

2002 年度修士論文

人工衛星 Terra/MODIS センサ画像における自動幾何補正

Automatic geometric correction
for the Terra/MODIS sensor imageries

2003 年 1 月

指導教員 高木方隆

高知工科大学大学院基盤工学専攻
社会システム工学コース 1055165

元久慎哉

要旨

人工衛星 Terra/MODIS センサ画像における幾何補正には、システム補正が使われる。しかしながらシステム補正における幾何補正は、人工衛星の軌道情報が完全でないため、その補正に精密性を欠くという問題を抱えている。そのため、MODIS センサ画像を使用する場合には、精密に幾何補正することが望まれるが、一般ユーザがシステム面からそれを達成することは難しい。また、目視で GCP（地上基準点）を取得しておこなう幾何補正では、画像の空間分解が 1000m のため、正確に GCP を取得する作業は困難であり、この手法は大量のシーン処理に向いていない。これらの現状から、MODIS センサ画像を扱う一般ユーザには、軌道情報を必要とせず精密に補正でき、なおかつ大量のシーン処理も可能な幾何補正システムが強く望まれている。本論文の目的は、これらの問題を解決する MODIS センサ画像の高精度な自動幾何補正システムを開発することである。

本論文の自動幾何補正では、まず最初に MODIS 画像上から地球の曲面による歪の影響を除去し、軌道傾斜角に対する回転処理が実行される。次に、陸域の自動抽出が行われ、その画像をもとに海岸線マッチングによって GCP が自動取得される。そしてその GCP 情報をもとに、アフィン変換によって MODIS 画像の幾何補正が行われる。これらの過程とともにその結果を要約すると、以下のことが示された。

地球の曲面の影響は非線形な歪であり、この歪は空間分解能と撮影画素数の関係をもとに算出し補正した。その結果、明確な影響が考えられる幾何変換は拡大縮小・平行移動・スキュー歪・台形歪となる。そのため、非線形歪を最初に取り除くことで、幾何補正は一次式のアフィン変換で対応可能とすることができた。

陸域の自動抽出に関しては、教師付き分類と正規化バンド間演算の両者を適用・比較した。その結果、MODIS センサ画像に従来の教師付き分類がそのまま適用できないことが分かった。教師付き分類の修正による適用を試みたが、汎用性という点で困難であるという結論に達した。一方、正規化バンド間演算では、修正した教師付き分類より高精度な分類精度が得られた。また、撮影時期の異なる画像に対しても汎用性があることが確認され、MODIS センサ画像の自動陸域抽出には正規化バンド間演算が有用であることが示された。

GCP 自動取得における海岸線マッチングでは、雲の無い最適な条件において、平均 0.90 という高い画像相関を得ると同時に、ミスマッチはひとつも起こらなかった。しかしながら、雲量シミュレーションの結果、相関が高いからといって必ずしも有効な場所とマッチングしているとは限らないということが示された。

精度検証の結果では、本論文の幾何補正画像における海岸線の約 80% が正しい海岸線より ± 1 画素以内に存在していた。この補正精度は、システム補正と比べると約 2 倍近い精度差であり、本論文の幾何補正がかなり正確に行われたことを示している。

以上から、本論文における自動化という目的は達成された。

Abstract

For geometric correction in the Terra/MODIS sensor imageries, System-Correction is used. However, System-Correction is not accurate because the orbital information of satellite is not accurate. Moreover, it is difficult for general users from point of view system side to perform geometric correction with high accuracy. Since, the resolution of MODIS image is 1000m, it is difficult to acquire GCPs by visual interpretation. Taking GCPs requires much time and efforts for geometric correction of large number of image. Therefore, the highly accurate geometric correction which does not need the parameter information of the satellite orbit is required for general users of MODIS data. The purpose of this study is developing a high accuracy automatic geometric correction system for the MODIS sensor imageries.

For geometric correction without orbital information, distortion caused from the roundness of the earth must be removed, and rotation processing is carried out. Next, land area is automatically extracted and GCPs are automatically acquired by sea line matching. And the geometric correction is rectified by affine transform based on the GCPs information.

The influence of the earth's curvature is nonlinear distortion, and this distortion was rectified by calculating the relationship between spatial resolution and column number in image. By removal of this influence, it is possible to apply by 1st order affine-transform on geometric correction.

In order to extract land automatically, application of normalized band operation and supervised classification method were considered. As a result of these, it turns out that the conventional supervised classification method was difficult to apply to MODIS data. Although correction of supervised classification was tried, it was concluded that method was difficult to use in terms of flexibility. On the other hand, normalized band operation had classification accuracy and flexibility higher than supervised classification method.

In sea line matching for acquiring GCPs automatically, the high value of correlation coefficient 0.90(average of 16 templates) was obtained under the optimal conditions that there are no clouds. However, as a result of cloud-simulation, even if correlation is high in the usual case, the result showed that a high correlation does not necessarily yields high matching accuracy.

In the result of accuracy verification, about 80% of sea line pixels of geometric correction existed within ± 1 pixel on the basis of true sea line. From using geometric correction method which was introduced in this study, it was able to acquire good compensation accuracy also about 2 times of System-Correction. And, the purpose of automation was achieved.

KEY WORDS : MODIS , Geometric Correction ,Automation ,Sea Line Matching

< 目次 >

1 序論

1.1 背景	2
1.2 本研究の目的	3
1.3 本論文の構成	4

2 人工衛星 Terra/MODIS センサ

2.1 人工衛星 Terra の概要	6
2.2 観測センサについて	8
2.2.1 5つの観測センサの概観	8
2.2.2 MODIS センサ詳細	9
2.3 MODIS データフォーマットとその操作	11
2.4 MODIS データのシステム補正による幾何補正	12

3 MODIS データの前処理

3.1 取得データの状況	14
3.2 地球の曲面による歪の影響の除去	15
3.2.1 撮影画素に対する地上観測幅の算出	15
3.2.2 歪の補正	18
3.3 軌道傾斜角に対する回転補正	20

4 陸域の自動抽出

4.1 抽出手法の検討	24
4.1.1 教師付き分類の適用検討	24
4.1.2 教師付き分類手法の概要	25
4.1.3 分光反射特性	27
4.1.4 分類結果と問題点	30
4.1.5 手法修正における適用検討	33
4.1.6 教師付き分類による陸域抽出結果のまとめ	35
4.2 抽出手法の検討	
4.2.1 正規化バンド間演算の適用検討	36
4.2.2 陸域抽出結果と汎用性の検討	41

5 自動幾何補正	
5.1 幾何補正の概要	45
5.2 海岸線マッチング	46
5.2.1 マッチング手法	46
5.2.2 雲量シミュレーション	51
5.3 アフィン変換による幾何補正	55
5.3.1 変換式概要	55
5.3.2 幾何補正結果	57
5.4 幾何補正精度の検証	60
5.4.1 検証手法	60
5.4.2 システム補正と自動幾何補正の精度検証	61
6 結論	
6.1 まとめ	65
6.2 補正成果と開発システムの利用	67
6.3 今後の課題	67
参考文献	69
謝辞	71

< 目次 >

2.1	人工衛星 Terra 概要図	6
2.2	MODIS センサ	9
2.3	MODIS 空間分解能	10
2.4	HDF データ構造	11
2.5	システム補正のずれ	12
3.1	データ全景	14
3.2	MODIS bow-tie 効果	14
3.3	MODIS センサ主走査方向全域	15
3.4	地球の曲面による地上撮影幅の変化	16
3.5	各撮影画素の地上観測範囲	17
3.6	画素の拡張処理	18
3.7	拡張処理の概要と内挿方法	19
3.8	画素の拡張処理 (修正)	19
3.9	撮影シーンと撮影軌道による角度差	20
3.10	目視による GCP と幾何補正	20
3.11	GCP(u, v) プロット	21
3.12	回転後画像 (約 10°)	22
4.1	MODIS からの陸域抽出	24
4.2	2001/10/15 撮影 MODIS データ	25
4.3	MODIS 分光反射	27
4.4	陸域の分光反射と標準偏差	28
4.5	都市域の分光反射と標準偏差	28
4.6	雲域の分光反射と標準偏差	29
4.7	海域の分光反射と標準偏差	29
4.8	ユークリッド距離の分類結果	30
4.9	標準ユークリッド距離の分類結果	31
4.10	マハラノビス距離の分類結果	31
4.11	バンド 3, 4 の相関関係	32
4.12	最大値修正によるマハラノビス距離分類結果	34
4.13	濃度マッチングによる補正	34
4.14	太陽天頂角補正 (濃度変換済)	34

4 . 1 5	正規化バンド間演算分類の概要	37
4 . 1 6	陸域強調の正規化画像とヒストグラム	38
4 . 1 7	都市域強調の正規化画像とヒストグラム	38
4 . 1 8	海域強調の正規化画像とヒストグラム	39
4 . 1 9	雲域強調の正規化画像とヒストグラム	39
4 . 2 0	正規化指標値の取得位置	40
4 . 2 1	A : 都市域における正規化指標値	40
4 . 2 2	B : 陸域における正規化指標値	40
4 . 2 3	C : 海域における正規化指標値	40
4 . 2 4	D : 雲域における正規化指標値	40
4 . 2 5	正規化バンド間演算の分類結果	41
4 . 2 6	7 , 8 , 9 月分類結果	42
4 . 2 7	11 , 12 月分類結果	43
5 . 1	自動幾何補正の流れ	45
5 . 2	陸域抽出画像からの幾何補正	45
5 . 3	テンプレートと地理座標位置	46
5 . 4	1000m グリッド化した海岸線	47
5 . 5	GCP 自動取得に用いるテンプレートセット	47
5 . 6	テンプレートマッチング概図	48
5 . 7	最適な条件として用いた MODIS 画像	49
5 . 8	雲量シミュレーション	51
5 . 9	GCP No.1 での雲量	52
5 . 1 0	雲量結果	52
5 . 1 1	ミスマッチしやすい箇所の例	54
5 . 1 2	最近隣内挿	56
5 . 1 3	アフィン変換後の画像	57
5 . 1 4	擬似アフィン変換後の画像	57
5 . 1 5	幾何補正画像の局所	59
5 . 1 6	基準色付の海岸線とベクトルの海岸線	60
5 . 1 7	誤差の検証に用いる画像の作成	59
5 . 1 8	海岸線における誤差量	61
5 . 1 9	アフィン変換 : 誤差ベクトル(10 倍)	62
5 . 2 0	システム補正 : 誤差ベクトル(10 倍)	62
5 . 2 1	補正画像の比較	63

< 表目次 >

2 . 1	EOS 計画における人工衛星 Terra 観測指標.....	7
2 . 2	人工衛星 Terra の主な仕様.....	7
2 . 3	MODIS センサ詳細.....	9
2 . 4	MODIS センサ観測バンド一覧.....	10
3 . 1	GCP 座標と回転角.....	21
4 . 1	観測波長帯.....	27
5 . 1	雲無し条件における各テンプレートの相関係数.....	49
5 . 2	各テンプレートがマッチした場所でのそれぞれの画像相関.....	50
5 . 3	ミスマッチ直前における他のテンプレートの画像相関.....	53
5 . 4	アフィン変換による各 GCP の誤差.....	58
5 . 5	擬似アフィン変換による各 GCP の誤差.....	58

1 序論

1.1 背景

1999年、アメリカ航空宇宙局より人工衛星 Terra が打ち上げられた。NASA は、21世紀の長期的な地球環境観測を展開していくため、地球観測システム計画 EOS (Earth Observing System) を推進しており、その主役となるのが人工衛星 Terra である。この人工衛星 Terra には5つの観測センサが搭載されており、MODIS センサはその中のひとつである。MODIS センサは、少なくとも地球の同一地点を約2日に一回撮影可能であり、空間分解能 1000m、36チャンネルのマルチスペクトルセンサとなっている。すなわち、MODIS センサは地球観測において非常に優れた能力を有していると言える。

アジア地域での MODIS センサデータの受信・運用は、東京大学生産技術研究所の他、いくつかの大学・研究機関においてもなされており、受信したデータを無償で加工・配布するシステムが構築されている機関もある。通常、MODIS データを受信した場合、システム補正と呼ばれる処理を経た後、様々な処理レベルのプロダクトが作成される¹⁾。この処理には当然、幾何補正も含まれており、処理レベルによっては単なる地理情報の添付だけや、画像の補正まで行っているものもある。

一般に MODIS データに限らず、システム補正における幾何補正の背景には、その補正精度があまり良くないという問題がある。これは、処理するソフトがどのようなアルゴリズムを用いているかという問題でもあるが、大部分は人工衛星の位置決定が不正確なところに起因する。その原因は、位置決定の計算が人工衛星やセンサのパラメータ情報からのみ行われていながら、その情報が常に一定でないためである。特に、衛星の軌道情報に関しては、微調整が繰り返されており、精密な幾何補正には精度の良い軌道情報を得ることが絶対条件である。受信した MODIS データからのプロダクト作成には、NASA と Wisconsin 大学がそれぞれ開発したシステムが2大ソフトウェアとして用いられているが、これらの幾何補正精度は橋本²⁾によって明らかにされ、そのシステムや手法におけるいくつかの問題点と同時に、現状の幾何補正より更に精密な幾何補正を施す必要があることを指摘している。

これまで、MODIS のような中・低分解能で広い観測幅をもつ衛星画像の精密幾何補正においては、気象衛星 NOAA を中心に数々の手法が提案されてきた経緯がある³⁾。基本的に、精密な幾何補正を行うにあたって用いられる手法は、システム補正の面から改善する方法と、GCP(地上基準点)を用いて補正する方法に大別できる。橋本⁴⁾は、システム補正された MODIS 画像に対して GCP 取得を行い、そこから衛星の位置・姿勢の最確値をもとめた精密幾何補正を試みている。しかし、システム補正をあらかじめ行うということは、そのためのパラメータ情報入手や処理システムの構築といった多くの手間が掛かるという問題も併せ持つ。受信局を構えるような専門的機関においては、これらのしっかりとしたシステム構築が重要となるが、一般ユーザ側が構築するには妥当なシステムではない。また、一般ユーザでも GCP を用いずに精密な幾何補正を行おうとするならば、それに見合った精度の良い衛星の軌道情報を手に入れる必要がある。この場合、処理する撮影シーンが大量であれば個別に衛星の軌道情報入手しなければならないという点で、より手間と労力が必要なことは

明白である。GCP を目視で取って行う幾何補正においても、1000m という分解能ゆえに基準点の決定が困難であり、高い精度をもとめるためには大量の GCP を必要とするので、これも非効率的である。

MODIS センサ画像はその高い観測スペックにより、利用用途は多岐に渡ると予想され、今までのような一部の専門的技術を持つ機関だけの利用に留まらないことも予想されている。これらのことを踏まえると、求められる幾何補正手法の構成はシステム補正に頼らず、付随する様々なパラメータ情報も必要としない、独立的な手法となるべきである。つまり、原画像から直接的に幾何補正ができることが求められる。これを実現した幾何補正手法は複雑なシステムを要せず、処理速度、汎用性、改良の部分で大きな利点となり、他の組織・機関へシステム自体の提供が容易となる。また、撮影時期の異なる大量のデータを手に入れた場合でも、自動化された幾何補正であれば一括処理でき、個々に人工衛星の軌道情報を参照する必要も無い。一般に精密な幾何補正手法を研究する場合、精度面ばかりを重視する傾向があるが、それだけを追求するのではなく、前述のような視点に立った上でのシステム・手法の構築が、広く一般ユーザにとって必要とされるシステムとなる。

これまで、気象衛星 NOAA の例をはじめ、幾何補正における GCP の自動取得にあたっては、衛星画像を陸・海・雲の 3 値化画像にし、海岸線に着目する手法が多く用いられてきた⁵⁾。しかしながら、MODIS センサ画像における完全な 3 値化処理のアルゴリズムは確立されていない。観測時期・条件が毎回異なる衛星画像において、単に 3 値化することだけでも多くの問題が存在し、汎用性のある 3 値化手法となるとさらに困難である。当然この問題は、MODIS センサ画像においても当てはまり、やがては MODIS センサ画像における土地被覆分類手法の確立にも繋がる課題である。

1.2 目的

本論文の命題は、人工衛星 Terra/MODIS センサ画像における自動幾何補正手法のシステムを確立することにある。その中で以下の 2 点を主目的とし、研究・解析をおこなう。そして以下にこれらの目的を達成するための要件を示す。

1. 本論文の幾何補正精度がシステム補正よりも高い精度であること
2. 自動化という観点で汎用性のある手法であること
 - ・ MODIS センサ画像の歪み処理
 - ・ 自動 GCP 取得の検討
 - 分光反射特性の把握
 - 自動陸域抽出の検討
 - ・ 雲と GCP 取得の関係把握
 - ・ 精度検証

本論文が目的とする幾何補正を簡潔に述べると、MODIS センサ画像上から自動で GCP を取得する幾何補正手法である。このような自動幾何補正手法が一般ユーザに対してどのような意義があるのかは背景で述べた。ここでは、幾何補正を主眼とする個々の目的が持つ意義を述べる。

一般に自動・高精度な幾何補正手法はいくつかあり、GCP の自動取得方法に関しても様々である。その中で、GCP の取得という行為が常に雲と密接な関係にあることは変わらない。しかしながら、GCP の取得と雲に関する因果関係をはっきりさせた、あるいは指標化された例はない。これは、システム補正ならば雲に関係なく幾何補正ができるために軽視されているという事にも起因する。だが、システム補正より高精度を目指すなら GCP の取得は重要であり、この点を踏まえると、本論文が目的とする GCP 自動取得や雲量との関係把握は、今後の効率良い GCP の取得を目指す上で重要である。

また、システム補正を含む処理システムは雲量を無視するので、明らかに使えないデータも無駄にストックし、処理をしている。この点も、本論文が目的とする GCP 自動取得や雲量との関係把握によって、改善することが可能である。つまりこれらには、陸域を対象とするユーザが、データベースの中からわざわざ衛星画像を見なくとも、どの場所にどれくらいの雲量が存在しているか、データの使用有無や幾何補正の是非を事前に判断するといった事が可能なシステムに応用できるという意義もある。

1.3 本論文の構成

本論文は前述の内容をふまえ、以下の構成となっている。

まず、はじめに重要となる MODIS センサ画像の前処理について論述する。使用する MODIS センサ画像は東京大学生産技術研究所で受信されたものを基に、データの内容、全観測エリアからの四国域の切り出し、地球の曲面による歪の影響の補正、撮影センサ角に対する回転補正についての手法や検討をおこなっている。

次に、GCP の自動探索に向けた内容を展開する。GCP の自動探索には海岸線の特徴を利用したテンプレートマッチングが有効であり、そのために必要な MODIS センサ画像の自動陸域抽出にあたっては、教師付き分類手法と正規化バンド間演算での適用可能性を検討する。また、作成したテンプレートでの海岸線マッチングが雲量においてどのようなマッチングを示すかをシミュレーションし、考察を行っている。

幾何補正においては、GCP 自動取得によるアフィン変換を行い、システム補正されたデータと本論文で補正したデータを比較し、その補正精度から本件の補正精度についての有用性を論述する。そして最後に、その利用法を検討するとともにまとめを述べる。

2 人工衛星 Terra/MODIS センサ

2.1 人工衛星 Terra の概要

地球観測衛星である人工衛星 Terra は、1999年12月、アメリカが推進する地球観測計画の初号機として NASA より打ち上げられた。人工衛星 Terra 打ち上げには、近年急速に起きている地球環境の変化に対する深刻な危惧と、人工衛星を使った宇宙からの観測が地球環境の問題を把握する最も現実的な手段であるという背景がある。しかしながら、地球環境変化における原因の多くは、地球規模の問題であるがために、原因を突き止めることや予測を行うには観測データの質・量ともに不十分な現状にある。

人工衛星 Terra は、高度 705 km の極軌道を飛行し、5 つの高性能観測センサを備えた地球観測システム計画 (EOS) の中核をなす人工衛星である。人工衛星 Terra がこれからの地球観測の中心をなすであろう理由は、その優れた設計計画にある。人工衛星 Terra とそのセンサは、地球が反射・放射する電磁波を観測する受動型の観測をおこない、EOS 計画が定めた気候変動の要因 24 種のうち、16 種類を観測するように設計されている。また、5 種類の異なった性能を持つセンサは、その性能の高さだけでなく、同じ衛星に搭載されているため、容易に相互のデータを補完し合うことができる。そして、何より大きいのは、観測されたデータが無償（あるいは格安）で誰でも手に入れることができることを基本方針にしているところである。すなわち、これまでほんの一部の学術機関でしかできなかった地球観測の恩恵が、さまざまな産業に生かされる可能性がある。

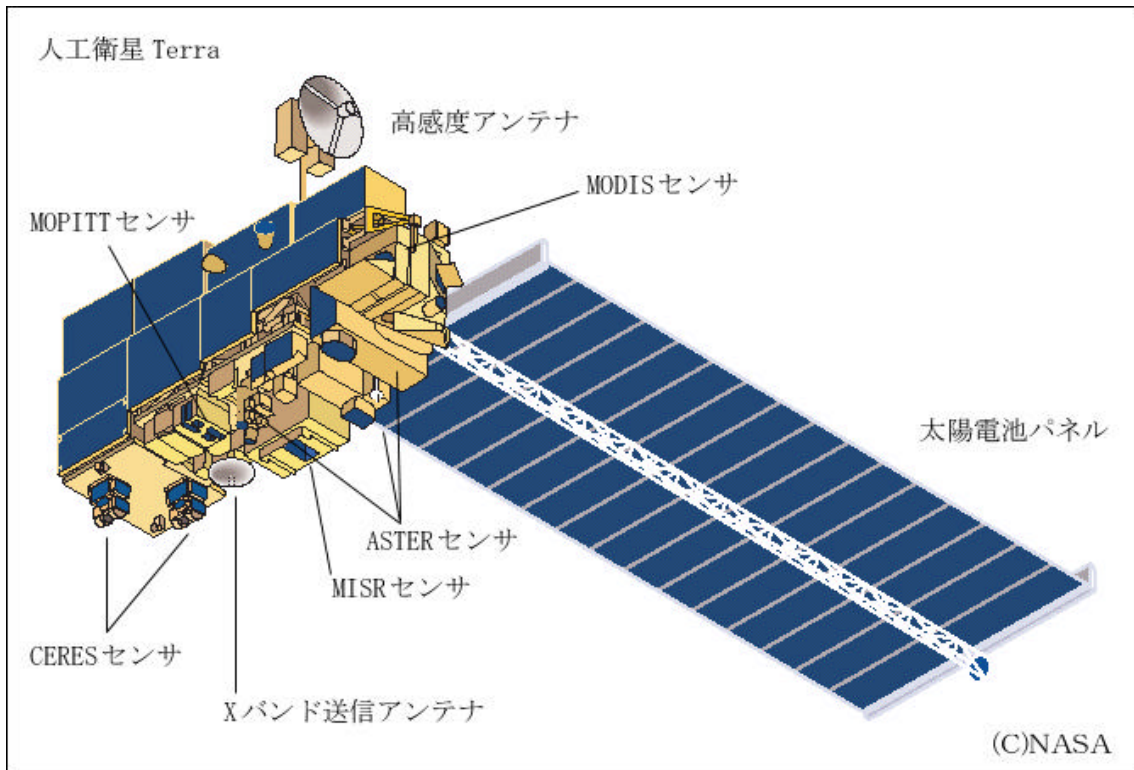


図 2.1 人工衛星 Terra 概要図

2003年現在，アジア地域においては，人工衛星 Terra からのデータ受信が，アジア工科大学，東京生産技術研究所，東京情報大学，東海大学技術センターなどで行われている．その内，東京生産技術研究所では，MODIS センサ画像のデータを受信・オンライン処理で配布するシステムの運用が行われている．当然このシステムも EOS の基本方針に沿って，誰でも無償で簡単にデータを手に入れることが可能となっている．

表 2.1 EOS 計画における人工衛星 Terra の設計観測指標

エアロゾル	熱放射	地表温度	大気汚染
気温	氷山	土地利用	氷河
雲	降雪	自然災害	水蒸気
火災	植生	海洋栄養素	海面温度

表 2.2 人工衛星 Terra の主な仕様

軌道	太陽同期
赤道地方時間	午前10時30分降交点
飛行高度	705Km
傾斜	98.2°
回帰周期	16日
軌道周期	98.88分
ミッション期間	6年
観測センサ	資源探査用将来型センサ(ASTER)
	雲・地球放射エネルギー観測システム(CERES)
	多重角度画像分光放射計(MISR)
	中分解能分光放射計(MODIS)
	対流圏汚染観測装置(MOPITT)
寸法	約6.8 m × 約3.2m
衛星重量	5,040kg
衛星電力	平均2530w
通信	Kuバンド 150Mbps(サイエンスデータ)
	Xバンド 13Mbps(DB)、105Mbps(DDL)
	Sバンド 16Kbps(テレメトリ)、10Kbps(コマンド)

2.2 観測センサについて

2.2.1 5つの観測センサの概要

ASTER：資源探査用将来型センサ

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

- * 機器開発：通産省（日本）
- * 空間分解能：15-90m
- * 観測波長帯：0.5-0.9 μm , 8-12 μm
- * 特徴：高分解能，ステレオ視，センサが観測方向に視線を向けられる。

CERES：雲・放射エネルギー測定システム

Clouds and the Earth's Radiant Energy System

- * 機器開発：NASA
- * 空間分解能：20000m
- * 観測波長帯：0.3-5.0 μm , 8-12 μm , 0.3-200 μm
- * 特徴：地球の全放射収支と放射フラックスにおける雲の役割を観測。

MISR：多視覚イメージング分光放射計

Multi-angle Imaging Spectro Radiometer

- * 機器開発：ジェット推進研究所
- * 空間分解能：275-1100m
- * 観測波長帯：446-906 μm
- * 特徴：9台のカメラで太陽光の散乱を観測。

MODIS：中解像度イメージング分光放射計

Moderate Resolution Imaging Spectrometer

- * 機器開発：NASA
- * 空間分解能：250-1000m
- * 観測波長帯：405-14.385 μm
- * 特徴：もっとも多チャンネルで観測項目が多く，使用用途が広い。

MOPIIT：対流圏汚染計測装置

Measurements of Pollution in the Troposphere

- * 機器開発：カナダ宇宙機構
- * 空間分解能：22000m
- * 観測波長帯：2.3 μm , 2.4 μm , 4.7 μm
- * 特徴：メタンと一酸化炭素の検出に優れる。

2.2.2 MODIS センサ詳細

MODIS センサは人工衛星 Terra が備えるセンサの中でも中核をなす存在である。36 種類の観測波長帯を持ち、可視、近赤外では 20 種のバンドで陸域、雲、エアロゾル、海、水蒸気、雲を観測し、赤外領域では 16 種のバンドで地表や雲の温度、大気温度、水蒸気、オゾンを観測している。また、観測幅約 2330km というスペックは、地球全域を約 2 日でカバーできるため、様々な地球変動を即時に捉えることができる。これらの MODIS センサの特性は、長年培われてきた地球観測衛星 NOAA の経験を生かして設計されたものであり、地球観測において非常に優れたスペックとなっている。

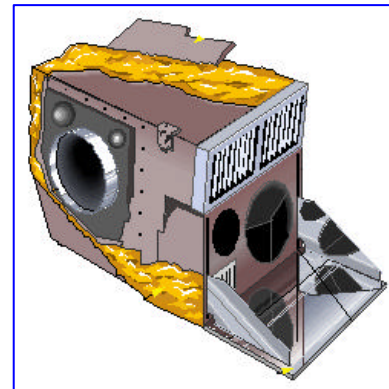


図 2.2 MODIS センサ

空間分解については、Band : 1-2 が 250m、Band : 3-7 が 500m、Band : 8-36 が 1000m になっている。このように MODIS センサは 3 種類の空間分解能を備えているが、データ配布時には、Band : 1-2 の 500m と 1000m、Band : 3-7 の 1000m のデータも補完される。基本的には、1000m 分解能で使用するための仕様であると言える。



図 2.3 MODIS 空間分解能 (四国中部): 左から 250m, 500m, 1000m

表 2.3 MODIS センサ詳細

軌道	高度705kmの太陽同期軌道
走査幅	2330 km (cross track) × 10 km (along track at nadir)
サイズ	1.0 × 1.6 × 1.0 m
重さ	228.7 kg
電力	162.5 W 平均
データ転送率	10.6 Mbps (peak daytime) : 6.1 Mbps (orbital average)
量子化	12 bits
空間分解能	250 m (band 1-2)
	500 m (band 3-7)
	1000 m (band 8-36)
設計寿命	約6年

