

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	高空間分解能リモートセンシングによる都市の土地被覆分布の詳細解析
Title(English)	
著者(和文)	小松義典
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第4923号, 授与年月日:2001年9月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第4923号, Conferred date:2001/9/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

学位論文 平成 13 年度

高空間分解能リモートセンシングによる
都市の土地被覆分布の詳細解析

小松 義典

東京工業大学大学院 総合理工学研究科
環境理工学創造専攻

指導教官 梅干野 晁 教授
松永 恒雄 講師

目 次

第1章 序論.....	1
1-1 研究の背景.....	2
1-2 研究の目的.....	7
1-3 既往の研究.....	9
1-4 用語の定義.....	12
1-5 本論文の構成	13
第2章 土地被覆の分布特性とミクセル	21
2-1 はじめに.....	22
2-2 住宅地の土地被覆分布特性の解析	24
2-2-1 解析対象とした住宅地及び土地被覆分布図	24
2-2-2 土地被覆分布特性の解析.....	28
2-3 リモートセンシングデータの空間分解能とミクセルの量・質との関係	33
2-3-1 細分類と大分類による分類結果の比較	33
2-3-2 大分類による空間分解能とミクセルの構成比率との関係.....	34
2-4 まとめ.....	38
第3章 土地被覆分類に要求される空間分解能	41
3-1 はじめに.....	42
3-2 解析画像の作成	43
3-3 ピュアピクセルの比率と空間分解能との関係.....	53
3-3-1 ピュアピクセルとミクセルの判別	53
3-3-2 ピュアピクセルとミクセルの構成比率.....	54
3-4 MSSデータの空間分解能と各クラスの分散との関係.....	56
3-4-1 ピュアピクセルの分散	56
3-4-2 分散と空間分解能との関係	56
3-5 土地被覆分類への影響と最適分解能.....	58

3-5-1 最尤法による土地被覆分類	58
3-5-2 解析結果	58
3-6 ひとまとまりの面積と分類精度との関係	65
3-6-1 ひとまとまりの面積によるグループ分け	65
3-6-2 グループ毎の分類精度と空間分解能との関係	65
3-7 まとめ	73
第4章 画素内緑被配置推定方法の開発	75
4-1 はじめに	76
4-2 解析対象地区の緑の特徴	77
4-3 ミクセルの解析方法と解析モデル画像の作成	81
4-3-1 既往の画素内緑被率推定方法	81
4-3-2 画素内緑被配置の推定方法	81
4-3-3 画素内緑被率モデル画像の作成	83
4-3-4 モデル画像に含まれる誤差と実用への課題	83
4-4 画素内緑被率を利用した推定方法の開発	85
4-4-1 出現する画素内緑被配置パターン	85
4-4-2 近傍画素情報を利用した推定方法の検討	87
4-5 ニューラルネットワーク法による推定	93
4-5-1 ミクセルの分割数と推定結果との関係	93
4-5-2 入出力パターンの対応関係の独立性向上	94
4-5-3 推定性能の地区依存性の検討	97
4-6 まとめ	98
第5章 詳細な都市緑被分布図の作成への応用	101
5-1 はじめに	102
5-2 都市環境計画のための緑被分布図の提案	103
5-2-1 市街地と里地の情報格差	103
5-2-2 市街地を対象とした緑の調査方法とその問題点	103
5-2-3 調査結果と環境行政での活用策	105

5-2-4 都市緑被分布詳細図の提案	106
5-3 高空間分解能データの取得と前処理方法.....	108
5-3-1 市街地と里地の定義	108
5-3-2 解析地区の選定.....	110
5-3-3 高空間分解能航空機 MSS による観測.....	111
5-3-4 既存情報のデジタル化によるGISデータの整備.....	115
5-3-5 航空機リモートセンシングデータの補正方法	119
5-3-6 市街地及び里地の緑の分光特性の比較	121
5-4 里地の緑被分布図の作成手順.....	126
5-4-1 利用する波長帯の選択.....	126
5-4-2 現存植生図の修正による緑被分布図の作成	127
5-5 市街地の緑被分布図の作成手順	131
5-5-1 画素内緑被率推定のための MRVI の閾値設定方法.....	131
5-5-2 画素内緑被配置推定	145
5-5-3 樹木と草地の判別	147
5-6 都市緑被分布詳細図の作成.....	149
5-7 まとめ.....	149
第6章 結論.....	155
6-1 総括	156
6-2 結論	158
6-3 今後の課題.....	160

本研究に関連した公表論文リスト

謝辞

第1章 序論

1-1 研究の背景

都市環境の位置づけの変化と、これからの都市環境計画に求められる環境情報について述べた上で、環境情報の整備に関する課題について論述する。

(1)都市環境と環境情報

今日の都市環境は、自然環境や地球環境の一部としてとらえられ始めている¹。人工環境として自然から切り離された特別な領域であるかのように位置づけられてきた都市は、領域の拡大とともに周辺の自然環境への影響を増大し、地球環境への大きな負荷となってきたためである。また、その影響の大きさを定量的に把握する方法が整備されてきたことも大きく寄与している²。リモートセンシングに代表される広域をモニタリングする手法が開発され、国や地球規模での環境変動とその要因を把握することが可能となり、GISで情報を管理し、インターネットで情報を共有できるようになってきている。

日本では都市への人口集中と都市域の拡大が急速に進んだ結果、全人口の7割以上が都市に居住³するようになった。しかし、数年後からと予想されている人口の減少⁴に連れて、都市が拡大・成長する「都市化社会」の時代から、安定・成熟した「都市型社会」の時代へと移行していくと考えられている⁵。これは、経済活動を優先し機能性や利便性を追求してきた都市計画から、生活環境の快適性や自然環境との共生が重視される都市環境計画の時代への変革期に位置していると、とらえることができる。

こうした社会の変革の流れを受けて、平成12年の都市計画法の一部改正⁶では、これからの都市計画には「自然的環境の整備または保全への配慮」が義務づけられるようになった。今後は、技術・情報の整備によって実際の環境行政を支援していくことが、これまで以上に求められるであろう。

地球環境への負荷低減や生活者にとって快適な都市環境を考える場合には多くの

要因が複雑に絡み合っていることは言うまでもない。建築・都市計画分野での取り組みに絞ってみると、機能性や利便性を向上させることを目的とした従来の都市計画と公害を防止し自然生態系を保全することを目的とした従来の環境計画を融合した新たな視点での都市環境計画が必要となっていると考えられる。「環境共生」、「循環型社会」、「自然ポテンシャルの有効利用」をキーワードにして、これからの環境行政を展開・実行していくには、都市計画法に基づき整備された都市計画基本図や都市計画基礎調査の情報に加えて、環境基本法に基づく新たな環境情報の整備・活用が必要である。

これまでの都市計画では主に土地利用の視点から情報が整備され、基本計画に利用されてきた。今後、都市環境という視点を重視すると共に、より具体的な政策を進めていくには、基本となる土地利用情報に加えて、土地被覆に着目した情報整備が必要と考える。さらには、自然生態系関連の情報等も統合することにより、地球環境の一部としての都市環境の計画が進められる。図 1-1 に都市環境計画を支援する情報整備の概要を示す。このように土地被覆情報を加えることにより、熱環境や水環境等の解析・評価を進めることができるようになり、環境政策の効果を具体的に把握しながら、都市環境計画を進めていくことが出来ると考える。

例えば、緑の情報を環境計画に利用しようとした場合、都市計画基本調査の土地利用区分ではオープンスペースを含んだ「緑地」であり、実際に緑が生育している「緑被」情報が整備されていない⁷。また、自然環境保全を目的として全国で整備されている小縮尺の現存植生図ではどうであろうか⁸。山地や里地の樹種は細かく分類されているものの分布の形状は大まかにしか示されておらず、市街地の緑については分布さえも示されていない⁹。

都市環境を国・地球環境の一部としてとらえる視点からは、人間活動の集積する市街地とそこに存在する小規模ではあるが身近な自然と、市街地周辺の里地や山地の大規模で多様な自然、その双方を都市環境として対等に情報整備していくことが重要と考え

られている¹⁰。また、市街地に生育する小規模ではあるが身近な緑の分布状況のように、生活環境にとって大きな役割を持っている自然を把握しておくことも大切である^{11,12}。

(2)環境情報整備の課題

これまで、土地被覆分布等の詳細な環境情報の整備が進まなかったのは、「都市環境計画」という視点が希薄であっただけではなく、調査に多大な労力を要することも大きな理由であったと考えられる。詳細な調査は、空中写真の判読と現地踏査を併用して行われる¹³ため、広域を均一の精度で調査することも困難である。

人工衛星や航空機によるリモートセンシングと画像処理による調査が、従来の調査方法に代わる有効な手法として期待され、多くの研究・提案がされてきた¹⁴。

リモートセンシングは広域を短期間に調査できることを第一の特徴としている。観測対象とするスケールは、オゾン層、植生変動、海洋温度分布のように地球規模から、農作物や森林の調査のように地域・国家規模、ヒートアイランドや環境アセスメントのような都市・小地域規模まで、非常に大きな幅を持っている。また、都市規模の観測でも、北米やオセアニアの都市とアジアや欧州の都市では、明らかに異なるスケールの地物を観測対象とする¹⁵。

このように多様なスケールのリモートセンシングがあるなかで、日本の都市を対象として都市環境計画で利用できる精密さを持った調査結果を得るには、どのような空間分解能のリモートセンシングが要求されるかを明らかにしておくことが重要である。

従来、高分解能データを得るためには、観測と処理にかかる費用・時間が小さくないことから、実際に自治体等で利用された例は少数であった。しかし、航空機だけでなく人工衛星によるリモートセンシングでも1m以下の空間分解能のデータを利用することができるようになった現況¹⁶では、調査対象に適合したデータを選択することも困難ではなくなっている。

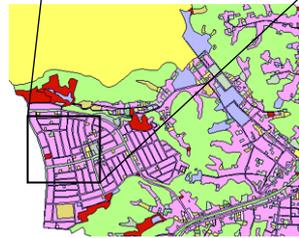
これからの都市環境調査では、要求精度と費用・時間のトレードオフから、調査対象地域全体に対して適切な空間分解能のデータを選択したうえで、一部の地域について高精度化をするというような実用的なアプローチが必要と考えている。

これまでの都市計画

都市計画法 第十四条(都市計画の図書)
 ①都市計画は、国土交通省令で定めるところにより、総括図、計画図及び計画書によって表示するものとする。

都市計画基本図
 地形 → 2m間隔等高線
 建物 → 建物形状
 都市計画基礎調査
 建築物 → 構造、階数、用途(地上、地下、全体)
 土地利用 → 土地利用(大中小コード)
 規制 → 法定容積率、法定建ぺい率、用途地域

土地利用の視点にとどまっている



土地利用図

これからの環境行政に向けて

環境共生、循環型社会、自然ポテンシャルの有効利用

土地被覆の視点が重要

建物と緑・水・土

市街地では建物の被覆(屋上緑化、壁面緑化…)、
 里山では緑(樹冠密度、樹種混在度…)、
 地形の情報(斜度、斜面方位…)、
 土壌の情報(地質、土質、水脈、含水比…)

他に

エネルギー関連
の視点

生態系関連
の視点

居住者意識関連
の視点

細密
植生図
HIP
地面
水収支
・
・
・

これまでの自然環境保全

自然環境保全基礎調査(緑の国税調査)

環境省が昭和48年度より自然環境保全法第4条の規定に基づきおおむね5年ごとに実施している調査
 自然環境保全法第4条
 国は、おおむね5年ごとに地形、地質、植生及び野生動物に関する調査その他自然環境の保全のために講ずべき施策の策定に必要な基礎調査を行うよう努めるものとする。

第1回調査(緑の国税調査)	第2回調査(緑の国税調査)	第3回調査(緑の国税調査)	第4回調査(緑の国税調査)
【調査目的】 【調査対象】 【調査方法】 【調査結果の活用】	【調査目的】 【調査対象】 【調査方法】 【調査結果の活用】	【調査目的】 【調査対象】 【調査方法】 【調査結果の活用】	【調査目的】 【調査対象】 【調査方法】 【調査結果の活用】

引用: 生物多様性センターホームページ
<http://www.biodic.go.jp>



現存植生図

都市環境計画のための環境情報

図 1-1 これからの都市環境計画に求められる環境情報

1-2 研究の目的

自然環境を保全しながら生活者にとって快適な都市環境を創造していくためには、環境の現状を正確に把握し、解析、計画とつなげていく必要がある。これからの都市環境計画に利用される情報としては、「土地利用」をベースとしながら、「土地被覆」の視点からの新たな情報が求められている。特に、具体的に都市環境施策を推進していくには、詳細な土地被覆情報が必要となる。

都市空間は人間活動の集積する様々な形態の地区からなる市街地とそこに存在する小規模ではあるが身近な自然と、里地等の大規模で多様な自然から構成されている。このため、土地被覆情報の把握にはリモートセンシングの利用が有効であるが、対象とする地域特性に応じた観測が重要である。

本研究は、「都市に適合したリモートセンシング」とはどのようなものなのかということを考えるための視点を明確にすることから始める。リモートセンシングの主な分解能は、空間分解能、分光分解能、時間分解能の3つである。都市計画のスケールで土地被覆を把握する場合、最も不足している分解能は空間分解能と考えられる。空間分解能の都市スケールへの適合性を検討するために、まず、都市を構成する地域・地区ごとの土地被覆の分布特性を明らかにする。次に、観測データが適合していない場合の問題をデータの最小単位である一画素に複数の対象が混在して観測されるミクセルの量と質の変化として示す。さらに、空間分解能によって変化する観測値の分散を加え、土地被覆分類への影響を明らかにする。これらによって都市の土地被覆分類に適した空間分解能の範囲を示すことを第1の目的としている。

また、土地被覆毎にひとまとまりの面積規模が異なるため、解析地区全体に対して適当な空間分解能であっても、小規模な土地被覆はミクセルとして観測される比率が高くなる。ここでは、都市環境での役割が最も注目されている土地被覆の一つであり、且つ、

第1章 序論

小規模のものが数多く分布している「緑」をとりあげ、緑を含むミクセルの解析方法を開発することを第2の目的とする。

さらに、上記の知見・開発手法を統合して適用し、都市全域を対象とした土地被覆分布図の作成への応用手順を示すことが第3の目的である。このとき、全国で整備されている土地利用図と現存植生図を既存情報として利用する。これらに不足している緑被分布を中心に解析を行うことにより、詳細で正確な土地被覆分布図を作成する。緑被分布は、都市を市街地と里地に大別し、地域毎の緑について、空間分布と分光分布にどのような違いがあるかを把握したうえで、それぞれに適した解析手順を明確にしていく。

1-3 既往の研究

(1) リモートセンシングを利用した研究の流れ

1960年代初頭にリモートセンシングという言葉が米国で使われるようになり、航空機に搭載されたマルチスペクトルスキャナ(MSS)での観測を経て、1972年のランドサット1号が打ち上げられてからは人工衛星データの利用が可能となり、多くの研究開発が行われてきた¹⁷。

日本の都市環境分野でのリモートセンシング研究は1970年代初頭から始まり、1975年に日本船舶振興財団「日本国土海洋総合学術診断プロジェクト」が発足したのを契機にして多くの研究成果が報告されるようになった¹⁸。

日本建築学会を中心にした研究はこれまで約600編の論文が発表されている¹⁹。これらの研究は、都市環境情報の基本となる土地被覆に関する研究が主流であり、特に「熱」と「緑」に関する多くの報告がされている²⁰。

(2) 土地被覆分類に関する研究

土地被覆分類の対象は、利用するリモートセンシングデータの空間分解能や観測幅に対応している。数十メートルの空間分解能の人工衛星データを利用した研究では、個々の建物や小規模の緑を抽出するのではなく、一定規模の領域毎の緑被率や建ぺい率として土地被覆が検討²¹されたり、植生指標で経年変化をみたもの²²や、他の指標との関係等も検討されている^{23, 24}。また、観測幅の大きさをいかして、都市全域を対象とした解析から都市間の比較等も試みられてきた²⁵。都市を構成する個々の要素を分類対象とする場合には、高分解能の航空機MSSデータが利用されている²⁶。

(3) 最適分解能に関する研究

良好な調査結果を得るには、リモートセンシングデータの空間分解能と土地被覆分類結果の関係を定量的に明らかにしておく必要がある。これまで、ランドサットやスポット等の地球観測衛星を打ち上げる際に搭載する放射計の空間分解能を決定する目的において行われた研究例がみられる^{27, 28}。また、これらの衛星が観測体制にはいった後にもいくつかの研究がみられる^{29, 30}。これらの研究は、数十メートルの空間分解能のデータを前提としてカテゴリを設定しており、森林や湖などのように大面積の対象を分類しよ

うとするものである。このようなカテゴリー設定の場合、分類対象画像に占めるミクセルの比率が小さくなり、分類結果を悪くする主要因として各カテゴリーデータの分散の大きさがあげられている。また、分類精度が最も高くなる最適分解能を数十メートルであると結論付けている。

これらの知見を都市環境を把握する場合に適用することは、必要とする情報(カテゴリー)のレベル³¹の違いにより困難であると考えられる。このため、都市研究を行う場合に要求されるカテゴリー設定での研究が必要となっている。

都市を対象とした研究^{15, 32}もいくつか行われており、WELCH の研究では、各国の都市を代表する土地被覆要素のひとまとまりの面積と瞬時視野の比率を示すことにより、都市研究に必要な空間分解能の地域差を論じている。この研究によると、都市環境要素や地勢は、地理学的地域によってその大きさ、密度、コントラストに関して非常に異なっているため、北米を基準に最適とする空間分解能が、東南アジアで適当とはいえないとしている。また、現在の地球観測衛星や計画されている衛星をプラットフォームとするリモートセンサーのデータでは、都市域の詳細研究には空間分解能的に不十分であり、依然として空中カラー写真や航空機をプラットフォームとするMSSデータの必要性があると結論している。また、FORSTER の研究では、地球観測衛星のデータを用いて都市を観測する場合の問題点を空間分解能の観点から検討している。

これらの研究では、LANDSATやSPOTで観測された数十メートルの空間分解能のデータに対する問題提起にとどまっており、高分解能衛星や航空機データを利用する場合は、都市を構成する個々の単位要素(建物、みどり、道路など)が分類の対象となるため、新たな検討が必要となっている。また、WELCH が指摘するように都市の様相は地域的な差が顕著であるため、対象とする都市の地域特性それぞれについての研究が必要とされている。

また、都市近郊の小規模な農地を対象とした ATKINSON による研究^{33, 34}では、農地の面積とマッピングに最適な空間分解能の関係を検討し、面積変化のマッピングに最適な空間分解能が 0.5~3m であることを示している。ここでは、航空機リモートセンシングの大きな利点として、対象に適合した空間分解能での観測を行えることであると指摘している。

(4)ミクセルに関する研究

都市域のリモートセンシングデータのように、ミクセルを考慮しないと十分な解析ができない対象が認識されるにつれて、ミクセルを対象とした分類手法が提案されるようになってきた。カテゴリー分解法^{35, 36}、回帰分析法^{37, 38}、スケーリング法^{39, 40}、ニューラルネットワーク法^{41, 42, 43, 44}、ファジー推論法^{45, 46}、あるいは、ミクセルを新たなクラスとした確率密度関数を定義しての判別分析手法の利用^{47, 48}などである。

こうした手法で得られる分類結果は、画素内のクラス占有率である。都市域では、クラスが多種類であることと分布が複雑なために、占有率の推定でも困難な対象が多いが、緑については、緑以外との分光反射特性の差異が大きいことにより、正確なクラス占有率(画素内緑被率)を推定することができる³⁵。

画素内緑被率を用いて緑被分布図を作成した場合、エッジの比率が高い小規模な緑の形状は不明瞭なものになってしまう。熱環境や景観等の解析・評価のように小規模なものを含めた緑の分布形状が重要である場合⁴⁹、非常に高分解能のリモートセンシングデータが必要となる。現状ではこのようなデータの取得が困難であるため、画素内緑被率から画素内の緑被配置を近似する方法が必要と考えられる。

こうした分布形状の詳細化は、デジタルカメラ画像の補正処理等で利用されており、主に補間法を用いて行われることが多い。また、複数の空間分解能で同時に観測されたリモートセンシングデータを利用した解析例⁵⁰などがある。これらは、対象の形状が複雑な場合に十分な詳細化が困難であり、より正確な推定方法の開発と適用範囲の明確化が求められている。

1-4 用語の定義

ここでは、使用する主な用語の、本論文での定義を示す。

(1) 土地被覆関連

- ・土地被覆の基本要素： 都市を構成する土地被覆の要素。例えば、建物、道路、街路樹。
- ・ひとまとまりの面積： 基本要素の境界線が閉じているものを、ひとまとまりとしたときの面積。例えば、戸建住宅の屋根の投影面積、1本の樹木の樹冠の投影面積。
- ・土地被覆カテゴリー： 分類対象として項目設定する土地被覆の種類。例えば、建物、緑、その他の3クラス。

(2) 画素関連

- ・ピュアピクセル： 単一のカテゴリーで構成されている画素
- ・ミクセル： 複数のカテゴリーで構成されている画素
- ・ミクセルA： 複数のカテゴリーの境界部分が含まれる画素であり、画素内に独立したカテゴリーが存在しないミクセル
- ・ミクセルB： 画素内に独立したカテゴリーを島状に含むミクセル

(3) 分類精度関連

- ・土地被覆分類精度： 正解とする土地被覆分布図と、土地被覆分類結果を、画素単位で比較し、両者が一致した画素数の全画素に対する比率
- ・配置パターン推定精度： 画素内緑被配置パターンの正答数の全ミクセル数に対する比率
- ・画素単位正答率： ミクセルを分割した画素単位で正誤を判定した場合の正答画素数の全画素数に対する比率

1-5 本論文の構成

本論文は、第1章の序論、および、第6章の結論を含めて、全6章で構成されている。

第1章「序論」では、研究の背景と目的及び論文の構成について述べている。

研究の背景として、都市環境としてとらえる範囲が、周辺の自然観環境から、地球環境の一部まで広がってきており、これに伴い、現在の都市計画では、環境という視点が重視されるようになってきたことを指摘した。また、これに対応して、地域特性に応じた都市環境情報の迅速な把握手法の必要性について述べるとともに、環境施策を具体的に進めていくには、基本となる土地利用情報に加えて、土地被覆に着目した情報整備が必要であることを述べ、研究の位置づけとした。

既往の都市を対象としたリモートセンシングに関する研究をレビューし、都市環境情報の取得に関する問題点を提示する。従来は、数十メートルの空間分解能を前提とした、土地被覆のカテゴリー設定での解析がされてきたが、こうした土地被覆解析結果からは、質の高い都市環境計画を進めていくことは困難である事を指摘した。

そこで、本論文では、建物、道路、緑等の都市の土地被覆を構成する基本要素に着目し、これらをカテゴリーとした土地被覆情報の整備を進めるための方法を明確にすることを、研究の目的として示した。

第2章「土地被覆の分布特性とミクセル」では、都市の土地被覆の観測に適したリモートセンシングを、空間分解能の観点から明らかにすることを目的としている。

まず、住宅地を対象として、土地被覆のひとまとまりの要素の分布特性を明らかにしている。住宅地は、小面積の被覆が複雑に分布することを特徴する都市空間の中で、特にその特徴が顕著な地域として選定している。解析には、高分解能の空中写真を用いている。その結果、土地被覆のひとまとまりの面積は、地域・地区ごとに、固有の頻度分布特性を持っていることを明確にしている。

また、土地被覆毎に、観測データの空間分解能をパラメータとして、ミクセルの質及び量の変化を定量的に示している。

第3章「土地被覆分類に要求される空間分解能」では、リモートセンシングデータを用

いた土地被覆分類において、都市に適した空間分解能の範囲を明らかにすることを目的としている。

空間分解能の低下に伴い、画素値の分散は小さくなるが、ミクセルとして観測される画素の比率は高くなる。それぞれの土地被覆分類への影響を、定量的に把握することによって、両者の影響が、空間分解能をパラメータとして、トレードオフの関係にあることを示し、土地被覆分類に最適な空間分解能が存在することを明確にするとともに、都市の土地被覆分類に適した空間分解能の範囲を示す。

さらに、土地被覆カテゴリー毎の解析により、地区全体として最適な空間分解能であっても、小規模な土地被覆カテゴリーは、ミクセルの影響が大きいことを明らかにする。

第4章「画素内緑被配置推定方法の開発」では、都市環境での役割が注目されている緑を対象を絞り、ひとまとまりの面積が小さいためにミクセルとして観測されることが多い市街地の緑の分布を詳細に把握することを目的として、ミクセル内の緑被情報を抽出する方法を提案している。

解析対象とするミクセルと近傍画素の関係に着目し、近傍画素値からミクセル内の緑被配置を推定可能としている。リモートセンシングデータによる近傍 8 画素の画素内緑被率から画素内の緑被配置を推定することにより、ミクセルを9分割した場合の緑被の配置を推定でき、小面積の緑の分布形状を精細化できることを確認している。

第5章「詳細な都市緑被分布図の作成への応用」では、都市域全体で緑被分布図を作成する場合の解析手順を提案することを目的としている。

まず、市街地の緑と、その周辺の里地の緑について、空間分布特性、及び、分光分布特性の違いを把握し、それぞれに応じた解析手順の必要性について述べる。

市街地では、第4章での開発手法を適用し、小規模な緑を抽出する手順を提案する。このときの主な課題として、既存の植生指標 MRVI の値と、画素内緑被率との対応を、決定する方法をとりあげ、実用的な解決方法を検討する。

里地では、小縮尺ではあるが、現存植生図が整備されていることから、これを修正することによって、詳細な緑被分布図を作成する。

両地区の解析結果を統合することで、現地踏査に代わる、高精度で詳細な都市計画レベルの緑被分布図を作成できる、新たな手順を提案している。

第6章「結論」では、本論文全体の結論を述べ、各章で得られた成果の総括と今後の課題を述べる。

以上の本論文の構成を、図 2-1 に示す。

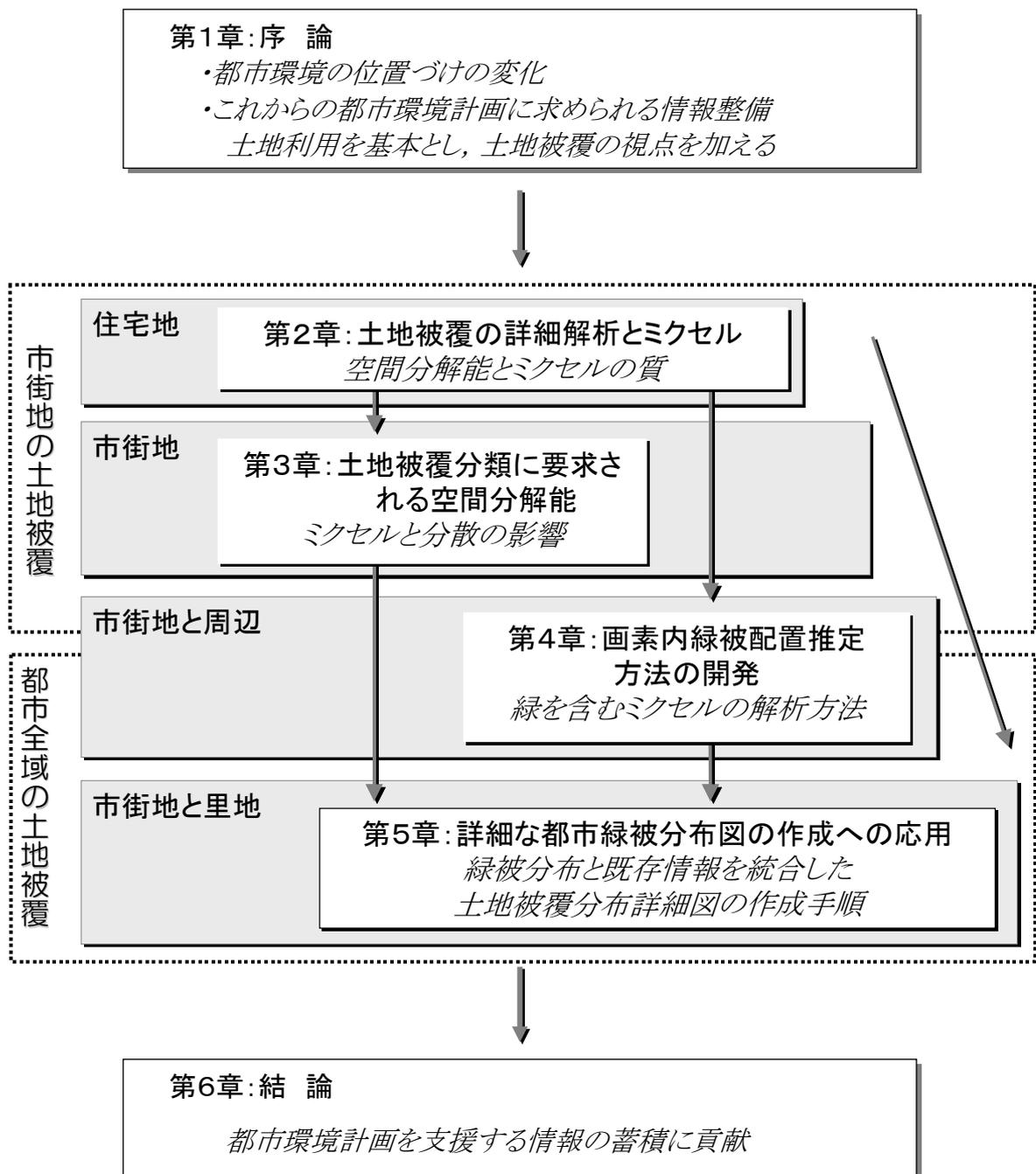


図1-2 論文の構成

引用文献

- 1 井村秀文:特集論文地球環境と都市と緑,都市計画,Vol.46,No.1,pp.13-16,1997
- 2 安岡善文:《巻頭言》木を見て森を見る,RESTEC44号,pp.1,2000
- 3 全国人口125,860,006人(平成11年3月31日現在の自治省調べ)のうち,都市人口は90,869,316人(平成11年9月30日現在の全国市長会調べ)であり,都市人口比率(都市人口/全国人口)は72.20%となっている
- 4 国立社会保障・人口問題研究所:日本の将来推計人口(平成9年1月推計)
「わが国の総人口は平成7(1995)年10月1日現在で1億2,557万人である。今回の中位推計によると,総人口は今後増加を続け,平成12(2000)年の1億2,689万人を経て,平成19(2007)年に1億2,778万人でピークに達した後減少に転じ,推計期間の最終年次の平成62(2050)年には1億50万人に達するものと予想される。」
- 5 古澤達也:エコロジカルネットワーク計画と都市計画,都市緑化技術, No.38, pp.6-9, 2000
- 6 平成12年5月19日法律第73号(1年以内施行, H13.5.18 施行予定)
第十三条(都市計画基準)に追加されている。
また,改正に先立つ「都市計画中央審議会答申:今後の都市政策はいかにあるべきか,H12.3.14」によると,今回の措置は総合的取組のための第一歩と位置づけられている。
「4. 自然的環境や景観など都市環境の保全のための制度の充実
5) 自然的環境や景観など都市環境の保全のための総合的取組
都市における貴重なストックである緑地等の自然的環境, 田園景観や美しい街並み等の維持を図り, 全体として良好な都市環境を保全していくためには, 上述した風致地区制度の改正, いわゆる白地地域での建築物の用途規制の導入, 容積率, 建ぺい率等の規制の土地利用の状況に応じた見直しなどに加え, 現行の緑地等の保全に関する諸制度の活用, 前述した開発許可基準の条例による上乘せなどを積極的かつ総合的に運用していくことが必要である。さらに将来的には, 後述するとおり, 財源措置や税制のあり方を含めた総合的な方策を講じていく必要があり, 今回の措置はその第一歩ととらえるべきである。」
- 7 社団法人日本公園緑地協会編:緑の基本計画ハンドブック改訂版, 1997
- 8 環境庁自然保護局編:日本の植生 第4回自然環境保全基礎調査植生調査報告書(全国版),(財)自然環境研究センター,1997
- 9 例えば,「逗子市現存植生図」昭和63年度発行,平成11年度一部更新(図1-1に一部引用)
- 10 中瀬勲:特集論文緑地環境のマネジメント,都市計,Vol.48,No.4,pp.29-33,1999
- 11 田中總太郎他:IKONOS データによる東京の緑の計測について,RESTEC45号, pp.49-54,2000
- 12 梅干野晃:地球温暖化対策とグリーンビルディング,グリーンエージ((財)日本緑化センター)平成11年10月号, pp.24-32, 1999

-
- 13 例えば, 富士通エフ・アイ・ピー:平成 11 年度逗子市植生調査報告書,2000
 - 14 都市域を対象とした研究は, 建築学会, 土木学会, リモートセンシング学会, 写真測量学会, 造園学会等を中心に報告されている。例えば, 梅干野他:高分解能航空機 MSS データを用いた自動分類による市街地におけるみどりの抽出, 日本建築学会計画系論文報告集第 407 号,pp.37-45,1990
 - 15 WELCH R., Spatial resolution requirements for urban studies, International Journal of Remote Sensing, Vol.3, No.2, pp.139-46, 1982
 - 16 田中總太郎:高分解能衛星リモートセンシング時代の幕開け, RESTEC44 号, pp.2-20, 2000
 - 17 香取義重:米国および欧州にみる宇宙利用戦略, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.21, No.1, pp30-36, 2001
 - 18 梅干野晁:都市環境分野におけるリモートセンシングの現状と将来, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.11, No.1, pp72-76, 1991
 - 19 日本建築学会環境工学委員会リモートセンシング WG 編:リモートセンシングに関する研究論文選集, 第4集(都市・建築環境), 2000
 - 20 田中總太郎:リモートセンシングー20 世紀から 21 世紀へー, リモートセンシングWG シンポジウム「21 世紀のリモートセンシング」, pp.5-13, 2001
 - 21 平川秀樹・高木直樹:マルチテンポラル人工衛星データによる土地利用の分類精度に関する研究, 日本建築学会計画系論文集第 480 号, pp.61-68, 1996
 - 22 斉藤郁雄・石原修:ランドサットTMデータによる都市域の緑被変化の抽出に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, Vol.38, pp105-108, 1999
 - 23 鍵屋浩司・尾島俊雄:広域避難場所における防火性からみた緑の評価のためのリモートセンシング調査, 日本建築学会計画系論文集第 498 号, pp.89-94, 1997
 - 24 宮崎ひろ志・森山正和:阪神・淡路大震災における地震火災規模と緑被率・建ぺい率等市街地特性との相関解析, 日本建築学会計画系論文集第 520 号, pp.77-81, 1999
 - 25 尾島俊雄編:リモートセンシングシリーズ都市, 朝倉書店, 1980
 - 26 梅干野晁・加藤倍敬:高分解能航空機MSSデータを用いた自動分類による市街地における緑の抽出, 日本建築学会計画系論文集第 407 号, pp.37-45, 1990
 - 27 MARKHAM B.L., and TOWNSHEND J.R.G., Land Cover Classification Accuracy as a Function of Sensor Spatial Resolution, Proceedings of the 15th International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Michigan, pp.1075-90, 1981
 - 28 TOWNSHEND J., and JUSTICE C., Information Extraction from Remotely Sensed Data, A user view, International Journal of Remote Sensing, Vol.2, No.4, pp.313-29, 1981
 - 29 LATTY R.S. et al., Performance Comparisons Between Information Extraction Techniques Using Variable Spatial Resolution Data, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.51, No.9, pp.1459-70, 1985

- ³⁰ 新井康平, マルチスペクトル分析における最適空間分解能, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.5, No.3, pp.199-205, 1985.9
- ³¹ ANDERSON J.R. et al., A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data, U.S. Geological Survey Professional Paper 964, 1976
- ³² FORSTER B.C., An Examination of some problems and Solutions in monitoring Urban areas from satellite Platforms, International Journal of Remote Sensing, Vol.6, No.1, pp.139-151, 1985
- ³³ ATKINSON P M: Selecting the spatial resolution of airborne MSS imagery for small-scale agricultural mapping, Int. J. Remote Sensing, Vol.18, No.9, pp.1903-1917, 1997
- ³⁴ ATKINSON P M, CURRAN P J: Choosing an Appropriate Spatial Resolution for Remote Sensing Investigations, Photogramm. Eng. Remote Sensing, Vol.63, No.12, pp.1345-1351, 1997
- ³⁵ 藤村貞雄, 伊藤直史: 画素のカテゴリー分解による面積比推定, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.6, pp.23-34, 1987.6
- ³⁶ 稲村實: カテゴリー分解に基づくリモートセンシング画像データの解析, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J70-C, No.2, pp.241-250, 1987.2
- ³⁷ 本條毅, 高倉直: 植生指数と(Vegetation Index)を用いた都市における緑被率の推定, 造園雑誌, Vol.52, No.5, pp.283-287, 1989.3
- ³⁸ 尹敦奎, 梅干野晃: 都市域における画素内緑被率推定のための指標, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.18, No.3, pp.4-16, 1998.9
- ³⁹ 竹内章司, 稲永麻子: スケーリングを目的とするミクセル推定におけるカテゴリ分解法と回帰推定法の比較, 写真測量とリモートセンシング, Vol.37, No.1, pp.29-34, 1998
- ⁴⁰ 杉田幹夫, 安岡善文: NOAA/HVRR データと LANDSAT/TM データのスケーリングによる土地被覆の画素内面積比率推定, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.20, No.1, pp.32-42, 2000.3
- ⁴¹ 三條和博: ニューラルネットワークによる頑健な衛星画像分類法の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.IE93-121, pp.15-21, 1994.2
- ⁴² 稲村實, 山崎秀春: ニューラルネットワークによるミクセルのカテゴリー分解, 日本リモートセンシング学会第 17 回学術講演会論文集, pp.101-102, 1994.12
- ⁴³ FOODY G M : Relating the Land Cover Composition of Mixed Pixels to Artificial Neural Network Classification Output, Photogramm. Eng. Remote Sensing, Vol.62, No.5, pp.491-499, 1996
- ⁴⁴ FOODY G M, LUCAS R M, CURRAN P J, HONZAK M: Non linear mixture modeling without end members using an artificial neural network, Int. J. Remote Sensing, Vol.18, No.4, pp.937-953, 1997
- ⁴⁵ 西田真, 大塚敬, 田畑亮: ファジィ推論によるミクセルのクラス混在率推定, 電気学会論文誌, Vol.116-C, No.3, pp.359-366, 1996.3

-
- ⁴⁶ FOODY G M, ARORA M K: Incorporating mixed pixels in the training, allocation and testing stages of supervised classifications, *Pattern Recogn. Lett.*, Vol.17, No.13, pp.1389-1398, 1996
- ⁴⁷ 北本朝展,高木幹雄:ミクセルの内部構造を反映する面積占有率密度を用いた画像分類法, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J81-D-2, No.11, pp.2582-2597, 1998.11
- ⁴⁸ 須崎純一,柴崎亮介:確率ミクセルモデルに基づいたスペクトル特性ならびに被覆混合比推定手法, *写真測量とリモートセンシング*, Vol.38, No.3, pp.44-59, 1999
- ⁴⁹ 尹敦奎,梅干野晁:熱収支数値シミュレーションによる都市緑化の評価, *日本建築学会計画系論文集*, 第 520 号, pp.69-75, 1999.6
- ⁵⁰ FOODY G M: Sharpening fuzzy classification output to refine the representation of sub-pixel land cover distribution, *Int. J. Remote Sensing*, Vol.19, No.13, pp.2593-2599, 1998

第2章 土地被覆の分布特性とミクセル

2-1 はじめに

土地被覆の自動分類では、分類しようとする土地被覆のカテゴリーと、リモートセンシングデータの空間分解能を、どのように設定するかが、高精度の分類結果を得るための、非常に重要な問題となってくる。リモートセンシングデータの空間分解能と、観測対象として設定する土地被覆要素のスケールが、適合していることが必要である。

空間分解能と土地被覆分類結果に関する、これまでの研究の多くは¹⁾⁻⁵⁾、LANDSATやSPOTで観測された、数十メートルの空間分解能のデータを前提として、カテゴリーが設定されている。これらでは、森林・草原・湖などのように、大面積の自然被覆及び、人工被覆が大半を占める都市の中心部は、市街地や住宅地というくくりで分類しようとするものであり、市街地を構成する個々の土地被覆に対してのカテゴリー設定は行われていない。

こうした大規模な観測対象に対しては、ひとまとまりの土地被覆の面積と空間分解能の関係から、土地被覆分類結果を検討するという視点が求められることはなく、設定した各土地被覆カテゴリーの観測値の分散が、判別に十分な程度に小さくなる空間分解能であることが、適切な観測であるという視点からの議論が行われている。

しかし、都市の環境計画に利用する土地被覆分布図を作成しようとする場合、市街地を構成する土地被覆の基本要素である建物、緑、道路などを分類の対象としてカテゴリー設定することになる。こうしたカテゴリー設定では、各カテゴリーのひとまとまりの面積が小さく、かつ、それらが複雑に分布している。このため、空間分解能は、各カテゴリーの境界部分を明瞭に示すことができるか、という視点での議論が必要となる。

また、市街地は、都市計画においては、住宅地や商業地などの地域地区に分類されている。こうした地域・地区毎に、土地被覆のひとまとまりの面積と分布は異なっていると考えられる。このため、地域・地区毎の検討も必要であろう。

リモートセンシングデータの空間分解能が低下すると、観測対象の形状が不明瞭になるのは、観測の最小単位である1画素内に複数のカテゴリーが存在するミクセル (MIXEL: Mixed Picture Cell) として観測される比率が高くなっていくためである。

本章では、建物、道路、樹木など市街地を構成する土地被覆の基本要素を分類の対象とした場合の、自動分類に要求される空間分解能を検討する為の基礎研究として、

- ①地区毎の各土地被覆のひとまとまりの面積と出現頻度の関係
- ②空間分解能とミクセルとして観測される比率との関係

について検討する。

なお、都市の土地被覆をみた場合、住宅地の土地被覆の分布が最も複雑であり、ひとまとまりの面積も小さい。観測データの空間分解能と観測対象のスケールとの適合性という観点でみた場合、都市の中で最も厳しい条件を住宅地が持っていると言える。そこで、住宅地を対象として解析を行うこととした。

2-2 住宅地の土地被覆分布特性の解析

2-2-1 解析対象とした住宅地及び土地被覆分布図

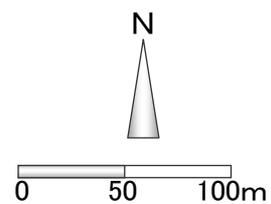
(1) 解析対象地区

土地被覆分類においては、対象地区を構成する基本要素のひとまとまりの面積や分布状態が分類結果に大きな影響を及ぼす。この基本要素に注目すると、市街地は、地域・地区毎に、大きく異なる分布特性を持っている。

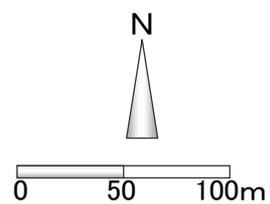
研究の第一段階としては、基本要素の分布特性が大きく異なる2地区を選定することにより、市街地の一般的な特徴が、両地区の中間の特性として現れることを意図して、解析地区を設定した。ひとまとまりの面積が小さく、分布状態が複雑な地区として、小面積の戸建住宅が密集した地区を選定した。また、ひとまとまりの面積が大きく、整然とした分布状態の地区として、大面積の住棟が建ち並んだ集合住宅地を選定した。

戸建住宅地としては、墨田区東向島六丁目から、ひとまとまりの面積の小さい構成物が、非常に高密度に分布している地区を戸建住宅地A、その中に部分的に大面積のものが分布している地区を、戸建住宅地Bとして抽出した。また、集合住宅地は中層住棟が整然と並び、前庭にはみどりが多く分布している、同区の文化団地を選定した。

現状では、リモートセンシングデータよりも、空中カラー写真の空間分解能が高い。また、視覚判読を行う場合、アナログデータである空中写真は、デジタルデータであるリモートセンシングデータよりも、事物の境界が滑らかであるために判読性が高い。このため、空中カラー写真をもとに、土地被覆分布図を視覚判読によって作成し、解析に利用する。図 2-1 にこれら解析対象地区の空中写真を示す。



戸建住宅地A, B
(墨田区東向島六丁目)



集合住宅地
(墨田区文花団地)

図2-1 解析対象地区の空中写真

(2) 土地被覆分布図の作成

土地被覆のカテゴリーについては、これまでに梅干野らが扱ってきたカテゴリー⁶⁾をもとに、細分類(15 分類)と大分類(3分類)の2種類の設定を行った。表 2-1 に土地被覆のカテゴリーを示す。

細分類した土地被覆のカテゴリーは、3章における航空機 MSS データを用いた土地被覆の自動分類に使用しているカテゴリーと同じものである。細分類による土地被覆分布図は、主にピュアピクセルの分類項目の構成と空間分解能との関係の検討に用いた。

これに対して、大分類の土地被覆分布図は、細分類のカテゴリーを建物、みどり、その他の3カテゴリーにまとめたものである。細分類のカテゴリーを用いた解析では、ミクセルを構成するカテゴリーの組合せが複雑になるため、ミクセルに関する詳細な検討には、大分類のカテゴリーを用いた。

空中カラー写真(縮尺1/1000)をトレースし、カテゴリーを目視判別することによって、土地被覆分布図を作成した。大分類で作成した土地被覆分布図の一例を図 2-2 に示す。

表2-1 土地被覆のカテゴリー

大分類	細分類
みどり	樹木 草木 地被植物
建物 (屋根)	トタン 瓦 スレート アルミ アスファルト コンクリート
その他	土 砂 舗装(アスファルト) 舗装(コンクリート) 日影(植物) 日影(植物以外)



図2-2 大分類の категория 設定による土地被覆分布図 (戸建住宅地A, B)

2-2-2 土地被覆分布特性の解析

(1) 大分類のカテゴリ設定でのひとまとまりの面積の特性

リモートセンシングの空間分解能の選択にとって、各カテゴリのひとまとまりの面積は、形状や分布位置とともに重要な特性である。また、形状や分布位置の相互関係等によって示される分布状態に比して、数量化が容易である。ここでは、土地被覆の大分類カテゴリについて、境界線が閉じているものをひとまとまりの基本要素とし、その面積と出現頻度の関係を地区の特性として検討した。

図 2-3 に、土地被覆分布図より求めた各地区の建物の面積、および、戸建て住宅地のひとまとまりのみどりの面積に関するヒストグラムを示す。建物は 10 m²単位、みどりは 1 m²単位のランクで頻度を求めている。

戸建住宅地の建物は、30～39 m²のランクを最頻値として、100 m²以下に分布しているものが多い。戸建住宅地Bでは、比較的規模の大きい建物が、小数ではあるが存在し、戸建住宅地 A の半数以下の住戸数になっている。一方、集合住宅地の住棟は、510～519 m²のランクを最頻値としており、戸建て住宅地の最頻値と比較すると、約 15 倍の面積となっている。

みどりは数本の樹木が点在している場合が多く、4 m²以下のものが半数を占めている。また、従来の緑被調査で主な対象とされてきた 100 m²を越えるみどりは戸建て住宅地Bに2カ所存在するのみである。

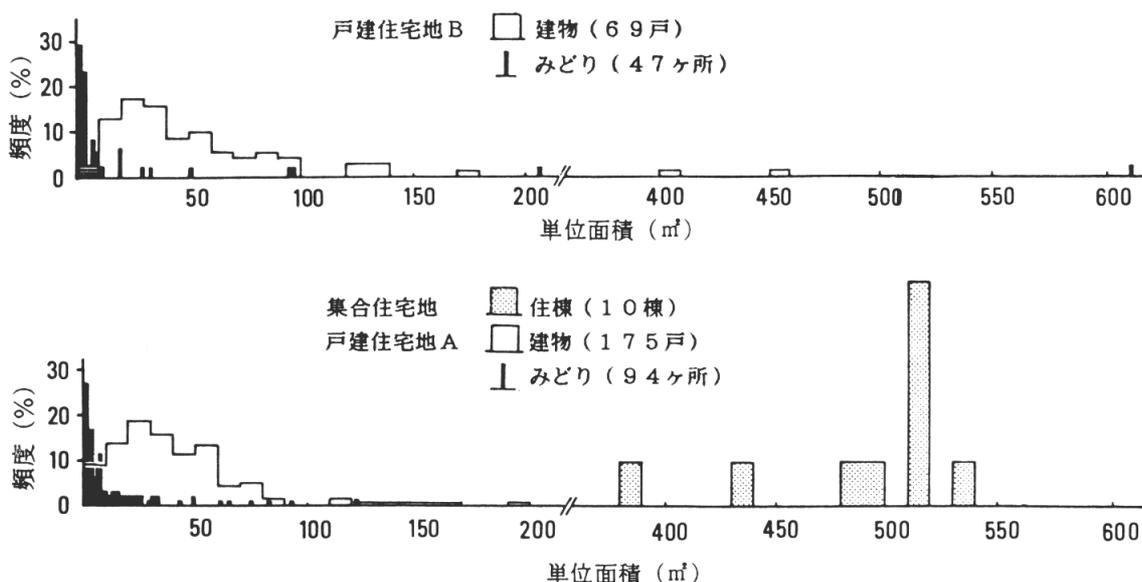


図2-3 地区毎にみた土地被覆のひとまとまりの面積のヒストグラム

(2) 細分類による空間分解能とピュアピクセルの構成比率との関係

ここでは、ミクセルの検討に先立ち、細分類の分類結果により、ピュアピクセルの構成比率と空間分解能との関係を検討する。解析は、デジタルデータに相当する土地被覆メッシュ画像を作成して行う。なお、解析対象地区は、3地区の中間的特性を持つと考えられる戸建住宅地Bとした。

a) 土地被覆メッシュ画像の作成

土地被覆分布図上に、リモートセンシングデータの空間分解能に対応するメッシュを描いた透明シートをかけ、画素に相当する各メッシュの土地被覆の状態を、目視判読により分類し、土地被覆メッシュ画像を作成した。メッシュの大きさは、土地被覆分布図上で1m, 2.5m, 5m, 10m, 30mに相当する5種類である。画素は大別して、ピュアピクセルとミクセルA, ミクセルBの3種類に分類した。

それぞれの定義を以下に示す。

ピュアピクセル： 単一のカテゴリーで構成されている画素

ミクセルA： 複数のカテゴリーの境界部分が含まれる画素であり、画素内に独立したカテゴリーが存在しないもの

ミクセルB： 複数のカテゴリーで構成され、画内に独立したカテゴリーを含む画素

これにもとづいて、土地被覆を大分類した場合の各画素の土地被覆の状態は、表 2-2 に示すように分類でき、図 2-4 には、その場合の画素の分類例を示す。また、大分類の土地被覆グリッド画像の例として、空間分解能 2.5mの場合を図 2-5 に示す。

