

3S技術(GPS, RS, GIS)の利用による 森林管理業務の効率化に関する研究

小 林 裕 之

Studies on Utilization of 3S-Technology (GPS, RS, GIS)
for Effective Forest Management Work

Hiroyuki KOBAYASHI

3S技術 (GPS,RS,GIS) の利用による森林管理業務の効率化に関する研究

小林 裕之

目 次

第1章 序 論	1
第1節 研究の目的	1
第2節 研究の方針	2
第3節 測地系と座標系	3
第4節 引用文献	6
第2章 全地球測位システム (GPS)	7
第1節 SA 解除前の森林内外での測位精度	7
第1項 方 法	8
第2項 結 果	12
第3項 考 察	18
第2節 SA 解除後の森林内外での測位精度	22
第1項 方 法	22
第2項 結果と考察	24
第3節 引用文献	27
第3章 リモートセンシング (RS)	29
第1節 デジタルオルソフォト作成方法の比較	29
第1項 対象範囲と使用したもの	29
第2項 作成方法	29
第3項 結果と考察	32
第2節 簡易デジタルオルソフォト作成の効率化	37
第1項 方 法	37
第2項 結果と考察	40
第3節 引用文献	42
第4章 地理情報システム (GIS)	43
第1節 地すべり危険地のマッピング	43
第1項 材料と方法	45
第2項 結果と考察	50

第2節 参考文献	62
第5章 森林管理業務への応用	64
第1節 PC とフリーソフトの利用	64
第1項 データセットの構築方法	64
第2項 野外調査での利用法	69
第2節 PDA とフリーソフトの利用	70
第1項 ハードウェアとソフトウェア	70
第2項 整備したデータセット	72
第3項 現地調査での利用方法	72
第3節 参考文献	74
第6章 総合考察	75
第1節 3S 技術	75
第1項 GPS	75
第2項 RS	79
第3項 GIS	79
第2節 現場での利用と行政との連携	80
第3節 参考文献	82
要 旨	83
謝 辞	84
Summary	85

第 1 章序論

第 1 節 研究の目的

近年の日本の森林・林業を取り巻く情勢は、材価の低迷、就業者の減少と高齢化、気象災害の多発、病虫獣害の広がり、林務職員の削減など非常に厳しいものがある。

まず材価については、昭和 55 年に 22,707 円/m³であったスギの立木価格が平成 15 年には 4,801 円/m³となり、その一方で、伐出業賃金や苗木代が大幅に上昇した。また、林業就業者数は、昭和 55 年に 165,500 人であったものが平成 12 年には 67,200 人へと減少し、そのうち 65 歳以上の占める割合は 25%に達している（林野庁、2004）。

気象災害としては、平成 16 年には過去最多の 10 個の台風が上陸し（気象庁、2004）、とりわけ 10 月 20 日に高知県から徳島県、大阪府、岐阜県、山梨県、東京都を通過した超大型の 23 号は、林地荒廃等 2,829 ヶ所、林道 6,708 ヶ所、森林 14,848ha など合わせて 830 億円以上の森林林業関係被害（H.16.11.22 現在）をもたらした（農林水産省、2004a）。また、10 月 23 日から 28 日にかけて発生した新潟県中越地震では、林地荒廃 167 ヶ所、林道等 493 ヶ所など合わせて 210 億円以上の森林林業被害（H.16.11.15 現在）が発生している（農林水産省、2004b）。

病虫獣害としては、青森県と北海道を除く全国に広まっている松くい虫被害、カシノナガキクイムシが媒介するナラ菌による本州日本海側、紀伊半島や九州南部のカシ、ナラ、シイ類の集団枯損被害、シカやカモシカによる樹木の食害やクマによる皮剥ぎ被害などが森林資源を損失させている（林野庁、2002）。

また、平成 15 年 4 月現在、309 人の林業専門技術員と 1,737 人の林業改良指導員が、各都道府県で林業技術の普及等に従事しているが、これらの普及指導職員数は、都道府県の行財政改革の流れの中で減少傾向にある（林野庁、2004）。

このような情勢のもと、事業者側の経営意欲が減退し、行政側の指導体制も手薄となり、管理不足から山が荒れるという現象が起こっている。

一方、計算機、衛星技術、電子光学技術、情報ネットワーク、デジタル画像処理、マルチメディアなどの技術革新に伴ったアナログ技術からデジタル技

術への変化、紙地図から電子地図への変換等を背景として、空間情報工学という新しい学問領域が生まれた（村井、2002）。空間情報工学は空間情報科学とも呼ばれる。岡部（2001）では、空間情報科学とは空間情報を効率よく取得し、取得した空間情報を操作性よく管理し、管理された空間情報を多面的に分析し、分析結果に基づき空間的政策、計画をたて、その成果たる空間情報を広く伝達する系統的な方法、およびその方法論を研究する学問である、と定義している。

空間情報工学（科学）を支える主な技術として、リモートセンシング（Remote Sensing ; RS）、地理情報システム（Geographic Information System ; GIS）、全地球測位システム（Global Positioning System ; GPS）のいわゆる“3 S 技術”がある。

GPS とは、6 つの軌道面に 4 衛星、合計 24 個の衛星（実際には 1998 年 9 月時点で予備を入れて合計 26 個利用可）が、高度約 20,000km の高さの円軌道に配置され、電波信号を発信しており、この信号を地球上あるいは地上の空間で受信することにより、位置（緯度、経度）および高さを測位するシステムであり、リモートセンシングとは、遠い所から直接触れずに、対象物から反射または放射される電磁波を計測し、対象物の性質やその環境を分析する技術であり、GIS とは、土地利用、資源、環境、交通、都市施設その他行政あるいは業務に必要な案件の計画および管理に係わる意志決定を支援する目的で、地理的に関連するデータの入力、格納、検索、計算、分析および表示を行う情報システムである（村井、2002）。

森林管理にこの 3 S 技術（GPS, RS, GIS）を利用することができれば、業務の効率化が期待でき、ひいては森林荒廃の防止に寄与することが可能となる。

しかしながら、3 S 技術は新しい技術であり、森林管理業務で実際にどこまで使えるかが十分明らかになったとは言いきれず、また、GPS, RS, GIS を総合的に取り扱った論文もまだ少ない。

そこで本研究では、GPS, RS, GIS を森林管理業務で利用するための基礎的な研究結果について述べ、現状でどこまで使えるのかを明らかにし、3 S 技術を利用した森林管理業務の効率化手法を提言する。

なお、森林管理とは、育林、伐採、治山、林道、

保護、計画など林業家や行政官が関わる森林のあらゆる種類の仕事と考えられる（木平，1998）が、本論文では、森林資源の把握と管理、適地や危険地の把握、災害（被害）発生後の現地調査などを特に意

識して森林管理業務という言葉を使用する。また、空中写真もリモートセンシングデータとして論ずる。研究の背景と目的を図 1-1 に示す。

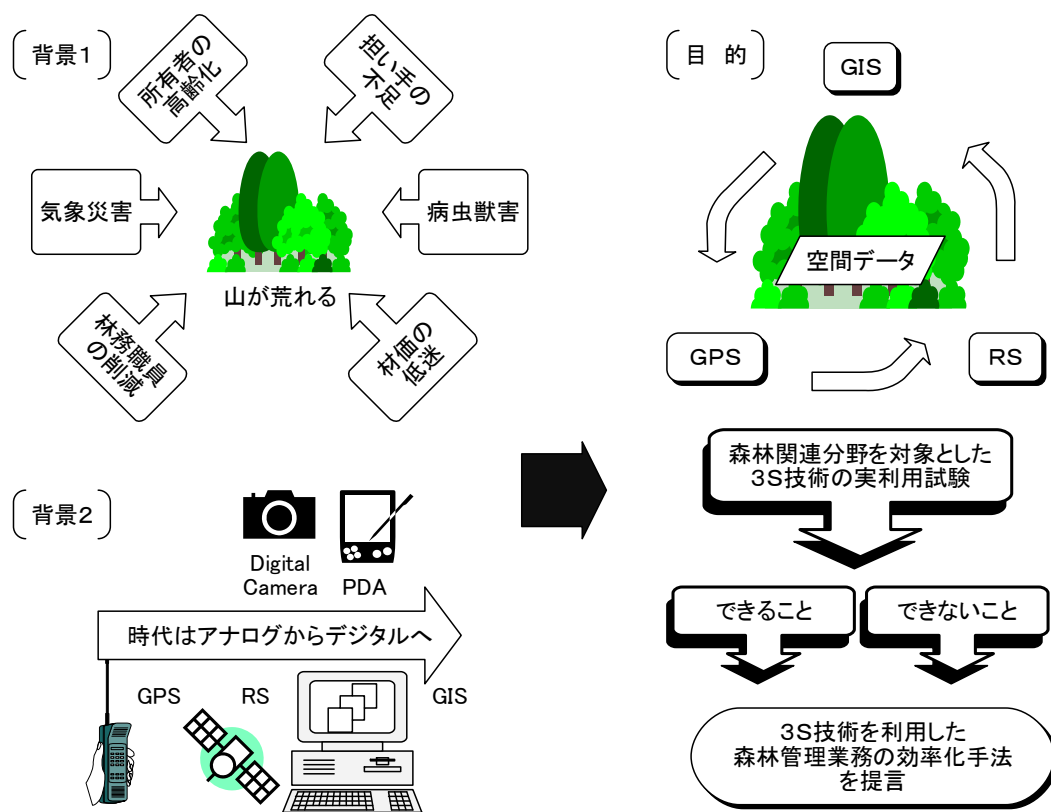


図 1-1 研究の背景と目的

第2節 研究の方針

第2章「全地球測位システム（GPS）」では、まず GPS が森林内で使用可能であるかどうかを検証するために、測位方式が異なる 5 機種 of GPS 受信機を用いて 1999 年 11 月に行った森林内外での測位実験の結果を示す（第1節）。その後 2000 年 5 月に、単独方式の測位精度を故意に劣化させていた SA が解除されたので、その効果を明らかにするために、単独測位、DGPS 方式の 2 機種 of GPS 受信機を用いて 2000 年 11 月に行った森林内外での測位実験の結果を続いて示す（第2節）。

第3章「リモートセンシング（RS）」では、森林管理分野でこれまで主として用いられてきたアナログ空中写真をデジタル正射写真（デジタルオルソフォト）へ変換する方法を比較検討した結果について

述べ（第1節）、次に前節で提案した作成方法を用いて、いかに効率よく大量にデジタルオルソフォトを作成するかについて検討した結果を示す（第2節）。

第4章「地理情報システム（GIS）」では、富山県全体を対象とした地すべり関連 GIS データセットの構築方法と空間統計解析結果に基づく地すべり危険地、危険度マップの作成結果について述べる。

第5章では、実際の森林管理業務での GPS, RS, GIS の利用方法について、PC とフリーソフトを用いた事例（第1節）と、PDA とフリーソフトを用いた事例（第2節）について紹介する。

第6章では、第2～4章で得られた結果について総合的な考察を加え、3S技術を利用した森林管理業務の効率化手法を提言する。

第3節 測地系と座標系

GPS, RS, GIS のいわゆる 3 S 技術は空間データを扱う技術であり、そのデータの地理的位置は、例えば、A 測地系 B 座標系の南北座標=Y, 東西座標=X の点, というように、測地系と座標系の組み合わせ並びにその座標値によって特定される。本節では、この測地系と座標系に関する必要最小限の事柄について記述する。

測地系 (geodetic datum, datum) とは、測地基準系 (geodetic reference system) と呼ばれ、地球上の位置を経度、緯度で表すための基準であり、地球の形に最も近い回転楕円体で定義されている (国土地理院, 2002)。日本国内の空間データを取り扱う場合に使用される測地系は、Tokyo, WGS84, JGD2000 の 3 つである。

Tokyo 測地系 (Tokyo Datum, 旧日本測地系, 日本測地系) は、明治時代に全国の正確な 1/50,000 地形図を作成するために整備され、改正測量法の施行

日まで使用されていた日本の測地基準系であり、ベッセル楕円体を採用し、天文観測によって決定された経緯度原点の値と原点方位角を基準として構築されたものである。WGS84 測地系 (World Geodetic System 1984) は米国が構築、維持している世界測地系であり、GPS の軌道情報で使われているほか、GPS によるナビゲーションの位置表示の基準として使われている。また、JGD2000 測地系 (Japanese Geodetic Datum 2000, 日本測地系 2000, 世界測地系) は平成 14 年 (西暦 2002 年) 4 月から我が国が採用しており、世界測地系である ITRF94 座標系 (International Terrestrial Reference Frame : 国際地球基準座標系) と GRS80 (Geodetic Reference System 1980 : 測地基準系 1980) の楕円体を使用するものであり、標高については Tokyo 測地系と同様に東京湾平均海面を基準に表すものである (国土地理院, 2002)。これら 3 つの測地系の概要を図 1-2 に示す。

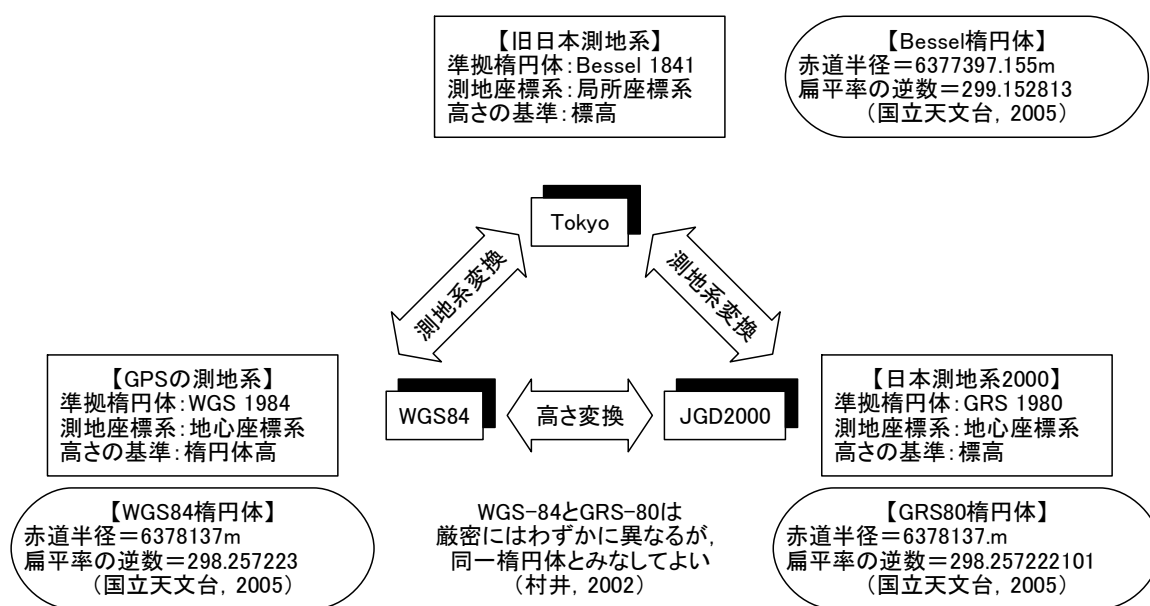


図 1-2 3つの測地系の概要

座標系 (coordinate system) とは、空間データの地理的位置を特定するための基準である (村井, 2002)。日本国内の空間データを取り扱う場合に主として使用される座標系は、測地座標系, UTM 座標系, 平面直角座標系の 3 つである。

測地座標系 (Latitude / Longitude, Geographic

coordinates) は地球を回転楕円体と仮定して、経度および緯度を用いて位置を表す座標系である。UTM 座標系 (Universal Transverse Mercator System) はガウス・クリューゲル図法と呼ばれる横メルカトール図法 (横軸等角円筒図法) で表されており、地球全体を経度 6° 毎に 60 の帯に分け、その中央子午

線の赤道上の点を原点とし、原点における縮尺率を 0.9996 としたものである。また、平面直角座標系(19座標系、公共測量座標系、公共座標系)は UTM 座標系と同じ図法で表されるが、原点を日本の地勢に

合わせて 19 設け、原点における縮尺率を 0.9999 としたものである(村井, 2002)。これら 3 つの座標系の概要を図 1-3 に、日本付近の UTM ゾーンと平面直角座標系を図 1-4 にそれぞれ示す。

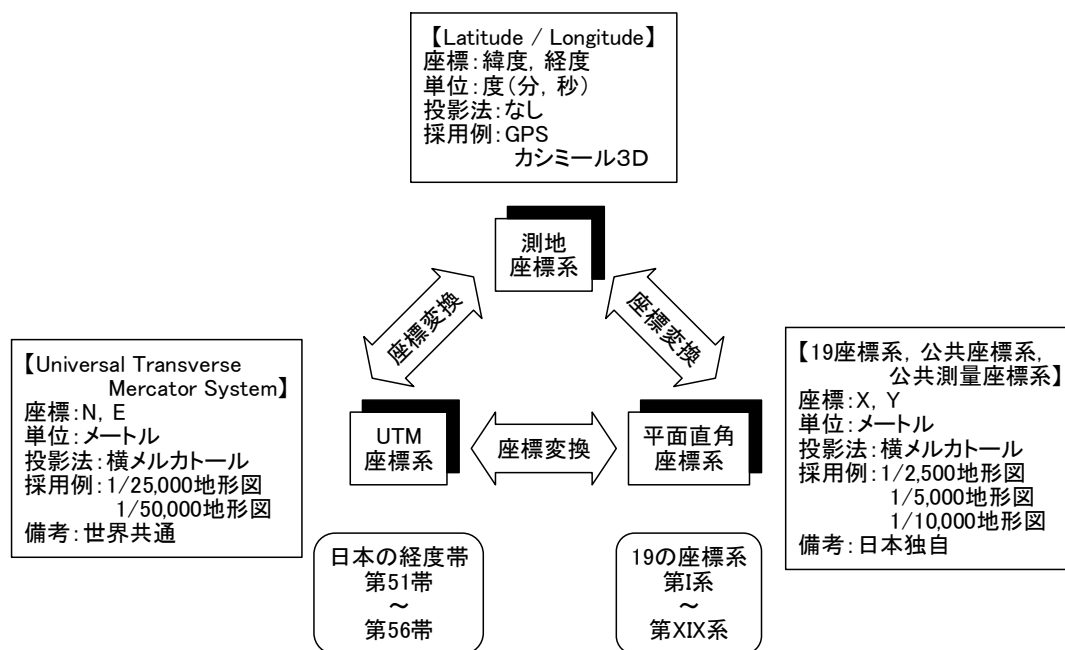


図 1-3 3つの座標系の概要

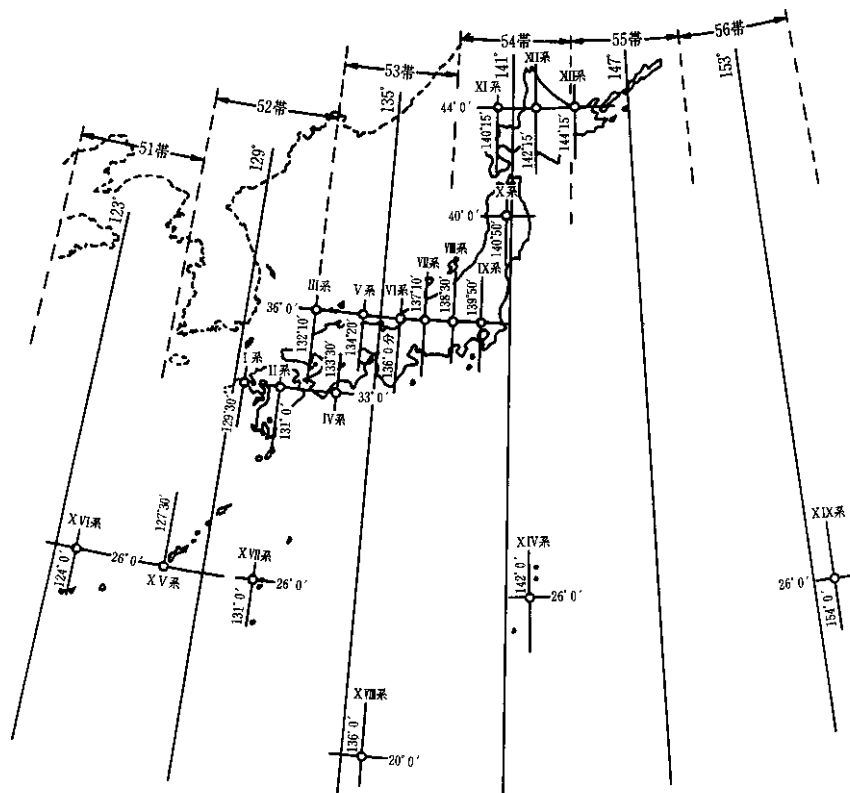


図 1-4 日本付近の UTM ゾーンと平面直角座標系

(村井, 2002) より

空間データのユーザは、そのデータの位置座標がどの測地系のどの座標系で記述されているかを認識しておく必要があり、また GIS ソフトウェアに取り込む際にはその設定をしてやる必要もある。筆者が

主に使用している GIS ソフトウェアでの設定例を、測地座標系, UTM 座標系, 平面直角座標系の順に表 1-1~3 にそれぞれ示す。

表 1-1 測地座標系の設定例

項目	英語項目名	Tokyo での設定 (旧日本測地系)	JGD2000 での設定 (新日本測地系)	WGS84 での設定 (GPS オリジナル)
座標系	Coordinate System	Latitude / Longitude	←	←
測地系	Datum	Tokyo - Japan	Japan Geodetic Datum 2000	World Geodetic System 1984
楕円体	Ellipsoid	Bessel 1841	GRS 1980	WGS 1984

表 1-2 UTM 座標系の設定例

項目	英語項目名	Tokyo での設定 (旧日本測地系)	JGD2000 での設定 (新日本測地系)
座標系	Coordinate System	Universal Transverse Mercator	←
経度帯	Zone	53 (E 132 to E 138)	←
投影法	Projection	Transverse Mercator	←
測地系	Datum	Tokyo – Japan	Japan Geodetic Datum 2000
楕円体	Ellipsoid	Bessel 1841	GRS 1980
原点の縮尺係数	Central scale	0.9996000	←
中央子午線	Central meridian	E 135 00 00.000	←
原点緯度	Origin Latitude	N 0 00 00.000	←
仮原点の E 座標	False Easting	500000.00000	←
仮原点の N 座標	False Northing	0.00000	←

経度帯の 53 は、富山県が属する番号。

表 1-3 平面直角座標系の設定例

項目	英語項目名	Tokyo での設定 (旧日本測地系)	JGD2000 での設定 (新日本測地系)
座標系	Coordinate System	Japan-19 Plane Orthogonal	←
経度帯	Zone	Japan-19 Zone VII	←
投影法	Projection	Transverse Mercator	←
測地系	Datum	Tokyo – Japan	Japan Geodetic Datum 2000
楕円体	Ellipsoid	Bessel 1841	GRS 1980
原点の縮尺係数	Central scale	0.9999000	←
中央子午線	Central meridian	E 137 10 00.000	←
原点緯度	Origin Latitude	N 36 00 00.000	←
仮原点の E 座標	False Easting	0.00000	←
仮原点の N 座標	False Northing	0.00000	←

経度帯の VII は、富山県が属する番号。

第 4 節 引用文献

気象庁 (2004) 平成 16 年の日本の天候 (速報).
http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/press/0412/20a/tenko2004.pdf
 国土地理院 (2002) 世界測地系移行の概要.
<http://www.gsi.go.jp/LAW/G2000/g2000.htm>.
 国立天文台 (2005) 理科年表平成 17 年(机上版).
 1015pp, 丸善, 東京.
 木平勇吉 (1998) 森林管理と GIS. (森林 GIS 入門.
 100pp, 日本林業技術協会, 東京). 1-10.
 村井俊治 (2002) 改訂版空間情報工学. 224pp, 日
 本測量協会, 東京.
 農林水産省 (2004a) 台風 23 号による農林水産業被
 害と対応.
<http://www.maff.go.jp/soshiki/keiei/keiei-seis>

aku/saigai-kanren/2004tai_23.htm
 農林水産省 (2004b) 平成 16 年新潟県中越地震によ
 る農林水産業被害と対応.
http://www.maff.go.jp/soshiki/keiei/keiei-seisaku/saigai-kanren/h16niigata_jisin.htm
 岡部篤行 (2001) 空間情報科学の挑戦. 123pp, 岩
 波書店, 東京.
 林野庁 (2002) 病虫害や動物被害から森林を守る! .
<http://www.rinya.maff.go.jp/seisaku/sesakusyokai/mamoru/top.html>
 林野庁 (2004) 平成 15 年度森林・林業白書. 274pp,
 日本林業協会, 東京.

第2章全地球測位システム（GPS）

第1節 SA解除前の森林内外での測位精度

GPSの測位の種類には、単独測位、DGPS、干渉測位の三つがある。

単独測位（一点測位，point positioning）は、一般開放されているC/Aコードを1台の受信機で観測する方式で、得られる精度は100m程度である。DGPS（差動GPS，トランスロケーション方式，コードディファレンシャル方式，differential GPS，C/A code differential GPS，code DGPS）は、一般的にC/Aコードのみを利用し、参照点と未知点の2カ所で同時に単独測位を行って共通誤差を相殺する方式で、精度は数m程度である。また、干渉測位（GPS測量，carrier phase positioning，carrier phase DGPS）は、搬送波位相積算回路の付いた受信機で、参照点と未知点の2カ所で同時に搬送波を観測し、その位相差から2地点間の基線ベクトルを求める方式で、精度は数cm程度である。

これまでGPSは、葉の落ちた森の中では受信強度が低下するものの、何とか測位可能であるが、葉の茂った森の中では受信強度の低下が著しく、ほとんど測位不能である（土屋・辻，1997）といわれてきた。しかしながら、1993年末にGPS衛星24個すべての打上げが完了し、完全運用状態になったこと、受信機の小型・計量・低価格化や、多チャンネル・高性能化が進んだことなどの理由により、最近では、森林内での測位を目的とした研究も行われるようになった。

国内の森林地帯で測位を行った例としては、露木ら（1993）、露木（1994）、長谷川ら（1998）がある。露木ら（1993）は、東京大学北海道演習林の林内や林道端において、2種類の単独測位受信機を用いた測定結果として、1992年9月測定時の平均水平誤差が100.1m，45.7m，1993年2月測定時のそれが49.7m，43.9mであったと報告している。露木（1994）は、同地において、DGPSおよび干渉測位方式での測定も行い、ギャップのある森林ではDGPS方式の測位が可能であり、その精度は水平誤差3.0mであるとし、また、天頂付近のみ開空していた地点や全くの林内では、衛星捕捉を十分な継続時間行うことができず、干渉測位には失敗したと報告している。長谷川ら（1998）は、京都大学和歌山演習林において、林道基準点および、一部に樹高15

～20mのヒノキ人工林と樹高5m程度の広葉樹林を含む林地境界をDGPS方式で測定し、平均水平誤差が2.9mであったとしている。

一方、海外の森林内で実際に測位を行った例としては、Deckert and Bolstad（1996）、Næsset（1999）、Næsset *et al.*（2000）などがある。Deckert and Bolstad（1996）は、典型的な合州国東部の森林におけるDGPS測位の平均誤差が、落葉樹林、針葉樹林内で、それぞれ3.1m，4.4mであったとしている。Næsset（1999）はノルウェー南東部の森林において実験を行い、DGPS方式の平均水平誤差が1.2～3.7m，フロート解のときの干渉測位による平均水平誤差が0.8～2.3mであったと報告している。また、Næsset *et al.*（2000）は、同地において、GPSだけを使用した場合と、GPSおよびGLONASS（The Russian Global Navigation Satellite System）の両方を使用した場合のフロート解の干渉測位結果として、平均水平誤差がそれぞれ0.2～5.7m，0.1～2.9mであったとしている。

最近の国内におけるGPSを取り巻く環境の変化で特筆すべきものとしては、1999年の海上保安庁によるDGPSビーコン局の整備完了があげられる。これは、日本の沿岸や島などに設置された27カ所の基準点におけるGPS測位誤差を中波無線局から時々刻々放送し、未知点における測位誤差を10m以下にまで向上させるというシステムであり、サービス自体は無料で提供されるものである。本来は船舶航行用で、その有効範囲は各DGPS局から200km以内の海上ということになってはいるが、もし陸域でもこのシステムが利用可能であれば、ユーザ側はGPS受信機とビーコン受信機を1組用意するだけで、基準局を設置することなしに数m程度の測位精度が期待できる。立木ら（2000）は、この海上保安庁のDGPSシステムを使用した林道線形のデジタル化などを試み、長瀬ら（2000）、京都府立大学大枝演習林内外の地況・林況が異なる4地点において観測を行い、測位精度は地況・林況を問わず6m以内であったとしている。

既往の国内研究では、樹冠遮蔽と地形遮蔽の影響を分離した測位精度検証が不十分であること、海外研究では単独測位方式との比較が行われていないこと、海上保安庁のDGPSシステムは林内での使用事例がまだ少ないこと、などの理由により、測位方式

が異なる複数の受信機を用いた樹冠下での GPS 測位精度の比較は十分意義があると考えられる。そこで本節では、測位方式が異なる 5 種類の受信システムを同時に使用し、林相が異なる 4 林分と森林外計 5 地点で測位を行い、今後の森林管理業務等における実用性について比較検討を行った結果について述べる。

第 1 項 方法

実験は 1999 年 11 月 10, 11 日に、富山県林業技術センター林業試験場構内で行った。今回使用した機種を表 2-1 に示す。調査地点最寄りの DGPS ビーコン局は能登半島沖の舳倉島にあり、その距離は約 140km である。海上保安庁の DGPS 局を図 2-1 に、測点の概要を表 2-2 に、各測点の写真を図 2-2～2-6 にそれぞれ示す。

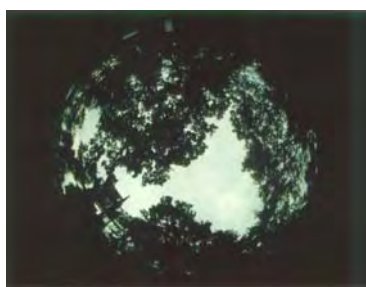
表 2-1 使用した機種 (SA 解除前)

	メーカー or ブランド	受信機	チャンネル数	仰角マスク	測位方式	ビーコン局 の選択	開空間での 期待精度
機種 1	Garmin	GPS II PLUS	12	固定 (非公開)	単独	—	100m
機種 2					DGPS	自動	10m
(GPS 受信機)	Garmin	GPS II PLUS	12	固定 (非公開)	(海上保安庁		
(ビーコン受信機)	CSI	SBX-2			ビーコン局使用)		
機種 3	Ashtech	BR2G	12	規定値 (5°)	DGPS	自動	1-2m
					(海上保安庁 ビーコン局使用)		
機種 4					干渉	—	1-2cm
(移動局)	NovAtel	RT-20	12	規定値 (10°)	(1周波後処理		(測位時間
(基地局)	Ashtech	Z-Surveyor	12	規定値 (10°)	キネマティック)		による)
機種 5					干渉	—	1-2cm
(移動局)	Ashtech	Z-Surveyor	12	規定値 (10°)	(2周波後処理		(測位時間
(基地局)	Ashtech	Z-Surveyor	12	規定値 (10°)	キネマティック)		による)

表 2-2 測点の概要

	林相など	地形	林齢 (年)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	立木密度 (本/ha)	胸高断面積合計 (m ² /ha)	開空度* (%)
G0	林外(三角点)	尾根部	—	—	—	—	—	23
G1	コナラ	平坦地	66	28	20	450	27.7	37
G2	スギ密	平坦地	12	12	9	4,800	54.3	14
G3	スギ疎	平坦地	31	24	14	1,400	63.3	23
G4	ケヤキ	平坦地	8	7	7	4,000	15.4	27

* 開空度は全天写真の空の部分の単純な比率。



全天写真



遠景



近景(測位中)

図 2-2 測点 G0 (林外三角点) の写真



全天写真



遠景



近景(測位中)

図 2-3 測点 G1 (コナラ林) の写真



全天写真



遠景



近景(測位中)

図 2-4 測点 G2 (スギ密林) の写真



全天写真



遠景



近景（測位中）

図 2-5 測点 G3（スギ疎林）の写真



全天写真



遠景



近景（測位中）

図 2-6 測点 G4（ケヤキ林）の写真

測点 G1 から G4 を設置した林分はすべて平坦地にあり、地形による衛星遮蔽の影響はほとんど受けないと考えられた。また、実験日の広葉樹林は紅葉の初期段階であった。なお、事前に衛星配置を調べることはしなかった。

