

論文の内容の要旨

論文題目 パーソナルコンピュータをベースとした
森林リモートセンシングデータ解析システムの
開発と応用に関する研究

氏 名 露 木 聡

本論文は、パーソナルコンピュータをベースとしたリモートセンシングデータ解析システムの開発と、そのシステムを応用してリモートセンシング技術を森林に対していかに使いやすくするかについて研究を行ったもので、以下の5章から成る。

第1章では本研究の背景と目的について述べた。

グローバルな目を持つ衛星リモートセンシングは、現在地球規模での環境モニタリングにとって唯一の、最も有効な手段である。しかし、リモートセンシングが有用なのは大規模なスケールのモニタリングに対してのみではない。たとえば、地域レベルでの森林について考えた場合、これまでは、森林の分布や変化を知るためには、国家や公共機関などが公表したものをデータソースとするしかなかった。ところがリモートセンシング技術を利用することにより、ありのままの姿を、いつでも、知りたい人が知りたい時に、知ることが可能となったのである。しかし、この技術を誰でもが利用できるようにならなくては、真の意味で「使える」ことにはならない。そこで本研究では、パーソナルコンピュータをベースとした解析システムの開発と、そのシステムを応用して、リモートセンシングを「使える」形でわかりやすくインタープリテーションする手法についての検討を行った。

第2章ではパーソナルコンピュータをベースとした森林リモートセンシング

データ処理システム FREDAM の開発について述べた。

日本においてパソコンを使ったリモートセンシングデータ解析が本格的に始まったのは、1984年にフロッピーディスクによるランドサットデータの配布が行われてからといってよいが、システムの多くはパソコン（と画像メモリ）を利用したものであった。しかし、限られた CPU 能力とグラフィック機能しかないパソコンでは、フルカラーでの画像操作に限界があり、実用的に使用するには問題が多かった。そこで、本研究ではパソコンをベースとし、さらに専用のイメージプロセッサを利用してフルカラー画像表示や高速演算を行うことにより、実用に耐えるシステムを開発した。

現在では高性能パソコンやワークステーションのウィンドウシステムの普及により高機能のデータ解析ソフトが数多く販売されているが、そういったシステムでは与えられた機能の範囲内での解析が主体となる。FREDAM では画像データそのものへのアクセシビリティを高くし、新たなアルゴリズムの開発や実験的な処理が簡単に行えるようにした。そのためファイル構造をなるべく単純にしているため、上記システムなどと補完的利用が行いやすくなっている。

第Ⅲ章では GPS を森林地域で使用した場合の精度の検討を行い、GPS を利用したグラントゥールズについて述べた。

衛星リモートセンシングを利用して森林資源調査を行う場合、現地調査は不可欠であるが、調査ポイントを衛星データ上に正確に乗せることは、特に森林内では非常に難しい。そこで、衛星からの電波を受け測位を行う GPS (Global Positioning System) がどの程度森林内で精度を持ち、上記の目的に利用することができるかについて明らかにした。GPS を利用した測位には、受信機単体で行う単独測位と、2台以上を組み合わせる相対測位がある。手法によって期待できる精度や、制限要因が異なるので、まず、手法による違いについて検討を行った。そして、その結果を利用して実際にリモートセンシングデータからグラントゥールズ地点のデータ抽出を行い、森林内での GPS 利用の可能性を調べた。テストエリアとしては、比較的地形がなだらかで、地形による受信障害の少ないと考えられる東京大学農学部附属北海道演習林を利用した。

単独測位法による測位は、2種類の受信機を利用し、樹木の影響を見るために夏季と冬季に同じ地点で行った。その結果、樹木の葉は特に密な場合を除いて受信に影響はないが幹や枝は受信障害を引き起こすこと、受信機による差が見られ、精度のよい受信機では 15～35m の誤差で安定した測位が可能であることがわかった。相対測位法による測位は、4種類の手法について検討を行った。中でも最も精度の良い干渉測位法では、標高を含めた 3 次元で 1m 以下の誤差で測位可能であったが、そのためには、GPS の準拠している WGS-84 測

地系と日本の公共座標系の準拠している東京測地系の変換を行う必要があった。しかし、上記程度の精度の場合は準拠標高の違い（楕円体高とジオイド高）については考慮せずに、ジオイド高のまま計算を行っても支障がないことがわかった。この手法では衛星電波受信のため測位ポイントの周囲が広く開けている必要があり、鬱閉した林内では実行不可能であるので、精密な測量を林内で行うためには、従来測量法との組み合わせが最も実現性の高い手法であると結論した。その他の手法では5m以上の誤差となるが、ギャップのある林内では実行可能であるため、目的に応じて手法を選択する必要がある。ただ、その際には2地点での使用衛星の一致が必須であることが確認された。

単独測位の誤差は現在利用されている衛星データの解像度とほぼ一致することがわかったので、その測位結果を Landsat TM データ上でのトレーニングエリア抽出に用いたところ、被害林分と健全林分の差を反射輝度上で識別することが可能であった。このように GPS の測位誤差を明らかにしておくことにより、目的に応じた測位法の選択を適切に行うことができるようになった。

第IV章では SPOT および Landsat データを使った高解像度カラー衛星画像マップの作成手法について検討し、マップの試作を行った。

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、必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。これは当然といえば当然であって、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。本研究では、Landsat TM と SPOT HRV-P 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 は解像度 30m で可視から近赤外まで6つのバンド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アピールするためには最適な組み合わせである。解像度の異なるデータの合成に RGB-HSV 変換を利用した手法を開発し、さらに

起伏の激しく影の多い画像の補正にDTM（デジタル地形モデル）を利用した斜面輝度補正を応用した手法を開発し、最終的に10m解像度の白黒データの情報をカラー画像に持たせた画像マップを作成した。

本研究では、アルゴリズム開発が容易なFREDAMの特徴を生かし、まず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FREDAMとWSシステムで処理する補完的利用法で画像マップデータの作成を行った。

第Ⅴ章ではFREDAMの機能を利用した2つの変化抽出の実例について述べた。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法により解析したものである。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は把握できないものである。前述のようにこのような解析は、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いくのが理想である。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、使いやすいシステムとして開発した。

CVA法は変化のタイプと強度を変化ベクトルで表すことにより変化抽出を行う手法である。2時期のLandsat TMの第1・第2主成分を特徴量として採用し、変化の有無を判別する閾値や変化のタイプを決定する角度範囲を、従来のLandsat MSSでの解析結果を参考に決定した既定値を利用することにより、植生被覆の消失部分と回復部分を、画像判読と同程度に、自動抽出することが可能となった。抽出過程はほとんどルーチン化された作業であるので、解析者の経験や判断を必要としないのがこの手法の特徴である。

タイにおいては、現在ユーカリ造林がよくも悪くも社会的関心を引いているが、実際にどの程度造林が行われているかについては正確な資料は存在しない。そこで、本研究では新たに提案するDifference Index (DI)法により、タイ中央平原の一部(22,000ha)をテストサイトとして、Landsat TMデータを利用して3年間のユーカリ造林地の面積変化を求めた。現地調査にはGPSを利用し、さらに聞き取り調査などの結果をもとにDI法の閾値を定め、この期間に新たに390haのユーカリ造林地が増加したと推察された。しかし、ユーカリは植栽から伐採までが4~5年と短く、林木より農作物に近い周期で施業が行われているので、上の結果は過小推定である可能性が非常に高い。

以上のように本論文は、新たに開発したパソコンベースのリモートセンシングデータ処理システムFREDAMの有効性を示し、さらにリモートセンシング技術の利用が広く一般的に行われることを目的とした技術開発とその実践の重要性を示したものである。

FREDAM CVAによる変化抽出デモ "CVADEMO" 解説画面

1枚目 はじめに

CVAによる都市近郊林の変化抽出
大都市近郊の森林は、さまざまな開発圧力により、常に消失の危険性にさらされています。こうした貴重なみどりを保全してゆくことは、たとえば、都市環境の維持という点から考えても、野生鳥獣の生息域の確保という点から考えても、非常に重要なことであるといえます。

都市近郊林は本当になくなりつつあるのでしょうか？もしなくなっているとすれば、この森林がどのようになくなっているのでしょうか？このような疑問に答えるために最も役立つのがリモートセンシング技術です。この技術を利用すれば、土地利用変化のモニタリングや変化抽出を容易に行うことが可能です。横浜市周辺の人工衛星画像データを使って、都市近郊林の変化抽出を行ってみましょう。

3枚目 画像の比較

この2時期の画像を並べて比較してみましょう。まず対象地域の左半分を見てみましょう。左側が1984年、右側が1992年のものです。一見したところ目立って大きな変化は見られないようです。しかしよく見てみると、このあたりのみどりが減っているように思えます。では、対象地域の右半分を見てみましょう。池子の森の中に大きな空き地ができています。金沢市民の森の中にも何やら道路のようなものができてみどりがなくなっています。これ以外にもいくつか変化を見ることが出来ます。海のほうを見てみると、どうやら埋め立て地が完成したようです。これは八景島シーパラダイスです。

2枚目 使用データの説明

使用した画像は、2つのランドサットTMデータで、1984年8月16日と1992年8月22日に撮影されたものです。まずこれが新しいほうのデータで、1992年のものです。対象地域は横浜市南部と鎌倉市、逗子市の一部を含む範囲です。TMデータは1画素およそ30m四方の大きさを持ち、画像の大きさが500×400画素なので、実際の広さは15km×12kmとなります。これが1984年に撮影された同じ地域の画像です。画面中央下が米軍池子弾薬庫跡で、その北側に鎌倉霊園周辺、横浜自然観察の森、市民の森と森林地帯が続いているのがわかります。また、鎌倉由比ヶ浜のまわりの山にもみどりが残されていることが見て取れます。

4枚目 CVAの必要性

このように、画像を読み取りながらその内容を同定することを「判読」といいますが、これでは見落としが生じてしまいます。そこで、画像データを直接コンピュータで処理して変化部分を取り出す作業が必要となります。ここでは、CVAと呼ばれる手法を用いて8年間の森林の変化を見てみることにします。

5枚目 CVAの手法解説(Ⅰ)

CVAとは、変化ベクトル解析という意味で、各画素において2つの特徴量を考え、この特徴量を用いて2時期の変化をベクトルとしてあらわし、そのベクトルの大きさや向きにより変化の内容を推定しようとする手法です。このようにある閾値を設定し、これを越えない場合は変化が起きなかったとし、越えた場合はその向きによって起こった変化が異なっていたと考えます。

7枚目 変化抽出結果

1984年の画像に、植生の消失部分を赤色で重ねてみたのがこの画像です。先ほど画像の判読を行って発見した部分はちゃんと抽出されています。それ以外にも見落としていた変化が起こっているのが発見されました。雑木林を切り開いて住宅団地になっているのが主なものであると考えられます。

逆に、植生の回復した部分を見てみましょう。1992年の画像に黄色であらわしています。消失部分にくらべて非常に少ないことがわかります。8年間という期間は、裸地が森林になるには短すぎるので、そのような変化は起きていませんが、裸地が草本などの植生に覆われ緑色が回復したと考えられる部分がいくつか見られます。

6枚目 CVAの手法解説(Ⅱ)

この解析で特徴量として用いたのは、2時期の画像それぞれを主成分分析した第一・第二主成分です。第一主成分には画像の明るさを表す指標(ブライトネス)が、第二主成分にはみどりの存在を示す指標(グリーンネス)が得られたので、ブライトネス増大・グリーンネス減少の起きる植生の消失は第Ⅰ象限、植生の増加はその反対なので第Ⅱ象限にベクトルが存在することになります。そこで、閾値を超えたこの赤の部分を植生の消失、緑の部分を植生の増加を示す範囲とし、変化部分の抽出を行いました。

8枚目 おわりに

この解析結果を地図に重ねて表示すれば、簡単な変化マップとして利用することができます。また、1画素の大きさがわかっていますから、変化画素の数を数えれば、実際の変化面積を推定することもできます。このような解析をいくつかの期間にわたって行えば、連続的に変化の様子を知ることにも可能となります。

もちろんこの解析結果は現地調査を行って確認することが必要です。調査結果を解析方法にフィードバックさせれば、さらに高精度な解析を行うこともできます。

このように、リモートセンシング技術を使うことにより、広い地域の変化を一度に把握することができます。この「変化抽出」はリモートセンシングの最も得意とする分野です。

パーソナルコンピュータをベースとした
森林リモートセンシングデータ解析システムの
開発と応用に関する研究

露 木 聡

②

学 位 論 文

パーソナルコンピュータをベースとした
森林リモートセンシングデータ解析システムの
開発と応用に関する研究

1994

露 木 聡

目 次

第 I 章 序 論

I-1	研究の背景と目的	1
I-1-1	研究の背景	1
I-1-2	なぜパーソナルコンピュータか	2
I-1-3	わかりやすくすること	2
I-1-4	研究の目的	3
I-2	本論文の構成	5

第 II 章 パーソナルコンピュータをベースとした リモートセンシングデータ解析システムの開発

II-1	システム開発の背景	6
II-1-1	はじめに	6
II-1-2	パーソナルコンピュータリモートセンシング 画像処理システムの歴史	7
(1)	初期のパーソナルコンピュータ画像処理システム	7
(2)	最近の動向	8
II-1-3	システム開発の基本姿勢	8
II-2	ハードウェアシステム構成	12
II-2-1	FREDAM-PIPS	12
II-2-2	FREDAM6500	13
II-2-3	PUSREHUT システム	15
II-2-4	現在の FREDAM6500	16
II-3	ソフトウェアシステム構成	22
II-3-1	はじめに	22

II-3-2	イメージプロセッサを利用したプログラム	23
(1)	画像表示	23
(2)	ルックアップテーブルの設定・変更	23
(3)	ルックアップテーブルの自動設定	24
(4)	トレーニングエリアの選択	24
(5)	高速最短距離法分類	25
(6)	画像データの保存	25
(7)	画像データのウィンドウ表示	25
(8)	面積計測	26
(9)	トレーニングエリアの表示	26
(10)	その他	26
II-3-3	数値計算のためのプログラム	26
(1)	ラジオメトリック補正(ストライプ補正)	26
(2)	地理補正	26
(3)	FREDAM-CIPS	27
(4)	教師付き分類	28
(5)	主成分分析	28
(6)	分離度計算	28
(7)	測地座標系変換	28
(8)	CVAによる変化抽出	29
(9)	傾斜方位・傾斜角、相対日射量の算出	29
(10)	RGB - HSV 変換	29
(11)	ファイル変換	29
II-3-4	周辺機器操作のためのプログラム	29
(1)	磁気テープからの画像切り出し	29
(2)	ドラムスキャナ画像入力	29
II-3-5	デモンストレーションプログラム	30
(1)	リモートセンシングと画像分類	30
(2)	経年変化の観察	31
II-3-6	FREDAM フォーマット	31
(1)	画像ファイル	31
(2)	トレーニングエリア座標ファイル(フィールド座標ファイル)	33
(3)	トレーニングエリア統計量ファイル(フィールド統計量ファイル)	33
(4)	クラス統計量ファイル	34
(5)	シェードカラーテーブルファイル	35

(6)	ルックアップテーブルファイル	35
(7)	MTパラメータファイル	35
(8)	ラジオメトリック補正パラメータファイル	36
(9)	GCPファイル	36
(10)	地理変換パラメータファイル	37
II-4	今後のFREDAMの課題	43

第三章 GPSを使ったグラントゥールース

III-1	はじめに	44
III-2	GPSとは	45
III-2-1	システム構成	45
III-2-2	GPSによる測位	46
(1)	GPSの信号	46
(2)	単独測位: point positioning	46
(3)	相対測位: differential positioning	47
III-2-3	測地座標系	49
(1)	GPSの測地座標系と日本の測地座標系	49
(2)	公共座標系	50
III-3	単独測位の精度検定	59
III-3-1	方法	59
III-3-2	測位結果	59
(1)	1992年9月	60
(2)	1993年2月	60
(3)	2時期の差	60
III-4	ディファレンシャル測位の精度検定	63
III-4-1	方法	63
III-4-2	測位精度	64
(1)	干渉測位の測位精度	64
(2)	トランスロケーション測位の測位精度	66
III-4-3	作業効率	68
(1)	単独測位の作業効率	68
(2)	干渉測位の作業効率	69

(3) トランスロケーション測位の作業効率	69
(4) 森林内でのディファレンシャル測位	69
Ⅲ-5 測位検定のまとめ	79
Ⅲ-6 トレーニングエリアの抽出	80
Ⅲ-6-1 方法	80
Ⅲ-6-2 抽出結果	80
Ⅲ-6-3 まとめ	81

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	86
Ⅳ-1-1 研究の目的	86
Ⅳ-1-2 使用データ	87
(1) 衛星データ	87
(2) DTM データ	87
(3) 林班界データ	88
Ⅳ-2 高解像度カラー画像の作成	90
Ⅳ-2-1 画像処理の流れ	90
Ⅳ-2-2 地理補正	90
Ⅳ-2-3 斜面輝度補正	91
Ⅳ-2-4 画像強調	93
Ⅳ-2-5 RGB-HSV 変換	94
(1) マンセル表色系	94
(2) HSV 変換	95
Ⅳ-2-6 高域成分の強調	97
Ⅳ-3 衛星画像マップの作成	110

第Ⅴ章 FREDAM を利用した変化抽出

Ⅴ-1 はじめに	111
Ⅴ-2 CVA 法による都市近郊林変化の自動抽出	112
Ⅴ-2-1 CVA (Change Vector Analysis) 法	112

V-2-2	CVA 法による解析	113
V-2-3	変化抽出の結果	113
V-3	Difference Index 法によるタイ・ユーカリ林の変化抽出	121
V-3-1	はじめに	121
V-3-2	グラントゥルースと分類	121
(1)	テストサイトの概要	121
(2)	グラントゥルース	122
(3)	ユーカリ	123
(4)	画像分類	123
V-3-3	Difference Index 法による変化抽出	124
(1)	Difference Index 法	124
(2)	DI の適用	125
(3)	DI 法利用の得失	126
(4)	まとめ	127

謝 辞

引 用 文 献

付 図

第I章 序 論

I-1 研究の背景と目的

I-1-1 研究の背景

「対象とする物質や現象と物理的な接触をせずに観測記録できる装置（センサ）を用いて、それらの物質や現象に関する特性情報を計測・収集すること」がリモートセンシングの最も広義な定義（American Society of Photogrammetry 1983）であるが、センサのプラットフォームの高度によっていくつかの種類に分けることができる。まず地表～数10mの範囲は主に人間や車両に搭載されたセンサで観測するもので、ビデオカメラによる形状や温度の計測が代表的なものである。地下や水中の石油探査や魚群探査も含めることができる。次は数万mまでの範囲でプラットフォームには主に航空機が用いられる。アナログの空中写真カメラやデジタルセンサが使用される。そして最後はそれ以上の高度で、人工衛星の守備範囲である。

前者から後者に向かうにつれ、通常は対象物からの距離が離れるので、観測の細かさとしては粗くなり、誤差や雑音が入り込みやすくなる。さらに、前二者はプラットフォームの制限が少ないので、いかなるセンサでも使用することができ、大きなセンサで詳細な計測や膨大なデータ量を扱うことができる。ところが後者は人工衛星という限られたプラットフォーム能力のため、センサシステムには重量や消費電力、送信データ量などに大幅な制限が加えられ、地表近くでの計測と同様には行えない。それにも関わらず現在次々と人工衛星が打ち上げられ、将来にわたるさまざまな観測計画（図I-1-1）が世界中にあるのは、グローバルな目を持つことができるという、他の手段では決して得られない利点を持っているからであろう。

地球の陸地の30%を占める森林（林地）は現在世界の各地ですさまじい開発圧力にあり、その保全と回復が急務とされている。しかし、面積の規模などからいって森林の実態をとらえることは容易ではなく、この点で人工衛星データの利用が唯一の信頼できる情報源となることも珍しくない。森林に対する衛星リモートセンシングは事実上1972年ランドサット1号の打ち上げに始まると言ってよいが、FAOが行った1990年森林資源評価（熱帯諸国）で、森林破壊と森林劣化のモニタリングに人工衛星データが利用されている

(FAO 1993) のは最近の有名な例である。地球環境に対する関心が高まるにつれ、こうした地球規模でのリモートセンシングが脚光を浴びている。

ひるがえってわれわれの身近な森林について考えてみよう。どこか遠い国の森の話ではなく、例えば自分の住む市町村の周辺のどこに森林があり、どのあたりが伐採されて宅地になっているかである。このようなことを知りたい場合、通常は出版物や行政機関が公開している地図や統計表を収集・解読して行っている。しかしそれはあくまでも受動的な立場でしかなく、公表されていること以上はなかなかわからない。ところが、リモートセンシング技術を利用すれば、ありのままの姿を、能動的に、捉えることが可能である。誰がなんと言おうと、見えるものはわかってしまうのである。これは非常に重要な点で、技術と設備さえあれば(人工衛星データは原則として公開されているので)、いままで一方的だった情報を独自に入手可能となったのである。

1-1-2 なぜパーソナルコンピュータか

しかしここまでだけでは、単に可能となっただけのことである。実際には誰でもがこの技術を使えるようにならなくては役に立たない。さらに、すぐ使えるところにシステムが存在しなくてはならない。人工衛星で取得されるデジタルデータを解析するためにはコンピュータシステムは不可欠である。現在最も多く利用されているのはEWS(エンジニアリングワークステーション)をベースとしたシステムである。こういったシステムの能力の高さや使いやすさは言うまでもないが、実はシステムの維持に想像以上の時間と労力が必要とされる。システムの高度化・複雑化にともない、メンテナンスにもそれ相応の知識が必要となっている。

