

久留米大学大学院比較文化研究科

審査博士学位論文

デジタル化空中写真と人工衛星データのコンポジットによる
地表面環境解析法に関する応用的研究

黒田 圭介

2018 年

デジタル化空中写真と人工衛星データのコンポジットによる

地表面環境解析法に関する応用的研究

黒田 圭介

要旨

1. はじめに

本研究は地上分解能が高く、なおかつ高い過去への遡及性を備えたデジタル化空中写真に、人工衛星データや DEM データ等をコンポジットした画像を自動分類することで、ローカルな研究対象地域での地表面環境の定量的な解析に資する高分解能な土地被覆分類図の自動作成法を構築し、その妥当性を地理学的な事例研究を通じて実証することで、市町村単位の狭小なスケールで問題とする地理学的課題解決に活用できる新たな地表面解析方法を確立することを目的とする。その検討内容を以下の 4 点にまとめる。

1)地理学分野で馴染み深い「空中写真」を、普及著しい「GIS ソフト」を通じて「リモートセンシング的手法」を用いた自動分類により土地被覆分類図を作成する簡便な手法を構築する。

2)コンポジット空中写真から作成された地上分解能 1m かつローカルな範囲における土地被覆分類図の分類精度を検証し、実用に耐えうる精度として妥当であるか、各種地理学的な課題を通じて検討する。分類精度の検証には、同地域における人工衛星データによる土地被覆分類図との比較のほか、考察においては既存研究との分類精度の比較検討を行う。

3)USGS の web サービスより入手した無償の 1970 年代及び 1980 年代の LANDSAT データと空中写真の

コンポジットデータから作成される地上分解能 1m の土地被覆分類図を作成し、近年の高地上分解能を持つ人工衛星データではなし得ない過去への遡及性の高さをもった地表面解析が可能であることを、各種地理学的な課題を通じて検討する。考察においては既存研究との過去への遡及性の比較検討を行う。

4)以上より、元来目視判読に用いられてきた空中写真は、地表面解析適用事例の幅を飛躍的に広げることができるリモートセンシングデータである、という新たな知見を地理学界に提供し、本研究が新規提案する手法が、地理学的な研究課題解決に対するリモートセンシング的手法の普及と浸透を担うことができることを示す。そのための研究事例として考察では、土地被覆分類図を他の意味を持つ主題図へと変換できる具体例を提示し、本研究手法の汎用性と応用性を明らかにする。

2. 本研究手法の概要

本研究のリモートセンシング手法における具体的操作に必要な知識・技術は「GIS ソフトの基本的な操作が行える」のみであり、高度な情報処理の知識、機械語によるプログラミング、人工衛星データの解釈やその解析方法などの知識は必要としない。そのため、作業者の属性を問わず実行が可能である。以下に GIS ソフトを使用した本研究の手法を示す。

(準備段階)分類根拠となりうる地理データを収集する。本研究では、地物を色調で分類する根拠となる RGB(パソコンで表示される 8bit のデジタル化カラー空中写真画像においては R(Red: 赤), G(Green: 緑), B(Blue: 青)それぞれが 256 階調の情報を持ち、最大で約 1,677 万色を用いて表現されている)で記録された空中写真と、人工物と植生を分類する根拠となる人工衛星データの不可視領域の反射率データ、及び地物の分布特性として地形が重要な場合はその分類根拠としての DEM(傾斜角分布図に変換)の 3 種の地理データを使用した。なお、空中写真には、その地上分解能の高さを活用し、土地被覆分類図を高分解能化する役割もある。必要な地理データを収集したら、以下の手順で土地被覆分類図の作成を行う。

①地理データに地理座標を与え、すべてのデータが位置のずれなく重なるように位置あわせ(幾何補正)を

行う。デジタル化空中写真はオルソ幾何補正を行う。

②必要に応じて地理データのセルサイズ(地上分解能)を調整・統一し、さらに必要に応じて前処理を実施する。

③複数の地理データをコンポジット(組み合わせ)し、教師付最尤法分類(オーバーレイ解析)により土地被覆分類を行う。

④精度判別表を用いて精度検証を行う。目視および精度判別表での分類精度が研究目的を満たすものであれば土地被覆分類図の完成。そうでなければ教師付最尤法分類から再度やりなおす。

⑤必要に応じて新たな空間情報を持つ主題図へ変換する。

以上である。このような方法を用いた土地被覆分類図の作成法は著者らが今日まで提示してきた成果以外にほとんどなく、高い新規性と萌芽性を持ち、GIS ソフトの普及と地理情報のデジタル化が進展する地理学界に対して、新たな地表面環境の解析手法の一つとして一般化が見込まれる。

3. 結果

第1表 本研究で作成した全ての土地被覆分類図の概要

	第3章	第4章	第6章	第7章	第8章	
分類対象	河川氾濫及び斜面崩壊地	カルスト台地の草原	河川近傍の土地被覆	河川近傍の土地被覆	都市域	
研究対象地域	熊本県阿蘇市	福岡県平尾台	大分県大分川	熊本市白川	福岡県福岡市	
土地被覆分類図スケール	南北約5.4km × 東西約4.7km	南北約500m × 東西約750m	河道中央より両岸へ各300m × 河口から上流にかけて約50km	河道中央より両岸へ各300m × 河口から上流に向かって約20km	南北約1.6km × 東西約1.5km	平均 ¹⁾ : 南北1,620m 東西1,510m
コンポジット構成	THEOS+空中写真+傾斜	ALOS AVNIR2+空中写真+傾斜	ASTER VNIR+空中写真	①ALOS AVNIR2+空中写真 ②LANDSAT MSS+空中写真	①LANDSAT ETM++空中写真 ②LANDSAT TM+空中写真	
土地被覆分類図解像度	1m	1m	1m	1m	1m	
平均精度 (%)	83.0%	94.8%	88.3%	①:88.0% ②:74.7%	①:85.9% ②:77.5%	平均: 84.6%
人工衛星データ及び空中写真の年代	写真:2011年10月9日撮影 衛星:2012年10月8日観測	写真:1994年10月23日撮影 衛星:2008年11月13日観測	写真:2007年4月29日撮影 衛星:2007年1月31日観測	①: 写真:2007年2月8日撮影 衛星:2008年11月13日観測 ②: 写真:1975年1月5日撮影 衛星:1978年12月7日観測	①: 写真:2007年7月27日撮影 衛星:2007年10月21日観測 ②: 写真:1981年11月18日撮影 衛星:1984年5月22日観測	過去への遡及性: 1978 ²⁾ 年より現在

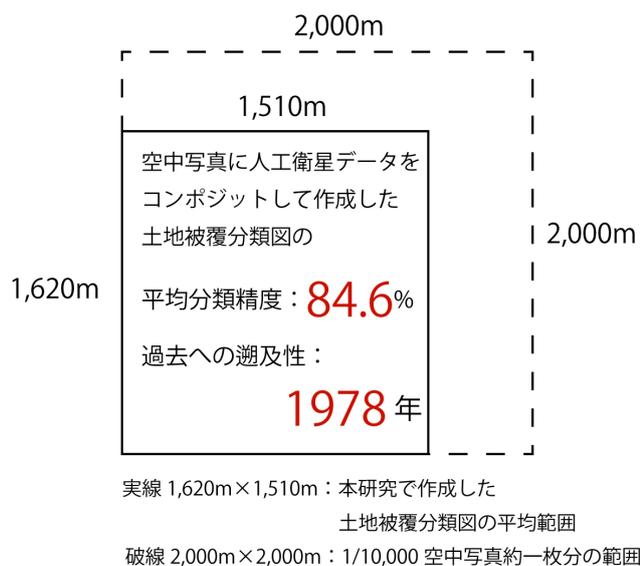
1)大分川及び白川については、300m×300mで計算している。2)第7章、LANDSAT MSSの観測年。

3.1 土地被覆分類結果

本研究の事例研究において作成された、人工衛星データコンポジット空中写真による土地被覆分類図

は、高精度(平均分類精度約 75~90%)かつ高解像度(1m)である。本研究での事例研究における精度結果を第 1 表に示す。また、第 1 図に本研究で作成したすべての土地被覆分類図の大きさ(寸法)を平均したモデルを示す。第 1 表を見ると、すべての土地被覆分類図で平均精度 80%を超え、その多くは 85%を超える。今回作成したすべての土地被覆分類図の平均精度を平均すると 84.6%であり、この値は近年の 1m未満の高解像度人工衛星データを用いたものと比較して同等もしくは高精度である。次に、第 1 図を見ると、本研究で作成した平均的な分類図のスケールは東西 1,510m、南北 1,620m で、これは国土交通省国土地理院発行の 1/10,000 空中写真 1 枚弱の範囲を占める。また、過去への遡及性も高く、白川の事例では 1975 年撮影の空中写真と 1978 年観測 LANDSAT MSS データコンポジット画像から土地被覆分類図を作成した。よって、本研究の結果のみ見ても、人工衛星データの観測年 1978 年より 2017 年現在まで、約 40 年を遡って高解像度な土地被覆分類図が作成できる。

以上、本研究手法を用いれば、空中写真 1 枚程度の範囲において、セルサイズ(解像度)1m、分類精度約 85%、さらに 1970 年代後半にまで遡って土地被覆分類図が作成できることが見込まれ、研究課題に応じてさらなる高解像度化(空中写真の地上分解能に依存する)や、対象とする範囲の広範囲化も可能である。もちろん、これは一般的に入手可能な人工衛星データではなし得ないもので、なおかつ一般的な GIS ソフトに搭載された最尤法分類で作成可能であり、最近の地上分解能 1m未満の高解像度な人工衛星データで用いられるオブジェクト指向分類のような、きわめて専門性が問われる方法を用いる必要はない。



第 1 図 本研究で作成した全ての土地被覆分類図のスケールを平均したモデルと平均分類精度及び、過去への遡及性

3.2 地表面環境解析結果

本研究手法で作成された土地被覆分類図は、コンポジットした地理データを反映した結果となるため、ローカルなエリアでの地表面環境のオーバーレイ解析に使用することができ、さらに定量解析や他の意味を持つ主題図への変換可能である。本研究では 4 地域においてその応用的な事例研究を示した。以下にその結果を概括する。

①カルスト台地における草原

作成された土地被覆分類図と地形分類図, ALOS AVNIR2 から作成した地表面環境指標の NDVI, NDWI, NDSI とのオーバーレイ解析により, 高 NDVI(植物活性度が高い), 高 NDWI(地表面の帯水状況が高い), 低 NDSI(土壌が露出せず植生が繁茂する)なドリーネ底をネザサが最好適地とすることが明らかとなった。これは, 現地調査におけるグランドトゥルース結果と調和的であった。

②大分川における土地被覆と流出係数分布図への変換

大分川に沿う地域の土地被覆分類図と地形分類図のオーバーレイ解析により, 特に離水していない河床での土地利用や河川に沿う竹林も検出され, これらは現地調査でも確認できた。

さらに, 降雨時の雨水流出度を示す流出係数の分布図を土地被覆分類図の読み替えによって作成した。この流出係数分布図は土地被覆状況・地形分類とよく対応し, 大分川近傍では, 市街地である沖積低地は流出係数が高く, 市街地以外の耕地等に利用されている段丘他は流出係数が低いという関連性を, 定量的に明らかにした。

③白川における土地被覆変化

白川近傍の二時期の土地被覆分類図のオーバーレイ解析により, 1975 年から約 30 年間で市街地が 7.8%増加しており, 草地が 4.8%減少, 裸地は 12.4%減少している結果を得た。また, 2012(平成 24)年の北部九州豪雨における, 解析範囲内の浸水面積は約 62 万 m²で, このうちの約 10.5%が 1975 年当時は裸地・草地であった場所が都市化した地域であったことが分かった。このように, 都市化の進展状況や被災

範囲の場所性を定量的に把握することができた。

④都市域(福岡市福岡空港周辺)における土地被覆の経年変化と土地利用図への変換

福岡市の福岡空港周辺における土地被覆分類図の時代間オーバーレイ解析により、1981年から約25年間で森林が22.5%減少し、宅地が30.3%増加している結果を得た。このように、空港周辺の丘陵地の森林開発による都市化の進展状況を定量的にとらえることができた。また、地表面環境、特に土壌水分量の指標であるNDWIと土地被覆分類図から明らかになった竹林分布図とのオーバーレイ解析により、高低差が生じる地形境界、特に沖積低地と丘陵の境界のような土壌水分の高まるポイントに竹の森林への侵入を捉えることができた。

また、本地域を例に、意図的にセルサイズを低下させることにより、土地利用図へと変換した。視覚的には国土交通省国土地理院発行の土地利用細分メッシュデータと対応がよかったが、そもそも土地被覆分類図と土地利用図では主題図としての性質が異なるため、表現できない分類項目も存在した。

5. まとめ

以上より、近年入手可能となった解像度1m未満の人工衛星データ(例えばWorld View 3)などと同等の地上分解能(1m)を持ち、空中写真にLANDSAT MSSデータをコンポジットしたものを除いては、分類精度約80%~90%と高精度で、さらに過去への遡及性においてもWorld View 3(2014年打ち上げ観測開始)に勝る結果を得た。すべて一般的に入手可能なGISソフトを民生用のパソコンで操作した結果であり、人工衛星データと同じ取り扱いで空中写真を使用した本研究手法によるリモートセンシングは、時空間スケールとテクニカルな問題をクリアできる。よって、本研究手法を用いれば、リモートセンシングの専門家でない者でも手軽に地表面環境の定量解析を土地被覆分類図の自動分類により行うことができる。

目次

第1章 序論 p.1-18

1.1 はじめに

1.2 人工衛星データによるリモートセンシング

1.3 空中写真を用いたリモートセンシング

1.3.1 先行研究

1.3.2 本研究における空中写真を用いたリモートセンシング手法

1.4 本研究手法の有利性

1.4.1 アプリケーション

1.4.2 地上分解能

1.4.3 過去への遡及性

1.4.4 ノイズ

1.4.5 コスト

1.5 本論文の目的

1.6 本論文の構成

第2章 研究方法 p.19-32

2.1 本研究手法の概要

2.2 本研究で用いたデジタル地理データ

2.2.1 空中写真について

2.2.2 人工衛星データについて

2.2.3 DEM データについて

2.2.4 地理データの解析前処理について

2.3 土地被覆分類方法と分類精度の評価方法

- 2.3.1 教師付き最尤法分類
- 2.3.2 土地被覆分類図の分類精度
- 2.3.3 土地被覆分類図の読み替え, 再変換

第3章 本研究手法を用いた解析事例

～2012(平成24)年北部九州豪雨災害地を例に p.33-46

- 3.1 はじめに
- 3.2 本章の目的
- 3.3 研究方法
 - 3.3.1 本研究手法の概要
 - 3.3.2 阿蘇市の事例で用いたデジタル地理データ
- 3.4 分類精度の検証
- 3.5 本章のまとめ

第4章 カルスト台地平尾台の草原における土地被覆分類 p.47-62

- 4.1 はじめに
- 4.2 本章の目的
- 4.3 カルスト台地平尾台の自然環境
- 4.4 土地被覆分類図の作成
- 4.5 現地調査方法
 - 4.5.1 植生調査方法
 - 4.5.2 地形概観
- 4.6 土地被覆分類図の分類精度
- 4.7 ラインセンサスルートにおける植生分布の特徴
- 4.8 考察～植生調査結果と土地被覆分類図の比較検討

4.9 本章のまとめ

第5章 土地被覆分類図を用いた地表面環境解析

～平尾台におけるネザサの分布好適地を例に p.63-82

5.1 はじめに

5.3 植生に関する既往研究概説

5.4 土地被覆分類図を用いた環境調査方法

5.5 ドリーネ調査方法

5.5.1 土壌調査

5.5.2 デジタルカメラによる植生調査

5.5.3 デジタルカメラ画像を用いた土地被覆分類図の作成

5.6 土地被覆分類図を用いた平尾台におけるネザサ好適地の検討

5.7 グラントゥルース

5.7.1 デジタルカメラ画像による土地被覆分類図の精度

5.7.2 精密調査ドリーネにおけるネザサの分布好適地の検討

5.8 カルスト台地平尾台の地表面環境総合的考察

5.9 本章のまとめ

第6章 土地被覆と地形状況のオーバーレイ解析～大分川近傍を例に p.83-94

6.1 はじめに

6.2 研究対象地域概観

6.3 地形分類

6.4 使用データとその処理方法

6.5 精度検証

6.6 考察～土地被覆と地形の関係

6.7 本章のまとめ

第7章 土地被覆経年変化の定量解析 1

～熊本県白川における河川氾濫による浸水域を事例に p.95-106

7.1 はじめに

7.2 研究対象地域概観

7.3 使用データとその処理方法

7.4 精度検証

7.5 考察～土地被覆の経年変化

7.6 本章のまとめ

第8章 土地被覆経年変化の定量解析 2

～福岡市域における都市化の進展状況を事例に p.107-118

8.1 はじめに

8.2 研究対象地域概観

8.3 使用データとその処理方法

8.4 精度検証

8.5 考察～土地被覆の経年変化

8.6 本章のまとめ

第9章 考察 p.119-134

9.1 土地被覆分類精度評価

9.2 過去への遡及性

9.3 解析コストの検討

9.4 他の主題図への読み替え

9.4.1 本節の概要

9.4.2 流出係数分布図へ読み替え～大分川を例に

9.4.3 土地利用図へ読み替え～福岡市域を例に

9.4.4 本節のまとめ

9.5 本章のまとめ

第 10 章 結論 p.135-141

参考文献 p.142-153

注釈 p.154-158

謝辞 p.159-160

研究業績一覧 p.161-163

図・写真 一覧

第1章

図 1.1 土地被覆分類の例

図 1.2 人工衛星による地球環境観測のモデル

図 1.3 代表的な地物の反射率と本研究で使用する人工衛星データの観測波長帯

図 1.4 本研究が提案する分類方法と従来の方法の概念図

図 1.5 ALOS AVNIR2 と空中写真の地上分解能の違い

第2章

図 2.1 本研究手法のフローチャート

図 2.2 位置合わせ例

図 2.3 人工衛星データの画素集合体(ALOS AVNIR2, 画素(セルサイズ)一辺 10m)

図 2.4 傾斜角分布図(オリジナルセルサイズ 5m を 1m へ変換例)

図 2.5 セルサイズの異なる画像をコンポジットした場合と、統一した場合の出来上がりの違い

図 2.6 フォーカル統計処理の概念

図 2.7 フォーカル統計処理の例

図 2.8 セルサイズが大きい人工衛星データの場合、期待する結果が得られない例

図 2.9 内挿法による人工衛星データの平均化の例

図 2.10 最尤法分類のモデル

図 2.11 教師取得の例

図 2.12 精度検証のモデル

第3章

図 3.1 解析範囲

図 3.2 解析範囲空中写真(2011年10月9日撮影)及び写真 3.1, 写真 3.2 の位置

図 3.3 THEOS(トゥルーカラー表示, 2012年10月8日観測)

図 3.4 DEMによる傾斜角分布図

図 3.5 土地被覆分類図(未処理 THEOS ベース)

図 3.6 土地被覆分類図(フォーカル統計処理済 THEOS ベース)

図 3.7 平均分類精度散布図

図 3.8 分類項目と傾斜角分布図のオーバーレイ例

写真 3.1 河川氾濫による土砂堆積の様子

写真 3.2 斜面崩壊地の様子

第 4 章

図 4.1 研究対象地域(赤枠内)の空中写真

図 4.2 (1)研究対象地域の地形分布および区画 (2)研究対象地域の陰影図

図 4.3 フォーカル統計処理(平均)された ALOS AVNIR 2band4 画像

図 4.4 傾斜角分布図

図 4.5 ラインセンサルートに設置した区画のモデル

図 4.6 平尾台のカルスト地形モデルとランプロファイアーに沿って形成されたドリーネの地形モデル

図 4.7 (1)空中写真 RGB のみの土地被覆分類図, (2)RGB+傾斜+コンポジット画像による土地被覆分類図, (3)RGB+傾斜+ALOS AVNIR2 コンポジット画像による土地被覆分類図, (4)JAXA 高解像度土地利用土地被覆分類図

図 4.8 ラインセンサルートの植生調査における区画ごとの植生分布割合(%)と地形分布

図 4.9 ラインセンサルートに沿った土地被覆の区画ごとの抽出例

図 4.10 ラインセンサルートと土地被覆分類図でのネザサ, ススキの分布割合のグラフ及び 10 区間移動平均

写真 4.1 平尾台のネザサーズスキ草原

第 5 章

図 5.1 本章における研究のイメージ

図 5.2 研究対象地域の NDVI 分布図

図 5.3 研究対象地域の NDWI 分布図

図 5.4 研究対象地域の NDSI 分布図

図 5.5 精密調査ドリーネとその地形区分

図 5.6 精密調査ドリーネの(1)土壌酸性度(pH), (2)土壌水分量(%)

図 5.7 光の波長と透過率との関係 (1)LANDSAT TM band3, (2)LANDSAT TM band4

図 5.8 (1)バンド 3D 画像と(2)バンド 4D 画像

図 5.9 (1)カラーデジタルカメラ画像と教師データ, (2)NDVI 画像, (3)コンポジット画像によるドリーネ覆分類図, (4)デジタルカメラ画像のみのドリーネ被覆分類図

図 5.10 (1)分類項目ごとの平均 NDVI 値 (2)分類項目ごとの平均 NDWI 値
(3)分類項目ごとの平均 NDSI 値

図 5.11 (1)地形ごとの平均 NDVI 値 (2)地形ごとの平均 NDWI 値
(3)地形ごとの平均 NDSI 値

図 5.12 本研究の現地調査により明らかとなった平尾台の地表面環境のモデル

第 6 章

図 6.1 研究対象地域(大分川)

図 6.2 地形分類のモデル

図 6.3 (①)解析範囲の空中写真 (①～④の範囲は図 6.4～図 6.7 の範囲に対応), (②)流出係数解析区画
(第 9 章にて使用), (③)標高分布

図 6.4 地形分類, 土地被覆分類結果(範囲は図 6.3①の範囲①)

図 6.5 地形分類, 土地被覆分類結果(範囲は図 6.3①の範囲②)

図 6.6 地形分類, 土地被覆分類結果(範囲は図 6.3①の範囲③)

図 6.7 地形分類, 土地被覆分類結果(範囲は図 6.3①の範囲④)

写真 6.1 河床の竹林

写真 6.2 河床の運動場

第 7 章

図 7.1 研究対象地域(白川)

図 7.2 1975 年の空中写真と土地被覆分類図(a : 1975 年空中写真, b : 空中写真による土地被覆分類, c : 同コンポジット空中写真)

図 7.3 1975 年の空中写真と土地被覆分類図における 2012(平成 24)年 7 月の九州北部豪雨による浸水範囲拡大表図

図 7.4 2007 年の空中写真と土地被覆分類図(a : 1975 年空中写真, b : 空中写真による土地被覆分類, c : 同コンポジット空中写真)

図 7.5 2007 年の空中写真と土地被覆分類図における 2012(平成 24)年 7 月の九州北部豪雨による浸水範囲拡大表図

図 7.6 1975 年裸地・草地→2007 年市街地への変化地域(赤で着色した地域)

第 8 章

図 8.1 研究対象地域((1)2007 年 7 月 27 日撮影空中写真, (2)1981 年 11 月 18 日撮影空中写真)

図 8.2 土地被覆分類図 (1)LANDSAT ETM+全 band 使用 (2)ALOS AVNIR2 全 band 使用 (3)2007 年デジタル化空中写真のみ使用 (4)デジタル化空中写真に LANDSAT ETM+ band4 コンポジットした画像を使用

図 8.3 1981 年の土地被覆分類図(コンポジット空中写真使用)

図 8.4 (1)森林から都市化, (2)草地から都市化 (図 8.3(2), (3)の背景の空中写真は 1981 年 11 月 18 日撮影の 1/8,000 空中写真を使用)

図 8.5 竹の約 25 年間での森林への侵入の様子

第9章

図 9.1 解析地域の流出係数分布図

図 9.2 解析区画毎の流出係数, 流出係数の5区間移動平均, 解析区画毎の平均標高

図 9.3 リサンプル(再標本化)の例

図 9.4 (1)土地利用メッシュマップ, (2)読み替えメッシュマップ, (3)1981年空中写真

図 9.5 表 9.4 の概念

第10章

図 10.1 本研究で作成した全ての土地被覆分類図のスケールを平均したモデルと平均分類精度及び、過去への遡及性

表 一 覧

第2章

表 2.1 本研究で使用した人工衛星とそのデータの概要

第3章

表 3.1 コンポジットしたデジタル地理データの主要諸元

表 3.2 未処理 THEOS ベースの土地被覆分類図の分類精度(%)

表 3.3 フォーカル統計処理済 THEOS ベースの土地被覆分類図の分類精度(%)

表 3.4 図 3.5(1)と図 3.5(4)の分類項目における平均分布傾斜角度(°)

表 3.5 図 3.6(1)と図 3.6(4)の土砂堆積域における THEOS 平均 band1~3 値(上段)及び空中写真の平均 RGB 値(下段), および両者の平均値から導き出したカラーコード及びその色調

第4章

- 表 4.1 (1) 空中写真のみ(図 4.7(1))の分類精度(%) (2) 空中写真+傾斜(図 4.7(2))の分類精度(%)
(3)空中写真+傾斜+ALOS AVNIR2(図 4.7(3))の分類精度(%)

- 表 4.2 ラインセンサルート植生調査における地形ごとの植物出現割合

第5章

- 表 5.1 (1)デジタルカメラ画像による分類精度(%), (2)コンポジットデジタルカメラ画像による分類精度(%)

- 表 5.2 精密調査ドリーネにおける各分類項目における平均バンド 4D 値

- 表 5.3 精密調査ドリーネの地形ごとの ph, 土壌水分量, NDVI 値の平均

- 表 5.4 精密調査ドリーネにおける地形ごとの植物出現割合

第6章

- 表 6.1 分類精度 (1)ASTER VNIR (2)空中写真 (3)コンポジット空中写真

- 表 6.2 地形毎の土地被覆割合

- 表 6.3 1975 年土地被覆分類図の分類精度(%)

- 表 6.4 2007 年土地被覆分類図の分類精度(%)

- 表 6.5 1975 年から 2007 年にかけての土地被覆変化

第7章

- 表 7.1 1975 年土地被覆分類図の分類精度(%)

- 表 7.2 2007 年土地被覆分類図の分類精度(%)

- 表 7.3 1975 年から 2007 年にかけての土地被覆変化

第8章

表 8.1 図 8.2 の土地被覆分類図の分類精度

表 8.2 教師データ内の RGB 及び band4 の DN 値

表 8.3 土地被覆の約 25 年間の面積変化

表 8.4 土地被覆変化地点の平均 NDWI

第 9 章

表 9.1 本研究と先行研究による平均分類精度

表 9.2 本研究と先行研究による使用衛星データの年代

表 9.3 流出係数

表 9.4 土地利用メッシュマップの「市街地」と「森林」の分布域と読み替えメッシュマップでの一致率(%)

第 10 章

表 10.1 本研究で作成した全ての土地被覆分類図の概要

第 1 章

序論

1.1 はじめに

本研究はデジタル化空中写真に人工衛星が観測したリモートセンシングデータ(以後人工衛星データと略す)をコンポジット(Composite, 合成の意)した画像を自動分類することで、ローカルな研究対象地域での地表面環境の定量的な解析に資する高分解能な土地被覆分類図の自動作成法を構築し、その妥当性を地理学的な事例研究を通じて実証することで、市町村単位の狭小なスケールで問題とする地理学的課題解決に活用できる新たな地表面解析方法を確立することを目的とする。

本研究で焦点を当てる土地被覆分類図とは、地表を覆っている物体の属性に基づいた区分図で、地表を覆う物体をある定性的な観点から分類して定量化し、計量的な取り扱いを可能とするもので、一般的に人工衛星が観測した、可視光線と紫外線や赤外線などの不可視光線の波長帯の電磁波も記録されたマ

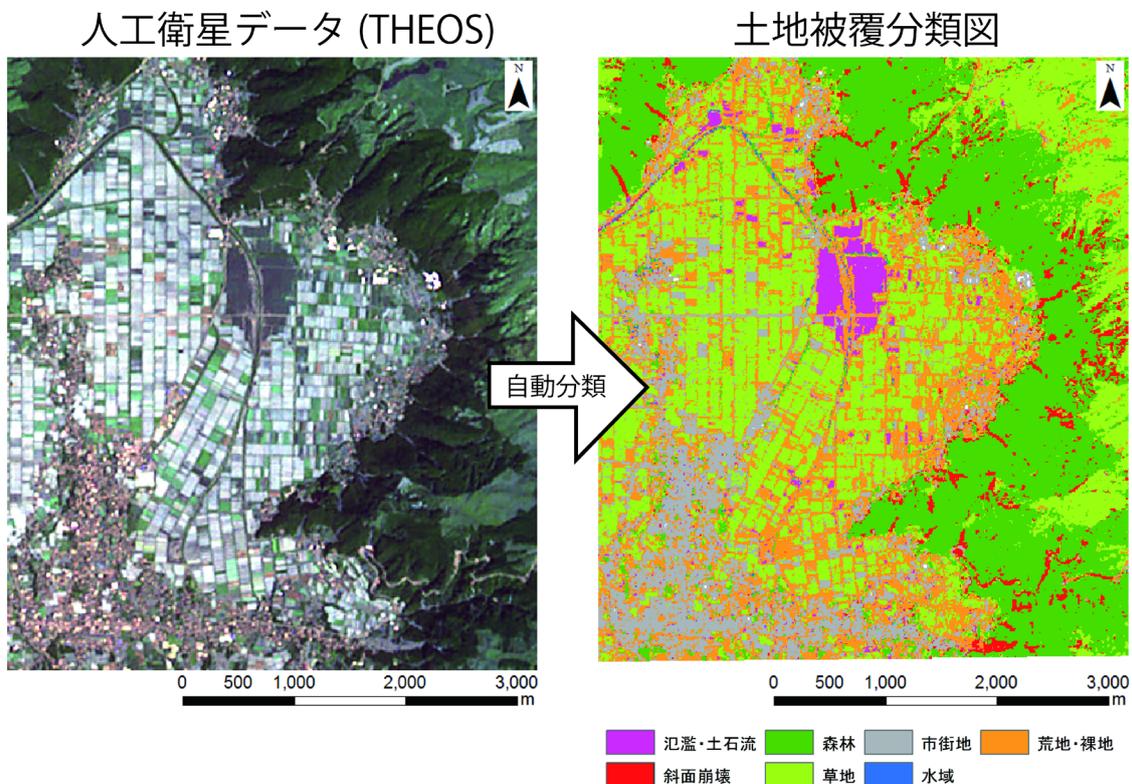


図 1.1 土地被覆分類の例(著者原図)

マルチスペクトルデータを用いた自動画像分類で作成される主題図である[1]。その応用の幅は広く、例えば植生調査、森林・農地管理、自然災害被害把握などに大きく貢献してきた。例えば図 1.1 は、タイが打ち上げた人工衛星「THEOS」のマルチスペクトルデータを利用して作成した土地被覆分類図である。これを現地調査の結果をもとに作成しようとした場合、膨大な時間と労力を必要とするが、リモートセンシングの技術を用いれば、短時間かつ踏査自体が困難である地点における土地被覆もあらかずことが可能となる。さらに、これはデジタル画像であるので、GIS ソフトを用いれば定量的な解析、例えばある分類項目における分布面積の計算や土地被覆の経年変化の追跡などが可能となる。本研究では、このような地表面環境解析に対して有効な手段となる土地被覆の自動分類を、昨今デジタル化が進む空中写真をマルチスペクトルデータとして作成しようとするものであり、デジタル化空中写真を人工衛星データでは困難な時空間に対応できる土地被覆分類図の作成を可能とするリモートセンシングデータとみなす。その根拠を以下より概説する。

人工衛星によるリモートセンシングの特徴として「広域性」がある。例えば、アメリカ航空宇宙局(NASA)が 1970 年代に打ち上げた人工衛星 LANDSAT は 1 度で 180km 四方を観測し、それを 1 シーンとして商品化され、我々の手に届く。そのため人工衛星によるリモートセンシングでは大陸・国家単位を包括するようなグローバルなスケールでの地表面解析に用いられており[1]、市町村単位のような、ローカルな地域を対象とする研究課題にはあまり利用されることがなかった。その理由として、地上分解能の問題があり、例えば先述した LANDSAT1 号のデータは一辺 80m の画素の集合体であることから[2]、80m 四方未満の地物は判読することができない。一方、地上分解能数十 cm のデータを提供できる人工衛星が登場し、空中写真と同じレベルで地物の判読が可能となったが、このようなデータは過去への遡及性が乏しく、例えば米国 DigitalGlobal 社が打ち上げた地上分解能 46cm の商業用高分解能衛星「World View 2」のデータ提供開始時期は 2009 年である[3]。これらに対しデジタル化空中写真が人工衛星データと比較して有利である点は、地上分解能の高さと過去への遡及性である。空中写真は 1970 年代年から国土交通省国土地理院発行のカラー撮影版が入手可能で、これは現在においてはデジタル化空中写真として提供されており、加えて 1/10,000 カラー空中写真の一部には 20cm の地上分解能が備わっている*1。以上より、デジタル化空中写真を用いれば、一般的に入手可能な人工衛星では作成が困難な、例えば 1m 未満の地上分

解能を備えた 1970 年代の土地被覆分類図が作成できるということになる。

ただし、空中写真は色調のみを表現するデータ画像であることから、同じ色調で異なる土地被覆の自動分類には適さない。そこで本研究では、色調以外の分類根拠として、人工衛星によって観測される、特に植物の活性度に関わる近赤外域データ画像や地形の起伏状況を表わすデジタル数値標高モデルを空中写真にコンポジットすることで、擬似的に人工衛星データで観測されるようなマルチスペクトルデータとし、これを GIS ソフトで自動分類することで、高地上分解能かつ高い過去への遡及性を持つ土地被覆分類図の作成法を確立する。その結果、市町村単位、ともすれば字単位で土地被覆の様相を精緻に議論する必要がある研究課題に対してリモートセンシング的手法の利用拡大が見込まれ、さらに地理学的な解析作業のデジタル化が進展する地理学界に対し新たな地理学的解析手法を提供する上でも意義深いと考えられる。

それでは次節より、人工衛星データによるリモートセンシングと空中写真によるリモートセンシングについての概要を説明した後、本研究手法の有利性を整理し、最後に本論文の目的と構成を述べる。

1.2 人工衛星データによるリモートセンシング

「リモートセンシング」とは直訳すれば遠隔(Remoto)・検知(Sensing)であり、「物体に関する情報を接触することなく集めること」で、地球表面と地球大気を上空から観測する手法として定義される[4]。その上空か

らの観測手段としては、気球、凧、ドローン、航空機、人工衛星などが挙げられるが、現代的なリモートセンシングは 1972 年に打ち上げられた LANDSAT1 号を契機として進展したとされ、今日単に「リモー

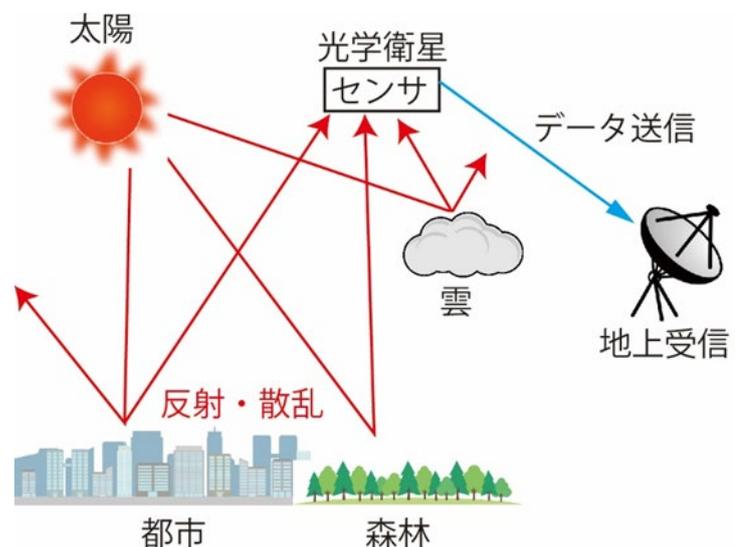


図 1.2 人工衛星による地球環境観測のモデル
(著者原図)

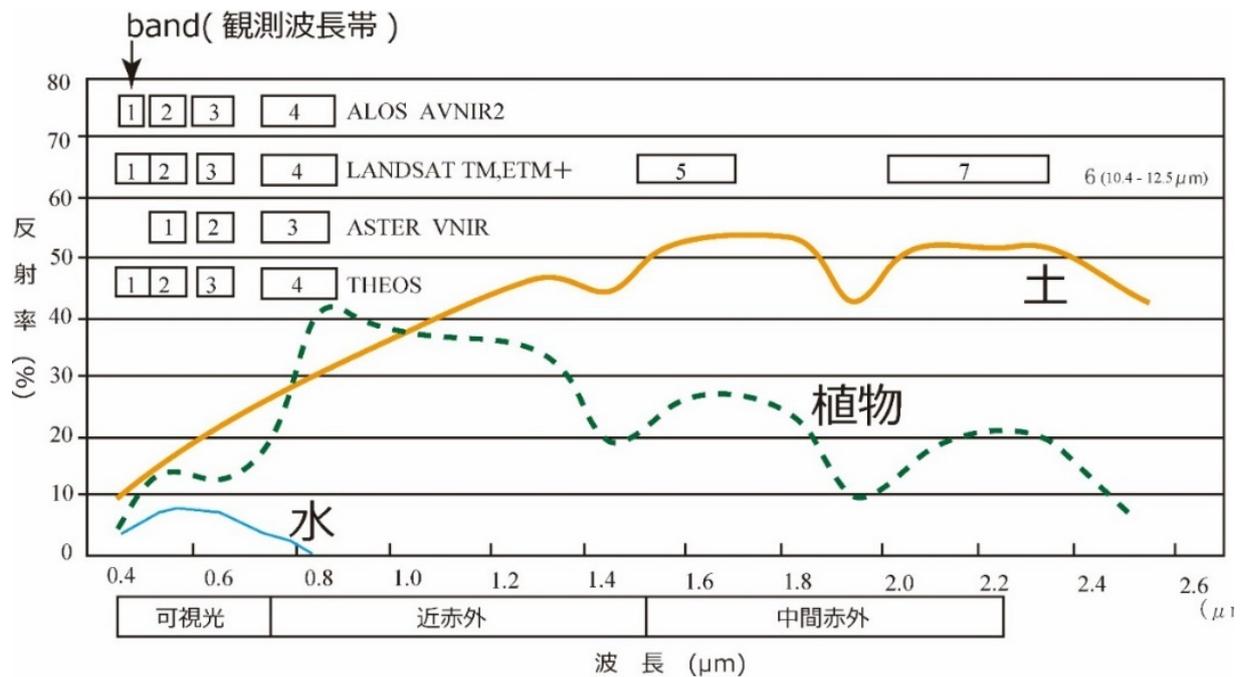


図 1.3 代表的な地物の反射率と本研究で使用する人工衛星データの観測波長帯
 空中写真は可視光の波長帯のデータ画像である(参考文献[1]より一部改変)

トセンシング」と言った場合「人工衛星による遠隔観測」を指すことが多い[1]。人工衛星に搭載されたマルチスペクトルセンサは、地球上の海域、植生、都市、雲などから反射したり、自ら放射したりする電磁波を観測し、それを数値データとして地上に送信する(図 1.2)。例えば LANDSAT の場合、可視領域の他に近赤外域の波長帯等の、さらに幅広い帯域の電磁波を観測することができる。このセンサで観測される近赤外域の波長帯データの値は無機物と植物で大きく値を異にし(図 1.3), さらに植物(クロロフィル)の活性状態を知る指標となるため[1], 人工衛星 LANDSAT1 号のデータが取得可能となった当初より、人工衛星によるリモートセンシングは土地被覆の自動分類に用いられてきた経緯がある。人工衛星データはラスタ型データで提供され、その画素 1 つ 1 つに地表からの反射率データが数値情報で格納されており、その数値を手掛かりとして地表面の土地被覆を自動分類することができる。例えば Marvin E. Bauer and Jan E. Cipra(1973)は、農業用地を観測した LANDSAT1 号のマルチスペクトルデータを自動分類し、とうもろこし、大豆、その他の領域に分類した[5]。また、村井ほか(1975)は土地被覆の実態を植物、水、無機物に分解して考えることで東京を中心とする首都圏の土地被覆分類を LANDSAT1 号のデータを用いて実施し、その際近赤外域の波長帯データの値が最も大きい区分を森林とし、無機物や水が含まれる牧草地やゴルフ場、畑などは段階的に値が小さくなると定義した[6]。LANDSAT1 号以降のマルチスペクトル

データも活発に土地被覆分類作成へと利用され、例えば後藤ほか(2003)では、1986年と1999年の二時期のLANDSATデータを用いて太宰府市における市街化の進展状況を定量的に把握したり[7]、Siqinbiligeほか(2015)では中国内モンゴル地区の緑地化の様子をLANDSATデータで作成した土地被覆分類図より明らかにしたりしている[8]。

以上より、土地被覆分類図の作成に際しては、可視領域の反射率データとともに、近赤外域のデータが重要であることが分かる。すなわち、可視領域のデータのみの中空写真に近赤外域の反射率データをコンポジットすれば、現実に即した土地被覆分類図の作成が可能であると考えられるが、このような試みは著者の事例以外、国内外通じてみられない。次節では、空中写真によるリモートセンシングについてその先行研究を概説し、次いで本研究が提唱する空中写真を用いた新たなリモートセンシング手法について解説する。

なお、以後本論文で単に「リモートセンシング的手法」と述べた場合、リモートセンシング分野で日常的に行われている、上記のような反射データを手掛かりに、地物を自動抽出ないし土地被覆を自動分類する手法のことを指すものとする。

1.3 空中写真を用いたリモートセンシング

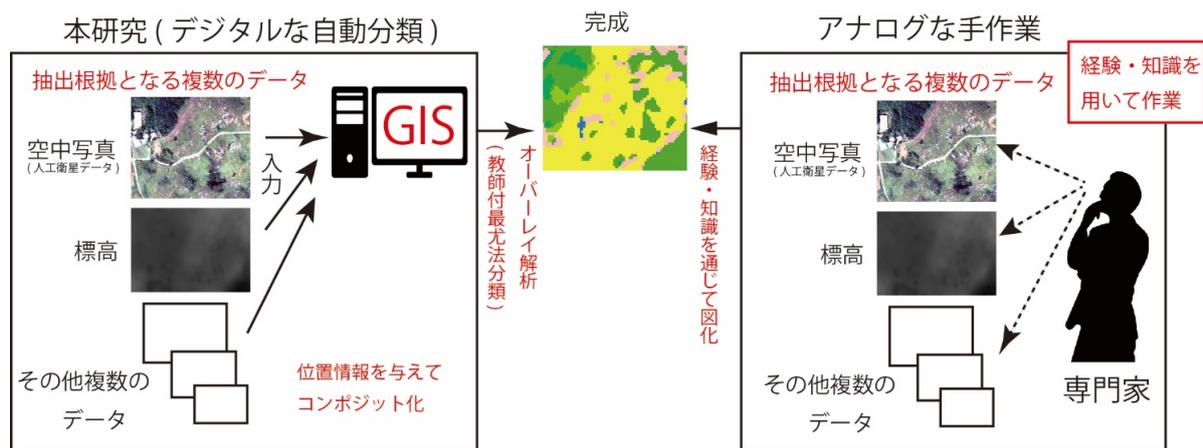
1.3.1 先行研究

航空機から観測(撮影)される空中写真も、座標情報を与えたラスター型データとすれば、人工衛星データと同じ取り扱いができるデジタル地理情報として見なせる可能性があるが、国内外問わず空中写真をリモートセンシング的手法により自動分類することで定量的な地表面環境解析に用いた事例は少ない。デジタル化空中写真は可視領域の反射率データ、R(Red:赤)、G(Green:緑)、B(Blue:青)それぞれ0~255段階の256階調の値で記録されており、それぞれの値は人工衛星データの可視領域の反射率データとほぼ一致し(図1.3)、例えばALOS AVNIR2であれば、観測波長帯のうち、band1がB、band2がG、band3がRに対応する。すなわち、空中写真もそれ自体が、人工衛星データと同様の画素単位の数値情報によって構成される地上分解能1m未満のデジタル地理データと見なすことができ、さらに位置情報もGISソフトやリモートセンシング解析ソフトで幾何補正を施すことにより与えることができる。したがって、例え

ば工場を構成する色調を抽出し、その総面積を計算したり、読み替えにより工場用地面積から二酸化炭素の排出量を計算したりと、従来リモートセンシングの分野で日常的に行われている解析作業がデジタル化された空中写真であれば可能である。例えば板谷(1998)は、森林を撮影した東西約 4km, 南北約 1.7km の範囲の 1/5,000 空中写真において、樹種によって RGB の階調に特徴があることを見出し、ケヤキやスギの群落を画像処理ソフトで抽出した[9]。また黒木(2007)は、約 1km 四方の 1/8,000 空中写真の範囲内の土砂災害地において、土砂が被覆する範囲を乾湿に分けて GIS ソフトにて自動抽出した[10]。これらの先行研究は地理学的な課題解決に対して空中写真の自動分類を行った希少な事例であるが、空中写真の可視領域のみのデータを使ったものであり、現実に即した分類図であるかどうかの議論の余地がありそうである。また、近年では Muditha K. Heenkenda ほか(2014)がオーストラリア北部のマングローブ林を空中写真の自動分類によりその樹種ごとに抽出し[11]、山本ほか(2017)が東京都市域を撮影した空中写真から緑地や住宅地の抽出を試みたが[12]、これら研究の主眼は、前者は空中写真と高解像度人工衛星データの分類精度の比較検討、後者は自動分類方法の検討を行ったものであり、地理学的な課題解決を行ったものではない。今現在「デジタル化空中写真」を「人工衛星データ」と同じように取り扱って環境解析しようとする気運は、前例の少なさから鑑みても、地理学界をはじめとして他の研究領域でも生まれていないように思われる。その理由は広範に存在すると思われるが、やはり空中写真はあくまで地表面の「色」のみによって地物が表現されている画像であり、これを機械的に自動分類した場合、属性の異なる地物であっても同じ色調の地物は同じ地物として分類されてしまう誤分類が多発することが挙げられるが、実体視判読など肉眼で見て確認するような、どちらかといえばアナログな使い方をされる空中写真をリモートセンシングデータとして取り扱って土地被覆分類図を作成しようとする発想自体がそもそもなかった可能性もある。

1.3.2 本研究における空中写真を用いたリモートセンシング手法

空中写真は元来より主に実体視判読に用いられてきたが、人工衛星データの利用形態としても、ディスプレイに表示される画像を人間（特に専門家）が目で「読み」判断を下す、言い換えれば、空中写真の代替画像としての利用が実際には広く使われているとされる[13]。例えば安田(2005)は Corona 衛星写真を実



例) ある地域を草原と樹林に分類しなさい。
 図 1.4 本研究が提案する分類方法と従来の方法の概念図
 (著者原図)

体視判読し長安西北部の黄河支流清河流域における唐代蕭關新城の位置や交通路を推定し[14], 三浦ほか(2010)は, 2008年中国四川地震で被害を受けた地域を対象として建物被害分布を把握するために, 地震前後に撮影されたALOSパンシャープン画像を利用して, 建物被害の目視判読を行った[15]。また, 八木ほか(2010)はパキスタンにおいて大規模地すべり事前把握のためにALOS PRISM画像を用いて実体視による地形分類を行い[16], 黒田ほか(2014)は, 地滑り跡地と干拓地における微地形を, ALOSパンシャープン画像を実体視判読することで抽出した[17]。このように, 作業者が目視により人工衛星リモートセンシングによるデータ画像を読むことで, 目的に応じて地物を分類・抽出するアナログな手法は現在でも地理学界をはじめ多分野間において広く行われている。ここで, 人工衛星データ画像や空中写真を「読む」とは, 作業者が画像の色調だけで表現される情報だけを単に「見る」ではなく, その背景や因果関係をも「読む」ことで総合判断を下すことを指す。したがって, GISソフトで自動的に抽出作業を行う際, 出力される結果に目的に応じた意味を持たせるためには, 作業者が分類に際して考慮する多種多様な「分類根拠」を, デジタル化空中写真をはじめとした「デジタル地理データ」として入力し, オーバーレイ解析(Overlay, 地理情報を重ね合わせて新たな知見を導き出す解析法)すればよい。このような「デジタル」な方法を用いれば, 専門家のいわゆる「主観」を排した客観的な結果を得られ, また, 専門性と経験に依存せず, 精度よく効率的な分類手法となりうる可能性が高い。このオーバーレイ解析は, リモートセンシングの分野では日常的に行われており, 先述したように一般に人工衛星データを用いた土地被覆の自動分

類では、可視領域の反射率データとともに近赤外域の反射率データが用いられ、例えばコンクリートでできた人工建造物と光合成を行っている植物とを自動分類する際には、特に植物の反射率が高くなる近赤外域の反射率データが重要となる。これは、可視領域の反射率データ、RGB の画像データだけでの自動分類では誤分類が頻発するので、同じ色調の地物を明瞭に区分できる根拠としての他のデータ、「近赤外域波長帯の反射率データ」画像を組み合わせた 4 画像でオーバーレイ解析した方が地表面の物理的な状態を反映した、現実に即した分類となるためである。

この考え方は地理学的解析手法にも応用できる。すなわち、デジタル化空中写真を用いて自動分類を行おうとする場合、その精度向上に寄与するデジタル地理データを収集し、これを GIS ソフトでコンポジットした画像を用いて自動分類すれば誤分類の少ない高精度な結果を得ることができる可能性が高い。具体的に言えば、「平野と斜面に建つ家屋をそれぞれ選択的に抽出したい」となれば、植物と人工物を分ける根拠となる空中写真や人工衛星による反射率データに、平野と斜面を分ける根拠である「傾斜量分布図」をコンポジットしてオーバーレイ解析すればよい(図 1.4)。詳細な研究方法は次章にて解説するが、この作業は、一般的な GIS ソフトであれば十分可能である。

1.4 本研究手法の有利性

本節では、本研究手法が人工衛星データを用いたリモートセンシングに対して有利な点を整理する。まず、解析用アプリケーションに GIS ソフトを採用する有利性を述べたあと、地上分解能の高さ、過去への遡及性の高さ、ノイズの少なさといった、空中写真の地理データとして優れている点を述べ、最後にコスト面での有利さを述べる。

1.4.1 アプリケーション

ある地域の人工衛星データから土地被覆分類図を自動分類で作成する場合、専門外の者はどう対処すればよいのか。人工衛星データの解析時にはデータの選定、幾何補正処理といった準備から、データを自動分類するための解析方法の選択、さらにはアプリケーションの操作など、リモートセンシングの知識と経験が不可欠である。

人工衛星データによるリモートセンシングはあくまでも地表面の電磁波反射と放射特性の数値データをよりどころとして判別解析しており、その研究環境としてハードウェアとソフトウェアの整備が必要であるため、主に各研究分野の情報処理部門で進展してきた[1]。例えば土木分野では人工衛星データから地震による建物全壊率をロジスティック近似および回帰判別分析を用いて定量解析したものや[18]、林学分野では人工衛星データから日本全域の葉面積指数マップを作成したものなどがあり[19]、枚挙にいとまがない。また、人工衛星データがもつ高い周期性を利用したモニタリング、例えば国土交通省国土地理院は陸域観測技術衛星「だいち2号」を利用し、活火山における地殻変動を常時監視なども行われている[20]。いずれにせよこれら解析作業は専門家によってパソコン上で、専用のアプリケーションを用いて行われる。さらに、作業内容によっては機械語を駆使したプログラミングや、数学の知識を用いた演算処理が必要な場合もある。例えば橋本(2013)は、人工衛星データによる自然災害状況把握作業における専門家の判断を軽減するための知識駆動型自動検出化システムを提案したが[21]、高度な情報処理技術の知識の素養が必要で、紙上作業のような手軽さはない。このように、高度な情報処理法の知識を有さない者が、人工衛星データ解析を行うことで新たな空間情報を導き出そうとしても、期待される結果を滞りなく出力するには相当の研鑽が必要となる。地理学界において本研究が提案しようとする新たなリモートセンシング技術を汎用化するためには、このテクニカルの問題をクリアする必要がある、一般的に普及している解析アプリケーションがあると有利である。

ここで、近年ではすでに人工衛星データを GIS ソフトで解析する例が見られ、建石(1985)も GIS ソフトが一般普及する以前より、情報収集の手段としての人工衛星及び航空機によるリモートセンシングと、空間解析の手段としての GIS の統合を予見しており[22]、最近では、例えば亀山ほか(2015)はベトナム北部において LANDSAT1 号のデータを GIS ソフトで自動分類し、養殖事業が開始される以前の 1973 年当時のマングローブ林を抽出し[23]、Matamy Simwanda and Yuji Murayama(2017)はザンビアの首都ルサカの土地利用状況の経年変化を、LANDSAT5 号及び 7 号のデータを GIS ソフトで自動分類することで明らかにした[24]。このように、人工衛星データを GIS ソフトで取り扱うことは現在ではそう珍しいことではなくなったと言えそうである。

さらにそのソフトウェアの入手も容易となり、近年では高度な地理学的空間解析が実現できる無償ないし安価な GIS ソフトも入手可能となった。例えば、オープンソース型の地理情報システム「QGIS」は無料でありながら有料の GIS ソフトに近い機能を備えており、機能の追加も無料のプラグインで行うことが出来る*2。また、高等学校地歴科の学習指導要領解説においても GIS を利用した学習は有効と記述され[25]、GIS 学士の資格も創設された[26]。GIS の概念を学び、そしてそのソフトを利活用できる環境は充実したと言える。

この GIS ソフトが有利な点は、あらかじめ必要な演算処理のプログラムが組み込まれているので、操作としては実施したい解析処理方法を選択し、インターフェイス上で指示される通りに作業すれば、結果が種々のデータ形式、例えば画像、テキスト、数値等で出力されるところにある。もちろんその精査が必須であるが、必要な処理演算式を機械語でプログラミングする必要は基本的にない。人工衛星データは地理座標を持ったデジタルデータなので、当然 GIS ソフトで表示、解析およびその結果の出力が可能である。さらに、作成された土地被覆分類図はラスタ型データのデジタル主題図として出力されるので、GIS ソフトを通じて計量的な解析はもちろんのこと、分類項目を読み替えることにより別の視点から地表面環境を論じたり、研究課題の目的に応じて新たな意味を持つ主題図へと変換したりすることができ、その応用の幅は大きい。

以上より、アプリケーションソフトとして GIS ソフトを採用することは、リモートセンシングの専門家でない者でも地理データを用いた定量的な解析作業が実行できる点で有利であると考えられる。

1.4.2 地上分解能

リモートセンシングの大きな特徴の一つに先述した「広域性」が挙げられる。例えば、アメリカ航空宇宙局(NASA)が打ち上げた LANDSAT によるデータは、1 シーンおよそ 180km 四方であり、これを国土交通省国土地理院発行の 1/20,000 空中写真(約 4km 四方)でまかなおうとするとおよそ 2,000 枚、1/10,000 空中写真(約 2km 四方)ではおよそ 8,000 枚が必要である。このようにリモートセンシングでは空中写真では対応が困難な大陸・国家単位を包括するようなグローバルなスケールでの地表面解析に用いられており[1]、空中写真で対応するようなスケールでの解析にはあまり用いられていない。LANDSAT に限らず一般

的にリモートセンシングは、国家規模での課題を解決する手法として様々な研究分野に活用されており、例えば最近では 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災直後において、発生翌日から人工衛星「だいち」にて観測が実施され、東日本における地殻変動の検出などが行われている[27]。

ここで、地理学的な課題、例えば分布や立地を明らかにしようとしたとき、まず適切なスケールを設定する必要がある。地理学が扱う空間スケールは市町村の字単位から大陸規模まで多岐にわたるが、浮田(1970)は稲作分布を例に以下の 5 段階に分けて地理学的解析におけるスケール感を示した[28]。

①日本全土を包括できる 1/50,000,000 縮尺の地図では、日本農業における稲作の普遍性・第一義性が強調される。いわゆる巨視的な視点に立った解釈となる。

②1/5,000,000 では平野と山地の土地利用上の極端なコントラストが協調され、平野の分布と稲作分布が一致することが読み解ける。

③1/500,000 では堆積平野の中でも沖積平野と洪積台地のコントラストが協調され、反当収量の地域差や機械化の進展状況などはこのスケールで読み解ける。

④1/50,000 では、段丘や扇状地などの細やかな地形と稲作の関係が読みとけ、また水田の他の土地利用への転換などが問題とできる。

⑤1/15,000 では、水田は 1 筆ずつ描き分けられ、各筆の所有・経営関係、農家屋敷から営田までの距離、農業用設備の整備状況、裏作や促成栽培の様子なども問題とできる。

まず、リモートセンシングが取り扱う「スケール」は、①～③が該当しそうである。長谷川(2001)も、リモートセンシング画像の肉眼判読で最適な縮尺と、意味のある縮尺の限界は、地上分解能約 30m の LANDSAT 画像で 1/100,000～1/300,000 程度であるとしている[1]。この「地上分解能」が、浮田(1970)による上記④、⑤のようなローカルなスケールでの地理学的課題に対して人工衛星データが選択できない障壁となっている。例えば、我々が一般に入手しうる 1/20,000 空中写真で「針葉樹」を目視判読で混交林から抽出ないし分類するとしよう。作業者は広葉樹との緑の色調や樹冠の様子の違いでこれを一本ずつ抽出できる。それは、空中写真の「地上分解能が高い」ことに由来する(図 1.5)。例えば国土交通省国土

地上分解能の違いの例 (両者とも同範囲)