表 2.4 MODIS センサ観測バンド一覧

Primary Use	Band	Bandwidth	Spectral Radiance
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	620 - 670	21.8
	2	841 - 876	24.7
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	459 - 479	35.3
	4	545 - 565	29
	5	1230 - 1250	5.4
	6	1628 - 1652	7.3
	7	2105 - 2155	1
Ocean Color Phytoplankton Biogeochemistry	8	405 - 420	44.9
	9	438 - 448	41.9
	10	483 - 493	32.1
	11	526 - 536	27.9
	12	546 - 556	21
	13	662 - 672	9.5
	14	673 - 683	8.7
	15	743 - 753	10.2
Atmospheric Water Vapor	16	862 - 877	6.2
	17	890 - 920	10
	18	931 - 941	3.6
Surface/Cloud Temperature	19	915 - 965	15
	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)
	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)
Atmospheric Temperature	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)
	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)
Cirrus Clouds Water Vapor	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)
	26	1.360 - 1.390	6
	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)
Cloud Properties	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)
	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)
Ozone	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)
Surface/Cloud Temperature	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)
	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)
Cloud Top Altitude	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)

・ Band1-19 の単位 : n m k : kelvin

・ Band20-36 の単位 : μ m Radiance : Watts/ m²/steradian/micron

2.3 MODIS データフォーマットとその操作

MODIS センサは観測時にその撮影スペクトルを 12 ビット (2^{12}) で量子化し、その後各地の基地局・機関で様々なレベルの処理が行われる。一般に、MODIS センサ画像は HDF-EOS (Hierarchical Data Format Earth Observing System) と呼ばれるフォーマットで配布される。レベル処理に関しては、観測したスペクトルから計算モデルとアルゴリズムによって反射率のデータを 4 つに分類している。レベルはそれぞれ 0 から 3 までの 4 種類で、本研究で使用したのは Level1b とされる処理レベルのものである。これは人工衛星や取得データに関するパラメータデータなどを付随させただけの低次プロダクトである。この MODIS-Level1b プロダクトにおいては、各画素に対する地上の緯度経度の値を 5 画素分ずつ記述したデータが含まれる。

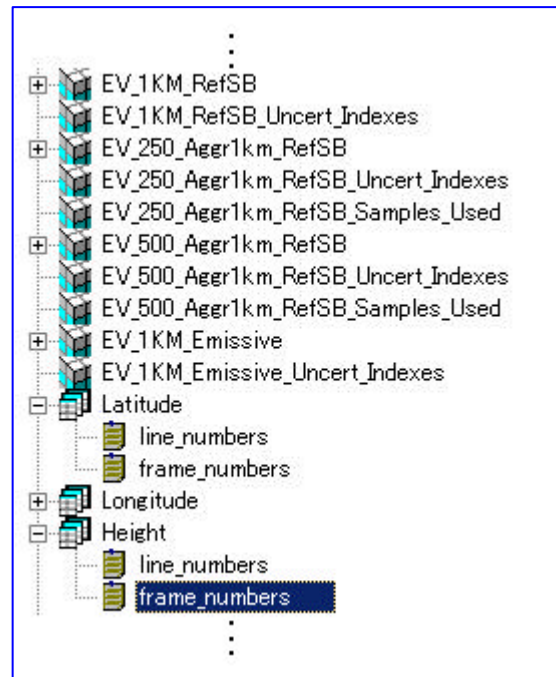


図 2.4 HDF データ構造

HDF フォーマットは、画像データ以外に様々なパラメータデータ（地理座標、太陽天頂角、センサ角など数十種）を付随するための階層的なフォーマットで、主に科学技術関連のデータに用いられる。HDF フォーマットのデータ操作に関しては、Research System 社が提供する HDF に関する操作スクリプトや、米 Wisconsin 大学で無償配布されている、MODIS Level1b データ処理用のスクリプトを用いた。これらのスクリプトはプログラムソースが閲覧可能で、容易に修正ができる。

配布された MODIS の HDF データからは、基本的に 2 種類のデータを取り出すことができる。ひとつは DN 値（デジタルナンバー値）と呼ばれるもので、これは各画素における地表からの反射光の強さに対応したデジタル濃度値である。Level1b では校正済放射輝度に変換されている値であり、取り出した場合は整数型 16bit のデータサイズとなる。もうひとつは、ラジアンズデータである。ラジアンズ (radiance) とは、放射輝度を意味し、空間を伝播する電磁波エネルギーの大きさを表している。ラジアンズデータで取り出した場合は、実数型 32bit データサイズになる。DN 値からラジアンズ、ラジアンズから DN 値への変換は、Level1b プロダクトに付随するにゲイン、オフセットの値を利用して行うことができる。

本研究では、処理する場合は全て DN 値のデータで行った。

2.4 MODIS データのシステム補正による幾何補正

システム補正による幾何補正とは、衛星画像の幾何学的歪を人工衛星のパラメータ情報とセンサの幾何学的特性データのみを用いて補正し、観測地点の地理座標を算出する補正である。MODIS-Level1b プロダクトには、計算から算出された各画素に対応する緯度経度の座標値データ（投影法：整数化正弦曲線）が含まれていることは既に述べた。つまり、この緯度経度座標の値を用いて幾何補正をおこなうことは可能であるが、座標値の精度そのものが良くないため、使用には適さない。

一般に、システム補正による幾何補正の精度は悪いとされており、この問題は MODIS においても例外ではない。実際にシステム補正された画像に国土数値情報の海岸線（1/2500）を重ねてみると、その精度は明らかである。システム補正が実際にどれ程ずれているのかは後に後述するが、図 2.5 を見れば多いところでは 4, 5 画素ずれていることがわかる。リモートセンシングにおいては、時系列的な解析や GIS 各種のデータを重ね合わせて解析することが重要な命題であり、このずれは非常に憂慮すべき問題である。

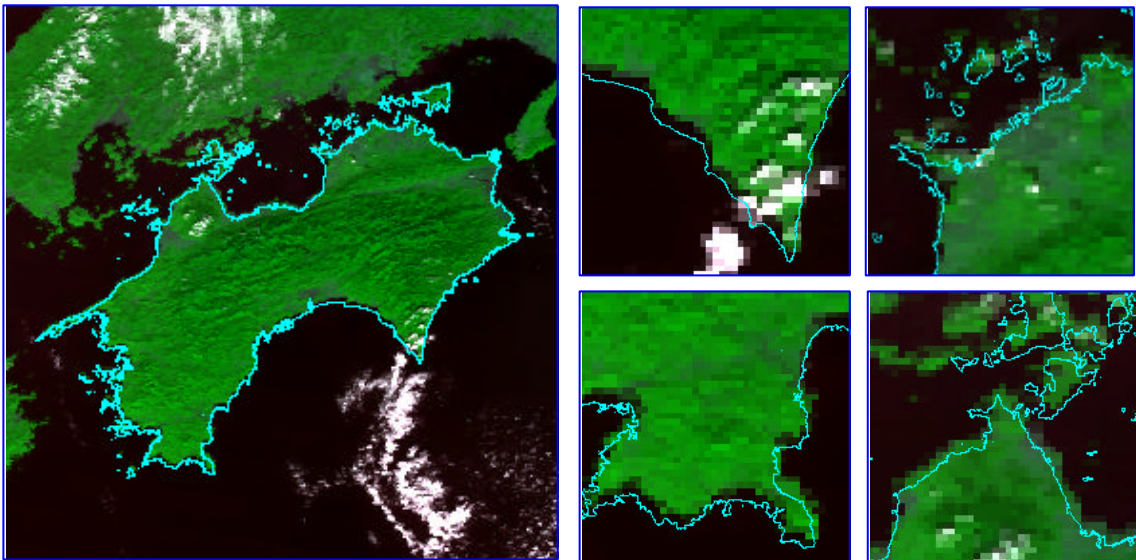


図 2.5 システム補正のずれ

また、MODIS センサ画像の 1000m という分解能は、目視・手動による幾何補正をも困難にしている。Landsat (30m) や SPOT (16m) などの分解能であれば、地図や GIS データなどから、目視・手動によって GCP を取得する幾何補正が十分可能である。そのため、実際にシステム補正されたデータを入手して使用する場合、前述の方法で精密に補正し、使用するのが通常である。しかしながら、MODIS のような 1000m の分解能ともなると、その地形的特徴を詳細に目視で判断するのは困難である。このような分解能から目視による幾何補正を行う場合、誤差を少なくするためには相当数の GCP が必要であり、また満遍なく均等に取れるかどうかとも考慮すると、非常に時間と労力を要することがわかる。

3 MODIS データの前処理

3.1 取得データの状況

本研究の使用データは全て東京大学生産技術研究所で2001年に受信されたものである。図 3.1 を参照すると、取得されたデータはセンサの観測幅が 2330 km なのに対し、1354 画素しかないことがわかる。また、画像の両端部では、bow-tie 効果と呼ばれる現象が発生している（図 3.2）。これは、センサ走査角が大きい場合に起こり、センサが同じ箇所を重複して走査してしまうための現象で、画像の両端はぶれの様な状態となっている。本来ならばこの bow-tie 効果を取り除く必要があるが、本研究ではその補正は行わなかった。bow-tie 効果が起こるのは画像の両端であり、例え補正したところで、その両端は地球の曲面による歪の影響が強く、後の使用に耐えうるデータにはならない。また、本研究で扱ったデータエリアは、センサのほぼ直下にあるものだけを使用したので、bow-tie 効果の影響は少ないであろうと判断した。

このように、MODIS センサ画像は、観測幅が大きいため、地球の曲面による影響を大きく受けたものとなっている。そのため、取得されたデータには、非線形の影響が存在する。システム補正でその補正を取り除いても、やはり MODIS センサ画像の両端は使用に向かないと思われる。研究等に使用される場合もほぼセンサ直下に近いシーンばかりと想定されるので、本研究では、画像両端のシーンでは幾何補正を検証しないこととした。

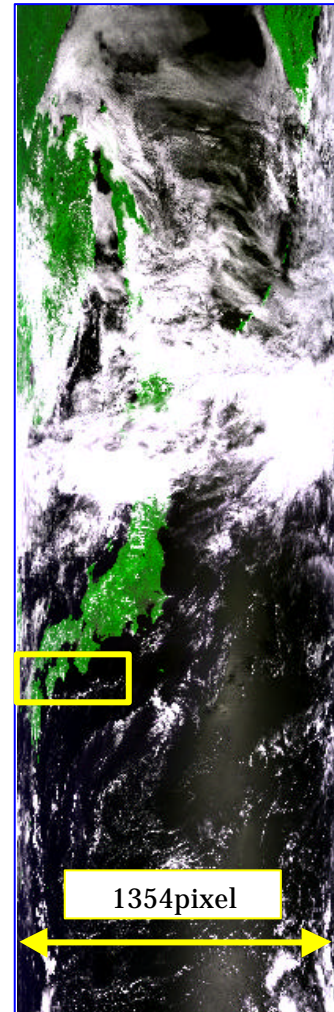


図 3.1 データ全景

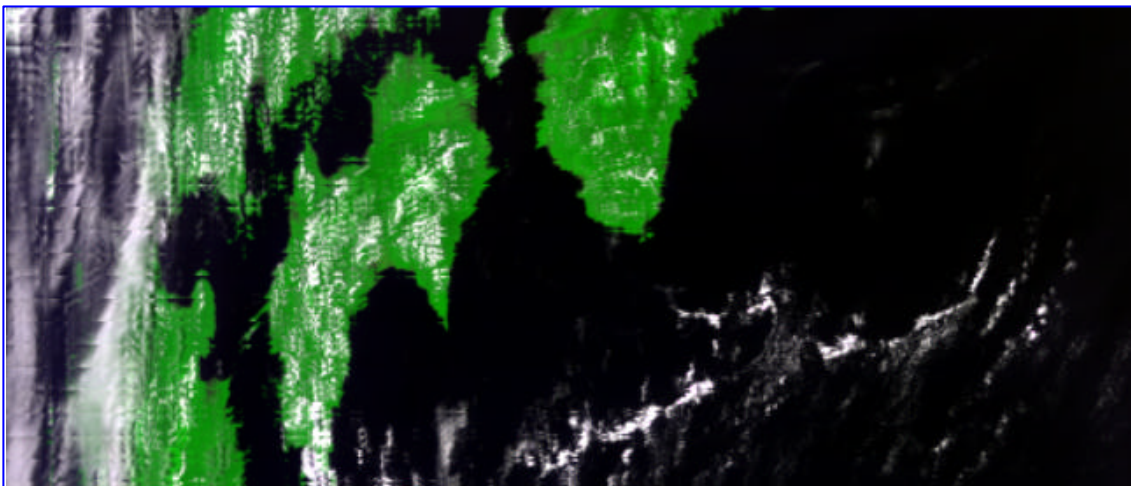


図 3.2 MODIS bow-tie 効果

3.2 地球の曲面による歪の影響の除去

3.2.1 撮影画素に対する地上観測幅の算出

MODIS センサ画像では、人工衛星の進行方向（副走査方向）には地球の曲面の影響を受けず、センサのスキャンライン方向（主走査方向）にのみその影響がある。MODIS センサの IFOV（瞬間視野）は一定なので、直下のシーンはほぼ並行に地表面が投影されるのに対し、撮影範囲の端部となる画素ほど、地球の曲面の影響によって撮影地表面の幅は広がる。これが、歪の原因である。図 3.3 を見れば分かるように、両端ほど圧縮されたような形になっている。この影響は非線形なので、後の海岸線マッチングや幾何補正のために最初に補正する必要がある。

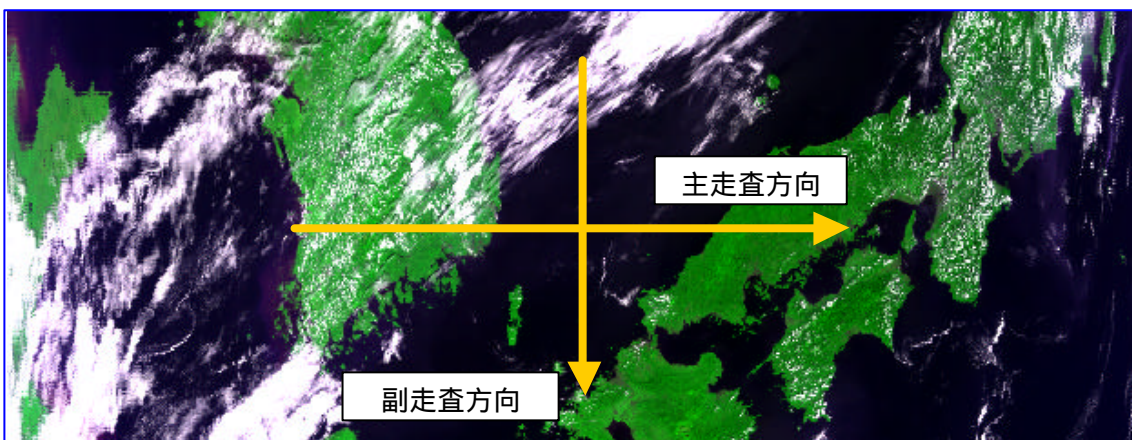
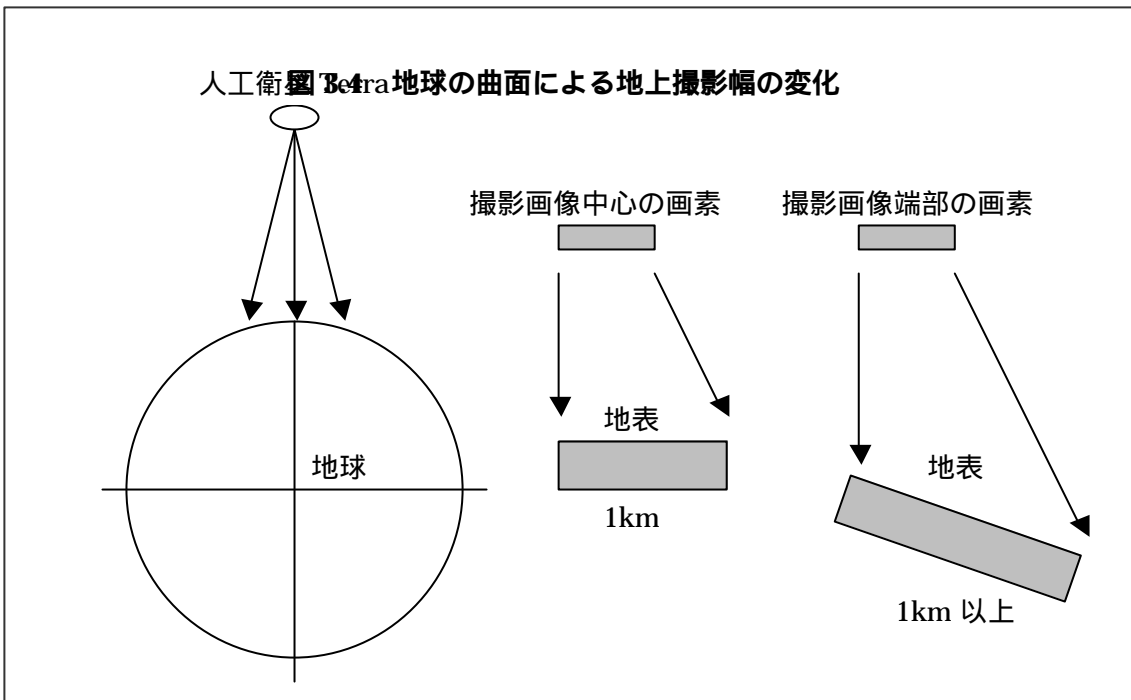


図 3.3 MODIS センサ主走査方向全球



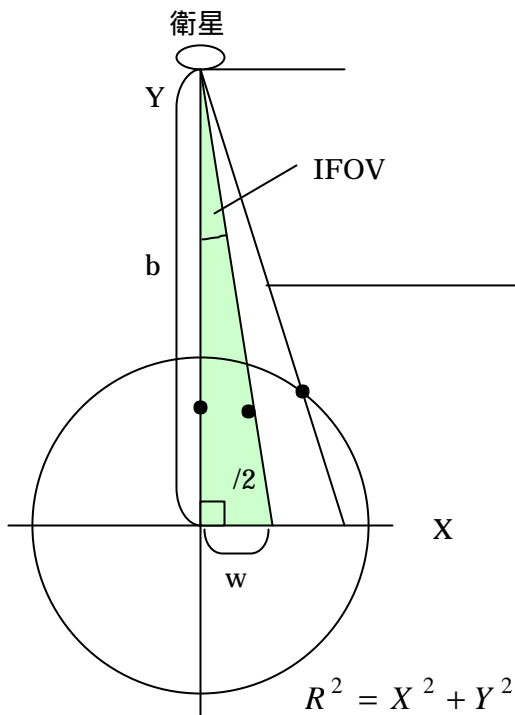
MODIS センサ画像で、どの画素がどれくらいの地上幅に相当するのかは、地球の半径と

センサの IFOV(瞬間視野角)から近似的に求めることができる。地球断面を正円と仮定し、撮影の視線ベクトルなどを考慮すると、以下の円と直線の関係から成り立つ。これらを二次連立方程式の解として求めると、各撮影画素の視線ベクトルと、円の交点における X, Y 座標を算出でき、MODIS センサ画像における 1 画素あたりの観測幅をそれぞれもとめられる。なおこの計算は、撮影画像中心から半分の画素についての計算である。

MODIS センサ画像の撮影画素に対する地上観測幅の計算

$$\left. \begin{aligned} R^2 &= X^2 + Y^2 \\ Y &= \frac{b}{b / \tan(\theta / 2 - IFOV \times n)} X + b \end{aligned} \right\} (3.1)$$

R: 6371.137km (地球の半径)
 b: 77076.137 km (衛星の高度 705km+R)
 IFOV (瞬間視野): 0.001418
 n: 撮影画像横幅中心から n 番目の画素



どの画素の視線ベクトルも IFOV は一定であるので、
 視線ベクトル: $y=ax+b$ の傾き a は $\tan(\theta/2) = b/w$ より
 $w = b / \tan(\theta/2 - IFOV \times n)$ であり
 $a = b / \tan(\theta/2 - IFOV \times n)$

円と直線の交点間の距離から撮影画素ひとつひとつの地上観測幅をもとめる。

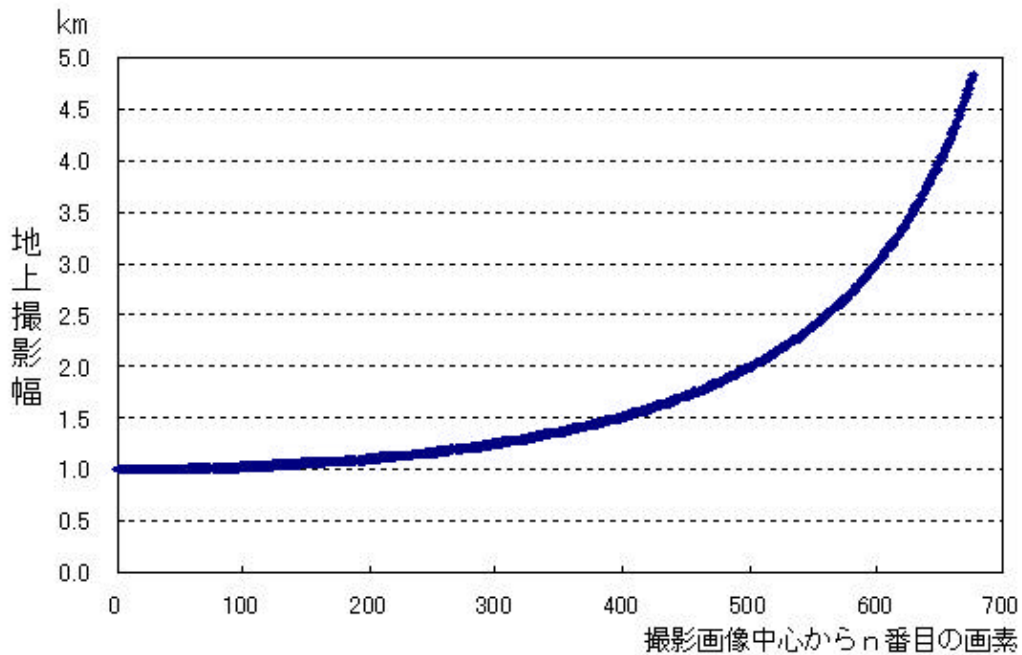


図 3.5 各撮影画素の地上観測範囲

図 3.5 は、MODIS センサ画像の撮影画素に対する地上観測幅の計算によってもとめた、撮影画像横幅中心から n 番目の画素が実際に撮影している地上観測幅を表したグラフである。全ての画素の観測幅（全 677 画素）を合計すると、1165.98km となり、これは MODIS センサ画像半分の合計値なので、画像全体（全 1354 画素）では 2331.96km となる。MODIS センサのスペックで記される観測幅 2330km と比べると、計算式でもとめた値との差は、わずか 1.96km であった。これにより、ほぼ正しく各画素ひとつひとつが実際に撮影している地上幅を求めることができたと言える。

グラフによると、空間分解能 1km をほぼ正しく投影している画素は中心から左右約 400 個までであり、それ以降の画素になってくると、1.5km 以上の地上幅を投影していることがわかる。画像端部では、最大で観測幅は 5km/pixel となり、かなり大きな歪を生じさせている。これらを幾何学的な面で改善するためには、実際の地上観測幅に合わせたピクセルの拡張を行う必要がある。

3.2.2 歪の補正

計算式により、各画素がどれくらいの地上幅を観測しているかが算出できた。そのため、MODIS センサ画像における各画素をいくら主走査方向に拡張すればよいか分かる。ここでは、観測幅 2km の 1 画素は 2 画素分、3km は 3 画素分・・・、というように、先にもとめた画素ごとの地上観測幅を参照テンプレートとして画素の拡張を実行した。

この場合の実行結果は図 3.6 のようになる。図内の正しい四国の海岸線と比較すると、全く相似でないことより、単に参照テンプレートを基にした拡張では失敗してしまうことがわかる。補正用のテンプレートを見ると（補正前図の枠線内に対応）、画像の約左半分が等倍なのに対し、右半分は 2 倍を示していた。そのため、失敗した図 3.6 は当然の結果となっている。1 画素を実数単位で分割することは当然できないので、拡張する場合の手法を修正する必要がある。

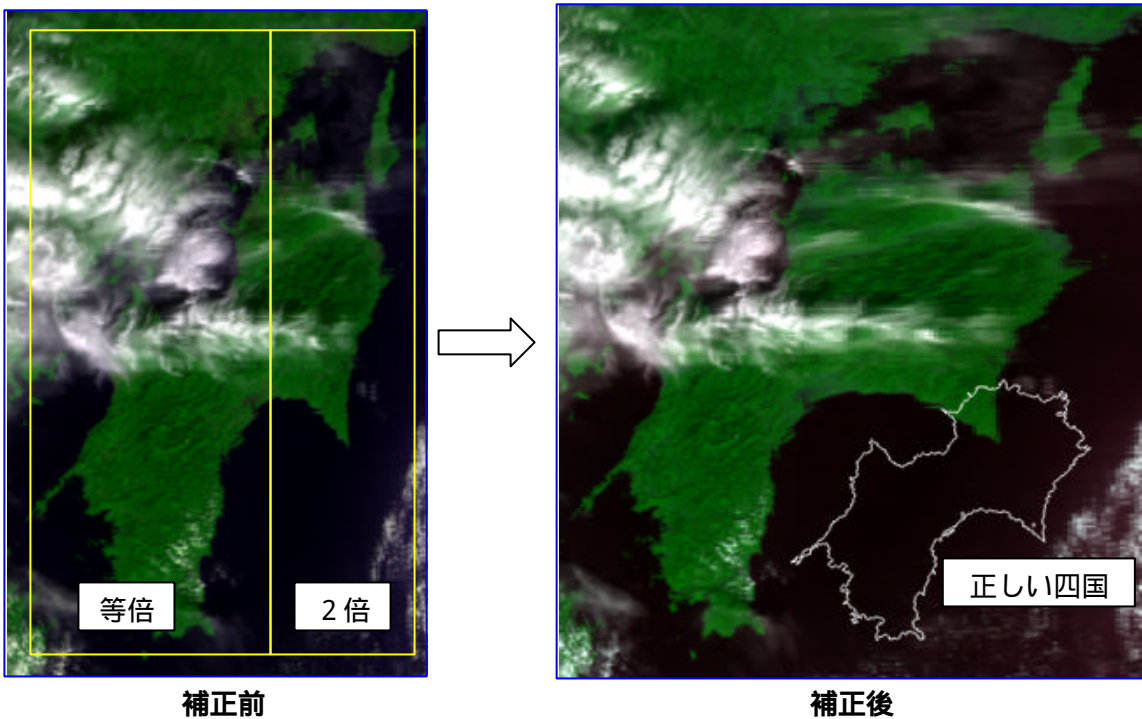


図 3.6 画素の拡張処理

そこで、拡張する場合、その拡張数を $\times 10$ 倍にすることとした。そしてアウトプットする画像は、拡張数 $\times 10$ 倍したデータから、順に 10 画素ごとに値を書き出していく(図 3.7)。つまり、画像サイズを 10 倍することで、仮想的に 1 画素を $1/10$ 画素単位で処理できることとなる。画像サイズを拡大した後に処理し、その後縮小すれば、原画像を直接拡張するより極端な拡張の変化を防ぐことができる。その場合の結果は、図 3.8 の通りである。先の拡張方法より遥かに改善されているのがわかる。

