145	7.724	7.036	24.837	11.927
10 soil	2.763	1.492	5.813	14.001	67.818	18.864
11 soil_2	3.035	1.990	11.513	8.131	59.543	14.668
12 pond	63.945	1634.78	1692.97	1600.00	358.627	539.009
13 field_3	3.313	59.757	79.150	12.400	588.640	1073.578
14 pond_2	4.946	28.157	1600.00	377.977	774.938	604.208
15 pond_3	8.393	6.254	33.024	10.106	90.904	28.174
16 soil_3	15.803	5.814	31.396	24.220	135.882	128.347
17 soil_4	5.295	5.150	24.633	7.563	79.948	26.422
18 field_4	12.130	6.162	92.311	15.056	1049.52	796.982
19 road_2	2.265	4.515	39.694	6.083	68.787	24.569
20 soil_5	7.692	5.531	23.775	6.277	139.591	27.448
21 veg_river	5.629	4.872	23.979	16.629	206.704	166.179
22 soil_6	2.836	9.440	59.792	107.868	212.512	223.158

* bands 2,3,4,5,7 were used for DI calculation

表 V-3-4 DI 閾値の違いによる抽出ピクセル数の違い

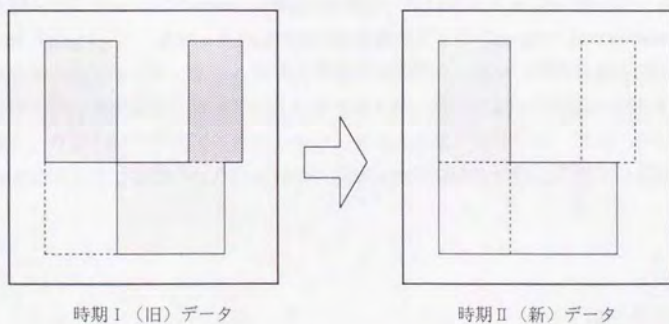
分類クラス	分類結果		151 ≤ DI ≤ 255		171 ≤ DI ≤ 255		191 ≤ DI ≤ 255	
	ピクセル数 (面積 ha)	画像に占める割合	ピクセル数 (面積 ha)	新植割合	ピクセル数 (面積 ha)	新植割合	ピクセル数 (面積 ha)	新植割合
1 euc_cam	8,886 (799.74)	3.62	1,237 (111.33)	13.92	888 (79.92)	9.99	644 (57.96)	7.24
2 euc_cam2	9,684 (871.56)	3.94	2,651 (238.59)	27.38	1,859 (167.31)	19.20	1,296 (116.64)	13.38
3 euc_deg	5,647 (508.23)	2.30	441 (39.69)	7.81	261 (23.49)	4.62	146 (13.14)	2.58
5 veg_euc1	3,776 (339.84)	1.54	1,581 (142.29)	41.87	1,349 (121.41)	35.73	1,211 (108.99)	32.07
小計	27,993 (2,519.37)	11.39	5,910 (531.90)	21.11	4,357 (392.13)	15.56	3,297 (296.73)	11.78
4 rubber	5,892 (530.28)	2.40	1 (0.09)	0.00	0 (0)	0	0 (0)	0
合計	33,885 (3,049.65)	13.79	5,911 (531.99)	17.44	4,357 (392.13)	12.86	3,297 (296.73)	9.73

*: 画像全体の面積 = 245,760 ピクセル = 22,118 ha



網掛け部分が注目している土地利用（ここではユーカリ造林地）。2 時期の間にこのような変化があったとすると、時期Ⅱを基準としたDI法で把握できるのは網掛けの部分である。つまり、この期間に新たにユーカリ造林地となった部分のみを抽出し、現在ユーカリ造林地ではない部分は過去にそうであったとしても抽出されないので、純増面積ではなく新規面積の把握となる。

図 V -3-16 DI法による抽出内容の概念（1）



時期Ⅰを基準としたときにDI法で把握できる部分は網掛けの部分である。左下の増加部分は抽出することはできない。

図 V -3-17 DI法による抽出内容の概念（2）

謝 辞

この論文を作成するにあたって数多くの方々にお世話になりました。東京大学農学部林学科 南雲秀次郎教授、東京大学農学部附属演習林 箕輪光博教授には常に暖かいご指導と励ましを頂きました。お二方のご助言がなければこの論文は完成することはなかったと思います。さらに、リモートセンシング研究へ筆者を導いて下さった森林総合研究所 大貫仁人博士、さまざまな実践上のアドバイスやご指導を頂いた森林総合研究所林業経営部 沢田治雄博士には言葉に尽くせないほどの感謝を捧げます。