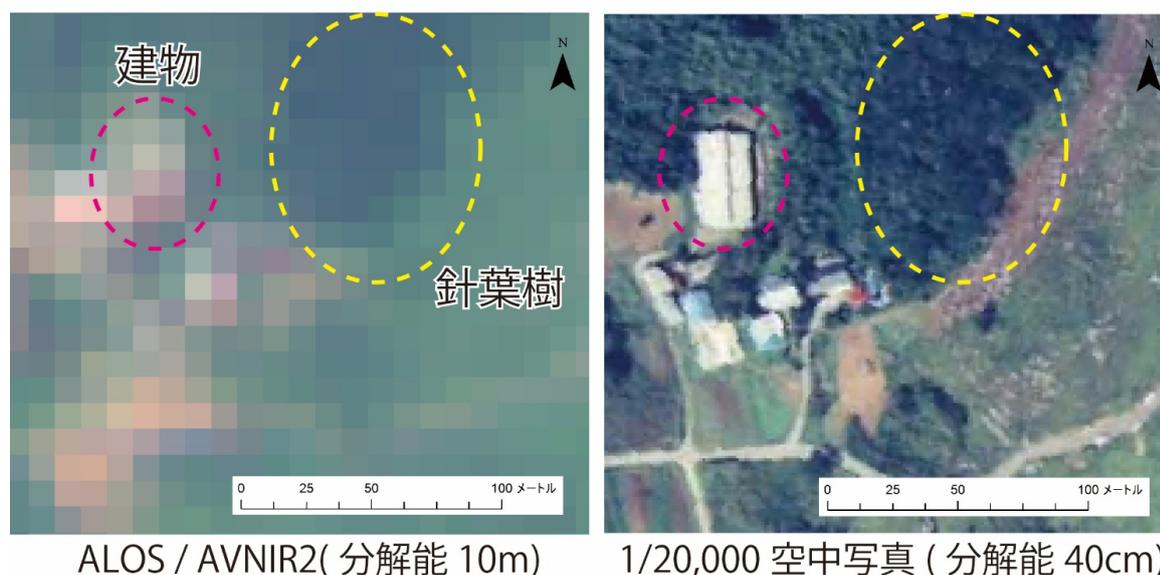


図 1.5 ALOS AVNIR2 と空中写真の地上分解能の違い
(著者原図)

地理院発行の 1/10,000 空中写真の一部には 20cm の地上分解能が備わっている*1。人工衛星データは画素の集合体で構成されるデータで、その画素一辺の大きさが地上分解能となり、「針葉樹」の抽出の例で言及するならば、LANDSAT 画像でのその抽出作業では非常に分類精度の悪い結果か、ともすれば抽出自体が不可能である。もちろんグローバルなスケールを問題とする場合の針葉樹「林」は分類できる。図 1.5 は地上分解能 10m(画素 1 辺が 10m)の人工衛星「だいち」による ALOS AVNIR2 データ画像での例であるが、リモートセンシング分野では比較的高地上分解能を持つこの人工衛星データでも針葉樹のみの抽出は困難で、空中写真同等の抽出精度は期待できない。

空中写真レベルの、数万分の 1~数千分の 1 スケールのローカルな研究対象範囲内で、精密に地物を分類・区分し議論する必要がある問題や課題はここで述べるまでもなく日常的に存在しているが、そのような課題を解決しようとする時、少なくとも 1 画素中に様々な地物が混在する可能性が高い LANDSAT 画像や ALOS AVNIR2 画像は選択できない。趙ほか(2013)は、近年のリモートセンシングの普及によって、ローカル・スケールからグローバル・スケールにわたる景観動態のモニタリングと抽出が可能となったが、研究対象のスケールに応じて適切な空間分解能を持つ人工衛星データの選択が必要であると言及し、地上分解能の異なるデータを用いて 1.5km×2km の狭い範囲内における土地被覆分類を行った結果、高解像度なデータほど精度の高い土地被覆分類図が作成できると実証している[29]。

以上より、精緻に地表面環境を精査する必要がある研究課題に対して空中写真は有利であると考えられ、土地被覆分類図作成に際しこれを能動的に選択できるようになれば、リモートセンシングが対象とできる空間スケールの幅が広がると考えられる。

1.4.3 過去への遡及性

今日では、地上分解能が空中写真に迫る人工衛星データが入手可能で、先に挙げた浮田(1970)の④、⑤に対応できるような人工衛星データが手に入るようになった。

しかし、このような高分解能人工衛星データは過去データに乏しいので、地表面環境の経年変化を解析する場合、World View 2 では 2009 年から 2018 年現在までの約 10 年、World View 3 では 2014 年から 2018 年現在までの約 5 年しかさかのぼることができない[3]。すなわち、十数年～数十年の時間スケールを取り扱う研究課題においては、このようなデータは選択できない。一般的に入手可能で、かつ過去の蓄積が最も多い人工衛星データは LANDSAT データである。これ用いれば、2018 年現在より約 40 年過去へさかのぼって地表面の解析が可能であるが、先述のように地上分解能の点で適応できる研究課題がグローバル・スケールのような限定的なものとなる。LANDSAT データと同程度の過去への遡及性があり、かつ高い地上分解能を持つ光学的観測データがあれば、地理学研究において対象とされることが多い先述した浮田(1970)における④、⑤のスケールでの地表面変化を高分解能かつ長期間で捉える上で有利である。

空中写真の過去への遡及性という観点からみた場合、1930 年代の旧陸軍が撮影した約 1/10,000 モノクロ空中写真があり、第二次世界大戦後であれば 1940 年代後半に米軍によって撮影された約 1/10,000～1/50,000 モノクロ空中写真がある。これらは一般財団法人日本地図センター^{*3}で購入が可能である。さらに 1970 年代年からは国土交通省国土地理院発行の空中写真にカラー撮影版が登場している。一般的に入手可能な、光学的に地物を上空から観測した媒体の中で、最も過去へ遡及するものは空中写真である。

以上より、高地上分解能かつ過去への遡及性が求められる土地被覆分類図の作成に対して空中写真は有利であり、リモートセンシングが対象とできる時間スケールの幅も広がると考えられる。

1.4.4 ノイズ

空中写真は基本的に人工衛星データに見られるマルチスペクトルセンサ特有の「ノイズ」が存在せず、その「除去」を行う必要がないため、解析作業を簡略化しつつ、現実を即した高精度・高地上分解能な土地被覆分類図の作成が可能であると考えられる。以下よりその根拠を述べる。

最近では、地上分解能 10m から数十 cm のマルチスペクトルセンサを搭載した人工衛星、例えば先述した World View 2 や World View 3 は、空中写真と同等の地上分解能を持つ[3]。高地上分解能の人工衛星データを用いた研究事例としては、福本ほか(2012)が World View 2 データを用いて土地被覆分類を行い、水田耕作地を一筆ずつ抽出している[30]。このように、空中写真に迫るような、地上分解能 1m 未満の地上分解能の人工衛星データを用いれば、「水田」のような、「土地利用」の把握に用いることが可能であるが、先の福本ほか(2012)の例では、土地被覆分類後にあらためて土地利用区分を目視判読で実施することで分類精度を高める方法が採用されており、自動分類された土地被覆分類図そのものには誤分類が見られ、高地上分解能であるから分類精度が高まるとは言えないようである。World View 2 データを用いた他の先行研究例として、松澤ほか(2011)は竹林の自動分類を試みたが、無加工の World View 2 データを用いた分類精度は 50~60%代に留まり[31]、高山ほか(2016)では福島第一原発の汚染水タンクの自動抽出を試みたが鋼製円筒タンクの分類精度は 77.8%に留まっている[32]。つまり、前者は本来竹林であるべき地域の 40~50%は竹林以外の地物に、後者も同様に 20%は鋼製円筒タンク以外の地物に自動分類されていることとなる。ここで、両者の例とも土地被覆分類法として「オブジェクト指向分類」が採用されており、いわゆる「地物の形状」に着目した方法を採用している。なお、リモートセンシング分野では、2つ以上の画素の集合体をオブジェクトと呼ぶ。高解像度な人工衛星データであればあるほど、いわゆる「ノイズ」の数も増えるため、画素ごとの自動分類方法よりも、形状ごとの自動分類を試みる例が最近では多いが、それでも誤分類を大幅に解消するには至っていない現状が垣間見える。この「ノイズ」であるが、人工衛星データには搭載されたマルチスペクトルセンサ固有の「スペckルノイズ」があるとされる[33]。これは散乱波同士の干渉により、同じ状態の地表面での受信強度が変動し、隣り合うピクセル間で強度が揺らぐ現象である。そのため、高地上分解能であるほど1シーンあたりの画素数も多くなるため、突出した値(=ノイズ)を持つ画素が多数混在することとなる。この問題は、地上分解能が 1m を切る人工衛星データが日本において商業用プロダクトとして一般入手できる前から指摘されていた[34]。

この「スペックルノイズ」を軽減し、現実に即した土地被覆分類を作成するには様々な方法があるが、その一つに意図的に解像度を低くして 1 画素中に様々な地物が存在する状態、いわゆるミクセル状態にする方法があり、例えば杉本ほか(2011)は、本来 10mの地上分解能を持つ ALOS PALSAR データを 50m に変換したものをを用いてセンサ固有のスペックルノイズを軽減し、建物面積の算出の高精度化を図った [33]。このスペックルノイズがほとんど存在せず、かつ高地上分解能なデータが空中写真であり、高分解能かつ高精度な土地被覆分類図を作成できることが見込まれる。もちろん印画紙をスキャンした過去の空中写真には品質の問題で傷などのノイズがあるが、基本的にセンサ特有のスペックルノイズは存在しないため、高地上分解能な人工衛星データのように意図的に地上分解能を低下させたり、オブジェクト分類を採ったりする必要はなく、高解像度な画像をそのまま用いて高精度な土地被覆分類図を作成できる可能性が高い。

以上より、空中写真は「ノイズ除去」という煩雑な手順を基本的には踏まなくてもよく、解析作業の簡略化を図れる点に有利さがある。

1.4.5 コスト

空中写真に迫る地上分解能を持つリモートセンシングデータを用いた地表面解析は、そのデータ購入に関してももちろんコストがかかる。2018 年現在、1/10,000 空中写真と同等の解像度を持つ先述の World View2 や World View3 の最小購入単位は、25km²あたり約 90,000 円で[35]、国土交通省国土地理院が発行し、日本地図センターで購入できる 20cm もしくは 40cm 解像度のデジタル化オルソ幾何補正済みのカラーデジタル空中写真の最小購入単位は、30 秒×30 秒区画(約 1,000m×約 750m)で約 3,000 円である[36]。さらに、地上分解能 1m 程度と、有償製品版のそれと比較すると多少落ちるが、国土交通省国土地理院の web サービス「地図・空中写真閲覧サービス」に公開されている空中写真は基本的に無償で利用できる [37]。

また、本研究では使用していないが、甚大な自然災害が発生すると、被災地域の空中写真が web 上で公開されることがあり、これも無償で研究に利用することができる場合が多い。例えば国土交通省国土地理院のホームページにおいては、平成 28(2016)年の熊本地震の被災状況を撮影した空中写真が、前震翌

日の平成 28 年 4 月 15 日より提供が開始された[38]。このように、現在においては高解像度な空中写真が安価ないし無償で入手できる時代で、このような傾向は今後拡充していく可能性が高い。

さらに、人工衛星データにおいても、LANDSAT データに関してはアメリカ地質調査所(USGS)の web サービス, Earth Explorer より無償で入手可能で[39], これを空中写真とコンポジットして自動分類を行えば, 地上分解能 1m 未満の土地被覆分類図が, とすれば無償で作成できる可能性が高い。

以上より本研究では, 空中写真を用いることで高分解能な土地被覆分類図作成に際しコストダウンを図ることができる点に意義を見出した。空中写真を用いる方がコスト面で有利であれば, 本研究手法の一層の普及が見込まれると考えられる。

1.5 本論文の目的

本研究は地上分解能が高く, なおかつ高い過去への遡及性を備えたデジタル化空中写真に, 人工衛星データや DEM データ等をコンポジットした画像を自動分類することで, ローカルな研究対象地域での地表面環境の定量的な解析に資する高分解能な土地被覆分類図の自動作成法を構築し, その妥当性を地理学的な事例研究を通じて実証することで, 市町村単位の狭小なスケールで問題とする地理学的課題解決に活用できる新たな地表面解析方法を確立することを目的とする。その検討内容を以下の 4 点にまとめる。

1)地理学分野で馴染み深い「空中写真」を, 普及著しい「GIS ソフト」を通じて「リモートセンシング的手法」を用いた自動分類により土地被覆分類図を作成する簡便な手法を構築する。

2)コンポジット空中写真から作成された地上分解能 1m かつローカルな範囲における土地被覆分類図の分類精度を検証し, 実用に耐えうる精度として妥当であるか, 各種地理学的な課題を通じて検討する。分類精度の検証には, 同地域における人工衛星データによる土地被覆分類図との比較のほか, 考察においては既存研究との分類精度の比較検討を行う。

3)USGS の web サービスより入手した無償の 1970 年代及び 1980 年代の LANDSAT データと空中写真のコンポジットデータから作成される地上分解能 1m の土地被覆分類図を作成し, 近年の高地上分解能を

持つ人工衛星データではなし得ない過去への遡及性の高さをもった地表面解析が可能であることを、各種地理学的な課題を通じて検討する。考察においては既存研究との過去への遡及性の比較検討を行う。

4)以上より、元来目視判読に用いられてきた空中写真は、地表面解析適用事例の幅を飛躍的に広げることができるリモートセンシングデータである、という新たな知見を地理学界に提供し、本研究が新規提案する手法が、地理学的な研究課題解決に対するリモートセンシング的手法の普及と浸透を担うことができることを示す。そのための研究事例として考察では、土地被覆分類図を他の意味を持つ主題図へと変換できる具体例を提示し、本研究手法の汎用性と応用性を明らかにする。

1.6 本論文の構成

本研究の全体的な構成の概要としては、第2章にて基本的な解析手法や利用した地理データを整理し、第3, 4, 5章で地理学的な研究における妥当性と有効性を示す。第6, 7, 8章では事例研究の蓄積を行って汎用性を示し、第9章では、本研究手法で作成された土地被覆分類図の分類精度を他の先行研究と比較検討、さらに過去への遡及性の高さや他の主題図への読み替えについて考察する。第10章では本研究の結果をまとめる。

本論文の各章の内容を以下に概説する。

第2章では、本研究に使用した空中写真や人工衛星データの主要諸元の解説、その処理方法の整理、採用した自動分類方法の説明や分類精度の評価方法等を詳説する。

第3章で事例としたのは2012年北部九州豪雨によって土砂災害被害を被った熊本県阿蘇市で、人工衛星データ THEOS と空中写真及び傾斜角分布図に変換した DEM データのコンポジット画像を用いて、山地斜面の斜面崩壊域と沖積低地の土砂堆積域の自動抽出を行う。この事例により、土地被覆分類図の高分解能化と、傾斜角分布図をコンポジットすることによる斜面崩壊地の高精度化を示し、本研究手法の妥当性を示す。

第4章では、カルスト台地平尾台で特徴的に見られるススキネザ草原を対象に、空中写真に ALOS AVNIR2 の band4(近赤外域の反射率データ)データ及び傾斜角分布図をコンポジットした画像を用いて草

原を自動分類し、現地調査におけるススキとネザサの分布傾向と作成された土地被覆分類図におけるその分布傾向が一致することを確認し、本手法の分類結果が現実にも即したものであることを示す。

第 5 章では、第 4 章で作成された土地被覆分類図を用いて、特にネザサの分布好適地を人工衛星データで作成した地表面環境指標(NDXI)とのオーバーレイ解析により明らかにする。さらに、実際の平尾台の地表面環境を反映した主題図となっているか、詳細な現地観測結果(グラントゥルース)で確認した。これにより本研究手法で作成される土地被覆分類図が、特に植生に着目した地表面解析に対して有効であることを示す。

第 6 章では本研究手法を用いた自然地理学的な事例研究の一つとして、大分県大分川近傍を研究対象にして、空中写真に ASTER VNIR2 データをコンポジットした画像を自動分類して土地被覆分類図の作成を行い、特に河川防災の観点に立って、河川近傍の微地形と土地被覆の関係をオーバーレイ解析によって明らかにする。

第 7 章では本研究手法を用いた自然地理学的な事例研究の一つとして、熊本県白川近傍を研究対象にして、約 30 年間土地被覆経年変化を抽出し、都市化の進展と 2012(平成 24)年の九州北部豪雨による浸水被害の関係を定量的に明らかにする。

第 8 章では本研究手法を用いた人文地理学的な事例研究の一つとして、ミクセル状態が頻発しやすい都市域での分類事例として、福岡市の福岡国際空港周辺の都市域を研究対象に、二時期(1980 年代と 2000 年代)の空中写真にそれぞれの年代に近い LANDSAT データの band4(近赤外域波長の反射率データ)データをコンポジットした画像を自動分類し、高分解能・高精度な土地被覆分類図作成を試み、さらに約 25 年間の都市域における土地被覆変化を定量的に明らかにする。

第 9 章では考察として、本研究手法における土地被覆分類図の分類精度と過去への遡及性を他の先行研究と比較することでその有利性・簡便性を示す。さらに、土地被覆分類図を流出係数分布図や土地利用図への変換例を示すことで、本研究で作成される分類図の応用性を示す。

第 10 章では本研究で得られた結果を述べる。

第 2 章

研究方法

2.1 本研究手法の概要

本節ではまず、本研究が提案する土地被覆分類図の基本的な手法をまとめる。

本研究の土地被覆分類図の作成法において必要な技術は「GIS ソフトの基本的な操作が行える」のみである。高度な情報処理の知識，機械語によるプログラミング，人工衛星データの解釈やその解析方法などの知識は基本的に必要としない。以下に本研究手法の全体的な流れを箇条書きで概括し，図 2.1 にフローチャートを示す。

①地理データに地理座標を与え，すべてのデータが位置のずれなく重なるように幾何補正を行う。デジタル化空中写真については，オルソ幾何補正を行う。

②必要に応じて地理データのセルサイズ(地上分解能)を調整する。また，分類精度向上のため，これも必要に応じて画像処理を行う。

③地理データを，位置情報を保ったまま組み合わせ(コンポジットバンド化)，教師付最尤法分類(オーバーレイ解析)により土地被覆分類を行う。

④分類精度判別表を用いて精度検証を行う。目視および精度判別表での分類精度が研究目的を満たすものであれば土地被覆分類図の完成とみなし，そうでなければ教師付最尤法分類から再度やりなおす。

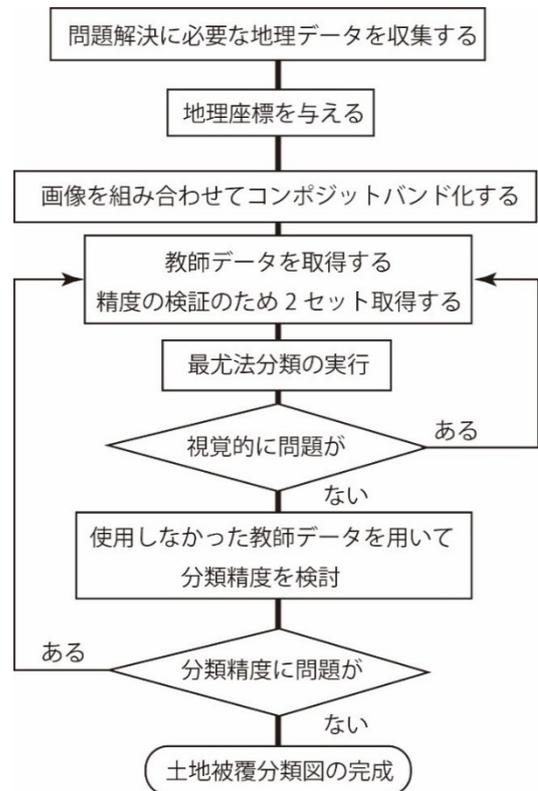


図 2.1 本研究手法のフローチャート

(著者原図)

⑤必要に応じて新たな空間情報を持つ主題図へ変換する。

以上である。次節より本研究で用いた主な地理データについて解説した後、フローチャートに沿って本研究手法を詳細に解説する。

2.2 本研究で用いたデジタル地理データ

本研究で用いた地理データは、空中写真、人工衛星データ、数値標高モデル(DEM)の3種である。これらを目的に応じて組み合わせることで、土地被覆分類図の高分解能・高精度化を実現する。以下に使用したこれら地理データの概要とその処理法を記す。

2.2.1 空中写真について

本研究での空中写真の主な役割は、可視領域の色調、RGBそれぞれ256階調の違いを地物の分類根拠とすることと、高地上分解能を活かした土地被覆分類図の高分解能化にある。

本研究で用いた空中写真はすべて国土交通省国土地理院が撮影した、一般に入手可能なもののみを使用した。第4章の空中写真のみスキャナーでスキャンしたものを使用し、その他はすべて最初からデジタル化されている国土交通省国土地理院がwebで発行している空中写真を用いた。地上分解能は1/10,000で20cm, 1/20,000で40cmである。なお、本章以降単に「空中写真」と言った場合、上記のようなデジタル化空中写真のことを指す。

航空カメラで撮影された空中写真は、レンズの中心に光束が集まる中心投影なので、レンズの中心から対象物までの距離の違いにより画像に歪みが生じているのでオルソ幾何補正を行う必要がある*1。この作業はGISソフトで行うことができる。本研究では、すべてこのオルソ幾何補正済みの空中写真を用いている。

使用する地理データはすべてずれなく重なり合う必要がある。人工衛星データとDEMに関しては地理座標(位置情報)がすでに与えられた状態の製品であるが、空中写真に関してはGISソフトで地理座標を与え、さらに位置合わせを行う必要がある。本研究では、地理座標については世界測地系(JGD2000)を用いた。JGD2000ではない地理データはGISソフトに実装されている「投影変換」機能を用いて変換した。

空中写真にまず JGD2000 の地理座標を与えたあと、すでに位置情報が与えられている人工衛星データに重なるように「ジオリファレンス」を用いて位置合わせを行う。ジオリファレンスは直訳すれば「参照」であり、すでに位置情報が与えられている画像データを参照として位置合わせを行う機能である(図 2.2)。なお、空中写真に緯度経度情報を直接与えていく方法もある。緯度経度の情報は国土交通省国土地理院の web サービス「地理院地図」等で取得することができる。

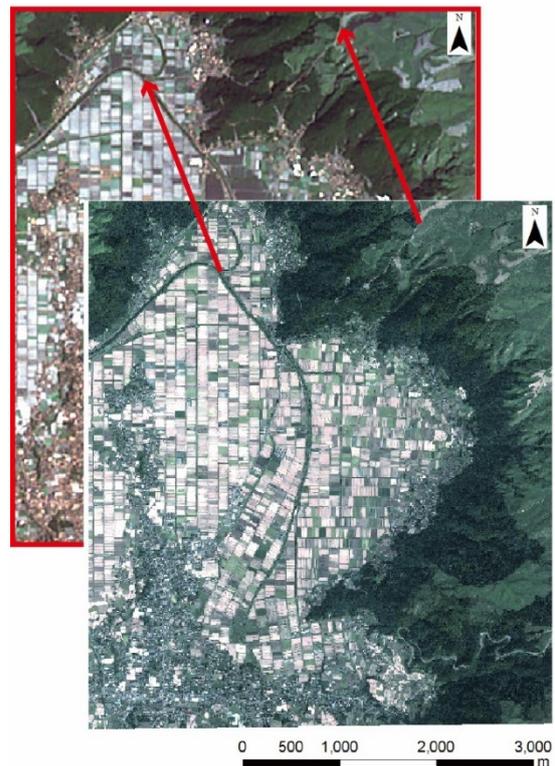


図 2.2 位置合わせ例 (下図赤枠内 THEOS 画像は地理情報を持っており、これを目標にして上図空中写真を位置合わせする(矢印の先端と末端は同地点))(著者原図)

2.2.2 人工衛星データについて

本研究での人工衛星データの主な役割は、不可視領域、特に近赤外域における反射率データを空中写真にコンポジットし、同じ色調で異なる物体を分ける分類根拠とすることで、作成される土地被覆分類図の誤分類を減らすことにある。以下に人工衛星データの概要を示す。

光の波長ごとの反射率を分光反射率と呼び、物質固有の反射率特性がある(図 1.2)。植生の場合その反射特性は可視域での反射が小さく、近赤外域で反射が大きい*2。この反射率データは例えば日本が打ち上げた「だいち ALOS AVNIR2」データでは地上で 10m 四方の測定値であり、10m 四方 1 画素の集合体で構成されているラスタ型データとして製品化されている(図 2.3)。

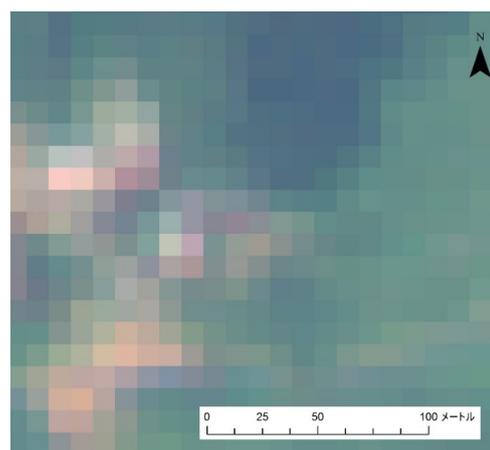


図 2.3 人工衛星データの画素集合体(ALOS AVNIR2, 画素(セルサイズ)一辺 10m)
(著者原図)

一般的に反射率データはパソコン上の色調にあわせた 256 階調の DN(Digital Number)値と呼ばれる整数値に変換されて製品化されている。なお、この DN 値は GIS ソフトで反射率(%)に変換可能であるが、本研究では DN 値をそのまま解析に用いる。その理由として、リモートセンシング分野では DN 値をそのまま解析に用いるのが一般的であり[1]、また DN 値の反射率(%)への変換が煩雑であること*3、そして異なる地物で同じ色調の土地被覆を自動分類する際の指標となればよいので、DN 値を反射率に変換する必要がないからである。

本研究では各章ごとに異なる種類の人工衛星データを空中写真にコンポジットした。以下、本研究で取り扱った人工衛星データについて概説する。表 2.1 に各衛星の主要諸元を記す。

表 2.1 本研究で使用した人工衛星とそのデータの概要(著者原図)

	THEOS	ALOS/AVNIR2	ASTER/VNIR	LANDSAT/MSS	LANDSAT/TM	LANDSAT/ETM+
打ち上げ日	2008/10/1	2006/1/24	1999/12/18	1978/3/5	1982/7/16	1999/4/15
運用終了日	運用中	2011/5/12	運用中	1983/3/31	1993/12/14	運用中
観測波長帯	B band1 0.45-0.52 μ m	band1 0.42-0.50 μ m		band4 0.50-0.60 μ m	band1 0.45-0.52 μ m	band1 0.45-0.52 μ m
	G band2 0.53-0.60 μ m	band2 0.52-0.60 μ m	band1 0.52-0.60 μ m	band5 0.60-0.70 μ m	band2 0.53-0.60 μ m	band2 0.53-0.60 μ m
	R band3 0.62-0.69 μ m	band3 0.61-0.69 μ m	band2 0.63-0.69 μ m	band6 0.70-0.80 μ m	band3 0.63-0.69 μ m	band3 0.63-0.69 μ m
	IR band4 0.77-0.90 μ m	band4 0.76-0.89 μ m	band3 0.76-0.86 μ m	band7 0.80-1.10 μ m	band4 0.76-0.90 μ m	band4 0.76-0.90 μ m
地上分解能	2m	10m	15m	80m	30m	30m

(1)THEOS

THEOS(Thailand Earth Observation Satellite)衛星はタイの地球観測衛星で、タイ王国タイ地理情報・宇宙技術開発機関の地球観測衛星である。2008年10月1日に打ち上げられた。THEOSデータの地上分解能はパンクロマティックで2mと高精度である。観測波長帯はband1からband4で、band1が可視波長のB(青)に対応し、同じくband2がG(緑)、band3がR(赤)、band4が近赤外域(IR: Infra Red)の反射率データである[2]。本研究では全てのbandを第3章にて空中写真にコンポジットした。

(2)ALOS AVNIR2

陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS, Advanced Land Observing Satellite)は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が開発した地球観測衛星である。2006年1月24日にH-IIAロケット8号機で打ち上げられた。運用終了の2011年5月12日まで650万シーンを撮影し、東日本大震災での緊急観測など災害観測活動による貢

献なども果たした[3]。だいちには PRISM (パングロマティック立体視センサ), AVNIR2 (高性能可視近赤外放射計 2 型), PALSAR (フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダー) の 3 つのセンサが搭載されており, 本研究ではこのうち AVNIR2 データを使用した。AVNIR2 データは可視光線から近赤外線までのマルチバンド (複数の波長帯) を, バンドごとに計測するマルチスペクトル (多波長) センサで, その地上分解能は 10m, 観測波長帯は band1 から band4 で, band1 が可視波長の B(青)に対応し, 同じく band2 が G(緑), band3 が R(赤), band4 が近赤外域(IR : Infra Red)の反射率データである[4]。本研究では, この band4 を第 4 章及び第 7 章にて空中写真にコンポジットした。

(3)ASTER VNIR

ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)は, 米国 NASA のテラ(Terra)衛星に搭載されている, 可視から熱赤外にわたるマルチバンド観測波長を持った日本の地球観測用センサである。1999 年 12 月 18 日に打ち上げられた。ASTER には可視近赤外放射計 (VNIR), 短波長赤外放射計 (SWIR), 熱赤外放射計 (TIR) の 3 つのセンサが搭載されており, 本研究ではこのうち VNIR データを使用した。ASTER VNIR の地上分解能は 15m, 観測波長帯は band1 から band3 で, band1 が可視波長の G(緑)に対応し, 同じく band2 が R(赤), band3 が近赤外域(IR : Infra Red)の反射率データである[5]。本研究では, この band3 を第 6 章にて空中写真にコンポジットした。

(4)LANDSAT MSS

本研究で用いた LANDSAT(Land Satellite) MSS データは, アメリカ合衆国が 1978 年 3 月 5 日に打ち上げた地球観測衛星, ランドサット計画の 3 機目の衛星である LANDSAT3 号に搭載された多重スペクトル走査放射計(MultiSpectral Scanner, MSS)センサによるデータである。LANDSAT MSS データの地上分解能は約 80m, 観測波長帯は band4 から band7 で, band4 が可視波長の B(青)に対応し, 同じく band5 が G(緑), band6 が R(赤), band7 が近赤外域(IR : Infra Red)の反射率データである[6]。本研究では, この band7 を第 7 章にて空中写真にコンポジットした。

(5)LANDSAT TM

LANDSAT TM データは、アメリカ合衆国が 1982 年 7 月 16 日に打ち上げた地球観測衛星、ランドサット計画の 4 機目の衛星である LANDSAT4 号に搭載されたセマティックマップパー(Thematic Mapper, TM) センサによるデータである。LANDSAT TM データの地上分解能は 30m, 観測波長帯は band1 から band4 で、band1 が可視波長の B(青)に対応し、同じく band2 が G(緑), band3 が R(赤), band4 が近赤外域(IR : Infra Red)の反射率データである[6]。本研究では、この band4 を第 8 章にて空中写真にコンポジットした。

(6)LANDSAT ETM+

LANDSAT ETM+データは、アメリカ合衆国が 1999 年 4 月 15 日に打ち上げた地球観測衛星、ランドサット計画の 7 機目の衛星である LANDSAT7 号に搭載されたセマティックマップパープラス(Enhanced Thematic Mapper, Plus, ETM+)センサによるデータである。LANDSAT ETM+データの地上分解能は 30m, 観測波長帯は band1 から band4 で、band1 が可視波長の B(青)に対応し、同じく band2 が G(緑), band3 が R(赤), band4 が近赤外域(IR : Infra Red)の反射率データである[6]。本研究では、この band4 を第 8 章にて空中写真にコンポジットした。

2.2.3 DEM データについて

DEM は、特に地物の分布特性が地形に左右される場合の分類根拠としての役割があり、空中写真にコンポジットすることで、作成される土地被覆分類図のさらなる高精度化を実現する。人工衛星データによる土地被覆分類の分類精度向上を目的として、標高値や傾斜角を分類の条件として補助的に利用する方法は長谷川(1998)によって示されている[1]。以下に DEM の概要を示す。

DEM は地形の起伏をデジタル表現したものである。本研究における DEM は標高値が格子状に配列されたラスタ型 DEM データのことを指す。等間隔の緯度と経度で区切った正方形メッシュのグリッドデータであり、これが細密になればなるほど高分解能なデータとなる。1997 年に国土交通省国土地理院の「数値地図 50m メッシュ (標高)」が CD-ROM で入手可能となって以降、DEM を用いた地形の解析が活発に行われているとされる[7]。

DEM を利用した地形解析を主とする研究は多くの分野で行われており、最近では航空レーザー測量により得られた 2m メッシュの DEM から地形縦断面図を作成し、活断層の推定を行ったものや[8], 同様の

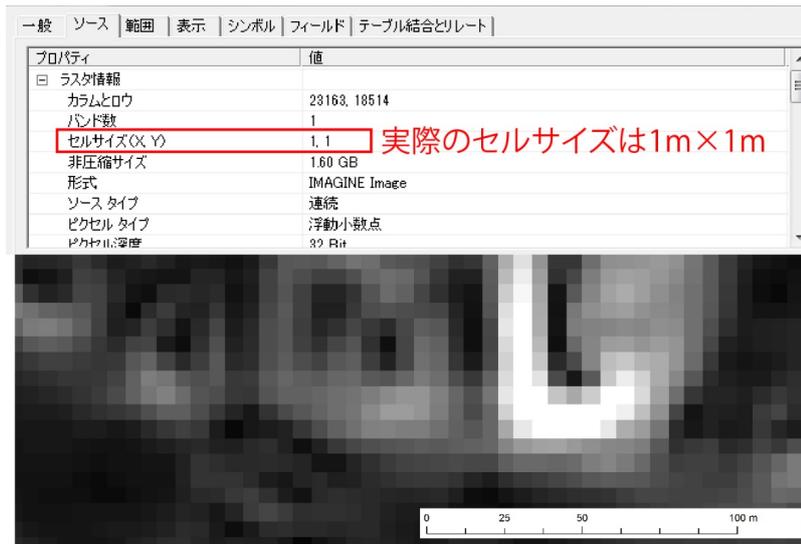
方法で得られた 2m メッシュの DEM から 2011 年東日本大震災時における津波遡上高分布図の作成を行ったものなどがある[9]。応用の幅が広く、上記に挙げたように自然災害科学や地形学において盛んに利用されているが、DEM は基本的に地形解析に用いられることがほとんどで、本研究で提案する方法のような、GIS ソフトで空中写真に DEM をコンポジットし、それを分類根拠に土地被覆分類図の作成に用いた事例は筆者らが報告した研究成果以外にほとんど見られない(例えば黒田ほか(2015)[10])。本研究では DEM を GIS ソフトで傾斜角分布図に変換*4し、第 3 章では平地の緩斜面と山地の急斜面とを分類するため、第 4 章では地形状況で異なる植生の分類根拠とするため空中写真とコンポジットした。

2.2.4 地理データの解析前処理について

解析に必要な地理データをコンポジットしオーバーレイ解析を行う前に、データの解析前処理を工夫するとより高精度・高分解能な土地被覆分類図が作成できる場合がある。特別な知識・技術を必要せず、一般的な GIS ソフトであれば実行可能である。なお、これらの処理は必須ではなく、研究課題により実施の検討を行う必要があるが、より高精度・高分解能な結果を求めるならば予察的に行った方がよい場合がある。以下に概要を記す。

(1)セルサイズの編集

本研究では GIS ソフトで取り扱うラスタ型データの最小単位、いわゆる画素のことを「セル」と呼び、そのセルに与えられている値を「セル値」、セルの大きさを「セルサイズ」と呼ぶ。セルサイズは広義では地上分解能と同じ意味を持つ。例えば LANDSAT TM データを無加工の状態にて GIS ソフトで展開すると、そのセルサイズはおよそ 30m に設定されている。すなわちこれは地上分解能そのものである。このようにオリジナルの地理データはそれぞれ固有のセルサイズを持っているが、コンポジットする際にはセルサイズを統一した方がよい。これは、「地上分解能を統一」するのではなく、「画素(セル)のサイズを統一する」ことを指す。図 2.4 にその例を示す。このセルサイズを統一した上で自動分類した方が、作成される土地被覆分類図が見た目もそうでないものより精度が良くなることが経験的に判明しており、統一しない場合、セルサイズは高分解能だが、地上分解能が低い最もセルサイズの大きい地理データの影響を受けてモザイク状の土地被覆分類図となってしまう(図 2.5)。ただし、地上分解能が 10m を超える



* 描画上は約5m×約5mのオリジナルセルサイズ

図 2.4 傾斜角分布図(オリジナルセルサイズ 5m を 1m への変換例)(著者原図)

1 辺が 15m の人工衛星データの影響を受ける

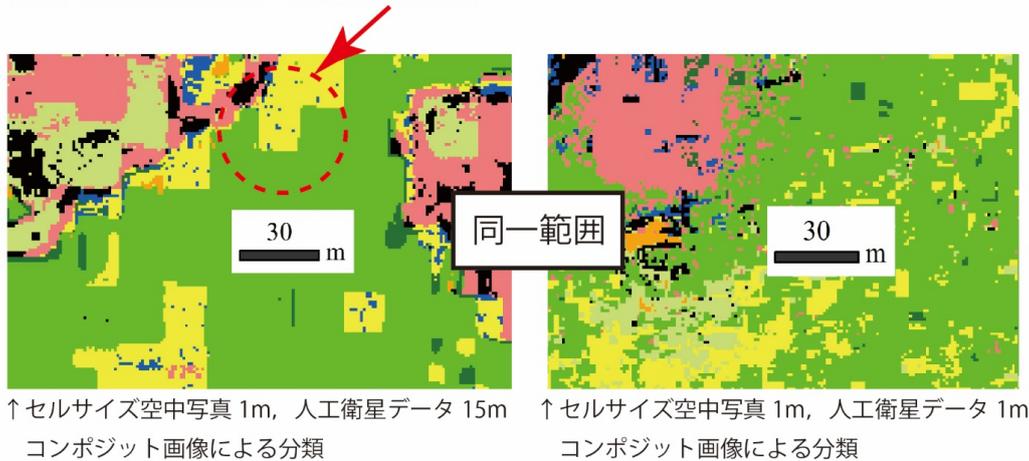


図 2.5 セルサイズの異なる画像をコンポジットした場合と、セルサイズを統一した場合の出来上りの違い(著者原図)

ような人工衛星データでは、セルサイズだけを細かくしても土地被覆分類結果がモザイク状になる現象が改善されない場合があるため、分類精度を高めるためのさらなる前処理を行う必要がある。なお、本研究では、空中写真にコンポジットした地理データはすべてセルサイズを 1m に統一した。

(2)フォーカル統計処理

地上分解能が 1m未満と高解像度な人工衛星データや空中写真は、画素の大きさが対象とする地物より小さくなるが多いため、自動分類を行った場合地物が断片的に判別され、微小な領域が発生してしまう salt and papper effect が存在するとされ[11]、誤分類となる領域がごま塩状に散在してしまう問題がある。この問題に対し Jorge Alejandro Butrón Guillén ほか(2015)は、人工衛星データ画像で表現される「色調」を単純化することで高解像度な土地被覆分類図を作成する手法を報告している[12]。これは人工衛星データの

の RGB および近赤外域の反

射率データの極値を取り除き、地物を構成する色調を単純化することで、土地被覆分類図の高精度化を実現したものである。ただし、この処理には機械語でのプログラミングを要するアメリカ合衆国の MathWorks 社の数値解析ソフトウェア MatLab を使用しているが、GIS ソフトで同様の処理ができると、分類精度向上に対し有利であると考えられる。そこで本研究では、GIS ソフトに実装されている「フォーカル統計処理」を用いた方法を提案する。その概念図を図 2.6 に示す。フォーカル統計処理は、任意に設

入力処理前ラスタ型データ

9	10	14	8	14
13	14	11	15	10
11	30	12	15	15
14	13	10	11	40
10	16	16	9	8

*数字はセル値

処理後

	14	15	12	

例)3×3 四方の平均値

斜め網掛け内: $(13+14+11+11+30+12+14+13+10) \div 9 \approx 14$

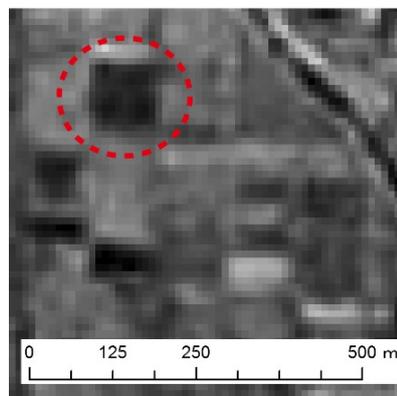
赤色内: $(14+11+15+30+12+15+13+10+11) \div 9 \approx 15$

青枠内: $(11+15+10+12+15+15+10+11+40) \div 9 \approx 12$

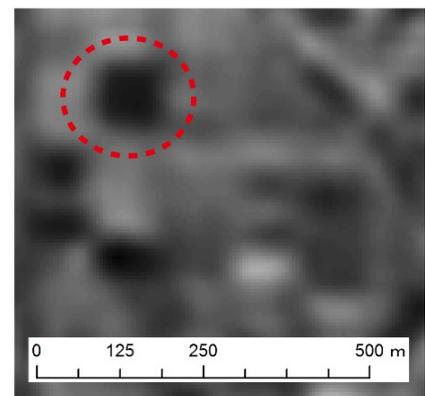
図 2.6 フォーカル統計処理の概念 (例のため処理後の数値は3つしかないが、実際はすべてのセルに統計計算結果が与えられる)(著者原図)

THEOSデータ(地上分解能2m)

処理前



処理後



*フォーカル統計処理すると、同じ地物のセル値がほぼ統一される
*ただし、地物の境界線が不明瞭になるので、目的に応じて使い分ける必要がある。

図 2.7 フォーカル統計処理の例(著者原図)

定される範囲内のセル値を統計計算する処理で、その範囲を1セルずつずらしながら解析範囲全体を処理する。計算結果は、範囲内のセル中央に出力される。本研究では「平均値」を求めた(図2.6)。この処理を行うと、出来上がりは土地被覆分類図ではあるが、土地利用図のような見た目となる場合がある。例えば、水田は季節にもよるが植生や土壌が交じり合った状態で存在するが、これらを構成するセルを平均化することにより極地が除去され、水田を構成するセル値がほぼ統一される(図2.7)。ただし、図2.7を見

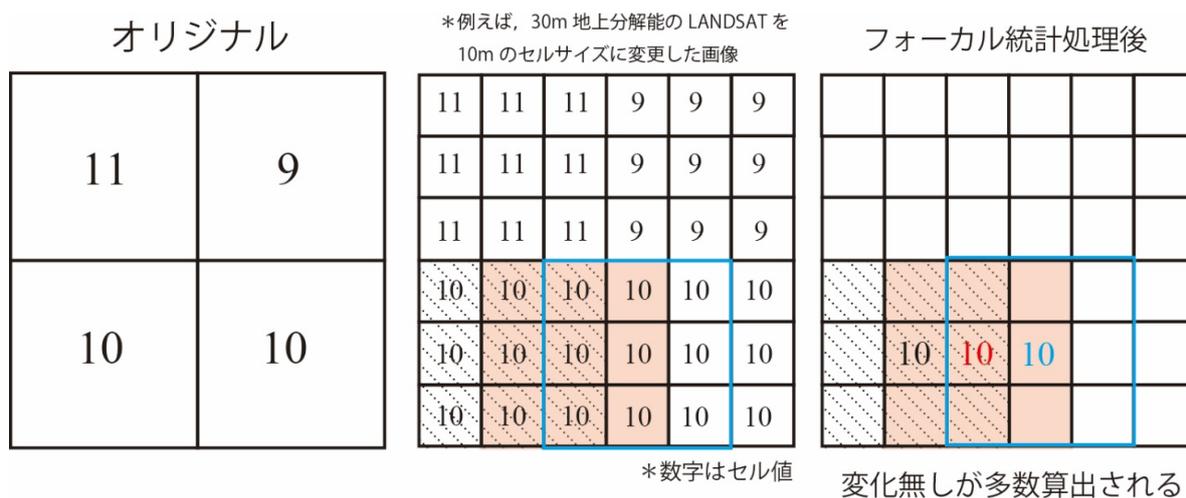


図 2.8 セルサイズが大きい人工衛星データの場合、期待する結果が得られない例

(フォーカル統計処理(平均値)の考え方については図 2.6 を参照)(著者原図)

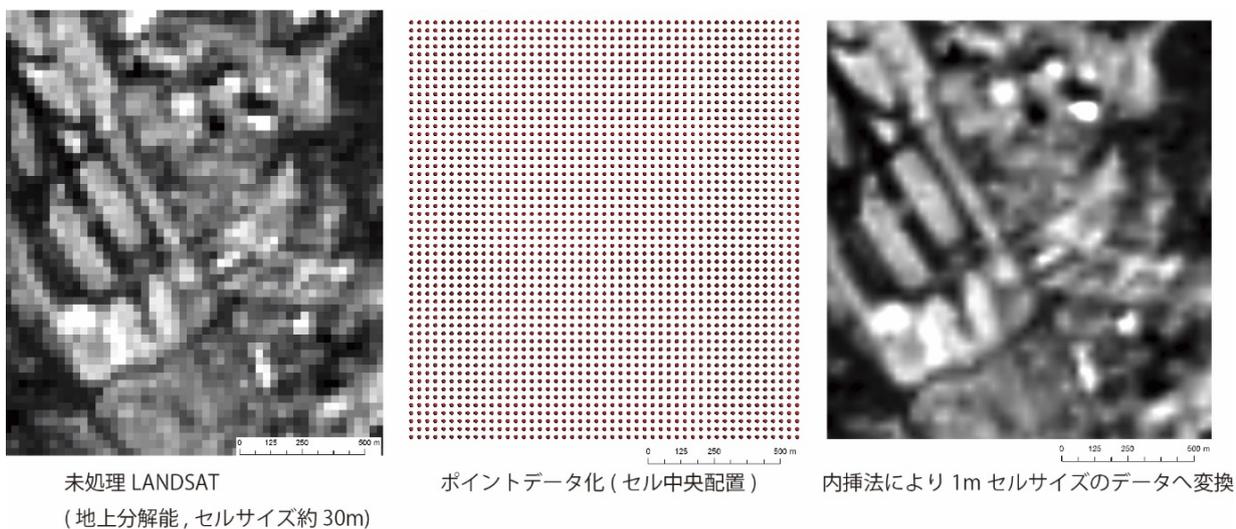


図 2.9 内挿法による人工衛星データ平均化の例(著者原図)

でも分かるように、地物境界が不明瞭になるので、研究の目的に応じて使い分ける必要がある。本研究では、THEOS データ(地上分解能 2m)を用いた第 3 章、ALOS AVNIR 2(地上分解能 10m)を用いた第 4 章にてこの処理を行った。

(3)内挿法による人工衛星データの平均化

LANDSAT データの場合、オリジナルのセルサイズ(地上分解能)が約 30m～約 80m と粗いので、フォーカル統計処理を行っても期待できる結果が得られない場合がある(図 2.8)。そこで、LANDSAT データをベクター型データのポイントに変換後、これを内挿法*5 でより細かいセルサイズのラスター型データへ変換すると、疑似的に地上分解能が高いデータへと変換でき(図 2.9)、図 2.5 で見られるような土地被覆分類がモザイク状になる状況を大幅に改善できる。本研究では LANDSAT データを用いた第 8 章にてこの処理を行った。

2.3 土地被覆分類方法と分類精度の評価方法

2.3.1 教師付き最尤法分類

地理データの位置あわせと、目的に応じた画像の前処理が完了したら、画像データを GIS ソフトのコンポジット機能を用いて画像をマルチバンド化する。これで地理データの準備は終了し、画像間オーバーレイ解析による自動分類での土地被覆分類図作成を行う。以下よりその概要を述べる。

作業者が目視判読により土地利用であれ土地被覆であれ空中写真を用いて分類しようとするとき、その基準となるのは「色」、「形」、「模様」に大別できるであろう。最近では先述した salt and pepper effect 抑制のために、「オブジェクト分類」とよばれる「形」に着目して土地被覆分類を行うものが最近では多く報告されているが[10]、オブジェクト指向分類を実装するソフトウェアはプログラミングなどの高度な専門知識を要するため、地理学的課題に対するリモートセンシング利用の汎用化という本研究の目的に沿わない。

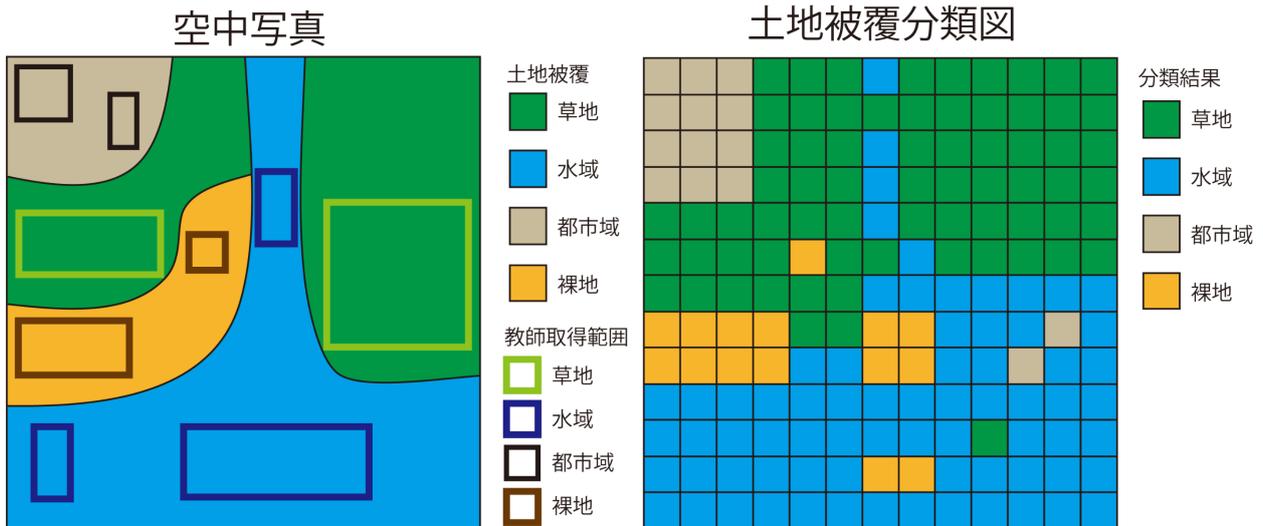


図 2.10 最尤法分類のモデル(著者原図)

そこで本研究では、我々が入手しうる GIS ソフトに一般的に搭載されている機能「教師付最尤法分類」による土地被覆分類を採用する。図 2.10 にそのモデルを示す。これは面積的には対象地域の中のごく少数を占めるトレーニングエリア(教師)の統計量を基にして、対象地域全域の分類を行う方法で、各分類クラス(項目)において選定したトレーニングデータ(教師)から画素データの尤度



教師をポリゴンで取得

図 2.11 教師取得の例(著者原図)

*6 を求め、尤度最大の分類クラスにその画素を分類する。この最尤法分類は、リモートセンシング分野で最も利用されている分類法で[1], JAXA(宇宙航空研究開発機構)が web 上で無償配布している陸域観測技術衛星「だいち」による土地被覆分類図も最尤法分類により作成されている*7。

教師の取得方法は 1 セルごとに取得する方法と複数セルをまとめてエリアで取得する方法があるが、本研究では後者の方法を採用した(図 2.11)。エリア取得する方法はベクター型データの一つ、「ポリゴン」

形式で行う。まず、ポリゴンを新規作成し、JGD2000の座標系を与える。次に、研究目的にかなう分類項目(クラス)を設定し、目視による空中写真判読や現地調査での結果を加味しつつ、同じ地物で構成される分類クラスをポリゴンで取得する(図 2.11)。

土地被覆分類図作成の過程において、教師の取得は重要な位置を占める。教師データが多ければ直接的に精度向上に寄与するとは言えないことが指摘されており[13]、研究の目的と合致する分類精度を達成するためには、教師の取得→最尤法分類→分類精度の検証、を繰り返す必要がある。なお、後述するが教師は最尤法分類用と精度検証用の2セット準備する必要がある。

2.3.2 土地被覆分類図の分類精度

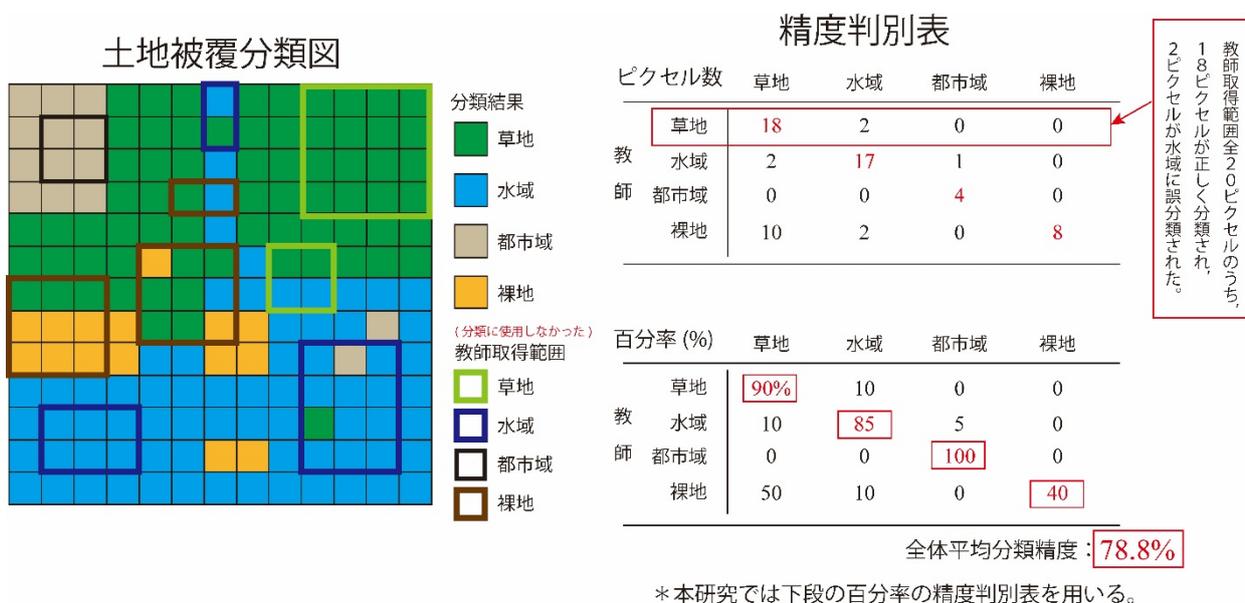


図 2.12 精度検証のモデル(著者原図)

本研究では作成したすべての土地被覆分類図について、分類精度判別表を用いて定量的に精度評価を行った。その概念を図 2.12 に示す。先述した最尤法分類に使用しなかった精度検証用の教師データを作成された土地被覆分類図に重ねあわせ、その教師データ内の分類結果のピクセル(セル)数を GIS ソフトの「クロス集計機能」で数え、正しく分類されている面積の割合(%)を算出することで評価する[1]。この方法を用いた最近の既往研究の例を挙げると、地上分解能 2.5m の Quick Bird データを用いた湿田及び森林地域の土地被覆分類を行ったもので全分類項目の平均分類精度が 77.23%[14]などがあるが、分類精度何%を持って高精度とみなすかは議論が多い(例えば趙ほか(2013)[14]；児島ほか(1999)[15]など)。なお、先述

の JAXA(宇宙航空研究開発機構)による地上分解能 10m の ALOS AVNIR2 を用いた土地被覆分類図では、その平均分類精度は 76.9%である[16]。本研究手法で作成した土地被覆分類図の総合的な精度評価は考察にて詳説するが、実用に耐える分類精度は、例えば John R.Thomlinson ら(1999)は総合精度で最低 85%、かつクラス毎の精度で最低 70%という基準を設けているが[17]、これはあくまでグローバルスケールな土地被覆分類に主眼を置いたもので、通常は全ての分類項目で 80%程度以上の判別効率が得られれば、その成果を採用することが多いとされる[18]。よって、本研究でもその考えに従う。

第3章

本研究手法を用いた解析事例

～2012(平成24)年北部九州豪雨災害地を例に

3.1 はじめに

本章では前章で示した研究方法を用いた地表面解析の一例として、2012年の北部九州豪雨で自然災害を受けた熊本県阿蘇市を対象として(図3.1)、沖積低地における河川氾濫域と斜面崩壊域の抽出を、コンポジット空中写真の最尤法分類を用いて行い、さらにその抽出精度の検討を行う。

研究対象とする範囲は南北約5.4km×東西約4.7km(図3.2)で、地上分解能20cmの1/10,000空中写真(図3.2)にコンポジットする人工衛星データは地上分解能2mのTHEOSデータ(図3.3)、作成する土地被覆分類図の解像度は1mとする。

本邦は温暖湿潤かつ変動帯に位置するため、河川氾濫による洪水被害や山地斜面崩壊等による土砂災害被害が頻発する。人工衛星データを利用した被災地域の抽出は、人工衛星によるマルチスペクトルデータを用いた土地被覆分類図の作成により行われることが多いが、大雨時の斜面地における崩壊域と低平地における河川氾濫域は湿潤な土砂という同様な物性であることが多い上に、色調もよく似ているため、これら二つを分類するには最終的に専門家の目に頼る必要がある。土地被覆分類図の作成は、先に現地調査を行って現地地表面の様子を確認し教師を得た上で実施する方が好ましいが、自然災害時には緊急性が求められる場合が多く、まずは人工衛星データや空中写真を得てから即時解析を行うことが望ましいと考えられる。近年では、甚大な自然災害が発生すると、数日中には空中写真が撮影され、それはweb上で無償入手できることが多くなってきた。本研究手法を用いれば、災害直後に現場入りせずとも高精度かつ高分解能な災害被災範囲の抽出を行うことが可能で、初動現地調査において有効な主題図を提供できる可能性が高い。

なお、本章は著者らによる学会発表[1]にて報告したものを骨子としている。

3.2 本章の目的

本章では、豪雨災害地に対応する土地被覆分類図の作成を通じて、コンポジット空中写真による最尤法分類手法の提示と分類精度の検討を行う。本章の目的を以下にまとめる。

数 km 四方のローカルな範囲における解像度 1m の土地被覆分類図の作成方法を示し、これが解像度 2m の人工衛星データ THEOS を用いたものより高分解能・高精度であることを示す。本章では特に、沖積低地における河川氾濫域と山地斜面地における土砂災害地を精度よく選択的に抽出できる手法として、コンポジット空中写真に DEM データを合成した画像による最尤法分類方法を示す。また、土地被覆分類図の誤分類と salt and pepper effect の抑制を目的として、THEOS データにフォーカル統計処理を施したデータを空中写真にコンポジットしたデータを用いて最尤法分類を行い、その効果を確認する。