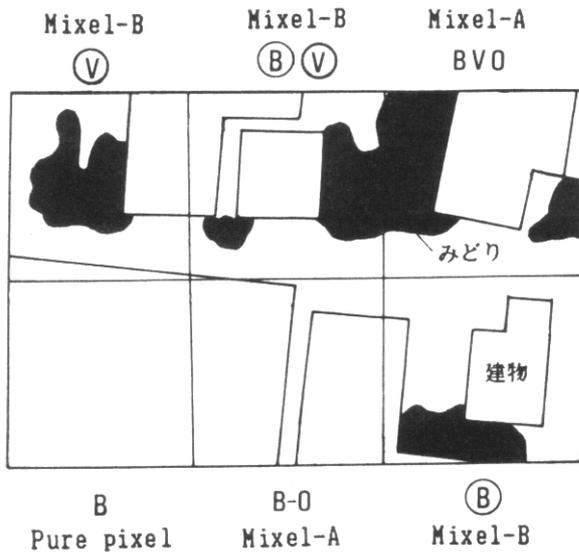


図2-4 大分類の土地被覆図にメッシュをかけた場合の画素の分類例

表2-2 画素の分類項目

Pure pixel	
B	: 建物
V	: みどり
0	: その他
Mixel-A	
B-0	: 建物-その他
V-0	: みどり-その他
B-V	: 建物-みどり
B-V-0	: 建物、みどり その他
Mixel-B	
(B)	: 建物
(V)	: みどり
(B V)	: 建物、みどり

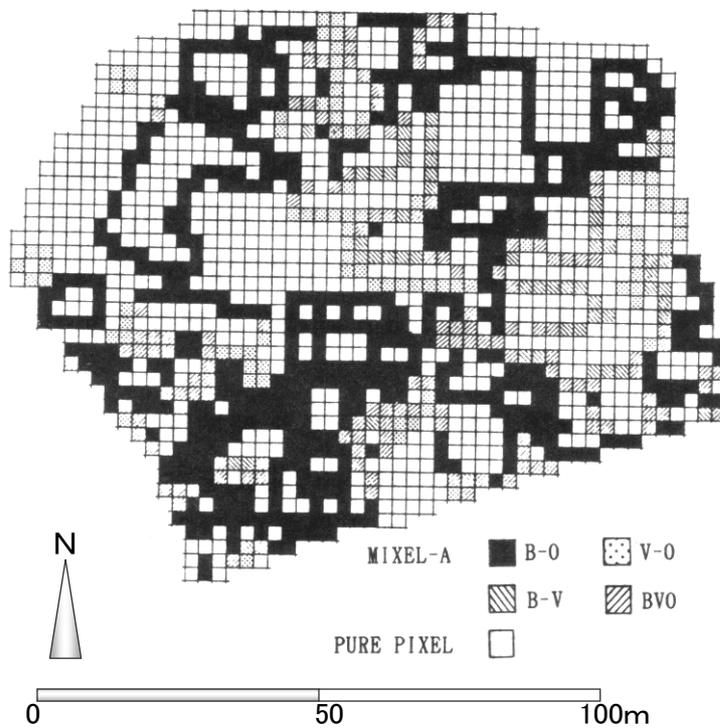


図2-5 大分類の土地被覆メッシュ画像(戸建住宅地B, メッシュサイズ 2.5m)

なお、土地被覆メッシュ画像を作成するにあたり、住棟が規則正しく配置された集合住宅地の場合、住棟方向に対する航空機の観測コースの方向の違いによる、解析結果への影響を考慮する必要があると考えられる。このため、観測コースが異なる場合を想定して、グリッドの直行軸の方向、および、位置を任意にとった試行実験を行った。空間分解能が5m以下では、観測コースによる差はみられないが、10m程度から、多少の相違がみられる。一例として、表 2-3 に空間分解能 30mの集合住宅地の試行結果を示す。標準偏差が一画素前後と小さいため、平均値を用いることが妥当であると考え、空間分解能 10m以上の画像を用いた解析では 10 回の試行を行い、最大値、最小値を除いた平均値を解析結果とした。

表2-3住棟配置が規則正しい場合のメッシュのかけ方による分類結果の相違
(集合住宅地, メッシュサイズ 30m の場合)

No.	Pure pixel		Mixel-A		Mixel-B		全画素数
	画素数	比率 (%)	画素数	比率 (%)	画素数	比率 (%)	
1	0	0	7.5	35.7	13.5	64.3	21.0
2	2.0	8.7	5.5	23.9	15.5	67.4	23.0
3	1.5	6.5	10.5	45.7	11.0	47.8	23.0
4	1.0	4.3	7.5	32.6	14.5	63.0	23.0
5	0.5	2.3	10.5	47.7	11.0	50.0	22.0
6	0	0	11.5	54.8	9.5	45.2	21.0
7	1.0	4.5	8.0	36.4	13.0	59.1	22.0
8	2.0	8.9	8.0	35.6	12.5	55.6	22.5
9	1.0	4.3	7.5	32.6	14.5	63.0	23.0
10	0.5	9.0	9.0	41.9	12.0	55.8	21.5
平均値	0.9	4.3	8.5	38.5	12.7	57.2	22.2
標準偏差	0.7	-	1.8	-	1.8	-	0.8

b) ピュアピクセルの構成比率と空間分解能の関係

空間分解能1m, 2.5 m, 5mについて、この地区の全画素に対するピュアピクセルの比率、および、全ピュアピクセルに対する各カテゴリーのピュアピクセルの比率を求め、図 2-6 に示す。空間分解能1mのとき、66%である全ピュアピクセルの比率は、2.5mで35%、5mでは17%と、それぞれ約1/2, 1/4に減少する。さらに、カテゴリー別にみ

ると樹木や瓦は、ある空間分解能でその比率が半減していることがわかる。

これらのことは、各カテゴリーのひとまとまりの面積に関係するものと考えられる。これを、前項で求めたヒストグラム(図 2-3)との関係で考察する。戸建住宅地Bの全ピュアピクセルに対するみどりの比率は、空間分解能1mの 10%に対し、2.5 mでは6%と半減している。これは6㎡(空間分解能 2.5mの画素の面積に対応する)以下の小面積のみどりが、全個数の半数以上を占めていることと関係があると考えられる。また、空間分解能5mの画素の面積に対応する 25 ㎡は、戸建住宅地Bの建物の面積の最頻値であるが、戸建住宅地の瓦屋根の全ピュアピクセルに対する比率が、空間分解能 2.5mで 42%、5mでは、28%と急激に減少していることも、みどりと同様の関係であると考えられる。

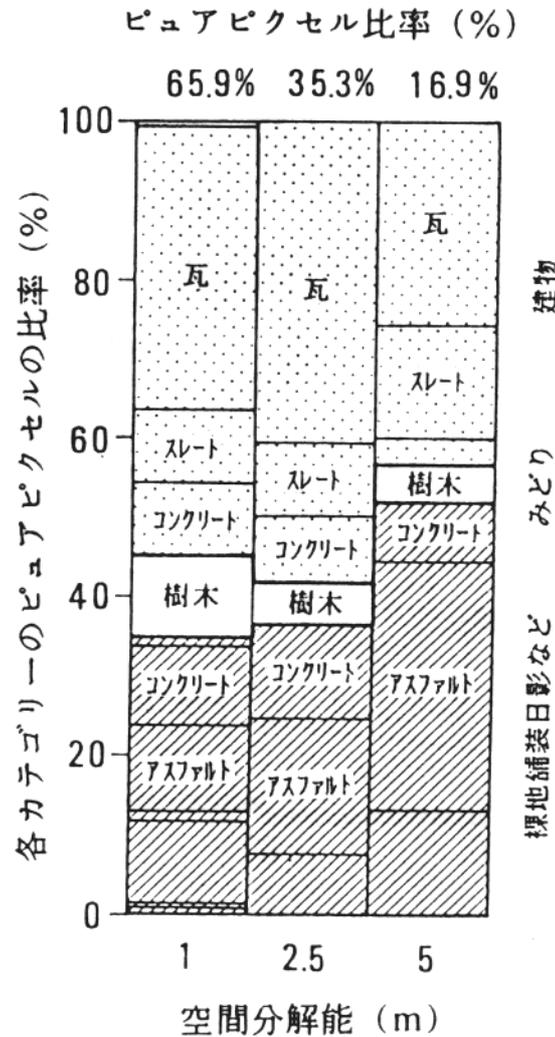


図2-6 細分類による土地被覆メッシュ画像の各カテゴリーのピュアピクセルの構成比率と空間分解能との関係(戸建住宅地B)

2-3 リモートセンシングデータの空間分解能とミクセルの量・質との関係

リモートセンシングデータを用いた分類結果へのミクセルの影響を考える場合には、同一のカテゴリ設定(細分類)で、ミクセルを構成するカテゴリの組合せについて、検討すべきであるが、細分類では組合せの数が多すぎることから、定量的に組み合わせ相互の関係を把握することは不可能に近い。このため、細分類のカテゴリを3つにまとめた大分類のカテゴリによって、ミクセル内のカテゴリの組合せ相互の関係と空間分解能との関係を検討する。

2-3-1 細分類と大分類による分類結果の比較

量的な観点からではあるが、両画像の各分解能のミクセル比率の関係を検討し、大分類の画像を用いてミクセルについての解析を行うことが妥当であることを示す。なお、解析対象地区は、2-2-2におけるピュアピクセルの解析と同様に戸建住宅地Bとした。

図2-7は、細分類と大分類による土地被覆メッシュ画像を用いて求めたミクセルの比率の相関を示した。ミクセル比率は、空間分解能1mの場合は大分類の土地被覆メッシュ画像で25%、細分類の画像で39%を示し、後者による比率の方が14%高い。

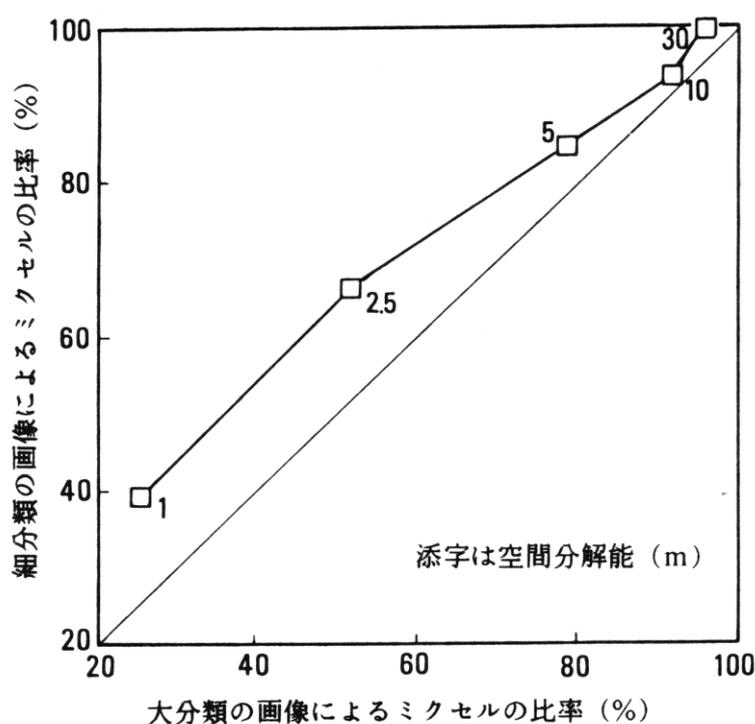


図2-7 細分類と大分類の土地被覆メッシュ画像によるミクセル比率の相関

この比率の差は空間分解能が粗くなるにつれて無くなっていき、両者の比率には直線的で高い相関関係が読みとれる。

以上、細分類の方がカテゴリーが多いためにミクセル比率そのものは大きいですが、空間分解能との関係については、細分類と大分類でほぼ直線的な関係がみられることから、大分類の画像を用いてミクセルの検討を進めても妥当であると考えられる。

2-3-2 大分類による空間分解能とミクセルの構成比率との関係

地区別にみた、ミクセルA、B、および、ピュアピクセルの比率と、空間分解能との関係を、図 2-8 に示す。

空間分解能1mのデータは、高分解能衛星 IKONOS データや、一般的な航空機MS S(瞬時視野角:2.5mrad)を搭載して、ほぼ限界の低高度(500m)で観測した場合に相当する。この分解能でのミクセルの比率は、ひとまとまりの面積の小さい戸建住宅地Aでは35%、ひとまとまりの面積の大きい集合住宅地でも20%を示している。空間分解能が2.5mになると、両地区とも、30%程度の画素が、ピュアピクセルからミクセルへと変化し、集合住宅地で約50%、戸建住宅地Aでは65%近くまで、ミクセルは増加している。この分解能までは、構成要素のひとまとまりの面積の違いにより、15%程度の差がみられる。分解能が粗くなると、ミクセルは急激に増加するとともに、地区による差は少なくなり、空間分解能5mでのミクセルの比率は、両地区とも約80%となる。SPOTのPモードデータに相当する10mでは、90%以上がミクセルとなり、ピュアピクセルは数%しか存在しないことがわかる。

戸建住宅地では、建物とみどりのミクセルが多く、ミクセルAの比率が最大となる分解能5mでは54%を占める。これは、建物のひとまとまりの面積が小さく、建物が密集している場所が多いためと考えられる。また、建物とその他のミクセルが少なく、空間分解能が粗くなっても、建物とみどりとその他のミクセルが20%程度しかないのは、みどりの面積の絶対量が少ないためであろう。一方、集合住宅地では、住棟に接して前庭のみどりが分布しており、その面積の絶対量も大きいため、みどりとその他のミクセルが多く、分解能が粗くなると建物とみどりとその他のミクセルが増加していると考えられ、空間分解能10mでは45%が建物とみどりとその他のミクセルである。

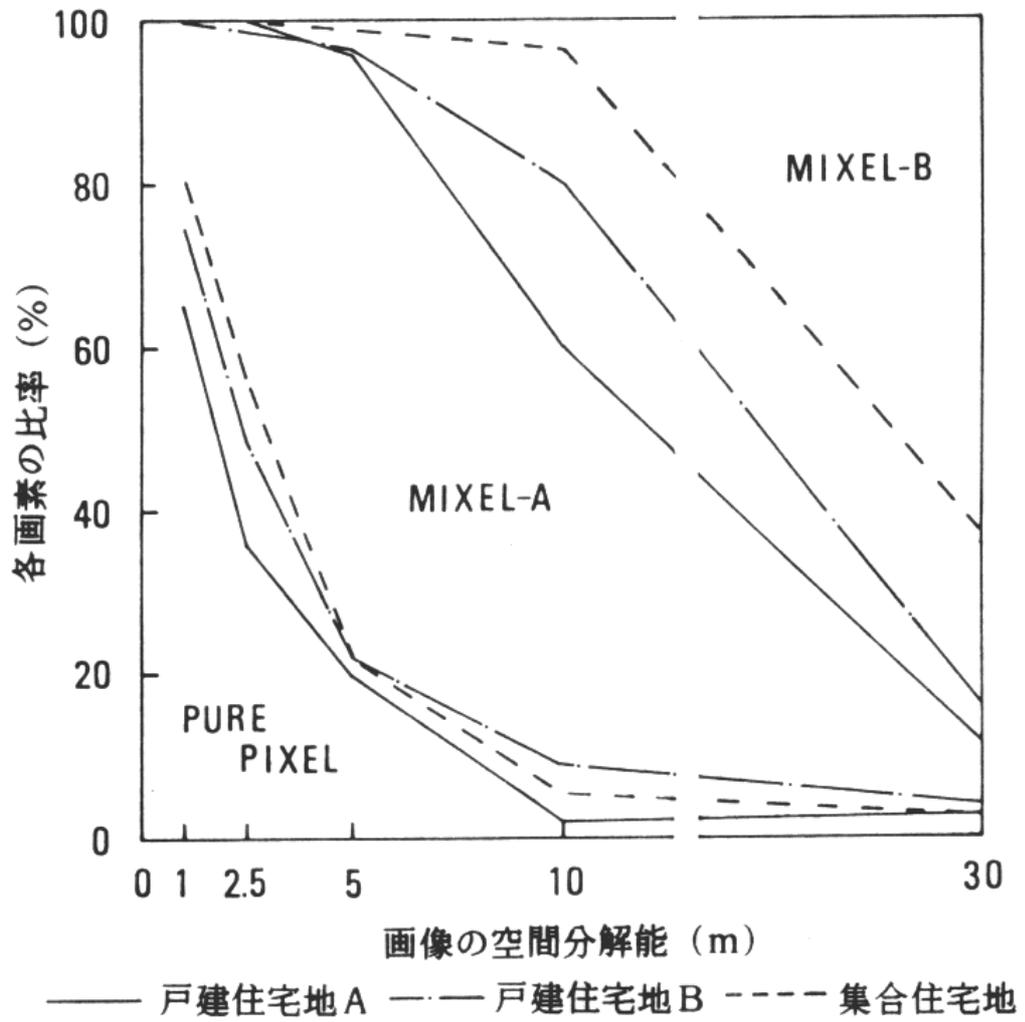


図2-8 大分類の土地被覆メッシュ画像における
ピュアピクセル比率及び各ミクセル比率と空間分解能との関係

2-3-3 空間分解能とミクセルの質の関係

次に、ミクセルAからミクセルBへの変化と、空間分解能との関係を詳しく検討する。戸建住宅地Aと集合住宅地について、空間分解能ごとにみた、各画素の構成比を、図2-9に示す。

空間分解能 2.5m以下では、ミクセルの中でも、画素内に独立したカテゴリーを含まないミクセルAが、大半を占めている。空間分解能5m前後から、ミクセルAは、画素内に独立したカテゴリーが存在するミクセルBへ、変化しはじめる。

また、3地区とも空間分解能 10mと 30mのミクセルA、Bを合わせた比率の違いは、ほとんど無く、90%程度であるが、戸建住宅地では、空間分解能 10mで、また集合住宅地では、空間分解能 30mで、急速にミクセルBの比率が増加している。戸建住宅地Aでは、ミクセルの大半が、独立した建物とみどりが存在するミクセルBである。この点において、SPOTのPモードデータ(空間分解能 10m)とLANDSATのTMデータ(同 30m)では、ミクセル比率は同じでも、質的に大きな差があると言える。

以上、分解能が粗くなるにしたがって、画素の種類が、ピュアピクセル→ミクセルA→ミクセルBへと変化していく過程を、定量的に把握し、画像全体の様相が、各カテゴリーのひとまとまりの面積やその分布状態によって異なることを明らかにした。

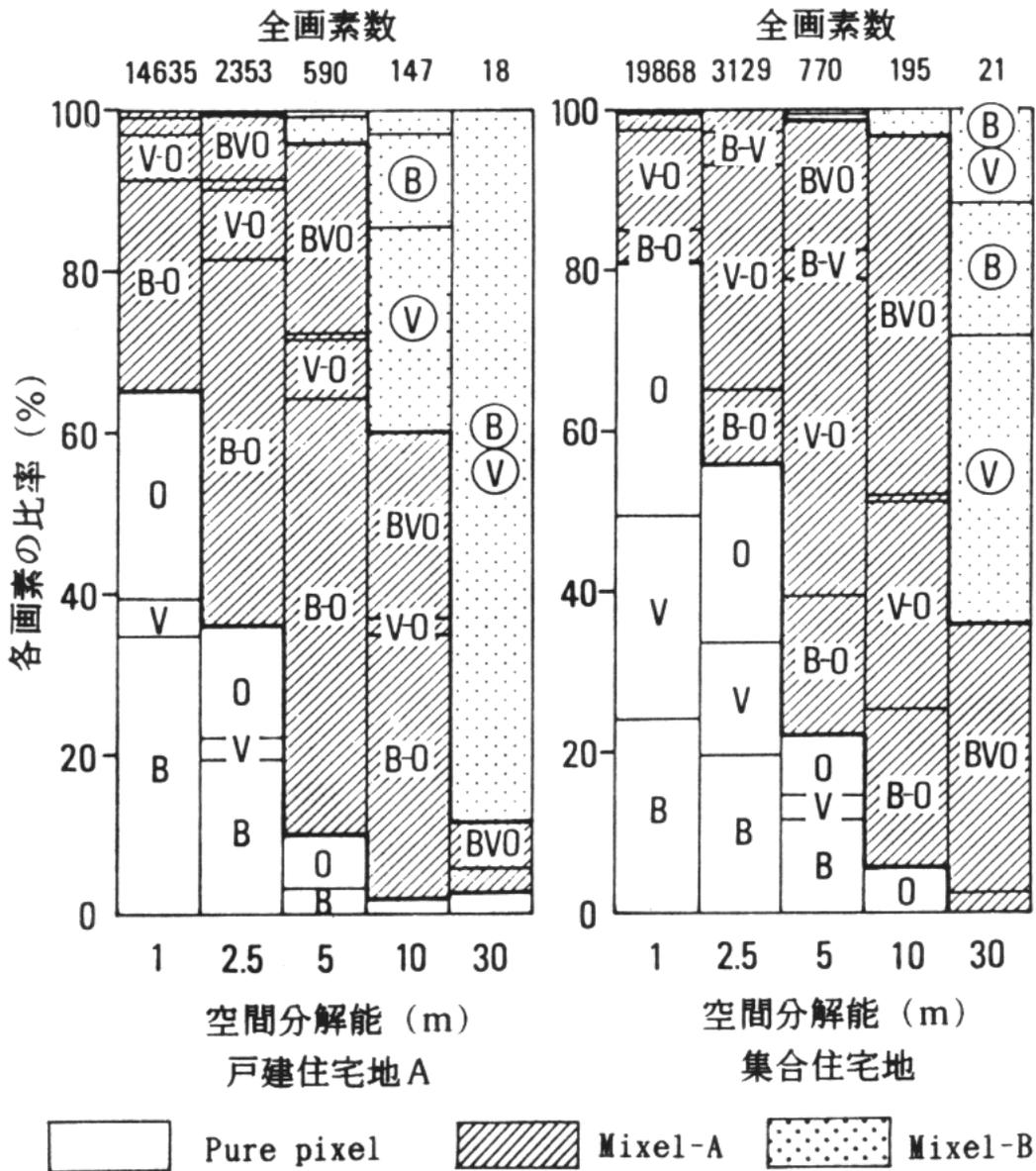


図2-9 大分類の土地被覆メッシュ画像における各カテゴリーの構成比率と空間分解能との関係

2-4 まとめ

都市の土地被覆分類に適したリモートセンシングを考えるための視点を明確にすることを目的として、土地被覆のひとまとまりの面積に関する地区特性、および、観測データの空間分解能とミクセルとして観測される比率との関係を明らかにした。

土地被覆カテゴリーは、建物、道路、樹木など市街地を構成する基本要素を分類対象として設定した。また、解析対象地区は、土地被覆の分布が複雑で、ひとまとまりの面積が小さいことを特徴とする都市空間の中でも、特にその特徴が顕著である住宅地とした。

その結果、土地被覆のひとまとまりの面積は、住宅地毎に異なる特性を持っており、これに応じた観測データの空間分解能の選択が重要であるという知見が得られた。また、両者が適合しない場合、複数クラスが一画素中に混在するミクセルとして観測される比率が高くなるだけでなく、ミクセルの質の変化を伴うことを定量的に示した。

非常に密集した戸建住宅地と標準的な集合住宅地は、土地被覆のひとまとまりの面積に関して、都市を構成する住宅地のなかで、最も小さいものと大きいものの代表的な地区と位置づけることができ、以下の知見は、市街地の土地被覆の観測に適する空間分解能を検討する目安となると考えられる。

1) 地区毎の各土地被覆のひとまとまりの面積と出現頻度の関係

- ① 戸建住宅地では 30~39 m²に最頻値がみられ、100 m²以下の建物が大半を占める。また、集合住宅地の建物面積の最頻値は、戸建て住宅地の約 15 倍になっており、両者は大きく異なる。
- ② 戸建住宅地のみどりは、10 m²以下のものが約 7 割を占めており、小規模なものほど急激に出現頻度が高くなり、約半数は4m²以下のみどりである。

2) ミクセルとして観測される比率及びミクセルの質と空間分解能との関係

- ① 住宅地の土地被覆を観測対象とした場合、空間分解能1mのデータにも 20~35%のミクセルが存在する。集合住宅地と戸建住宅地Aの差は、15 ポイント程である。空間分解能が粗くなると、急激にミクセル比率が高くなるとともに、地区による差は減少し、空間分解能5mでは、各地区とも 80%がミクセルとして観測される。これより粗い空間分解能の画像では、各地区ともにほとんどがミクセルとなる。

- ② このように、空間分解能 10mと 30mでのミクセル比率の違いは、ほとんどみられないが、ミクセルを画素内に独立したカテゴリーを含まないミクセルAと、独立したカテゴリーを島状に含むミクセルBに分類すると、戸建住宅地Aでは空間分解能 10mで、集合住宅地では 30mで、急速にミクセルBの比率が増加しており、両地区のミクセルの質には大きな差がみられる。

引用文献

- 1 MARKHAM,B.L., and TOWNSHEND,J.R.G., 1981, Land Cover Classification Accuracy as a Function of Sensor Spatial Resolution, Proceedings of the 15th International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Michigan, pp.1075-90
- 2 TOWNSHEND,J., and JUSTICE,C., 1981, Information Extraction from Remotely Sensed Data, A user view, International Journal of Remote Sensing, Vol.2, No.4, pp.313-29
- 3 WELCH,R., 1982, Spatial resolution requirements for urban studies, International Journal of Remote Sensing, Vol.3, No.2, pp.139-46
- 4 LATTY,R.S. et al., 1985, Performance Comparisons Between Information Extraction Techniques Using Variable Spatial Resolution Data, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.51, No.9, pp.1459-70
- 5 新井康平: マルチスペクトル分析における最適空間分解能, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.5, No.3, pp.199-205, 1985.9
- 6 梅干野晁・加藤倍敬: 高分解能航空機 MSS データを用いた自動分類による市街地におけるみどりの抽出, 日本建築学会論文報告集, 第 407 号, pp.37-45, 1990.1

第3章 土地被覆分類に要求される空間分解能

3-1 はじめに

リモートセンシングにより得られるマルチスペクトルデータを用いた、土地被覆の自動分類については、判別分析の分野を中心に研究が進められ、多くの自動識別手法の提案が行われている¹⁾。しかし、対象を都市とした場合、その構成要素の分布が複雑で、ひとまとまりの面積が小さいことから、既存の方法そのままでは、十分な解析結果を得ることができず、これを解決できる手法の確立が待たれている²⁾⁻⁴⁾。

これらの自動識別法をマルチスペクトル画像の分類に用いる場合の妥当性を比較検討した研究⁵⁾では、トレーニングデータの正規性と代表性が保たれている場合には、最尤法を最も良い分類結果を与える手法としている。さらに、この最尤法を用いた場合の分類精度に関する研究⁶⁾⁷⁾では、リモートセンシング画像の空間分解能が、分類精度を決定する重要な要素として検討されている。各カテゴリーの画素値の分散と、解析対象の全画素に対するピュアピクセルの比率(以下ピュアピクセル比率)が空間分解能により変化し、両者の影響により、分類精度が決定されるとしている。空間分解能が低下すると画素値の分散が小さくなり、分類精度が向上する傾向にあるのに対し、ピュアピクセル比率は減少するため、全体の分類精度は低下する傾向にある。この二つの要因が空間分解能を介してトレードオフの関係にあるため、分類精度が最高となる最適空間分解能が存在すると考えられる。

前章では、都市の土地被覆は非常に複雑であることから、解析の第一段階として、空中写真を基に作成した単純化したモデルを用いて、ミクセルと空間分解能の関係を検討した。本章では、実際のマルチスペクトル画像を用いることにより、前章で扱うことのできなかつた放射輝度情報も解析対象として、土地被覆分類のための最適空間分解能について考察する。なお、土地被覆のカテゴリー設定は、分類結果の利用目的によっても異なるものである。このため、現在地方自治体等で整備され始めているGIS(地理情報システム)との統合・利用を念頭におき、前章同様に都市の土地被覆の基本要素である、建物、みどり等を対象としたカテゴリー設定での解析とする。

3-2 解析画像の作成

(1) 航空機搭載 MESSR データ

都市を対象として高精度の分類結果を得るためには、前章で扱った空間分解能1mよりも、さらに高分解能の画像が、必要となると予測された。このため本章では、海洋観測衛星1号(もも1号, MOS-1)用に開発された可視近赤外放射計 MESSR(Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer)を航空機に搭載することによって得ることができた高空間分解能のマルチスペクトル画像を用いている。

一般的な航空機搭載用のセンサーは、瞬時視野角が 2.5mrad 前後であり、市街地ではほぼ限界に近い飛行高度 500m で観測した場合、空間分解能は 1.25m のデータが取得できる。また、最近利用可能となった瞬時視野角 1.25mrad センサーでは、63cm の分解能のデータを取得できる。これらに比較して MESSR は瞬時視野角 $54.7 \mu\text{rad}$ と非常に高性能なセンサーである。ここでは、高度 7,000m で観測した空間分解能 38cm のデータを使用する。観測波長帯は、可視域2バンド、近赤外域2バンドである。なお、データの放射・幾何補正は、MOS-1 衛星データのレベル2に相当し、幾何補正については、航空機のジャイロデータを用いたシステム補正を行っている。

また、市街地では、建物等による日影が、土地被覆分類にとって誤分類の原因となる。日影の影響が小さい解析を行うには、太陽高度が高く日影面積が小さくなる夏季の正午付近の観測データを利用することが基本と考える。しかし、ここでは、観測時期よりも、高空間分解能であることを優先して、既存の利用可能なデータから、最も高空間分解能のデータを解析に用いた。使用したデータは、冬季観測で太陽高度が低いため、土地被覆のカテゴリーに「陰」「影」を加えて解析を行うこととした。対象地区の約 28%が陰影部となっている。観測の概要を表 3-1 に示す。

観測対象地区は、茨城県土浦市の土浦駅から約1km離れた住宅地である。戸建木造住宅が多く分布し、その中に、商業施設や小規模工場が存在している。また、みどりについては、大きなまとまりのものは存在せず、点的なものが分布している。なお、解析対象地区の特性により、解析結果は変化するものであり、これを明らかにしておくことが、解析結果の利用のために重要と考えられる。対象地区の土地被覆の状態を明確にするために、各カテゴリーの存在比率を表 3-2 に示した。

表3-1 MESSR による観測の概要

観測地区:	茨城県土浦市桜町
中心座標:	東経 140° 12' , 北緯 36° 04'
観測日時:	1987 年 12 月 3 日, 10:30 前後
太陽位置:	高度 31° , 方位角-16°
天 候:	快晴
観測高度:	7,000m
観 測 幅:	800m
瞬時視野角:	54.7 μ rad
空間分解能:	0.38m
観測波長帯:	Band1(0.51-0.59 μ m) Band2(0.61-0.69 μ m) Band3(0.72-0.80 μ m) Band4(0.80-1.10 μ m)

表3-2 各カテゴリーの存在面積の構成比率

カテゴリー番号	存在面積の構成比率
1	3.7
2	7.2
3	2.7
4	2.8
5	2.9
6	3.1
7	12.4
8	3.4
9	0.8
10	2.1
11	0.1
12	0.8
13	17.7
14	5.6
15	10.2
16	24.5

表3-3 土地被覆のカテゴリー設定

カテゴリー番号	大分類	細分類
1	屋 根	瓦屋根 (赤・黄系)
2		瓦屋根 (青・緑系)
3		瓦屋根 (灰)
4		瓦屋根 (白)
5		瓦屋根 (黒)
6		瓦屋根 (陰)
7		モルタル・ アスファルト屋根
8	み ど り	芝 生
9		草 地
10		樹 木
11		樹 木 (陰)
12		コンクリート舗装
13		アスファルト舗装
14		土 砂
15		水 面
16		影 面

解析には、ピュアピクセル比率や分類精度の検討に用いる土地被覆地図画像、および、土地被覆自動分類に用いる分解能のみ異なるマルチスペクトル画像が必要となる。空間分解能の異なるリモートセンシング画像を同時に観測することは不可能に近いいため、ここでは高分解能の原画像から低分解能のシミュレーション画像を作成した⁸⁾。これらの画像においては瞬時視野の感度特性などは考慮されていないが、観測高度の違いに起因する大気による吸収・散乱の影響の違い、および、幾何補正誤差が含まれないため、空間分解能についてのみの相違から、検討を行うことができると考えられる。観測により得られた航空機MESSR画像を原画像として、これらの画像を分類対象とする土地被覆カテゴリーを(2)項において設定したうえで、(3)項から示す方法で作成する。

(2) 土地被覆カテゴリーの設定

まず、都市環境の評価に必要な土地被覆について、都市を構成する基本要素のカテゴリーを設定した。さらに、解析に用いたマルチスペクトル画像の感度波長帯における分光反射率を考慮し、各カテゴリーの画素値の分布が正規分布に近くなるように細分類を行い、本解析対象地区の分類に妥当と考えられるカテゴリーを設定した(表3-3)。

この細分類のカテゴリー設定は、ヒストグラムを求める事により画素値の分布の正規性を検討しながら試行錯誤的に行った。各カテゴリーのヒストグラムの例を波長別に図3-1～図3-3に示す。

アスファルト舗装及び樹木は、最も正規性のよいカテゴリーの一つである。このように正規性の良いカテゴリーとしては他に、瓦屋根(赤・黄系, 青・緑系, 黒, 陰), 芝生, 樹木(陰), 土砂等を設定できた。これらに比して、コンクリート舗装は正規性が最も乏しいものである。このようなカテゴリーとして、瓦屋根(灰, 白), モルタル・アスファルト屋根, 草地がある。しかし、これらのカテゴリーは正規性は弱いものの、同図に示すように空間分解能を下げても、最大頻度を示す山が複数個存在しないため、これ以上の細分類は行わなかった。

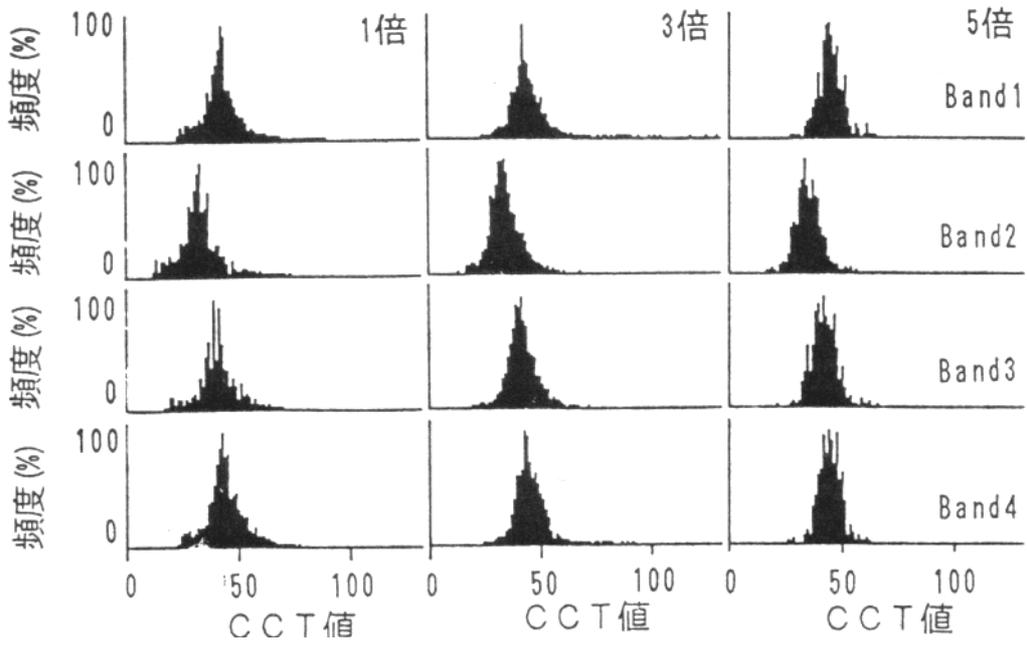


図3-1 分解能及びバンド毎のアスファルトのヒストグラム

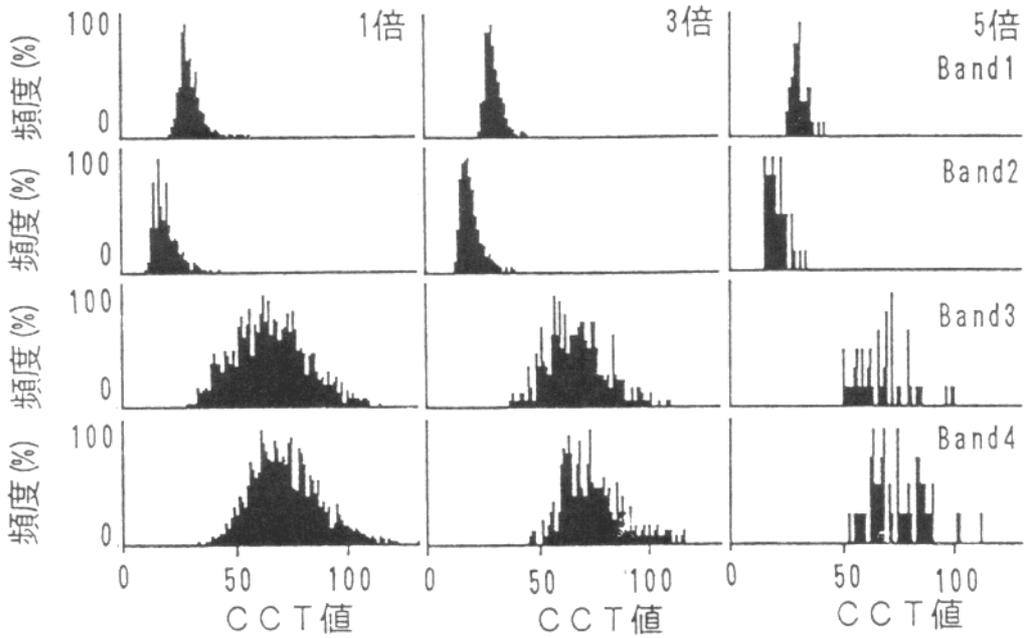


図3-2 分解能及びバンド毎の樹木のヒストグラム

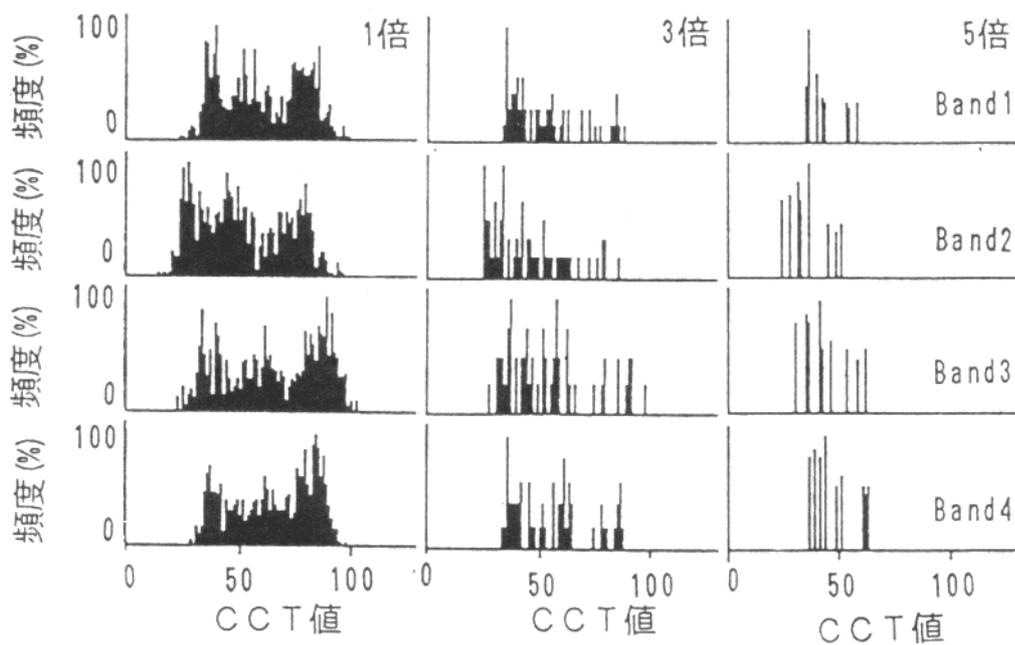


図3-3 分解能及びバンド毎のコンクリートのヒストグラム

(3) 土地被覆画像の作成

第一段階として、対象地区の航空機 MESSR 画像をフォールスカラー表示し、全画素を目視判読により、16 カテゴリーの土地被覆に分類した。目視判読する場合のフォールスカラー画像の各色へのバンドの割当方の影響については、三輪ら⁹⁾による LANDSAT-4, 5 号に搭載された TM(Thematic Mapper)のデータを用いた場合の研究がある。この研究によると、(R:G:B)に (5:4:3), または、(4:5:3)を割り当てた場合の判読結果が優れているとしている。本解析に用いた MESSR 画像の波長帯は、LANDSAT-TM データの観測波長帯と完全には対応していないが、上記の解析結果を利用できる範囲の違いであると考えられる。

表 3-4 に、LANDSAT-TM データと、MESSR データの観測波長帯域の対応を示す。また、航空機 MESSR 画像に比べて、大気透過距離の大きいランドサット画像では、大気による散乱の影響が大きく出ていることを考慮して、上記の割当よりも1バンド短い波長のバンドを割り当てた。

以上より、フォールスカラー表示のバンド割当は、R:G:B=2:3:1 とした。図 3-4 に解析対象地区のフォールスカラー画像を示す。

表3-4 フォールスカラー表示に利用する
各センサーの観測波長帯の比較

	MESSR			TM		
R	Band1	0.51～ 0.59 μ m	可視緑	Band3	0.63～ 0.69 μ m	可視赤
G	Band2	0.61～ 0.69 μ m	可視赤	Band4	0.76～ 0.90 μ m	近赤外
B	Band4	0.80～ 1.10 μ m	近赤外	Band5	1.55～ 1.75 μ m	近赤外

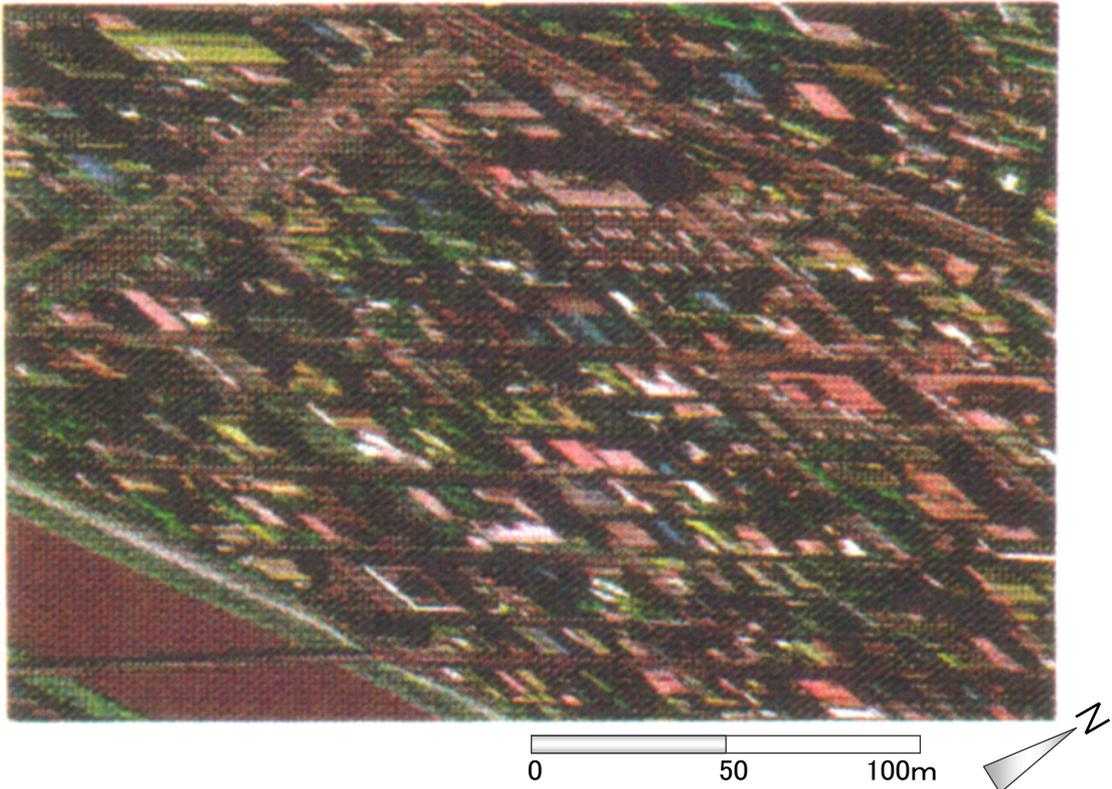


図3-4 解析対象地区の航空機搭載 MESSR データのフォールスカラー画像
(空間分解能 38cm, R:Band2, G:Band3, B:Band1)

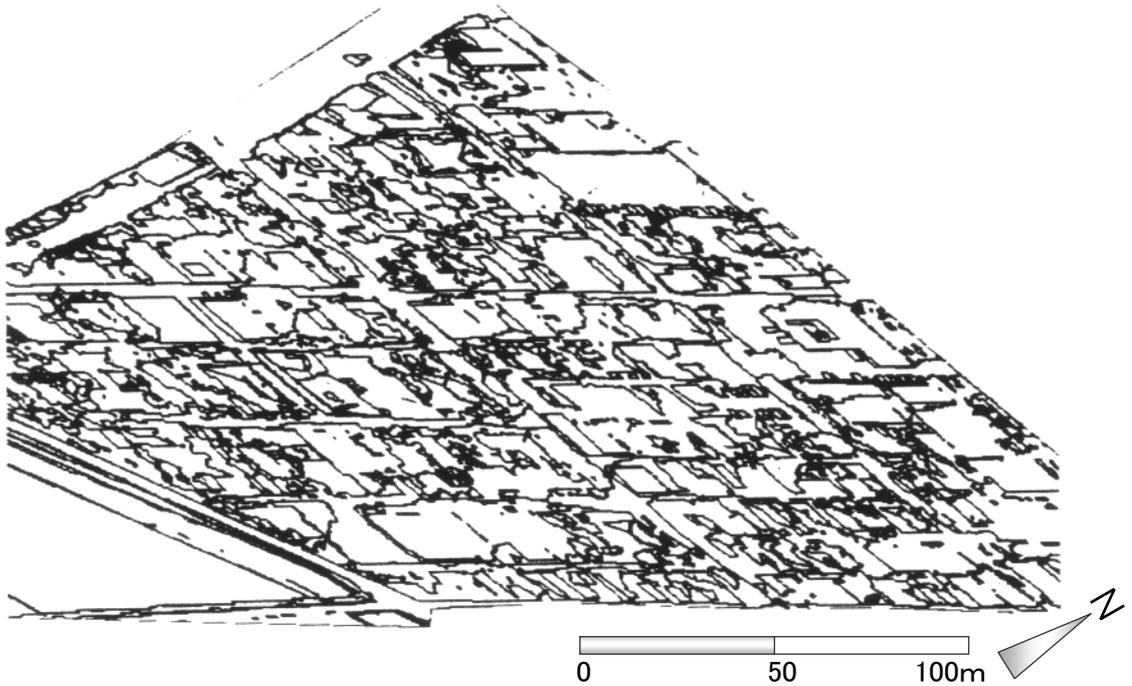


図3-5 土地被覆の境界部分2画素を抽出した画像
(空間分解能 38cm)

なお、38cm と高分解能の画像であっても、各カテゴリーの境界部分には、ミクセルが存在する確率が非常に高い。このため、第2段階として、土地被覆の境界部分の両側1画素を、原画像においてミクセルである可能性が大きいため、ピュアピクセルを対象とした解析から除く画素として抽出した(図 3-5)。このとき抽出された画素は、全画素の約31%である。

これらの画素以外の、各カテゴリーに分類されたピュアピクセルで構成されている画像を、土地被覆画像(図 3-6)として以下の解析に用いる。

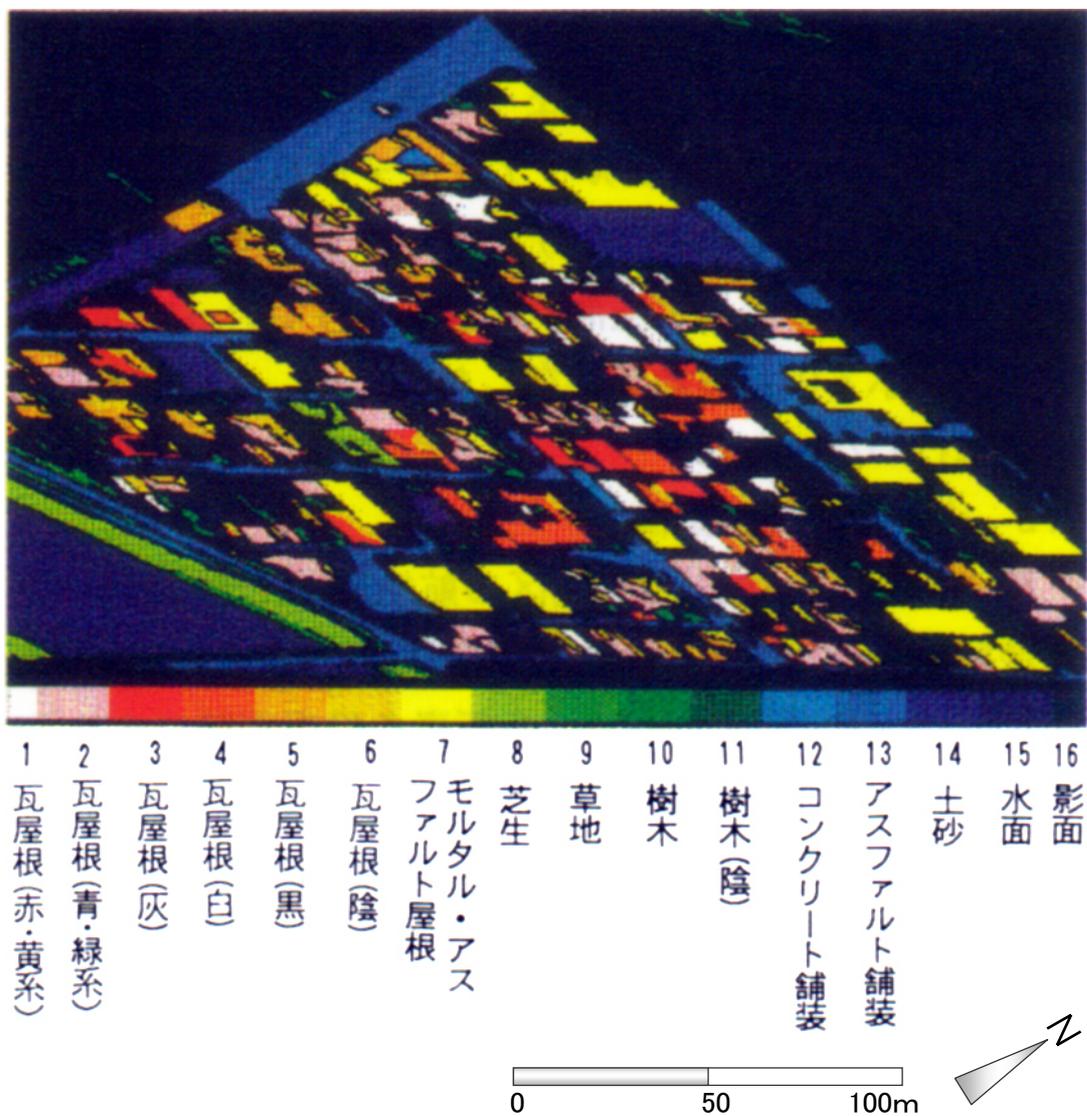


図3-6 土地被覆画像

(空間分解能 38cm, 数字は表 3-3 のカテゴリー番号に対応)