しかし、専門の研究者でない者にとって unnecessary 負担が増えることは望ましいことではない。そこで本論文で開発したシステムは、パーソナルコンピュータをベースとしたデータ処理システムとした。とはいえ、グラフィック処理の美しさや快適さはリモートセンシングデータ解析システムの要となるので、画像表示や簡単な処理を行うために専用イメージプロセッサを利用している。価格は下がりがつつあるとはいえ、決して安くはないイメージプロセッサを使用したことで、当初の「誰でもどこでも」にはやや及ばなくなったが、これも今後のコンピュータ技術の発達と共に解消されていく問題であろう。

1-1-3 わかりやすくするということ

「誰でもどこでも」は一般化・普遍化ということができる。リモートセンシング技術は現在では毎日の天気予報に気象衛星「ひまわり」の画像が使われることもあり、かなり親しみやすいものとなっていると思われる。とはいえ、それを自分たちでも使えろと感じて

もらうためには、リモートセンシングデータがどのようなものなのか、それをどのように使えばどのようなことが具体的にできるかを、わかりやすく繰り返し示す必要がある。前者にはビデオや印刷物での画像の紹介や、データと実際の現地の様子を比較対照させた判読キーのようなものが、後者には身近な問題を取り上げた解析例の紹介などが考えられる。もともとリモートセンシング画像が視覚的なもので、直感に訴えやすい利点を持っているのでわかりやすくするという作業を抜きがちである。時には1つの画像が百万言に優る場合もあるが、結果をわかりやすい言葉に翻訳するインタープリテーションが必要である。

1-1-4 研究の目的

本論文では、以上のことを考慮し、以下に示す内容を研究の目的とした。

- ・「使える・使いやすい」ことを目標として、パーソナルコンピュータと専用イメージプロセッサを用いた森林リモートセンシングデータ解析システムを開発する。
- ・開発したシステムが実用に耐えることを、実例をもって明らかにする。
- ・リモートセンシング技術を「わかりやすく」提示する手法について検討する。
- ・解析方法や解析結果を理解しやすくインタープリテーションする。

今後開発を推進すべきセンサ名称と研究開発状況一覧
Sensors to be developed

センサ名称 Acronym	和文名称(略称)及び英文名称 Name	開発状況
ADALT	次世代レーザー高度計 Advanced radar ALTimeter	
AMSR	次世代マイクロ波放射計 Advanced Microwave Scanning Radiometer	
AMS2	次世代マイクロ波放射計 (Successor of AMSR)	
AVNIR2	次世代可視赤外線放射計 Advanced Vis. & Near Infrared Radiometer 2 (Successor of AVNIR)	
DIAL	差分吸収ライダー Differential Absorption LIDAR	
GLI	グローバルイマジン Global Imager	
GLI2	地球の凍結レーザ (Successor of GLI)	
HLAS	高分解能衛星気象観測装置 High-resolution Limb Atmospheric Sounder	
IMR2, 3	衛星気象観測装置 Infrared Multi-Meier of Greenhouse gases (Successors of IMR)	
JLWS	日本衛星気象観測装置 Japanese Lined Atmospheric Wind Sounder	
LIDAR	レーザースカウティング及び高度計 LIDAR atmospheric sounder and altimeter	
MILES	衛星大気三波放射分光計 Millimeter-wave Limb Emission Spectrometer	
NSAR	次世代合成開口レーザ Next generation Synthetic Aperture Radar	
PR2, 3	降水観測装置 Precipitation Radar 2, 3 (Successors of PR)	
SCAT	マイクロ波放射計 SCATerometer	
TERSE	次世代地球放射計 Terrestrial Earth Radiation Sounder of Earth	
TOMIS	衛星気象観測装置 Three-dimensional Ozone Mapping with Ultraviolet Imaging Spectrometer	

観測項目別の観測センサの計画 Future Plan of Observation Sensors by Item

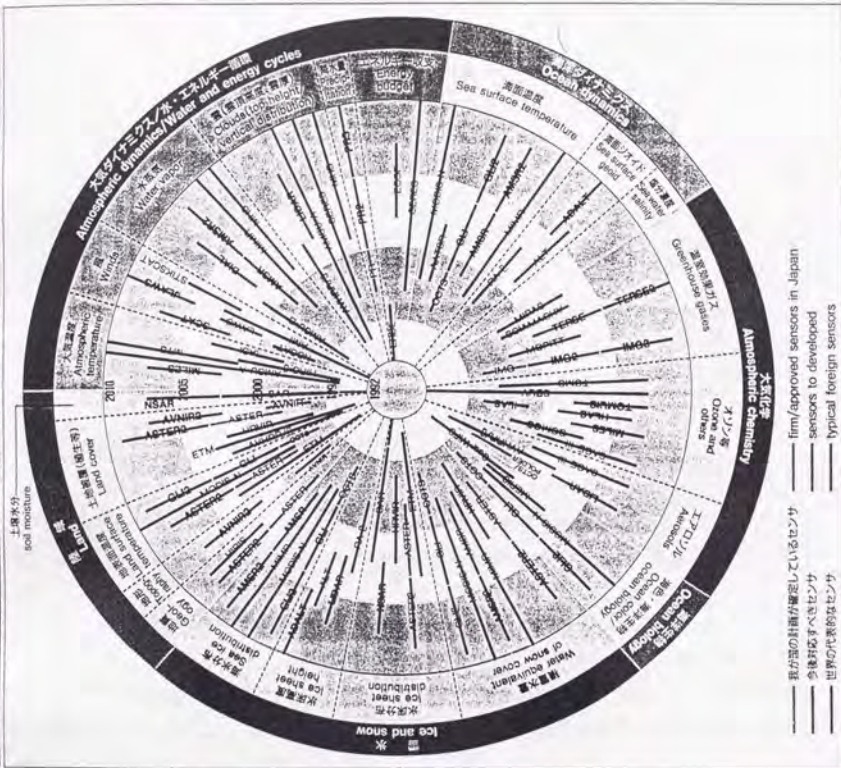


図 1-1-1 宇宙からの観測シナリオ (宇宙開発事業団 1993)

I - 2 本論文の構成

第I章 序論

本論文の背景及び目的について述べる。

第II章 パーソナルコンピュータをベースとしたリモートセンシングデータ解析システムの開発

パーソナルコンピュータをベースとした森林リモートセンシングデータ解析システムの開発について、システム開発の経緯や変遷、ハードウェア・ソフトウェア構成について述べる。

第III章 GPSを使ったグラントゥルース

データ解析において必要である現地調査（グラントゥルース）をリモートセンシングデータ上に反映させるために、GPS（Global Positioning System）の利用について述べる。また、森林調査でのGPSの高度な利用法とその精度についても考察する。

第IV章 高解像度カラー衛星画像マップの試作

リモートセンシングデータのわかりやすい表現法として、縮尺1:50,000のカラー衛星画像マップの試作について述べる。マップ作成の対象地域となった秩父地方の急峻な地形条件を緩和するために、DTM（デジタル地形モデル）を衛星画像と重ねて見やすい画像マップの作成法について考察する。

第V章 FREDAMを利用した変化抽出

リモートセンシングデータ解析の具体例として、作成した解析システムを用いた変化抽出について述べる。身近な問題として横浜市付近の都市近郊林の変化を、特定の目的を持った解析例としてタイのユーカリ林の変化について考察する。

第Ⅱ章 パーソナルコンピュータをベースとした リモートセンシングデータ解析システムの開発

Ⅱ-1 システム開発の背景

Ⅱ-1-1 はじめに

「3カ月ごとに性能が2倍になる」とまでいわれるほど、最近の電子技術の発達はすさまじいものがある。この急速な進歩の直接の恩恵を受けるのはもちろんスーパーコンピュータや大型コンピュータなどのハイエンドであるが、コンピュータ利用の大多数をしめるパーソナルコンピュータ（以下パソコンと略す）ユーザにとっても、最新技術の動向は目が離せない。技術がこなれ量産がきくようになったとたんにパソコンのCPUとして採用され、手の届く範囲に降りてくるスピードもますます速くなっているからである。

このような傾向が一般にも明らかになったのは数年前からで、「ダウンサイジング：downsizing」として盛んにコンピュータ企業の商業にも登場し、時代のキーワードともなった。IBMのようなメインフレームの業績が悪化し、パソコンメーカーの台頭が明らかになった時期でもあった。しかし、ハードウェアの発達のテンポに比して、ハードウェアとユーザのインターフェイスを行うソフトウェアはそれほど順調ではない。ハードウェア資源、特にCPU、の能力拡大に伴うソフトウェアの大規模化のために、開発の手間やコスト、時間が以前にも増してかかるようになってきたためである。

本システムの開発が開始されたのは、まさにこのようなダウンサイジングの始まる直前の1986年であった。開発のきっかけとなったのは、当時国際協力事業団（JICA）がインドネシア政府と協力して行っていた「インドネシア熱帯降雨林研究計画：Tropical Rain Forest Research Project」であった。このプロジェクトの1部門として「土地利用分類と計画」があげられており、衛星リモートセンシング技術を利用して土地利用分類を行うこと（TAKAHATA 1987）となっていた。農林水産省林業試験場経営部航測研究室（現森林総合研究所林業経営部遠隔探査研究室）では、技術供与の一環としてリモートセンシングデータ解析システムを提供することになった。そこで開発を行ったのが本システムのプロトタイプというべきもので、その後システム構成の変更やプログラム開発・整備などを行い現在の姿となっている。

(1) 初期のパーソナルコンピュータ画像処理システム

日本における初期のパソコンを利用したリモートセンシングデータ処理の概説はデータ処理技術研究会（1986）に詳しいのでそれに譲るが、1970年代末から研究機関で開発が始まり、RESTECのFDによるMSSデータの配布（1984年）を契機に市販のシステムの開発・販売が本格化した。当初は外国製の8ビットマシンによるシステムが中心であったが、1982年に日本電気からPC-9801が発売されて以降、16ビットマシンが主流となってきた。グラフィック機能についてはフルカラーフレームバッファの登場で表示部分については従来の専用機と同レベルになったが、処理スピードや記憶装置の制限から、解析機能は専用機とは比較にならないものが多かった。後者の解決の一つの方向として、パソコンを大型計算機ホストの画像表示端末として使用するというシステムが考えられた。

1987年には日本リモートセンシング学会による「パソコンによるリモートセンシングデータ解析講習会」が開始された。この講習会で採用されたハードウェアは当時の一般的なものであると考えられるので図II-1-1(a)に、また、講習会の内容を(b)に示す（夏季講習実施委員会1987）。ハードウェア構成は図に示したように、16ビットのIntel 8086をCPUとした日本電気PC-9801Vm2をメインに、画像表示にフルカラーフレームバッファを利用し、画像データはフロッピーディスクに格納するという、全く標準的なパソコンシステムであった。ここで使用されたソフトウェアの一部はのちに公開され（日本リモートセンシング学会出版委員会1989）、その内容とも共通するが、大きな特徴はまずパソコンの使い方といった部分に大きな時間が割り当てられていることである。この講習会は6年間続き、最終回の1992年では「パソコンの基本知識」に関する部分が相対的に少なくなり、この間のパソコンの一般的な普及がうかがえる内容となっている。同様な機器構成で作成されたソフトウェアの例として、瀬戸島他（1989）、野上他（1990）の画像処理システムや、坪根（1991）がFD付きの書籍を出版している。

林学分野では、鈴木他（1984）、鈴木（1985）、内藤（1986b）、鈴木他（1989）がPC-9801単体で画像表示を行うシステムの開発を行い、その後内藤（1986a）がそのシステムを利用して日光戦場ヶ原のランドサットMSSデータ解析を行っている。加藤（1987）は、ランドサットやNOAAデータの解析デモプログラムを作成し一般への啓蒙を図った。妹尾は前出の日本リモートセンシング学会出版委員会（1989）で森林植生解析プログラムを発表している。このシステムは京都府公害対策技術者会議（1990）にその詳細がとりまとめられているが、PC-9801シリーズにフレームメモリを用い、SPOTデータとDTMを組み合わせて地形効果の軽減を図りつつ画像分類を行うことのできるシステムである（妹尾他1990）。その後本体をより高性能なPC-H98シリーズに変更し、

GIS 情報を組み入れられるシステムへ発展させている (SENOO 1994)。東他 (1985)、寺田 (1989) は磁気テープデータ利用の可能なシステムの構築を行い、松食い虫被害の把握を行った。

(2) 最近の動向

高性能の IBM 互換機 (DOS/V 機) の低価格化と Windows の普及、画像処理ボードの一般化などがここ 1~2 年で急速に進み、それとともなって外国製の画像処理ソフトウェアが次々と発売されるようになってきている。その多くはワークステーションなどで定評のあったシステムをマルチプラットフォーム化し、パソコンでも利用可能にしたものである。また、画像処理で定評のある Macintosh も低価格化によって普及し、これを利用した解析システムの市販も盛んになっている。日本におけるリモートセンシングデータ配布機関である RESTEC では、FD による MOS データの配布の際に「ももっぴい」という画像ビューソフトを添付するサービスも行っている。また、前記の講習会は 1993 年からは「環境とリモートセンシング <環境評価手法>」というタイトルで再開している。この内容は、パソコンとはいっさい無関係に標記のテーマでの講演となっている。これらのことから言えるのは、リモートセンシング画像解析が、さまざまな目的を達成するための一つの手段であることが認知されてきたことであろう。このことを最も端的に示す最近のトレンドは、リモートセンシングを GIS (Geographic Information System : 地理情報システム) の一つのレイヤとして扱うために、GIS システムの一部にリモートセンシングデータ解析が取り入れられていたり、GIS ソフトウェアとリモートセンシング画像解析ソフトウェアが有機的にリンクして使用できるようになっていることである。

II-1-3 システム開発の基本姿勢

本システムは FREDAM (Forest REmote sensing Data Analysis system : フリーダム) といい、パソコンを中心として構成された、森林のリモートセンシングデータ解析を主目的として開発されたシステムである。

当時リモートセンシングデータ解析システムとして実用的に利用されていたのは、もっぱらミニコンを中心としてそれにイメージプロセッサを配置したタイプであった。コンピュータメーカーやサードパーティからも市販され、また研究機関で自主開発も行われていた。林業試験場の FIAS はその一例である (沢田他 1980)。しかしこのような比較的大規模なシステムは、利用するために高度な知識が必要となり、動作環境や維持、保守にも (専任のオペレータを配置するなど) 注意が必要である。プロジェクトは東カリマンタン (ボルネオ島) のムラワルマン大学で進められていたが、現地の状況を考慮したとき、このようなシステムでは早晚運用不能になることは明らかであった。そこで、折から高性

能化しつつあったパソコンを中心としたシステムで行うことになった。

ところで、リモートセンシングデータ解析はミニコンや汎用大型コンピュータで行われていることからわかるように、もともと非常に大量のデータを処理しなくてはならないという特徴を持っている。パソコンの高性能化が進んだといっても、現在から比較すると当時の状況は、処理能力や表示能力の点でリモートセンシングデータ処理をすべて行うというわけにはいかなかった。そこで、データ表示や簡単な演算については専用のイメージプロセッサを用いてパソコンの能力不足に対処することとなった。また、リモートセンシングデータの標準的なデータ配布媒体である磁気テープも、パソコンの標準的な I/O デバイスではないので外部接続を行いサポートできるようにした。パソコンを核として周辺機器を充実させ、研究目的として実用的な解析システムをめざしたのである。

プロトタイプ of FREDAM である FREDAM-PIPS (PUSREHUT Image Processing System) から現在の FREDAM6500 にいたるまで、一貫しているシステムの特徴は以下の通りである。

- ① パソコンを中心とした実用的なリモートセンシングデータ解析システムである。
- ② 画像データの表示に専用イメージプロセッサを使用し、フルカラー (1600 万色) 画像の高速なハンドリングが可能である。
- ③ システムの OS に MS-DOS を採用し、データの互換性やユーザー独自の拡張性が高い。
- ④ 森林を対象としたデータ解析に適した手法をプログラム化し取り入れている。
- ⑤ ソフトウェアは主にメニュー方式を採用し、操作性がよい。
- ⑥ 画像データや各種パラメータファイルは単純な構造で (可能な場合は ASCII 形式) 、外部からの参照が容易である。
- ⑦ 画像データは 512 ピクセル × 480 ライン × 8 ビットを基本サイズとする。

つまり、システムのハードウェアの面では、さまざまな周辺機器の持つ複雑な操作コマンドを整理して、定型作業を効率化するコントローラとしての役割をパソコンに強く持たせ、ソフトウェアの面では、周辺機器コントローラソフトの充実とともに、大量のデータから必要な情報を効率的に抽出しファイル化することにより外部インターフェース機能を持たせた、と言える。後者については、統計解析やグラフ処理などには定評のある市販ソフトウェアが数多くあり、それを利用するのが最もよいが、一般にリモートセンシングデータはそのデータ量の多さのために生データのままでは市販ソフトに直接入力することは難しい。そこで情報抽出の必要が生じ、本システムはそのための手段を提供しているのである。

また、研究目的とした場合、市販の画像処理システムは、新たなアルゴリズムの開発とそのインプリメントの面で、ソフトウェアシステムの複雑性やさまざまな約束事 (システ

ムサブルーチンの使用など)のために、敷居が高いことは否めない。(もちろん、こういったシステムの持つ機能のみを利用した場合の操作性や生産性の高さは言うまでもない。) FREDAM では画像データへのアクセシビリティを高く、つまり画像データのハンドリングをなるべく簡単な手続きでできるようにし、ユーザが新たに開発したアルゴリズムをたやすくデータに対して実験できるようにした。そのかわり、市販のソフトウェアに比べて高速性が犠牲になっていると言えるが、この点についてはこの章の冒頭に記したように、コンピュータ技術の発展によりハードウェアでの処理速度の向上が常に図られているので、トレードオフを考えれば二義的な問題と考えられる。

画像表示について、FREDAM では比較的高価な専用イメージプロセッサを使用している。その点現在では、パソコン本体に内蔵してフルカラー表示をおこなう低価格のフレームバッファや画像アクセラレータボードが一般的になっている。前者は一般ユーザでも利用するユーティリティが附属しているが、基本的に画像表示を行う機能のみで、画像演算機能は有していない。後者は、画像演算機能を有するのが一般的だが、一般ユーザが自分で直接利用するようにはなっていない。これらを考えあわせると、FREDAM がイメージプロセッサを採用した利点は現在でも保たれているといえる。

現在ではパソコン環境は Windows に移行しつつあり、フルカラー・高解像度表示が標準になりつつある。FREDAM では依然として DOS 環境でシステムが稼働しているが、将来的には上記の操作性の問題を解決しつつ Windows へ移行していかざるをえないと考えている。その際にこれまでのように専用イメージプロセッサ(現在ハイビジョン用高解像度の機種も市販されている)を使用するか、Windows 環境へ全てまとめるかについては、今後しばらくパソコン環境の推移を見極めた方がよいと考えている。

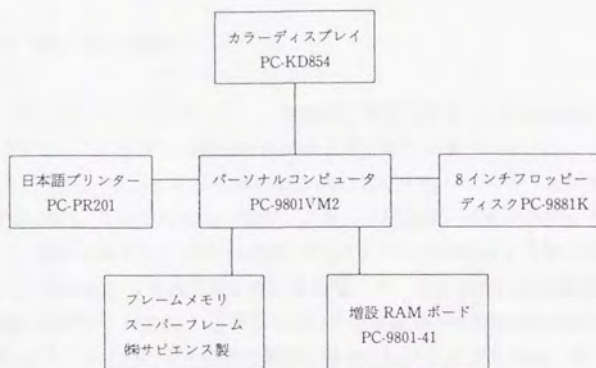


図 II - 1 - 1(a) 講習会で利用されたパソコンシステム

基礎編	9:30		10:50		11:10		12:30		13:30		14:50		15:10		16:30									
第1日	パソコンの基本知識				パソコンの基本知識				昼休	メモリ操作、機械語ルーチン利用				メモリ操作、機械語ルーチン利用										
第2日	ファイル技術、ディスク操作				ファイル技術、ディスク操作				昼休	基本プログラムI				基本プログラムI										
第3日	基本プログラムII				基本プログラムII				昼休	基本プログラムIII				基本プログラムIII										
応用編	9:30		10:20		10:30		11:20		11:30		12:20		13:30		14:20		14:30		15:20		15:30		16:20	
第4日	応用プログラムI		応用プログラムII		応用プログラムIII		応用プログラムIII		昼休	応用プログラムIV		応用プログラムV		応用プログラムVI		-----								
第5日	応用プログラムVII		応用プログラムVIII		応用プログラムIX		応用プログラムIX		昼休	応用プログラムX		応用プログラムXI		-----										

注) 11通りの応用プログラム (REMOTE-11から-21) を、それぞれパソコン2セットに割り当てる。講師は50分を単位として、2日間に渡り計11回同じ講習をする。受講者は30分単位で席を11シフトする。こうして11通りの応用プログラムを全部学習する。