11 月 10 日に、まず干渉測位用の基地局を上空の開けた構内の芝地に設け（図 2-7）、機種 3 により約 3 時間連続測位し、その平均値をもって基準位置とした。観測は 2 回行った。1 回目の観測は 11 月 11 日の午前 10 時過ぎから、測点 G2, G3, G4, G1, G0 の順に各測点 10 分間ずつを目途に、2 回目の観

測は同日の午後 2 時過ぎより、同じ順番で 20 分間ずつを目途に行った。測位は、各測点上に立てた測量用三脚に、腕の長さ 50cm の十文字型アンテナ設置用ステー（図 2-8）を固定し、その 4 端点の東に機種 2、西に機種 4、南に機種 3、北に機種 5 のアンテナを配置し、また、アンテナ一体型の機種 1 についてはステー中央部に受信機を設置して行った。各受信機のアンテナ高は地上から約 1.5m であった。なお、測位はすべて WGS84 測地系で行う予定であったが、機種 2 の G2 での 1 回目だけは Tokyo 測地系で取得してしまった。



基地局



機種 3 による位置決めのための測位中

図 2-7 基地局の写真



図 2-8 アンテナ設置用ステー

機種 1 から機種 3 までの観測データは、NMEA0183 フォーマットを用いて 2 秒間隔で、機種 4, 5 のそれは、受信機用ソフトウェアを用いて 1 秒間隔でノートパソコンに収集した。また、後処理キネマティック解析にはAshtechのWinPrismソフトウェアを用いた。機種 1 から機種 3 までのデータファイルからは、GGA および GSA センテンスを切り出し、また、機種 4, 5 の解析結果ファイルはそのまま、Excel, dBase 形式を経由し、GIS ソフトウェア (TNTmips) に取り込み、緯度経度ポイント

データとした。なお、取り込みにあたっては、データ取得時の測地系をそのまま指定した。

第 2 項 結果

1. 測位の安定性

森林内という厳しい状況での GPS 測位では、安定して測位ができるかどうかが重要である。そこで、各観測データを、位置情報が取得できたかどうかという視点から分析した結果を表 2-3 に示す。

表 2-3 位置情報の取得結果

		機種1	機種2	機種3	機種4	機種5
G0	1回目	○	○	○	○(F)	△(I)
	2回目	○	○	○	○(F)	○(F)
G1	1回目	○	○	○	○(F)	×
	2回目	○	○	○	○(F)	×
G2	1回目	○	○	×	△(F)	○(F)
	2回目	○	○	○	○(F)	△(F)
G3	1回目	○	○	○	○(F)	×
	2回目	○	○	○	○(F)	△(F)
G4	1回目	○	○	○	○(F)	△(F)
	2回目	○	○	△	○(F)	○(F)

○は欠測なし，△は一部欠測，×は全欠測。(F)はフロート解，(I)はフィックス解。

全測点，全観測時間帯で安定して測位が可能であったのは機種 1，2 であり，機種 3 では全欠測と一部欠測がそれぞれ一度ずつ生じた。干渉測位方式の機種 4 では一部欠測が一度生じ，機種 5 では一部欠測と全欠測が頻繁に生じた。ただし，機種 3 の G2 における 1 回目の観測は，実験日初回のものであり，機器の接続不良の可能性もある。干渉測位で得られる基線解には，波数不確定を実数値として推定したフロート解と，それを整数化したフィックス解の二種類がある。波数不確定の整数化によって精度は格段に上がる（土屋・辻，1999）のであるが，今回の干渉測位機種でフィックス解が得られたのは機種 5 の林外（G0）での 1 回目だけであり，林内（G1～G4）ではフィックス解は全く得られなかった。

2. 測位の精度

測位データの水平誤差を計算するため，各測点，各観測回において，全欠測機種を除くすべての機種で位置情報が得られた時間帯のうち，後半の 5 分間分をまず切り出した。機種 5 の G0 での 1 回目観測のフィックス解はこの切り出し時間帯に含まれてい

た。その後，各緯度経度値を，GIS ソフトウェア内で Tokyo 測地系平面直角座標系の X，Y 座標値に変換した。なお，測点 G1 から G4 の X，Y 座標の真値としては，建設省公共測量作業規定に準拠した，外部測量業者による 4 級基準点測量成果を使用した。また，同一測量業者による，G0 および隣接する二つの三角点間での GPS 測量の結果に整合性があったことから，今回使用した三等三角点「栃津」が位置ずれを起こしている可能性はないと判断し，国土地理院が基準点成果として公表している X，Y 座標を G0 の真値として採用した。こうして求めた X，Y 座標値をもとに水平誤差を計算したところ，フィックス解が得られたにもかかわらず，機種 5 の G0 での 1 回目の観測において，3m 以上の誤差が出ていることがわかった。また，フロート解の場合を含めた機種 4，5 の測位点を GIS ソフトウェア上でプロットしたところ，ほぼすべての測点において測位点が南東方向にずれるという傾向が認められた。G0 での測位点のプロット結果を 1 回目，2 回目の順に図 2-9，10 にそれぞれ示す。

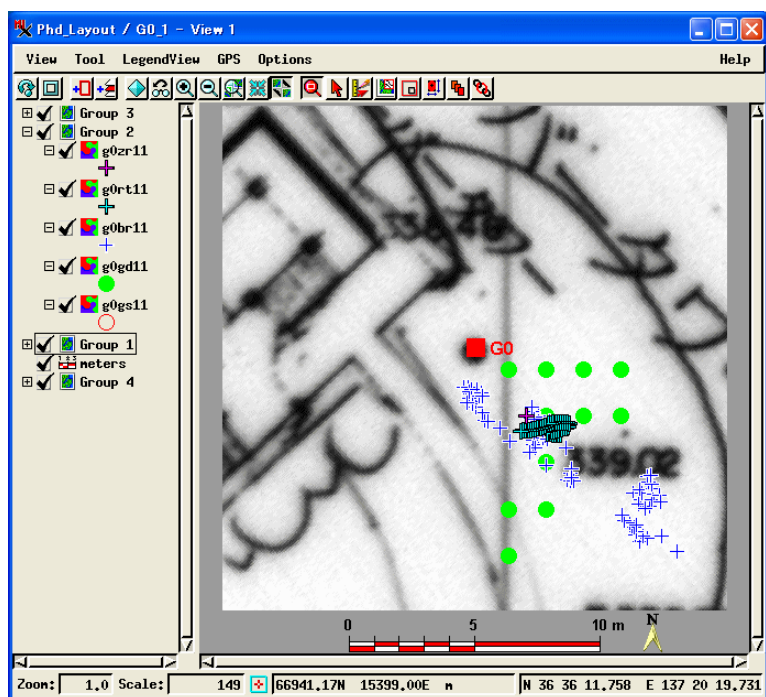


図 2-9 測点 G0 での1回目の測位プロット

機種 1 は○，機種 2 は●，機種 3 は+，機種 4 は+，機種 5 は+。

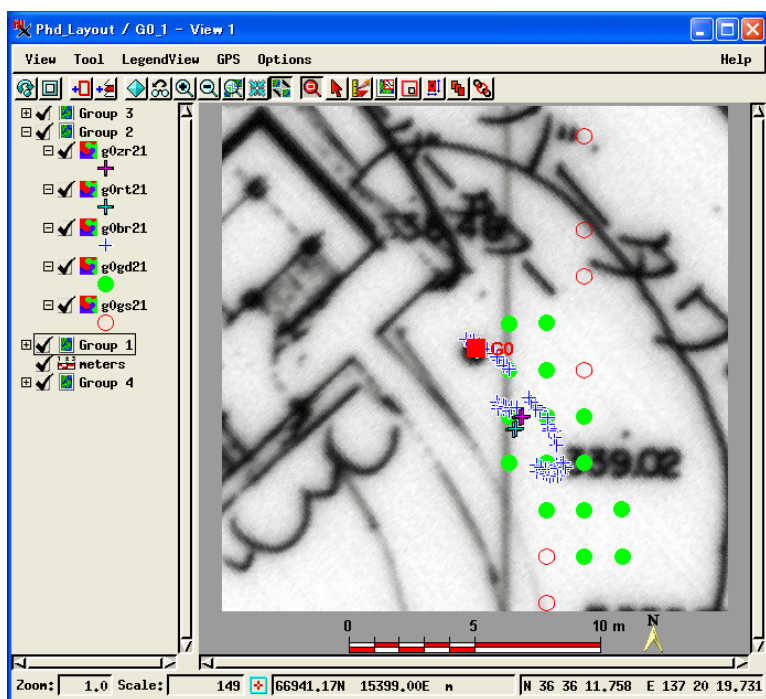


図 2-10 測点 G0 での2回目の測位プロット

機種 1 は○，機種 2 は●，機種 3 は+，機種 4 は+，機種 5 は+。

今回使用した GIS ソフトウェアは、WGS84 測地系と Tokyo 測地系との座標変換に、準拋楕円体原点

の平行移動量である三つのパラメータを使用する方法を採用しているが、このような素朴な変換による

変換精度は 1～10m 程度になる（土屋・辻，1999）という指摘がある。そこで，前述基準点成果の緯度経度を WGS84 系の緯度経度に変換し，その値を GIS ソフトウェアによって Tokyo 測地系平面直角座標系の X，Y 座標に変換したものと，基準点成果で公表されている X，Y 座標との比較を行った（図 2-11）。なお，Tokyo 測地系から WGS84 系への変換

は，現在入手可能なもので最も精度が高いと考えられ，日本測地系のひずみを考慮して，約 21,000 個の変換パラメータを用いているので，変換誤差が 1 m 以下に抑えられている（日本測量協会，1998），国土地理院開発の座標変換プログラム（TKY2WGS Ver.3.5）を使用した。

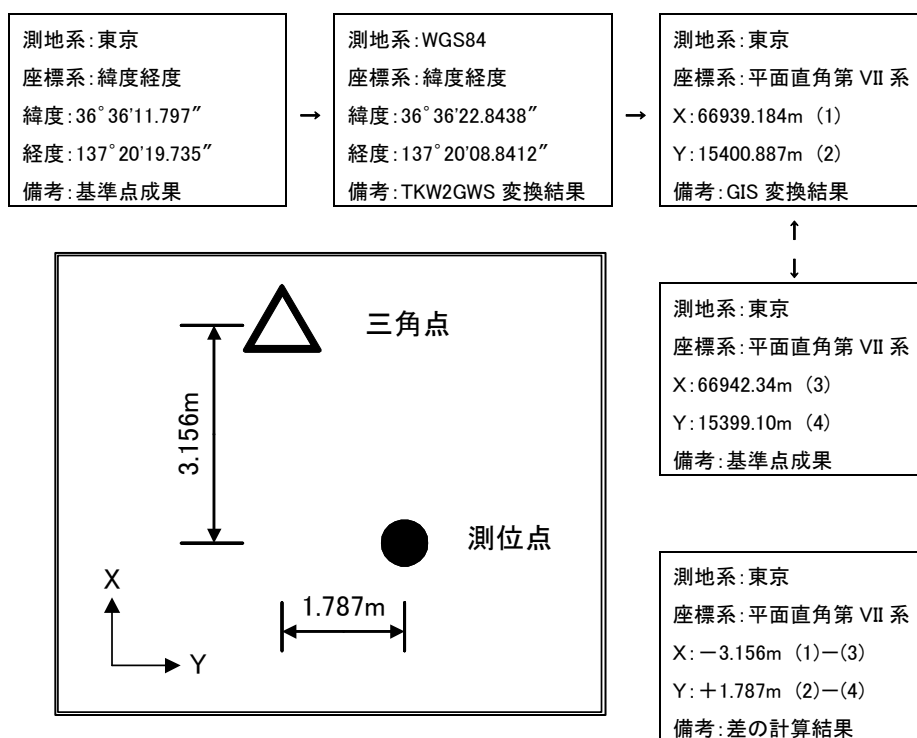


図 2-11 GIS ソフトウェアと TKY2WGS による座標変換の比較

この図からは，GPS による WGS84 系での測位結果が G0 三角点にぴったり合っているにもかかわらず，その結果を GIS ソフトウェアによって Tokyo 測地系に変換すると，その測位点は三角点から南に約 3.2m，東に約 1.8m ずれてプロットされてしまうことがわかる。この南東方向へのずれは，機種 4，5 の測位点プロットと整合性があったため，この数値(X 方向: +3.156 m，Y 方向: -1.787m)を全測点での補正量とし，更に観測時のアンテナのオフセット量(=0.5m)を考慮し，水平誤差を計算し直した。なお，唯一 Tokyo 測地系で測位を行った機種 2 の G2 での 1 回目については，受信機内部での測地系変換方法が公開されていないので，他の測位結果と同様の補正量を与えた。

観測 1 回目の測位誤差は，機種 1 の林外で 31.8

m，林内で 27.0～33.9m，機種 2 の林外で 2.8m，林内で 2.7～7.3m，機種 3 の林外で 2.3m，林内で 1.1～4.0m，機種 4 の林外で 1.7m（フロート解），林内で 0.1～3.4m（フロート解），機種 5 の林外で 0.2m（フィックス解），林内で 0.2～1.1m（フロート解）であった（表 2-4）。また，観測 2 回目の測位誤差は，機種 1 の林外で 55.6m，林内で 15.4～48.6 m，機種 2 の林外で 3.0m，林内で 3.0～21.7m，機種 3 の林外で 2.0m，林内で 1.5～6.6m，機種 4 の林外で 0.2m（フロート解），林内で 0.1～1.0m（フロート解），機種 5 の林外で 0.1m（フロート解），林内で 0.3～5.1m（フロート解）であった（表 2-5）。なお，観測 2 回目の G1 での機種 2 のデータには，単独測位時間帯が一部含まれていたため，これを除外し，DGPS 時間帯のみを誤差計算に使用した。観

測 1, 2 回目における, 機種別, 測点別 (林内測点 図 2-12, 13 にそれぞれ示す。
は胸高断面積合計の昇順に並べ替え) の測位誤差を

表 2-4 観測 1 回目の測位結果

		機種 1	機種 2	機種 3	機種 4	機種 5
G0	平均誤差 (m)	31.82	2.75	2.31	1.68 (F)	0.19 (I)
	標準偏差	3.72	1.20	1.96	0.54	
	最大	41.66	5.16	7.57	2.40	
	平均衛星数	8.50	8.73	8.47		
	平均 PDOP	1.77	1.73	1.96		
	データ数	150	150	150	150	
G1	平均誤差 (m)	26.96	3.31	3.33	1.52 (F)	×
	標準偏差	7.30	1.87	1.19	0.06	
	最大	37.77	6.93	5.48	1.60	
	平均衛星数	8.91	8.48	7.63		
	平均 PDOP	1.83	1.78	2.00		
	データ数	150	150	150	150	
G2	平均誤差 (m)	33.85	5.55	×	0.91 (F)	1.11 (F)
	標準偏差	15.00	2.53		0.17	0.34
	最大	63.57	9.61		1.35	1.81
	平均衛星数	5.79	6.69			
	平均 PDOP	2.91	2.75			
	データ数	150	150		150	150
G3	平均誤差 (m)	27.17	7.25	4.02	3.38 (F)	×
	標準偏差	11.02	3.23	3.00	0.17	
	最大	45.81	13.43	13.89	3.58	
	平均衛星数	8.35	8.28	7.18		
	平均 PDOP	2.19	2.07	3.16		
	データ数	150	150	150	150	
G4	平均誤差 (m)	32.45	2.65	1.08	0.13 (F)	0.22 (F)
	標準偏差	17.65	1.51	0.63	0.03	0.04
	最大	75.15	5.06	3.02	0.18	0.30
	平均衛星数	8.28	8.31	7.98		
	平均 PDOP	2.51	2.32	2.63		
	データ数	150	150	150	150	150

×は全欠測。(F)はフロート解, (I)はフィックス解。

機種 4, 5 については, 機種 1~3 に合わせて 2 秒間隔に間引いてある。

表 2-5 観測 2 回目の測位結果

		機種 1	機種 2	機種 3	機種 4	機種 5
G0	平均誤差 (m)	55.60	3.02	1.99	0.17 (F)	0.06 (F)
	標準偏差	31.71	1.58	0.92	0.03	0.03
	最大	106.11	6.11	4.66	0.24	0.08
	平均衛星数	6.84	6.81	7.27		
	平均 PDOP	2.83	2.18	1.88		
	データ数	150	150	150	150	150
G1	平均誤差 (m)	48.59	21.68	2.29	0.45 (F)	×
	標準偏差	16.63	17.73	1.81	0.05	
	最大	69.30	89.58	7.82	0.54	
	平均衛星数	7.00	3.38	6.98		
	平均 PDOP	2.13	2.52	2.12		
	データ数	150	128*	150	150	
G2	平均誤差 (m)	31.31	4.25	6.62	1.00 (F)	1.15 (F)
	標準偏差	13.05	1.85	3.23	0.42	0.31
	最大	53.40	6.79	14.65	1.87	1.80
	平均衛星数	6.19	5.87	4.81		
	平均 PDOP	3.32	2.23	2.79		
	データ数	150	150	150	150	150
G3	平均誤差 (m)	19.88	4.89	5.30	0.78 (F)	5.08 (F)
	標準偏差	3.96	2.32	4.42	0.12	4.16
	最大	27.48	10.46	21.41	0.94	16.60
	平均衛星数	6.67	5.67	4.83		
	平均 PDOP	2.73	2.67	4.43		
	データ数	150	150	150	150	150
G4	平均誤差 (m)	15.44	2.95	1.48	0.13 (F)	0.26 (F)
	標準偏差	2.78	1.51	0.80	0.05	0.04
	最大	21.18	5.94	3.20	0.26	0.28
	平均衛星数	6.49	6.64	5.42		
	平均 PDOP	2.92	2.94	3.66		
	データ数	150	150	150	150	150

×は全欠測。(F)はフロート解, (I)はフィックス解。

*単独測位時間帯を除外してある。

機種 4, 5 については, 機種 1~3 に合わせて 2 秒間隔に間引いてある。

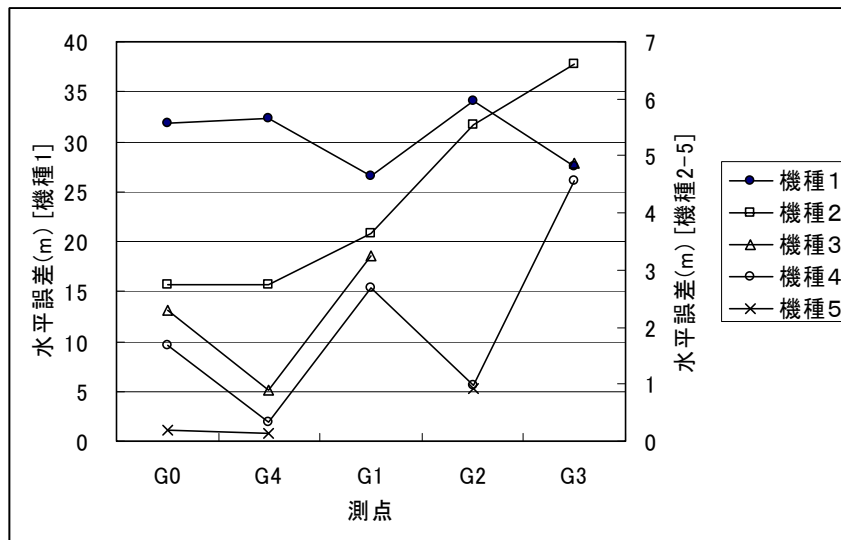


図 2-12 観測 1 回目の平均水平誤差

林内測点 (G1~G4) は胸高断面積合計の昇順に並べ替えてある。

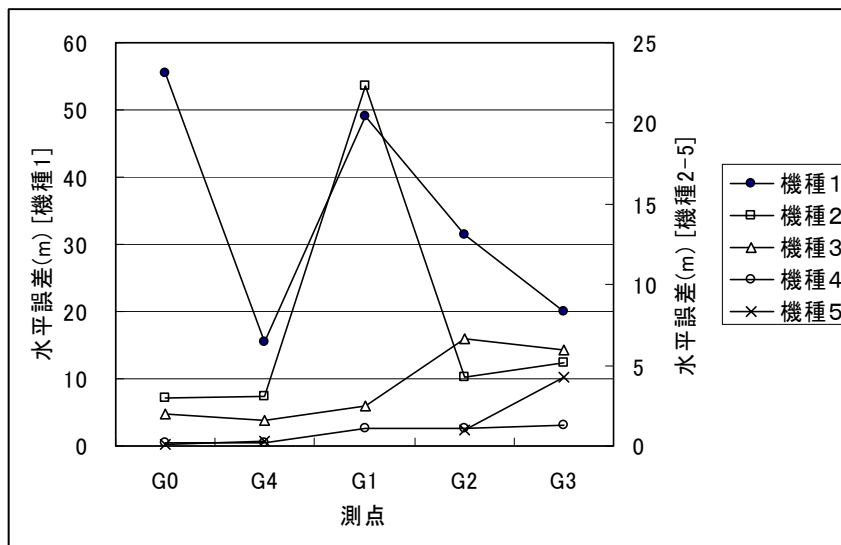


図 2-13 観測 2 回目の平均水平誤差

林内測点 (G1~G4) は胸高断面積合計の昇順に並べ替えてある。

第3項 考察

1. 単独測位

1 回目, 2 回目の観測をまとめると, 単独測位の機種 1 ではその測位誤差が, 林外で 31.8~55.6m, 林内で 15.4~48.6m となる (表 2-4, 5)。また, 観測 1 回目では, 全測点において概ね 30m 前後の測位誤差となった (図 2-12) のに対して, 観測 2 回目では

は測点間で誤差にばらつきがある (図 2-13)。G0, G1 での誤差が特に大きくなっているが, これは SA の影響によるものと考えられ, 単独測位機種においては, 測点と測位誤差の間には特にこれといった傾向はみられないといえる。

2. DGPS

機種 2 の 1, 2 回目の観測をまとめると, その測

位誤差は、林外で 2.8～3.0m、林内で 2.7～21.7m となる（表 2-4, 5）が、観測 2 回目の G1 での測位誤差だけが異常に大きい（図 2-13）ことがわかる。G1 での 1 回目, 2 回目の観測データのうち、捕捉衛星数, 最終 DGPS 更新からの経過時間 (Age), PDOP 値を図 2-14, 15 にそれぞれ示す。通常 Age は数秒以内ならば十分である（土屋・辻, 1999）といわれているが、1 回目では全て 0 または 1 秒であるのに対して、2 回目では 10 秒を超えることが頻繁にあったことがわかる。また、記録されていたビーコン局の ID を調べると、調査値最寄りの舳倉島局ではない、大陸側の基準局と思われるものが混入していることもわかった。つまり、G1 での 2 回目は、わざ

わざ遠い基準局の、Age の大きい補正情報による測位結果であり、信頼することができないといえる。この測定を除外すると、機種 2 の測位誤差は、観測 1, 2 回目をまとめて、林外で 2.8～3.0m、林内で 2.7～7.3m（表 2-4, 5）となる。機種 3 の 1, 2 回目の観測をまとめると、その測位誤差は、林外で 2.0～2.3m、林内で 1.1～6.6m となる（表 2-4, 5）。

DGPS 機種 2 の測位誤差は、Deckert and Bolstad (1996), Næsset (1999), Næsset *et al.* (2000), 長瀬ら (2000) の結果とも概ね一致する。また、林内では、胸高断面積合計が大きくなるほど測位誤差も大きくなるという、Næsset (1999), Næsset *et al.* (2000) と同様の傾向が認められる（図 2-12, 13）。

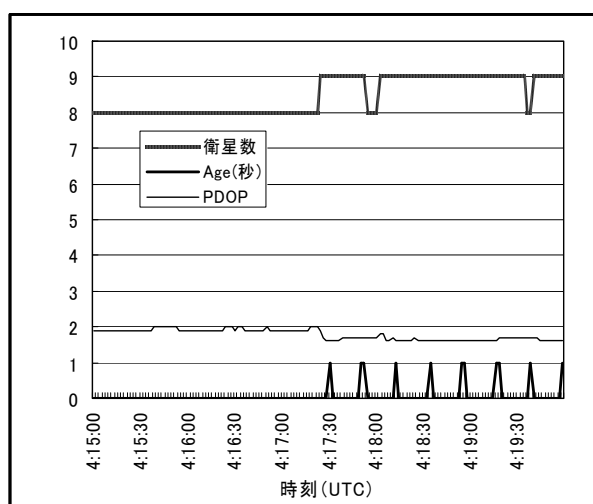


図 2-14 測点 G1 での観測 1 回目の衛星数, Age, PDOP

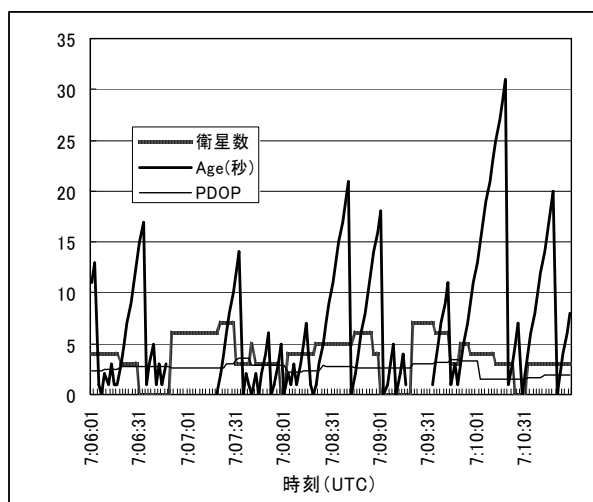


図 2-15 測点 G1 での観測 2 回目の衛星数, Age, PDOP

3. 干渉測位

機種 4 の 1, 2 回目の観測をまとめると, その測位誤差は, 林外で 0.2~1.7m (フロート解), 林内で 0.1~3.4m (フロート解) となる (表 2-4, 5)。また, 機種 5 の 1, 2 回目の観測をまとめると, その測位誤差は, 林外で 0.1 (フロート解) ~0.2m (フィックス解), 林内で 0.2~5.1m (フロート解) となる (表 2-4, 5)。

干渉測位機種の林内でのフロート解時の測位誤差は, Næsset (1999), Næsset *et al.* (2000) の結果と概ね一致し, DGPS 機種よりも高い精度を示した。また, 胸高断面積合計が大きくなるほど測位誤差も大きくなるという, Næsset (1999), Næsset *et al.* (2000) と同様の傾向も認められた (図 2-12, 13)。機種 5 の林外での 1 回目でフィックス解が得られたのは, 上空の視界に空きがあり (図 2-2), サイクルスリップがなかったことによると考えられる。

4. 精度に影響を与えたもの

測位精度に及ぼす, 機種, 林分要素, 衛生状態の影響を明らかにするために, 林内 4 測点のデータを使用して重回帰分析を行った。機種については, SA の影響を大きく受け, 他機種よりも明らかに測位精度が劣っている機種 1 をまず除外し, 残る 4 機種に対して 3 (機種数-1) 個のダミー変数 (R_2 , R_3 , R_4) を作成した。林分要素については, 常緑樹/落葉樹区分, 林齢, 樹高, 胸高直径, 立木密度, 胸高断面積合計の間に強い相関がみられたので, これらのうちから胸高断面積合計 (G) を説明変数として採用し, また, 開空度 (OR) も林分要素として採用した。衛星状態については, 機種間の差を明確にする

ために, 個々の機種が記録した衛星数や PDOP 値ではなく, 実験時間帯の開空間での衛星数 (NS), PDOP 値 ($PDOP$) を採用した。計算には, Ashtech の Mission Plan V4.1 を使用した。なお, 舳倉島局以外の補正情報が混入していた, 観測 2 回目の G1 での機種 2 データは解析から除外した。目的変数には, 測位誤差の自然対数 ($\ln D$) を採用した。これは, 測位誤差の分布が極端な L 字型分布となっていたからである。重回帰モデル式を以下に示す。

$$\ln D = a_1 \cdot R_2 + a_2 \cdot R_3 + a_3 \cdot R_4 + a_4 \cdot G + a_5 \cdot OR + a_6 \cdot PDOP + a_7 \cdot NS + b \quad \text{数式 2-1}$$

ここで, D : 測位誤差 (m), R_2 , R_3 , R_4 : 機種のダミー変数 (0 または 1), G : 胸高断面積合計 (m^2/ha), $PDOP$: 開空間での PDOP 値, NS : 開空間での衛星数, $a_1 \sim a_7$: 回帰係数, b : 定数項である。表 2-6 に重回帰分析の結果を示す。4 林分における 2 回繰り返すという限定された観測ではあるが, 標準偏回帰係数が最も大きかったのは胸高断面積合計であり, これが林内での測位精度に大きな影響を与えていたといえる。これは, Næsset (1999), Næsset *et al.* (2000) の結果と同様である。また, 機種以外の説明変数が同一の場合には, 機種 5 ($R_2 = R_3 = R_4 = 0$) と比べ, 機種 2 ($R_2 = 1$, $R_3 = R_4 = 0$) が標準偏回帰係数で 0.498 だけ測位誤差が大きく, 機種 3 ($R_3 = 1$, $R_2 = R_4 = 0$) が同係数で 0.368 だけ大きく, 機種 4 ($R_4 = 1$, $R_2 = R_3 = 0$) が同係数で 0.119 だけ小さくなることを示しており, 機種 2~5 の測位誤差は, 機種 4 < 機種 5 < 機種 3 < 機種 2 であったといえる。

表 2-6 重回帰分析結果

変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	判定
胸高断面積合計 (G)	0.037	0.612	**
受信機2 (R_2)	1.392	0.498	**
受信機3 (R_3)	1.027	0.368	**
開空度 (OR)	0.029	0.185	**
受信機4 (R_4)	-0.319	-0.119	*
PDOP ($PDOP$)	-0.105	-0.039	*
衛星数 (NS)	0.002	0.002	
定数項 (b)	-2.210		**

変数は、標準偏回帰係数の絶対値の降順に並べ替えてある。

$r^2=0.658^{**}$, $n=4050$ 。*有意水準 5%, **有意水準 1%。

受信機 2, 受信機 3, 受信機 4 は 3 個で 1 組のダミー変数。

機種 2 の場合は, (R_2, R_3, R_4) = (1, 0, 0)

機種 3 の場合は, (R_2, R_3, R_4) = (0, 1, 0)

機種 4 の場合は, (R_2, R_3, R_4) = (0, 0, 1)

機種 5 の場合は, (R_2, R_3, R_4) = (0, 0, 0)

5. 利用法の提案

今回の実験からは、地形遮蔽の影響のない樹冠下において、単独測位機種は安定した測位が行えるが、その精度は 15.4~48.6m であることがわかった。なお、本実験後の 2000 年 5 月に SA が解除され、良好な条件下での単独測位では 7~15m の水平精度が期待できる (Garmin Corp., 2000) ようになった。また、DGPS 機種は船舶航行用の補正情報を内陸部でも受信することができ、1.1~7.3m の精度を示すこと、干渉測位機種はフィックス解が得られず、また測位自体も不安定となるが、フロート解が得られた場合の測位精度は DGPS 機種よりも高く、0.1~5.1m であること、DGPS、干渉測位機種とも、胸高断面積合計の増加に伴って測位誤差が増大すること、がわかった。また、1m 内外の測位誤差を論ずる場合には、GIS ソフトウェアが内蔵している測地系変換プログラムでは精度が足りず、別のプログラムを使用して変換する必要があることもわかった。

森林、林業分野での GPS の利用形態には、1) 予め指定された地点へ到達する際に使用する場合、2) 現地調査を行った地点を後で特定する際に使用する場合、3) 精密測量に使用する場合、の大きく三つが考えられる。以下に、ケース別の GPS 利用法について提案する。

1) 指定された地点へ到達する場合

要求精度が 10m 内外 (SA 解除後) の場合には、今回使用した機種 1 のようなレジャー用ハンディタ

イプの単独測位受信機を Tokyo 測地系に設定しておき、予め目標点の緯度経度をウェイポイントとして入力しておき、ナビゲーション機能を利用して目標点に到達すればよい。要求精度が数 m の場合には、まず単独測位で目標点近くまで到達し、その後 DGPS 測位で微調整すればよいと考えられる。しかしながら、1m 内外の精度が要求される場合には測地系変換時の誤差が無視できないので、DGPS 受信機を WGS84 系に設定しておき、ノートパソコンと今回使用した TKY2WGS プログラムを使用し、WGS84 系での測位結果を Tokyo 測地系に精密変換し、目標点に到達したかどうかを検証する必要があると思われる。