森林総合研究所林業経営部 栗屋善雄主任研究員には FREDAM 開発に関してさまざまなご協力を頂きました。東京大学北海道演習林 山本博一林長、高田功一技官、犬飼 浩技官ならびに職員の方々には北海道演習林での GPS 調査において常に多大な協力を頂きました。また、GPS 受信機材などではマゼランシステムズジャパン社の岸本信弘社長にお世話になりました。衛星画像マップの作成には東京大学農学部附属演習林 斎藤 薫講師および東京大学秋父演習林の方々にデータの提供を頂きました。都市近郊林の変化抽出に関しては鳥取大学農学部 魚住侑司教授ならびに都市近郊林研究会の皆様にご助言を頂きました。タイ・ユーカーリンの変化抽出に関しては、全くのタイ初心者だった筆者をご指導下さったタイ王室林野局 Pearmsak Makarabhirom 氏、現地調査に際してさまざまな便宜を図って下さった同 Komon Pragtong 博士、そしてスタッフの Chairat Chujun 氏、Chatchai Tangsap 氏、Adisorn Noochdumrong 氏ならびに Teunchai Lahhaviwattanukul 女士にお世話になりました。また、東京大学農学部林学科 永田 信助教授にはこの研究を含めたプロジェクト研究に筆者を加えて頂きました。ここに記して感謝いたします。

最後に、たびたびの不在でご迷惑をかけた東京大学農学部林学科 龍原 哲助手および現地調査に関してご協力いただいた同森林経理学研究室所属の院生の方々に感謝いたします。

1994 年 11 月 16 日

露木 聡



引用文献

American Society of Photogrammetry (1983) Manual of Remote Sensing. American Society of Photogrammetry. Virginia, U.S.A. : 2440pp.

AUGUST, P., MICHAUD, J., LABASH, C., SMITH, C. (1994) GPS for Enviromental Applications: Accuracy and Precision of Locational Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing **60** : 41 ~ 45.

東 敏生・寺田公治 (1985) マイコンシステムを用いたランドサットデータの林業的利用開発 (1). 広島県林誌研報 **20** : 25 ~ 49.

CARPER, W.J., LILLESAND, T.M. and KIEFER, R.W. (1990) The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multi-spectral image data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **56** : 459 ~ 467.

CHAVEZ, P.S.Jr., SIDES, S.C. and ANDERSON, J.A. (1991) Comparison of three different methods to merge multiresolution ans multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **57** : 295 ~ 303.

Civco, D.Daniel (1989) Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **55** : 1303 ~ 1309.

COLBY, D.Jeffery (1991) Topographic normalization in rugged terrain. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **57** : 531 ~ 537.

COLWELL, John (1981) Forest change detection. Proceedings of 15th Symposium of Remote Sensing and Environment, ERIM, Ann Arbor, Michigan : 839 ~ 852.

データ処理技術研究会 (1986) パーソナルコンピュータを利用したリモートセンシングデータの画像処理/解析技術の現状. 日本リモートセンシング学会誌 **6** : 411 ~ 438.

FAO (1993) Forest resources assessment 1990 Tropical countriesq. FAO Forestry

Paper 113.

FOLEY, J.D. and DAM, A.V. (今宮淳美訳) (1984) コンピュータ・グラフィックス. 日本コンピュータ協会, 東京: 620 ~ 627.

後藤純一・前川国利・南方清克・松井信行・山本 誠 (1989) 森林空間での GPS 情報の利用技術に関する研究 (II) - 現状の測位精度について -. 日林論 100 : 761 ~ 764.

海外農業開発協会 (1993) タイ国チップ原料用造林事業調査報告書. 48pp.

夏期講習実施委員会 (1987) パーソナルコンピュータによるリモートセンシングデータ解析講習会の記録. 日本リモートセンシング学会誌 7 : 261 ~ 297.

加藤正人 (1987) 人工衛星ノア・ランドサット解析デモンストレーション. J. PC-Forestry 5 : 161 ~ 164.

柏木研究所 (1986) nexus6000 本体取扱説明書 (システム編) REV.01.

川村竜哉 (1992) 人工衛星リモートセンシング技術の森林機能評価への利用. 平成4年度東京農工大学農学部卒業論文: 107pp.