これらの手法により、地球の曲面による歪の影響を補正し、非線形の影響を無くすことができる。

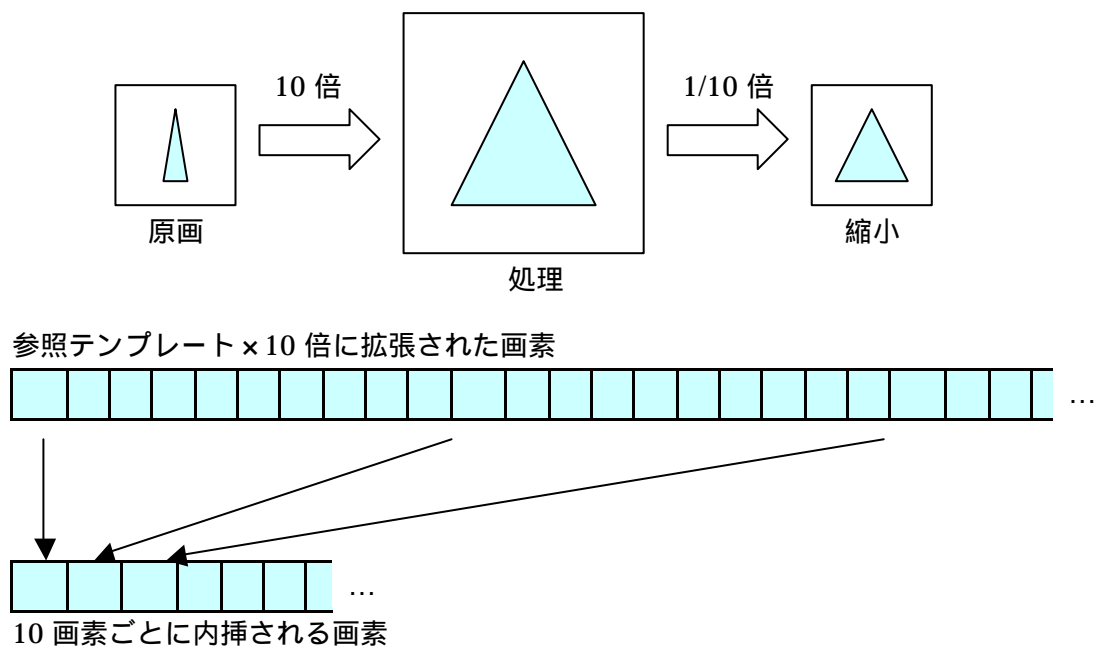


図 3.7 拡張処理の概要と内挿方法

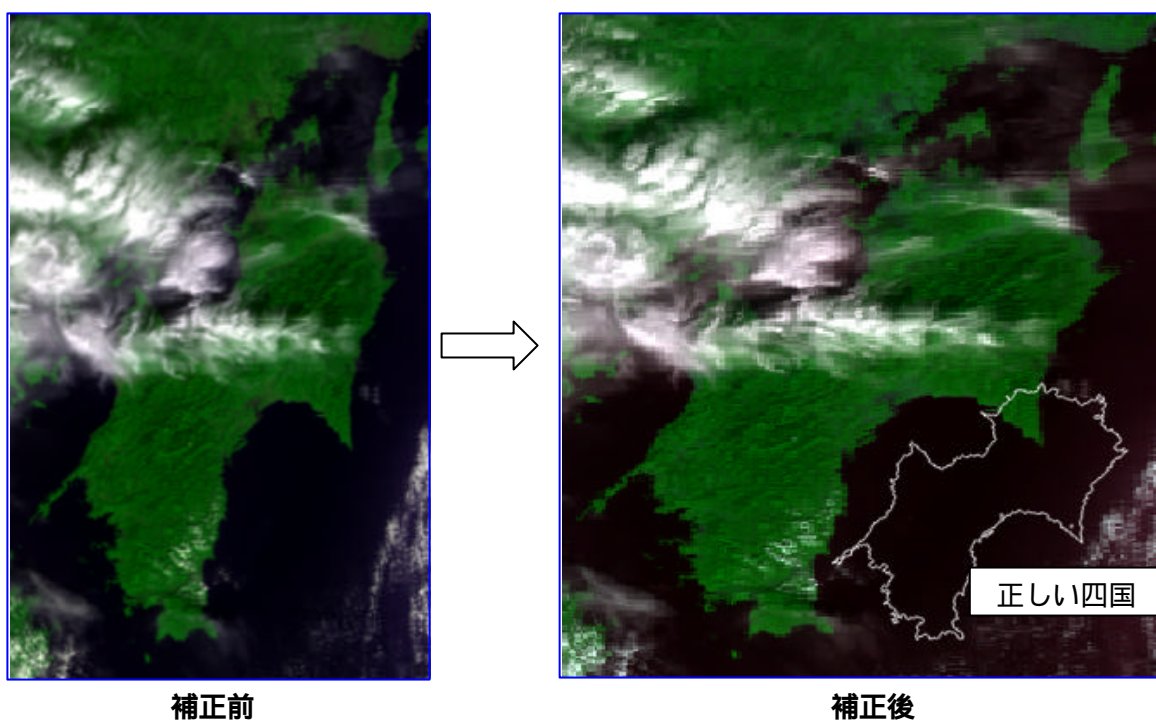


図 3.8 画素の拡張処理 (修正)

3.3 軌道傾斜角に対する回転補正

人工衛星 Terra は地球の南北を通過する極軌道で地上を撮影している．しかしながら，撮影されたデータにはスキュー歪とは別に傾きが存在する．この傾きは，全シーンでほぼ一定であると考えることができる（軌道修正が繰り返されているので完全に一定ではない）．そのため，あらかじめその傾きを修正するような回転量を与えておくことが，後の海岸線マッチングで有利となる．補正前と補正後では図 3.9 のような回転差が存在するので，補正せずにテンプレートを重ねると，高い相関を得ることはできず，ミスマッチの要因になる．

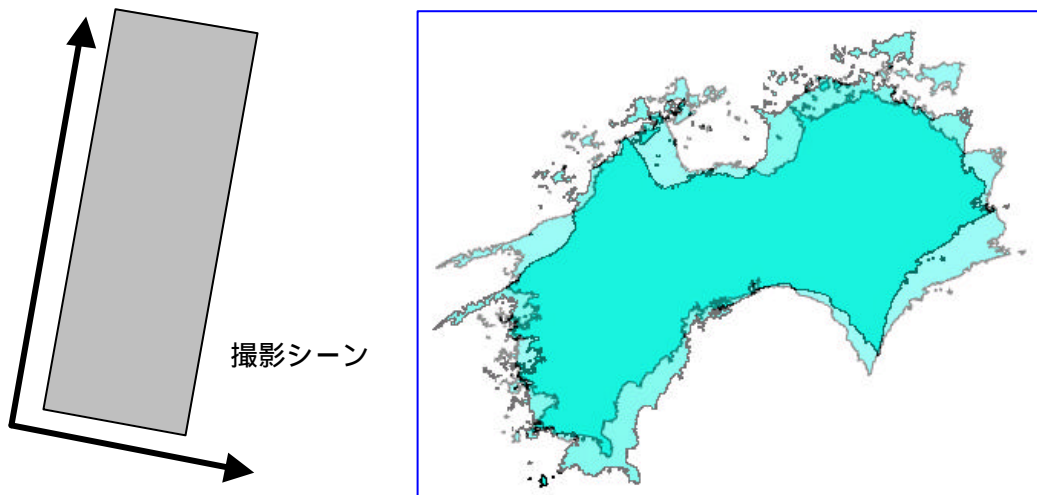


図 3.9 撮影シーンと撮影軌道による角度差

ここでは，目視で MODIS データから GCP を取り，市販ソフトウェアを用いて幾何補正したデータと，幾何補正前のデータを比較し，回転量を求めた．使用データは，地球の曲面による歪を補正しデータである．対応点を取るための参照データは国土数値情報の海岸線（1/2500）を用い，特徴のある海岸線や島などを GCP とし，全 12 点の GCP を使って幾何補正を行った．変換座標は UTM-平面直角座標系-第四座標系である．GCP の RMS エラー（平均二乗誤差）は平均で 0.57km，最大でも 1.26km であったので回転量を求めるには十分な補正精度であると言える．

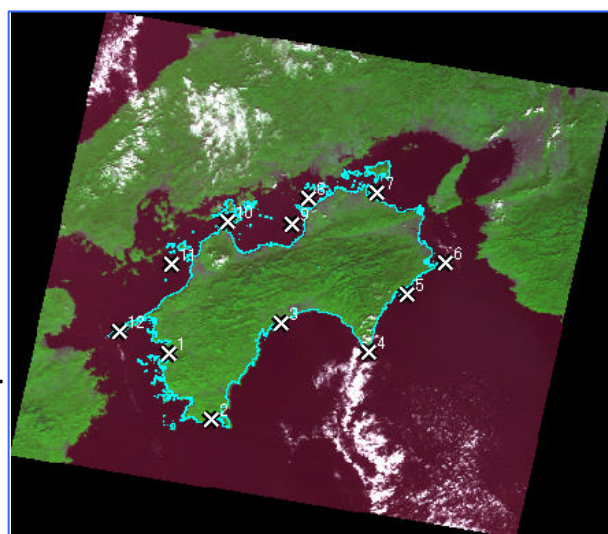


図 3.10 目視による GCP と幾何補正

回転量の算出は、幾何補正前の GCP 座標 (u_1, v_1) と幾何補正後の GCP 座標 (u_2, v_2) を直接比較し、角度の差をもとめた。図 3.11 は幾何補正後の画像サイズ (463×403) の中心を原点に、画像中心を原点として GCP 全 12 点をプロットしたものである。全 12 点の平均ラジアン値は 0.185 で反時計回りに約 10.6°、標準偏差は 1.27 であった。これにより、撮影センサ角の補正には 0.185(rad)を用いることとした。

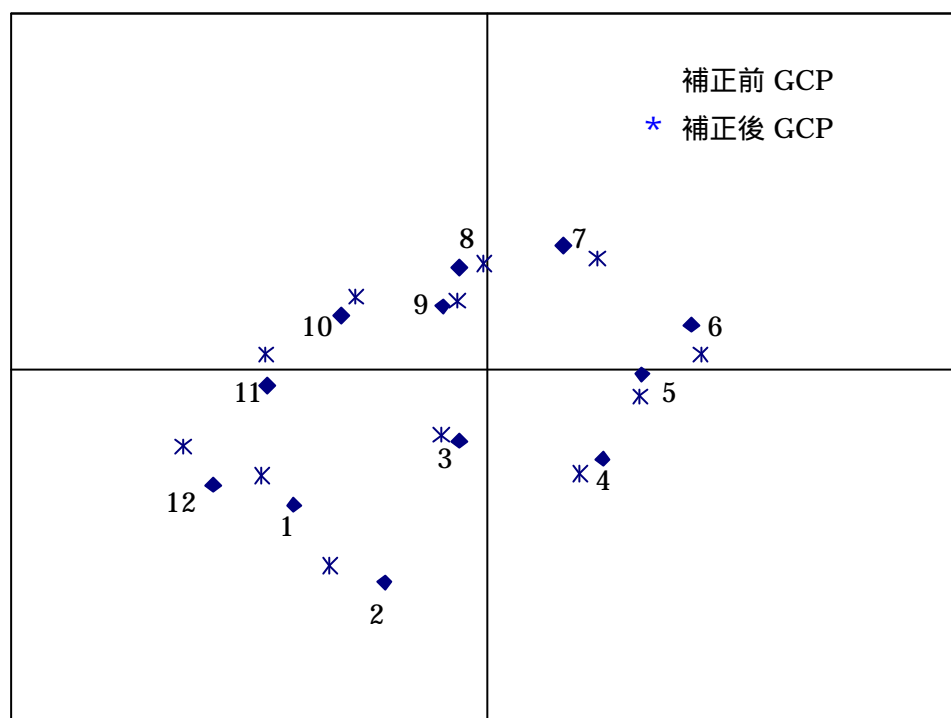


図 3.11 GCP (u, v) プロット

表 3.1 GCP 座標と回転角

No	補正前GCP		補正後GCP		回転角(rad)	回転角(°)
	u_1	v_1	u_2	v_2		
1	-109.4	-60.7	-94.5	-77.0	0.178	10.2
2	-77.0	-111.7	-50.1	-121.6	0.212	12.2
3	-22.8	-37.6	-13.9	-40.5	0.215	12.3
4	44.9	-59.6	55.9	-50.7	0.189	10.8
5	74.2	-15.7	75.0	-3.5	0.162	9.3
6	103.7	8.8	99.0	24.7	0.160	9.2
7	53.0	63.0	36.2	69.6	0.220	12.6
8	-2.2	59.1	-13.9	57.4	0.201	11.5
9	-15.0	38.7	-22.0	35.4	0.185	10.6
10	-64.1	41.0	-71.0	30.4	0.164	9.4
11	-108.1	8.2	-107.0	-9.5	0.165	9.5
12	-147.9	-43.5	-133.9	-65.7	0.170	9.7

画像の回転に用いた変換式は以下の通りである。また、回転角を rad 、回転の原点は画像中心である。

「回転後の画像座標の計算」

$$cx1 = \frac{imgw}{2} \quad cx2 = \frac{xsize}{2}$$

$$cy1 = \frac{imgh}{2} \quad cy2 = \frac{ysize}{2}$$

$$\left. \begin{aligned} imgx &= (x - cx1) \times \cos(rad) - (y - cy1) \times \sin(rad) + cx2 \\ imgy &= (x - cx1) \times \sin(rad) + (y - cy1) \times \cos(rad) + cy2 \end{aligned} \right\} (3.2)$$

cx1 : 出力画像の横幅中心	x : 出力画像の x 座標	imgw : 出力画像横サイズ
cy1 : 出力画像の縦幅中心	y : 出力画像の y 座標	imgh : 出力画像縦サイズ
cx2 : 元画像の横幅中心	imgx : 入力画像の x 座標	xsize : 原画横サイズ
cy2 : 元画像の縦幅中心	imgy : 入力画像の y 座標	ysize : 原画縦サイズ

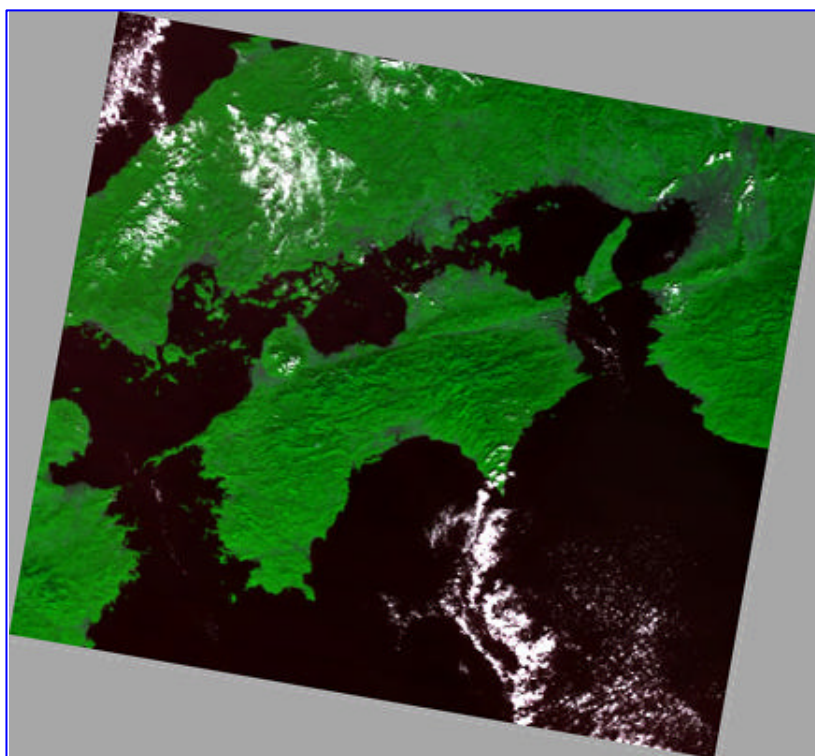


図 3.12 回転後画像 (約 10°)

4 陸域の自動抽出

4.1 陸域抽出手法の検討

4.1.1 教師付き分類の適用検討

幾何補正を自動で行う場合、最も重要なのは、人間が幾何補正するにあたって目視で行っている GCP の取得を自動化させることにある。つまり幾何補正の自動化とは、衛星画像から地上の特徴点となる場所を自動的に探さなければならないということである。そしてこの場合、空間分解能 1000m の MODIS データにおいて、最も GCP となりうる特徴を持つのが海岸線である。海岸線であれば、その形状を明確に判別することができると同時に、人工衛星の撮影時期などによる影響もほとんど受けることはない。そのため、陸域を自動抽出できれば、それは海岸線の特徴を得ることに等しく、その海岸線の形状を利用した GCP の自動取得が可能となる。

まず、陸域の抽出に関するアルゴリズムは土地被覆分類手法が利用できると思われる。土地被覆分類手法とは、複数のスペクトル画像の特徴空間を領域分割するもので、トレーニングエリア（サンプルデータセット）を必要とする教師付き分類と、画像のスペクトル特徴のみを用いる教師無し分類がある。教師無し分類（クラスタ分類）は、トレーニングデータを必要としないので、どの撮影時期データにも適用できる利点があるが、相対的な分類であり、最終的に分類された項目を人が判別する必要がある。そのため、自動化という点から、教師付き分類での陸域抽出を試みることにした。

教師付き分類をするにあたって適応を検討したのは、最短距離法、標準ユークリッド距離、マハラノビス距離の3手法で、分類する最小のカテゴリーは都市域、陸域、海域、雲域の4つとした。これらをはっきり分類できれば、それは陸域を抽出したと等価である。また、どの撮影時期のデータにも適用するという点では、トレーニングデータより得られる分類係数とその撮影時期の分光反射率に合わせることで可能になると想定できる。

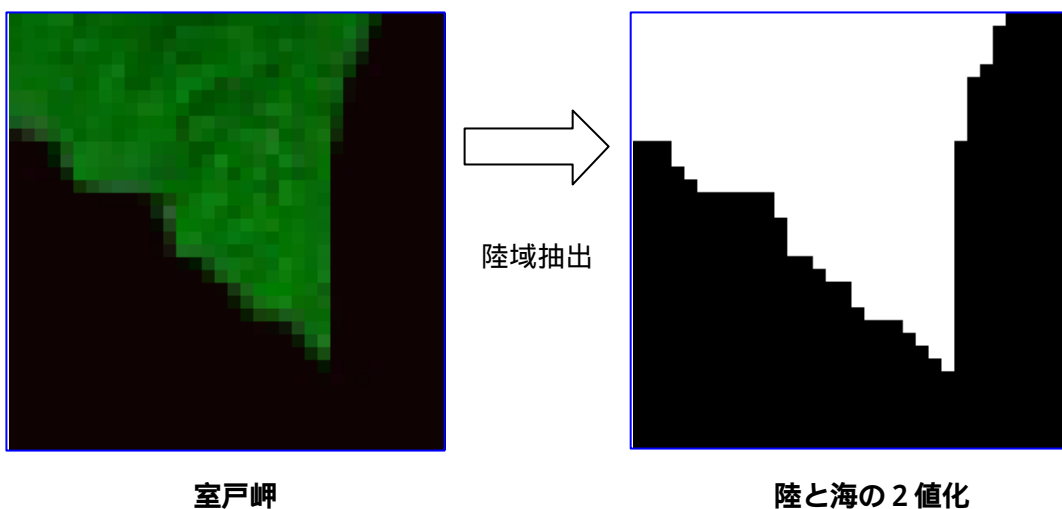


図 4.1 MODIS からの陸域抽出

4.1.2 教師付き分類手法の概要

教師付き分類において最も基本的なのは、ユークリッド距離である。これは、トレーニングデータより特徴空間の平均値をもとめ、未知の画素とトレーニングデータの平均値との差を距離として分類する手法である。標準ユークリッド距離はユークリッド距離の概念に加え、バンドごとのトレーニングデータの分散を考慮している。これは、トレーニングデータの分散の違いを標準偏差で正規化した距離であり、分散のばらつきを確率分布密度と考えることができる。すなわちユークリッド距離によって、あるカテゴリーに分類される未知の画素も、データのばらつき次第では、別のカテゴリーに分類したほうが妥当となる。さらにマハラノビス距離は、標準ユークリッド距離の概念に加え、各バンド間のトレーニングデータの相関（共分散）をも考慮した分類手法である。

これらの手法を以下の画像に適用し、MODIS データの陸域抽出に教師付き分類手法が適用可能かを試みる。トレーニングデータについては、図 4.2 に示すエリアのデータを使った。なお、分類に用いるバンドは 1 ~ 7 とする。MODIS センサはその仕様から、特定の分光反射が特定のバンド帯において検出値の上限を超え、オーバーレンジの値をとっている。この時の値は 16bit の最大値で固定されるため、分散・共分散は 0 になり、マハラノビス距離や標準ユークリッド距離が正しく計算できない。そのため、使用できるバンドはかなり限られてしまう。結果として、分類するために使用できるバンドは 1 ~ 7 と 18 ~ 36 である。このうち、18 ~ 36 は大気と温度についてのバンドなので、分類には陸域と雲の観測に主眼を置いている 1 ~ 7 のバンドだけを使用することとした。

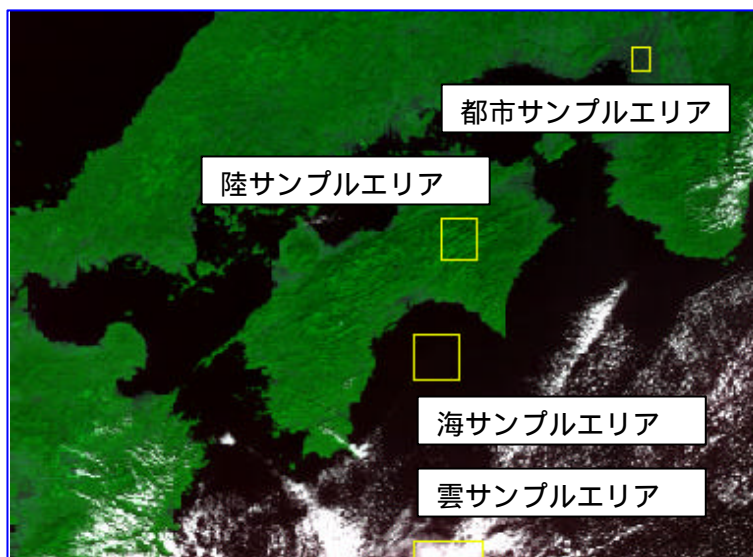


図 4.2 2001/10/15 撮影 MODIS データ

$$\text{ユークリッド距離: } d_k^2 = (X - \bar{X}_k)^t (X - \bar{X}_k) \quad (4.1)$$

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad \bar{X} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix}$$

X : 未知の画素 X におけるバンド 1 ~ n の値

\bar{X} : m_n はトレーニングデータにおけるバンド 1 ~ n の平均値

トレーニングデータの平均値からの距離で画素を分類

$$\text{標準ユークリッド距離: } d_k^2 = (X - \bar{X}_k)^t \mathbf{S}_k^{-1} (X - \bar{X}_k) \quad (4.2)$$

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad \bar{X} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{s}_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \mathbf{s}_{nn} \end{bmatrix}$$

\mathbf{S}_k : 分類クラス k の分散を対角成分にもち、その他の成分は 0 の行列

平均値からの距離に加え、データの分布の仕方も考慮して画素を分類

$$\text{マハラノビス距離: } d_k^2 = (X - \bar{X}_k)^t \Sigma_k^{-1} (X - \bar{X}_k) \quad (4.3)$$

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad \bar{X} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix} \quad \Sigma_k = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{11} & \cdots & \mathbf{s}_{1n} \\ \mathbf{s}_{21} & \cdots & \mathbf{s}_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{s}_{n1} & \cdots & \mathbf{s}_{nn} \end{bmatrix}$$

Σ_k : 分類クラス k の母集団におけるバンド間の分散・共分散

バンド間の相関関係も考慮して画素を分類

* 添字-1 は逆行列, t は転置行列, n はバンド数, k は分類数

4.1.3 分光反射特性

図 4.3 は、陸域、都市域、雲域（濃と薄）、海域における分光反射値（DN 値）をバンドごとに表したグラフである。データはトレーニングデータにおけるそれぞれの平均値をプロットしており、値 30000 を示しているバンドは、そのカテゴリにおいてオーバーレンジとなっていることを示す。各カテゴリのデータのばらつきについては、標準偏差として図 4.4～4.7 に個別のグラフで示した。

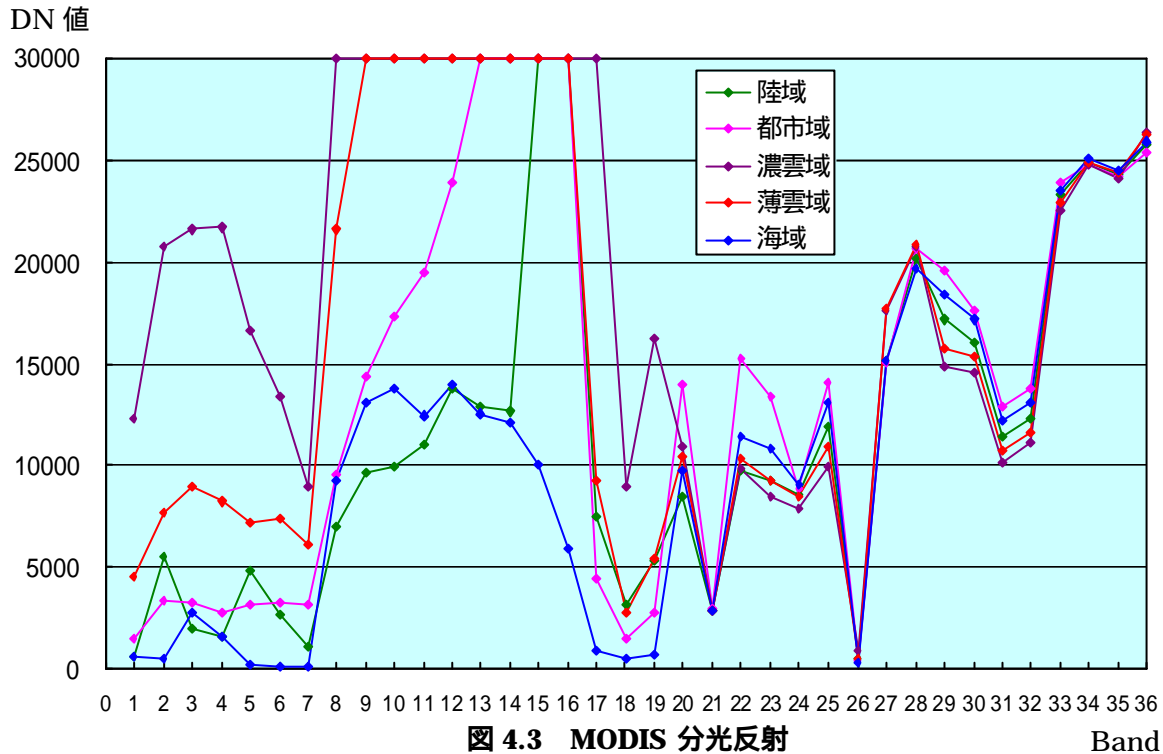


図 4.3 MODIS 分光反射

Band

これらのグラフから、分類に使用する 1～7 バンドについて見ると、可視・近赤外域で雲域の分光反射だけが極端に高いことがわかる。また、濃い雲域と薄い雲域の値を両方プロットしたところ、その平均値の差も極端であることがわかる（図 4.6）。これは、トータルで雲を考えると、水域や都市域に比べてデータのばらつきが大きいことを意味している。温度域のバンドについては、どのカテゴリも極めて似通った値で推移しており、分類に使用しても明確な空間的特長を得られるとは考えにくい。

表 4.1 観測波長帯

Band	波長 (μm)	観測項目
1-7	0.469-2.63	Land and Cloud Boundaries/Properties Bands
8-16	0.412-0.884	Ocean Color Bands
17-18	0.905-0.99	Atmosphere/Cloud Bands
20-36	1.375-14.54	Thermal Band