(4) 空間分解能の異なるシミュレーション画像

空間分解能の異なる画像の作成は、高分解能の原画像に $n \times n$ 画素のウィンドウを用い、ウィンドウ内の画素の相加平均値で置き換える方法⁸⁾を採用した。このようにして作成された画像をn倍画像と呼ぶ。シミュレーション画像の作成は2倍から5倍画像まで行い、空間分解能は 0.76m, 1.14m, 1.52m, 1.9m に相当する。画像の様相が空間分解能の低下とともに変化することを対象地区の2, 4倍画像の合成画像により図 3-7, 図 3-8 に示す。

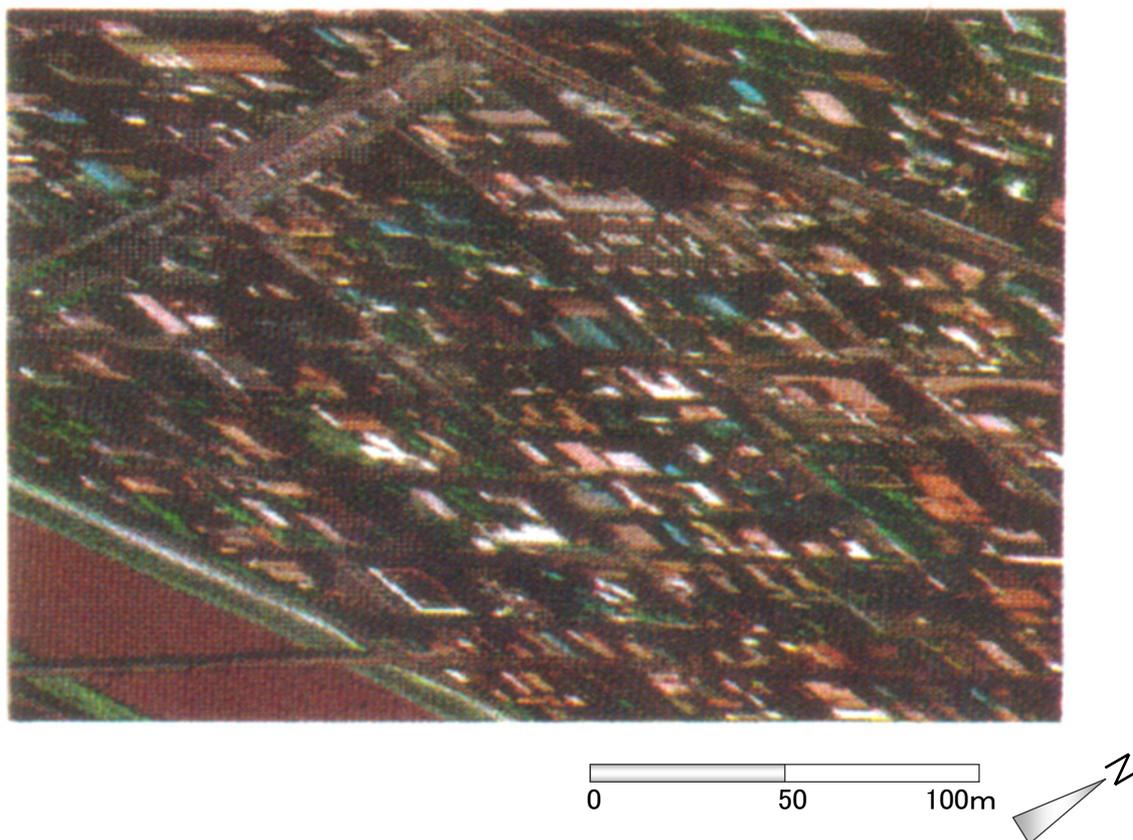


図3-7 シミュレーションデータのフォールスカラー画像
(2倍画像:空間分解能 76cm, R:Band2, G:Band3, B:Band1)

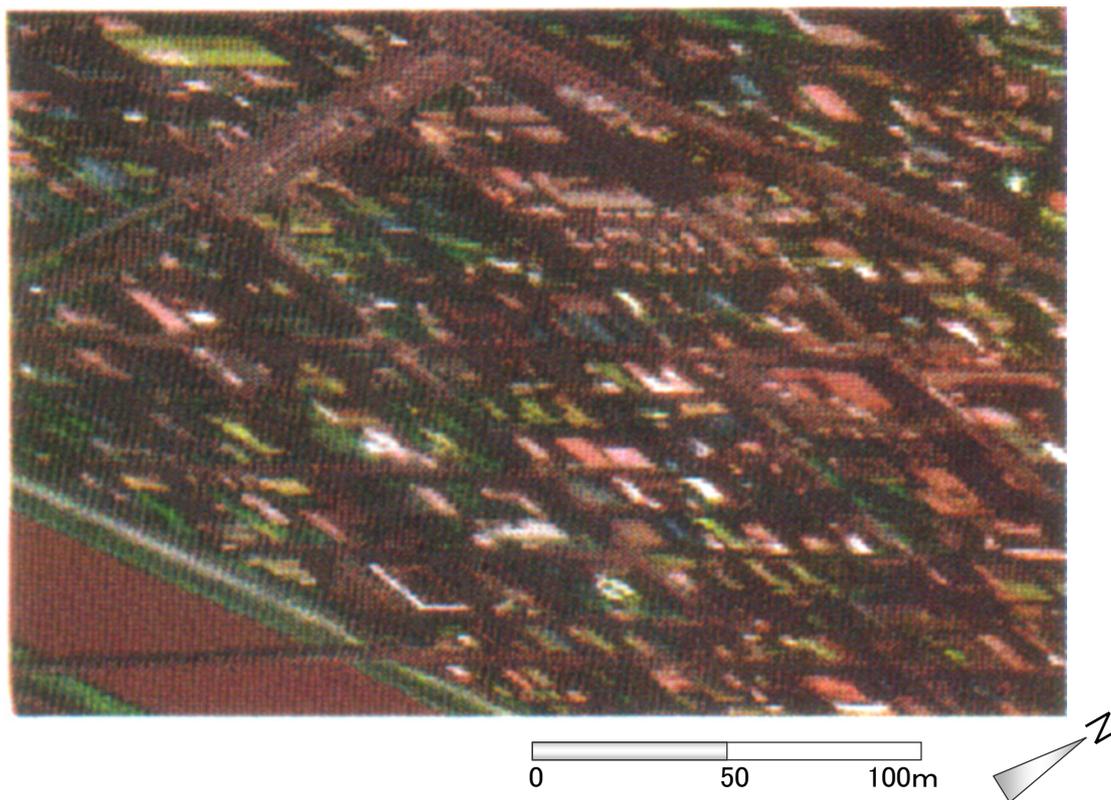


図3-8 シミュレーションデータのフォールスカラー画像
(4倍画像:空間分解能 1.52m, R:Band2, G:Band3, B:Band1)

3-3 ピュアピクセルの比率と空間分解能との関係

3-3-1 ピュアピクセルとミクセルの判別

ミクセルとピュアピクセルの判定は、土地被覆地図画像に $n \times n$ のウィンドウをかけ、ウィンドウの全画素が同一のカテゴリーで構成されているか否かで行った。この操作を n が 2~5 について行い、それぞれの空間分解能の画像ごとにミクセルとピュアピクセルの比率をカテゴリー別に算出した。図 3-9 に 2 倍画像、図 3-10 に 4 倍画像のピュアピクセルの分布を示す。

さらに、従来の人工衛星で得られるデータの範囲 ($n=13, 26, 53, 79, 132$) も検討に加えた。なお、 $n=26, 53$ (空間分解能 10m, 20m) はそれぞれ SPOT・Pモード, XSモードに、 $n=79$ (同 30m) は LANDSAT・TM, $n=132$ (同 50m) は MOS-1・MESSR に対応する。

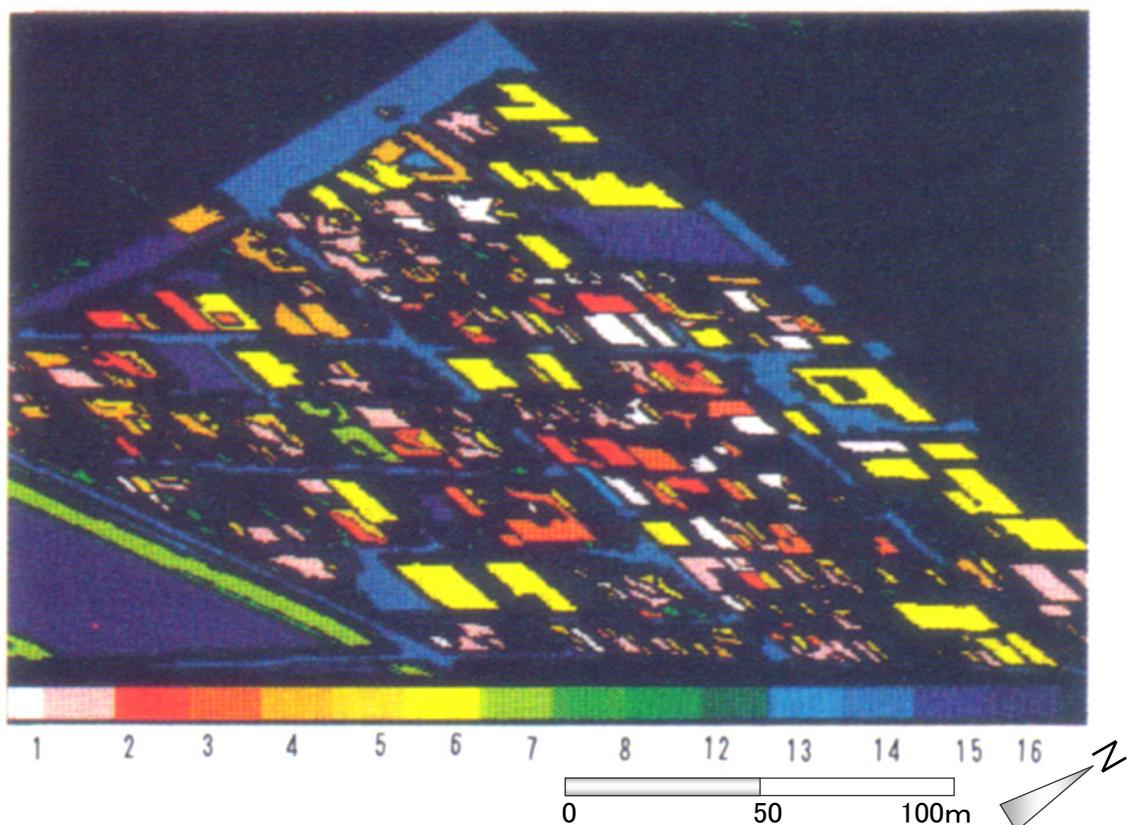


図3-9 各分解能の土地被覆画像のピュアピクセルの分布

($n=2$ の場合:空間分解能 76cm, 数字は表 3-3 のカテゴリー番号に対応)

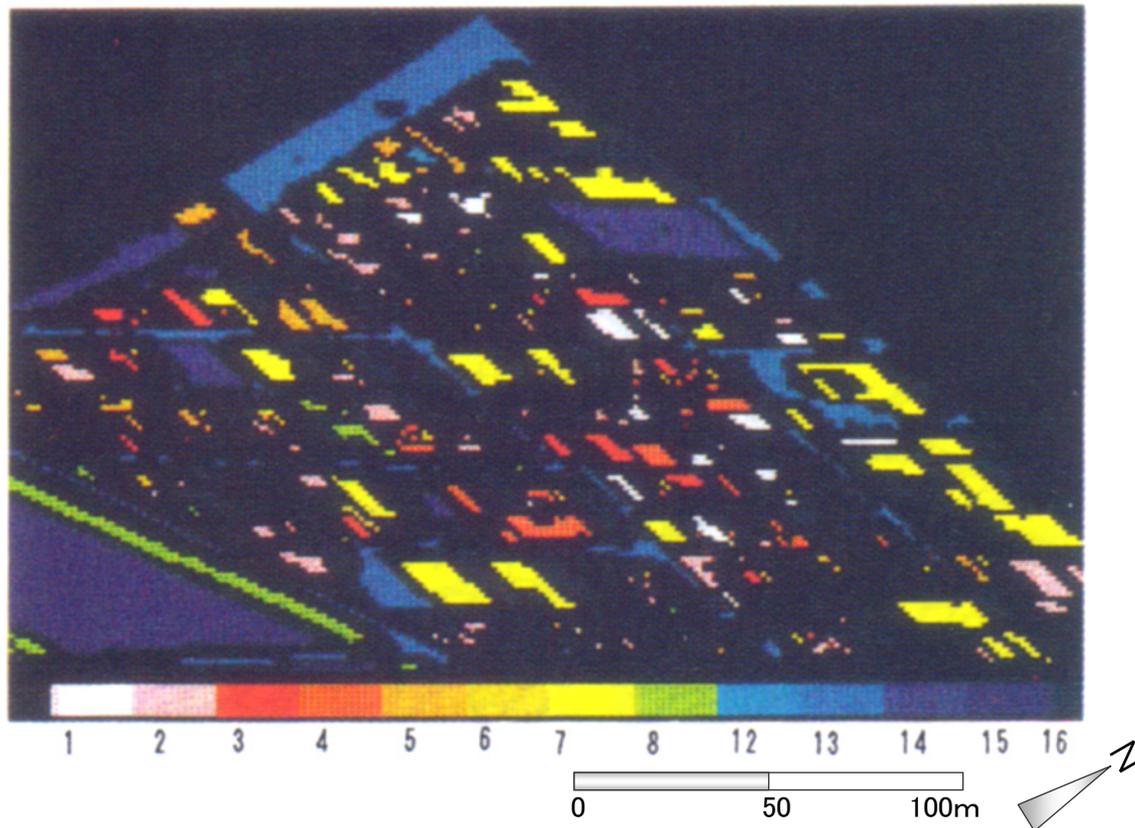


図3-10 各分解能の土地被覆画像のピュアピクセルの分布

(n=4の場合:空間分解能 1.52m, 数字は表 3-3 のカテゴリー番号に対応)

3-3-2 ピュアピクセルとミクセルの構成比率

土地被覆画像のミクセル, および, ピュアピクセルの比率と空間分解能の関係を求めたのが, 図3-11である。なお, ピュアピクセルの比率を100%から減じたものが, ミクセルの比率である。カテゴリー別にみると, 樹木(10), 樹木(陰)(11), 草地(9) は, この地域では小面積で点的に分布しているものしか存在しないため, 2倍画像でピュアピクセルは半減し, 4倍画像ではほとんどピュアピクセルは存在していない。逆に, ひとまとまりの面積が大きい水面(15)は, なだらかに減少している。その他のカテゴリーは両者の中間に分布しており, 5倍(1.9m)画像においては瓦屋根(1~5)が 40%程度, アスファルト舗装(13)・土砂(14)が 50%程度まで低下し, 13倍(約5m)画像では瓦屋根(1~5)は殆どピュアピクセルが存在しなくなり, アスファルト舗装(13)・土砂(14)でも 20%程度となっている。この結果, 全カテゴリーとしては, 2倍画像で約 65%を示すピュアピクセルは, 空間分解能の低下とともに急激に減少し, 空間分解能5m画像では, 7%程度しか存在しなくなる。

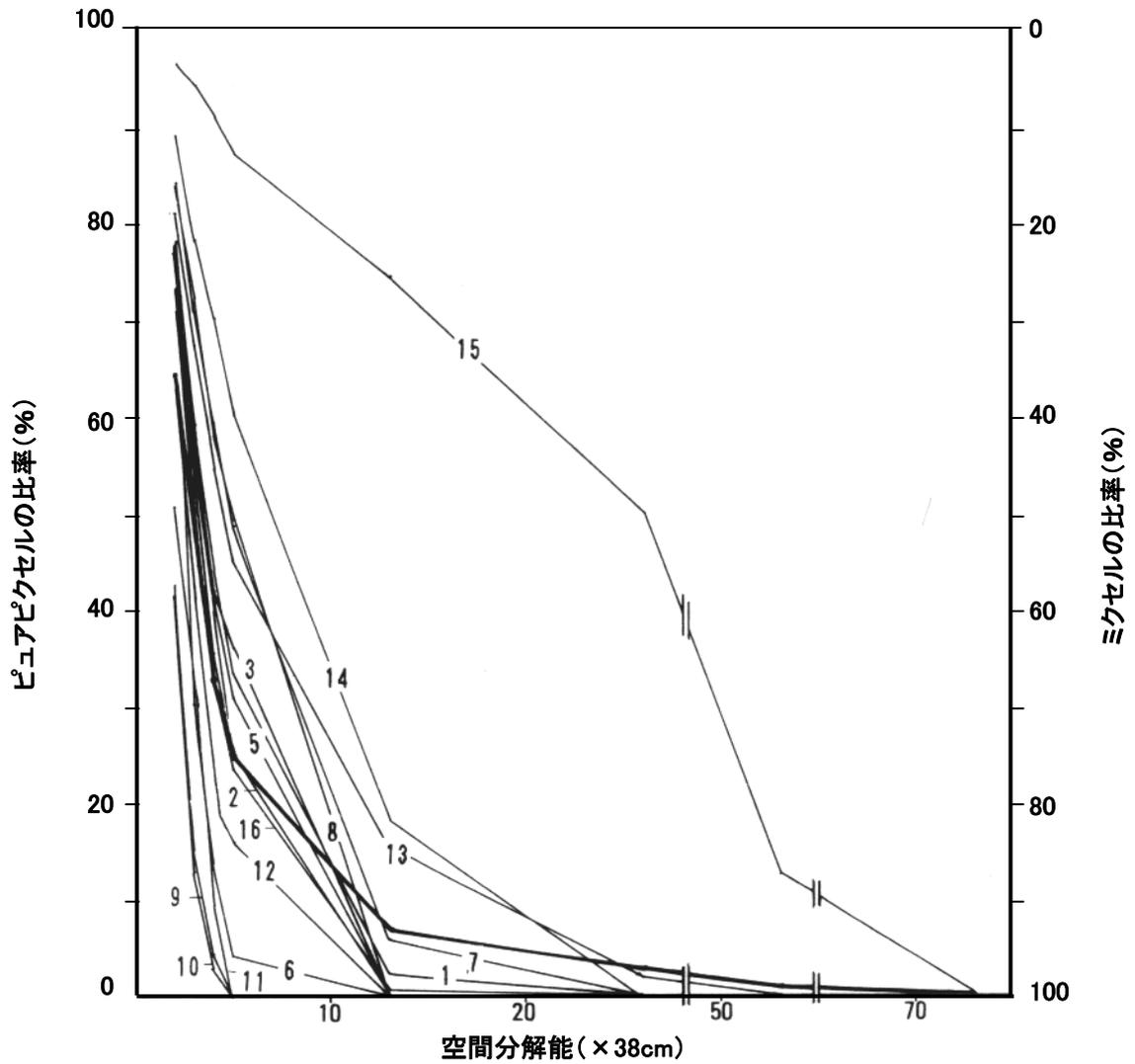


図 3-11 各カテゴリーのミクセル及びピュアピクセルの比率と空間分解能の関係
(数字は表 3-3 のカテゴリー番号に対応)

3-4 MSSデータの空間分解能と各クラスの分散との関係

3-4-1 ピュアピクセルの分散

前項で得られた結果より、13倍画像でほとんどのカテゴリーのピュアピクセルが存在しなくなるため、5倍(1.9m)画像までのピュアピクセルについて、各カテゴリーの画素値の分散を求めた。

なお、3-2(1)で行ったヒストグラムの検討において、可視域の2バンドと近赤外域の2バンドはそれぞれ同傾向の分布を示していたため、可視域と近赤外域はそれぞれの代表としてバンド2とバンド4について考察を行うこととした。

3-4-2 分散と空間分解能との関係

バンド2と4についてカテゴリー別に分散と空間分解能の関係を示したのが図3-12である。以下にそれぞれの波長域について考察する。

(a)可視域：瓦屋根(白)(4)、瓦屋根(青・緑系)(2)、モルタル・アスファルト屋根(7)、コンクリート舗装(12)は、3-2(1)で記したように、他のカテゴリーに比して、原画像における分散が大きく、空間分解能の低下とともに減少の割合も大きい。これに対して、水面(15)や影面(16)は原画像においても分散は殆ど無く、空間分解能の低下による変化も僅少である。その他のカテゴリーについては、それぞれ原画像における分散の大きさは異なるものの、空間分解能の倍率に対し約4%の傾きで緩やかに減少している。

(b)近赤外域：ほとんどのカテゴリーは可視域と同じ傾向で減少しているが、相対的な分散の大小関係は可視域と逆転しているものもある。瓦屋根(灰)(3)、アスファルト舗装(13)等は小さくなり、瓦屋根(黒)(5)、土砂(14)等は逆に大きくなっている。また、影面(16)は可視域では水面(15)と同様の傾向を示しているが、緩やかな減少傾向を示している。植物に多く含まれるクロロフィルは近赤外域で分光反射率そのものが大きいいため、草地(9)や樹木(10)は可視域に比べて原画像における分散が大きく、減少の割合も大きくなっている。

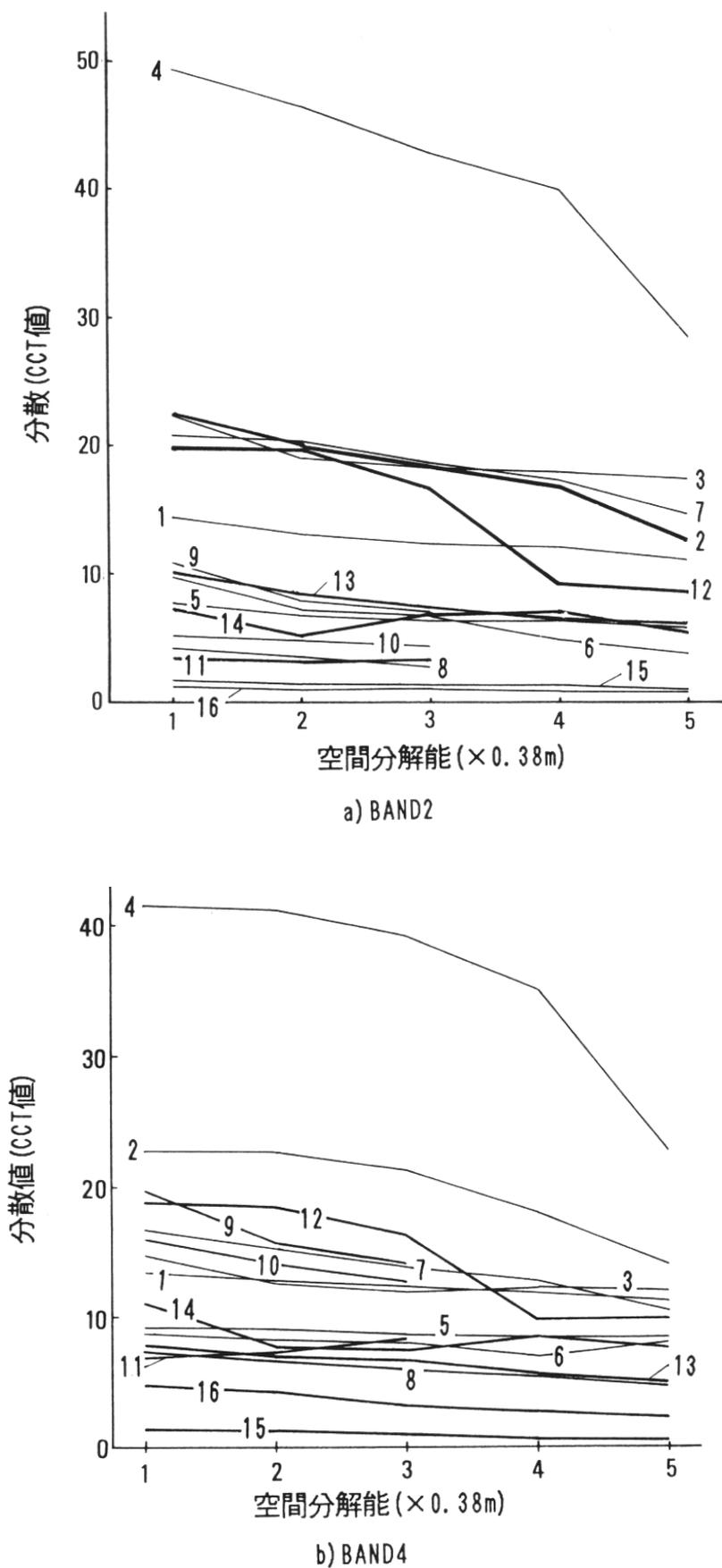


図3-12 ピュアピクセルの画素値の分散と空間分解能の関係
(数字は表 3-3 のカテゴリ番号に対応)

3-5 土地被覆分類への影響と最適分解能

3-5-1 最尤法による土地被覆分類

まず、各分解能の全ピュアピクセルをトレーニングデータとして最尤法による土地被覆分類を行なった。3-3-2 項で得られた知見から、5倍画像までを対象として、最尤法により自動分類を行い、土地被覆分類画像を作成した。このときのトレーニングデータとしては、各カテゴリーのピュアピクセル全画素を用いているため、トレーニングデータの代表性は保証されている。なお、樹木(10)、樹木(陰)(11)、草地(9)のカテゴリーは4倍画像においてピュアピクセルすなわちトレーニングデータを抽出することが出来なくなるため、最尤法による分類は行っていない。

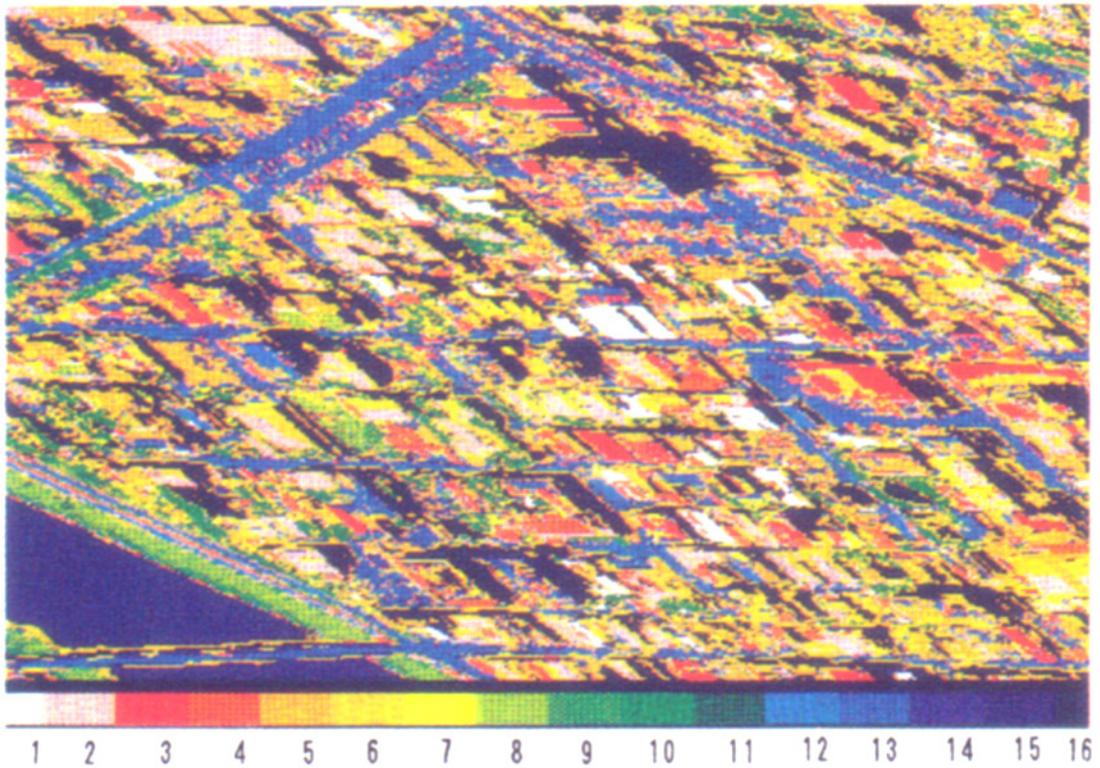
つぎに、各分解能の最尤法による自動分類で得られた土地被覆分類画像と土地被覆地図画像とを比較することにより、正しく分類された画素を抽出し、全画素に対する比率を分類精度として求めた。

また一方では、ピュアピクセルのみの分類精度を求め、全画素の分類精度と比較検討を行うことにより、分散の変化とピュアピクセル比率の変化が、分類精度に及ぼす影響を検討した。

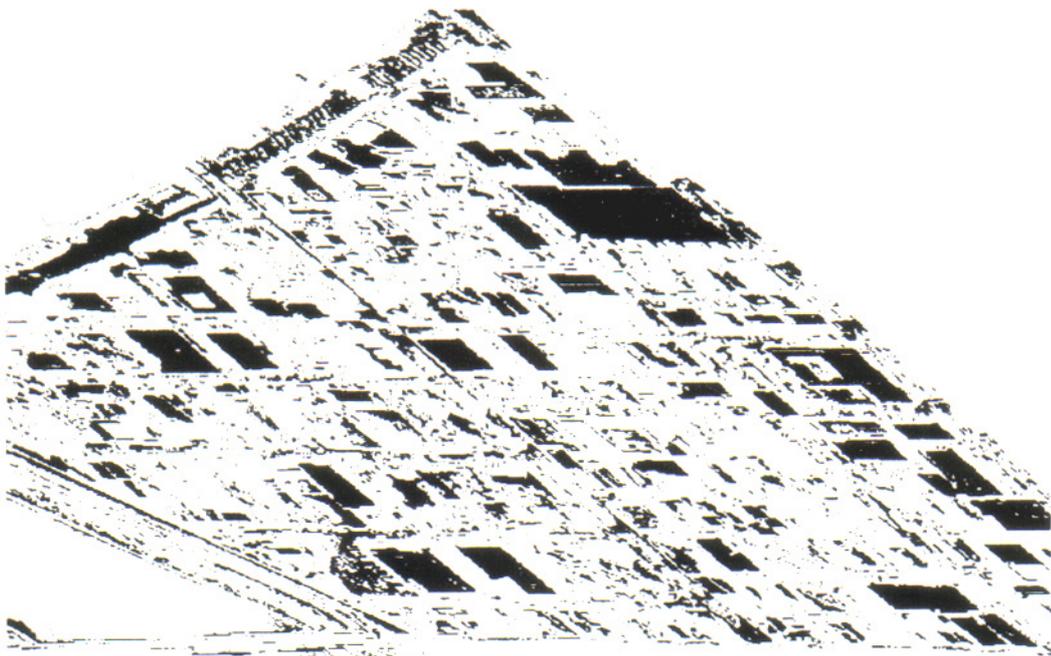
3-5-2 解析結果

(1)最尤法による土地被覆分類結果

各分解能における土地被覆分類結果を図 3-13～15 の a)に示し、誤分類された画素を抽出して黒塗りで図 3-13～15 の b)に示した。原画像を用いた土地被覆分類画像では、空間分解能が高いため細部の形状まで表現されているが、同一の土地被覆で構成されているところに異なるカテゴリーに分類された画素が点状に分布している。2倍画像では原画像に比べて点状の誤分類画素が減少しているが、細部の形状表現が行えなくなる様子がわかる。4倍画像ではよりその傾向が顕著となっている。



a) 土地被覆画像



b) 誤分類画像

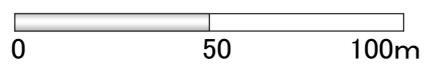
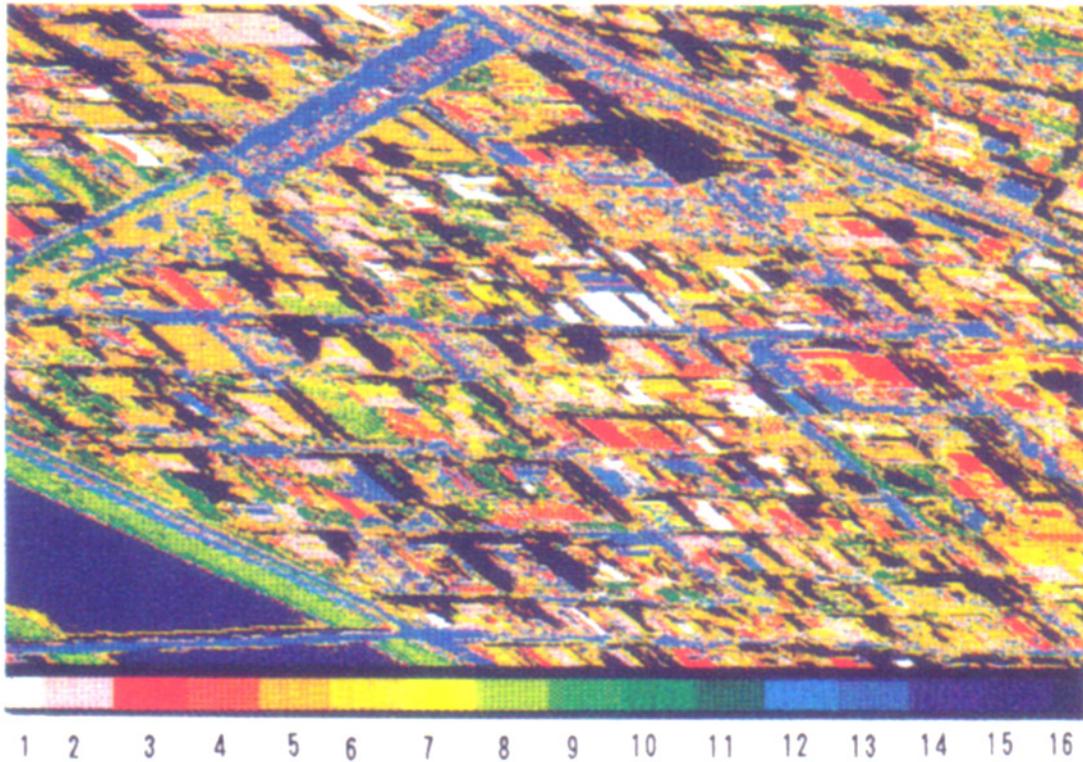
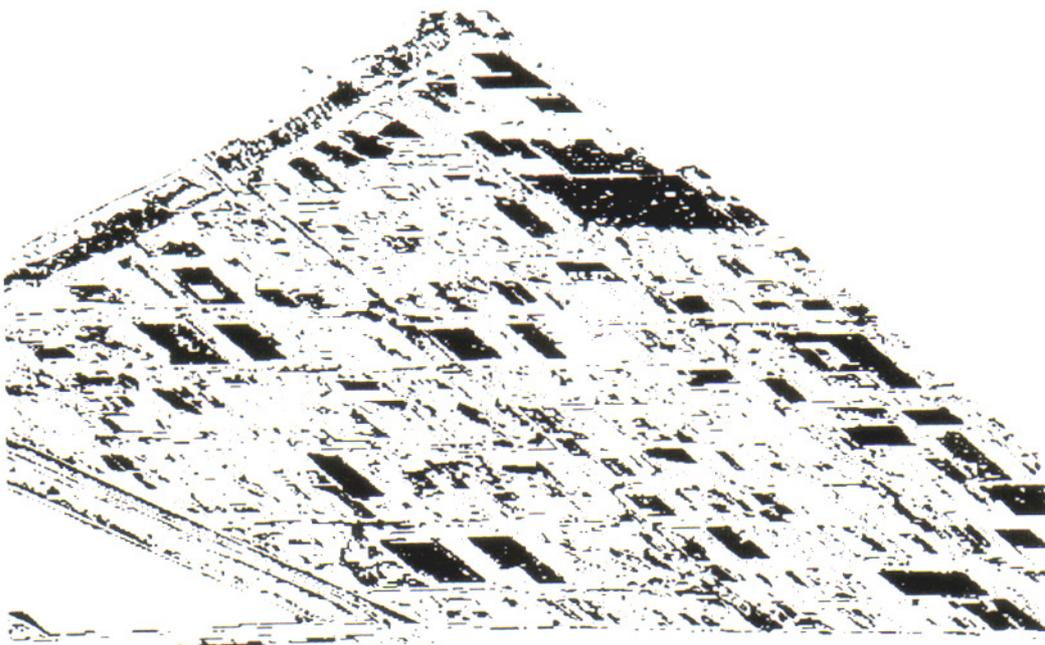


図3-13 各分解能の土地被覆分類結果画像

(n=1の場合:空間分解能 38cm, 数字は表 3-3 のカテゴリー番号に対応)



a) 土地被覆画像



b) 誤分類画像

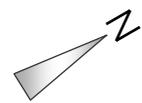
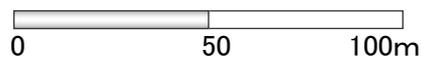
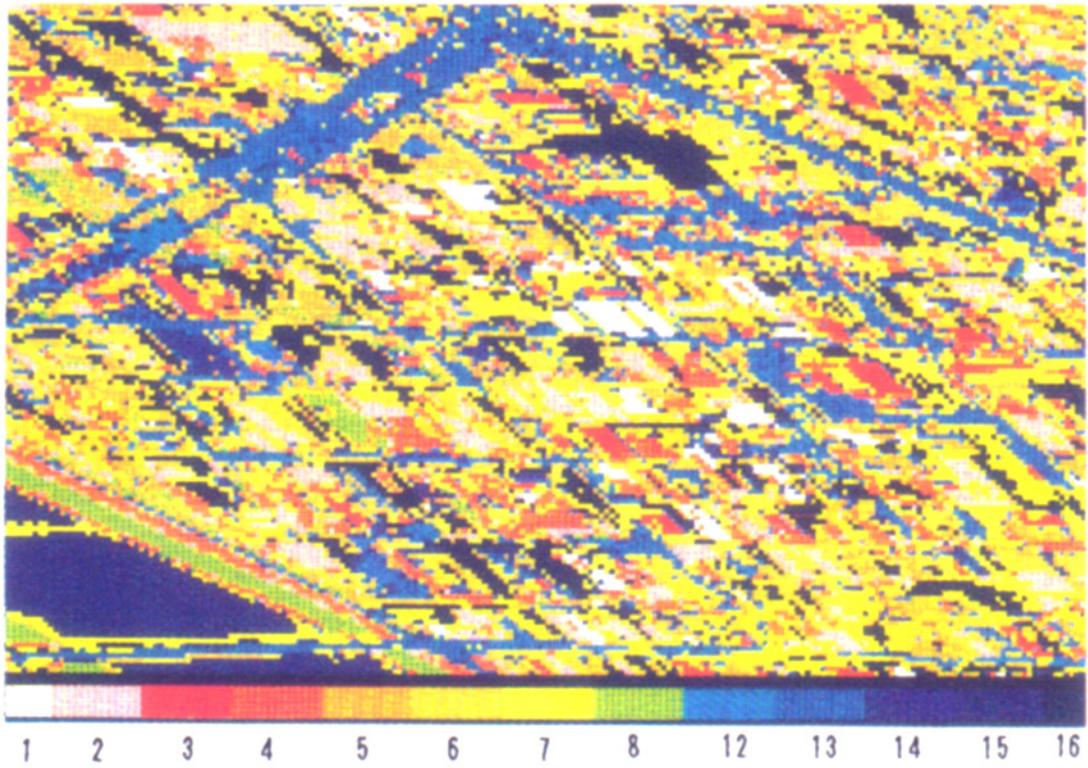
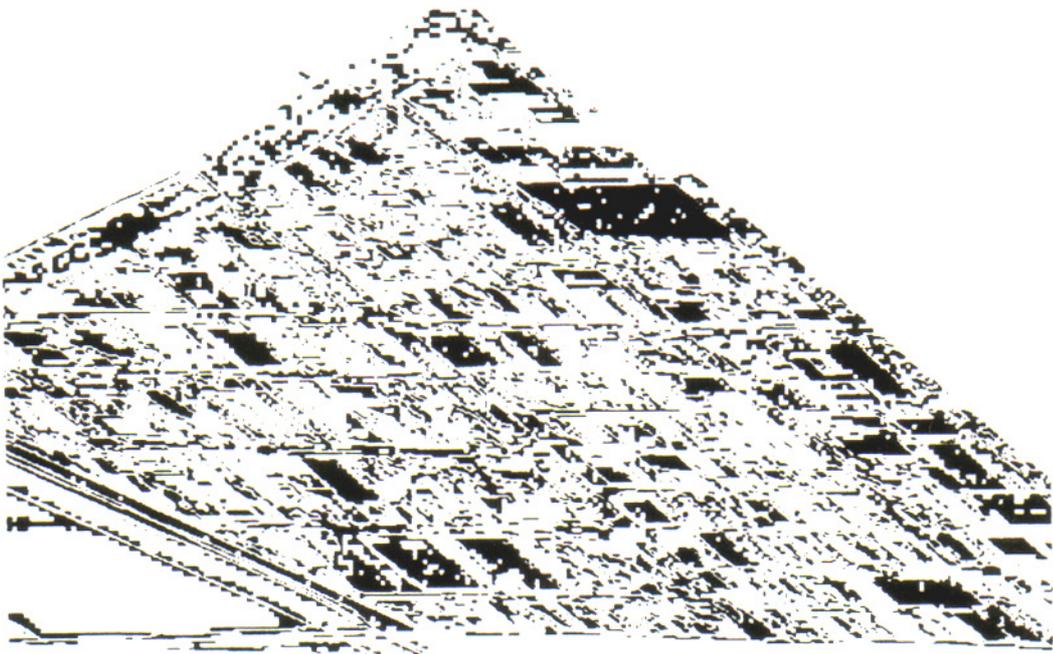


図3-14 各分解能の土地被覆分類結果画像

(n=2 の場合:空間分解能 76cm, 数字は表 3-3 のカテゴリ番号に対応)



a) 土地被覆画像



b) 誤分類画像

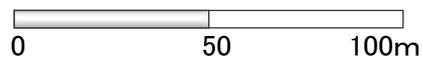


図3-15 各分解能の土地被覆分類結果画像

(n=4の場合:空間分解能 1.52m, 数字は表 3-3 のカテゴリ番号に対応)

(2)ピュアピクセルの分類精度

つぎに、ピュアピクセルのみの分類精度をカテゴリ別に検討した。図 3-16 からわかるように、ほとんどのカテゴリは空間分解能の低下に伴い分類精度が高くなる。これは、先に示した画像中の点状の誤分類画素が空間分解能の低下とともに減少していることを裏付けるものであり、分散の低下による影響と考えられるものである。瓦屋根(黒)(5)、コンクリート舗装(12)等が3倍の画像まで一度低下した後上昇しているように多少の低下傾向がみられる部分や、土砂(14)のように原画像の分類精度が著しく低いものは、カテゴリの独立性が悪い例と考えられる。このようなカテゴリについては、独立性を含めた詳細な検討が必要となるが、これに関しては今後の課題とする。

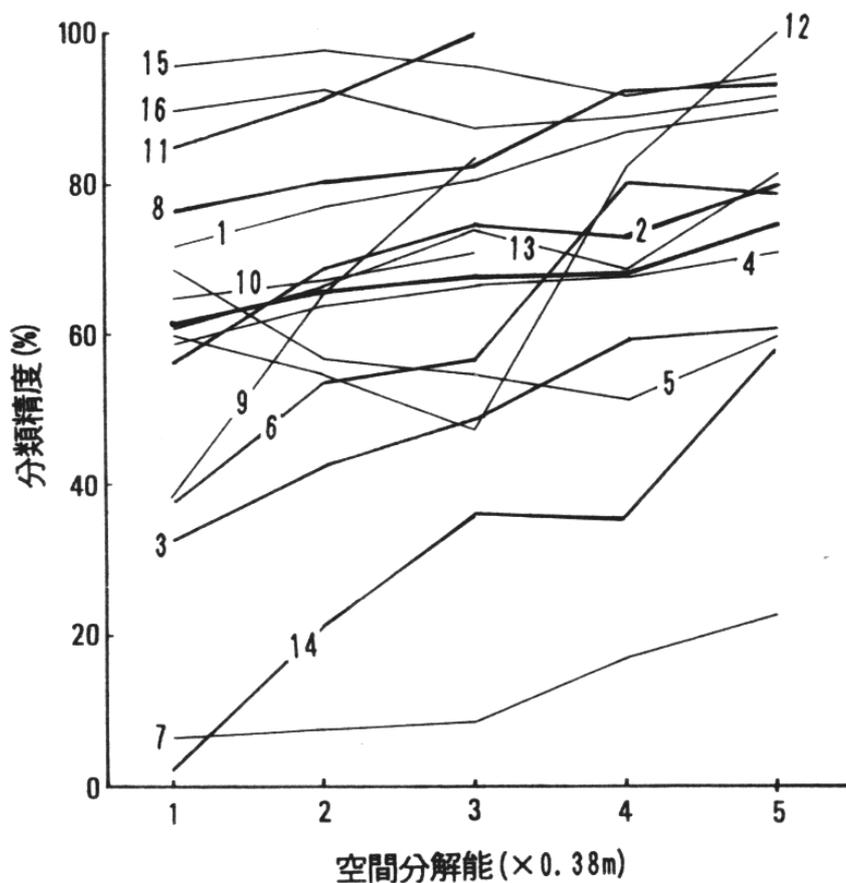


図3-16 カテゴリ毎のピュアピクセルの分類精度と空間分解能との関係
(数字は表 3-3 のカテゴリ番号に対応)

(3)全画素の分類精度

全画素についての分類精度を空間分解能別、カテゴリ別に図 3-17 に示す。樹木(10)、樹木(陰)(11)、コンクリート舗装(12)、影面(16)のように急激に低下しているものや、土砂(14)、草地(9)のように急激に上昇しているカテゴリもあるが、原画像と2倍画像の分類精度とを比較すると、やや上昇するか一定のカテゴリが多く、その後は低下しているものが多い。これは、ピュアピクセルの減少により、土地被覆分類画像において細部の形状表現が行えなくなることを説明できる。

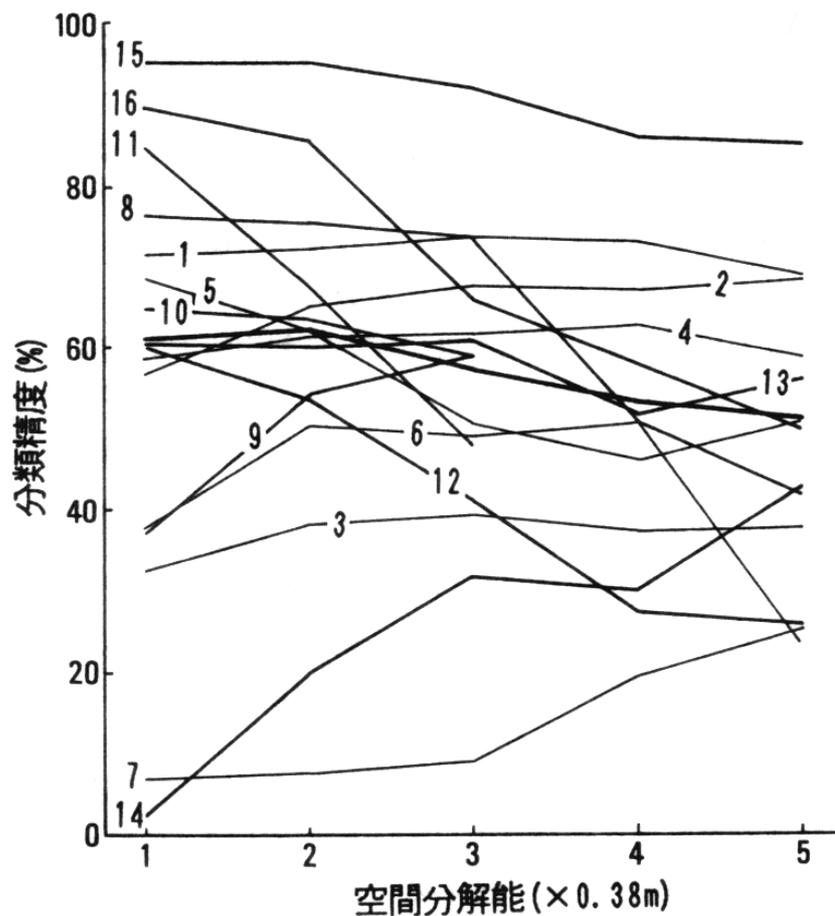


図3-17 カテゴリ毎の全画素の分類精度と空間分解能との関係
(数字は表 3-3 のカテゴリ番号に対応)

以上のことを全カテゴリーについて示したのが図 3-18 である。これより、全画素の分類精度は2倍(0.76m) の画像において最高の分類精度約 62%を示しており、対象住宅地において土地被覆分類の最適空間分解能が存在することが読み取れる。また、ピュアピクセルの分類精度は空間分解能の低下とともに向上しているにもかかわらず、全画素の分類精度は3倍画像からは低下している。このことから、建物や道路など都市を構成する単位要素をカテゴリーとした場合、1mより低い空間分解能の画像を用いた場合、図中に示すようにピュアピクセルが急激に減少するための分類精度の低下が、分散の低下による分類精度の向上よりも大きく影響していると結論付けられる。

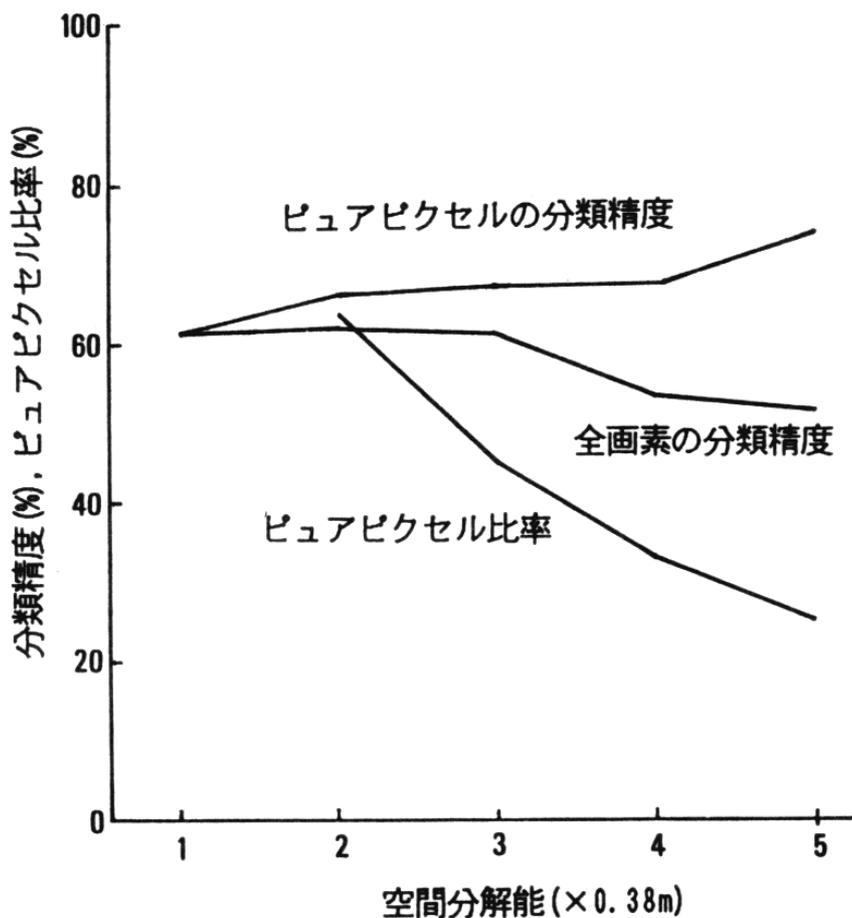


図3-18 全カテゴリーの各画素の分類精度と空間分解能との関係

3-6 ひとまとまりの面積と分類精度との関係

3-6-1 ひとまとまりの面積によるグループ分け

各土地被覆カテゴリーのひとまとまりの面積と分類精度との関係を検討する。土地被覆画像よりカテゴリー毎にひとまとまりの面積のヒストグラムと平均値求め、これより面積の最も小さい、草(9)、木(10, 11)、コンクリート(12)をグループDとした。グループAよりやや大きいものとして、木造屋根(1~5)をグループBとした。つぎに、面積の比較的大きいものとして芝生(8)、アスファルト(13)、土(14)をグループCとした。また、平均面積は小さいがヒストグラムより検討した結果、ひとまとまりの面積の大きなものが多く含まれるためRC造屋根(7)もグループCとした。最後に、ひとまとまりの面積が特に大きいものとして水面(15)をグループDとした。