3.3 研究方法

3.3.1 研究対象地域概観

研究対象範囲としたのは、2012年7月11日から14日までの九州北部豪雨にて河川氾濫被害(写真3.1)と斜面崩壊(写真3.2)とが生じた阿蘇カルデラ内に位置する阿蘇市の沖積低地とカルデラ壁斜面である(図



写真 3.1 河川氾濫による土砂堆積の様子
(2013年2月16日著者撮影)



写真 3.2 斜面崩壊地の様子
(2013年2月16日著者撮影)

3.1, 図 3.2)。

阿蘇市の事例においては空中写真に人工衛星データ及び傾斜角分布図をコンポジットした画像を用いて、河川氾濫と土石流による沖積低地上の土砂堆積範囲と山地斜面崩壊域を抽出する。なお、現地において2013年2月16日に現地調査を行い、河川氾濫域や斜面崩壊地の観察を行い、これを教師とした。



図 3.1 解析範囲 (背景図は google map を使用)(参考文献[1]より)

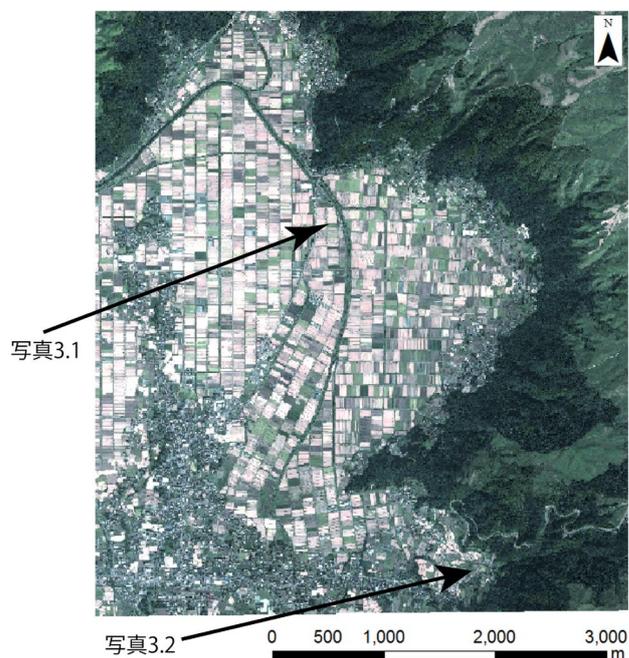


図 3.2 解析範囲空中写真(2011年10月9日撮影)及び写真3.1, 写真3.2の位置
(参考文献[1]より一部改変)

3.3.2 阿蘇市の事例で用いた地理データ

解析に用いた人工衛星データは2012(平成 24)年九州北部豪雨災害後の2012年10月8日観測のTHEOS(地上分解能 2m)である(図 3.3)。これに、国土交通省国土地理院発行の、災害前の1/10,000 空中写真(2011年10月9日撮影, 地上分解能 20cm ; 図 3.2)と DEM から作成した傾斜角分布図(図 3.4)をコンポジットした。本章で用いた地理データの主要諸元を表 3.1 に示す。

本章では災害前の空中写真を意図的に利用し、災害後の THEOS データの反射率との違いで抽出精度を向上させる。例えば、災害前の空

中写真に写る沖積低地の多くは耕作地による植生や裸地などが被覆するが(図 3.2), 災害後の THEOS データの土砂堆積域はこれらを覆いほぼ単色となる(図 3.3)。この色調の変化を利用した教師付最尤法分類を行い、土砂災害地とそうではない地域を明確に抽出する。このように二時期の異なる反射率を利用したリモートセンシングは既に用いられており、例えば小熊ほか(1996)では、二時期の LANDSAT MSS データをコンポジットし、最尤法分類による湿原植生群落の分類精度の向上を試み[2], 松岡(2002)は地震倒壊家屋に照射された人工衛星によるマイクロ波は多方向散乱の影響により、人工衛星に反射して戻る成分が、倒壊していない家屋に比べて小さくなることを利用して、地震前後の人工衛星データを用いて倒壊家屋の抽出を行っている[3]。



図 3.3 THEOS(トゥルーカラー表示, 2012年10月8日観測)
(赤枠内は大規模な土砂堆積域)(参考文献[1]より一部改変)

表 3.1 コンポジットしたデジタル地理データの主要諸元(著者原図)

諸 元				
	撮影(観測)年月日	地上分解能	GISでのセルサイズ	備考
空中写真	2011年10月	20cm	1m	-
THEOS	2012年10月8日	2m	1m	土地被覆分類図には全bandを使用
傾斜角分布図	-	-	1m	5mメッシュDEMから作成

さらに、沖積低地の土砂堆積範囲と斜面崩壊地を高精度に分類するための根拠として、傾斜角分布図をコンポジットする。DEM から作成したセルサイズ 1m の傾斜角度分布図を GIS ソフトで作成した(図 3.4)。

阿蘇市の事例で作成した教師付最尤法分類による土地被覆分類図をまとめると、未処理 THEOS を用いたもの(図 3.5①)と、未処理 THEOS+空中写真(図 3.5②)、未処理 THEOS+傾斜(図 3.5③)、未処理 THEOS+空中写真+傾斜(図 3.5④)の計 4 図、フォー

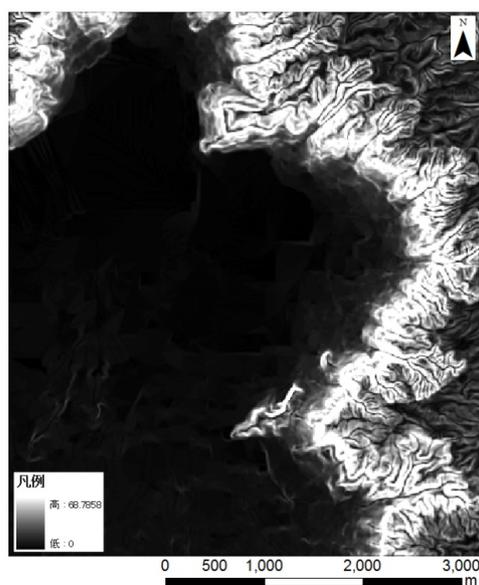


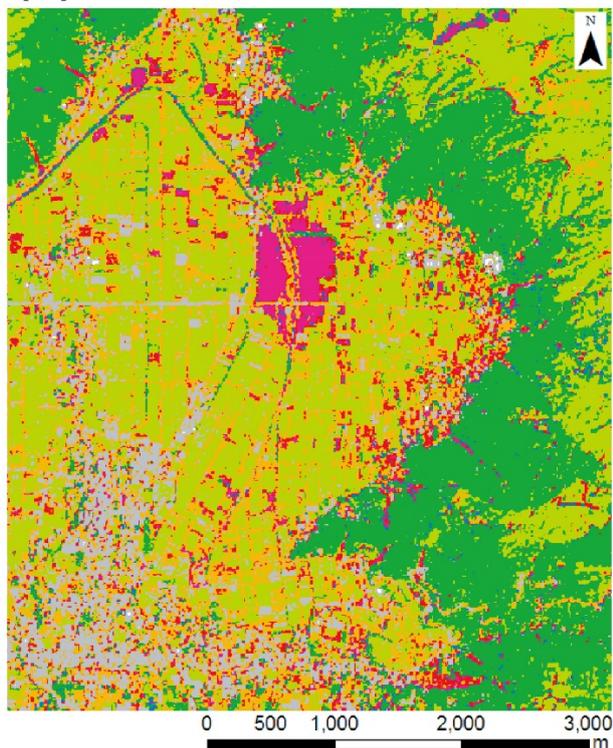
図 3.4 DEM による傾斜角分布図(著者原図)

カル統計処理済 THEOS 画像を用いたもの(図 3.6①)と、処理済 THEOS+空中写真(図 3.6②)、処理済 THEOS+傾斜(図 3.6③)、処理済 THEOS+空中写真+傾斜(図 3.6④)の計 4 図、合計 8 図である。セルサイズはすべて 1m とした。阿蘇市の事例では、THEOS データ画像と現地調査を手掛かりに、(沖積低地における)土砂堆積域、(カルデラ壁における)斜面崩壊地、森林、市街地、荒地・裸地、草地、水域の 7 分類として教師を取得した。なお、すべての土地被覆分類図で同じ教師データを使用し、精度検証用の追加教師データセットも準備した。

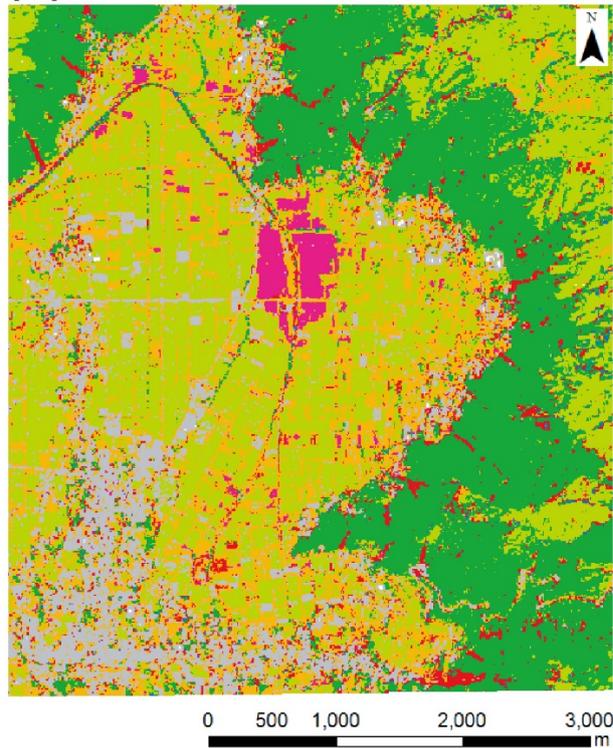
3.4 分類精度の検証

土地被覆分類図を図 3.5 と図 3.6 に、各画像の精度判別表を表 3.2 と表 3.3 に、土地被覆分類図作成

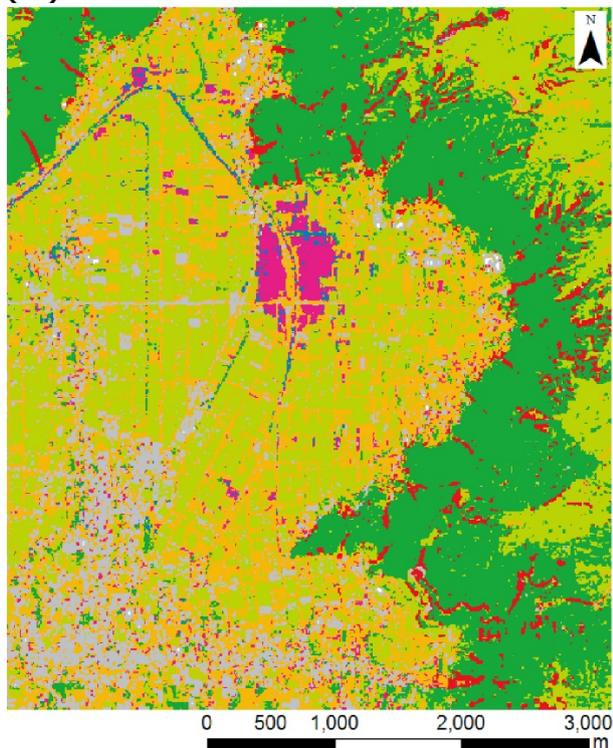
(1)未処理THEOSのみ



(2)同THEOS+空中写真



(3)同THEOS+傾斜



(4)同THEOS+空中写真+傾斜

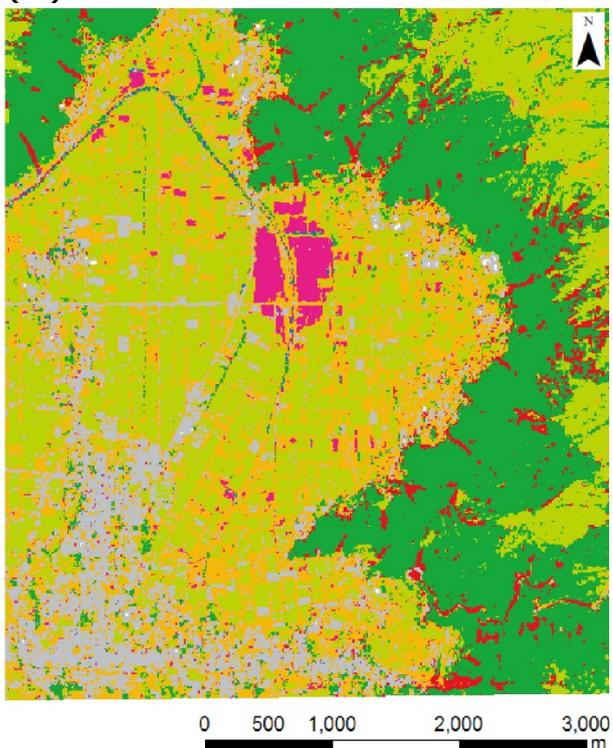


図 3.5 土地被覆分類図(未処理 THEOS ベース)(参考文献[1]より一部改変)

表 3.2 未処理 THEOS ベースの土地被覆分類図の分類精度(%) (参考文献[1]より)

(1)未処理THEOSのみ

	土砂堆積	斜面崩壊	森林	草地	市街地	水域	荒地	
土砂堆積	83.9	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	
斜面崩壊	18.1	13.8	0.0	33.0	0.0	0.0	35.1	
森林	0.0	0.0	81.8	17.0	0.0	1.1	0.0	
草地	0.0	1.7	0.0	95.4	2.5	0.0	0.4	
市街地	1.0	1.0	0.0	3.0	57.6	1.0	36.4	
水域	4.8	0.0	23.8	42.9	0.0	28.6	0.0	
荒地	5.2	5.2	0.0	59.4	5.2	0.0	24.9	
							平均精度	55.1

(2)同THEOS+空中写真

	土砂堆積	斜面崩壊	森林	草地	市街地	水域	荒地	
土砂堆積	93.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9	
斜面崩壊	21.3	57.4	0.0	0.0	0.0	0.0	21.3	
森林	0.0	0.0	74.7	24.2	0.0	1.0	0.0	
草地	0.0	1.0	0.0	97.6	1.0	0.0	0.3	
市街地	2.8	0.0	0.0	8.3	58.7	0.9	29.4	
水域	0.0	0.0	30.0	10.0	0.0	60.0	0.0	
荒地	7.2	1.3	0.0	48.9	3.6	0.0	39.0	
							平均精度	68.7

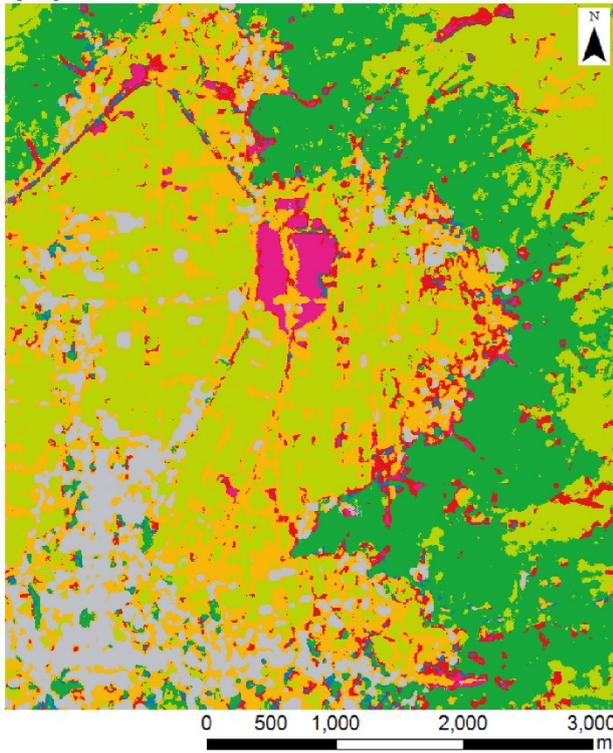
(3)同THEOS+傾斜

	土砂堆積	斜面崩壊	森林	草地	市街地	水域	荒地	
土砂堆積	88.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	
斜面崩壊	3.2	87.1	0.0	9.7	0.0	0.0	0.0	
森林	0.0	0.0	78.4	21.6	0.0	0.0	0.0	
草地	0.0	2.1	0.4	94.6	2.5	0.0	0.4	
市街地	1.0	0.0	0.0	4.1	58.2	0.0	36.7	
水域	38.5	0.0	0.0	0.0	0.0	61.5	0.0	
荒地	9.6	0.3	0.0	55.8	4.0	0.0	30.2	
							平均精度	71.2

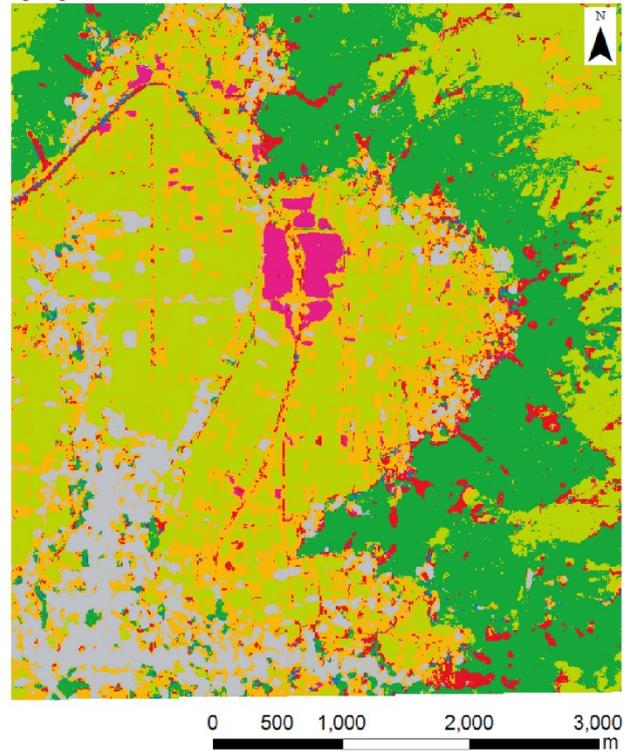
(4)同THEOS+空中写真+傾斜

	土砂堆積	斜面崩壊	森林	草地	市街地	水域	荒地	
土砂堆積	94.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	
斜面崩壊	3.1	84.4	3.1	9.4	0.0	0.0	0.0	
森林	0.0	0.0	76.8	22.2	0.0	1.0	0.0	
草地	0.0	1.4	0.0	97.1	1.1	0.0	0.4	
市街地	0.9	0.0	0.0	9.8	57.1	0.9	31.3	
水域	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	
荒地	11.8	0.8	0.0	46.9	3.1	0.0	37.4	
							平均精度	78.2

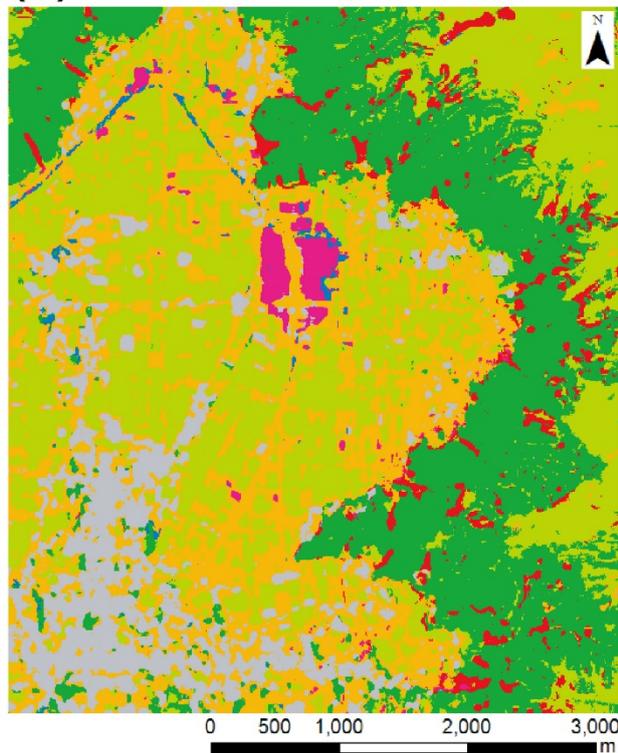
(1)フォーカル処理THEOSのみ



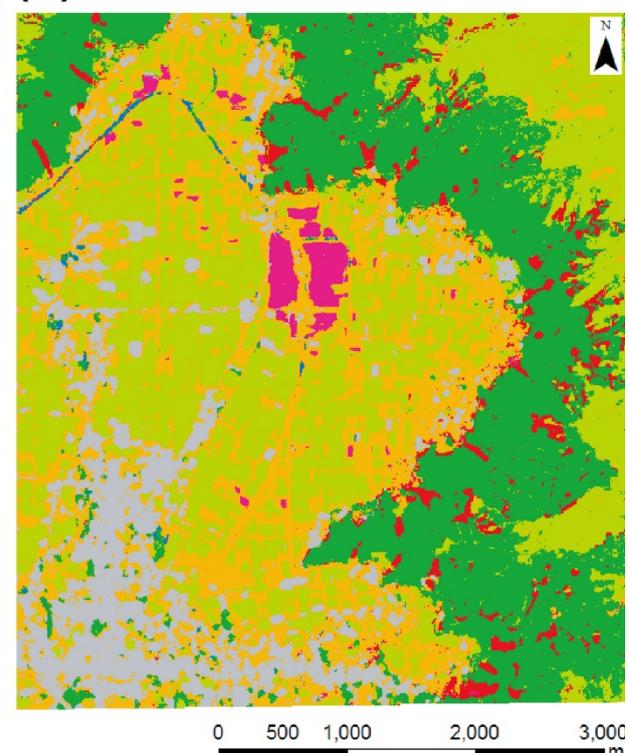
(2)同THEOS+空中写真



(3)同THEOS+傾斜



(4)同THEOS+空中写真+傾斜



凡例

土砂堆積	森林	市街地	荒地・裸地
斜面崩壊	草地	水域	

図 3.6 土地被覆分類図(フォーカル統計処理済 THEOS ベース)(参考文献[1]より一部改変)

表 3.3 フォーカル統計処理済 THEOS ベースの土地被覆分類図の分類精度(%)(参考文献[1]より)

(1)フォーカルTHEOSのみ

	土砂堆積	斜面崩壊	森林	草地	市街地	水域	荒地
土砂堆積	85.1	12.6	0.0	0.0	0.0	0.4	1.9
斜面崩壊	2.1	83.5	0.0	13.4	0.0	0.0	1.0
森林	0.0	0.0	81.8	18.2	0.0	0.0	0.0
草地	0.0	2.0	0.0	97.7	0.3	0.0	0.0
市街地	0.0	0.0	0.0	0.0	75.3	0.0	24.7
水域	0.0	16.3	0.0	2.0	0.0	81.6	0.0
荒地	10.2	0.0	0.0	50.3	0.4	0.0	39.1
平均精度							77.8

(2)同THEOS+空中写真

	土砂堆積	斜面崩壊	森林	草地	市街地	水域	荒地
土砂堆積	99.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
斜面崩壊	25.0	62.2	0.0	10.2	0.0	0.0	2.6
森林	0.0	0.0	79.9	20.1	0.0	0.0	0.0
草地	0.0	1.7	0.0	98.3	0.0	0.0	0.0
市街地	1.9	0.0	0.0	0.0	73.4	0.0	24.7
水域	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	97.6	0.0
荒地	7.4	0.0	0.0	42.6	0.8	0.0	49.3
平均精度							80.0

(3)同THEOS+傾斜

	土砂堆積	斜面崩壊	森林	草地	市街地	水域	荒地
土砂堆積	97.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7
斜面崩壊	0.0	97.6	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0
森林	0.0	0.0	80.7	19.3	0.0	0.0	0.0
草地	0.0	2.3	0.1	97.3	0.3	0.0	0.0
市街地	2.7	0.0	0.0	0.0	71.4	0.0	25.9
水域	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0
荒地	10.4	0.0	0.0	50.9	0.3	0.0	38.3
平均精度							83.2

(4)同THEOS+空中写真+傾斜

	土砂堆積	斜面崩壊	森林	草地	市街地	水域	荒地
土砂堆積	99.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
斜面崩壊	12.6	86.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0
森林	0.0	0.0	79.9	20.1	0.0	0.0	0.0
草地	0.0	1.8	0.0	98.2	0.0	0.0	0.0
市街地	2.3	0.0	0.0	0.0	73.1	0.0	24.6
水域	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0
荒地	9.8	0.0	0.0	44.8	0.7	0.0	44.6
平均精度							83.0

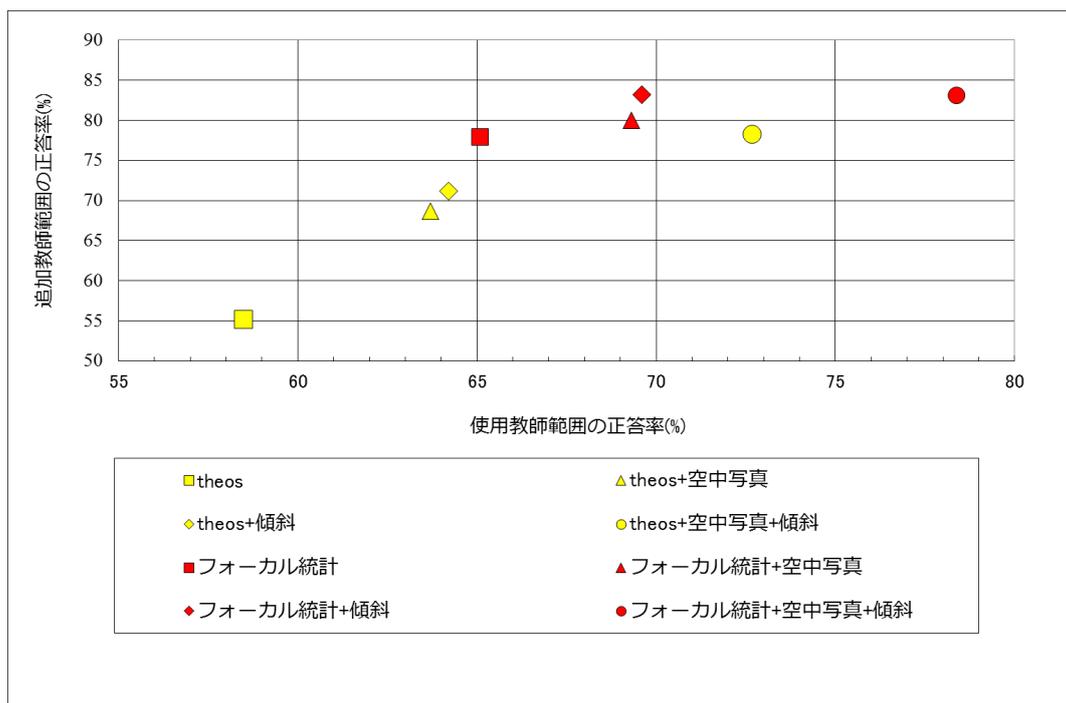


図 3.7 平均分類精度散布図(参考文献[1]より一部改変)

に用いた教師データ内の平均精度と、前章で解説した精度検証用追加教師データでの平均精度を散布図形式でグラフ化したものを図 3.7 に示す。

まず、図 3.5 を見てみると、未処理 THEOS のみで作成した土地被覆分類図(図 3.5(1))では、特に南部の市街地での土砂堆積域・斜面崩壊地への誤分類が目立つ。空中写真(図 3.5(2))や傾斜角分布図(図 3.5(3))をコンポジットするごとにその誤分類が減少し、THEOS に空中写真と傾斜角分布図をコンポジットしたものは(図 3.5(4))大幅に減少した。次に図 3.6 を見てみると、図 3.5 と同様の状況で誤分類が解消するが、特にフォーカル統計処理済み THEOS に傾斜角分布図をコンポジットしたものは(図 3.6(3), 図 3.6(4))では、南部市街地の土砂堆積域・斜面崩壊地への誤分類が解消し、図 3.5 で見られるような 1 セル単位で散在する誤分類が消滅する。よって、土砂堆積地・斜面崩壊地の分類根拠として有効な地理データをコンポジットすることで、セルサイズ 1m の高分解能・高精度土地被覆分類図が作成可能で、さらに空中写真よりも地上分解能が低い人工衛星データに対してフォーカル統計処理を施すと 1 セルサイズで細やかに散在する誤分類、いわゆる salt and pepper effect を解消することができる。

次に、平均分類精度(図 3.7)を見てみると、THEOS データをフォーカル統計処理したものを空中写真に

コンポジットしたデータセットほど精度が向上する傾向がグラフから読みとれる。特に、フォーカル統計処理された THEOS に空中写真と傾斜角分布図をコンポジットして作成した土地被覆分類図は、最尤法分類に使用した教師データ内でも、精度検証用追加教師データ内でも平均分類精度が高い。この結果は、先に述べたように視覚的にも同様のことが言える。

次に、精度判別表(表 3.2, 表 3.3)を見てみると、GIS ソフトでフォーカル統計処理した THEOS 画像の分類精度は総じて高く(表 3.3), その中でも傾斜角分布図をコンポジットしたものは追加教師内精度 83.2%と最も高い(表 3.3(3))。

傾斜角分布図をコンポジットした土地被覆分類図では、沖積低地における土砂堆積地の誤分類解消も認められるが、特に斜面崩壊地の誤分類が大幅に解消されている。例えば、表 3.2(1)を見てみると、未処理 THEOS データのみで作成した土地被覆分類図の斜面崩壊地の追加教師範囲内精度は 13.8%であったが、傾斜を組み合わせたもの(表 3.2(3))では 87.1%と誤分類が解消された。ここで、今回の山地斜面崩壊の多くは傾斜 25°以上の急傾斜地で発生していることが報告されており[4]、傾斜角分布図をコンポジットした画像を用いた土地被覆分類図(図 3.5(3), (4)及び図 3.6(3), (4))の斜面崩壊地の分類精度の良さは、分類根拠としての傾斜角を反映した結果である可能性が高い。そこで、これを確認する目的で傾斜角分布図(図 3.4)と土地被覆分類図(図 3.5(1)と図 3.5(4))とをオーバーレイし、ゾーン統計機能を用いて各分類

ゾーン統計の例



図 3.8 分類項目と傾斜角分布図のオーバーレイ例(著者原図)

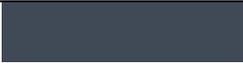
表 3.4 図 3.5(1)と図 3.5(4)の分類項目における平均分布傾斜角度(°)(著者原図)

	土砂堆積	斜面崩壊	森林	草地	市街地	水域	荒地
図2.19 (1)	2.69	9.36	26.32	5.87	2.33	8.25	2.63
図2.19 (4)	0.74	24.62	27.06	4.39	1.98	0.59	2.28

項目における平均傾斜角分布図を算出した(表 3.4)。そのゾーン統計のモデル例を図 3.8 に示す。表 3.4 を見てみると、未処理 THEOS のみの土地被覆分類図(図 3.5(1))における斜面崩壊地の平均傾斜角度は 9.36°、一方空中写真と傾斜角分布図をコンポジットした画像を用いたもの(図 3.5(4))では 24.62°と既往研究の結果と調和的である。また、同様に土砂堆積地を見てみると、図 3.5(1)では 2.69°であったが、図 3.5(4)では 0.74°とほぼ水平となった。よって、急傾斜の斜面崩壊地と沖積低地の土砂堆積地を包括的に最尤法分類する場合、人工衛星データとともに、傾斜角分布図を組み合わせると精度よく斜面崩壊地を抽出できる。すなわち、地形状況が地物の分布に影響を与えるようなエリアでの最尤法分類による土地被覆分類図の作成では、DEM をコンポジットした画像を用いるとより高精度なりモートセンシングが可能となる。

次に THEOS に空中写真をコンポジットしたものでは、特に土砂堆積域での精度向上に寄与し、表 3.3(2)および表 3.3(4)の土砂堆積地の分類精度は 99.1%で最も高くなる。これは、災害前の空中写真と災害後の THEOS 画像における土砂堆積域の可視域の色調が明瞭に異なり、これが精度向上に寄与した可能性が高い。そこで、傾斜角分布図と空中写真をコンポジットした図 3.6(4)における土砂堆積地の THEOS 画像の平均 band1~band3 値と空中写真における平均 RGB 値を同 GIS ソフトのゾーン統計機能で算出し、この値を元にカラーコードを導き*1、実際の色調に変換した(表 3.5)。この表を見てみると、両者の色調は明

表 3.5 図 3.6(1)と図 3.6(4)の土砂堆積域における THEOS 平均 band1~3 値(上段)及び空中写真の平均 RGB 値(下段)、および両者の平均値から導き出したカラーコード及びその色調(著者原図)

	R(band3)	G(band2)	B(band3)	カラーコード	色調
土砂堆積	64.6	73.2	86.1	#414956	
	R	G	B	カラーコード	色調
土砂堆積	140.7	150.7	159.6	#8c969f	

らかに異なり、災害後の THEOS データの方が濃い色調となる。災害前空中写真図 3.16 と災害後 THEOS ナチュラルカラー表示の図 3.3 を見比べても分かるように、解析範囲中央やや北側に広がる赤枠内の土砂堆積域(図 3.3)は周辺耕作地に比べて色調があきらかに異なり濃い。よって、図 3.6(4)のように災害前空中写真がコンポジットされた画像を用いた土地被覆分類図は、この災害前後の色調の違いが反映され、高精度化した可能性が高い。

最後にフォーカル統計処理について言及すると、表 3.2 と表 3.3 を見比べても明らかのように未処理 THEOS を用いた土地被覆分類図よりも分類精度は向上するが、図 3.5 と図 3.6 を見比べたら分かるように、図 3.6 では地物の境界線がぼやけてしまう。本章では特に沖積低地での土砂堆積域と山地斜面における崩壊地の抽出に主眼を置いているためあまり問題とはならなかったが、地物の境界線をはっきりと描画する必要がある研究課題においては、フォーカル統計処理を実施するか検討の余地がある。また、フォーカル統計処理を行うと、図 3.5 で見られるような 1 セル単位で散在する誤分類がほぼ消滅するため、あたかも土地利用図のような分類図となる。このフォーカル統計処理地理データを用いた教師付最尤法分類による疑似的な土地利用図の作成は、研究課題によっては有効な手段となりうる可能性がある。

3.5 本章のまとめ

本章では、2012 年 7 月 11 日から 14 日までの九州北部豪雨にて斜面崩壊と河川氾濫被害が生じた阿蘇カルデラ内に位置する阿蘇市の沖積低地とカルデラ壁斜面を解析範囲として、本研究手法で作成される土地被覆分類図の精度評価を検討した。その結果を以下に示す。

1)地上分解能 2m の人工衛星データ THEOS に地上分解能 20cm の空中写真をコンポジットした画像を教師付最尤法分類に用いることで、セルサイズ 1m の高分解能な土地被覆分類図が作成できた。これは THEOS のみを用いた土地被覆分類図よりも高精度である。

2)セル値を平均化するフォーカル統計処理を THEOS データに施し、これに空中写真と傾斜角分布図をコンポジットした画像を用いた土地被覆分類図の平均精度は 83.0%(表 3.3(4))で、これは、未処理 THEOS

のみを用いたものの平均分類精度(55.1%(表 3.2(1)))よりも高精度となることを確認した。すなわち、オリジナルの未処理 THEOS データを用いたものよりも、本手法の方が高解像度・高分解能な土地被服分類が可能である。

3)傾斜角分布図をコンポジットしたフォーカル統計処理(平均化)済 THEOS データを用いた土地被覆分類図での斜面崩壊地における平均傾斜角度は 24.62° と既往研究の結果と調和的であった。よって、THEOS データに傾斜角分布図をコンポジットすると、特に斜面崩壊地の分類精度が向上することが確認できた。

4)空中写真をコンポジットしたフォーカル統計処理(平均化)済 THEOS データを用いた土地被覆分類図での土砂堆積地における分類精度の向上は、災害前後の色調の違いを反映して高精度化した。

5)セル値を平均化するフォーカル統計処理は精度向上に寄与するが、地物の境界が不明瞭になるため研究課題により処理の実施を行うか検討する必要がある。また、フォーカル統計処理を行った人工衛星データを用いた土地被覆分類図は、1セル単位で散在する誤分類がほぼ消滅するため、土地利用図に近い分類図となる。

第4章

カルスト台地平尾台の草原における土地被覆分類

4.1 はじめに

本章では、福岡県北九州市、カルスト台地平尾台の草原と石灰岩地を事例として(図4.1)、草原を構成する代表種であるネザサとススキの抽出をコンポジット空中写真の最尤法分類を用いて行い、その抽出精度を検討する。

研究対象とする範囲は南北約500m×東西約750m(図4.1)で、地上分解能1未満の1/25,000空中写真(図4.1)にコンポジットする人工衛星データは地上分解能10mのALOS AVNIR2データ、作成する土地被覆分類図の解像度は1mとする。また、本章でも起伏状態の違いによる土地被覆を精度よく抽出するため、コンポジット空中写真にDEMデータから作成した傾斜角分布図を合成し、さらに、誤分類の解消を目的としてALOS AVNIR2データにフォーカル統計処理を施した。

本研究では土地被覆分類図が現実に即したものであるか実証するために、現地植生調査の結果を用いて、土地被覆分類図での植生の出現傾向と実際のそれを比較検討した。

なお、本章で示す平尾台の植生分布の調査結果は、著者らによる投稿論文[1]にて報告したものを使用している。

4.2 本章の目的

本章では、草原の植生分布図に対応する土地被覆分類図の作成を通じて、コンポジット空中写真による最尤法分類手法の提示と分類精度の検討を行い、さらに現地調査結果を基にして本章で作成する土地被覆分類図が現実に即した分類となったか検討する。本章の目的を以下の2点にまとめる。

1)数百 m 四方のローカルな範囲における解像度 1m の土地被覆分類図，特に草原における植生区分図の作成方法を示し，これが解像度 10m の人工衛星データを用いたものより高分解能・高精度であることを示す。本章では特に，分布傾向に地形の影響を受けると考えられるネザサやススキの抽出精度向上のため，コンポジット空中写真に DEM データを合成した画像による最尤法分類方法を示す。

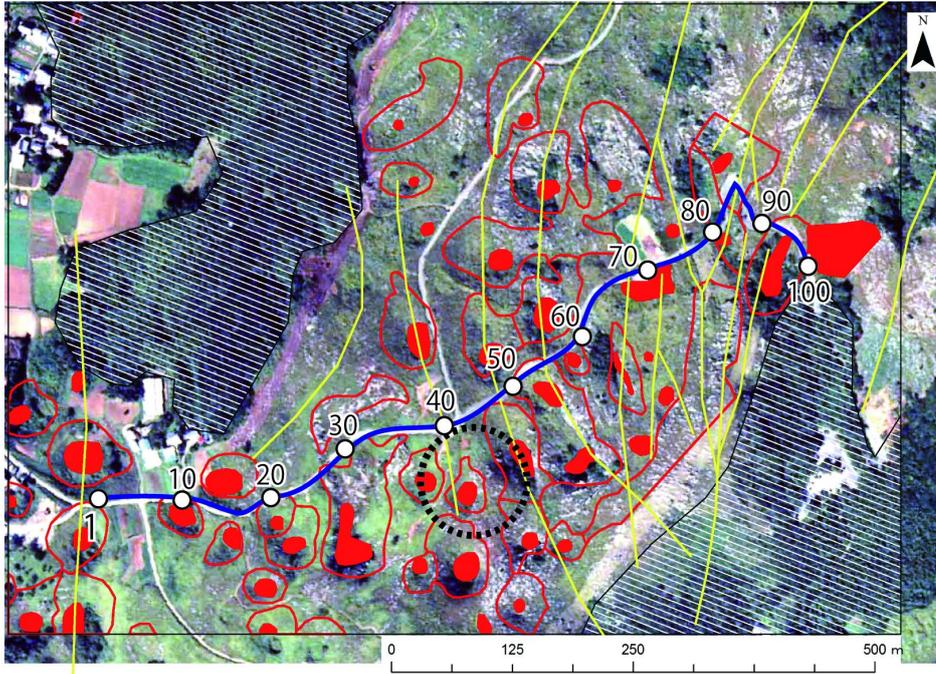
2)土地被覆分類図におけるネザサとススキの出現傾向が現実に即したものとなるか，現地植生調査との結果と比較することで検討し，本研究手法が植生種を分類するような研究課題に対して有効な手段となることを示す。

4.3 カルスト台地平尾台の自然環境

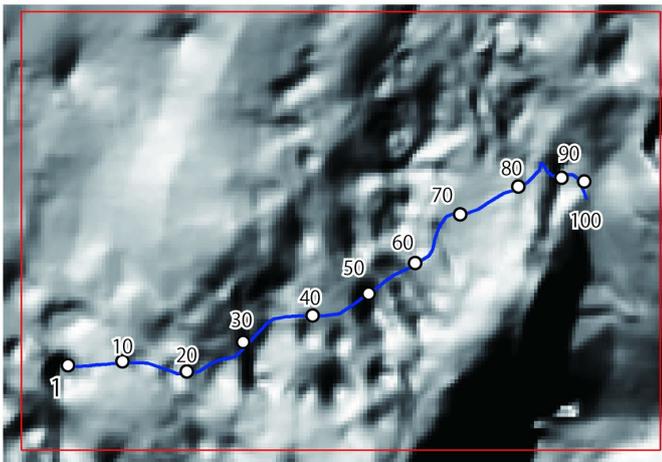
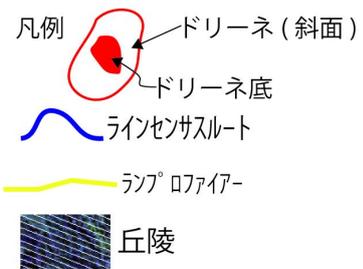


図 4.1 研究対象地域(赤枠内)の空中写真(参考論文[1]より一部改変)

研究対象地域平尾台とドリーネ分布図を図 4.1，図 4.2 に示す。平尾台は福岡県北九州市，行橋市，苅田町にまたがる卓上孤立石灰岩地で，ドリーネ，カレン，ピナクル，石灰洞など，典型的なカルスト地形が広がる国定公園である。平尾台には石灰岩に貫入した火成岩脈であるランプロファイアーが多数存在



(1) 地形分布と区画 (10 区画ごと)



(2) 陰影図

図 4.2 (1)研究対象地域の地形分布および区画(黒破線の囲みは第 5 章における精密調査ドリーネの位置を示す) (2)研究対象地域の陰影図(参考論文[1]より一部改変)

し[2], その岩脈と断層や節理の交差点にはドリーネが形成されていることが多く, その地下には石灰洞が形成されている。このランプロファイア-岩脈は風化し土壌化していることが多く, 雨水や地下水による侵食を石灰岩よりも受けやすい。この石灰岩との侵食速度の違いにより主にランプロファイア-岩脈に沿って緩やかな凹地が形成され, やがてはすり鉢状の地形, ドリーネへと成長する。このドリーネが

形成する地表面の特徴的な凹凸には、ネザサやススキ、セイタカアワダチソウを構成種とする草原が広がっている(写真3.1)。また、この草原には多くの昆虫類が生息し、ハッチョウトンボ、ギョウトクテントウムシ、キアシキスジトビハムシ、ルリナガツツハムシなどが知られている[3]。なお、植生図の作成や特定の植物群落の抽出、ある特定の植生種に関する詳しい調査、解析については、すでに満塩ほか(1973)[4]や、鈴木(1973)[5]、畑中(1982)[6]などで詳しく議論されている。



写真 4.1 平尾台のネザサーススキ草原 (2010年11月29日著者撮影, 写真手前ネザサ, 奥ススキ)

4.4 土地被覆分類図の作成

本章で作成した空中写真による土地被覆分類図は、以下の3パターンの地理データコンポジット画像を最尤法分類したものである。

- ①：デジタル化空中写真のみ (RGB 合計3画像)
- ②：①+ALOS AVNIR2 band4 (RGB+近赤外域の反射率データ 合計4画像)
- ③：②+傾斜角分布図 (RGB+傾斜角分布図+近赤外域の反射率データ 計5画像)

②と③は空中写真に他の地理データをコンポジットした画像で、①のRGBの色調のみで最尤法分類を行ったものよりも分類精度の高い土地被覆分類図となることが予想される。②のように、植生の反射率が最も高くなる近赤外域の反射率データをコンポジットすると、植生とその他の地物を明瞭に分ける根拠となるため、植生の誤分類を減らす可能性が高い。③はカルスト地形の起伏が植生種の分布傾向に影響を与えることが予想されることから、DEMから作成した5mメッシュ(セルサイズは1m)の傾斜角分布図をコンポジットした画像で、これを用いて最尤法分類を行えば、植生種、今回分布傾向に地形の影響を受けると予想されるネザサとススキの分類精度を向上させる可能性がある。

まず、空中写真は 300dpi でスキャンし RGB で記録されたデータを用意した。この空中写真(1/25,000)は国土交通省国土地理院が 1994 年 10 月 23 日に撮影したものである(図 4.1)。この空中写真にコンポジットする衛星画像は、2008 年 11 月 13 日観測の ALOS AVNIR2 の近赤外域の band4 画像である。この band4 画像は前章と同じく土地被覆分類図の高精度化を目指してフォーカル統計処理を行った(図 4.3)。

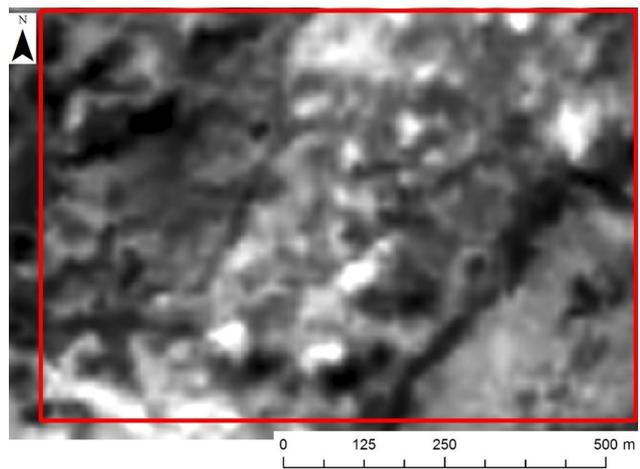


図 4.3 フォーカル統計処理(平均)された ALOS AVNIR2 band4 画像 (赤枠の範囲は図 4.1)(著者原図)

傾斜角分布図は国土交通省国土地理院が web で配布している 5m メッシュ DEM を使用して作成した(図 4.4)*1。空中写真と人工衛星データの撮影(観測)時期にずれがあるが、本研究では草原における植物活性が同じになると考えられる季節の統一を優先した。なお、すべての地理データはセルサイズ 1m に統一した。

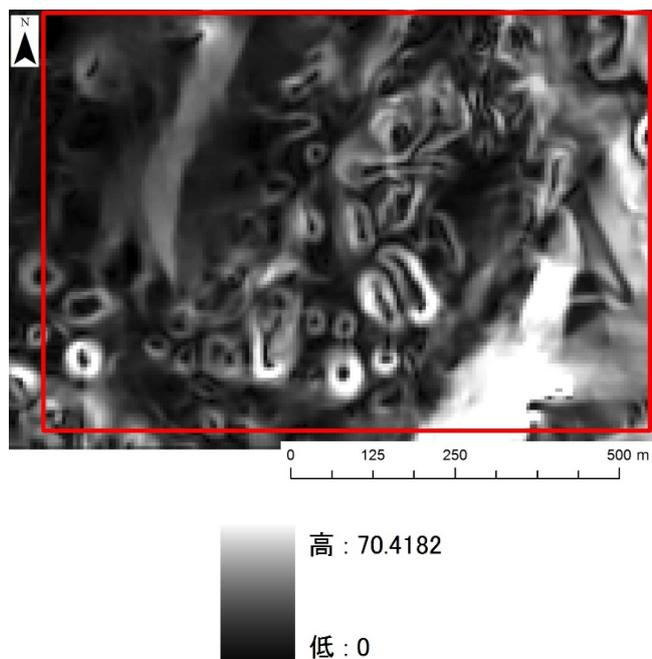


図 4.4 傾斜角分布図 (凡例の単位は角度(°), 赤枠の範囲は図 4.1)(著者原図)

次に、図 4.1 に示される地域での現地調査結果を元に空中写真で目視判読することで、教師範囲をポリゴンとするベクター型データを 2 セット用意した。1 セットは最尤法分類に、もう 1 セットは精度検証に利用する。なお、植生の分類項目は、ネザサとススキ以外の植生種の写真判読が困難であったため、これら以外はその他草地と一括した。その他は石灰岩地、裸地・畑、雑木による樹林、以上計 6 分類とした。

4.5 現地調査方法

4.5.1 植生調査方法

土地被覆分類図での植生の分布傾向が現地での実際の分布傾向と一致するか確認する。その理由で用いた植物分布のデータは、著者らによる平尾台の自然環境調査で行ったラインセンサスルート調査*2(単にルートと述べた場合このラインセンサスルートのことを指す)における結果を用いる[1]。調査地域を横断する道路の一部をルートとし、そこに等間隔(10m)の101箇所の観測点を設置した(図 4.2(1))。また、このルートの南側に向けて、観測点を境に1辺が10mの正方形の区画(計100区画)を設定し、この中で植生調査を行った。以下、区画と記述するものはルート上に設定したこの区画のことを指す。

ルート上に分布する植生種を明らかにするために、観測点から2.5m、7.5mの地点を基点に南側に20cm間隔で10mまでの植生種を、平尾台の草原景観を主として構成するネザサ、ススキ、外来種であるセイトカアワダチソウ、そしてその他に分けて観察し、その本数を記録した(図 4.5)。観察数は、1区画あたり約100本である。植生観察は秋季に実施した(2006年11月19~21日)。

4.5.2 地形概観

現地地形調査と1/2,500北九州市基本図を用いて、ルート上の地形を10m間隔で、平坦地、ランプロファイアーが形成するドリーネ内部の谷(以下谷)、ドリーネ底、平坦地からドリーネ底へ至る斜面(以下斜面)、の4つに区分した。

図 4.6 に平尾台のカルスト地形のモデルと、ドリーネのモデル図を示す。なお本章では、平坦地と丘陵以外の地形を一括して指す場合、便宜的にドリーネ地形と呼称する。図 4.2(2)はDEMを陰影起伏表示にし、地形の凹凸を強調したものである。これを用いて地形状況を概説すると、全体的に、西から東にかけて、地形の起伏は平坦となる傾向がある。区画1周辺はドリーネ地形で区画20付近にかけてゆるやかな

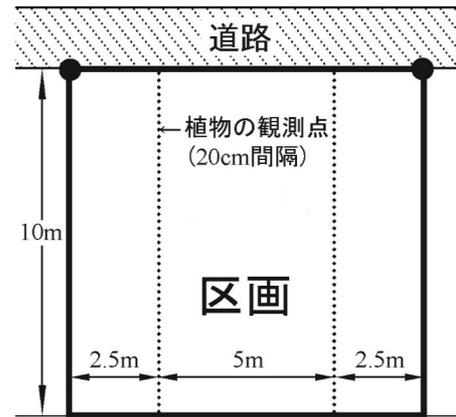


図 4.5 ラインセンサスルートに設置した区画のモデル(参考文献[1]より)

起伏があり，区画 20 付近から 60 付近にかけては起伏に富み，区画 60 付近から 80 付近にかけてはおおよそ平坦，区画 80 付近から 90 付近にかけては起伏に富むが，区画 90 付近から 100 ではおおよそ平坦となる。

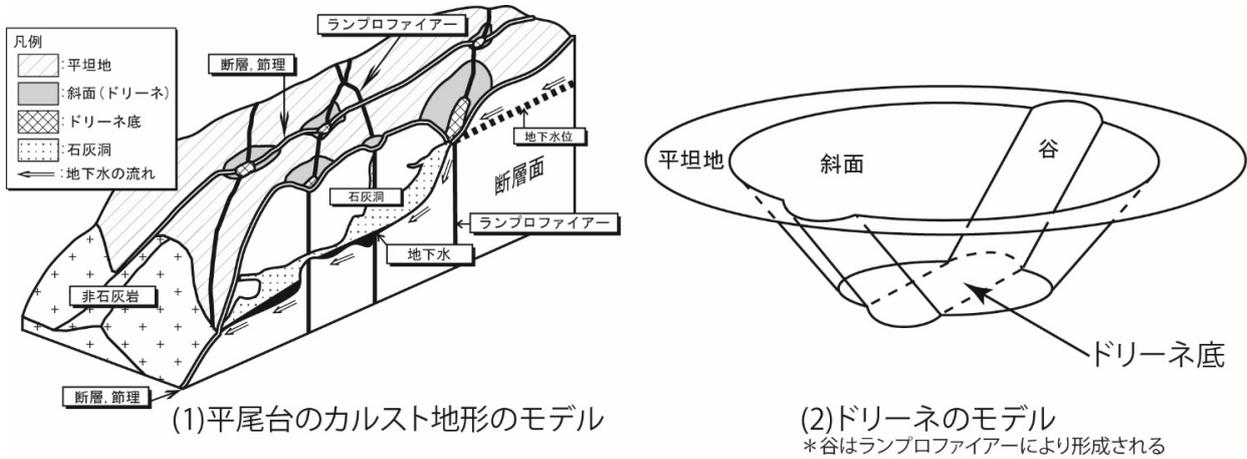


図 4.6 平尾台のカルスト地形モデルとランプロファイアーに沿って形成されたドリーネの地形モデル ((1)は参考文献[2]より一部改変，(2)は参考文献[1]より一部改変)

4.6 土地被覆分類図の分類精度

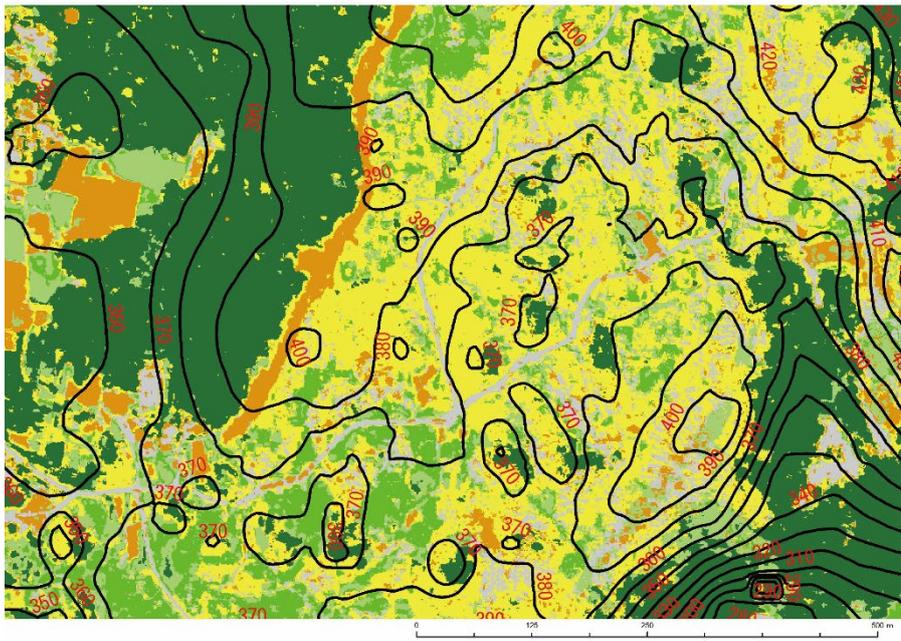
作成した土地被覆分類図を図 4.7(1)~(3)に，それぞれの分類精度判別表を表 4.1(1)~(3)に示す。まず，図 4.7(1)~(3)を概観してみると，視覚的に分類項目の分布傾向に大きな差は見られない。ここで，図 4.7(4)の JAXA による同地域の高解像度土地利用土地被覆分類図(ALOS AVNIR2 使用，セルサイズ 10m)を見てみると[7]，草原の水域や畑地への誤分類が目立つ。この分類図は本研究の土地被覆分類図とは最尤法分類に用いた画像，設定した分類項目，さらに用途が異なるので単純に優劣を比較できないが，少なくとも図 4.7(1)~(3)において草原中に裸地(土地利用としてみれば耕作地が多い)が広い範囲で出現するような誤分類は図 4.7(3)と比較して視覚的には見られない。

ここで，目視確認での土地被覆分類図精度の検討は困難なため，分類精度判別表を用いることとする。まず，表 4.1(1)~(3)の平均精度を見てみると，図 4.7(1)の空中写真のみの土地被覆分類図で 89.0%(表 4.1(1))，図 4.7(2)の RGB+ALOS AVNIR2 で 91.3%，図 4.7(3)の RGB+ALOS AVNIR2+傾斜角分布図で 94.8%である。なお，今回空中写真のみの土地被覆分類(図 4.7(1))でも，全体平均精度 90%弱の高い分類精度を得た。黒木ほか(2007)は，RGB で記録された空中写真のみを用いた最尤法分類を実施し，斜面災害地の斜面崩

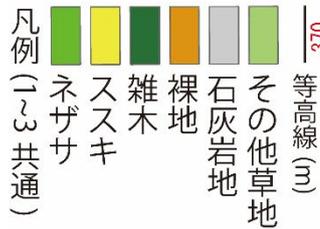
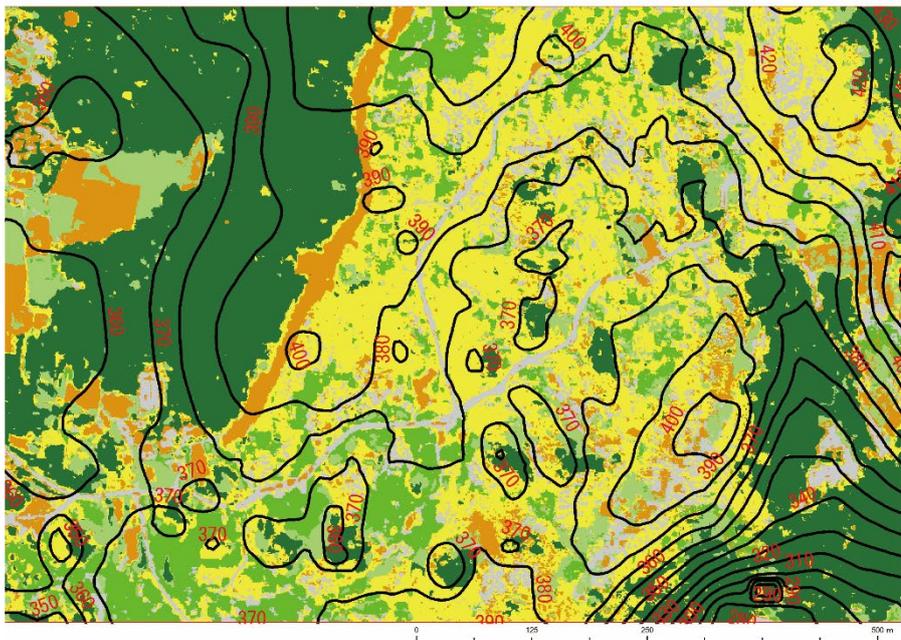
壊と土石流範囲を土砂の乾湿に分けて分類した先行事例がある[8]。よって、空中写真のみの最尤法分類も、研究課題によっては有効な手段となりうる可能性が高い。