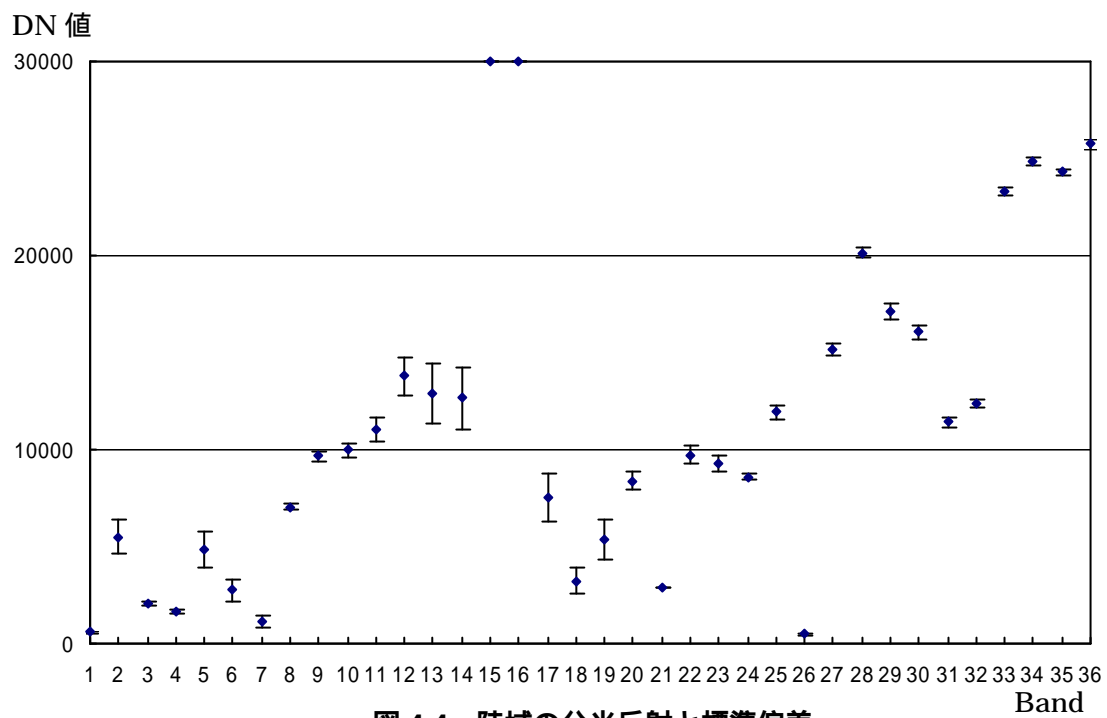


図 4.4 陸域の分光反射と標準偏差

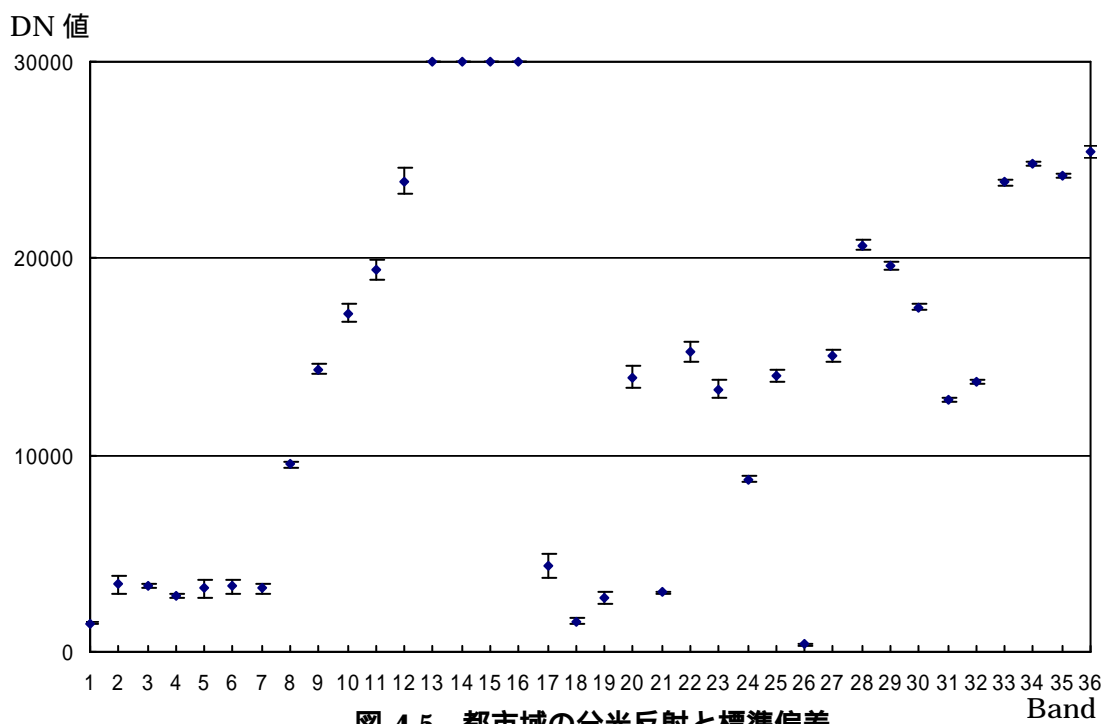


図 4.5 都市域の分光反射と標準偏差

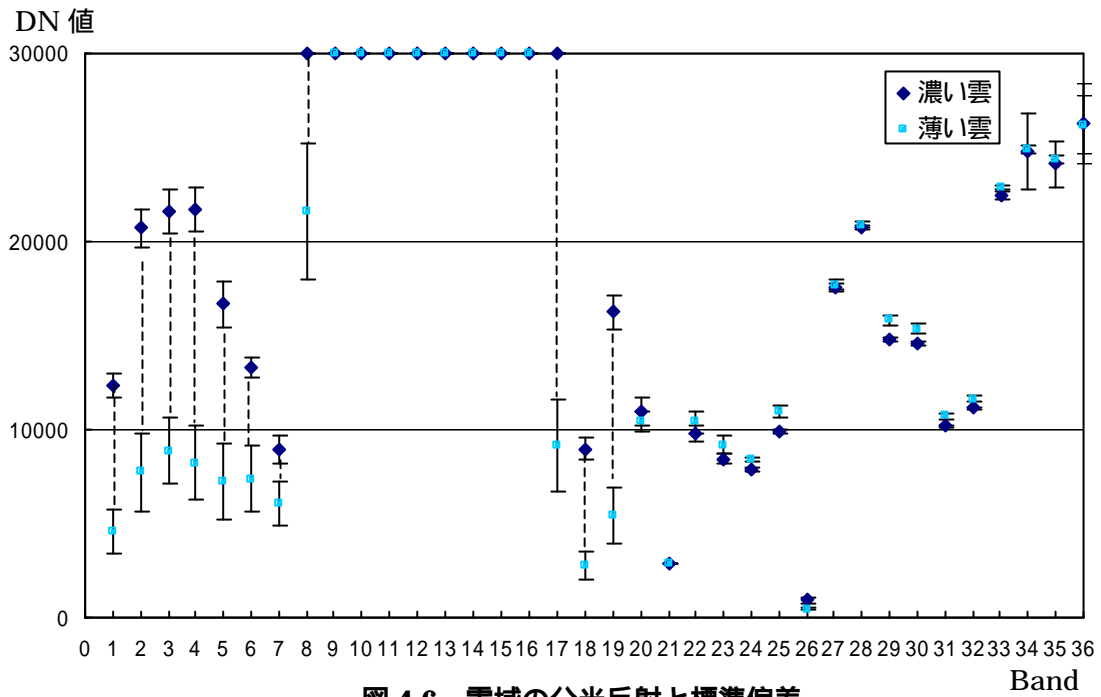


図 4.6 雲域の分光反射と標準偏差
 (点線部はデータが存在すること意味する)

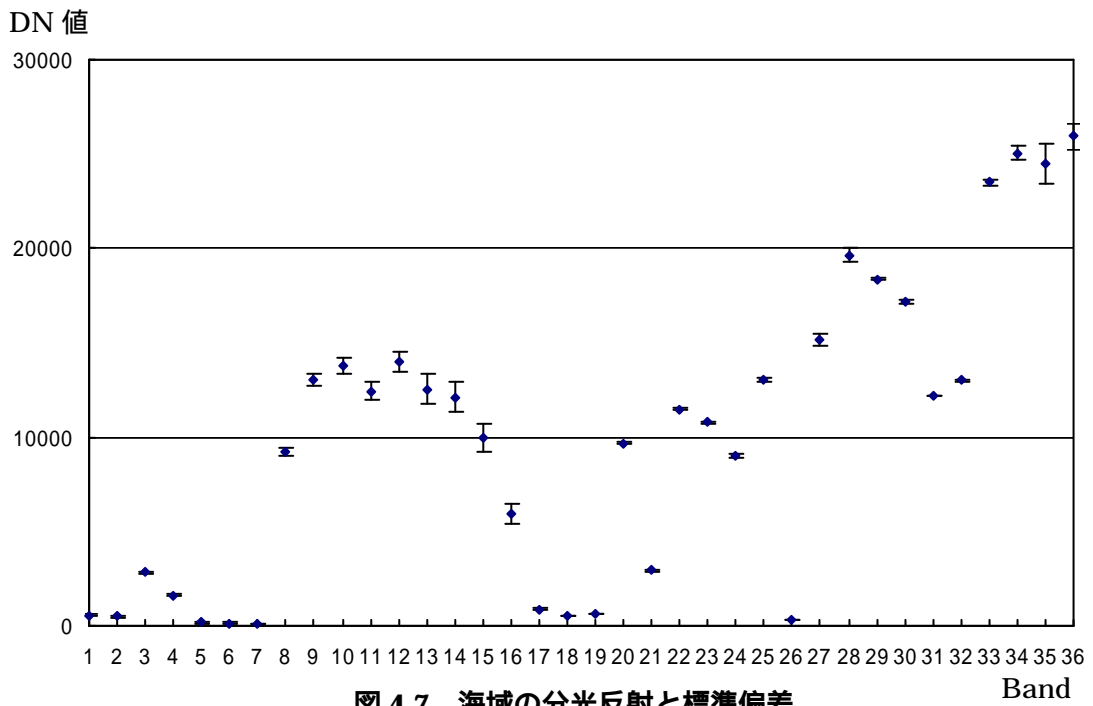


図 4.7 海域の分光反射と標準偏差

4.1.4 分類結果と問題点

ユークリッド距離，標準ユークリッド距離，マハラノビス距離の分類結果は図 4.8～4.10 の通りである．結果的にユークリッド距離が最も誤分類が少なく（図 4.8），多少薄い雲を都市域と誤分類しているものの，陸と海の境界はかなりはっきりと分離されていることがわかる．本来ならば，アルゴリズム的に分散や共分散を用いた分類のほうが分類精度は向上するはずである．しかしながら，分散，共分散による影響を考慮するに従って，標準ユークリッド距離（図 4.9），マハラノビス距離（図 4.10）の順にその分類精度は著しく低下するという結果となった．これらは，別の撮影日のデータで試しても，トレーニングデータの変更や増減を試みてもほぼ同一の結果であった．つまり，MODIS データ上に分類精度を低下させる要因が存在することとなる．

これらの要因を推測するにあたって考えられるのは，先の分光反射特性においても述べた雲域の値である．雲域は他の陸域や海域，都市域に比べて極めて大きな値と大きな標準偏差を示していた．標準偏差が大きいことはすなわち，分散・共分散の値が巨大になることを意味し，結果的に標準ユークリッド距離やマハラノビス距離において多大な誤分類を引き起こしていることが考えられる．また，これほど雲の値にばらつきが大きくなったのは，従来の観測センサが陸域メインの低い輝度部分に感度を設定して分光反射を量子化（8 bit）していたのに対し，MODIS では雲のようなより明るい部分も詳しく見られるように広い感度設定で分光反射を量子化（12bit）しているためである．

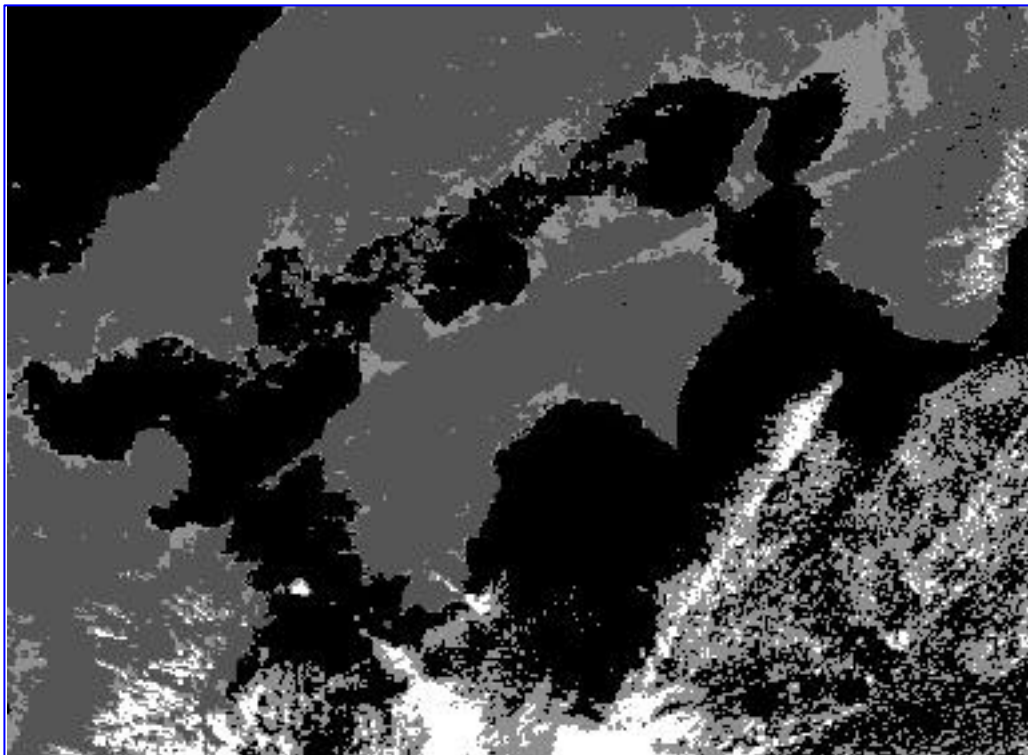


図4.8 ユークリッド距離の分類結果

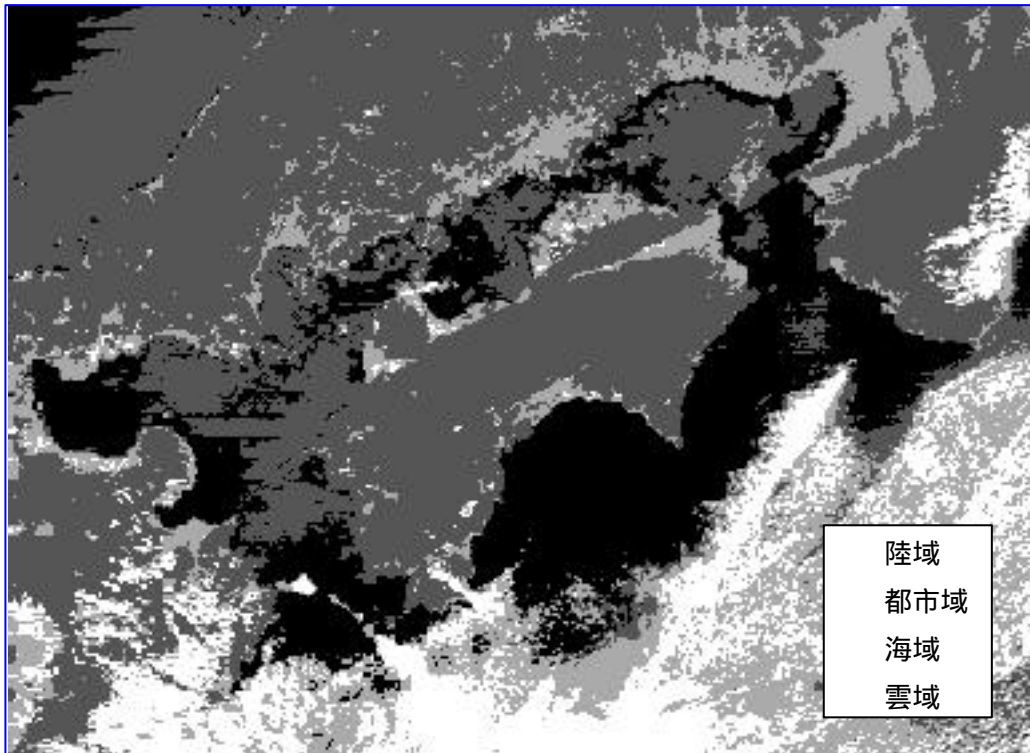


図 4.9 標準ユークリッド距離の分類結果

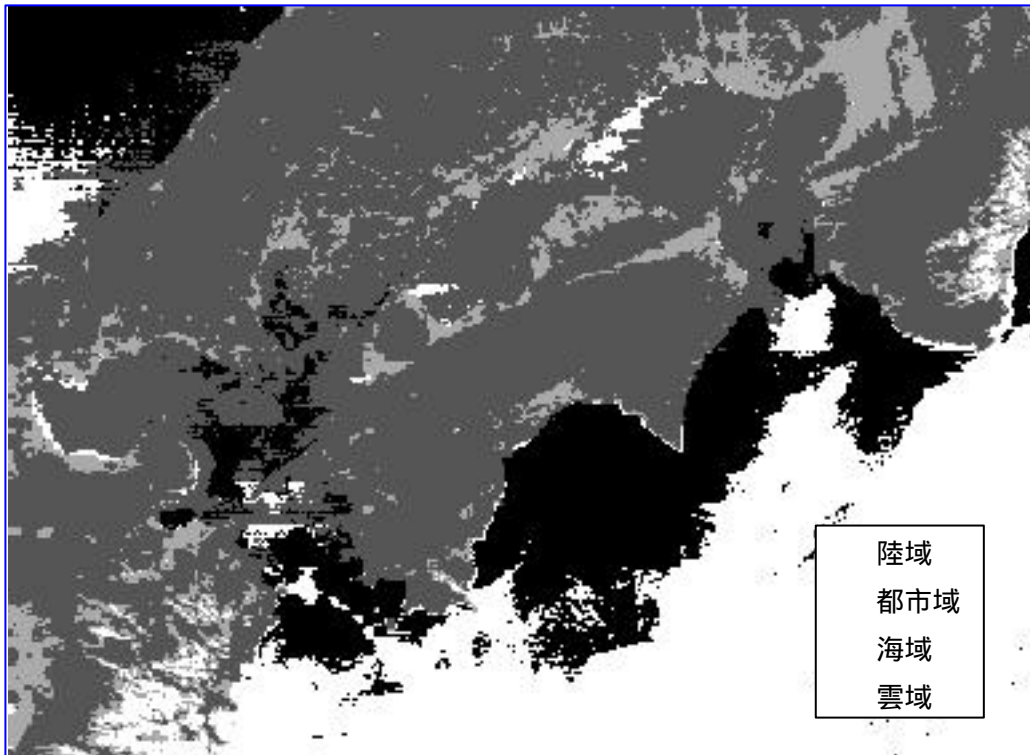


図 4.10 マハラノビス距離の分類結果

図 4.11 は、分類に使用したトレーニングデータにおける Band 3 (0.459-0.479 μm) と Band 4 (0.545-0.565 μm) のデータをプロットしたものである。これを見ると、各分類カテゴリーにおけるバンド間の相関関係やデータのばらつきがわかる。特に雲について見ると、バンド間の相関が高く、陸や海に比べてデータの分布の仕方が大きく異なっていることがわかる。これらは、Band 1 ~ 7 の全ての関係においてもほぼ同じであった。また、トレーニングエリアの雲域は基本的に濃い雲域を中心に指定しており、薄い雲域も考慮すると陸や海の分布部分に重なってくることは容易に推測できる。

標準ユークリッド距離とマハラノビス距離の分類結果を見ると、雲域での分類結果はほぼ確かであると言える。何故ならば、雲域の誤分類のように見えるところのデータを確認したところ、実際には肉眼で捉えられない水蒸気が存在していたからである。また、薄い雲と都市域における誤分類の原因は、分光反射的に非常に似通っていることに起因することはすでに明らかにされている。これらを踏まえると、誤分類のほとんどは都市域、陸域、海域の3要素間で起こっており、どれもばらつきは雲域より遥かに小さい。つまり、標準ユークリッド距離、マハラノビス距離の誤分類の原因は、これらのアルゴリズムがデータのばらつきや相関関係を考慮するために起こっていることが推測される。

そこで、このデータのばらつきや相関関係を修正すればマハラノビス距離等の教師付き分類が適用可能になるのではないかとと思われる。

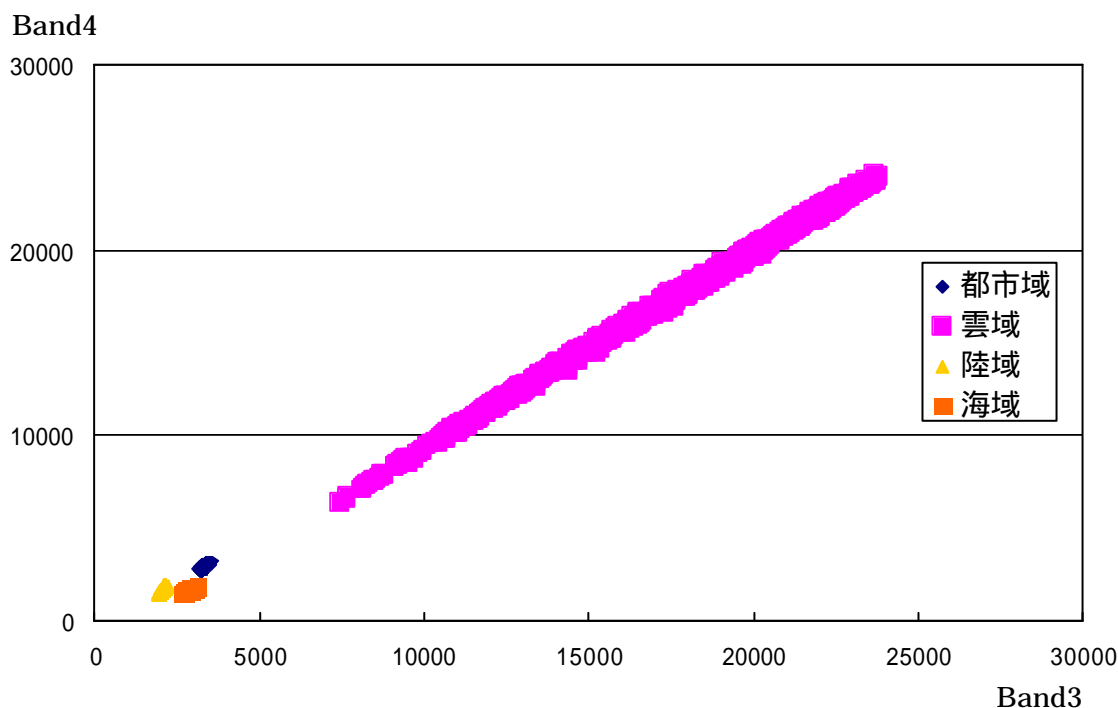


図 4.11 バンド 3 , 4 の相関関係

4.1.5 手法修正における適用検討

教師付き分類の中ではユークリッド距離が最も精度が良かった。しかし、修正による精度向上の余地はマハラノビス距離の方が大きいと考えられる。そのため、ここではマハラノビス距離を主体として手法修正とその適用を試みた。また、自動化という観点から、その都度トレーニングデータを取ることはできないので、最初に用意したトレーニングデータを次々変換・修正していく方が自動化として好ましい。そのため、元画像のトレーニングデータを他時期に合わせる方向で手法を検討する。

データの相関関係とを示すグラフより(図 4.11), トレーニングデータを設定した撮影日のデータに対する教師付き分類(マハラノビス距離分類)の精度向上には、トレーニングデータのばらつきを修正する方法が考えられる。そこで、それぞれのトレーニングデータの最大値を修正する手法を試みた。これは、あまりにも最大値の大きい雲に対して、それぞれトレーニングデータの最大値を合わせたものであり、分散・共分散行列の修正に繋がる。

例)

- ・陸域のトレーニングデータ × (雲の最大値 / 陸域の最大値)
- ・海域のトレーニングデータ × (雲の最大値 / 海域の最大値)

また、他時期のシーンへの適用検討としては、異なる画像間の濃度マッチングに良く使われる次式の変換式を用いてトレーニングデータの補正を行い、そのデータで分類を試みた。データ変換の基準となる標準偏差や平均値の算出は、それぞれのシーンにおける均質な海の値を比較して得たデータを比較して算出した。

$$y = \frac{SY}{SX}(x - \bar{X}) + \bar{Y} \quad (4.4)$$

SY = 変換対象画像の標準偏差

\bar{X} = トレーニングデータ

SX = 基画像の標準偏差

\bar{Y} = 変換対象画像の平均値

そして、他のシーンへの適用の時に考えられる違いとして、太陽高度によるスペクトル反射率の違いがある。そこで、これも考慮するため、トレーニングデータに太陽天頂角の補正も加えて検討した。

$$\frac{1}{\cos(q_1 - q_0)} \quad \text{or} \quad \cos(q_1 - q_0) \quad (4.5)$$

q_1 = 原画像の太陽天頂角

q_0 = 他時期の太陽点頂角

ここでは、10月31日撮影のデータを原画像とし、それぞれの手法で行ったマハラノビス距離の分類結果を示す。分類は都市域を除く陸・海・雲の3分類で行った。

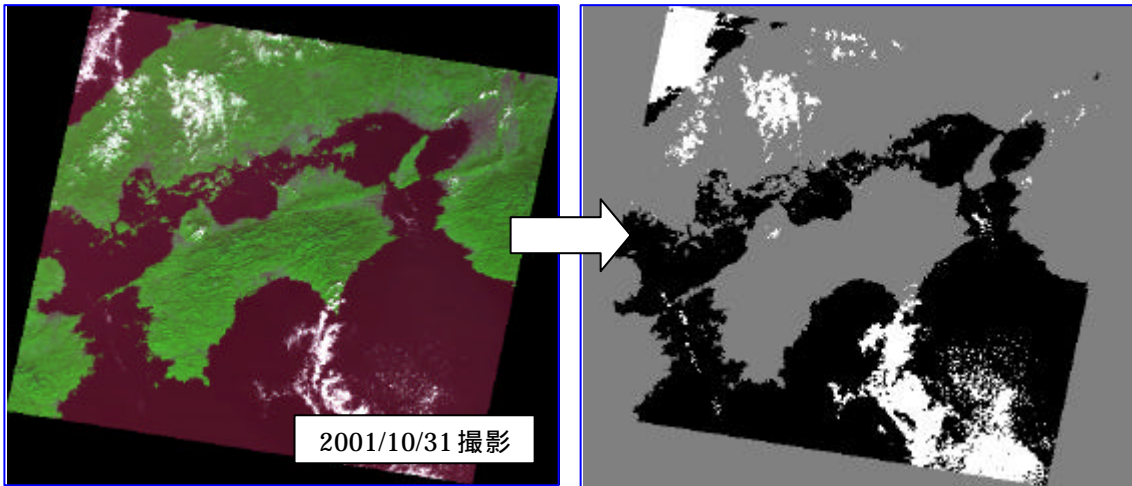


図 4.12 最大値修正によるマハラノビス距離 分類結果

↓ 他時期データに適用

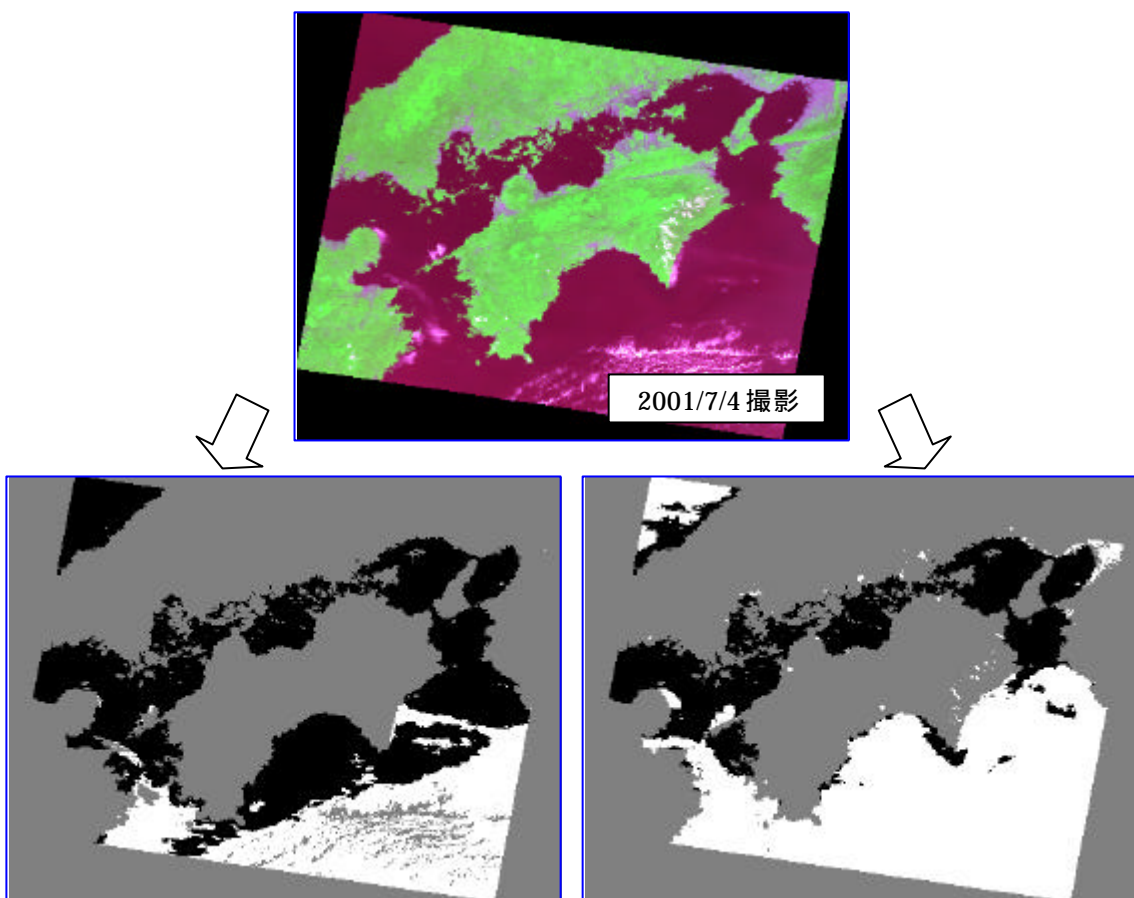


図 4.13 濃度マッチングによる補正

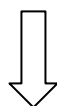
図 4.14 太陽天頂角補正（濃度変換済）

結果として、原画像から得たトレーニングデータの最大値を修正することによって、原画像におけるマハラノビス分類の精度向上を達成することはできた(図 4.12)。そのため、マハラノビス距離における誤分類の要因が、データのばらつきにあることも確認できた。しかし、明らかな誤分類がなくなっただけで、海岸線に着目してみると、その分類精度はやや不完全であると言える(瀬戸内海の島々が重なってしまっているところなど)。

他時期データへの適用については、10月31日のトレーニングデータを修正して、7月4日のデータにマハラノビス距離を適用した。修正には、濃度マッチングとそれに太陽天頂角補正を加えた補正の2種類で比較している(図 4.13, 4.14)。これらの分類結果を見ると、どちらも陸と海の分類はある程度の精度で行われているものの、精度自体は原画像の場合より低下していることがわかる。

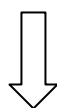
4.1.6 教師付き分類による陸域抽出結果のまとめ

分類手法	分類精度について	分類精度 ↓ 低
ユークリッド距離	陸と海の分類精度は良いが薄い雲域で誤分類発生。	
標準ユークリッド距離	陸と海の間で明らかな誤分類が多く発生。雲域の誤分類はユークリッド距離より多い。	
マハラノビス距離	陸と海の誤分類が標準ユークリッド距離よりも多い。雲域(薄雲・水蒸気部分も含む)の分類は若干の誤分類がある程度。	