3-6-2 グループ毎の分類精度と空間分解能との関係

各カテゴリー毎の分散、ピュアピクセル比率、分類精度を図3-19~図3-21に示す。また、それぞれのグループごとにピュアピクセルとミクセルの別に分類精度を図3-22~図3-25に示し、分類精度の変化の傾向を検討する。

グループDは水面だけであるが他のカテゴリー比べて特にひとまとまりの面積が大きいものであり、全画素の分類精度はピュアピクセルの分類精度と同様の傾向を示しており、分類精度は高く一定である。グループCはピュアピクセルの分類精度の影響を強く受けている点でDと同じであるが、分類精度は一定でなく上昇傾向にある。これらのグループでは、ピュアピクセル比率より分散の影響が卓越しているといえる。また、グループBの傾向としてはピュアピクセルの分類精度よりもミクセルの分類精度の影響を強く受けているが、ミクセルの分類精度がほぼ一定か上昇傾向にある。最もひとまとまりの面積の小さいグループAは、全画素の分類精度はミクセルの分類精度と同様の傾向にあり、木以外は、空間分解能の低下と共に急激に減少している。

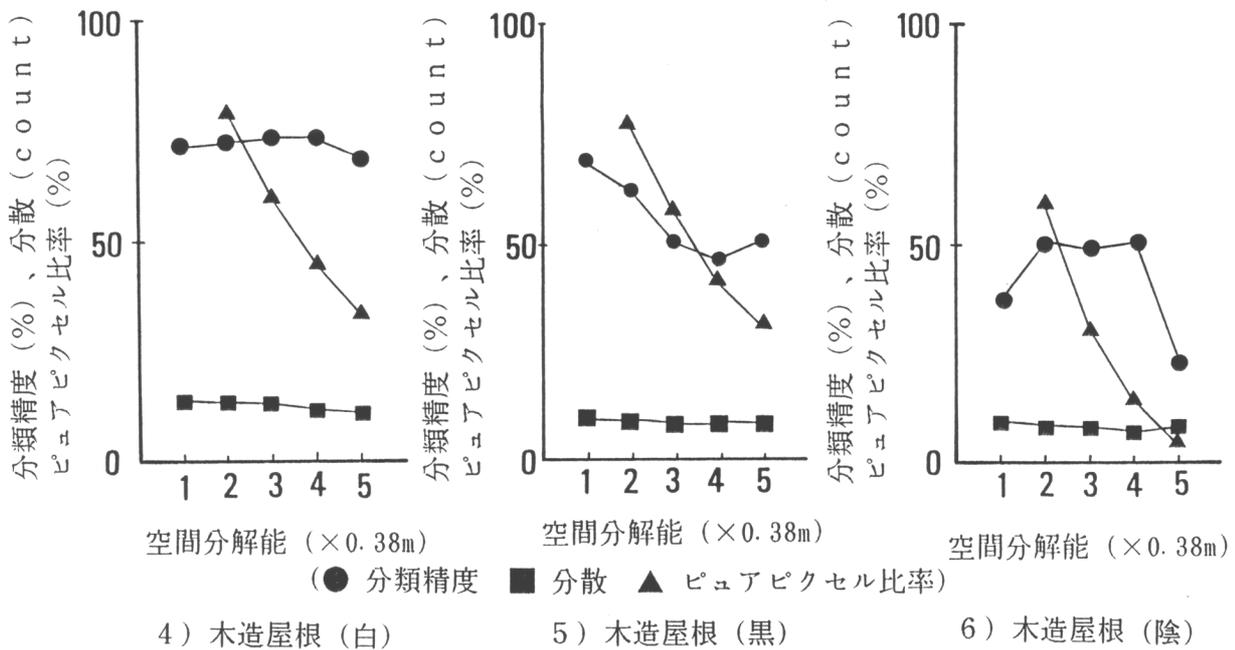
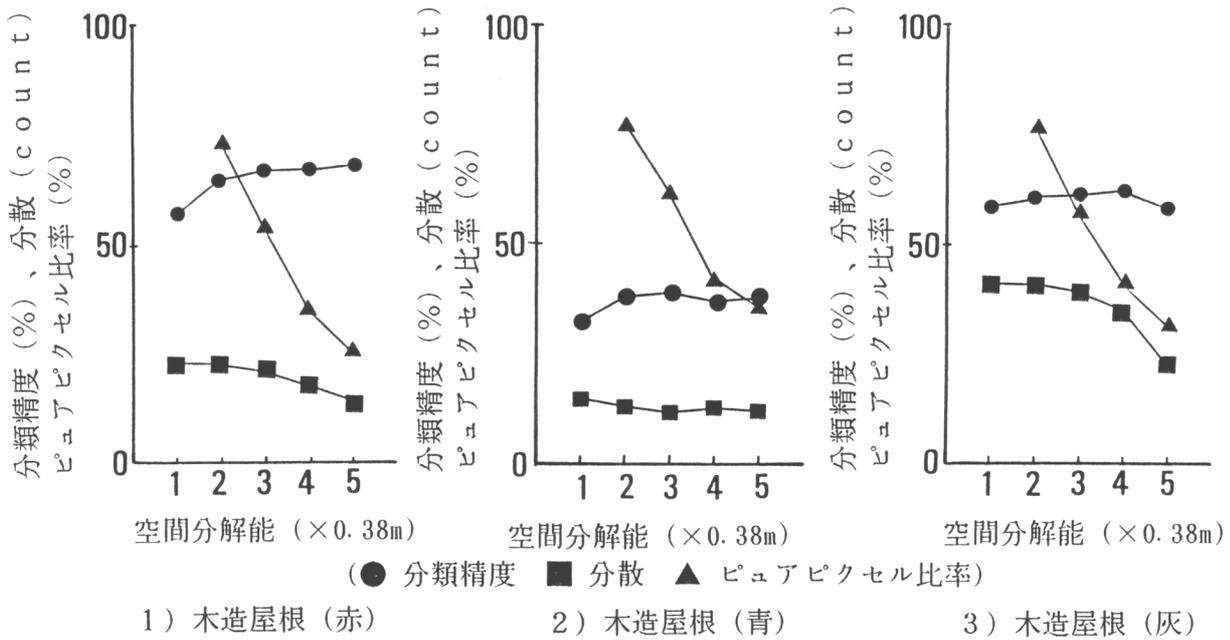


図3-19 各カテゴリーの分類精度・分散・ピュアピクセル比率と空間分解能との関係

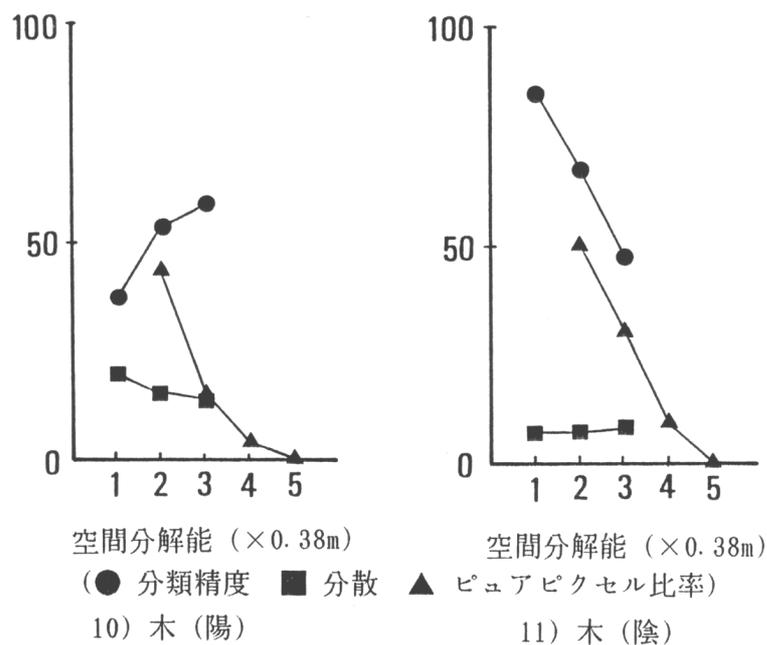
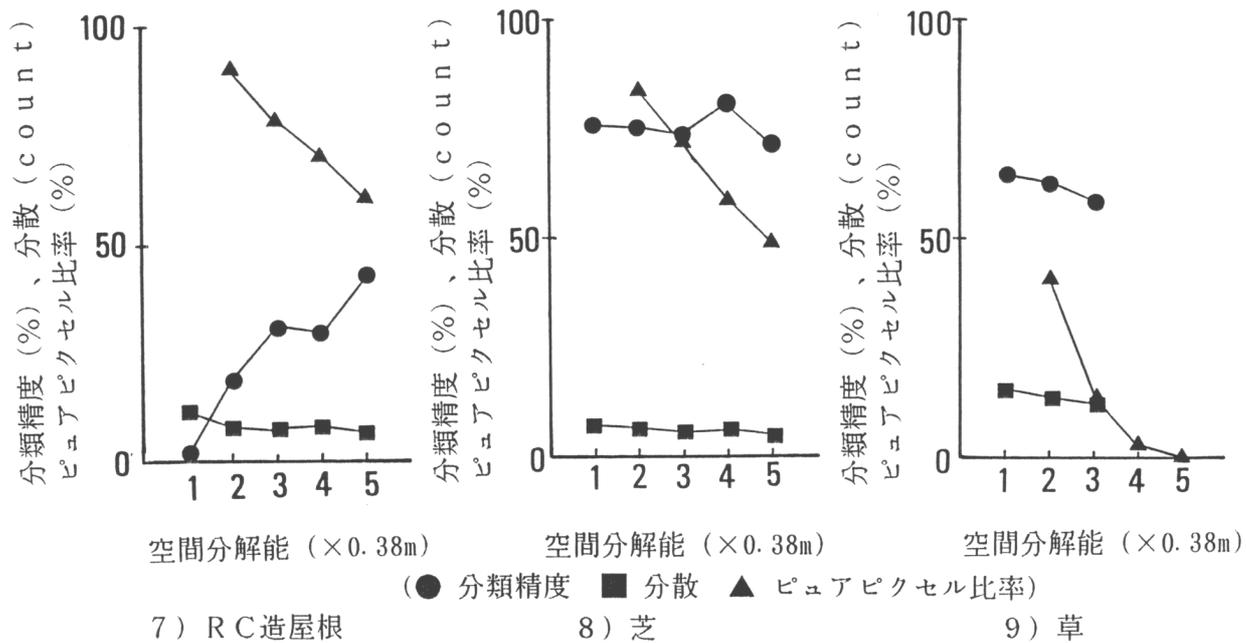


図3-20 各カテゴリーの分類精度・分散・ピュアピクセル比率と空間分解能との関係

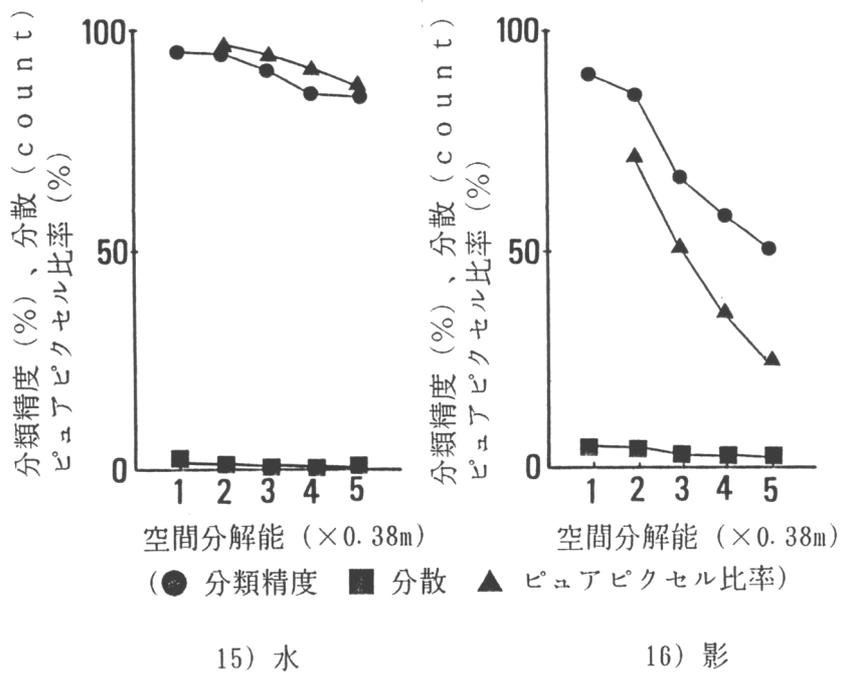
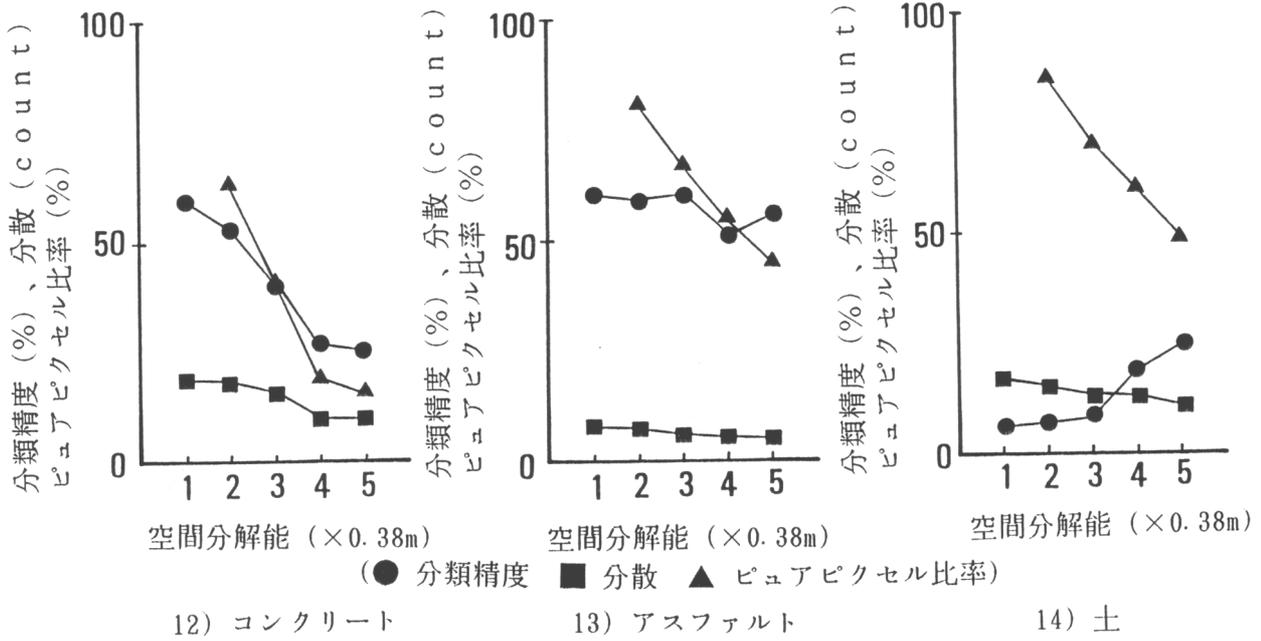
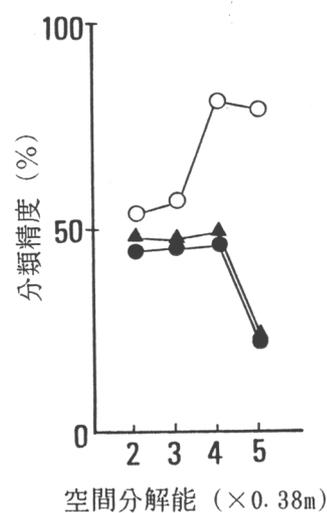
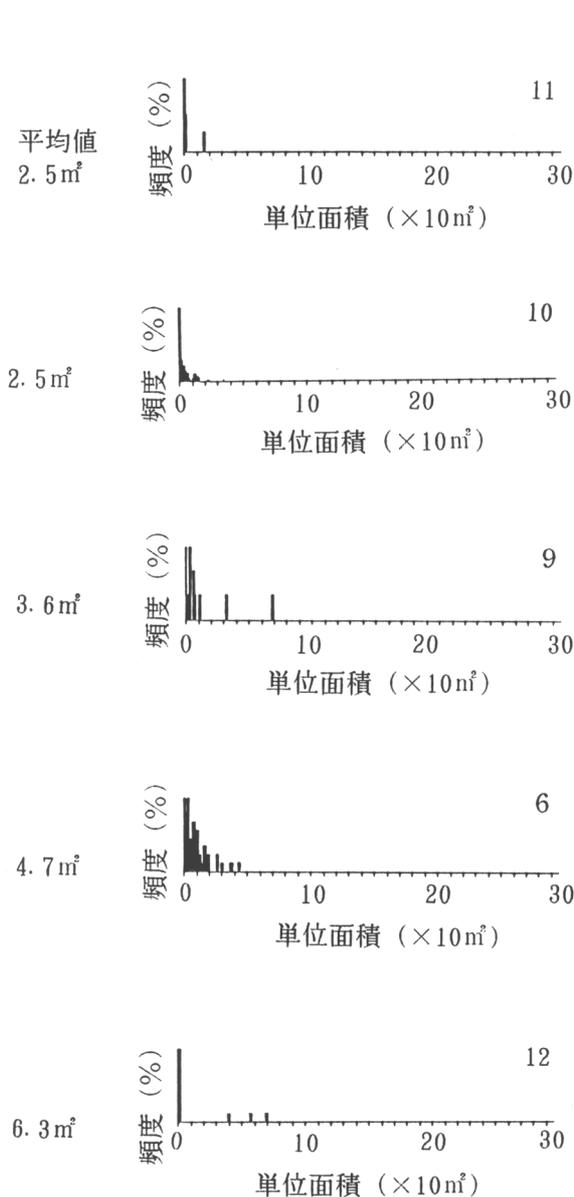
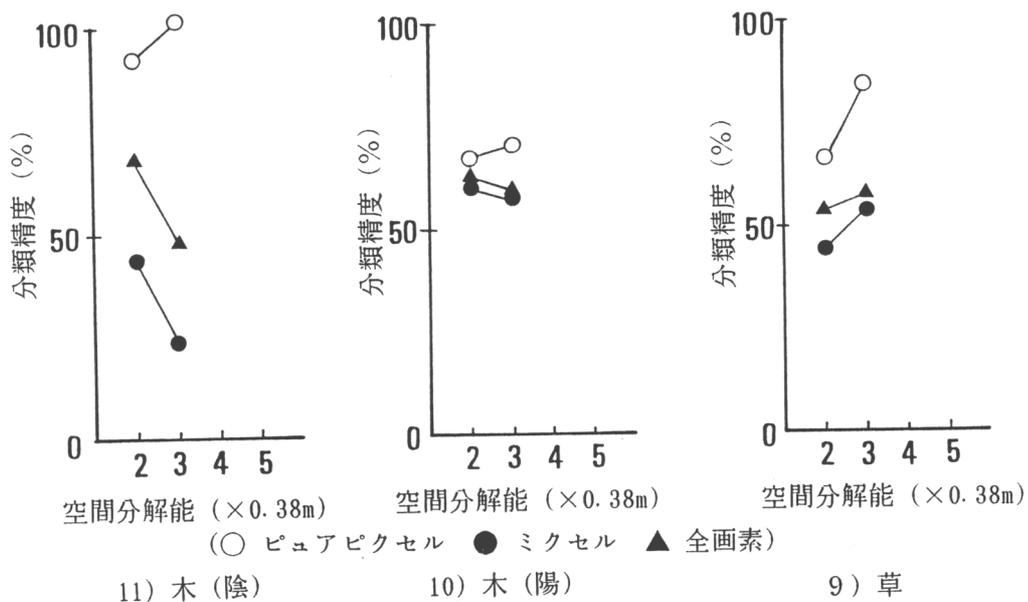
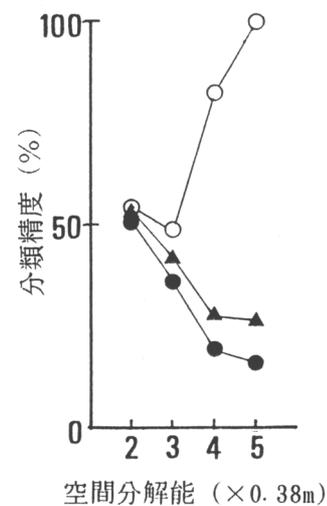


図3-21 各カテゴリーの分類精度・分散・ピュアピクセル比率と空間分解能との関係

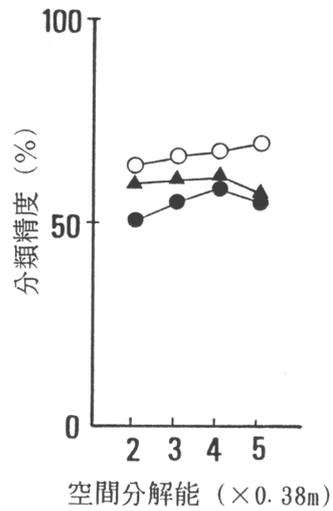
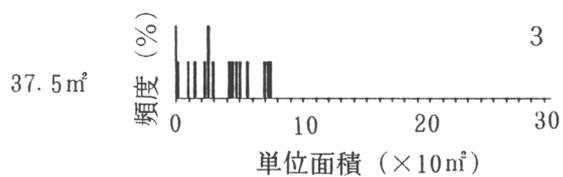
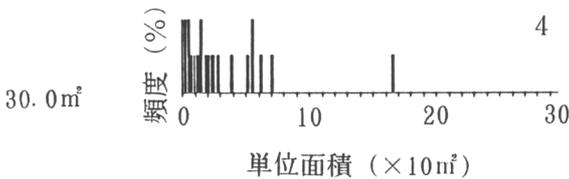
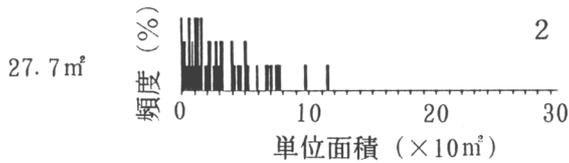
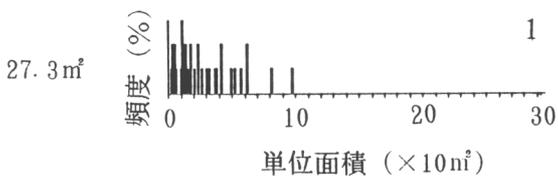
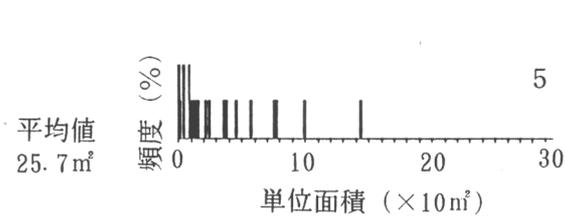
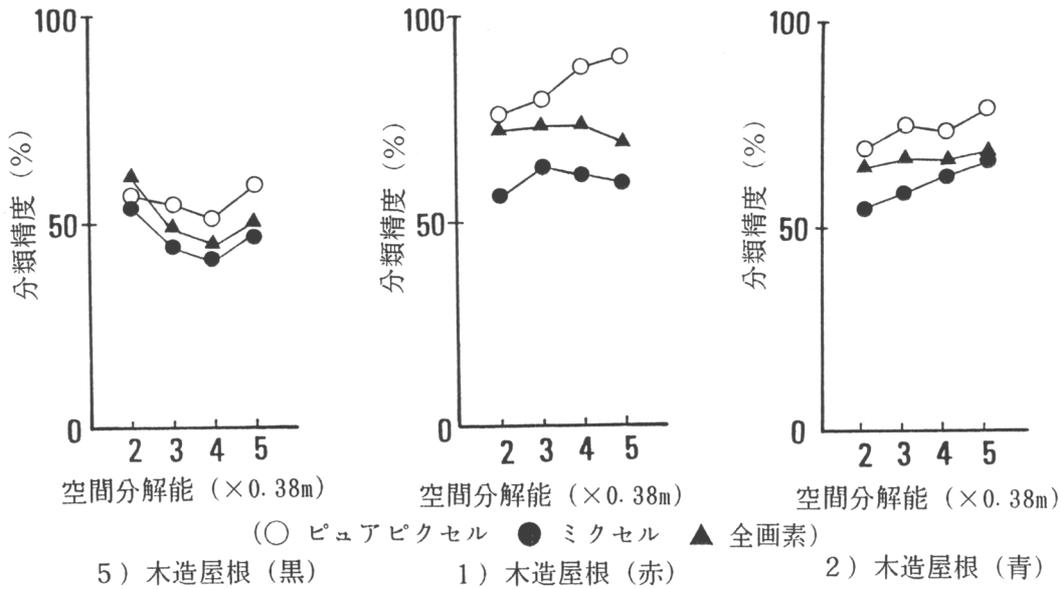


6) 木造屋根 (陰)

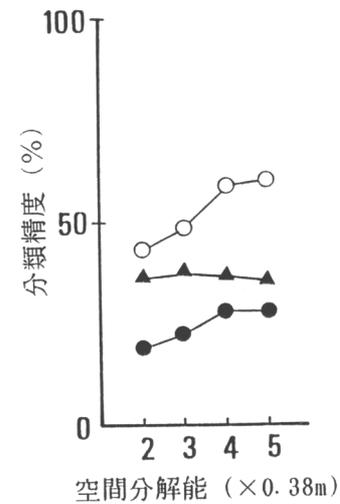


12) コンクリート

図3-22 単位要素の面積のヒストグラムと各画素の分類精度
(グループA:平均面積 10 m²以下)



4) 木造屋根 (白)



3) 木造屋根 (灰)

図3-23 単位要素の面積のヒストグラムと各画素の分類精度

(グループB: 平均面積 25 m² ~ 40 m²)

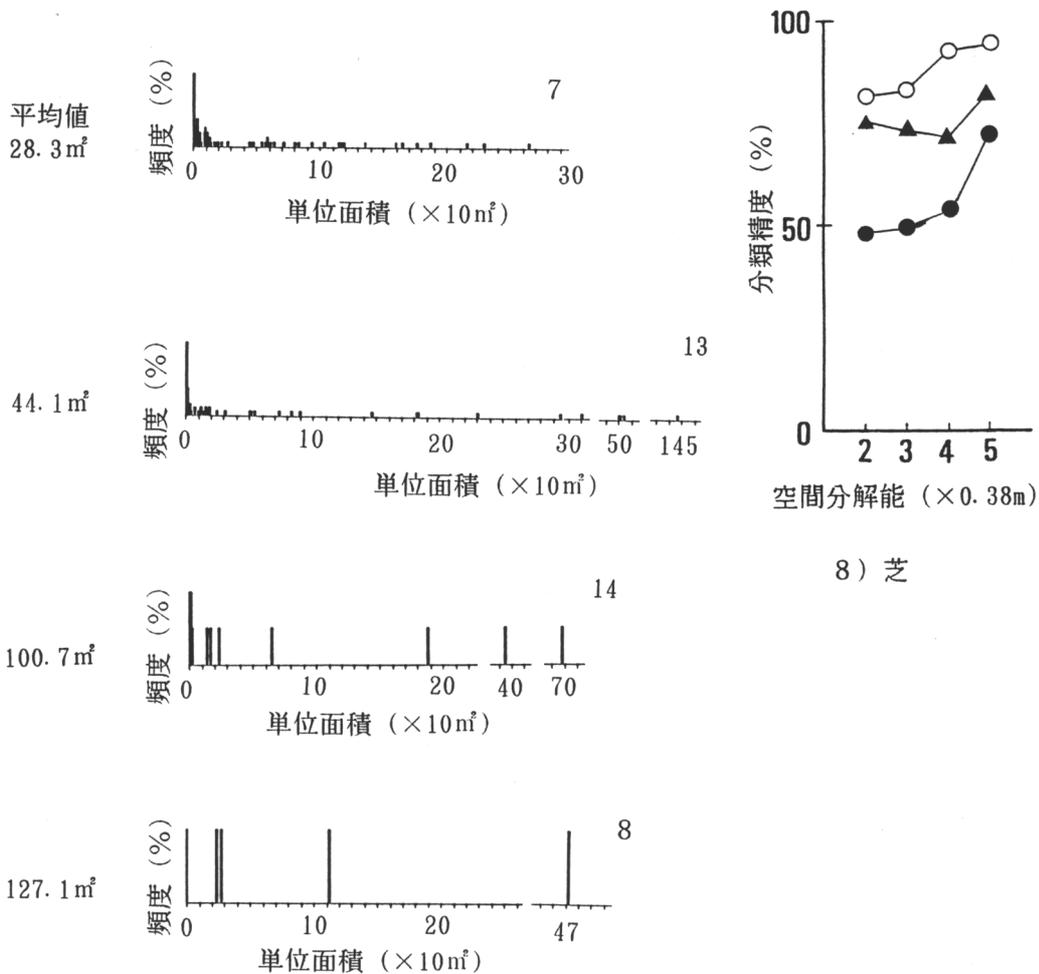
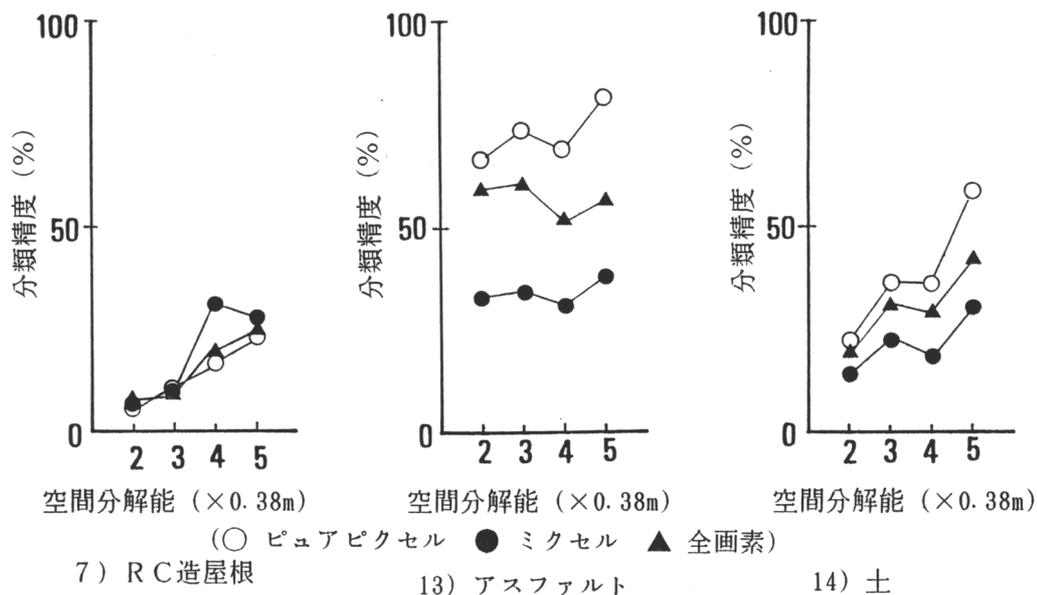


図3-24 単位要素の面積のヒストグラムと各画素の分類精度
(グループC: 平均面積 40 m²~130 m²)

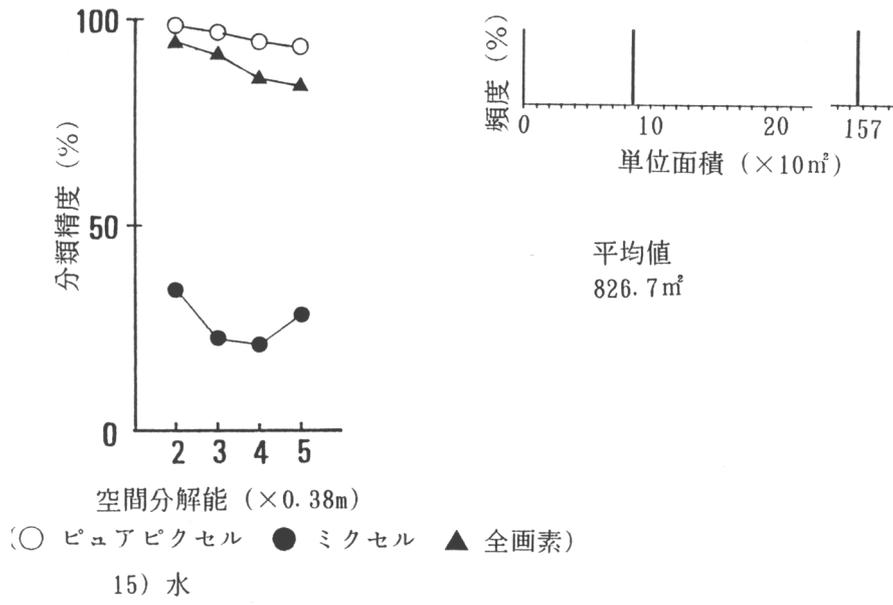


図3-25 単位要素の面積のヒストグラムと各画素の分類精度
(グループD:平均面積 800 m^2 以上)

3-7 まとめ

都市を構成する基本要素である建物、みどり等をカテゴリーとして、市街地を対象として最尤法による土地被覆分類を行う場合について、最適な空間分解能を明らかにするとともに、分類精度に影響を及ぼす要因として、各カテゴリーのピュアピクセルの比率と画素値の分散をとりあげ、その影響を考察した。以下に得られた知見を示す。

- ①全カテゴリーでは、2倍(0.76m)の画像で約65%を示すピュアピクセルは、分解能の低下にともない急激に減少し、13倍(約5m)の画像には7%程度しか存在しなくなる。カテゴリー別にみると、ひとまとまりの面積の小さい樹木や草などは、2倍の画像で半減し、4倍(1.52m)の画像で殆ど存在しなくなる。また、瓦屋根(1~5)では5倍(1.9m)で40%程度まで減少し、13倍でピュアピクセルはみられなくなる。
- ②可視域での画素値の分散は、それぞれ原画像における分散の大きさは異なるものの、空間分解能の倍率に対し約4%の傾きで緩やかに減少しているものが多い。近赤外域では可視域と分光反射率の値が異なるため、分散値が逆転しているものやみどりのように傾きが大きくなっているカテゴリーもあるが、減少の傾きについては可視域にほぼ等しい。
- ③原画像の分類精度と2倍画像のそれを比較するとやや上昇するか一定のカテゴリーが多く、2倍画像において全カテゴリーとしては最高の分類精度約62%を示しており、最適分解能が存在することを示した。すなわち、本研究で対象とした住宅地における土地被覆分類の最適空間分解能は2倍(0.76m)である。
- ④1mよりも低い空間分解能の画像では、ピュアピクセルのみの分類精度は空間分解能の低下とともに上昇するが、全画素の分類精度は逆の傾向を示し、分散の影響よりも、ピュアピクセル比率の影響を強く受けることを明らかにした。
- ⑤ひとまとまりの面積が大きいカテゴリーは、全画素の分類精度はピュアピクセルの分類精度と同様の傾向を示しており、分散の影響の方が卓越している。逆にひとまとまりの面積の小さいカテゴリーは、ピクセルの分類精度と同様の傾向にあり、ピュアピクセル比率の影響が卓越している。

以上、高分解能のリモートセンシング画像を用いることにより、従来の研究に比して都市の細部を解析するに十分な範囲で検討を行うことができたと考えられる。しかし、デ

一夕の観測波長帯が、可視域と近赤外域に限られたため、分類の精度としては比較的低い値にとどまった。今後の課題として、中間赤外域、熱赤外域のデータを加えた解析を行い、より高精度の分類結果を得ることが必要であると考えられる。

引用文献

- 1 大橋靖雄, 分類手法概論, 計測と制御, Vol.24, No.11, pp.999-1006, 1985 年
- 2 梅干野晁, 日本建築学会・環境工学分野におけるリモートセンシング研究の動向, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.8, No.2, 1988
- 3 FORSTER,B.C., 1985, An Examination of some problems and Solutions in monitoring Urban areas from satellite Platforms, International Journal of Remote Sensing, Vol.6, No.1, pp.139-151
- 4 WELCH,R., 1982, Spatial resolution requirements for urban studies, International Journal of Remote Sensing, Vol.3, No.2, pp.139-146
- 5 藤村貞夫他, マルチスペクトル画像を用いた自動識別手法の比較, 計測自動制御学会論文集, Vol.14, No.3, pp.269-276, 1978 年
- 6 MARKHAM,B.L., and TOWNSHEND,J.R.G., 1981, Land Cover Classification Accuracy as a Function of Sensor Spatial Resolution, Proceedings of the 15thInternational Symposium on Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Michigan, pp.1075-1090
- 7 新井康平, マルチスペクトル分析における最適空間分解能, 日本リモートセンシング学会誌,Vol.5,No.3, pp.199-205,1985.9
- 8 CLARK,J., 1977, LANDSAT-D Thematic Mapper Simulation Using Aircraft Multispectral Scanner Data, Proceeding of 11th International Symposium on Remote Sensing of Environment, ERIM, pp.483-491
- 9 三輪卓司他3名, ランドサットTMデータのカラー合成画像に関する検討(Ⅱ)判読におよぼすバンドの組合せと色の割当方の影響, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.8, No.2, pp.31(113)-47(129), 1988 年

第4章 画素内緑被配置推定方法の開発

4-1 はじめに

都市環境での役割が注目されている緑を対象を絞り、ひとまとまりの面積が小さいためにミクセルとして観測されることが多い市街地の緑の現況を把握するために、ミクセル内の緑被情報を抽出する方法を開発する。

都市を観測したリモートセンシングデータは、緑と緑以外の分光反射特性の差異が大きいため、画像処理による自動解析に適しており、空中写真のように人手に頼る解析を要しないという利点がある。一方で、空中写真に比して空間分解能が低いために、緑と緑以外の境界部分であるエッジのほとんどは、両者が混在したミクセルとして取得されるという欠点がある。

ミクセルを対象とした既存の解析手法によって抽出できる緑の情報は、画素内での緑の占有率である画素内緑被率に限られている^{1) -11)}。画素内緑被率を用いて緑被分布図を作成した場合、エッジの比率が高い小規模な緑の形状は不明瞭なものとなってしまふ。

熱環境や景観等の解析・評価のように小規模なものを含めた緑の分布形状が重要である場合¹²⁾、非常に高分解能のリモートセンシングデータが必要となる。現状ではこのようなデータの取得が困難であるため、画素内緑被率から画素内の緑被配置を近似する方法が求められている。

そこで本章では、緑の形状の精細化を目的として、ミクセルの画素内緑被率から画素内緑被配置を推定する方法を提案する。特に、画素内の緑被配置と近傍画素の画素内緑被率の関係に注目し、補間法及びパターンマッチング法による推定について検討を進める。

4-2 解析対象地区の緑の特徴

(1) 解析対象地区と観測データ

ここでは、前章までの住宅地から解析対象を拡大し、緑の規模や種類が多様な市街地とその周辺の広域(1km×4km)を対象とした。都市の後背地として盛んに開発が進められている川崎市宮前区である。夏季の晴天日に航空機 MSS による観測を行った。表 4-1 に航空機 MSS データの概要を示す。また、図 4-1 に解析対象地区及び比較対象地区の航空機 MSS データの合成画像を示す。なお、緑の分布形状は地区による相違が考えられる。提案手法の推定性能を比較検討する目的で、観測地域を2分割し、解析対象地区と比較解析地区とした。

解析対象地区は、緑地や公園、ゴルフ場、畑等のまとまった緑が存在するため、緑被率は 44.8%と高い。集合住宅地の庭樹や高木の街路樹など、線上に連なる特徴的な分布もみられる。比較解析地区も、グラウンド等の中規模の緑と戸建住宅地等の比較的小規模な緑を多く含んでいる。緑被率は 28.7%と解析対象地区に比較すると小さい。

(2) 緑被分布画像の作成と緑の特徴

この地区の緑の単位要素の面積の特徴を検討するため、航空機 MSS データの合成画像と同時期に撮影した空中カラー写真を参考データとして目視判読による緑被分布画像を作成する。抽出対象は合成画像において短辺が3画素以上の緑とし、境界部分のミクセルと思われる画素もいずれかに分類した。また、参考のため、緑を樹木と草地・芝地に細分類した。図 4-2 に解析対象地区及び比較解析地区の緑被分布画像を示す。

表4-1 航空機MSSデータの概要

観測地区	神奈川県川崎市菅生: 1km × 2km × 2 地区	
中心座標	東経 139° 33′ , 北緯 35° 35′	
観測日時	1987 年8月9日, 13:50 前後	
太陽位置	高度 55° , 方位角 65°	
空間分解能	1.9m(直下): 500 画素 × 1,000 画素 × 2 地区	
観測波長帯	可視域	0.45-0.49, 0.53-0.57, 0.60-0.65 μ m
	近赤外域	0.92-1.0 μ m
	中間赤外域	2.06-2.45 μ m
	熱赤外域	8.0-12.0 μ m



a) 解析対象地区

0m 200m 500m



b) 比較解析地区

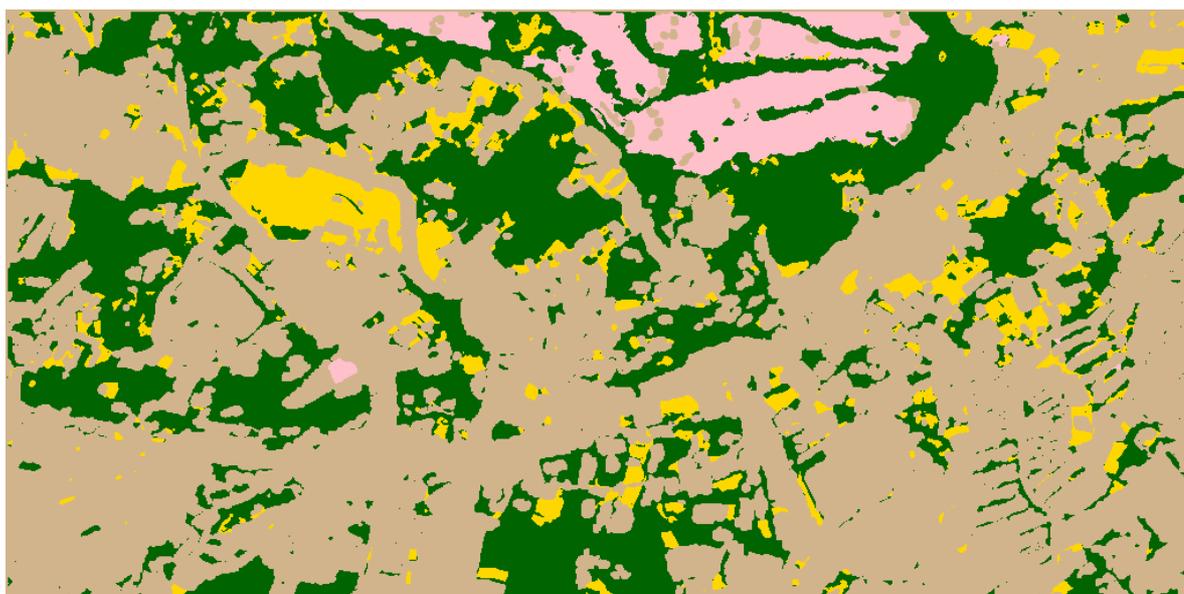
0m 200m 500m



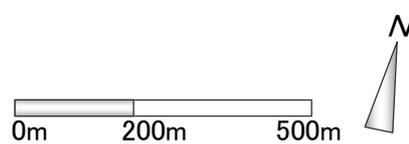
図4-1 航空機MSSデータの合成画像

(空間分解能 1.9m, R:熱赤外域, G:近赤外域, B:可視域青)

川崎市宮前区菅生周辺



a) 解析対象地区



b) 比較解析地区

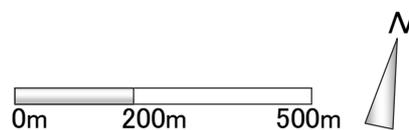


図4-2 短辺3画素以上の緑を抽出した緑被分布画像
(空間分解能 1.9m, 川崎市宮前区菅生周辺)

抽出された緑の個数は解析対象地区が 751 ヶ所、比較解析地区で 784 ヶ所に及んでいる。これらのひとまとまりの面積と分布の関係を求めたのが図 4-3 である。

樹木については、解析対象地区における緑被面積は 88%以上が 100 m²以上のまとまりの樹木で占められているが、分布数からみれば 63%は 100 m²未満のまとまりの樹木で占められている。草地についてもほぼ同様であり、面積では 89%以上が 100 m²以上の草地であるのに対して、個数では 52%が 100 m²未満の草地である。

比較解析地区でも小規模なものが多数分布する傾向は同じであるが、樹木・草地共に 100 m²未満の分布数が 61%となっており、両地区の差異が見られる。

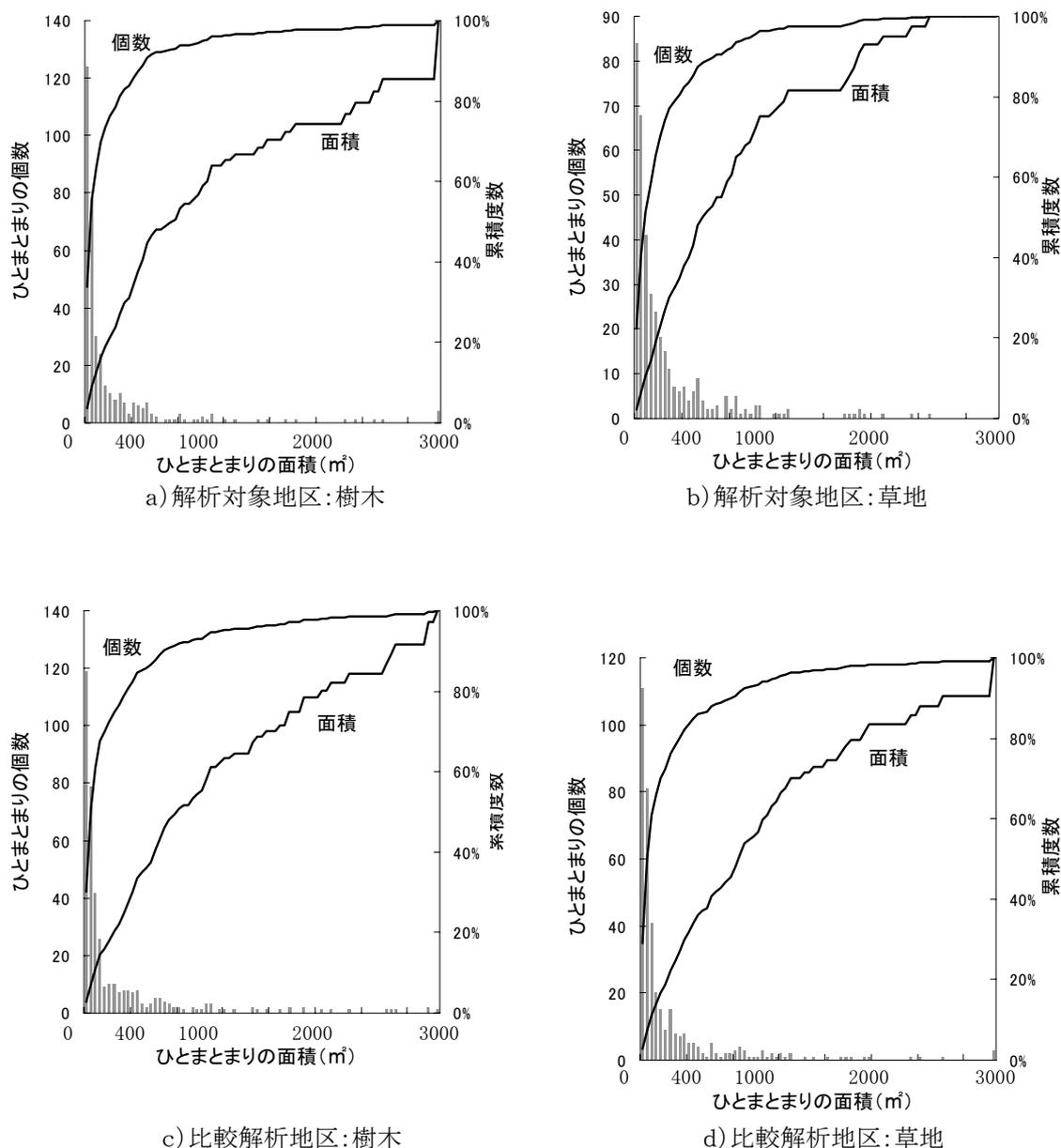


図4-3 ひとまとまりの緑の面積と分布数の関係

4-3 ミクセルの解析方法と解析モデル画像の作成

4-3-1 既往の画素内緑被率推定方法

都市域のリモートセンシングデータのように、ミクセルを考慮しないと十分な解析ができない対象が認識されるにつれて、ミクセルを対象とした分類手法が提案されるようになってきた。カテゴリー分解法^{1),2)}、回帰分析法³⁾⁻⁵⁾、スケーリング法⁶⁾、ニューラルネットワーク法^{7),8)}、ファジー推論法⁹⁾、あるいは、ミクセルを新たなクラスとした確率密度関数を定義しての判別分析手法の利用^{11), 12)}などである。

こうした手法で得られる分類結果は、画素内のクラス占有率である。都市域では、クラスが多種類であることと分布が複雑なために、占有率の推定でも困難な対象が多いが、緑については、緑以外との分光反射特性の差異が大きいことにより、正確なクラス占有率(画素内緑被率)を推定することができる⁴⁾。

4-3-2 画素内緑被配置の推定方法

本章では、画素内緑被率は既往の方法で推定し、画素内緑被率画像から画素内の緑被配置を推定する方法を検討する。図 4-4 に画素内緑被率と画素内緑被配置の違いを模式的に示す。

異種クラスが混在した画素であるミクセルは、第2章での解析結果(図 2-4, 2-8)に示すように観測データの空間分解能と観測対象物の幾何特性(大きさ, 形状, 分布状態)との関係によって、その質が異なる。現状得られる高分解能のマルチスペクトルデータは、人工衛星で3m, 航空機で数十 cm 程度の空間分解能である。一方、都市の緑には、樹冠幅が 50cm 程度の低木や、さらに小さい鉢植え等の緑が含まれる。このため、現状の観測データには島状のミクセルが存在する。

今後、観測データの空間分解能が向上すると、微少な緑も複数画素で観測されるようになる。このときのミクセルは緑と緑以外の境界部分のみに存在し、ミクセルに含まれる緑は近傍画素にも含まれるようになる。このとき、ミクセルの画素内緑被配置は近傍画素の画素内緑被率と密接な関係を持っている。

この関係を、図 4-5 に模式的に示す。推定対象とするミクセルの近傍画素を参照することにより、ミクセル内の画素内緑被配置が推定可能である場合があることがわかる。特