図 II - 1 - 1(b) 講習会の内容

II-2 ハードウェアシステム構成

FREDAM は開発当初のプロトタイプから現在に至るまで、ハードウェアやソフトウェアの変更にとまぬいくつもの段階を経てきたが、それにしたがって概説する。

II-2-1 FREDAM-PIPS

プロトタイプハードウェアシステム構成は、林業試験場の沢田治雄氏が行った。機器構成を図 II-2-1 に示す。遠隔地でのスタンダードシステムということ considering、データ入力、解析、出力までが考慮された機器構成となっている（露木他 1986、露木 1986、高畑 1987、TAKAHATA et.al 1988）。最大の特徴は、イメージプロセッサを主に扱う Vm 系と、数値演算を主とする XA 系を並列にしたことである。大量のリモートセンシングデータの数値演算は高速性が必要とされるので、その当時の最速機種である日電の PC-9801XA（CPU：i80286）を準備した。この機種はその他の PC-9801 シリーズから比べるとハードウェア的に少々特殊な構成を持っていたために、XA に未対応の市販ソフトウェアが存在した。同じく日電の PC-9801Vm は CPU に i8086 を持つ標準機で、スピードは XA より遅いが、コントローラの役割を持たせ数値計算をメインにしないことで、作業の効率化を図った。Vm、XA とも、5^{1/4}FDD 2 台と 20MB HDD 1 台を内蔵し、FPU（数値演算プロセッサ）と増設メモリを実装している。

イメージプロセッサは關柏木研究所の nexus6400 を GP-IB インターフェースを介して接続する。nexus6400 は分解能 512 × 480 画素、RGB 各 8 ビットの 14" CRT、512 × 512 × 8 ビットのイメージメモリ 4 枚、パイプライン型イメージプロセッサを持つ。nexus のポインティングデバイスとしてタブレットを、そしてカラーハードコピー装置と粒子解析 ROM Pack を接続する。GP-IB I/F は最大 100KB / 秒の転送速度を持っており、コンピュータ用インターフェースとしては中速である。

ドラムスキャナは、写真や地図などをデジタルデータ化するのに使用するが、ここでは阿部設計機のドラムスキャンデシトメータ・モデル 2605 を専用の I/O ボードを用いて接続した。走査範囲 300 × 400mm、測定アパーチャ最小 25 × 25 μm、8 ビットの A/D コンバータ内蔵である。

ディジタイザはグラフテック KD5050、プロッタはローランド DG の DPX-2000、磁気テープ装置は TEAC MT-1000GP II を採用した。

このシステムは、1986 年中頃に一応の完成を見、インドネシア東カリマンタン熱帯降雨林研究所（PUSREHUT）に発送された。

FREDAM-PIPS 完成の翌年に、林業試験場航測研究室で FREDAM の継続開発のために作成されたのが、FREDAM6500 である。その機器構成を図 II-2-2 に示す。FREDAM6500 は日本国内での使用を前提としたシステムであるので、PIPS に見られたようなスタンドアロンの解析システムにはなっていない（露木 1988）。国内のパソコンの普及程度を考えると、すでに手持ちのパソコンシステムを数値計算専用に使えばよいので、新たに 1 系列をわざわざ設ける必要はなく、イメージプロセッサコントローラの 1 系列で十分だと考えられたからである。同様な考えから、ディジタイザ、プロッタもこの図には示していない。プリンタ、ハードディスクについても同じことがいえるが、これらは必須の機器であるので一例として示してある。

PIPS 機器選定から 1 年半経過していたので、FREDAM6500 の使用機器は PIPS とはやや異なっている。システム組立時点の最新機種を使用するので、以前と比べて処理速度や能力の面でやや向上している。特にイメージプロセッサは処理能力が強化され、nexus がシリーズ化されたので、ここでは nexus6510 という機種を使用している。また、以前はモニタとプロセッサの一体型（nexus6400）を用いていたが、メンテナンスの容易さを考え、それぞれ単体で構成した。

メンテナンスの容易さについては、サポート体制の整っている地域ではそれほど恩恵を被ることはないが、それ以外の地域では、機器故障の際のシステムへの影響をなるべく少なくするために、システムのモジュール化と冗長化が不可欠であるといえる。これについては次の II-2-3 でも述べる。

・ nexus6000 シリーズイメージプロセッサ

ここで、システムの中核となっているイメージプロセッサの概要を紹介する。イメージプロセッサというのは、単なるカラーディスプレイではなく、転送されてきた画像データを記憶する大容量のイメージメモリ、画像データに対し様々な演算を施すプロセッサ、デジタル画像データをモニタに表示するための信号を作る D/A コンバータ、イメージプロセッサの CPU であるコントロールプロセッサや様々なコントローラなどから成り立つ画像処理装置である。nexus6510 の主なスペックを説明書（柏木研究所 1986）から抜粋すると次のようになる。

nexus6510 概要

- | | |
|------------|---------------------------------|
| 1. 分解能 | : 512 × 480 ドット |
| 2. カラー表示能力 | : 1600 万色同時表現可能 (R.G.B 各 8 ビット) |
| 3. ズーム機能 | : 1, 2, 4, 8 倍 |

4. スクロール機能 : X,Y 方向共 1 ドット毎にハードウェアスクロール
5. リフレッシュ周波数 : 水平方向 15.734KHz、垂直方向 29.9Hz
6. イメージメモリ : $512 \times 512 \times 8$ ビットのメモリを 4 枚標準装備
7. 画素縦横比 : 1:1
8. 画像強調機能 : レベルスライス、等輝度線表示、階調変化、中間輝度レベル強調等がホストコンピュータにより任意に設定可能。
9. イメージプロセッサ : リフレッシュタイム (33mS) で全画面領域の計算を完了。基本は 8 ビット演算だが、16 ビット演算も可能。加算、減算ほか基本演算のみで 32 ファンクション。ルックアップテーブル、画像メモリシフト機能との併用によって 3×3 の局所領域の微分、積分、加重平均等の計算が 1 ～ 数 10 リフレッシュサイクルで処理可能。
10. イメージメモリ増設能力 : イメージメモリは $512 \times 512 \times 8$ ビットを単位として、本体自身が 4 セットを標準装備。さらに外部には 4 セット単位で増設が可能で、本体を含めて最大 64 セットまで拡張可能。
11. コントロールプロセッサ : 8 ビット処理用としては最速の、モトローラ社製 68B09E (2MHz バージョン) を使用。
12. 面積計算処理 : ハードウェアにて標準装備しており、リフレッシュタイムで目的の面積を求めることができる。
13. キャラクタ表示 : ハードウェアキャラクタジェネレータを持ち、77 文字 \times 30 行、256 種の文字を 1600 万色の中から任意の 1 色を選択して表示可能。
14. 多重表示機能 : RED、GREEN、BLUE の各イメージメモリより出力される 1600 万色の同時表現可能な映像が 1 つ、WORK メモリより出力される 64 色擬似カラー及びモノクロ 4 階調の各映像、キャラクタ表示映像の合計 4 つの映像がモニタ上で自由に合成可能。
15. ビデオ出力端子 : モニタ表示用に 2 系統のアナログ信号が BNC 端子にて RED、GREEN、BLUE および SYNC として外部に取り出し。
16. 環境条件 : 温度 10 ～ 40 度、湿度 20 ～ 80 %

そのほか、オプションでウィンドウ機能、ローミング機能を備えている。nexus シリーズは実際にミニコンをホストとして使用している例もあり、リモートセンシング用のイメージプロセッサとしてほぼ十分な機能を持っているといえる。

II-1-2 で述べたフレームバッファとの大きな違いは、画像メモリ中のデータの演算機能 (イメージプロセッサ機能) と画像強調機能、そして多重表示機能である。前者は 1 フレームの画像データ全体を 1 秒以下で演算処理し結果を画像メモリに保存することができる機能で、これにより、画像分類や条件演算がホストコンピュータからのコマンドの

みで実行可能である。FREDAM ソフトウェアでもこの機能を活用している。また、2 番目は、元画像データをコマンドのみで輝度変換させる機能である。衛星リモートセンシングデータはオリジナルデータのままで画像として表示しても暗くて見にくいことが多いが、この機能を利用すると、輝度変換テーブル（ルックアップテーブル）の設定により、いかようにでも画像の色づけが可能となり、リモートセンシングデータ解析作業の効率化に非常に役立つ。これと 3 番目の機能を組み合わせると、マルチチャンネルのデータ表示に非常に便利である。これらの機能を使ったソフトウェアについては第 3 節で述べる。

II-2-3 PUSREHUT システム

筆者が 1989 年に JICA インドネシア熱帯降雨林計画の短期専門家として東カリマンタン・サマリダ市にある熱帯降雨林研究所（PUSREHUT）へ派遣された際に作成したシステムである（TSUYUKI 1989）。II-2-1 で PIPS について述べたが、筆者の派遣当時はこのシステムは機器故障のためほとんど機能していなかった。そこで現地では、画像解析専用室の設定および整備、リモートセンシングデータ解析システムの再構築、ソフトウェアの整備などを行った。まず、画像解析専用室については、それまで製図室におかれていた旧システムを、旧電算機室を整備し直して移設し、冷房や除湿器を設置し、システム環境の向上を図った。データ解析システムの再構築については、インドネシアで手配できるパソコン本体や HDD 以外は日本から送付し、イメージプロセッサやドラムスキャナなどを除くほとんどの機器を更新した。新たなシステムは PUSREHUT01/02 と称し、これを図 II-2-3 に示す。また、現地の商用電源は 220V で日本国内とは異なることや、電気事情が悪く頻繁に電圧低下停電が起こることから、電源には注意を払い、無停電電源装置や電圧変換器・安定器を利用して、図 II-2-4 に示すような電気システムを組んだ。

・遠隔地におけるコンピュータシステムの保守

II-2-2 でも触れたが、サポート体制が整っていない遠隔地においてコンピュータシステムを運用する場合、最も気を使わなくてはならないのがシステムの保守であると考えられる。故障が起きないように管理するのが第一であるが、故障の起こった場合にその被害や影響を最小限にとどめられるようなシステム設計をするのが最も重要である。

まず管理であるが、一つはシステム環境の整備である。最近のパソコンは比較的劣悪な環境条件下でも安定した動作をするようにはなっているが、動作の保証されている気温や湿度には限界がある。インドネシア東カリマンタンのような高温多湿の地域では、空調設備なしには長期の運用は難しい。また、上記の電源不安定性についても機器それぞれの許容範囲があり、配慮が必要である。もう一つはシステム管理者の必要性である。システムについての専門知識を持った専任者が責任を持って管理するのが最も望ましいが、通常は難しい。そこで、システム利用者の制限、利用者が致命的な誤操作を行わないようにマニ

ユアルの整備、利用者記録簿を設けてシステムのログを取ること、などが必要である。管理専任者は無理でも、せめて責任者は必要で、トラブルの起こったときに速やかな対処を行わなくてはならない。

次にシステム設計については、II-2-2で述べたようにモジュール化と冗長化が必要であると考えられる。モジュール化とは、システムの構成要素を不都合のない程度に細かな部分に分けることである。これによって、故障の起きた部分のモジュールのみをシステムから取り除くことによって、モジュールによってはシステム全体の停止をしなくても運用を続けることも可能である。例えば HDD は、ディスククラッシュの発生した場合、パソコン内蔵型よりも外付けタイプであれば、FDでの運用が可能で、その間に HDD の修理を行える。ところが内蔵型でユーザによる取り外しがきかない場合は、修理期間はシステム全体が停止してしまう。冗長化は、同じ機器を複数システムに取り入れ、故障に備えるものである。モジュール化と同時に言えば、機器の取り外し、取り替えが容易であり、結果的にシステムの安定運用につながる。

PUSREHUTでは、図II-2-3に示すように PUSREHUT01と PUSREHUT02の2系統からなるが、それぞれにおいてパソコン、モニタ、HDD、FDD、CMT、I/O Unit、プリンタ、I/Fなどは共通である。これによって、同時に同じ機器が2台とも故障するのではなければ、最低1系統の運用は可能となる。初代 PIPS では数値計算系に処理速度の速い機会を用いたが、PUSREHUTでは処理速度よりもモジュール化・冗長化によって、安定性に重点を置いたシステム構成とした。実際に、筆者の滞在中に HDD コントローラボードが故障したが、修理期間中は1系統で運用を行った。

なお、このプロジェクトでは、日本からの機材供与をする必要があったので、全てが日本製の機器を利用したシステム構成であるが、本来なら現地国内で調達できる機材を用いるべきで、そのほうがトラブルの際の空白期間も短くなる。日本製の場合、たとえ現地で入手できるものであっても海外向けの特長仕様になっていることがあり、修理や注文に時間のかかることが多い。

II-2-4 現在の FREDAM6500

現在、東京大学農学部林学科森林経理学研究室で使用中のシステムは図II-2-2に示した機器構成とほぼ同様であるが、パソコンは PC-9801Vx2 改 (CPU : Cyrix Cx486SLC + FPU)、HDD は ICM 社製 PF-500 (容量 500MB) を使用している。必要に応じて MO (光磁気ディスク) ドライブ (1枚の容量 127MB) も接続可能である。なお、ドラムスキャナと MT 装置は使用していない。また、学内の LAN である UT-NET に接続し、ワークステーションでの作業が可能ないように、データの送受信を行えるようになっている。

数値計算は、同様に UT-NET で接続された処理スピードの速い他のマシン（PC-9821As など）で行うことが多く、Vx2 系はイメージプロセッサのコントローラとして用いられることが多い。



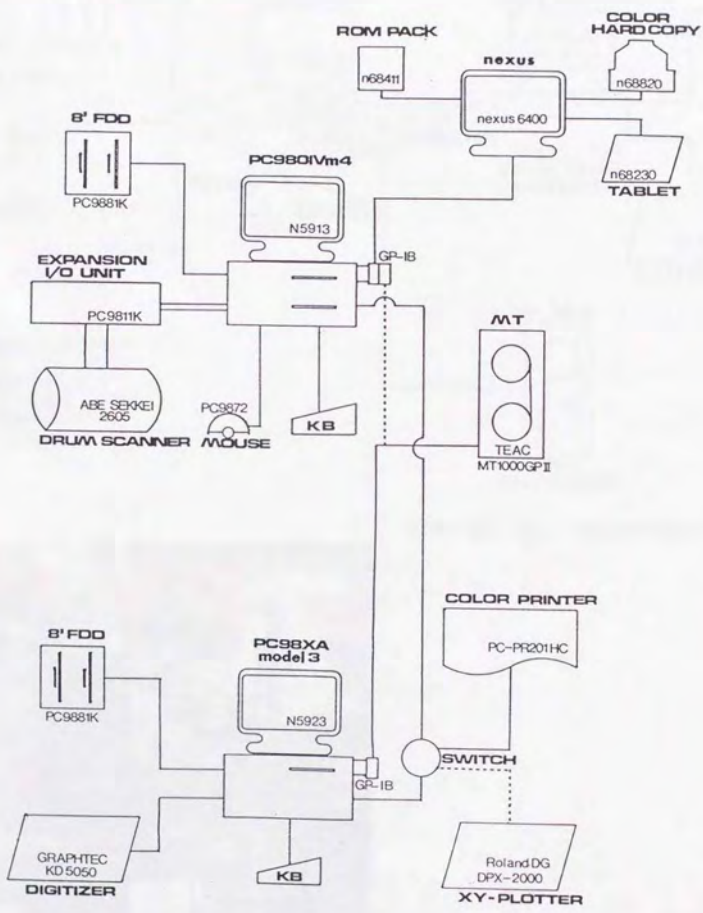


図 II - 2 - 1 FREDAM-PIPS の機器構成

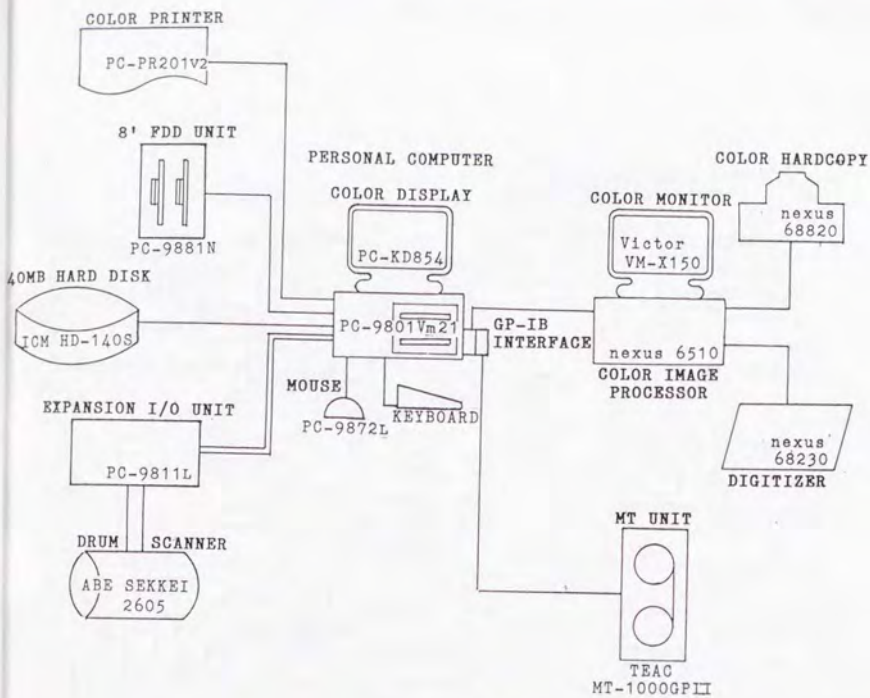


図 II - 2 - 2(a) FREDAM6500 の機器構成



図 II - 2 - 2(b) 森林経理学研究室の FREDAM システム外観

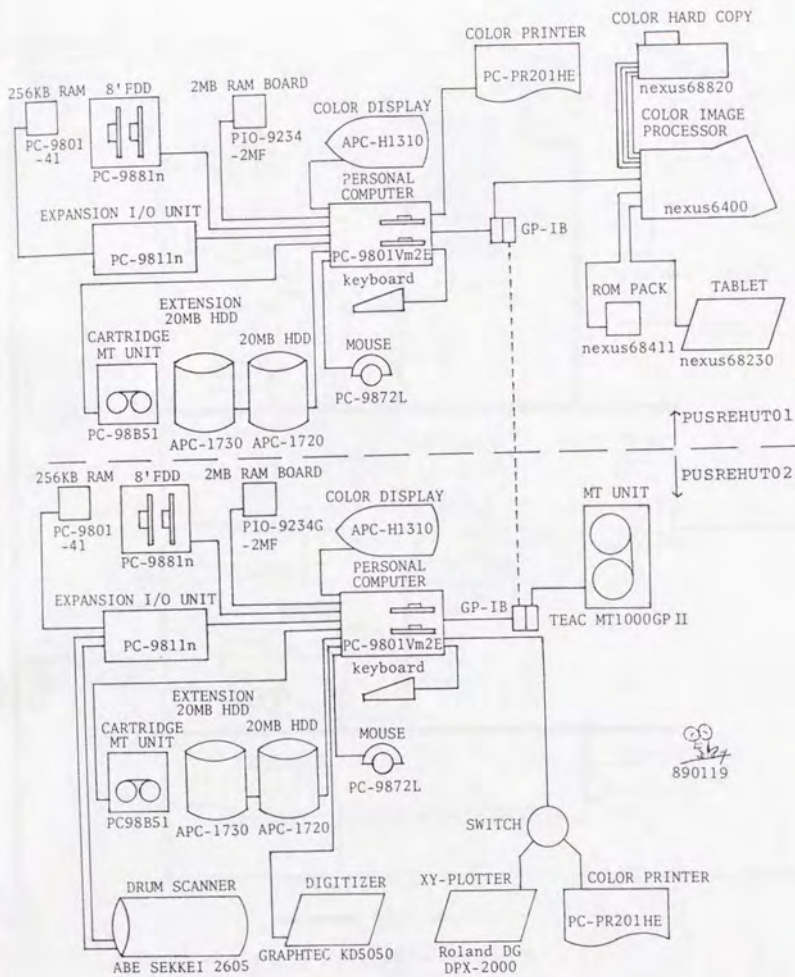


図 II - 2 - 3 PUSREHUT システムの機器構成

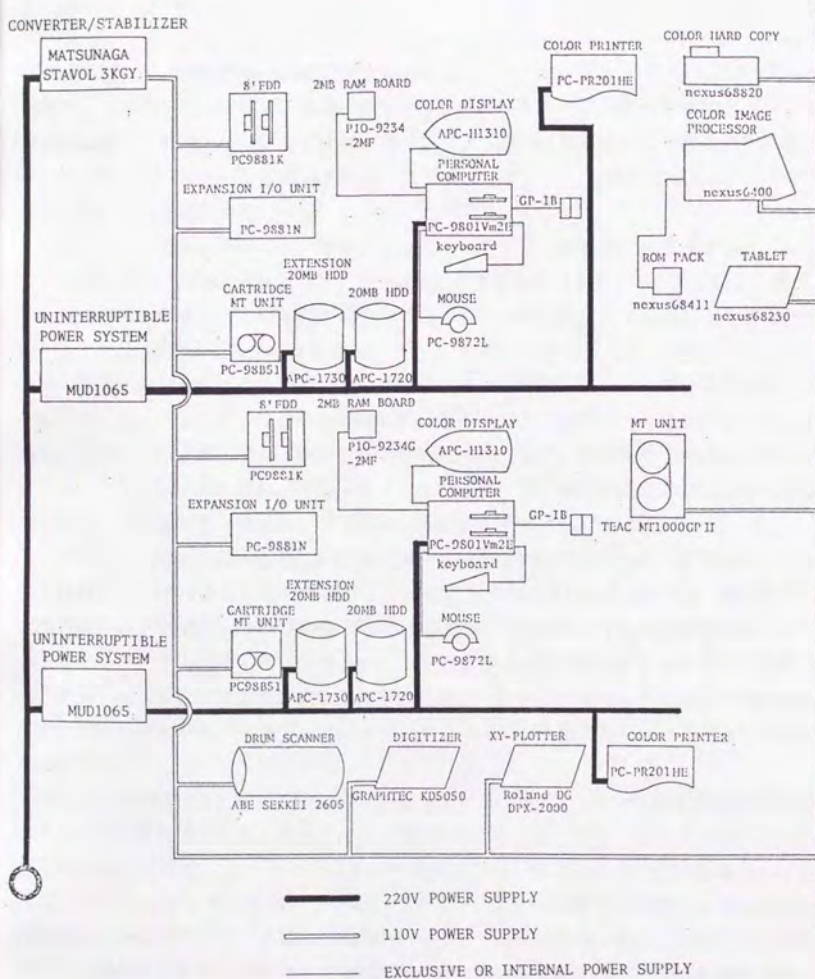


図 II - 2 - 4 PUSREHUT システムの電気系統配線図

II-3 ソフトウェアシステム構成

II-3-1 はじめに

前述のように、FREDAMはMS-DOSをOSとし、ユーザのデータアクセシビリティを高めたシステムとなっている。現在、基本的なリモートセンシングデータ解析プログラムはほぼ完備し、特定の解析アルゴリズムのプログラムがつけ加えられつつある状態になっている。現在のソフトウェア構成を図II-3-1に示す。ここでは、FREDAMの基本プログラムについて概説する。