マハラノビス距離の修正で適用を試みる。
補正 トレーニングデータの最大値補正(ばらつきを雲に合わせる)

分類手法	分類精度について
修正マハラノビス距離	ユークリッド距離と同等かそれ以上



修正マハラノビス距離を他時期の衛星画像に適用
(トレーニングデータは原画像のものを使用)
補正 濃度マッチング, 太陽天頂角補正

手法	分類精度について
濃度マッチング	原画像に適用した時ほどの分類精度は得られず
太陽天頂角補正 (濃度マッチング後)	同

以上のことより、MODIS センサ画像における陸域抽出に教師付き分類を適用するのは困難であり、また汎用性についても実用に耐えうるものとは言い難いと言える。

4.2 抽出手法の検討

4.2.1 正規化バンド間演算の適用検討

MODIS センサ画像における陸域抽出には、教師付き分類と同時に正規化バンド間演算での適用も検討した(式 4.6)。この式は、従来の衛星画像のほとんどが少ないバンド数だったことも起因して、地物等の明確な分類には有効な演算では無かった。しかし、MODIS のように 36 バンドという多バンドでは、細かい分光反射特性が得られているので、複雑な演算を用いずとも、比較的簡単に陸域の抽出ができるはずである。また、データを正規化することで、汎用性に優れた陸域抽出となることも予想される。

式 4.6 には、Band a 、Band b にそれぞれ任意のバンド値を入力することにより、演算結果が $-1 \sim 1$ という正規化データを得ることができる。また、地物等の分光反射を考慮することによって、特定の地物等を強調するような演算結果が得られる。そこで、この演算を利用することで、陸域の抽出を試みた。また、陸域の抽出にあたっては、教師付き分類での条件と同様に、MODIS 画像を陸域、都市域、雲域、海域の 4 カテゴリーに分類にすることとした。

$$C_n = \frac{Band_a - Band_b}{Band_a + Band_b} \quad (4.6)$$

具体的には、MODIS センサ画像においてそれぞれ Band a 、Band b に、陸域、都市域、雲域、海域の 4 カテゴリーを強調するバンドをデータ入力する。これらのカテゴリー強調におけるバンドの組み合わせは、分光反射の特性(図 4.3)を基に決定した。これらを計算すると、陸域、都市域、雲域、海域の正規化データで構成される 4 種のデータが作成されることになる。すなわち、未知の画素が 4 カテゴリーのどれに属するかは、その画素における 4 種の正規化データのうち、どれが最も大きい値を示しているかを見ることでわかるはずである。

しかしながら、単純に $-1 \sim 1$ の値のままでは、それぞれのカテゴリーにおける最小値と最大値の範囲が異なるので比較できない。そこで、計算された正規化データを次式の線形濃度変換式を用い、 $0 \sim 255$ の範囲の値に変換して比較した。式は、正規化データの値を X 、変換範囲を Y とすると、変換後のデータは R となることを示す。これによって、未知の画素の分類が、4 カテゴリーにおける正規化データの最大値比較で可能となる。

$$R = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} (X - X_{\min}) + Y_{\min} \quad (4.7)$$

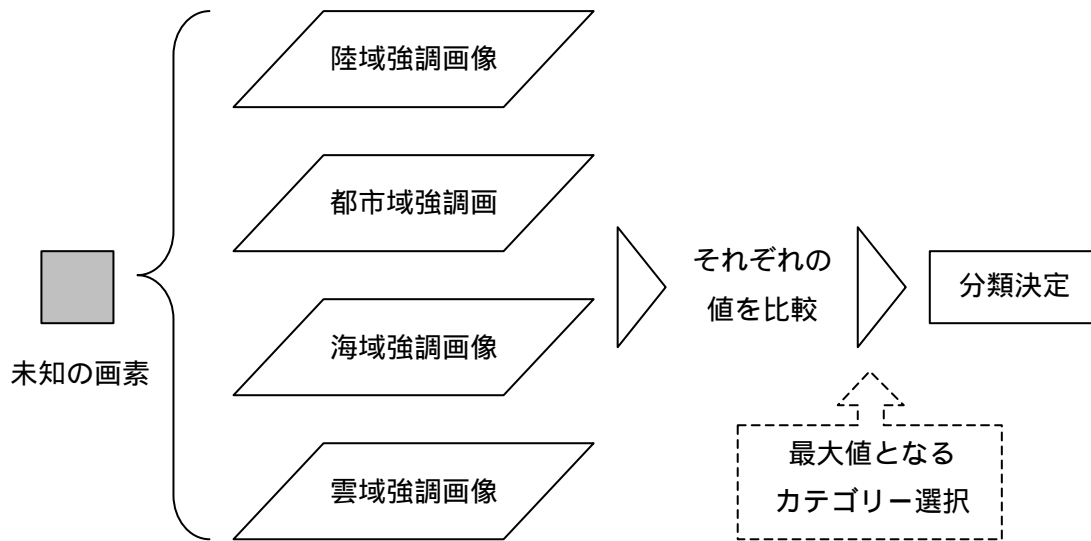


図 4.15 正規化バンド間演算分類の概要

上図 4.15 が，正規化指標の最大値による分類の概要を示している．図に示す強調画像作成には以下の式・バンドの組み合わせで行った．これらの演算式を，教師付き分類の時にも使用した 2001 年 10 月 15 日に撮影の MODIS センサ画像に適用し，個別の演算結果画像，ヒストグラム，各カテゴリエリアにおける演算値のとり値を示すと同時に，分類を行った．

$$\left. \begin{array}{ll}
 \text{陸域}(G) = \frac{\text{Band}18 - \text{Band}1}{\text{Band}18 + \text{Band}1} & \text{都市域}(U) = \frac{\text{Band}23 - \text{Band}24}{\text{Band}23 + \text{Band}24} \\
 \text{海域}(S) = \frac{\text{Band}3 - \text{Band}6}{\text{Band}3 + \text{Band}6} & \text{雲域}(C) = \frac{\text{Band}4 - \text{Band}22}{\text{Band}4 + \text{Band}22}
 \end{array} \right\} (4.8)$$

結果として，陸域，海域，雲域の演算式については良好な組み合わせを選ぶことができた．しかしながら，都市域の組み合わせについては，若干薄い雲も同時に強調され，センサ走査帯のストライプ跡も発生しており，満足のいく組み合わせを得ることができなかったといえる．そのため，薄い雲に関する誤分類の発生が，ある程度予想される．



$$\text{陸域}(G) = \frac{\text{Band}18 - \text{Band}1}{\text{Band}18 + \text{Band}1}$$

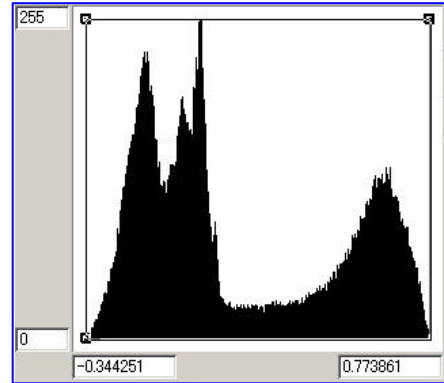
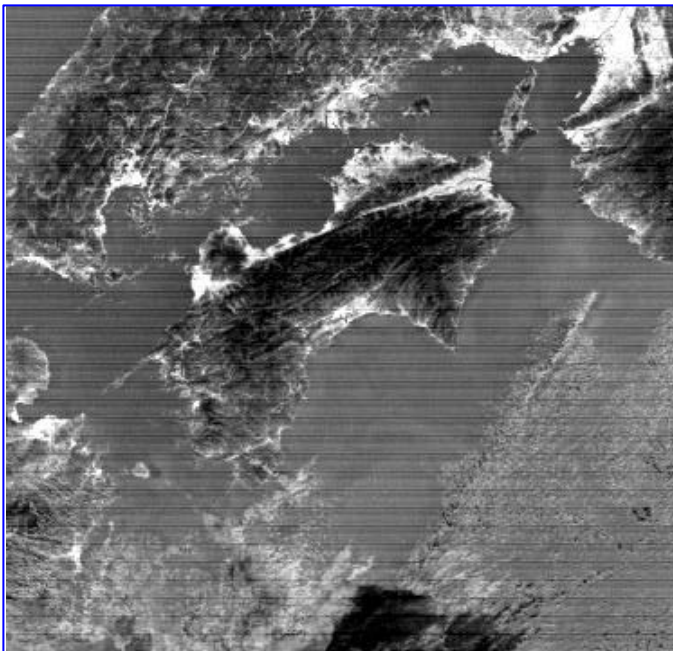


図 4.16 陸域強調の正規化画像とヒストグラム



$$\text{都市域}(U) = \frac{\text{Band}23 - \text{Band}24}{\text{Band}23 + \text{Band}24}$$

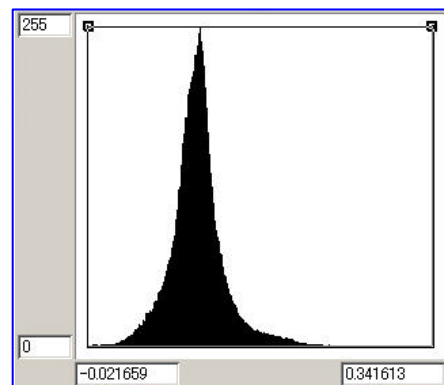
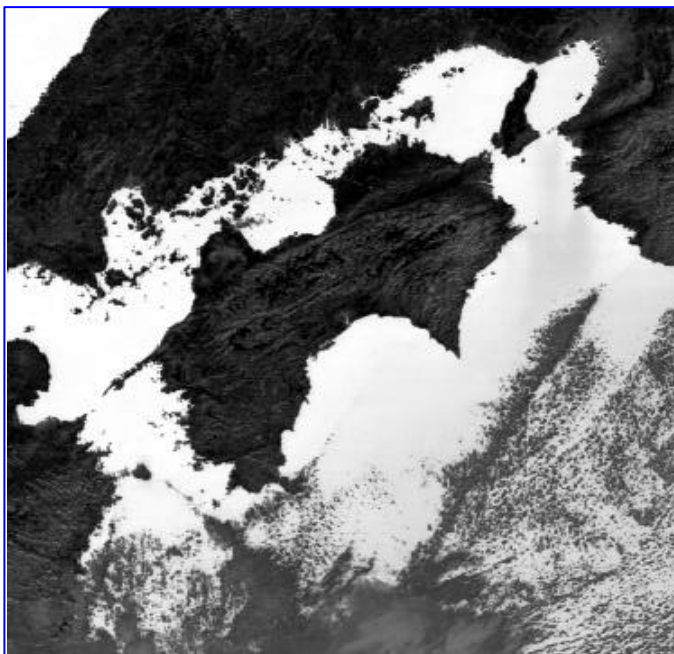


図 4.17 都市域強調の正規化画像とヒストグラム



$$\text{海域}(S) = \frac{\text{Band}3 - \text{Band}6}{\text{Band}3 + \text{Band}6}$$

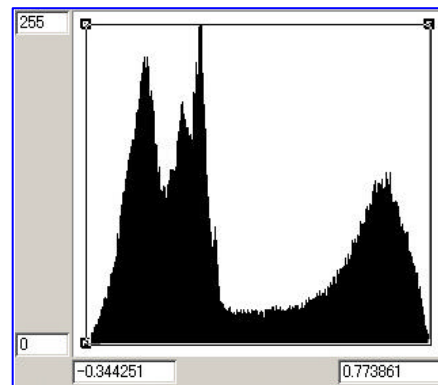
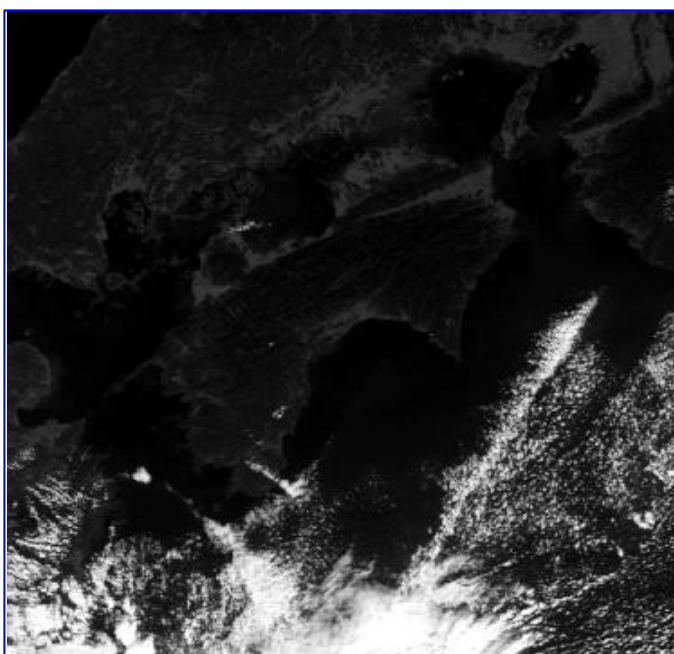


図 4.18 海域強調の正規化指標とヒストグラム



$$\text{雲域}(C) = \frac{\text{Band}4 - \text{Band}22}{\text{Band}4 + \text{Band}22}$$

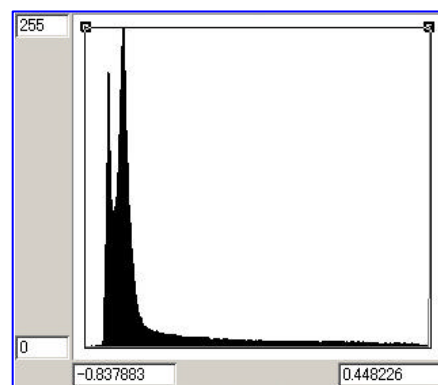


図 4.19 雲域強調の正規化画像とヒストグラム

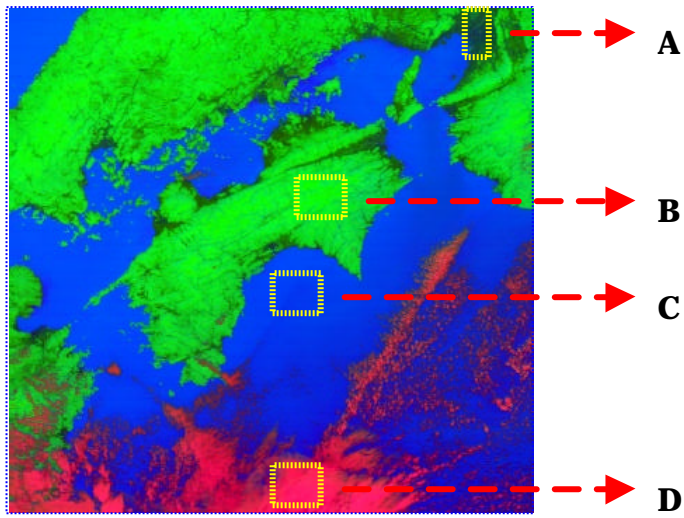


図 4.20 正規化指標値の取得位置

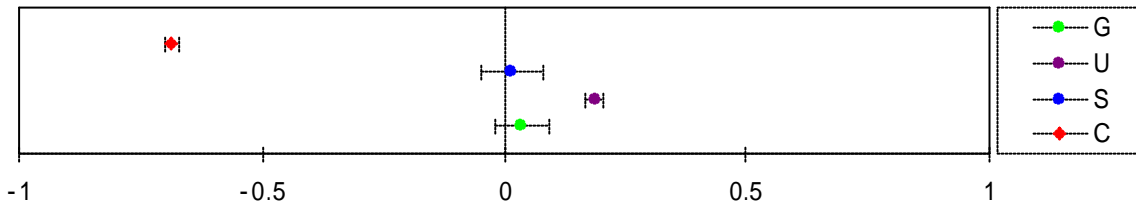


図 4.21 A: 都市域における正規化指標

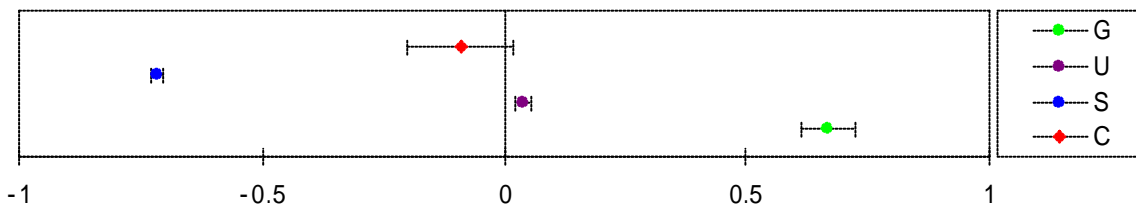


図 4.22 B: 陸域における正規化指標値

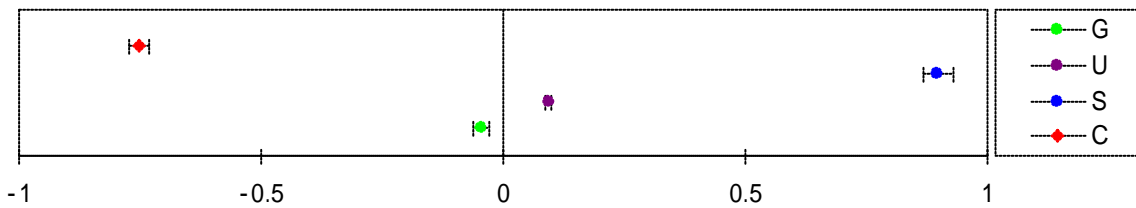


図 4.23 C: 海域における正規化指標値

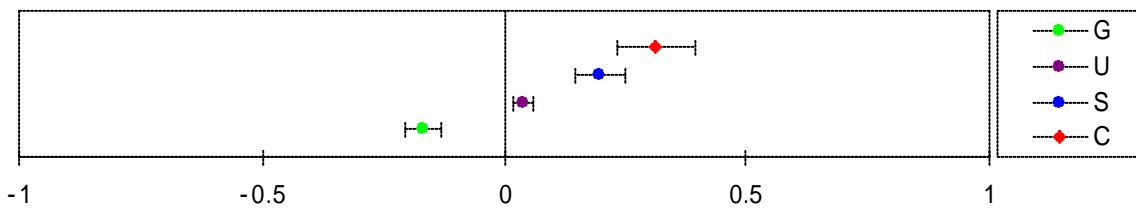


図 4.24 D: 雲域における正規化指標値

4.2.2 陸域抽出結果と汎用性の検討

下図 4.25 が、正規化指標の最大値による陸域抽出の結果である。最も重要な部分である陸域と海域の境界線はほぼ正確に分離されており、海岸線においては誤分類といえるところはほとんど見受けられない。全体を見れば若干、薄い雲に誤分類が発生しているが、教師付き分類で最も精度が良かったユークリッド距離の分類結果と比べても、その分類精度は遥かに改善されていることがわかる。すなわち、正規化指標の最大値を用いた分類手法は、陸域抽出という点で十分許容可能な精度であるといえる。

そして残す課題は、この手法の汎用性についてであるが、7月、8月、9月、11月、12月に撮影されたデータにそれぞれ同様の手法で適用を試みた。結果として、先に使用した10月撮影分のデータも踏まえると、6ヶ月間に渡る他時期データについて検討したことになる。本来なら、12ヶ月分検討できれば理想であったが、データの都合上1/2年分しか行えなかった。しかしながら、季節的には夏・秋・冬の検討を検討できることになり、異なる時期に撮影されたデータへの汎用性という点では、十分検討できると判断する。

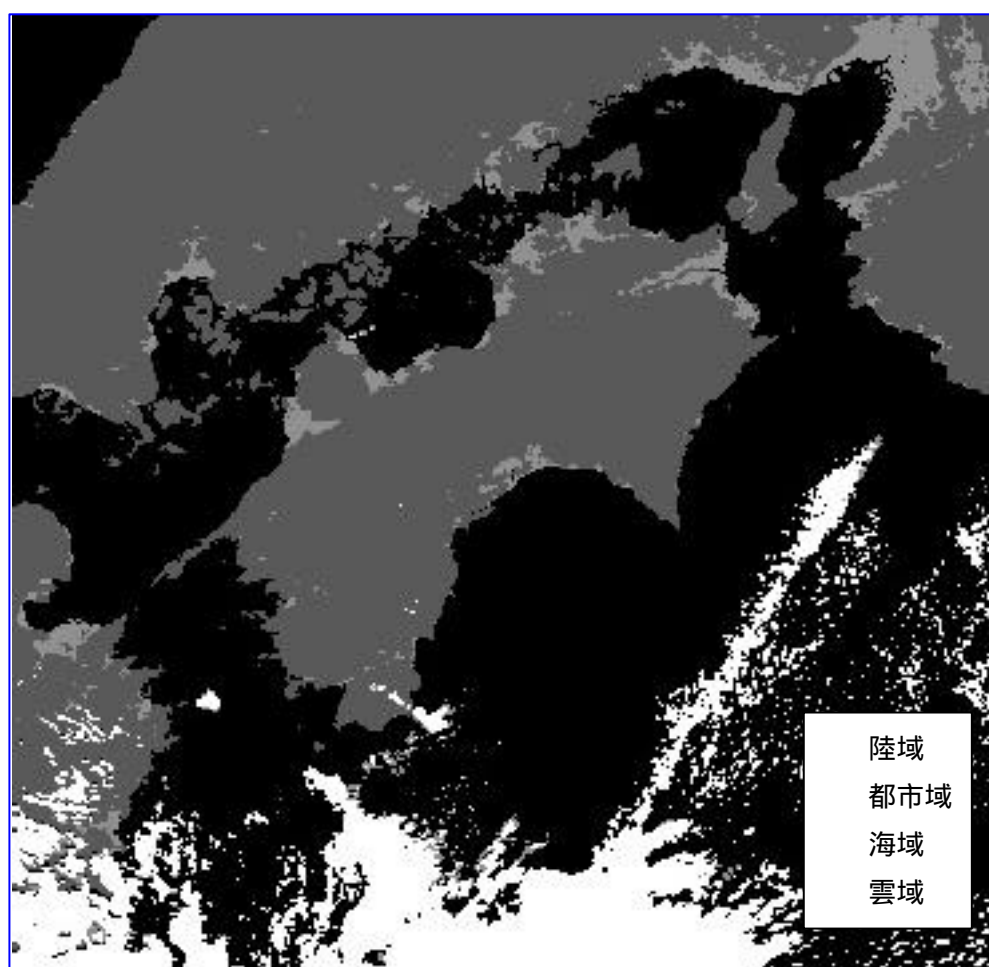


図 4.25 正規化バンド間演算の分類結果

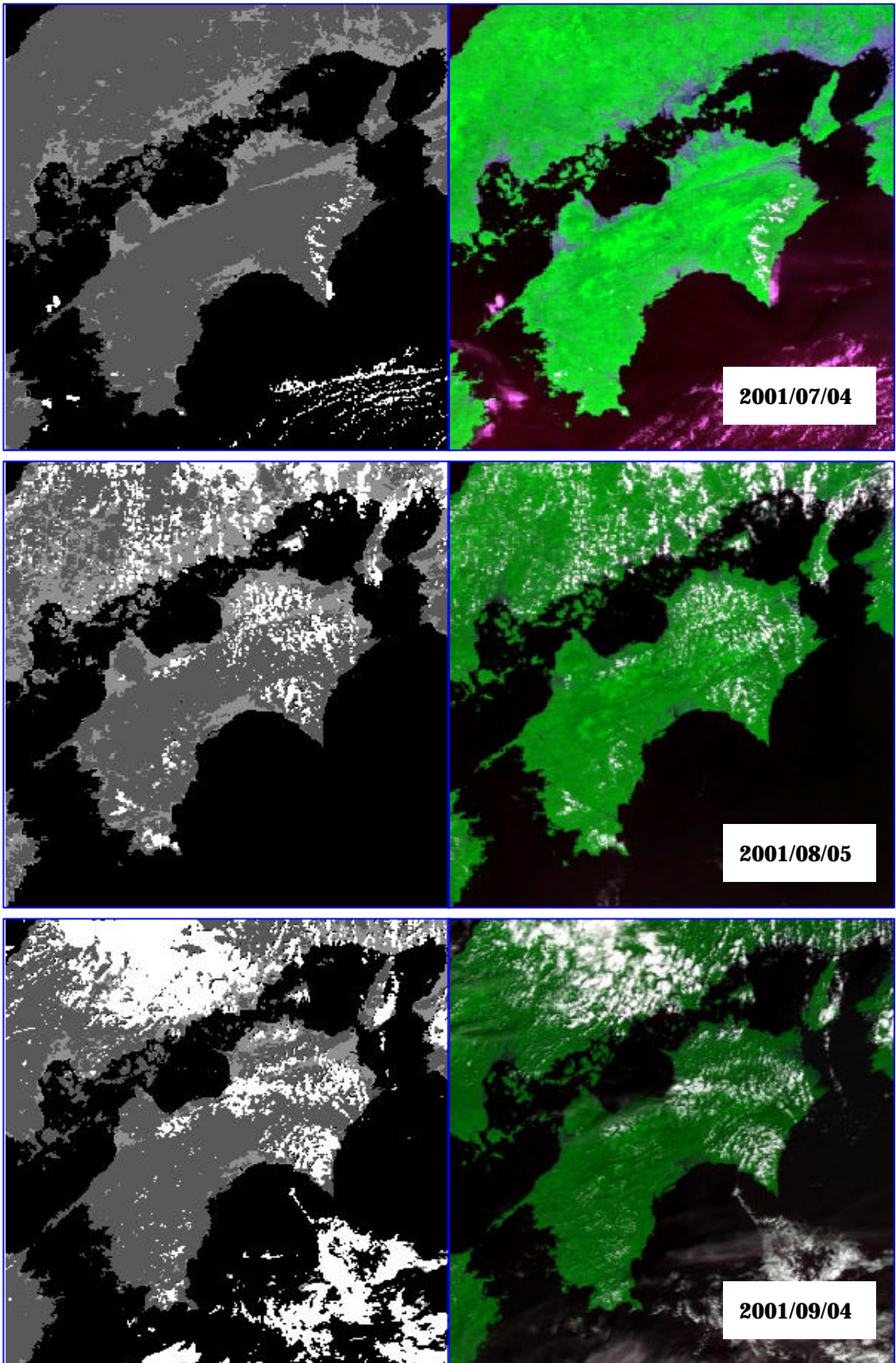


圖 4.26 7 , 8 , 9 月分類結果

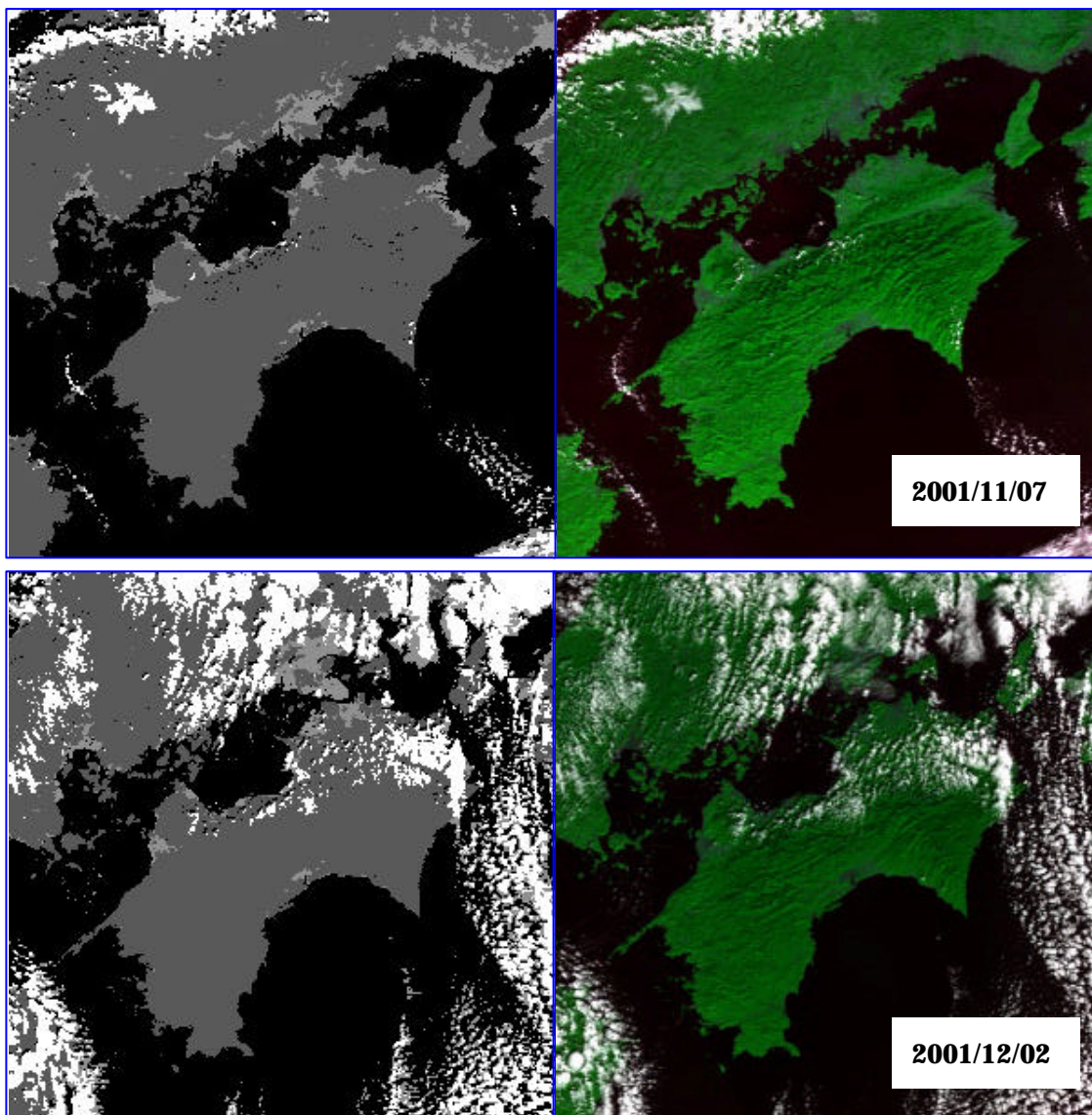


図 4.27 11,12 月分類結果

それぞれの結果を見ると、海と陸の分離という点での精度は全く変わらずに保たれていることがわかる。薄い雲に関する誤分類のわずかな発生に関しても、あまり変化は無い。若干、雲の陰を海域に誤分類しているところがあるが、これは季節的な影響とは考えられない。また、都市域の分類誤差が撮影時期によって若干変化しているが、陸域抽出という点では無視できるレベルである。