京都府公害対策技術者会議 (1990) 京都府公害対策技術者会議研究調査報告書=リモートセンシング部会=: 168pp.

前川国利・牧野慎吾・山本 誠・後藤純一 (1990) 森林空間での GPS 情報の利用技術に関する研究 (IV) - 移動体における3次元測位精度について -. 日林論 101 : 739 ~ 742.

前川国利・真木賢二・斎藤一郎・後藤純一・山本 誠 (1991) 森林空間での GPS 情報の利用技術に関する研究 (V) - リアルタイム処理によるディファレンシャル GPS の測位精度 -. 日林論 102 : 743 ~ 744.

Magellan Systems Corporation (1993) Magellan GPS NAV 5000 PRO USER GUIDE.

Makarabhirom, Pearmsak (1994) Forest Utilization Patterns: Case of Contract Tree

Farming in Thailand. Final report of "Study on Forest Utilization Patterns in Southeast Asia: Changes in the Course of Socio-economic Development" : 100-142.

Michalek, J.L., Wagner, T.W., Luczkovich, J.J., Stoffle, R.W. (1993) Multispectral change vector analysis for monitoring coastal marine environments. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 59(3) : 381 ~ 384.

水町守志 (1993) GPS 導入ガイド. 日刊工業新聞社, 東京 : 192pp.

内藤健司 (1986a) 日光戦場ヶ原周辺の環境変化. 文部省科学研究費補助金一般研究 (C) 研究報告.

内藤健司 (1986b) ランドサット MSS データ解析プログラム (1~4). J. PC-Forestry 4 : 57 ~ 91.

日本リモートセンシング学会出版委員会 (1989) パソコンによるリモートセンシングデータ解析. 啓学出版, 東京 : 291pp.

日本測地協会 (1989) 新訂版 GPS - 人工衛星による精密測位システム -. (社) 日本測量協会, 東京 : 272pp.

野上道男・近藤昭彦 (1990) 東京都立大学におけるパソコンを用いた 2,3 のリモートセンシングデータ解析例の紹介. 日本リモートセンシング学会誌 10 : 101 ~ 106.

大貫仁人 (1981) LANDSAT データの地形条件の差による電磁的歪の補正法とその効果. 92 回日林論 : 147 ~ 148.

沢田治雄・大貫仁人 (1980) 林試画像解析装置 FIAS. 森林航測 128 : 16 ~ 19.

沢田治雄・露木 聡 (1985) デジタル処理による流域環境の把握 (II) CVA による森林のモニタリング. 95 回日林論 : 135 ~ 136.

妹尾俊夫・小林藤雄 (1990) パソコンによる森林植生解析. 日本リモートセンシング学会誌 10 : 77 ~ 85.

SENOO, Toshio (1994) A Monitoring System for Forest Management using Multi-Temporal Remote Sensing Data. 京都府大演習林報 38 : 77 ~ 87.

瀬戸孝夫・谷浦憲治 (1992) キネマティック GPS テスト結果. APA 53-5 : 39 ~ 46.

瀬戸島政博・赤松幸生 (1989) 画像データをベースとするパソコン用環境情報解析システム. APA 42-10 : 52 ~ 59.

鈴木勇二・内藤健司 (1984) ランドサット MSS データ画像処理プログラム. J. PC-Forestry 2 : 141 ~ 145.

鈴木勇二 (1985) ランドサットデータの輝度分布-機械語サブルーチンによる処理の高速化. J. PC-Forestry 3 : 77 ~ 81.

鈴木勇二・阿久津浩幸 (1988) パーソナルコンピュータによるランドサット画像解析システム. 宇大演報 24 : 9 ~ 22.

高木幹雄他監修 (1991) 画像解析ハンドブック. 東京大学出版会, 東京 : pp.775.

TAKAHATA, Shigeru (1987) Report for the tropical rain forest research project, Research area 1: Landuse classification and planning : 21pp.

高畑 滋 (1987) 熱帯降雨林研究センター (インドネシア) でのリモートセンシング研究. 写真測量とリモートセンシング 26(4) : 44 ~ 47.

TAKAHATA, Shigeru, STUMIANG Risman (1988) Introduction of the Remote Sensing System in the Tropical Forest Research Institute, Indonesia. The 16th Congress of ISPRS, Kyoto, Japan, 1988 : 589 ~ 598.

田坂敏雄 (1992) ユーカリ・ビジネス タイ森林破壊と日本. 新日本出版社, 東京 : 213pp.