ランドサットなどの衛星リモートセンシングデータでは、森林部分のダイナミックレンジが比較的小さいので、解析に当たっては微妙な差異を見分けることが必要となる。特に、都市域や農地、水域などと同時に解析を行うとそれらの中に埋もれてしまうようなことが多い。FREDAMではこのような森林域のデータの特性を考えて、多くのプログラムでマスク処理を行うことができるようになっている。マスク処理とは、注目部分以外のデータを隠して（マスクして）、注目部分のみの解析処理を行うことをいう。これによって、不必要な解析エラーを減らすことができるようになった。また、分類を行うためのトレーニングエリアの選択においては、インタラクティブにエリアの適否を確認することができるようになっているので、微妙なクラス設定が行いやすくなった。

プログラム使用言語はMS-DOS版N88-BASICまたはPC-FORTRANで開発され、システムにはコンパイルされたものが実行ファイルとして組み入れられている。BASICプログラムはソース形式で、FORTRANプログラムは実行形式でユーザに提供される。インストールプログラムによってユーザのハードディスクにFREDAMディレクトリが作成され、その中に全てのファイルが納められる。現在、インストールディスクはFD3枚組で、それ以外にFORTRANソースディスク1枚、デモプログラム用の画像データディスクが5枚必要である。

初期のFREDAMでは、ソフトウェアはFDに、データをFDまたはHDに格納する方針でプログラムが作成された。そのうえ、1枚のFD容量に限りがあり全てを格納することができなかったので、イメージプロセッサ系列と数値計算系列のプログラムを分け、2種類のシステムディスクを用いていた。しかし、HDDの普及と大容量化にともない、FREDAMをHD対応させ、FREDAM6500からは1つの系列にまとめることとした。基本的な画像操作に関するプログラムがFREDAM開発当初に整備され、その後各種ユーティリティ、デモ、地形効果の補正、変化抽出などのプログラムが順次つけ加えられていった。

それぞれのプログラムは、MS-DOS標準のMENUコマンドによって表示されるメニュー

一から選択するようになっている。MENU 画面を図 II-3-2 に示す。FREDAM はその開発経緯からプログラム内で表示されるインストラクションは全て英語表示になっている。MENU 画面もその例に漏れないが、国内での使用を考え、メニュー項目のヘルプメッセージのみは日本語表示にしてある。FREDAM-PUSREHUT では、海外での使用のために、MS-DOS (当時は ver. 2.11) のメッセージを英語に変更したバージョンを作成し (露木 1987) OS として使用している。

FREDAM 全体像およびインストール法は「FREDAM6500 USER'S MANUAL」に説明されている。また、ほとんどの主要なプログラムには、操作方法と機能を解説したマニュアルが作成してある。(ただし、バージョンアップにマニュアルが追いついていないプログラムが多数存在する。) 英語版マニュアル (FREDAM-PUSREHUT 以前分のみ) と日本語マニュアルがある。

II-3-2 イメージプロセッサを利用したプログラム

(1) 画像表示

ディスクに保存されている FREDAM Format の画像データを nexus のイメージプレーンにロードし、画像表示を行う。1 バイトデータについては、シュードカラー表示とフォールスカラー表示を行うことができる。フォールスカラー表示では、nexus 本体に実装されている任意のイメージプレーン (最大 16 枚) に画像データの任意のバンドをロード可能である。シュードカラー表示は、画面に表示される 64 色のカラーパレットから任意の色を任意の輝度値に割り当てることができる。2 バイトデータは任意のイメージプレーンに上位・下位バイトを分けてロードする。

(2) ルックアップテーブルの設定・変更

指定したイメージプレーンのルックアップテーブル (LUT) を対話的に設定することによって、画面に表示された画像データの画像強調を行う。図 II-3-3 に示されるように、LUT はグラフの形で指定するが、マウスとアイコンにより、(3) の自動設定では不可能な微妙な設定が簡単にできるようになっている。図中のグラフで、横軸が入力輝度値、縦軸が出力輝度値である。したがって、 $Y=X$ の形のグラフが原データをそのまま表示する設定となり、たとえば $Y=2X$ とすれば原データの 2 倍の明るさの表示を得ることになる。このグラフは折れ線と自由曲線が利用できるので、原データの輝度分布に応じた LUT を設定可能である。原データの輝度分布は、ヒストグラムアイコンによってグラフの下部に表示される。

LUT は nexus 本体の任意のイメージプレーンに対して設定することができ、また Red、Green、Blue に任意のイメージプレーンを割り当ててのカラー表示や、1 バンドのみの

モノクロ表示が可能である。

設定した LUT は、LUT ファイルとしてセーブ・ロードできるので、目的に応じた LUT の使い分けが可能である。

(3) ルックアップテーブルの自動設定

画像データの統計パラメータを利用して LUT の自動設定を行う。ほとんどの画像データはこのプログラムで適切な LUT の設定が可能である。LUT 設定の手法として、原データの平均値を m 、標準偏差を SD 、ユーザ指定の実数値を a, b とすると、

1. $m \pm aSD$ を 0 ~ 255 に線形変換する、
2. 累積ヒストグラム $a\% \sim b\%$ を 0 ~ 255 に線形変換する、
3. 累積ヒストグラム $a\% \sim m$ を 0 ~ 127、 $m \sim b\%$ を 127 ~ 255 にそれぞれ線形変換する、
4. ヒストグラム平滑化
5. LUT グラフを \log 関数とする、
6. LUT グラフを \exp 関数とする、

以上の 6 種類用意されている。ユーザ指定の係数にはそれぞれデフォルトがセットされている。

統計データを計算するために画像領域の一部分のみを指定することができるので、注目部分のみを鮮明に画像強調したい場合などには都合がよい。LUT 設定前後のヒストグラムの表示も可能なので、変換後の輝度分布の確認ができる。このプログラムでも LUT の保存が可能である。

(4) トレーニングエリアの選択

教師付き分類に必要なトレーニングエリアを対話的に設定する。分類を成功させるためには適切なトレーニングエリアの設定が必要不可欠であるが、このプログラムでは、個々のエリア設定のたびに多バンドのレベルスライスを行いアラーム表示をするので、分類の基礎データとしてふさわしいエリアの設定が簡単にできる。

アラーム表示は図 II-3-4 に示す手法によって行われる。まず、設定されたエリア内の各バンドの画像データの最大・最小値を得る。次にそれぞれのバンドで前述の最大・最小条件を満たす部分を画像全体から見つけ、その部分を全てのバンドについて AND を取り、最後に残った部分を Work メモリ上で赤く表示させ、元の画像に重ねて表示する。nexus の表示機能の性質で、元の画像が明るい部分（白く表示される）ではアラームの赤が隠されて見にくくなってしまいが、これは原画像自身を一時的に表示しないことによってアラームを確認することができるようになっている。

エリアの設定は、nexus タブレットで行うが、現在は画面に平行な長方形のみとれる

ようになっている。しかし、多角形で指定できると微妙なエリアが設定できるので、この点は改良が必要である。

設定したエリアの座標情報はトレーニングエリア座標ファイル（フィールド座標ファイル）に保存され、また統計値をフィールド統計量ファイルに作成し、ヒストグラムの印刷をすることができる。

(5) 高速最短距離法分類

(4) や FREDAM-CIPS で作成した統計量ファイルを用いて、nexus 内部で最短距離法による画像分類を行う。ホストコンピュータでは計算を行わず、nexus に十分なイメージプレーン数があれば画像データ転送も行わないので、非常に高速に画像の分類を行うことができる。このプログラムの実行には最低 8 枚のイメージプレーンが必要である。

最短距離法の判別関数にはユークリッド距離を用いるが、nexus コマンドでは平方根をとったり、実数計算ができないので、判別関数を

$$\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - y_i)^2}{v_i}$$

ここで、 x_i : 未知のパターンの特徴ベクトル要素 ($i=1, n$)

y_i : あるクラスの中心の特徴ベクトル要素 ($i=1, n$)

n : 特徴空間の次数

v_i : あるクラスの特徴空間における分散 ($i=1, n$)

とし、計算経過を適当な整数倍して行うことにより、コマンドによる制限を避けている。分類閾値の設定は、分類クラスの最大の分散の実数倍で指定して行う。

分類結果は各クラスの所属ピクセル数とともにデフォルトの配色でシェードカラー表示されるが、配色は画面に表示されるカラーパレットで自由に変更することができる。

(6) 画像データの保存

nexus の任意のイメージプレーンに格納された画像データを FREDAM Format でディスクに保存する。画像領域の一部のみの保存が可能である。

(7) 画像データのウィンドウ表示

nexus のレイヤードモードを利用して、複数のフルカラー画像を同時に表示する。2 時期（以上）の衛星データを表示して比較検討したい場合や地理補正のための GCP を取る場合に使用する。画像の複数表示は、各イメージメモリユニットのレイヤードコントロールプレーンに窓を開けて、その部分を表示することによって行われる（図 II-3-5）。したがって、窓の形をさまざまにすることが可能であるが、このプログラムでは任意のサ

イズの長方形と円に限っている。また、スクロールコントローラを使用することで、個々のレイヤーの移動表示可能である。

(8) 面積計測

nexus のタブレットを利用して、図形の内積計測を行う。計測された図形は nexus 上に表示されるので、境界線と塗りつぶしデータは画像ファイルとして保存することができる。また、図形をプロッタに出力することも可能である。計測パラメータとして、縮尺を指定して実面積、周囲長、X・Y方向の幅、画像データの画素数が表示される。計測時のトレース方向で面積の正負を指定できるので穴のあいた図形や、2個以上の部分に分かれた図形についても計測が可能である。

(9) トレーニングエリアの表示

画像分類に使用したトレーニングエリアを nexus 画面上にエリア名とともに表示する。(4) で作成したトレーニングエリア座標ファイルや FREDAM-CIPS でマニュアル入力したファイルを使用する。このプログラムは、分類作業を行ったあとに、用いたトレーニングエリアを画像的に記録に残しておくために利用する。ズーム表示が可能である。

(10) その他

- ・ nexus GP-IB ハンドラプログラム
nexus イメージプロセッサに付属のプログラムで、ユーザが直接パソコン画面から nexus コマンドを入力する。
- ・ FREDAM シンボルマーク表示
FREDAM のロゴ (シンボルマーク) を nexus 画面上に表示する。
- ・ 字幕表示プログラム
FREDAM デモンストレーションの際使用するバッチファイル実行用プログラム。

II-3-3 数値計算のためのプログラム

(1) ラジオメトリック補正 (ストライプ補正)

未補正のランドサット MSS データのストライプノイズ補正を行う。林業試験場で開発された、ディテクタ間の循環回帰式を作成して補正を行う手法を利用する。このプログラムの一部は林業試験場航測研究室で使用されていた FORTRAN プログラムを移植したものである。

(2) 地理補正

画像データを地図、あるいは他の画像データを重ね合わせる地理補正（幾何補正）を行う。地理補正には、地図（または未補正画像）と参照画像の両方から基準点（GCP）を取ることが必要だが、地図の場合はディジタイザを利用してGCPを取ることができる。

地理補正変換式には、一次、共一次、共二次式の3種類から適当なものを選び変換精度を検討することができる。このプログラムの一部は林業試験場航測研究室で使用されていたFORTRANプログラムを移植したものである。

(3) FREDAM-CIPS

イメージプロセッサを使用せずに一連の画像処理を行うためのプログラム群。阿部設計(株)「MICRO-CIPS」をもとに、OSの変更、ファイル構造のFREDAM化、入力・表示部分の変更、プログラムの追加を行ったものである。実行可能な主な処理は以下の通りである。

a. 画像データの表示（パソコン画面上にディザ法により8色表示）

- フォールスカラー表示
- シュードカラー表示
- 表示画面のカラー印刷

b. 画像データ印刷

- グレイマップ印刷
- データの数値印刷

c. 統計計算と分類

- ヒストグラム印刷
- トレーニングエリア座標マニュアル入力
- トレーニングエリア統計量計算
- クラス統計量計算
- トレーニングエリア内分類
- 最短距離法による画像分類
- 重回帰分析

d. 画像処理

- 画像データ強調
- バンド間演算
- 3×3フィルタリング
- 画像拡大

e. 地理補正

- アフィン変換

(4) 教師付き分類

画像データの教師付き分類を行う。このプログラムでは

- a. 最尤法
- b. 線形判別法
- c. ユークリッド距離による最短距離法
- d. correlation 法
- d. normalized correlation 法

の5種類の分類法を利用することができる。このプログラムは林業試験場航測研究室で使用されていた FORTRAN プログラムを移植したものである。

(5) 主成分分析

画像データの主成分分析を行う。固有ベクトルの算出のためには、トレーニングエリアまたはマスク画像を指定して、画像データの一部を使用する。主成分画像の作成は、各バンドの線形結合によって行うが、線形結合のためのパラメータは PCA ファイルとして、パラメータ計算プログラムが作成する。このプログラムの一部は林業試験場航測研究室で使用されていた FORTRAN プログラムを移植したものである。

(6) 分離度計算

トレーニングエリアまたはクラス（カテゴリー）間の統計的な分離度を計算する。計算は全てのチャンネル、カテゴリーの組み合わせについて行われる。分離度 ISB は transformed divergence D_T を整数化するため 20 倍した形、

$$ISB(S_j, S_k) = 20 \times D_T(S_j, S_k)$$

$$D_T(S_j, S_k) = 100 (1 - e^{-D(S_j, S_k)/8})$$

$$D(S_j, S_k) = \int \left\{ \ln \frac{P(z | S_j)}{P(z | S_k)} P(z | S_j) - P(z | S_k) \right\} dz$$

ここで、 S_j, S_k : カテゴリー

で表され、0 ~ 2000 の値を取る。このプログラムは林業試験場航測研究室で使用されていた FORTRAN プログラムを移植したものである。

(7) 測地座標系変換

UTM 座標系、緯度経度座標系、19 系直交座標系、WGS-84 座標系相互の座標値の変換を行う。UTM 座標系はリモートセンシング画像の準拠する座標系として最も良く用いられ、緯度経度座標系は地形図から GCP を読み取る時に用いられる。19 系直交座標系は日本の公共座標系であり、大縮尺の基本図に用いられる。WGS-84 座標系は GPS が利

用する座標系であり、GPSによる精密測量結果を日本で用いるときには考慮が必要な座標系である。手法については第Ⅲ章で解説する。

(8) CVAによる変化抽出

Change Vector Analysis (変化ベクトル分析)法で、リモートセンシングデータの経年変化を解析する。手法については第Ⅴ章で解説する。

(9) 傾斜方位・傾斜角、相対日射量の算出

2バイト(または1バイト)のDTM(digital terrain model: 数値地形モデル)データを用いて、各ピクセルの傾斜角及び傾斜方位を計算する。また、この時同時に相対日射量の計算を行うことができる。それぞれの結果は0~255に整数化しFREDAMフォーマットの画像ファイルとして出力される。手法については第Ⅳ章で解説する。

(10) RGB - HSV変換

3バンドの画像ファイルを使って、色彩を数学的に表現するカラーモデルのうち、RGBとHSV相互の変換を行う。HSVそれぞれの結果は0~255に整数化され、FREDAMフォーマットの画像ファイルとして出力される。手法については第Ⅳ章で解説する。

(11) ファイル変換

RESTEC形式、MICRO-CIPS形式からFREDAM Formatへの画像ファイルの変換を行う。

Ⅱ-3-4 周辺機器操作のためのプログラム

(1) 磁気テープからの画像切り出し

㈱TEAC製MT-1000GPⅡ磁気テープ装置を利用して、ランドサットなどのCCTから画像を切り出し、FREDAM Format画像ファイルを作成する。800/1600 bpiのBILまたはBSQフォーマットのCCTを扱うことができる。このプログラムは森林総合研究所の栗屋善雄氏が開発したものである。

(2) ドラムスキャナ画像入力

阿部設計㈱製2605型ドラムスキャンデンストメータを使用して、写真や地図などを読み取り、FREDAM Format画像ファイルを作成する。このプログラムは阿部設計㈱「DRUMSCO-98」をもとに、OSの変更、ファイル構造のFREDAM化、メッセージの変更を行ったものである。

II-3-5 デモンストレーションプログラム

(1) リモートセンシングと画像分類

パソコン画面に解説、nexus画面に画像や図を表示しながら、リモートセンシングの基本原理と画像分類の手法を説明するデモンストレーション。分類には1981年3月18日撮影の富士山周辺ランドサットMSSデータを使用する。所要時間は現在のシステムで12'55"である。主要なシナリオは以下の通りである。()内は経過時間。

1. FREDAMのロゴを表示(図II-3-6(a))。(1'19")
2. ランドサット、SPOT、もも衛星の外観図(図II-3-6(b))を示しながら「対象物からの電磁波の反射・放射・散乱を観測する」リモートセンシングの定義を説明する。(2'10")
3. 植物、土、水の分光反射パターンをnexus上に描画しながら(図II-3-6(c))、リモートセンシングの原理を解説する。(3'10")
4. オリジナルの明るさのMSS画像をnexus画面に表示する。(3'42")
5. 画像強調について、まず画素値と明るさの関係を説明してから、ルックアップテーブルの設定を解説する(図II-3-6(d))。(5'00")
6. フォールスカラーのカラー合成について説明する。(5'38")
7. nexus画面の画像を強調表示する。(5'55")
8. 土地利用分類を行うために、まずトレーニングエリアについて解説する。(6'20")
9. FREDAMでのアラーム表示の利点について説明する。(7'04")
10. nexusに表示されている富士山画像上でトレーニングエリアを取るデモを行う。(8'00")
11. 最短距離法による分類手法についての説明をnexusに模式図(図II-3-6(e))を表示しながら行う。植物、土、水3種類の物体について、MSSバンド4と7の2バンドのスキューターグラムのモデルを表示し、そのグラフ上で任意の点がどのクラスに近いかを示すことにより分類の概念を説明する。未分類ピクセルについても解説する。(9'28")
12. 実際に富士山画像を8つのカテゴリーに分類する作業を行う(図II-3-6(f))。(12'55")

これまでこのデモを何人かのリモートセンシング未経験者に見せたところ、解説と画像が別々の画面に表示され、進行のテンポも比較的速いので、片方の画面に気を取られていると場面が次々と進んでいってしまい、途中で一時止めて解説をつけ加えなければならぬことが何回かあった。現在のシステムは、nexusに2ユニット(8枚)のイメージ

レーンしか実装していないので、最後の画像分類に時間がかかる（3分半程度）ため、この時間中に解説を加えている。

ヴォイスリーダなどの機器を使用すれば上のような問題は解決すると思われるが、いずれにせよ、リモートセンシングの原理と分類手法の解説を目的としたデモンストレーションとしては十分な内容を持つものであると考えている。

(2) 経年変化の観察

インドネシア東カリマンタン州サマリダ市を中心とした地域の経年変化を観察するデモンストレーション。所要時間は3'23"。

はじめに対象地域の1987年撮影SPOT HRVデータを使って土地利用の説明を行ったあと（2'28"）、1985年撮影のランドサットMSSデータを重ね合わせて、2年間の森林の変化を観察する（2'48"）。最後に、SPOTデータを使った分類画像の表示を行う（3'23"）。一部、森林総合研究所鷹尾元氏の作成した解説ルーチンを使用している。

II-3-6 FREDAM フォーマット

(1) 画像ファイル

画像ファイルは次の2種類のファイルから成り立っている。なお、画像データには1ピクセル1バイトのものと、1ピクセル2バイトのものがある。

a. 画像ヘッダファイル

画像ヘッダファイルはアスキーテキストで、画像データの大きさやコメントなどの情報のみを内容とするファイルである。ヘッダの詳細な内容は以下に示したようになっている。1ピクセル1バイトの画像データについては、ファイルの拡張子を「.HDR」、2バイトの画像データについては「.HD2」の拡張子を持ち、256（+2）バイトの大きさである。ここで（+2）は、コンピュータファイルのファイル終了識別子が付加された場合である。拡張子以外のファイル名は画像データファイルと共通である。

- 1) IDナンバー（4バイト） [1～4]
- 2) RUNナンバー（4バイト） [5～8]
- 3) チャンネル総数（4桁） [9～12]
- 4) プログラムID（4バイト） [13～16]
- 5) カラム総数（4桁） [17～20]
- 6) ライン総数（4桁） [21～24]
- 7) ファイル作成またはオリジナルデータ取得年（4桁） [25～28]