次に、空中写真を用いた土地被覆分類図(図 4.7(1))と、近赤外域画像をコンポジットした画像(図 4.7(2), (3))を比較してみると(表 4.1(1)~(3)), 特に「その他草」での分類精度向上が大きい。これは ALOS AVNIR2 の近赤外域の反射率データが寄与していると考えられる。そこで、図 4.7(1)と図 4.7(2)をそれぞれ ALOS AVNIR2 の band4(図 4.3)とオーバーレイし、GIS のゾーン統計でその他草に分類された範囲の平均 DN 値を算出し*³, その平均 DN 値を反射率へ変換したところ*⁴, 前者が 14.3%, 後者が 20.0%と約 6%反射率が高かった。よって、図 4.7(2)のその他草は植生の反射率特性を反映した分類結果となった可能性が高い。次に、傾斜角分布図をコンポジットした土地被覆分類図では裸地の分類精度の向上が目立ち、そうでない図と比べておよそ 10%の精度向上が見られた(表 4.1)。対象地域北西に見られるように、裸地の土地利用は平坦な耕作地が多く、この地域の裸地の起伏状況を反映した可能性がある。また、ネザサとススキに関しても図 4.7(3)での分類精度が両者ともに 98%代と高まった(表 4.2)。植生においても傾斜角分布図が高精度化に寄与した可能性が高い。一方、雑木とその他草については、図 4.7(2)の近赤外域の反射率データのみを空中写真にコンポジットした土地被覆分類図が全分類図中最も高い分類精度となった。研究課題によりコンポジットする画像データの取捨選択が重要であると考えられるが、本章では、特にネザサとススキの分布傾向を地形と関連付けて検討するため、以後図 4.7(3)の土地被覆分類図を用いて議論を行う。

以上より、本研究で作成された土地被覆分類図は視覚的には大差はないが、分類判別表で確認してみると、特に近赤外域画像をコンポジットすると植生の分類精度が高まり、さらに傾斜角分布をコンポジットすると、ネザサやススキ、裸地の分類精度が高まった。これより、図 4.7(3)は、植生の反射率特性や地形を反映した高分解能・高精度な分類図であると言える。

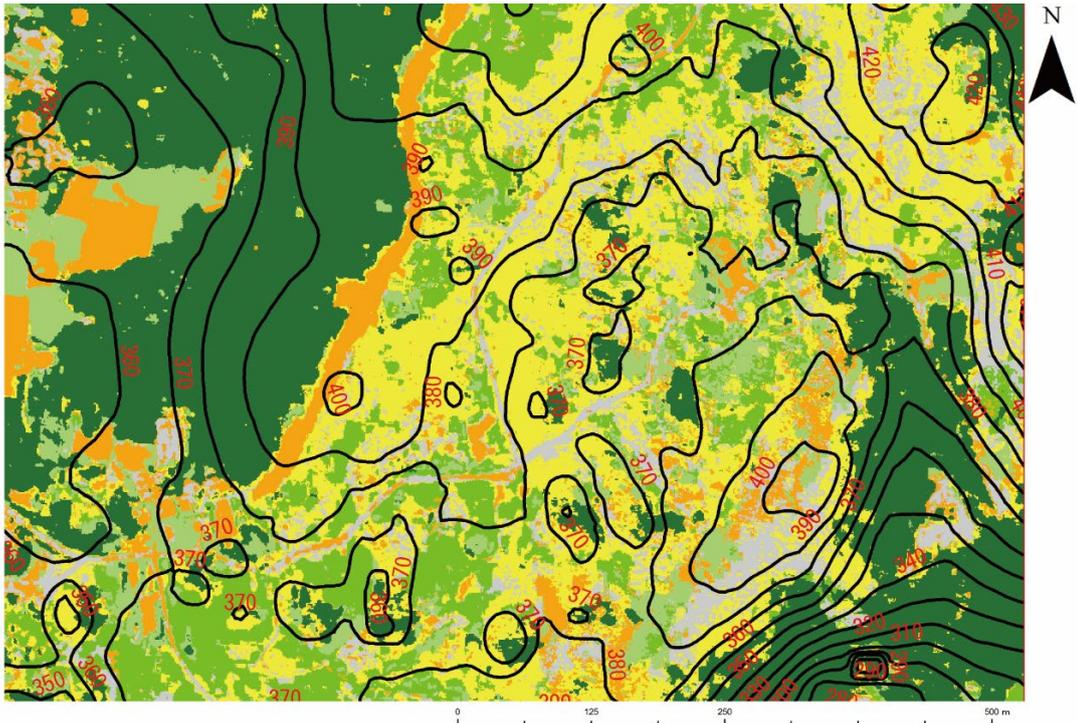


(1) 空中写真 RGB のみ

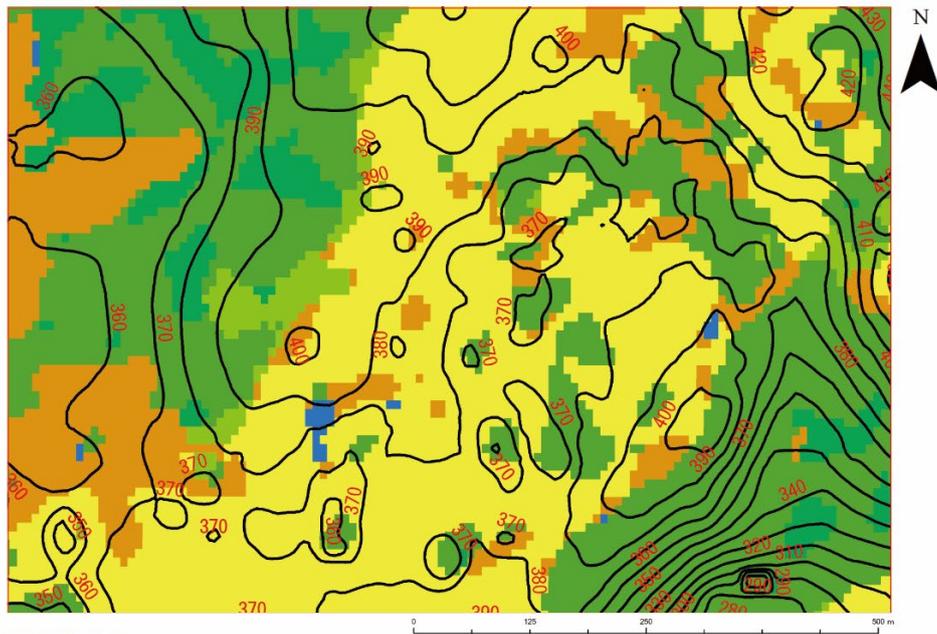


(2) RGB+ALOS AVNIR2 バンド 4

図 4.7 (1)空中写真 RGB のみの土地被覆分類図, (2)RGB+ALOS AVNIR2 データコンポジット画像による土地被覆分類図(著者原図)



(3)RGB+ 傾斜 +ALOS AVNIR2 バンド 4



凡例

	常緑針葉樹
	常緑広葉樹
	落葉広葉樹
	草地
	畑地
	水域
	等高線(3)

(4)JAXA による高解像度土地利用土地被覆図
バージョン 16.02 (v16.02、2016年2月版)

図 4.7 (3)RGB+傾斜+ALOS AVNIR2 コンポジット画像による土地被覆分類図, (4)JAXA 高解像度土地利用土地被覆分類図(著者原図)

表 4.1 分類判別表(著者原図)

(1) 空中写真のみ(図 4.7(1))の分類精度(%)

	ネザサ	ススキ	雑木	裸地	石灰岩	その他草
教師	ネザサ	94.4	0.6	0.0	0.1	4.8
	ススキ	0.4	95.8	0.0	1.5	2.1
	雑木	0.0	0.9	97.8	0.0	1.3
	裸地	0.0	2.0	0.0	75.0	18.2
	石灰岩	0.0	1.8	0.0	1.5	91.9
	その他草	9.9	0.2	0.2	10.4	0.0
					平均精度	89.0

(2) 空中写真+ALOS AVNIR2(図 4.7(2))の分類精度(%)

	ネザサ	ススキ	雑木	裸地	石灰岩	その他草
教師	ネザサ	95.4	1.1	0.0	0.0	3.3
	ススキ	1.2	96.2	0.0	0.5	1.5
	雑木	0.0	0.5	99.0	0.0	0.5
	裸地	0.0	1.0	0.0	73.9	21.9
	石灰岩	0.1	2.5	0.0	7.8	84.5
	その他草	0.5	0.4	0.1	0.0	0.0
					平均精度	91.3

(3) 空中写真+傾斜+ALOS AVNIR2(図 4.7(3))の分類精度(%)

	ネザサ	ススキ	雑木	裸地	石灰岩	その他草
教師	ネザサ	98.7	0.4	0.0	0.1	0.7
	ススキ	0.5	98.2	0.0	0.2	1.1
	雑木	0.0	0.6	98.9	0.0	0.6
	裸地	0.0	0.0	0.0	83.1	12.1
	石灰岩	0.0	1.3	0.0	6.8	91.9
	その他草	0.3	0.0	0.1	1.8	0.1
					平均精度	94.8

4.7 ラインセンサルートにおける植生分布の特徴

本節では、ラインセンサルート of 区画 1 から 100 までの植生の分布傾向を明らかにする。

図 4.8 は、区画内の植生種の分布割合である。区画 1 から植生の分布傾向を詳しく見てみると、区画 1

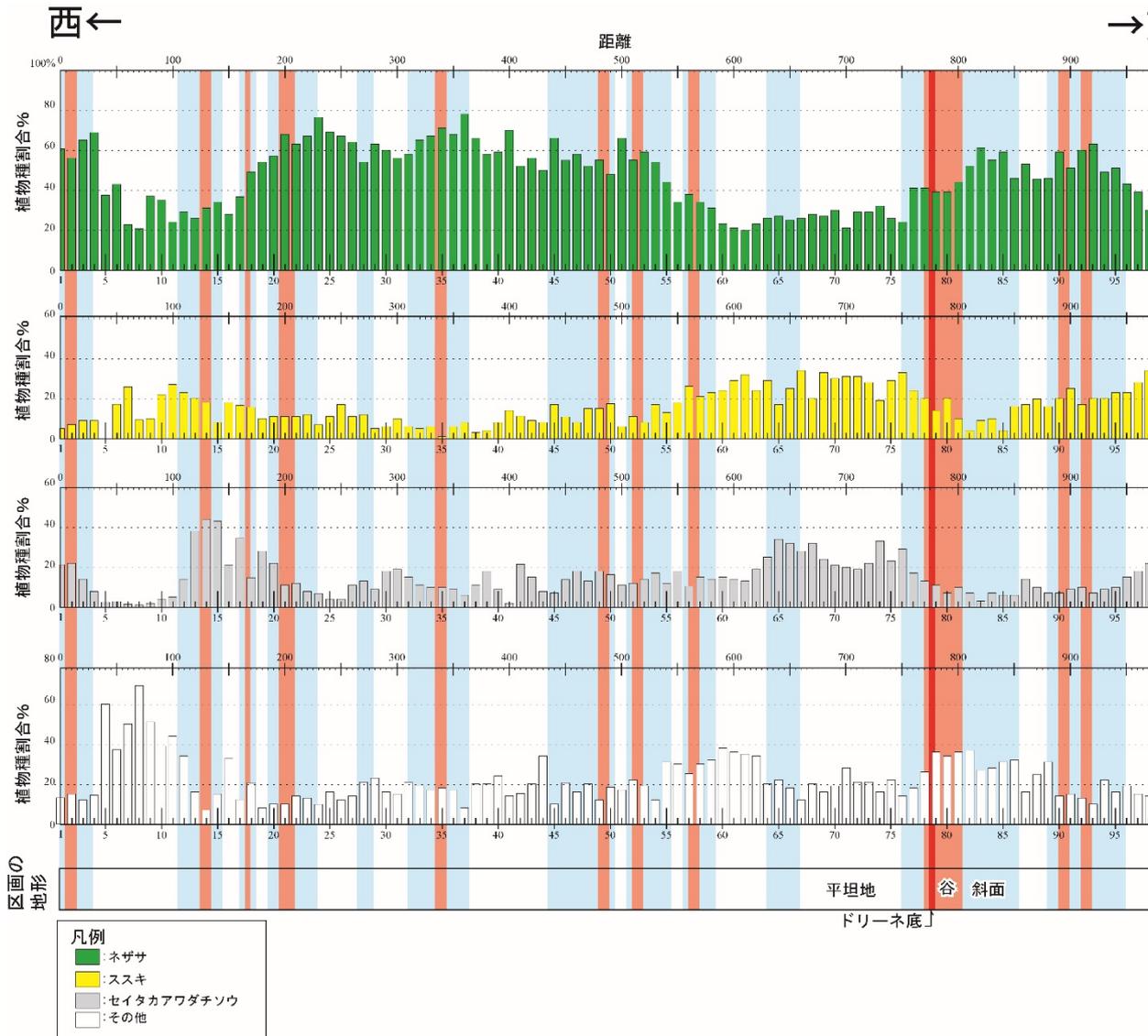


図 4.8 ラインセンサスルートの植生調査における区画ごとの植生分布割合(%)と地形分布(白：平坦地，水色：斜面，オレンジ：谷，赤：ドリーネ底)(参考文献[1]より一部改変)

から 4 までの谷・斜面ではネザサの割合が高い。区画 5 から 11 付近の平坦地ではネザサの割合が極端に低くなり、ススキとセイタカアワダチソウの割合が高くなる。区画 12 から 24 にかけての斜面・谷が交互に出現する区画では、ネザサの分布割合が高まる。区画 20 から 55 付近の斜面・谷が連続する区間では、ネザサの割合が高く、セイタカアワダチソウは 10%前後の一定の割合で分布しているが、ススキはほとんどの場合 10%以下で分布が少ない。この区間のネザサは、区画 24 から 32 と区画 38 から 44 の比較的広い平坦面が出現する区間で分布割合が低くなる。区画 50 付近から 75 付近にかけてネザサの割合

が低くなっていくが、この区間はルート上で最も大規模な谷・斜面から最も広い平坦面に至る区間である。特に区画 60 から 75 にかけての広い平坦地でのセイタカアワダチソウとススキの増加が顕著で、ネザサは 30%前後の分布にとどまる。区画 75 から 95 の斜

表 4.2 ラインセンサルート植生調査における地形ごとの植物出現割合 (著者原図)

平坦地での平均分布割合(%)			
ネザサ	ススキ	セイタカアワダチ	その他
25.4	43.4	10.3	20.9
斜面での平均分布割合(%)			
ネザサ	ススキ	セイタカアワダチ	その他
42.6	32.3	5.4	19.7
谷での平均分布割合(%)			
ネザサ	ススキ	セイタカアワダチ	その他
41.9	32.6	9.7	15.8
ドリーネ底での平均分布割合(%)* 1 地点のみの観測のため参考値			
ネザサ	ススキ	セイタカアワダチ	その他
30.6	38.9	8.3	22.2

面地形ではネザサの割合が高くなるが、区画 95 以東の平坦地ではセイタカアワダチソウとススキの割合が高まる。

表 4.2 は、地形ごとに各植生をカウントし、平均分布割合を算出したものである。平坦地ではススキとセイタカアワダチソウの割合が高く、斜面・谷ではそれらの割合は低くなり、ネザサの割合が高くなる傾向が見られる。

以上より、ネザサ、ススキとセイタカアワダチソウの分布傾向は無秩序ではなく、地形と関連した一定の規則性が出現している。すなわち、谷・斜面ではネザサが多く、平坦地ではススキやセイタカアワダチソウがネザサ群落へ侵入していると考えられる。なお、ドリーネ底は 1 区画のみでの調査なので参考程度にとどめるが、少なくともネザサは平坦地よりも分布割合が高く、ススキとセイタカアワダチソウは低くなる。

4.8 考察～植生調査結果と土地被覆分類図の比較検討

本節では考察として、土地被覆分類図上における区画 1 から 100 までのネザサとススキの出現傾向と現地調査における傾向を、10 区画移動平均値グラフを用いて比較し、両者の植生分布の傾向が近似的で

あるか確認することで、土地被覆分類図が現実に即した結果となっているか検討する。土地被覆分類図(図4.7(3))でのラインセンサスルート上のネザサとススキの分布傾向が現地調査の分布傾向と調和的であれば、

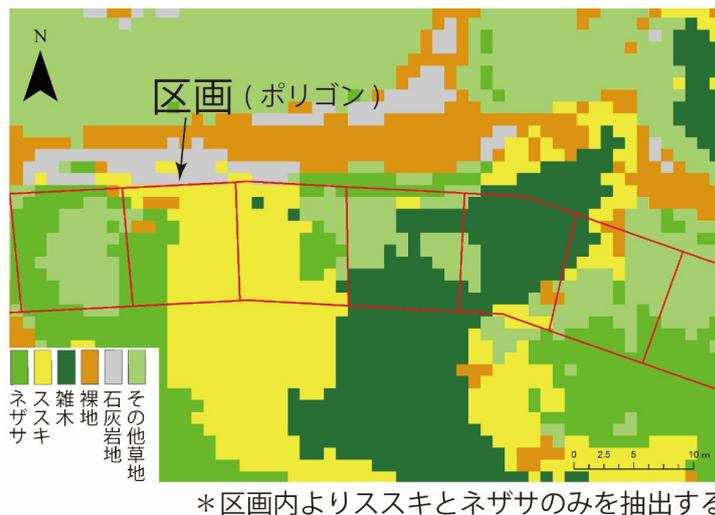


図 4.9 ラインセンサルートに沿った土地被覆の区画ごとの抽出例 (著者原図)

本手法で作成した土地被覆分類図は現実に即したものと

と考えられ、草原において植生種を分類するような研究課題に対して有効活用できる可能性が高い。

なお、土地被覆のうち植生だけを観察したルートでの結果と、植生以外も含めて土地被覆を包括的に分類した土地被覆分類図でのネザサとススキの出現率の結果を単純に比較することはできないので、本章では傾向を読むにとどめる。以下に具体的検討方法を記す。

まず、図 4.2(1)のルートの南側に区画 1 から 100 まで約 10m 四方のポリゴンを 100 個描画し、その内部のネザサとススキの分類項目をオーバーレイ抽出し、これらに分類されているセルの面積を百分率に変換することで出現率を算出した。例えば、区画 2 ではネザサが 43.7 m²、ススキが 66.0 m²であったため、ネザサ出現率 39.8%、ススキ出現率 60.2%とした。なお、ルートをラインで描画したあとポリゴンに変換し、それを自動的に 100 等分したので 10m 四方とならないものや四角形とならないものもある。図 4.9 に一部を拡大した例を示す。次に、ルートの植生調査で得られたネザサとススキの各区画での本数のみを抜き出し、これも百分率に変換した。例えば、区画 2 ではネザサが 60 本、ススキが 4 本であったため、ネザサ出現率 93.8%、ススキ出現率 6.3%とした。以下に検討結果を示す。

図 4.10 はルートと土地被覆分類図でのネザサ、ススキの出現率のグラフに 10 区画移動平均を挿入したものである。まずネザサを見てみると(図 4.10(1), (3)), その分布傾向は無秩序ではなく、ピークが区画 20 ~50 付近と区画 80 付近で両者ほぼ一致する。よって、ススキに関しても区画 10 付近、区画 60~70 付近で出現ピークは両者ほぼ一致することとなる(図 4.10(2), (4))。よって、土地被覆分類図のルート上におけ

るネザサとススキの分布傾向は現地調査でのネザサとススキの分布傾向と近似性が読み取れたことから、本手法で作成した土地被覆分類図は現実に即したものである可能性が高い。

ここで、植生、特にネザサとススキの分布傾向は地形に左右されることから、ルート上だけにとどまらず、土地被覆分類図全体においても、ネザサはおよそランプロファイアーが密に分布するようなドリーネ地形で、ススキは石灰岩による平坦地で勢力を拡大する傾向が見られると予想される。次章では、本章で作成された土地被覆分類図と、より詳細な現地調査の結果から、特にネザサの分布好適地を明らかにする。

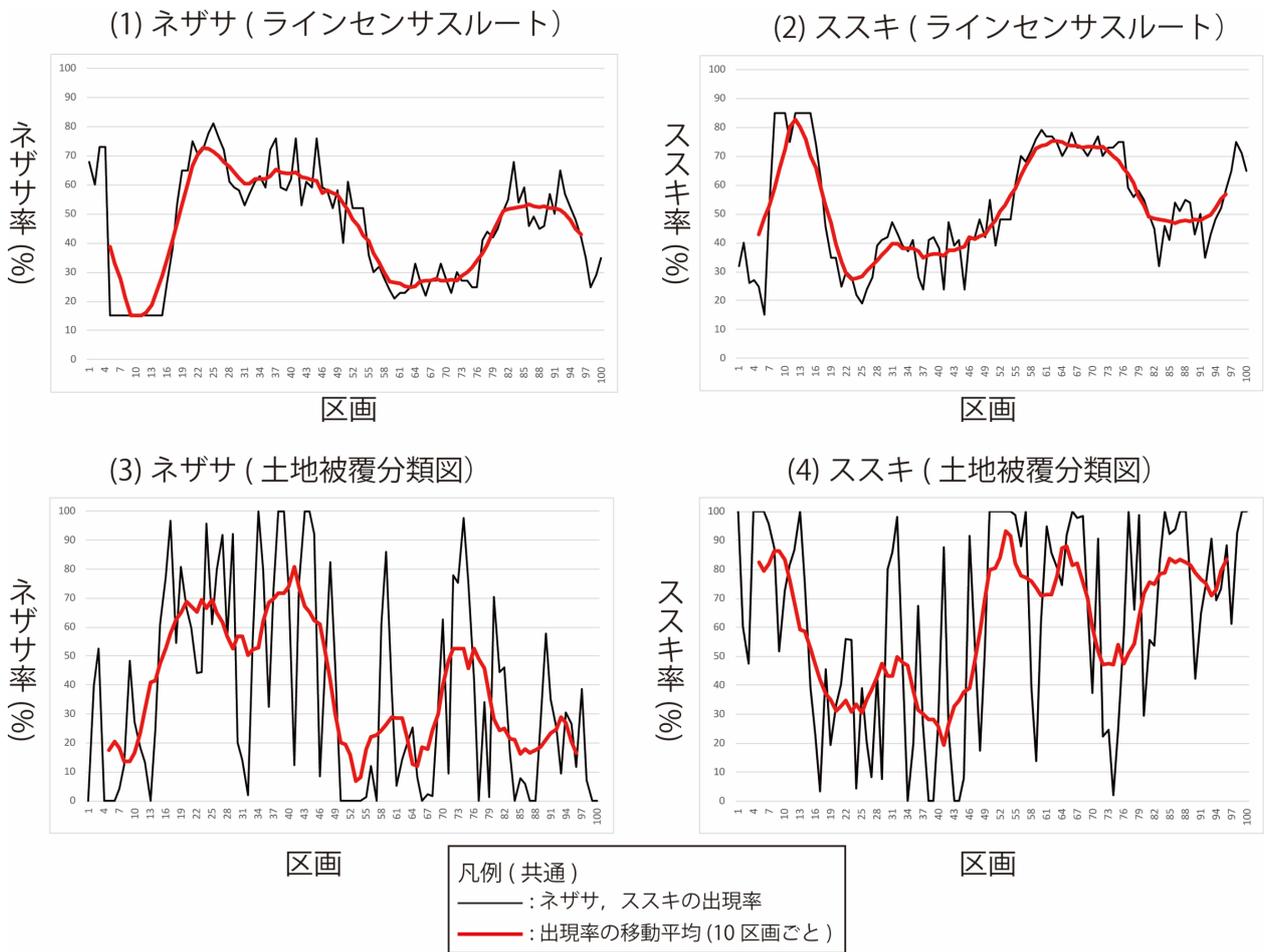


図 4.10 ラインセンサスルートと土地被覆分類図でのネザサ, ススキの分布割合のグラフ及び 10 区間移動平均 (著者原図)

4.9 本章のまとめ

デジタル化空中写真を GIS ソフトで人工衛星データと同じ取り扱いで教師付最尤法分類を行い、カルスト台地平尾台の草原について土地被覆分類図を作成したところ、セルサイズ 1m で精度よくかつ簡便に作成することができた。本章の結果を以下に示す。

1)土地被覆分類図の平均精度は、空中写真のみの最尤法分類で 89.0%, RGB+近赤外域データで 91.3%, RGB+近赤外域データ+傾斜角分布図で 94.8%であった。また、特に近赤外域データをコンポジットすると植生の分類精度が向上した。さらに傾斜角分布をコンポジットすると、分布傾向に地形の影響を受けると考えられるネザサやススキ、裸地の分類精度が高まった。

2)ラインセンサスルートを用いた現地調査の結果から、ランプロファイアーによるドリーネ近傍の地形ではネザサが優勢で、石灰岩による平坦地ではネザサの勢力を衰え、ススキやセイタカアワダチソウがネザサ群落に侵入する様子が明らかとなった。よって、これらの出現傾向は無秩序ではなく、地形に関連した一定の規則性が見られることが分かった。

3)土地被覆分類図におけるネザサとススキの出現傾向は、現地調査との出現傾向に近似性が見られた。よって、作成された土地被覆分類図に表現される植生分布は現実に即したものである可能性が高い。

第5章

土地被覆分類図を用いた地表面環境解析

～平尾台におけるネザサの分布好適地を例に

5.1 はじめに

前章の結果より，平尾台におけるネザサとススキの出現率には地形と関連する規則性が見られたが，それはあくまでラインセンサスルート上でのみの結果である。平尾台の草原全体についての植生分布の規則性を各種地表面環境と関連付けて明らかにするためには，詳細な植生調査を草原全体で行う必要がある。このような場合，本研究が新規提案する空中写真を用いたリモートセンシングの技術を活用できれば，労力の軽減や時間効率の点において有利であると考えられる。

そこで本章では，前章で作成された土地被覆分類図(図 4.7(3))と各種地表面環境の状態を示す地理情報をオーバーレイ解析することで，平尾台の特にネザサの生育好適地を明らかにし，それが地表面環境の特性を反映した分類図となっているか検討する。ただし，本研究のような空中写真をベースに複数地理データコンポジット画像を用いた最尤法分類の研究事例がほとんど存在しないため，本章ではデジタルカメラを用いた独特な方法を用いて詳細なグランドトゥルース*¹を実施し，現実に即した結果が得られたか検証する。

なお，本章は著者らの投稿論文[1]にて報告したものを骨子としている。

5.2 本章の目的

本章では解像度 1m の，特に植生に着目した土地被覆分類図と環境指標分布図をオーバーレイ解析する

ことで、平尾台の草原の地表面環境を明らかにする。さらに、詳細なグラントゥルースを行う目的で、デジタルカメラによるリモートセンシングによる土地被覆分類図の作成を行い、その手法の整理や現実に即した分類となったか検討する。本章の目的を以下の3点にまとめる。

1)前章で作成した土地被覆分類図(図 4.7(3))と地形分類図と地表面環境指標を示す地理情報を用いたオーバーレイ解析により、特にネザサの分布好適地明らかにして、後述のグラントゥルース結果と調和的であるか確認し、本研究手法による土地被覆分類図が、地表面環境を反映した分類図となっているか検討する。

2)選定した一ヵ所のドリーネ全体の土壌環境(ph, 土壌水分量)を精密に観測してこれを GIS ソフトでラスター型データの分布図とし、さらにドリーネをデジタルカメラで撮影した画像を最尤法分類することで詳細な植生分布図を作成して、これらをオーバーレイ解析することで、平尾台のドリーネ周辺における植生の分布好適地を明らかにする。なおこの結果を、グラントゥルースに使用する。

3)最後に、カルスト台地平尾台の自然環境を植生に着目して総合的にまとめ、本研究手法が草原における地表面環境調査に有効な手段となることを示す。

5.3 平尾台の植生に関する既往研究概説

本章で分類対象とする植生、特にネザサと、ススキおよびセイタカアワダチソウについて、その生育環境に関する既往研究を概説する。

ネザサを含むササ類は土壌酸性度が高くなるほど分布を拡大するという結果が得られており[2]、地下茎を通じて個体間が酸素を供給しあうため、乾燥・湿潤地を問わず分布を拡大させることができると言われている。次にススキは比較的好酸性の植生であるが、中性あるいは微塩基性の土壌でも他の初期生長の早い競合植生がない場合は十分生育可能とされている[3]。一方セイタカアワダチソウは、土壌 pH3 以下ではほとんど生育しないが、それ以上では一定して盛んに生育し、特に pH6 から 8 にかけて最も生

育が進むとされ[4], 他の植生への侵略性が高い外来種として知られており, 地下茎を伸ばし栄養生長が盛んで, 草丈が高いことから, 侵入すると他の草本植物を被陰して優占群落を作る特徴があるとされる[5]。

5.4 土地被覆分類図を用いた環境調査方法

人工衛星データを用いたリモートセンシングでは, 反射率データを用いたバンド間演算による地表面環境の定量解析が日常的に行われている。代表的なものとして, NDVI(正規化植生指数: Normalized Difference Vegetation Index) * 2, NDWI(正規化水指標, Normalized Difference Water Index) * 3 そして NDSI(正規化土壌指数, Normalized Difference Soil Index) * 4 があり [6], これらはまとめて NDXI とも呼ばれ [7], 本章でもそれにならう。本研究では, 土地被覆分類図(図 4.7(4))を NDXI 分布図と地形分類図とオーバーレイ解析する(図 5.1)。

地形に関しては, 空中写真を用いてその分類図を作成した(図 5.2(1))。地形分類は, ドリーネ底, 谷・斜面, 平坦地, 丘陵の 4 分類とした。谷と斜面は空中写真で判読できなかったため一括した。丘陵は研究対象地域南東部と北西部にあり, 石灰岩以外の地質からなる地形であり, 比較的傾斜が急である。

図 5.2 は ALOS AVNIR2(表 2.1)をバンド間演算することで作成した研究対象地域内の NDVI 分布図, 図

土地被覆分類図を用いた地表面環境の解析

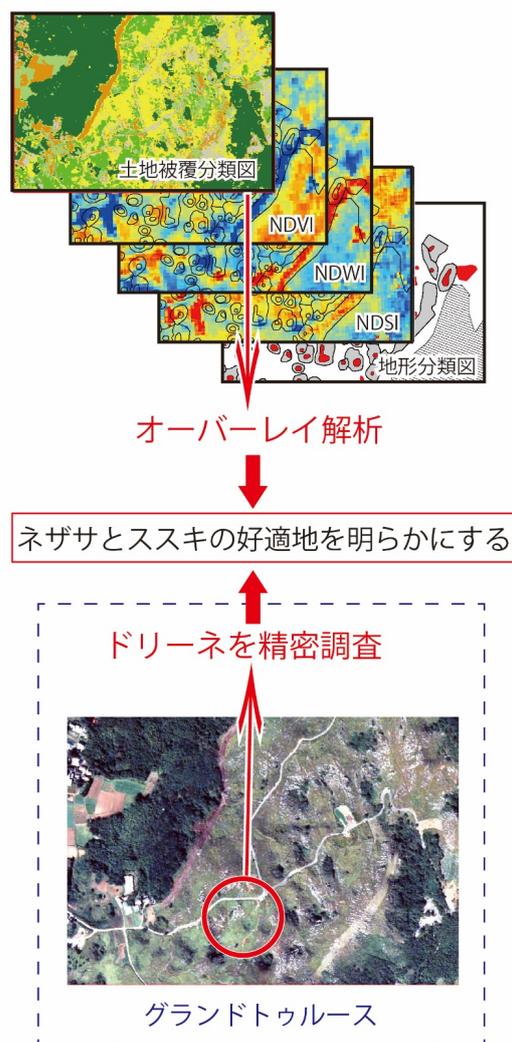


図 5.1 本章における研究のイメージ (リモートセンシングにより得られた土地被覆分類図の結果を, グランドトゥルースにより検証する)(著者原図)

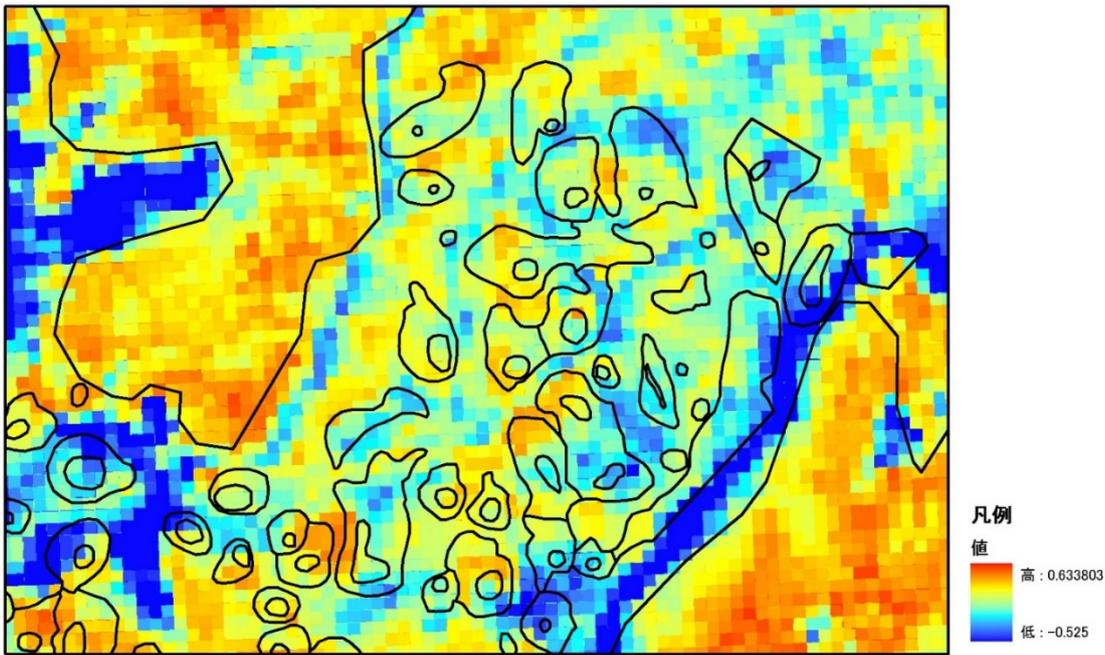


図 5.2 研究対象地域の NDVI 分布図 (値は DN 値。地形については図 4.2(1)を参照)(著者原図)

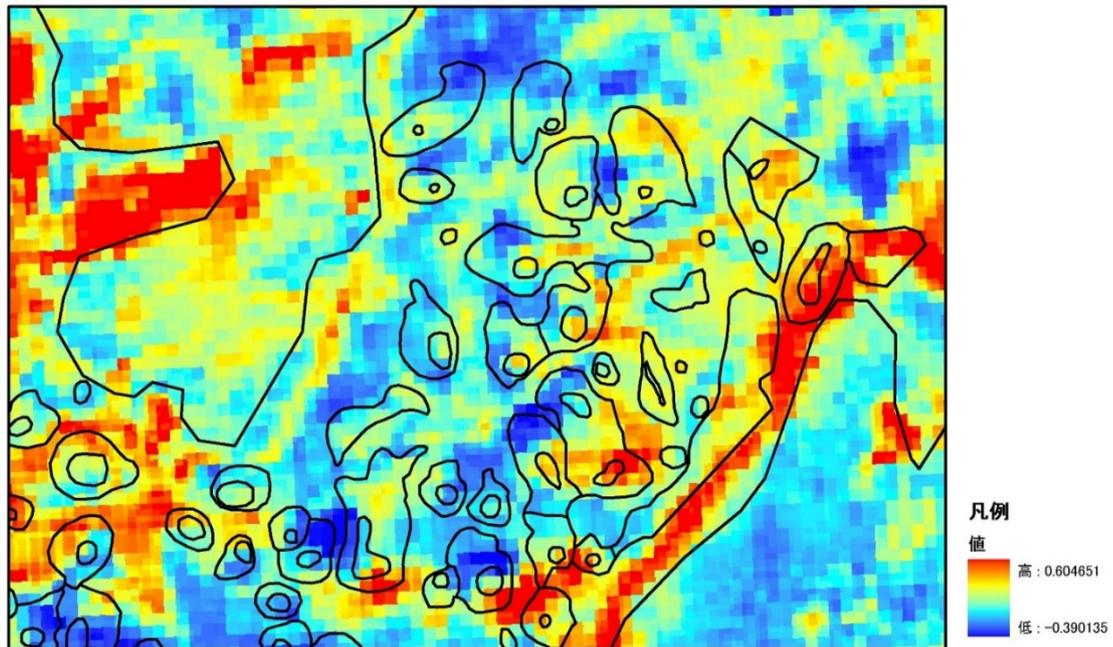


図 5.3 研究対象地域の NDWI 分布図 (値は DN 値。地形については図 4.2(1)を参照)(著者原図)

5.3 は NDWI 分布図，図 5.4 は NDSI 分布図である。NDVI 分布図は平尾台の植生に対する活性度を明らかにするために，NDWI 分布図は平尾台における地表の帯水状況を明らかにするために，そして NDSI 分布図は平尾台における地表面土壌の状態を明らかにするために作成した。

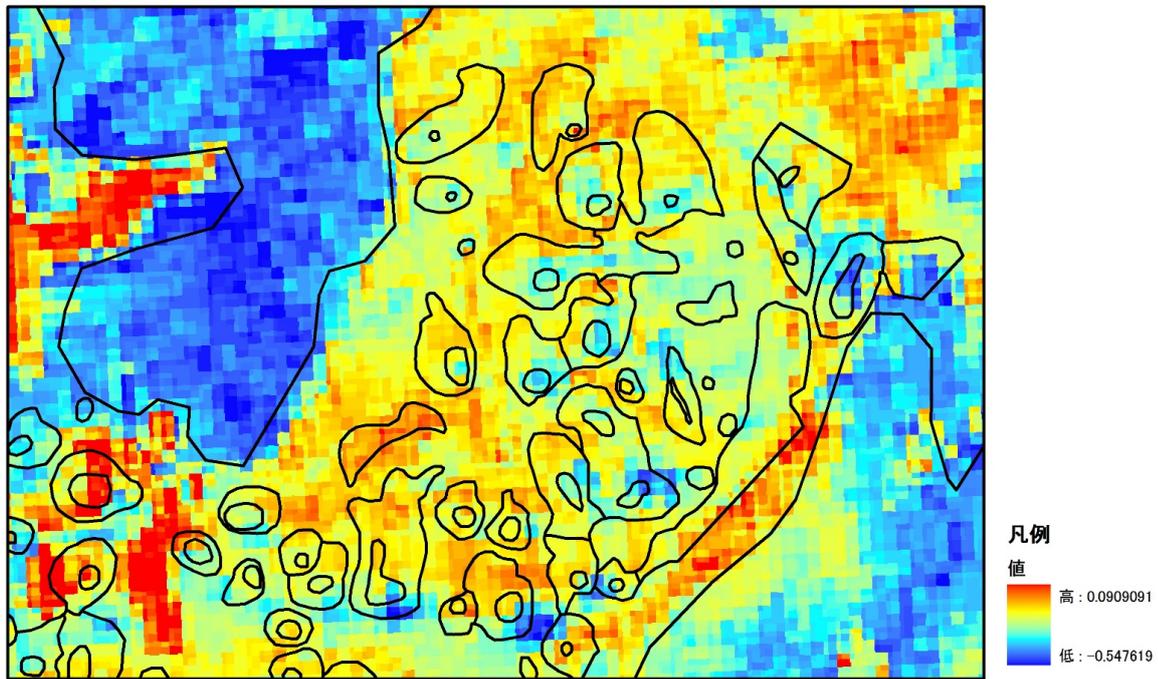
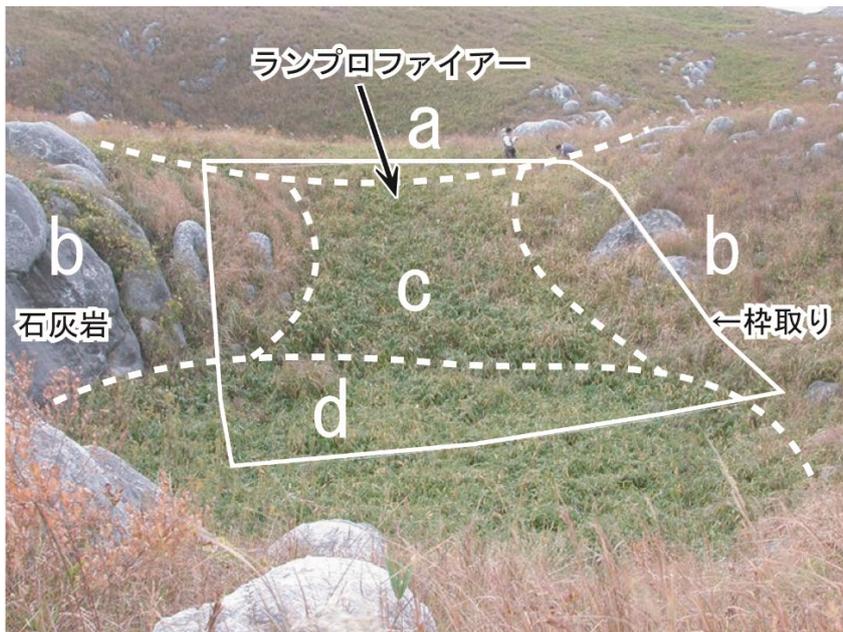


図 5.4 研究対象地域の NDSI 分布図 (値は DN 値。地形については図 4.2(1)を参照)(著者原図)



地形区分
a(平坦地), b(斜面), c(谷), d(ドリーネ底)

図 5.5 精密調査ドリーネとその地形区分(参考文献[1]より一部改変)

これら NDSI 分布図をネザサの分布域とオーバーレイ解析すれば、植生がどのような地表面環境の下で生育しているかが明らかとなると考えられる。

5.5 ドリーネ調査方法

本研究では、選定した一カ所のドリーネを対象にして土壌酸性度と土壌水分量を精密に測定し、地形ごとの土壌特性を明らかにする。さらに、デジタルカメラでドリーネの植生を撮影し、その画像を最尤法分類することで地形ごとの植生分布を詳細に明らかにする。

デジタルカメラで撮影および土壌調査を精密に行ったドリーネを図 5.5 に、その位置を図 4.2(1)に示す。このドリーネを本章では便宜的に精密調査ドリーネと呼称する。

精密調査ドリーネを概観すると、人が通行可能な遊歩道となっている石灰岩からなる平坦面から斜面を下りドリーネ底に至るもので、ほぼ中央にランプロファイアーによる谷が存在している。精密調査ドリーネの地形分類図を図 5.5 に示す。現地調査での観察によれば、谷とドリーネ底には、ネザザを中心とする植物が分布していたが、石灰岩による斜面には石灰岩が露出し、茶褐色に色づいた枯れ草が多かった。セイタカアワダチソウは、ネザザのようにまとまって群生することは少なく、様々な地形上に散在して分布していた。以下より精密調査ドリーネの具体的な調査方法を記す。

5.5.1 土壌調査

精密調査ドリーネを東西 13m、南北 19m で枠取り(図 5.5)、その中を 1m×1m に分割し、その格子点(280 点)で土壌酸性度(pH)と土壌水分(≒土壌湿度、%)を測定した。これらの測定には、土壌酸度計(竹村電機製作所製土壌酸湿度測定器 DM-5 型)を使用した。測定点を GIS ソフトでポイントデータとし、土壌水分量と土壌酸性度を属性として入力した。これを、GIS ソフトで内挿し、セルサイズ 10cm の高分解能なラスターデータに変換することで、精密調査ドリーネの土壌酸性度と水分量の分布図を作成した(図 5.6)。なお、これら測定は 2006 年 11 月 15 日に実施した。

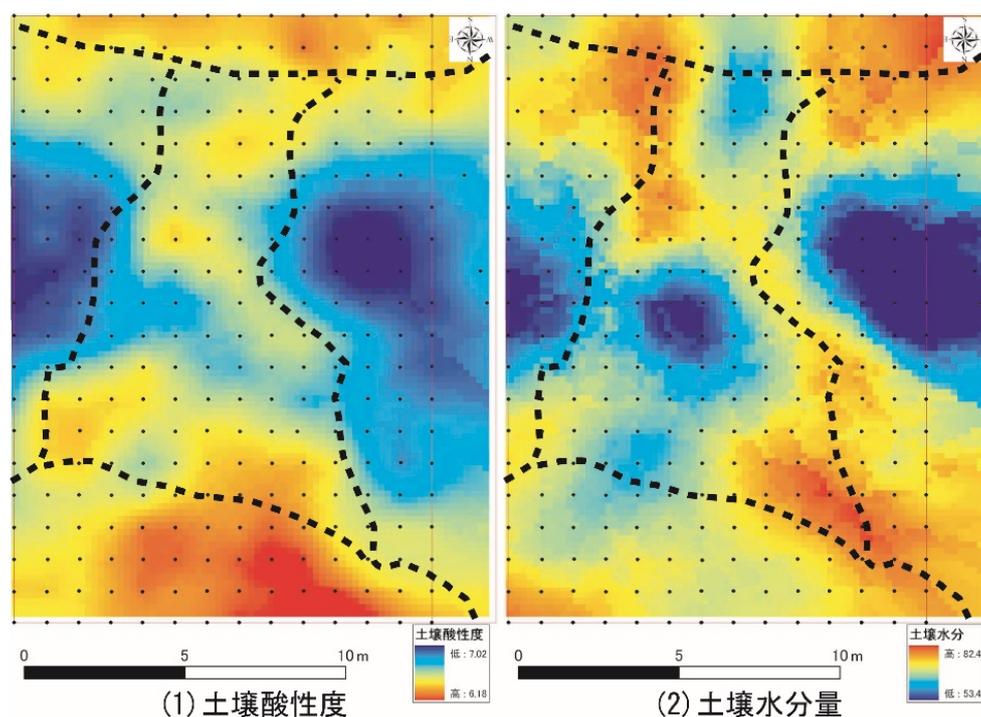


図 5.6 精密調査ドリーネの(1)土壌酸性度(ph), (2)土壌水分量(%) (地形分類図は図 5.5 を参照)

(参考文献[1]より一部改変)

5.5.2 デジタルカメラによる植生調査

十数 m 四方とはいえ(図 5.5), ドリーネ全体の植生を種類に分けて計数するには多大な労力が必要である。そこで本研究では, 精密調査ドリーネとその近傍の平坦地における植生分布及び植物活性度(NDVI)をデジタルカメラ画像の最尤法分類で明らかにする。

撮影は 2006 年 11 月 15 日に実施した。デジタルカメラはニコン COOL PIX990(レンズ径 28 mm)を使用した。フィルターは富士フィルム製の IR84 光吸収・赤外線透過, SC74 紫外線吸収, SC64 紫外線吸収, SC68 紫外線吸収の 4 種類のハイパスフィルターを使用した。

デジタルカメラの撮影条件は, モノクロモード, 解像度は fine(1024×768), 焦点距離は無限遠とした。チェック用の通常のカラー画像の撮影後, フィルター撮影を 4 回行った。シャッタースピードは IR84 と SC74 装着時は 8 秒, SC64 と SC68 装着時は 1/4 秒とした。以後, 例えば SC64 のフィルター撮影による写真画像は SC64 画像と呼ぶ。なお, 使用したデジタルカメラには赤外域の光をカットするフィルターが

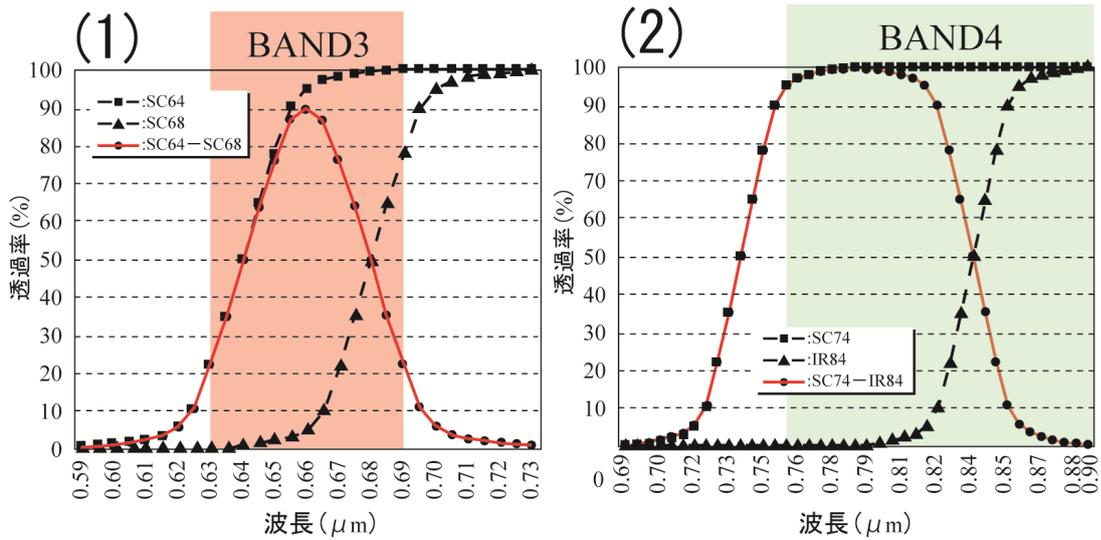


図 5.7 光の波長と透過率との関係 (1)LANDSAT TM band3, (2)LANDSAT TM band4

(参考文献[1]より)

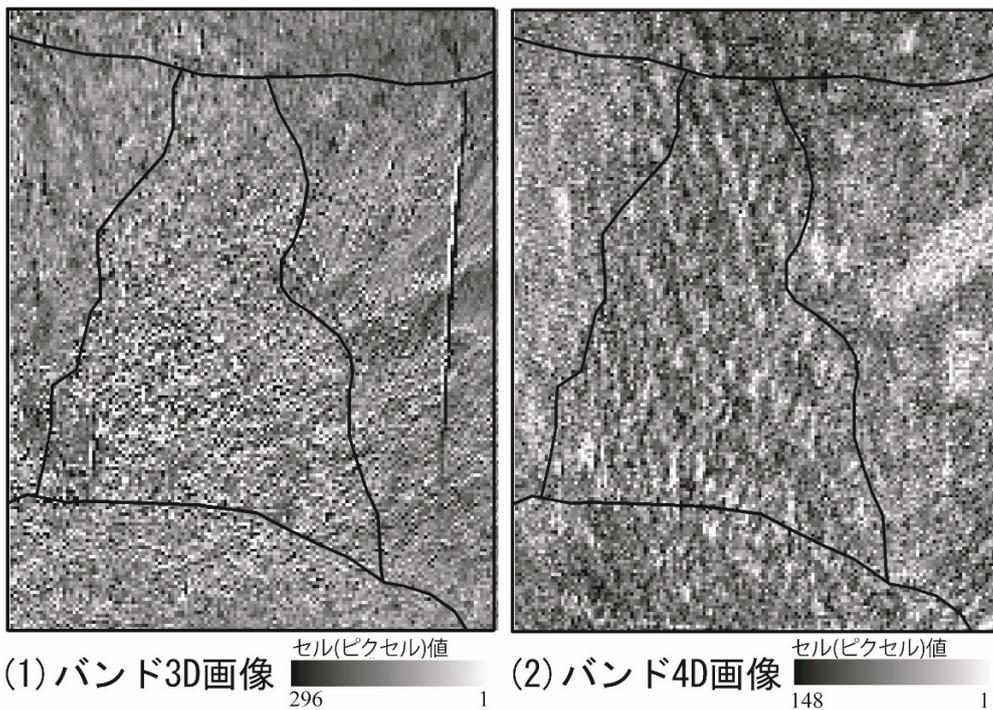


図 5.8 (1)バンド 3D 画像と(2)バンド 4D 画像 (地形分類は図 5.5 を参照)(参考文献[1]より)

内蔵されており、シャッタースピードが短いと赤外域の光を十分に取得できないため、IR84 と SC74 装着時のシャッタースピードは遅くする必要があります。

撮影した画像は GIS ソフトで幾何補正をする必要があるので、精密調査ドリーネの四隅に一辺 25cm の

アルミ箔で作成した反射板を設置し、これを GCP(Grand Control Point)とした。次に、解析対象とするドリーネ全体をメジャーで東西 13m×南北 19m の長方形に枠取りし撮影した(図 5.5)。

撮影した SC64 画像を画像処理ソフトの Adobe 社製 PhotoShop でメジャー枠内だけを切り抜き、これを GIS ソフトで直交座標系の座標を与え、アフィン変換で縦 19m、横 15m の長方形に位置合わせをした。残りの 3 画像は SC64 画像の GCP を目標にアフィン変換で位置を合わせた。なお、図形を変形させないアフィン変換では地形のゆがみを補正できないが、本研究の目的は植生分布と地表面環境の関連性を検討することなので、簡易的に平面化するにとどめた。

図 5.7(1)に SC64 画像と SC68 画像に取得された光の波長と透過率との関係のイメージを示す。例えば 0.64 μm よりも長波長の光を透過させる SC64 は、0.64 μm 波長の光を 50%透過させ、それよりも長波長の光はより多く透過させる。SC68 画像の特性も同様の考え方をする。同じ撮影条件で両フィルターを介した撮影画像の差分は、図 5.7(1)の実線で示されるグラフで表される。各フィルターのグラフは、取得する反射率データの積分値に読み替えられるため、その差分は約 0.66 μm 付近を中心とする波長帯の反射率データとなる。この差分値は可視域の R(赤)に対応する LANDSAT TM データの band3(0.63 - 0.69 μm)に近い。そのため、本章ではバンド 3D と称する(人工衛星データとの混同を避けるため、band ではなくバンドと表現する。また、D は Digital Camera より)。SC74 画像と IR84 画像の差分値は、図 5.7(2)の実線で示されるグラフで表される。この差分値は約 0.79 μm を中心とする波長帯の反射率データで、近赤外域に対応する LANDSAT TM データのバンド 4(0.76 - 0.90 μm)の短波長側に偏っているが、本章ではバンド 4D と呼称し、近赤外域の波長帯データとして取り扱う。バンド 4D の波長帯は、光合成に関わるクロロフィルの含有量に関係するレッドエッジ(0.68 μm - 0.75 μm)に近く、植生の生育状況の把握に適していることが期待できる。

図 5.8(1)は、SC64 画像と SC68 画像の差分値に正值への調整値(78)を加えたセルの値が 1~269 のバンド 3D 画像である。図 5.8(2)は、SC74 画像と IR84 画像の差分値に正值への調整値(118)を加えた値 1~148 のバンド 4D 画像である。図 5.8(2)は、セルの値が高いほど暗く、低いほど明るく表示しているが、図 5.8(1)と見比べてみると、露出している石灰岩と茶褐色の枯れ草の値は全体的に低く、植物が緑色に生い茂る地点では値が高い。これは、前者に比べて後者は近赤外域の波長の光を後者より反射していることを示す。

本研究ではドリーネ地形と平坦地における植物活性状況を詳細に把握するために、バンド3D画像とバンド4D画像からNDVI分布図作成を試みる。NDVI値は、LANDSAT TMデータを例にすると、

$$\text{NDVI 値} = (\text{band4} - \text{band3}) \div (\text{band4} + \text{band3})$$

で求められるので*2, 精密調査ドリーネのNDVIは以下の式で求めることができる。

$$\text{NDVI 分布図(図 5.9(2))} = \{(\text{図 5.8(2)} - \text{図 5.8(1)}) \div (\text{図 5.8(2)} + \text{図 5.8(1)})\}$$