2) 現地調査位置を後で特定する場合

要求精度が 10m 内外 (SA 解除後) の場合には、単独測位機種の Tokyo 測地系での測位結果をそのまま使用すればよい。要求精度が数 m の場合には、DGPS 機種の Tokyo 測地系での緯度経度、捕捉衛星数、PDOP や Age をログファイルとして持ち帰り、それらの情報を判読し、確からしい測位結果のみを選択して調査位置を特定すればよいと考えられる。1m 内外の精度が要求される場合には、1) と同様に、WGS84 系での測位結果を、Tokyo 測地系へ精密変換する手順を加える必要があると考える。

3) 精密測量に使用する場合

今回の実験では、平坦林内でもフィックス解が得られなかったため、地形遮蔽の影響がある実際の山

地林の樹冠下では、フィックス解はまず期待できないと思われる。現地へ干渉測位機種を2台携行し、測位不能あるいはフロート解を覚悟で精密測量を試みることも考えられるが、コスト面を考えるとあまり現実的ではないと考えられる。

なお、本節では高さ方向の精度検証は行っていない。また、実験はSA解除前、測地成果2000発効前に行われたことを明記しておく。

第2節 SA解除後の森林内外での測位精度

GPSの単独測位の精度を意図的に劣化させていたSA(Selective Availability:選択利用性)が、2000年5月2日午後1時(日本時間)に停止、解除された。この措置により、単独測位の精度は100m程度から20m前後(土屋・辻, 2001)へと格段に向上した。

SA解除に関連した森林における測位事例としては、森・武田(2000)、澤口ら(2001)、長瀬ら(2001)などがある。森・武田(2000)、澤口ら(2001)は、SA解除前後のDGPSによる測位結果を比較し、SA解除による精度の向上はなかったとしている。長瀬ら(2001)は、SA解除前のDGPSと解除後の単独測位による測位結果を比較し、両者の精度は概ね一致したとしている。しかしながら、これらの報告では、SA解除の恩恵を直接受けた単独測位による解除前後の比較がなされておらず、また、解除後の単独測位、DGPSの同時観測による比較検討もなされていない。

一方、小林ら(2001)はSA解除前(1999年11月)の森林内外において、単独測位、DGPS、干渉測位機種の同時観測によるGPSの測位比較を行っ

ている。本節では、小林ら(2001)と同一測点において、SA解除後(2000年11月)に単独測位、DGPSの2機種による同時観測を行い、その直接比較ならびにSA解除前後の単独測位機種間およびDGPS機種間の間接比較を行い、SA解除後の森林分野におけるGPSの利用性について検討した結果について述べる。

第1項 方法

実験は、2000年11月24日に、富山県林業技術センター林業試験場構内で行った。今回使用した機種を表2-7に示す。測点は小林ら(2001)で使用したものと同一であり、林外1ヶ所(G0)、林内4(コナラ林、スギ林2、ケヤキ林)ヶ所(G1~G4)の計5点である(表2-2、図2-2~6参照)。測点での観測は、1回目を午前9時36分から、2回目を午後1時20分から、G0、G1、G2、G3、G4の順にそれぞれ約10分間ずつ行った。測位は、カメラ用三脚に固定された板上に単独測位機種(以下「単独測位」という)の本体、DGPS機種(以下「DGPS」という)のGPS本体およびビーコンアンテナを設置して行った。その際、アンテナ同士が干渉しないよう配慮した。各測点での測位中の写真を図2-16~20に示す。また、開空間での衛星数等を把握するために、上空の開けた構内芝地に単独測位と同一機種(以下「開空間」という)を設置し、1、2回目の全観測時間をカバーする観測も併せて行った。測位はすべてWGS84測地系で行い、観測データはNMEA 0183フォーマットを用いて2秒間隔でノートパソコンに収集した。なお、実験日の広葉樹林は落葉の盛りであった。

表 2-7 使用した機種 (SA 解除後)

	メーカーまたは ブランド	受信機	チャン ネル数	測位方式	ビーコン局 の選択
単独測位機種	Garmin	GPS II PLUS	12	単独	—
DGPS 機種				DGPS	自動
(GPS 本体)	Garmin	GPS II PLUS	12	(海上保安庁	
(ビーコン受信機)	CSI	MBX-2		ビーコン局使用)	
開空間検証機種	Garmin	GPS II PLUS	12	単独	—



図 2-16 測点 G0 での測位状況



図 2-17 測点 G1 での測位状況



図 2-18 測点 G2 での測位状況



図 2-19 測点 G3 での測位状況



図 2-20 測点 G4 での測位状況

持ち帰ったデータファイルから GGA, GSA セン
テンスを切り出し, Excel, dBase 形式を経由して

GIS ソフトウェアに取り込み, WGS84 測地系の緯
度経度ポイントデータとした。これらポイントデー

タを GIS ソフトウェア内部ルーチンにより Tokyo 測地系の平面直角座標系第 VII 系の X, Y 座標値に変換した後, Tokyo 測地系の内部ひずみ補正を行って最終的な測位結果とした。測地系変換とひずみ補正には, 小林ら (2001) と同一の 3 パラメータ ($dx = -148\text{m}$, $dy = +507\text{m}$, $dz = +685\text{m}$), 同一の補正量 (X 方向: $+3.156\text{m}$, Y 方向: -1.787m) を使用した。

なお, 測点 G3 での DGPS の 2 回目観測において, 測定開始約 3 分後に緯度経度情報の欠落が一度生じたこと, 小林ら (2001) との整合性を取るために, X, Y 座標の算出は各回の観測で単独測位, DGPS 共通時間帯のうち, 後半の 5 分間とした。

第 2 項 結果と考察

測位誤差は, 小林ら (2001) でも使用した各測点の地上測量による X, Y 座標を真値として計算した。今回の測位結果を表 2-8 に示す。

観測 1 回目の測位誤差は, 単独測位の林外で 4.4 m, 林内で 4.0~21.7m, DGPS の林外で 4.3m, 林内で 3.6~5.8m であった。また, 観測 2 回目の測位誤差は, 単独測位の林外で 4.2m, 林内で 3.2~13.2 m, DGPS の林外で 2.0m, 林内で 3.4~7.7m であ

った。

平均誤差が 10m を超えたのは, 単独測位の 1 回目の G2, 2 回目の G1 である。とくに 1 回目の G2 においては, 開空間および DGPS の平均 PDOP 値がそれぞれ 1.80, 2.69 であるのに対して, 6.12 と極端に大きくなっており, 最大測位誤差も 190.9m という極端な数値を示した。原因は不明であるが, このときの DGPS の最大測位誤差はいずれも 10m 台であり, 単独測位は DGPS に比べ, 時として不安定になるといえる。

捕捉衛星数については, 1 回目の G3, G4 において単独測位の衛星数が開空間のそれを上回ったほかは, 双方とも開空間の概ね 0.6~0.9 の捕捉率を示した。

以下に, 前回 (小林ら, 2001) との比較も含めた比較検討結果について述べる。なお, 統計処理には, 前回, 今回分ともに 5 分間×2 回分の計 300 サンプルを使用し, 測位誤差の分布に正規性がみられなかったことから, 全てノンパラメトリック検定を行った。

表 2-8 測位結果 (SA 解除後)

		1回目(サンプル数:150)			2回目(サンプル数:150)			1・2回目(サンプル数:300)		
		単独 測位	DGPS	開 空間	単独 測位	DGPS	開 空間	単独 測位	DGPS	開 空間
G0 三角点	平均誤差 (m)	4.41	4.32		4.19	2.02		4.30	3.17	
	標準偏差	1.44	1.67		1.16	1.16		1.31	1.84	
	最大	6.99	6.53		6.87	5.14		6.99	6.53	
	平均衛星数	7.36	7.26	9.00	5.23	5.00	6.69	6.30	6.13	7.85
	衛星捕捉率	0.82	0.81	—	0.78	0.75	—	0.80	0.78	—
	平均 PDOP	2.16	2.20	1.88	2.90	3.33	2.35	2.53	2.77	2.11
G1 コナラ	平均誤差 (m)	6.80	5.76		13.21	6.57		10.00	6.17	
	標準偏差	3.23	2.76		7.99	4.26		6.88	3.61	
	最大	14.03	12.45		51.28	19.30		51.28	19.30	
	平均衛星数	7.71	7.81	8.43	4.73	4.91	5.41	6.22	6.36	6.92
	衛星捕捉率	0.91	0.93	—	0.87	0.91	—	0.90	0.92	—
	平均 PDOP	2.09	2.15	1.82	3.16	3.16	3.08	2.62	2.65	2.45
G2 スギ	平均誤差 (m)	21.70	3.60		3.22	3.39		12.46	3.50	
	標準偏差	43.53	2.22		1.57	1.66		32.11	1.96	
	最大	190.88	12.39		5.95	7.22		190.88	12.39	
	平均衛星数	5.44	5.89	8.00	4.91	4.53	6.51	5.18	5.21	7.25
	衛星捕捉率	0.68	0.74	—	0.75	0.70	—	0.71	0.72	—
	平均 PDOP	6.12	2.69	1.80	3.17	3.36	2.11	4.64	3.03	1.95
G3 スギ	平均誤差 (m)	5.05	5.39		5.84	7.71		5.44	6.55	
	標準偏差	2.82	1.86		3.01	7.17		2.94	5.36	
	最大	11.40	10.25		11.92	41.99		11.92	41.99	
	平均衛星数	7.73	6.75	7.00	6.83	6.02	6.99	7.28	6.38	7.00
	衛星捕捉率	1.10	0.96	—	0.98	0.86	—	1.04	0.91	—
	平均 PDOP	2.18	2.62	2.30	2.48	3.62	1.81	2.33	3.12	2.05
G4 ケヤキ	平均誤差 (m)	3.99	3.79		6.52	3.60		5.25	3.70	
	標準偏差	1.27	1.34		2.25	1.71		2.22	1.54	
	最大	6.26	6.32		10.66	8.11		10.66	8.11	
	平均衛星数	6.91	6.00	6.00	5.57	4.99	8.85	6.24	5.50	7.42
	衛星捕捉率	1.15	1.00	—	0.63	0.56	—	0.84	0.74	—
	平均 PDOP	2.52	3.60	3.60	3.85	4.00	1.57	3.18	3.80	2.58

誤差はひずみ補正後の水平誤差。衛星捕捉数＝（各機種の平均衛星数）／（開空間の平均衛星数）。

1. SA 解除前/後の比較

まず、SA 解除の効果を見るために、解除前後で林況にほとんど差がないと思われるスギ林（G2，G3）における測位誤差の比較結果を表 2-9 に示す。単独測位は SA 解除後に測位精度が大きく向上していることがわかった。

それに対して、DGPS は、G2 において精度向上がみられたものの、G3 においては精度が低下するという結果となった。2 ヶ所だけの比較であるが、DGPS はもともと SA の影響がほとんどなかった（土屋・辻，2001）といわれており、そのことが裏

付けられたと考えられる。また、この結果は、SA 解除により林内での DGPS 測位の精度向上がみられるようになったとはいえないとする森・武田（2000）や森林内では SA の解除後、DGPS に際だった測位精度向上が認められないとする澤口ら（2001）の知見とも一致する。

2. SA 解除後の単独測位/DGPS の比較

SA 解除後の単独測位、DGPS の測位誤差の比較結果を表 2-10 に示す。全ての測点において統計的有意差がみられた。G3 を除く 4 ヶ所において DGPS の測位誤差が単独測位のそれより小さく、SA 解除

後も DGPS 測位方式が有意であるという結果となったが、その差は G2 で約 9m と大きいほかは、1～4m 程度であった。空中写真図化により地形基本原図を作成する場合の平面位置の公差は、主要点で図上 0.2mm 以内、その他の点で図上 0.7mm 以内、また、この基本原図を修正する場合の水平位置の公差は図上 1.0mm 以内（日本林野測量協会，1992）とされている。これを 1/5,000 森林基本図に適用すると、実距離でそれぞれ 1.0, 3.5, 5.0m となり、原図またはその複写図をスキャンして GIS ソフトウェア等に取り込む際にも誤差が累積するであろうことを考えると、通常の森林管理業務における位置決めを使用する場合には、ビーコンアンテナなどの装備が増える DGPS は必要ないと考えられる。

3. SA 解除後のひずみ補正の有/無の比較

SA 解除後における、Tokyo 測地系の内部ひずみ

補正の有無による測位誤差の比較結果を表 2-11 に示す。単独測位は、G0, G3 において補正効果がなく、その他の測点においては統計的有意差がみられたものの、その差は 1m 以内とごくわずかであり、あえて補正を行う必要はないと考えられた。DGPS は全ての測点において統計的有意差がみられ、G3 を除く 4 点において 1～3m の精度向上がみられた。DGPS では、既知点（ビーコン局）と未知点（測位点）の同時観測により相対位置を求めることから、単独測位の誤差要因が相殺され、測位結果が内部ひずみ方向（南南東方向）にずれる傾向が強かったことにより、補正効果が現れたものと考えられる。一方単独測位では、DGPS 方式と比べて相対的に大きな測位誤差が内部ひずみ方向の誤差を打ち消してしまい、補正効果がほとんど現れなかったものと考えられる。

表 2-9 SA 解除前/後の比較

		G2	G3
単独測位	SA 解除前	32.58	23.53
	後	12.46	5.44
	検定結果	**	**
DGPS	SA 解除前	4.90	6.07
	後	3.50	6.55
	検定結果	**	有意差なし

数値はひずみ補正後の平均水平誤差（m）。

サンプル数は 300。**は有意水準 1%。Mann-Whitney 検定。

表 2-10 SA 解除後の単独測位/DGPS の比較

	G0	G1	G2	G3	G4
単独測位	4.30	10.00	12.46	5.44	5.25
DGPS	3.17	6.17	3.50	6.55	3.70
検定結果	**	**	*	**	**

数値はひずみ補正後の平均水平誤差（m）。

サンプル数は 300。*は有意水準 5%，**は有意水準 1%。符号検定。

表 2-11 SA 解除後のひずみ補正有/無の比較

		G0	G1	G2	G3	G4
単独測位	補正なし	4.19	10.73	13.13	5.30	6.12
	あり	4.30	10.00	12.46	5.44	5.25
	検定結果	有意差なし	**	**	有意差なし	**
DGPS	補正なし	4.18	8.30	4.78	5.90	6.86
	あり	3.17	6.17	3.50	6.55	3.70
	検定結果	**	**	**	**	**

数値は平均水平誤差 (m)。

サンプル数は 300。**は有意水準 1%。符号検定。

今回使用した DGPS システムは、安価なレジャー用 GPS 受信機とビーコン受信機との組み合わせであったが、このようなシステムではコストおよび装備面でのメリットはあまりなく、精密位置決めが必要とされない森林調査においては、レジャー用単独測位 GPS 受信機を単体で、ひずみ補正なしで使用するが適していると思われる。

なお、実際の測位にあたっては、今回使用した単独測位機種が持つ測位結果の平均化機能を使用するか、測位中に表示される EPE (Estimated Position Error) 値がなるべく小さいときの測位結果を採用することにより異常値の排除が期待できるが、今回の実験ではそれらに関するデータを取得しておらず、検討も行っていない。

また、1～数m程度の測位精度が要求される場合には、小林ら (2001) でも使用した GPS、ビーコン受信機一体型システムを、ひずみ補正ありで使用するのが良いと考えられる。

なお、本報告では測地成果 2000 を考慮していない。

第3節 引用文献

Deckert, C. and Bolstad, P. V. (1996) Forest canopy, terrain, and distance effects on Global Positioning System point accuracy. Photogram. Eng. Remote Sens. 62: 317-321.
Garmin Corp. (2000)
<http://www.garmin.com/support/faqs/2.html>
長谷川尚史・吉村哲彦・山手規裕・境慎二郎・福田昌史 (1998) 山岳林におけるディファレンシャル GPS の測位精度と手法の検討. 森利学誌 13 : 89-98.

海上保安庁 (2002) 日本全国の DGPS 局.

http://www.kaiho.mlit.go.jp/06kanku/ikoi/sea-sky/event/aids_to_navigation_department/mission/dgps/dgps_station.htm

小林裕之・矢田 豊・茶珍俊一・小神野和貴・野上由美子・鳥本秀幸 (2001) 森林内外での多機種の GPS 受信機による測位比較. 日林誌 83 : 135-142.

森 章・武田博清 (2000) S/A 解除による森林 DGPS の測位精度への影響. 日林誌 82 : 393-396

長瀬 興・吉田剛司・美濃羽靖・田中和博 (2000) 大枝演習林における DGPS 受信状況及び測位精度. 京都府大演報 44 : 27-31.

Næsset, E. (1999) Point accuracy of combined pseudorange and carrier phase differential GPS under forest canopy. Can. J. For. Res. 29 : 547-553.

Næsset, E., Bjerke, T., Øvstedal, O., and Ryan, L. H. (2000) Contributions of differential GPS and GLONASS observations to point accuracy under forest canopies. Photogram. Eng. Remote Sens. 66 : 403-407.

日本測量協会 (1998) 座標変換プログラム TKY2WGSF for Windows95 ユーザーズガイドーGPS 測量技術者のためのプログラム取扱説明書ー. 9pp, 日本測量協会, 東京.

日本林野測量協会 (1992) 民有林空中写真測量作業規定. 70pp, 日本林野測量協会, 東京

澤口勇雄・渡邊 悟・猪内正雄 (2001) リアルタイム DGPS の測位精度に及ぼす林況の影響. 森利学誌 16 : 35-42.

立木靖之・尾張敏章・吉村暢彦・石崎英治 (2000)

- 林内におけるディファレンシャル GPS の試用事例. 日林北支論 48 : 172-174.
- 土屋 淳・辻 宏道 (1997) 新訂版やさしい GPS 測量. 445pp, 日本測量協会, 東京.
- 土屋 淳・辻 宏道 (1999) 改訂版 GPS 測量の基礎. 276pp, 日本測量協会, 東京.
- 土屋 淳・辻 宏道 (2001) 新・やさしい GPS 測量. 449pp, 日本測量協会, 東京.
- 露木 聡・増田義昭・小谷英司・山本博一・高田功一 (1993) リモートセンシングによる森林資源調査における GPS の有効性－単独測位結果を使ったトレーニングエリアの抽出－. 日林論 104 : 271-274.
- 露木 聡 (1994) 森林資源調査における GPS 利用の可能性－ディファレンシャル GPS 測位精度の比較－. 森林計画誌 23 : 45-58.

第3章リモートセンシング（RS）

第1節 デジタルオルソフォト作成方法の比較

空中写真の地上分解能は一般的に、既存の地球観測衛星データ（例えば、LANDSAT TM は 30m、SPOT パンクロは 10m）のそれよりも高いが、中心投影特有の幾何学的ひずみを持っている。一方、地図は正射投影により作成されており、GIS（地理情報システム）の1レイヤーとして空中写真画像を取り扱う場合には、まずその写真をオルソフォト（正射写真）に変換する必要がある。

オルソフォトの作成には、オルソフォト装置などを使うアナログ方式と、コンピュータおよびソフトウェアを使いデジタル方式とがあるが、同じコンピュータを使う方式でも、ワークステーションと比べて安価な、パーソナルコンピュータを使うシステムが市販されるようになってきた。

本節では、このオルソフォト作成機能を持つ、米

MicroImages 社の TNTmips というソフトウェアを使い、3つの方法でデジタルオルソフォトを作成し、それらの精度についての簡単な検証を行った結果について述べる。

第1項 対象範囲と使用したもの

今回対象にした範囲は、富山県氷見(ひみ)市北部から石川県鹿島町および七尾市にかけての丘陵性山地であり、第三紀層地すべりの多発地帯でもある。空中写真は、国土地理院が 1992 年に撮影したもので、ステレオペアのオーバーラップ領域内の最高点は標高 564m（石動(せきどう)山山頂）、最低点は標高約 95m、主点の標高は約 505mである。表 3-1 に、今回のオルソフォト作成に使用したものを列挙する。

表 3-1 オルソフォト作成に使用したもの

区分	名 称	記 事
ハード	スキャナー	EPSON ES-8000, A3 サイズ対応
	パソコン	IBM-PC/AT 互換機
	ディスプレイ	三菱 RD21 GII, 21 インチ
	立体視鏡	牛方商会 CONDOR T-22
ソフト	OS	Windows95
	TNTmips	Version5.7(一部 Version5.8 使用)、解像度は主に 1280x1024 で使用
	DEM 変換ソフト	国土地理院 50mメッシュ DEM を ASCII 形式からバイナリ形式に変換する自作ソフト
データ類	密着空中写真	国土地理院、白黒、約 1/25,000、高度 3,900m、CB-92-2X C2-10(左)、C2-11(右)、スキャン用
	2 倍引伸空中写真	同上、立体視用
	地形図	国土地理院、1/25,000「能登二宮」、GCP マーク書込用
	地形図画像	国土地理院、数値地図 1/25,000(地図画像)、「能登二宮」、GCP 取得時および精度検証用
	50mメッシュ DEM	国土地理院、数値地図 50mメッシュ(標高)、「能登二宮」
その他	まち針、デルマト等	2 倍引伸空中写真への刺針、記入用

第2項 作成方法

デジタルオルソフォトの作成方法は、DEM（数値標高モデル）をキーワードとして、図 3-1 のように区分することができるが、今回は以下の 3 つの方法で作成した。

方法 1：ペア写真から発生させた DEM を使用

方法 2：国土地理院の 50mメッシュ DEM を使用

方法 3：GCP の標高値のみを使用

空中写真のスキャン解像度は、併用する 1/25,000

地図画像のセルサイズ（1 ピクセル当たりの地上距離）2.5mに合わせるために、250dpi（dot/inch）とした。

作業手順は、まず 2 倍引伸写真を立体視して、山頂や谷の合流点などの GCP（地上基準点）候補を 43 点選んだ。次に、密着写真をスキャナにより読み込み、地図画像を参照しながら交差点や道路の屈曲点などを 57 点選び、左写真内で合計 100 点の標高値付き GCP を取得した。続いて標定作業を行い、

DEM を発生させ、その DEM およびオーバーラップ領域内 89 点の GCP ならびにオーバーラップ領域左画像を使用してオルソフォトを作成した。方法 1 の作業フローを図 3-2 に示す。また、方法 2、3 に

ついては、方法 1 と同一 GCP 及び同一画像を使用し、さらに方法 2 では 50m メッシュ DEM を内挿したものも使用し、オルソフォトを作成した。地図座標は、1/25,000 地形図と同じく UTM 座標系とした。

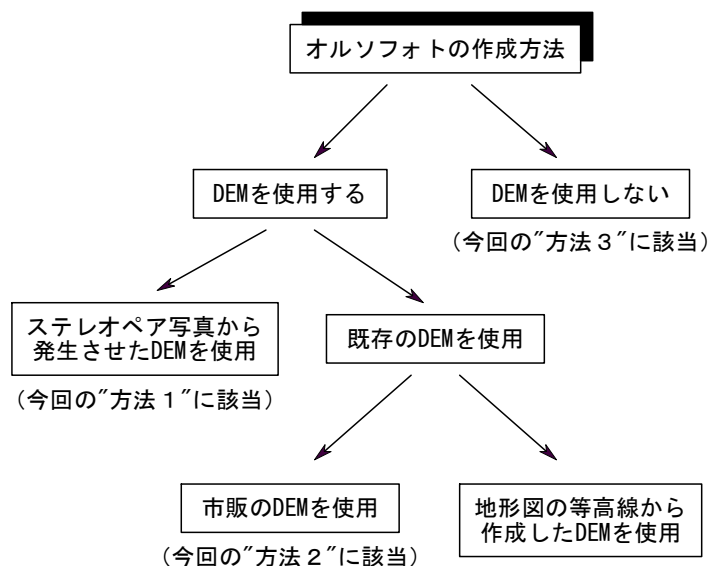


図 3-1 DEM をキーとしたオルソフォト作成方法の区分

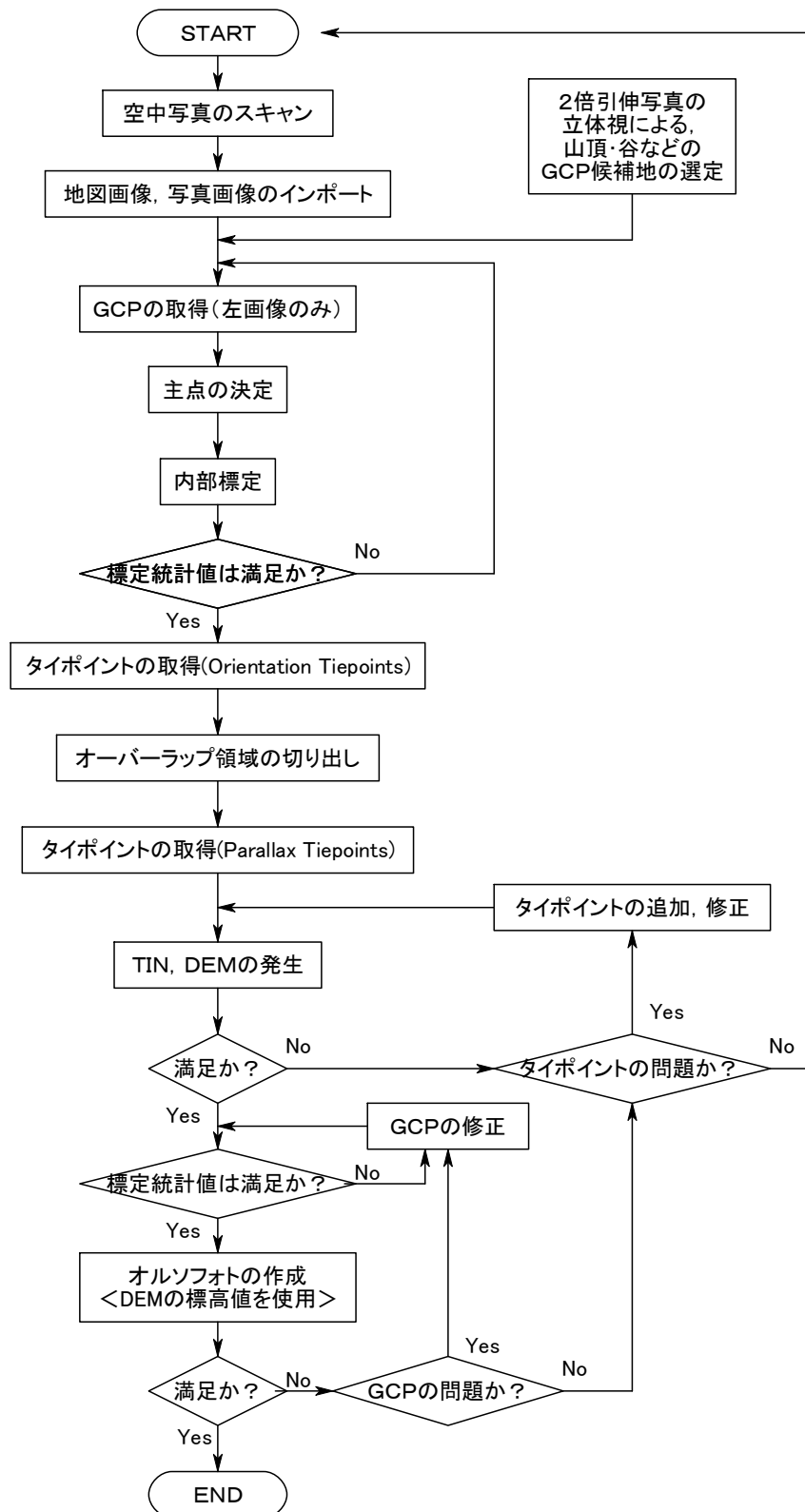


図 3-2 方法1の作業フロー

第3項 結果と考察

方法 1, 2, 3 で作成したオルソフォトを, 図 3-3, 4, 5 にそれぞれ示す。これらを一見しただけでは, 画像の外枠の違いしか識別できないが, よく見ると, 図 3-3 の右側上部や右側中部において, 霜柱状の画像の乱れが確認できる。同様の現象は, 図 3-4 の右側中部においても生じている。これらの場所は, 左写真の主点から見た山の裏側（背斜面）に該当し, 元の写真では相対的に縮んで写っていたものが, オルソ化されたときに引き伸ばされたことによって生じたものである。この乱れを修正するには, 例えば, 右写真からもオルソフォトを作成し, 2 つのオルソフォトをモザイク（合成）するなどの処置が必要であると考える。

1/25,000 地図画像から抽出した道路（黒で表示）をオルソフォトに重ねた, 部分拡大図を図 3-6 に示す。左列の 3 枚では, 各方法間での道路のずれ具合には明瞭な差はみられないが, 中央列, 右列の 3 枚からは, 方法 1, 2 に比べて方法 3 の精度が明らかに劣っているということがわかる。図 3-6 全体を通じて, 方法 1 と方法 2 の間では明瞭な精度差はみら

れない。なお, オルソ変換後の GCP の平均残差は, 方法 1, 2, 3 で, それぞれ 16.4m, 17.0m, 30.6m であった。

一方, 地形図に表示される各種表現対象物の平面位置の精度（標準偏差）としては基準点（標定点を含む）の誤差をないものと仮定して, 地上における明瞭な地点の平面位置を図上 0.7mm としている（高橋正義編, 1988）とあり, 今回の 1/25,000 地形図にこれを適用すると 17.5m となるので, 方法 1, 2 については, ある程度の精度が出ていると思われる。各方法間の違いをまとめたものを表 3-2 に示す。今回の結果のみから判断すれば, 作業量と精度のバランスにおいて, 方法 2 が最適であったということになる。最も苦勞して, できる限り精細な DEM を発生させたつもりの方法 1 の精度が, 方法 2 のそれと大差ないのは, オペレータ（筆者）の未熟さによる部分もあると思うが, 許容可能なオルソフォトの作成にはファジーな DEM でも十分である（Keith Ghormley, 1997）ともいわれているので, 精細な DEM がほしい場合以外は, 無理してペア写真から作る必要はないとも考えられる。



図 3-3 方法1で作成したオルソフォト全景



図 3-4 方法 2 で作成したオルソフォト全景



図 3-5 方法 3 で作成したオルソフォト全景

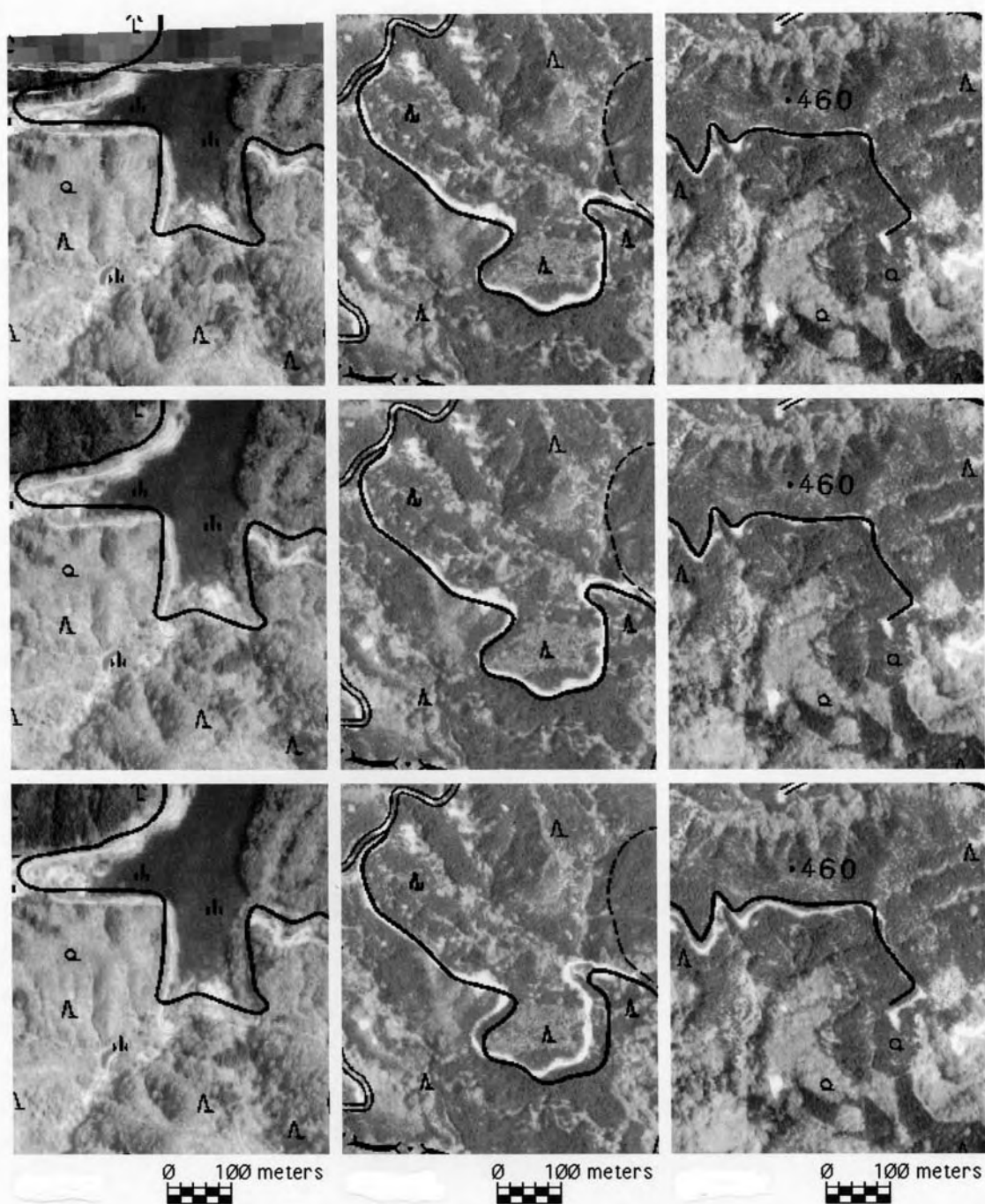


図 3-6 オルソフォトの部分拡大図

上から方法 1, 2, 3 の順。

表 3-2 オルソフォトの作成方法別比較表

作 業 量		オルソの精度	1 回当たりの 作成可能範囲	副産物
方法 1	方法 2, 3 では不要な、タイポイントの取得から DEM の発生にかけての作業量がとても多い	方法 3 より良いが、 方法 2 とほぼ同じ程度	オーバーラップ 領域のみ	DEM
方法 2	DEM を発生させる必要がないので、 方法 1 よりはるかに少ない	方法 3 より良いが、 方法 1 とほぼ同じ	単写真 1 枚分	
方法 3	方法 2 よりも少ない	方法 1, 2 より悪い	単写真 1 枚分	