結果として、他時期のデータにおいても、本手法における陸域の抽出精度は高いままであり、十分適用可能であることを示していることがわかる。以上のことより、自動幾何補正のための自動陸域抽出には、教師付き分類よりもよい分類精度・汎用性が得られた正規化バンド間演算を用いることとした。

5 自動幾何補正

5.1 幾何補正の概要

本研究における幾何補正のシステムは右図 5.1 の様なフローで行われる。幾何補正を実施するにあたっては、陸域抽出画像から GCP の情報を取得し、変換係数を得た後、それを実画像に適用することで可能となる。

幾何補正に用いた座標系は全て、ガウス・クリューゲル図法である UTM 座標系（ユニバーサル横メルカトル図法）となっている。距離単位はメートルで表され、日本では、UTM よりも位置の誤差が少なくなるように、ゾーン中に独自の原点を 19 個設置しており、公共測量の原点にもそれぞれの点が用いられている。一般にこれらは平面直角座標系として表され、本研究の幾何補正および誤差の評価には、四国域の公共測量に用いられる 4 番目の点を原点としている。

これらの地理情報は、海岸線マッチングに用いられるテンプレートにあらかじめ付与されるものであり、幾何補正システムを他の地域・座標系に適用する場合、目的の座標系で作成されたテンプレートを用意するだけで可能となる。そのため、さまざまなパラメータを指定するようなことは必要ない。

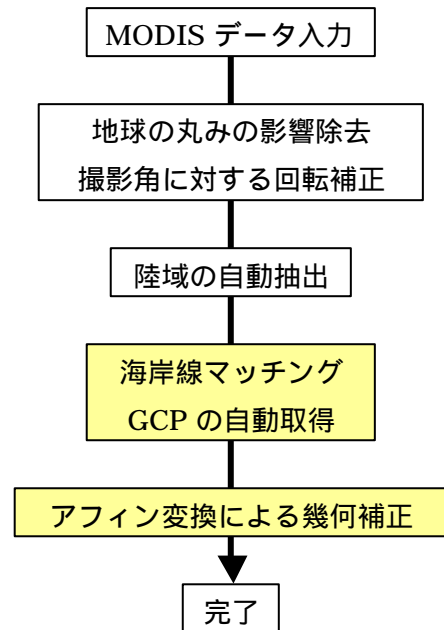


図 5.1 自動幾何補正の流れ

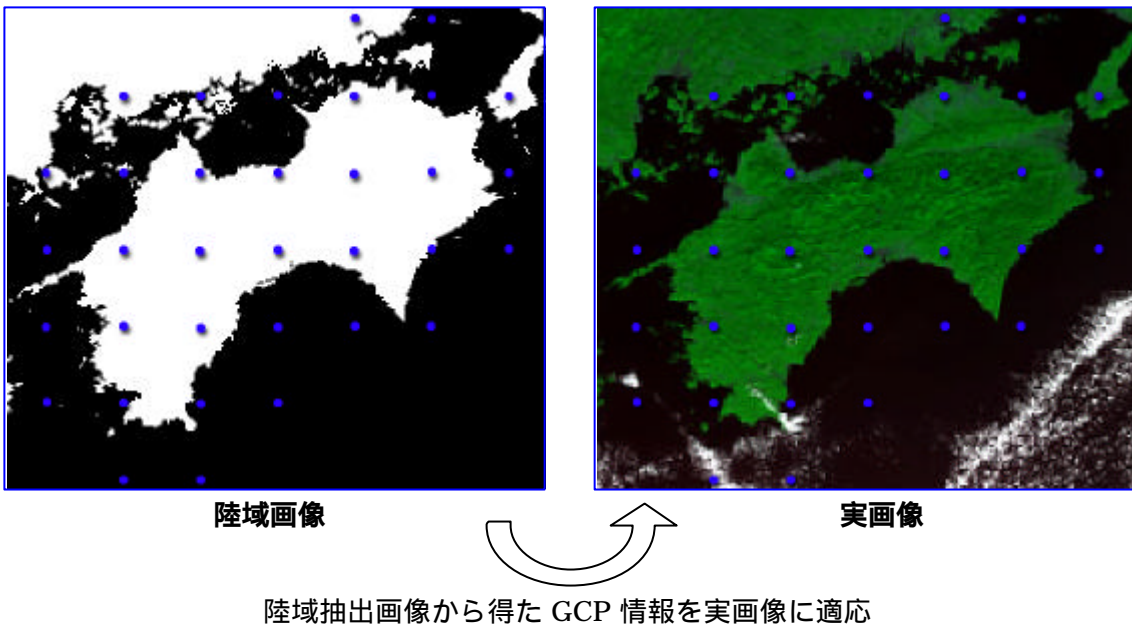


図 5.2 陸域抽出画像からの幾何補正

5.2 海岸線マッチング

5.2.1 マッチング手法

MODIS の陸域抽出画像から GCP を自動取得するにあたっては、テンプレートマッチングで行った。テンプレートマッチングは、パターンマッチングの代表的な手法であり、あらかじめ検出したいパターンを持つ画像テンプレートを用意しておき、走査対象である画像上を走査させることによってテンプレートと類似なパターンを識別することができる。すなわち、陸域抽出された MODIS センサ画像上において既知の地理情報をもつテンプレートを走査させ、最も類似度の高い場所（座標）を探すことにより、画像上の座標に対する位置情報との対応を得ることができる。

前節にも述べたように、MODIS センサ画像上で最も GCP の特徴を備えているのは海岸線の形である。基本となる海岸線のテンプレートを用意すれば、この特徴は比較的容易に得ることができる。ここで、MODIS センサ画像の海岸線との類似度を得るために用意したテンプレートは、国土数値情報から作成した。この国土数値情報とは、四国域における市町村境（2500 分の 1）のベクトルデータであり、これらをひとつのポリラインに統合した後、1000m グリッドデータに変換した。結果として、この海岸線データからは、四国域の周辺海岸をカバーするような 40×40 画素のテンプレートを全 16 個作成した。

この GCP 自動探索に用いるテンプレートのサイズについては、目視で決定している。テンプレートは、そのサイズが大きければ計算量が増え、小さすぎると類似の海岸線を持つテンプレートができてしまう。これらは、テンプレートサイズにおける明確な定義を困難としている。よって、本研究では、ある程度四国の海岸線の特徴を得られ、それほど計算量が大きくならないことを考慮して、テンプレートのサイズを 40×40 画素とした。また、テンプレートにはそれぞれ既知の地理座標を 4 隅に持たせている（図 5.3）。

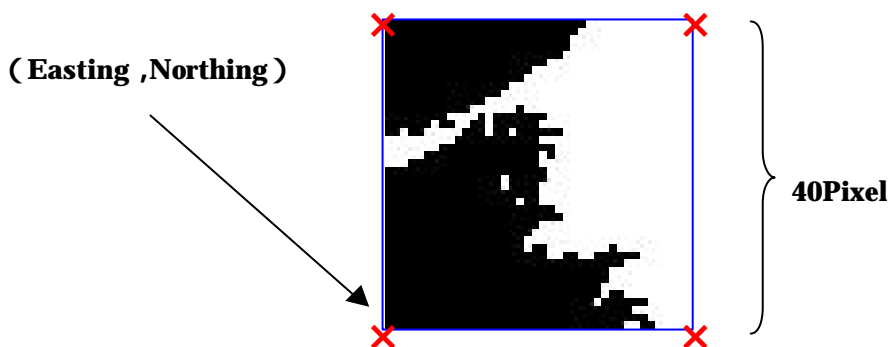


図 5.3 テンプレートと地理座標の位置

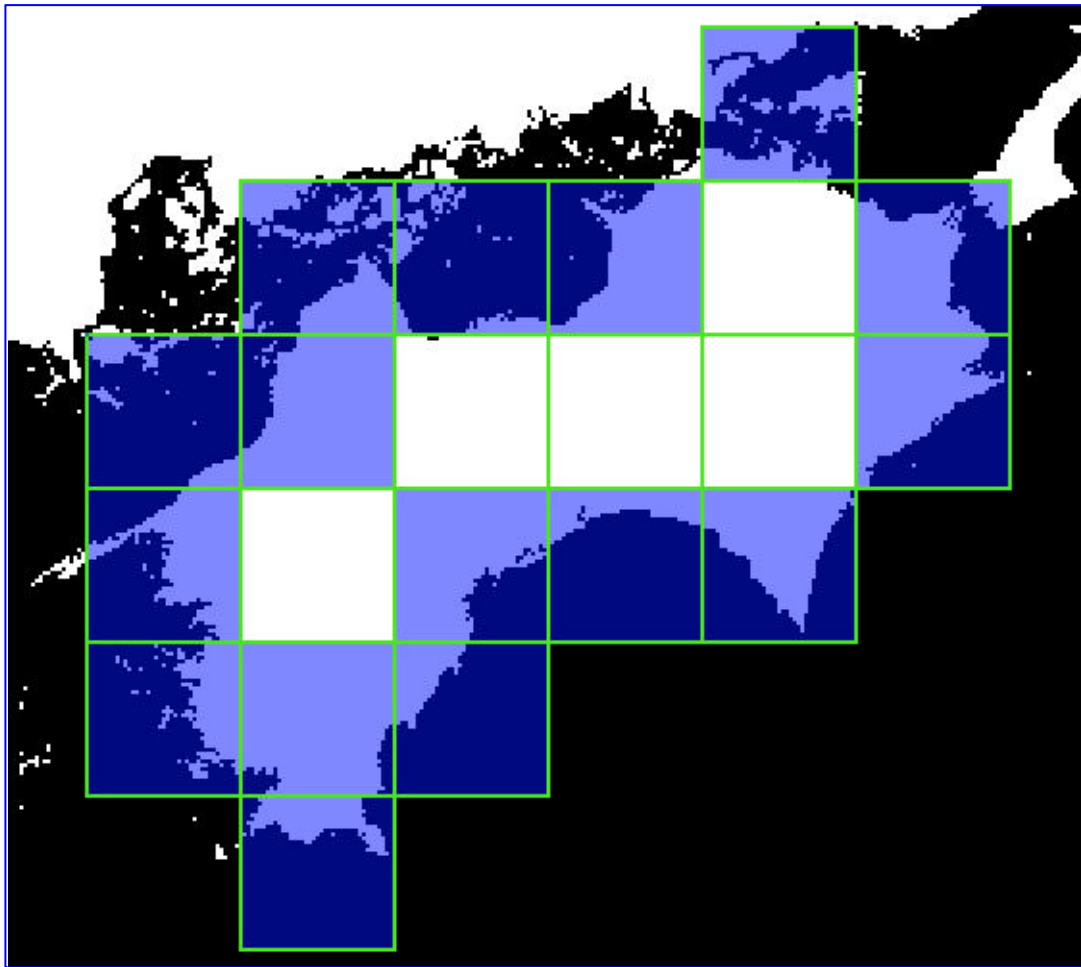


図 5.4 1000mグリッド化した海岸線

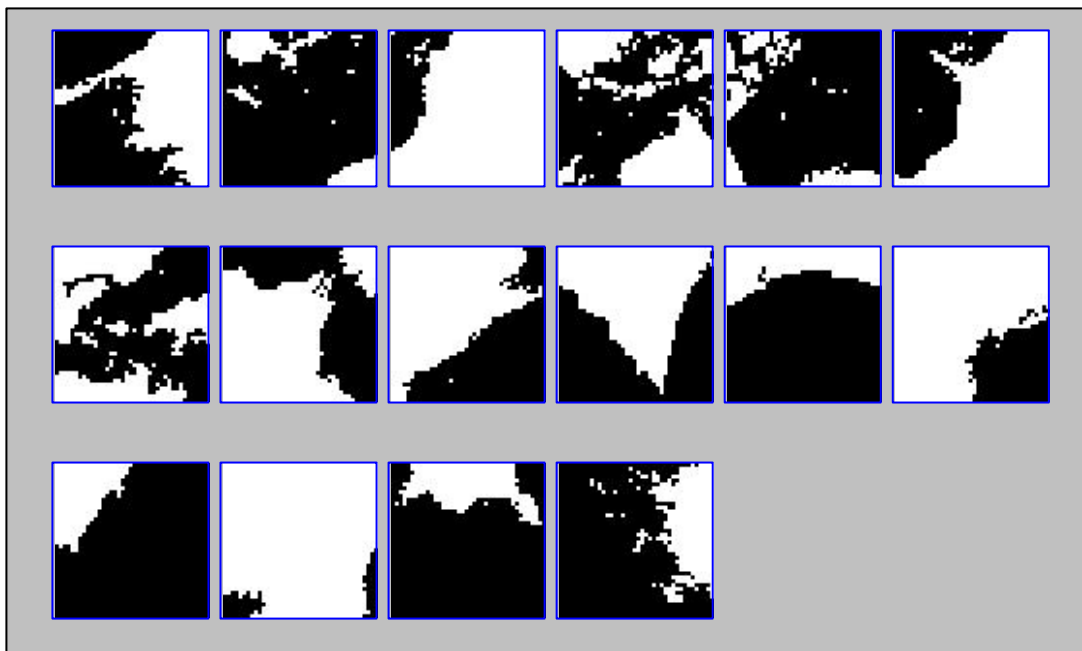


図 5.5 GCP 自動取得に用いるテンプレートセット

MODIS の陸域抽出画像とテンプレートにおける類似度の比較には、画像相関を用いた。テンプレートは白と黒の2値化画像であり、デジタルデータとしては0と255の値を持つ。一方、陸域抽出画像も海域を0、雲域を127、陸域（都市域も含む）を255としている。これらの濃度値を基に、以下の画像相関式で海岸線におけるテンプレートとの類似度を示す相関Rをもとめ、Rが最大となる画像座標を取得する。ここで s_p^2 、 s_q^2 はそれぞれ、走査する画像の探索ウインドにおける標準偏差とテンプレート画像における標準偏差を表している。

$$R = \frac{\sum \sum (P_{ij} - \bar{P})(Q_{ij} - \bar{Q})}{\sqrt{s_p^2 s_q^2}} \quad (5.1)$$

$$\left. \begin{aligned} s_p^2 &= \frac{1}{n \times n} \sum \sum (P_{ij} - \bar{P})^2 \\ s_q^2 &= \frac{1}{n \times n} \sum \sum (Q_{ij} - \bar{Q})^2 \end{aligned} \right\}$$

\bar{P}, \bar{Q} はそれぞれ P_{ij}, Q_{ij} の平均値

$n \times n$ はそれぞれウインドのサイズ

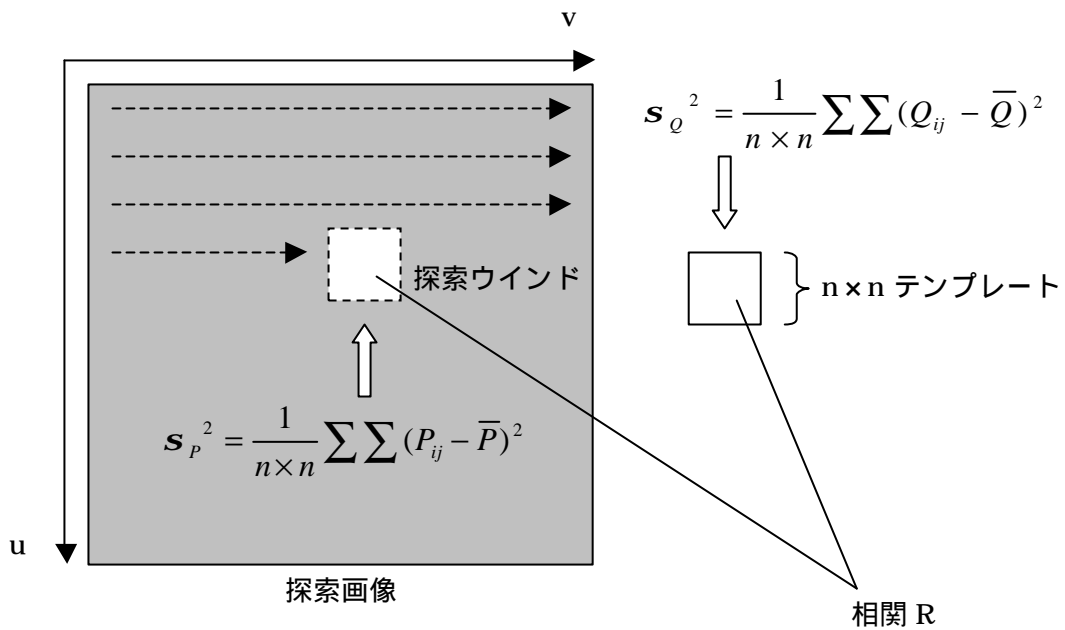
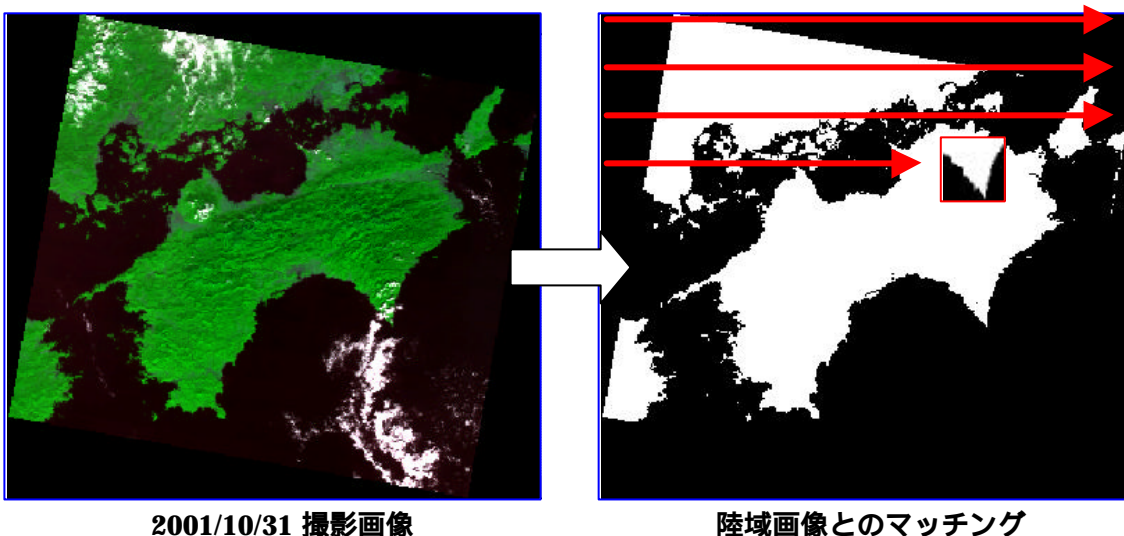


図 5.6 テンプレートマッチング概図

テンプレートひとつにつき4点の既知の地理座標があり、16個全てのテンプレートを走査することで、全64点の画像座標と地理座標の対応点を取ることは可能である(これをGCPとする)。この作業を海岸線マッチングとして行うわけであるが、そこで、それぞれのテンプレートが有効に働くかどうか、最適な条件における海岸線マッチングで確かめた。

最適な条件とは、雲が全く無いという条件である。本研究においては、四国域に全く雲の無いMODISセンサ画像が無かったため、最も雲が影響していない日のデータから陸域抽出を行い、手作業で雲域を除去した画像を作成した。そしてこれを、最適な条件の陸域抽出画像とし、海岸線マッチングを行った。

結果として、全16個のテンプレートにおける画像相関の平均値は0.90、最大で0.98、最小で0.78といういずれも高い相関を示し(表5.1)、どのテンプレートも目視で見て、明らかに間違っていると判断されるものは無かった。すなわち、本研究で作成したテンプレートセットは、陸域抽出画像に対して十分海岸線マッチングに耐えうるものと判断した。下図5.7は、その検証を行った日付のMODISセンサ画像とその陸域抽出画像である。



2001/10/31 撮影画像

陸域画像とのマッチング

図 5.7 最適な条件として用いた MODIS 画像

表 5.1 雲無し条件における各テンプレートの画像相関

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
画像相関	0.93	0.82	0.92	0.79	0.78	0.94	0.84	0.92	0.94	0.95	0.96	0.95	0.98	0.89	0.92	0.87

画像相関：最大値 0.98

画像相関：最小値 0.78

画像相関：平均値 0.90

また、表 5.1 で示した画像相関においてマッチングが正しく行われたと確認したので、マッチした場所における他のテンプレートの画像相関値も表 5.2 に示す。表は列方向についてのみ、その関係が示されている。例えば、テンプレート 3 が正しくマッチングした時の画像相関は 0.92（黄色枠内）で、それに次ぐ第 2 位の画像相関を得たのはテンプレート 6 で画像相関 0.59（水色枠内）ということになる。ここで第 2 位の画像相関を見れば、そのテンプレートにどの程度の信頼性があるのかを推測することができる。これは、あるテンプレートが最も高い画像相関でマッチしたとしても、似たような高い画像相関を持つテンプレートが他にあれば、マッチしたテンプレートの信頼は低いと言える。そのため、マッチした時における全てのテンプレートの画像相関を知る必要がある。

表 5.2 各テンプレートがマッチした場所でのそれぞれの画像相関

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.93	-0.13	0.32	0.03	-0.26	0.52	-0.28	-0.36	-0.31	0.09	-0.08	-0.28	-0.28	-0.02	0.05	0.60
2	-0.08	0.82	-0.26	0.27	0.35	-0.19	0.22	-0.30	0.08	0.10	0.30	-0.08	0.34	-0.04	0.28	-0.17
3	0.29	-0.27	0.92	-0.07	-0.39	0.55	-0.29	-0.07	-0.39	-0.04	-0.33	-0.24	-0.73	-0.12	-0.07	0.26
4	0.01	0.28	-0.04	0.79	0.22	0.15	0.10	-0.28	-0.20	-0.00	0.22	-0.38	0.20	-0.09	0.08	0.09
5	-0.22	0.36	-0.33	0.24	0.78	-0.20	0.33	0.00	0.13	-0.02	0.19	-0.05	0.43	-0.12	0.08	-0.24
6	0.50	-0.19	0.59	0.14	-0.28	0.94	-0.24	-0.14	-0.65	-0.09	-0.27	-0.42	-0.52	-0.06	-0.16	0.44
7	-0.27	0.23	-0.27	0.04	0.34	-0.26	0.84	-0.10	0.05	-0.06	0.19	0.12	0.41	-0.05	0.14	-0.14
8	-0.37	-0.29	-0.09	-0.25	0.01	-0.14	-0.10	0.92	0.17	-0.13	-0.22	0.33	-0.09	0.05	-0.38	-0.39
9	-0.26	0.09	-0.40	-0.18	0.17	-0.61	0.03	0.15	0.94	0.43	0.27	0.62	0.39	0.16	0.35	-0.30
10	0.13	0.08	-0.03	0.02	-0.04	-0.05	-0.08	-0.16	0.39	0.95	0.41	0.29	0.23	0.26	0.43	-0.06
11	-0.08	0.30	-0.31	0.21	0.22	-0.28	0.19	-0.22	0.26	0.39	0.96	0.29	0.49	0.14	0.56	0.05
12	-0.27	-0.08	-0.26	-0.35	0.02	-0.44	0.10	0.33	0.63	0.27	0.29	0.95	0.25	0.16	0.29	-0.17
13	-0.27	0.38	-0.71	0.18	0.47	-0.52	0.42	-0.11	0.40	0.25	0.51	0.25	0.98	0.12	0.27	-0.25
14	-0.01	-0.05	-0.13	-0.09	-0.14	-0.06	-0.07	0.03	0.15	0.27	0.14	0.16	0.12	0.89	0.14	-0.01
15	0.05	0.26	-0.05	0.08	0.11	-0.17	0.12	-0.38	0.33	0.41	0.51	0.27	0.25	0.13	0.92	0.03
16	0.55	-0.19	0.27	0.09	-0.24	0.43	-0.13	-0.33	-0.32	-0.10	0.06	-0.17	-0.24	-0.02	0.07	0.87

* 列方向：テンプレート n がマッチした場所での他のテンプレートの画像相関値を表す。

■ 画像相関最大値

■ 第 2 位の画像相関

第 2 位の画像相関 平均値：0.48

最大値：0.63

最小値：0.26

マッチングしたテンプレートの次に高い第 2 位の画像相関について見ると、その平均は 0.48、最大で 0.63、最小で 0.26 となっていた。また全体的に見ると、負の画像相関が多いことがわかる。これらの結果から考えると、テンプレートそれぞれがマッチングした時の信頼度はかなり高いといえる。また、第 1 位と第 2 位の画像相関には大きな開きがあり、第 1 位の画像相関を持つテンプレートに代わって、第 2 位のテンプレートがマッチするといったことは通常起こりにくいと言える。

5.2.2 雲量シミュレーション

雲の無いという条件において、海岸線マッチングにおけるそれぞれのテンプレートは非常に高い相関を示した。しかしながら現実的に、四国域規模の範囲になると雲が全くかかっていないシーンを撮影できる確率は非常に少ない。四国域を雲が半分以上覆うようなシーンの場合は、幾何補正する以前にデータとして使用できない公算が大きいのであまり考慮する必要はないが、少量の雲量ならばデータとしては活用すべきである。

海岸線マッチングを行う場合、陸域抽出画像の雲部分は海(0)と陸(255)の中間濃度値:127としている。そのため、雲があるほど画像相関の値は純粋に低下し、ある雲量がマッチすべきエリアを覆うにことによって、ミスマッチを引き起こすはずである。通常、画像相関に最も大きな影響を与えるのは雲の存在であり、ミスマッチした場合の要因を知る上でも雲量とミスマッチの関係を把握しておく必要がある。

そこで、これら雲量と海岸線とのマッチングの関係をj知るために、雲量シミュレーションを試みた。これは各テンプレート域において、雲量の増加とともに、それぞれのテンプレートがどのようにミスマッチするかjのシミュレーションである。

シミュレーションの具体的な方法は下図5.8の通りである。それぞれのテンプレートに雲に相当する画素をランダムに増加させていき、国土数値情報の画像上でテンプレートマッチングを行う。当然最初は相関 $R = 1$ から始まり、雲が増えるに従って相関下がり、やがてミスマッチすることになる。