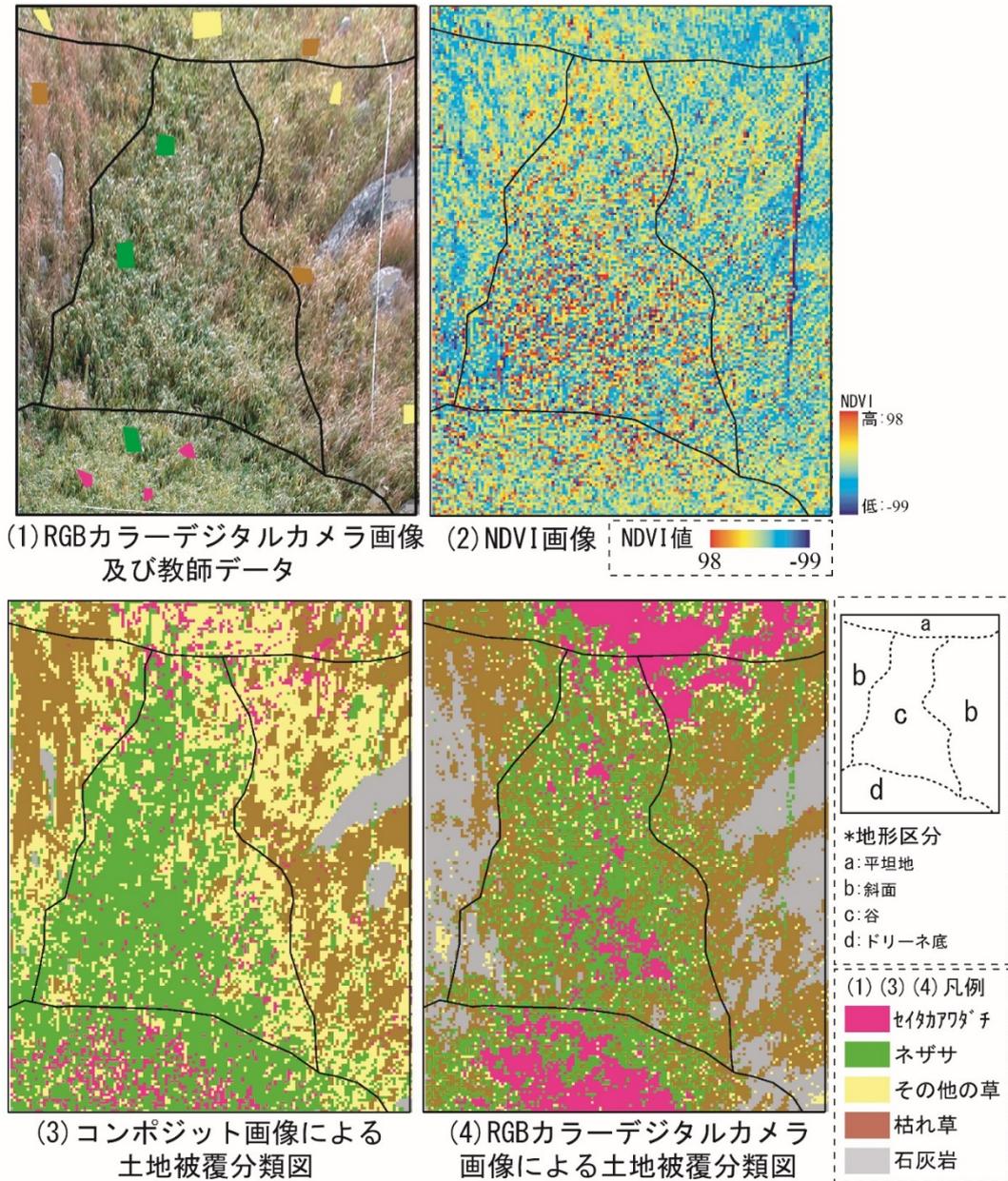


図 5.9 (1)カラーデジタルカメラ画像と教師データ, (2)NDVI 画像, (3)コンポジット画像によるドリーネ被覆分類図, (4)デジタルカメラ画像のみのドリーネ被覆分類図(参考文献[1]より)

図 5.9(2)を見てみると、撮影の際に写りこんだ砕取りメジャーや、露出している石灰岩の値が低い。また、ランプロファイアーでは値が高く、その両側のドリーネ斜面では低い。図 5.9(1)と見比べても明らかであるが、NDVI 値が低いドリーネ斜面は茶褐色の枯れ草が多く、ランプロファイアー上の植物は緑色を呈していて、光合成を行っていると考えられる。したがって、図 5.9(2)は現実的な NDVI 値の分布を示すものと考えられる。

5.5.3 デジタルカメラ画像を用いた土地被覆分類図の作成

取得したバンド 4D 画像をカラー撮影したデジタルカメラ画像とコポジットした画像を使用して、最尤法分類による土地被覆分類図を作成した。本研究ではこの土地被覆分類図を便宜的にドリーネ被覆分類図と呼称する。ドリーネ被覆分類図作成に用いた画像は、チェック用のカラー画像(図 5.9(1))とバンド 4D 画像(図 5.8(2))をコンポジットして作成したものである。ドリーネ被覆分類図のセルサイズは 10cm とし、分類項目はネザサ、セイタカアワダチソウ、その他の草、光合成を行っていない枯れ草、露出している石灰岩の 5 分類とした。ススキに関しては群生せず独立して散在し、教師データを取得するのが困難であるため、その他草に含めた。図 5.9(3)は 4 バンドのコンポジットデジタルカメラ画像で分類したドリーネ被覆分類図、精度比較のための図 5.9(4)は RGB のみで記録されている図 5.9(1)を教師付最尤法分類したものである。なお、教師データの取得地点(図 5.9(1))は、両者とも同地点である。

5.6 土地被覆分類図を用いた平尾台におけるネザサ好適地の検討

本節では土地被覆分類図(図 4.7(3))と地形分類図(図 4.2(1))及び NDXI(図 5.2, 5.3, 5.4)とのオーバーレイ解析を通じて、平尾台のネザサの生育好適地を地表面環境と関連付けて考察する。まず、土地被覆分類図における分類項目ごとの平均 NDXI を算出した(図 5.10)。次に、地形と NDXI との関連性を明らかにするために、地形分類図と各 NDXI 分布図をオーバーレイし、地形ごとの平均 NDXI 値も算出した(図 5.11)。これらの解析にはゾーン統計機能を用いた*5。

まず、NDVI(図 5.2)を土地被覆分類図(図 4.7(3))と合わせて見てみると、解析地域北西と南島の雑木による丘陵の森林で NDVI 値が高く、耕作地などに利用される裸地は総じて低い。また、図 5.10(1)を見てみると、ネザサが樹林に次いで高く、その生育状況のよさがうかがえる。地形ごとの平均 NDVI(図 5.11(1))を見てみると、雑木による森林が繁茂する丘陵で値が高く、平坦地で最も低い。ドリーネ底と谷・斜面はその中間の値を示す。よって、平坦地では植生の育成状況があまり良好ではなく、ドリーネ底と谷・斜面では比較的植生の育成状況がよいことが分かる。

次に NDWI(図 5.3)を土地被覆分類図(図 4.7(3))と合わせて見てみると、裸地では高く、草原や雑木などの緑地で低い傾向が見られる。土地被覆ごとの NDWI 値を平均してみると(図 5.10(2)), ネザサとその他草での値が高く、石灰岩地で最も低くなる。地形ごとに平均 NDWI を見てみると(図 5.11(2)), ドリーネ底での値の高さが目立ち、谷・斜面と丘陵で低い。一方平坦面はドリーネ底について値が高い。ここで、佐藤(1983)によれば、カルスト地形である八幡浜市真穴地区は、降水

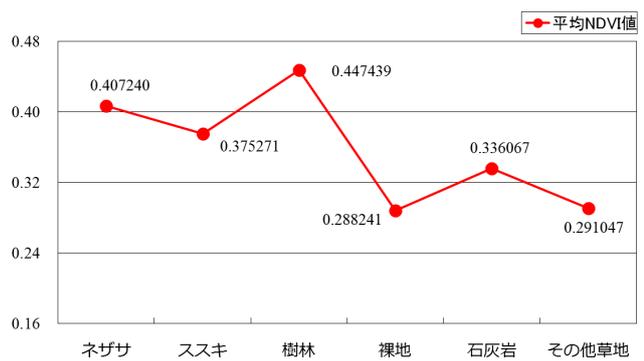


図 5.10 (1)分類項目ごとの平均 NDVI 値 (DN 値)(著者原図)

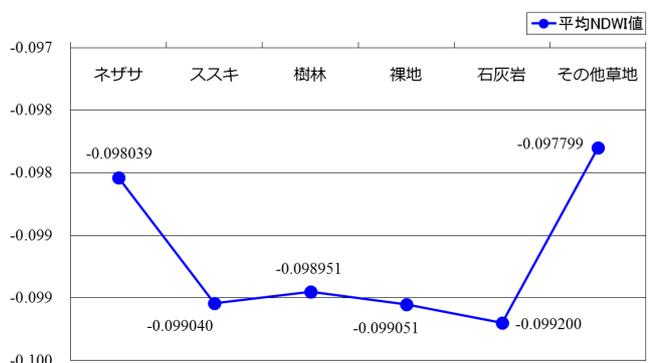


図 5.10 (2)分類項目ごとの平均 NDWI 値 (DN 値)(著者原図)



図 5.10 (3)分類項目ごとの平均 NDSI 値 (DN 値)(著者原図)

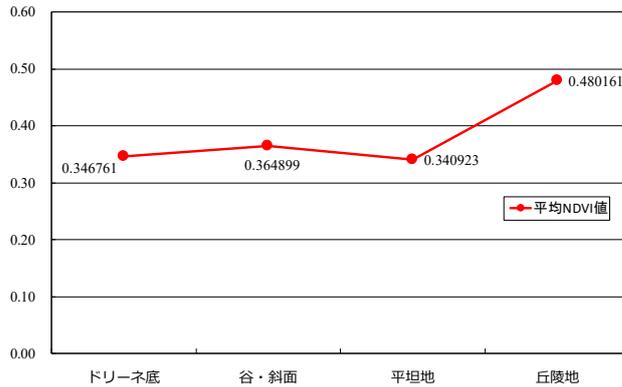


図 5.11 (1)地形ごとの平均 NDVI 値 (DN 値)(著者原図)

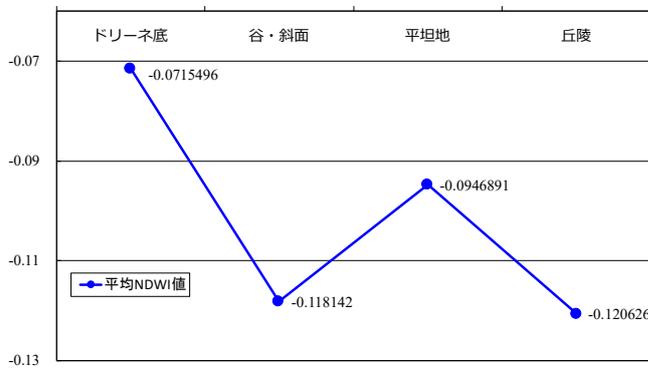


図 5.11 (2)地形ごとの平均 NDWI 値 (DN 値)(著者原図)

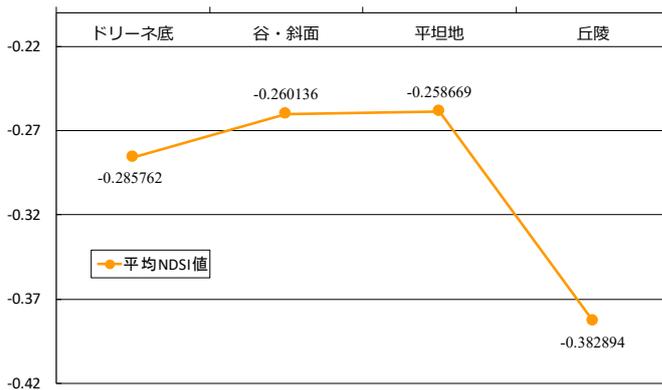


図 5.11 (3)地形ごとの平均 NDSI 値 (DN 値)(著者原図)

の影響で斜面部よりも尾根部(本研究の平坦地にあたる)の方が多く水分が含まれるという結果を得ている[8]。その理由として、秋季の降雨をその一つに挙げている。本研究においても11月の晩秋に調査を行ったため、降雨があまり蒸発せずに平坦地の土壌中に含水しやすかった環境にあった可能性がある。

最後に、NDSI(図 5.4)と土地被覆ごとの平均 NDSI を見てみると、雑木による樹林が突出して低い。次いでその他草とネザサが低い。平均 NDSI 値が高いのは、ススキと石灰岩であった。ここで、NDSI は地表における土壌の存在量を示す指標であり、竹内(2004)によれば、植生よりも裸地のような土壌が露出する範囲の値の方が高くなると言及しており[8]、これは本章での結果(図 5.10(3))と調和的である。地形ごとの平均 NDSI(図 5.11(3))を見てみると、雑木による森林が繁茂する丘陵で突出して低く、次いでドリーネ底で値が低い。ドリーネ底はネザサが繁茂するとともに、雑木も一部見られることから(図 4.1, 図 4.2(1)), 土壌が露出しておらず、高密度に植生が繁茂している様子が伺え

る。谷・斜面と平坦地は NDSI 値が低く、ドリーネ底でのネザサのように高密度に群生することなく、土壌が表に露出している可能性が高い。よって、ドリーネ底はネザサが繁茂し土壌があまり露出せず、谷・斜面や平坦地では土壌が露出することが多い。すなわち谷・斜面と平坦地はネザサをはじめ植生の生育状況があまりよくない可能性が高い。

以上より、ネザサはランプロファイアーによるドリーネ底のような高水分の地形を最好適地として繁茂していることが明らかとなった。なお、今回ランプロファイアーによる谷と石灰岩地の斜面は本章では同じ地形として取り扱ったが、谷は線状の狭小地形であるため(図 4.2(1)), 本研究で作成した土地被覆分類図には、谷についての地表面環境は反映されていない可能性が高く、石灰岩の斜面のみを反映していると推測される。次節より、この結果がグランドトゥルース結果と調和的であるか検討する。

5.7 グランドトゥルース

本節では前節で明らかになったネザサの最好適地が、現実に即した結果となったかグランドトゥルースを通じて検証する。

まず、デジタルカメラによるドリーネ被覆分類図の分類精度を確かめる。次にデジタルカメラ画像を用いて作成した NDVI 画像と土壌調査によって得られた土壌酸性度・水分量分布図をドリーネ被覆分布図とオーバーレイし、特にネザサに着目してその分布好適地を明らかにし、本研究手法による土地被覆分類図による解析結果が現地調査結果と調和的であることを確認する。

5.7.1 デジタルカメラ画像による土地被覆分類図の精度

RGB で記録されたデジタルカメラ画像(図 5.9(1))と、バンド 4D 画像(図 5.8(2))をコンポジットした画像によるドリーネ被覆分類図(図 5.9(3))を見てみると、露出した石灰岩と植物は明瞭に区分されている。また斜面の枯れ草と、ランプロファイアーによる谷において緑色で光合成を行っている植物も明瞭に区分されていて、写真(図 5.9(1))と比べてみても現実の土地被覆に近い。しかし、影の部分がその他の草に分

表 5.1 (1)デジタルカメラ画像による分類精度(%), (2)コンポジットデジタルカメラ画像による分類精度(%)(著者原図)

(1)RGB空中写真	ネザサ	セイタカアワダチ	その他の草	枯れ草	石灰岩
ネザサ	52.1	16.8	9.2	21.8	0.0
セイタカアワダチ	2.8	77.8	16.7	2.8	0.0
その他の草	5.9	62.5	3.7	27.8	0.0
枯れ草	15.4	11.0	8.8	61.5	3.3
石灰岩	0.0	0.0	0.0	2.2	97.8
平均精度					58.6

(2)コンポジット	ネザサ	セイタカアワダチ	その他の草	枯れ草	石灰岩
ネザサ	90.8	6.7	2.5	0.0	0.0
セイタカアワダチ	11.1	69.4	16.7	2.8	0.0
その他の草	5.9	14.7	77.2	2.2	0.0
枯れ草	0.0	2.2	0.0	97.8	0.0
石灰岩	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
平均精度					87.0

類されたり、石灰岩がネザサに分類されたりしている箇所も見られるなどの誤分類がある。次にデジタルカメラ画像のみのドリーネ被覆分類図(図 5.9(4))を見てみると、図 5.9(3)の分類結果とおおよそ似ているが、斜面での石灰岩の誤分類や、ドリーネ底と平坦地でのセイタカアワダチソウの誤分類も目立つ。

表 5.1 に精度判別表を示す。また、各分類項目の反射率特性を明らかにするために、図 5.9(3)を近赤外域

の反射率データであるバンド 4D 画像(図 5.8(2))とオーバーレイし、各分類項目における平均バンド 4D 値を算出した(表 5.2)。表 5.1 を見てみると、全体的な傾向としてコンポジットデジタルカメラ画像を用いた最尤法分類の方がセイタカアワダチソウを除いて分類精度が高くなる。デジタルカメラ画像のみでの分類精度が 3.7%と非常に悪かったその他の草はセイタカアワダチソウへの誤分類が目立つが、コンポジ

表 5.2 精密調査ドリーネにおける各分類項目における平均バンド 4D 値(著者原図)

	平均セル値
セイタカアワダチソウ	126.128
ネザサ	123.132
その他草	127.599
枯草	123.103
石灰岩	120.335

ットデジタルカメラ画像を使用することで77.2%にまで分類精度が高まった。ここで、その他草とセイタカアワダチソウに分類された範囲のバンド4D平均値を見てみると(表5.2), 前者が127.599, 後者が126.128で約1.5の差がある。光合成を行う同じ「植物」の土地被覆であるが、その種類や活性度により近赤外域波長の反射率が多少異なることが知られている[6]。よって、両者の反射率の違いが図5.9(3)の分類精度の向上に反映されている可能性が高い。また、石灰岩の分類精度もコンポジットデジタルカメラ画像ではほぼ100%となる。ここで表5.4を見てみると図5.9(3)での石灰岩地の値が突出して低く、バンド4D画像が分類精度の向上に有効であったことが伺える。同様に枯草も植物の中で最も値が低く(表5.2, 図5.9(3))は光合成をしている植生とそうではない植生を正確に分類していると考えられる。

以上より、バンド4D画像を合成しコンポジットバンド化した画像データで最尤法分類したドリーネ被覆分類図(図5.9(3))は、人工衛星データを使用した場合の最尤法分類と同様な、近赤外域の反射率データを含む地表面の反射率特性を反映した高分解能かつ高精度な土地被覆分類図であると考えられる。

5.7.2 精密調査ドリーネにおけるネザサの分布好適地の検討

精密調査ドリーネにおける特にネザサの好適地を、デジタルカメラによる土地被覆分類図と地表面環境の地理データをオーバーレイ解析することで明らかにする。表5.3は精密調査ドリーネの地形ごとの土壤酸性度(pH), 土壤水分量(%), NDVI値の平均, 表5.4は精密調査ドリーネにおける地形ごとの植物出現割合である。

表5.3, 5.4を見てみると、土壤酸性度, 水分量, NDVI値が最も高い値を示すドリーネ底では、ネザサが優占種となっていて、枯れ草の比率が低く、植物の生育状況がよい。その他の草の分布も少なく、ネザサとセイタカアワダチソウで土地被覆率が8割以上となる。次いで土壤酸性度, 水分量, NDVI値が高い谷においてもほぼ同じ傾向が見られる。

NDVI値が低い値を示す平坦地と斜面では、枯れ草の比率が高い。土壤酸性度, 水分量とともにNDVI値も低い斜面では、枯れ草と石灰岩の分布比率をあわせて約50%と、他の地形に比べて光合成を行っている植物の分布比率が少ない。

平坦地はNDVI値が最も低い, 土壤酸性度, 水分量ともに高い値を示し, ドリーネ底やランプロファ

イアーでの植物の生育状況と同等となることが予想されたが、植物の分布は枯れ草が多く、ネザサは少ない。しかし、セイタカアワダチソウの分布比率はドリーネ底に次いで高い。

以上より、精密ドリーネおよびその近傍におけるネザサの最適地は、高水分・高酸性度のランプロファイアーによるドリーネ底であるとまとめられる。この結果は、前節の土地被覆分類図による検討結果と調和的である。従って、本研究のリモートセンシング手法による土地被覆分類図(図 4.7(3))は、現実に即した高解像度・高精度なものだと言える。

5.8 カルスト台地平尾台の地表面環境総合的考察

前節までの結果より、平尾台におけるネザサの分布傾向は、地質、地形、土壌特性が相互に関連しあうことで特徴づけられていると考えられる。そこで本節では、本章の結果を用いてカルスト台地平尾台の地表面環境を植生に着目して総合的にまとめる。

ここで、本節では NDWI を土壌酸性度に読み替えることでその関連性を見出す。NDWI(図 5.3)は地表における帯水状

表 5.3 精密調査ドリーネの地形ごとの ph, 土壌水分量, NDVI 値の平均(著者原図)

	平均土壌酸性度(ph)	平均土壌水分量(%)	平均NDVI
平坦地	6.47	76.7	-4.45
斜面	6.74	71.4	-3.87
谷	6.59	72.9	-1.85
ドリーネ底	6.39	74.7	-1.52

表 5.4 精密調査ドリーネにおける地形ごとの植物出現割合(著者原図)

平坦地での平均分布割合(%)			
ネザサ	ススキ含むその他草	セイタカアワダチ	枯れ草
11.0	46.4	12.3	30.3
斜面での平均分布割合(%)			
ネザサ	ススキ含むその他草	セイタカアワダチ	枯れ草
10.3	41.9	2.4	45.5
谷での平均分布割合(%)			
ネザサ	ススキ含むその他草	セイタカアワダチ	枯れ草
60.0	30.4	4.1	5.4
ドリーネ底での平均分布割合(%)			
ネザサ	ススキ含むその他草	セイタカアワダチ	枯れ草
65.2	15.2	18.0	1.5

況を表す指標で、本研究では特にネザサが繁茂するドリーネ底で高まる傾向を得ている(図 5.10(2), 図 5.11(2))。また、グランドトゥルースでも同様の結果を得ている(図 5.6, 表 5.3)。よって、図 5.3 の NDWI 分布図は平尾台においては土壤酸性度の指標に読み替えできると考えられる。以下に、土地被覆分類図から得られたカルスト台地平尾台における地表面環境の関連性を、地形に特徴を与える地質を起点としてまとめるが、5.6 節で先述したように、本研究では地形分類において谷と斜面を一括したため、特に線状で狭小な谷の議論ができない課題が残った。

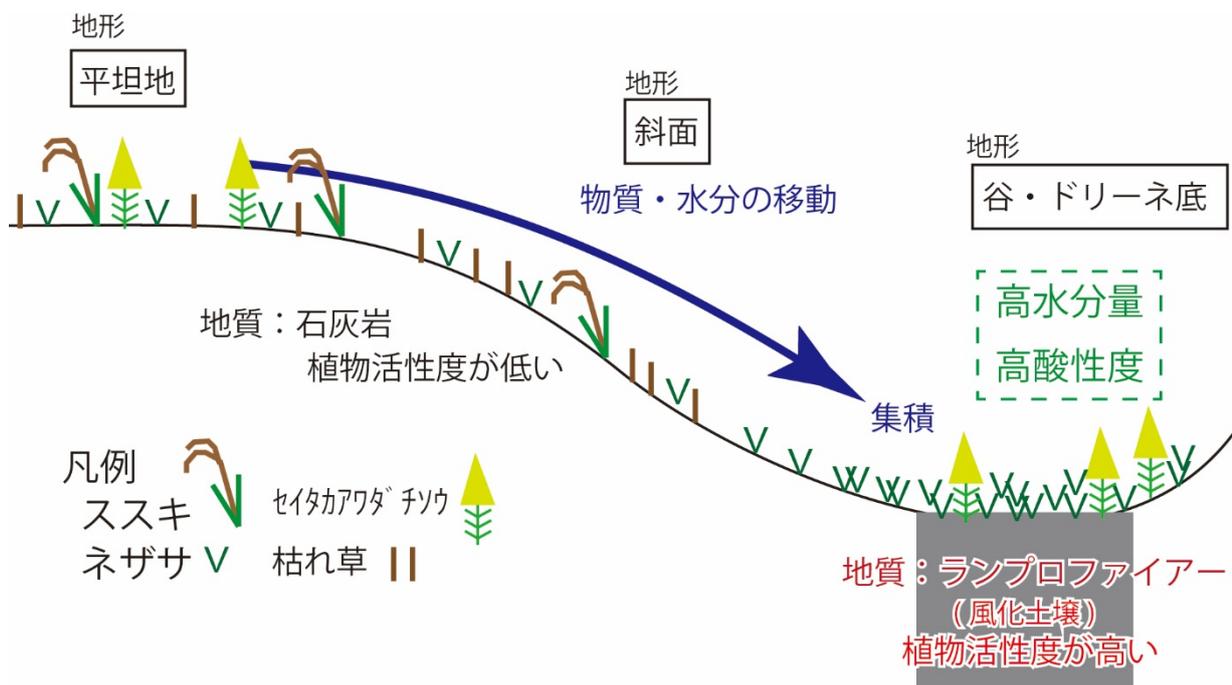


図 5.12 本研究の現地調査により明らかとなった平尾台の地表面環境のモデル(著者原図)

最後に、グランドトゥルース結果や既往研究を加味し、カルスト台地平尾台の地表面環境を総合的にまとめる。図 5.12 にそのモデルを示す。

ドリーネはすり鉢状の地形で、雨水を集めやすいので斜面や谷ではさかんに水分が移動し、受け皿にあたるドリーネ底には水分が集中するとされる[9]。ネザサはこのような高水分量・高酸性度なドリーネ底に地下茎を発達させて個体数を増やし、さらにセイタカアワダチソウの侵入も目立つ(図 5.9(3))。

ランプロファイアーは風化し土壌化していることが多いことからこれも石灰岩による斜面に比べると

高水分量・高酸性度となり、ドリーネと同様の植生分布を示す。谷は石灰岩地形で土壤水分も低く、植生は全体的に植物活性が低い。

平坦地は分布地形のなかで石灰岩が露岩することが多く、土壤水分量は高く、土壤酸性度も高い。このような条件下ではネザサ分布が縮小し、セイタカアワダチソウとススキが勢力を拡大する。ここで、平坦地では精密調査ドリーネの平坦地が通行可能な遊歩道になっていることから考えると、人々の出入りによって植物が踏み荒らされている可能性が高い[10]。また、平坦地でのセイタカアワダチソウの侵入が他の地形に比べて顕著であるが、これは人々の踏圧による土壤硬度の増大がセイタカアワダチソウの侵入を促進するという既存研究結果と調和的であった[11]。

5.9 本章のまとめ

本章では、本研究手法で作成されたローカル・スケールにおける土地被覆分類図を用いて特にネザサの分布最適地を、地形分類図、ALOS AVNIR2を用いた地表面の環境指標分布図(NDVI, NDWIおよびNDSI)とのオーバーレイ解析から明らかにし、それをグランドトゥルースによって検証した。その結果を以下に示す。

1)土地被覆分類図と地形分類図、NDVI とのオーバーレイ解析により、高 NDVI(植物活性度が高い)、高 NDWI(地表面の帯水状況が高い)、低 NDSI(土壤が露出せず植生が繁茂する)のドリーネ底をネザサが最適地とすることが明らかとなった。

2)デジタルカメラ画像から得た LANDSAT TM データの band3, band4 に近い反射率データから、現実的な NDVI 値を得た。また、一般的なデジタルカメラ画像と、その画像に近赤外域の反射率データ画像を合成したコンポジット画像を最尤法分類した場合、前者は誤分類が多いが、後者は誤分類が少なく、岩石と植物、枯れ草と緑色の草等を精度よく分類できた。

3)精密調査ドリーネにおけるネザサの最適地を、ドリーネ被覆分類図と地形、土壤酸性度、土壤水分量、

NDVI とのオーバーレイ解析で検討したところ、高酸性度、高水分量なドリーネ底であることが明らかとなった。この結果は土地被覆分類図と調和的であった。よって、本研究のリモートセンシング手法は、現実に即した地表面環境を詳細に捉えた土地被覆分類図を作成可能である。

4)NDWI を土壌酸性度に読み替えた場合、ネザサは風化土壌が堆積しやすく湿潤かつ土壌酸性度が高いドリーネ底に特に繁茂することが明らかになった。ただし、このような場所にはセイタカアワダチソウも侵入していることが分かった。

第 6 章

土地被覆と地形状況のオーバーレイ解析

～大分県大分川近傍を事例に

6.1 はじめに

前章までの結果より、本研究手法における空中写真を用いたリモートセンシングは、ローカルなエリアに対して地表面環境を反映した高精度・高解像度な土地被覆分類図を作成することができることが分かった。そこで本章より、さらにいくつかの地理学的な研究課題への適応を試み、事例研究を蓄積することで本研究手法の有効性と妥当性を示す。

本章では、空中写真に人工衛星データの近赤外域データをコンポジットした画像を用いて、大分県を流れる大分川近傍の土地被覆分類図を最尤法分類により作成し、これを用いて地被覆と地形状況の関係をオーバーレイ解析により定量的に把握、特に竹林の分布地形と河床における土地被覆の様相等、特に河川防災の観点に立って考察を試みる。

なお、本章は著者らによる投稿論文[1], [2]にて報告したものを骨子としている。

6.2 研究対象地域概観

研究対象とした大分川は、その源を大分県大分郡湯布院町由布岳に発し、大分平野に入り大分市において別府湾に注ぐ幹川流路延長約 55km、流域面積約 650km²の一級河川である(図 6.1)。流域内人口は約 25 万人で、過去に死者を出す河川氾濫災害を数回起こしており、人的被害を出した直近の水害は、平成 7 年



図 6.1 研究対象地域(大分川)(参考文献[1]より)

の台風 13 号による氾濫被害で、大分川流域での死者は 7 名、家屋全半壊 58 戸、床上・床下浸水 3,090 戸であった[3]。この大分川について解析対象としたのは、2007 年に空中写真撮影された下流約 30km の範囲内である(図 6.1)。

6.3 地形分類

地形分類図は DEM による判読と、現地調査(2011 年 9 月 10 日, 24 日, 25 日実施)により作成した。なお、現地調査では地形判読の正誤確認とともに、地形ごとの土地被覆の確認作業も行った。地形分類図は著者らの投稿論文[2]で作成した、九州地方整備局が所有するレーザー計測による 5mDEM (2005 年測量) による地形判読結果を用いた。その作成方法は、GIS ソフトで大分川河床中央から両岸に向けて 300m の

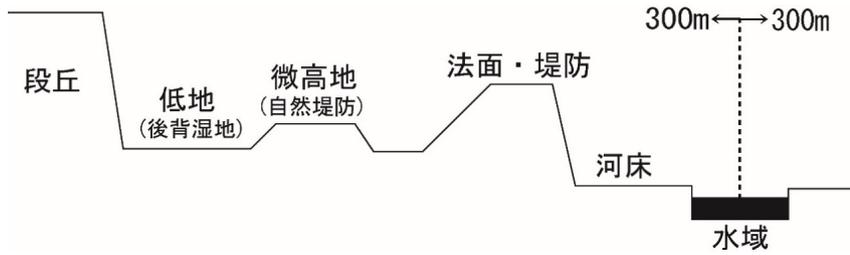


図 6.2 地形分類のモデル(参考文献[1]より)

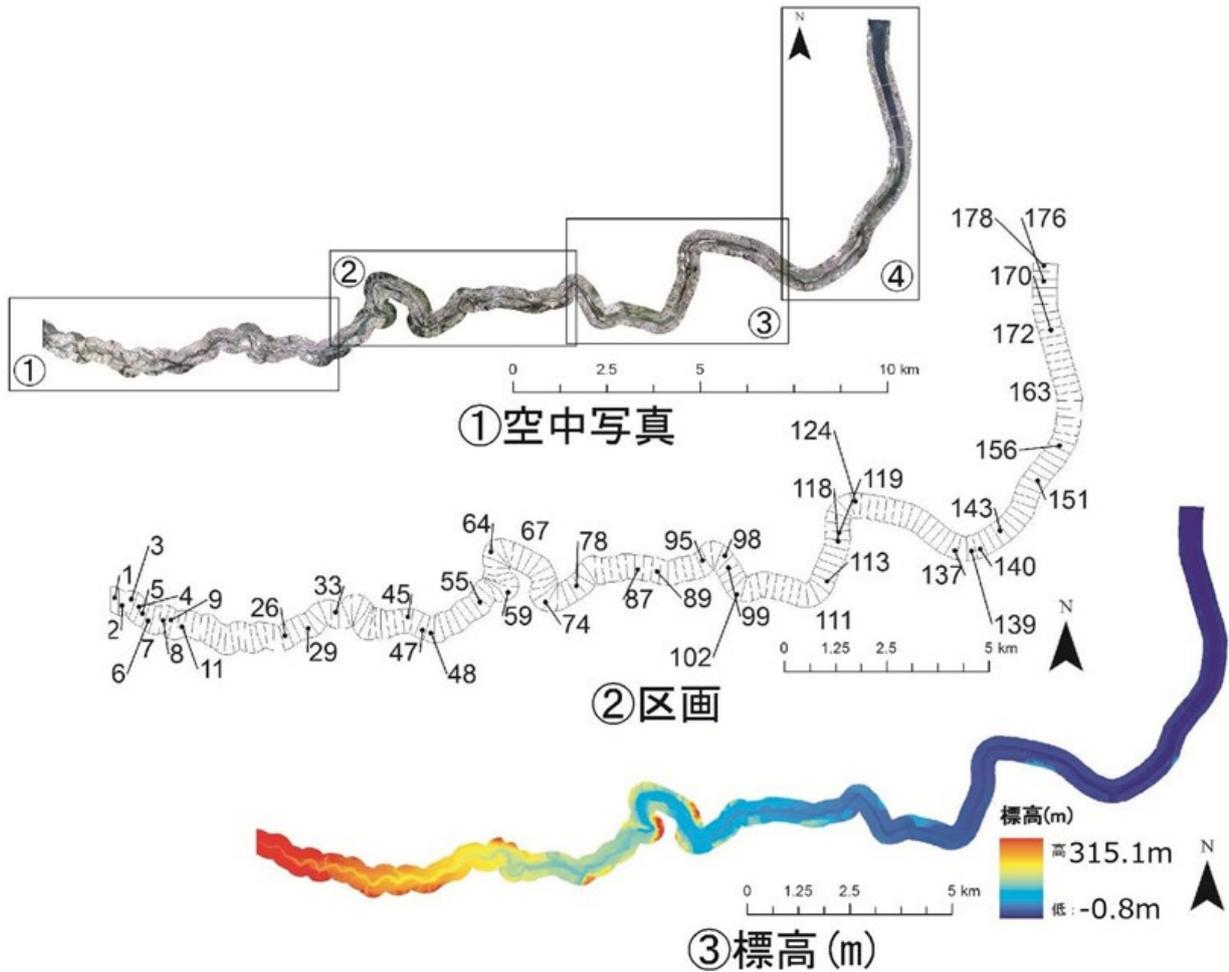


図 6.3 (①)解析範囲の空中写真 (①～④の範囲は図 6.4～図 6.7 の範囲に対応), (②)流出係数解析

区画(第 8 章にて使用), (③)標高分布(参考文献[1]より)

バッファを発生させたその内部について目視判読を行ったものである。分類項目は、法面・堤防、堤外を水域、河床(堤外のいわゆる河川敷も含む)、堤内を低地(主として後背湿地)、微高地(主として自然堤防)、段丘他(主として河岸段丘)、の以上 6 分類とした。その地形分類のモデルを図 6.2 に示す。地形条件と土地被覆の関連を考えるために、ゾーン統計機能*2 を用いて水域を除く地形毎の土地被覆分類の分布割合

を算出した。

6.4 使用データとその処理方法

本研究で用いた空中写真(図 6.3)と人工衛星データは、国土交通省国土地理院撮影 1/10,000 カラー空中写真(地上分解能 20cm)で、2007 年 4 月 29 日撮影のもので、その解像度は GIS で 1m に設定した。解析範囲の 1/10,000 空中写真は国土交通省国土地理院電子国土 web システムから取得した*1。なお、この空中写真は既にオルソ幾何補正されている。これにコンポジットする人工衛星データは ASTER で、2007 年 1 月 31 日観測の地上分解能 15m の VNIR データを使用した。同季節の空中写真と人工衛星データ画像のコンポジットがもちろん理想的であるが、空中写真の撮影回数が衛星データの画像取得回数に比べて少ないので、撮影年と季節を合致させることが難しい。そこで今回は地物の季節変化や緑地の詳細な分類ではなく総合的な土地被覆の状態に焦点をあてるため、季節ではなく撮影(観測)年の統一を優先した。

土地被覆解析用のコンポジット空中写真は、GIS ソフトで空中写真と ASTER VNIR の band4 画像を幾何補正したあと、これらを合成して合計 4 画像のコンポジットデータ(RGB+近赤外域の反射率データ)として作成した。

最尤法分類に使用する教師データは、空中写真の目視判読と現地調査(2011 年 9 月 10 日, 24 日, 25 日実施)により取得した。教師データはポリゴン形式のベクター型データで作成し、分類項目は、草地(田植え後の水田含む)、耕地(田植え前の水田含む)、裸地(川床礫地含む)、樹林、竹林、宅地(道路含む)、水域の 7 項目とした。なお、精度検証のため、最尤法分類に使用する教師データとは異なる地点の教師データをもう 1 セット用意した。

本章で作成した土地被覆分類図は、コンポジット空中写真によるもの(セルサイズ 1m)、精度比較のため RGB3 バンドの空中写真によるもの(セルサイズ 1m)と ASTER VNIR データによるもの(セルサイズ 15m, band1 から band3 を使用)で、すべて共通の教師データを使用した。

土地被覆分類図の作成は、地形分類図と同様大分川の河道の中央から両岸に向けて 300m の範囲で行った(図 6.1)。最尤法分類は、ArcView10 のエクステンションである Spatial Analysis の解析ツール「最尤法分類」で行った。分類精度は、最尤法分類に使用しなかった教師データを重ねあわせ、その教師データ内

の分類結果の面積を GIS ソフトで抽出することで評価した(表 5.1)。

図 6.4～図 6.7 の①～④は、図 6.3 に示す①～④の範囲に対応している。図 6.4～図 6.7 の①はコンポジットに使用した空中写真，同②は地形分類図，同③は ASTER VNIR データによる土地被覆分類図，同④はコンポジット空中写真による土地被覆分類図である。なお，空中写真のみによる土地被覆分類図は精度比較のための分類精度判別表(表 6.1)のみ示す。

6.5 精度検証

ここでは，コンポジット空中写真を用いた土地被覆分類図の分類精度について論じる。分類判別表(表 6.1)を見てみると，平均分類精度は，ASTER VNIR データ(73.8%，表 6.1(1))，空中写真(80.9%，同(2))，コンポジット空中写真(88.3%，同(3))を用いたものの順に高くなる。

コンポジット空中写真と空中写真のみによる土地被覆分類図の分類精度を教師毎に比較してみると，草地に関しては両者とも 81.1%で変化がなく，宅地・道路に関しても，コンポジット空中写真の方が 0.3%の精度向上にとどまった。一方，樹林と水域に関してはコンポジット空中写真の方が 10%以上精度が高くなる。樹林に関しては草地への誤分類が減少し，水域は竹林への誤分類が減少している。特に水は可視域より波長の長い近赤外域では反射率が他の地物に比

表 6.1 分類精度(参考文献[1]より)

(1)ASTER VNIR (2)空中写真 (3)コンポジット空中写真

(1)ASTER VNIR

		最 尤 法 分 類 結 果 (%)						
		草地	耕地	裸地	樹林	竹林	宅地・道路	水域
教	草地	46.2	46.2	0.0	0.0	0.0	7.7	0.0
	耕地	3.4	94.9	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0
	裸地	0.0	2.4	61.9	0.0	0.0	35.7	0.0
師	樹林	0.0	0.0	0.0	76.9	17.9	0.0	5.1
	竹林	5.6	0.0	0.0	55.6	38.9	0.0	0.0
	宅地・道路	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	97.9	0.0
	水域	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
平均分類精度：								73.8

(2)空中写真

		最 尤 法 分 類 結 果 (%)						
		草地	耕地	裸地	樹林	竹林	宅地・道路	水域
教	草地	81.1	0.0	0.0	16.5	2.4	0.0	0.0
	耕地	0.0	93.8	1.0	0.0	5.2	0.0	0.0
	裸地	0.0	1.6	91.5	0.0	0.0	6.8	0.0
師	樹林	27.0	0.0	0.0	62.6	10.2	0.0	0.3
	竹林	0.6	0.0	0.1	11.1	78.9	0.1	9.2
	宅地・道路	0.0	0.1	16.0	0.0	1.7	78.3	3.9
	水域	0.0	0.0	0.0	0.0	19.3	0.7	80.0
平均分類精度：								80.9

(3)コンポジット空中写真

		最 尤 法 分 類 結 果 (%)						
		草地	耕地	裸地	樹林	竹林	宅地・道路	水域
教	草地	81.1	0.0	0.0	16.5	2.4	0.0	0.0
	耕地	0.0	97.9	0.5	0.0	1.7	0.0	0.0
	裸地	0.0	2.1	96.0	0.0	0.0	1.9	0.0
師	樹林	16.7	0.0	0.0	75.7	7.6	0.0	0.0
	竹林	1.5	0.0	0.0	8.9	89.5	0.1	0.0
	宅地・道路	0.0	0.0	18.0	0.0	3.3	78.6	0.0
	水域	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.1	99.3
平均分類精度：								88.3

較すると明瞭に小さくなるため(第2章, 図 2.2), ASTER VNIR データ band3 相当の反射率データを含むコンポジット空中写真での最尤法分類では, 教師データとして取得した地点の水域の画素クラス(DN 値)の分布パターンが他の分類項目のそれと明瞭に異なる。よって, 近赤外域の反射率データを含まない RGB3 バンドの空中写真によるものより精度が高まったと考えられる。また, 樹林の草地への誤分類は

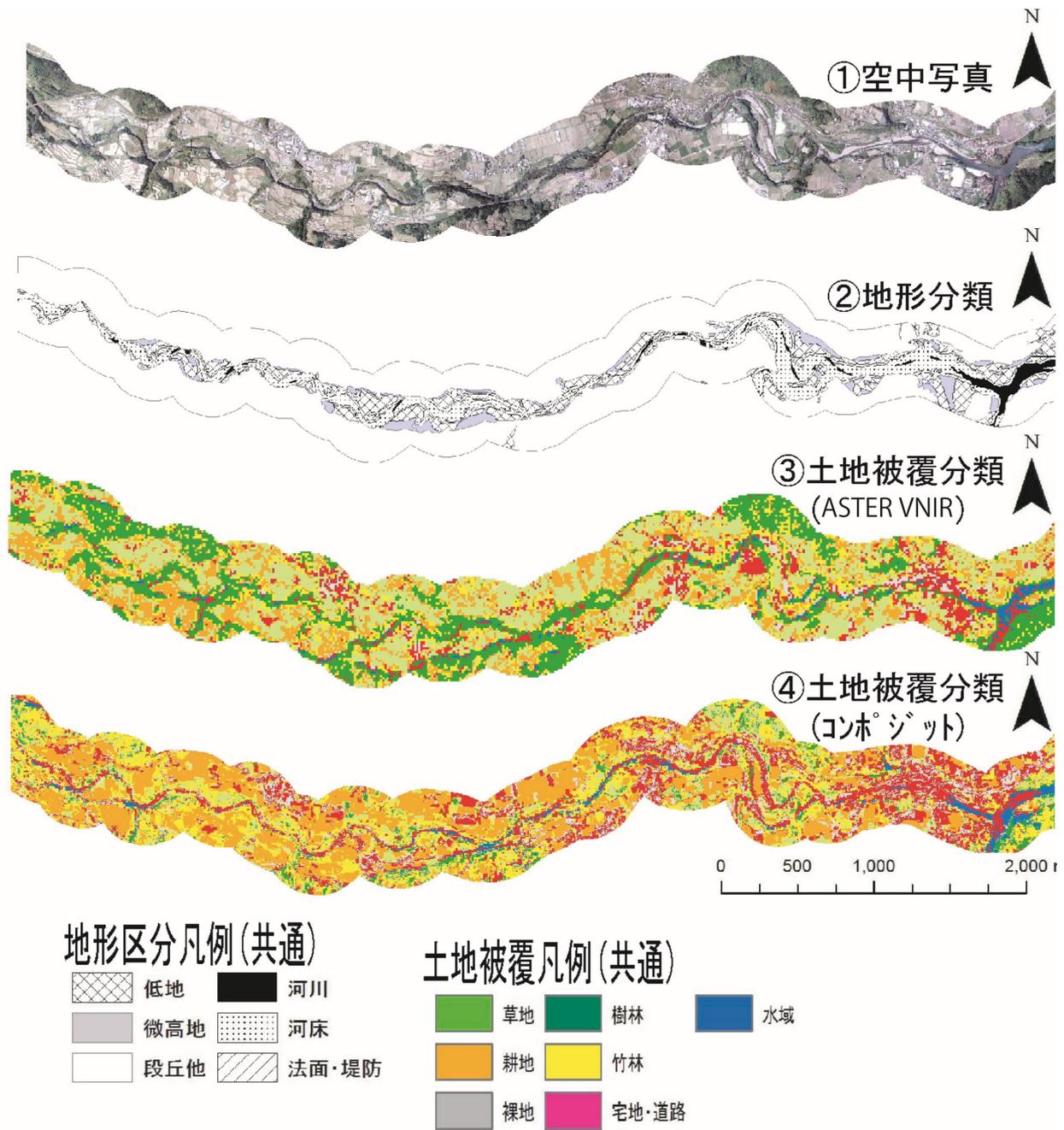


図 6.4 空中写真, 地形分類, 土地被覆分類結果(範囲は図 6.3①の範囲①)(参考文献[1]より)

10.3%の精度向上見られたが、それでも 16.7%の誤分類が残った。空中写真で樹林と草地を見てみると、両者とも緑色を呈しており、同様の状況が竹林の樹林への誤分類でも見られる。これを解消するためには、空中写真と衛星データの季節を統一してコンポジットする必要があると考えられる。

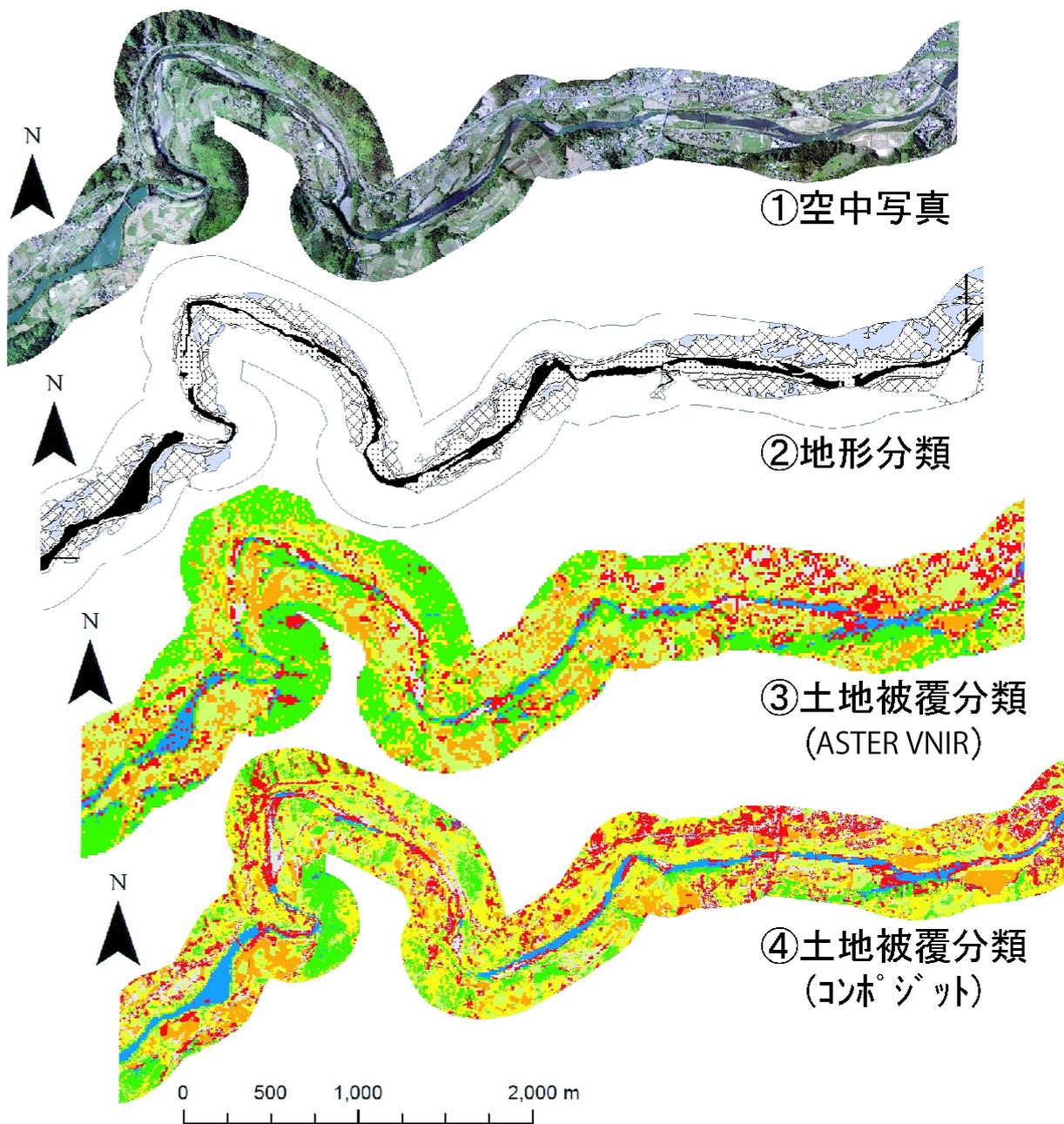


図 6.5 空中写真，地形分類，土地被覆分類結果

(範囲は図 6.3①の範囲②，凡例は図 6.4 を参照)(参考文献[1]より)

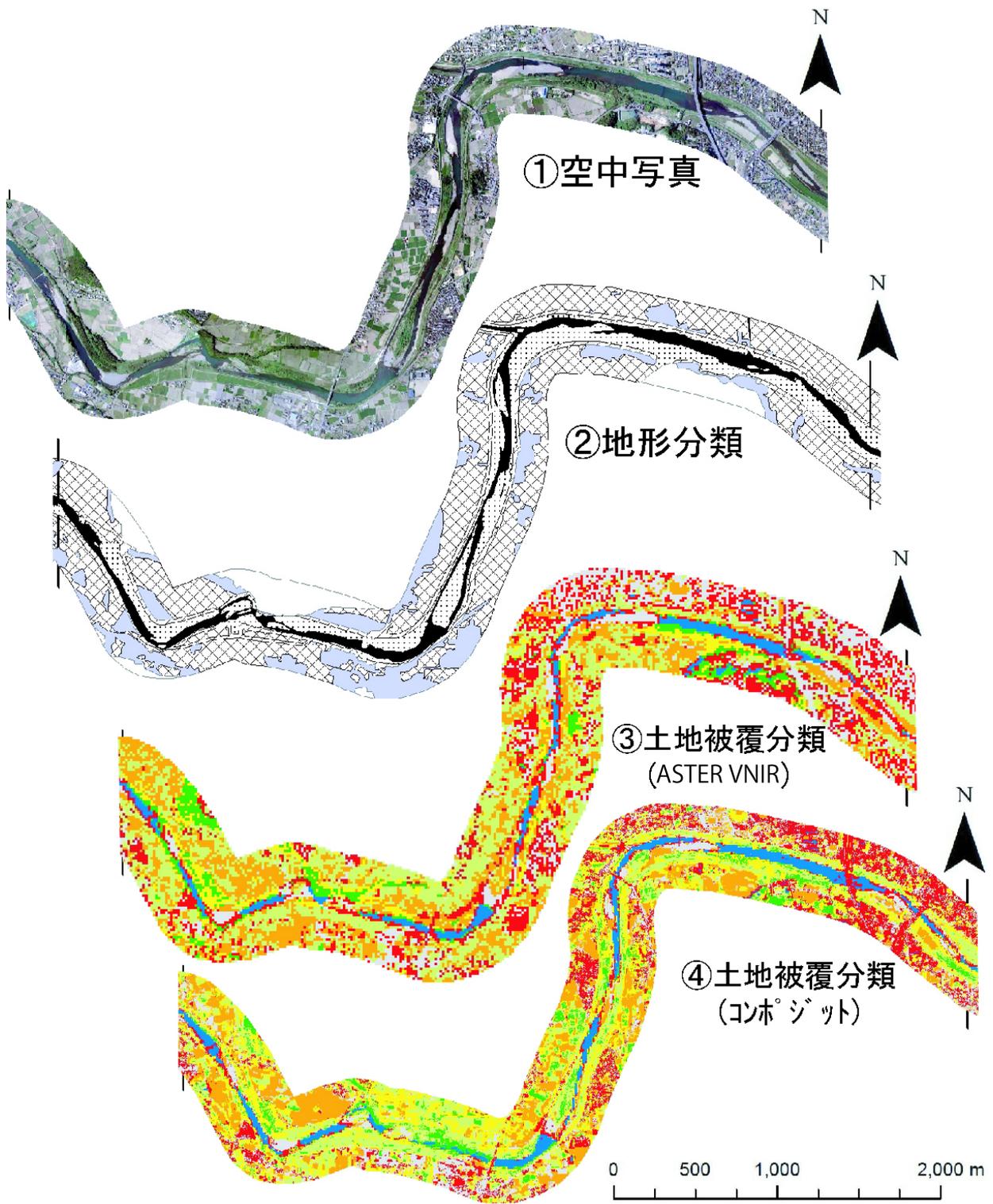


図 6.6 空中写真，地形分類，土地被覆分類結果

(範囲は図 6.3①の範囲③，凡例は図 6.4 を参照)(参考文献[1]より)

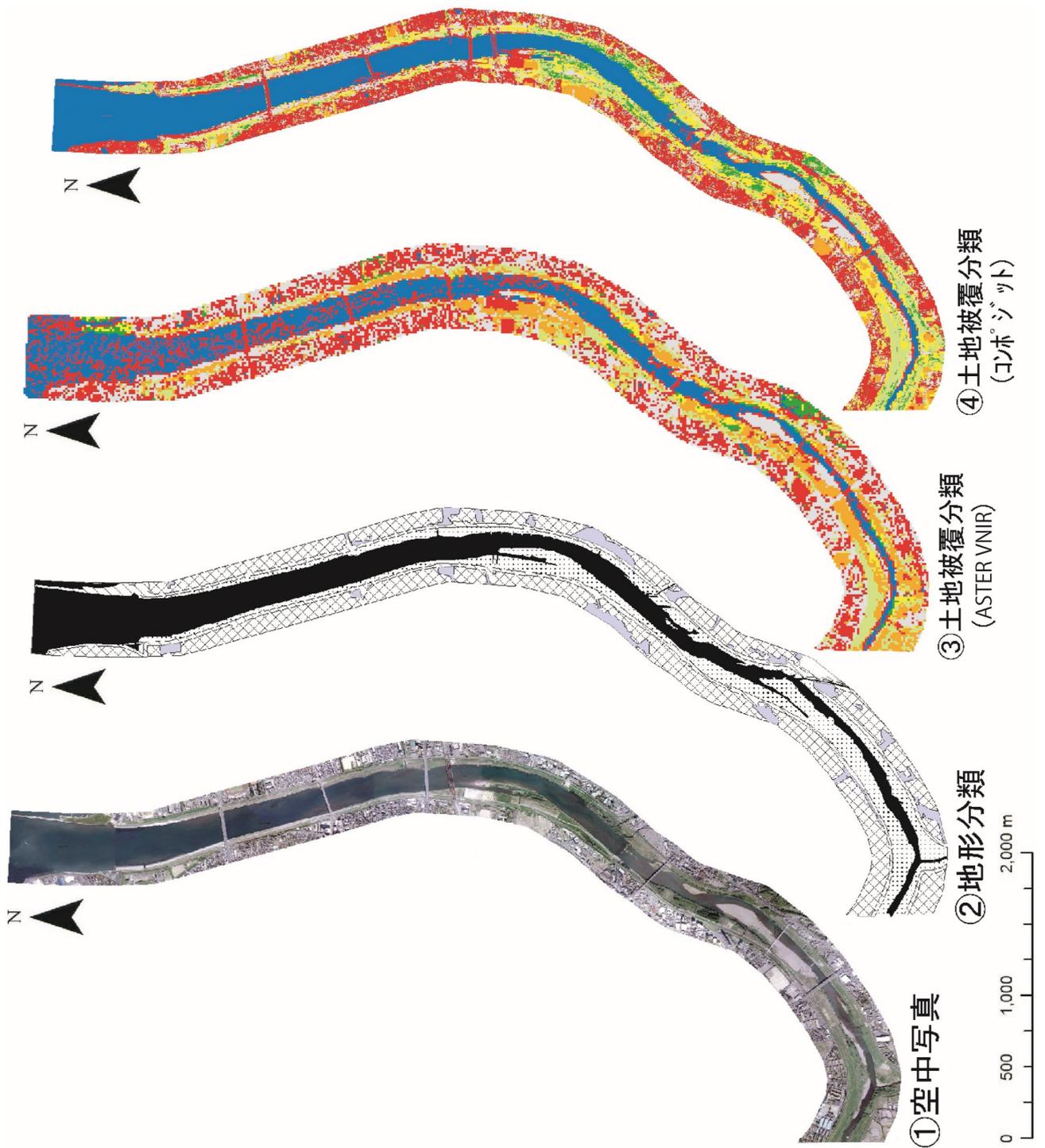


図 6.7 空中写真，地形分類，土地被覆分類結果

(範囲は図 6.3①の範囲④，凡例は図 6.4 を参照)(参考文献[1]より)

6.6 考察～土地被覆と地形の関係

大分川沿いの地形と土地被覆の関連性を明らかにするために、図 6.4～図 6.7 に示す地形分類図と土地被覆分類図を GIS でオーバーレイし地形毎の土地被覆割合を算出した(表 6.2)。以下より、主として河川防災の観点に立って論述する。

表 6.2 地形毎の土地被覆割合(参考文献[1]より)

		土 地 被 覆 分 類 (%)					
		草地	耕地	裸地	樹林	竹林	宅地・道路
地 形 分 類	河床	22.5	7.7	15.1	8.7	26.8	19.1
	微高地	8.7	14.6	20.3	2.3	23.2	30.9
	低地	9.6	19.6	16.7	2.4	20.1	31.6
	段丘他	13.6	21.5	7.7	11.0	29.6	16.5



写真 6.1 河床の竹林(2012年3月11日著者撮影) 写真 6.2 河床の運動場(2011年9月25日著者撮影)

表 6.2 を見てみると、河床は草地と竹林の分布割合が高い。現地調査においても、堤外河床において竹林が発達する様子が観察できた(写真 6.1)。管理されていない竹林は勢力拡大が進みやすいとされ、森林や田畑への侵食力が強く、景観悪化や生態系への悪影響を招くとされる[4]。また、落葉した竹の葉は腐敗が進みにくく土壌化が遅いため、土壌の保水力は低くなるとされる[4]。竹林は地下茎の深度が浅く、管理されていない河川堤外や河岸への侵入・繁茂が知られており[4][5]、大分川でも同様の傾向が見られる可能性がある。よって、大分川におけるよく管理されているとは言い難い竹林は河川防災上好ましく

ないと考えられ、さらには景観悪化も招くと思われるため、防除等の対策を講じる必要があると本稿では指摘したい。

また、河床は離水していない地形であるため、宅地や施設などの土地利用にあまり適さないと考えられるが、19.1%と分布割合が高い。この結果を裏付けるように、現地調査において河床と考えられる地点に公園やスポーツ施設が確認された(写真 6.2)。