第 2 節 簡易デジタルオルソフォト作成の効率化

森林 GIS の背景として使用するため、あるいは林相区分、崩壊地抽出などの画像解析に使用するために、なるべく精度良く、しかも早く安く大量にデジタルオルソフォトを作成することが求められている。

GIS ソフトウェアのなかには、このデジタルオルソフォトを作成する機能を持つものがあり、これまでに小林（1998）、光田ら（2000）、乾（2000）などが TNTmips を使用し、ステレオペア写真あるいは単写真と既存の DEM を使った作成事例を報告している。

小林（1998）は、国土地理院（以下「地理院」）の 1/25,000 地図画像を使用して 100 点の GCP を取得し、ステレオペア写真から発生させた DEM、地理院の 50m メッシュ DEM および GCP の標高値と異なる 3 種類の標高データを使用して、撮影縮尺 1/25,000 の空中写真からオルソフォトを作成したところ、オルソ変換後の GCP 残差の平均がそれぞれ 16.4, 17.0, 30.6m であったとしている。また、得られる精度と作業量とのバランスから、単写真と地理院の DEM を使用する方法が最適であったとしている。

光田ら（2000）は、日本林業技術協会が作成したオルソフォトを使用して 62 点の GCP を取得し、ステレオペア写真から発生させた DEM、1/5,000 地形図から作成した 30m メッシュ DEM および地理院の 50m メッシュ DEM の 3 種類の標高データを使用して、撮影縮尺 1/16,000 の空中写真からオルソフォトを作成したところ、変換後の GCP 残差の平均がそれぞれ 12.0, 16.9, 17.5m であったとしている。また、作業量と精度のバランスから、単写真と地理院の DEM を内挿して使用する方法が最も効率的であると、小林（1998）と同様の報告をしている。

乾（2000）は、1/5,000 森林基本図を使用して 6 点の GCP を取得し、地理院の 50m メッシュ DEM を内挿したものを使用してオルソフォトを作成したところ、変換後の GCP 残差の平均が 9.2m であったとしている。

これら 3 者が使用した GIS ソフトウェアによる作成法は既に確立されつつあるが、より早く、なるべく正確に作るには GCP を何点取ればよいのか、また、地理院以外から販売されている DEM を使用した場合に変換精度に違いが現れるか否かについて、まだ検討の余地が残っている。そこで本節では、今後の大量生産を考慮し、合計 280 枚の空中写真を使用して、GCP 数と市販 DEM2 製品の違いによる、オルソフォトの精度と作成効率についての検討を行った結果について述べる。

なお本節において“簡易”という用語は、単写真と既存の DEM を利用するという意味で使用している。

第 1 項 方法

今回使用した空中写真は、中山間地域地図情報整備事業で富山県が 2000 年に撮影した 1,288 枚のうち、福光地区 77 枚と氷見地区 203 枚である。オルソフォトの作成範囲を図 3-7 に示す。福光地区の最高点は医王山（939m）、最低点は町役場北東部の水田（約 50m）であり、氷見地区の最高点は石動山（564m）、最低点は海面（0m）である。オルソフォト作成に使用した写真、地図類とそれらの諸元を表 3-3 に、また作成フローチャートを図 3-8 に示す。

航測用カメラによって撮影された単写真標定では、3 次元の地上座標が測定されている基準点と、対応する 2 次元写真座標を用いて、撮影されたカメラの位置とカメラの傾きを求める空間後方交会法が用いられ、3 点以上の基準点（GCP）が必要である（解

析写真測量委員会，1989)。今回福光地区については写真1枚当たり20点，氷見地区については10点を目標にGCPを取得し，オルソ変換後のGCP残差の最大値が，正射写真図の公差の基準値（縮尺

1/5,000で平面位置が図上2mm以内）（林野庁計画課，2002）である10.0m以内に収束するまで，残差の大きいGCPの削除，修正とオルソ変換を繰り返した。

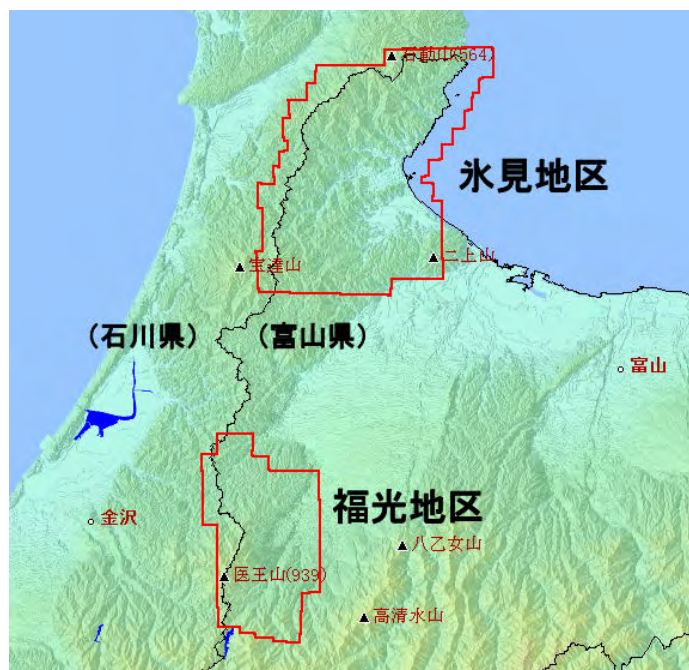


図 3-7 オルソフォトの作成範囲（赤枠）

背景は国土地理院の50mメッシュDEM

表 3-3 使用した資料，ソフトおよび器機の諸元

区 分	名 称	諸 元
空中写真	福光地区	カラー，1/10,000，C22-3194～C27-3458，計 77 枚
	氷見地区	カラー，1/10,000，C1-2850～C14-782，計 203 枚
地形図	福光町管内図	白黒，1/5,000（山間部），1/2,500（平野部），計 69 枚
	氷見市管内図	白黒，1/5,000，国土基本図，都市計画図，計 31 枚
DEM	数値地図（標高）	50mメッシュ，国土地理院
	GISMap Terrain	10mメッシュ，北海道地図(株)
GIS ソフトウェア	TNTmips	MicroImages 社
スキャナ	ES-8000	A3 判対応，セイコーエプソン(株)，空中写真用
	ScanPlus III 400T	A0 判対応，CalComp 社，地形図用

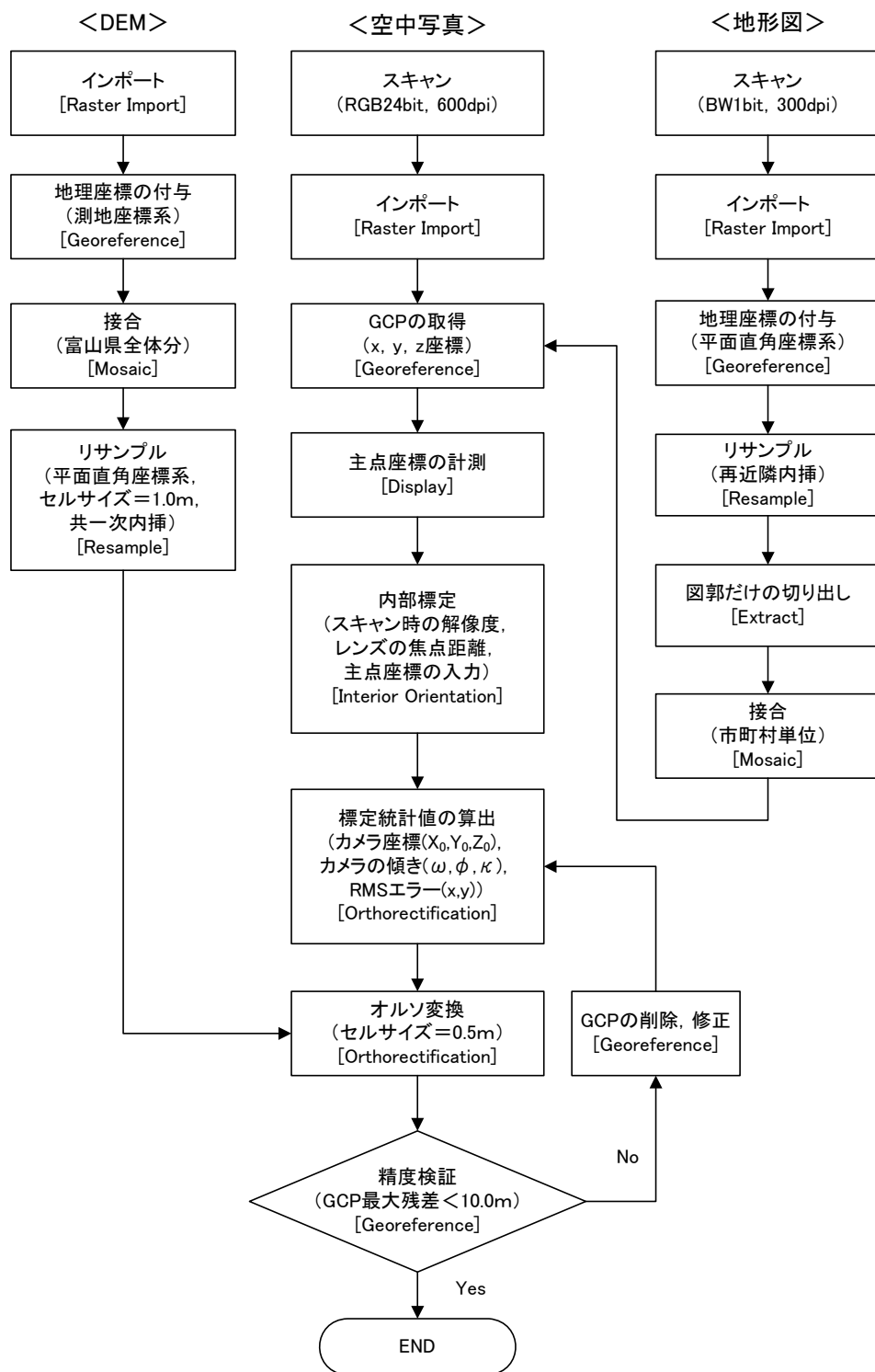


図 3-8 簡易デジタルオルソフォトの作成フローチャート

[] は使用した GIS ソフトウェアのモジュール名。

GCP は、地図画像と写真画像の両方で明瞭に識別できる、平野部では農道の交差点、山間部では林道の分岐点などから順に取得した。その際、地形図に

標高値が記載されているものについてはその標高値を採用し、記載されていないものについては周囲の等高線から補間して標高値を求めた。福光地区 77

枚と氷見地区の前半約 170 枚についてはこの方式を取ったが、効率が悪いことが判明したので、氷見地区の後半約 30 枚については、参照地図画像の背景に 10mメッシュ DEM 画像を表示し、地形図に標高値の記載がない点の値を DEM から採取した。

なお、一連の作業は、GIS ソフトウェアの使用経験がない同一アルバイト職員が、福光地区（50mメッシュ DEM を使用して収束させた後、同一 GCP を用いて 10mメッシュ DEM も使用）、氷見地区（10

mメッシュ DEM のみ使用）の順に行った。また、今回使用した GIS ソフトウェアは、オルソ変換前に X または Y 方向の RMS エラーが 4.0 ピクセルを超えていると警告を発するが、主な対象が山間部の森林地帯であることを考慮し、RMS エラーが両方向ともに 10.0 ピクセル程度に収まるように努力はしたが、たとえ警告が出てもそれを無視して作業を続けた。作成した全オルソフォトを図 3-9、10 に示す。

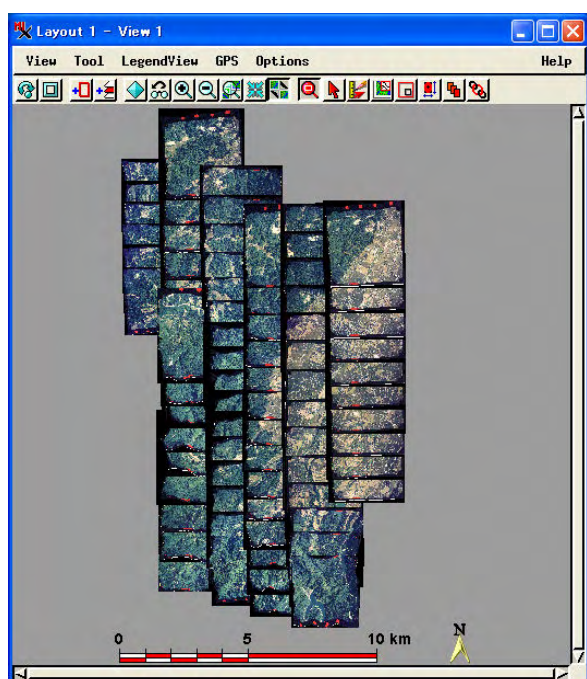


図 3-9 福光地区の全オルソフォト

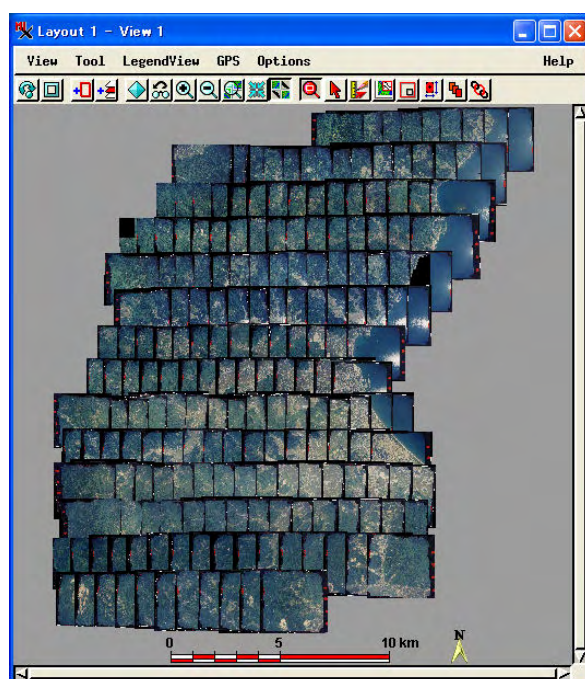


図 3-10 氷見地区の全オルソフォト

第 2 項 結果と考察

1. GCP の取得効率

デジタルオルソフォトの作成作業全体に占める GCP 取得作業の割合は非常に大きく、最も時間を要するのがこの作業である。1 回目のオルソ変換を行う前までの、初期 GCP の取得効率を表 3-4 に示す。1 日（実働 6 時間）当たりの取得枚数は、目標を 20 点（実取得数は 16.8 点）に設定した福光地区では 3.4 枚、目標を 10 点（実取得数は 9.8 点）に設定した氷見地区では 7.8 枚であり、1 時間当たりの取得点数は、福光、氷見でそれぞれ 9.4、12.8 点であった。

福光での取得率（84%）が氷見でのそれ（98%）より低かったのは、目標点数 20 を満たすだけの明瞭な点をオペレータが発見できなかったことによる。この理由には、オペレータがまだ未熟練であったこと、福光地区は氷見地区と比べて山が深く（図 3-7）、山間部において道路等の人工構造物の割合が相対的に低かったこと等が考えられる。また、1 時間当たりの取得点数も福光が氷見より少なかったが、これは、前記二つの要因および福光では標高値の取得に DEM を併用しなかったことが影響したものと考えられる。

表 3-4 初期 GCP の取得率と取得効率

地区名	写真 枚数 (枚)	取得 GCP 数 (点)	GCP の取得率			延べ作業		GCP の取得効率		
			平均 (点/枚)	目標 (点/枚)	取得率 (%)	日数 (日)	時間数 (hr)	日あたり (枚/日)	時間あたり (点/hr)	点あたり (分/点)
福光	77	1,297	16.84	20	84	23	138	3.35	9.40	6.38
氷見	203	1,995	9.83	10	98	26	156	7.81	12.79	4.69

2. 収束までの変換回数

福光、氷見地区のオルソ変換後の GCP 最大残差と変換回数との関係を、図 3-11、12 にそれぞれ示す。福光では各オルソフォトの残差最大値が 10.0m

以内に収まるまで最高 9 回の変換が、また氷見では最高 4 回の変換が必要であった。氷見が福光より早めに収束したのは、前述の要因による影響と考えられる。

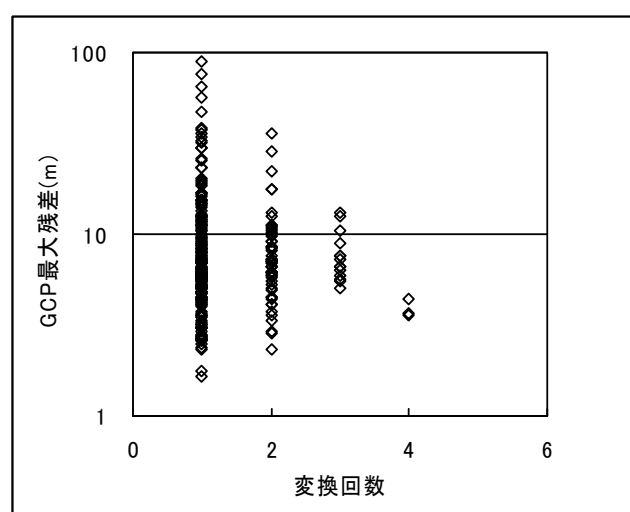
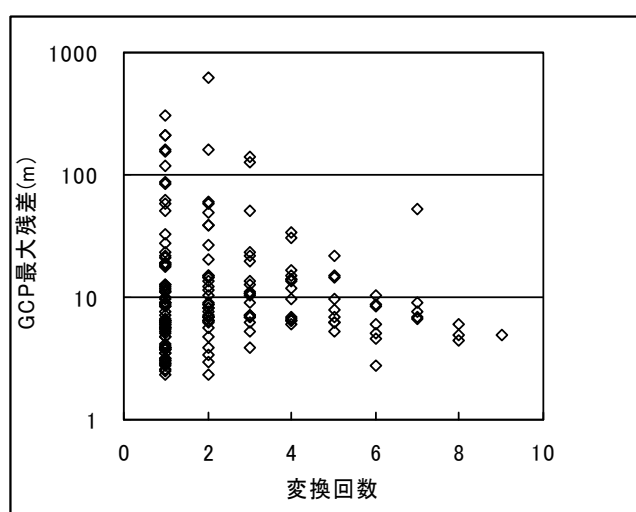


図 3-11 福光地区での GCP 最大残差と変換回数

図 3-12 氷見地区での GCP 最大残差と変換回数

プロットは全写真の全変換回数の最大残差。

3. DEM の違いによる精度比較

福光地区における DEM の違いによるオルソ変換後の GCP 残差の比較を表 3-5 に示す。50mメッシュ、10mメッシュを使用した場合の平均残差はそれぞれ 2.50、2.41mであった。この両者は、カメラパラメータ、写真座標、GCP の 2 次元座標までは共通であり、GCP の画素が変換される際に使用される DEM が異なるだけであるが、変換後の残差に有意差は認められなかった。また、オルソ画像と地図画像を重ねて目視判読を行っても、道路の線形等に明

瞭な精度差は認められなかった。今回使用した DEM はともに地理院発行の 1/25,000 地形図の等高線を元に作成されており、GCP となり得るような人工構造物が存在する場所においては標高差が現れなかったと考えられる。GCP を取ることが不可能な斜面等においては、メッシュサイズの小さい DEM に多少なりとも優位性があると考えられることから、氷見地区においては 10mメッシュ DEM だけを使用してオルソ変換を行った。

表 3-5 福光地区での DEM の違いによる GCP 残差の比較

	地区全体の GCP 数	全 GCP の平均残差(m)
50mメッシュ DEM	1,185	2.503
10mメッシュ DEM	同上	2.411
t 検定における p 値		0.061

4. GCP 数の違いによる精度比較

ともに 10mメッシュ DEM を使用した、福光、氷見地区の GCP 残差の比較を表 3-6 に示す。目標を 20 点/枚とした福光、10 点/枚とした氷見でのオルソ変換後の平均残差はそれぞれ 2.41、3.06mであり、両者の間には有意差が認められた。このことは、時

間を掛けて GCP を余分に取得すること(1 点当たり 4.7~6.4 分、表 3-4) によりオルソフォトの精度が向上することを示唆しているが、その差は約 60cm (1.2 画素分) であり、簡易オルソを早く大量に作成するという観点からは、無視してもよい精度差であると考えられる。

表 3-6 GCP 数の違いによる GCP 残差の比較

	目標 GCP 数 (点/枚)	取得 GCP 数 (点/枚)	地区全体の GCP 数	全 GCP の 平均残差(m)
福光地区	20	16.84	1,185	2.411
氷見地区	10	9.83	1,896	3.061
t 検定における p 値				<0.001

今回は試験的に地区内全ての空中写真をオルソ化したが、森林管理業務での使用を考えると平野部の写真は除外することができ、また、撮影コース(通常は 60%のオーバーラップ)方向に 1 枚おきに間引きするなどすれば、変換対象の写真数をかなり減らすことが可能である。このようにして枚数のある程度絞り込んだ後、市町村管内図等の小縮尺地形図と DEM を使用して 10 点程度の標高値付き GCP を取得し、50mメッシュ DEM (もしあれば 10mメッシュ DEM) を使用してオルソ変換と GCP の修正を 1~数回繰り返して目標基準値を満たすという手順が、単写真と市販 DEM を用いた簡易デジタルオルソフォトの効率的な作成方法であると考えられる。

第 3 節 引用文献

Keith Ghormley (1997) Making DEMs and Orthophotos. 20pp, MicroImages, Inc., Lincoln.
<http://www.microimages.com/getstart/> より最

新版をダウンロード可能
 乾 雅晴(2000) 50mメッシュ DEM を用いた空中写真の幾何補正. 森林応用研究 9-1 : 149-151.
 解析写真測量委員会(1989) 解析写真測量改訂版. 190pp, 日本写真測量学会, 東京.
 小林裕之(1998) 自分で作るオルソフォトーパソコンと市販ソフトによる作成例ー. 森林航測 185 : 1-8.
 光田 靖・高田佳夏・溝上展也・吉田茂二郎・今田盛生(2000) 作成方法の違いによるデジタルオルソフォトの位置精度の比較ーTNTmips を用いた研究事例ー. 九大演報 81 : 1-11.
 林野庁計画課(2002) 森林計画業務必携ー平成 14 年度版ー. 1342pp, 日本林業調査会, 東京.
 高橋正義編(1988) 地図学. 266pp, 朝倉書店, 東京.

第4章 地理情報システム (GIS)

第1節 地すべり危険地のマッピング

地すべりや地すべり性崩壊の発生位置のほぼ90%近くは古い地すべりの再移動やそれに伴う周辺部のすべり（日本測量調査技術協会編，1984）であり，特定の地層とくに中新世中期から後期の地層分布地に密集し，また小断層・褶曲軸に沿って帯状に連なっている（林野庁地すべり対策協議会編，1976）ともいわれており，地すべり危険地の選定や危険度の判定に関してこれまで様々な研究がなされ，各省庁からも指針が示されてきた。

空中写真の立体視によって地すべり地形を抽出し，危険地を選定しようとする事例には，北海道の地すべり地形分布図（山岸宏光編，1983）や東北，中部，関東地方の地すべり地形分布図（防災科学技術研究所・科学技術振興機構，2005）などがあり，後者はweb上で公開され，誰もがアクセス可能となっている。また，林野庁の地すべり危険地区調査では，既存の資料を元に対象地区を選定した後，地質，地況，植生，地すべり状況等の定性的な調査結果の組み合わせから地すべり危険度を3ランクに，保全対象の質，量から被災危険度を3ランクに分け，これら2者を総合した危険度をA，B，Cの3ランクに分けて判定する（林野庁，1994）という手法で危険地選定，危険度判定を行っている。これらの手法で用いられるのは主としてアナログ的な技術であり，定性的な判断には高度な専門的知識が要求され，特に空中写真による実体視判読は熟練を要し，一般的な技術者がこれを行うことは容易ではない。

一方，定量的な手法を用いた危険地選定，危険度判定に関する研究例としては，地すべり調査平面図から得られる等高線のスペクトル解析や地形要因の統計解析による危険度判定（吉松ら，1979），地形，地質，その他の要因を用いた数量化理論による危険度評価（杉山ら，1987），1/25,000 地形図から計測または判読できる地形情報のみを用いた数量化理論による危険度評価（吉澤・石井，1990），地形要因と衛星データから得られる植生指標などを用いた数量化理論による危険度評価（後藤ら，1996）などがある。これらの手法で用いられるのは主としてデジタル的な技術であり，高度な専門的知識はそれほど必要ではないが，GISが普及する以前になされた狭域を対象とした事例が多く，GISと統計解析を利用した広域的な解析事例はこれまでほとんどない。

そこで本節では，富山県全体という広域を対象とし，定性的，アナログ的に作成された既存の地すべり危険地，危険度マップを補完することを目的として，地形，地質および植生情報をGIS上で整備し，デジタル解析によって既存の地すべり防止区域と類似性が高い区域のマッピングを行った結果について述べる。なお，地すべりに関連する要因の評価には，ベイズの定理を応用したWeights of Evidenceという新しい空間統計解析手法を用いることとした。地すべり危険地マッピングのフローチャートを図4-1に示す。

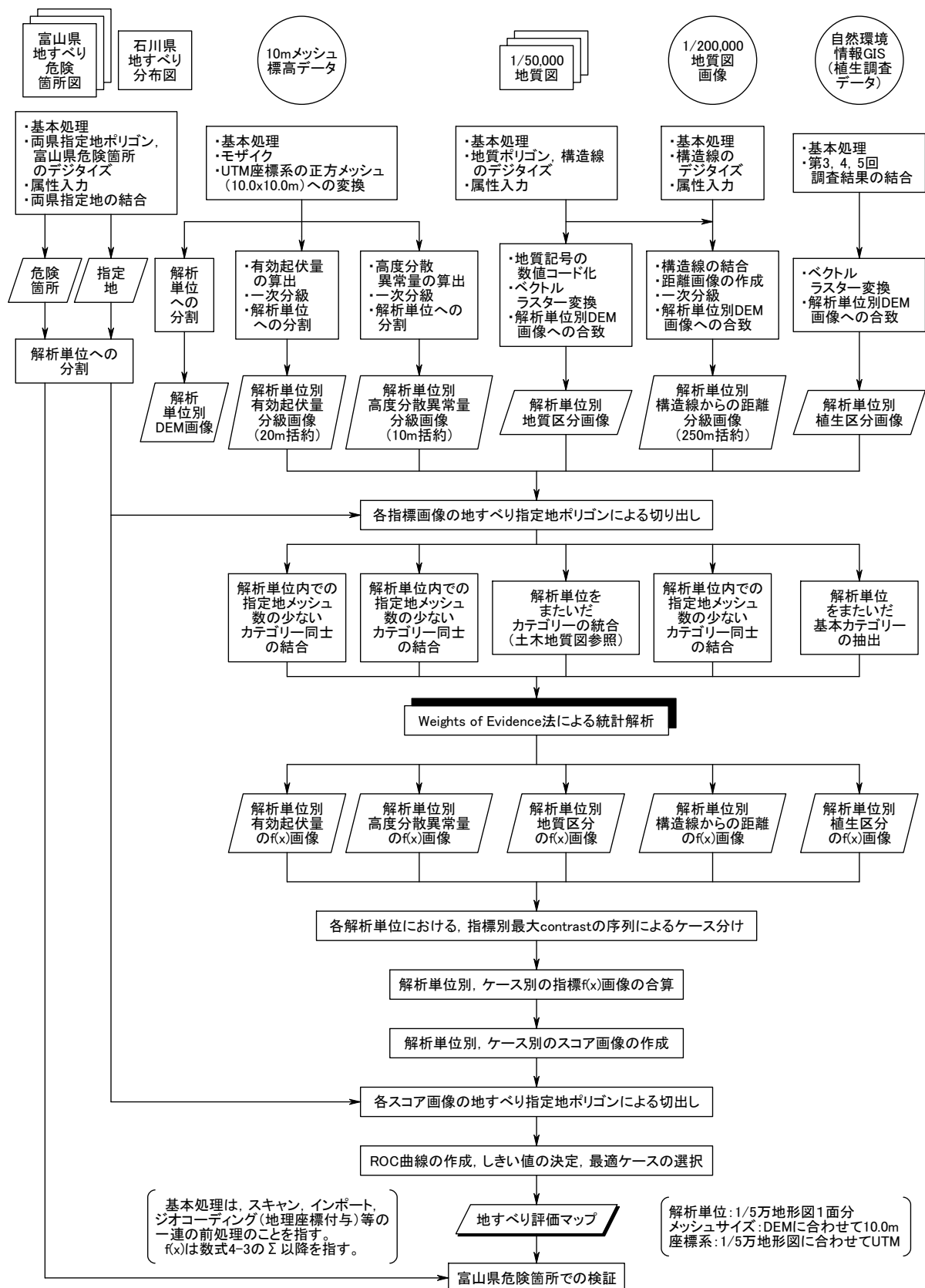


図 4-1 地すべり危険地マッピングのフローチャート

第 1 項 材料と方法

1. 調査対象と使用した地図類

調査の対象は、地すべり防止区域（以下「地すべり指定地」）が存在しない富山県南東部を除く地域とし、解析の単位を 1/50,000 地形図の範囲とした（図

4-2）。ただし、「虻ガ島」、「三日市」は面積が小さく、単独で取り扱うことは統計解析上好ましくないと思われたので、それぞれ、「氷見」、「泊」と結合し、「氷見・虻ガ島」、「三日市・泊」とした。使用した地図類を表 4-1 に示す。