に、(1)の例のように、画素内緑被配置が単純な場合には、簡易な補間法等でも、高精度の推定が可能であることが予測される。一方、(2)の例のように画素内緑被配置が複雑な場合には、パターンマッチング等の方法の利用が必要となろう。

また、この関係を利用して、画素内緑被配置を推定する場合、島状の緑によるミクセルを含まないデータに、適用範囲が限定される。

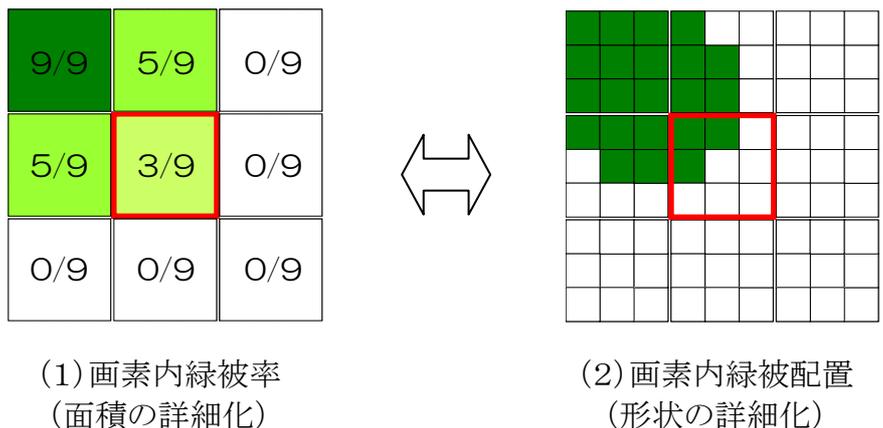


図4-4 画素内緑被率と画素内緑被配置の違い

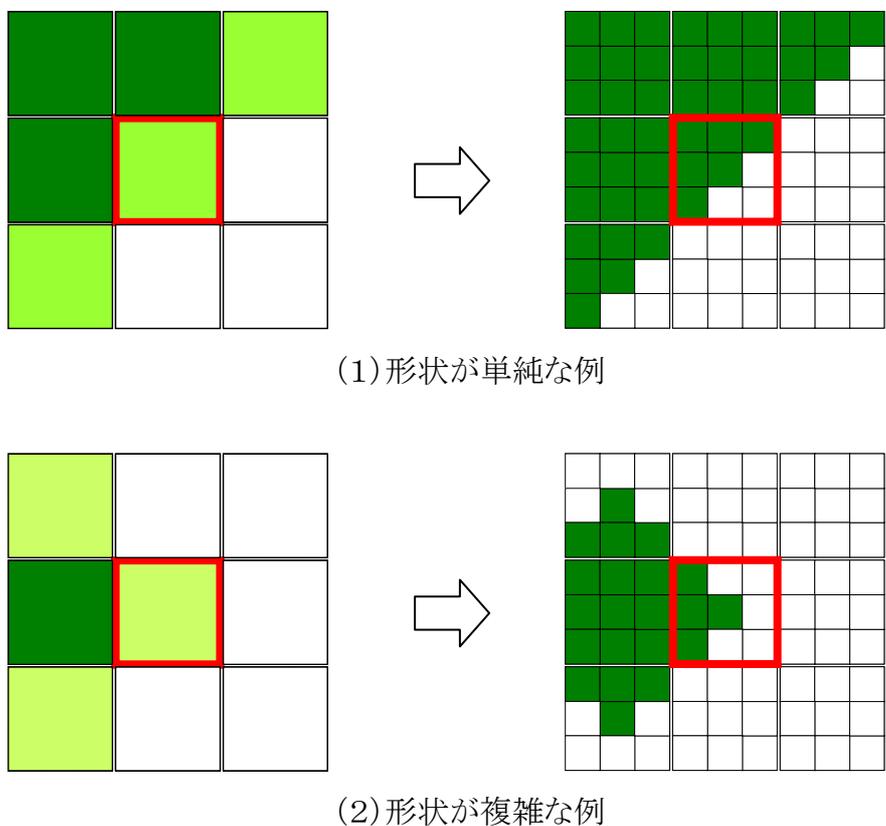


図4-5 画素内緑被率から画素内緑被配置の推定が可能であることを示す模式図

4-3-3 画素内緑被率モデル画像の作成

現在は推定手法の適用範囲で観測されたデータを入手が困難である。そこで、島状のミクセルが存在しない画素内緑被率モデル画像を作成して検討を行う。緑被分布画像に $n \times n$ 画素 ($n=2 \sim 5$) の相加平均フィルターを適用し、画素内緑被配置が既知で空間分解能が n 倍に低下した画素内緑被率モデル画像を作成する(表 4-2, 図 4-6)。

4-3-4 モデル画像に含まれる誤差と実用への課題

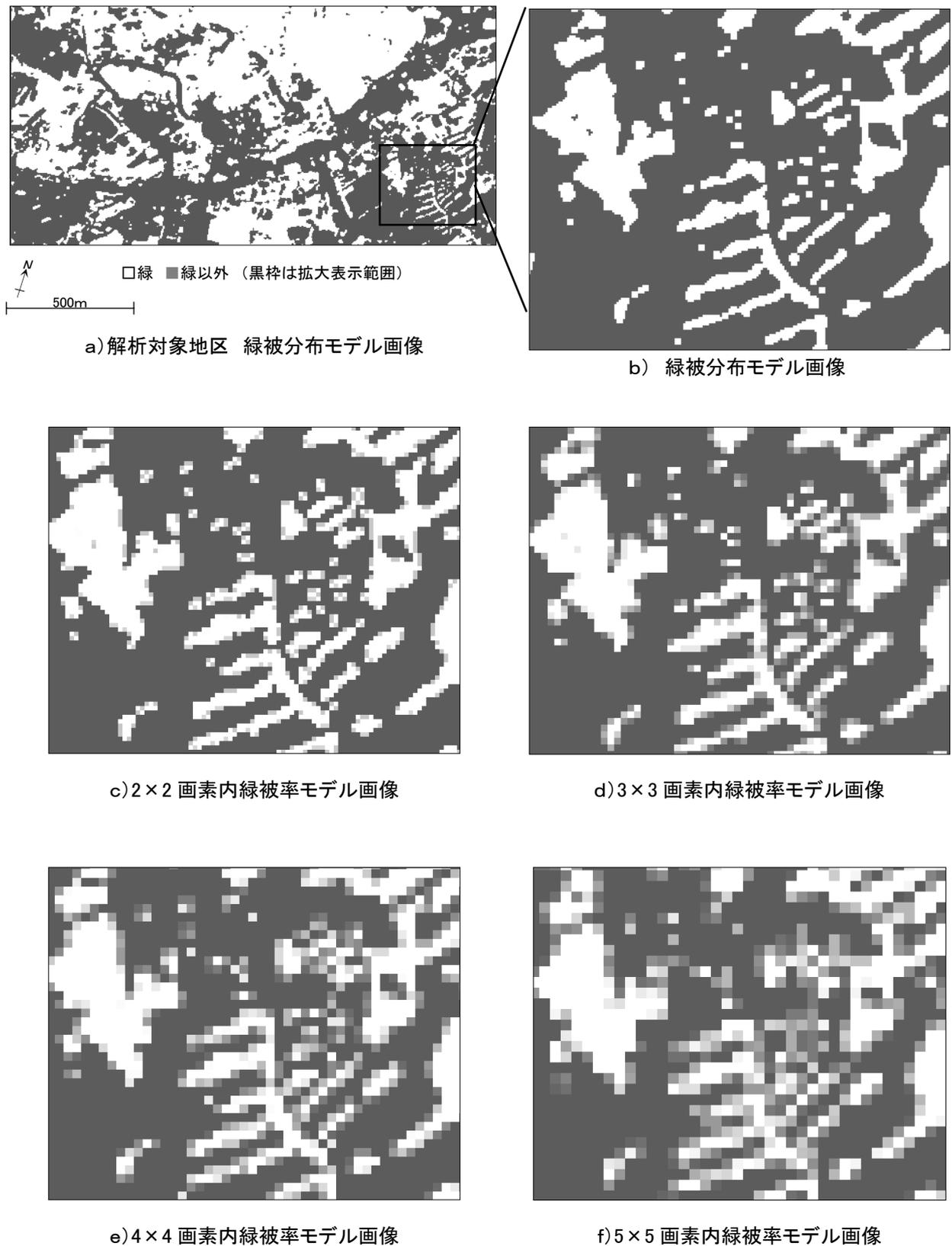
画素内緑被分布モデル画像の緑の外周形状は、実際の緑の外周形状と比較すると、観測データに含まれるミクセルを2値化したことによる誤差を含んでいる。

画素内緑被率モデル画像の緑被率は、ミクセルの分割数に応じた離散値となっている。リモートセンシングデータから求める画素内緑被率からは、 $\pm 1/\text{分割数}/2$ の最大誤差が考えられる。9分割の場合では、画素内緑被率は10段階 $1/9$ ピッチであり、最大で $\pm 1/18$ ($\pm 5.6\%$)の誤差が含まれる。

実際の利用では、これらの誤差が緑の外周形状の利用目的に応じた許容範囲に収まる必要がある。都市環境の解析目的に応じたリモートセンシングデータの空間分解能の選択が実用化への課題である。

表4-2 モデル画像の概要

	空間分解能	画素数	ミクセル数(比率)	
			解析対象地区	比較解析地区
緑被分布モデル画像	1.9m	500x1000	-	-
2x2画素内緑被率モデル画像	3.8m	250x500	9,241 (7.4%)	9,182 (7.3%)
3x3画素内緑被率モデル画像	5.7m	166x333	7,968 (14.4%)	8,017 (14.5%)
4x4画素内緑被率モデル画像	7.6m	125x250	6,637 (21.2%)	6,622 (21.2%)
5x5画素内緑被率モデル画像	9.5m	100x200	5,524 (27.6%)	5,452 (27.3%)



画素内緑被率をグレースケール表示(明るいものほど緑被率が高い)

図4—6 緑被分布モデル画像及び画素内緑被率モデル画像の部分拡大図

4-4 画素内緑被率を利用した推定方法の開発

4-4-1 出現する画素内緑被配置パターン

画素内緑被配置の出現パターンと近傍画素の画素内緑被率の対応を検討し、両者の関係を用いた推定の可能性を示す。

まず、理論上存在する組み合わせを検討する。ミクセルの分割数を n とすると、画素内緑被配置パターンは $2n-2$ 個存在する。これに対応する画素及び8近傍画素は、それぞれ独立に $n+1$ 段階の画素内緑被率をとり得るため、 $(n+1)^9$ パターンが考えられる。4分割の場合で、画素内緑被配置 14 パターンに対して、画素及び近傍画素の画素内緑被率は約 200 万パターンと膨大である。

つぎに、各パターンの出現頻度を 2×2 緑被率モデル画像の場合で検討する。画素内緑被配置パターンと出現数を図 4-7 に示す。画素内緑被率 50% のパターンが、画素内緑被率 25% 及び 75% のパターンの約 2 倍出現している。一方、対角線上に並んだ画素内緑被率 50% のパターン(2-5, 6)は、ほとんど出現しない。出現頻度には大きな偏りがあるが、解析対象地区と比較解析地区での出現頻度は同様の傾向がみられる。両地区とも、推定対象となる主なパターン数は 12 となっている。

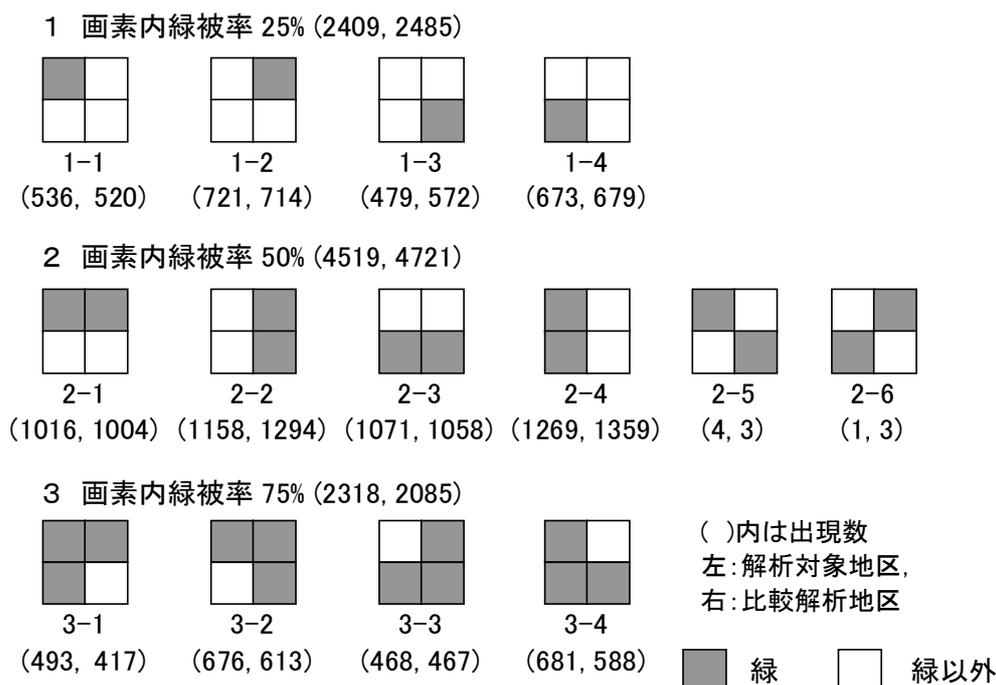


図4-7 4分割の場合の画素内緑被配置パターンと出現数

図4-8は出現頻度が高い2-4, 3-4の画素内緑被配置パターンを例にして, 8近傍画素の画素内緑被率の平均値と分散を示している。画素内緑被配置 2-4 は出現数 1,269 と最も頻度が高いパターンであり, 緑と緑以外が左右に分かれて並ぶ配置である。これは, 縦方向の境界線上のミクセルであり, 近傍画素 P2, P7 も境界を含む可能性が高いため分散が大きくなっている。他の近傍画素の分散は小さい。画素内緑被配置 3-4 は出現数 681 と比較的高い頻度で出現するパターンであり, 右下がりの斜めの境界線上のミクセルである。この場合は, 近傍画素 P1, P8 が境界を含む可能性が高いため分散が大きい。

このように, 近傍画素の画素内緑被率は変動幅が大きいものが限られており, 理論上存在する膨大なパターン数に対して, 実際に出現するパターン数は大きく低減している。

以上より, 画素内緑被配置の出現パターンと対応する近傍画素の画素内緑被率の出現パターンは, 推定に実用的な程度に集約されている可能性を示した。

P1	0.86 0.080	P2	0.43 0.113	P3	0.09 0.057
P4	1.00 0.001	1	0	P5	0.02 0.010
P6	0.86 0.080	P7	0.51 0.109	P8	0.10 0.059

a) 2-4

P1	0.64 0.147	P2	0.99 0.004	P3	0.95 0.029
P4	0.17 0.072	1	1	P5	0.98 0.009
P6	0.05 0.032	P7	0.18 0.066	P8	0.68 0.143

b) 3-4

(上段: 平均値, 下段: 分散)

図4-8 画素内緑被配置パターン 2-4,3-4 に対する近傍画素値の出現パターン

4-4-2 近傍画素情報を利用した推定方法の検討

近傍画素値の利用方法としては、次の2通りが考えられる。

- ①ミクセルを分割して生成される画素の画素値を補間する関数の既知変数
- ②ミクセル内の緑被配置パターンと対応するパターンの構成要素

それぞれの利用方法の適性について、最も基本的な分割である4分割の場合で比較検討する。補間方法としては共一次内挿法とスプライン補間法、パターンマッチング法としてはニューラルネットワーク法を使用する。

(1) 共一次内挿法

4近傍画素値に距離の重みを付けて補間を行う方法であり、幾何補正を行ったりリモートセンシングデータの画素の再配置等に利用されている。ここでは、図 4-9 に示すように4分割で生成される画素毎に4近傍画素値を用いて補間値を算出し、0.5を閾値として2値化する。

(2) スプライン補間法

スプライン補間法は、対象領域の全ての画素値を滑らかに結ぶ曲面を設定して補間を行う方法であり、等高線からDEMを作成する場合やコンピュータグラフィックスの分野で多用されている。ここでは、8近傍画素値を結ぶ2次元2次のスプラインで得られる補間値を、0.5を閾値として2値化する。

(3) ニューラルネットワーク法

ニューロンと呼ばれる神経細胞モデルがシナプスと呼ばれる結合部分で互いに結合したネットワークモデルを用いた分類方法である。結合の荷重を学習によって修正させることで、目的の出力を得ることができる。パターン認識等さまざまな対象で利用されている。ネットワークの構成や入力方法、学習方法等は自由であり、分類目的に応じた方法が検討されている。ここでは、簡易で良好な分類結果が得られるため現在最も一般的に使用されている3層の階層型モデルを基本構成として採用した(図 4-10)。

ミクセルとその8近傍画素値を入力パターン、画素内緑被配置を出力パターンとした。各ニューロンの出力関数はシグモイド関数を使用した。3層の階層型モデルでは、中間

層のニューロン数が少ないと教師データに対する学習が十分に行えない。一方、ニューロン数が多いほど教師データに対する学習誤差は小さくなるが、未学習データに対する誤差が大きくなる過学習の状態となる。ここでは、中間層のニューロン数と学習誤差の関係を求める予備検討により中間層のニューロン数を決定した。

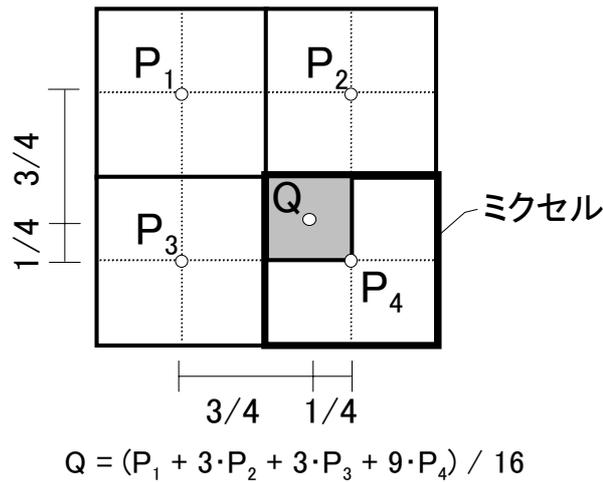


図4-9 4分割推定への共一次内挿法の適用方法

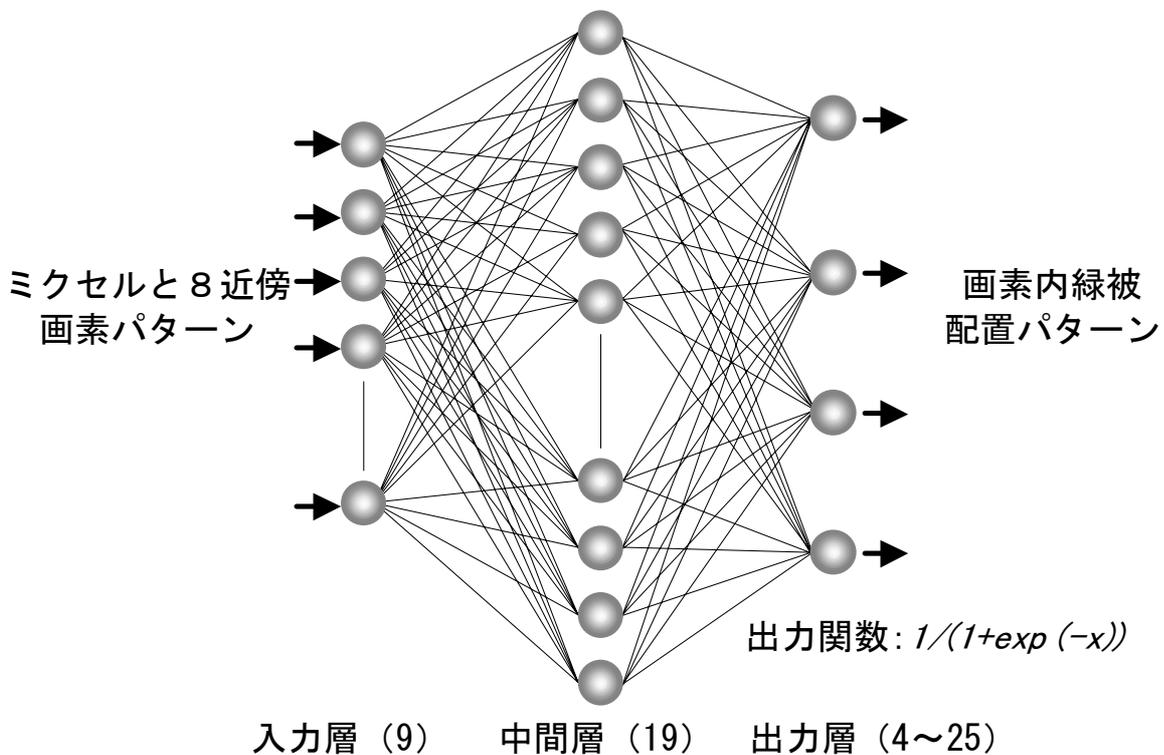


図4-10 ニューラルネットワークの構成

予備検討はミクセルを4分割する場合の学習で行った。中間層ニューロン数は1～27の範囲で変化させ、教師データの学習誤差と未学習データの推定誤差の2乗平均の和の最小値を比較した。学習は誤差逆伝搬法で結合荷重を修正していく方法を用いた。教師データは、全ミクセル数の5%にあたる455パターンをランダムに抽出した。未学習データは、比較対象地区から教師データと同様に452パターンを抽出した。教師データ(学習データ)及び未学習データの誤差と学習回数との関係を求めた一例が図4-11である。未学習データの推定誤差が学習途中から増加傾向を示すため、2乗平均誤差の和に最小値が存在することが分かる。誤差の和が最小となる学習回数は100回程度であった。

また、中間層ニューロン数が1及び2のときは教師データの学習が十分に行えなかった。ニューロン数3以上の場合の誤差の和の最小値を図4-12に示す。これより、誤差の和が最小となった中間層ニューロン数19を採用した。

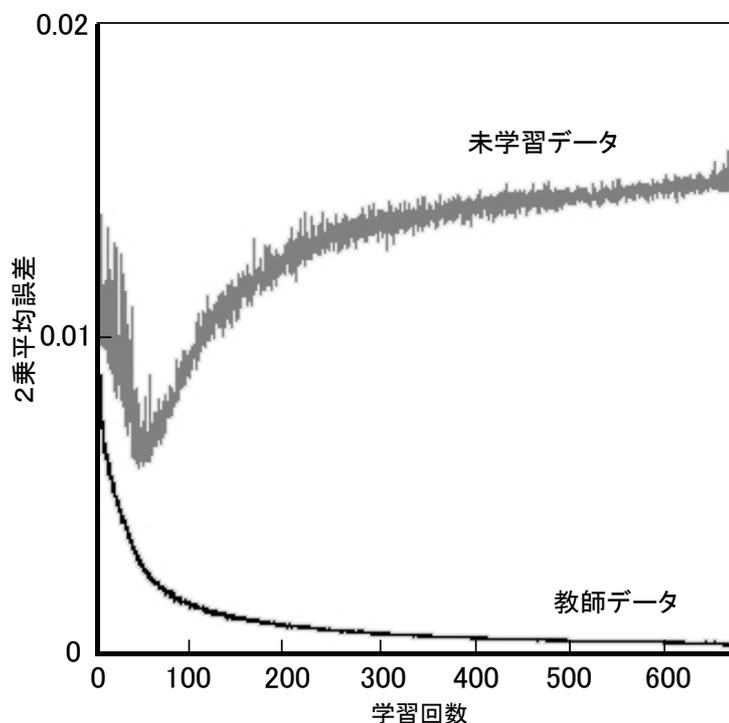


図4-11 学習回数と学習誤差及び未学習データの推定誤差との関係
(4分割推定, 中間層ニューロン数19の例)

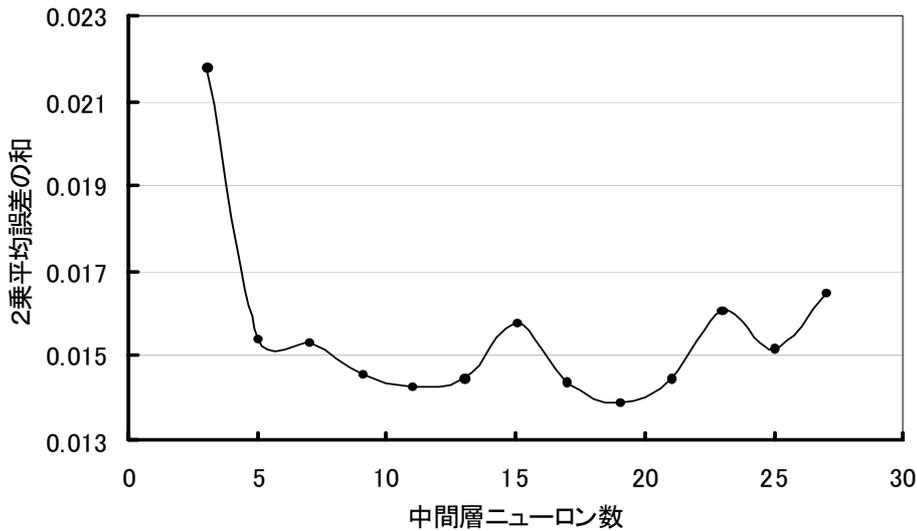


図4-12 中間層のニューロン数と学習誤差の最小値との関係

(4分割推定, 中間層ニューロン数 3~27)

学習の評価を全教師パターンの誤差で行った場合、出現数の少ないパターンのみが過学習となる可能性が考えられる。特定パターンが過学習とされていないことを確認するために、画素内緑被配置パターン毎の出現比率と推定精度の関係を検討した。

図 4-13 は4分割推定の場合の検討結果である。出現数が少ないパターンのみ推定精度が低いという傾向は見られない。これより、パターン毎の出現数の偏りは特定パターンのみが過学習となるほどの偏りではないことが確認できる。

以上より、ニューラルネットワークによる推定では、中間層ニューロン数は 19 とし、学習の評価は教師データと未学習データの誤差の2乗平均の和で行うこととした。

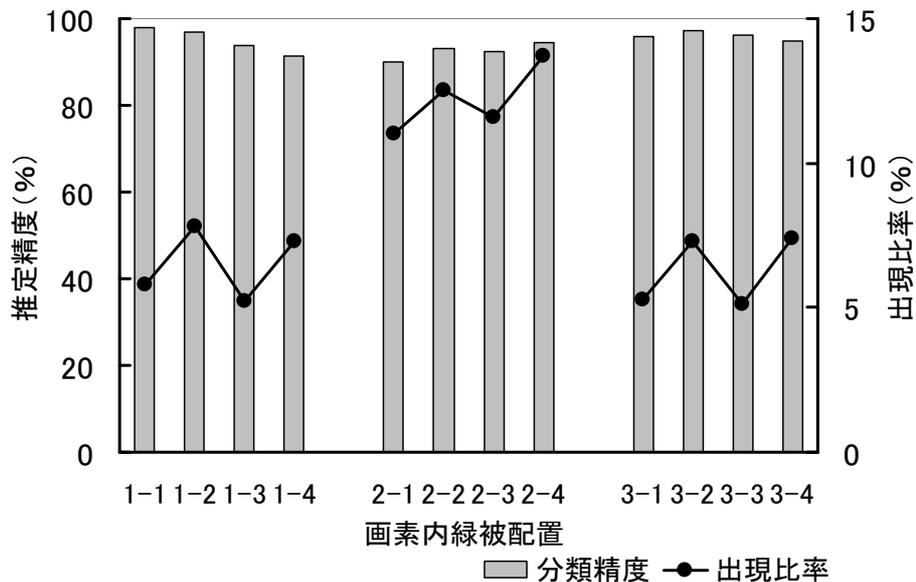


図4-13 パターン毎の推定精度と出現比率との関係(4分割推定)

(3) 推定結果の比較

推定結果は、画素内緑被配置パターン単位と分割後の画素単位の2つの評価を行った。それぞれの定義を以下に示す。

- ①配置パターン推定精度:画素内緑被配置パターンの正答数の全ミクセル数に対する比率。
- ②画素単位正答率:ミクセルを分割した画素単位で正誤を判定した場合の正答画素数の全画素数に対する比率。

各推定方法の推定結果を表 4-3 に示す。パターンマッチング法と補間法の比較では、いずれの推定結果でもパターンマッチング法で高い正答率が得られており、補間法において大きく低下する配置パターン推定精度では、37 ポイントの差異となっている。これは、補間法が画像を平均化する特性を持っているために、複雑な画素内緑被配置の推定が困難であることによると考えられる。

補間法の比較では、共一次内挿法とスプライン補間法に大きな差異はみられない。また、両者とも、画素単位正答率は高いが、配置パターン推定精度は大きく低下している。そこで、以下の検討は共一次内挿法についてのみ行うこととする。

表4-3 近傍画素情報の利用方法の違いによる推定結果の比較

推定方法		配置パターン推定精度			画素単位正答数		
		正答数	誤答数	推定精度	正答数	誤答数	正答率
補間法	共一次内挿法	5,331	3,910	58%	32,894	4,070	89%
	スプライン補間法	5,197	3,910	57%	32,469	4,070	89%
パターンマッチング法	NN法	8,260	526	94%	34,192	952	97%

表 4-4 に示す画素内緑被率別の推定精度でみると、補間法では画素内緑被率 50% の場合に比して、25%、75% の場合に低い精度となっている。これは、画素内の緑被形状(配置)が、画素内緑被率 50% の場合に比して、25%、75% の場合が複雑(図 4-5 参照)であることに対応しており、補間法の場合、画素内緑被配置が複雑であるほど推定が困難であることを示している。一方、パターンマッチング法では、画素内緑被配置が複雑な場合でも入出力パターンへの対応を学習できれば、正確な推定が行えることがわかる。

以上の結果より、近傍画素情報はパターンマッチングでの利用が有効であることが確認できる。ミクセルの分割数を増やした複雑な画素内緑被配置の推定は、ニューラルネットワークによるパターンマッチング法で検討を進める。

表4-4 近傍画素情報の利用方法の違いによる推定結果の比較

画素内緑被率	補間法			パターンマッチング法		
	正答数	誤答数	推定精度	正答数	誤答数	推定精度
75%	1,150	1,168	50%	2,075	129	94%
50%	3,091	1,423	68%	4,001	290	93%
25%	1,090	1,319	45%	2,184	107	95%

4-5 ニューラルネットワーク法による推定

4-5-1 ミクセルの分割数と推定結果との関係

ネットワークの構成と学習法を固定した場合、ニューラルネットワークによる推定性能は、①入力パターンである近傍画素パターンと出力パターンである画素内緑被配置パターンの対応関係の独立性、②出現する入出力パターンに対する学習データの代表性、によって決まる。ここでは、ミクセルの分割数と推定精度との関係から、入出力パターンの対応関係の独立性と学習データの代表性が確保される分割数の範囲を検討する。

学習に使用する教師データ及び学習評価に用いる未学習データは、解析対象地区及び比較解析地区から全ミクセル数の 20%をランダムに抽出した。分割数が多くなると出現する画素内緑被配置パターン数も多くなるため、予備検討よりも高い比率で抽出した。教師データと未学習データの誤差の和が最小となった学習結果を用いて画素内緑被配置の推定を行った結果を図 4-14 に示す。

配置パターン推定精度は、分割数の増加に比例して、94%から 12%へ大きく低下している。一方、画素単位正答率は、16 分割までの低下は 97%から 91%と小さく、25 分割で大きく低下する。

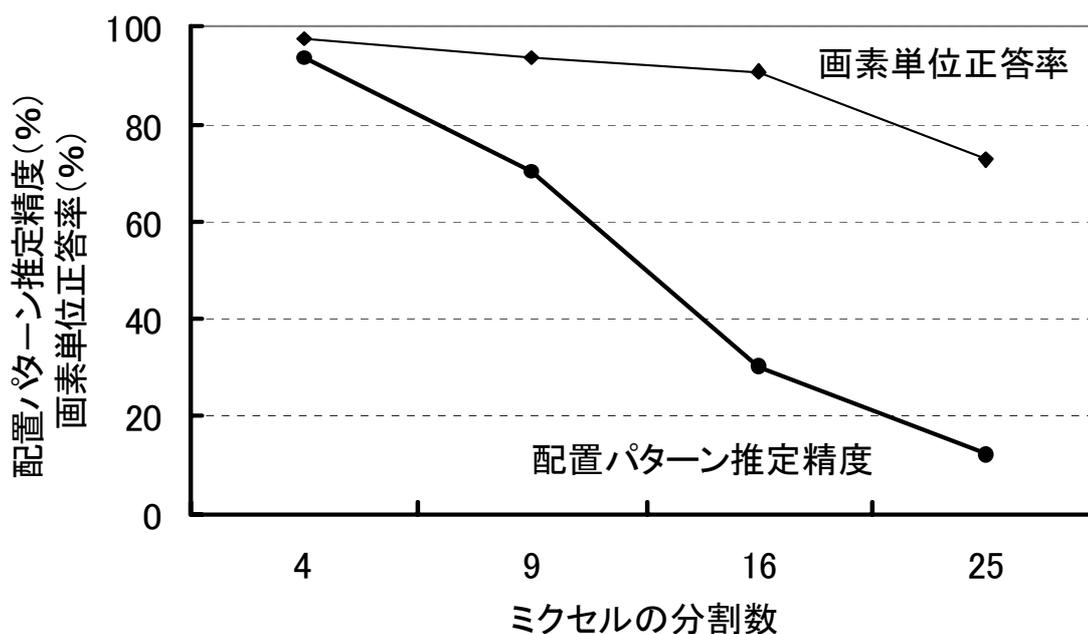


図4-14 配置パターン推定精度及び画素単位正答率とミクセル分割数との関係

これは、16 分割までは画素内緑被配置が類似したパターンへの誤分類が多いのに対して、25 分割では類似性のないパターンへの誤分類が多くなるためと考えられる。

すなわち、25 分割の場合は学習データに含まれない入出力パターンが増加していることを示していると考えられる。

以上より、16 分割以下の場合に学習データの代表性が確保されていることがわかる。また、入出力パターンの対応関係の独立性を向上させることで、推定精度の向上が期待できることを示している。

4-5-2 入出力パターンの対応関係の独立性向上

ここでは、類似する入出力パターンの対応を分離する方法の一つとして、画素内緑被率別の推定を行う。前項の検討より 16 分割までを対象とする。各分割で画素内緑被率別に教師データを抽出し、前項同様の学習と推定を行う。

画素内緑被率別に推定された結果を集計し、推定結果と分割数の関係として図 4-15 に示す。

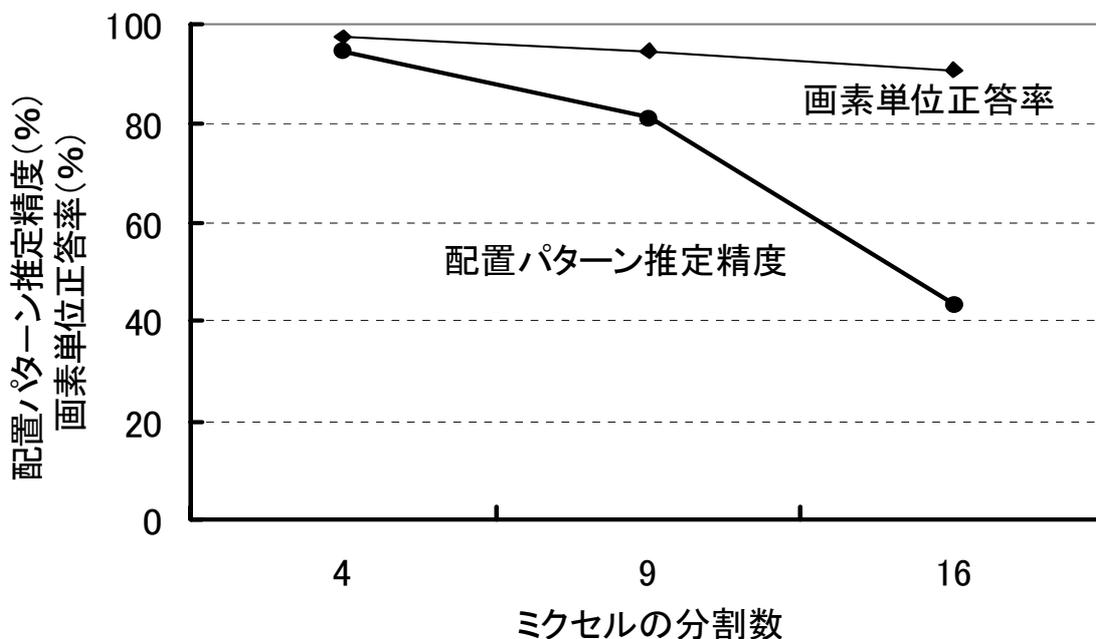


図4-15 配置パターン推定精度及び画素単位正答率とミクセル分割数との関係
(画素内緑被率別に学習と推定を行った結果を集計)

9, 16 分割の場合は, 前項で行った一括推定に比して, 11 ポイント以上の推定精度の向上がみられる。一括推定でも推定精度が高い4分割の場合には, 1ポイントの向上に止まっている。これより, 類似する入出力パターンが多い場合に画素内緑被率別の推定が有効であることが示された。ただし, 16 分割のパターン推定精度は依然として低い。これは, 16 分割の場合, 画素内緑被率で分離しても, 各画素内緑被率に類似パターンが多く存在するためである。

以上より, 本研究で提案したニューラルネットワークモデルによるパターンマッチング法の適用範囲は9分割以下であることが示された。緑被分布モデル画像のミクセルを9分割した場合の推定結果画像を図 4-16 に示す。また, 提案手法の効果を確認するため, 正解画像である緑被分布モデル画像, 入力画像である画素内緑被率モデル画像, 及び, 出力画像である推定結果画像を部分拡大して図 4-17 に示す。これより, エッジの比率が高い小規模な緑の形状が大きく改善されている様子が見られる。

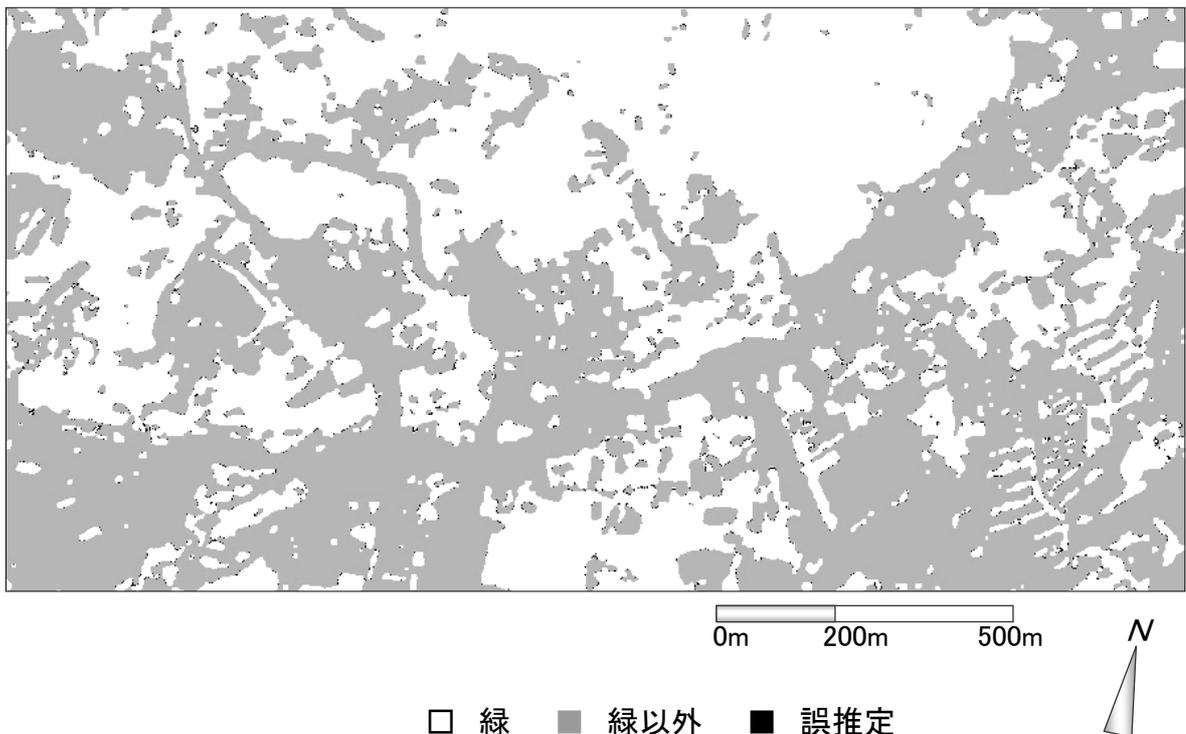


図4-16 ミクセルを9分割した画素内緑被配置推定結果画像

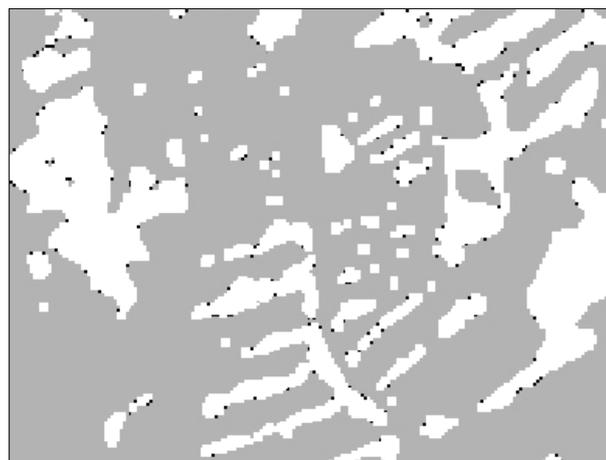


a) 緑被分布モデル画像 (正解画像) □ 緑 ■ 緑以外



画素内緑被率 10 段階をグレースケール表示(明るいものほど緑被率が高い)

b) 3×3 画素内緑被率モデル画像 (入力画像)



□ 緑 ■ 緑以外 ■ 誤推定
c) 推定結果画像 (出力画像)

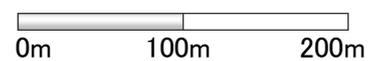


図4-17 画素内緑被配置推定結果の部分拡大画像(9 分割)

4-5-3 推定性能の地区依存性の検討

解析地区による緑の分布状態の違いが、推定性能に及ぼす影響を比較解析地区の分類結果で検討する。推定は4分割及び9分割で行った。両地区の配置パターン推定精度及び画素単位正答率を表 4-5 に示す。いずれの場合も分類精度の低下は微小であり、画素内緑被配置の出現パターン及びこれに対応する近傍画素の画素内緑被率の出現パターンに地区依存性が小さことがわかる。

表4-5 解析地区による推定結果の比較

	配置パターン推定精度			画素単位正答率		
	解析対象地区	比較対象地区	差 (ポイント)	解析対象地区	比較対象地区	差 (ポイント)
4分割推定	94.8%	93.5%	-1.3	97.6%	97.0%	-0.6
9分割推定	81.9%	81.1%	-0.5	94.6%	94.3%	-0.3

4-6 まとめ

都市緑被分布図の精細化を目的として、リモートセンシングデータによる画素内緑被率画像から、緑を含むミクセルの画素内緑被配置を推定する方法を検討した。提案手法は「島状の緑を含むミクセルが存在しない観測データ」を用いることを条件としている。現状では、この条件を満たす空間分解能の観測データを得ることが出来ないため、モデル画像を作成して検討を行った。

その結果、ニューラルネットワークを利用して、近傍画素の画素内緑被率と画素内緑被配置のパターンマッチングによる推定を行うことにより、ミクセルを9分割した場合の画素内緑被配置を求めることができ、緑のエッジ部分の形状が精細化されることを示した。

得られた知見以下にまとめる。

- (1) 緑が島状に含まれるミクセルが存在しない空間分解能のデータにおいて、緑のエッジ部分に存在するミクセルの8近傍画素の画素内緑被率は、ミクセルを9分割した場合の画素内緑被配置を推定可能な情報を持っている。
- (2) 補間法による推定では、画素内緑被配置パターンが複雑な場合の推定が困難であるのに対し、パターンマッチング法では、画素内緑被配置パターンと近傍画素の画素内緑被率のパターンとの対応を学習することにより、複雑なパターンの推定が行える。
- (3) 類似する入出力パターンの対応を分離して推定精度を向上させる方法の一つとして、画素内緑被率別に画素内緑被配置を推定する方法の有効性を示した。
- (4) 比較解析地区での推定精度の低下は微小であり、出現する画素内緑被配置パターンと近傍画素の画素内緑被率の出現パターンとの対応関係の地区依存性は小さい。

今後は、鉢植えや生け垣等の微少な都市緑被の分布形状を把握するために必要なデータの空間分解能を検討すると共に、これに適した超高分解能のリモートセンシング

データを用いて、本手法の適用性を確認したいと考えている。また、実際のリモートセンシングデータの特性に応じたニューラルネットワークの構成や学習方法についての検討も課題となると考えている。

引用文献

- 1 藤村貞雄,伊藤直史:画素のカテゴリー分解による面積比推定,計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.6, pp.23-34, 1987.6
- 2 稲村實:カテゴリー分解に基づくリモートセンシング画像データの解析,電子情報通信学会論文誌, Vol.J70-C, No.2, pp.241-250, 1987.2
- 3 本條毅,高倉直:植生指数と(Vegetation Index)を用いた都市における緑被率の推定,造園雑誌, Vol.52, No.5, pp.283-287, 1989.3
- 4 尹敦奎,梅干野晁:都市域における画素内緑被率推定のための指標,日本リモートセンシング学会誌, Vol.18, No.3, pp.4-16, 1998.9
- 5 竹内章司, 稲永麻子:スケーリングを目的とするミクセル推定におけるカテゴリー分解法と回帰推定法の比較,写真測量とリモートセンシング, Vol.37, No.1, pp.29-34, 1998
- 6 杉田幹夫,安岡善文:NOAA/HVRR データとLANDSAT/TM データのスケーリングによる土地被覆の画素内面積比率推定,日本リモートセンシング学会誌, Vol.20, No.1, pp.32-42, 2000.3
- 7 三條和博:ニューラルネットワークによる頑健な衛星画像分類法の検討,電子情報通信学会技術研究報告, Vol.IE93-121, pp.15-21, 1994.2
- 8 稲村實, 山崎秀春:ニューラルネットワークによるミクセルのカテゴリー分解,日本リモートセンシング学会第17回学術講演会論文集, pp.101-102, 1994.12

- 9 西田真, 大塚敬, 田畑亮: ファジィ推論によるミクセルのクラス混在率推定, 電気学会論文誌, Vol.116-C, No.3, pp.359-366, 1996.3
- 10 北本朝展, 高木幹雄: ミクセルの内部構造を反映する面積占有率密度を用いた画像分類法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-2, No.11, pp.2582-2597, 1998.11
- 11 須崎純一, 柴崎亮介: 確率ミクセルモデルに基づいたスペクトル特性ならびに被覆混合比推定手法, 写真測量とリモートセンシング, Vol.38, No.3, pp.44-59, 1999
- 12 尹敦奎, 梅干野晁: 熱収支数値シミュレーションによる都市緑化の評価, 日本建築学会計画系論文集, 第 520 号, pp.69-75, 1999.6

第5章 詳細な都市緑被分布図の作成への応用

5-1 はじめに

住宅地、市街地と解析範囲を拡大して解析を進めてきたが、本章では市街地の周辺に存在する里山等を含むより広域を対象とすることによって、都市全域へ適用可能な緑被分布図の作成手順を提案する。本章は、これまでに得られた知見と解析手法を都市緑被分布図の作成に展開する応用研究と位置付けている。

都市域の緑は、都市環境の向上に重要な役割を果たしており、量の拡大と質の向上が求められている。核となる大規模な公園・緑地を過密な都市空間で増加させることは容易でないため、屋上緑化など建物周辺の緑化¹⁾が進められている。こうした、小規模で身近な緑は、物理的・心理的環境を改善するだけでなく、防災や生態系の保全など、様々な役割をもって、その重要性が増大してきている。

これまで行われてきた大規模な緑を対象とした数年間隔の調査²⁾は、地上踏査で対応できたが、小規模な緑を含めて多頻度の調査を継続するには、時間的・経済的に限界があり、リモートセンシングを活用した都市緑被分布図の作成が期待されている。

小規模な緑を活用した快適で安全な都市づくりを進めていくには、緑の実態を正確に把握したうえで、解析・評価を行うことが重要である。規模の小さい緑は、大規模なものに比較して、変動が大きいいため、現況の正確な把握には、多頻度の調査が必要と考えられる。全国で整備されている小縮尺の現存植生図では、山地や里地の樹種は細かく分類されているものの分布の形状は大まかにしか示されておらず、市街地の緑については分布さえも示されていない。

そこで、現存植生図を利用することによって、市街地と里地に分割をしたうえで、それぞれに必要な緑の解析を行い緑被分布図を作成する。市街地については緑被分布が調査されていないことから、前章までに得られた知見・解析方法を適用し、小規模であるが身近な緑の分布状況までを解析する。里山は、緑被分布について判別することで、植生調査が行われてからの改変箇所の修正を行う。これらを統合して都市全域の緑被分布を対象とできる都市緑被分布詳細図が作成される。

5-2 都市環境計画のための緑被分布図の提案

地方自治体を中心にして、みどりに関する調査はほぼ定期的に行われている²⁾。ここでは、過去に行われた調査の方法・対象などの整理を行い、それらを比較検討することにより現状の問題点を明らかにする。さらに、これを基にして、都市環境評価・計画に必要な緑被分布図の作成に関する基本方針を示す。

5-2-1 市街地と里地の情報格差

都市の緑の生育地は、社会活動を主体とした市街地と自然環境を主体とした里地に大別して捉えることができる。従来から整備されている現存植生図においては、里地の緑については樹種を含めて詳細な調査が行われている一方で、市街地の緑についてはその分布さえも調査されていないという不均衡がみられる。図 5-1 に現存植生図の一例を示す。住宅地及び緑の多い住宅地という2区分で日常の生活の場は扱われていることがわかる。自然環境と社会活動の共生が望まれる都市の環境を計画する上では、両者を出来るだけ対等且つ詳細に把握しておく必要がある。

5-2-2 市街地を対象とした緑の調査方法とその問題点

全国で一定基準の基に調査される現存植生図³⁾に比して、個々に実施される市街地の緑被調査は調査対象や調査の方法に以下のような問題点あるいは優れた点を指摘できる。

(1) 調査対象について

- ① 調査対象となる緑の種類や大きさが統一されていない。樹木のみを対象とすることが多く、草地や芝地などは調査されることが少ない。
- ② 樹木を調査対象とした場合、樹幹径の太い大木樹のみが対象とされている。低木や小規模の樹木は扱われないことが多い。
- ③ 公園や緑地など、公共のみどりに重点が置かれている。個人住宅の庭などには自由に立ち入れないため、調査の対象外とされている。
- ④ 樹種に関してはかなり詳細な調査が行われている。大木樹を対象を限定することで樹種の把握まで行われている。