また、沖積低地の中心をなす微高地と低地は宅地・道路の土地利用がなされていることが多く、竹林の割合も約 20%と比較的高い。空中写真と地形分類図を見てみると、段丘と低地の境界付近で竹林をよく確認できた。これは、竹林は崖の下のような日当たりが悪い場所でもあっても拡大できることが原因であると考えられ[6]、また、段丘崖は地下水が湧出しやすいことも竹林の繁茂拡大させた一因であると考えられる。

洪水被害をまぬがれやすい段丘面は、その分布が市街地から離れていることもあり、宅地・道路の土地利用は少なく、耕地として使用されることが多い。また、他の地形と同様に竹林の分布が多い。これは前述した理由の通りであると考えられる。

6.7 本章のまとめ

本章では、特に河川近傍に着目して空中写真に人工衛星データの近赤外域データをコンポジットした地理データを用いて土地被覆分類図を作成し、その結果、大分県大分川の事例では河川に沿う地域における土地被覆と地形との関連性を示した。その結果を以下に示す。

1)大分川の事例では、コンポジット空中写真から作成した土地被覆分類図は、空中写真のみのものより分類精度がよく、かつ地上分解能 15m の ASTER VNIR データを用いたものより高分解能・高精度となった。分類項目の中では特に樹林と水域に関してはコンポジット空中写真の方が 10%以上の精度が高くなった。これは、ASTER VNIR の近赤外域の反射率データが精度向上に寄与していた結果であると考えられる。

2)大分川の事例では、土地被覆分類と地形分類図とのオーバーレイ解析から、河床における人工的な土地利用や、竹林が繁茂しやすい地形条件の箇所には竹林が侵入していることが読み取れた。竹林に関し、当該地域では竹林管理が十分ではなく、河川防災、防除対策が必要であると考えられる。

第7章

土地被覆経年変化の定量解析 1

～熊本県白川近傍を事例に

7.1 はじめに

本章と次章では空中写真を用いる本研究手法の有利性、特に過去への遡及性の高さを示すために、過去の蓄積が多く、なおかつ無償で入手できる LANDSAT データをコンポジットした空中写真を用いて、数十年にわたる土地被覆分類図作成を試みる。LANDSAT データの提供開始時期は国土交通省国土地理院によるカラー空中写真のそれと同時期の 1970 年代であるため、もちろん解像度や精度についての検討は必要であるが、本研究の手法により最大約 40 年間に渡る高解像度の土地被覆分類図が日本各地で整備できる可能性があり、多くの研究分野での利活用が期待できる。

さらに、本章では自然災害科学的な事例を、次章では人文地理学的な事例を取り上げることで、空中写真を用いた土地被覆分類図の適用事例の広汎性を示すことも目的とする。

本章では、熊本県熊本市域を流れる白川を対象に、空中写真に LANDSAT MSS データの近赤外域データをコンポジットした画像を用いて 1970 年代の土地被覆分類図を作成し、2012(平成 24)年北部九州豪雨による浸水地域とその地域の土地被覆変化の関係を、時代間オーバーレイ解析を用いて明らかにする。

なお、本章は著者らによる科研報告書[1]にて報告したものを骨子としている。

7.2 研究対象地域概観

研究対象地域を図 7.8 に示す。対象とした白川は、その源を熊本県阿蘇郡高森町の根子岳(標高 1,433m)に発し、阿蘇外輪山の立野付近において黒川をあわせ、熊本平野を貫流し有明海に注ぐ、幹川流路延長

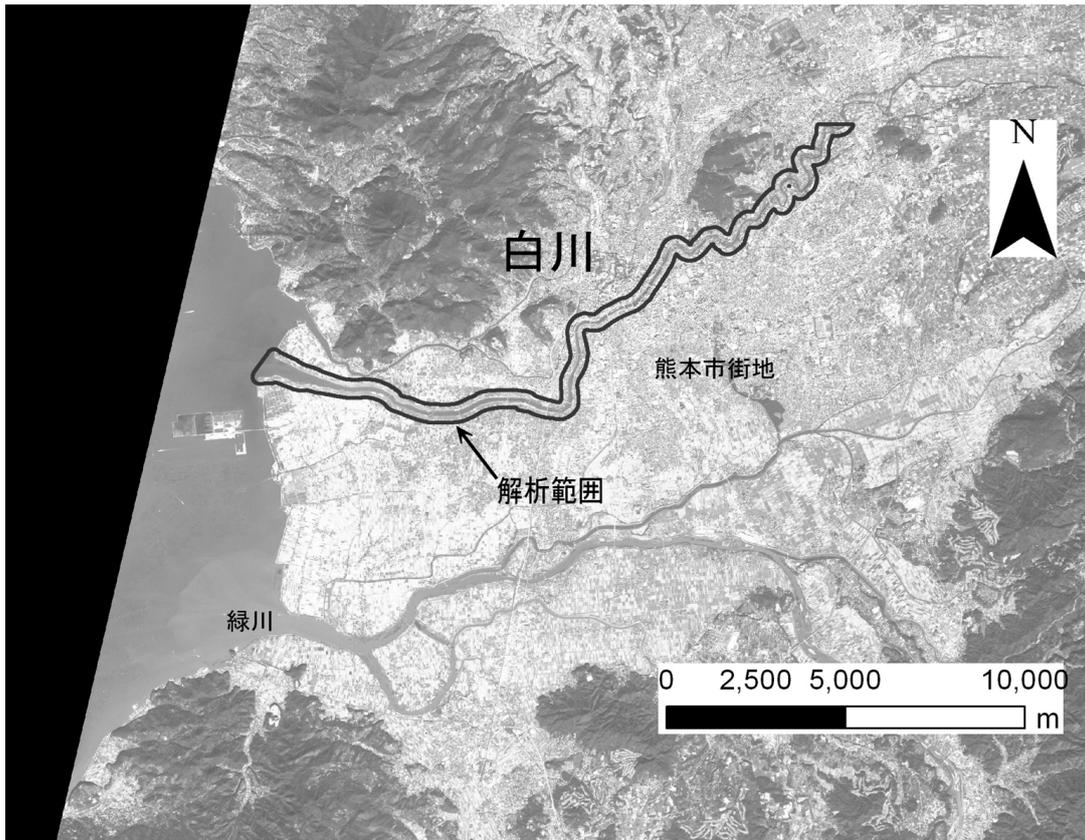


図 7.1 研究対象地域(白川)(参考文献[1]より)

74km, 流域面積 480km² の一級河川である[2]。流域内人口は約 13 万人で、過去に死者を出す河川氾濫災害を数回起こしており、1953(昭和 28)年西日本水害では熊本市の白川流域で死者 422 名を出した[3]。2012(平成 24)年 7 月の九州北部豪雨では氾濫被害が生じ、熊本市内での浸水面積は約 110ha, 浸水戸数は約 724 戸に達した[4]。

7.3 使用データとその処理方法

本節で用いた空中写真は、国土交通省国土地理院撮影 1/10,000 カラー空中写真(1975 年 1 月 5 日撮影および 2007 年 2 月 8 日撮影)、解像度は GIS ソフトで 1m に設定した。解析範囲の 1/10,000 空中写真は国土交通省国土地理院電子国土 web システムから取得した。なお、この空中写真は既にオルソ幾何補正されている。人工衛星データは、1978 年 12 月 7 日観測 LANDSAT MSS データ(地上分解能 83m)の近赤外域の反射率データ画像の band7 と 2008 年 11 月 13 日観測の ALOS AVNIR2 データ(地上分解能 10m)の同じく

band4 を使用した。同季節の空中写真と人工衛星データ画像のコンポジットが理想的であるが、空中写真の撮影回数が衛星データの画像取得回数に比べて少ないので、撮影年と季節を合致させることが難しい。そこで本章では地物の季節変化や緑地の詳細な分類ではなく、総合的な土地被覆の状態に焦点をあてるため、近い撮影(観測)年の組み合わせでコンポジットした。GIS ソフトで空中写真と人工衛星データの幾何補正を行ったあと、空中写真に、人工衛星データの近赤外域データ画像をコンポジットした。教師データは空中写真の目視判読と現地調査(2012年2月16日、17日実施)により取得し、ポリゴン形式のベクター型データで作成した。項目は、草地、裸地(畑、休耕地含む)、樹林、市街地(宅地、道路)、水域の5項目とした。なお、精度検証のため、実際に最尤法分類に使用する教師データとは異なる地点の教師データを取得したポリゴンをもう1セット準備した。最尤法分類は、ArcView10のエクステンションである Spatial Analysis の解析ツール「最尤法分類」で行った。土地被覆分類図の作成は、大分川の事例と同様に白川の河道の中央から両岸に向けて 300m の範囲で行った。本章で作成した最尤法分類による土地被覆分類図は、コンポジット空中写真によるものと、精度比較検討用に RGB3 バンドの空中写真によるもので、すべて共通の教師データを使用した。図 7.2 は、a : 1975 年の空中写真、b : 空中写真のみによる土地被覆分類図、c : LANDSAT MSS データコンポジット空中写真による土地被覆分類図で、2012(平成 24)年 7 月の九州北部豪雨による浸水範囲を拡大表示したものを図 7.3 に示す。図 7.4 は、a : 2007 年の空中写真、b : 空中写真のみによる土地被覆分類図、c : ALOS AVNIR2 データコンポジット空中写真による土地被覆分類図で、同じく拡大表示したものを図 7.5 に示す。分類精度は、最尤法分類に最尤法分類に用いなかった追加教師データを重ねあわせ、その教師データ内の分類結果の面積を GIS ソフトで抽出することで評価した。

熊本市域における白川流域の都市化進展の様子を明らかにするために、1975 年と 2007 年の土地被覆分類図をオーバーレイし、2007 年は市街地である範囲のうち、1975 年当時は草地と裸地であった範囲を抽出し、図化した。具体的な手順は、まず 2007 年と 1975 年の土地被覆分類図をポリゴン形式の shape file に変換し、両者を ArcView10 の「ユニオン」でポリゴンと属性データを結合した。次に 2007 年現在市街地で、かつ 1975 年は草地もしくは裸地であるポリゴンを属性検索で抽出した。2012(平成 24)年九州北部豪雨による熊本市域の浸水範囲は、国土交通省国土地理院の「2012 年 7 月九州北部豪雨に関する情報」

より確認し[4], ポリゴン形式の shape file で浸水範囲データを作成した。

7.4 精度検証

分類精度を表 7.1 および 7.2 に示す。まず, 視覚的に空中写真と土地被覆分類図がマッチするか概観してみると, 1975 年の空中写真による土地被覆分類図(図 7.2(b))では, 陸域における水域への誤分類が特に目立つ。河口付近は水域の草地・樹林への誤分類が広い範囲で出現した。空中写真に LANDSAT MSS データをコンポジットして分類した図 7.2(c)を見てみると, 河口の誤分類はほぼ解消されたように見える。空中写真で水域を見てみると, 光に反射して白っぽくなったり, 青みがかったり, というように, 様々な色調を持つことが多いため, RGB3 バンドの最尤法分類では様々な分類項目への誤分類が発生しやすいと考えられる。LANDSAT MSS データ band7 相当の反射率データでは, 水域は可視域より波長の長い近赤外域では反射率がほぼ 0 になるため(第 2 章, 図 2.2), 教師データとして取得した地点の水域の画素クラスの分布パターンが他の分類項目のそれと明瞭に異なる。よって, 人工衛星データをコンポジットした空中写真で最尤法分類を行うことにより, 水域の他の分類項目への誤分類が少なくなると考えられる。

2007 年の空中写真による土地被覆分類図(7.4(b))も 1975 年のものと同じく水域の他の分類項目への誤分類が目立つが, ALOS AVNIR2 データをコンポジットして分類した図 7.4(c)を見てみると, 河口付近をはじめとして, 水域の他の分類項目への誤分類はほぼ解消したように見える。

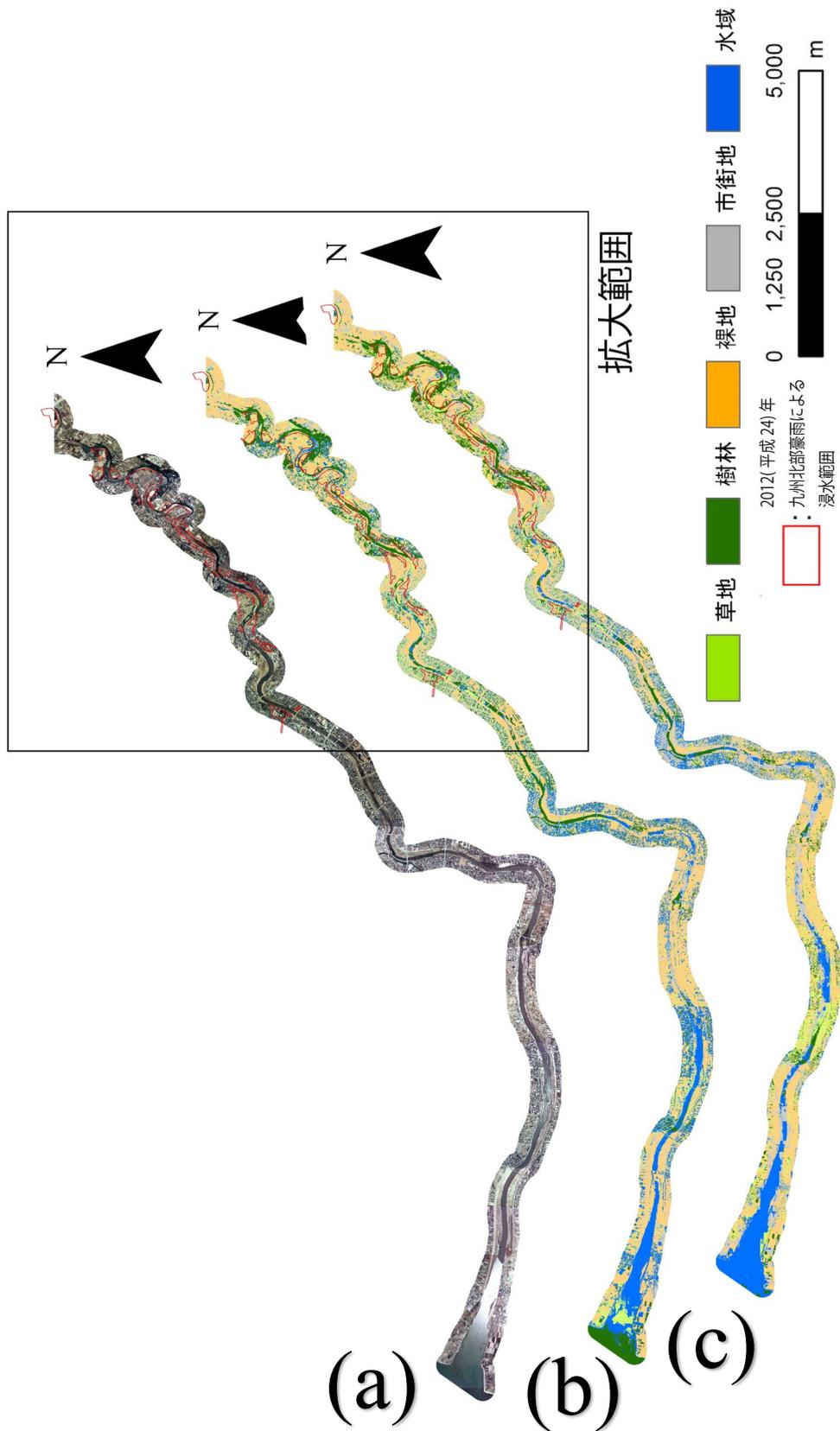


図 7.2 1975 年の空中写真と土地被覆分類図(a : 1975 年空中写真, b : 空中写真による土地被覆分類, c : 同コンポジット空中写真)(参考文献[1]より)

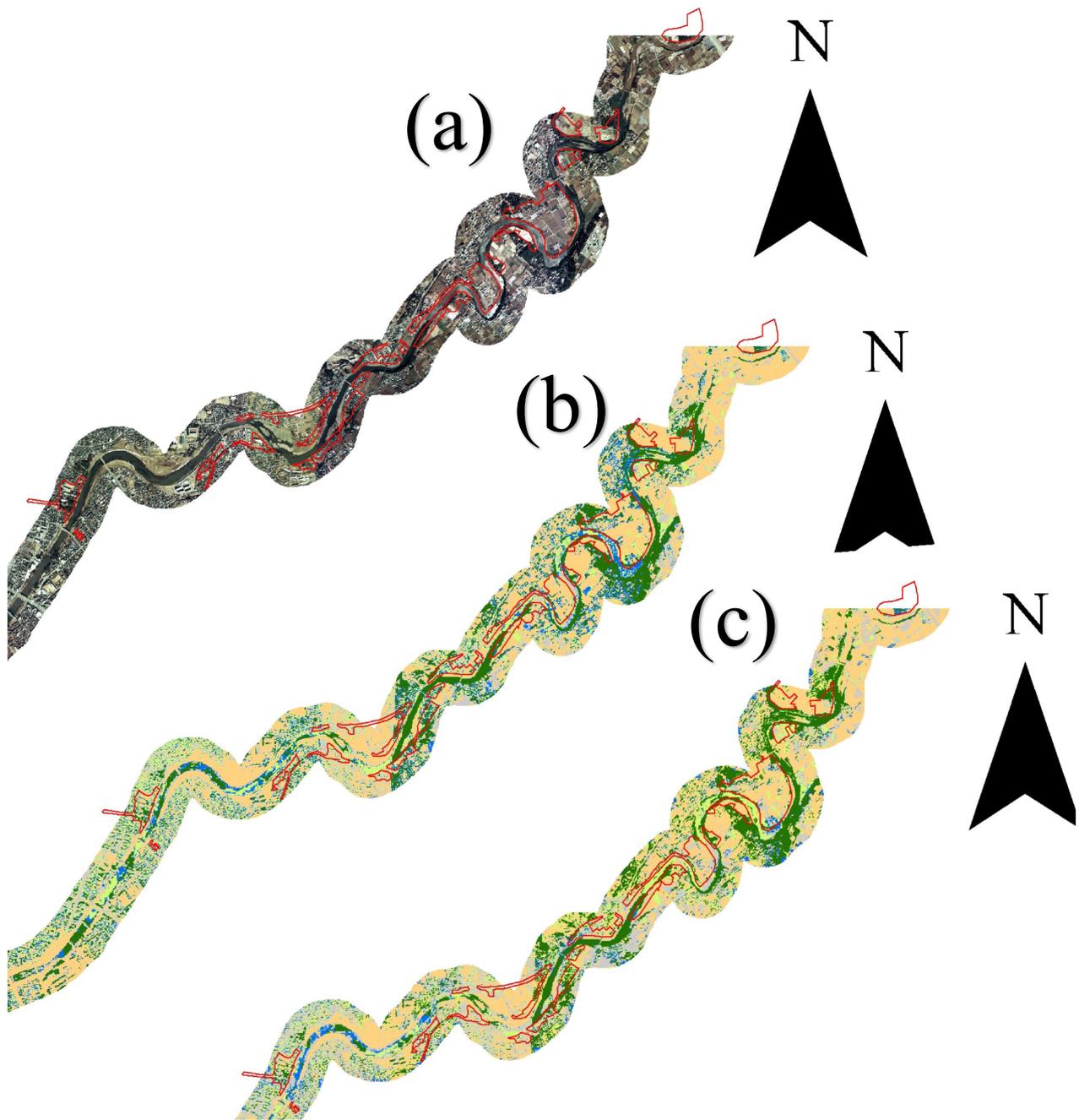


図 7.3 1975 年の空中写真と土地被覆分類図における 2012(平成 24)年 7 月の九州北部豪雨による浸水範囲拡大表図(参考文献[2]を一部改変)

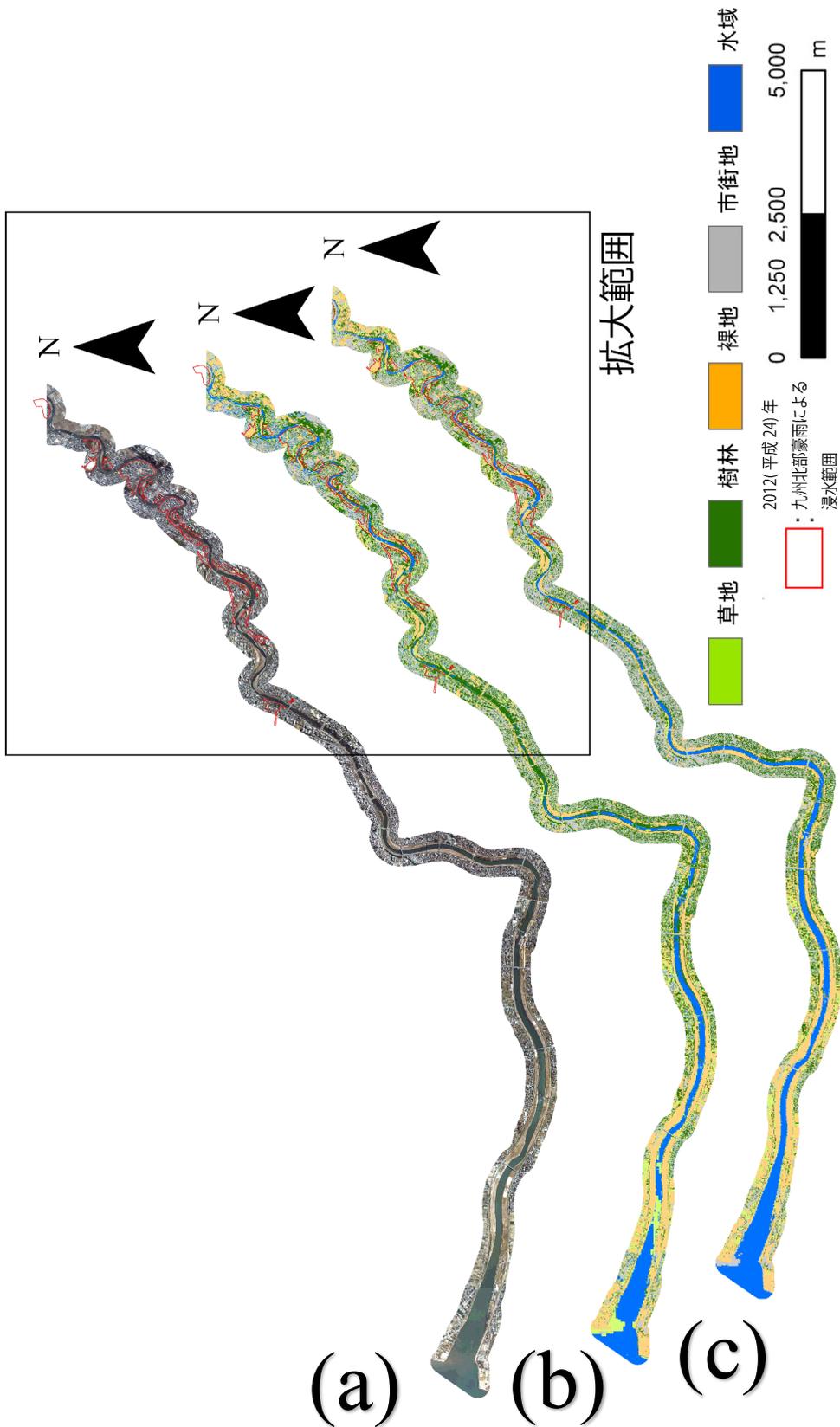


図 7.4 2007 年の空中写真と土地被覆分類図(a: 1975 年空中写真, b: 空中写真による土地被覆分類, c: 同コンポジット空中写真)(参考文献[1]より)

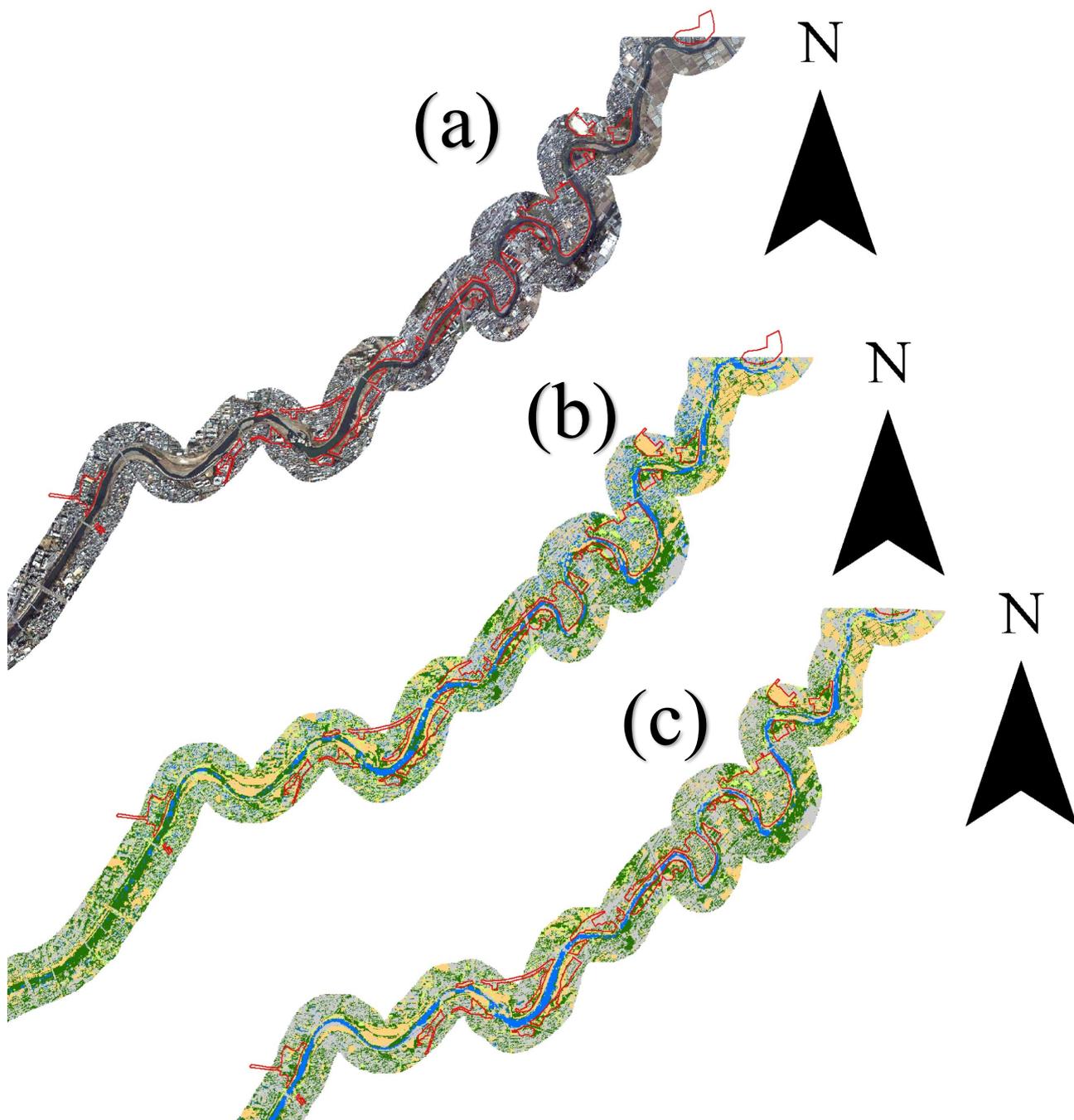


図 7.5 2007 年の空中写真と土地被覆分類図における 2012(平成 24)年 7 月の九州北部豪雨による浸水範囲拡大表図(参考文献[2]を一部改変)

次に、分類精度(表 7.1, 表 7.2)を見てみると、平均分類精度は人工衛星データをコンポジットしたものの方が高くなる。1975 年の分類精度を見てみると(表 7.1), LANDSAT MSS データをコンポジットしたものでは、特に草地、市街地、水域の分類項目で誤分類の解消が見られた。しかし、市街地についてはコンポジットしたものでも分類精度は 48.6%と極端に低い。市街地も空中写真で見ると様々な色調が混じった状態であり、かつ、コンポジットした LANDSAT MSS データの地上分解能が 83m と高くなく、様々な土地被覆がミクセル状態であるため、分類精度が低

表 7.1 1975 年土地被覆分類図の分類精度(%)(参考文献[1]より)

(1)RGB空中写真
最尤法分類結果(%)

	草地	樹林	裸地	市街地	水域	
教	草地	70.6	0.3	3.4	8.2	17.5
師	樹林	2.4	89.5	3.8	1.9	2.3
	裸地	13.8	1.9	72.9	9.4	2.0
	市街地	19.2	12.0	20.5	23.7	24.6
	水域	22.7	8.8	3.3	4.3	61.0
	平均分類精度					63.6

(2)RGB空中写真+LANDSATMSS BAND7コンポジット
最尤法分類結果(%)

	草地	樹林	裸地	市街地	水域	
教	草地	88.0	0.8	2.6	6.8	1.9
師	樹林	1.4	89.0	1.7	5.1	2.9
	裸地	1.4	2.6	73.6	17.1	5.3
	市街地	11.4	10.5	12.1	48.6	17.4
	水域	6.9	8.0	2.1	8.7	74.3
	平均分類精度					74.7

表 7.2 2007 年土地被覆分類図の分類精度(%)(参考文献[1]より)

(1)RGB空中写真
最尤法分類結果(%)

	草地	樹林	裸地	市街地	水域	
教	草地	84.9	3.2	1.6	0.1	10.3
師	樹林	7.0	85.0	3.1	1.1	3.8
	裸地	1.8	5.2	81.8	11.2	0.0
	市街地	7.1	11.2	6.2	70.7	4.8
	水域	2.5	5.4	0.2	0.7	91.2
	平均分類精度					82.7

(2)RGB空中写真+ALOS BAND4コンポジット
最尤法分類結果(%)

	草地	樹林	裸地	市街地	水域	
教	草地	93.6	2.8	1.3	2.3	0.0
師	樹林	7.3	86.6	3.0	2.2	1.0
	裸地	2.2	5.0	80.4	12.4	0.0
	市街地	2.7	10.3	4.9	81.7	0.4
	水域	0.0	0.9	0.0	1.4	97.7
	平均分類精度					88.0

くなった可能性がある。2007 年の分類精度を見てみると(表 7.2), ALOS AVNIR2 データをコンポジットしたものでは、特に草地、市街地、水域の分類項目で誤分類の解消が見られ、この結果は LANDSAT MSS データをコンポジットしたもの(表 7.1)と同様で、特に市街地で 10%以上の精度向上が見られた。この

結果は、ALOS AVNIR2 のような、LANDSAT MSS より地上分解能の高い人工衛星データをコンポジットした空中写真による最尤法分類では、様々な地物が混在する都市域での誤分類解消に有利である可能性が高い。その根拠として、ALOS AVNIR2 データをコンポジットしたものの分類精度(表 7.2)は、他の分類精度と比べて特に誤分類が少なく、平均分類精度は約 90% と高い。ALOS AVNIR2 データは地上分解能 10m で LANDSAT MSS データより高精度であるためミクセル状態が少ないことは、この可能性を支持する。

以上より、コンポジット空中写真を用いれば、光の三原色(RGB)とともに近赤外域の反射率データを考慮に入れて最尤法分類ができるため、RGB のみの空中写真よりも精度向上が見込める。LANDSAT MSS データをコンポジットした最尤法分類は、ALOS AVNIR2 データをコンポジットしたものに視覚的にも分類精度は及ばないが、少なくとも 1975 年撮影の空中写真のみの最尤法分類よりも分類精度向上が見込める。

7.5 考察～土地被覆の経年変化

熊本市域の白川流域(図 7.1 解析範囲内)の約 30 年間の土地被覆面積の変化を表 7.3 に示す。1975 年から約 30 年間で、樹林と市街地が約 10%増加しており、草地在約 5%減少、裸地は約 13%減少している。水域はほ

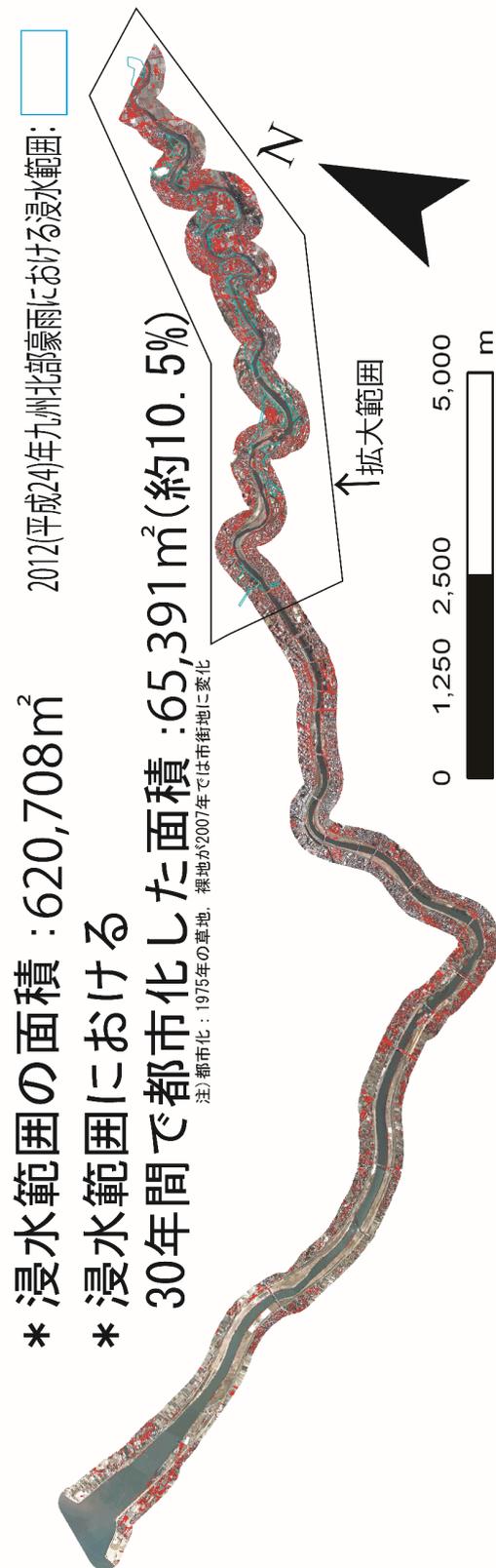


図 7.6 1975 年裸地・草地→2007 年市街地への変化地域
(赤で着色した地域)(参考文献[1]より)

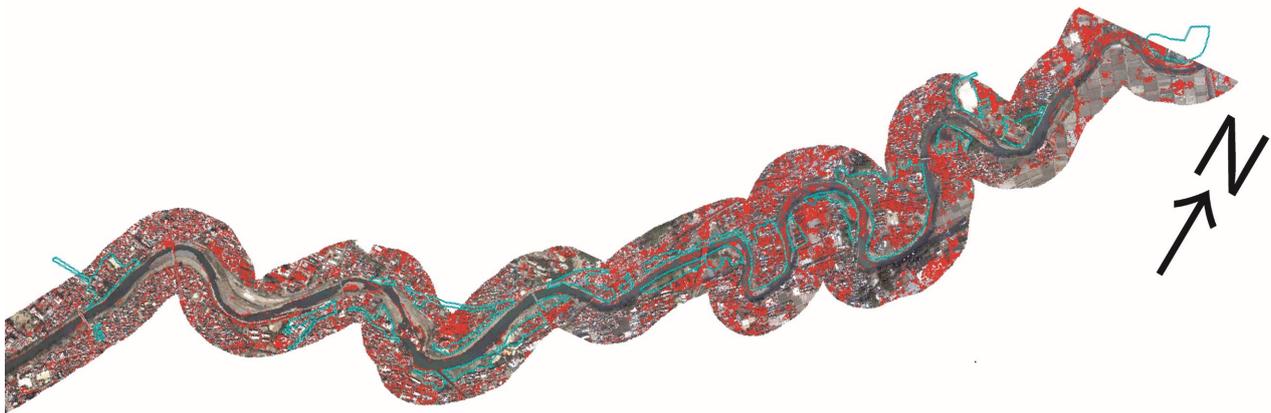


図 7.7 図 7.6 における浸水範囲の拡大図 (参考文献[1]より一部改変)

表 7.3 1975 年から 2007 年にかけての土地被覆変化 (参考文献[1]より)

1975年

土地被覆	面積(m ²)	土地被覆割合(%)
草地	201,006	11.9
樹林	217,527	12.9
裸地	608,379	36.2
市街地	405,621	24.1
水域	250,242	14.9

2007年

土地被覆	面積(m ²)	土地被覆割合(%)
草地	119,462	7.1
樹林	365,996	21.9
裸地	397,355	23.8
市街地	533,530	31.9
水域	256,532	15.3

→
→
→
→
→

とんど変化が見られない。空中写真と土地被覆分類図 (図 7.2, 図 7.4) を見てみると、特に上流部の畑と考えられる裸地や草地が市街地(住宅地)に変化している様子が視覚的に確認でき、都市化の進展とともに河川近傍の宅地化が進んでいる様子が見て取れる。そこで、2012(平成 24)年の九州北部豪雨における解析範囲内の浸水範囲内の 1975 年から 2007 年の土地被覆変化を図 7.2(c)と図 7.5(c)のオーバーレイ解析し、市街化の様相を明らかにしたものを図 7.6 に、浸水範囲を拡大したものを図 7.7 示す。これらに図中の赤で着色した範囲は、1975 年当時は裸地・草地であった場所が、2007 年では市街地への変化した地域を示している。浸水面積約 620,000 m²のうち、このように市街地化した面積が約 65,000 m²で、浸水範囲の約 10.5%を占めていた。今後都市化(住宅地化)がさらに進展すれば、雨水を浸透させやすい裸地・草地が失われ、浸透させにくいアスファルトに覆われることで、浸水被害のリスクが高まると考えられる。同様のケースは先述した大分市の大分川流域でも確認でき、これは都市域近郊のスプロール地域に

おける全国的な傾向であり(例えば宗, 2012)[5], 特に最近はアスファルト舗装道やコンクリートが雨水の浸透を低下させ, 堤内地で排水不良を引き起こすことで発生する都市型水害が, 局地的な大雨, いわゆるゲリラ豪雨とともに関心事となっている[6]。白川は熊本市の市街地を貫流するため, 解析地域においても都市型水害へのリスクが高まっていると考えられる。

7.6 本章のまとめ

本章では, 特に河川近傍に着目して空中写真に人工衛星データの近赤外線データをコンポジットした地理データを用いて土地被覆分類図を作成し, その結果, 白川においては河川近傍の土地被覆変化と2012(平成 24)年九州北部豪雨での浸水範囲の関連性を示した。その結果を以下に示す。

1)空中写真に LANDSAT MSS データをコンポジットした最尤法分類は, ALOS AVNIR2 データをコンポジットしたものに視覚的にも分類精度は及ばないが, 少なくとも空中写真のみの最尤法分類よりも分類精度向上が見られた。ALOS AVNIR2 をコンポジットした画像での土地被覆分類図は平均分類精度が88%と, LANDSAT MSS の74.7%と比較して高く, これは空中写真にコンポジットする人工衛星データの地上分解能に影響を受けている可能性がある。

2)二時期の土地被覆分類図のオーバーレイ解析により, 1975年から約30年間で市街地が約10%増加しており, 草地が約5%減少, 裸地は約13%減少していることが分かった。また, 2012(平成 24)年の北部九州豪雨における解析範囲内の浸水面積は約62万㎡で, このうちの約10.5%が1975年当時は裸地・草地であった場所が都市化した地域であったことが分かった。よって, 熊本市市街地を貫流する白川の河川近傍においては, 都市化の進展にしたがって都市型水害のリスクが高まっていることが考えられる。

第 8 章

土地被覆経年変化の定量解析 2

～福岡市域における都市化の進展状況を事例に

8.1 はじめに

本章では前章に引き続き、時空間スケール、特に過去への遡及性を示すために、空中写真と LANDSAT データを用いて 2007 年と 1981 年における都市域の土地被覆状況の経年変化を、二時期土地被覆分類図時代間オーバーレイ解析によって定量的に明らかにする。

ここで、都市域は高密度に地物が存在するため、人工衛星データの 1 ピクセル内に複数の土地被覆が混在する、いわゆる「ミクセル」状態が頻発し[1]、これは前章でも指摘したが分類精度に影響を与える。ALOS AVNIR2 データであれば解像度 10m、NASA により無償提供されている LANDSAT データであれば解像度 30m であるので、前者は 10m×10m、後者は 30m×30m のピクセル内に複数の土地被覆が混在していることとなる。

そこで本章では、ミクセル状態が発生しにくいと考えられる解像度 20cm のデジタル化空中写真に人工衛星データの近赤外域の反射率データをコンポジットした画像を使用して土地被覆分類図を作成し、都市域における土地被覆の経年変化を定量的に捉えることで、本研究が提案する土地被覆分類法の有効性と汎用性を示す。さらに本章では、解像度 1m の高解像度土地被覆分類図作成に用いる地図データは全て無償で提供されているものを利用することで、本研究手法の、昨今の高解像度な人工衛星データに対するコスト面に関する有利性をも示すことを目的とする。

なお、本章は著者らによる投稿論文[2]にて報告したものを骨子としている。

8.2 研究対象地域概観

(1) 2007 年

(2) 1981 年

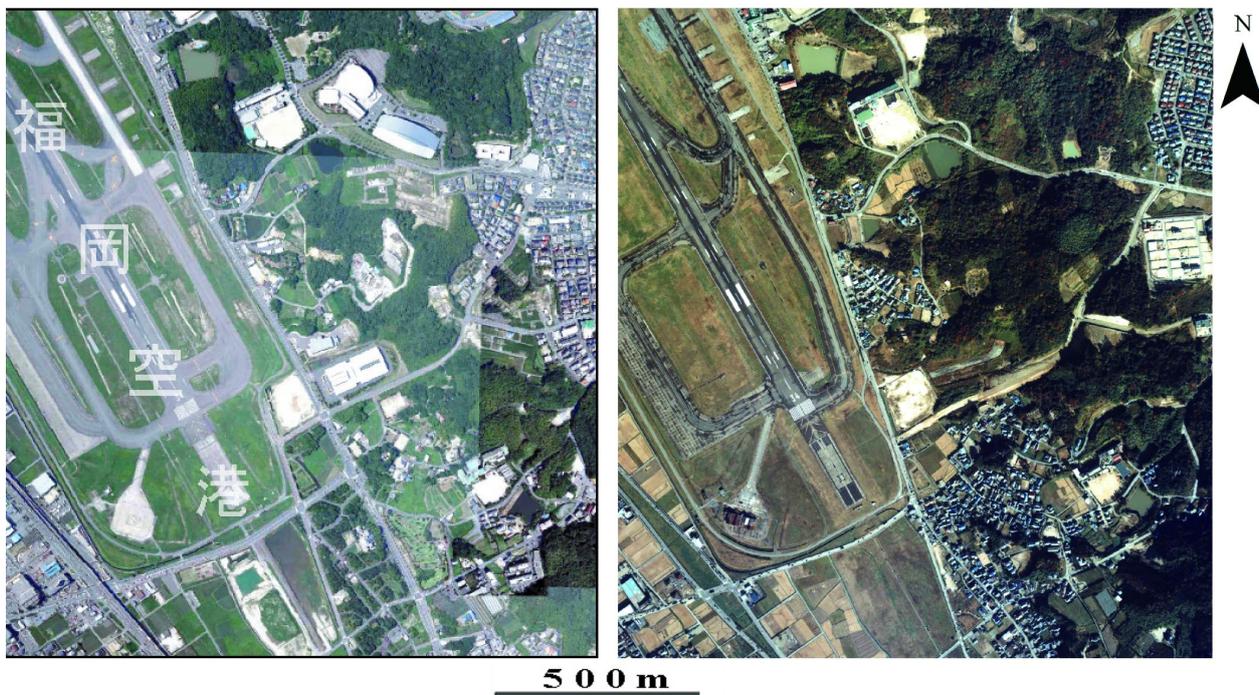


図 8.1 研究対象地域

((1)2007 年 7 月 27 日撮影空中写真, (2)1981 年 11 月 18 日撮影空中写真)(参考文献[2]より)

本章での解析対象地域は、福岡県福岡市博多区にある福岡国際空港(以下福岡空港と略す)の南部付近とした。その範囲を図 8.1 に示す。2007 年の解析地域の土地被覆を概観してみると(図 8.1), 福岡空港内は道路(滑走路及び誘導路)と草地が多く、福岡空港を除いた南西部は主に田畑、裸地、草地と宅地、アスファルトに覆われた産業用地となっている。解析地域の東部は主に樹林と宅地で、ため池も点在し、学校のグラウンドは裸地である。また、大規模な建物も散見される。樹林は樹冠の形状と色調から広葉樹、針葉樹、竹に明瞭に分類可能で、この中で竹は特に広葉樹林の中にパッチ状に侵入している様子が見られ、一部では群生し竹林を形成する。また、針葉樹林は主に解析地域南東側に見られる。

この地域を選定した理由として、①典型的な沖積低地と斜面地形における主な土地利用・土地被覆がぼそろっている、②都市化が進む地域で、土地被覆の経年変化の様相を解析しやすい、③福岡空港の滑走路や誘導路の増設が土地被覆変化として視覚的に捉えやすい、の 3 点である。①について、沖積低地では

道路を含む都市域、田畑、裸地が存在し、斜面地には樹林が分布し、これは本邦における沖積低地では典型的に見られる土地利用であると考えられる。②について、研究対象地域は丘陵開発が盛んな地域で、森林から都市への変容を視覚的にも捉えやすい。③について、福岡空港の整備改修に伴って、草地がアスファルトによる滑走路及び誘導路に変化するので、これも②と同様に経年変化を視覚的にも捉えやすい。

8.3 使用データとその処理方法

本章で作成した土地被覆分類図を図 8.2 と図 8.3(1)に示す。土地被覆分類図作成に用いた地理データは、GIS ソフトで空中写真のジオリファレンスを行ったあと、LANDSAT データの近赤外域の反射率データを空中写真にコンポジットすることで作成した。

土地被覆分類に用いた空中写真は、前章と同じく電子国土 web システムからダウンロードした国土交通省国土地理院撮影 1/10,000 カラー空中写真(2007年7月27日撮影, 図 8.1(1))と、1/8,000 カラー空中写真(1981年11月18日撮影, 図 8.1(2))である。両者ともセルサイズを 1m とし、作成する土地被覆分類図のセルサイズも 1m とした。これらに USGS の Earth Explorer より LANDSAT データの近赤外域の反射率データを合成することで、コンポジット空中写真を作成した。その LANDSAT データは、2007 年撮影空中写真には 2007 年 10 月 21 日観測の ETM+の近赤外域の反射率データ band4 データを、1981 年撮影空中写真には 1984 年 5 月 22 日観測の TM の近赤外域の反射率データ band4 データを使用した。本来ならば同季節の空中写真と人工衛星データ画像をコンポジットしなければならないが、前章での例と同じ理由で撮影(観測)時期が近接する組み合わせを優先した。また、コンポジットする人工衛星データも ALOS AVNIR2 のような、より高解像度のものが好ましいが、本章では過去に遡及する土地被覆分類図の作成とそのオーバーレイ解析をも目的にしているため、二時期共通の人工衛星データを用いることとした。さらに精度比較のため、2007 年空中写真のみを用いた土地被覆分類図と、LANDSAT ETM+及び ALOS AVNIR 2(2010年8月19日観測)データ(セルサイズ 10m)の全 band を用いた土地被覆分類図を作成した。なお、2007 年代の土地被覆分類図についてはすべて共通の教師データを使用した。

最尤法分類に使用する教師データは、空中写真の目視判読により取得した。教師データはポリゴン形式のベクター型データで作成し、その項目は、竹、広葉樹、針葉樹、草地、宅地、裸地、道路(福岡空港

の滑走路含む), 水域の 8 項目とした。なお, 教師データは最尤法分類用と精度評価用の 2 セット準備した。

8.4 精度検証

本節では, コンポジット空中写真を用いた土地被覆分類図の分類精度を, RGB 3 バンド空中写真での分類精度と比較する。各画像で作成した土地被覆分類図を図 8.2 に, 図 8.2 の分類精度を表 8.1 に示す。表 8.2 は土地被覆分類図(図 8.2(3))に示される各分類項目が, 空中写真では平均的にどのような色調を呈しているか, さらに近赤外域データの値が緑地と非緑地でどう異なっているかを把握する目的で作成したもので, 図 8.2(3)の作成に用いたコンポジット空中写真と図 8.2(3)を重ね合わせ, 分類項目ごとの B, G, R 値(0~255 の 256 階調), 及び LANDSAT ETM+データ band4 の DN 値(0~255 の 256 階調)の平均値をゾーン統計機能*1 で算出したものである。表 8.2 を見てみると, 例えば, 竹, 広葉樹, 針葉樹, 草地は植物であるので, G(緑)の平均値が大きく, 非緑地でコンクリートやアスファルトで構成された宅地, 道路では band4 の平均値が小さい。

まず, 空中写真を用いた図 8.2(3)の分類精度(表 8.1(3))を見てみると, 平均分類精度は 80.9%と人工衛星データを用いたもの(表 8.1(1), 表 8.1(2))よりも高い。しかし, 図 8.2(3)を見てみると, 特に福岡空港内の誤分類が目立ち, 主に草地や裸地が水域や竹に誤分類されているほか, 解析地域東側の草地が広葉樹に誤分類される地点も多く見られ, 解析地域全体にわたって道路に宅地が混じる地点も多く見られる。ここで, 図 8.2(3)と解像度が近い ALOS AVNIR2 を用いた図 8.2(2)を空中写真(図 8.1(1))と比べてみると, 解析地域東側の森林と草地はよく対応しているように見え, 福岡空港内の草地と裸地の対応は図 8.2(3)と比較したら図 8.2(2)の方がよく, 水域への誤分類も少ない。特に水は可視域より波長の長い近赤外域では反射率がほぼ 0 になるため(図 1.2), LANDSAT ETM+データ band4 相当の反射率データを含む人工衛星データでの最尤法分類では, 教師データとして取得した地点の水域の画素クラス(DN 値)の分布パターンが他の分類項目のそれと明瞭に異なる。よって, 図 8.2(2)は他の分類項目の水域への誤分類は図 8.2(3)に比べて少ないと考えられる。

一方、空中写真による最尤法分類は、RGB の色調のみを用いて分類するため、例えば植物と水のように物理的に明らかに異なる土地被覆であっても、色調が似たものであれば、それぞれの教師データとし

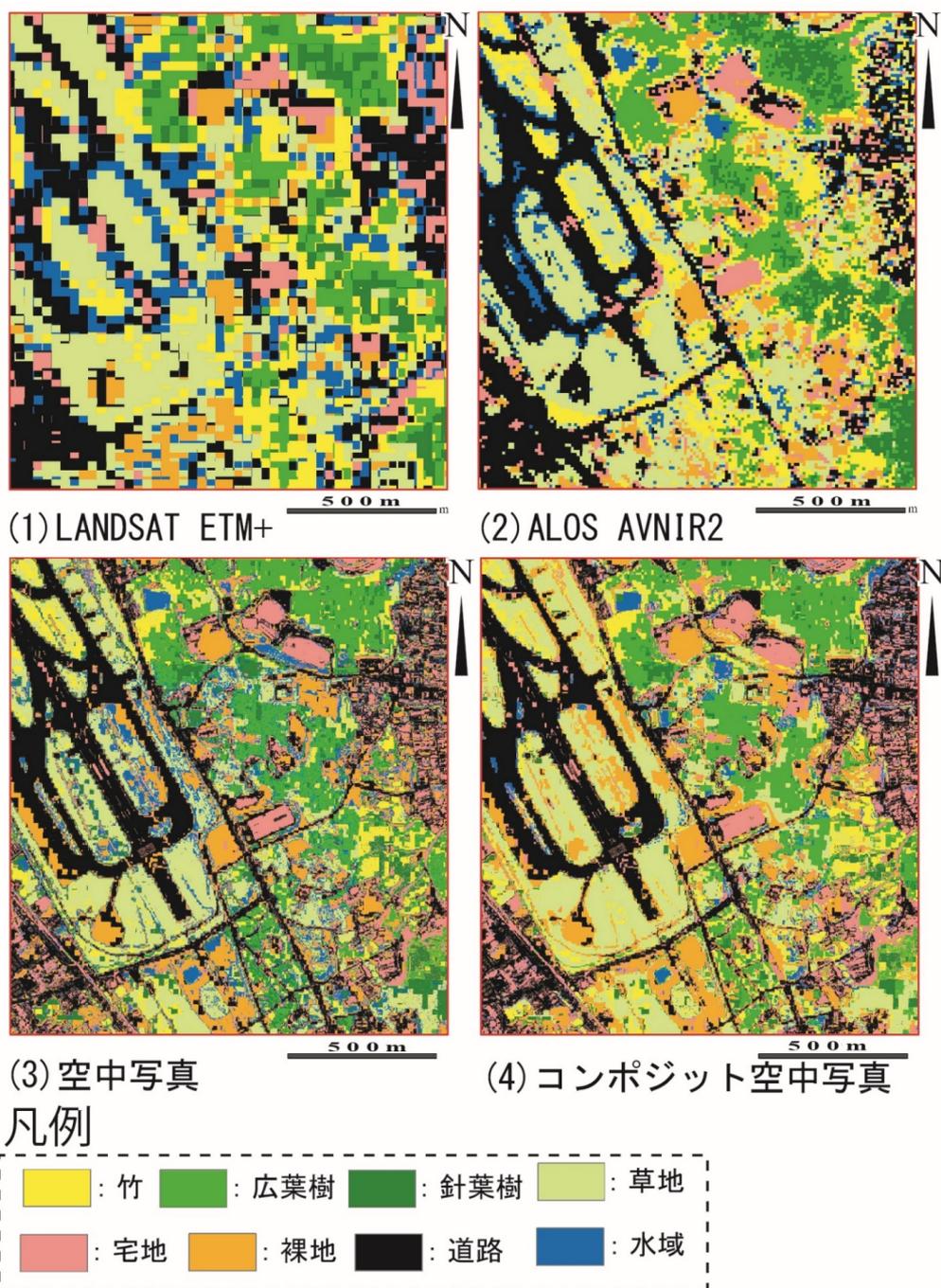


図 8.2 土地被覆分類図 (1)LANDSAT ETM+全 band 使用 (2)ALOS AVNIR2 全 band 使用 (3)2007 年デジタル化空中写真のみ使用 (4)デジタル化空中写真に LANDSAT ETM+ band4 コンポジットした画像を使用(参考文献[2]より)

表 8.1 図 8.2 の土地被覆分類図の分類精度(参考文献[2]より)

(1) LANDSAT ETM+ による最尤法分類分類精度(%)									(2) ALOS AVNIR2による最尤法分類分類精度(%)										
LANDSAT	最 尤 法 分 類 結 果								ALOS	最 尤 法 分 類 結 果									
	竹	広葉樹	針葉樹	草地	宅地	裸地	道路	水域		竹	広葉樹	針葉樹	草地	宅地	裸地	道路	水域		
教師	竹	13.0	57.5	7.5	10.5	0.0	0.0	10.9	0.6	教師	竹	63.9	21.7	11.3	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0
	広葉樹	1.5	95.3	3.2	0.0	0.0	0.2	1.4	0.0		広葉樹	0.1	74.7	20.3	0.0	0.0	2.4	0.0	2.4
	針葉樹	9.6	11.2	79.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		針葉樹	13.4	29.7	56.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	草地	24.2	0.0	0.0	60.7	1.5	0.1	3.9	9.7		草地	2.6	0.5	0.0	83.9	1.0	0.7	4.0	7.2
	宅地	0.0	0.0	0.0	0.0	76.3	0.2	16.2	7.2		宅地	0.7	0.0	0.0	4.3	74.5	0.9	17.5	2.0
	裸地	10.1	0.0	0.0	24.4	0.0	42.6	21.1	1.8		裸地	11.2	0.0	0.0	31.6	0.0	57.1	0.1	0.0
	道路	2.6	0.0	0.0	33.2	5.8	0.0	43.5	14.8		道路	0.9	0.0	0.0	2.1	8.4	0.7	81.5	6.4
	水域	22.1	0.0	0.0	1.4	0.0	0.6	4.2	71.7		水域	16.0	12.3	0.0	4.8	0.0	0.6	0.0	66.2
	平均分類精度 : 60.3%										平均分類精度 : 69.8%								
(3) 空中写真による最尤法分類分類精度(%)									(4) コンポジット空中写真による最尤法分類分類精度(%)										
空中写真	最 尤 法 分 類 結 果								空中写真+ LANDSAT BAND4	最 尤 法 分 類 結 果									
	竹	広葉樹	針葉樹	草地	宅地	裸地	道路	水域		竹	広葉樹	針葉樹	草地	宅地	裸地	道路	水域		
教師	竹	56.3	5.9	21.2	11.8	0.0	0.0	0.0	4.9	教師	竹	56.9	15.1	9.6	18.4	0.0	0.0	0.0	0.1
	広葉樹	9.6	83.8	3.3	0.1	0.4	0.0	0.0	2.8		広葉樹	1.4	82.5	8.3	7.1	0.6	0.0	0.0	0.0
	針葉樹	2.2	1.6	95.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.3		針葉樹	0.8	0.1	99.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	草地	4.6	0.0	0.1	94.8	0.0	0.0	0.0	0.4		草地	2.3	0.0	0.1	97.0	0.0	0.0	0.0	0.6
	宅地	0.0	0.0	0.4	0.1	88.4	1.2	8.6	1.3		宅地	0.0	0.0	0.0	0.0	88.8	0.0	9.7	1.4
	裸地	0.0	0.0	0.6	0.0	0.1	90.5	7.3	2.1		裸地	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	91.6	0.1	0.0
	道路	0.0	0.0	0.1	0.0	3.0	3.2	93.3	0.4		道路	0.0	0.0	0.1	0.0	5.2	5.6	88.9	0.1
	水域	0.0	0.0	55.5	0.0	0.0	0.0	0.0	44.5		水域	0.0	4.3	13.4	0.0	0.0	0.0	0.0	82.3
	平均分類精度 : 80.9%										平均分類精度 : 85.9%								

表 8.2 教師データ内の BGR 及び band4 の DN 値(参考文献[2]より一部改変)

	教 師 デ ー タ							
	竹	広葉樹	針葉樹	草地	宅地	裸地	道路	水域
B	75.25	70.43	77.53	79.77	131.87	110.46	133.45	82.11
G	102.33	88.09	98.06	108.86	141.93	128.80	144.19	101.32
R	88.53	71.07	88.01	92.64	141.07	128.94	144.66	89.77
band4	56.03	61.62	58.43	66.69	50.28	59.84	46.10	45.11