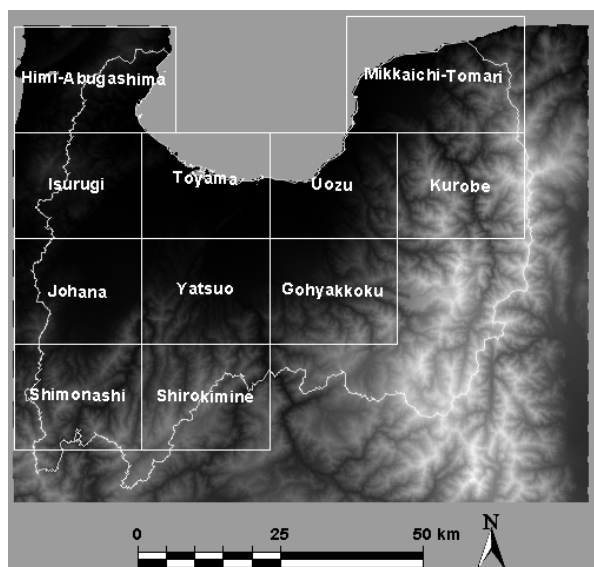


図 4-2 調査対象と解析範囲

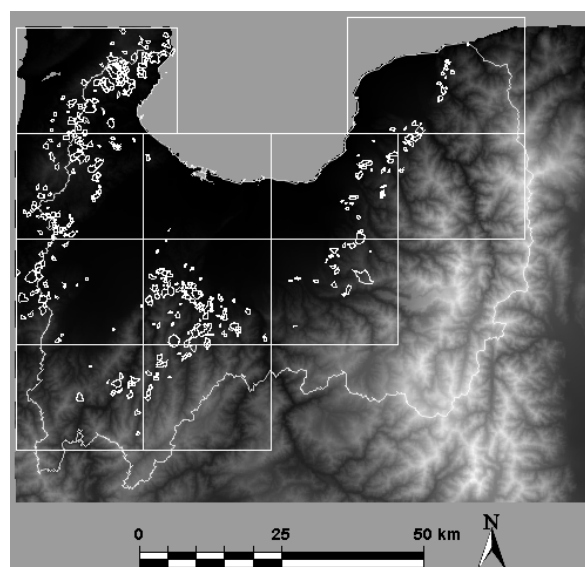


図 4-3 解析単位と地すべり指定地の分布

背景は 10m メッシュ DEM。

大きなポリゴンは富山県、矩形ポリゴンは解析単位、小さなポリゴンは富山県、石川県の地すべり指定地。

表 4-1 使用した地図類

名称(縮尺)など	区分	図幅名など	発行元、発行年など
標高データ(10mメッシュ)	D	富山県全体を含む、1/25,000 地形図 77 面分	北海道地図(株)、2002、2003 年購入
地質図(1/5 万)	A	「邑知湯」、「虻ガ島」、「石動」、「城端」、「富山」、「八尾」、「白木峰」、「魚津」、「五百石」、「三日市」	地質調査所、1960～1989 年
表層地質図(1/5 万)	A	「下梨・白川村」、「三日市・泊」、「黒部・白馬岳」	国土庁、1987～1993 年
地質図(1/20 万)	D, A	「輪島」、「七尾・富山」、「富山」、「金沢」、「高山」	地質調査所、1961～1999 年
石川県地質図(1/10 万)	A	石川県全体	石川県、1993 年
現存植生図(1/5 万)	D	富山県全体を含む、1/50,000 地形図 20 面分	環境庁自然環境情報 GIS 第二版、1999 年
地すべり危険箇所図(1/2.5 万)	A	富山県全体	富山県、1999 年発行、2004 年修正
地すべり分布図(1/10 万)	A	石川県全体	石川県、1993 年

区分の D はデジタル、A はアナログ。

2. データセットの構築

(1) 地形データ

地形データの基本となるのは、数値標高データ (Digital Elevation Model, 以下「DEM」) である。ここでは、調査対象地域で一般に入手できる DEM

としてはメッシュサイズが最も小さい 10m メッシュの DEM を使用した。この DEM は 1/25,000 地形図の図郭ごとにファイル化されており、個々のデータファイルの取り込み、ジオコーディング (地理座標の付与) などの基本的な前処理 (以下「基本処理」)

の後、全ての画像を単純に接合してひとつのモザイク画像を作成した。その後、測地座標系から UTM 座標系への変換を行い、10.0m×10.0mの正方メッシュへと変更した。

DEM から算出できる地形指標には、斜面傾斜、斜面方位、起伏量、高度分散量 (Ohmori, 1978)、開度 (横山ら, 1999) など様々なものがあるが、本節では、地すべりの誘因となる地下水の供給量を示す有効起伏量と、地すべり地形と関連が高い高度分散異常量を算出した。

有効起伏量とは、ある地点より上位に位置する斜面や山体から供給される地表、地中水量の大小を示す指標であり、注目点から一定範囲内にある最高点と注目点との標高差 (竹下, 1971) として定義される。なお、竹下 (1971) では山腹崩壊を対象とした有効起伏量の算出対象として半径 100m の円形領域を使用しているが、本節の対象は地すべりであることから、算出対象の領域窓サイズは、細かな谷が概ね消え去る範囲として、510×510m (51×51 画素) の矩形領域を使用し、GIS ソフトウェアのマクロ言語プログラムにより算出した。

高度分散量は単位面積中の標高値の標準偏差であり、三箇・藤原 (2000) は日本全域の 1km 四方の高度分散量が 1km 四方の平均標高の累乗式 (標準地形曲線) で近似できることを示した。三箇・藤原 (2000) はまた、注目点の標高値から近似式で予測される高度分散量と、注目点の周囲の標高値から実際に計測される高度分散量との差を高度分散異常量と定義し、高度分散異常量の不連続線が地質・構造境界に一致する場合があることを明らかにした。さらに、単位面積を小さくすると、より小さな規模の地形変化を捉えることが可能であると考えられたことから、小林・三箇 (2003) は、計測する単位を 250m 四方、地域的な標準地形曲線を求める範囲を、盆地を含む山間地でも累乗式が適用できる 20×20km として高度分散異常量を算出し、その負の異常地帯が既存の地すべり地とよく一致することを明らかにした。これは、地すべりが生じた地域が周囲よりも凹凸の少ない滑らかな地形を呈するためであると考察された。

なお、高度分散異常量の実際の計算は、(1) 標高の平均および標準偏差 (高度分散量) を計測するための小領域 (数十～数百メートル四方位程度) を設定し、

(2) 対象全体を数十キロメートル四方位程度の中領域に分割し、(3) 中領域内の各小領域で計測した平均標高と高度分散量から近似式 (地域標準地形曲線) を求め、(4) 注目点近傍の 4 つの地域標準地形曲線から注目点での高度分散量を予測し、(5) 注目点での高度分散量の計測値から予測値を引く、という手順をとる。

本節では、前述の計測単位 (小領域) 窓サイズ、地域標準地形曲線を求める範囲 (中領域) を、小林・三箇 (2003) で実績がある、それぞれ 250×250m (25×25 画素)、20×20km として、C 言語プログラム (三箇・藤原, 2000) により算出した。

対象地域全体を含んだ計算結果は、有効起伏量、高度分散異常量でそれぞれ 0～695m、-127～127m となったが、後の統計解析を考慮しそれぞれ 10 カテゴリー程度になるよう、有効起伏量は 20m ごと、高度分散異常量は 10m ごとに括約し、分級画像を作成した。また、UTM 座標系に変換後の DEM を前述の解析単位 (図 4-2) ごとに切り出し、有効起伏量、高度分散異常量の分級画像も同様に切り出した。

(2) 地質データ

本節において基本となる地質図は、縮尺 1/50,000 の紙地図である。これらの地質図は、基本処理を行った後、地質区分境界線、断層線、衝上断層線、背斜軸線、向斜軸線をデジタイズしてベクトルデータを生成し、地質記号等の属性データも入力した。また、1/50,000 地質図には記載されていない背斜軸が 1/200,000 地質図に記載されていることが判明したので、それら 5 枚の地質図画像より、背斜軸、向斜軸のデータも生成した。

1/50,000 地質区分ポリゴンデータには、地質記号の時代区分が新しい方から古い方へ向かって順に 1, 2, 3・・・と数値コードを与え、それらの数値を画素値として持つラスターデータへと変換し、メッシュサイズ (=10.0m) および画素数を解析単位ごとの DEM 画像に合致させた。

断層、衝上断層、背斜軸、向斜軸の構造線ラインデータは、前述の全てを結合した後、それぞれのラインからの距離を全てのメッシュで算出した。なお、地すべりに対する構造線の影響範囲は最大でも数 km 程度と考えられることから、ここではその最大値を 2,500m と設定し、分級後のカテゴリー数が 10 個程度になるように距離画像を 250m ごとに括約し

て分級画像を作成し、解析単位ごとの DEM 画像への合致処理を行った。

(3) 植生データ

環境庁(現環境省)発行の自然環境 GIS 第二版「16 富山県」CD-ROM から、1/50,000 地形図範囲ごとに収録されている第 3 回、4 回、5 回植生調査のベクトルデータおよび属性データについて基本処理を施し、川端幸蔵(2000)にならい、最新データへと加工した。これらの植生ポリゴンデータは、植生コード番号を画素値として持つラスターデータへと変換し、メッシュサイズ(=10.0m)および画素数を解析単位ごとの DEM 画像に合致させた。

(4) 地すべりデータ

本節での教師データには、過去に滑動した地すべりブロックを必ず含んでいるという仮定のもとに、地すべり指定地全体を採用した。まず平成 16 年 6 月現在の富山県地すべり危険箇所図に対して基本処理を行い、314 箇所の地すべり指定地と、313 箇所の地すべり危険箇所(防止区域に指定する予定がある箇所)のポリゴンデータを生成し、箇所名、所管等の属性データを入力した。また、石川県地すべり分布図も基本処理の後、247 箇所の地すべり指定地ポリゴンデータを作成し、属性データを入力した。なお、石川県側の危険箇所については、データが入手できなかったので入力していない。両県分の指定地ポリゴンは結合処理の後、また、富山県の地すべり危険箇所ポリゴンはそのまま、解析単位ごとに切り出し処理を行った。解析単位と地すべり指定地の分布を図 4-3 に示す。

3. Weights of Evidence とは

Weights of evidence 法とは、ベイズ(Bayes)の定理を応用したもので、統計に基づく確率による重み付け法である。

ベイズの公式は次のように表される。 n 個の互いに排反する事象 $E_1, E_2, \dots, E_n$ があって、かつその中の 1 つは必ず起こるものとする。 E を別の確率事象とすると、一般に $P(E_i|E) = \{P(E)P(E|E_i)\} / \{P(E)P(E|E_1) + \dots + P(E)P(E|E_n)\}$ が成り立つ。ここに、 $P(E)$ は E の起こる確率、 $P(E|E_i)$ は E_i の起こるという条件の下における E の起こる条件付き確率を表す。ベイズの公式が利用されるのは、実際にある事象 E が起こった場合に、それが E_i という

原因によって生じたという確率を、右辺の式から求めようとする場合である。その意味で、 $P(E)$ を事前確率、 $P(E|E_i)$ を事後確率という(日本数学会編、1985)。

Weights of evidence は、ベイズの公式から得られる確率を優劣の差(odds)として表現し、更に対数変換したものである。具体的には、関連事象の各カテゴリに対象事象が存在する確率を次の各式により求める(Bonham-Carter, G.F., 1994)。

ステップ 1)

$$W^+ = \ln[(L/K) / \{(B-L)/(A-K)\}] \quad \text{数式}$$

4-1

$$W^- = \ln[\{(K-L)/K\} / \{A - (B+K-L)\} / (A-K)]$$

数式 4-2

ここで、

A : 対象地域の面積、

K : 対象地域において対象事象(例えば地すべり)が生じている面積、

B : ある指標(例えば地質区分)のあるカテゴリ(例えば〇〇累層)が占める面積、

L : ある指標のあるカテゴリにおいて対象事象が生じている(例えば〇〇累層において地すべりが発生している)面積、

であり、 K/A が事前確率、 L/B がある指標のあるカテゴリの事後確率となる。

なお、地すべりの場合には、 W^+ はある指標のあるカテゴリ内の地すべり密度が、対象地域全体の地すべり密度に対してどの程度高いかを示し、 W はその逆を示す。また、 W^+ と W^- の差は contrast と呼ばれ、この差が大きいものほど目的事象との関連が高いと判断できる。

ステップ 2)

対象地域内のある地点の posterior logit は次式により計算される。

$$\text{PostLogit} = \ln\{(\text{事前確率}) / (1 - \text{事前確率})\} + \sum_{j=1}^m \{b(j) \cdot W^+ + (1 - b(j)) \cdot W^-\}$$

数式 4-3

ここで、

PostLogit (posterior logit) : 事後ロジット (事後の対数オッズ),

事前確率 : 対象地域において対象事象が生じている割合,

$b(j)$: ある地点がある指標のカテゴリ j に相当するか否かを 1 または 0 で表現したもの,

m : ある指標のカテゴリの数

である。

また、指標が複数個ある場合の *posterior logit* を次式で与える。

$$\text{PostLogit} = \ln\{(\text{事前確率})/(1 - \text{事前確率})\} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{b(j) \cdot W^+ + (1 - b(j)) \cdot W^-\}$$

数式 4-4

ここで、

n : 指標の数

である。

複数のカテゴリからなる複数個の指標の総合評価点は、数式 4-4 の *PostLogit* を用いて次式により計算される。

$$\text{Score} = \exp(\text{PostLogit}) / \{1 + \exp(\text{PostLogit})\}$$

数式 4-5

ここで求めた *Score* は、0~1 の値をとり、ある地点の評価点となる。

4. Weights of Evidence の前処理

今回使用した指標は、連続数値データである有効起伏量、高度分散異常量、構造線からの距離と、質的データである地質区分および植生区分の 5 つである。解析単位ごとのこれらの指標画像は、前述の地すべり指定地ポリゴンによる切り出し処理をまず行った。その後、縮尺 1/50,000 地質データのうち、第三紀以前の堆積岩については 1/200,000 北陸地方土木地質図（北陸地方土木地質図編纂委員会、1990）の分類に従って単元の統合を行った。また、これ以外の地質は、沖積層、洪積層、岩脈、火山岩類、深成岩類、変成岩類に分類・統合し、統計解析用の基本カテゴリを作成した。また、植生区分については、11 個の解析単位を見渡し、少なくとも 1 つの解析単位でそのカテゴリのメッシュ数が全体のメッシュ数の 5% 以上を占め、なおかつ地すべり指定地が存在するものを基本カテゴリとした。その他 3 つの数的指標についてはデータセットの構築時に分級が終わっており、その分級結果をそのまま基本カテゴリとした。3 つの数的指標、地質区分、植生区分の基本カテゴリを表 4-2, 3, 4 にそれぞれ示す。なお、数的指標については、特定の解析単位においてメッシュ数が極端に少ないカテゴリが存在し、そのまま統計解析を行うことは好ましくないと考えられたので、各解析単位において、各カテゴリのメッシュ数が全体の 5% を下回らないことを基本方針として、一部の基本カテゴリの結合処理（「氷見・虻ガ島」における有効起伏量の 100m 以上を一括するなど）も行った。

表 4-2 有効起伏量，高度分散異常量，構造線からの距離の基本カテゴリー

有効起伏量	高度分散異常量	構造線からの距離
0～20m	～-50m	0～250m
20～40m	-50～-40m	250～500m
40～60m	-40～-30m	500～750m
60～80m	-30～-20m	750～1000m
80～100m	-20～-10m	1000～1250m
100～120m	-10～0m	1250～1500m
120～140m	0～+10m	1500～1750m
140～160m	+10～+20m	1750～2000m
160～180m	+20～+30m	2000～2250m
180～200m	+30～+40m	2250～2500m
200～m	+40～m	2500～m

表 4-3 地質区分の基本カテゴリー

カテゴリー	時代	土木地質	
		図の記号	岩相
沖積層			
洪積層			
大桑累層(石川)、伊那層群(長野)及び相当層	更新世～鮮新世	Om	砂岩・礫岩
藪田層・崎山層(能登)	鮮新世	Yt	石灰質シルト岩
稲積・赤崎泥岩層(能登)		In	泥岩・シルト岩
高窪累層(石川・富山)	中新世後期	Ta	砂岩・泥岩・凝灰岩
音川累層(石川・富山)	～中新世中期	Ot	砂岩・泥岩・凝灰岩
上滝砂岩層及び下部音川累層(富山・石川)	中新世中期	Ka	砂岩
葛葉互層・小久米砂岩層(能登)		Kz	砂岩・泥岩
東別所累層(富山)及び相当層		Hi	泥岩・硬質頁岩
山田中凝灰岩層(富山)及び相当層	中新世前期	Ym	凝灰岩・層灰岩
黒瀬谷累層(富山・石川)及び相当層安山岩		Kuan	安山岩
黒瀬谷累層(富山・石川)及び相当層砂岩・泥岩・礫岩		Ku	砂岩・泥岩・礫岩
黒瀬谷累層(富山・石川)及び相当層砂岩・礫岩		Kusc	砂岩・礫岩
医王山累層・山中累層(石川)・柳田累層(能登)及び相当層		Iop	流紋岩質 ～石英安山岩質凝灰角礫岩・凝灰岩
岩稲累層(富山・石川)及び相当層		Iw	安山岩質凝灰角礫岩・凝灰岩・溶岩
月長石流紋岩		URy	月長石流紋岩質溶結凝灰岩
楡原累層(富山・石川)及び相当層		Ni	砂岩・泥岩
太美山層群(富山)	古第三紀	FRy	流紋岩質凝灰角礫岩・凝灰岩
濃飛流紋岩類(石川・岐阜)	古第三紀～白亜紀	KPR	流紋岩類(未区分)
手取層群一有峰亜層群	白亜紀	KTA	礫岩・砂岩・泥岩・珪長岩岩床を伴う
手取層群一石徹白亜層群		KTI	砂岩・泥岩・礫岩
手取層群一九頭竜亜層群		KTK	砂岩・泥岩・礫岩(海成層)
来馬層群(新潟・長野・富山)	ジュラ紀	Jsc	砂岩・泥岩・礫岩
火山岩類			
深成岩類			
変成岩類			
岩脈			

表 4-4 植生区分の基本カテゴリー

カテゴリー	環境庁のコード番号
ヒメアオキ・ブナ群集	4006
マルバマンサク・ブナ群集	4008
ブナ・ミズナラ群集	5002
コナラ群落	7002
ヤマツツジ・アカマツ群集	7084
スギ・ヒノキ・サワラ植林	9016
スギ・ヒノキ植林	9017
スギ植林	9018
水田雑草群落	9098
水田	9099
市街地	9902
緑の多い住宅地	9905

第2項 結果と考察

1. 事前確率

今回対象とした 11 解析単位の前確率（地すべり指定地の面積率）を図 4-4 に示す。事前確率が最も高かったのは「氷見・虻ガ島」の約 10%、次いで

「八尾」の約 8%、「石動」の約 6%、「城端」の約 4%と続き、その他は全て 3%未満であった。特に「富山」は地すべり指定地が 2 箇所だけ存在し、事前確率は 0.2%であった。以下では「氷見・虻ガ島」、解析対象全体の順に結果と考察を記述する。

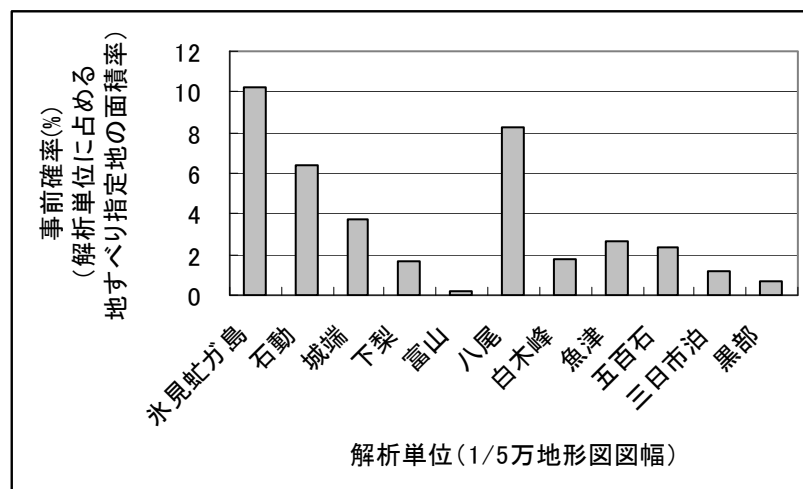


図 4-4 解析単位ごとの事前確率

2. 「氷見・虻ガ島」の Weights of Evidence 解析結果

事前確率が最も高かった「氷見・虻ガ島」での Weights of evidence の解析結果を表 4-5～9 に、また contrast を図 4-5～9 にそれぞれ示す。有効起伏量（表 4-5, 図 4-5）については、0～20mにおい

て-2.3 という高い負の contrast が現れたが、+1.0 を超えるような高い正の contrast は現れず、地すべりとの関連が特に高いと判断されるカテゴリーは存在しなかった。高度分散異常量（表 4-6, 図 4-6）については、-30m以下のカテゴリーが+2.0 という非常に高い正の contrast を示し、このカテゴリーが

地すべりと非常に関連が高いと判断された。「論田」,
「一刎」,「胡桃」,「国見」,「平の山」などの大規模
地すべり指定地の多くの部分がこの-30m以下の
カテゴリーに属している。地質区分(表 4-7, 図 4-7)
については, 山田中凝灰岩層と黒瀬谷累層砂岩泥岩
礫岩が+1.7 以上の高い contrast を示し, これら 2
つのカテゴリーが地すべりと関連が高いと判断され
た。構造線からの距離(表 4-8, 図 4-8)については,

contrast が+1.0 を超えるカテゴリーは現れなかつ
たが, 距離の増加に伴って contrast が減少していく
ことから, 断層や褶曲軸の近くに地すべり地が多い
という傾向が確認できた。植生区分(表 4-9, 図 4-9)
については水田雑草群落が+1.2, 水田が-1.6 とい
う contrast を示し, 耕作が行われていない水田跡地
に地すべりが多いというという結果となった。

表 4-5 「氷見・虻ガ島」の有効起伏量の Weights of Evidence 解析結果

カテゴリー	全体 (メッシュ)	指定地 (メッシュ)	事前確率	全体の 5%のメッシュ数: 215716			
	カテゴリー別事後確率			Weights of evidence			
	全体 (メッシュ)	指定地 (メッシュ)	事後確率	W+	W-	contrast	f(x)
0~20m	1226728	18486	0.0151	-2.007	0.331	-2.339	-2.35
20~40m	832191	79710	0.0958	-0.073	0.017	-0.089	-0.10
40~60m	977571	141443	0.1447	0.396	-0.143	0.539	0.53
60~80m	714544	112960	0.1581	0.500	-0.127	0.627	0.62
80~100m	342348	54939	0.1605	0.518	-0.056	0.574	0.57
100~m	220942	33610	0.1521	0.454	-0.030	0.484	0.48

f(x)の値は数式 4-3 の Σ 以降。

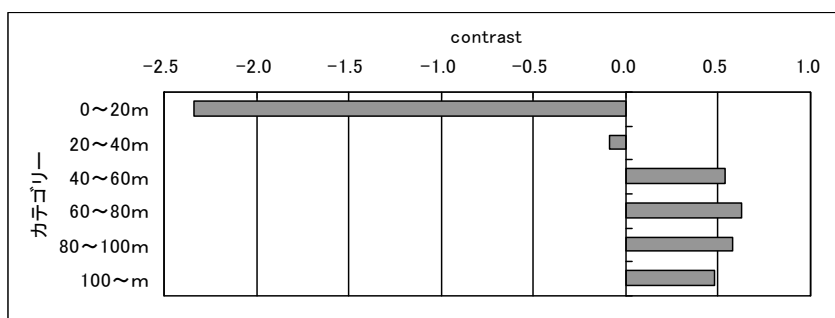


図 4-5 「氷見・虻ガ島」の有効起伏量の contrast

表 4-6 「氷見・虻ガ島」の高度分散異常量の Weights of Evidence 解析結果

カテゴリー	全体 (メッシュ)	指定地 (メッシュ)	事前確率	全体の 5% のメッシュ数: 215538			
	4310755	441002	0.1023	Weights of evidence			
	カテゴリー別事後確率						
	全体 (メッシュ)	指定地 (メッシュ)	事後確率	W+	W-	contrast	f(x)
～-30m	462845	169597	0.3664	1.624	-0.407	2.031	1.98
-30～-20m	264160	49329	0.1867	0.701	-0.062	0.762	0.71
-20～-10m	428032	46896	0.1096	0.077	-0.009	0.085	0.03
-10～0m	819707	41063	0.0501	-0.771	0.127	-0.897	-0.95
0～10m	486547	38369	0.0789	-0.286	0.032	-0.318	-0.37
10～20m	420345	32611	0.0776	-0.304	0.029	-0.333	-0.39
20～30m	377717	24769	0.0656	-0.485	0.038	-0.523	-0.58
30～40m	314060	18023	0.0574	-0.627	0.038	-0.665	-0.72
40～m	737342	20345	0.0276	-1.390	0.158	-1.548	-1.60

f(x)の値は数式 4-3 の Σ 以降。

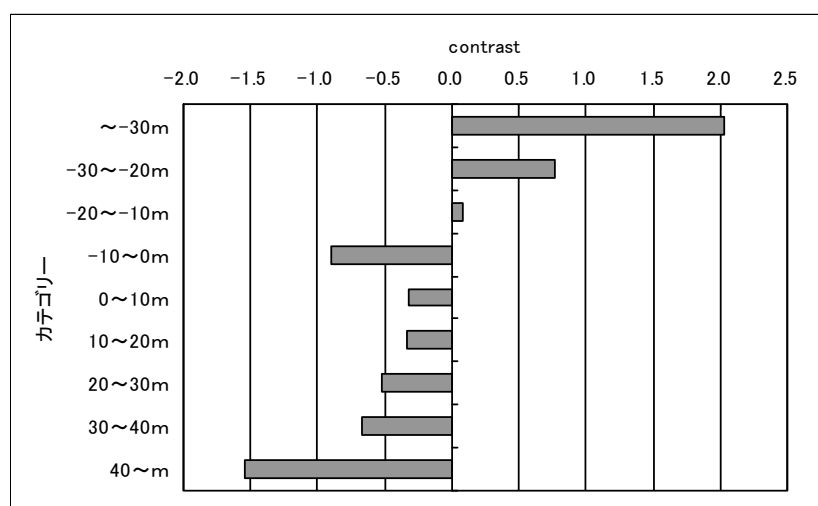


図 4-6 「氷見・虻ガ島」の高度分散異常量の contrast

表 4-7 「氷見・虻ガ島」の地質区分の Weights of Evidence 解析結果

カテゴリー	全体 (メッシュ)	指定地 (メッシュ)	事前確率	全体の 5%のメッシュ数: 214679			
	4293578	441217	0.1028	Weights of evidence			
	カテゴリー別事後確率			W+	W-	contrast	f(x)
	全体 (メッシュ)	指定地 (メッシュ)	事後確率				
沖積層	1352607	11410	0.0084	-2.600	0.402	-3.002	-3.02
洪積層	68150	1858	0.0273	-1.408	0.013	-1.421	-1.44
大桑累層	24731	0.01	0.0000	-12.554	0.006	-12.561	-12.58
藪田層	53401	0.01	0.0000	-13.324	0.014	-13.338	-13.36
稲積赤崎泥岩層	9865	0.01	0.0000	-11.635	0.003	-11.638	-11.66
音川累層	467385	31114	0.0666	-0.474	0.047	-0.521	-0.54
葛葉互層小久米砂岩層	158541	22775	0.1437	0.382	-0.017	0.399	0.38
赤浦三尾砂岩層	419786	66257	0.1578	0.492	-0.066	0.559	0.54
東別所累層	326297	70485	0.2160	0.878	-0.105	0.983	0.96
山田中凝灰岩層	37447	14597	0.3898	1.719	-0.028	1.746	1.73
黒瀬谷累層砂岩泥岩礫岩	544695	166997	0.3066	1.351	-0.372	1.723	1.70
黒瀬谷累層砂岩礫岩	601247	33730	0.0561	-0.656	0.080	-0.736	-0.76
岩稲累層	178268	19840	0.1113	0.089	-0.004	0.093	0.07
深成岩類	26603	2080	0.0782	-0.300	0.002	-0.302	-0.32
変成岩類	24555	74	0.0030	-3.635	0.006	-3.641	-3.66

f(x) の値は数式 4-3 の Σ 以降。

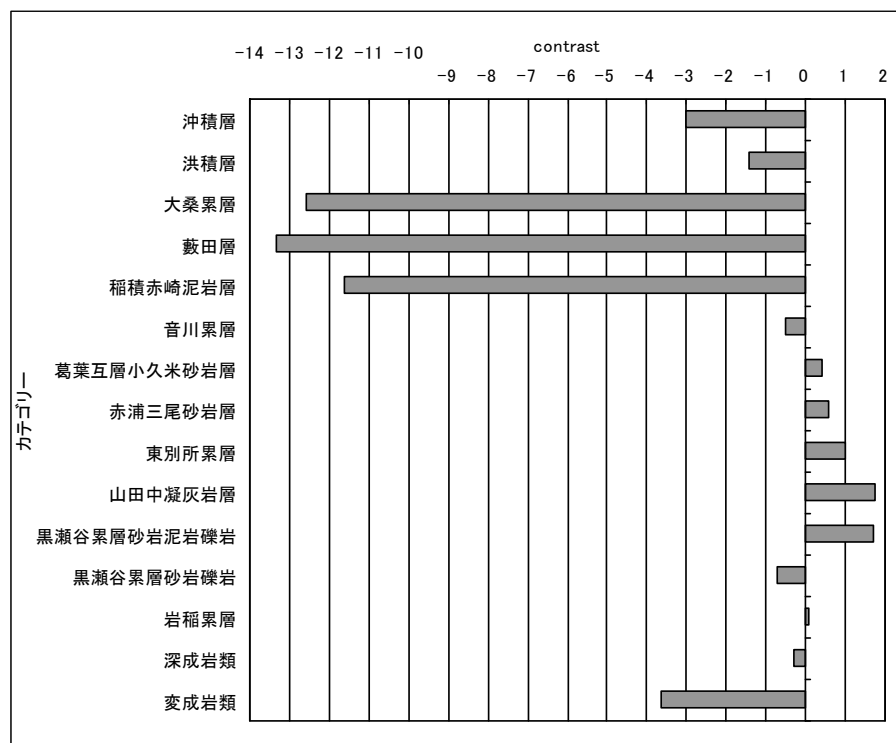


図 4-7 「氷見・虻ガ島」の地質区分の contrast

表 4-8 「氷見・虻ガ島」の構造線からの距離の Weights of Evidence 解析結果

カテゴリー	全体 (メッシュ)	指定地 (メッシュ)	事前確率	全体の 5%のメッシュ数: 213030			
	4260606	441148	0.1035	Weights of evidence			
	カテゴリー別事後確率						
	全体 (メッシュ)	指定地 (メッシュ)	事後確率	W+	W-	contrast	f(x)
0～250m	448042	80734	0.1802	0.643	-0.101	0.744	0.76
250～500m	394562	73208	0.1855	0.679	-0.094	0.773	0.79
500～750m	358907	52684	0.1468	0.398	-0.044	0.442	0.46
750～1000m	329089	40556	0.1232	0.196	-0.018	0.214	0.23
1000～1250m	303748	40124	0.1321	0.276	-0.024	0.300	0.32
1250～1500m	283937	37089	0.1306	0.263	-0.021	0.284	0.30
1500～1750m	264668	25562	0.0966	-0.077	0.005	-0.082	-0.06
1750～2000m	248910	15857	0.0637	-0.529	0.026	-0.556	-0.54
2000～2250m	231362	21258	0.0919	-0.132	0.007	-0.140	-0.12
2250～2500m	213318	16823	0.0789	-0.299	0.014	-0.313	-0.29
2500～m	1184063	37253	0.0315	-1.269	0.269	-1.537	-1.52

f(x)の値は数式 4-3 の Σ 以降。

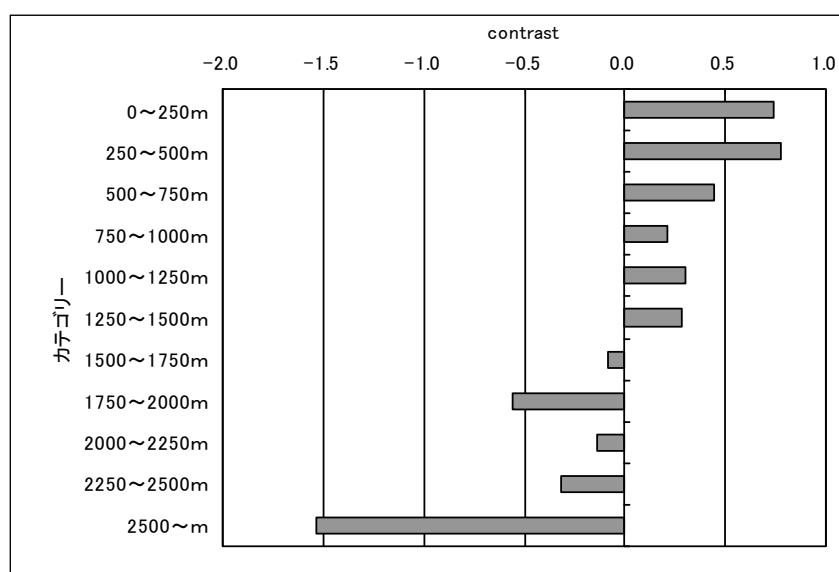


図 4-8 「氷見・虻ガ島」の構造線からの距離の contrast

表 4-9 「氷見・虻ガ島」の植生区分の Weights of Evidence 解析結果

カテゴリー	全体 (メッシュ)	指定地 (メッシュ)	事前確率	全体の 5%のメッシュ数: 212337			
	カテゴリー別事後確率			Weights of evidence			
	全体 (メッシュ)	指定地 (メッシュ)	事後確率	W+	W-	contrast	f(x)
コナラ群落	1254768	186446	0.1486	0.413	-0.223	0.636	0.57
ヤマツツジ・アカマツ群集	448565	11506	0.0257	-1.478	0.095	-1.574	-1.64
スギ・ヒノキ・サワラ植林	2942	36	0.0122	-2.232	0.001	-2.233	-2.30
スギ・ヒノキ植林	360238	23840	0.0662	-0.488	0.037	-0.525	-0.59
スギ植林	187741	38768	0.2065	0.813	-0.052	0.865	0.79
水田雑草群落	397322	101214	0.2547	1.086	-0.181	1.266	1.20
水田	861012	24342	0.0283	-1.378	0.191	-1.569	-1.64
市街地	52522	1370	0.0261	-1.461	0.010	-1.471	-1.54
緑の多い住宅地	267096	24266	0.0909	-0.144	0.009	-0.153	-0.22
その他	414538	27701	0.0668	-0.477	0.042	-0.520	-0.59

f(x)の値は数式 4-3 の Σ 以降。

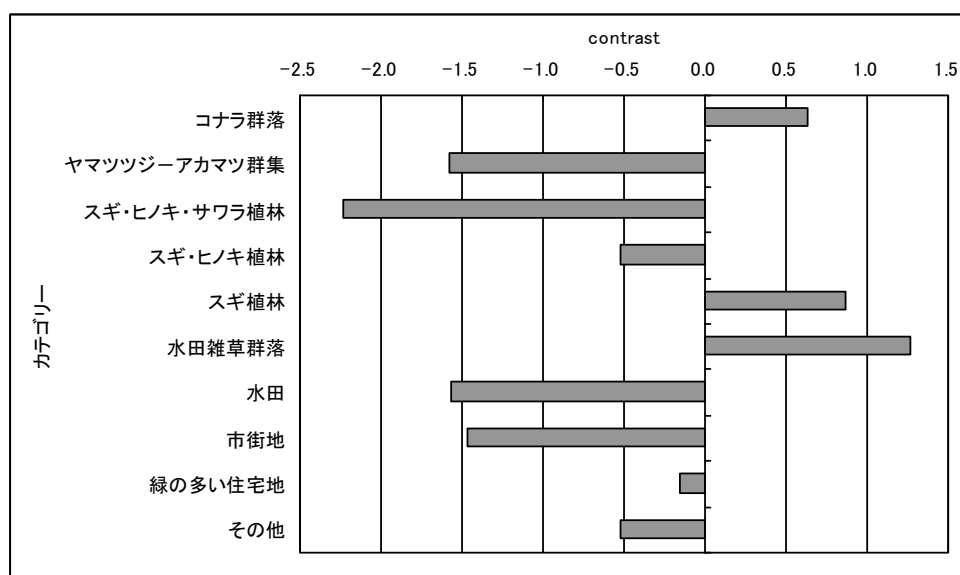


図 4-9 「氷見・虻ガ島」の植生区分の contrast

3. 全体の Weights of Evidence 解析結果とケース分け

対象全体の Weights of evidence 解析結果を示すものとして、解析単位ごとの最大 contrast を図 4-10 に示す。ただし、ここでいう最大 contrast は、統計的に意味を持たせるため、全体の 5%以上のメッシュ数を持つカテゴリーの最大値である。有効起伏量では、「城端」、「富山」、「魚津」、「三日市・泊」、「黒