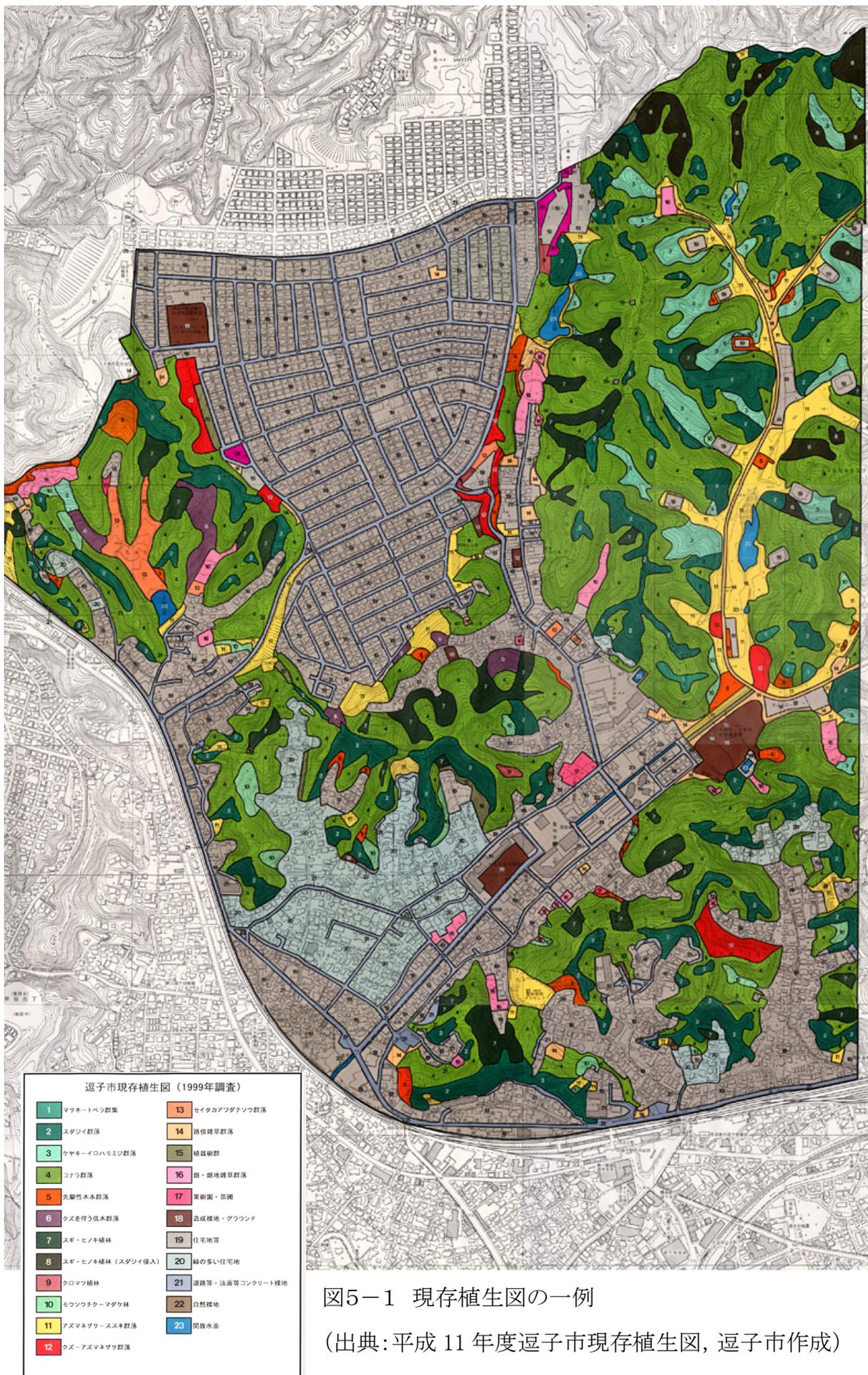


図5-1 現存植生図の一例

(出典:平成 11 年度逗子市現存植生図, 逗子市作成)

(2)調査方法について

- ① 地上踏査が主である。さらに、調査方法が実施機関により異なるために、緑被率などのデータ相互の比較・検討が困難である。
- ② 空中写真が地上踏査の補助として利用されることが多いが、広域全体に渡って均一で詳細な調査が実施されていたとは言えず、調査対象が限定されている場合が多い。さらに、人件費の高騰や時間の制約により地上踏査手法においては、いっそう詳細な調査が困難になってきている。
- ③ 緑被率は樹冠と樹幹の関係式から求められている。地上踏査手法のための便宜的な方法であり、実際の緑被率とは言い難い。

5-2-3 調査結果と環境行政での活用策

最近の緑化施策の中心は、屋上や壁面などの建物緑化や庭木、生け垣、小公園等の点的な緑である。しかし、空中写真や赤外線写真を使った調査例の多くは、視覚判読による緑の抽出を行なっているなどの理由で、100 m²以上程度の緑が対象とされることが多い⁴⁾。こうした調査結果は、点的な緑が調査対象に含まれないため、緑化計施策の成果を確認することが困難である。

東京都では「緑被率標準調査マニュアル」⁵⁾を作成し、これに基づいて区市町村が定期的な緑被調査を実施している。マニュアルには、解析の方法と手順として水準Ⅰ～水準Ⅲの規定がされている。水準Ⅰでは縮尺 1/2,500 程度の空中写真の判読により1m程度が緑被地抽出の最小単位であり、水準Ⅱでは3m程度が最小単位とされている。こうした詳細な緑被調査の水準に基づいて、一部の区市町村では詳細な調査が行われた例がある。

こうした調査は、同マニュアルに「・・・、緑被地の抽出・図化の方法として判読(人力)による方法を標準としている。・・・、機械的方法を補助的に利用するような方法は採用できるものとする」(pp.14)と、記述されているように、通常の見視域カラー写真または近赤外カラー写真の視覚判読を基本としている。このため、判読結果の精度や客観性及び調査の省力化に課題が残されている。また、区市町村毎に、調査結果の精度や更新頻度にばらつきがあり、都全域を一括して評価する事が出来ないのが現状である。そこで、リモートセンシングデータを利用した調査が期待されていると考える。

また、最近の例として、IKONOS の空間分解能1mのパンクロデータと4mのマルチスペクトルデータを利用して、画像処理により、概ね 1 m²以上の緑を抽出したとする墨田区の調査⁶⁾がある。しかし、1m分解能のデータにも多くのミクセルとして観測された画素が存在するため、ミクセルに含まれる緑の情報を抽出する必要があると考える。

一方、非常に詳細な調査が行われている場合にも、町丁目別に緑被率を求めたり、数十メートルのメッシュ図にしてしまう等、貴重な分布状態に関する情報価値を失ってしまっているものもある。

建物緑化に代表される今後の緑化は、住民参加が前提であろう。そのため住民が緑の実態、緑化の効果を確認し、緑化の必要性や目的を明らかにすることができるような緑被情報の提供が必要となる。現状では報告書や市民向けのホームページを作成する程度であり、その内容も統計量としてグラフ化されたものや、かなり大縮尺のメッシュデータの場合が多く、実際の分布状況を十分に把握できる情報とは言い難い。自分の住んでいる地域のみどりの分布状態を視覚的に理解でき、さらに必要に応じて緑被率やみどりの経時変化等の情報が得られるよう、GIS(地理情報システム)を活用した双方向型システムの提供が求められていると考える。

5-2-4 都市緑被分布詳細図の提案

住民と行政がコミュニケーションをとりながら都市の緑化を推進していくためには、視覚的に緑被情報を共有していくことが基本となろう。また、日常の生活空間では身近で小規模な緑も大切にされている。こうした市街地の緑はできるだけ詳細に把握しておくことが住民の緑に対する意識を高めるために役立つと考える。さらに、市街地周辺の里地は市街地と一体になって計画・活用していくことが都市環境の向上に必要不可欠となっている。里地は現存植生図において樹種情報までが整備されているが、更新の周期が長いことから、緑被分布の改変箇所を随時把握していくことが必要であろう。

前章までの知見から、空間分解能の高いリモートセンシングデータを利用して都市緑被分布詳細図を作成する手順を図 5-2 に示す。また、都市緑被分布詳細図はさまざまな植生図のベースとしても利用されることで、より応用の範囲が広がると考える。都市緑被分布詳細図と分光分解能や時間分解能が高いデータを複合利用することで構想される展開についても図中に示した。

5-3 高空間分解能データの取得と前処理方法

第3章の知見から、住宅地の土地被覆分類には1m以下の高分解能データの利用が望ましいことがわかっている。また、単位要素の小さい緑を抽出するためには、さらに高空間分解能が必要となる。ここでは、一般的に利用できるリモートセンシングのなかでは最も高空間分解能の得られる航空機 MSS を使用した多時期の観測と解析に併用する GISデータの準備、及び、緑の特徴に応じた適切なデータの前処理方法について述べる。

同時に観測された画像に含まれる緑はその分光反射特性が違っていても、特性に応じて前処理段階で分割して解析する方法がとられることは少ない。緑の分光反射強度の強弱が極端に強い場合、一方の特徴を捉えようとすると、他方の特徴が見えてこないと言うことは十分に考えられる。NDVI と緑被率の関係を解析した研究例⁷⁾では、緑と混在する緑以外の被覆(住宅地、市街地、土壌、水)に着目して領域を分割し高精度の推定が行えることを示している。しかし、緑の特性に注目した領域の分割は行われていない。また、緑以外の被覆のカテゴリ設定は、都市計画レベルの利用には適さないものとなっている。

ここで解析対象とする地域のように、都市の緑は生育状態が大きく異なるものが混在していることが多い。そのために、都市を広域に観測したデータでは、一括して緑を解析することにより、緑がもつ本来の情報を有効に活用できない地域が存在する場合もある。

ここでは、地域による緑の違いがリモートセンシングデータの観測値にどのように反映されているかを考察する。両者の違いが大きい場合、前処理段階で分割し、それぞれを独立して解析することの有利性が明らかになると思われる。なお、前処理段階での分割は、植生図等の既存情報を活用することで行う。

5-3-1 市街地と里地の定義

本章では、「里地」と「市街地」は現存植生図⁸⁾におけるカテゴリを表5-1に示すように統合して定義して使用する。里地は里山・山地などの傾斜地に生育する樹木と畑地・空地等の草地、及び、緑地の樹木・草から構成されている。市街地は、住宅地を中心として道路・造成地等から構成されている地域とした。

表5-1 「里地」と「市街地」の植生・土地利用カテゴリー

<p>里地:自然林・二次林・植林等の植生 17 カテゴリー</p> <ol style="list-style-type: none">1. マサキトベラ群集2. スダジイ群落3. ケヤキーイロハモミジ群落4. コナラ群落5. 先駆性木本群落6. クズを伴う木本群落7. スギ・ヒノキ植林8. スギ・ヒノキ植林(スダジイ侵入)9. クロマツ植林10. モウソウチクーマダケ林11. アズマネザサーススキ群落12. クズーアズマネザサ群落13. セカアワダチソウ群落14. 路傍雑草群落15. 植栽樹群16. 畑・畑地雑草群落17. 果樹園・苗園 <p>市街地:植生以外の6カテゴリー</p> <ol style="list-style-type: none">18. 造成裸地・グラウンド19. 住宅地等20. 緑の多い住宅地21. 道路等・法面等コンクリート裸地22. 自然裸地(23. 開放水面)

5-3-2 解析地区の選定

市街地と里地が混在して構成されている地域として、神奈川県逗子市のJR逗子駅北に位置する、東西約420m×南北約1,750m、面積約73haのエリアを解析地区に選定した。

ここに含まれる大規模な戸建住宅団地は街路樹や庭木が豊富な緑豊かな地区である。また、里山に隣接する旧来の住宅地等に樹種や分布形態の多様な緑が分布している。

里山はコナラを中心とする二次林が広く分布し、一部にスダジイ等の自然林、スギ植林を含んでいる。また、樹木の伐採や耕作地の放棄等による草地も多く分布している。

図5-3に示す周辺図に見られるように、池子地区の大規模な自然林から連なる里山に囲まれ、横浜市、横須賀市という大都市に隣接しながら緑豊かな地域である。

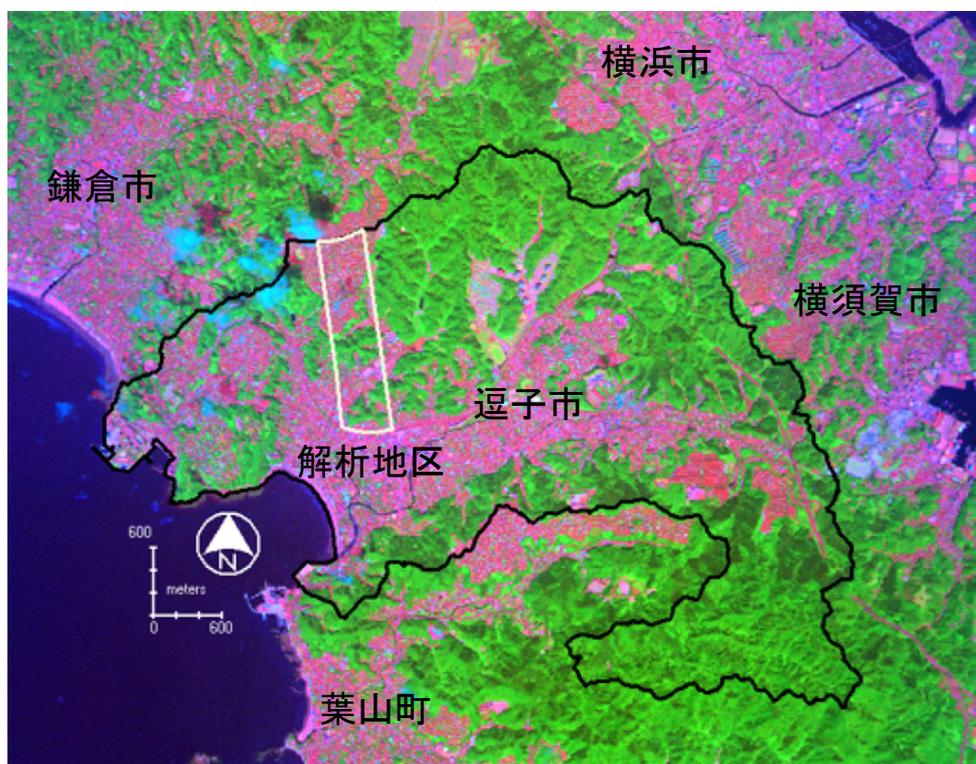


図5-3 解析地区周辺図

(夏季昼間高々度観測データの合成画像 R:熱赤外,G:近赤外,B:可視青)

5-3-3 高空間分解能航空機 MSS による観測

(1) 高空間分解能データの取得

従来の一般的な航空機搭載型 MSS に比して2倍の高分解能データ取得が可能な瞬時視野角 1.25mrad の MSS を利用し、対地高度もほぼ限界の 500m に設定することで、63cm 分解能のマルチスペクトルデータを取得した。第3章の解析条件での最適空間分解能 76cm に近い高空間分解能データである。また、第3章で利用した MESSR データに比べると、赤外域、中間赤外域のデータを取得していることに大きな違いがある。航空機 MSS の概要を表 5-2 に示す。

表5-2 航空機 MSS の観測概要と観測波長帯域

		観測波長帯域 (nm)	
観測日時	夏昼 2000. 8. 29, 12:35	1 可視域	458.9 - 483.6
	夏夜 2000. 8. 29, 19:50	2 可視域	550.0 - 575.1
	冬昼 2000. 2. 4, 13:50	3 可視域	657.3 - 675.2
	冬夜 2000. 2. 4, 19:20	4 可視域	663.3 - 680.4
観測高度	500m	5 可視域	682.9 - 707.3
		6 近赤外域	737.7 - 762.5
観測装置	AZM (中日本航空)	7 近赤外域	836.6 - 859.4
		8 近赤外域	987.0 - 1,091
瞬時視野角	1.25mrad	9 中間赤外域	1,444 - 1,547
走査角度	80°	10 中間赤外域	1,542 - 1,635
空間分解能	63cm (直下)	11 熱赤外域	7,960 - 10,530
観測波長帯域	12 バンド	12 熱赤外域	10,960 - 12,670

(2) 観測概要と日射環境

観測は夏季・冬季の昼・夜の4回行った。観測時における日射環境は取得データの特性に大きく影響する条件の一つである。起伏の多い里地では、斜面方位と傾斜角によって基本的な日射環境が決まると共に、樹木等による日陰・日影が部分的にも発生しており、非常に複雑な日射環境となっている。また、市街地では起伏の影響は少ないが、樹木に加えて、建造物による日影が多いことを特徴としている。

こうした観測時の日射環境の差異は、解析結果にも大きく影響する。太陽高度が高い日時に観測することによって日影面積の小さいデータを取得することが基本であるが、天候等の気象条件の制約から観測日時は決まってくる。そこで、実際の観測日時にお

ける天候と日射環境を解析条件として示す。天候は快晴で、解析地域上空には雲は存在しなかった。日中の観測時刻における太陽高度と方位角及び後述する 10m メッシュ DEM(Digital Elevation Model)より求めた日影図を図 5-4 に示す。建物や樹木等の高さを含まない標高データであるため、実際の日影とは異なるが、解析地域の日射環境を概観できる。

また、赤外域については、日没後の夜間データも取得しており、日中に比して影の影響が小さい解析に利用できる。

夏季日中の合成画像及び夜間画像を図 5-5-(1)に、冬季について図 5-5-(2)に示す。

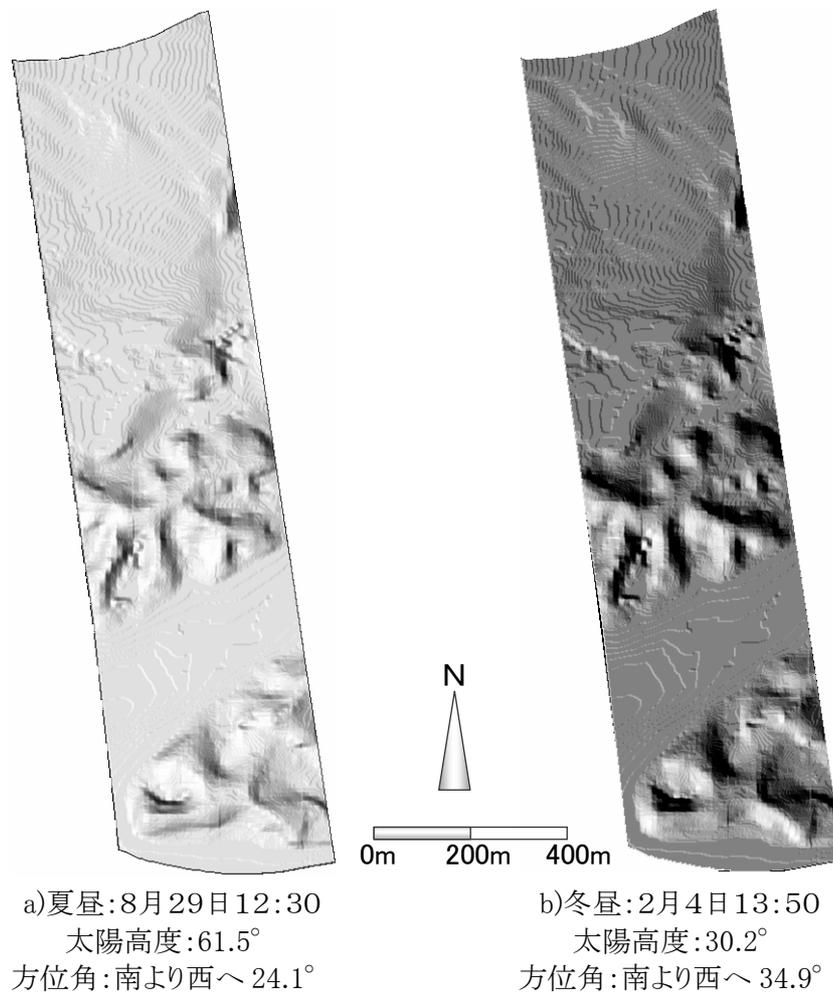


図5-4 10m メッシュ DEM による日影図

画像中心の位置:北緯 35.3° , 東経 139.5°

太陽位置:ET_AEE Ver.1.1(九州大学大学院総理工都市環境工学研究室)を使用して計算

日影図:Imagine Ver.8.3.1 (ERDAS 社)を使用して作成, グレースケールで日射量を相対表示

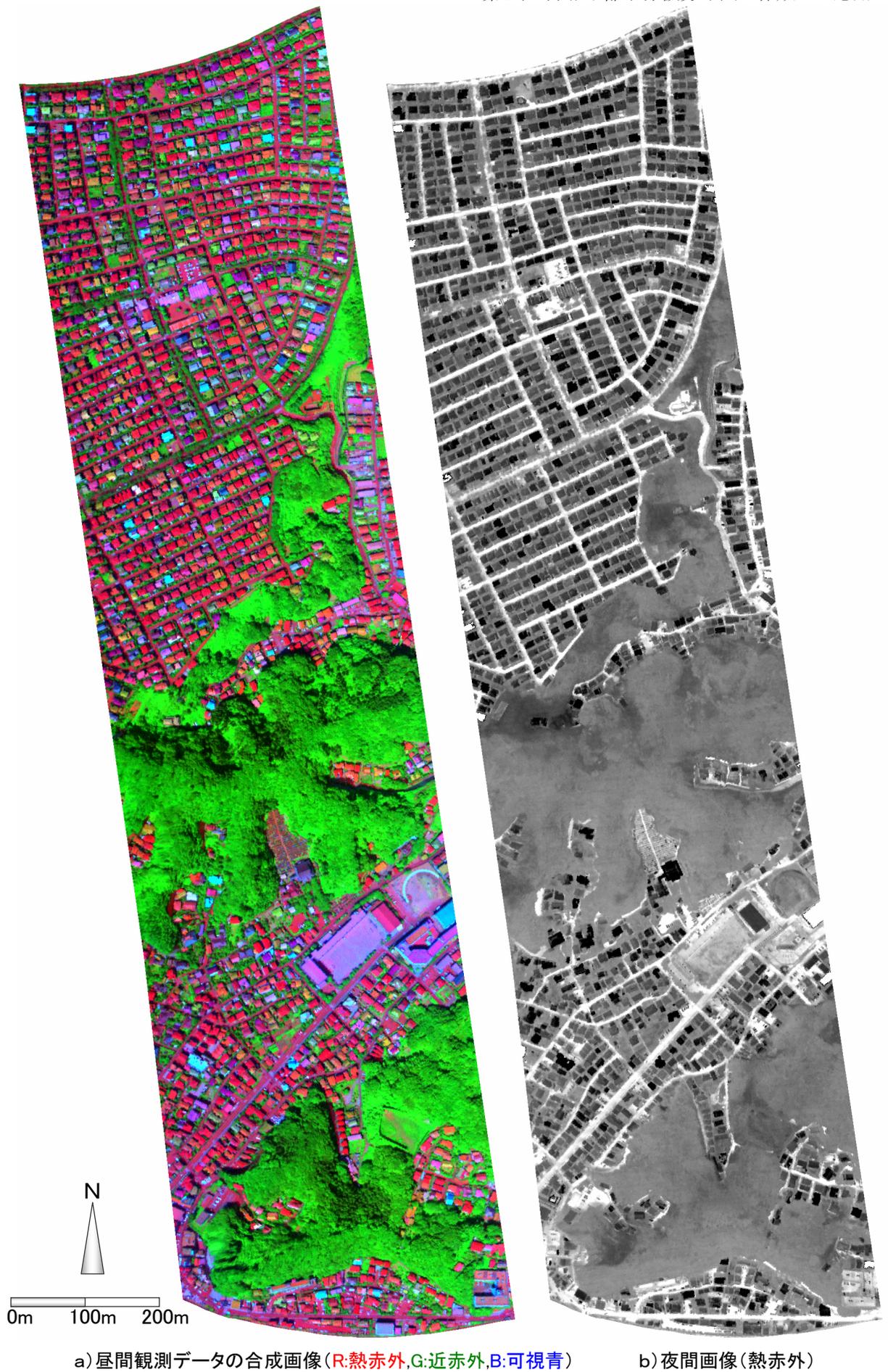


図5-5-(1) 航空機 MSS による夏季観測データ

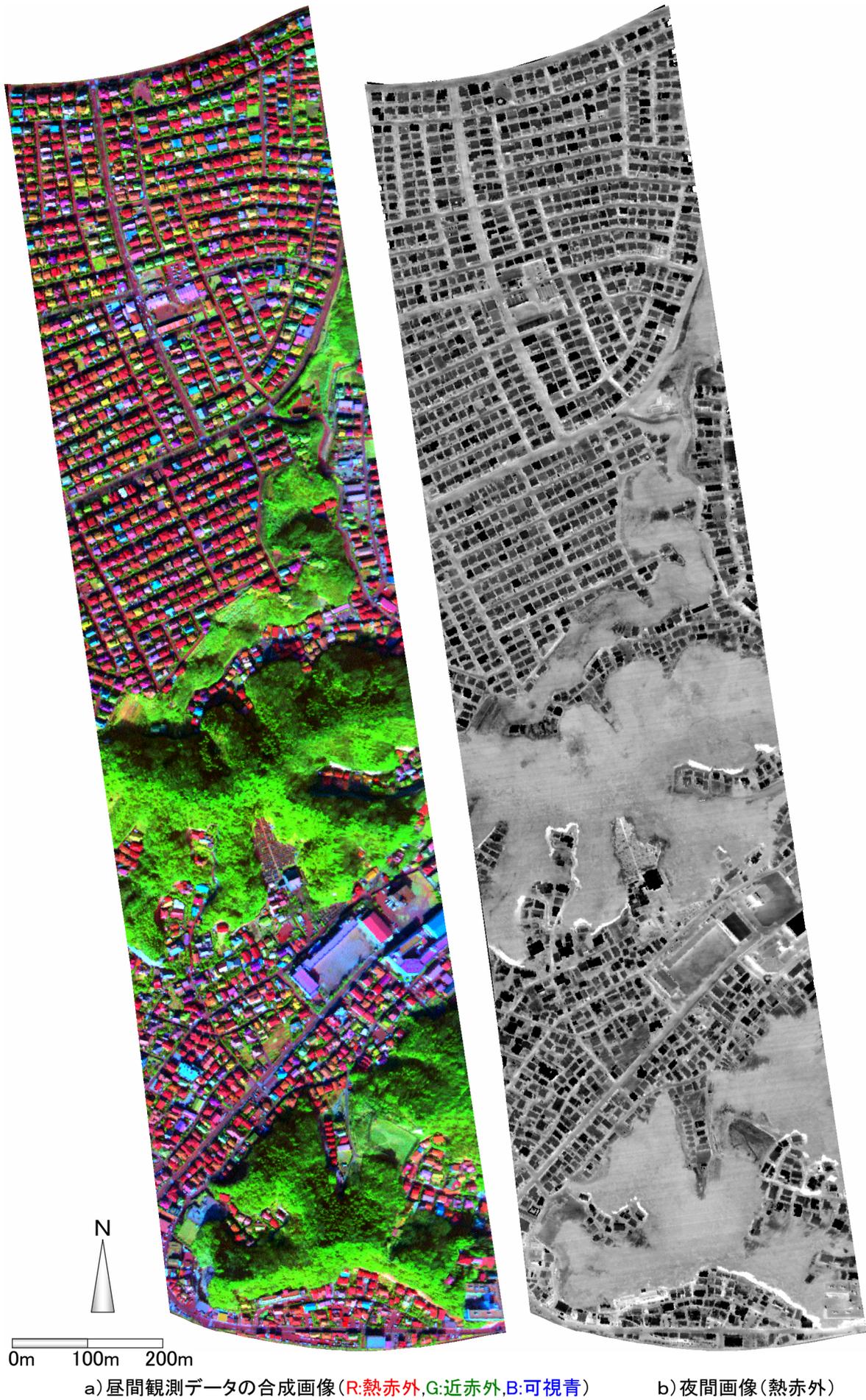


図5-5-(2) 航空機 MSS による冬季観測データ

5-3-4 既存情報のデジタル化によるGISデータの整備

リモートセンシングデータの解析には、地形図や植生図などの既存情報をいかに活用するかが、高精度の解析結果を得るために重要なポイントとなっている。また、解析により得られた成果はGISのデータの一つとして利用されることで、新たな成果を生み出し、発展していくことができよう。

ここで使用・整備したGISデータの概要を以下に示す。

(1) H11年度逗子市現存植生図のベクトルデータ(縮尺 1/2500)

平成11年度逗子市現存植生図(図5-1)をデジタル化し、ベクトルデータとして利用した。これは、S63年度に作成された現存植生図(1/1万)を基にして、空中写真と現地調査により、逗子市がH11年度に更新を行ったものである。成果は、1/2500都市計画基本図にプロットされている。図5-6に解析対象地区の植生図を示す。

(2) 都市計画基本調査のデジタルデータ(縮尺 1/2500)

H7年度の都市計画基礎調査によるデータを逗子市がデジタル化し、1/2500都市計画基本図相当の神奈川県デジタルマップとリンクさせたGISデータである。用途地域や建物階数など都市計画関連のデータで構成されているが、ここでの解析では建物の位置と、土地利用の道路を参照した。図5-7に解析対象地区の建物と道路画像を示す。

(3) 10mDEM(基図縮尺 1/25000)

北海道地図が1/25,000地形図の等高線から作成した10mメッシュDEMをリモートセンシングデータの幾何補正に使用した。これは、国土地理院作成の50mメッシュDEMと同じ縮尺の地形図から作成されているため、両者の標高値精度は同程度であるが、メッシュサイズを10mとすることで、詳細な起伏が表現されている。逗子市周辺で両者を比較したところ、丘陵部で最大10m以上の差異が見られた。この差は、航空機の鉛直下から30°地点での正射投影位置で約6mの差となる。ここでのMSSデータでは約10画素のずれに相当する。図5-8に解析対象地区のDEM画像を示す。

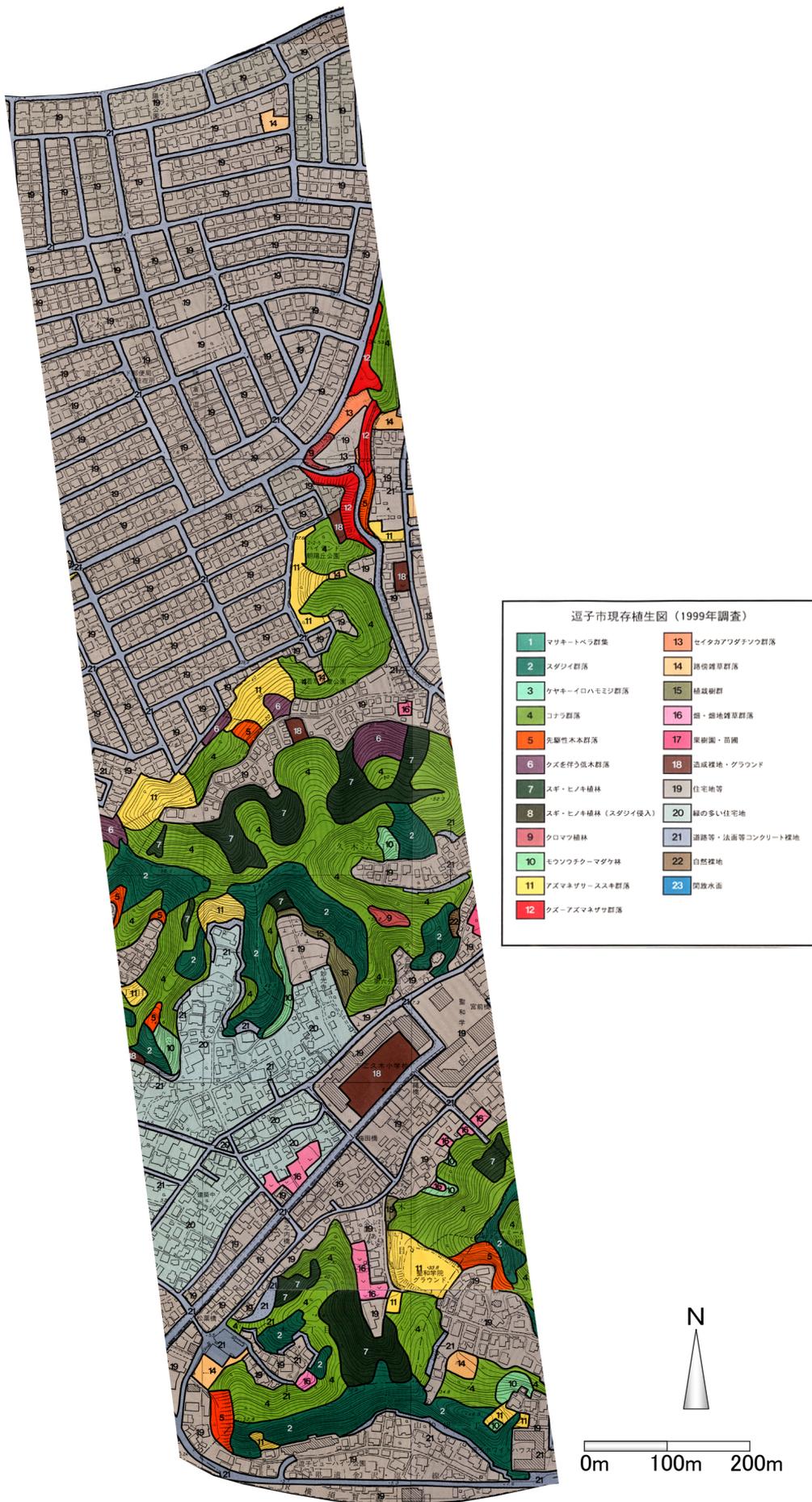


図5-6 解析対象地区の現存植生図



図5-7 解析対象地区の都市計画基礎調査画像(建物・道路)

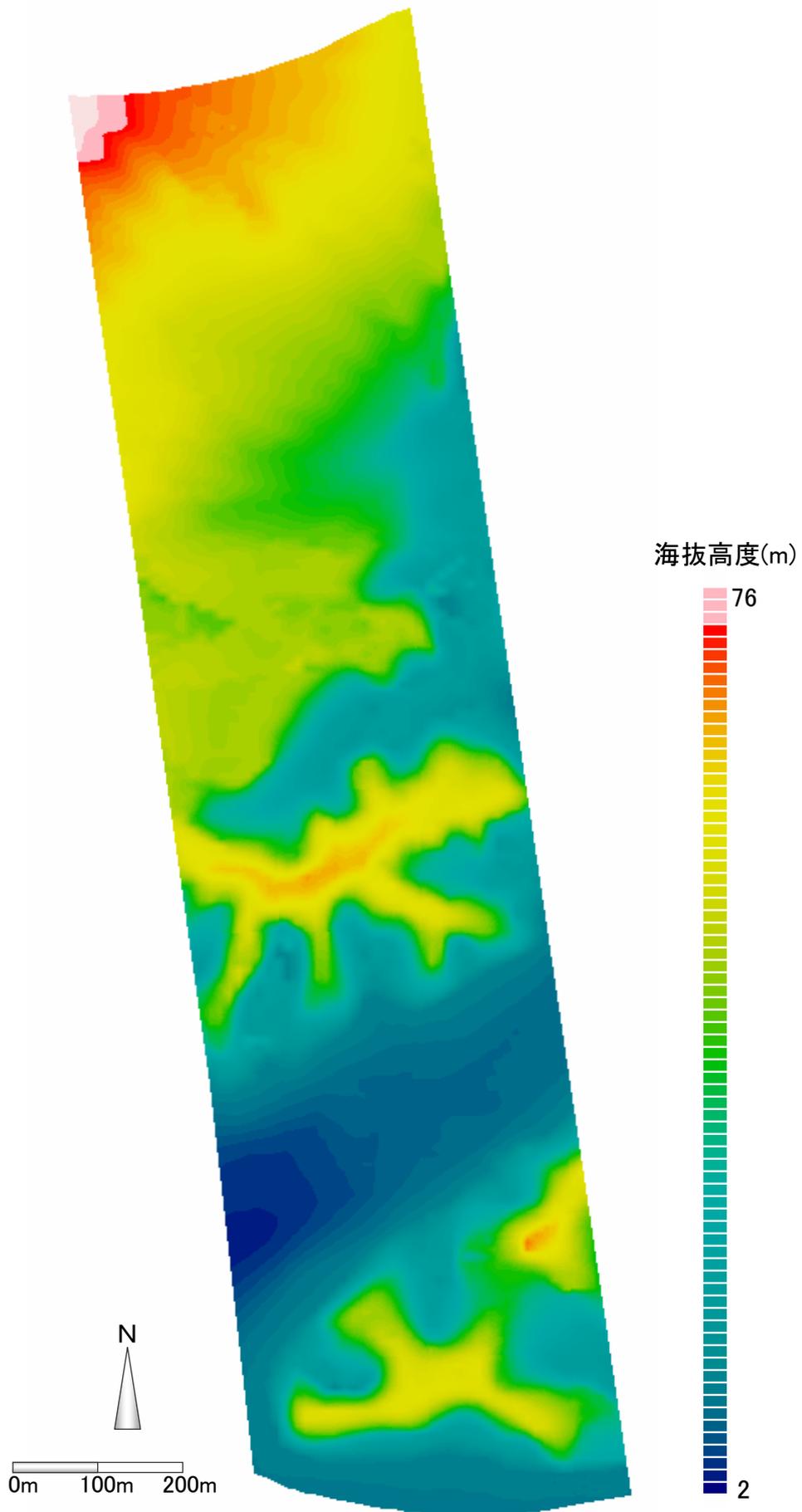


図5-8 解析対象地区の 10m メッシュ DEM

5-3-5 航空機リモートセンシングデータの補正方法

リモートセンシングデータと GIS データを複合利用する解析では、両者のレジストレーションが解析結果に求められるスケールに適合した精度で行われている必要がある。都市計画の多くは、1/2,500 スケールの情報が利用される。航空機による観測データは、局所的な画像歪み多いため、データを小ブロック単位で幾何補正する方法⁹⁾が有効とされている。この方法では、残差2m程度の補正精度を得ているが、1/2,500 スケールではさらに高精度の補正が必要となる。ここでは、GCPの取得位置による補正精度の向上を検討する。

これまで、地図上の位置を特定しやすい交差点の角や建物角に GCP を取得していた。しかし、高分解能データでも角の形は明瞭でないことによる誤差が考えられる。また、街路樹などに隠されていることも多い。一方、交差点の中央は見通しが良いが、中心の特定は作業者の主観によるところが多く、道路幅員が小さい場合には誤差が大きくなると思われるため使用していなかった。そこで、幅員の異なる交差道路の中央に GCP を取得し、幅員と補正精度の関係を検討した。

GCP取得位置とGCP残差との関係を夏季昼間の観測データについて表5-3に示す。これより、幅員8mと4mの場合に顕著な差は認められず、いずれの幅員でも比較対照とした建物角よりも残差が小さいことがわかった。建物は道路のように平坦でないため、直下の観測以外では倒れ込みの影響があること及び地図上では0.2mm(実寸50cm)を限度に移動されることがあることにより精度が低いと考えられる。

表5-3 GCP取得位置と残差との関係

取得位置	交差点	交差点	交差点	建物角
	幅員 20m	幅員 8m	幅員 4m	
残差 RMS (画素)	1.15	1.30	1.35	1.68

主に交差点中央にGCPを取得して補正を行った場合の各観測データの補正の残差を表5-4に示す。夏季、冬季共に夜間のデータの補正精度が高い。これは、GCPを取得した道路の表面温度とその周囲の表面温度の差が夜間において大きくなるため、熱赤外域のデータにおいて道路が明瞭に特定できるためである。特に冬季の夜間において、この温度差が最も大きくなることにより、最高の補正精度を得ている。

以上の結果、全体での補正の残差は、昼間観測データで約2画素(1.2m)、夜間観測データで1画素(0.6m)から1.5画素(1m)となった。これは、1/2,500縮尺における公共測量規定の図化精度である0.75m(水平精度図上0.3mm)には及ばないが、1/5,000縮尺の図化精度1.5mには十分対応できる精度の補正が行えたことを示している。

表5-4 各観測データの幾何補正の残差

	分割番号	分割ライン数	GCP取得数	カラム方向残差	ライン方向残差	総合残差
夏 昼	1	1300	110	1.71	0.95	1.95
	2	1000	62	1.59	1.09	1.92
夏 夜	1	400	26	1.27	0.8	1.51
	2	1100	115	1.25	0.93	1.55
	3	1100	86	1.35	0.82	1.58
冬 昼	1	900	57	1.58	1.14	1.95
	2	1200	87	1.46	1.37	2
	3	1000	68	1.62	1.05	1.93
冬 夜	1	650	33	0.86	0.74	1.14
	2	650	39	0.37	0.37	0.52
	3	700	45	0.6	0.48	0.77
	4	1100	38	0.41	0.39	0.56
	5	1000	35	0.81	0.67	1.05

5-3-6 市街地及び里地の緑の分光特性の比較

里地と市街地それぞれの緑は、単位要素の面積が大きく異なっていることは観測画像からも明らかであるが、さらに詳細に観察すると、林床部の被覆や地形、樹冠密度など生育状態にも違いがあることが分かる。こうした両地域の緑の違いが観測データではどのように現れてくるかを主に合成画像の観察による定性的な違いを示した上で、観測値のヒストグラムを用いて考察する。

(1) 落葉樹にみられる違い

まず、最も顕著に違いが現れている画像として、冬季昼間の合成画像を拡大して図5-9に示す。市街地の桜並木と里地のコナラ林は、両者共に落葉樹であり、冬季観測データでは近赤外域の観測値が低くなっていることが予想される。しかし、画像に見られるように、コナラ林は夏季同様に近赤外域を割り当てた緑が明るく表示されている。これは、里山の落葉樹では林床部に落葉が堆積していたり、低木や草が生育していたり

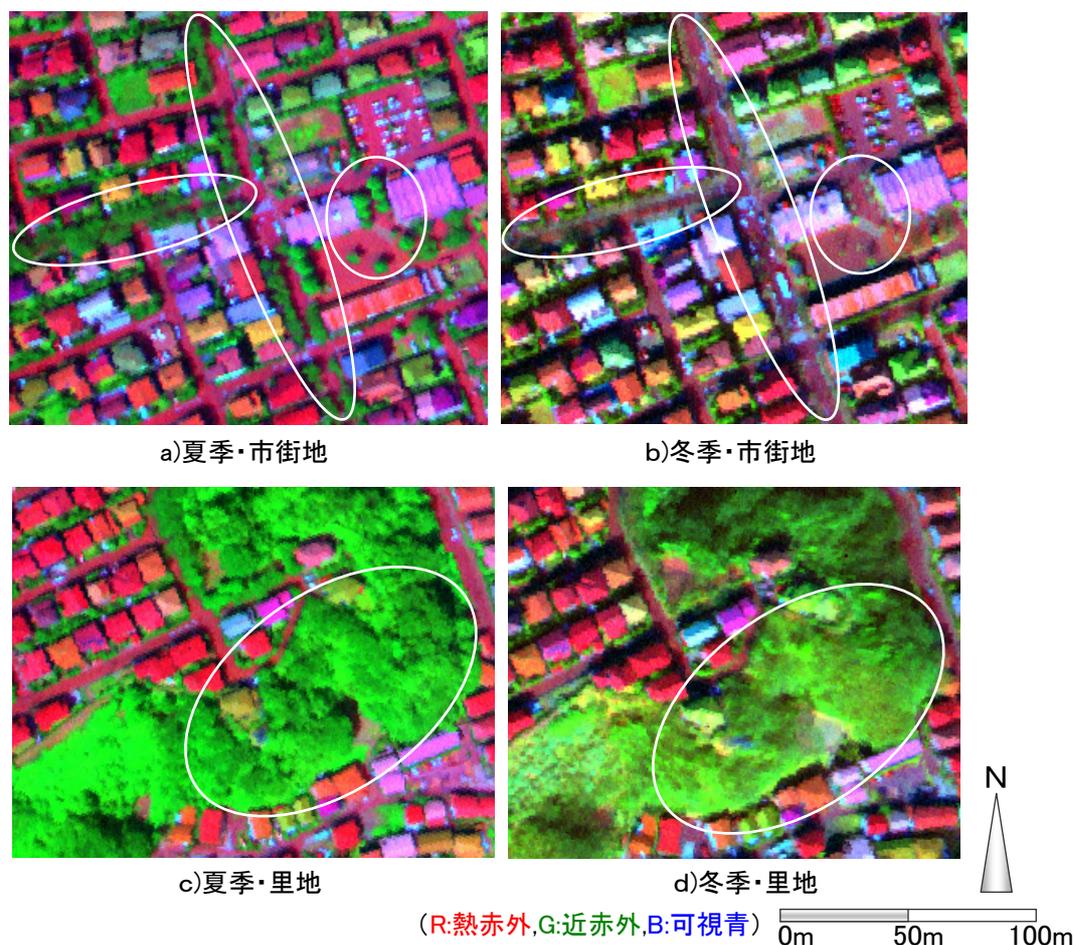


図5-9 冬季及び夏季の合成画像における里地と市街地の落葉樹の観察

することにより、市街地の舗装面に囲まれて生育している落葉よりも近赤外域の反射が強くなっているためと考えられる。また、夏季データでも里地の緑は市街地の緑に比して明るく見えている部分が多い。これも、生育状況や活性度の違いが第一に影響していると考えられる。

(2)各波長帯域の観測値の違い

両地区の緑のみの夏季観測の近赤外域データのヒストグラムを示したのが図 5-10 である。なお、緑は次項以降の解析で得られた緑被分布を使用した。このヒストグラムからも、市街地の緑の分光反射強度が里地の緑に比して高いものが多いことが理解できる。

また、緑の特徴を強調できる波長帯域である、可視域赤、近赤外域、熱赤外域(昼)、熱赤外域(夜)について、各波長帯間の観測値の散布図でそれぞれの緑の位置を求めて図 5-11 に示す。これより、両地域の緑は、各波長帯間でも異なる分光特性を持っていることが確認できる。

以上より、里地と市街地に分割して解析を進めることとする。

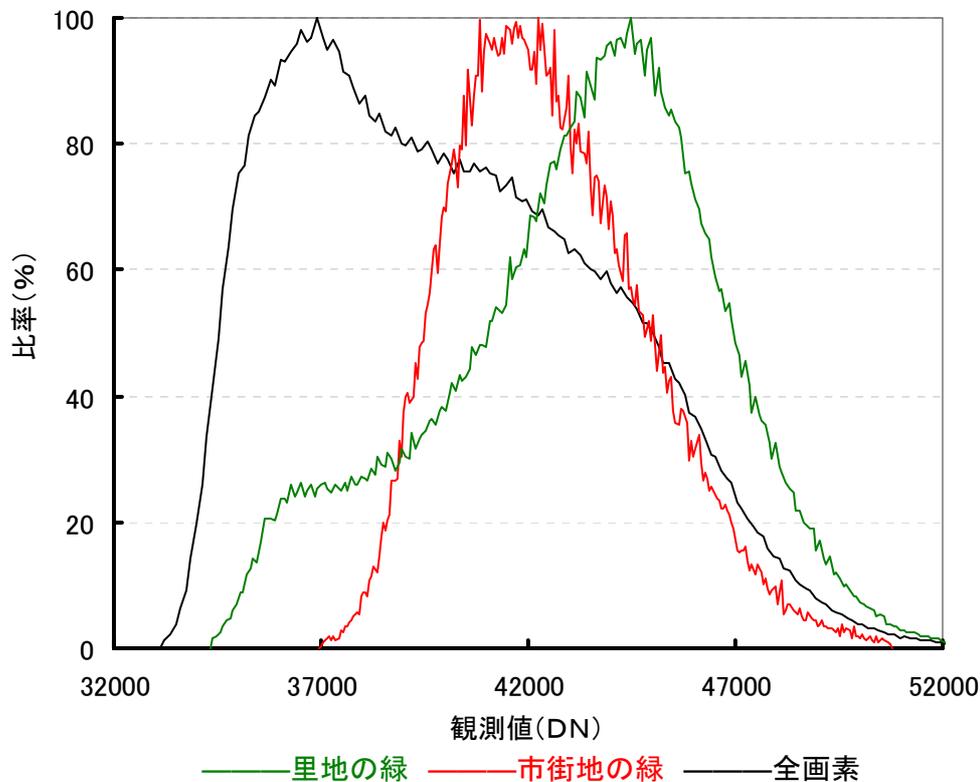


図5-10 地域ごとの緑の夏季昼間の近赤外域観測値のヒストグラム
(各地域の最頻値を1とした場合の比率)

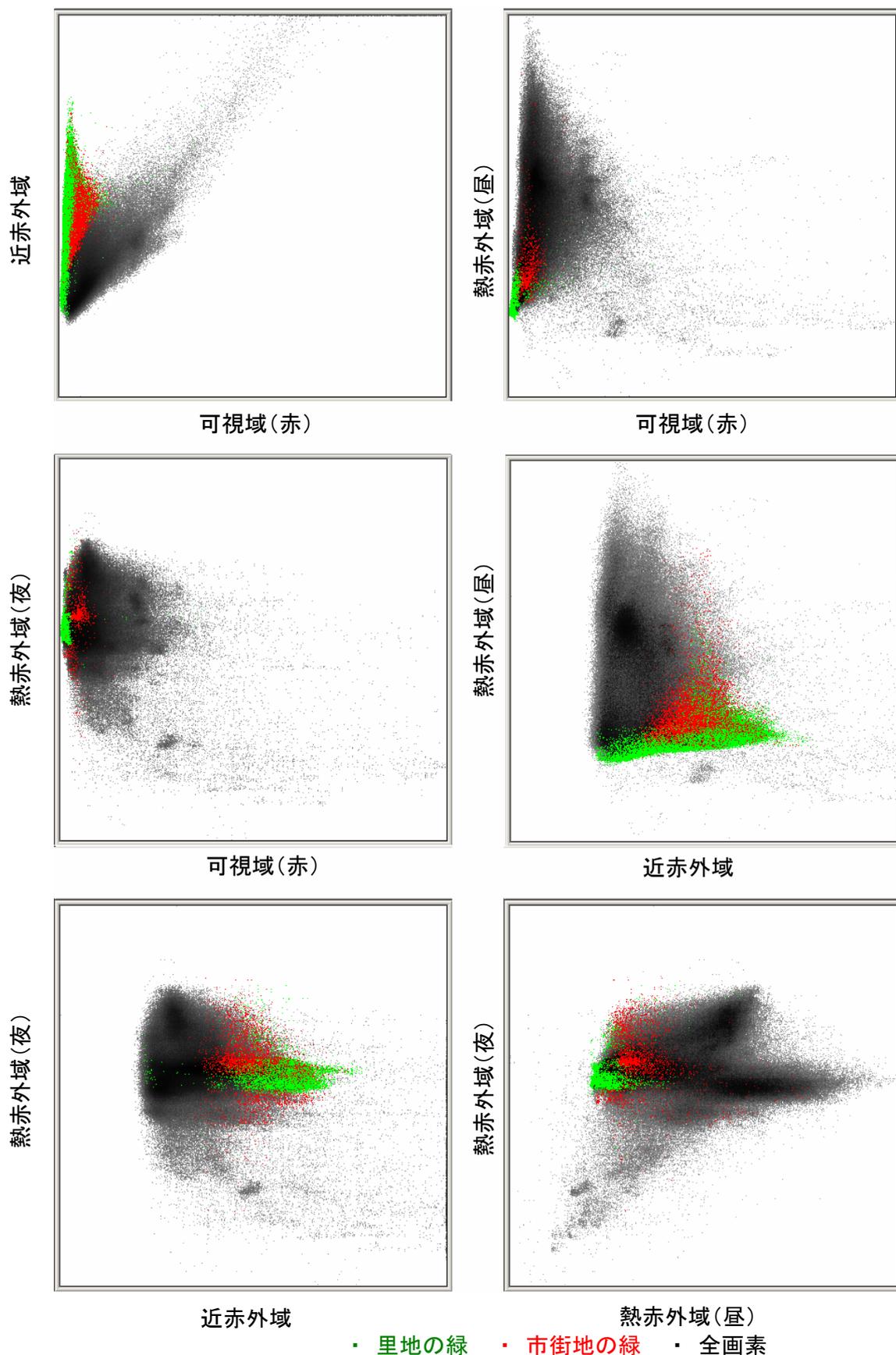


図5-11 各波長帯域間の散布図における市街地と里地の緑の分布の違い
 (各波長帯域の全画素の最小・最大値を軸の両端部に割当てて左下を最小値とした)