寺田公治 (1989) 広島県立林業試験場 パソコンシステムを用いたランドサットデータの林業面への利用開発. 日本リモートセンシング学会誌 9 : 102 ~ 113.

東京大学農学部附属演習林 (1992) 秩父演習林自然環境調査報告書 (平成3年度) : 297pp.

友田良文・鈴木弘道・土屋 淳 (1985) 地球観測ハンドブック. 東京大学出版会, 東京 : 830pp.

TREITZ, P., ELLIOT, L., HOWARTH, P. (1993) Differential Global Positioning System: potential for geographical information system database management. Environment and Planning A 25 : 883 ~ 898.

坪根治広 (1991) パソコンによる人工衛星データの画像処理. 森北出版, 東京 : 129pp.

土屋 淳・辻 宏道 (1991) やさしいGPS測量. (社)日本測量協会, 東京 : 376pp.

露木 聡 (1984) LANDSAT-MSS データを利用した崩壊危険度評価システムに関する研究. 東京大学卒業論文.

露木 聡・沢田治雄・大貫仁人・栗屋善雄 (1986) パソコンによるリモートセンシングデータ処理システム - FREDAM -. 日本リモートセンシング学会第6回学術講演会論文集 : 41 ~ 44.

露木 聡 (1986) パソコンによるリモートセンシングデータ処理システム - FREDAM -. J. of PC-Forestry 4 : 172 ~ 182.

露木 聡 (1987) 日本語 MS-DOS ver.2.11 英語バージョンを作ろう!. J. of PC-Forestry 5 : 191 ~ 196.

露木 聡 (1988) パーソナルコンピュータによるリモートセンシングデータ処理システム - FREDAM -. 林統研誌 13 : 36 ~ 48.

Tsuyuki, Satoshi (1989) A Short Term Expert Report on Remote Sensing. JICA Tropical Rain Forest Research Project JTA 9(a)-137 : 22pp.

露木 聡 (1992) 緯経度・UTM・17座標系変換プログラム "PROJ_TRN" 覚え書き. J. PC-For. 10 : 56 ~ 72.

露木 聡・増田義昭・小谷英司・山本博一・高田功一（1993）リモートセンシングによる森林資源調査における GPS の有効性－単独測位結果を使ったトレーニングエリアの抽出－. 日林論 104 : 271 ~ 274.

露木 聡（1994a）座標系変換プログラム "PROJ_TRN" その後. J. PC-For. 12 : 31 ~ 41.

露木 聡（1994b）森林資源調査における GPS 利用の可能性－ディファレンシャル GPS 測位精度の比較－. 森林計画学会誌 23 : 45 ~ 58.

上平 浩・山田 勝・村石公典・織田和夫（1992）GPS 測位・測量における樹木や鉄塔の影響の定量的調査研究. APA 52-6 : 40 ~ 49.

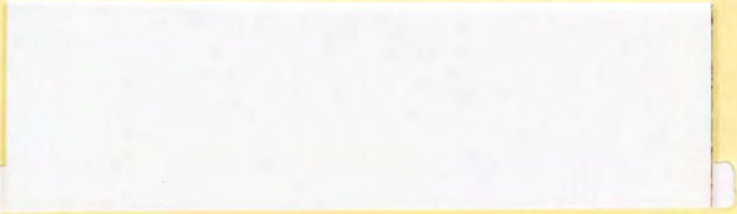
宇宙開発事業団（1993）宇宙からの地球観測シナリオ SCOPE. 18pp.

宇宙開発事業団・地球観測センター編集（1989）地球観測データ利用ハンドブック－SPOT編－.（財）リモートセンシング技術センター：1-2-8 ~ 1-2-10.

WELCH, R. and EHLERS, M.（1987）Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 53 : 301 ~ 303.

山本 誠・後藤純一・松井信行・南方清克・前川国利（1989）森林空間での GPS 情報の利用技術に関する研究（Ⅰ）－GPS の概要と利用可能性の検討－. 日林論 100 : 757 ~ 760.

山本 誠・後藤純一・前川国利・牧野慎吾（1990）森林空間での GPS 情報の利用技術に関する研究（Ⅲ）－測位値の再現性に関する検討－. 日林論 101 : 735 ~ 738.