部」の 5 面で +1.0 以上を示すカテゴリーが現れた。高度分散異常量では、「城端」、「富山」、「三日市・泊」を除く 8 面で +1.0 以上を示すカテゴリーが現れ、特に「氷見・虻ガ島」と「白木峰」では +2.0 を超えた。地質区分では、「石動」、「下梨」、「富山」、「黒部」を除く 7 面で +1.0 を超えるカテゴリーが現れた。構造線からの距離では、「城端」、「富山」、「白木峰」、「魚津」、「黒部」の 5 面で +1.0 を超えるカテ

ゴリーが現れた。植生区分では、「石動」、「八尾」、「白木峰」、「黒部」を除く 7 面で+1.0 以上を示すカテゴリが現れた。contrast が+1.0 を超える解析単位数で比較すると、今回使用した 5 つの指標では、高度分散異常量 (8 面)、地質区分および植生区分 (7 面)、有効起伏量および構造線からの距離 (5 面) の順に地すべりと関連が深いということが判断される。

なお、「富山」の有効起伏量および構造線からの距離の contrast が非常に高いのは、結合処理を行った後のカテゴリ数がそれぞれ 3, 2 と少なく、メリハリが強調されたことによる。また、「富山」、「黒部」

の地質区分の最大 contrast が負の値をとっているのは、正の contrast 値をとったカテゴリのメッシュ数がいずれも全体の 5%未満であったことによる。

数式 4-4 で示したように、ある解析単位において指標をいくつか組み合わせると、その組み合わせごとにスコアマップが作成できる。今回は作成した 5 つの指標が地すべりに対してどの程度寄与しているかの目安として contrast の最大値に注目し、その最大値の大きいものから順に 2 個、3 個、4 個、5 個、の指標を採用するケースを作成し、以後の比較検討を行うこととした。ケース分け一覧表を表 4-10 に示す。

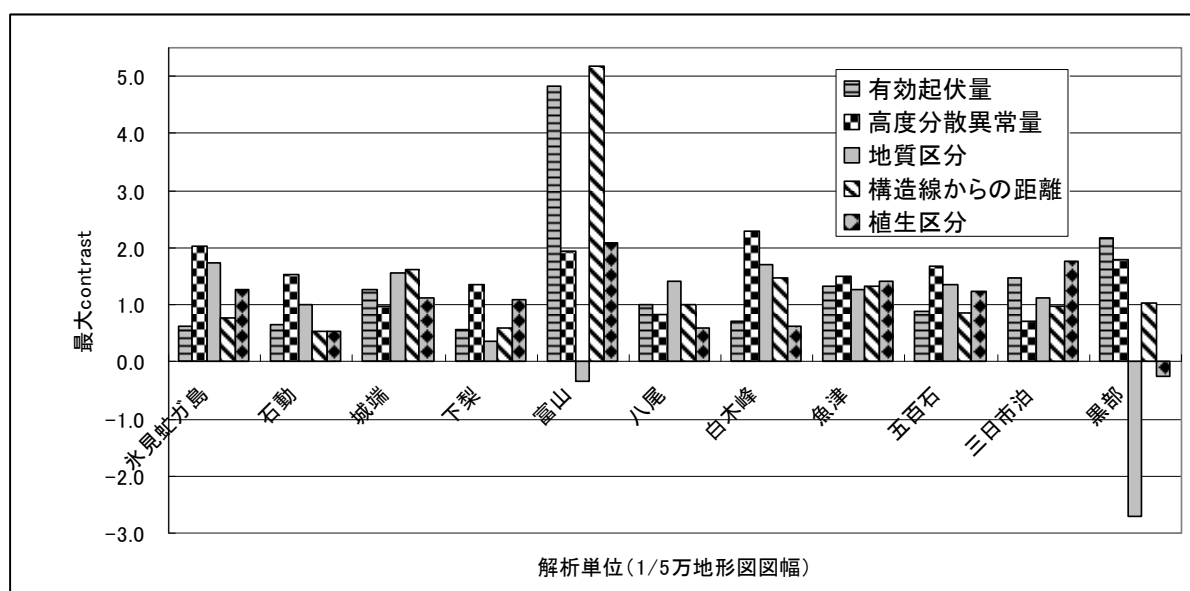


図 4-10 解析単位別、指標別の最大 contrast

表 4-10 ケースごとの指標の組み合わせ

	氷見虹ガ島				石動				城端				下梨				富山				八尾			
ケース	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
有効起伏量				x		x	x	x		x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
高度分散異常量	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x	x	x			x	x			x	x
地質区分	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x				x	x	x	x	x
構造線からの距離				x	x			x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x			x	x
植生区分			x	x	x			x	x			x	x	x	x	x			x	x	x			x
	白木峰				魚津				五百石				三日市泊				黒部							
ケース	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
有効起伏量				x	x			x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x				
高度分散異常量	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x	x	x				
地質区分	x	x	x	x				x	x	x	x	x			x	x	x				x			
構造線からの距離			x	x	x			x	x	x		x			x	x			x	x	x			
植生区分					x	x	x	x	x			x	x	x	x	x				x	x			

4. 「氷見・虻ガ島」のマッピングとその検証

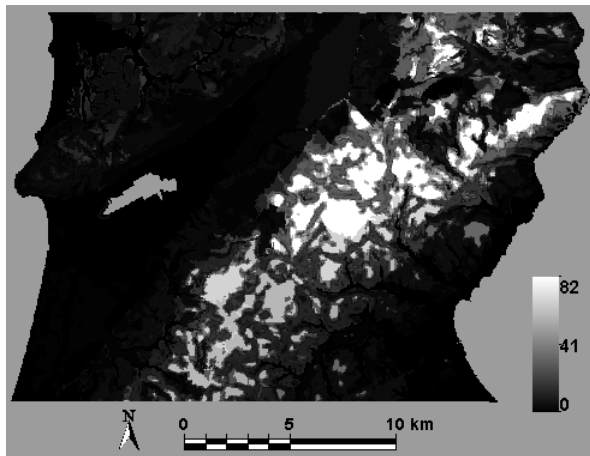
「氷見・虻ガ島」のケース別スコアマップを図 4-11 に示す。凡例右の数字は数式 4-5 で得られるスコア（0～1 の値をとる）を 100 倍した数値であるが、ケース 1, 2, 3, 4 と指標が増えるにつれて最高値がそれぞれ 82, 94, 97, 98 と上昇していき、また、明暗のはっきりした白黒画像から、中間色が多く混じる複雑な画像に変化していくことがわかる。

ケース間の優劣を比較する方法としては、ROC 曲線による評価がある。ROC 曲線（Receiver Operating Characteristic Curve）とは、縦軸に感度（本節では、“地すべり指定地”が“指定地”として判定される確率）、横軸に偽陽性率（本節では、“非地すべり指定地”が“指定地”として判定される確率）をとった曲線のことであり、その曲率が大きいほど予測ルールの精度が高いとされている。この曲線が初めて利用されたのは第二次世界大戦中で、レーダー装置がランダムな雑音の中から敵の飛行機をとらえた本当の信号をどれだけ識別できるかを評価した（Swets *et al.*, 2000）とされている。

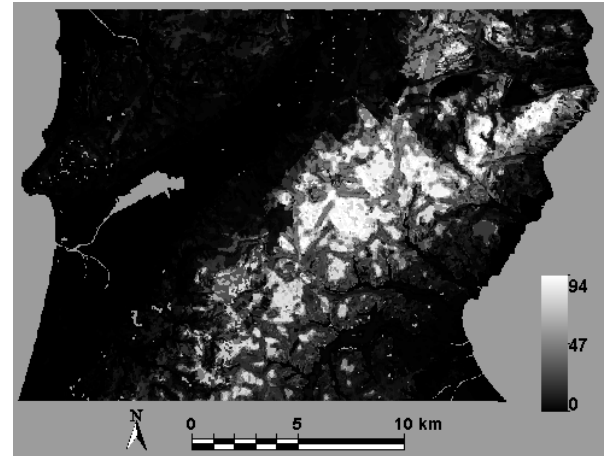
「氷見・虻ガ島」の ROC 曲線を図 4-12 に示す。この図からは、偽陽性率が 0.1 のとき（非指定地面積の 10%が指定地として判定されるとき）の感度が、4 ケースともに 0.53 前後（指定地面積の約 53%が指定地として判定される）であり、偽陽性率が 0.2

のときの感度が、4 ケースともに 0.73 前後であることがわかる。また、偽陽性率が 0.3～0.6 の間においてケース 1, 2 の感度がケース 3, 4 のそれに比べて低く、ケース間に優劣差が出ていることも読み取れる。

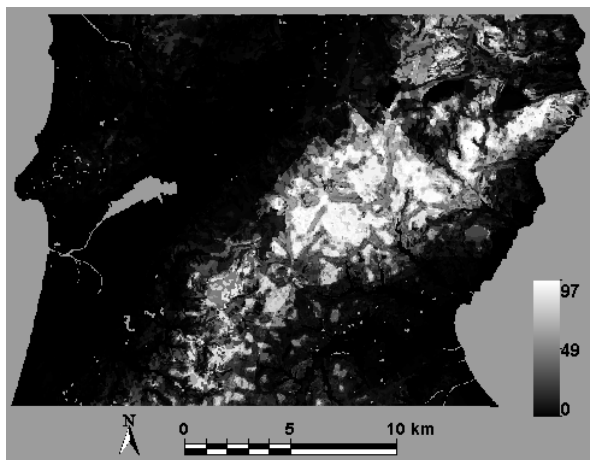
解析結果をマッピングする場合には、しきい値を選択する必要がある。偽陽性率=0.1 をしきい値とすると、指定地面積の約半分がマップに含まれるが、残り半分はマップから除外されてしまう。一方、偽陽性率=0.5 をしきい値とすると、指定地面積の 9 割以上がマップに含まれるが、非指定地面積の半分も同時にマッピングされてしまい、どこが危険であるかがわかりにくいマップとなってしまう。しきい値には、基準線（傾き 45 度の直線）に平行な直線と ROC 曲線との接点における偽陽性率を採用する方法がある。図 4-12 の ROC 曲線では、この接点の偽陽性率が 0.2 付近となっている。各解析単位において、曲率が一番大きいケースの ROC 曲線でこの接点における偽陽性率を求めると、0.05～0.35 となり概ね 0.2 前後の値を示すことから、ここでは全ての解析単位で共通のしきい値として 0.2 を採用することにした。



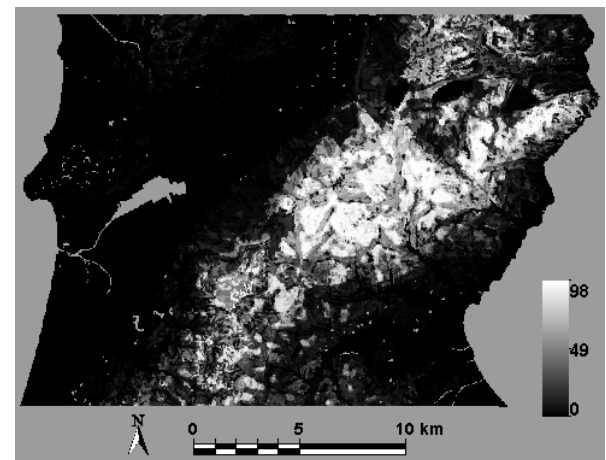
Case1
(高度分散異常量+地質)



Case2
(高度分散異常量+地質+植生)



Case3
(高度分散異常量+地質+植生+構造線距離)



Case4
(高度分散異常量+地質+植生+構造線距離+有効起伏量)

図 4-11 「氷見・虻ガ島」のスコアマップ

凡例右の数字はスコア (数式 4-5 の生スコア×100)

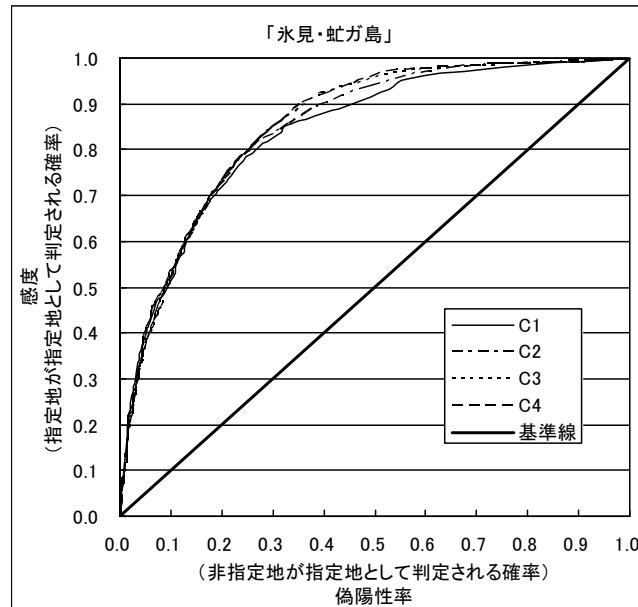


図 4-12 「氷見・虻ガ島」の ROC 曲線

5. 全体のマッピングとその検証

偽陽性率が 0.2 のときの解析単位別、ケース別の感度を図 4-13 に示す。「氷見・虻ガ島」、「城端」、「富山」、「白木峰」、「五百石」、「三日市・泊」、「黒部」の 7 面で感度が 0.7 を超え、概ね良好な精度が得られたと考えられる。特に、事前確率が低かった（図 4-4）、「富山」、「白木峰」、「三日市・泊」、「黒部」においては感度が 0.9 を超え、非常に高い精度が得られた。しかしながら、「石動」、「下梨」、「八尾」、「魚津」の感度は 4 つのケース全てにおいて 0.7 に達しなかった。これらについては、タイプの異なる地すべりが混在する、あるいは今回の指標では説明できない現象が地すべりの原因となることによって精度が下がっている可能性があり、今後更に検討する必

要がある。

また、ケース 1 の感度が最も高かった「城端」、ケース 3 の感度が最も高かった「五百石」、の 2 面を除く 9 面については、5 つの指標全てを使用したケース 4 の感度が最も高く、説明変数が多いほど精度が向上するという結果となった。

最も高い感度を示したケースのスコアマップから、偽陽性率=0.2 のときのスコア値以下を除外した、解析単位別の最良ケーススコアマップを図 4-14 に示す。これらのマップでスコアの高い地域ほど、既に地すべり防止区域として指定されている地域と地形、地質、植生の類似性が高い地域ということになる。

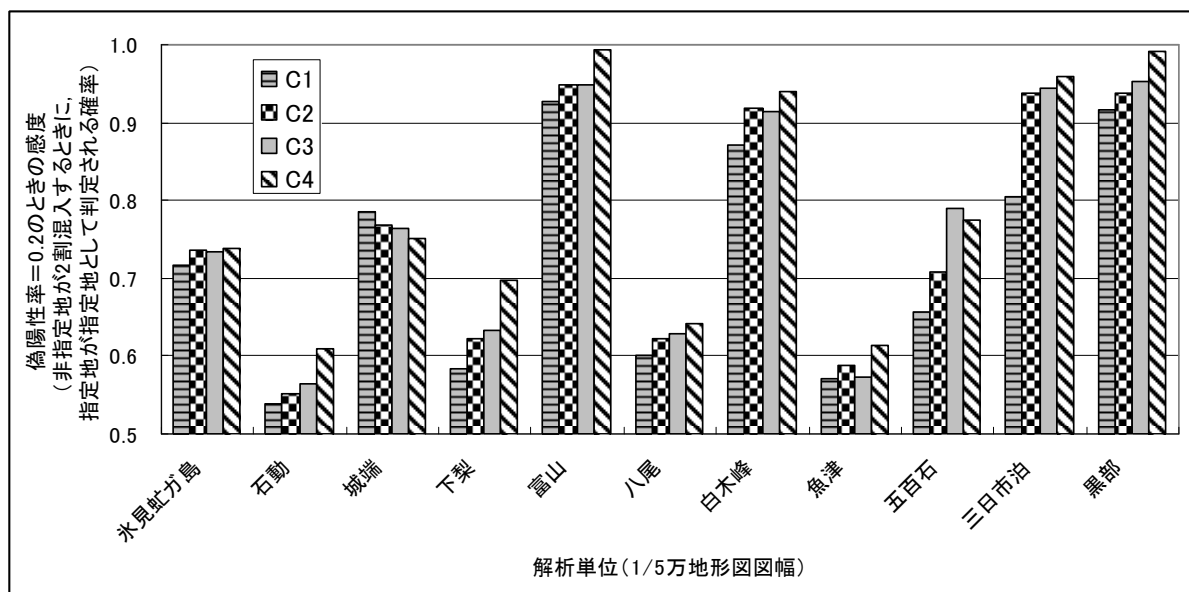


図 4-13 偽陽性率=0.2 のときの感度

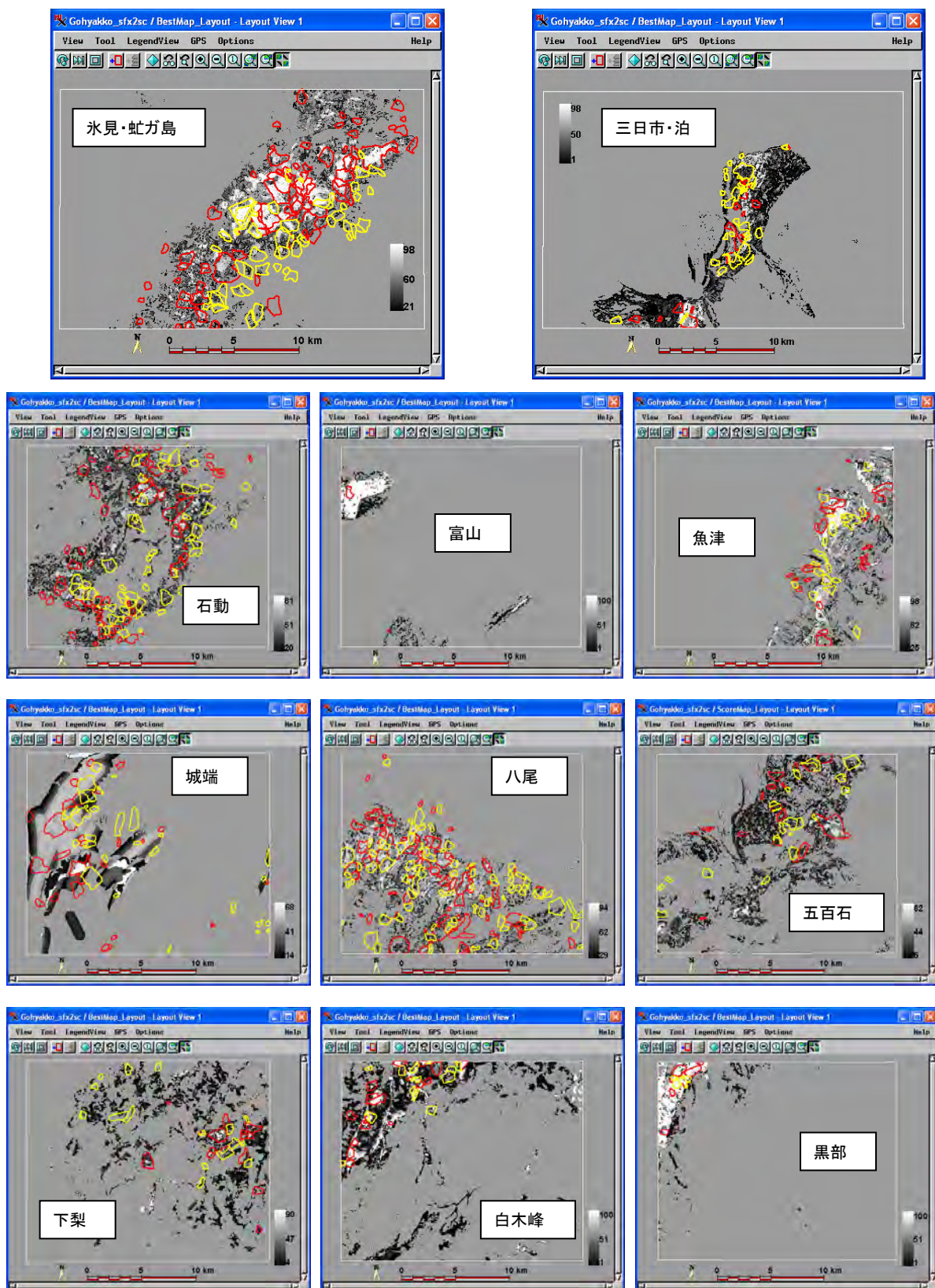


図 4-14 解析単位別の地すべり危険地・危険度マップ

凡例右の数字はスコア（数式 4-5 の生スコア×100）。赤色枠は地すべり指定地，黄色枠は地すべり危険箇所。

6. 最良マップと地すべり危険箇所

前述の最良マップの検証のため、図 4-14 において黄色で示した地すべり危険箇所が何箇所マップに含まれるかをカウントすることによって算出した危険箇所の抽出率を図 4-15 に示す。「城端」の 64.5%を除く 9 面（「富山」は危険箇所なし）において 80%以上の危険箇所の少なくともその一部が抽出されて

おり、今回作成したマップは概ね妥当なものであり、また、地すべりに共通する要因の評価を行う上で、Weights of Evidence は有効な手法であると考えられる。さらに、図 4-14 の赤色でも黄色でもない地域は既存のマップでは無警戒の地域であり、今後スコアの低い箇所について重点的に警戒していく必要があると思われる。

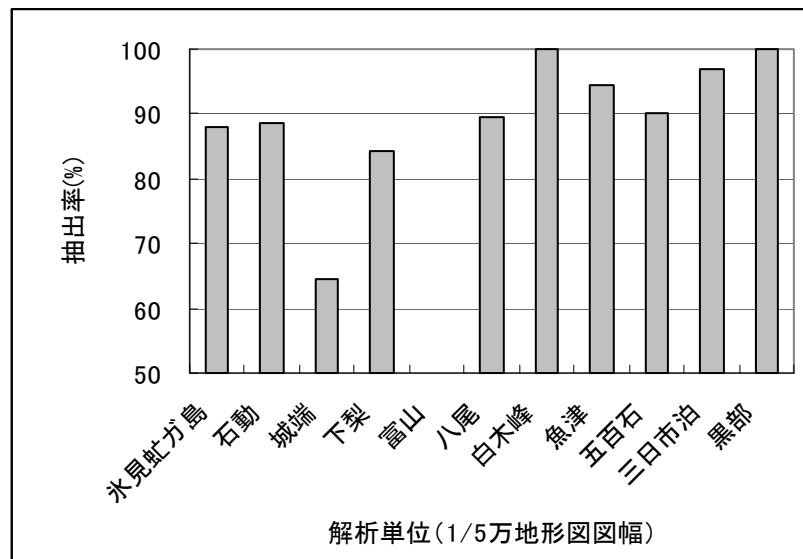


図 4-15 地すべり危険箇所の抽出率

GIS と Weights of Evidence という新しい技術を利用し、定量的、デジタル的、広域的に作成された本節の地すべり評価マップは、そのスコアが高いほど既存の地すべり地との類似度が高いことを示しており、また既存の危険箇所の大半を抽出できていることから、高度な知識を持つ専門家が定性的、アナログ的に作成した従来の地すべり地形分布図や危険地、危険度マップと相互補完的に利用することが可能であると考えられる。

第 2 節 引用文献

Bonham-Carter, G.F. (1994) Geographic information systems for geoscientists-Modeling with GIS-, Computer methods in the geoscientists Vol.13, 398pp, PERGAMON, Netherlands.
防災科学技術研究所・科学技術振興機構 (2005) 地

すべり地形分布図データベース,
http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/jisuberi/jisuberi_mini/jisuberi_top.html.

後藤恵之輔・杉山和一・三浦国春・棚橋由彦 (1996) 人工衛星データによる植物活性を導入した地すべりの発生予測法. 地すべり誌 33(2) : 25-34.

北陸地方土木地質図編纂委員会 (1990) 北陸地方土木地質図 3 及び 4 (富山県・石川県・長野県西部地域). 内外地図.

川端幸蔵 (2000) 重点研究支援協力員成果報告書ーGIS データベースの整備とその扱い方ー. 農林水産省森林総合研究所, 55pp.

小林裕之・三箇智二 (2003) 高度分散量を用いた地すべり地形抽出の試み. 第 42 回地すべり学会研究発表講演集 : 439-442.

日本測量調査技術協会編 (1984) 空中写真による地すべり調査の実際. 185pp, 鹿島出版会, 東京.

日本数学会編 (1985) 岩波数学事典第 3 版. 1609pp,

- 岩波書店，東京。
- Ohmori,H. (1978) Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development, Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo, No.10 : 31-85.
- 林野庁 (1994) 治山必携法令通達編. 平成 6 年版 : 587-592, 日本治山治水協会, 東京.
- 林野庁地すべり対策協議会編 (1976) 地すべりの実態とその対策ー治山事業調査報告からー第 2 部 各論 (地区別特徴). 186pp, 日本治山治水協会, 東京.
- 三箇智二・藤原 治 (2000) 高度分散量を用いた数値地図からの地形・地質的特長の抽出. 情報地質誌 11(2) : 118-121.
- 杉山和一・後藤恵之輔・棚橋由彦 (1987) 地すべりの危険度評価における数量化理論適用の試み. 地すべり誌 33(4) : 24-28.
- Swets,J.A.,Dawes,R.M. and Monahan,J. (2000) Better Decision from Science. 日系サイエンス 2001 年 1 月号 : 50-57.
- 竹下敬司 (1971) 北九州市門司・小倉地区における山地崩壊の予知とその立地解析 (治山調査報告 I). 85pp, 福岡県林業試験場, 福岡.
- 山岸宏光編 (1993) 北海道の地すべり地形ー分布図とその解説ー. 426pp, 北海道大学図書刊行会, 札幌.
- 横山隆三・白沢道生・菊池 祐 (1999) 開度による地形特徴の表示. 写真測量学会誌 38(4) : 26-34.
- 吉松弘行・清水清文・坂本靖秀 (1979) 地すべり斜面の地形解析による地すべりの判読と危険度判定. 地すべり誌 15(4) : 12-19.
- 吉澤孝和・石井 哲 (1990) 地形図から得られる地形情報を用いた地すべり危険地域の判別に関する基礎的研究. 地すべり誌 27(3) : 1-10.