- 8) ファイル作成またはオリジナルデータ取得月 (2桁) [29 ~ 30]
- 9) ファイル作成またはオリジナルデータ取得日 (2桁) [31 ~ 32]
- 10) 画像左上開始ライン番号 (4桁) [33 ~ 36]
- 11) 画像右下終了ライン番号 (4桁) [37 ~ 40]
- 12) ライン間隔 (4桁) [41 ~ 44]
- 13) 画像左上開始カラム番号 (4桁) [45 ~ 48]
- 14) 画像右下終了カラム番号 (4桁) [49 ~ 52]
- 15) カラム間隔 (4桁) [53 ~ 56]
- 16) コメント (80バイト) [57 ~ 136]
- 17) アノテーション (120バイト) [137 ~ 256]

ここで、() バイト表示は文字型、桁表示は整数型、[] はバイト番号を表す。
 ~~~~~ 部分は必須である。

#### b. 画像データファイル

画像データファイルはバイナリファイルで、画像データのみを内容としている。各バンド(チャンネル)につき1ファイルを持ち、バンド順に拡張子が「.B1」、「.B2」、「.B3」・・・となっていて、Bのあとの数字でバンド名を識別するようになっている。いわゆるBSQ形式である。MS-DOSでは拡張子は最大3文字なので、可能な最大バンドは99バンドとなる。

データは画像の左上からライン順に書き込まれ、ライン毎の区切りはない。したがって、1ピクセル1バイトの場合は、1つのデータは0~255までの256( $2^8$ )段階を表現することができ、ファイルの大きさはカラム数×ライン数(+2)バイトとなる。1ピクセル2バイトの場合は、1つのデータは0~60525の60526( $2^{16}$ )段階を表現し、ファイルの大きさはカラム数×ライン数×2(+2)バイトとなる。

このファイルはN<sub>88</sub>-BASICではシーケンシャルファイルとして、PC-FORTRANではランダムファイルとして扱うことができる。

画像ファイルの形式は以上のようにになっている。ファイルの命名法は具体的には、「TOKYO948」という1ピクセル1バイト、512カラム×480ライン、4バンドの画像に対しては、

- TOKYO948.HDR : 256(+2)バイトの画像ヘッダファイル
- TOKYO948.B1 : 245,760(+2)バイトのバンド1画像データファイル
- TOKYO948.B2 : 245,760(+2)バイトのバンド2画像データファイル

TOKYO948.B3 : 245,760 (+2) バイトのバンド 3 画像データファイル

TOKYO948.B4 : 245,760 (+2) バイトのバンド 4 画像データファイル

あわせて 5 つ、983,296 (+10) バイトのファイルが存在する。

このような全く特殊化を行わない画像データ形式にしたことで、ユーザが作成するプログラムからのデータアクセスを単純化することができる。また、ヘッダファイルはテキストなので、通常のエディタプログラムから作成・修正が可能で、コメントなどの付加が容易である。

## (2) トレーニングエリア座標ファイル (フィールド座標ファイル)

II-3-2(4) および II-3-3(3) のトレーニングエリア設定の際に作成される、トレーニングエリアの座標情報が含まれる。BASIC のランダムアクセスファイル (固定長 256 バイト) で、レコード 1 にファイルの内容が、レコード 2 以降にトレーニングエリアの座標値が 1 レコードにつき 1 カ所格納されている。拡張子は特に指定されていない。

### レコード 1

- 1) データ形式 (バイナリ、1 バイト)
- 2) マトリクスサイズ x,y (バイナリ、各 1 バイト)
- 3) トレーニングエリア個数 (バイナリ、1 バイト)
- 4) コメント (アスキー、30 バイト)

### レコード 2 ~ (トレーニングエリア総数個)

- 1) トレーニングエリア名 (アスキー、10 バイト)
- 2) エリア左上座標 x,y (バイナリ、各 2 バイト)
- 3) エリア右下座標 x,y (バイナリ、各 2 バイト)

## (3) トレーニングエリア統計量ファイル (フィールド統計量ファイル)

II-3-2(4) および II-3-3(3) でトレーニングエリアの統計量を計算した場合に作成されるファイル。BASIC のランダムアクセスファイル (固定長 256 バイト) で、レコード 1 にファイルの内容が、レコード 2 以降にトレーニングエリアの統計量が 1 レコードにつき 1 カ所格納されている。拡張子は特に指定されていない。

### レコード 1

- 1) トレーニングエリア個数 (バイナリ、1 バイト)
- 2) 計算に使用したチャンネル総数 (バイナリ、1 バイト)
- 3) チャンネル番号 1 ~ 6 (バイナリ、各 1 バイト、計 6 バイト)
- 4) コメント (アスキー、30 バイト)

レコード2～ (トレーニングエリア総数個)

- 1) トレーニングエリア名 (アスキー、10バイト)
- 2) エリア内のピクセル数 (バイナリ、2バイト)
- 3) 以下の項目がチャンネル総数組
  - ・データの総和 (バイナリ、4バイト)
  - ・データの平均値 (バイナリ、4バイト)
  - ・データの2乗和 (バイナリ、4バイト)
  - ・データの最大値 (バイナリ、1バイト)
  - ・データの最小値 (バイナリ、1バイト)
- 4) 共分散行列  $ij$  ( $ij=1 \sim$ チャンネル総数、バイナリ、各4バイト)

#### (4) クラス統計量ファイル

II-3-3(3)で、トレーニングエリアを統合してクラスを作成した場合に作成される、クラス統計量が格納されたファイル。BASICのランダムアクセスファイル(固定長256バイト)で、レコード1にファイルの内容が、レコード2以降にクラスの統計量が1レコードにつき1カ所格納されている。拡張子は特に指定されていない。

レコード1

- 1) クラス個数 (バイナリ、1バイト)
- 2) 計算に使用したチャンネル総数 (バイナリ、1バイト)
- 3) チャンネル番号1～6 (バイナリ、各1バイト、計6バイト)
- 4) コメント (アスキー、30バイト)

レコード2～ (クラス総数個)

- 1) クラス名 (アスキー、10バイト)
- 2) クラス内のピクセル総数 (バイナリ、2バイト)
- 3) 以下の項目がチャンネル総数組
  - ・データの総和 (バイナリ、4バイト)
  - ・データの平均値 (バイナリ、4バイト)
  - ・データの2乗和 (バイナリ、4バイト)
  - ・データの最大値 (バイナリ、1バイト)
  - ・データの最小値 (バイナリ、1バイト)
- 4) 共分散行列  $ij$  ( $ij=1 \sim$ チャンネル総数、バイナリ、各4バイト)
- 5) クラスに属するフィールド個数 (バイナリ、1バイト)
- 6) クラスに属するフィールド番号 (バイナリ、各1バイト)



(5) シュードカラーテーブルファイル

II-3-2(1)のシュードカラー表示でカラーテーブルを作成した際に、そのパラメータを保存する。BASICのアスキー CSV シーケンシャルファイルで、拡張子は「.COL」固定で以下の内容を持つ。

- 1) データレンジ
- 2) カラーレジスタの値  $R_1, R_2, R_3, G_1, G_2, G_3, B_1, B_2, B_3$
- 3) カラーコード 1 ~ 63
- 4) コメント

(6) ルックアップテーブルファイル

II-3-2(2)(3)でルックアップテーブルを作成した際に、そのパラメータを保存する。BASICのアスキー CSV シーケンシャルファイルで、拡張子は「.LUT」固定で以下の内容を持つ。

- 1) RED 用 LUT テーブル (0 ~ 255)
- 2) GREEN 用 LUT テーブル (0 ~ 255)
- 3) BLUE 用 LUT テーブル (0 ~ 255)
- 4) コメント

(7) MTパラメータファイル

II-3-4(1)でCCTからのデータ切りだしを行う際に、そのパラメータを保存するファイル。BASICのアスキーシーケンシャルファイルで、拡張子は「.DST」固定で以下の内容を持つ。各データ間はスペースで区切られている。

- 1) パラメータファイル名
- 2) TM (テープマーク) の個数
- 3) ブロック長
- 4) イメージデータ開始ライン
- 5) イメージデータ開始ピクセル
- 6) チャンネル数
- 7) データ切り出し開始ライン
- 8) データ切り出し開始ピクセル
- 9) データ切り出しライン数
- 10) データ切り出しピクセル数

- 11) ラインサンプリング間隔
- 12) ピクセルサンプリング間隔
- 13) FREDAM 画像ヘッダファイルのチャンネル数
- 14) FREDAM 画像ヘッダファイルのコメント

(8) ラジオメトリック補正パラメータファイル

II-3-3(1) で使用する循環回帰係数が格納される。アスキーシーケンシャルファイルで、拡張子は「.SBn」（n：チャンネル名）固定である。先頭 8 文字のファイル名は元の画像ファイルと共通となる。ファイル内には、最初にベースとなるディテクタ番号、そのあとにそれぞれのディテクタについての回帰式

$$Y=a+bX$$

ここで、X：未補正の CCT 値、Y：補正後の CCT 値  
 の回帰係数 a、b が順に 6 組格納されている。

(9) GCP ファイル

II-3-3(2) で画像の地理補正を行う場合に使用する GCP を格納する。アスキーシーケンシャルファイルで、拡張子は「.GCP」固定。変換の方法によって 2 種類のフォーマットがある。

a) GCP を地図上を取る場合（画像対地図の地理補正）

レコード 1

- 1) GCP 総数×-1（整数 5 桁、右寄せ）

レコード 2

- 1) 補正後画像の左上経度（10 進数実数 10 桁）
- 2) 補正後画像の左上緯度（10 進数実数 10 桁）
- 3) 経線方向のメッシュサイズ（m 単位、実数 10 桁）
- 4) 緯線方向のメッシュサイズ（m 単位、実数 10 桁）

レコード 3～（GCP の総数個）

- 1) 未補正画像上の GCP X 座標（実数 10 桁）
- 2) 未補正画像上の GCP Y 座標（実数 10 桁）
- 3) 地図上の GCP の経度（実数 10 桁）
- 4) 地図上の GCP の緯度（実数 10 桁）

b) GCP を画像に取る場合（画像対画像の地理補正）

レコード 1

1) GCP 総数 (整数 5 桁、右寄せ)

レコード 2 ~ ( GCP の総数個)

1) 未補正画像上の GCP X 座標 (実数 10 桁)

2) 未補正画像上の GCP Y 座標 (実数 10 桁)

3) 補正済み画像上の GCP X 座標 (実数 10 桁)

4) 補正済み画像上の GCP Y 座標 (実数 10 桁)

(10) 地理変換パラメータファイル

II-3-3(2) で変換係数を計算した際に作成される。アスキーシーケンシャルファイルで、拡張子は「.GPR」固定。変換係数の計算を行うと、3種類の座標変換式(1次、共1次、共2次)のパラメータを計算するので、ファイルにはこれら3式の値が書かれる。入力したGCPの地図座標の平均値を $(x_m, y_m)$ 、座標変換式の番号を $F_i$  ( $i=1, 2, 3$ )、変換式のパラメータ個数を $N_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) (ただし $N_1=3, N_2=4, N_3=6$ )、 $x, y$ についての3式を、

$$\begin{cases} x' = ax + by + c_1 \\ y' = az + bz + c_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x' = axy + bx + cy + d_1 \\ y' = axy + bx + cy + d_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x' = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f_1 \\ y' = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f_2 \end{cases}$$

とすると、ファイルには以下のように出力される。

$x_m, y_m$  (2F12.5)

$F_1, N_1$  (2I5)

$a_1, b_1, c_1$  (3E20.8)

$a_2, b_2, c_2$  (3E20.8)

$F_2, N_2$  (2I5)

$a_1, b_1, c_1, d_1$  (4E20.8)

$a_2, b_2, c_2, d_2$  (4E20.8)

$F_3, N_3$  (2I5)

$a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$  (6E20.8)

$a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2$  (6E20.8)

ここで、()内は数値の表示形式をFORTRAN式に表したもので、1行が1レコード



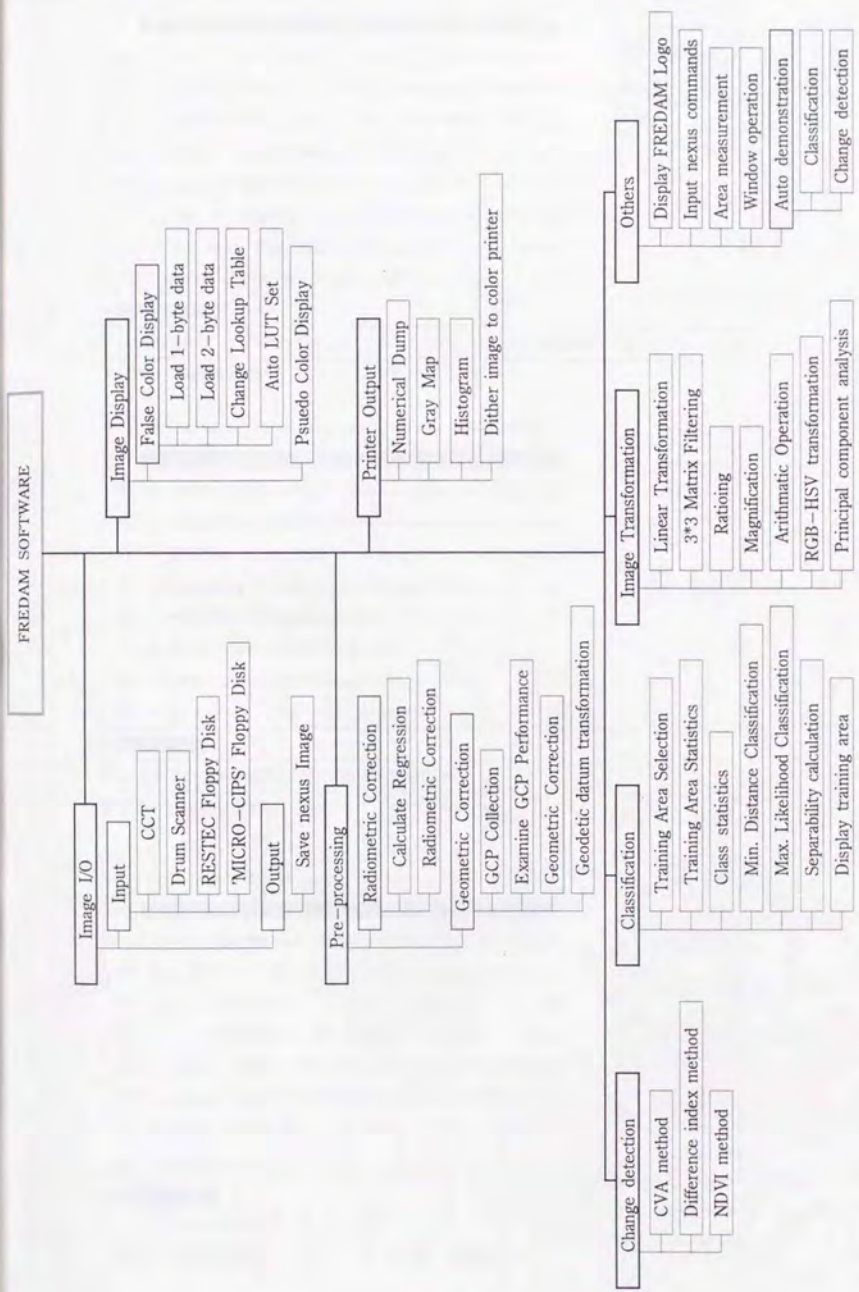


図 II -3-1 FREDAM ソフトウェア構成

|    |                                                         |                                                           |
|----|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| F1 | • <b>DISPLAY IMAGE on nexus 6000</b> *****              | 日付:<br>1994-08-12<br>時刻:<br>12:17<br>MS-DOS:<br>Ver. 3.30 |
| F2 | • LOOK UP TABLE HANDLER for nexus 6000 .....            |                                                           |
| F3 | • AUTOMATIC LOOK UP TABLE SET for nexus 6000 .....      |                                                           |
| F4 | • TRAINING AREA SELECTION for nexus 6000 .....          |                                                           |
| F5 | • DISPLAY TRAINING AREA on nexus 6000 .....             |                                                           |
| F6 | • nexus GP-1B HANDLER .....                             |                                                           |
| F7 | • MINIMUM DISTANCE CLASSIFICATION with nexus 6000 ..... |                                                           |
| F8 | • SAVE nexus 6000 IMAGE .....                           |                                                           |
| F9 | • WINDOW OPERATION for nexus 6000 .....                 |                                                           |

A) **DISPMENU.EXE!**

nexus画面にフォールスカラー、シュードカラー、2バイト画像表示を行います

矢印キーで項目を選択し、リターンキーを押してください

|    |                                                             |                                                           |
|----|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| F1 | • <b>AREA MEASURING with nexus 6000 &amp; PLOTTER</b> ***** | 日付:<br>1994-08-12<br>時刻:<br>12:19<br>MS-DOS:<br>Ver. 3.30 |
| F2 | • FREDAM-CIPS .....                                         |                                                           |
| F3 | • RADIOMETRIC CORRECTION .....                              |                                                           |
| F4 | • GEOMETRIC CORRECTION .....                                |                                                           |
| F5 | • Geographic Projection Transformation.....                 |                                                           |
| F6 | • PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS .....                        |                                                           |
| F7 | • SEPERABILITY CALCULATION .....                            |                                                           |
| F8 | • SUPERVISED CLASSIFICATION .....                           |                                                           |
| F9 | • CCT SUBSECTIONING ( MT => FREDAM ) .....                  |                                                           |

A) **MEASURE.EXE!**

nexusタブレットを使用して面積計測を行います

矢印キーで項目を選択し、リターンキーを押してください

|    |                                                    |                                                           |
|----|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| F1 | • <b>DRUM SCANNER</b> .....                        | 日付:<br>1994-08-12<br>時刻:<br>12:21<br>MS-DOS:<br>Ver. 3.30 |
| F2 | • FILE CONVERSION ( MICRO-CIPS => FREDAM ) .....   |                                                           |
| F3 | • FILE CONVERSION ( RESTEC (DOS) => FREDAM ) ..... |                                                           |
| F4 | • FILE CONVERSION ( *SAHADA => FREDAM ) .....      |                                                           |
| F5 | • FILE CONVERSION ( RESTEC (IBM) => FREDAM ) ..... |                                                           |
| F6 | • FREDAM LOGO display .....                        |                                                           |
| F7 | • FREDAM CLASSIFICATION DEMO.....                  |                                                           |
| F8 | • FREDAM CHANGE DETECTION DEMO.....                |                                                           |
| F9 | • PC-TCP .....                                     |                                                           |

A) **FRSDRUM.EXE!**

ドラムスキャナからの入力を行います

矢印キーで項目を選択し、リターンキーを押してください

図 II - 3 - 2 FREDAM のメニュー画面

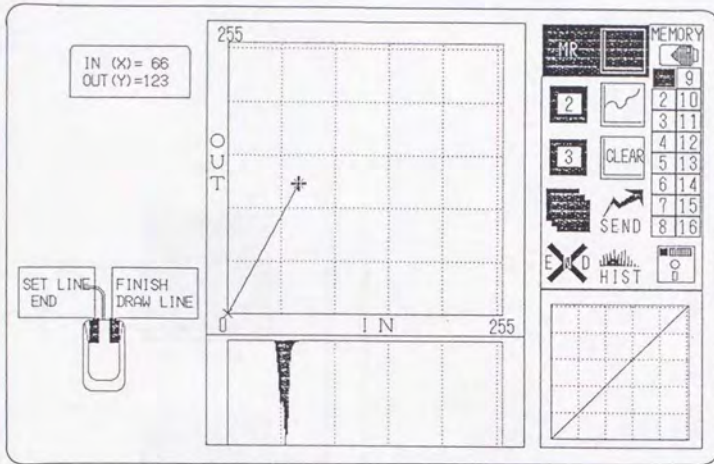
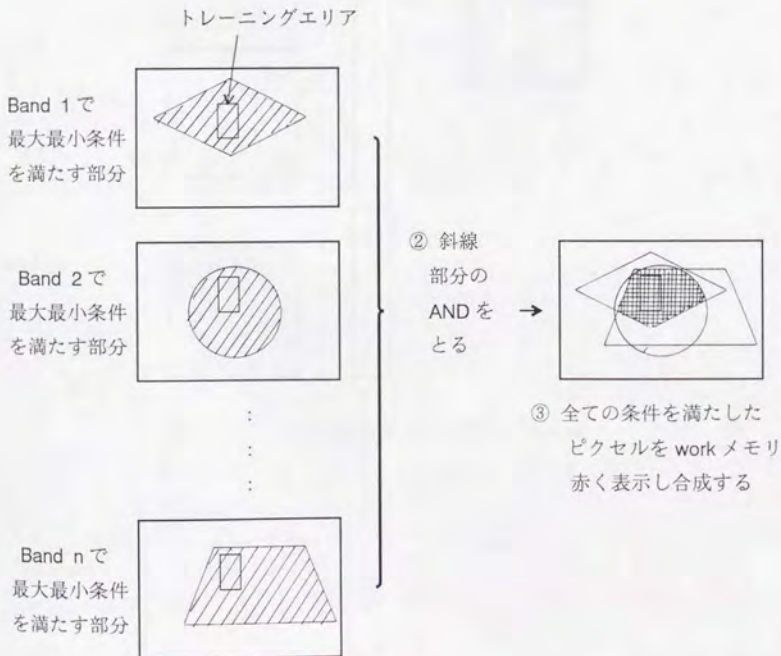


図 II - 3 - 3 LUT 設定画面



- ① バンド毎にトレーニングエリア内の  
最大・最小値を取得する

図 II - 3 - 4 アラーム表示の原理



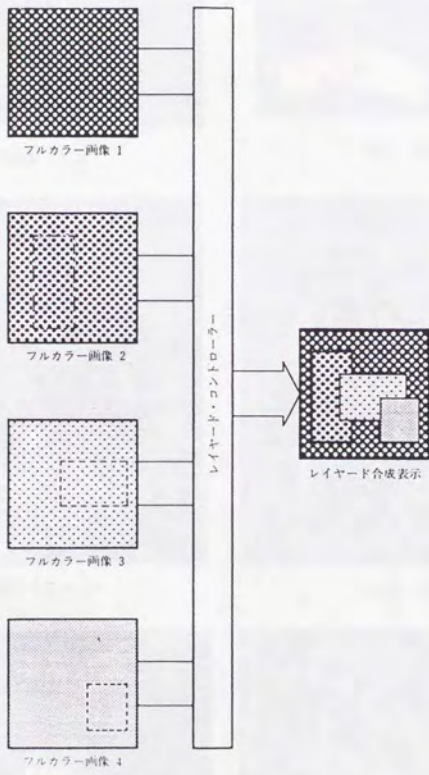
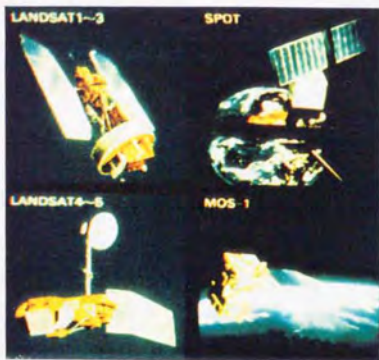


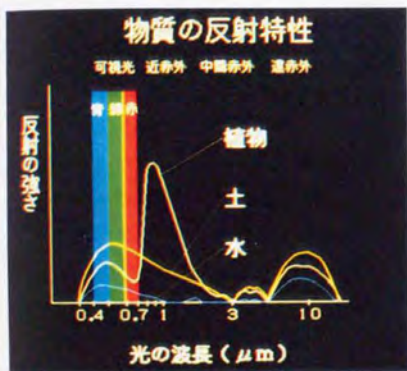
図 II - 3 - 5 nexus レイヤードコントロール



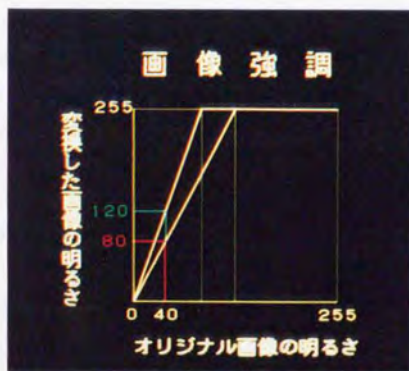
(a) FREDAM ロゴ



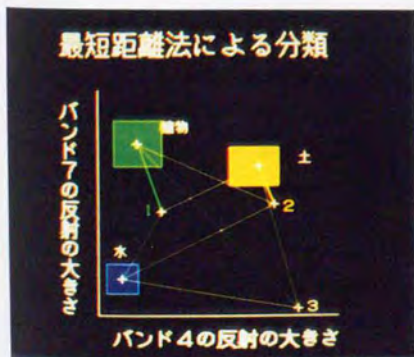
(b) 衛星外観図



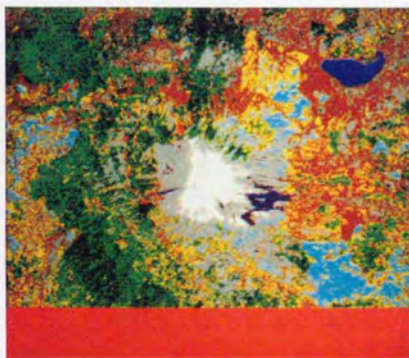
(c) 分光反射パターン



(d) LUT の解説



(e) 最短距離法の解説



(f) 分類画像

図 II - 3 - 6 リモートセンシングと画像分類のデモ画面



## II-4 今後の FREDAM の課題

以上、ハードウェアの構成や変遷、ならびにソフトウェアの概要を見てきた。ハードウェアの発達にともない、使用機材は異なってきたが、イメージプロセッサ (nexus) を中心としたパソコンシステムであることに変わりはない。CPU の高速化、外部記憶装置やメモリの大容量・高速化により、プロトタイプの FREDAM-PIPS と比較すると現在のシステムはかなりレスポンスの早い使いやすいものになっていると言える。また、森林のリモートセンシングデータを解析するために考案されたアルゴリズムをプログラム化したものが中心となっているため、森林用の解析システムとして充実しつつある。

このように、このシステムは研究用としては使いやすいものであると考えられるが、欠点としては、比較的高価なイメージプロセッサを使用しているために気軽に導入できないこと、画像サイズの基本がイメージプロセッサにあわせて  $512 \times 480$  ピクセルと小さいことがまず挙げられる。また、ベクトルデータの扱いや GIS 的機能の強化など、さらなるシステムの発展のためには取り入れるべき要素が数多く考えられる。しかし、この章の最初にも述べたように、現在ではパソコン、ワークステーション共に市販の優秀な画像解析システムが数多く市販されている。

リモートセンシングの研究を始める者が、現在最初に触れるのが市販の画像解析システムである。これらの「完成」されたシステムでは、利用者はコマンドを入力することで画像データに対し何かしら手を加え、「画像処理」を行うことができる。しばらく前までは、初心者はずまずコンピュータ言語の習得から始め、試行錯誤しながらプログラムを完成させて始めて画像処理を行うことができた。効率や生産性という面では現在の方が優れていることは論を待たないが、反面そのシステムを持っている処理手法のみに甘んじてしまう危険性や、不必要な加工までしてしまう可能性を指摘することができる。