て取得した地点の画像中の画素データ分布パターンが広い範囲で重なり合ってしまうため、分類精度が低下してしまう。この問題を解消し、空中写真による土地被覆分類図と人工衛星データで作成したそれとを同等のものとして議論できるようにするためには、やはり近赤外域の反射率データを空中写真にコンポジットしたものを使用方法が有効である。

コンポジット空中写真を用いた土地被覆分類図(図 8.2(4))とその分類精度(表 8.1(4))を、空中写真を用いたもの(図 8.2(3), 表 8.1(3))と比較してみると、平均精度は 85.9%と、空中写真を用いたものに比べて 5%高くなる。特に水域に関しては針葉樹への誤分類が多かったが(表 8.1(3)), コンポジット空中写真を用いることで約 40%の精度向上が見られ、針葉樹への誤分類は大幅に減少した(表 8.1(4))。この理由を考える

上で表 8.2 を見てみると、水域と針葉樹、竹と草地のそれぞれの RGB の値は近接しているが、LANDSAT ETM+データ band4 の値は大きく異なる。よってこの値の相違が、水域の教師データの取得地点の画素データ(DN 値)分布パターンと針葉樹のそれとを明瞭に異なるものとし、それを反映して図 8.2(4)の水域の分類結果は高くなったものと考えられる。ここで、第 6 章、第 7 章においても同様の傾向が捉えられたことから、本研究手法は水域を含むような土地被覆分類図の作成に有効な手段であると考えられる。

一方、宅地と道路もともに RGB の値がほぼ同じで薄い灰色を呈し(表 8.2)、誤分類されやすい関係にある。しかし、両者ともコンクリートやアスファルトなどの人工建造物であるので、LANDSAT ETM+データ band4 の値にあまり差がでず(表 8.2)、コンポジット空中写真で最尤法分類しても、大幅な精度向上には至らなかった。また、緑地に関しても大幅な精度向上は見られず、広葉樹に関してはコンポジット空中写真の方が 1.3%精度の低下が見られた。

以上より、コンポジット空中写真を用いれば、RGB の値とともに近赤外域の反射率データを考慮に入れて最尤法分類ができるため、可視領域のみの空中写真よりも精度向上が見込めるが、RGB 値と近赤外域の反射率データの値が互いに近接しているような分類項目に関してはその限りではない。よって、分類項目の設定を工夫する必要があると考えられ、今回の場合は特に非緑地の宅地と道路に関してはまとめて一つの分類項目にした方が適切であった可能性がある。

しかしながら、図 8.2(4)における非緑地の分類精度(表 8.1(4))と、LANDSAT ETM+データを用いた図 8.2(1)の精度を(表 8.1(1))とを見比べてみても分かるように、特に道路に関しての精度向上が著しい。LANDSAT のような 1 セルあたりの解像度が 30m と低く、ミクセル状態が多いデータを用いた非緑地における人工建造物の最尤法分類は誤分類が頻発するため敬遠されがちであるが[1]、解像度が高いコンポジット空中写真を用いた場合、大幅な誤分類は発生しなかった。そのため、高解像度なコンポジット空中写真による最尤法分類は、都市域での解析にも適していると考えられ、本研究で提案する手法は自然環境のみならず、人工地物が被覆するエリアにおいても有効な地表面環境解析の手段であると考えられる。さらに、今回作成した空中写真による土地被覆分類図は、その作成に用いた地理データに関してはすべて無償で取得したものである。本研究手法を用いれば廉価にミクセル状態が頻発すると考えられる都市域における高分解能かつ高精度な土地被覆分類図の作成が可能で、近年の高地上分解能を持つ人工衛星データではカバーできない年代の土地被覆状況を研究対象とする際に有効であると考えられる。

8.5 考察～土地被覆の経年変化

本節では、コンポジット空中写真を用いた解析事例として、時代間の土地被覆分類図のオーバーレイ解析を行う。1981年撮影のコンポジット空中写真(1/8,000 カラー空中写真(1981年11月18日撮影と1984年5月22日観測のLANDSAT TM データをコンポジット)を用いた土地被覆分類図を図8.3に、図8.2(4)と図8.3(1)の各分類項目の面積とその約25年間の変化を表8.3に示す。1981年空中写真は図8.1(2)に示す。なお、図8.3の全体平均精度は77.5%であった。

図8.2(4)、図8.3と表8.3から土地被覆の面積変化を見てみると、約25年間で森林・草地面積の減少と宅地・道路・裸地面積の増加が目立つ。空中写真を見てみても(図8.1、図7.1(1)(2))、1981年に比べて2007年では特に解析地域東側での宅地造成に伴う森林減少が顕著で、さらに森林周辺の竹林化が読み取れる。表8.3を見てみると、約25年間で宅地54,689 m²(増加率20.6%)、道路61,573 m²(同12.5%)の面積増加に対し、広葉樹は205,554 m²(減少率40.8%)減少している。また、竹林は森林に比べて減少率が3.4%と低く、約25年間における森林の解析地域全体に占める割合が33.6%から26.1%へ低下するのに対し、竹は9.0%から8.7%と微減傾向であるため、森林に占める竹の面積の相対的な増加が見られる。以下より、都市化の様子と竹林の森林への侵入の様子に焦点を当てて、土地被覆分類図を用いた地表面解析事例を示す。

表 8.3 土地被覆の約25年間の面積変化(参考文献[2]より)

分類項目	1981年		2007年		面積変化(2007-1981)	
	面積(m ²)	占有率(%)	面積(m ²)	占有率(%)	面積(m ²)	増減率(%)
竹	213,676	9.0	206,404	8.7	-7,272	-3.4
広葉樹	503,980	21.3	298,426	12.6	-205,554	-40.8
針葉樹	78,233	3.3	112,441	4.8	+34,208	+43.7
(森林)	(795,889)	(33.6)	(617,271)	(26.1)	(-178,618)	(-22.4)
草地	521,146	22.0	441,592	18.7	-79,554	-15.3
宅地	265,786	11.2	320,475	13.5	+54,689	+20.6
裸地	264,884	11.2	345,233	14.6	+80,349	+30.3
道路	490,839	20.7	552,412	23.3	+61,573	+12.5
水域	28,156	1.2	89,717	3.8	+61,561	+218.6
合計	2,366,700	100.0	2,366,700	100.0		

注) (森林)は竹、広葉樹、針葉樹を合計した。

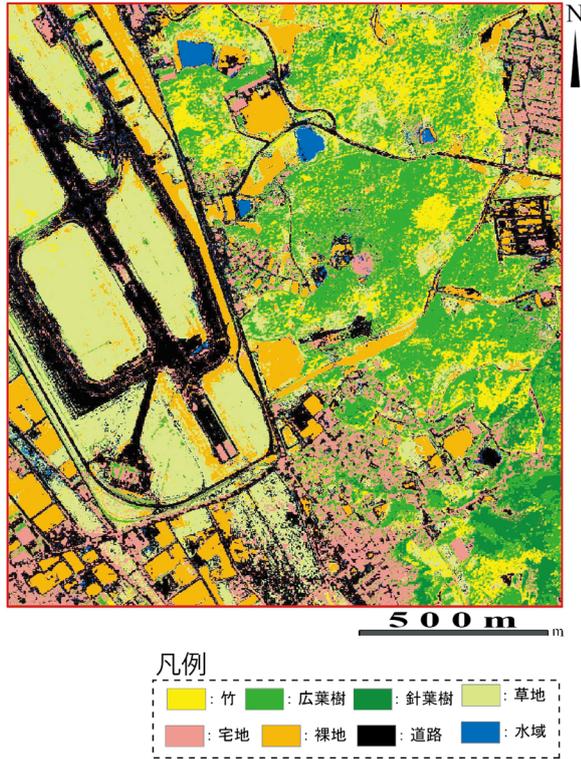


図 8.3 1981 年の土地被覆分類図(コンポジット空中写真使用)(参考文献[2]より)

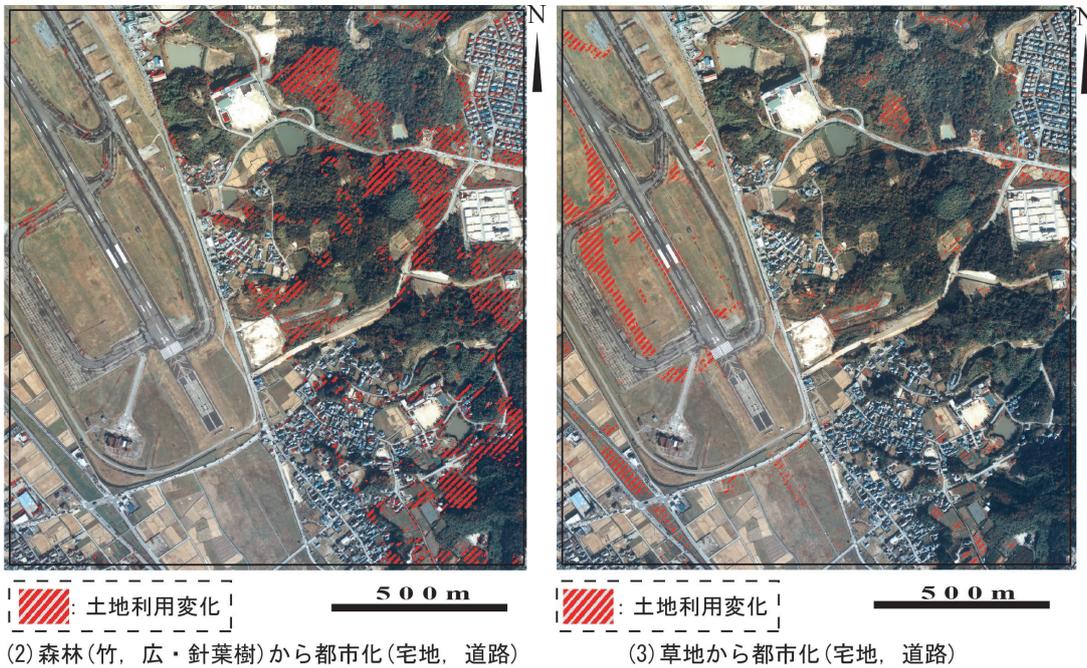


図 8.4 (1)森林から都市化, (2)草地から都市化 (図 8.3(2), (3)の背景の空中写真は 1981 年 11 月 18 日撮影の 1/8,000 空中写真を使用)(参考文献[2]より一部改変)

まず, 図 8.4(1)は約 25 年間で面積が増えた宅地・道路の内, 森林が開発造成を受けた範囲だけをオー

バーレイ解析により抽出したものを 1981 年撮影空中写真に重ねて表示したもので、同じく図 8.4(2)は草
 地が開発造成を受けた範囲を抽出したものである。図 8.4(1)を見てみると、特に解析地域東側での森林開
 発による都市化の様子がよく分かる。また、図 8.4(2)を見てみると、福岡空港内の滑走路の拡張や、解析
 地域南西部にみられる道路の拡張によって草地が消失している様子がよく分かる。これらの土地被覆の
 変化は、2007 年空中写真(図 8.1(1))と見比べてみても明らかである。

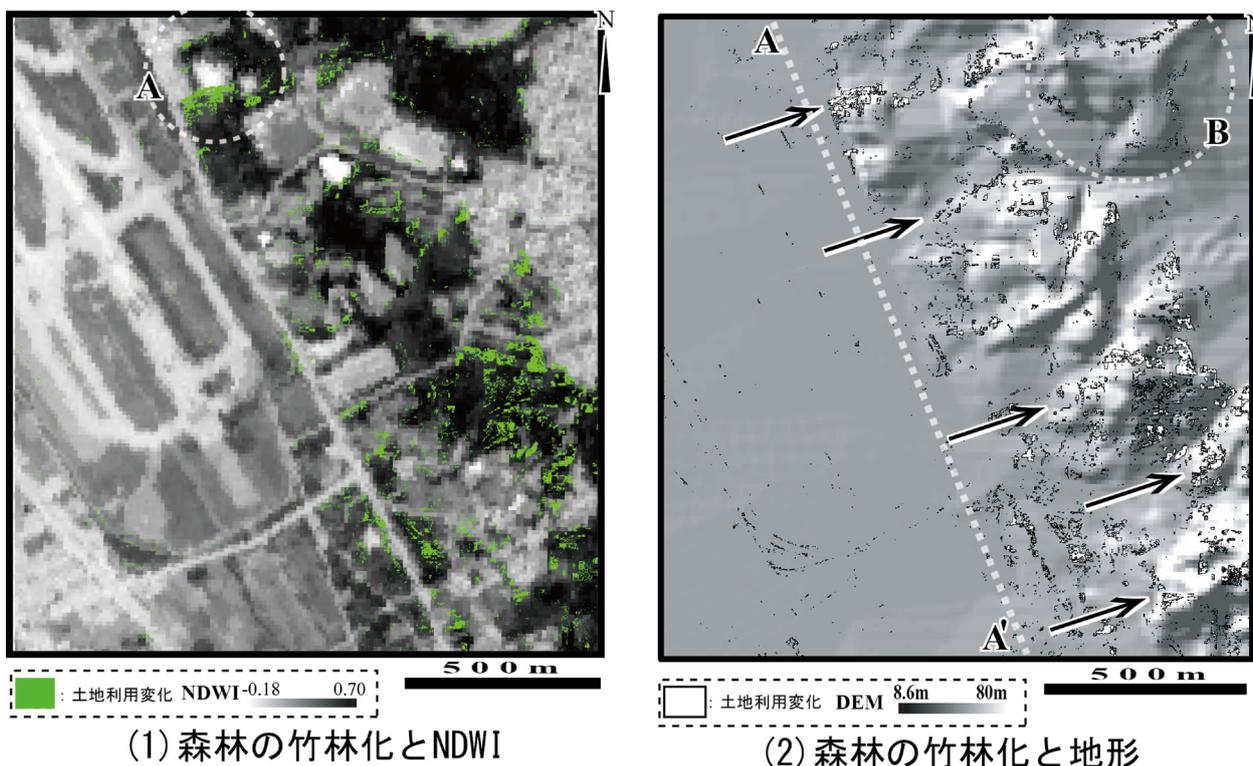


図 8.5 竹の約 25 年間で森林への侵入の様子(参考文献[2]より)

次に、竹林の森林への侵入を地
 表面環境と関連付けて考えるた
 めに、図 8.2(2)作成に用いた
 ALOS AVNIR 2 データを GIS で
 バンド間演算することで、NDWI

表 8.4 土地被覆変化地点の平均 NDWI(参考文献[2]より)

	広葉樹→竹	広葉樹	針葉樹→竹	針葉樹	竹
平均NDWI	0.097	0.001	0.072	0.012	0.167
解析範囲全体の平均NDWI : 0.236					

を算出した。さらに、地形との関連性を考えるために、2006 年発行 1/25,000 地形図から作成した解像度
 10m の DEM を陰影表示にして解析範囲内に示した。これらに約 25 年間で面積が拡大した竹の内、広
 針葉樹から竹へ土地被覆が変化した範囲だけを重ね合わせたものが図 8.5(1)、同様に DEM に重ねあわせ

たものが図 8.5(2)である。

竹林の、特に広葉樹への侵入は日本各地で報告がされていて[3]、また、水分を得やすい河川堤外の河畔林への侵入が福岡県でも報告されている[4]。林ほか(2008)によれば、竹林は主として平坦面～緩斜面から森林に侵入するとされ、地下茎を地下に発達させることにより暗い場所でも生育でき、さらに成木するまで数ヶ月しかかからないため加速度的に竹の群落は拡大していくとされる[5]。図 8.5(1)を見てみると、緑地と非緑地との境目のような、NDWI の値の高低が変化するポイントにおいて森林が竹林へと変化しているように見え、森林へ環状に侵入している様子が見て取れる。また、図 8.5(1)の A 地点に見られるように、水域(ため池)周辺にも竹の侵入が多く見られる。表 8.4 は、森林への竹林の侵入箇所における NDWI の平均値と、図 8.2(4)の広葉樹、針葉樹、そして竹に分類された地点の NDWI の平均値及び解析範囲全体の NDWI の平均値を GIS ソフトのオーバーレイ解析で算出したものである。広葉樹の平均 NDWI は 0.001、同じく針葉樹は 0.012 と低いが、竹へと変化した地点は前者が 0.097、後者が 0.072 と、竹が樹林の特に地表面の土壌水分が高い箇所から侵入している傾向が見られる。この結果は既存研究と調和的で、竹は地下茎の発達深度が 50cm 程度と浅いことが知られていて[6]、地下水脈が浅い地点でよく生育するとされる。今回の解析範囲内で地下水脈が浅いと考えられる地点は、ため池周辺及び沖積低地と他の地形との地形境界が挙げられる。そこで、地形に関して図 8.5(2)を見てみると、A～A'に沿って沖積低地と丘陵の地形境界線があり、このラインに沿って竹が明瞭な北西－南東方向の森林への侵入前線を形成している。また、地点 B の範囲を見てみると、前述したように森林の丘陵を環状にとりまいて侵入前線を形成している。さらに、竹は主として日当たりが悪いと考えられる北側斜面から森林へ侵入しているように見え(図 8.5(2)矢印を参照)、他の樹木が生育しにくい箇所からも群落を拡大させている様子が見てとれる。

以上より、コンポジット空中写真を用いた最尤法分類による土地被覆分類図は、LANDSAT のような低解像度人工衛星データではミクセルしやすい地物を細かく捉えることができているため、都市域での詳細な土地被覆状況の解析などに用いることができる。また、約 25 年間の森林への竹林拡大の様相を地表面環境とともに詳細に把握することができたため、自然環境の定量的な変化を把握することも可能である。

8.6 本章のまとめ

福岡空港を含む都市域におけるデジタル化空中写真に LANDSAT の近赤外域の反射率データを GIS ソフトでコンポジットした画像を用いて最尤法分類を行い、当該地域の土地被覆分類図を作成した。その結果を以下に示す

1)空中写真に LANDSAT の近赤外域反射率データをコンポジットして最尤法分類すると、そうしないものより平均精度が 5%向上した。特に水域に関しては、第 6, 7 章と同様に大幅な精度向上が達成されたため、本研究手法は特に水域を含むような土地被覆分類図の作成に適していると考えられる。

2)LANDSAT のような低い地上分解能の人工衛星データではミクセル状態となりやすい宅地や道路でも、高解像度なコンポジット空中写真による土地被覆分類図では現実に即した分類結果を得ることができた。よって、本研究手を用いれば、地理データのコストをかけずとも、最近の高地上分解能な人工衛星データと同等な高分解能・高精度な土地被覆分類図作成が可能である。

3)土地被覆分類図の時代間オーバーレイ解析により、森林開発による都市化の様子や、地表面環境に影響された竹の森林への侵入を詳細に捉えることができた。よって、本手法は数 100m 四方のローカルなエリアにおけるリモートセンシング技術として有効である。

第9章

考察

9.1 土地被覆分類精度評価

本節では考察としてまず、前章までの阿蘇市、平尾台、大分川、白川そして福岡市の事例研究で得られた土地被覆分類図の分類精度を、類似する他の先行研究と比較検討することで評価し、本研究手法で作成される土地被覆分類図が人工衛星データを用いたものよりも高精度かつ高分解能であり、狭小な範囲における精緻な地表面環境解析に有効であることを示す。

ここで、第2章でも述べたが、実用に耐えうる土地被覆分類図の分類精度についての議論は多く、例えば John R.Thomlinson ら(1999)は総合精度で最低 85%、かつクラス毎の精度で最低 70%という基準を設けているが[1]、これはあくまでグローバルスケールな土地被覆分類に主眼を置いたもので、通常は全ての分類項目で 80%程度以上の判別効率が得られれば、その成果を採用することが多いとされる[2]。そこで、本研究で作成した土地被覆分類図の分類精度を、先行研究と比較することで、本研究手法の妥当性を検討する。

表 9.1 は、本研究での分類項目全体の平均分類精度と先行研究による解像度 2.5m未満の人工衛星データを用いた土地被覆分類図の精度をまとめた表である。2.5m未満としたのは、1m未満の解像度を持つ土地被覆分類の分類精度を評価した先行研究が未だ少ないことと、一般入手可能な人工衛星データのうち、地上分解能 2.4mの Quick Bird を使用した先行研究を含める処置である。先行研究は、自動分類方法、アプリケーション、解析対象とする地域、さらに分類項目等々が本研究と異なるので直接的には比較できないので、分類項目全体の平均精度に着目する。

まず、本研究での分類項目全体の平均分類精度(総合精度)を概観すると(表 9.1)、第3章で作成した阿蘇市の事例で 83.0%、第4章の平尾台の事例で 94.8%、第6章の大分川の事例で 88.3%、同章白川の事例で

表 9.1 本研究と先行研究による平均分類精度 (著者原図)

	第3章	第4章	第6章	第7章	第8章
研究対象地域	熊本県阿蘇市	福岡県平尾台	大分県大分川	熊本市県川	福岡県福岡市
研究テーマ	河川氾濫域及び斜面崩壊地の抽出	植生と石灰岩の分類	河川近傍土地被覆分類	河川近傍土地被覆分類	都市域土地被覆分類
使用衛星データ	THEOS+空中写真+傾斜	ALOS AVNIR2+空中写真+傾斜	ASTER VNIR+空中写真	ALOS AVNIR2+空中写真	LANDSAT+空中写真
分類方法	最尤法分類	最尤法分類	最尤法分類	最尤法分類	最尤法分類
使用アプリケーション	ArcGIS	ArcGIS	ArcGIS	ArcGIS	ArcGIS
土地被覆分類図解像度	1m	1m	1m	1m	1m
平均精度 (%)	83	94.8	88.3	88.0	85.9

	先行研究1 Noorほか(2013)	先行研究2 松澤ほか(2011)	先行研究3 Leほか(2004)	先行研究4 Scotほか(2003)	先行研究5 原ほか(2014)
研究対象地域	沖縄本島ヤンバル地域	新潟県佐渡市	パナマ沿岸部	米国ワシントンDC郊外	千葉県佐倉市
研究テーマ	森林伐採地の抽出	竹林の抽出	マングローブ林抽出	森林の抽出	農村の土地被覆分類
使用衛星データ	IKONOS	World View2	IKONOS, Quick Bird	IKONOS	Quick Bird
分類方法	最尤法分類, オブジェクト分類	オブジェクト分類	オブジェクト分類	最尤法分類	最尤法分類
使用アプリケーション	最尤法: ENVI, オブジェクト: eCognition	Definiens Developer	eCognition	不明	ERDAS IMAGINE
土地被覆分類図解像度	不明 (1m程度と予想)	不明 (1m未満と予想)	不明 (1m程度と予想)	不明 (1m程度と予想)	不明 (2m程度と予想)
平均精度 (%)	最尤法: 83.7 オブジェクト: 81.3	59.6 (NN法) 53.5 (CART)	IKONOS: 75.5 Quick Bird: 73.43	86.0	77.23
備考		オブジェクト分類ではNN法とCARTモデルを使用			

	先行研究6 福岡ほか(2012)	先行研究7 Xuほか(2015)	先行研究8 Alrezaほか(2015)	先行研究9 山本ほか(2014)	先行研究10 大西ほか(2014)
研究対象地域	宮城県女川町	香港 Mong Kok地区	マレーシア クアラルンプール郊外	東京都世田谷区	富山県富山市中心部
研究テーマ	津波による瓦礫の抽出	都市域建築物抽出	都市域の詳細な土地被覆分類	都市域土地被覆分類	都市域土地被覆分類
使用衛星データ	World View2	World View2	World View2	World View2	IKONOS
分類方法	オブジェクト分類	オブジェクト分類	オブジェクト分類	オブジェクト分類	オブジェクト分類
使用アプリケーション	不明	不明	ENVI	不明	不明
土地被覆分類図解像度	50cm	不明 (1m未満と予想)	不明 (1m未満と予想)	不明 (1m未満と予想)	1m
平均精度 (%)	69.8 ~ 81.0	76.7	85.02 ~ 93.07	60 ~ 70	82.24
備考		World View2に建物3Dデータをコンポジットした画像を使用	World View2にレーザー測量データをコンポジットした画像を使用		

88.0%, 第7章の福岡市の事例で 85.9%であり, すべて分類精度 80%を超え, 阿蘇市の事例を除いては John R.Thomlinson ら(1999)の基準, 総合精度で最低 85%をクリアしている[1]。これらはすべて一般的な GIS ソフトに搭載されている最尤法分類を用いた結果であり, 現在高解像度人工衛星データによる自動分類では主流になりつつあるオブジェクト指向分類は用いていない。また, 土地被覆分類図のセルサイズ(解像度)はすべて 1m で, LANDSAT や ALOS AVNIR2 では作成し得ない高解像度を実現している。

次に, 先行研究の土地被覆分類図の分類項目全体の平均分類精度を見てみると(表 9.1), まず, 森林等の自然環境をターゲットとした事例では, Noor ほか(2013)の地上分解能 1m の IKONOS を用いて沖縄本島の森林の, 特に伐採地をオブジェクト指向分類及び最尤法分類したもので 80%台前半[3], 松澤ほか

(2011)の地上分解能 0.46m の World View 2 を用いて佐渡島の森林中の竹の抽出をオブジェクト指向分類したもので 50%台[4], Le ほか(2004)の IKONOS と地上分解能 2.4m の Quick Bird を用いてパナマにおけるマングローブ林の抽出をオブジェクト指向分類したもので 70%台前半[5], Scot ほか(2003)の IKONOS を用いてワシントン D.C.郊外における森林の抽出を最尤法分類したもので 86%[6], 原ほか(2014)の Quick Bird を用いて佐倉市郊外の農村の土地被覆を最尤法分類したもので 77.23%[7], となっている。次に, 都市域などにおける人工地物をターゲットとした例では, 福岡ほか(2012)の World View 2 を用いて津波による瓦礫をオブジェクト指向分類で抽出したもので 70%~80%台前半[8], Xu ほか(2015)の World View 2 を用いて香港の高層ビル街の一部をオブジェクト指向分類したもので 76.7%[9], Alireza ほか(2015)の World View 2 を用いてクアラルンプールの都市域の一部をオブジェクト指向分類したもので 75%~90%台前半[10], 山本ほか(2014)の World View 2 を用いて世田谷区の一部をオブジェクト指向分類したもので 60%~70%台[11], 大西ほか(2014)の IKONOS を用いて富山市中心部を最尤法分類したもので 84.24%[12], となっている。以上より, 本研究でのコンポジット空中写真を用いた土地被覆分類図は国内外での先行研究での分類精度と同程度ないし良好な精度を実現しているため, 高解像度な人工衛星データと比較して地表環境解析に用いるに遜色がないと考えられる。

ここで, 近年リモートセンシング分野で盛んに利用されるオブジェクト指向分類では, 人工衛星データ以外の分類根拠となるデジタルデータを増やして自動分類することで, 分類精度を向上させる事例が見られる。例えば Alireza ら(2015)では LiDAR(Light Detection and Ranging)*¹によって得られた高さのデータを用いて nDSM(正規化標高モデル: normalized Digital Surface Model)*²を作成し, これを World View2 と組み合わせてオブジェクト指向分類を実行している[10]。具体的には, 分類項目ごとに nDSM の値を設定することで高精度化を実現しており, 例えば「草原」であれば「nDSM が 9.5 未満」と設定することで, この値が 9.5 以上の値を示す地物は草原へ分類しないことになる。また, Xu Yong ら(2015)では人工衛星 TerraSAR-X データから都市域の 3D 画像を作成し, これを World View2 と組み合わせてオブジェクト指向分類を実行することで, 建物を高さごとに階級区分している[9]。これらの手法は複数地理情報のオーバーレイによって土地被覆分類図の高精度化を目指すもので, 本研究手法と類似した考え方となる。ただし, 本研究においては空中写真を用いた土地被覆分類図の高精度化のために人工衛星データをコンポ

ジットするため、根本的な発想は異なる。本研究手法による分類精度と土地被覆分類図の解像度はこれらの例と比較して同等である上に、手軽に分類図を作成でき、なおかつオブジェクト指向分類の素養がなくとも GIS の基本操作が可能であれば作業者の属性を問わず実行できる有利さがある。

以上より、コンポジット空中写真から作成される高解像度な土地被覆分類図の分類精度は、最近の高解像度人工衛星データで作成されるものと比較して同等ないし高精度であり、さらに専門的な知識を必要とするオブジェクト指向分類ではなく最尤法分類を採用するため、GIS 普及著しい地理学界における地表面解析方法の新たな手法として普及が見込まれる。

9.2 過去への遡及性

本節では、本研究手法における過去への遡及性の高さを、先行研究と比較することで実証する。本研究では、現代の高解像度人工衛星リモートセンシングではなし得ない 1970～1980 年代の高分解能・高精度な土地被覆分類図の作成を、空中写真に LANDSAT データをコンポジットした画像を用いて実施した。解析対象としたのは第 6 章の熊本県を流れる白川流域と第 7 章の福岡市東部の福岡国際空港周辺の都市域で、前者は 1978 年、後者は 1981 年の土地被覆分類図であり、これらは近年の高解像度人工衛星データを用いたものに匹敵するセルサイズ 1m の解像度を実現している。もちろん、空中写真の本来の地上分解能 1m 未満に対応した解像度の土地被覆分類図も作成可能である。1970 年代～1980 年代の空中写真と同等かそれ以上の解像度を持つ人工衛星データは存在せず、長期に渡る地表面環境のモニタリングは、過去のデータ蓄積の多い LANDSAT データを用いたものが主流である。表 9.1 は、過去への遡及性に着目した、本研究での結果と先行研究によるものをまとめた表である。特に一般的に入手可能な過去への遡及性が高い人工衛星データのうち、気象衛星 NOAA に搭載された AVHRR(1978 年観測データより取得可能、地上分解能約 1,000m)を用いたものと、LANDSAT(1978 年観測データより取得可能、地上分解能約 80 m～30m)を用いたものを取り上げる。

まず表 9.2 の NOAA AVHRR データを使用した先行研究例を見てみると、堤田(2017)は NOAA AVHRR データにより作成された NDVI(GIMMS NDVI)を用いて、全球における 1981 年から 2015 年の 34 年間に渡る 1 年ごとの土地被覆分類図を用いてその経年変化を抽出した[13]。古野ほか(2008)は、1970 年代から

表 9.2 本研究と先行研究による使用衛星データの年代(著者原図)

	第7章	第8章
研究対象地域	熊本県白川流域	福岡市福岡空港周辺
研究テーマ	白川流域の土地被覆経年変化	福岡市の土地被覆経年変化
使用衛星データ	LANDSAT MSS 1978年 ALOS AVNIR2 2008年	LANDSAT TM 1984年 LANDSAT ETM+ 2007年
使用空中写真	1975年, 2007年撮影	1981年, 2007年撮影
土地被覆分類画素解像度	1m	1m
備考	コンポジットした空中写真は1975年撮影。1975～2007年の約30年間の土地被覆変化を明らかにした。	コンポジットした空中写真は1981年撮影。1981～2007年の約25年間の土地被覆変化を明らかにした。

	先行研究1 堤田(2017)	先行研究2 古野ほか(2008)	先行研究3 梶山ほか(2015)
研究対象地域	全球	中国モンゴル自治区ゴビ砂漠黒河流域	カラコルム山脈
研究テーマ	全球土地被覆変化	乾燥地の土地被覆変化	氷河末端の変動
使用衛星データ	AVHRR 1981年～2015年までの計816枚	AVHRR 1979年 Terra MODIS 2005年	LANDSAT TM 1990年前後 LANDSAT ETM+ 2000年前後 ALOS AVNIR2 2010年前後 Terra MODIS 2010年前後
土地被覆分類画素解像度	約1,000m	約1,000m	約10m～約30m
備考	1981～2015年の約35年間の土地被覆変化を解明した。	1979～2005年の約25年間の土地被覆変化を解明した。	1990年～2010年の約20年間の氷河末端変動を解明した。

	先行研究4 Durinaほか(2013)	先行研究5 Adellほか(2007)	先行研究6 J.S.Rawatほか(2015)
研究対象地域	タイ, バンコク都市域	エジプト北西部	インド, ウッタラカンド
研究テーマ	都市化の進展	土地被覆変化	土地被覆変化
使用衛星データ	LANDSAT TM 1990年 ALOS AVNIR2 2009年 ALOS PRISM 2009年	LANDSAT TM 1987年 LANDSAT ETM+ 2001年	LANDSAT TM 1990年 LANDSAT TM 2010年
土地被覆分類画素解像度	約10m～約30m	約30m	約30m
備考	1994年～2009年の約15年間の都市拡大の様相を解明した。	1987年～2001年の約15年間の土地被覆変化を解明した。	1990年～2010年の20年間の土地被覆変化を解明した。

1980年代のNOAA AVHRRデータおよび2000年代のTerra MODISデータを用いて、中国モンゴル自治区の黒河流域の乾燥地帯における1979年から2005年の約25年間の土地被覆変化を明らかにした[14]。以上のように、NOAA AVHRRデータは高い過去への遡及性を持ち、2017年現在まで最大39年間の地表面に対する経年変化を検討することが可能であるが、地上分解能が約1,000mと、大陸規模のグローバルス

ケルな課題に対してのみ有効なデータと考えられる。

次に、LANDSAT データを使用した例を見てみると(表 9.2), 梶山ほか(2015)は、1990 年代の LANDSAT TM データ, 2000 年代の LANDSAT ETM+データ, 2010 年代の ALOS AVNIR2 および Terra ASTER を用いて、カラコルム山脈における 1990 年から 2010 年の 20 年間の氷河末端変動の経年変化を明らかにした [15]。Durina ほか(2013)は、LANDSAT TM, ALOS AVNIR2 及び ALOS PRISM データを用いて、タイの首都バンコクにおける 1994 年から 2009 年の約 15 年間の都市拡大の様相と近郊地域における農業景観の変遷を明らかにした [16]。Adel ほか(2007)は、LANDSAT TM および ETM+データを用いて、エジプト北西部における乾燥地の 1987 年から 2001 年の約 15 年間の土地被覆, 特に植生劣化の経年変化を明らかにした [17]。J.S.Rawat ほか(2015)は、LANDSAT TM データを用いて、インド国ウッタラカンド州における 1990 年から 2010 年の 20 年間の土地被覆変化を明らかにした [18]。このように、LANDSAT も NOAA AVHRR データと同じく 2017 年現在まで約 40 年間の経年変化を検討することが可能であるが、地上分解能が MSS データで 80m, TM および ETM+データで 30m であるためミクセル状態が頻発しやすく、やはり LANDSAT も大陸国家の州や大都市を包括的に含む規模や大地形規模の課題に対して有効なデータであると考えられる。以上より、1970 年代のカラー空中写真に LANDSAT データをコンポジットする本研究手法は、先行研究と比較して過去への遡及性の高さという点で見た場合同等であると言える。

以上より、RGB のカラー情報に近赤外域の不可視領域のデータを分類根拠として最尤法分類し、出力される解像度 1m の土地被覆分類図に 2017 年現在から約 40 年間の時間遡及性を与えることができる方法は本研究手法のみであり、本邦における市町村単位、小地形単位のローカルな範囲で精緻に地表面環境の経年変化を検討する地理学的課題に対して有効な手段であると考えられる。

ここで、過去への高い遡及性と高い解像度を備えた人工衛星データとして、アメリカ合衆国が打ち上げた偵察衛星 CORONA がある。CORONA 画像は 1960~1970 年代にフィルムで撮影されたいわゆる「モノクロ写真」で、1995 年に機密扱いが解かれ、アメリカ地質調査所(USGS)を通じて一般公開がなされており、その解像度は約 3~8m で、現代の高水準な解像度を持つ人工衛星データと比べて遜色がない [19]。そのため、目視による空中写真判読としての利用に留まらず、LANDSAT 以前の土地被覆を高解像度で捉える研究に利用され、例えば守村ほか(2003)はアラル海南部のシルダリアを解析対象に、1963 年撮影の

CORONA 画像の色調を 256 階調に変換し、これを教師無し最尤法分類により土地被覆分類図を作成し[20]、田(2008)も同様に中国北京の 1697 年の土地被覆を 256 階調の輝度値を手がかりに分類した[21]。しかし、CORONA は冷戦時代のアメリカ合衆国の偵察衛星という性質上、撮影範囲が旧ソ連や中国などを中心に撮影されていることから、解析対象とできる範囲が限定され[22]、事実、守村ほか(2003)や田(2008)のように、CORONA 衛星を用いた研究は旧ソ連地域やモンゴル、中国における研究に活発利用されている[20][21]。本邦に限ればカラー空中写真の入手は容易であり、web 上から無料で取得できる場合も多く、LANDSAT データに関しても同様に USGS のホームページから無料でダウンロードできる手軽さがある。さらに、CORONA はモノクロ写真であるため、最尤法分類や他の自動分類法において 256 階調の輝度値しか利用できず、また、人工衛星という特性上、雲に覆われた部分やフィルムの傷などのノイズもあり、これを軽減・除去するための前処理も必要となる[21]。本研究手法の過去への遡及性は LANDSAT データとカラー空中写真の提供時期に依存するため、CORONA 画像を用いて作成できる土地被覆分類図のその高さには及ばないが、カラー画像を用いることや解析範囲の設定に対する自由度、分類前のノイズ除去作業がほぼ必要がない有利さがある。

以上より、本研究の手法、カラー空中写真に LANDSAT データをコンポジットして土地被覆分類図を作成する手法は、NOAA AVHRR データや LANDSAT データと同等の過去への遡及性を持って解像度 1m の土地被覆分類図の作成が可能であり、さらに、LANDSAT 以前の衛星画像として利用される CORONA 画像よりも撮影範囲とノイズの少なさで有利である。

9.3 他の主題図への読み替え

9.3.1 本節の概要

本節では、作成された土地被覆分類図を GIS ソフトでデジタル処理し、他の主題図への変換を試みる。まず、第 6 章で作成した大分川近傍における土地被覆分類図を水害に対応するハザードマップへの読み替えを行い、河川近傍における水害リスクを検討する。近年 GIS ソフトの普及により、デジタルデータで作成された地図の分類項目を読み替えることで、他の意味を持つ主題図へと変換することも容易とな

ってきた。例えば自然災害科学の分野における「土地条件」は「自然災害ハザードリスク」に読み替えられることがある。近年では中埜ほか(2015)は、土地条件図から作成する液状化ハザードマッピングの手法として、例えば「後背湿地」を液状化リスク「大きい」などと読み替えを行うことで簡便化を図ったり[23]、福田ほか(2014)はALOS データから土壌水分移動率(Water Content Fluctuation Index, WCF)を算出し、それを斜面崩壊リスクへと読み替えて考察を行ったりしている[24]。そこで、大分川河川近傍における土地被覆と地形状況の関係をオーバーレイ解析により定量的に把握するとともに、土地被覆分類図を、降雨時の地表雨水の流出程度を示す流出係数の分布図に読み替えを行い、水害に対応するハザードマッピングの一手法を提示することで、本研究の手法が自然災害科学分野へ応用できることを示す。

次に、第 8 章で作成した福岡市域の土地被覆分類図の土地利用図への読み替えを試みる。都市域全体を包括するような、広い範囲で土地利用等の時系列変遷を検討する場合、セルサイズをむやみに細かくせず、ある程度大きい方が好ましい場合もある。人工衛星データによる最尤法分類を用いた土地利用区分は、特に都市部ではミクセルの問題もあり活用しづらいが、広域性、同時性、反復性、経済性というメリットがあるため、土地利用項目を読み替えるなどして積極的に検討されている[25]。そこで本節では、本研究による高地上分解能な土地被覆分類図の他の利活用方法を検討する目的で、土地被覆分類図の土地利用図として読み替えについて議論する。

なお、本節は著者らによる投稿論文[26]、[27]にて報告したものを骨子としている。

表 9.3 流出係数(参考文献[26]より)

9.3.2 流出係数分布図へ読み替

え～大分川を例に

流出係数分布図(図 9.1)は、土地被覆分類項目に応じて河川砂防技術基準[28]に記載された土地利用等区分に定められた流出係数に対応させた(表 9.3)。なお、この対応方法に関しては宗ほか(2011)を参考としている

土地被覆分類	土地利用等区分	流出係数	
草地	水田	0.7	
耕地	畑原野	0.6	
裸地	浸透面の野外作業場 などの、間地を若干持 つ工場地域や庭が若 干ある住宅地域	0.65	
	起伏のある土地及び 樹林		0.625
	樹林		
宅地	一般市街地	0.8	
水域	水面	1	

[29]。ラスタ型データの画素に新たなデータを入力することができないので、一度ベクター型データに変換しこれに流出係数を入力し作成した。具体的には、土地被覆分類図(図 6.4④, 図 6.5④, 図 6.6④, 図 6.7④)を GIS ソフトのセルサイズの変更機能を用いて一辺 20m 四方のセルに変換したものをポリゴン形式のベクター型データに変換し、土地被覆毎に流出係数を入力した後、再度 20m 四方のラスタ型データに変換して作成した。セルサイズ変更は、これが細かすぎると生成されるポリゴンが膨大な量となることでパソコンに負荷がかかり、GIS ソフトがフリーズしてしまうことを防ぐための処置である。

図 9.1 を見ると、低地で標高が低い河口付近の市街地で流出係数が高く、段丘が多く分布し標高が高い上流域で流出係数は低くなる。しかし、下流域でなくとも loc.A のように流出係数が高まる地域もある。特に loc.A は支流合流部にあり、かつ

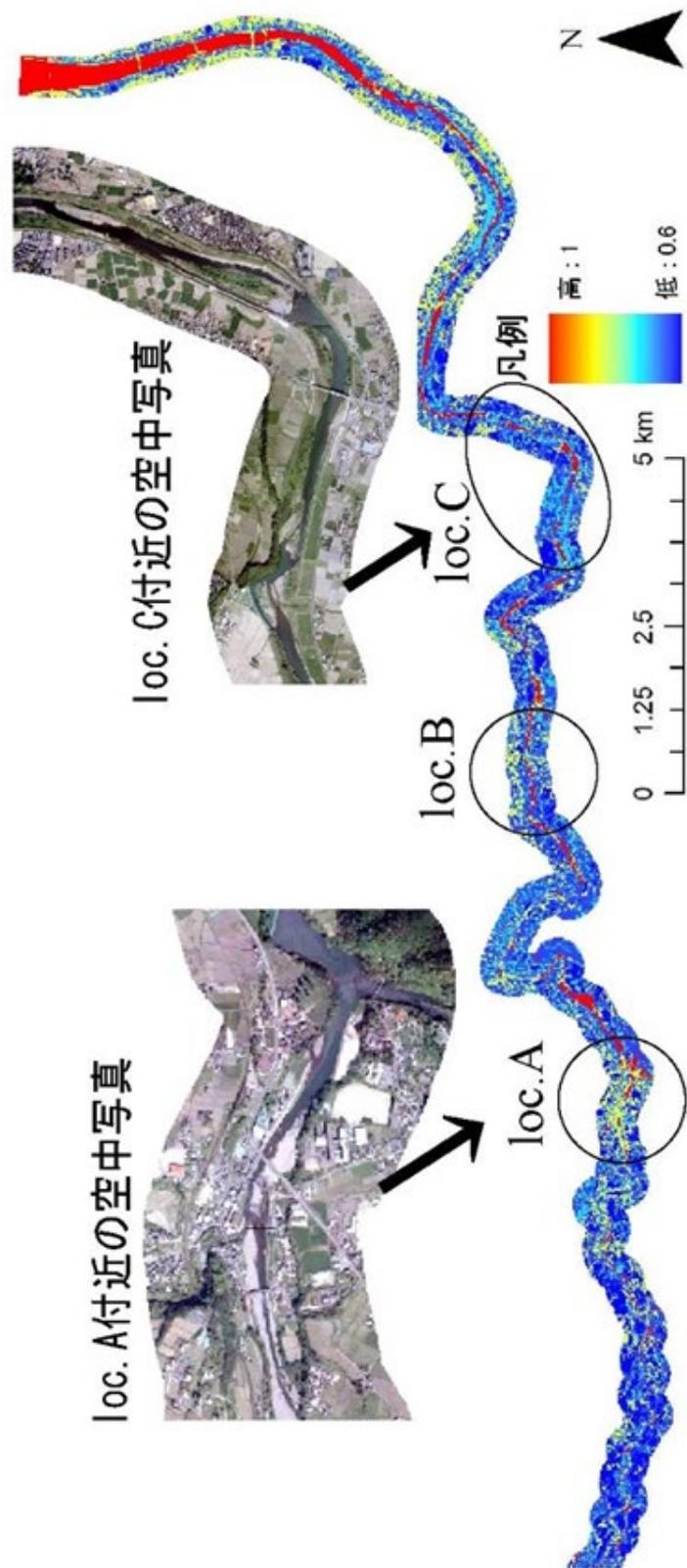


図 9.1 解析地域の流出係数分布図(参考文献[26]より)

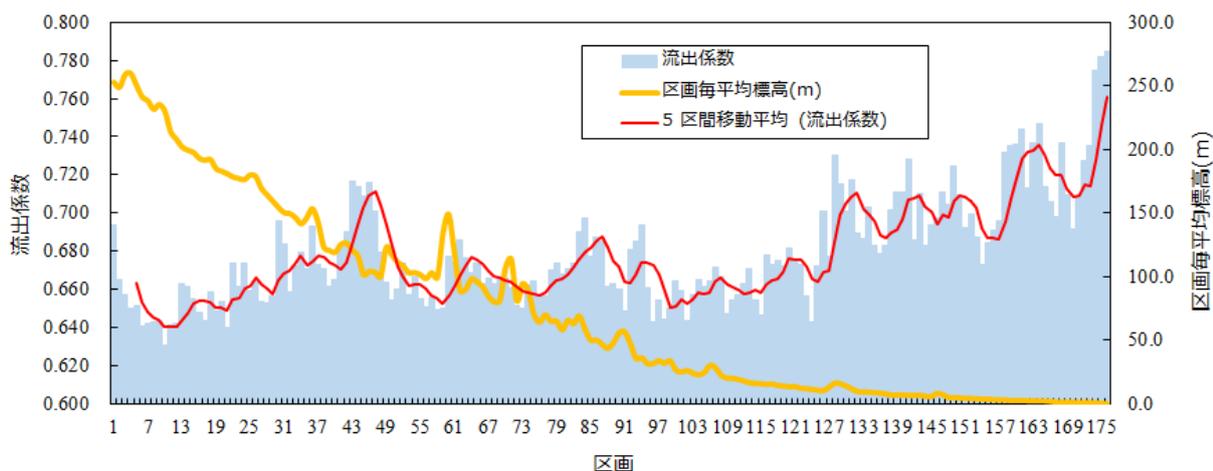


図 9.2 解析区画毎の流出係数，流出係数の 5 区間移動平均，解析区画毎の平均標高(著者原図)

段丘に挟まれた凹地状地形の中心の低地や河床に集落が形成されているため，loc.A は溢流した河川水が地下に浸透せずに長時間地表面に留まる可能性が高い。

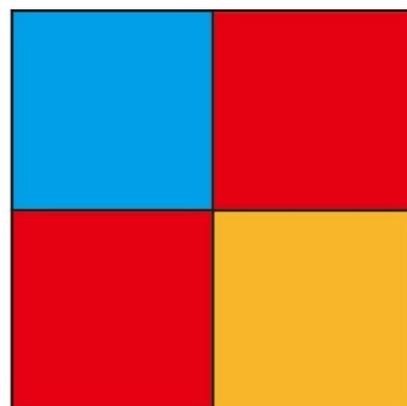
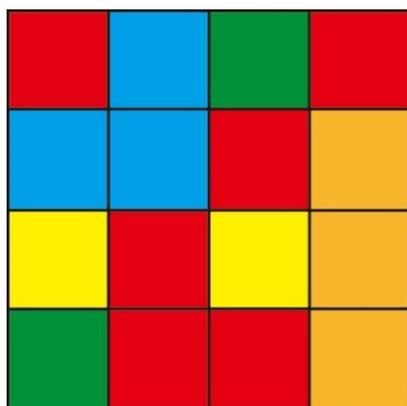
次に，流出係数の分布を詳細に把握する目的で，解析区画毎の流出係数とその 5 区間移動平均及び解析区画の平均標高を示したグラフ(図 9.2)を作成した。区画については図 6.3②)，標高については図 6.3 ③)に示す。図 9.2 を概観してみると，区画 90 付近から下流にかけては区画平均標高の低下とともに流出係数が高低を繰り返しながら徐々に高まる傾向が見られる。この区間における，区画 127 付近，同 141 付近，同 148 付近，同 162 付近には流出係数の高まりのピーク(流出係数約 0.72)が見られ，これらの区画付近にはいずれも橋梁が存在している。よって，これら区画は橋梁による堰き止め効果で河川が溢流しやすいと考えられる上に，溢流した河川水が長時間留まる可能性が高い。区画 99 付近から区画 127 付近にかけては流出係数が約 0.66 と安定して低い。この地域は宅地とともに草地や耕地が混在するスプロール地域(図 9.1-loc.C)であり，今後当該地域における宅地開発が進むと流出係数が高まると考えられ，河川氾濫時の被害拡大が懸念される。区画 90 付近より上流側は，総じて流出係数は約 0.68 以下で下流側よりも低いが，前述した通り，宅地が進んだ区画 45 付近(図 9.1-loc.A)での流出係数が高い。区画 1 から区画 30 付近は今回の解析範囲のなかでもっとも流出係数が低い地域で，この区間には主として段丘上に耕地や草地が見られる。

以上より、土地被覆から求めた流出係数は土地被覆状況や地形分類とよく対応しており、大分川では、流出係数高いエリアは沖積低地の市街地で、同じく低いエリアは段丘面で市街地以外の耕地や草地であるという関連性が明らかとなった。

9.3.3 土地利用図へ読み替え～福岡市域を例に

趙ほか(2013)は、異なる

地上分解能を持つ人工衛星データの精度比較を行うために、土地被覆分類図をリサンプル(再標本化)することで意図的に画素(セルサイズ)を拡大した



例) 1辺 25mのピクセルを 1辺 50mにリサンプルして変換

土地被覆分類図を作成した[30]。その概念図を図 9.3

に示す。本研究でもこの方法を用いて、第 8 章の図

図 9.3 リサンプル(再標本化)の例 (最も卓越する分類項目へ統合する)(著者原図)

8.3(1)の 1981 年の土地被

覆分類図を GIS ソフトに搭載されているリサンプル機能を使用してセルサイズを 100m×100m に変換した。以後この土地被覆分類図を便宜的に土地被覆分類メッシュマップと呼称する。今回土地利用図との比較検証を行うために用いた土地利用図は、100m メッシュの国土交通省国土地理院がインターネットで無償頒布している国土数値情報土地利用細分メッシュデータの昭和 51 年(1976 年)度版*3 である。以後これを便宜的に土地利用細分メッシュマップと呼ぶ。

両マップの分類項目が一致するように、長谷川(1998)を参考に GIS ソフトで両者とも市街地、田、裸地、森林、水域の 5 分類に再分類した[25]。解析範囲内に分布する土地利用細分メッシュマップの分類項目は、建物用地 B(独立建物(小)で長辺 50m 以下の独立建物)、その他用地(福岡空港の滑走路含む)、田、荒地、

果樹園，森林，水域であった。土地被覆メッシュマップの分類項目とマッチするように，建物用地 B とその他用地を統合して「市街地」とし，果樹園と森林を統合して「森林」とし，荒地は「裸地」とした。土地被覆分類図(図 8.3)の分類項目のうち，宅地と道路を統合して「市街地」，竹・広葉樹・針葉樹を統合して「森林」とした。「草地」については，福岡空港内に見られるものがほとんどであることから「市街地」へ統合した。図 9.4(1)に土

表 9.4 土地利用細分メッシュマップの「市街地」と「森林」の分布域と読み替えメッシュマップでの一致率(%) (著者原図)

		土地被覆メッシュマップ			
		市街地	森林	裸地	水域
土地利用細分メッシュマップ	市街地	61.1	15.3	11.5	0.0
	森林	10.5	72.4	9.2	2.6

地利用細分メッシュマップを，図 9.4(2)に土地被覆メッシュマップを示す。

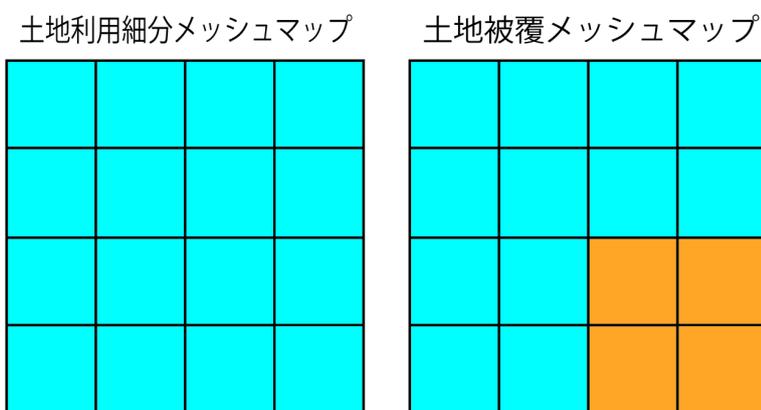
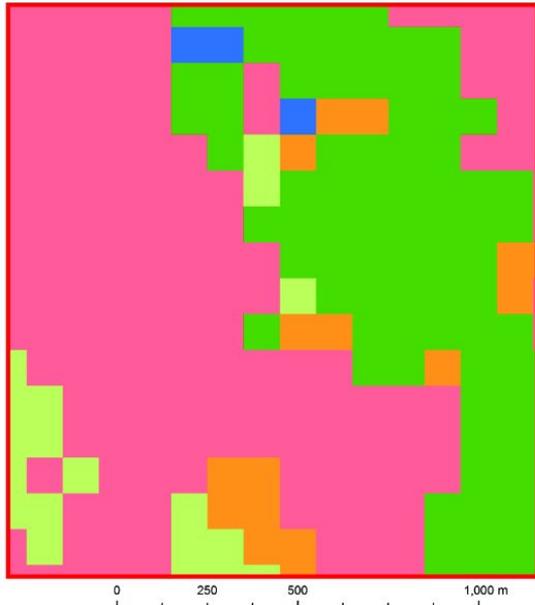
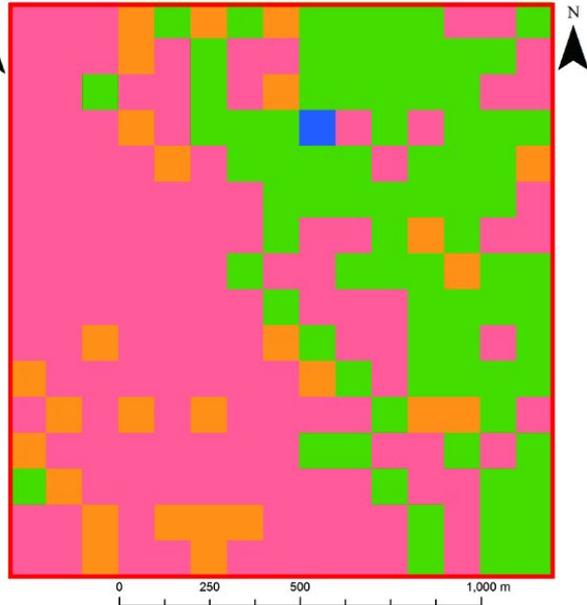


図 9.5 表 9.4 の概念 (著者原図)

図 9.4(2)を見てみると，元の分類図(図 8.3)と比べると細かい形状は画素の拡大とともに単純となり潰され，図 9.4(1)と視覚的にはほぼ同じ分布パターンとなった。これらは基本的に性質の異なる主題図であるので単純に精度比較はできないが，土地利用細分メッシュマップの「市街地」と「森林」の分布域が，土地被覆メッシュマップではどの分類項目に分類されているかを GIS ソフトでオーバーレイ解析して一致率の算出を試みた結果が表 9.4 である。図 9.5 にその概念を示す。表 9.4 を見てみると，土地利用細分メッシュマップでの「市街地」と土地被覆メッシュマップでは 61.6%一致しており，「森林」では 72.4%一致した。土地利用細分メッシュマップを「教師」とみなすなら，この値は土地被覆メッシュマップの



(1) 土地利用細分メッシュマップ



(2) 土地被覆メッシュマップ



(3) 1981 年空中写真

凡例 (1), (2) 共通

- 市街地 (含空港)
- 田
- 裸地
- 森林
- 水域

図 9.4 (1)1976 年土地利用細分メッシュマップ, (2)1981 年土地被覆メッシュマップ, (3)1981 年空中写真 (著者原図)

「分類精度」と捉えることができる。この「分類精度」が高いか低いか議論の余地があるが、少なくとも 100m メッシュの土地利用細分マップと視覚的には対応がよい。

しかし一方で、今回の解析範囲内には「福岡空港」が位置し、その土地被覆の多くを「草地」と「滑走路・誘導路(道路)」が占めている。これらを「市街地」として土地利用区分を設定すると、土地被覆「草地」に対応するであろう土地利用区分、例えば耕作地や牧草地、ゴルフ場なども「市街地」とカテゴライズされてしまい、実際に図 9.4(2)では耕作地である「田」が分類できなかった。現実の土地利用は様々な土地被覆から構成されるため、土地被覆分類図の土地利用区分への読み替えは困難を要するが、研究の目的にかなった読み替えをすれば本手法は有効であると考えられる。

9.3.4 本節のまとめ

コンポジット空中写真から作成した土地被覆分類図は GIS ソフトを用いることで流出係数の分布図という自然災害科学の内容を含む主題図へと変換でき、さらに国土交通省国土地理院発行の土地利用細分メッシュデータに類似する擬似的な土地利用メッシュマップ(土地利用図)へと変換できた。しかし後者では、そもそも土地利用図と土地被覆分類図の性質が異なるため読み替えが困難な分類項目が発生し、例えば土地利用としての「田」は土地被覆では主に「草地」と「裸地」より構成されるため、土地被覆メッシュマップでは「田」の分類ができなかった。

9.4 本章のまとめ

本章では、本研究で作成した土地被覆分類図の分類精度の評価や、過去への遡及性を、先行研究と比較することで評価し、さらに、他の意味を持つ主題図への変換を試みた。その結果を以下に示す。