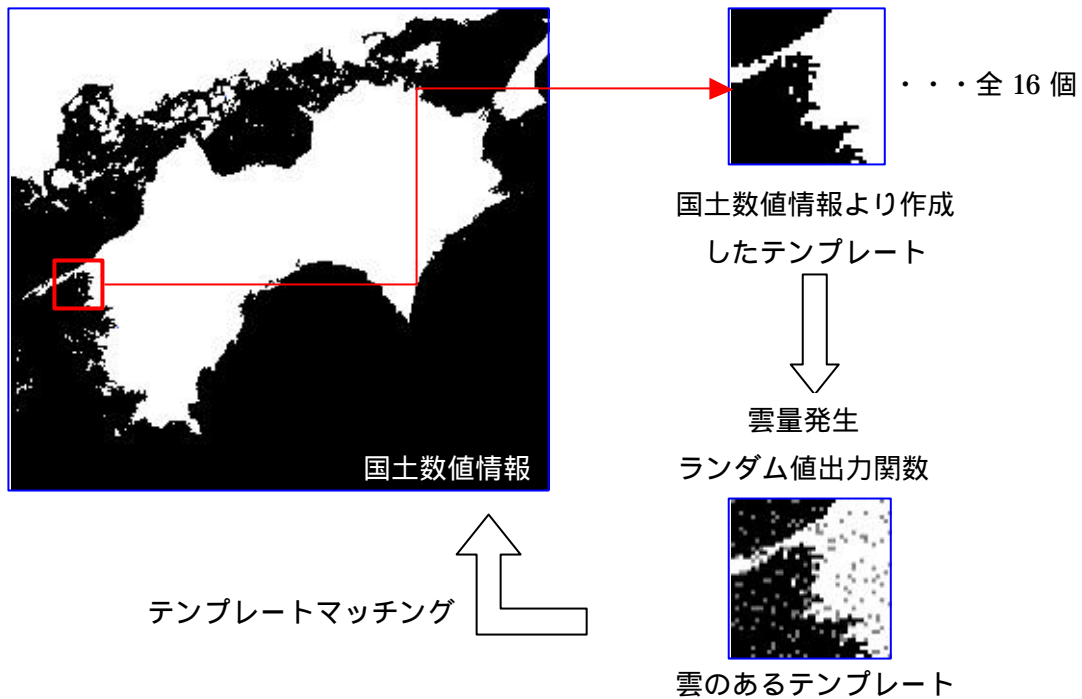


図 5.8 雲量シミュレーション

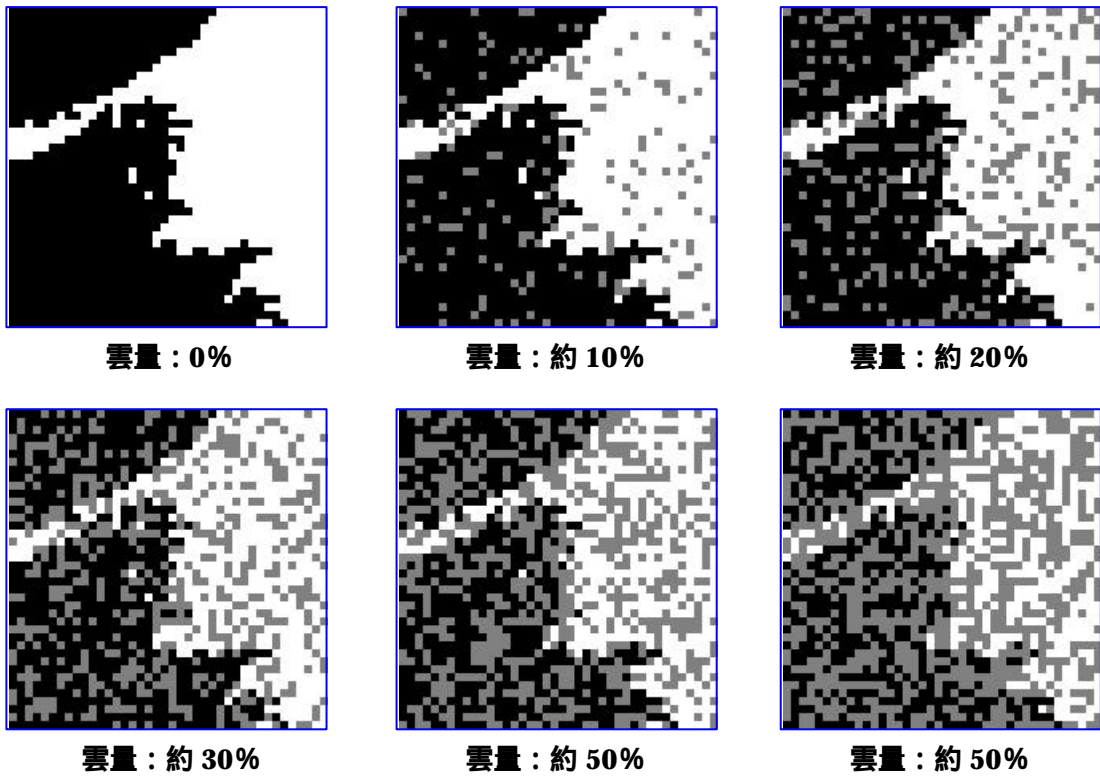


図 5.9 GCP No.1 でのシミュレーション

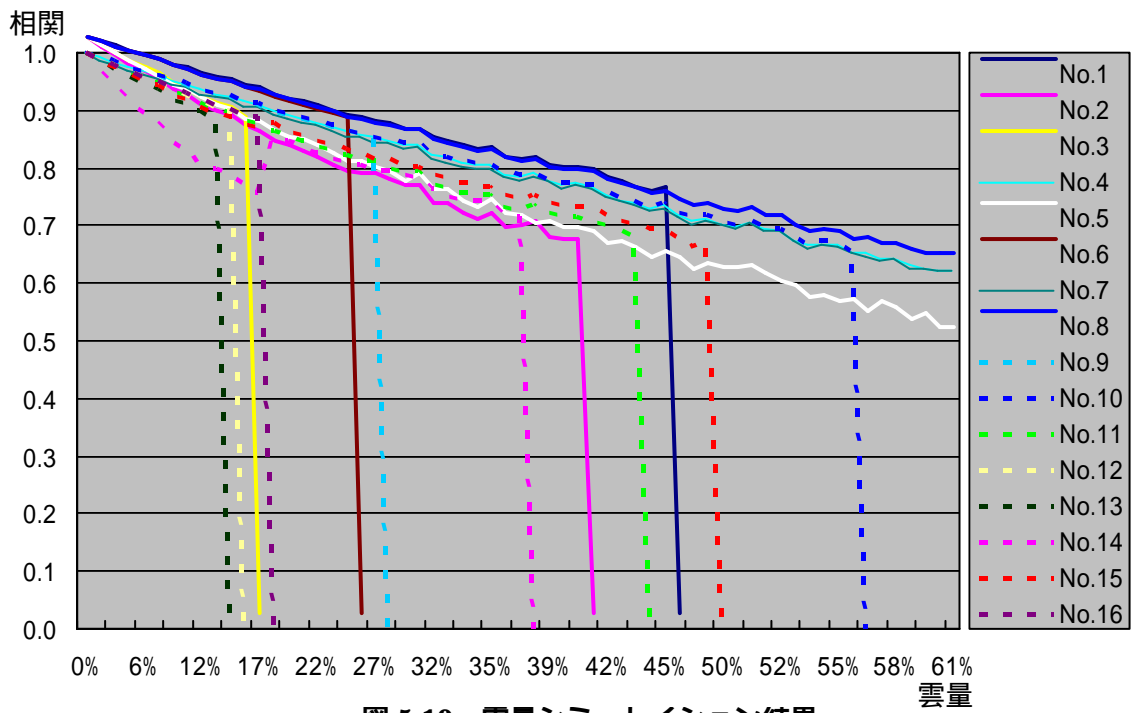


図 5.10 雲量シミュレーション結果

表 5.3 ミスマッチ直前における他のテンプレートの画像相関

ミスマッチ雲量	約45%	約38%	約16%	約60%	約60%	約25%	約60%	約60%	約27%	約58%	約48%	約15%	約14%	約40%	約50%	約18%
GCP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.73	-0.04	0.26	0.01	-0.10	0.44	-0.15	-0.20	-0.23	0.05	-0.07	-0.26	-0.24	-0.00	0.05	0.49
2	-0.09	0.65	-0.26	0.21	0.18	-0.14	0.14	-0.21	0.08	0.07	0.20	-0.08	0.33	-0.03	0.14	-0.14
3	0.27	-0.17	0.86	-0.04	-0.17	0.47	-0.18	-0.04	-0.33	-0.04	-0.21	-0.23	-0.62	-0.04	-0.03	0.24
4	-0.00	0.19	-0.05	0.62	0.12	0.13	0.05	-0.17	-0.16	-0.01	0.13	-0.35	0.16	-0.05	0.05	0.06
5	-0.18	0.20	-0.30	0.12	0.51	-0.17	0.20	-0.03	0.10	-0.00	0.14	-0.05	0.38	-0.07	0.04	-0.21
6	0.41	-0.13	0.49	0.08	-0.11	0.86	-0.17	-0.08	-0.54	-0.03	-0.19	-0.40	-0.45	-0.03	-0.08	0.35
7	-0.20	0.11	-0.24	0.05	0.16	-0.21	0.62	-0.08	0.04	-0.03	0.13	0.10	0.35	-0.03	0.12	-0.11
8	-0.26	-0.21	-0.02	-0.17	-0.02	-0.13	-0.09	0.62	0.12	-0.10	-0.12	0.28	-0.12	0.02	-0.25	-0.33
9	-0.22	0.08	-0.33	-0.12	0.08	-0.55	0.05	0.08	0.85	0.27	0.18	0.58	0.34	0.06	0.21	-0.24
10	0.07	0.11	-0.04	0.01	-0.02	-0.07	-0.02	-0.09	0.36	0.66	0.28	0.24	0.21	0.14	0.29	-0.05
11	-0.06	0.21	-0.29	0.14	0.09	-0.24	0.14	-0.14	0.25	0.31	0.66	0.26	0.44	0.08	0.31	0.06
12	-0.21	-0.04	-0.22	-0.24	-0.03	-0.38	0.10	0.20	0.54	0.18	0.21	0.90	0.22	0.07	0.18	-0.13
13	-0.25	0.23	-0.62	0.13	0.21	-0.44	0.25	-0.06	0.35	0.16	0.33	0.23	0.86	0.05	0.16	-0.22
14	0.00	-0.01	-0.11	-0.04	-0.04	-0.07	-0.06	-0.01	0.16	0.19	0.11	0.14	0.12	0.53	0.09	0.01
15	-0.00	0.20	-0.06	0.03	0.06	-0.15	0.10	-0.25	0.31	0.27	0.33	0.24	0.22	0.06	0.64	0.05
16	0.45	-0.12	0.22	0.06	-0.11	0.36	-0.08	-0.23	-0.25	-0.04	0.02	-0.14	-0.21	0.00	0.03	0.88

- * 列方向：テンプレート n がミスマッチした時の他のテンプレートの画像相関値を表す。
- * 雲量が青字：60%でもミスマッチしなかったテンプレート。

■ ミスマッチ直前の画像相関 □ 第2位の画像相関

図 5.9 はテンプレート No.1 でのシミュレーション雲量の例である。実際にはランダムな数を発生させる関数を用い、雲量がテンプレート範囲内で 60%を超えるまで、徐々に 1~2%前後ずつ雲の画素を増加させていった。その結果をプロットしたのが図 5.10 である。

図 5.10 はテンプレート No.1~8 までを実線、No.9~16 点線で表し、雲量の増加に伴うマッチングの画像相関の低下を示している。グラフが小刻みに上下しているのはランダムな値を基に雲量を発生させているためである。グラフが急激に下降しているところは、その雲量付近においてテンプレートが正しい場所から外れて、ミスマッチが発生したことを意味する。また、各テンプレートにおけるミスマッチ直前の画像相関と、その時の他のテンプレートの画像相関も表 5.3 に示した。

シミュレーションの結果、図 5.10 を見ればミスマッチが起こる雲量にはそれぞれのテンプレートでかなりのばらつきがあることがわかる。相関 0.9 でミスマッチしているテンプレートもあれば、雲量が 60%を超えてもミスマッチしないテンプレートも存在している。全体で見ると相関 0.7 以上でのミスマッチ数は 16 分の 7 となっている。表 5.3 の結果では、表 5.2 のマッチした時と雲量の影響によるミスマッチ直前の画像相関の関係には、ほとんど変化は見られない。結果的に、この高い相関でのミスマッチと、全体的なミスマッチのばらつきは、通常の海岸線マッチングにおいて以下のことを示唆している。

- 〔1〕画像相関が高いからといって必ずしも有効な場所とマッチしたとは限らない。
- 〔2〕雲量が影響するミスマッチにおいて、その本質的要因は海岸線の形に依存している。

海岸線マッチングにおいては、そのマッチングの成否を決めているのは画像相関だけであり、相関が最大となる場所を最も確からしい場所と仮定している。しかしながら、(1)の結果からは、単純に画像相関からミスマッチの閾値を設定するのは不適當であることがわかる。(2)においては、下図 5.11 のように似通った海岸線箇所をテンプレートに選んだことに起因する。通常テンプレート設定する場合、地形的に似通っていない場所を選ぶのは当然であるが、それに加えて少量の雲量がどのように影響するのかも想定して選ぶ必要がある。

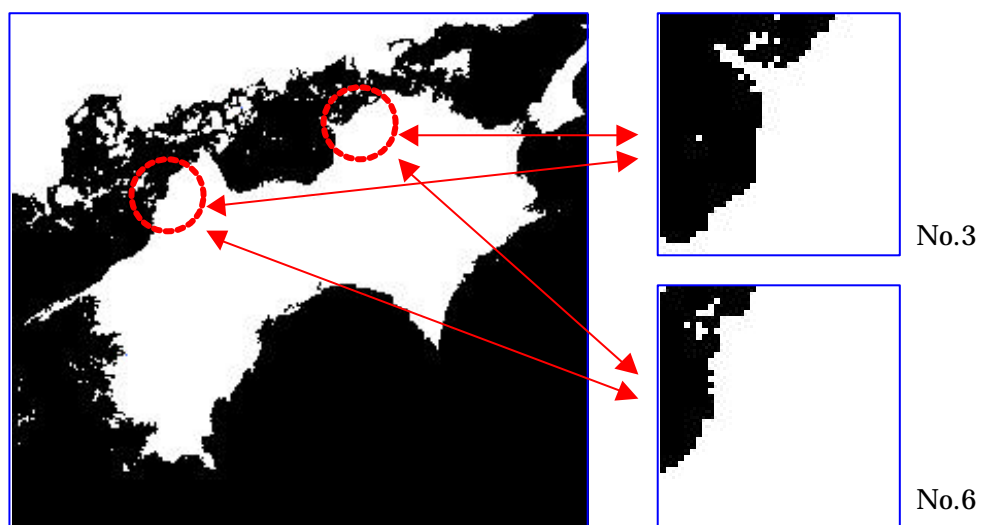


図 5.11 ミスマッチしやすい箇所の例

5.3 アフィン変換による幾何補正

5.3.1 変換式概要

幾何補正は陸域の自動抽出後、海岸線マッチングが行われ、GCP が自動取得される。幾何補正には、取得された GCP の画像座標とテンプレートが持つ地理座標をもとに、幾何補正の変換式が計算される。これらはシステム的にほぼ同時に行われるものである。

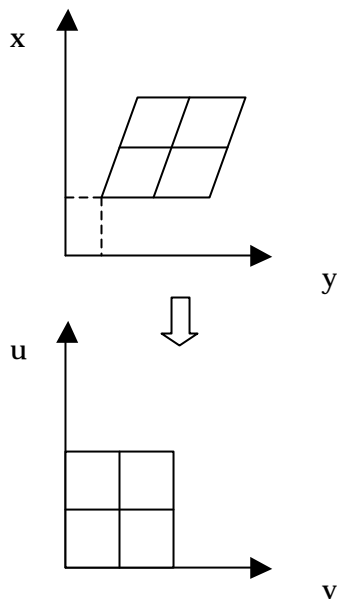
一般に、幾何補正の変換式は様々だが、本研究では変換式にアフィン変換(Affine Transformation)を用いた。MODIS センサ画像の非線形な歪は、すでに地球の曲面の影響除去によって補正されていると仮定でき、幾何補正には高次の変換式を用いずとも、一次式であるアフィン変換で十分対応可能であると思われる。

アフィン変換は、平行移動、回転、拡大・縮小、スキュー歪が存在する画像の幾何学的変換・補正を行うことができる。次式は、アフィン変換によって、ある座標系 (x, y) から他の座標系 (u, v) に変換することを意味する。この変換式はユークリッド距離における線形変換式であり、擬似アフィン変換とよばれる式では台形歪も補正する。これらの変換式にはそれぞれ未知係数があり、それらを求める場合は最小二乗法が用いられる。基本的に幾何補正にはアフィン変換だけを用いるが、MODIS センサ画像に台形歪が存在する可能性もあるので、擬似アフィンでも幾何補正を行い、その精度を比較した。

幾何補正式

アフィン変換

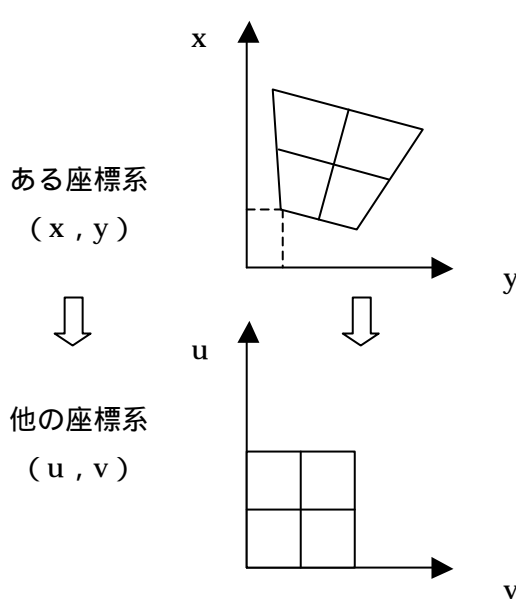
$$\begin{aligned} u &= ax + by + c \\ v &= dx + ey + f \end{aligned} \quad (5.2)$$



未知係数 : a, b, c, d, e, f

擬似アフィン変換

$$\begin{aligned} u &= ax + by + cxy + d \\ v &= ex + fy + gxy + h \end{aligned} \quad (5.3)$$



未知係数 : a, b, c, d, e, f, g, h

アフィン変換における未知係数の算出は次のようになる．擬似アフィン変換についても未知係数の数が増えるだけで計算方法は変わらない． V_n (エラーベクトル) = 0 と仮定すると，次式の展開によって未知係数 a, b, c がもとめられる．

$$\begin{array}{l}
 V_1 = au_1 + bv_1 + c - x_1 \\
 V_2 = au_2 + bv_2 + c - x_2 \\
 \vdots \\
 V_n = au_n + bv_n + c - x_n
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 & v_1 & 1 \\ u_2 & v_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n & v_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \\
 \Downarrow \qquad \qquad \qquad \Downarrow \qquad \qquad \Downarrow \qquad \Downarrow \\
 \vec{V} \qquad \qquad \qquad A \qquad \qquad \vec{L} \qquad \vec{X}
 \end{array}$$

$$(A'A)\vec{L} = A'\vec{X}$$

$$\vec{L} = (A'A)^{-1} A'\vec{X} \tag{5.4}$$

V_n : エラーベクトル u_n, v_n : 既知の他の座標 L : 未知係数 x_n : 既知のある座標

これらの計算式によって，MODIS センサ画像を幾何補正するための変換係数が決定される．得られた変換係数を基に，MODIS センサ画像のそれぞれの画素は公共測量第4座標系のジオコード画像座標上 (x, y) に再配列・内挿される．内挿には，最近隣内挿で行った．そのため，最大で 0.5 画素の位置誤差を有することとなる．



$$\text{画像データ } Q(X, Y) = P_{kl} \tag{5.5}$$

$$k = \text{IFIX}(x + 0.5)$$

$$l = \text{IFIX}(y + 0.5)$$

図 5.12 最近隣内挿

5.3.2 幾何補正結果

下図 5.13, 5.14 はそれぞれ, 陸域抽出画像からの GCP の自動取得によるアフィン変換と擬似アフィン変換の幾何補正画像である。GCP の自動取得に使用した陸域抽出画像は, 雲を除去した最適な条件のものを使用しており, すなわちこれは, テンプレート 16 個 (GCP 全 64 点) についてのデータが正常に使用できた場合の補正結果を示している。また, 表はそれぞれの幾何補正によって得られた各 GCP における位置誤差を表している。

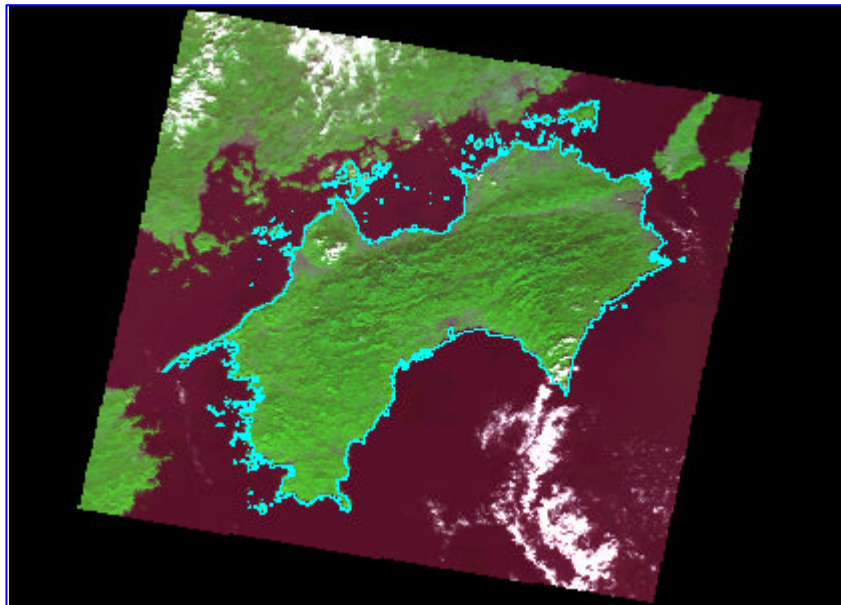


図 5.13 アフィン変換後の画像

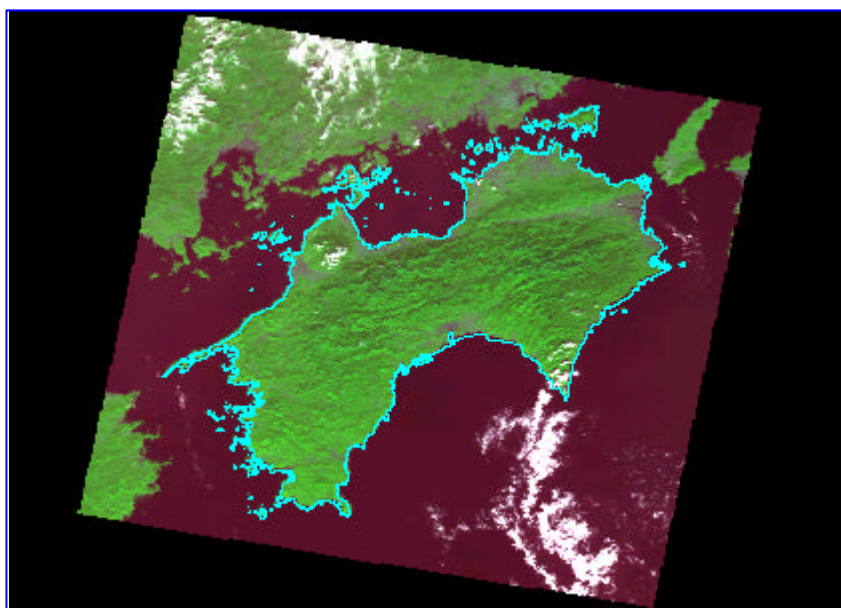


図 5.14 擬似アフィン変換後の画像

表 5.2 アフィン変換による各 GCP の誤差

単位：画素

GCP	画像相関	左上	右上	左下	右下	誤差平均
1	0.93	0.39	0.47	1.78	1.15	0.95
2	0.82	0.43	0.89	1.32	0.65	0.82
3	0.92	0.16	0.85	1.62	1.18	0.95
4	0.79	0.37	1.17	1.12	0.75	0.85
5	0.78	0.52	0.76	1.47	0.73	0.87
6	0.94	0.76	1.54	0.73	0.63	0.91
7	0.84	0.64	0.65	1.63	0.85	0.94
8	0.92	0.15	0.98	1.34	0.90	0.84
9	0.94	0.93	0.51	1.96	1.15	1.14
10	0.95	0.54	1.21	1.00	0.50	0.81
11	0.96	0.77	0.54	1.80	1.00	1.03
12	0.95	1.13	1.81	0.40	0.50	0.96
13	0.98	1.62	2.34	0.13	0.98	1.27
14	0.89	2.02	2.62	0.65	1.13	1.60
15	0.92	0.65	1.13	1.10	0.38	0.82
16	0.87	0.25	1.00	1.26	0.77	0.82
最小	0.78	0.15	0.47	0.13	0.38	0.81
最大	0.98	2.02	2.62	1.96	1.18	1.60
平均	0.90	0.71	1.16	1.21	0.83	0.97

表 5.3 擬似アフィン変換による各 GCP の誤差

単位：画素

GCP	画像相関	左上	右上	左下	右下	誤差平均
1	0.93	0.39	0.46	1.74	1.14	0.93
2	0.82	0.45	0.86	1.32	0.66	0.82
3	0.92	0.17	0.82	1.62	1.18	0.95
4	0.79	0.32	1.13	1.15	0.74	0.84
5	0.78	0.54	0.76	1.49	0.74	0.88
6	0.94	0.76	1.57	0.74	0.63	0.92
7	0.84	0.59	0.72	1.60	0.80	0.93
8	0.92	0.20	1.09	1.33	0.90	0.88
9	0.94	0.92	0.52	2.00	1.19	1.15
10	0.95	0.53	1.18	1.05	0.49	0.81
11	0.96	0.79	0.53	1.83	1.05	1.05
12	0.95	1.12	1.79	0.41	0.46	0.94
13	0.98	1.62	2.31	0.14	0.93	1.25
14	0.89	2.03	2.61	0.65	1.14	1.61
15	0.92	0.65	1.14	1.02	0.38	0.80
16	0.87	0.27	1.02	1.19	0.77	0.81
最小	0.78	0.17	0.46	0.14	0.38	0.80
最大	0.98	2.03	2.61	2.00	1.19	1.61
平均	0.90	0.71	1.16	1.20	0.83	0.97

* 画像相関は海岸線マッチングにおける各テンプレートの値

* 右下，右上などはテンプレートの四隅の点を意味する

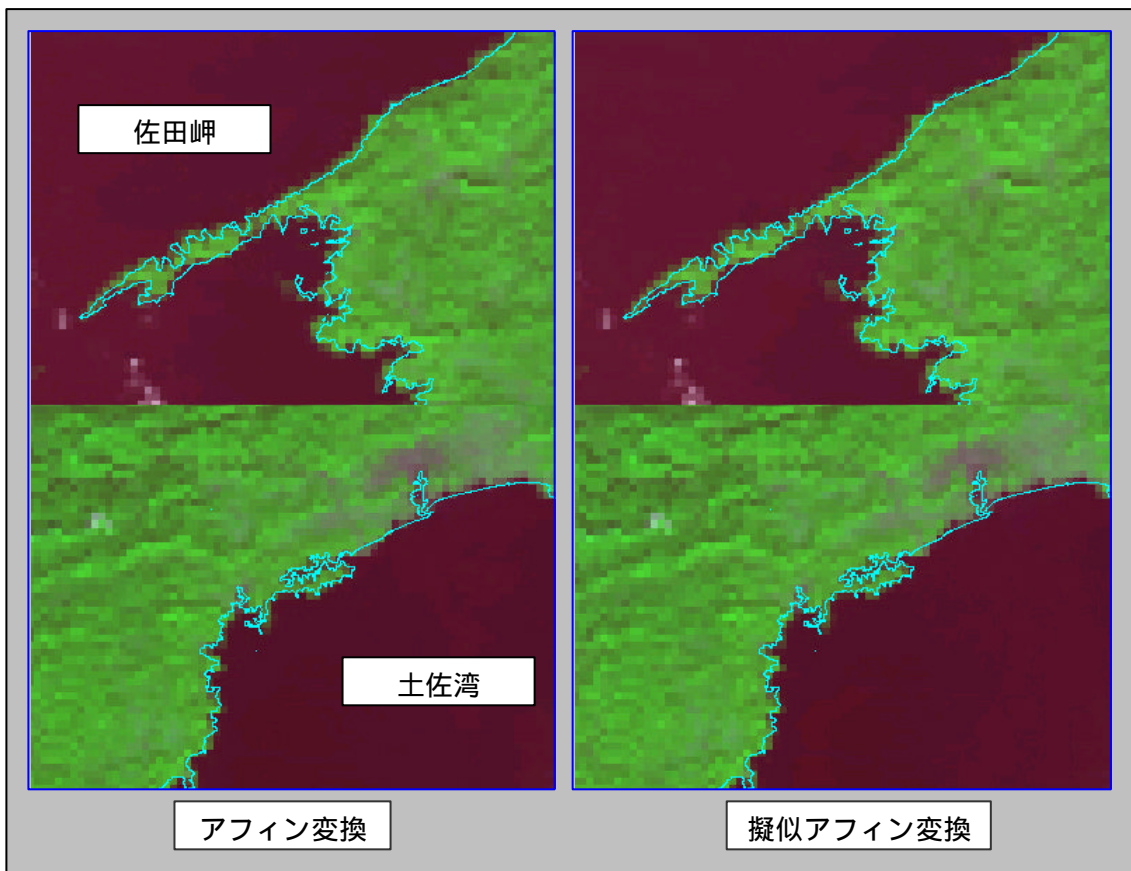


図 5.15 幾何補正画像の局所

最適な条件で行われる自動幾何補正は、テンプレート全 64 点における RMS エラーの平均が 1 画素以内に収まる結果となった（表 5.2, 5.3）。また、突出して大きい RMS エラーは無く、最大値でも 2.6 画素である。これらの値から考察すると、海岸線マッチングによる幾何補正はかなり正確に行われたことが予測される。