したがって、一般的な解析アルゴリズムや、大きなサイズの画像の定型的な処理はそういったシステムで行い、FREDAM は新たなアルゴリズムの開発や、大きなエリアの処理を定型的に行うために小面積でテストを行う、といった、研究開発用に小回りのきくシステムとして利用価値 (存在価値) を見いだしてゆくべきであろう。



### 第三章 GPSを使ったグランドトゥルース

#### III-1 はじめに

衛星リモートセンシングを利用して森林資源調査を行うためには、現地調査が必要不可欠であるが、地上調査のポイントを画像データ上での確に押さえることは、特に、はっきりとした目印のない森林内では非常にむずかしい。そこで、人工衛星からの電波を受け測位を行う GPS が、上記の目的のためにどの程度有効であるかを検証した。

GPS を利用した測位には、受信機単体で行う単独測位と、2 台以上を組み合わせて行うディファレンシャル測位がある。手法によって期待できる精度や、制限要因が異なるので、まず、それぞれの手法によってどのような結果が得られるかについて検討を行った。そして、その結果を利用して実際にリモートセンシングデータからグランドトゥルース地点のデータ抽出を行い、森林内での GPS 利用の可能性を調べた。

単独測位法やディファレンシャル測位法における精度については解説書（日本測地学会 1989、土屋他 1991）や報告（August et al. 1994、瀬戸他 1992、Trenz et al. 1993、上平他 1992）などが多数出版されているが、森林内での測位を主目的としたものは見あたらない。山本他の一連の研究（山本他 1989、後藤他 1989、山本他 1990、前川他 1990、前川他 1991）も林外での精度の検討に止まっている。しかし、われわれが利用する場合は森林が使用場所となるので、そこでの使い勝手や限界などを知る必要がある。また上記の文献の多くは、高価格の測量用 GPS 受信機を用いたケースが多いが、比較的低価格の受信機を日常業務に使用することの方が、導入の容易さからいっても可能性が高い。

解析にあたっては、GPS 基線解析には GPS 受信機付属のソフトウェアを用い、測地座標系の変換やリモートセンシングデータの抽出は FREDAM に含まれるプログラムで行った。

## Ⅲ-2 GPSとは

### Ⅲ-2-1 システム構成

GPS: Global Positioning System「汎地球測位システム」とは本来、高速で移動する船舶や航空機、ロケットなどが自機の位置をリアルタイムで把握するために開発された衛星ナビゲーションシステムである。正式名称は NAVSTAR/GPS「時刻同期と測位のための航法衛星/汎地球測位システム」: Navigation Satellite Timing and Ranging/ Global Positioning System といい、合衆国防総省 (DOD) によって運営・管理がおこなわれている。1970年代に計画・開発が開始され、1989年からは実用衛星の打ち上げが始まり、1993年に衛星の完全配置が完成し、正式運用がアナウンスされた。

システムは3つの部分から成り立っている(図Ⅲ-2-1)。1つはスペースセグメントで、高度約20,200kmの6つの円軌道に11時間58分で周回する24個の衛星が配置され、地球上のどの地点からでも最低4機(通常5機以上)の衛星を観測可能であることが保証されている(図Ⅲ-2-2)。2つめはコントロールセグメントで、これらの衛星を監視するステーションである。世界中に5カ所設置され、合衆国のコロラドスプリングスがマスターステーションとなっている。3つめは実際にGPSを利用するユーザーで、ユーザーセグメントと呼ばれる。特別な使用料はないので、受信機さえあれば誰でも利用可能である。

GPSを使用すると、地球上のほぼ全地域で、全天候下で、24時間、連続的に3次元測位をおこなうことができる。精度もほぼ一定値に抑えることができ、特殊な使用方法を採用すれば精密測量も可能である。GPSによる測量は、測位ポイント1点1点で行われるので、長区間の測量でも従来測量のような誤差伝播が起こることはない。つまり、併合誤差が何分の一といった評価法は全く意味をなさないのである。その点で従来からの測位の概念とは全く異なった手法であると言える。

また、衛星には原子時計が搭載されているので、大陸間などの遠く離れた地点同士で  $0.1 \mu\text{s}$  ( $10^{-6}$ 秒)の精度で時計の正確な時刻同期をおこなうことができる。GPS受信機についても、アンテナを含めハンドヘルドの小型なものとなることができ、取り扱いやすい。しかし前述のDODによる管轄は、軍事用を主目的としているので、有事の際の保証が完全になされているとはいえない。とはいえ、合衆国運輸省が民間航空機の着陸支援に正式に採用するなど、軍事目的より先行して民間での利用が本格化している現在、DODでも安易な変更ができない状況になっている。



### Ⅲ-2-2 GPSによる測位

#### (1) GPSの信号

GPSの信号は、L1、L2と呼ばれる2つの周波数の電波を用いて衛星から送信されている。民生用として一般に使用されるのはL1帯で1575.42MHz、波長約19cmで、軍事目的とされているL2帯は1227.60MHz、波長24cmである。電波にはコード信号と航法メッセージが位相変調されて乗せられている。コード信号には民生目的として利用できるC/Aコード：Coarse/Acquisition codeと軍事目的のPコード：Precise codeがあり、C/AコードはL1帯に、PコードはL1、L2帯の両方に送られる。コード信号は衛星からその信号が発射された時刻の情報が暗号化されているため、この暗号を解読することによって衛星から受信機まで電波が到達するのに要した時間を知ることができる。C/AコードよりPコードの方が周波数が高い（C/Aコードは1.023MHz、Pコードは10.23MHz）ので、後者の方が精密に測定することが可能である。暗号解読の方法がC/Aコードでは公開されているが、Pコードでは原則として非公開なので一般には使うことができないとされている。現在ではPコードを暗号化したYコードも使用されている。

航法メッセージは両帯で送られ、衛星自身の軌道情報や時刻の補正情報、健康状態情報であるエフェメリス：ephemerisと全衛星のおよその軌道情報であるアルマナック：almanacが含まれる。

#### (2) 単独測位：point positioning

最も一般的なGPSの使用法で、受信機のある地点の地理座標（緯度、経度、高さ）をリアルタイムに測位する方法である。単独測位は図Ⅲ-2-3に示すように、測位点で同時に4機からのGPS衛星の電波を受信し、それぞれの衛星までの距離と、それぞれの衛星の位置を知ることにより行われる。衛星までの距離（疑似距離：psuedorange）は、信号を解読することによって得られる電波の発射時刻と、受信機内蔵時計で計測される受信時刻の差をとることにより伝達時間を計算し、それに光速を乗ずることによって知ることができる。このようにして得られる位置情報の精度は、衛星の配置状態、衛星の軌道情報の精度、大気や電離層の状態、受信機の内部誤差などによって影響を受け、2次元で民生用C/Aコードでは100m、軍事用Pコードでは16m程度とされている。さらに現在では、C/AコードにはSA：Selective Availabilityがかけられており、これが精度に大きく影響を与えている。SAはDODが国防上の理由で故意に精度を劣化させるための機能で、これにより実際の精度は200m程度となっている。高さの精度は2次元よりも幾分悪くC/Aコードで150m程度とされている。精度が100mとは具体的には、表示される測位値が、真値を中心とした100mの直径の円内に63%、100m半径の円内に98%の確率で入るということを意味する。



4機の衛星が作る4面体を考えたとき、その体積が大きいほど精度が向上する。つまり1ないし2機は比較的高高度に、残りの3ないし2機は低高度に位置するのがよい。そこで、衛星の配置状態が測位精度に及ぼす影響をDOP: dilution of precisionという指標で表す。最もよい場合が1で、値が大きくなるほど精度が低くなる。この値が4~6以下なら実用上問題はない。一般的に使用されるDOPにはGDOP「幾何学的精度低下率」: Geometric DOPとPDOP「位置精度低下率」: Position DOPがある。GDOPは

$$GDOP^2 = (PDOP)^2 + (TDOP)^2, \text{ ここで } TDOP: \text{Time DOP}$$

と表される。

普通DOPは、受信機に付属の解析ソフトウェアで計算することができる。表Ⅲ-2-1にMagellan Systems社のGPS NAV 5000 PROのソフトウェアで出力した衛星スケジュールとPDOPの結果を示す。1994年5月30日午後に東京大学農学部1号館森林経理学研究室上(北緯35度42分45秒3591・東経139度45分45秒3295。これは東京測地系での値。WGS-84測地系では北緯35度42分57秒0240・東経139度45分33秒6677となる)で観測可能な衛星の高度と仰角、そしてPDOPのよい衛星の組み合わせが最大4つ、15分毎に計算される。受信機の周囲の状況によっては、障害物や地形の関係で衛星が隠されてしまう場合があり、精度よい測位のためにはこれら2つの情報が必要である。簡易型のGPS受信機では、観測する衛星を選択することができないものがあるが、選択可能な場合はDOPは必須情報である。

### (3) 相対測位: differential positioning

ディファレンシャル測位とは、2地点で同時に測位を行い、2地点間の相対的な位置関係を求める方法である。2地点間の相対関係を知りたいだけなら付加情報は不要であるが、地理座標を正確に知りたい場合はどちらかの点の地理座標が既知である必要がある。このとき正確な地理座標の既知な地点を固定局(コントロールポイント)、測位をおこなう点を移動局(リモートポイント)という。ディファレンシャルには、単独測位の原理を用いておこなう方法(トランスロケーション方式)と、搬送波(carrier: GPS信号の電波)の位相とドップラーシフトを観測しておこなう方法(干渉測位方式)がある。いずれも単独測位で得られるよりも1桁以上よい精度が得られ、急速に普及し始めている。しかし、単独測位とは異なり、通常は2地点の測位データを持ち寄り座標計算をおこなう必要があるのでリアルタイムで結果を得ることはできない。また、両局の間で受信開始や受信状況などを常にトランシーバなどで通信する必要があること、測位データがかなりの大きさを持つこと、測位に必要なGPS衛星の配置状態をあらかじめ確認し調査スケジュールをたてておく必要があることなど、単独測位法にくらべて制約が大きい。

#### a. トランスロケーション方式

2カ所で同時に単独測位を行い、各点の地理座標を得た後、これらの座標値を比較(減

算)すれば、互いの相対位置関係が求められる。単独測位の精度は100mとされているので、減算後の精度はこれより悪くなるはずだが、実際には精度が改善される。その理由は、単独測位の誤差要因にある。つまり、軌道情報の誤差や大気の状態などが同時観測で共通なため、減算によりこれらの影響が相殺され、結果として精度は1~5m程度になることが期待される。測位結果を外部出力できるものであれば特別な受信機は必要でなく、単独測位の組み合わせで実現が可能である。

原理的には以上のようになるが、そのままではリアルタイムに結果を知ることができない。そこで現在合衆国ではリアルタイムディファレンシャルを実現するために、基準局からの情報送信ネットワークが整備されつつある。これは、あらかじめ正確な地理座標が判明している(各地に存在する)基準局において、各衛星からの疑似距離、時刻情報や軌道情報から誤差成分を計算し、それを補正值として送信する。利用者はGPS受信機で付近の基準局からの補正值を受信し、GPS信号の補正をリアルタイムに行うのである。このサービスはFM多重放送などにより有償(民間会社)または無償(合衆国沿岸警備隊、連邦航空局など)で運用あるいは計画が行われている。

この手法により、船舶の入港時や航空機の空港進入時の位置測定や誘導などのサービスに実用化が開始されている。

#### b. 干渉測位方式

干渉測位は、静的干渉測位: static DGPS とキネマティック方式: kinematic DGPS が代表的なものとしてあげられる。いずれも精度は数cm以下(前者の方がよい結果が得られる)が期待され、測量技術として実用的に使用されている。前者は各点を数時間かけて観測するので高精度の基準点測量に、後者は1点を1分程度で観測できるので移動しながら多数の点を測量する工事測量などに用いられる。原理的には違いはなく、目的に応じた応用がなされているといえる。

図Ⅲ-2-4に示すように干渉測位では、測量しようとする基線の両側に全く同じ受信機を設置し、同時に同じGPS衛星を観測する。(なお、図では1機の衛星しか描かれていないが、実際は最低4機の衛星を利用する。)衛星から発射された搬送波は、衛星を中心とした球面上に広がり、まず衛星に近い方の受信機に到達し、その後遠い方に到達する。この差の部分に搬送波の波がいくつあるかを、波の位相などをもとに小数点以下まで測定する。この差の長さを行路差という。行路差は、衛星の位置と基線の長さおよび方向(基線ベクトル)によって決まる値である。ところが上述のように行路差は実測され、衛星の位置は軌道情報をもとに計算できるので、基線ベクトルを求めることができる。これを基線解析という。

本質的には以上のような方法で測位が行われるが、行路差を測定する際の位相差の整数部分(整数値バイアス)を確定することができない。そのために長時間の観測を行ったり、



衛星の移動によるドップラー効果を利用したりして正確なバイアスを決定する。また、受信機ごとの時計の違いも行路差測定に影響を与えるが、2機の衛星を同時に観測してその誤差を消去する（二重位相差：double difference）など、実際にはさまざまなテクニックが利用されている。このあたりは、採用する測位方式や受信機とソフトウェアのアルゴリズムによって異なっている。

前出の Magellan 社の受信機では、carrier phase によるディファレンシャル測位を行うことができる。この測位法の場合も、衛星の配置状態が測位精度に大きな影響を与えるので、ここでは CPDOP: carrier phase DOP とよばれる指標によって、選択すべき衛星の組み合わせを決定するようになっていいる。表 III-2-2 に表 III-2-1 と同様の条件で CPDOP の良好な組み合わせの出力結果を示す。PDOP の組み合わせとは全く異なっているのは、この測位法で必要となる衛星配置の条件が単独測位の場合とは異なっているためである。すなわち、天空近くに3機の衛星が異なる方向へ向かい、低高度付近に上昇中の衛星が1機ある場合ほど精度が良好になる。この値が20以下であれば問題はなく、44以下で測位可能とされている。

### III-2-3 測地座標系

GPS 測位の精度検定のためには、まず GPS や測量に用いられている測地座標系と、地図投影法について知っておく必要がある。特にメートル以下の精密な測量結果を評価するためには、これらの違いが成果に及ぼす影響を無視できないからである。

#### (1) GPS の測地座標系と日本の測地座標系

地球上の位置を表す測地座標系（緯度・経度・高さ）にはさまざまなものがあり、国や地域によって異なったものが採用されている。地球を回転楕円体として考え、実際の地球に楕円体を固定することによって、地表の点が楕円体を基準とした3次元の直交座標系で表されるが、測地座標系が違うということは、用いている楕円体（準拠楕円体という）の形と原点の位置が異なっているということができる。日本では東京測地系：Tokyo Datum という測地座標系が採用されている。明治時代から日本全国に整備されてきた三角点はこの測地系の座標値を持っている。しかしこれは日本だけに通用する測地系で、例えば合衆国では NAD-83: North American Datum 1983 が採用されている。たとえ地球上の同一点でも、別の測地系を使うと全く異なった座標値として表されてしまう。それぞれの国の中だけで完結している分には不都合は起きないが、全地球を統一的な座標系で表現したい場合には全く役に立たない。そこで GPS では WGS-84: World Geodetic System 1984 という測地座標系が採用された。

東京測地系は、測量法により準拠楕円体として Bessel 楕円体（赤道半径



6,377,397.155m、偏平率  $1/299.152813$  ) が採用され、日本経緯度原点として東京都港区にある旧東京天文台子午環の中心点(東経 139 度 44 分 40 秒 5020、北緯 35 度 39 分 17 秒 5148、原点方位角 156 度 25 分 28 秒 442) が定められた。一方 WGS-84 測地系は、赤道半径 6,378,137m、偏平率  $1/299.152813$  の楕円体に準拠し、楕円体の中心を地球の重心に一致させ、グリニジ基準子午面方向を X 軸、地球自転軸を Z 方向としている。したがって、GPS による測位結果はそのままでは東京測地系の値と一致しない。WGS-84 と東京測地系の変換については変換式が定義されており、つくば付近の変換パラメータが測定されている。

さらに、高さについても注意が必要である。普通、標高として表されている高さは、ジオイドからの距離のことである。一方 GPS によって求められる高さは、準拠楕円体からの距離で表される。ジオイドとは、地球全表面に海水を張ったときにその表面がとる形状のことで、地球の重力ポテンシャルが等しい面となる。ジオイドは地球内部物質の不均一さや自転により準拠楕円体とは異なる複雑な凹凸がある。三角点などの持つ標高は、このジオイドに基づいた水準測量により決定される高さなので、準拠楕円体からの高さ(楕円体高)とは異なった値を持つことになる。以上の関係を図 III-2-5 に示す。つまり、GPS の測定値から標高を求めるためには、その地点のジオイドの準拠楕円体からの高さを正確に知る必要があるということである。しかし、ジオイドについては測定が非常に難しく、公表されているジオイド図(図 III-2-6) は 3m 以内の精度が保証されているだけである。メートル以下の精度で測位が可能な GPS の成果を標高に直接変換する場合にはこの点が問題となる。

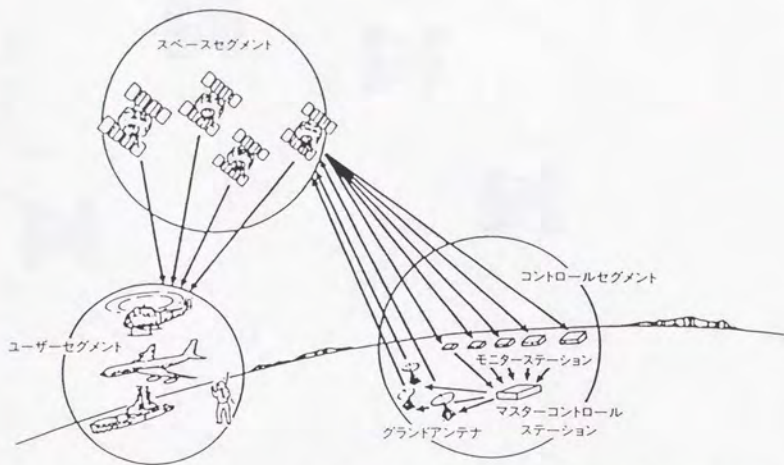
## (2) 公共座標系

球面である地球表面を、平面である地図に表現するために、地図投影法が使用される。地図投影法には、利用目的や描画範囲の大小によってさまざまなものが考案され用いられている。日本では基本的に UTM 投影法が用いられている。UTM とは Universal Transverse Mercator の略で、等角円筒投影図法の一つである。メルカトル投影は地図投影法の中で最も広く使われているもので、地球の自転軸を軸とし赤道に接する円柱面を投影面としている。全ての経線・緯線がそれぞれ平行な直線で表され、かつ等角の条件が満足される唯一のものである。横メルカトル投影(ガウス・クリューゲル投影)は、ふつうのメルカトル投影の円柱を、赤道面内に軸を持つように 90 度倒した円柱に投影を行うようになっている。(図 III-2-7 参照)。

円柱と球が接した線を基準経線(中央子午線)といい、UTM 図法ではこの基準経線が 60 本設定されている。つまり、基準経線の両側 ±3 度を同じ円柱に投影し、それからはずれる部分は次の基準経線で球に接する円柱に投影する。この 1 つの円柱に投影される 6 度の幅をもった範囲をゾーン(帯)といい、西経 180 度から東経 180 度にゾーン 1 から

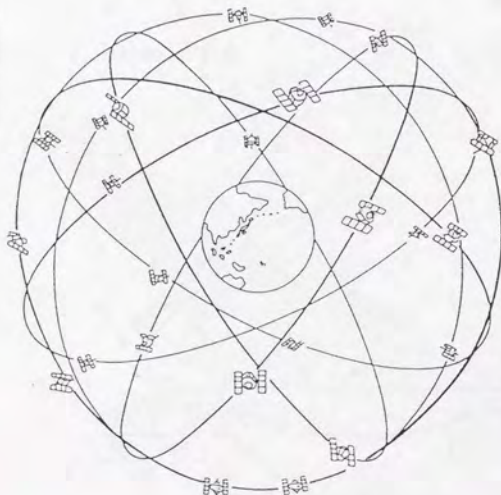
ゾーン 60 が配列されている（図Ⅲ-2-8 参照）。日本付近の基準経線については表-3 に示した。中央経線と赤道が交わった部分を原点とし、ここの座標値が（0,500000）とされている（北半球の場合で、単位はメートル。X軸を北に、Y軸を東方向にとる）。

19 座標系は日本の公共座標系として定められ、大縮尺の地図を作成するときに用いられる図法である。日本国内の三角点には、緯度・経度のほかこの座標系による座標値が与えられている。投影法は UTM であるが、全国を都道府県などによって 19 の地域に分け、各地域ごとに座標系の原点を定め、原点における経線を基準経線とし、原点の座標値を（0m,0m）としている。



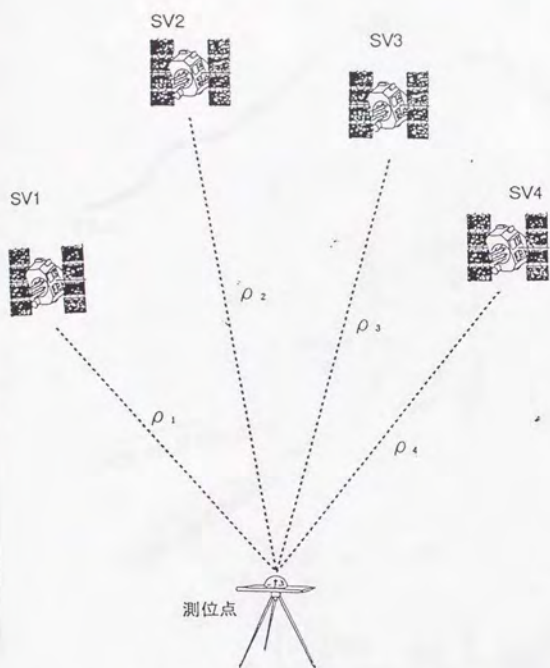
出典：Magravox Electronic Systems Company

図Ⅲ-2-1 GPSシステムエレメント（水町，1993）

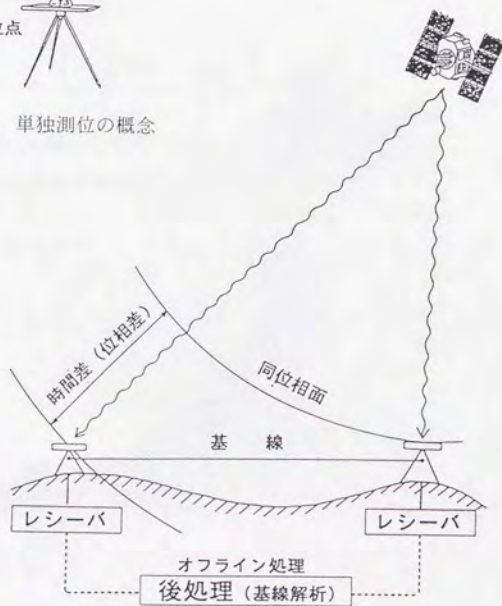


図Ⅲ-2-2 GPS衛星の軌道（土屋他，1991）

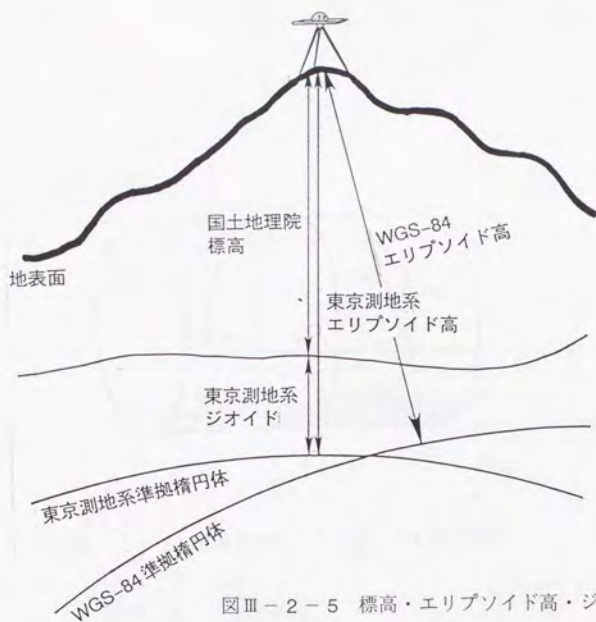




図Ⅲ-2-3 単独測位の概念



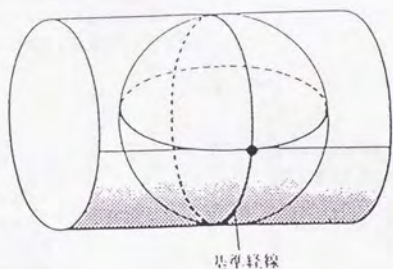
図Ⅲ-2-4 相対測位の概念



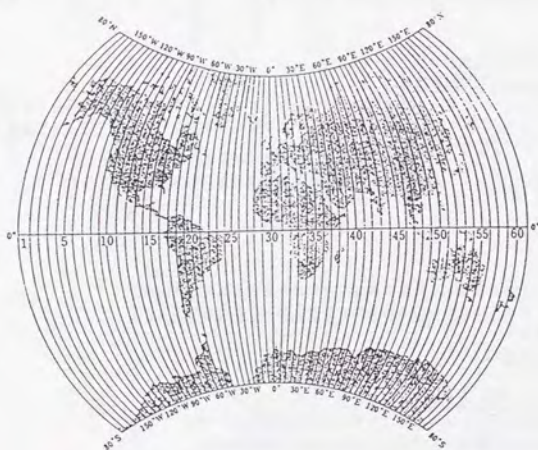
図Ⅲ-2-5 標高・エリプソイド高・ジオイド高



図Ⅲ-2-6 日本の天文ジオイド (土屋他 1991)



図Ⅲ-2-7 横メルカートル投影 (友田他 1985)



図Ⅲ-2-8 UTM 図法のゾーン (友田他 1985)



ASTUTE AND RESOLUTIONS ARE AS FOLLOWS  
 LATITUDE 0.5-42.57.024 LONGITUDE 129.45.33.667 Local offset from UTC 9.88

| Time  | SAT 1 | SAT 2 | SAT 4 | SAT 5 | SAT 6 | SAT 7 | SAT 9 | SAT 12 | SAT 14 | SAT 15 | SAT 16 | SAT 17 | SAT 18 | SAT 19 | SAT 20 | SAT 21 | SAT 22 | SAT 23 | SAT 24 | SAT 25 | SAT 26 | SAT 27 | SAT 28 | SAT 29 | SAT 31 |     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| Alt   | Alt   | Alt   | Alt   | Alt   | Alt   | Alt   | Alt   | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt    | Alt |