付 図

東京大学農学



学農学部附属演習林秩父演習林



秩父演習林





この画像マップは、1992年4月23日に撮影されたLandsat・TM画像(解像度30m、Band 3:赤、Band 5:緑、Band 1:青)と、1991年4月4日に撮影されたSPOT・HRV-P画像(解像度10m)を地形データを使って輝度補正し、RGB-HSV変換によって重ね合わせたものです。



13: 赤、Band 5: 緑、Band 1: 青)
て輝度補正し、RGB-HSV変換に

0 1:50,000 2000m

製作
協力

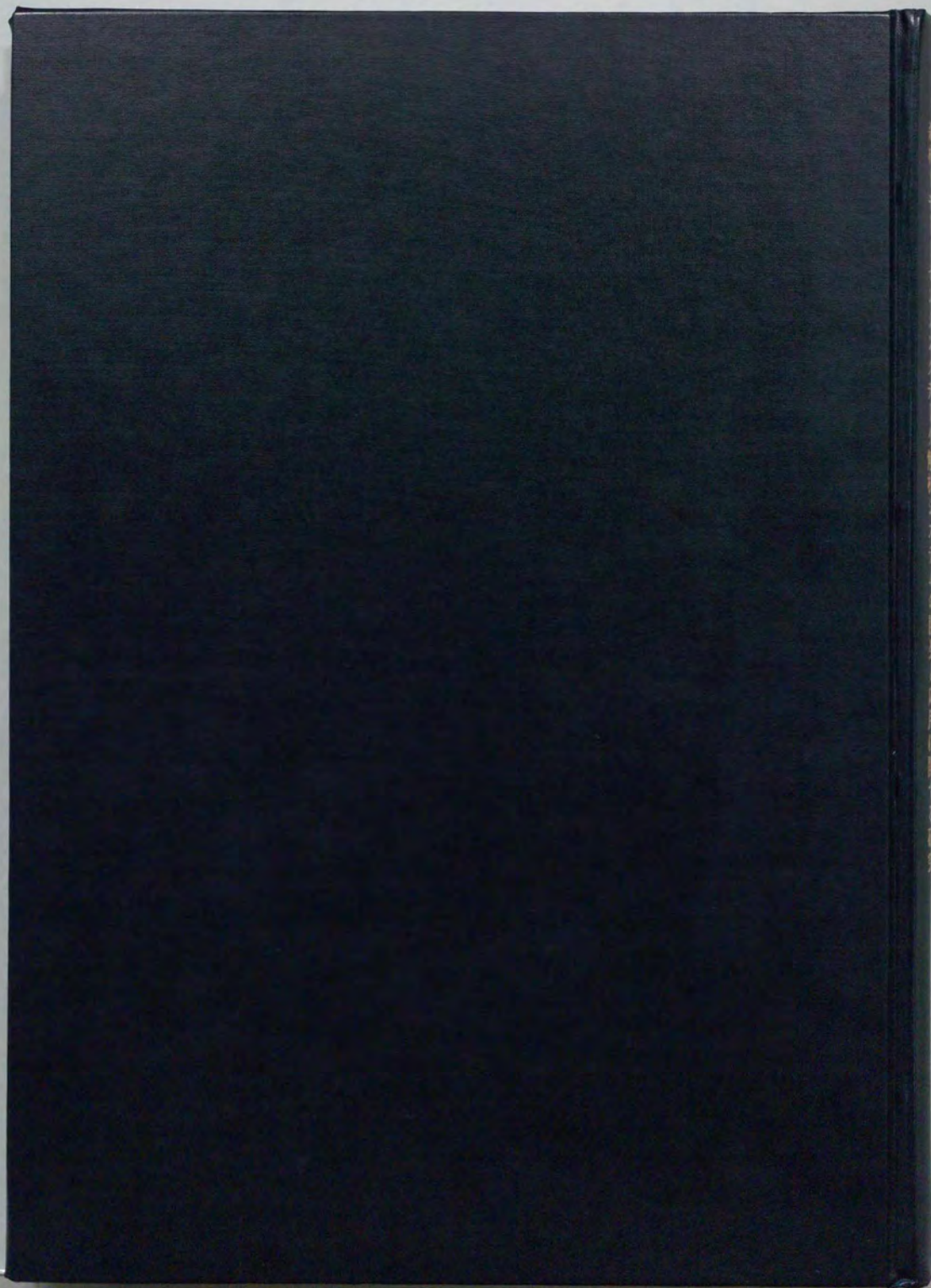


製作 東京大学農学部林学科森林経理学研究室

協力 東京大学農学部附属演習林

©CNES, 1991- SPOT®

印刷 西東京印書館



inches 1 2 3 4 5 6 7 8 9
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



© Kodak, 2007 TM, Kodak