(3) 地域分割による合成画像の変化

最後に、地域を分割することにより、合成画像の見え方がどのように変化するかを考察する。図 5-11 の散布図において両地域の緑の分布領域の差異が最も大きい近赤外域と熱赤外域(昼)の合成画像を図 5-12 に示す。熱赤外域を赤、近赤外域を青と緑に割り当てている。また、それぞれの画像の全画素の平均値から $\pm 2\sigma$ (σ :標準偏差)の領域を0-255に割り当てて強調表示している。

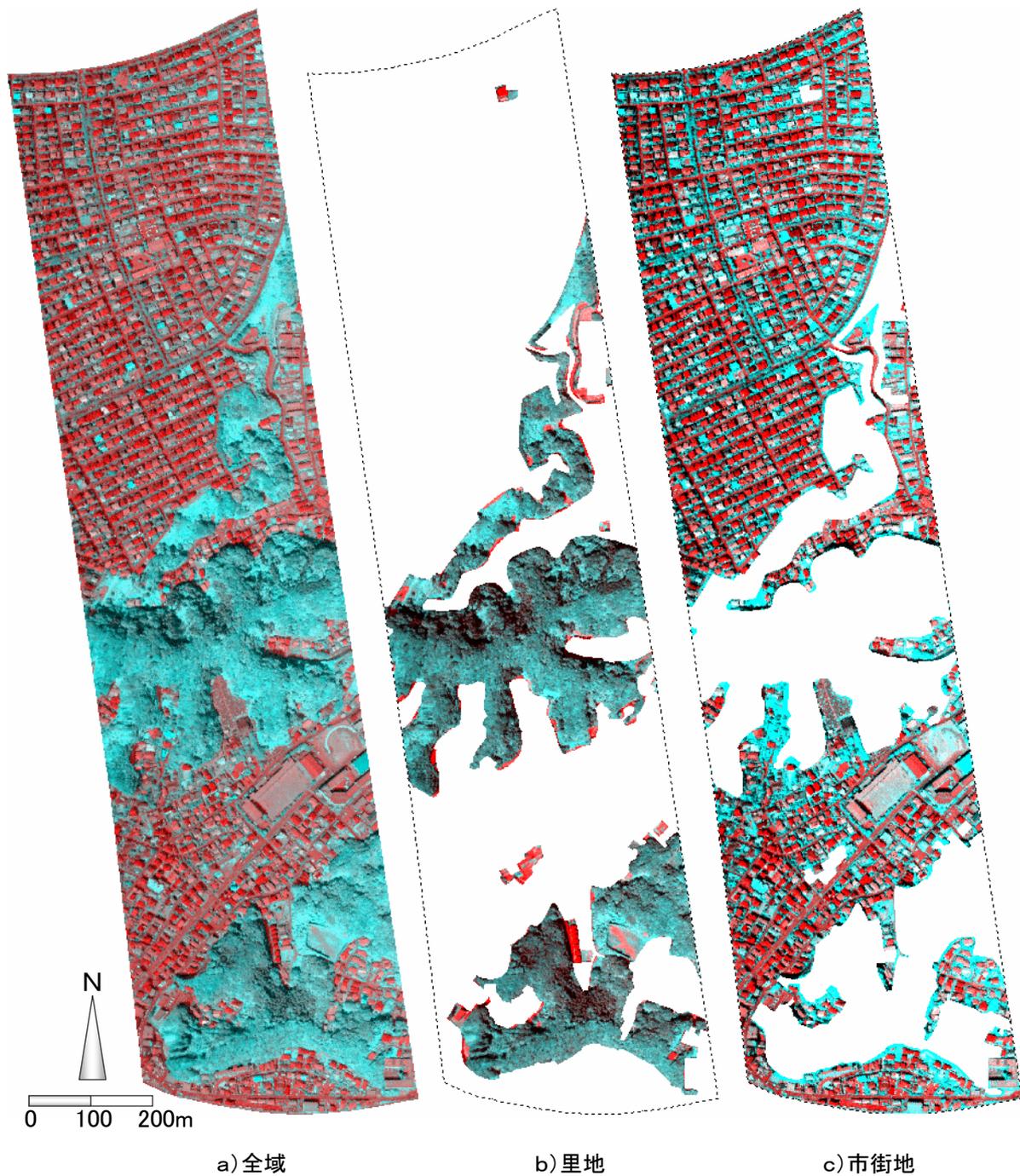


図5-12 夏季昼間観測データの合成画像 (R:熱赤外,G・B:近赤外)

里地の緑は近赤外域の分布幅が大きく、熱赤外域の分布幅が小さい。市街地の緑は逆に熱赤外域が大きく、近赤外域の分布幅が小さい。このため、全域でストレッチした場合には、それぞれの緑の色調の差異が小さくなっている。これに対して、地域を分割してストレッチした画像では、里地の緑の中にテクスチャーが見えてくると共に市街地の緑が鮮明になっている様子が分かる。それぞれの画像を部分拡大して図 5-13 に示す。

以上、既存情報の一つである現存植生図を利用して、緑の地域毎の分光特性に応じた分割を前処理として行ったうえで解析を進めることの有利さが、定性的な観察からも読みとれる。

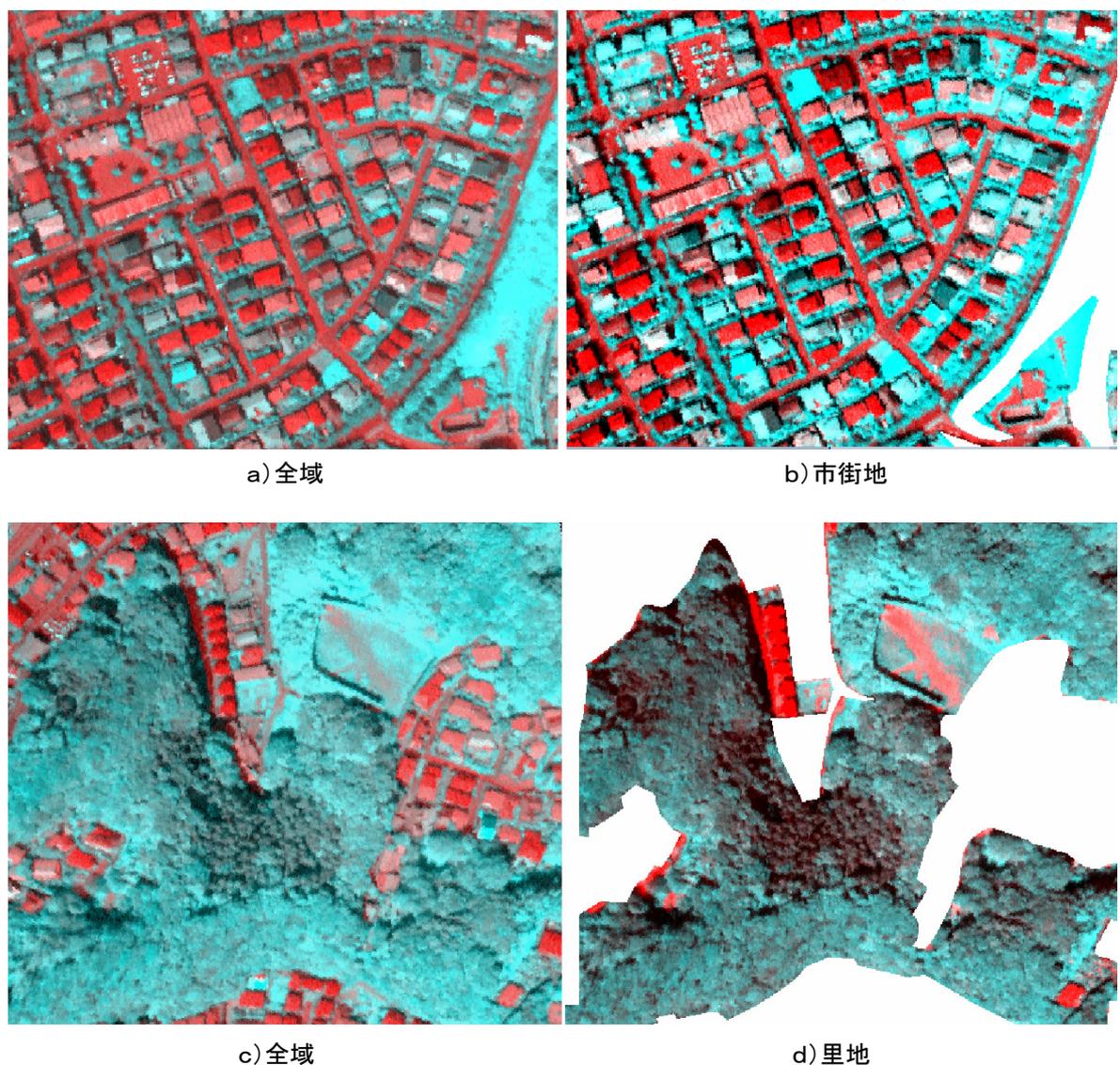


図5-13 夏季昼間観測データの合成画像(部分拡大, R:熱赤外,G・B:近赤外)

5-4 里地の緑被分布図の作成手順

5-4-1 利用する波長帯の選択

この地域には、現存植生図における植生群落9種類、植林2種類、竹林、植栽樹群の合計13種類が存在する。樹種等の区分が詳細である一方で、緑被分布としてみたときの分布領域の線引きは大まかにしか行われていない。このため、緑被分布詳細図で分類対象とした樹木と草地の混在が多く見られる。これは、地上踏査による分布領域の把握の困難さに加えて、最終的な調査成果が1万分の1から5万分の1といった小縮尺の地図に表現されるか、10m以上のメッシュにまとめて利用されるためと考えられる。また、一部には調査時点以後の改変等により市街地に分類した土地被覆となった箇所もみられる。

これらを修正することで、市街地とバランスのとれた緑被分布詳細図を作成する。修正のための解析は、緑と緑以外の判別と樹木と草地の判別を同時に行う方法と、両者を階層的に順次行う方法が考えられる。それぞれの方法を検討し、里地の緑被分布の修正に適した手順を考察する。

緑と緑以外の判別は一般的に近赤外域の反射率の差を利用して行われる。しかし、図5-9に見られるように、里山は起伏が大きいため影の部分が多く分布する。日向と日影では観測値が大きく異なり、緑であっても近赤外域の観測値は小さい。このため、緑以外と緑の影は近赤外域の観測値が近似してしまう。こうした日射環境の差異を簡易に補正し、緑と緑以外の差異を強調できるよう考えられた指標がNDVI(Normalized Difference Vegetation Index)である。近赤外域と可視赤の差を和で除して求めるため、日射量の影響が緩和される。ここでも、近赤外域に代えてNDVIを用いる。

また、合成画像や空中カラー写真を観察したところ、里地に分布する緑以外の被覆は、造成裸地、建物屋根、道路等である。これらの土地被覆は、NDVIが小さく、熱赤外域の観測値が高いものが多い。この特性を利用することにより、緑と緑以外は高精度に判別できる¹⁰⁾。さらに、夜間の熱赤外データでは、昼の熱赤外域データに比して短時間のみ日影になっていた部分の影響が小さいため、これを併用することでさらに影の影響を小さくできると考えられる。

以上より、NDVI、昼と夜の熱赤外域の3データを用いて緑被分布の修正を進める。

5-4-2 現存植生図の修正による緑被分布図の作成

修正のための分類は、3データのクラスター解析による教師なし分類を行った後、最尤法による教師付き分類を実施する方法を用いた。この方法は教師なし分類で判別効率を確認できるというメリットがある。クラスター解析は ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) 法を用いた。ISODATA は非階層的クラスタリングであり、繰り返し毎に統計値を計算し、最短距離法で自己組織化していく方法である。次に、各クラスターの分布を合成画像上で確認し、樹木、草地、緑以外のクラスターを判定した。最後に、各クラスターの統計値を教師として最尤法による分類を行った。

(1) クラスター分類の結果

樹木、草、緑以外の3クラスターの各波長帯域間の散布図上での位置を図 5-14 に示す。また、クラスター間の分離度をみるため平均値間のユークリッド距離を求めて表 5-5 に示す。

単独のデータでみると、緑(樹木・草)と緑以外は昼間観測の熱赤外域データにおいて最も分離度が高い。一方、樹木と草の分離度は、昼の熱赤外域データが最も低くなっている。これは、緑以外の表面温度が緑に比して非常に高いためであり、先に述べたように緑の中の温度差を見る場合、緑以外を分離して解析する必要性を示している。

また、夜間観測の熱赤外データにおける樹木と緑以外の分離度が全組合せの中で最も低くなっている。これは、樹木の温度が夜間もあまり低下しないのに対して、緑以外に含まれる舗装面以外の裸地や屋根面の温度が急激に低下することによるという従来の知見で説明できる。

次に、2データの組合せで分離度を考察する。緑と緑以外の分離度でみると熱赤外域の昼のデータを含む組合せで分離度が高いが、昼の熱赤外域データ単独での分離度から大きく向上していない。樹木と草の分離度では NDVI と夜間観測の熱赤外データの組合せにおいて高い分離度となっている。これは、夜間の温度差が顕著であることに加えて、昼間の樹木は日陰となっている部分が草地に比して多いため NDVI が低い範囲に分布していることによると考えられる。

さらに、3データの組合せではいずれの分離度も最も高くなっている。

以上より、里地の緑被分布の把握には昼夜のデータ利用が適していることが分かる。

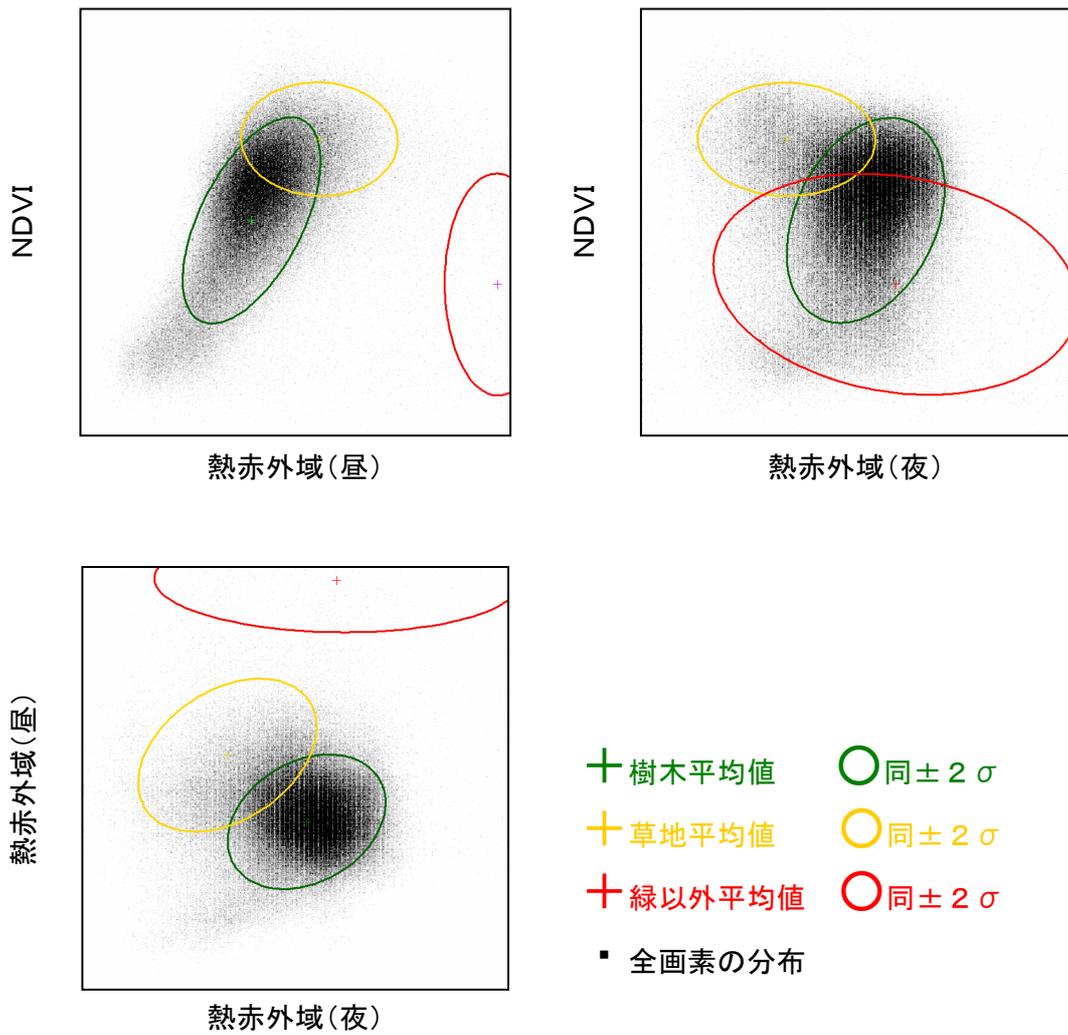


図5-14 2データの散布図上での各クラスターの位置

(各波長帯域の全画素の最小・最大値を軸の両端部に割当てて左下を最小値とした)

表5-5 データの組合せ毎の各クラスターの分離度

(画素値のユークリッド距離)

データ		樹木-草	樹木-緑以外	草-緑以外
1データ	NDVI	12,139	9,592	21,731
	熱赤外(昼)	10,070	36,452	26,382
	熱赤外(夜)	12,046	4,544	16,590
2データ	NDVI 熱赤外(昼)	15,772	37,693	34,180
	NDVI 熱赤外(夜)	17,101	10,614	27,340
	熱赤外(昼) 熱赤外(夜)	15,701	36,734	31,165
	熱赤外(夜)	15,701	36,734	31,165
3データ		19,846	37,966	37,993

(2) 最尤法による分類結果

樹木・草地・緑以外の3クラスターのNDVI・熱赤外域(昼)・熱赤外域(夜)の3データにおける統計値を利用して、最尤法による分類を行った。分類された画素数を現存植生図と比較した緑被分布の修正結果として表 5-6 に示す。また、修正結果画像を図 5-15 に示す。

なお、樹木は現存植生図における以下の 11 カテゴリーに設定した。

1. マサキートベラ群集, 2. スダジイ群落, 3. ケヤキイロハモミジ群落, 4. コナラ群落, 5. 先駆性木本群落, 6. クズを伴う木本群落, 7. スギ・ヒノキ植林, 8. スギ・ヒノキ植林(スダジイ侵入), 9. クロマツ植林, 10. モウソウチク・マダケ林
15. 植栽樹群

草地は同様に以下の5カテゴリーとした。

11. アズマネザサ・ススキ群落, 12. クズ・アズマネザサ群落, 13. セカアワダチソウ群落, 14. 路傍雑草群落, 16. 畑・畑地雑草群落とした。

里地全域では 6.4%に造成等によって緑被がない地域がある。この比率は、樹木に比較すると草地で高くなっており、草地の改変が大きいことがわかる。

現存植生図の樹木の構成比率と修正結果の樹木の比率はほぼ一致している。一方、現存植生図における草地の半分近くは樹木として分類されている。これらから、現地踏査による現存植生図では草地と樹木の線引きが詳細に行われていないことが考えられる。

以上、里地の緑被分布詳細図を現存植生図の修正により行い、修正後の樹木の構成比率から妥当と考えられる修正結果を得た。

表5-6 緑被分布の修正結果

	修正分類結果			合計 構成比率	
	樹木	草地	緑以外		
現存植生図	樹木	435,540	24,991	15,167	475,698
	草地	91.6%	5.3%	3.2%	84.2%
修正結果	樹木	40,594	27,456	21,262	89,312
	草地	45.5%	30.7%	23.8%	15.8%
合計	476,134	52,447	36,429	565,010	
構成比率	84.3%	9.3%	6.4%		

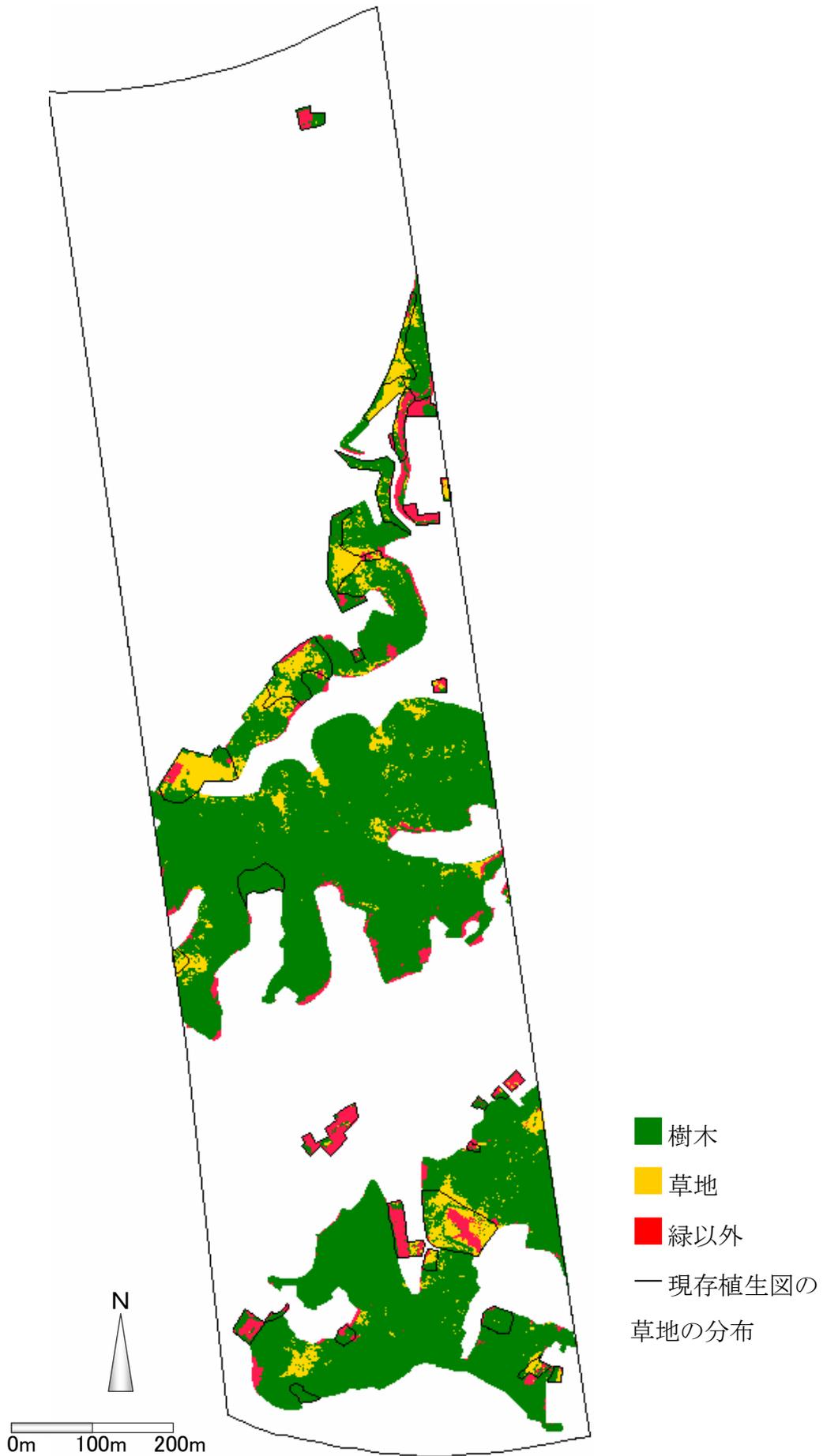


図5-15 里地の緑被分布詳細図

5-5 市街地の緑被分布図の作成手順

現存植生図において、緑被分布が調査されていない、住宅地、緑の多い住宅地、道路・法面、造成裸地、自然裸地の5カテゴリーを、市街地としている。市街地では、緑の分布が示されていないため、都市環境計画を進める上では、土地利用図と同様の利用しかできない。また、第2章・第3章の知見から、戸建住宅地では、街路樹や庭木の様に、小規模の緑が多いことから、第4章で提案した、画素内緑被率から画素内緑被配置を求める手法により、高空間分解能リモートセンシングデータよりも、さらに小規模の緑の抽出を行う。

5-5-1 画素内緑被率推定のための MRVI の閾値設定方法

緑を含むミクセルの画素内緑被率を推定する指標としては、シミュレーションデータを用いた検討から、MRVI(Modified Ratio Vegetation Index)が提案されている¹¹⁾。しかし、実際の観測データを用いた解析では、画素内緑被率 100%と0%に設定する、MRVIの閾値を決める方法が、課題として残されている¹²⁾。

ここでは、MRVI のヒストグラムにおいて、緑と緑以外、および、緑を含むミクセルの分布範囲を、設定する方法として、過小推定と過剰推定の観点から作成した評価式を提案し、推定結果画像から、その妥当性を考察する。

(1)MRVI のヒストグラムの形状

閾値設定の解析に先立ち、解析地域を分割したことによる、ヒストグラムの形状の変化について検討する。大規模な緑地を含んだ地域設定を行った例として、市街地と里地を含む全域の MRVI を、小規模な緑のみを含む地域設定を行った例として、市街地のみの MRVI を、(1)式により求めた。

$$\text{MRVI} = \frac{\text{近赤外域 B8}}{(\text{可視域青 B1} + \text{緑 B2} + \text{赤 B3} + \text{近赤外域 B8})} \quad \dots\dots(1)$$

算出されたそれぞれの MRVI において、最小値を0、最大値を255に割り当て、このときの頻度分布を、図 5-15 に示す。全域のヒストグラムは、里地の大規模な緑と、市街地の緑以外によって、明瞭な二山の分布形状がみられる。一方、市街地のみのヒストグラムは、緑の絶対量が少ないため、主に緑が分布する、MRVI が高い範囲のピークが低く、

二山の形状が崩れている。

また、MRVI の最大値が小さくなったために、緑以外と緑のピークの値が近接している。これは、図 5-10 に示したように、市街地の小規模な緑は、里山の大規模な緑に比して、近赤外域 B8 の値が小さいために、MRVI も小さくなっているためである。

以上より、解析地域の範囲設定が画素内緑被率の推定に影響することが明らかであり、画素内緑被率により抽出を必要としない大規模な緑を含まない範囲で MRVI を算出する必要があるということが確認できた。

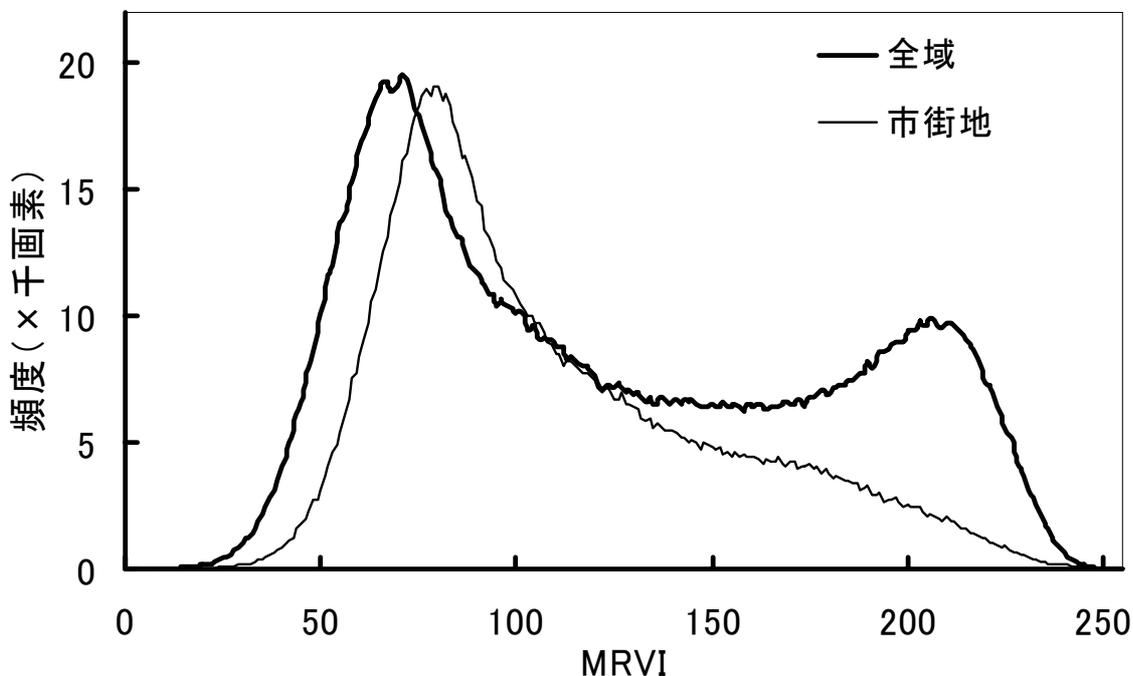


図5-15 解析範囲の設定の違いによる MRVI の分布形状の変化

(2) 日陰・日影の影響

ここでは、今回の観測データにおける日陰・日影となっている面積を、検証地区として選定した住宅地において確認し、解析条件を明確にする。

MRVI は近赤外域と可視域の比演算をおこなうため、NDVI と同様に日陰や日影の影響を緩和できる植生指標である。日陰は直達日射が当たらない面であるが、天空日射量や反射日射量は、日向面に比較して、大きくは低下していない場合が多く、植生指

標によって、緑以外と判別が可能な場合が多い。一方、建物や高木による日影に分布する緑は、天空日射量や反射日射量も大きく低下している場合が多く、分類が困難であることが多い。

検証地区は、戸建住宅団地の4街区から構成されている地区を選定した。道路が直交しておらず住宅の方向が一定でないため、日影の形状・分布にバリエーションが多い。また、街路樹や庭木に加えて、空地の草地等もあり、緑のバリエーションも多い地区である。図 5-16 に、検証地区の可視域合成画像を示す。

検証地区を、クラスター分類により、緑と緑以外、両者の日影、いずれかの日影の5クラスに分類した。クラスター分類は、近赤外域データと、昼の熱赤外域データを用いて、ISODATA 法により行った。各クラスターの散布図上での位置を、図 5-17 に示す。また、分類結果画像を、図 5-18 に示す。

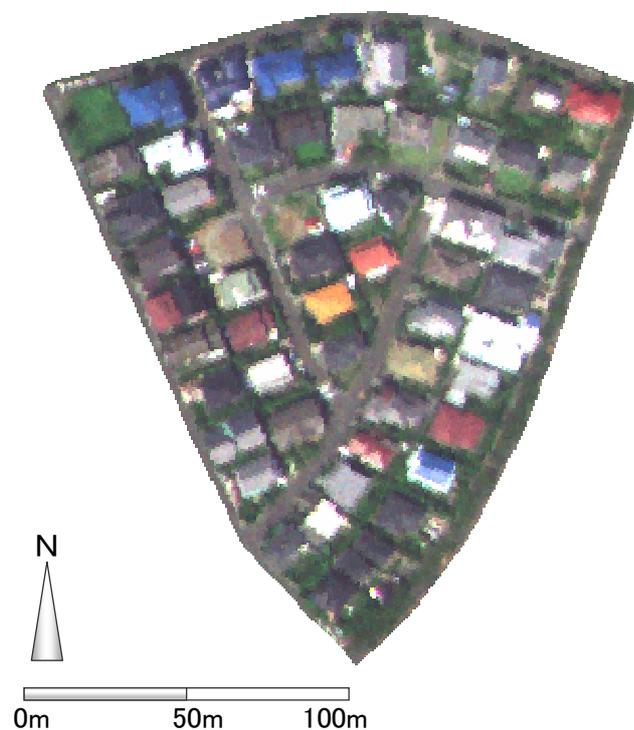


図5-16 検証地区の可視域合成画像

(R:可視域赤,G:可視域緑,B:可視青)

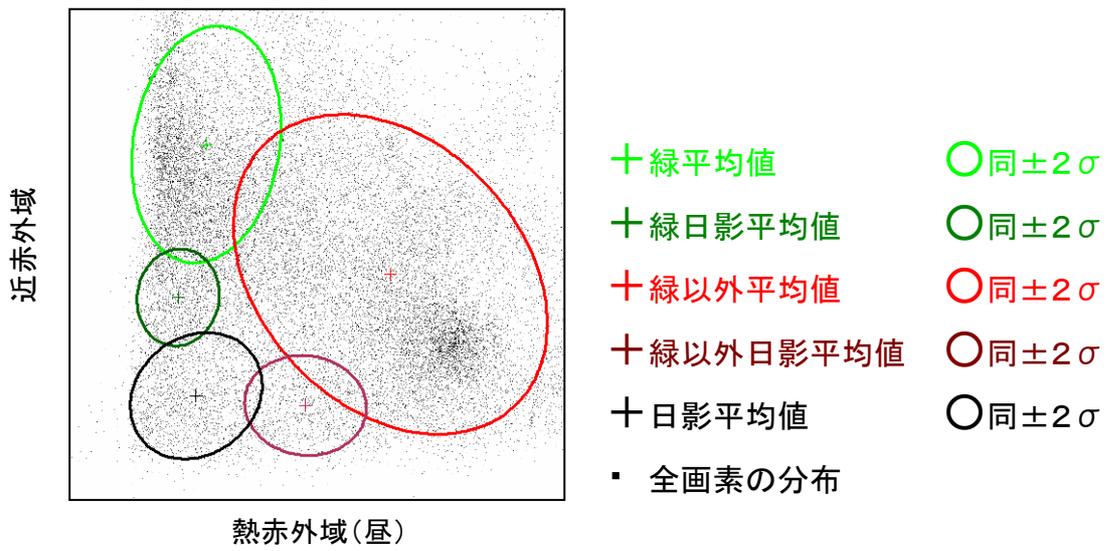


図5-17 散布図上での各クラスターの位置

(各波長帯域の最小・最大値を軸の両端に割り当て、左下を最小値とした)

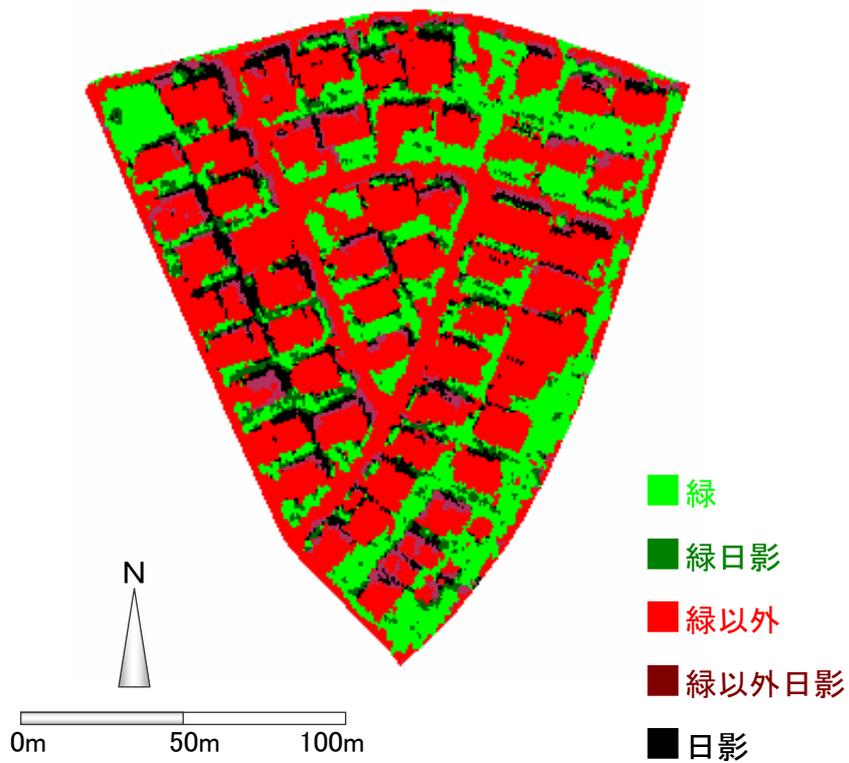


図5-18 検証地区のクラスター分類結果

5クラスに分類された画素の構成比率等を表 5-7 に示す。これより、緑・緑以外と判別できない日影は、全体の 7.4%を占めている。また、緑の約 16%が日影部に分布していることがわかる。

図 5-19 は、各クラスの MRVI のヒストグラムである。これより、緑の日影の MRVI は、日向の緑の MRVI の分布の下端部分に位置していることがわかる。また、緑以外の日影と、判別できない日影は、MRVI の分布では、ほぼ等しい位置にあることがわかる。

以上より、緑の日影は緑と統合して扱うことが可能であり、緑以外の日影、および、判別できない日影は、緑以外として扱うことが妥当と考えられる。

表5-7 各クラスの画素数・面積, および, 構成比率

	画素数	面積(m ²)	構成比率	緑の構成比率
緑	13,071	5,188	25.4%	84.1%
緑影	2,477	983	4.8%	15.9%
緑以外	29,774	11,817	58.0%	
緑以外影	2,253	894	4.4%	
影	3,796	1,507	7.4%	
合計	51,371	20,389		

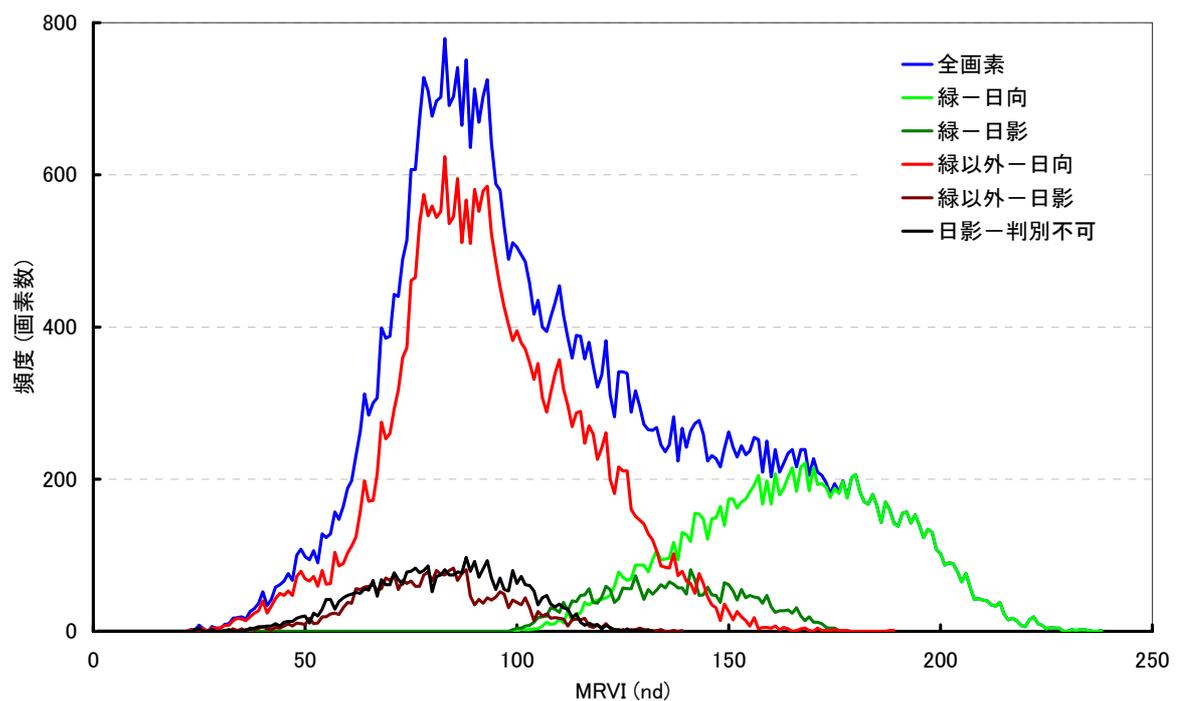


図5-19 各クラスの MRVI のヒストグラム

(3)ミクセルの分布モデルの設定

市街地のみで算出したMRVIのヒストグラムから画素内緑被率推定のためのMRVIの閾値設定方法を検討する。

まず、文献 11 と同様に MRVI の低域と高域部分を利用して緑と緑以外のピュアピクセルの分布を正規分布と仮定して求める。また、緑を含むミクセルの分布も平均値が緑と緑以外の推定分布の中央にあり、分散 σ^2 の正規分布と仮定する。標準偏差 σ は緑及び緑以外の推定分布の平均値間の距離の $1/8$ を仮定する。すなわち各平均値の位置が $\pm 4\sigma$ となるように配置する。これらを図示したのが図 5-20 である。

以下の解析はこのモデルを基に検討を進める。

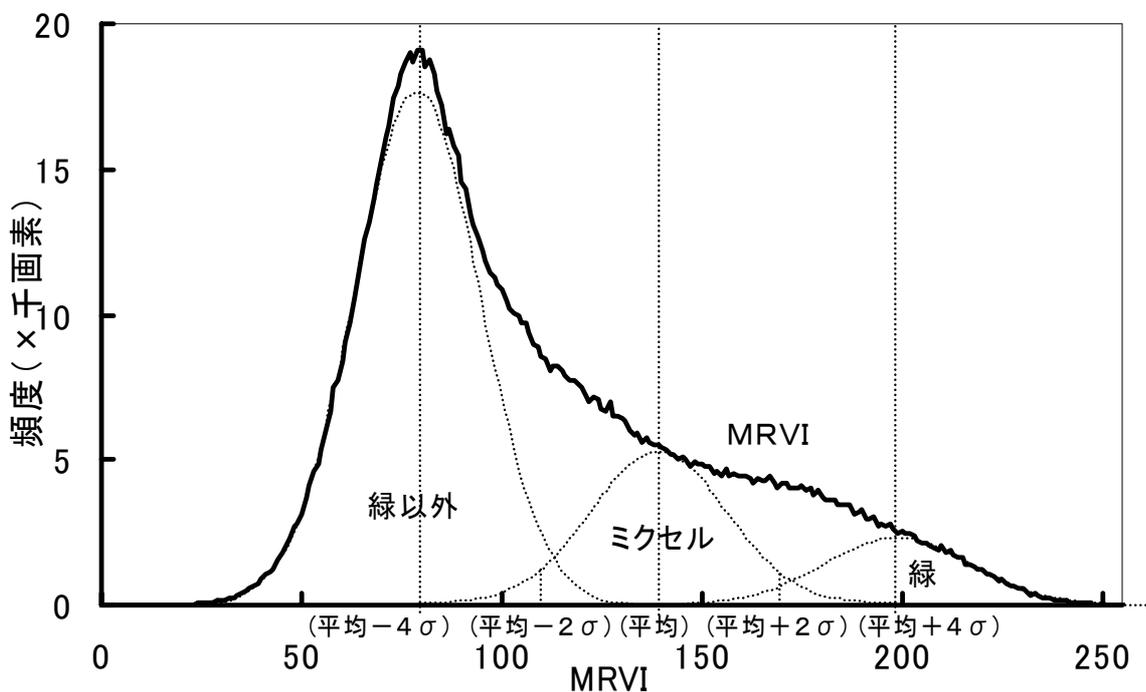


図5-20 緑・緑以外の推定分布と仮定したミクセルの分布

(4)MRVI の閾値設定方法

MRVI と画素内緑被率は線形回帰できるため、文献9の尹らの方法では、緑と緑以外の推定分布の平均値を、それぞれ画素内緑被率 100%と 0%の閾値とし、その間に均等に画素内緑被率を割り振っている。しかし、正規分布と仮定したミクセルの、どの範囲を有意な領域と考えるかによって、この画素内緑被率の割り振りは変動する。

ここでは、分布頻度の小さい両端部の影響が過大に出ないように、MRVI の閾値設定を行う方法を検討する。解析には、緑と緑以外の分布が既知である検証地区が必要であり、(2)項で選定した地区を、ここでも検証地区として使用する。

緑以外としては都市計画基礎調査のデジタルデータから建物を利用する。道路も利用できそうであるが、街路樹に覆われた部分があるため設定からはずした。緑の分布は、2種類の合成画像から求めた。まず、図 5-4 に示すように、(R:G:B)を(熱赤外:近赤外:可視青)とした合成画像において、明らかにピュアピクセルの緑であると判断できる画素を抽出した。次に(R:G:B)に(可視赤:緑:青)を割り当てたナチュラルカラー画像において抽出箇所の修正を行った。これは、近赤外域の反射が強いことで緑の周辺のミクセルまでがピュアピクセルと判断する可能性があったための修正である。以上の土地被覆分布を図 5-21 に示す。

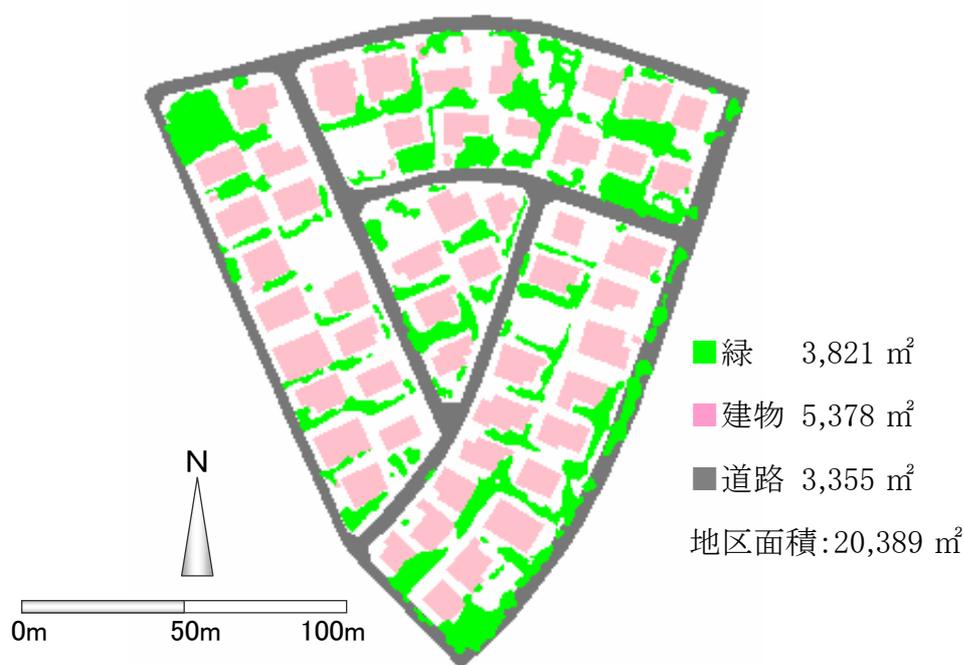


図5-21 検証地区の緑と建物の分布

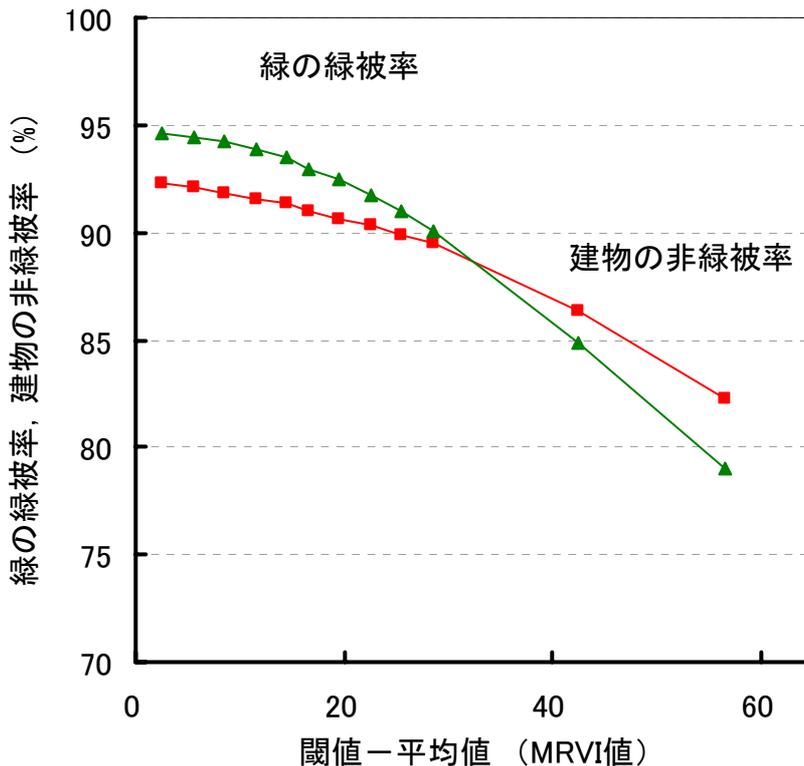


図5-22 緑の緑被率及び建物の非緑被率と閾値設定位置の関係

検証地区の MRVI に対して、平均値からの距離を指標にして、閾値設定を行い画素内緑被率を 10%間隔で割り当てた場合の建物・緑それぞれの緑被率及び非緑被率(1-緑被率)を示したものが図 5-22 である。この図からは、閾値の設定範囲と推定精度には線形関係がないということが分かるのみであり、どの位置が最適かを判断することはできない。

(5) 評価指標の提案

ここでは、最適値を持つ評価指標を提案することにより、閾値設定の最適位置を決定する。図 5-22 から、緑と建物の緑被率及び非緑被率の和や差を求めただけでは最適値は存在しないことが推定される。そこで、緑が緑 0%、建物が緑 100%と推定された比率を加えて、以下のような評価指標を設定した。

評価指標1: 緑の緑被率 - 建物が緑 100%と推定された比率

評価指標2: 建物の非緑被率 - 緑が緑 0%と推定された比率

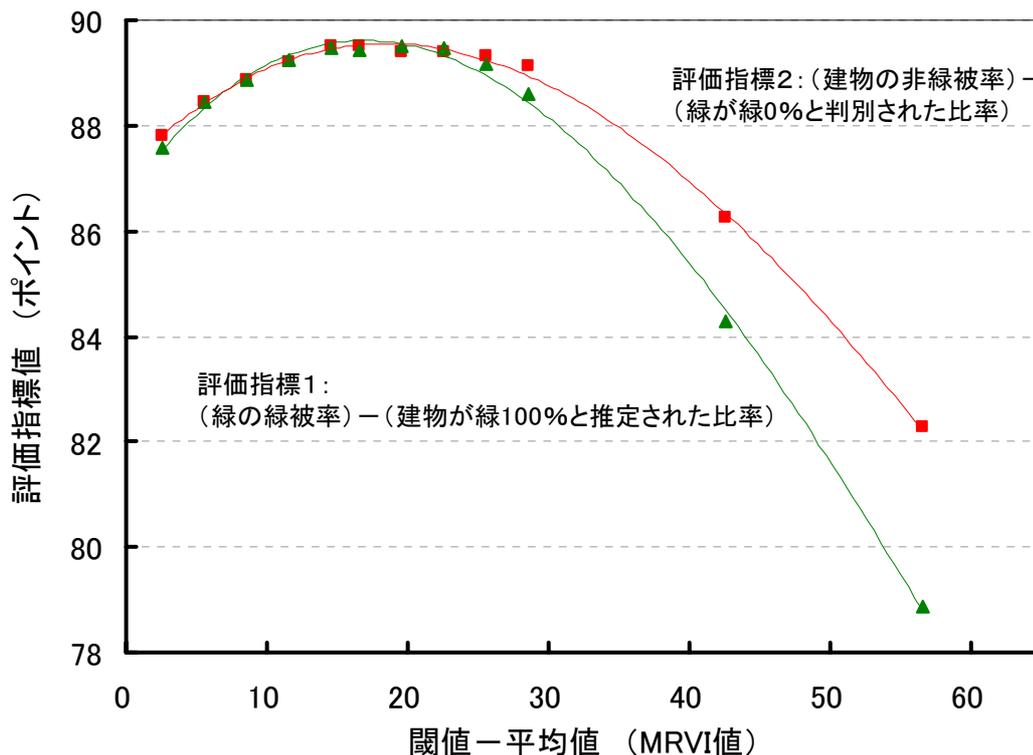


図5-23 閾値設定のための評価指標値と閾値との関係

これらの指標は、閾値がミクセルの平均値に近づく程、緑の緑被率と建物の非緑被率が向上することに対して、両者を完全に誤推定する比率も増加してしまう様子を数値化しようとするものである。これらの指標と MRVI の閾値とミクセルの平均値の距離の関係を求めて図 5-23 に示す。これより、両指標とも最適値を持っており、評価指標として利用できることが分かる。また、両指標の最適値が平均値から同じ距離に出現していることから、ミクセル分布の平均値の設定位置が妥当であることも推定できる。