| 17:00 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 17:05 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 17:10 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 17:15 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 17:20 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 17:25 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 17:30 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 17:35 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 17:40 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 17:45 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 17:50 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 17:55 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:00 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:05 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:10 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:15 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:20 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:25 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:30 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:35 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:40 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:45 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:50 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 18:55 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:00 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:05 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:10 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:15 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:20 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:25 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:30 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:35 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:40 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:45 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:50 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 19:55 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:00 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:05 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:10 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:15 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:20 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:25 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:30 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:35 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:40 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:45 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:50 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 20:55 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:00 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:05 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:10 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:15 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:20 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:25 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:30 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:35 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:40 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:45 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:50 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 21:55 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:00 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:05 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:10 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:15 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:20 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:25 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:30 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:35 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:40 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:45 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:50 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 22:55 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 23:00 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 23:05 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 23:10 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 23:15 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 23:20 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 23:25 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 23:30 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 23:35 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 23:40 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
| 23:45 |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |

表Ⅲ - 2 - 1(b) 各時刻における PDOP 良好な衛星の組み合わせ

30 PDOPs for 05/30/94 Local offset from UTC 9:00  
 LATITUDE +35 42 57.024 LONGITUDE +139 45 33.667 Mask angle 5 degrees

| Time<br>hh:mm | PDOP (sats)         |                     |                     |                     |  |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|
| 12:00         | 2.3(17, 19, 28, 29) | 2.7(17, 22, 28, 29) | 2.7(17, 19, 29, 31) | 2.8(17, 19, 22, 29) |  |
| 12:15         | 2.6(19, 21, 29, 31) | 2.7(15, 19, 21, 28) | 2.8(15, 18, 21, 31) | 2.8(18, 19, 21, 31) |  |
| 12:30         | 2.0(15, 23, 27, 28) | 2.0(15, 23, 27, 31) | 2.1(15, 21, 27, 31) | 2.1(15, 21, 27, 28) |  |
| 12:45         | 2.2(15, 23, 27, 31) | 2.2(18, 21, 27, 31) | 2.2(15, 23, 27, 28) | 2.2(15, 18, 23, 31) |  |
| 13:00         | 2.2(15, 23, 27, 31) | 2.3(15, 21, 27, 31) | 2.4(15, 23, 27, 28) | 2.6(15, 22, 27, 31) |  |
| 13:15         | 2.4(15, 23, 27, 31) | 2.5(15, 21, 27, 31) | 2.7(15, 22, 27, 31) | 2.8(15, 23, 27, 28) |  |
| 13:30         | 2.8(15, 21, 27, 31) | 2.8(15, 22, 27, 31) | 3.2(21, 22, 27, 31) | 3.5(19, 22, 27, 31) |  |
| 13:45         | 2.7(15, 22, 27, 31) | 3.0(15, 21, 27, 31) | 3.2(15, 22, 27, 28) | 3.2(21, 22, 27, 31) |  |
| 14:00         | 2.1( 2, 15, 22, 31) | 2.1( 2, 19, 22, 31) | 2.2( 2, 15, 22, 28) | 2.4( 2, 15, 21, 22) |  |
| 14:15         | 2.0( 2, 14, 15, 28) | 2.0( 2, 14, 15, 21) | 2.3( 2, 14, 15, 31) | 2.3( 2, 14, 19, 31) |  |
| 14:30         | 2.1( 2, 14, 15, 21) | 2.2( 2, 14, 15, 28) | 2.4( 2, 14, 15, 31) | 2.5(14, 15, 21, 27) |  |
| 14:45         | 2.3(14, 15, 21, 27) | 2.4( 2, 14, 15, 28) | 2.4( 2, 14, 15, 21) | 2.5( 2, 15, 19, 28) |  |
| 15:00         | 1.9( 7, 14, 15, 21) | 2.0( 7, 14, 15, 28) | 2.3( 7, 15, 19, 28) | 2.3(14, 15, 21, 27) |  |
| 15:15         | 2.1( 7, 15, 19, 28) | 2.2( 7, 14, 15, 28) | 2.4( 2, 15, 19, 28) | 2.5(14, 15, 27, 28) |  |
| 15:30         | 2.1( 7, 15, 19, 28) | 2.3( 7, 14, 15, 28) | 2.4( 7, 15, 27, 28) | 2.4(14, 15, 27, 28) |  |
| 15:45         | 3.0( 7, 14, 15, 31) | 3.1( 7, 15, 19, 31) | 3.2( 7, 15, 27, 31) | 3.3(14, 15, 27, 31) |  |
| 16:00         | 2.9( 2, 14, 19, 31) | 2.9( 7, 14, 19, 31) | 3.1( 2, 14, 27, 31) | 3.1(14, 15, 27, 31) |  |
| 16:15         | 2.7( 7, 14, 27, 31) | 2.8(14, 15, 27, 31) | 3.0( 2, 14, 27, 31) | 3.2( 7, 14, 15, 31) |  |
| 16:30         | 2.6( 4, 7, 14, 31)  | 2.7( 4, 14, 15, 31) | 3.2( 7, 14, 15, 31) | 3.4( 2, 4, 7, 31)   |  |
| 16:45         | 2.7( 4, 14, 15, 31) | 2.8( 4, 14, 15, 29) | 3.0( 4, 7, 14, 31)  | 3.0( 7, 14, 15, 29) |  |
| 17:00         | 2.8( 4, 14, 15, 31) | 2.9( 4, 14, 15, 29) | 2.9( 2, 4, 15, 29)  | 3.0( 2, 4, 15, 31)  |  |
| 17:15         | 2.0( 2, 12, 15, 18) | 2.0( 2, 12, 14, 18) | 2.3( 2, 12, 14, 29) | 2.3( 7, 12, 15, 18) |  |
| 17:30         | 2.2( 2, 12, 14, 18) | 2.2( 7, 12, 15, 18) | 2.4( 2, 12, 14, 29) | 2.5( 2, 12, 15, 18) |  |
| 17:45         | 2.1( 7, 12, 15, 18) | 2.5( 2, 12, 14, 18) | 2.5( 2, 7, 12, 29)  | 2.6( 2, 7, 12, 15)  |  |
| 18:00         | 2.1( 7, 12, 15, 18) | 2.3( 2, 7, 12, 15)  | 2.4( 2, 7, 12, 29)  | 2.6( 2, 7, 12, 18)  |  |
| 18:15         | 2.1( 2, 7, 12, 15)  | 2.2( 7, 15, 18, 24) | 2.2( 7, 12, 15, 18) | 2.2( 2, 7, 15, 24)  |  |
| 18:30         | 2.1( 2, 7, 15, 24)  | 2.3( 7, 15, 18, 24) | 2.5( 7, 14, 18, 24) | 2.7( 2, 4, 7, 15)   |  |
| 18:45         | 1.8( 2, 5, 7, 15)   | 2.0( 2, 7, 15, 24)  | 2.4( 2, 7, 14, 24)  | 2.5( 2, 5, 7, 14)   |  |
| 19:00         | 2.2( 2, 7, 14, 24)  | 2.2( 2, 5, 7, 14)   | 2.4( 2, 4, 5, 14)   | 2.5( 2, 4, 7, 14)   |  |
| 19:15         | 2.1( 2, 7, 14, 24)  | 2.1( 2, 5, 7, 14)   | 2.4( 2, 4, 14, 18)  | 2.5( 2, 4, 5, 14)   |  |
| 19:30         | 2.2( 4, 7, 14, 16)  | 2.2( 4, 14, 16, 18) | 2.3( 7, 14, 16, 24) | 2.4( 4, 5, 14, 16)  |  |
| 19:45         | 2.1( 4, 7, 14, 16)  | 2.4( 4, 14, 16, 18) | 2.4( 4, 5, 7, 14)   | 2.4( 4, 5, 14, 16)  |  |
| 20:00         | 3.0( 4, 5, 7, 29)   | 3.2( 4, 7, 16, 29)  | 3.3( 4, 5, 16, 29)  | 3.8( 4, 16, 18, 29) |  |
| 20:15         | 2.4( 4, 5, 7, 19)   | 2.5( 5, 7, 18, 19)  | 2.5( 4, 5, 19, 29)  | 2.6( 4, 5, 7, 29)   |  |
| 20:30         | 2.3( 4, 5, 19, 29)  | 2.4( 4, 5, 7, 29)   | 2.5( 4, 5, 7, 19)   | 2.6( 5, 7, 24, 29)  |  |
| 20:45         | 2.0( 4, 5, 27, 29)  | 2.2( 4, 5, 19, 29)  | 2.2( 5, 7, 24, 29)  | 2.2( 4, 5, 7, 29)   |  |
| 21:00         | 2.2( 4, 7, 16, 29)  | 2.2( 4, 16, 27, 29) | 2.6( 4, 16, 19, 29) | 2.9( 4, 7, 24, 29)  |  |
| 21:15         | 2.0( 4, 7, 16, 29)  | 2.3( 4, 16, 27, 29) | 2.8( 4, 7, 24, 29)  | 2.8( 7, 19, 24, 29) |  |
| 21:30         | 2.1( 6, 19, 24, 26) | 2.2( 6, 24, 26, 27) | 2.2( 6, 18, 24, 26) | 2.4( 6, 18, 24, 27) |  |
| 21:45         | 2.2( 6, 19, 24, 26) | 2.2( 6, 18, 24, 26) | 2.4( 6, 24, 26, 27) | 2.5( 6, 18, 24, 27) |  |
| 22:00         | 2.4( 6, 18, 24, 26) | 2.4( 6, 19, 24, 26) | 2.5(18, 24, 26, 27) | 2.6( 4, 16, 18, 26) |  |
| 22:15         | 2.5( 6, 18, 24, 26) | 2.6( 4, 16, 18, 26) | 2.6(18, 24, 26, 27) | 2.6( 6, 19, 24, 26) |  |
| 22:30         | 2.6( 6, 16, 18, 26) | 2.7(16, 18, 26, 27) | 2.7( 6, 18, 24, 26) | 2.7( 4, 16, 18, 26) |  |
| 22:45         | 2.9( 4, 6, 16, 19)  | 3.1( 6, 16, 19, 26) | 3.1( 4, 6, 19, 24)  | 3.3(16, 19, 24, 26) |  |
| 23:00         | 2.8( 4, 6, 16, 19)  | 3.0( 6, 16, 19, 24) | 3.1( 4, 6, 19, 24)  | 3.1( 6, 16, 19, 26) |  |
| 23:15         | 2.5( 4, 6, 16, 19)  | 2.8( 6, 16, 19, 24) | 3.0( 4, 6, 19, 24)  | 3.2( 4, 6, 24, 27)  |  |
| 23:30         | 2.2( 4, 16, 17, 19) | 2.2( 4, 17, 26, 27) | 2.3( 4, 16, 17, 26) | 2.3( 4, 6, 16, 19)  |  |
| 23:45         | 2.1( 4, 16, 17, 19) | 2.2( 9, 16, 17, 19) | 2.2( 4, 6, 16, 19)  | 2.2( 4, 17, 26, 27) |  |



表Ⅲ-2-2 各時刻における CPDOP 良好な衛星の組み合わせ

CPDOPs for 05/30/94 Local offset from UTC 9:00  
 LATITUDE 435 42 57.024 LONGITUDE +139 45 33.667 Mask angle 5 degrees

| Time<br>hh:mm | CPDOP (sats)         | Based on 10 min. session beginning at time indicated |                      |                      |  |
|---------------|----------------------|------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|--|
| 12:00         | 19.5(17, 19, 22, 28) | 20.3(17, 19, 28, 29)                                 | 21.0(17, 19, 22, 31) | 22.6(17, 19, 29, 31) |  |
| 12:15         | 33.9(18, 19, 21, 28) | 38.3(15, 18, 21, 28)                                 | 42.4(18, 19, 21, 31) | 43.1(19, 21, 28, 29) |  |
| 12:30         | 19.9(15, 22, 23, 31) | 20.0(15, 18, 23, 31)                                 | 20.2(19, 22, 23, 31) | 20.4(15, 22, 23, 28) |  |
| 12:45         | 18.8(15, 19, 23, 28) | 18.9(15, 19, 23, 31)                                 | 19.0(22, 23, 27, 31) | 19.4(15, 22, 23, 31) |  |
| 13:00         | 17.8(22, 23, 27, 31) | 17.8(15, 19, 23, 31)                                 | 18.2(15, 19, 23, 28) | 18.8(22, 23, 27, 28) |  |
| 13:15         | 17.4(22, 23, 27, 31) | 17.7(15, 23, 27, 31)                                 | 17.7(15, 19, 23, 31) | 18.0(15, 23, 27, 28) |  |
| 13:30         | 19.6(21, 22, 27, 31) | 20.7(15, 21, 27, 31)                                 | 21.4(15, 19, 21, 31) | 22.1(15, 21, 27, 28) |  |
| 13:45         | 19.8(15, 21, 27, 31) | 20.7(21, 22, 27, 31)                                 | 21.2(15, 21, 27, 28) | 22.0(15, 22, 27, 31) |  |
| 14:00         | 17.2( 2, 21, 27, 31) | 18.8( 2, 19, 21, 31)                                 | 20.0( 2, 21, 27, 28) | 20.1(15, 21, 27, 31) |  |
| 14:15         | 17.7( 2, 21, 27, 31) | 17.8(14, 21, 27, 31)                                 | 21.0( 2, 19, 21, 31) | 21.8(15, 21, 27, 31) |  |
| 14:30         | 19.4( 2, 21, 27, 31) | 19.5(14, 21, 27, 31)                                 | 20.9( 2, 15, 21, 31) | 24.1( 2, 15, 27, 31) |  |
| 14:45         | 19.9( 2, 15, 21, 31) | 22.7( 2, 21, 27, 31)                                 | 22.7(14, 15, 21, 31) | 23.0(14, 21, 27, 31) |  |
| 15:00         | 19.8( 2, 15, 21, 31) | 21.8(14, 15, 21, 31)                                 | 23.2( 2, 15, 19, 21) | 24.0( 7, 15, 21, 31) |  |
| 15:15         | 37.4( 2, 14, 28, 31) | 37.8( 2, 7, 28, 31)                                  | 37.9( 2, 15, 28, 31) | 39.8(14, 15, 28, 31) |  |
| 15:30         | 31.2( 2, 14, 15, 28) | 38.2( 2, 14, 19, 28)                                 | 38.6( 2, 14, 28, 31) | 38.9( 2, 7, 28, 31)  |  |
| 15:45         | 30.5( 7, 14, 15, 27) | 30.6( 7, 14, 15, 31)                                 | 34.0( 7, 14, 15, 19) | 43.8( 2, 7, 14, 27)  |  |