第5章 森林管理業務への応用

第1節 PCとフリーソフトの利用

業務用 GIS ソフトウェアには高度な空間解析機能があるが、高価であり、1人1本持つことは困難である。一方、簡易 GIS ソフトウェアには空間解析機能はほとんどないが、地理情報の閲覧機能があり、無料または安価で、1人1本持つことも可能である。

Microsoft Windows 上で動作する簡易 GIS ソフトウェアのひとつにカシミール 3D がある。これには、地図ブラウザ機能を基本に、風景 CG 作成機能、GPS データビューワ・編集機能、ムービー作成機能、山岳展望機能など (DAN 杉本, 2005) があり、野外調査時には GPS との連動機能が非常に便利である。

本節では、このカシミール 3D の利用法について、これまで検討してきた (小林, 2001a, 2002a, 2002b) ことをまとめた形で記述する。

第1項 データセットの構築方法

カシミール 3D がサポートしているのは測地座標系 (緯度経度) のみである。ラスターでもベクトルでも、測地座標系に変換されたものであれば全てのデータの取り込み、表示が可能である。以下に、基本地図、応用地図、属性データの順に、取り込み手

順とその表示例を示す。

1. 基本地図

(1) 標高データ

カシミール 3D は、もともと可視マップ (ある山が見える範囲を地図上にプロットしたもの) の作成を目的として 1994 年に最初に発表 (杉本智彦, 2002) されたものであり、可視判定に必要な標高データは最も基礎的なものである。一般的に入手可能なデジタル標高データを表 5-1 に示す。国土地理院の標高データについては、カシミール 3D 本体のみで取り込み、表示が可能である。50m メッシュ標高データの表示例を図 5-1 に示す。

(2) 地図画像

国土地理院が発行している地図画像については、カシミール 3D おまかせセット (本体+地図画像プラグインほか) により、簡単に取り込み、表示ができる。基本的な地図画像を表 5-2 に示す。

これらについては、取り込み時に解像度を選択することができるが、ノート PC での使用を考慮すると、デフォルトの標準コンパクトサイズが適正であると考えられる (小林, 2002a)。地図画像 20 万、5 万、2.5 万を 50m メッシュ標高データと重ね合わせたものの表示例を図 5-2~5-4 にそれぞれ示す。

表 5-1 入手可能なデジタル標高データ

名 称	発行元, 媒体など
数値地図 250mメッシュ (標高)	国土地理院, CD-ROM
数値地図 50mメッシュ (標高)	同上
10mメッシュ DEM (GISMAP Terrain)	北海道地図(株), CD-ROM ほか

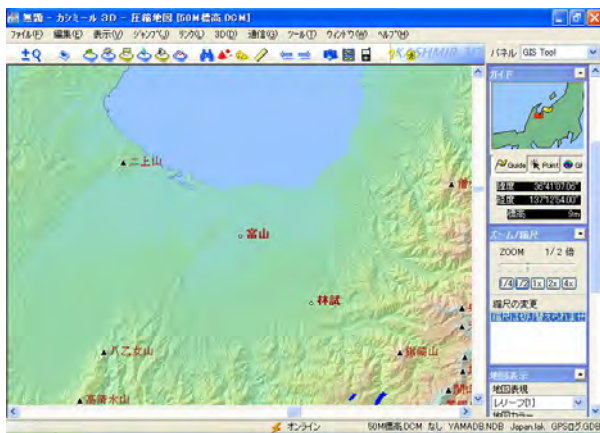


図 5-1 50mメッシュ標高の表示例

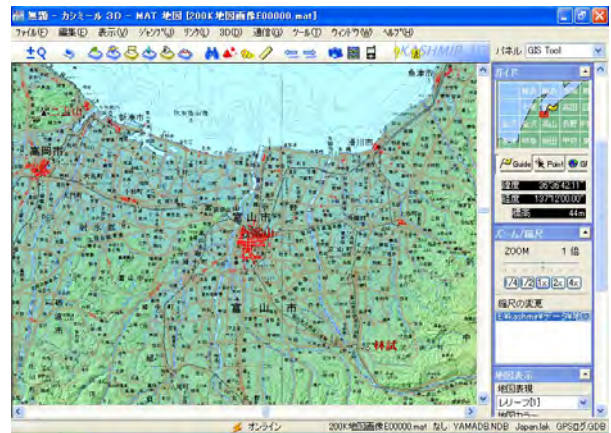


図 5-2 200000 地図画像の表示例

富山市周辺（配色，陰影はカシミール 3D のデフォルト）

表 5-2 基本的な地図画像

名 称	発行元，媒体など
数値地図 200000 (地図画像)	国土地理院，CD-ROM
数値地図 50000 (地図画像)	同上
数値地図 25000 (地図画像)	同上

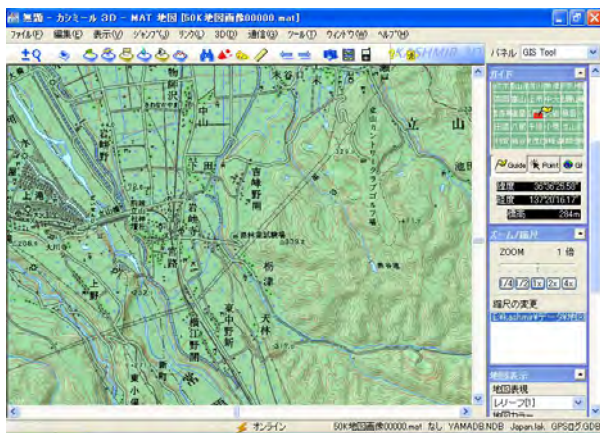


図 5-3 50000 地図画像の表示例

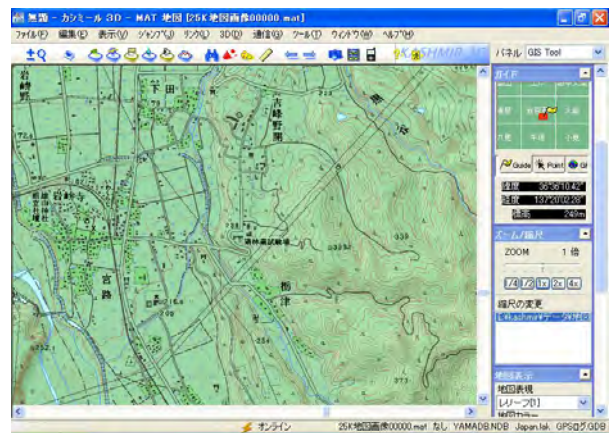


図 5-4 25000 地図画像の表示例

富山県林業技術センター林業試験場周辺

2. 応用地図

(1) ラスター

業務用 GIS ソフトが 1 本あれば，紙地図や空中写真等もカシミール 3D で表示することができる。応用地図画像の例を表 5-3 に示す。1/5,000 森林基本図，計画図については，地番の判読が可能であり，1/25,000 地図画像（デフォルトの標準コンパクトサイズではセルサイズ約 5m）とも整合性がある，セ

ルサイズ 1m（127dpi 相当）が適正サイズであると考えられる（小林，2002a）。

なお，現状ではカシミール 3D は 1bit ビットマップ画像を取り込むことはできないので，白黒地図画像（1bit，白黒 2 値）は，業務用 GIS ソフト内で 8bit に増色しておく必要がある。なお，カシミール 3D に取り込んだ後は圧縮が可能である。

デジタルオルソフォトを自作する場合には，第 3

章を参照されたい。また、衛星画像の取り込み、表示もデジタルオルソフォトと同様の手順で可能である。

森林基本図、計画図、簡易デジタルオルソフォト

の表示例を図 5-5～5-7 にそれぞれ示す。また、森林計画図のカシミール 3D データ化の手順を図 5-8 に示す。

表 5-3 応用地図画像の例

名 称	業務用 GIS ソフトウェアでの処理概要
森林基本図	地図のスキャン、画像の取り込み、地理座標の付与、測地座標系へのリサンプル、BitMap への変換
森林計画図	同上
市町村管内図	同上
簡易デジタルオルソ	写真のスキャン、画像の取り込み、地理座標の付与、正射変換、測地座標系へのリサンプル、BitMap への変換



図 5-5 森林基本図の表示例



図 5-6 森林計画図の表示例

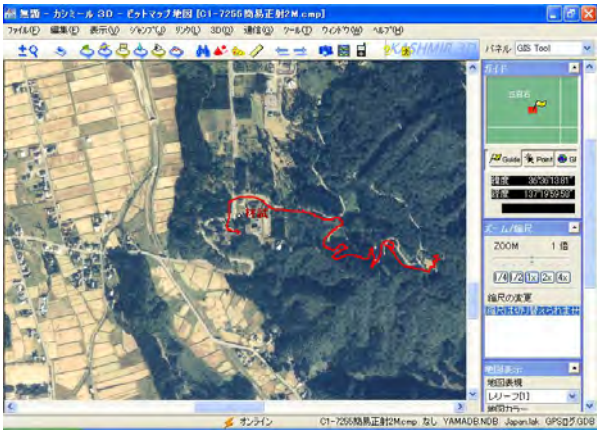


図 5-7 デジタルオルソフォトの表示例

赤線は GPS トラック。表示対象は富山県林業技術センター林業試験場周辺。

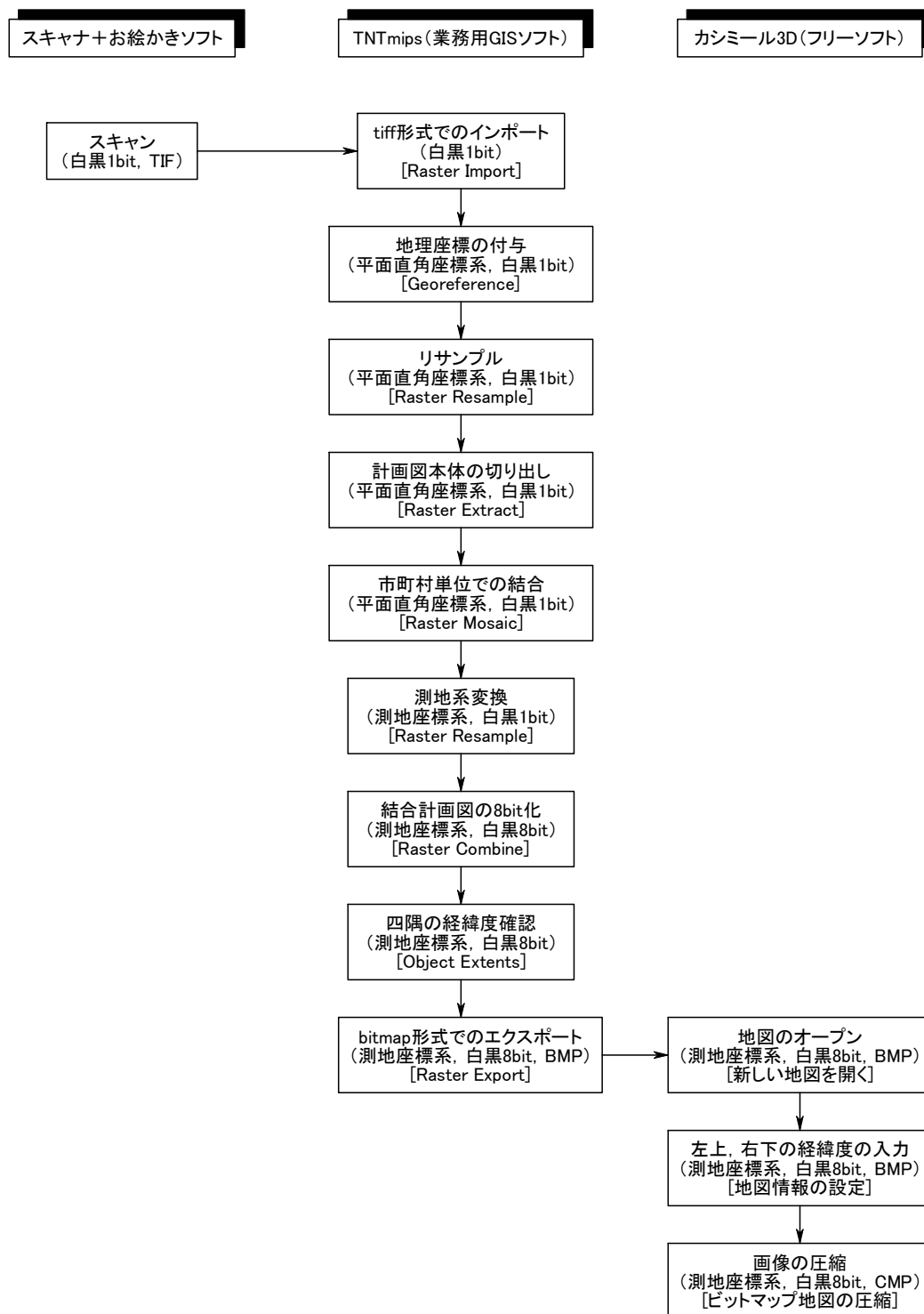


図 5-8 森林計画図のカシミール 3D データ化の手順

[]内はソフトウェアのモジュール（メニュー）の名称。

(2)ベクトル

業務用 GIS ソフト上で整備済みのベクトルデータがあれば、それらをカシミール 3D 上で、地図画

像の上に重ね合わせて表示することが可能となる。

ベクトルデータの例を表 5-4 に示す。

現状ではカシミール 3D が取り込むことができる

ベクトルデータは、e00（ArcInfo Export）形式のラインデータだけであり、また、経緯度の値は WGS84 測地系のものであると解釈してしまう。したがって Tokyo 測地系のデータは、業務用 GIS ソフトで予め WGS84 測地系へと変換した後に e00 形式で出力する必要がある。また、e00 ファイルの取

り込み、表示には GIS ツールプラグインが必要である。

地すべり指定地の表示例を図 5-9、5-10 に示す。森林計画図の林班、小班、地番界もベクトルデータがあれば同様の手順で取り込み、表示が可能である。

表 5-4 ベクトルデータの例

名 称	業務用 GIS ソフトウェアでの処理概要
地すべり指定地	指定地ポリゴンのデジタイズ、測地座標系(WGS84 測地系)への変換、e00 ファイルへの変換
市町村界	市町村境界線のデジタイズ、あとは同上
森林計画区	計画区ポリゴンのデジタイズ、あとは同上

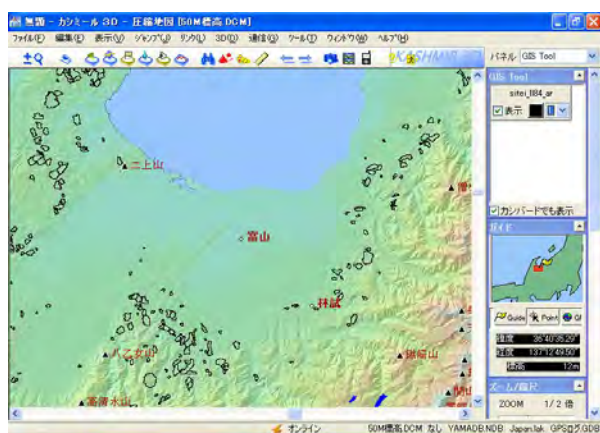


図 5-9 地すべり指定地の表示例(1)

黒は地すべり指定地。背景は標高画像。

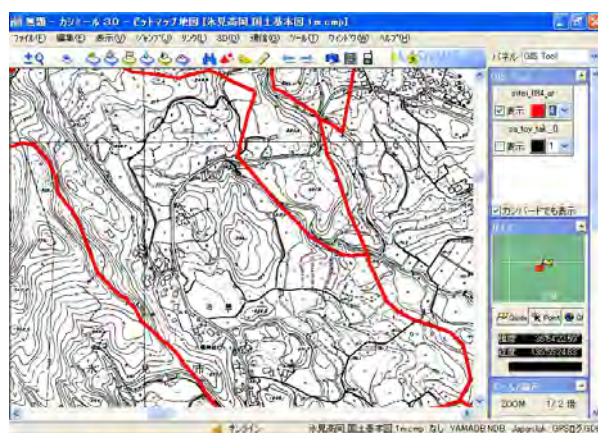


図 5-10 地すべり指定地の表示例(2)

赤は地すべり指定地。背景は国土基本図（富山県氷見市内）。

3. 属性データ

富山県には約 300 箇所の地すべり指定地があるが、カシ米尔 3D の地名ファイルにその位置と簡単な属性情報を記録することにより、その名称等が地図上で表示可能となる（図 5-11）。また、Windows のエクスプローラで任意のファイルを選び、カシミー

ル 3D の地図画像上にドラッグ&ドロップすることにより、そのファイルとのリンクを作成することができる。この機能により、例えば、指定地内のリンクアイコンをダブルクリックし、Excel で作成した指定地一覧表を別ウィンドウで表示する、といったことが可能となる（図 5-12）。

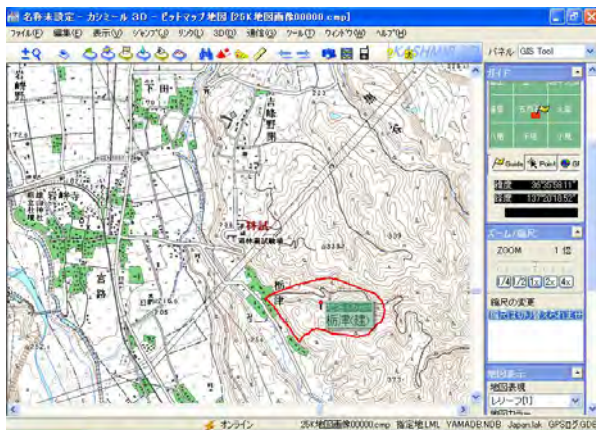


図 5-11 地すべり指定地の名称表示例

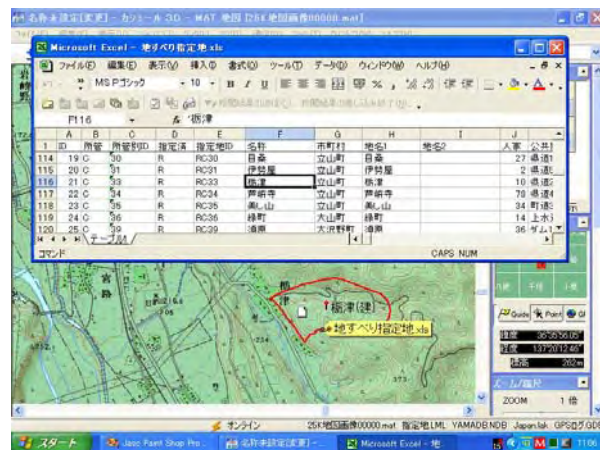


図 5-12 リンクファイルの表示例

赤枠は「栃津」地すべり指定地。赤色ピンは地名マーク、白色マークはリンクアイコン。

第2項 野外調査での利用法

従来の現地調査、踏査には紙地図が必要不可欠であったが、このカシミール 3D を核とした電子地図 + GPS システム (図 5-13) を携帯すれば、縮尺の異なる複数枚の紙地図を持ち歩く必要はなくなると考えられる。

SA 解除後の現在では、単独測位方式の GPS の精度も 10m 程度になり、道中ではカーナビ代わりに、現場では位置把握にと気軽に GPS が利用できるようになった。

通常の森林調査においては、3 万円程度のレジャー用単独測位 GPS 受信機を単体で、Tokyo 測地系のひずみ補正なしで使用するのが適しており (小林, 2002c), 受信機では、例えば Garmin 社の GPS II PLUS が林内での測位実績がある (小林ら, 2001, 小林, 2002c)。写真撮影地点に前述のリンク情報を埋め込めば、地図上のアイコンをクリックすることによるデジカメ画像の表示 (図 5-14) もでき、電子野帳としても利用可能である。

カシミール 3D を核とした研究 - 行政間でのデータ交換のイメージを図 5-15 に示す。



図 5-13 野外調査携行機材

左から接続ケーブル、ノート PC、GPS 受信機。

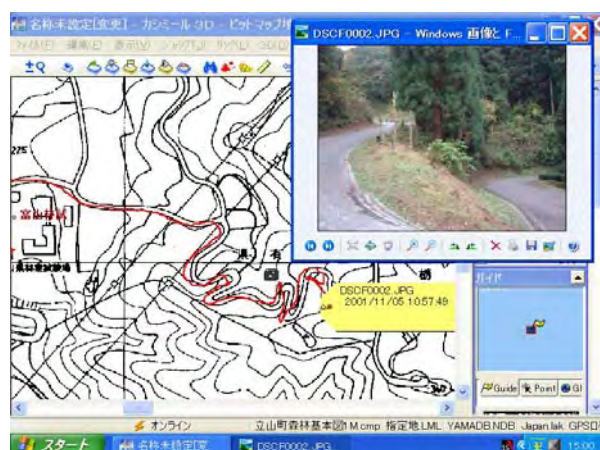


図 5-14 デジカメ画像のリンク表示例

カシミール 3D 画面中央にカメラアイコンがある。

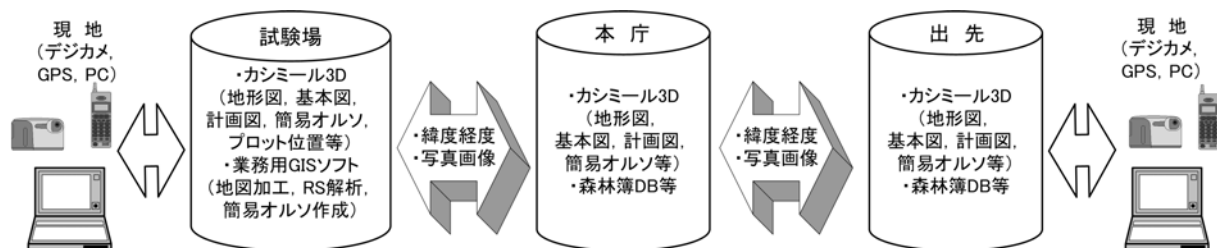


図 5-15 カシミール 3D を核としたデータ交換のイメージ

第 2 節 PDAとフリーソフトの利用

2004 年新潟県中越地震では、3,791 箇所の斜面崩壊が発生し（国土交通省，2005），甚大な被害をもたらされた。このような災害の発生地では，緊急，応急的な現地踏査，調査がまず必要となるが，この種の調査にはこれまで，地形図，地質図，危険箇所図などの紙地図が携行されることが一般的であった。

一方，計算機の発達により，アナログからデジタルへ，紙地図から電子地図への変換が行われ（村井，2002），野外調査に電子地図を携行する条件が整ってきた。

富山県ではこれまで，地すべり関連地図類，森林計画図などを，Windows 版フリーソフトのカシミール 3D（DAN 杉本，2005）で表示可能なフォーマットへと変換し（小林，2002b,d），林業改良指導員，治山担当者や森林組合職員を対象に，その使用法に関する講習会を実施してきた。

しかしながら，このカシミール 3D を直接現場で活用するには，調査者がノート PC とハンディ GPS をケーブルで接続した状態で保持し移動する必要がある。

あり，いわゆる“藪こぎ”を伴うような調査には利用することが困難であった。

その後，2004 年に GPS 受信機を内蔵した PDA が発売されたことから，富山県では，この PDA を森林政策課，林業試験場および各農地林務事務所に試験的に導入し，土砂災害，森林災害後あるいは通常の現地調査での利用を進めつつある。本節ではこの取り組みについて紹介する。

第 1 項 ハードウェアとソフトウェア

導入したハードウェアは，Pocket PC をベースとする PDA では初めて GPS 受信機を内蔵した DigiWalker Mio168（以下，「Mio168」）である。この PDA は，非内蔵型の本体に CF 型や SD 型の GPS を装着する場合に問題となるノイズ対策が既に施され（清水，2004），GPS 部分の脱落の心配もなく，アンテナ部と PDA 本体との角度が自由に変えられることが特徴である。なお，GPS 利用時の連続稼働時間は公称 5 時間（Mio Technology，2005）となっている。Mio168 の外観を図 5-16 に示す。



図 5-16 Mio168 の外観

GPS アンテナを起こした状態。

また、ソフトウェアについては、GPS と連動する Windows CE 版フリーソフトである Garmap CE と NMEA Monitor CE (Fukuro, 2004) の組み合わせを採用することとした。Garmap CE は PDA 画面に地図画像を表示しながら GPS データの管理やナビゲーションを行うものであり、NMEA Monitor CE

は衛星の捕捉状況などのデータを受信、表示するものである。両者は PDA 上のスティックで瞬時に切り替えることが可能であり、またカシミール 3D ととも親和性が高い。Garmap CE, NMEA Monitor CE の動作中の画面を図 5-17, 18 にそれぞれ示す。



図 5-17 Garmap CE の画面

背景は森林計画図。

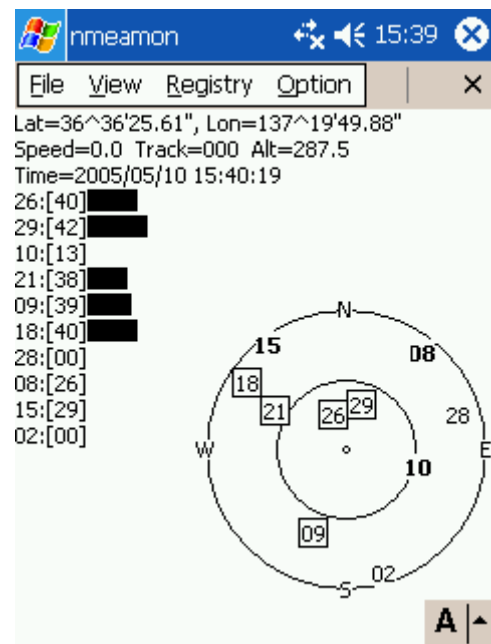


図 5-18 NMEA Monitor CE の画面

第2項 整備したデータセット

富山県ではこれまでに、カシミール 3D 用林務基本データセットとして、表 5-5 に示す地図類の整備を行い、CD-R に焼き付けたものを関係部署に配布

してきた。これらのデータは、カシミール 3D のマップカッタープラグインで切り出すことにより、Garmap CE で表示することが可能となる。

表 5-5 整備済みの主なカシミール 3D データ

名 称	整備範囲, 縮尺など
森林計画図(R)	全県民有林分, 市町村単位, 1/5 千,
林班配置図(R)	全県民有林分, 1/5 万
市町村管内図(R)	入手可能なもの全て, 1/2.5 千~1/1 万
事務所管内図(R)	全県 4 農地林務事務所分, 1/5 万
富山県地質図(R)	1/10 万
市町村境界(V)	全県 35 市町村分(合併前)
地すべり指定地(V)	富山県, 石川県分
地すべり未指定地(V)	富山県分
地すべり地形(V)	地すべり地形分布図データベースより

名称末尾の(R)はラスター, (V)はベクトル型データ。

なお、表 5-5 に記載していない、国土地理院の地図画像や数値標高データなど、汎用的な地図類の変換については、カシミール 3D の作者の著書(杉本, 2002a,b, 2003)に譲る。

第3項 現地調査での利用方法

現地調査で利用する際の手順を、2005 年 4 月に地すべりが発生した石川県羽咋市福水町を例として、前処理、現地、後処理の順に述べる。

1. オフィスでの前処理（カシミール 3D）

まずカシミール 3D において適切な地図画像を表示し、到達すべき地点、経由すべき地底をウェイポイントとして登録し、必要があれば、それらを結んだルートを作成する。ウェイポイント、ルートは POT 形式で保存する。次に、現地で表示させたい地図類をマップカッタープラグインで切り出し、適当なフォルダに保存する。切り出す際のプラグイン画面を図 5-19 に示す。

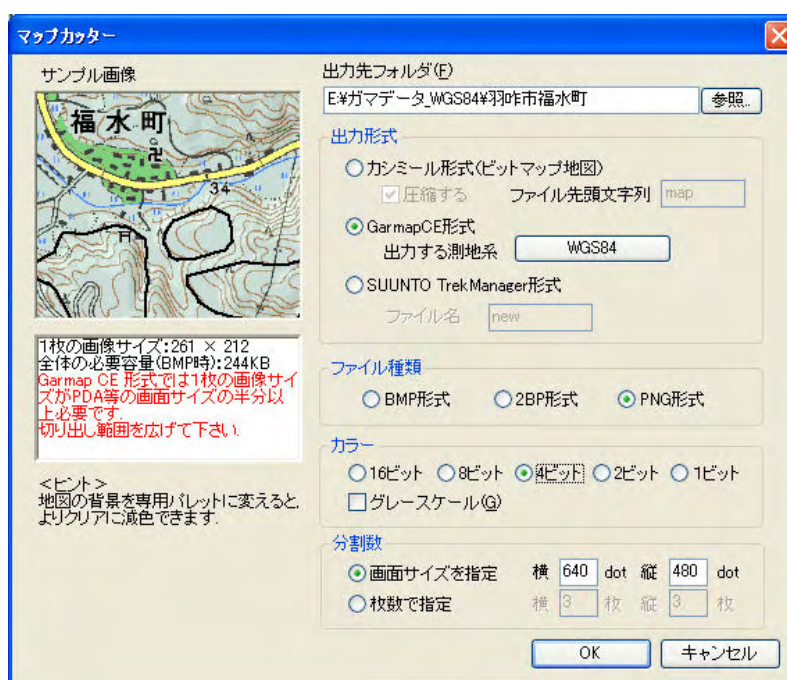


図 5-19 マップカッターの画面

保存した POT 形式ファイルと地図画像フォルダを SD カードにコピーする。また、現場で使うデジタルカメラの日付と時刻を合わせておく。

2. 現場でのデータ取得 (PDA+デジカメ)

Garmap CE を起動し、オフィスで切り出した地

図画像, ウェイポイント, ルートを読み込み, NMEA Monitor CE と連動させながらナビゲーションを行い, 必要に応じてデジタルカメラで撮影を行う。調査終了時にはトラックを POT 形式で SD カードに保存する。現場での調査の状況を図 5-20 に示す。



図 5-20 現地調査の様子

左手に PDA, 右手にデジタルカメラを保持。

3. オフィスでの後処理 (カシミール 3D)

まず SD カードに保存された POT 形式のトラックをカシミール 3D で読み込み, 地図画像上に軌跡を表示させる。次にデジカメプラグインを起動して現場写真を一覧表示させ, トラックの日付, 時刻と

カメラ画像のそれらを同期させ, 撮影位置の推定を行う。推定後のカシミール 3D 画面 (1/25,000 地図画像に地すべり地形 (防災科学技術研究所・科学技術振興機構, 2005) を重ねたもの) を図 5-21 に, また注目写真の拡大画像を図 5-22 にそれぞれ示す。

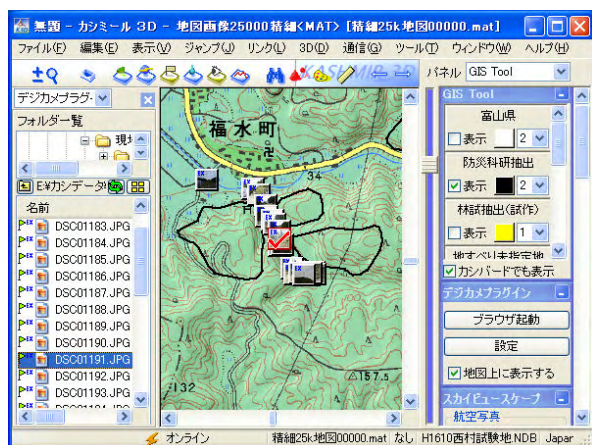


図 5-21 撮影位置推定後の画面



図 5-22 注目写真の拡大図

撮影位置の推定が終わった画像に対しては、その位置情報を Exif として書き込むことができる。この画像を電子メールの添付ファイルとして関係機関へ送信すれば、相手側のカシミール 3D においても撮影位置情報付きの写真画像として表示され、災害後の貴重な一次情報を共有することが可能となる。

第 3 節 引用文献

防災科学技術研究所・科学技術振興事業団 (2005)
地すべり地形分布図データベースホームページ.
http://lswb1.ess.bosai.go.jp/jisuberi/jisuberi_mini/jisuberi_top.html.
DAN 杉本 (2005) カシミール 3D ホームページ.
<http://www.kashmir3d.com/>.
Fukuro (2004) Garmap ホームページ.

<http://www.catnet.ne.jp/fukuda/garmap/garmap.html>.

小林裕之 (2001) GPS とフリーソフトによる森林調査支援システムの試作. 日本写真測量学会 平成 13 年度秋期学術講演会発表論文集: 113-114.

小林裕之 (2002a) 森林分野における簡易 GIS ソフトの利用法—フリーウェア: カシミール 3D を例として—. 第 113 回日本林学会大会学術講演集: 216.

小林裕之 (2002b) フリーソフトを使用した地すべり情報閲覧システム. 第 41 回日本地すべり学会研究発表会講演集: 421-424.

小林裕之 (2002c) SA 解除後の森林内外での単独測位と DGPS の比較試験. 日林誌 84: 276-279.

小林裕之 (2002d) フリーでもこれだけできる! —簡易 GIS ソフト: カシミール 3D の利用法—. 森林航測 198: 14-18.

小林裕之・矢田 豊・茶珍俊一・小神野和貴・野上由美子・鳥本秀幸 (2001) 森林内外での多機種 GPS 受信機による測位比較. 日林誌 83: 135-142.

国土交通省 (2005) 平成 16 年新潟県中越地震に伴う斜面崩壊の発生について (続報).
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/05/050113_.html.

Mio Technology (2005) Mio168 製品情報サイト.
<http://www.mio-tech.jp/products/168.html>.

村井俊二 (2002) 改訂版空間情報工学. 224pp, 日本測量協会, 東京.

清水隆夫 (2004) DigiWalker Mio168 の GPS 実用度. (モバイルプレス. 2004 年夏号, 239pp, 技術評論社, 東京). 28-33.

杉本智彦 (2002a) カシミール 3D 入門. 147pp, 実業之日本社, 東京.

杉本智彦 (2002b) カシミール 3D GPS 応用編. 191pp, 実業之日本社, 東京.

杉本智彦 (2003) カシミール 3D パーフェクトマスター編. 255pp, 実業之日本社, 東京.