以上より、ここでの MRVI の閾値は平均値から ±19.5 の位置に設定し、画素内緑被率を求める。

(6)画素内緑被率画像を用いた閾値設定の妥当性の考察

検証地区の緑と建物の境界部分に存在するミクセルの分布を画素内緑被率画像で確認し、上記の評価指標を用いた閾値設定の妥当性を検討する。図 5-24 は画素内緑被率画像と MRVI の閾値のミクセルの平均値からの距離の関係を示している。

閾値を ± 56.5 とした場合が、緑と緑以外の推定分布の平均値に閾値を設定した画像である。検証地区全域にミクセルが分布しており、明らかに実際と異なる分布である。また、 ± 42.5 及び ± 28.5 の場合が仮定したミクセルの正規分布の中央から $\pm 3\sigma$ 、 $\pm 2\sigma$ の位置に閾値を設定した場合の画像である。これらの画像でも緑の境界部分以外に多くのミクセルがみられる。

平均値 ± 19.5 が前項の評価指標で最適と判断された閾値設定の画像である。他の設定の画像に比較して緑の境界部分に多くのミクセルが分布すると共に緑の中心部分にミクセルが少ないことが確認できる。また、 ± 7 の画像では緑の面積が過少に推定されると共に、本来の目的である画素内緑被率で抽出する小規模の緑を含むミクセルの分布が非常に少ない。

以上、閾値設定のための評価指標の妥当性が高いことが、画素内緑被率画像におけるミクセルの分布から推定できる。

(7)画素内緑被率の推定に使用する波長帯域の選定

MRVI より作成した画素内緑被率画像を詳細にみると、戸建住宅の屋根全面が緑を含むミクセルに分類されているものがある。GIS データの整備後に建物が解体され草地になったものや屋上緑化が施された建物であることも考えられるが、可視域合成画像との比較からは、灰色・赤色系のスレート屋根に明らかに誤分類であるミクセルが存在している。これをわかりやすくするため、建物のみ画素内緑被率画像を抜き出して、図 5-25 に示す。

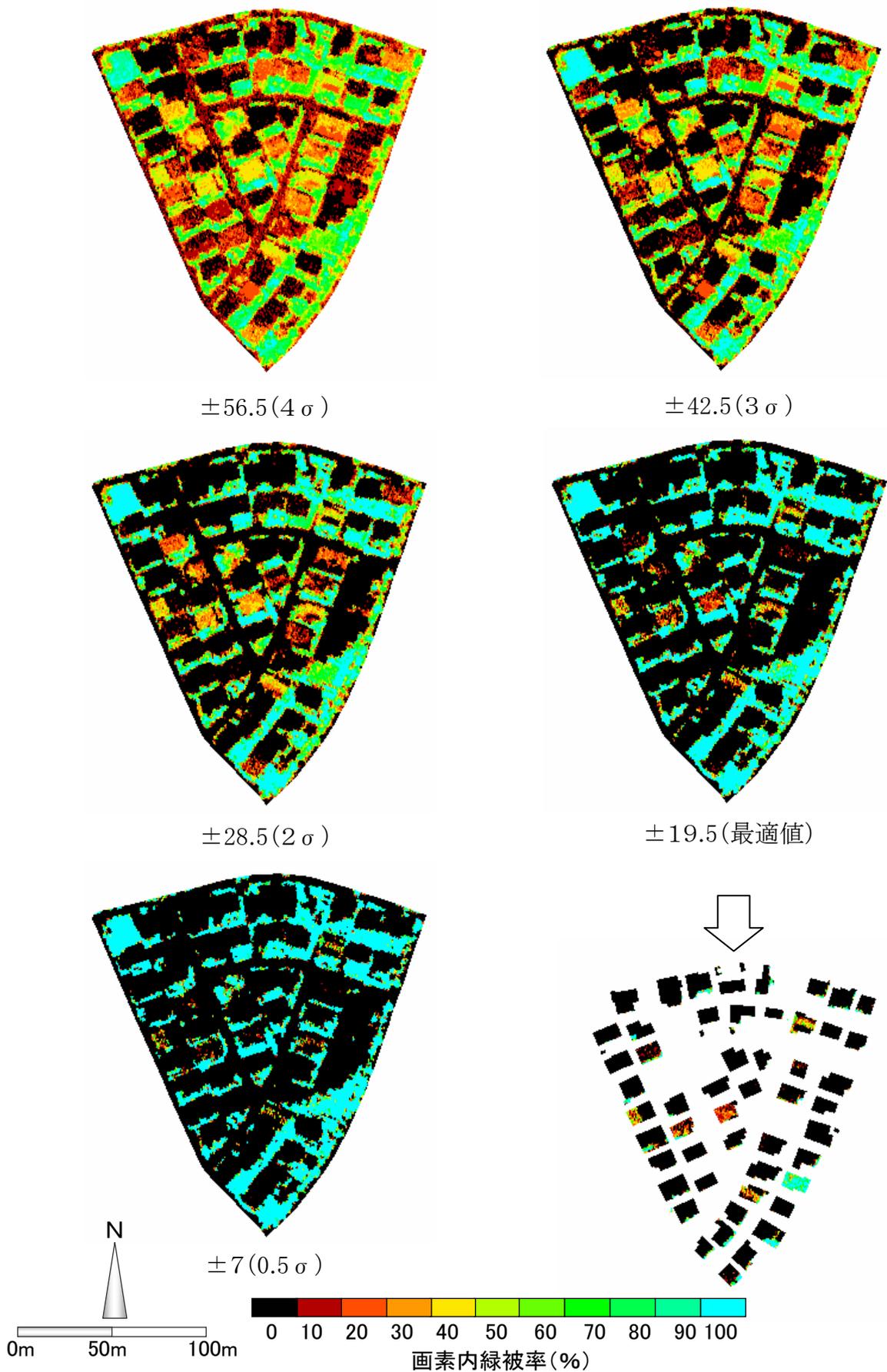


図5-24 各閾値設定の画素内緑被率画像

図5-25 建物だけの画素内緑被率画像

建物の一部に庭木が重なっているものがあるが屋根面全体が画素内緑被率 80%以上のミクセルとなっているものや画素内緑被率 20~40%のミクセルが散在している建物がある。これらの屋根は、可視域・近赤外域において緑に近い分光放射輝度値をとるために誤分類されていると考えられる。これを改善するには、MRVI の閾値設定の微調整も一つの方法であるが、屋根面だけに注目して閾値設定を見直した場合、他の部分で誤推定が発生する危険性がある。そこで、同時に観測した中間赤外域、熱赤外域のデータを MRVI の算出に加える方法を検討することとした。

既往の研究¹¹⁾によると熱赤外データは、高温となる屋根面と低温の樹木の分離に有効であるが、芝地のように高温の緑や被覆による蓄熱容量の差異があるために良好な画素内緑被率を得ることができないとされている。中間赤外域 (B10, 1,542nm ~ 1,635nm) は、比較的大気による減衰が大きい波長帯域にあるためノイズの多いデータであり、これまで分類に使用されることことが少なかった波長帯である。ここでは、中間赤外域データの利用を検討する

図5-26は誤分類されることの多い赤色系・灰色系の屋根及び緑の各バンドの観測値の一例である。いずれも、近赤外域 (B8) が高く、可視域の B1・B2 が低い類似した観測値となっている。このため、MRVI が大きくなり、画素内緑被率を誤推定する原因となっていると考えられる。また、可視域の B3 では屋根が緑よりも高い観測値となる傾向が見られるが、中間赤外域 (B10) の観測値ではより大きな差異がみられ、中間赤外域利用による推定精度の向上が期待される。

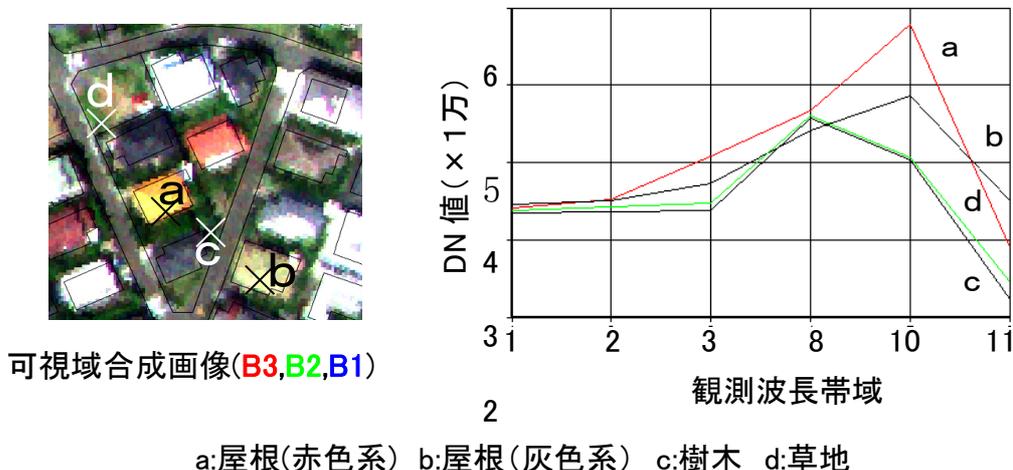


図5-26 木造住宅の屋根と緑の分光特性の例

建物屋根の誤分類を低減させるように MRVI を修正した MRVI' を中間赤外域を加えて新たに(2)式で定義し、画素内緑被率を推定に用いる。

$$\text{MRVI}' = \frac{\text{近赤外 B8}}{\text{可視青 B1} + \text{緑 B2} + \text{赤 B4} + \text{近赤外 B8} + \text{中間赤外 B10}} \dots\dots(2)$$

図 5-29 に MRVI' より推定した画素内緑被率画像を MRVI との比較して示す。また、各画素内緑被率の画素数、画素内緑被率を集計した緑被率、画素内緑被率 10-90%の画素をミクセルとしたミクセル比率を表 5-8 に示す。

中間赤外域を加えることにより建物に関する緑被率の誤推定を 0.8 ポイント低減し、ミクセル比率の過剰推定は 2.4 ポイント低減している。また、画素内緑被率が 10%の建物の誤分類数が大きく低減しており、中間赤外域を加えた MRVI' の有効性が確認できる。

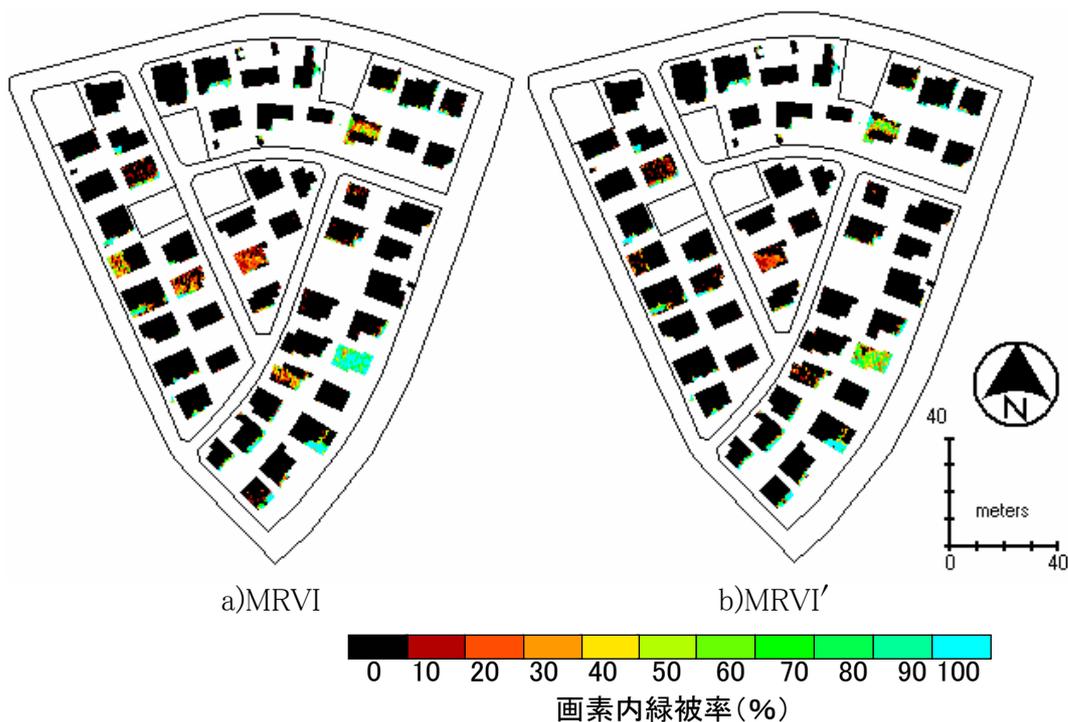


図5-29 MRVI と MRVI'による建物のみの画素内緑被率画像の比較

表5-8 MRVI と MRVI'の画素内緑被率推定性能の比較

画素内 緑被率	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	ミクセル 数	ミクセル 比率	緑被 率
MRVI	11,713	351	242	181	172	105	99	120	110	99	358	1,479	10.9%	6.9%
MRVI'	12,043	213	194	170	135	69	116	88	124	40	358	1,149	8.5%	6.1%

5-5-2 画素内緑被配置推定

(1) 推定手法の適用範囲の確認

画素内緑被配置の推定には、第4章において都市近郊の市街地のデータで学習を行ったニューラルネットを利用してミクセルを9分割する方法を用いる。この推定方法は、緑と緑以外の境界部分のミクセルを適用範囲としている。63cm 分解能のデータではこの条件を満たしているミクセルが多いと考えられるが、一部には鉢植えの緑等非常に小規模な緑を島状に含むミクセルも存在する。

これを確認するために、画素内緑被配置を推定した画像での緑のひとまとまりの画素数が9画素未満の緑の出現数を求めて表5-9に示す。なお、複数画素のミクセルにまたがって存在しながら9画素未満の緑も存在するため、これらの画素の全てが島状に一画素のミクセル内に存在しているとは限らないが、判定の簡便のため9画素未満の緑全てを抽出している。また、対応する画素内緑被率のミクセル数とは、9分割して生成される画素数に相当する画素内緑被率を持つミクセル数であり、ひとまとまりの画素数が2画素の場合では画素内緑被率 11.2%以上 22.2%以下のミクセル数になる。

これより、島状に緑を含むミクセルは63cm 分解能の画像においても最大 2.1%存在することが分かる。また、1画素で分布する非常に小規模な緑が全ミクセル数の 0.8%を占めており、出現数としては最も多い。これらのことは、前章までに解析したように、小規模なもの程急激に出現頻度が高くなるという知見に対応している。

表5-9 島状に緑を含むミクセルの出現数と全ミクセル数に対する比率

ひとまとまりの画素数	出現数	対応する画素内緑被率のミクセル	対応するミクセル数に対する比率	全ミクセル数に対する比率
1	2,223	58,435	3.8%	0.8%
2	875	41,980	2.1%	0.3%
3	788	36,862	2.1%	0.3%
4	599	31,995	1.9%	0.2%
5	477	29,249	1.6%	0.2%
6	385	27,322	1.4%	0.1%
7	228	25,817	0.9%	0.1%
8	262	25,275	1.0%	0.1%
合計	5,837	276,935		2.1%

一方、約 98%のミクセルは、画素内緑被配置推定方法の適用範囲に存在しているということであり、推定画像を緑被分布図として採用できるものとする。また、ひとまとまりの画素数が9画素未満の緑は推定の根拠がないため、誤分類が判明した画素として扱い、以下の解析にはこれらを除いた緑被分布図を利用する。

(2)MRVI と MRVI' による画素内緑被配置推定結果の比較

樹木と草の判別に先立ち、ここでは、MRVI 及び MRVI'により画素内緑被率を推定した場合の画素内緑被配置推定画像における違いを確認する。図5-30に画素内緑被配置推定後の緑被分布図を比較して示す。これより、MRVI では緑に誤分類してしまう住宅の屋根をMRVI'では緑以外に正しく分類できているものが多い様子が分かる。なお、MRVI'による推定結果で市街地の緑被率を求めると 22.1%となった。これを正解とすると、MRVIにより算出された緑被率 23.6%は、約 1.5 ポイント過剰に緑を抽出していることになる。これらの過剰推定した緑が住宅の屋根等に誤って分布しているものと考えられる。



図5-30 画素内緑被率推定に用いた植生指標の違いによる画素内緑被分布推定結果の比較

5-5-3 樹木と草地の判別

MRVIを利用した緑被分布図を基にして、里地と同様に、NDVI及び昼夜の熱赤外域データのクラスタリングによる教師を利用して最尤法により、樹木と草地の分類を行う。

まず、データの組合せ毎の各クラスターの分離度を求め、里地との違いを検討する。表 5-10 にユークリッド距離による分離度、図 5-31 に2データの場合の散布図上でのクラスターの位置を示す。

1データでの大きな違いは昼夜の熱赤外共に樹木と草の分離度が低いことにある。一方でNDVIでの分離度が高くなっている。草地との温度差が小さいのは、ひとまとまりの規模が小さい樹木が多いことにより、里地の大規模な樹林のような表面温度を一定に保つ機能が小さいためと考えられる。また、NDVIでの分離度が高くなっているのは、草地が空地等の日当たりの良い場所に分布しており、活性度が高いためと考えられる。

また、緑被分布図を基にしながらか緑以外のクラスターが存在するのは、画素内緑被率の推定で述べたように、一部の住宅屋根がMRVIを利用して誤推定されてしまっているためである。NDVIでの樹木と緑以外の分離度が最も低いのも近赤外での反射が大きい屋根材であることによる。こうした誤推定は里地での改変地同様に、熱赤外域データを利用して抽出する必要がある。

以上、里地との違いが大きい組合せが存在するが、3データを組み合わせた場合に最も分離度が高くなることは共通であり、里地同様に3データを用いて最尤法による分類を行う。分類結果を表 5-11 に示す。

表5-10 データの組合せ毎の各クラスターの分離度
(画素値のユークリッド距離)

データ		樹木-草	樹木-緑以外	草-緑以外
1データ	NDVI	22,792	2,050	24,842
	熱赤外(昼)	4,174	34,303	30,130
	熱赤外(夜)	4,719	29,210	24,491
2データ	NDVI	23,171	34,365	39,050
	熱赤外(昼)			
	NDVI	23,276	29,282	34,885
	熱赤外(夜)			
熱赤外(昼)	6,300	45,055	38,828	
熱赤外(夜)				
3データ		23,647	45,102	46,095

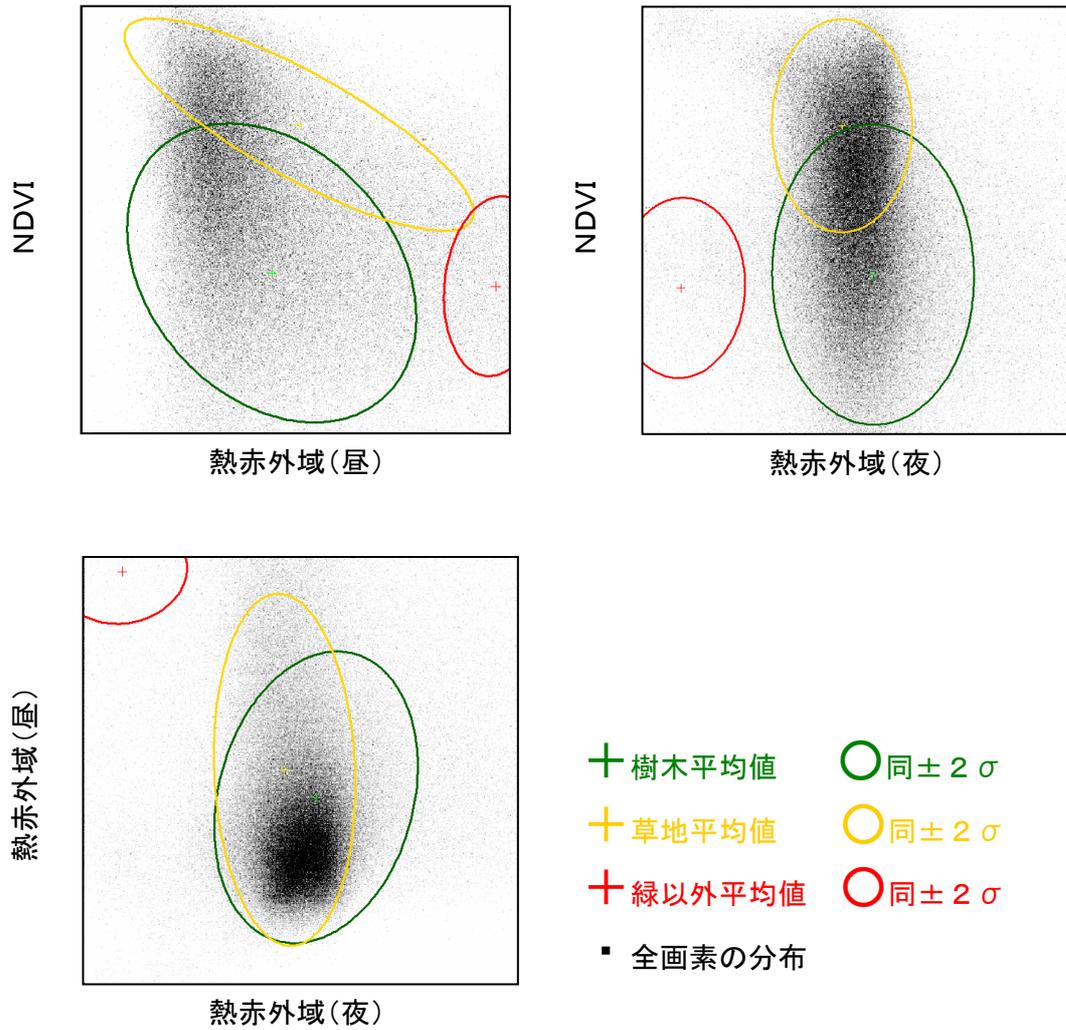


図5-31 2データの散布図上での各クラスターの位置

(各波長帯域の全画素の最小・最大値を軸の両端部に割当てて左下を最小値とした)

表5-11 樹木と草地の分類結果

	樹木	草地	緑以外	合計
画素数	1,699,539	797,930	70,004	2,567,473
構成比率	66.2%	31.1%	2.7%	

5-6 都市緑被分布詳細図の作成

最後に、画素内緑被率配置推定により詳細な緑被分布を抽出した市街地と、現存植生図を修正して緑被分布図とした里地を統合して、全域の緑被分布詳細図を作成した。

図 5-32 に最終成果としての土地被覆分布図を示す。これは、都市緑被分布詳細図と土地利用図を統合することで作成している。現存植生図(図 5-6)と比較すると、市街地では緑豊かな住宅地の様子が表現され、里地では草地と樹林が複雑に混在する状況が見られるようになっている。また、付図に示す市街地の部分拡大画像からは、街路樹や学校の樹木、庭木・下草等の日常の生活で日々接している身近な緑の分布が詳細に確認できる。

5-7 まとめ

(1) まとめ

本研究全体で得られた知見・手法を統合して、都市の緑被分布図を作成する手順を明確にすることを目的とした応用研究を行った。リモートセンシングでとらえることのできる緑の情報を詳細に観察するために、既存情報の利用や階層的処理により、緑と緑以外或いは特性の異なる緑を分割しながら解析を進めていくことを第一の基本方針とした。また、全国で整備されている現存植生図に不足する情報のみをリモートセンシングデータから抽出して追加することを第二の基本方針とした。その結果、リモートセンシングデータ単独の処理に比して効率的に詳細な都市緑被分布図の作成が行える手順を示すことができた。また、土地利用図等と統合することで、土地被覆分布図に相当する主題図を作成することができる。

本章で得られた主な知見を以下にまとめる。

- ①里地と市街地のように緑の特性が大きく異なる地域の解析は、現存植生図等の既存情報を利用して前処理段階で分割しておくことが、高精度な解析にとって重要である。例えば小規模なみどりの抽出に MRVI を利用する場合、分光特性の異なる大規模な緑を含まないエリア設定を行うことで、画素内緑被率の推定精度及び画素内緑被配置の推定精度が大きく向上する。

- ②画素内緑被率推定のための MRVI の閾値設定を客観的に行う方法を提案し、推定結果画像からその妥当性を検証した。まず、緑と建物の分布が既知の検証地区を設置し、緑の緑被率と緑以外が緑 100%と推定された比率の差を評価指標とする。次に、緑と緑以外の推定分布の中央値から両側に均等に閾値を設定し、評価指標が最大値となる場合の閾値を採用する。
- ③建物屋根の誤分類を低減させるために、ノイズ除去を行った中間赤外域データを MRVI の分母に加えて修正した MRVI' を提案し、両者を利用した画素内緑被率画像の推定結果から、MRVI' 有効性を確認した。

(2) 今後の課題

本章で使用した航空機 MSS データは、観測時の太陽高度が高いため、日陰・日影面積が比較的小さいデータである。また、緑の抽出に植生指標を用いることにより、日射量の差異による緑の抽出精度への影響が軽減されている。抽出された緑の樹木・草地への分類では、夜間の熱データを利用することで、日陰・日影の影響が小さくなるようにしている。

ただし、建物間の日影面のように、直達日射量と拡散日射量が共に小さい位置の緑は、植生指標を利用した抽出が出来ない対象である。解析地区の建物は低層の戸建住宅がほとんどであるため日影面積は小さいが、中高層建物を含む地区の解析では、他時期の観測データを使う等の日影を考慮した緑の抽出方法が必要となる。これについては今後の課題とする。



図5-32 土地被覆分布図
(都市緑被分布詳細図と
土地利用の統合図)



- 緑被分布: ■ 樹木
■ 草地
- 土地利用: ■ 木造建物
■ 非木造建物
■ 道路
■ その他

付図 市街地の拡大図にみる詳細な緑の形状
(都市緑被分布詳細図と土地利用の統合図より)

引用文献

- 1 梅干野晁:地球温暖化対策とグリーンビルディング, グリーンエージ((財)日本緑化センター)平成 11 年 10 月号, pp.24-32, 1999.10
- 2 社団法人日本公園緑地協会:緑の基本計画ハンドブック改訂版, 1997
- 3 環境庁自然保護局編:日本の植生 第4回自然環境保全基礎調査植生調査報告書(全国版),1997.3
- 4 東京都:「東京都緑の保全計画(仮称)」検討委員会報告書,1998.6
- 5 緑被率標準調査マニュアル, 東京都環境保全局自然保護部緑化推進室編, 1988.10
- 6 羽柴秀樹・亀田和昭・田中聰太郎・杉村俊郎:高分解能衛星画像データを用いた都市域における小規模緑地の詳細分布図作成の可能性の検討, 地図(日本国際地図学会誌), Vol.38, No.4, 2000
- 7 平野, 柴崎, 安岡:都市域における NDVI と緑被率の関係の解析と緑被率推定, 日本写真測量学会年次学術講演会梗概集, 2000, pp.67-72
- 8 富士通エフ・アイ・ピー:平成 11 年度逗子市植生調査報告書,2000
- 9 宮坂他, 航空機 MSS データのレジストレーション精度の向上のための一手法, 日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, 1997 年 11 月
- 10 梅干野晁・加藤倍敬:高分解能航空機 MSS データを用いた自動分類による市街地におけるみどりの抽出, 日本建築学会論文報告集, 第 407 号, pp.37-45, 1990.1
- 11 尹, 梅干野:都市域における画素内緑被率推定のための指標, 日本リモートセンシング学会誌,18(3), pp.4-16, 1998
- 12)尹, 梅干野, 白井, 瀬戸島:画素内緑被率を用いた都市域の緑被分図の実用化 その1 画素内緑被率の計量方法の提案, 日本リモートセンシング学会第 25 階学術講演会論文集, 1988, pp.233-234

参考文献

- 1 災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究・平成11年度概要報告書, 建築研究所, 2000.9
- 2 地域環境 GIS 研究会編著: デジタル観測手法を統合した里山の GIS 解析, 2000.9
- 3 環境と開発のデザイン研究会編: 環境と開発のデザイン, 大成出版, 1997.9
- 4 武内和彦: 生態都市の発想, 総合ユニコム, 1991.11
- 5 田代順孝: 緑のパッチワーク, 技術書院, 1998.11
- 6 高原栄重: 都市緑地, 鹿島出版, 1988.9
- 7 進士五十八: みどりのまちづくり学, 学芸出版, 1987.4
- 8 田畑貞寿他: 緑と居住環境, 古今書院, 1984.11
- 9 塩島大: みどりの挑戦, 鹿島出版, 1982.11
- 10 吉村元男: エコハビタ 環境創造の都市, 学芸出版, 1993.2
- 11 建設省都市環境問題研究会編: 環境共生都市づくりーエコシティ・ガイドー, ぎょうせい, 1993.7
- 12 武内和彦・恒川篤史: 環境資源と情報システム, 古今書院, 1994.6
- 13 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 1991.1
- 14 日本リモートセンシング研究会編: 画像の処理と解析, 共立出版会, 1981.5
- 15 渡辺宏: 森林航測テキストブック, (社)日本林業技術協会, 1993.7
- 16 (社)日本写真測量学会編: 空中写真の判読と利用, 鹿島出版会, 1980.11

第6章 結論

6-1 総括

各章で得られた成果を総括し、以下に述べる。

第1章「序論」では、研究の背景と位置づけ、及び、目的について述べた。まず、研究の背景として、現在の都市計画では、環境という視点が重視されるようになってきたことを指摘した。環境施策を具体的に進めていくには、基本となる土地利用情報に加えて、土地被覆に着目した情報整備が必要であることを述べ、研究の位置づけとした。次に、既往研究の問題点として、従来は、数十メートルの空間分解能を前提とした、土地被覆のカテゴリー設定での解析がされてきたが、こうした土地被覆解析結果からは、質の高い都市環境計画を進めていくことは困難である事を指摘した。そこで、本論文では、建物、道路、緑等の都市の土地被覆を構成する基本要素に着目し、これらをカテゴリーとした土地被覆情報の整備を進めるための方法を明確にすることを、研究の目的として示した。

第2章「土地被覆の分布特性とミクセル」では、まず、住宅地を対象として、土地被覆のひとまとまりの要素の分布特性を明らかにした。住宅地は、小面積の被覆が複雑に分布することを特徴する都市空間の中で、特にその特徴が顕著な地域として選定した。解析には、高分解能の空中写真を用いた。その結果、土地被覆のひとまとまりの面積は、地域・地区ごとに、固有の頻度分布特性を持っていることを明確にした。また、土地被覆毎に、観測データの空間分解能をパラメータとして、ミクセルの質及び量の変化を定量的に明らかにした。

第3章「土地被覆分類に要求される空間分解能」では、市街地の土地被覆分類に適した、リモートセンシングデータの空間分解能の範囲を明らかにした。空間分解能の低下に伴い、画素値の分散は小さくなるが、ミクセルとして観測される画素の比率は高くなる。それぞれの土地被覆分類への影響を、定量的に把握することによって、両者の影響が、空間分解能をパラメータとして、トレードオフの関係にあることを示し、土地被覆分類に最適な空間分解能が存在することを明確にした。これより、市街地を対象とした場合、1mよりも小さい数十センチメートルオーダーの範囲に、最適値があることを論述した。さらに、土地被覆カテゴリー毎の解析により、地区全体として最適な空間分解能で

あっても、小規模な土地被覆カテゴリーは、ミクセルの影響が大きいことを明らかにした。以上により、既往研究で利用されている人工衛星データの空間分解能である、数十メートルオーダーのデータは、都市の詳細な観測には、適していないことを指摘した。

第4章「画素内緑被配置推定方法の開発」では、ひとまとまりの面積が小規模な対象の抽出方法として、緑を含むミクセルの解析方法を開発した。市街地の小規模な緑は、都市環境での役割が注目されている土地被覆であるが、小規模で複雑な形状のため、リモートセンシングでは、ミクセルとして観測される比率が高い。この緑を含むミクセルを対象に、画素内での緑の分布位置を推定する方法を提案した。近傍画素の画素内緑被率を利用し、ニューラルネットワーク法で推定することにより、ミクセルを9分割した場合の画素内緑被配置を推定できる。従来の手法では、画素内の緑被率の推定に止まっていたのに対し、本手法では、緑の分布形状を精細化できる。

第5章「詳細な都市緑被分布図の作成への応用」では、前章までに得られた知見・手法を統合し、都市の緑被分布図の作成に応用する手順を提案し、その有効性を確認した。まず、市街地の緑と、その周辺の里地の緑について、空間分布特性、及び、分光分布特性の違いを把握し、それぞれに応じた解析手順の必要性について述べた。市街地では、第4章での開発手法を適用し、小規模な緑を抽出する手順を提案した。このときの主な課題として、既存の植生指標 MRVI の値と、画素内緑被率との対応を、決定する方法をとりあげ、実用的な解決方法を示した。里地では、小縮尺ではあるが、現存植生図が整備されていることから、これを修正することによって、詳細な緑被分布図を作成した。両地区の解析結果を統合することで、現地踏査に代わる、高精度で詳細な都市計画レベルの緑被分布図を作成できる、新たな手順を提案した。

第6章「結論」は、本研究の結論、総括と今後の課題を述べている。すなわち、本論文は、都市の土地被覆の観測に適した空間分解能に関する知見、及び、都市の緑被分布を高精度に把握できる解析手法を提示していることを述べた。また、本研究の成果は、全国で整備されている現存植生図や、土地利用図等と統合して利用することにより、詳細な土地被覆分布図を作成でき、これからの都市環境計画を支援する情報として蓄積できるものであることを述べた。

6-2 結論

現在の都市計画では、都市環境という視点が重視されるようになっている。これまでの都市計画では、主に土地利用の視点から情報が整備され、基本計画に利用されてきた。今後、より具体的な政策を進めていくには、基本となる土地利用情報に加えて、土地被覆に着目した情報整備が必要と考える。これにより、熱環境や水環境等の解析・評価を進めることができるようになり、環境政策の効果を具体的に把握しながら、都市環境計画を進めていくことが出来ると考える。さらには、自然生態系関連の情報等も統合することにより、地球環境の一部としての都市環境の計画が進められる。

このように、今後の都市環境計画では、「土地利用」に加えて「土地被覆」に関する情報が求められるようになるという考察に基づき、都市の詳細な土地被覆分布をリモートセンシングを利用して迅速且つ高精度に調査するための方法について研究を進めた。

リモートセンシングによる土地被覆分類についての既往研究では、従来の人工衛星データに対応した数十メートルの空間分解能を前提とした土地被覆のカテゴリー設定を行った上での解析が行われている。こうした研究では、建物、道路、緑等をまとめて市街地というカテゴリーを設定して分類が行われている。このような分類結果からは、質の高い都市環境計画を進めていくことは困難である。そこで、本研究では、建物、道路、緑等の土地を構成する単位要素について土地被覆カテゴリーを設定し、より良い都市環境計画に繋がる、土地被覆情報の整備を進めるための方法を明確にすることを、研究の目的とした解析を行った。

まず、観測データに求められる空間分解能の範囲を明らかにした。都市を構成する地域・地区ごとに土地被覆の単位要素の面積が固有の頻度分布特性を持っていることを把握したうえで、観測データが適合していない場合の問題を主にミクセルの質と量の変化として定量的に示した。また、空間分解能の低下に伴って画素値の分散が小さくなることと、ミクセルとして観測される画素の比率が高くなることの土地被覆分類への影響を明らかにした。これらにより、既往研究で最適空間分解能として提示されている数十メートルオーダーのデータは都市の詳細な観測に適していないことを示すと共に、都市観測の最適空間分解能が1mよりも小さい数十センチメートルオーダーの範囲にあることを明らかにした。

次に、単位要素の面積が小規模な対象の抽出方法を開発した。都市域の全ての土地被覆を分類する場合に最適な空間分解能での観測であっても、単位要素の面積が小さいカテゴリーはミクセルとして観測される比率が高く、単位要素の面積が大きいカテゴリーよりも分類精度が低くなる。ミクセルの分類精度が低くなるのは、最尤法等の分類手法がピュアピクセルを前提としているために、ミクセルの分類に適していないことに原因がある。また、ミクセルを対象とした分類手法も提案されてきているが、分類結果は画素内での各カテゴリーの占有率であり、分布形状については分類対象としていない。そこで、小規模な土地被覆カテゴリーの中から、都市環境の向上に特に重要な土地被覆である市街地の緑を対象として選択し、緑を含むミクセルの解析手法を開発した。ミクセルに含まれる緑の画素内での分布位置を推定する手法であり、近傍画素の画素内緑被率を利用してニューラルネットワーク法で推定する方法を画素内緑被配置推定方法として提案した。これにより、ミクセルを9分割した場合の画素内緑被配置を求めることができ、緑のエッジ部分の形状が精細化出来るようになった。

最後に、既存で整備されている都市計画基本図や現存植生図において不足しており且つ都市環境計画にとって重要な情報として都市の緑被分布をとりあげ、本研究全体で得られた知見・手法を統合して、都市の緑被分布図の作成に応用する手順を示した。このとき、リモートセンシングデータ単独の処理ではなく、既存の植生図を活用することにより、詳細な都市緑被分布図を正確に作成できることを示した。

以上、市街地の緑被分布を高精度に把握できる本研究の解析手法は、全国で整備されている現存植生図、及び、土地利用図等と統合して利用することにより、詳細な土地被覆分布図を正確に作成する事ができるものである。また、都市の観測に適した空間分解能に関する知見と併せて、これからの都市環境計画を支援する情報の蓄積に活用でき、都市環境の質の向上に寄与していくと考える。

6-3 今後の課題

本研究の範囲は都市域の土地被覆分布図の作成までであり、緑については、緑被分布図の作成までとした。しかし、現状整備されている現存植生図にみられるように、樹種の分類が求められる分野も多い。樹種の分類は、緑の質の違いを精細に判別することになる。このとき緑被分布情報をベースとすることで、判別の精度・効率は飛躍的に向上するものと考ええる。

樹種の判別を進めるためには、高空間分解能に加えて、分光分解能の高いリモートセンシングデータを利用する必要がある。近年構想されている可視域～近赤外域を200バンドにも及ぶ分光分解能で観測する人工衛星や、高分解能の熱赤外・中間赤外域データを取得できる航空機 MSS を活用することで、樹種の分類に取り組んでいきたい。

また、里山のように起伏の大きい地形では、リモートセンシングデータの幾何補正、放射補正の重要性が大きい。現状では詳細な DEM の整備が進んでいないため、補正の範囲・精度が限定されており、高精度の分類の課題となっている。高精度な DEM の整備は、レーザープロファイラーや多波長のレーダにより、今後急速に進んでいくと思われる。こうした、高精度の DEM を前提とした補正方法の開発を進める必要もある。

さらに、緑のように季節変動の大きい対象の解析には、リモートセンシングの時間分解能の向上も重要である。効果的な観測時期のデータを組み合わせることにより、樹種の判別精度は大きく向上すると期待できる。

以上のリモートセンシング技術の向上とこれに対応した解析技術の開発により、本研究により詳細化した都市緑被分布図をベースとして、樹種の情報を付加した細密都市植生図に発展させていくことが今後の課題と考えている。

本研究に関連した公表論文リスト

審査論文

- 1) 梅干野晁・小松義典：リモートセンシングデータの空間分解能と住宅地の土地被覆分類結果との関係(ミクセルの観点からの考察)，日本建築学会計画系論文報告集第 394 号, pp.1-9, 1988 (第2章)
 - 2) 小松義典:住宅地の土地被覆分類に要求されるリモートセンシングデータの空間分解能, 東京工業大学昭和 63 年度修士論文, 1989(第3章)
 - 3) 梅干野晁・小松義典：住宅地の土地被覆分類における MSS 画像の最適空間分解能, 日本建築学会計画系論文報告集第 426 号, pp.57-65, 1991 (第3章)
 - 4) 小松義典・梅干野晁・松永恒雄：ミクセルの画素内緑被配置推定による都市緑被分布図の精細化, 日本建築学会計画系論文集第 543 号, pp.77-83, 2001 (第4章)
 - 5) 小松義典・梅干野晁・松永恒雄：市街地と里山を対象とした緑被分布詳細図の作成方法, 日本建築学会技術報告集第 15 号, 2002 (掲載予定) (第5章)
- * 一部博士論文の内容を含む論文
- 梅干野晁・堀和裕登・小松義典：リモートセンシングデータを用いた都市域における画素内緑被率の推定方法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集第 459 号, pp.1-8, 1994 (第4章)

国際会議

- 1) Akira HOYANO and Yoshinori KOMATSU:Influence of Mixels on Land Cover Classification in Residential Areas Using Airborne MSS Data, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.27, part B10,VII399-VII408,1988 (BEST POSTER AWARD 受賞) (第2章)

総説

- 1) 梅干野晁・小松義典:リモートセンシングによるみどりに関する都市環境情報の計量化, 「環境の管理」日本環境管理学会誌 (Journal of RIEMAM), 第 6 号, pp.13-22,1991 (第5章)

口頭発表

- 1) 梅干野晁・小松義典:航空機 MSS データの地上分解能と土地被覆分類精度との関係 その1 (土地被覆地図による基礎的研究), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.515-516,1987 (第2章)

- 2) 梅干野晁・小松義典・加藤倍敬:航空機 MSS データの地上分解能と土地被覆分類精度との関係 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.517-518, 1987 (第2章)
- 3) 梅干野晁・小松義典:市街地空間の土地被覆自動分類に要求される航空機 MSS データの地上分解能の検討, 計測自動制御学会第 13 回リモートセンシングシンポジウム, pp.141-144,1987 (第2章)
- 4) 梅干野晁・小松義典:リモートセンシングによる都市環境解析に関する一考察(市街地空間の表現に要求される最適地上分解能), 都市環境工学, Vol.18, No.3, pp.33-36, 1987 (第2章)
- 5) 梅干野晁・小松義典:MOS-1/MESSR データの都市域における地表面分光反射強度の推定精度, The Third Symposium on MOS-1 Verification Program NASDA, pp.429-434, 1989 (第3章)
- 6) 西田正樹・梅干野晁・小松義典:住宅地の土地被覆分類に要求されるリモートセンシングデータの空間分解能(その1空間分解能とピュアピクセルの比率及び画素値の分散との関係), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp1051-52,1989 (第3章)
- 7)小松義典・梅干野晁:住宅地の土地被覆分類に要求されるリモートセンシングデータの空間分解能(その2空間分解能と土地被覆分類精度の関係), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.1053-1054, 1989 (第3章)
- 8) 小松義典・梅干野晁:住宅地の緑被率調査に要求されるリモートセンシングデータの空間分解能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.1279-1280, 1990 (第3章)
- 9) 小松義典・梅干野晁:航空機リモートセンシングデータを用いた都市のみどりに関する環境情報の計量化(その1みどりとみどり以外の判別), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.1495-1496, 1991 (第4章)
- 10)小松義典・梅干野晁:ミクセルを考慮した都市緑被分布図作成手法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp.1435-1436, 1992 (第4章)
- 11)小松義典・梅干野晁:ミクセルを考慮した都市緑被分布図の作成手法, 日本リモートセンシング学会第 12 回学術講演会論文集, pp.141-144, 1992 (第4章)
- 12)小松義典:RSデータを用いた緑被細分類手法の比較検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp.647-648, 1995 (第4章)
- 13)小松義典:ニューラルネットワークによるミクセルの分類, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp.503-504, 1996(第4章)
- 14)小松義典・梅干野晁・松永恒雄・尹敦奎:都市周辺の里山を対象とした詳細な植生図の作成方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp.689-690, 1999 (第5章)

- 15)小松義典・梅干野晁・松永恒雄:ニューラルネットワークによるミクセルの分類 (その2 階層構造を持った分類方法), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp.627-628, 2000 (第4章)
- 16)足永靖信・梅干野晁・小松義典・松永恒雄・宮坂聡:GISとリモートセンシングを利用した都市環境計画支援 (その1 自治体の環境計画支援), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp.581-582, 2001 (第5章)
- 17)宮坂聡・梅干野晁・松永恒雄・小松義典・足永靖信:GISとリモートセンシングを利用した都市環境計画支援 (その2 他時期航空機 MSS データの利用), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp.583-584, 2001 (第5章)
- 18)小松義典・梅干野晁・松永恒雄・足永靖信・宮坂聡:GISとリモートセンシングを利用した都市環境計画支援 (その3 細密植生図の提案), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp.585-586, 2001 (第5章)

委員会報告書

- 1) 平成4年度新都におけるインフラストラクチャー構築に関する技術的検討調査研究報告書, (財)エンジニアリング振興協会平成4年度社会開発システム等策定事業分科会, 分担共著, 3.2 環境, 1993年3月 (第1章)
- 2) 都市設備シンポジウム資料 「緑」と「熱」のリモートセンシング, (社)日本建築学会環境工学委員会都市設備運営委員会リモートセンシング小委員会, 分担共著, 1. 分類手法, 1993年7月 (第3章)
- 3) 都市設備シンポジウム資料 都市・建築環境のリモートセンシング 基礎編, (社)日本建築学会環境工学委員会都市設備運営委員会リモートセンシング小委員会, 分担共著, 第5章ハードウェア, 1993年7月 (第1章)
- 4) 新都におけるインフラストラクチャー構築に関する技術的検討調査研究報告書, (財)エンジニアリング振興協会平成5年度社会開発システム等策定事業分科会, 分担共著, 3.2 環境の保全, 1994年3月 (第1章)
- 5) 新都のインフラストラクチャー, (財)エンジニアリング振興協会 新都のインフラストラクチャーに関する技術的検討研究会, 分担共著, 生態系システム, 1994年3月 (第1章)
- 6) 特別研究 9 建築・地域環境・地球環境の在り方, (社)日本建築学会地球環境建築特別研究委員会, 分担共著, 第IX章 3-3 緑, 1995年3月 (第5章)
- 7) 平成8年度調査報告書 大規模緑化の実現化シナリオ作成に関する調査, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (財)地球環境産業技術研究機構 調査委員会, 分担共著, 3.モデル地域における水収支, 1997年3月 (第1章)

謝 辞

筆者は、平成元年に修士課程を修了し、清水建設技術研究所において研究を続けながら、平成2年から平成4年は共同研究員として、また、平成10年からは社会人大学院生として東京工業大学に在籍し、この学位論文をまとめてきました。修士課程から数えると、約15年に渡る長い期間の研究になりました。この間、非常に多くの皆様にご指導をいただくとともに、ご支援とご協力をいただきました。ここに、深く感謝いたします。

東京工業大学教授 梅干野晁先生には、指導教官という立場以上に、多くのことを教えていただきました。一つ一つの課題に対するご指導はもちろんのこと、「工学とは」、「研究とは」、「論文とは」という、基本であり、また、最も重要なことを、繰り返し繰り返し教えていただきました。

東京工業大学講師 松永恒雄先生には、懇篤なるご指導と、有益なるご助言、ご討論をいただきました。建築とは異なる観点からのご助言には、目から鱗の落ちる思いをいたしました。また、グローバルでアクティブな研究活動は、若き研究者の範を示していただいたものと受けとめております。

東京工業大学客員教授 田中聰太郎先生、同教授 原科幸彦先生、同教授 藤井修二先生、同助教授 渡邊真紀子先生には、論文全般に対して貴重なご助言と丁寧なご指導をいただき、機会ある毎に激励していただきました。

三度、在籍した梅干野研究室、松永研究室では、多くの皆さんと、ともに過ごし、議論し、切磋琢磨していくことが出来ました。特に、リモートセンシングの研究に取り組んだ皆さんには、多くのご協力をいただきました。修士課程では、川井弘之氏、飯野秋成氏(以上、当時東工大大学院生)、共同研究員のときには、西田正樹氏、西村直也氏、長谷山 大氏、水田敏也氏、堀和裕登氏(以上、当時東工大大学院生)、博士課程では、尹敦奎氏(当時東工大RA)、小川領一氏(当時東工大大学院生)に、大変お世話になりました。また、秘書 薄葉千景氏、RA 尹聖皖氏、学振特別研究員 田中稲子氏、大学院生岸本純氏をはじめとする研究室の皆さんには、社会人と大学院生の二足のわらじを履いて、研究生活を送るうえで、多大なご支援をいただきました。

日本建築学会リモートセンシング小委員会では、信州大学助教授 高木直樹先生、神戸大学教授 森山正和先生をはじめとする委員の先生方から、機会ある毎に、リモートセンシングの研究に関する貴重な情報とご指導をいただきました。

本研究における航空機リモートセンシングデータの取得と幾何補正では、中日本航空課長宮坂聡氏の多大なご協力をいただきました。また、航空機MESSRデータは、宇宙開発事業団よりご提供いただきました。逗子市のGISデータの利用にあたっては、逗子市都市計画課課長嶋六三氏らに多大なご尽力をいただきました。

勤務先の清水建設では、多くの皆様に、ご支援をいただきました。特に、小林昌弘氏（当時清水建設技術研究所研究部長）には、入社時より長年に渡りご指導をいただき、また、社会人大学院生としての進路も示していただきました。主任研究員西尾伸也氏、研究員竹内啓五氏には、リモートセンシングや画像処理に関する研究開発を共同で進めながら、多くのご助言やご協力をいただきました。研究員沢田英一氏には、英文の校正を通じて、論理的な文章構成を教えていただきました。研究所で在籍した部署の研究員の皆さんには、多くのご指導やご助言をいただきました。また、本社に転務してからの現部署では、繁忙な業務にかかわらず、多くの時間を研究に取り組ませていただくと共に、ご支援とご協力をいただきました。

みなさまのお陰を持ちまして、ここに学位論文をまとめることができ、感慨無量でございます。限られた時間の中で、精一杯の努力をして参りましたが、残された課題も多くあります。それらをひとつひとつ解決しながら、社会へ寄与していくことが、これからの私の役割と考え、志を新たにす次第です。

最後に、陰で見守り、最高の教育を受ける機会を与えてくれた亡き父と故郷の母に、心より感謝いたします。また、2度目の学生生活を支え励ましてくれた家族、妻 昌美、長男 巧、長女 千絵に、深く感謝いたします。

平成 13 年 9 月

小松 義典