| 16:00         | 24.7( 7, 14, 15, 31) | 27.2( 7, 14, 15, 27)                                 | 33.0( 7, 14, 15, 19) | 33.6( 2, 7, 14, 19)  |  |
| 16:15         | 22.2( 7, 14, 15, 31) | 27.6( 2, 7, 14, 15)                                  | 28.2( 7, 14, 15, 27) | 29.0( 2, 7, 14, 27)  |  |
| 16:30         | 21.3( 7, 14, 15, 31) | 23.0( 4, 7, 15, 31)                                  | 24.1( 2, 7, 14, 15)  | 24.3( 2, 4, 7, 15)   |  |
| 16:45         | 21.3( 7, 14, 15, 31) | 22.7( 2, 7, 14, 15)                                  | 23.1( 4, 7, 15, 31)  | 23.6( 2, 4, 7, 15)   |  |
| 17:00         | 22.0( 7, 14, 15, 31) | 23.1( 2, 7, 14, 15)                                  | 23.6( 7, 15, 29, 31) | 23.7(14, 15, 29, 31) |  |
| 17:15         | 17.9( 7, 12, 15, 29) | 18.0( 7, 12, 14, 15)                                 | 18.6( 2, 7, 12, 14)  | 20.1( 4, 7, 12, 15)  |  |
| 17:30         | 17.7( 7, 12, 15, 29) | 18.4( 2, 7, 12, 14)                                  | 19.4( 7, 12, 14, 15) | 19.8( 7, 12, 15, 18) |  |
| 17:45         | 18.8( 7, 12, 15, 29) | 19.0( 2, 7, 12, 14)                                  | 19.8( 7, 12, 15, 18) | 20.4( 7, 12, 14, 18) |  |
| 18:00         | 19.3( 7, 12, 14, 18) | 20.0( 7, 12, 14, 29)                                 | 20.7( 2, 7, 12, 14)  | 21.0( 2, 7, 12, 29)  |  |
| 18:15         | 19.7( 7, 12, 14, 18) | 20.1( 7, 12, 14, 24)                                 | 20.9( 7, 12, 14, 29) | 22.0( 2, 7, 12, 29)  |  |
| 18:30         | 23.4( 4, 7, 14, 29)  | 25.1( 4, 7, 14, 18)                                  | 27.0( 4, 14, 15, 29) | 27.6( 4, 14, 15, 18) |  |
| 18:45         | 18.5( 4, 5, 14, 29)  | 19.5( 2, 4, 5, 29)                                   | 20.2( 4, 5, 15, 29)  | 20.6( 4, 5, 14, 18)  |  |
| 19:00         | 17.9( 2, 4, 5, 29)   | 18.1( 4, 5, 14, 29)                                  | 18.2( 4, 5, 14, 18)  | 22.2( 2, 5, 24, 29)  |  |
| 19:15         | 17.6( 2, 4, 5, 29)   | 17.7( 4, 5, 14, 18)                                  | 18.7( 4, 5, 14, 29)  | 19.5( 2, 5, 24, 29)  |  |
| 19:30         | 18.4( 4, 5, 14, 18)  | 20.3( 4, 5, 14, 29)                                  | 20.3( 4, 5, 14, 16)  | 20.4( 5, 7, 24, 29)  |  |
| 19:45         | 19.3( 4, 5, 16, 29)  | 20.5( 4, 5, 14, 18)                                  | 21.1( 4, 5, 14, 16)  | 21.5( 5, 14, 24, 29) |  |
| 20:00         | 19.3( 4, 5, 16, 29)  | 23.4( 5, 7, 18, 24)                                  | 24.3( 4, 5, 16, 18)  | 24.5( 5, 7, 24, 29)  |  |
| 20:15         | 20.7( 4, 5, 16, 29)  | 23.0( 4, 5, 19, 29)                                  | 23.3( 4, 5, 16, 18)  | 25.4( 5, 7, 16, 24)  |  |
| 20:30         | 23.8( 4, 5, 16, 29)  | 24.3( 4, 5, 16, 18)                                  | 24.9( 4, 5, 19, 29)  | 25.9( 4, 5, 18, 19)  |  |
| 20:45         | 27.4( 4, 5, 18, 19)  | 27.5( 4, 5, 18, 27)                                  | 27.9( 4, 5, 16, 18)  | 29.3( 5, 7, 19, 24)  |  |
| 21:00         | 46.1(18, 19, 24, 29) | 52.2( 7, 18, 19, 24)                                 | 53.7(16, 18, 19, 24) | 57.0(18, 24, 27, 29) |  |
| 21:15         | 33.4(16, 18, 19, 24) | 36.2(16, 19, 24, 29)                                 | 42.3( 4, 16, 18, 19) | 45.1( 4, 7, 16, 19)  |  |
| 21:30         | 19.6( 6, 16, 18, 24) | 19.6(16, 18, 24, 26)                                 | 20.2( 6, 18, 24, 27) | 22.7( 4, 6, 16, 18)  |  |
| 21:45         | 18.8(16, 18, 24, 26) | 19.7( 6, 16, 18, 24)                                 | 21.0( 6, 18, 24, 27) | 22.7( 6, 16, 18, 19) |  |
| 22:00         | 18.8(16, 18, 24, 26) | 20.4( 6, 16, 18, 19)                                 | 20.6( 4, 6, 16, 19)  | 20.7( 6, 16, 18, 24) |  |
| 22:15         | 18.9( 4, 6, 16, 19)  | 19.6( 6, 16, 18, 19)                                 | 19.9(16, 18, 24, 26) | 21.4( 6, 16, 18, 27) |  |
| 22:30         | 18.5( 4, 6, 16, 19)  | 20.1( 6, 16, 18, 19)                                 | 20.1( 6, 16, 18, 27) | 20.4( 4, 6, 16, 27)  |  |
| 22:45         | 19.1( 4, 6, 16, 19)  | 19.4( 4, 6, 16, 27)                                  | 21.6( 4, 6, 16, 26)  | 21.9( 6, 16, 19, 26) |  |
| 23:00         | 20.0( 4, 6, 16, 27)  | 20.8( 4, 6, 16, 26)                                  | 21.0( 4, 6, 16, 19)  | 22.1( 6, 16, 19, 26) |  |
| 23:15         | 21.9( 4, 6, 16, 26)  | 22.2( 4, 6, 16, 27)                                  | 23.5( 6, 16, 19, 26) | 24.7( 4, 6, 16, 19)  |  |
| 23:30         | 18.4(16, 17, 24, 27) | 19.0( 6, 16, 17, 19)                                 | 19.0( 6, 16, 17, 27) | 20.2(16, 17, 24, 26) |  |
| 23:45         | 18.9(16, 17, 24, 26) | 19.4(16, 17, 19, 26)                                 | 19.6( 6, 16, 17, 27) | 20.0(16, 17, 24, 27) |  |



### Ⅲ-3 単独測位の精度検定

#### Ⅲ-3-1 方法

テストサイトは東京大学農学部附属北海道演習林、測位ポイントは、演習林内の各種林分の林内や林道端である。測位は1992年9月7～11日に54点のべ165回、そのうちの34点については1993年2月3～5日に再測（のべ104回）を行い、GPSの精度、再現性および条件の違いによる変化について調べた。ここでは2種類のGPS受信機（○SONY製IPS-360と●Trimble Navigation製TransPak II）を使用することができたので、GPS受信機の違いによる差についても検討した（露木他1993）。

今回行った測位法は、単独測位と呼ばれる方法で、1台の受信機のみで測位するものである。この手法は簡便にリアルタイムで測位することができるが、前述のように測位精度は原理的に15～100mである。また、GPSによる測位では、測点の上空が樹木などで遮蔽されていると、測位精度が悪化したり測位不可能になる。そこで森林内でどの程度の精度が得られるかを、演習林内に設置してある三角点と対空標識（以下三角点等）を利用して検討した。これらの点は比較的上空が空いているが、地理座標が既知であることから、精度検定には都合がよい。他の森林内のポイント（以下林内ポイント）としては、北海道演習林が森林衰退現象の観測のために設置した固定標準地、優良遺伝資源保続のために管理されている単木、林道沿いの点からいくつかを選んだ。測位は緯経度で行い、その値を19座標系（平面直角座標系）の座標値（対象地域はXⅡ系）に変換して、精度評価はメートル単位で行った。なお、座標変換は自作のプログラムで行った。

#### Ⅲ-3-2 測位結果

##### (1) 1992年9月

表Ⅲ-3-1に9月の測位結果を示す。三角点等18点の真値からのずれの平均はIPS-360：65.2m、TransPak II：15.1mであった。林内ポイントについては演習林独自で測量を行い地理座標を把握しているが、これらを含めた33点でのずれは両機種とも大きくなる。原因としては、これらの点の地理座標の値が、三角点等より正確さに欠けていることにあると考えられる。また、TransPak IIについては、受信衛星個数が4個以上の場合は標高も同時に測位することができる。この機種は標高が正確でないとき水平位置の精度が悪化する。そこで、上記の33点のうち標高が測位可能であった19点についてずれの量を見てみると28.0mとなり、受信衛星個数の多い場合に精度が向上することがわか

った。また、このときの標高測位値の真値とのずれは平均 12.3m で、比較的正確に標高も測位できることがわかった。

IPS-360 より TransPak II の方が精度がよく、その平均誤差 15m という値はリモートセンシングデータの地上解像度と同程度である。

## (2) 1993 年 2 月

北海道演習林は広葉樹が多いため、落葉して上空の見通しのよくなる冬季では測位精度にどの程度変化があるか、また測位時期の違いがどの程度結果に影響するかを調べるために 2 回目の調査を行った。その結果を表Ⅲ-3-2 に示す。三角点等 7 点でのずれの平均値は IPS-360 : 50.3m、TransPak II : 34.2m であった。TransPak II については予想に反して 9 月の測位より精度が悪化している。林内ポイントまで含めると両機種の違いはほとんどない。

この違いの原因を特定することはできなかったが、大きな理由として考えられるのは測位者の違いである。GPS で測位を行っているとき、刻々と測位値が変化することを見ることができる。この変化にはほぼ一定の範囲内の変動と、その範囲が移動してゆくという 2 種類がある。長時間にわたって同一点で測位を行うと、測位開始時の値と時間が経過したときの値とが非常に異なることがある。この大きなレンジの中でどの値を測位値として記録するかは測位者の判断にかかっている。今回、夏と冬では測位者が異なっていたためこの判断に差があったこと、また冬季は気温が低く同一点に長時間静止して受信機の表示を見ることが苦痛であったため測位時間が短くなったことなどが誤差量が増えた原因ではないかと考えられる。

## (3) 2 時期の差

9 月と 2 月に同一地点を 2 回測位した 32 点について、測位値にどの程度の変化があったかを検討した。その結果を表Ⅲ-3-3 に示す。また、図Ⅲ-3-1 は 2 時期の測位点の真値からの相対位置を結んだものである。2 時期の測位値のへだたりの平均値が IPS-360 : 64.2m、TransPak II : 31.7m であった。TransPak II は冬季の精度の悪化にも関わらず、へだたりの平均値は IPS-360 の半分程度で、時期を変えて測位を行った場合の再現性のよいことがわかった。へだたりの大きさは三角点等みの場合と、林内ポイントまで含めた場合とであまり変わらず、夏期の林内ポイントの測位精度は三角点等と同程度であったと推測できる。

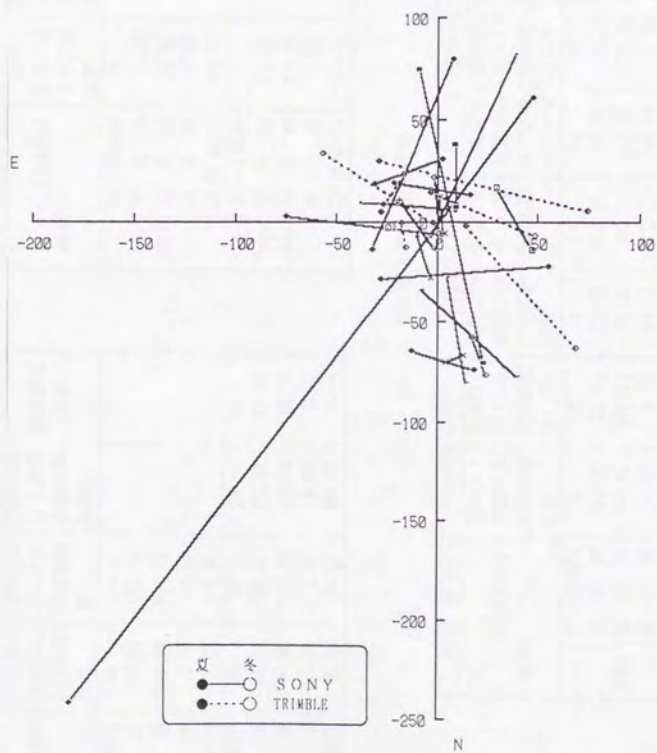


図 III - 3 - 1 2 時期の測位値の変動



表Ⅲ-3-1 1992年9月測定結果

| 機種      | 評価項目  |        | 三角点・<br>対空のみ<br>水平距離<br>誤差 |        | 含林内ポ<br>イント水<br>平距離誤<br>差 |       | 衛星4個<br>以上受信<br>点水平距<br>離誤差 |        | 標高測定<br>誤差 |        |
|---------|-------|--------|----------------------------|--------|---------------------------|-------|-----------------------------|--------|------------|--------|
|         | データ個数 | 平均値    | 最大値                        | 最小値    | 標準偏差                      | データ個数 | 平均値                         | 最大値    | 最小値        | 標準偏差   |
| SONY    | 23    | 65.24  | 100.14                     | 454.19 | 3.58                      | 45    | 100.14                      | 554.73 | 3.58       | 123.83 |
|         | 60    | 102.07 | 123.83                     | 102.07 | 123.83                    | 60    | 102.07                      | 123.83 | 102.07     | 123.83 |
|         | 28    | 15.14  | 45.65                      | 15.14  | 45.65                     | 28    | 15.14                       | 45.65  | 15.14      | 45.65  |
|         | 31    | 54.98  | 77.59                      | 54.98  | 77.59                     | 31    | 54.98                       | 77.59  | 54.98      | 77.59  |
| Trimble | 1.39  | 1.39   | 1.39                       | 1.39   | 1.39                      | 1.39  | 1.39                        | 1.39   | 1.39       | 1.39   |
|         | 11.39 | 11.39  | 11.39                      | 11.39  | 11.39                     | 11.39 | 11.39                       | 11.39  | 11.39      | 11.39  |
|         | 28.13 | 28.13  | 28.13                      | 28.13  | 28.13                     | 28.13 | 28.13                       | 28.13  | 28.13      | 28.13  |
|         | 8.38  | 8.38   | 8.38                       | 8.38   | 8.38                      | 8.38  | 8.38                        | 8.38   | 8.38       | 8.38   |

表Ⅲ-3-2 1993年2月測定結果

| 機種   | 評価項目  |       | 三角点・<br>対空のみ<br>水平距離<br>誤差 |       | 含林内ポ<br>イント水<br>平距離誤<br>差 |       | 衛星4個<br>以上受信<br>点水平距<br>離誤差 |       | 標高測定<br>誤差 |       |
|------|-------|-------|----------------------------|-------|---------------------------|-------|-----------------------------|-------|------------|-------|
|      | データ個数 | 平均値   | 最大値                        | 最小値   | 標準偏差                      | データ個数 | 平均値                         | 最大値   | 最小値        | 標準偏差  |
| SONY | 7     | 50.26 | 90.39                      | 12.29 | 32.73                     | 15    | 49.73                       | 90.39 | 12.29      | 26.07 |
|      | 7     | 34.15 | 86.64                      | 5.60  | 25.84                     | 16    | 43.92                       | 93.29 | 5.60       | 25.71 |
|      | 15    | 44.92 | 93.29                      | 5.60  | 25.84                     | 15    | 44.92                       | 93.29 | 5.60       | 25.84 |
|      | 15    | 40.99 | 86.22                      | 0.36  | 25.85                     | 15    | 40.99                       | 86.22 | 0.36       | 25.85 |

表Ⅲ-3-3 2時期の測定値の比較

| 測定時期    | 1992年9月 |                            | 1993年2月                   |                            | 2時期の差                     |                      |
|---------|---------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------|
|         | 評価項目    | 三角点・<br>対空のみ<br>水平距離<br>誤差 | 含林内ポ<br>イント水<br>平距離誤<br>差 | 三角点・<br>対空のみ<br>水平距離<br>誤差 | 含林内ポ<br>イント水<br>平距離誤<br>差 | 全測位点<br>水平距離<br>へだたり |
| SONY    | データ個数   | 6                          | 14                        | 6                          | 14                        | 32                   |
|         | 平均値     | 31.39                      | 57.91                     | 45.03                      | 47.45                     | 72.32                |
|         | 最大値     | 74.45                      | 302.94                    | 90.39                      | 90.39                     | 304.46               |
|         | 最小値     | 6.79                       | 6.79                      | 12.29                      | 12.29                     | 9.27                 |
| Trimble | データ個数   | 25.53                      | 76.13                     | 32.50                      | 24.45                     | 51.17                |
|         | 平均値     | 18.67                      | 29.52                     | 38.91                      | 47.38                     | 106.58               |
|         | 最大値     | 35.25                      | 76.39                     | 86.64                      | 93.29                     | 106.58               |
|         | 最小値     | 6.25                       | 2.81                      | 21.61                      | 18.62                     | 2.26                 |
|         | 標準偏差    | 10.34                      | 25.16                     | 24.71                      | 24.86                     | 30.27                |