第6章 総合考察

第1節 3S技術

第1項 GPS

1. 単独測位

SA 解除前後で林況に差がなかったスギ林内 2 測点における実験結果の比較では、測位誤差の大幅な減少（測点 G2 で 32.6 から 12.5m へ、G3 で 23.5 から 5.4m へ）が統計的に確認でき（表 2-9 の単独測位）、解除後の単独測位が実用上十分な精度を持つことが明らかとなった。

また、GPS オリジナルの WGS84 測地系で取得した測位値を Tokyo 測地系 (Tokyo Datum, 旧日本測地系, 日本測地系) へ精密変換する際に必要な測地網のひずみ補正は、林内 4 測点中 3 測点において誤差を減少（測点 G1 で 10.7 から 10.0m へ、G2 で 13.1 から 12.5m へ、G4 で 6.1 から 5.3m へ）させたが、その精度差は 1.0m 以内とごくわずかであり（表 2-11 の単独測位）、単独測位の期待精度を考慮すれば、手間の掛かる補正は必要ないと考えられた。

地形遮蔽の影響があることが多い実際の森林管理現場における測位誤差は、これらの実験値よりも大きくなるのが十分考えられることから、単独方式の測位結果には 10m 内外の誤差が常に含まれていることを認識しながら使用すべきものとする。

なお、第 2 章で使用した受信機は Garmin 社の GPS II PLUS であり、第 5 章第 2 節で使用した Mio168 に内蔵された受信機は SiRF 社のものであるが、他社のハンディ GPS と比べてみても、GPS 受信機の性能は Mio168 のほうがより優れている（清水隆夫, 2004）という指摘もあることから、今後は後者の精度検証を林内で行う必要がある。また、この種の先端技術は日々進化しつつあることから、新型の GPS エンジンが開発されるたびに林内での精度検証を行い、その能力を把握し続けていく必要もあると考えられる。さらに、GPS の内蔵アンテナを使用した場合と外付けアンテナを使用した場合における林内での受信感度や測位精度の比較も残された課題である。

2. DGPS

SA 解除前後で林況に差がなかったスギ林内 2 測点における実験結果の比較では、1 点で誤差が減少し、もう 1 点で増大（測点 G2 で 4.9 から 3.5m へ、G3 で 6.1 から 6.6m へ）するという結果となり（表

2-9 の DGPS）、SA 解除による DGPS の精度向上は認められないとする既往の研究例と同一の知見を得た。

また、Tokyo 測地系のひずみ補正は、林内 4 測点中 3 測点において測位誤差を 1~3m 減少（測点 G1 で 8.3m から 6.2m へ、G2 で 4.8 から 3.5m へ、G4 で 6.9 から 3.7m へ）させたことから（表 2-11 の DGPS）、DGPS の期待精度を考慮すれば、補正は必要であると考えられた。

SA 解除後における単独測位と DGPS の測位結果の比較からは、林内 4 測点中 3 測点において DGPS の測位誤差が単独測位のそれと比べて有意に小さい（測点 G1 の単独が 10.0, DGPS が 6.2m, G2 の単独が 12.5, DGPS が 3.5m, G4 の単独が 5.3, DGPS が 3.7m）という結果となり（表 2-10）、DGPS 方式の優位性が明らかとなったが、手間の掛かるひずみ補正処理を行うことを考えると、単体のハンディ GPS とビーコン受信機を組み合わせたものよりも、GPS、ビーコン受信機一体型の DGPS 専用機を使用の方が高い精度が期待できる（表 2-4、5 の機種 2 と機種 3）と考えられる。

なお、林内における DGPS の測位誤差は、林分の胸高断面積合計の増加に伴って増大し（表 2-6）、それは GPS 衛星の電波が樹木の幹に反射することによって起こるマルチパスの影響であることが考えられるので、そのような森林における精密位置決めには GPS 以外の方法を用いるか、あるいは強力なマルチパス除去アルゴリズムを備えた機種を使用するのが良いのかもしれない。

3. 干渉測位

干渉測位機種は林内ではフィックス解が得られず、また測位自体も不安定であった（表 2-4 の機種 4、5）。その後、Hasegawa and Yoshimura (2003) は、京都大学上賀茂試験地の林内においてフィックス解を得たと報告しており、将来的には林内でも干渉測位が利用される可能性もあるが、コストおよび装備面も含めて総合的に判断すると、現状では森林管理業務に使用するのには難しいと思われる。

4. Tokyo 測地系の基準点網のひずみ

Tokyo 測地系 (Tokyo Datum, 旧日本測地系, 日本測地系) は第 1 章第 3 節で述べたように、明治時代に整備されたものであり、当時の測量技術の制約や明治以来の地殻変動の影響により、例えば札幌で

約 9m, 福岡で約 4mのひずみがあることが分かっている（国土地理院，2002）。日本測地系と世界測地系の測地基準点成果の差を図 6-1 に，また，東京

を基準とした相対位置の変化を図 6-2 にそれぞれ示す。



図 6-1 日本測地系と世界測地系の測地基準点成果の差

（国土地理院，2002）より

筆者注）本論文では，日本測地系は Tokyo 測地系，世界測地系は JGD2000 測地系と記述。

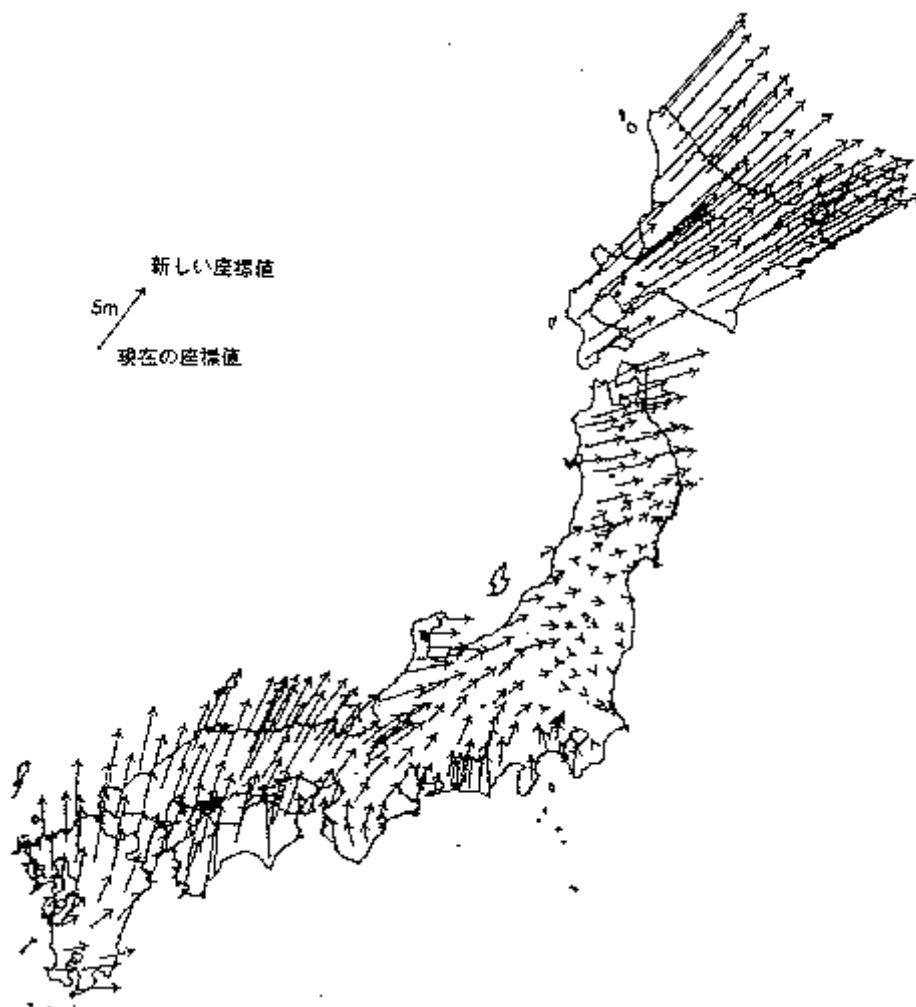


図 6-2 日本測地系による基準点網のひずみ

(国土地理院, 2002) より

筆者注) 本論文では, 日本測地系は Tokyo 測地系と記述。

このひずみが, 図 2-11 で示した, 干渉測位でフィックス解が得られたときの測位点と三角点との位置ずれの原因であり, 期待精度 10m 内外の単独測位はさておき, 期待精度 1 ~ 数 m の DGPS 受信機による測位結果を Tokyo 測地系で作成された地図上にプロットする (Tokyo 測地系の座標に変換する) 場合には, このひずみの補正作業が必要となってくる。

第 2 章ではこのひずみ補正に TKY2WGS という座標変換プログラムを使用した, 測地成果 2000 発効後の現在は入手不可能となっており, その後継ソフトウェアとして TKY2JGD が公開されている (国土地理院, 2003)。

5. 測地成果 2000 について

第 2 章においては測地成果 2000 を考慮しなかったが, 測量法及び水路業務法の一部を改正する法律 (平成 13 年法律第 53 号) が平成 14 年 4 月 (2002 年 4 月) に施行され, JGD2000 測地系が正式に発効となった。この改正により, 国土地理院の 20 万分の 1 地勢図, 5 万分の 1 及び 2 万 5 千分の 1 地形図には, Tokyo 測地系, JGD2000 測地系の経緯度の値が併記されるようになり, また, 国土地理院のベクトル地図データである数値地図 2500 (空間データ基盤) も JGD2000 測地系の位置座標が付いたものが刊行されるようになった。

しかしながら, 森林管理の基本となる, 森林基本図, 森林計画図は依然として Tokyo 測地系のままで

あり、第3章第2節で述べた簡易デジタルオルソフォトの作成に必要な市町村管内図もその大部分がTokyo測地系のままである。

ひとつの測地系に統一することが地理情報の管理上望ましいが、TokyoにするかJGD2000にするか、非常に悩ましい問題である。WGS84測地系が採用している楕円体とJGD2000が採用している楕円体は厳密にはわずかに異なるが、実用上の差異は殆どないと見てよく、同一楕円体と見なしてよい(村井, 2002)ことから、JGD2000測地系に統一した場合には、GPS受信機の測地系をWGS84に設定して得られた経緯度値をそのまま使用できるというメリットがある反面、既存のTokyo測地系の地図データを全てJGD2000測地系に変換しなければならないというデメリットがある。Tokyo測地系に統一した場合には、既存の森林基本図、計画図などの地図データをそのまま使用できるというメリットがある反面、DGPS受信機の測地系をWGS84に設定して得られ

た経緯度値を、前述のTKY2JGDプログラムを使用し、ひずみ補正付きで変換しなければならないというデメリットがある。

市販のGISソフトウェアの内部ルーチンでTokyo測地系の地図データをJGD2000測地系へ変換することは可能であるが、海外製のソフトウェアにこれまで述べてきた“ひずみ”の補正機能がどの程度組み込まれているのかが明らかでなく、また、実際の森林管理業務においてDGPS測位の頻度は単独測位の頻度と比べてそれほど高くはないと考えられることから、結論として、本論文では、当面の間Tokyo測地系に統一して森林関連のGISデータを管理することを提言する。

6. 森林管理業務におけるGPS利用法の提言

得られる精度と測位システムの価格、装備はトレードオフの関係にあるが、以上のことを踏まえ、筆者が提言する森林管理業務におけるGPSの利用法を表6-1に示す。

表 6-1 提案するGPSの利用法

	単独測位	DGPS
機種	レジャー用またはPDA内蔵型	期待精度1m程度のビーコン受信機一体型
測地系	Tokyo, WGS84のどちらでも可	WGS84に固定
使用例	中、低分解能衛星データのGround Truth 被害林分の位置の特定 山地災害の被災箇所の特 1/5万, 1/2.5万地形図を背景としたナビ 森林計画図を背景とした所有者の絞り込み 調査プロット位置図作成のための位置決め 簡易デジタルオルソを背景とした現地調査	高分解能衛星データのGround Truth 被害木の位置の特定
後処理	必要なし	TKY2JGDによる, WGS84からTokyoへの変換
備考1	森林管理者が常時携帯	精密位置決めが必要な場合だけ使用
備考2	WGS84からTokyoへの変換は, 受信機または使用ソフトに任せる	

第2項 RS

ステレオペア写真から発生させたDEM, 国土地理院の50mメッシュDEM, GCPの標高値, の3種類の標高データを使用し, 1/25,000地図画像を併用してデジタルオルソフォトを作成したところ, 89点のGCPにおけるオルソ変換後の平均残差はそれぞれ16.4, 17.0, 30.6mとなり, 変換精度と作業量のバランスから, 国土地理院のDEMを用いる方法が森林管理用デジタルオルソフォトの作成に最も適していることがわかった(第3章第1節)。

第3章第2節において, さらに精度, 能率を上げ

るべく, 1/2,500および1/5,000市町村管内図を使用し, GCPを20点程度取得した場合(福光地区)と10点程度取得した場合(氷見地区)とを比較したところ, 全GCPにおけるオルソ変換後の平均残差はそれぞれ2.41, 3.06mとなり(表3-6), GCP数の増加による精度向上が示唆されたが, その差はわずかであり, 10点程度でも実用上支障がないことがわかった。また, 福光地区において, 変換に国土地理院の50mメッシュDEMを使用した場合と北海道地図(株)の10mメッシュDEMを使用した場合とを比較したところ, 全GCPの平均残差はそれぞれ2.50,

2.41mとなり(表 3-5), DEM の違いが GCP 残差の差としては現れないこともわかった。

第 3 章第 2 節で提案した方法, すなわち, 市町村管内図等の小縮尺地形図と DEM を使用して 10 点程度の標高値付き GCP を取得し, 10m メッシュ(または 50m メッシュ) DEM を使用してオルソ変換と GCP の修正を数回繰り返し, 変換後の GCP 最大残差を 10.0m 以内に収める, という一連の手順が, 簡易デジタルオルソフォトの効率的な作成方法であると考ええる。

その後筆者はこの方法で, 富山県の山田, 八尾, 立山地区のオルソフォトを作成し, 前述の福光, 氷見地区を含めた全ての画像を, 第 5 章第 1 節で取り上げたフリーソフト用データへと変換し, 森林管理業務への使用準備を整えたところである。

第 3 章で方法論は確立できたと考えるが, なお検討の余地が残っているのは画像の管理の問題である。空中写真は衛星画像と比べて撮影範囲が狭いことから, その枚数(画像ファイル数)がどうしても多くなり, 注目地点を含む写真のコースおよび写真番号を標定図で検索し, 画像を表示するまでに時間が掛かってしまうのである。この不都合は, 前述のフリーソフトに標定図も取り込み, オルソ画像をコース別フォルダに整理してジャンプ(ショートカット)登録しておくことによってある程度緩和されるが, 将来的には, 例えば市町村の大字ごとにモザイクしたオルソ画像を作成し, 管理する方が良いのかもしれない。

また, 本論文では衛星リモートセンシングについて言及することができなかったが, IKONOS, QuickBird などの商用高分解能衛星データや, SPOT-5 号などの中分解能衛星データは森林管理に利用できる可能性が高く, また, 従来のピクセルベースの分類からオブジェクトベースの分類へと画像分類の手法も進化しつつあるので, 今後はこれらについても検討する必要がある。

第 3 項 GIS

第 4 章では, 山地災害のひとつである地すべりを対象として, GIS データセットの構築方法と, 日本では利用例があまりない, Weights of Evidence という確率論に基づいた空間統計解析手法を用いた地すべり危険地, 危険度マップの作成例について述べ

た。ここで作成したマップは, 富山県が独自に策定した地すべり危険箇所(指定地ではないが, 将来地すべりが発生するおそれがある箇所)の 80%以上が抽出できており(図 4-15), 空中写真判読等のアナログ的な手法で作成された既存の危険地マップと相互補完的に利用できると考える。

なお, 地すべりの発生要因に地域性があると考えられたことから, 今回は解析単位毎に指標の評価を行ったが, 今後は地域別に評価した要因を横断的に再評価し, 地すべり発生要因の地域的变化等についてさらに検討が必要である。また, 危険箇所の抽出率が悪い「城端」では, 今回含めなかった要因が地すべりに係わっている可能性があり, 受け盤, 流れ盤の指標や地すべり規模別の指標の変化などを考慮することによってより信頼性の高いマップが作成できる可能性がある。

また, GIS に関連した大きな課題として, 解析者がすぐ解析に取りかかることができるような基盤データが質, 量ともにまだまだ不足しているということを描きおきたい。国土地理院の地図類については, メッシュサイズの異なるデジタル標高データや縮尺の異なるデジタル地形図(ラスタ型, ベクトル型)などが市販されるようになって久しく, 利便性が非常に高いのであるが, 地質図については, 1/20 万ベクトル地質図が最近ようやく刊行されたばかりであり, 第 4 章で使った 1/5 万地質図は, 解析者が自らデジタル化してベクトルデータに変換する必要があった。また, 同じく第 4 章で使ったベクトル植生図についても, 最新情報を利用するためには解析者がデータの 2 次加工処理を行う必要があった。

森林管理業務において GIS が本来の空間解析機能を十分に発揮するためには, 前述の地質図, 植生図データの質的向上, 高精度デジタル標高データやベクトル型森林土壌図の整備, 機関や部署をまたいだデータの共有化などが今後望まれる。

第 2 節 現場での利用と行政との連携

第 5 章では, PC 版(第 1 節), PDA 版(第 2 節)の簡易 GIS ソフトウェアを使用し, ラスタ型, ベクトル型の電子地図(GIS データ)やデジタルオルソフォト(RS データ)を表示させ, GPS を使ってナビゲーションを行い, 現場で取得した軌跡(GPS

データ)や写真画像をオフィスへ持ち帰って整理するという、森林管理の現場における3S技術の利用例について述べた。

ここで紹介したソフトウェアは無償で配布されるフリーウェアと呼ばれるもので、導入コストが掛からないという点が最大のメリットであり、ハードウェア購入のコストだけで森林管理業務に3S技術を導入することが可能である。将来的には、全ての森林管理業務従事者がGPS内蔵型PDAを携行する時代が来るとも考えられる。3S技術を利用した効率

的な森林管理業務の在り方を、行政との連携も含めて図6-3に示す。

林業技術センター等に、リモートセンシングとGISの両方ができる専門家を少なくとも数名は配置する必要がある(田中, 1998)という指摘もあるように、図6-3の上半分のことを行うことができる専門家の育成や、試験研究の成果が地図の形をとるもののフリーソフト用データへの変換、フリーソフトの利用に関する普及啓蒙活動の継続などが今後の課題である。

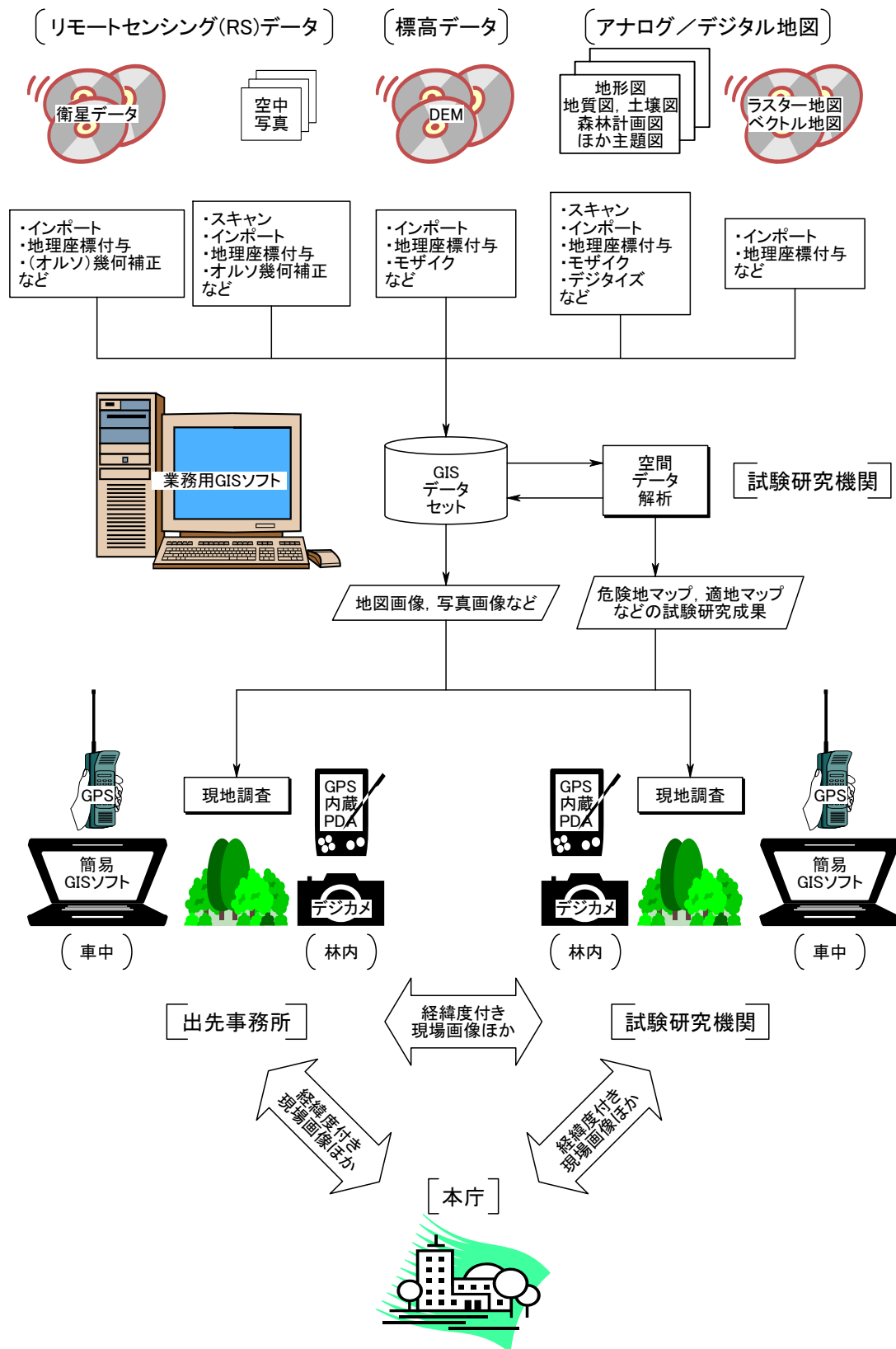


図 6-3 3S技術を利用した効率的な森林管理業務の在り方

第3節 引用文献

Hasegawa H, Yoshimura T (2003) Application of dual-frequency GPS receivers to static surveying under tree canopies. J For Res 8:103-110.

国土地理院 (2002) 世界測地系移行の概要.
<http://www.gsi.go.jp/LAW/G2000/g2000.htm>.

国土地理院 (2003) 座標変換ソフトウェア
“TKY2JGD for Windows” のダウンロード.
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/tsky2jgd/download/download.cgi>.

村井俊治 (2002) 改訂版空間情報工学. 224pp, 日本測量協会, 東京.

清水隆夫 (2004) DigiWalker Mio168 の GPS 実用度. (モバイルプレス. 2004 年夏号, 239pp, 技術評論社, 東京). 28-33.

田中和博 (1998) 森林 GIS の導入と運用. (森林 GIS 入門. 100pp, 日本林業技術協会, 東京). 73-78.

要旨

森林管理業務の効率化を目的として、GPS（全地球測位システム）、RS（リモートセンシング）、GIS（地理情報システム）のいわゆる 3 S 技術の実利用について検討したところ、以下の結果を得た。

1. 森林内での単独測位の水平誤差は、2000 年の SA 解除によって 32.6, 23.5m から 12.5, 5.4m へとそれぞれ大幅に減少し、期待精度が 10m 程度の通常の森林管理業務には十分利用できることが明らかとなった。また、Tokyo 測地系のひずみ補正は単独測位では必要ないこともわかった。
2. 海上保安庁のビーコン局を利用する DGPS の森林内での水平誤差は、SA 解除によって 4.9, 6.1m から 3.5, 6.6m へとそれぞれ変化し、測位精度は解除前後で変わらないという過去の知見が追認できた。また、Tokyo 測地系のひずみ補正によって、測位誤差は 8.3, 4.8, 6.9m から 6.2, 3.5, 3.7m へとそれぞれ減少し、期待精度が数 m の DGPS 方式においてはひずみ補正が有効であることが明らかになった。
3. 高価な測量用受信機を用いる干渉測位は、森林内では非常に不安定でフィックス解も得られなかったことから、樹冠下では使用できないということがわかった。
4. 林分の特定やナビゲーションには単独測位、単木の特定には DGPS、というように、装備や精度を考慮しながらこの両者を使い分けていくことが森林管理業務における GPS の利用法であると考えられた。
5. ステレオペア写真から発生させた DEM、国土地理院の 50m メッシュ DEM、GCP の標高値、の 3 種類の標高データを使用し、縮尺 1/25,000 の地図画像を併用してデジタルオルソフォトを作成したところ、オルソ変換後の平均 GCP 残差はそれぞれ 16.4, 17.0, 30.6m となり、作業量と変換精度を考慮すれば、単写真と既存の DEM を用いて作成する方法がデジタルオルソフォトの作成に最も適していることがわかった。
6. 単写真と既存の DEM を用い、縮尺 1/2,500 および 1/5,000 の市町村管内図を併用して、GCP を 20 点程度、10 点程度取得してデジタルオルソフォトを作成したところ、オルソ変換後の平均 GCP 残差はそれぞれ 2.41, 3.06m となり、GCP は 10 点程度でも実用上支障がないことがわかった。また、50

m メッシュ DEM、10m メッシュ DEM を使用した場合のオルソ変換後の平均 GCP 残差はそれぞれ 2.50, 2.41m となり、DEM の違いが GCP 残差の差としては現れないこともわかった。

7. 市町村管内図等の小縮尺地形図と DEM を使用して 10 点程度の標高値付き GCP を取得し、10m メッシュ（または 50m メッシュ）DEM を使用してオルソ変換と GCP の修正を数回繰り返し、変換後の GCP 最大残差を 10.0m 以内に収める、という一連の手順が、森林管理用簡易デジタルオルソフォトの効率的な作成方法であると考えられた。

8. 数値標高データ、地質図、自然環境情報 GIS データ、地すべり分布図ならびに GIS ソフトウェアを使用して、富山県全域を対象とした地すべり関連 GIS データを整備した。このデータセットから、有効起伏量、高度分散異常量、地質区分、構造線からの距離、植生区分の指標データを作成し、既存の地すべり防止区域の面積率を事前確率とした **Weights of Evidence** 解析を行ったところ、高度分散異常量 > 地質区分および植生区分 > 有効起伏量および構造線からの距離の順で地すべり地との関連が高いと判断された。この解析より得られたスコアマップから ROC 曲線を作成して精度検証を行い、偽陽性率が 0.2 のときの地すべり評価マップを作成した。定量的、デジタル的に作成したこれらのマップは、定性的、アナログ的に作成された従来の地すべり危険地・危険度マップを補完することが可能であると考えられた。

9. 森林管理業務において GIS が本来の空間解析機能を十分に発揮するためには、デジタル地質図、植生図の質的向上、高精度デジタル標高データやベクトル型森林土壌図の整備、機関や部署をまたいだデータの共有化などが今後は必要になると考えられた。

10. 森林管理業務に必須の森林計画図などのラスタ型データや地すべり指定地などのベクトル型データを、業務用 GIS ソフトウェアを使って Windows 版フリーソフト用データへ変換する手順を明らかにし、ノート PC とハンディ GPS の組み合わせによる現地調査での 3S 技術の利用法について示した。

11. Windows 版フリーソフト用データを Windows CE 版フリーソフト用データへ変換する手順を示し、GPS 内蔵型 PDA とデジタルカメラの組み合わせによる現地調査での 3 S 技術の利用法について示した。

12. 各種リモートセンシングデータ，標高データ，地図データを試験研究機関が GIS データセットとして整備し，必要に応じて空間データ解析を行い，危険地マップ，適地マップなどの試験研究成果や地図画像，写真画像などをフリーソフト用データへ変換して関係機関へ配布し，各機関が現地で取得した位置情報付き現場画像などのデータを相互に交換し合うという，3S 技術を利用した効率的な森林管理業務の在り方を図で示した。

謝辞

本論文を取りまとめるにあたり，京都大学フィールド科学教育研究センター教授竹内典之博士には終始，懇切な御指導と激励をいただいた。また，本論文の校閲を賜った京都大学大学院情報学研究科酒井徹朗博士，京都大学フィールド科学教育研究センター芝 正己博士には数々の御支援と御教示をいただいた。

森林総合研究所の沢田治雄博士，中北 理博士，鷹尾 元博士，平田泰正博士，齋藤英樹氏には，リモートセンシング，GIS の理論や解析ソフトウェア

の使用法に関して様々な御助言をいただいた。

第 2 章の GPS 測位実験では，石川県林業試験場の矢田 豊氏の協力を賜り，また DX アンテナ株式会社 GPS 事業部（当時）の鳥本秀幸氏をはじめ同部の皆様に機材の提供と実験への協力を賜った。

第 4 章の地すべり危険地のマッピングは，林野庁山地災害危険地区調査の指定テーマの一部として実施したものであり，その遂行にあたっては，日鉱探開株式会社地質部の三箇智二氏に懇切丁寧な御助言を何度もいただいた。

第 5 章の森林管理業務への応用では，富山県森林政策課松井俊成氏，同魚津農地林務事務所松井伸彦氏より，行政官の立場から様々な御助言をいただいた。

富山県林業技術センターの歴代の所長，同センター林業試験場の歴代の場長，西村正史博士，澤田隆司氏（現富山県森林政策課），安田 洋氏，嘉戸昭夫博士，長谷川幹夫氏，相浦英春氏ほか職員の皆様には研究実施にあたって多くの助言と協力をいただいた。

以上の方々に対して心から感謝を申し上げる。

Studies on Utilization of 3S-Technology (GPS, RS, GIS) for Effective Forest Management Work

S u m m a r y

To raise efficiency of forest management duty, practical use of GPS (Global Positioning System), RS (Remote Sensing) and GIS (Geographic Information System), which are so called “3S-technology”, were evaluated. The obtained results are as follows:

1 . Horizontal error of point positioning in forests were much decreased from 32.6 and 23.5m to 12.5 and 5.4m respectively by the removal of SA in 2000. It was shown that point positioning is practically usable for usual forest management duty when required accuracy is about 10 meter. It was also shown that the correction for deformation of the Tokyo-Datum was not necessary for point positioning.

2 . Horizontal error of differential GPS (DGPS), which uses beacon stations of the Japan Coast Guard, in forests were changed from 4.9 and 6.1m to 3.5 and 6.6m respectively by the removal of SA. It was shown that accuracy of DGPS was not affected by the removal of SA, as previous reports had said. Positioning error was changed from 8.3, 4.8 and 6.9m to 6.2, 3.5 and 3.7m respectively by the correction for the Tokyo-Datum. It was shown that the correction was effective for DGPS which expected accuracy was several meters.

3 . Carrier phase positioning, which uses expensive receivers for surveying, was unstable in forests and could not get fixed solutions. It was shown that the carrier phase positioning was not usable under tree canopies.

4 . It was suggested that the proper use of GPS for forest management duty was to use either point positioning or DGPS considering their accuracy and equipment, for example, point positioning for forest stands pointing and DGPS for single tree pointing.

5 . A 1/25,000 scale topographic map image and three kinds of elevation data, DEM extracted from stereo paired aerophotograph, 50 m mesh DEM published by the Japanese Geographical Survey Institute and elevation value of GCP, were used to make digital orthophotographs. Average GCP residuals for the three kinds of DEMs after ortho restitution were 16.4, 17.0 and 30.6m respectively. Considering accuracy and working time, it was suggested that the mono-restitution using a single photograph and published DEM was the most suitable method for forest management duty.

6 . Mono-restituted digital orthophotographs were made with 1/2,500 and 1/5,000 scale topographic maps made by municipalities using 20 target GCPs and 10 target GCPs. Average GCP residuals after restitution were 2.41 and 3.06m respectively and it was suggested that about 10 GCPs were enough for practical use. Restitution with 50 m mesh and 10 m mesh DEM showed 2.50 and 2.41m average residuals after restitution respectively and did not show any differences.

7 . Repeating several times mono-restitution and GCP editing using small scale topographic maps made by municipalities, about 10 GCPs with elevation value and 10 m (or 50 m) mesh DEM until the maximum GCP residual became smaller than 10.0m was supposed to be the best way to make digital orthophotographs for forest management duty.

8 . Landslide related GIS data set for the whole Toyama-prefecture was integrated with DEM, geological maps, natural environment GIS data, landslide distribution maps and GIS software. Effective relief, anomaly of disperse of altitude, geology, distance from faults and fold axes, and vegetation indices were produced from the data set. Result of the weights of evidence analysis with landslide reserved area ratio as prior provability showed that the highest relationship with landslide area was the anomaly of

disperse of altitude, the second highest were geology and vegetation and the third were effective relief and distance from faults and fold axes. Accuracy of these score maps made from the analysis were checked with ROC curves and landslide evaluation maps were produced when false positive rate is 0.2. It was thought that, these digitally produced maps can be used to complement analogously produced existing landslide hazard maps.

9. To bring spatial analysis ability of GIS into full play in forest managing area, it was suggested that more qualified and detailed digital geological maps, vegetation maps, DEMs and soil maps are needed. It was also suggested that more spatial data should be shared among related organizations.

10. Procedure to convert data, such as forest planning raster maps and landslide prevention areas' vector maps indispensable for forest management, from a business use GIS software to a Windows based freeware was shown. Usage of the 3S-technology combining a note PC and a handy GPS receiver in field investigation was proposed.

11. Procedure to convert spatial data from a Windows based freeware to a Windows CE based freeware was shown and usage of the 3S-technology combining a PDA with integrated GPS and a digital camera in field reconnaissance was proposed.

12. An efficient forest management image including connections between research and administrative organizations utilizing the 3S-technology was shown in a figure.