1)本研究で作成した LANDSAT や ALOS AVNIR2 で作成し得ない高解像度な土地被覆分類図の全体平均分類精度は 80%を超え、これは最近の World View2 のような高解像度人工衛星データで作成されるものと比較して同等ないし高精度である。さらに専門的な知識を必要とするオブジェクト指向分類ではなく最尤法分類を採用するため、GIS 普及著しい地理学界における地表面解析方法の新たな手法として普及が見込まれる。

2)本研究で作成した1970年代および1980年代の土地被覆分類図は、NOAA AVHRR データやLANDSAT データと同等の過去への遡及性を持ち、さらにこれらを用いた分類図では実現しえない解像度1mを実装している。また、過去への遡及性という点でLANDSATを用いた本研究での土地被覆分類図はCORONA画像を用いたそれには及ばないが、この衛星画像はモノクロ写真でありかつノイズが多く、冷戦時代のアメリカ合衆国の偵察衛星という性質から撮影範囲が限定的である。

3)コンポジット空中写真から作成した土地被覆分類図はGISソフトを用いることで流出係数の分布図という自然災害科学の内容を含む主題図へと変換できる。流出係数の高低は土地被覆状況や地形分類と対応しており、大分川では流出係数高いエリアは沖積低地の市街地で、同じく低いエリアは段丘面で市街地以外の耕地や草地であるという関連性が見られた。以上より、本研究手法によるリモートセンシングは、ローカルなエリアでの自然災害分野へ応用ができる。

4)土地被覆分類図をGISでリサンプル処理することで意図的に解像度を低下させることにより、擬似的な土地利用メッシュマップへ読み替えることができる。視覚的には国土交通省国土地理院発行の土地利用細分メッシュデータと対応がよかったが、そもそも土地被覆分類図と土地利用図では主題図としての性質が異なるため、分類できない項目も存在した。

以上より、カラー空中写真に人工衛星データをコンポジットした画像をオーバーレイ解析する本研究手法は、特殊な工程を経ない一般的なGISソフトでの最尤法分類で良好な分類精度を持つ高解像度な土地被覆分類図が作成可能であり、さらに現代の高解像度人工衛星データでは作成し得ない過去への遡及性を持つ高解像度な土地被覆分類も可能である。この土地被覆分類図を用いれば、国土交通省国土地理院発行の1/10,000空中写真1枚ないし数枚程度の狭小な範囲での精緻な地表面解析が可能である。また、この土地被覆分類図はそのままGISで各種主題図へとデジタル変換可能で、例えばハザードマップや土地利用区分へと読み替えできる。

上記のような特長を持つ本研究手法は著者らの報告以外国内外に例がなく、地図及び空間解析のデジ

タル化が進展する地理学界に対し，空中写真を用いた新しい地理学的な地表面環境解析手法として普及が見込まれる。

第 10 章

結論

本研究はデジタル化空中写真と人工衛星データをコンポジットしたマルチバンド画像を GIS ソフトで最尤法分類することで、ローカルなスケールでの対象地域における地表面環境の定量的な解析に資する高分解能な土地被覆分類図の自動作成法を新規提案し、その妥当性や応用性を、事例研究を通じて実証した。本研究における成果を以下にまとめる。

1) 本研究手法の妥当性と有利性

地理学界でのリモートセンシング的手法を用いた地表面環境解析、すなわち地表面の物性に基づく土地被覆の定量解析、を制限していた空間・時間スケールの問題とその実施上のテクニカルな問題は、過去への蓄積が多く、かつ地上分解能が 1m 未満の空中写真を人工衛星データと同じ取り扱いで、一般的な GIS ソフトに実装されている最尤法で自動分類すれば解決できる。

近年の高地上分解能な観測機を搭載する、例えば World View シリーズのデータを用いた土地被覆分類の実施は、そのスペckルノイズ等の影響でごま塩状に誤分類が頻発する salt and pepper effect の問題を解決するために、専門的なソフトを利用するオブジェクト指向分類が主流である。しかし、空中写真にはセンサ由来のノイズがほとんど発生しないので、意図的な地上分解能低下等の前処理を行うことなく最尤法分類でオブジェクト指向分類と同精度の土地被覆分類図が作成可能である。したがって、従来の高地上分解能な人工衛星データを用いる手法に比べて本研究手法は簡便である点で有利である。

ただし、空中写真のみの最尤法分類では色調のみの分類となるので誤分類が頻発する。そこで、空中写真に、地上分解能 2m の THEOS, 同 10m の ALOS AVNIR2, 同 15m の ASTER, 同 30m の LANADSAT TM/ETM+などの人工衛星データや DEM データをコンポジットし分類根拠を増やすことで、解像度(セルサイズ)1m の高解像度・高精度な土地被覆分類図を作成することができる。本研究では、空中写真に人工

地物と植生を分ける根拠となる人工衛星データの不可視領域の近赤外域反射率データや、分布特性が地形に影響を受ける地物の分類精度向上に寄与する DEM データをコンポジットした画像を用いて最尤法分類を実施することで、平均精度約 80~90%の高精度な土地被覆分類図を作成できた。一方、ミクセル状態が頻発していると考えられる地上分解能約 80m の LANDSAT MSS データをコンポジットした空中写真による土地被覆分類図は、平均精度が 70%代にとどまった。しかしながら、空中写真と無償提供される LANDSAT データを用いれば、最近の高地上分解能な人工衛星データを用いるより廉価に高解像度な土地被覆分類図が作成できる点と、最大 1970 年代まで遡って高分解能な土地被覆分類図が作成できる点において有利さがある。

なお、土地被覆分類図作成に用いる地理データは、最尤法分類実施前に、セルサイズの統一やフォーカル統計処理等の前処理を行うと分類精度向上に寄与する。特にコンポジットする地理データのセルサイズの統一は必須と考えられ、これを実施しない場合、最もセルサイズの大きい地理データの影響を受けて、セルサイズは詳細だが地上分解能が低い土地被覆分類図となる。ただし、LANDSAT シリーズや ALOS AVNIR2 のような地上分解能が 10m を超えるような人工衛星データの場合、セルサイズだけ細かくしても有意な結果が得られないことが多い。このような場合、フォーカル統計処理を行ってセルの極値を除去したり、人工衛星データを一度ポイントデータ化し、それを内挿法で細かいセルサイズのラスタ型データへ変換、疑似的に地上分解能が高いデータへと変換したりすれば、作成される土地被覆分類図の精度向上に寄与する。

本稿では本研究手法の妥当性、すなわち現実に即した分類精度となるか、5 地域を研究対象にコンポジット空中写真を用いて土地被覆分類図を作成した。その結果をまとめた表を表 10.1 に示す。表を見ても分かるように、LANDSAT MSS と LANDSAT TM データをコンポジットした白川と福岡市の事例を除いて、すべて平均分類精度が 80%を超え、この結果は先行研究における高地上分解能を持つ人工衛星データを用いた土地被覆分類図の分類精度と遜色はなく、場合によってはむしろ高精度となる結果を得た。

ここで、図 10.1 に表 10.1 に示したすべての土地被覆分類図の大きさ(寸法)を平均したモデルと全体平均精度のモデル図を示す。なお、大分川と白川は河川に沿った範囲であり四角形とならないため、300m × 300m の正方形として計算した。図 10.1 を見ると、本研究で作成した平均的な分類図のスケールは東西

1,510m, 南北 1,620m で、これは国土交通省国土地理院発行の 1/10,000 空中写真 1 枚弱の範囲を占める。

表 10.1 本研究で作成した全ての土地被覆分類図の概要(著者原図)

第3章	第4章	第6章	第7章	第8章	
河川氾濫及び斜面崩壊地	カルスト台地の草原	河川近傍の土地被覆	河川近傍の土地被覆	都市域	
熊本県阿蘇市	福岡県平尾台	大分県大分川	熊本市白川	福岡県福岡市	
南北約5.4km×東西約4.7km	南北約500m×東西約750m	河道中央より両岸へ各300m × 河口から上流にかけて約50km	河道中央より両岸へ各300m × 河口から上流に向かって約20km	南北約1.6km×東西約1.5km	平均 ¹⁾ : 南北1,620m 東西1,510m
THEOS+空中写真+傾斜	ALOS AVNIR2+空中写真+傾斜	ASTER VNIR + 空中写真	①ALOS AVNIR2+空中写真 ②LANDSAT MSS+空中写真	①LANDSAT ETM++空中写真 ②LANDSAT TM+空中写真	
1m	1m	1m	1m	1m	
83.0%	94.8%	88.3%	①:88.0% ②:74.7%	①:85.9% ②:77.5%	平均: 84.6%
人工衛星データ及び空中写真の年代	写真: 1994年10月23日撮影 衛星: 2008年11月13日観測	写真: 2007年4月29日撮影 衛星: 2007年1月31日観測	①: 写真: 2007年2月8日撮影 衛星: 2008年11月13日観測 ②: 写真: 1975年1月5日撮影 衛星: 1978年12月7日観測	①: 写真: 2007年7月27日撮影 衛星: 2007年10月21日観測 ②: 写真: 1981年11月18日撮影 衛星: 1984年5月22日観測	過去への波及性: 1978 ²⁾ 年より現在

1)大分川及び白川については、300m×300mで計算している。2)第7章、LANDSAT MSSの観測年。

また、本稿で作成したコンポジット空中写真による土地被覆分類図の全体平均精度は 84.6%で、この値は先述したように、1m未満の高解像度人工衛星データを用いたものと比較して同等もしくは高精度であるので、これは実用に耐えうるものと判断できる。

以上まとめると、本研究手法を用いれば、1/10,000 空中写真 1 枚程度の範囲において、1970 年代まで遡れるセルサイズ(解像度)1m で実用に耐えうる分類精度を備える土地被覆分類図が作成できることが見込まれる。もちろん、研究課題に応じてさらなる高解像度化(空中写真の地上分解能に依存する)や、複数の土地被覆分類図をつなぎ合わせた広範囲化も可能である。

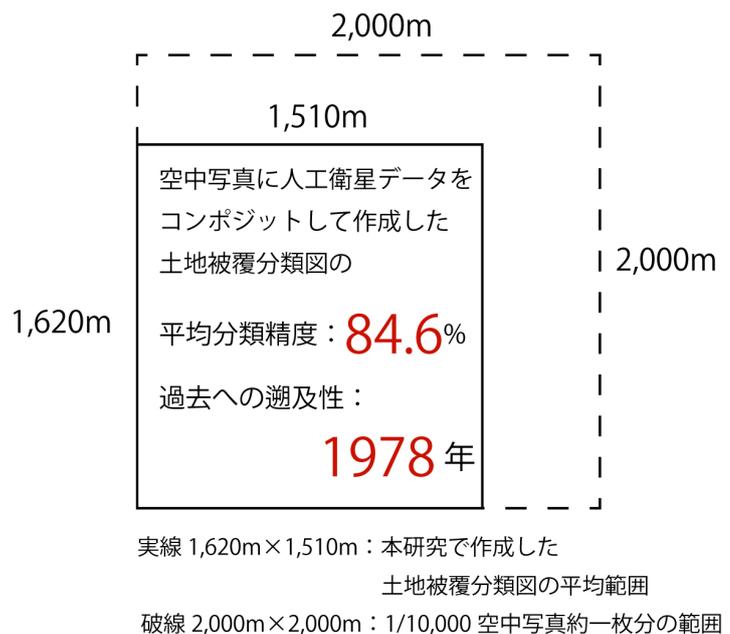


図 10.1 本研究で作成した全ての土地被覆分類図のスケールを平均したモデルと平均分類精度及び、過去への遡及性(著者原図)

2)本研究手法の応用性

本研究手法で作成された土地被覆分類図は、コンポジットした地理データを反映した結果となるため、ローカルなエリアでの地表面環境のオーバーレイ解析に使用することができ、さらに定量解析や他の意味を持つ主題図への変換可能である。本研究では 4 地域においてその応用的な事例研究を示した。以下にその結果を概括する。

①カルスト台地における草原

作成された土地被覆分類図と地形分類図, ALOS AVNIR2 から作成した地表面環境指標の NDVI, NDWI, NDSI とのオーバーレイ解析により、高 NDVI(植物活性度が高い)、高 NDWI(地表面の帯水状況が高い)、

低 NDSI(土壌が露出せず植生が繁茂する)なドリーネ底をネザサが最適地とすることが明らかとなった。これは、現地調査におけるグランドトゥルース結果と調和的であった。

②大分川における土地被覆と流出係数分布図への変換

大分川に沿う地域の土地被覆分類図と地形分類図のオーバーレイ解析により、特に離水していない河床での土地利用や河川に沿う竹林も検出され、これらは現地調査でも確認できた。

さらに、降雨時の雨水流出度を示す流出係数の分布図を土地被覆分類図の読み替えによって作成した。この流出係数分布図は土地被覆状況・地形分類とよく対応し、大分川近傍では、市街地である沖積低地は流出係数が高く、市街地以外の耕地等に利用されている段丘他は流出係数が低いという関連性を、定量的に明らかにした。

③白川における土地被覆変化

白川近傍の二時期の土地被覆分類図のオーバーレイ解析により、1975年から約30年間で市街地が7.8%増加しており、草地が4.8%減少、裸地は12.4%減少している結果を得た。また、2012(平成24)年の北部九州豪雨における、解析範囲内の浸水面積は約62万㎡で、このうちの約10.5%が1975年当時は裸地・草地であった場所が都市化した地域であったことが分かった。このように、都市化の進展状況や被災範囲の場所性を定量的に把握することができた。

④都市域(福岡市福岡空港周辺)における土地被覆の経年変化と土地利用図への変換

福岡市の福岡空港周辺における土地被覆分類図の時代間オーバーレイ解析により、1981年から約25年間で森林が22.5%減少し、宅地が30.3%増加している結果を得た。このように、空港周辺の丘陵地の森林開発による都市化の進展状況を定量的にとらえることができた。また、地表面環境、特に土壌水分量の指標であるNDWIと土地被覆分類図から明らかになった竹林分布図とのオーバーレイ解析により、高低差が生じる地形境界、特に沖積低地と丘陵の境界のような土壌水分の高まるポイントに竹の森林への侵入を捉えることができた。

また、本地域を例に、意図的にセルサイズを低下させることにより、土地利用図へと変換した。視覚的には国土交通省国土地理院発行の土地利用細分メッシュデータと対応がよかったが、そもそも土地被覆分類図と土地利用図では主題図としての性質が異なるため、表現できない分類項目も存在した。

3)まとめ

本研究の空中写真をベースとしたリモートセンシング的手法による土地被覆分類図は、近年入手可能となった解像度 1m 未満の人工衛星データ(例えば World View 3)等を用いたものと同等の地上分解能(1m)を持ち、かつ作成される分類図は空中写真に LANDSAT MSS データをコンポジットしたものを除いては、すべて分類精度約 80%~90%と高精度で、さらに過去への遡及性においては LANDSAT と同等、World View 3(2014 年打ち上げ観測開始)に勝る結果を得た。よって、コンポジット空中写真を使用した本研究手法によるリモートセンシングは、現在一般入手可能な人工衛星データではなし得ない地表面環境解析が可能である。

以上、本論文における一連の検討結果から、元来目視判読に用いられてきた空中写真は、地表面解析適用事例の幅を飛躍的に広げることができる地理情報とみなすことができ、本研究手法は地理学界に対して研究課題解決に対するリモートセンシング的手法の普及と浸透を担うことができると考えられる。

4)今後の課題

今後の課題としては、まず、地上分解能が約 80m と LANDSAT MSS データをコンポジットした空中写真を用いた土地被覆分類図の分類精度改善が挙げられる。これを解決するためには LANDSAT 観測年月日と空中写真の撮影年月日をできる限り近づける必要があると考えられるが、本稿でもそうであったように、これを一致させることが困難なケースがある。そのような際に有効となる手段を検討する必要があると考えられ、現在想定される解決策として、第 2 章で示したフォーカル統計処理を施すか、もしくは二時期以上のデータをコンポジットすればよい可能性がある。前者に関しては本稿にて実証済みで、後者に関しては著者らの論文[1]や研究報告[2]にて、二時期の空中写真をコンポジットすれば分類精度向上に寄与することが明らかになっており、これを応用すれば精度向上が見込める可能性が高い。今後は、観

測・撮影時期が近接する二時期以上の LANDSAT MSS データと空中写真をコンポジットした画像を用いた土地被覆分類図の精度検証を行いたい。

次に、現在計画している今後の展望として、本手法を用いた地形分類法の開発があり、特に、沖積低地と洪積台地（河岸段丘及び古い扇状地）の自動分類を計画している。地形分類は空中写真や陰影図にした航空レーザー測量による精緻な DEM を用いて、目視による実体視判読が主流であるが、この実体視判読は専門性が問われる上に、主観が入りやすく、なおかつ判読範囲によっては膨大な判読時間を要するという難点があり、自然地理学の研究者でないとその実施は困難な状況にある。

そこで、実際に地形分類する際の「分類根拠」となるデータを組み合わせ、これを用いて GIS ソフトで最尤法による自動分類を行えば、客観性の高い地形分類図が作成できる可能性がある。具体的な分類根拠の例として、氾濫原と扇状地を分ける根拠となる「傾斜」や、氾濫原と段丘面を分ける「土地利用」や「比高」、離水年代別に段丘を分ける根拠となる「標高」や「比高」等が挙げられる。ただし、これらデータを組み合わせた画像を自動分類することにより作成された地形分類図が、現実に即したものか検討する必要がある。そこで、過去に目視判読と現地調査による地形分類を行った福岡市域や筑紫平野を解析例として採用し、本手法を用いた地形分類図の正誤検証作業を行うことを想定している。これが新たな地形分類手法として一般化されれば、GIS ソフトの操作ができる者であれば人文系の地理研究者でも客観性を伴った地形分類図を作成できるようになる可能性が高く、地理学界の発展に大きく寄与できる可能性が高い。

【参考文献】

第 1 章

- [1]長谷川均(1998)：リモートセンシングデータ解析の基礎。古今書院，140p.
- [2]宇宙技術開発株式会社(SED)：ランドサット(Landsat)衛星・センサの概要・諸元。URL http://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite_landsat.html 2016年5月25日閲覧.
- [3]一般財団法人リモート・センシング技術センター：衛星総覧「WorldView-3，4」。URL <https://www.restec.or.jp/satellite/worldview-3>，2016年5月25日閲覧.
- [4]Thomas Lillesand・Ralph W. Kiefer・Jonathan Chipman(2015)：*Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley, 736p.
- [5]Marvin E. Bauer and Jan E. Cibra(1973)：IDENTIFICATION OF AGRICULTURAL CROPS BY COMPUTER PROCESSING OF ERTS MSS DATA. *Laboratory for Applications of Remote Sensing*, p.205-212.
- [6]村井俊治・奥田勉・建石隆太郎(1975)：地球資源衛星データを用いた首都圏の土地利用判読. 生産研究, 27-6, p.257-262.
- [7]後藤健介・磯望・黒木貴一・宗建郎(2003)：LANDSAT データを用いた詳細な土地被覆変遷調査の課題：福岡県太宰府市域における事例. 西南学院大学教育・福祉論集, 3-1, p.99-119.
- [8]Siqinbilige WANG・粟屋善雄(2015)：中国内モンゴルのエジナ河・居延三角州における土地被覆変化の特徴. システム農学, 31-3, p.67-79.
- [9]板谷明美(1998)：航空写真のデジタル化による土地被覆情報の抽出. 森林利用学会誌, 13-2, p.81-88.
- [10]黒木貴一・磯望・後藤健介・黒田圭介・辻真弓(2007)：空中写真による斜面災害地の土地被覆分類-相知町を対象として. 自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集, 31, p.65-68.
- [11]Muditha K. Heenkenda・Karen E. Joyce・Stefan W. Maier and Renee Bartolo(2014)：Mangrove Species Identification: Comparing WorldView-2 with Aerial Photographs. *remote sensing*, 6, p.6064-6088.
- [12]山本遼介・泉岳樹・松山洋(2017)：都市域の土地被覆分類におけるピクセルベース手法とオブジェクトベース手法の比較-高解像度デジタル航空写真を用いて-. 日本リモートセンシング学会誌, 37-3, p.236-

247.

- [13]北本朝展(2003)：リモートセンシング：画像情報処理から時空間情報処理へ．電子情報通信学会技術報告，255，p.73-80.
- [14]安田順恵(2005)：唐代蕭關新城の位置と長安西北部の唐代交通路に関する一試論:Corona 衛星写真の判読と現地調査による検討．人文地理，57-1，p.68-83.
- [15]三浦弘之・翠川三郎(2010)：人工衛星光学センサ画像の目視判読による2008年中国四川地震での北川県南東部の建物被害分布．日本地震工学会論文集，10-3，p.46-57.
- [16]八木浩司・丸井英明・Allahbuksh Kausar・Shablis Sherwali(2010)：大規模地すべりダムを形成した2010年パキスタン・フンザ・アッタパード地すべり ALOS/PRISM 画像判読による前兆現象の観察と現地調査結果．地すべり，47-6，p.335-340.
- [17]黒田圭介・黒木貴一・宗建郎・磯望・後藤健介(2014)：ALOS パンシャープンステレオペア画像を用いた実体視判読～微地形および斜面崩壊地を例に．土木学会西部支部，第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集，7，p.127-132.
- [18]能島暢呂・松岡昌志・杉戸真太・江崎 賢一(2006)：地震動情報と人工衛星 SAR 画像情報の統合処理による建物全壊率の定量的推定手法の開発．土木学会論文集A，62-4，p.808-821.
- [19]石井孝・梨本真・下垣久(1999)：衛星データによる葉面積指数 LAI の推定．水文・水資源学会誌，12-3，p.210-220.
- [20]三浦優司(2016)：「だいち2号」を利用した宇宙からの火山活動の監視．STA テクノロジー・ショーケース2016，p.3.
- [21]橋本秀太郎・田殿武雄・小野里雅彦・堀雅裕(2013)：衛星データによる災害状況把握のための知識駆動型自動変化検出システムの提案．日本リモートセンシング学会誌，33-1，p.13-26.
- [22]建石隆太郎(1985)：リモートセンシングと GIS．写真測量とリモートセンシング，24，p.65-67.
- [23]亀山哲・宮本千晴・須田清治・浅野哲美・野原精一・中村健太郎(2015)：リモートセンシングと GIS を用いたベトナムの放棄エビ池におけるマングローブ湿地の再生．環境科学会誌，28-1，p.63-72.
- [24]Matamy Simwanda and Yuji Murayama(2017)：Integrating Geospatial Techniques for Urban Land Use

Classification in the Developing Sub-Saharan African City of Lusaka, Zambia. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6-4, p.102-121.

[25]文部科学省(2014)：高等学校学習指導要領解説地理歴史編。教育出版，169p.

[26]日本地理学会：資格専門委員会 GIS 学術士とは?. URL <http://ajg-certi.jp/gis/becomes/gis.html> 2016年5月25日閲覧.

[27]宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター(2011)：陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)による東日本大震災の緊急観測結果(34). URL http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img_up/jdis_pal_tohokueq_110418.htm, 2016年5月25日閲覧.

[28]浮田典良(1970)：地理学における地域のスケール:とくに農業地理学における. 人文地理, 22-4, p.405-419.

[29]趙憶・富田瑞樹・原慶太郎(2013)：異なる空間分解能の衛星データを用いた景観解析のスケール効果についての検討. 景観生態学, 18-1, p.3-14.

[30]福本昌・吉迫宏(2012)：高解像度衛星データを用いた水田の土地被覆の判別手法. 農業農村工学会論文集, 80-5, p.383-390.

[31]松澤翔太・中川恭兵・望月翔太・村上拓彦(2011)：衛星リモートセンシングデータを用いたオブジェクトベース画像分析による竹林抽出手法の検討とその精度比較. 新潟大学農学部研究報告, 64-1, p.63-69.

[32]高山直也・山崎文雄・リュウウエン(2016)：World View-2 衛星画像を用いた福島第一原発における汚染水タンクの抽出. 日本リモートセンシング学会第60回学術講演会論文集, p.11-14.

[33]杉本賢二・奥岡桂次郎・谷川寛樹(2014)：合成開口レーダと建築物面積との相関性評価. 土木学会論文集 G(環境), 70-5, p.79-85.

[34]岡本晴人(1996)：高解像度衛星の商業化とデータ利用に向けて. 写真測量とリモートセンシング, 35-1, p.62-63.

[35]宇宙技術開発株式会社(2018)：衛星画像データ販売について.

URL <http://www.sed.co.jp/sug/contents/price/sample.html> 2018年6月1日閲覧.

[36]日本地図センター(2018)：地図・空中写真を買う「国土地理院刊行の正射写真」.

URL <http://www.jmc.or.jp/photo/gsiortho.html> 2018年6月1日閲覧.

[37]国土交通省国土地理院(2018) : 地図・空中写真閲覧サービス.

URL <http://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1> 2018年6月1日閲覧.

[38]国土交通省国土地理院(2018) : 平成28年熊本地震に関する情報.

URL <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html> 2018年6月1日閲覧.

[39] U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey(2018) : EarthExplorer.

URL <https://earthexplorer.usgs.gov/> 2018年6月1日閲覧.

第2章

[1]長谷川均(1998) : リモートセンシングデータ解析の基礎. 古今書院, 140p.

[2]宇宙技術開発株式会社 (SED) : テオス (THEOS) 衛星・センサの概要・諸元. URL http://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite_theos.html 2016年5月25日閲覧.

[3]宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター(2011) : 陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) の運用終了について. URL http://www.jaxa.jp/press/2011/05/20110512_daichi_j.html 2016年5月25日閲覧.

[4]宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター : 陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS). URL http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_j.html 2016年5月25日閲覧.

[5]宇宙技術開発株式会社 (SED) : テラ (Terra) 衛星 / アスター (ASTER) の概要・諸元. URL http://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite_aster.html 2016年5月25日閲覧.

[6]宇宙技術開発株式会社 (SED) : ランドサット (Landsat) 衛星・センサの概要・諸元. URL http://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite_landsat.html 2016年5月25日閲覧.

[7]小口高・勝部圭一(2000) : 細密 DEM を用いた地形解析. デジタル観測手法を統合した里山の GIS 解析—東京大学空間情報科学研究センターシンポジウム—, CSIS Discussion Paper #29, p.19-26.

[8]近藤久雄・杉戸信彦・吉岡敏和・堤浩之・木村治夫(2015) : 数値標高モデルを用いた上町断層帯の詳細位置および分布形状の再検討. 活断層研究, 42, p.1-34.

[9]杉戸信彦・松多信尚・石黒聡士・内田主税・千田良道・鈴木康弘(2015) : 津波浸水域データと数値標高

モデルの GIS 解析に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波遡上高の空間分布. 地学雑誌, 124-2, p.157-176.

[10]黒田圭介・黒木貴一・Burtron Guillen Jorge Alejandro・磯望(2015) : 複数の地理情報組み合わせ画像による土地被覆分類と解析画像前処理の工夫～2012 年九州北部豪雨災害地を例に. 2015 年春季学術大会日本地理学会発表要旨集, 87. p.323.

[11]山本遼介・泉岳樹・松山洋(2017) : 都市域の土地被覆分類におけるピクセルベース手法とオブジェクトベース手法の比較—高解像度デジタル航空写真を用いて—. 日本リモートセンシング学会誌, 37-3, p.236-247.

[12]Jorge Alejandro Butrón Guillén・Nozomi Is・Takahito Kuroki and Keisuke Kuroda(2015) : Region Classification of Geographic Information Systems Images by Sieve Filter and Principal Component Analysis. *Western Regional Division report of Natural Disaster Research Council*, 39, p.29-32.

[13]磯望・黒田圭介・黒木貴一・宗建郎・西木真織・後藤健介(2011) : 二時期合成デジタル空中写真画像による土地被覆の最尤法分類. 西南学院大学人間科学論集, 7-1, p.75-105.

[14]趙憶・富田瑞樹・原慶太郎(2013) : 異なる空間分解能の衛星データを用いた景観解析のスケール効果についての検討. 景観生態学, 18-1, p.3-14.

[15]児島利治・宝馨・岡太郎(1996) : リモートセンシング画像の分解能が土地被覆分類精度に及ぼす影響. 京都大学防災研究所年報, 39-B2, p.445-458.

[16]宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター : 高解像度土地利用土地被覆図ホームページ「AVNIR-2 高解像度土地利用土地被覆図 2016 年 2 月リリース版 (バージョン 16.02)」。URL http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/lulc_jindex.htm 2016 年 5 月 25 日閲覧.

[17]John R. Thomlinson・Paul V. Bolstad, and Warren B. Cohen(1999) : Coordinating Method-ologies for Scaling Landcover Classifications from Site-Specific to Global. *Remote Sensing of Environment*, 70-1, p.16-28.

[18]越智士郎(2009) : 画像オブジェクトに基づく高分解能衛星画像での土地被覆分類手法の検討. 東南アジア研究, 46-4, p.578-592.

第 3 章

- [1]黒田圭介・黒木貴一・Burtron Guillen Jorge Alejandro・磯望(2015)：複数の地理情報組み合わせ画像による土地被覆分類と解析画像前処理の工夫～2012年九州北部豪雨災害地を例に。2015年春季学術大会日本地理学会発表要旨集，87，p.323.
- [2]小熊宏之・山形与志樹(1996)：二時期航空機 MSS データを用いた湿原植生分類に有効な観測波長帯の研究。写真測量とリモートセンシング，35-1，p.36-45.
- [3]松岡昌志・山崎文雄(2002)：人工衛星 SAR 強度画像による建物被害地域の検出手法。日本建築学会構造系論文集，551，p.53-60.
- [4]株式会社防災地理調査：GIS で見る平成 24 年九州北部豪雨による阿蘇山の土砂災害。URL <http://gpi-net.jp/study/aso/aso.html> 2016 年 7 月 1 日閲覧.

第 4 章

- [1]黒田圭介・黒木貴一(2009)：カルスト台地平尾台における昆虫分布の土壌・地形・気温条件。環境科学論文集，23，p.203-208.
- [2]浦田健作(1993)：九州北部，平尾台カルストの地形形成における地質構造の影響。日本地質学会学術大会講演要旨，No.100，p.352.
- [3]山岡誠(1982)：平尾台の動物。天然記念物平尾台保存管理計画策定報告，p.25-27.
- [4]満塩博美・畑中健一(1973)：平尾台上の八女粘土層－新期阿蘇溶結凝灰岩－。カルスト台地平尾台の植生とフロラ，p.57-65.
- [5]鈴木和子(1973)：平尾台の草原植生。カルスト台地平尾台の植生とフロラ，p.67-75.
- [6]畑中健一(1982)：平尾台の植物相(フロラ)と植生について。天然記念物平尾台保存管理計画策定報告書，p.21-24.
- [7]宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター：高解像度土地利用土地被覆図ホームページ「AVNIR-2 高解像度土地利用土地被覆図 2016 年 2 月リリース版 (バージョン 16.02)」。URL http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/lulc_jindex.htm 2016 年 5 月 25 日閲覧.

[8]黒木貴一・磯望・後藤健介・黒田圭介・辻真弓(2007): 空中写真による斜面災害地の土地被覆分類-相知町を対象として. 自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集, 31, p.65-68.

第5章

[1]黒田圭介・黒木貴一・宗建郎(2010): デジタルカメラによるカルスト地形の土地被覆分類. 環境科学論文集, 24, p.31-36.

[2]東季実子・小林達明(2003): アズマネザサ(*Pleioblastus Makino*)の生育に及ぼす植生・土壌・地形の影響. 日緑工誌, 29-1, p.131-134.

[3]堀江秀樹・根本正之(1990): ススキの生育に対する土壌 pH とアルミニウムの影響. 雑草研究, 35-3, p.292-295.

[4]猪谷富雄・肱元茂善(1977): セイタカアワダチソウの生態に関する研究Ⅲ水耕液の pH と生育との関係. 作物学研究集録, 19, p.12-14.

[5]村中孝司・石井潤・宮脇成生・鷺谷いづみ(2005): 特定外来生物に指定すべき外来植物種とその優先度に関する保全生態学的視点からの検討. 保全生態学研究, 10, p.19-33.

[6]長谷川均(1998): リモートセンシングデータ解析の基礎. 古今書院, 140p.

[7]竹内渉・安岡善文(2004): 衛星リモートセンシングデータを用いた正規化植生, 土壌, 水指数の開発. 写真測量とリモートセンシング, 43-6, p.7-19.

[8]佐藤晃一・桜井雄二(1983): 四国カルスト草地土壌の初期特性—大規模草地造成に伴う土・水環境の変化と保全に関する基礎研究(Ⅱ) - . 農業土木学会論文集, 72, p.15-21.

[9]浦田健作(1993): 九州北部, 平尾台カルストの地形形成における地質構造の影響. 日本地質学会学術大会講演要旨, No.100, p.352.

[10]鈴木和子(1973): 平尾台の草原植生. カルスト台地平尾台の植生とフロラ, p.67-75.

[11]渡辺雅樹・岡秀一(2010): 埼玉県南東部見沼田圃の耕作放棄地における植生分布とその成立要因. 地理学評論, 83-5, p.465-478.

第 6 章

- [1]黒田圭介・黒木貴一・宗建郎・磯望・後藤健介(2012)：コンポジット空中写真による土地被覆分類図を用いた土地条件解析事例～大分川を例に．第 6 回土砂災害に関するシンポジウム論文集， p.153-158.
- [2]黒木貴一・黒田圭介・磯望・宗建郎・後藤健介(2015)：大分川中下流の 5mDEM による地形縦断曲線の特徴．福岡教育大学紀要，第 64 号，第 2 分冊， p.35-46.
- [3]国土交通省ホームページ：「水管理・国土保全，大分川の主な災害」，
http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/nihon_kawa/89102/89102-1_p4.html 2012 年 5 月 1 日閲覧.
- [4]河合洋人・西條好迪・秋山侃(2010)：地上部および地下部の成長からみた竹林拡大の解析．日林誌，92， p.93-99.
- [5]徳永陽子・荒木光(2007)：竹林と環境．京都教育大学環境教育研究年報，15， p.99-123.
- [6]黒田圭介・黒木貴一・宗建郎(2011)：コンポジット空中写真画像を用いた土地被覆分類図作成試案．環境科学論文集，25， p.239-244.

第 7 章

- [1]黒田圭介(2014)：白川流域の土地被覆分類と2012年九州北部豪雨災害被害地域の関係．平成23年度～25年度科学研究費補助金(基盤研究(c)一般)研究成果報告書，都市域における時空間地理情報を用いた氾濫原の特性評価の研究， p.62-67.
- [2]国土交通省：水管理・国土保全「白川」，URL http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/nihon_kawa/89099/89099-1.html 2017年6月1日閲覧.
- [3]国土交通省：水管理・国土保全「白川の主な災害」，URL http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/nihon_kawa/89099/89099-1_p4.html 2017年6月1日閲覧.
- [4]国土交通省九州地方整備局：「(情報提供)平成24年7月九州北部豪雨について」，[http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kawa/kensyo/02-tateno/houkokusyo\(tateno\)/houkokusyo_ref/05_ref_hokubu_gouu.pdf](http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kawa/kensyo/02-tateno/houkokusyo(tateno)/houkokusyo_ref/05_ref_hokubu_gouu.pdf) 2013年12月1日閲覧.

[5]宗建郎・黒田圭介・黒木貴一・磯望・後藤健介(2012)：1953年6月水害における室見川・樋井川の河川水量試算．第6回土砂災害に関するシンポジウム論文集， p.189-194.

[6]真木雅之(2010)：都市型水害(新用語解説)， 天気， 57-3， p.167-169.

第 8 章

[1]長谷川均(1998)：リモートセンシングデータ解析の基礎．古今書院， 140pp.

[2]黒田圭介・黒木貴一・宗建郎(2011)：コンポジット空中写真画像を用いた土地被覆分類図作成試案．環境科学論文集， 25， p.239-244.

[3]西川僚子・村上拓彦・吉田茂二郎・光田靖・長島啓子・溝上展也(2005)：隣接する土地被覆別にみた竹林分布変化の特徴．日本森林学会誌， 87-5， p.402-409.

[4]黒田圭介・黒木貴一・磯望・宗建郎・後藤健介(2011)：那珂川周辺の約 30 年間の自然環境変化－GIS と空中写真を用いて．自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集， 35， p.13-16.

[5]林加奈子・山田俊之(2008)：竹林の分布拡大は地形条件に影響されるのか？．保全生態学研究， 13， p.55-64.

[6]河合洋人・西條好迪・秋山侃(2010)：地上部および地下部の成長からみた竹林拡大の解析．日林誌， 92， p.93-99.

第 9 章

[1]John R. Thomlinson・Paul V. Bolstad, and Warren B. Cohen(1999)：Coordinating Methodologies for Scaling Landcover Classifications from Site-Specific to Global. *Remote Sensing of Environment*, 70-1, p.16-28.

[2]越智士郎(2009)：画像オブジェクトに基づく高分解能衛星画像での土地被覆分類手法の検討．東南アジア研究， 46-4， p.578-592.

[3]Noor Janatun Naim Binti Jemali・Shiba Masami and Zawawi Azita Ahmad(2013)：Comparison of image classification methods using IKONOS image for identifying land cover attributes of logged over forest area in Yambaru, Okinawa Island, 森林利用学会誌， 28-1， p.99-105.

- [4]松澤翔太・中川恭兵・望月翔太・村上拓彦(2011) : 衛星リモートセンシングデータを用いたオブジェクトベース画像分析による竹林抽出手法の検討とその精度比較. 新潟大学農学部研究報告, 64-1, p.63-69.
- [5]Scott J. Goetz^{a,b}・Robb K. Wright^b・Andrew J. Smith^b・Elizabeth Zinecker^b and Erika Schaub^b(2003) : IKONOS imagery for resource management: Tree cover, impervious surfaces, and riparian buffer analyses in the mid-Atlantic region. *Remote Sensing of Environment*, 88, p.195-208.
- [6]Le Wang・Wayne P. Sousa・Peng Gong and Gregory S. Biging(2004) : Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama. *Remote Sensing of Environment*, 91, p.432-440.
- [7]原慶太郎・趙憶・原田一平・下嶋 聖・関山絢子・田中健太(2014) : 生物多様性保全を目的とした衛星データによる千葉県自然环境解析に関する研究. 千葉県生物多様性センター研究報告, 7, p.107-119.
- [8]福岡巧巳・越村俊一(2012) : オブジェクトベース画像解析による津波被災地の瓦礫量の把握. 土木学会論文集. B2, 海岸工学, 68-2, p.371-375.
- [9]Xu Yong・Ma Peifeng・Lin Hui and Ng Edward(2015) : Fusion of World-view2 stereo and TerraSAR-X images for 3D building extraction in urban areas. *ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*, p.1795-1799.
- [10]Alireza Hamedianfar・Helmi Zulhaidi Mohd Shafri・Shattri Mansor and Noordin Ahmad(2014) : Detailed urban object-based classifications from WorldView-2 imagery and LiDAR data: supervised vs. fuzzy rule-based. *FIG Congress 2014 Engaging the Challenges - Enhancing the Relevance*, 6795.
- [11]山本遼介・泉岳樹・松山洋(2014) : オブジェクトベース画像解析による都市域の土地被覆分類. 日本地理学会発表要旨集, 85.
- [12]大西暁生・前崎隆一(2014) : オブジェクト分類手法による詳細土地被覆情報の取得と地表面温度の再現性に関する研究. 土木学会論文集 G (環境), 70-5, p.59-69.
- [13]堤田成政(2017) : 1982-2015年の全球土地被覆の変遷. 日本地理学会発表要旨集, 91.
- [14]古野義明・中山裕則・遠藤邦彦・穆桂金(2008) : 時系列衛星データによる閉塞湖水域変動解析に基づく乾燥地域の環境変化分析-中国黒河流域を対象として-. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 43,

p.325-335.

[15]梶山貴弘・藁谷哲也(2015) : カラコラム山脈における氷河の形態を考慮した 1990-2010 年の氷河の末端変動と気温変動の関係. 日本地理学会発表要旨集, 87.

[16]Durina・Nagasawa Ryota・Patanakano Boonrak(2013) : Urbanization and its Influences on the Suburban Landscape Changes in Bangkok Metropolitan Region, Thailand. システム農学, 29-2, p.29-39.

[17]Adel Shalaby and Ryutaro Tateishi(2007) : Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Applied Geography*, 27-1, p.28-41.

[18]J.S.Rawat and ManishKumar(2015) : Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18-1, p.77-84.

[19]小方登・高田将志・相馬秀廣(1998) : 自然地理学・人文地理学における米国偵察衛星写真の応用. 日本地理学会発表要旨集, 53.

[20]守村敦郎・堀川真弘・森本幸裕・石田紀郎(2003) : CORONA 衛星写真によるシルダリア川デルタ湿地帯の植生変化の推定. 国際景観生態学会日本支部会報, 8-1, p.11-14.

[21]田然(2008) : CORONA 衛星写真による土地被覆分類の試み-北京市を例に-. 季刊地理学, 60, p.77-88.

[22]石黒聡士・杉戸信彦・後藤秀昭・鈴木康弘・廣内大助・堤浩之・Dangaa Enkhtaivan(2014) : CORONA 画像の実体視判読に基づく 1957 年 Gobi-Altay 地震の地表地震断層の認定, 活断層研究, 40, p.19-34.

[23]中埜貴元・小荒井衛・宇根寛(2015) : 地形分類情報を用いた液状化ハザード評価基準の再考. 地学雑誌, 124-2, p.259-271.

[24]福田真也・石川大太郎・有満重徳・山口晃裕・韋江俊・大場和彦・石黒悦爾(2014) : 斜面崩壊ハザードマップ構築のための基礎的研究Ⅱー陸域観測技術衛星(ALOS)データを用いた鹿児島県大隅地方の斜面崩壊地抽出事例. 長崎総合科学大学紀要, 54, p.31-37.

[25]長谷川均(1998) : リモートセンシングデータ解析の基礎. 古今書院, 140p.

[26]黒田圭介・黒木貴一・宗建郎・磯望・後藤健介(2012) : コンポジット空中写真による土地被覆分類図を用いた土地条件解析事例～大分川を例に. 第 6 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, p.153-158.

[27]黒田圭介・黒木貴一・宗建郎(2011)：コンポジット空中写真画像を用いた土地被覆分類図作成試案.
環境科学論文集, 25, p.239-244.

[28]国土交通省河川局監修, 社団法人日本河川協会編(2005)：国土交通省河川砂防技術基準同解説, 230p.

[29]宗建郎・黒木貴一・磯望・黒田圭介・後藤健介(2011)：地形図を利用した河川環境変化の長期評価－
福岡市の事例－, 自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集, 35, p.9-12.

[30]趙 憶・富田瑞樹・原慶太郎(2013)：異なる空間分解能の衛星データを用いた景観解析のスケール効果
についての検討. 景観生態学, 18-1, p.3-14.

第 10 章

[1] 磯望・黒田圭介・黒木貴一・宗建郎・西木真織・後藤健介(2011)：二時期合成デジタル空中写真画像
による土地被覆の最尤法分類. 西南学院大学人間科学論集, 7-1, p.75-105.

[2] 黒田圭介・黒木貴一・宗建郎(2010)：二時期合成空中写真を用いた土地被覆分類の試み. 2010 年秋季
学術大会日本地理学会発表要旨集, 78, p.188. 於名古屋大学.

【注釈】

第 1 章

*1 一般財団法人日本地図センターホームページ(URL <http://www.jmc.or.jp/> 2016 年 5 月 25 日閲覧)で購入でき、地上分解能 20cm と 40cm を選択可能。

*2 QGIS(URL <http://qgis.org/ja/site/> 2016 年 5 月 25 日閲覧)より無料で入手できる。

*3 一般財団法人日本地図センターホームページ(URL <http://www.jmc.or.jp/> 2016 年 5 月 25 日閲覧)で購入できる。

第 2 章

*1 写真に写る物体が地面から高いほど、また写真の中心から周縁部に向かうほどこの歪みは大きくなる。空中写真では高層ビルなどの高い建物や周縁部の建物の像は、写真の中心から外側へ傾いているように写る。これを解消する為に、オルソ幾何補正を行う必要がある。オルソ幾何補正処理は 1 組のステレオペア写真から DEM (地形モデル) を作成し、その標高値データである DEM と空中写真からオルソ画像を作成する。

*2 光の波長ごとの反射率を分光反射率と呼ぶ。植生の場合その反射特性は、可視域での反射が小さく、近赤外域で反射が大きい。植物は光合成を行い、光エネルギーを有機物の化学エネルギーに変換する。その際、すべての波長の光を使用するわけではなく、光合成に有効である $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ の波長(可視域)の光を吸収し使用する。特に主要な植物色素であるクロロフィルの吸収帯である青色光 $0.435\mu\text{m}$ と赤色光 $0.68\mu\text{m}$ 付近の波長の光を吸収する。よって、緑色は反射するので、我々の目には植生の葉は緑色に見える。

*3 DN 値を反射率に変換するには、DN を輝度に変換する式と、輝度を反射率に変換する式を使う。

ALOS AVNIR2 の場合を例に、以下に変換式を示す。

まず、DN 値を輝度に変換する式は次のようになる。

$$L = a \cdot DN + b$$

L : 輝度 (W/m²/sr/μm), DN : デジタル・ナンバー, a : ゲイン, b : オフセット

DN を輝度に変換するにはゲインとオフセットを知る必要がある。ゲインとオフセットは衛星データを入力したときのリーダファイルのアンシラリ 2 に記載されている。次に、輝度を反射率に変換する式は、次のようになる。

$$\rho = (L \cdot \pi \cdot d^2) / (F_o \cdot \cos\theta)$$

ρ : 反射率 (%), L : 輝度 (W/m²/sr/μm), d : 太陽地球間距離 (AU), F_o : 分光太陽照度 (W/m²/μm),
θ : 太陽天頂角

また、F_o は衛星およびセンサによって異なる。ALOS AVNIR2 の F_o は以下の通り。

band1: 1943.3, band2: 1813.7, band3 : 1562.3, band4 : 1076.5

この式から分かるように、輝度から反射率を求めるには地球太陽間距離 d と太陽天頂角 θ を知る必要がある。太陽天頂角はリーダファイルのシーンヘッダに記載されている太陽仰角、あるいはサマリ情報ファイル (summary.txt) に記載されている太陽仰角から、以下の式により求めることができる。

$$\text{太陽天頂角} = 90 \text{ 度} - \text{太陽仰角}$$

また、太陽地球間距離 d[単位 : AU]は、イメージ撮影日からジュリアン・デートを求め、ジュリアン・デートを使い、以下の式から求めることができる。

$$d = 1.0000 + 0.01676 \cdot \cos \{ 0.977 (J - 186) \text{度} \}$$

ここで、J : ジュリアン・デートで、1月1日からの通算日数のこと。

上記のように、DN 値(256 階調)を反射率(%)に変換するには煩雑な計算が必要となる。

(参考 : リモートセンシングの活用・利用, リモートセンシング画像処理ソフトの無料提供, リモートセンシング技術等の紹介サイトホームページ URL <http://rs.aoyaman.com/> 2016 年 5 月 25 日閲覧)

*4 傾斜角分布図は、ArcGIS 「傾斜角(Slope)」作成機能を用いて作成した。傾斜角度を求める対象セル

とその近隣セルとを比較し、それらの値の最大変化率を計算し算出する。傾斜角の値(°)が小さくなるほど地表は平らになり、傾斜角の値が大きくなるほど地表が急勾配になる。

*5 本研究では、ArcGIS に搭載されている「Natural Neighbor 内挿法」を使用した。

*6 尤度 (likelihood) とはある仮説 (モデル) のもとで観察されたデータが生じる確率を意味する。

*7 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター高解像度土地利用土地被覆図ホームページ(URL http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/lulc_jindex.htm 2016年5月25日閲覧)より無料で入手できる。

第3章

*1 色を表現するために用いられる、文字の羅列からなる符号で、RGB 値を十六進法で表記した文字列。RGB の値が分かっているならば、その値をもとにカラーコードに変換する web サービスがあり、本章では「RGB と 16 進数カラーコードの相互変換ツール(URL <http://www.peko-step.com/tool/tfcolor.html> 2016年7月1日閲覧)」を利用した。また、色調は表計算ソフトエクセルのセル塗りつぶし機能で再現した。

第4章

*1 国土交通省基盤地図情報ダウンロードサービス(URL <http://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> 2016年5月25日閲覧)より入手可能。

*2 ラインセンサスルートとは、あらかじめ決められたルートに沿って動植物の出現種数を調査する「ラインセンサス法」で用いるための測線のことを指す。

*3 ゾーン統計による分類項目の平均値の求め方については図 3.8 を参照。

*4 変換方法については第2章注釈4を参照のこと。

第5章

*1 地上観測のことで、教師を得るために行ったり、土地被覆分類図作成後に確認として行ったりする。

*2 NDVI は植物のクロロフィルが可視域赤の電磁波を選択的に吸収し、葉の細胞構造による電磁波の体積散乱が近赤外域で大きく、植物の生理活性状態が高いほどこれらの吸収と反射が大きいという原理に基づいている。電磁波の吸収が大きいほど反射率は小さくなる。近赤外域反射率データと可視域赤のデータとのバンド間演算により算出され、ALOS AVNIR2 を例にすれば、

$NDVI = (band4 - band3) / (band4 + band3)$ で求めることができる。

*3 NDWI は水や雪の反射率は可視域で最大値を持ち、それから近赤外域・短波長赤外域にかけて現象するという性質に基づく。反射率の最大値と最小値の差を強調するために、可視域緑および水分子による電磁波の吸収帯が存在する1.4 μ m 付近の短波長赤外域での反射率との差を計算する。近赤外域反射率データと可視域青のデータとのバンド間演算により算出され、ALOS AVNIR2 を例にすれば、

$NDWI = (band1 - band4) / (band1 + band4)$ で求めることができる。

*4 NDSI は一般的に、土の反射率は可視域で最も低く、近赤外域で増加し、1.6 μ m 付近の短波長赤外域で最大になるという性質に基づく。そこで、1.6 μ m 付近の短波長赤外域での反射率と近赤外域での反射率との差に注目すれば、この差が大きいほど地表物質(すなわち裸地)の可能性が高いことになる。近赤外域反射率データと可視域青のデータとのバンド間演算により算出され、ALOS AVNIR2 を例にすれば、

$NDSI = (band1 - band4) / (band1 + band4)$ で求めることができる。

*5 ゾーン統計による分類項目の平均値の求め方については図3.8を参照。

第 6 章

*1 国土交通省，電子国土 web システムより取得した。

URL <http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse/index.html>，2016 年 5 月 25 日閲覧。

*2 ゾーン統計による分類項目の平均値の求め方については図 3.8 を参照。

第 8 章

*1 ゾーン統計による分類項目の平均値の求め方については図 3.8+を参照。

*2 国土交通省国土政策局国土情報課ホームページ「国土数値情報 ダウンロードサービス」よりダウンロードできる(URL http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/jpgis_datalist.html 2016 年 5 月 25 日参照)

第 9 章

*1 LiDAR(Light Detection and Ranging)は直訳すると「光検出と測距」で，航空機搭載型レーザースキャナにより地物の高さの情報を得ることができる技術である。

*2 nDSM(正規化標高モデル：normalized. Digital Surface Model)は表層高と地盤高の差を表わす指標で，言い換えれば地物の高さを意味する。これにより，例えば樹高や建造物の高さを知ることが可能となる。

*3 国土交通省，電子国土 web システムより取得した。

URL <http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse/index.html>，2016 年 5 月 25 日閲覧。

【謝辞】

本研究は、福岡教育大学教育学部教授黒木貴一先生が2007年にデジタル化空中写真を用いて佐賀県相知町における土砂災害地の最尤法分類を行ったアイデアに深い感銘を受けたことが発端となり、それから約10年間、継続して本研究手法を投稿論文や学会発表等において発信し続けました。一連の研究活動は、多くの方々の支えがあって成しえたものです。以下より、本研究をまとめるにあたり、多くの方々・機関にご指導とご支援をいただきました方々に謝意を表します。

本研究の根幹をなす複数地理情報オーバーレイ手法の開発は修士課程時代の指導教官、福岡教育大学教育学部教授黒木貴一先生のご指導がなければ成立しえないもので、数え切れないほどの地理データと、さらにGISソフト(ArcGIS ver10)も賜りました。修士課程時代よりおよそ15年間、継続して指導を賜り、時にやさしく励ましてくださいました。ここに厚く御礼申し上げます。

久留米大学経済学部教授浅見良露先生には主査として、同文学部特任教授堂前亮平先生、同経済学部准教授島中昌教先生には副査として、様々なご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導を戴きました。ここに深謝の意を表します。また、西南学院大学人間科学部教授磯望先生にも副査として多くのご支援を賜り、学部時代よりおよそ20年間常に私を激励していただきました。また、地理学全般についてご指導を頂き、研究遂行に必要な地理データの提供も数多く賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

志學館大学人間関係学部准教授宗建郎先生には本論文の校正作業を賜り、また、GISソフトの操作法に関する指導の多くをご教授頂きました。大阪教育大学学校危機メンタルサポートセンターの後藤健介准教授には、リモートセンシングの概念や最尤法分類をはじめとする解析方法の基礎知識の多くをご助言頂き、また多くの参考論文を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

以下、お世話になったの方々・機関を簡単ではございますが列挙いたします。

平尾台における植生調査結果の一部については、当時の黒木貴一先生のゼミ生である村橋正剛君により提供を賜りました。また、平尾台における植生調査では、同じく当時のゼミ生の尾崎公美さん、澤田祐一君、長嶺沙紀さん、山野彰子さん、中村麻耶さん、川田洋平君、磯望先生のゼミ生で私の後輩である西木真織さんのご支援を賜りました。

メキシコ職業技術教育活性化センターのJorge Alejandro Butrón Guillén氏との議論は、私にフォーカル

統計処理の着想を与えてくださいました。これがなければ、土地被覆分類図のさらなる高精度化は実現しませんでした。

香蘭女子短期大学非常勤講師元山善一先生には数学的处理, 特に DN 値から反射率データへの変換に関し助言を頂きました。また, 数学的な知識の多くを氏にご教授いただきました。

公益財団法人日本科学協会様には平尾台調査における研究助成金を賜りました。

以上の方々・機関に深い感謝の意を表します。

【研究業績一覧】

■査読付き原著論文

黒田圭介・黒木貴一(2009)：カルスト台地平尾台における昆虫分布の土壌・地形・気温条件．環境科学論文集，23，p.203-208.

黒田圭介・黒木貴一・宗建郎(2010)：デジタルカメラによるカルスト地形の土地被覆分類．環境科学論文集，24，p.31-36.

黒田圭介・黒木貴一・宗建郎(2011)：コンポジット空中写真画像を用いた土地被覆分類図作成試案．環境科学論文集，25，p.239-244.

黒田圭介・黒木貴一・宗建郎・磯望・後藤健介(2012)：コンポジット空中写真による土地被覆分類図を用いた土地条件解析事例～大分川を例に．土木学会西部支部，第6回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.153-158.

■その他研究論文(査読無し)

磯望・黒田圭介・黒木貴一・宗建郎・西木真織・後藤健介(2011)：二時期合成デジタル空中写真画像による土地被覆の最尤法分類．西南学院大学人間科学論集，7-1，p.75-105.

黒木貴一・黒田圭介・磯望・宗建郎・後藤健介(2015)：大分川中下流の5mDEMによる地形縦断曲線の特徴．福岡教育大学紀要，第64号，第2分冊，p.35-46.

■学会発表

黒田圭介・黒木貴一・村橋正剛・浦田健作(2007)：平尾台の植生と地形・地質条件．日本第四紀学会講演要旨集，37，p.160-160．於神戸大学.

黒田圭介・黒木貴一・宗建郎(2010)：二時期合成空中写真を用いた土地被覆分類の試み．2010年秋季学術大会日本地理学会発表要旨集，78，p.188．於名古屋大学．

黒田圭介・黒木貴一・磯望・宗建郎・後藤健介(2011)：那珂川周辺の約30年間の自然環境変化－GISと空中写真を用いて．自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集，第35号，p.13-16．於九州大学．

黒田圭介・宗建郎・黒木貴一・磯望・後藤健介(2011)：那珂川中流域におけるLANDSATデータバンド4画像合成空中写真を用いた土地被覆分類．2011年秋季学術大会日本地理学会発表要旨集，80，p.149．於大分大学．

黒田圭介・黒木貴一・磯望・宗建郎・後藤健介(2012)：コンポジット空中写真画像を用いた土地被覆分類図の作成～大分県大分川流域を例に．2012年度春季大会発表，季刊地理学，64-3，p.129．於仙台市戦災復興記念館．

黒田圭介・黒木貴一・磯望・宗建郎・後藤健介(2013)：ALOS近赤外域(BAND4)画像合成空中写真を用いた土地被覆分類-2012年九州北部豪雨による白川浸水範囲を例に．2013年秋季学術大会日本地理学会発表要旨集，84，p.129．於福島大学．

黒田圭介・黒木貴一・磯望・宗建郎・後藤健介(2014)：衛星データ(LANDSAT, ASTER, ALOS)合成空中写真による土地被覆分類図の精度評価．2014年春季学術大会日本地理学会発表要旨集，85，p.301．於国士舘大学．

黒田圭介・黒木貴一・Burtron Guillen Jorge Alejandro・磯望(2015)：複数の地理情報組み合わせ画像による土地被覆分類と解析画像前処理の工夫～2012年九州北部豪雨災害地を例に．2015年春季学術大会日本地理学会発表要旨集，87，p.323．於日本大学．

■研究報告書等

黒田圭介・黒木貴一(2009)：平尾台の斜面地形と植生．平成 18 年度～17 年度科学研究費補助金(基盤研究(c)一般)研究成果報告書，人工衛星データによる斜面特性の評価の詳細研究， p.77-83.

黒田圭介(2014)：大分川流域の土地被覆分類と河川近傍地形の関係．平成 23 年度～25 年度科学研究費補助金(基盤研究(c)一般)研究成果報告書，都市域における時空間地理情報を用いた氾濫原の特性評価の研究， p.54-61.

黒田圭介(2014)：白川流域の土地被覆分類と 2012 年九州北部豪雨災害被害地域の関係．平成 23 年度～25 年度科学研究費補助金(基盤研究(c)一般)研究成果報告書，都市域における時空間地理情報を用いた氾濫原の特性評価の研究， p.62-67.

以上

デジタル化空中写真と人工衛星データのコンポジットによる
地表面環境解析法に関する応用的研究

黒田 圭介