補正結果の画像を見ると、アフィン変換・擬似アフィン変換ともにどちらの補正結果も、ほぼ正確に国土数値情報の海岸線と MODIS 画像の海岸線がオーバーレイしており、目視レベルでは補正精度に明確な差がほとんど無いことがわかる。表の RMS エラーで比較しても、アフィン変換、擬似アフィン変換ともに最終的な GCP 全体における誤差の平均は 0.97 画素と同じとなった。つまり、MODIS センサ画像には台形歪はほとんど存在していないことになる。すなわち幾何補正には、擬似アフィン変換を用いずとも、アフィン変換だけで十分対応可能である。

5.4 幾何補正精度の検証

5.4.1 検証手法

一般に、幾何補正の精度評価は RMS エラーのみで表されることが多い。しかしながら、RMS エラーのみでは本研究の幾何補正とシステム補正との精度比較ができず、どれ程の精度差があるのかは表せない。本研究の補正精度と、システム補正の精度を比較する場合、両者の幾何補正に同様の基準を設けてその精度を比較する必要がある。その基準となるのが、GCP の自動取得でも用いた海岸線である。つまり、幾何補正された画像にベクトルデータの海岸線をオーバレイさせることによって、幾何補正画像の海岸線が実際の海岸線よりどの程ずれているのかを統計量的に画素単位で示すことができる（図 5.16）。

これにはまず、先の陸域抽出と同じ手法でそれぞれの幾何補正画像から陸と海の 2 値化画像を作成した。雲域やノイズに関しては目視で取り除いている。そして、陸と海の境を中心として、海側・陸側へ 0.5 画素ごとに 3 画素分の着色を行った。これによって、海岸線ラインデータがどの色と交差しているかが、直接ずれの差として判断できる。

しかしながら、上記の手法では誤差がどの方向に発生しているかがわからない。そこで、誤差ベクトルを算出するにあたっては、手動による幾何補正を基準として算出した。手動による幾何補正には、できるだけその誤差を少なくすべく、四国域周辺から満遍なく 42 個の GCP をとり、RMS エラーは 0.34 という幾何補正画像を得た。この画像にベクトルの海岸線を重ねた結果、目視ではあるが、この画像を基準として用いられると判断した。

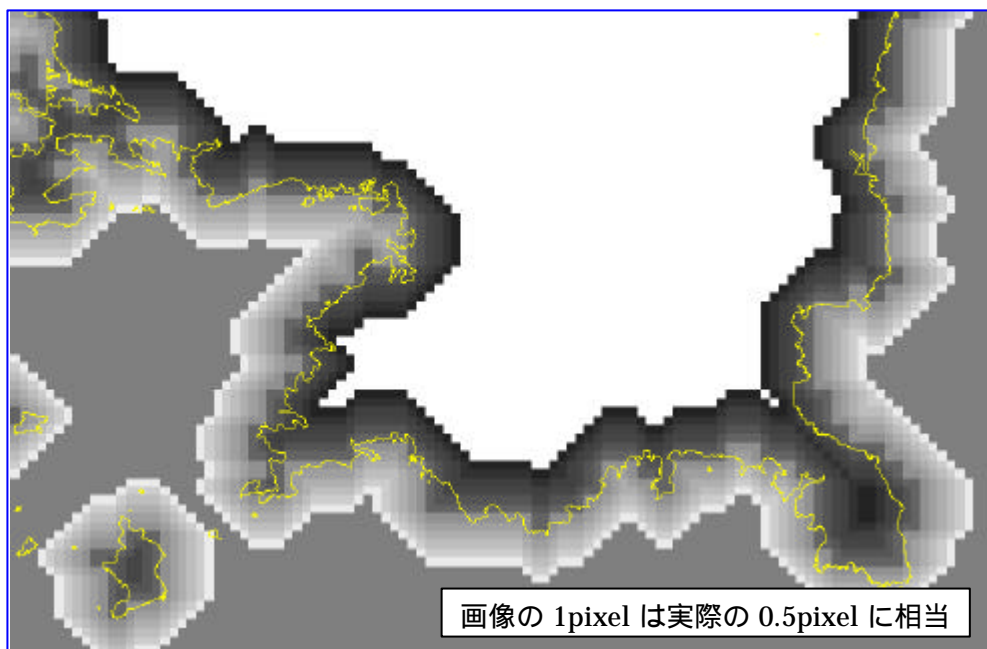


図 5.16 基準色付の海岸線とベクトルの海岸線

5.4.2 システム補正との精度比較

図 5.18 は、それぞれの幾何補正画像における海岸線でのずれを比べた結果である。誤差の統計をとる上では、四国本島周りの海岸線だけを用い、小さい島などはノイズとなるので除外した。結果、それぞれの補正精度の違いは明らかである。±1画素以内を正解としたならば、本研究の補正では約80%が正解であるのに対し、システム補正は約50%である。また、±1画素以上を見れば、本研究の補正はシステム補正に対し明らかに減少傾向が大きく、3画素以上のずれは、全体の1%程度である。これらの結果から、本研究における幾何補正精度が、システム補正よりもかなり高い精度で補正されていることがわかる。

誤差ベクトルにおいては、全13点のGCPで検証した。その結果、本研究の補正では平均0.78画素のRMSエラーを持ち、誤差ベクトルに一貫性は見られない(図5.18)。しかしながら、システム補正では平均1.7画素のRMSエラーを持ち、誤差のベクトルは一様に南方向に発生しているという結果となった(図5.19)。

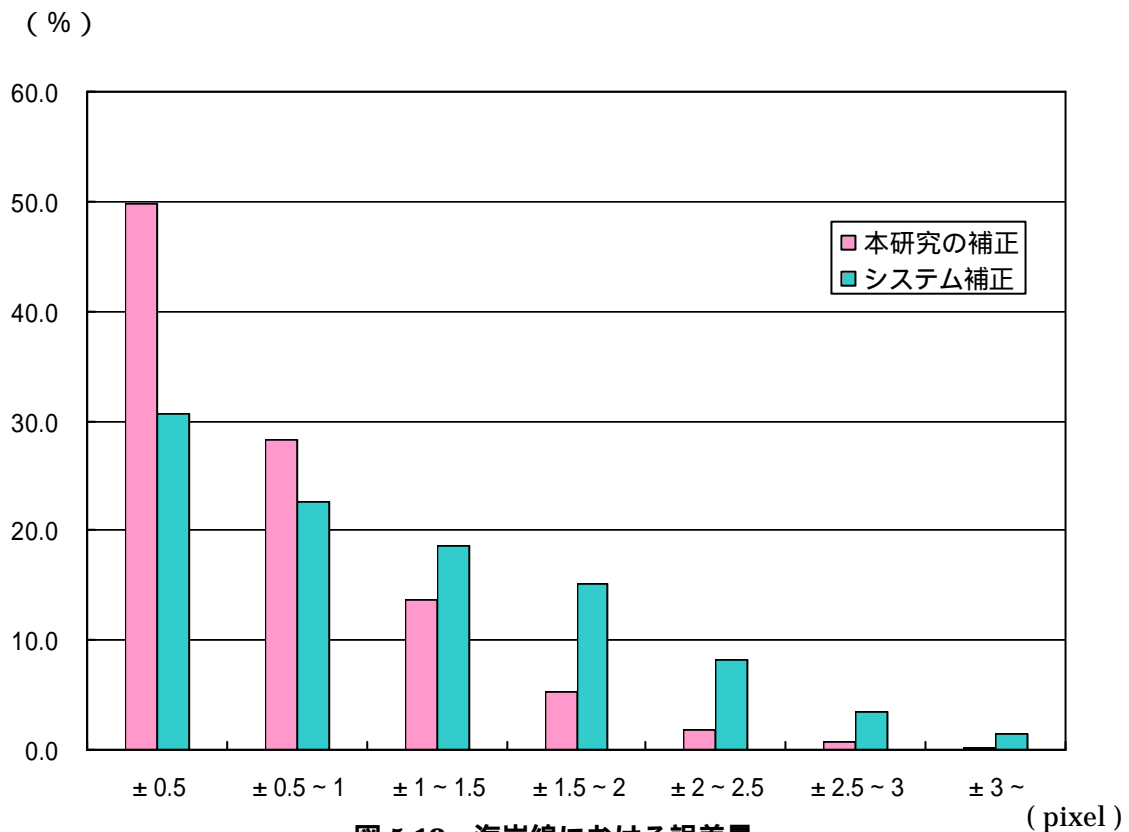


図 5.18 海岸線における誤差量

± 1 pixel 以内を正解とした場合

- ・ 本研究の補正 正解率：約 80%
- ・ システム補正 正解率：約 50%

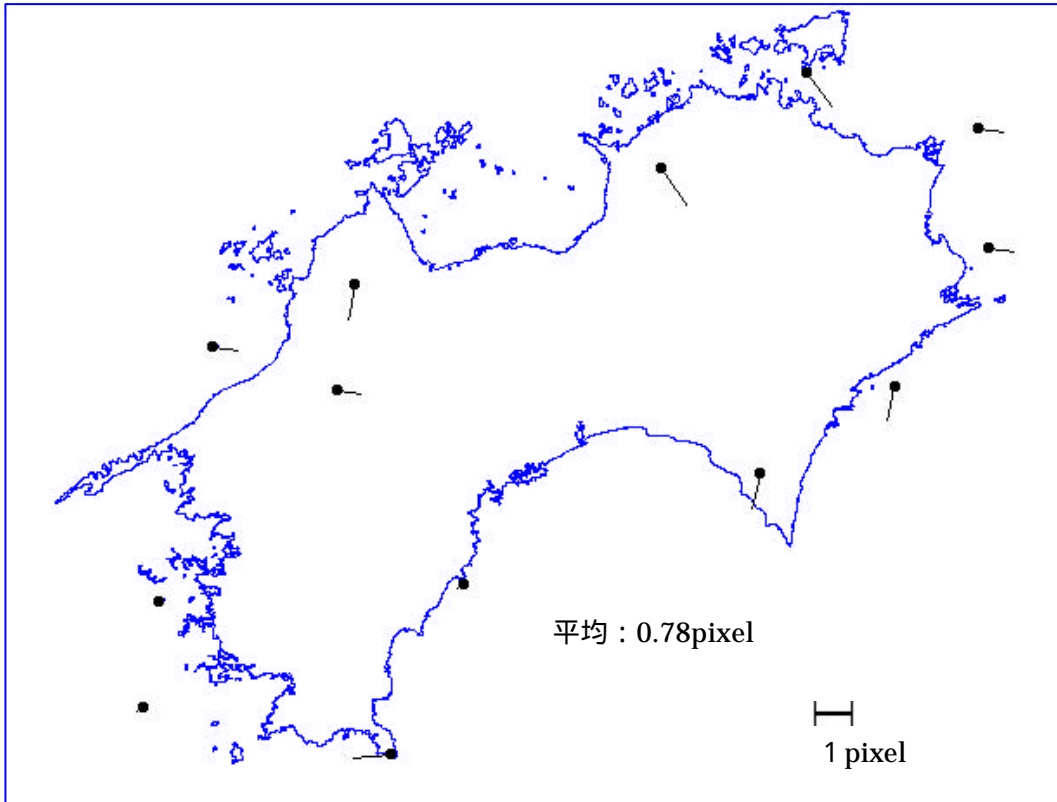


図 5.19 アフィン変換 : 誤差ベクトル (10 倍)

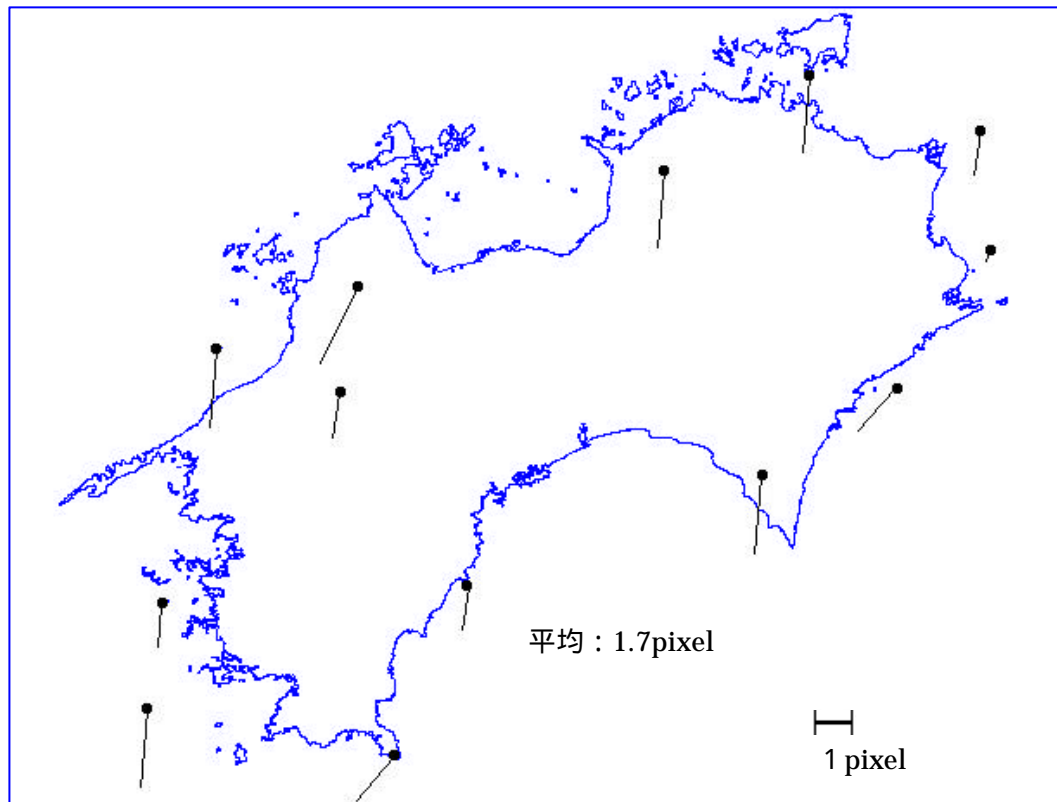
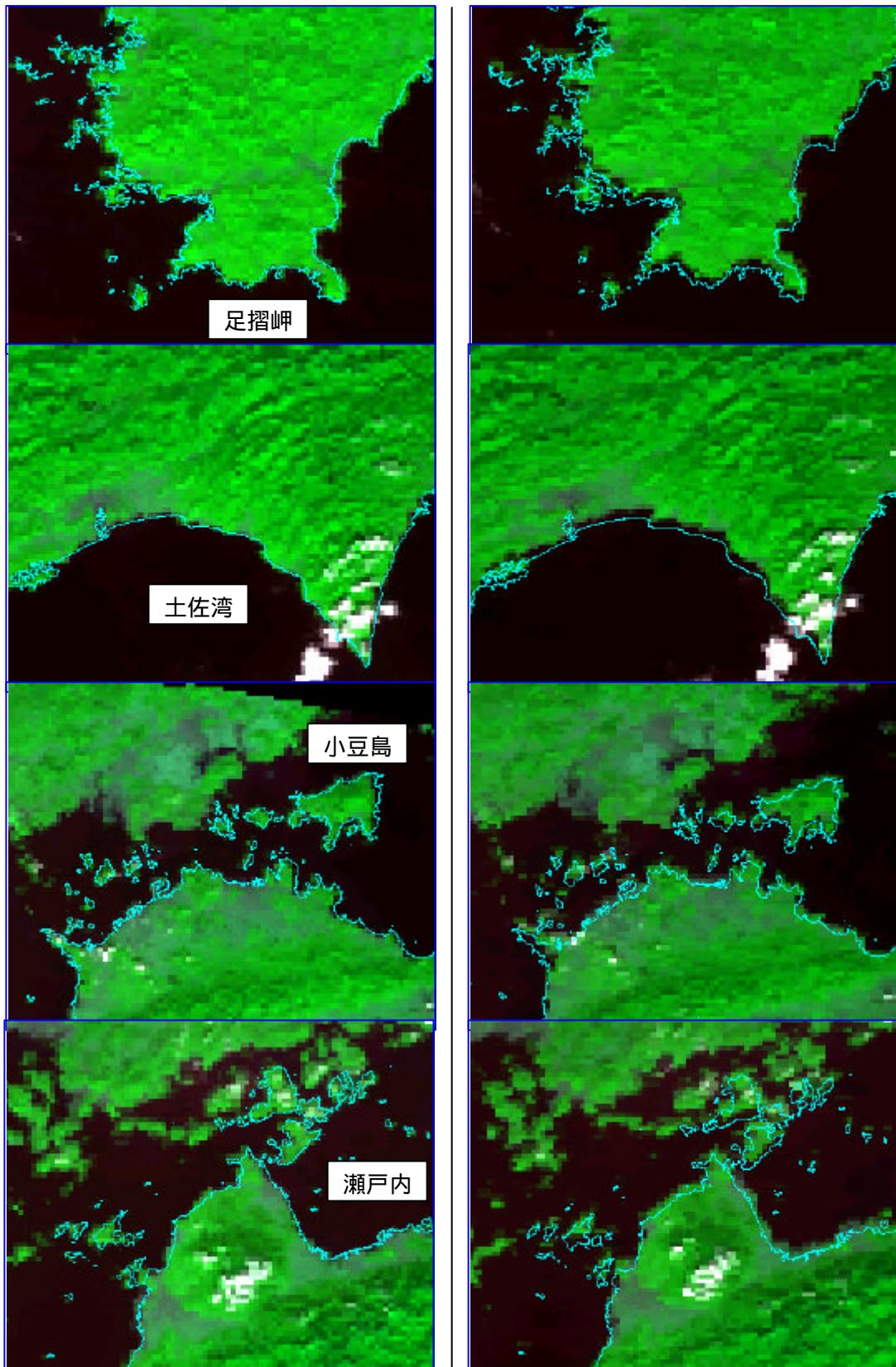


図 5.20 システム補正 : 誤差ベクトル (10 倍)



本研究の補正画像

システム補正画像

図 5.21 補正画像の比較

6 結論

6.1 まとめ

本論文を通じての結果を以下にまとめる。

1) データの前処理について

- ・MODIS データに対する地球の曲面による歪の影響は大きく、直下から左右 400 画素まではほぼ正しく地上面を投影しているが、それ以上は分解能 1000mのスペックを超えた地上幅を観測していた。そこで、撮影画素に対する地上観測幅の計算からセンサ主走査方向の非線形歪を歪に合わせた画像拡張によって修正し、後の幾何補正を1次式のアフィン変換だけで対応可能とすることができた。
- ・MODIS データには撮影センサ画像には、一定の回転量(約 10°)が加わっており、あらかじめその角度を補正することで、後の海岸線マッチングではそれぞれのテンプレートにおける高い画像相関(平均 0.90)を得ることができ、また回転量の違いによるミスマッチを無くすことができた。

2) 陸域の自動抽出について

- ・MODIS センサ画像は、従来よりも広い観測帯域を 12 ビットで量子化しているため、海や陸に比べて雲域はより多段階の濃度差となり、非常に大きな値とばらつきを示した。その結果、通常の教師付き分類(ユークリッド距離・標準ユークリッド距離・マハラノビス距離)を MODIS センサ画像に適用したところ、ユークリッド距離が最も高精度で、分散・共分散を考慮する分類式ほど著しく分類精度は低下するという結果となった。
- ・MODIS センサ画像に教師付き分類を適用可能とするため、マハラノビス距離においてそれぞれのトレーニングデータの最大値を雲の最大値に合わせる補正を行って適用した結果、分類精度は初期の分類より向上し、明らかな誤分類は無くすることができた。この結果、教師付き分類における誤分類が雲域の大きなデータのばらつきにあることを確認した。しかしながら、精度面では陸と海の明確な分類という点では、やや不十分であった。
- ・教師付き分類において、トレーニングデータを他時期の MODIS センサ画像に適用する手法の検討には、トレーニングデータに対して、濃度マッチング補正や太陽天頂角補正を試みた。しかしながら汎用性レベルの分類精度は得られず、自動陸域抽出に教師付き分類手法の適用は困難であるという結果となった。
- ・MODIS の多バンド性を生かし、陸、海、都市、雲を強調するような正規化バンド間演算を試みた。この結果、分類精度は教師付き分類より遥かに良好であった。また、この分類

方法を他時期 6 ヶ月分のデータに適用したところ、どの時期も陸と海の高精度な分類が実現され、この手法に高い汎用性があることが示された。

- ・ MODIS の陸域自動抽出には、教師付き分類と正規化バンド間演算の両者を適用可能か検討した結果、精度・汎用性という点において、ともに正規化バンド間演算が有用であるとことが示された。

3) 海岸線マッチングについて

- ・ 雲の無いという最適な条件下で、バンド間演算による陸域抽出画像に海岸線マッチングをおこなったところ、回転処理の効果も含まれてはいるが、作成した海岸線テンプレートにミスマッチはひとつも起こらず、高い画像相関を得た。すなわち、バンド間演算による陸域抽出画像は実用可能レベルの分類精度であると同時に、GCP の自動取得が海岸線マッチングで十分可能であることを意味する。
- ・ 雲と海岸線マッチングにおけるミスマッチの関係を把握するため雲量シミュレーションをおこなった。その結果、作成したテンプレートセットの中には、画像相関が 0.9 でミスマッチしているものもあり、相関が高いからといって必ずしも有効な場所とマッチしているとは限らないという結果となった。また、ミスマッチ発生時の雲量はテンプレートによって大きなばらつきがあり、ミスマッチの判断を画像相関の閾値で設定するのは不適當であることも示された。

4) 幾何補正と精度検証について

- ・ 同様の MODIS センサ画像に GCP 自動取得による幾何補正をアフィン変換・擬似アフィン変換を適用してその精度を比較した結果、目視レベルでその精度差は見受けられず、RMS エラーも同値であったことから MODIS 画像に台形歪が無いと同時に、アフィン変換で十分適用可能であると判断した。
- ・ 雲が無いという最適な条件下で、アフィン変換による自動幾何補正を施した結果、GCP 全 64 点の誤差は平均で 1 画素以内に収まっており、高精度で幾何補正をおこなうことができたと言える。
- ・ 精度の検証には、正しい海岸線（国土数値情報）を基準として、自動幾何補正とシステム補正によって得られたそれぞれの海岸線画像で比較した。自動幾何補正済み画像の海岸線は約 80% が正しい海岸線とオーバーレイしていたのに対し、システム補正は約 50% であ

った。また、正しい海岸線から何画素それぞれの海岸線が離れているかの統計を取ったところ、システム補正より自動幾何補正の方が明らかにその統計量の減少傾向は大きい。これらの結果より、自動幾何補正の精度はトータル的にシステム補正より2倍近い補正精度が得られたと言える。

- ・幾何補正のずれの方向をベクトル化して比較した結果、自動幾何補正には明確な特徴は無かったのに対し、システム補正データ（Terra 下降軌道で撮影）には一様に南南西方向にずれが存在しており、システム補正に使われている情報に特定の方向誤差が含まれていることが確認できた。

6.2 補正成果と開発システムの利用

本論文において、その幾何補正精度がシステム補正より高い精度であること、また自動化という点で汎用性のある手法であること、という2点を主目的としてきた。その結果、残す課題はいくらかあるものの、最終的にその2点ともほぼ達成されたと言える。

そして、開発システム利用の視点から述べると、以下のような利用が期待できる。本論文での幾何補正のシステムは、MODIS センサ画像の複雑な処理やパラメータ情報をほとんど必要としていない。必要とするのは、ユーザが MODIS 全体の撮影画像から四国のような局所領域を自動で切り出す時に、データに付随する緯度経度情報を参照する程度である。そのため、第三者によるこのシステムの利用・改良は極めて容易である。また、自動化を前提にしてあるので、幾何補正の要求に応じることができる地域のテンプレートさえデータベースとして用意しておけば、十分汎用性のある幾何補正システムとなる。それに加え、システム補正済みのデータを再補正する場合にも適用可能である。気象衛星 NOAA に関しては、このような高次システムが構築されており、多くの研究に寄与してきた経緯がある。MODIS についても、本論文のような幾何補正システムが望まれており、今後この成果が生かされることは大いに期待できると考えられる。

6.3 今後の課題

MODIS の幾何補正を行うにあたって避けられない問題に、Bow-tie 効果の補正問題がある。本論文の幾何補正は、Bow-tie 効果がほとんど無いと仮定して、対象地域がセンサの撮影直下に近いデータだけを検証した。そのため、MODIS の広域な観測幅という利点を犠牲にしてしまっているところがあり、少なからず幾何補正精度に影響を与えている可能性もある。MODIS についての Bow-tie 効果の補正については、データに付随する緯度経度の情報をもとに、ある程度の修正は可能であるものの、システム補正に頼らないという観点から見れば、全く別の手法が必要かもしれない。

また、幾何補正のアルゴリズムだけを考えれば、今後標高の違いも考慮した補正でなければならぬだろう。本論文では精度検証に海岸線のような標高差が影響しない部分で検証しており、標高差のある内陸部では誤差が生じている可能性があるからである。

データの前処理としての回転処理については、後の海岸線マッチングで高い画像相関を求めるためにあらかじめ実施した。しかしながら、この時点でいくらかのデータの損失が起きていることは否めない。そのため、できることならば無回転のデータから海岸線マッチングを行うほうが良い。本論文では記さなかったが、回転処理せずに海岸線マッチングを行うと、かなりのミスマッチと補正精度の低下が見受けられた。回転の影響をあまり受けないようにするためには、テンプレートサイズを小さくすればよいが、それではさらにミスマッチが多くなる。このあたりのテンプレートサイズやマッチングの手法においては、まだまだ検討の余地は多い。また、今後の検証のためにも、様々な地域・種類のテンプレートデータベースを作成する必要があるだろう。

陸域の自動抽出に関しては、MODIS の 36 バンドというスペックを考えると、その手法はひとつに絞られるということはない。一般に、MODIS 程度の分解能におけるデータの 2 値化・3 値化は比較的容易と思われているが、実際は逆であった。特にこの分野に関しては、最も汎用性という点が求められるところであり、その手法の確立が強く望まれる。本論文内では、データを正規化することである程度の汎用性を確保したが、薄雲の分類にやや不完全さを残したという課題があり、改善が望まれる。

参考文献

1) Terra/MODIS レベルデータの幾何補正手法および北海道環境評価への応用布和敖斯尔, 金子正美, 石崎英治, 亀山哲, 王勤学
RESTEC 衛星リモートセンシング実利用フォーラム 2001 in 北海道概要集 1-11(2002)

2) MODIS データのシステム補正の幾何補正について
橋本 俊昭
日本写真測量学会 平成 14 年度次学術講演会発表論文集 (35-38)

3) 気象衛星 NOAA の AVHRR データにおける精密な幾何補正
張 堯 棟, 高木 幹雄
写真測量とリモートセンシング 2/1995

4) Terra/MODIS データの精密幾何補正について
橋本 俊昭
写真測量とリモートセンシング 5/2002 (29 - 36)

5) NOAA-AVHRR 画像の幾何補正における GCP の誤差の評価
林 鍾杰, 安 中鉉, 安田 嘉純
日本写真測量学会 平成 7 年度次学術講演会発表論文集 (153-158)

6) Level 1B Product Information and Status
NASA GSFC
<http://www.mcst.ssai.biz/mcstweb/L1B/product.html>

7) アジア地域の 10 日間 AVHRR モザイク合成画像データセットの作成
横山 隆三, 雷 莉萍, Purevdorj.Ts
生研フォーラム「宇宙からの地球環境モニタリング」第 11 回 論文集 (66 - 69)

8) Terra MODIS データを用いた紀伊半島植生領域純一次生産量の推定
熊彦, 古海 忍, 村松 加奈子, 藤原 昇
生研フォーラム「宇宙からの地球環境モニタリング」第 11 回 論文集 (28 - 34)

9)GMS-5 S-VISSR データの高速高精度な幾何学的歪補正

安川 雅紀, 高木 幹雄

写真測量とリモートセンシング 1/2002 (56 - 69)

10) WWW を利用した Terra MODIS データ前処理システムの構築

竹内 渉, 根本 利弘, P.J.Baruah, 越智 士郎, 安岡 善文

日本写真測量学会 平成 14 年度秋季学術講演会論文集 11/2002 (15 - 18)

11) GCP が少ないときの NOAA AVHRR 画像の幾何補正

本田 俊昭, 村井 俊治

日本写真測量学会 平成 3 年度秋季学術講演会論文集 10/1991 (183 - 188)

12) 8 km AVHRR データにおける NDVI 変動要因の解析

松岡 真如, 立石隆太郎

日本写真測量学会 平成 8 年度秋季学術講演会論文集 10/1996 (183 - 188)

10)画像解析ハンドブック

高木 幹雄, 下田陽久 監修

東京大学出版会

11)イメージセンシング

動体計測研究会 編

社団法人 日本測量協会

12)リモートセンシングハンドブック

JARS 日本リモートセンシング研究会

13)空間情報工学

村井 俊治

社団法人 日本測量協会

14) Information, Support, and Software from the HDF Group of NCSA

<http://hdf.ncsa.uiuc.edu/>

謝辞

当時、ジオマティクス技術において浅はかな知識しか持たなかった私に、学部時から修士に至るまで懇切丁寧に御指導して頂いた高木方隆助教授には、筆舌にし難いほどの感謝を感じております。その深い技術見地と指導力、人生論にはいつも驚かされたと同時に、私の狭い世界観を大きく広げて下さいました。ここに深くその感謝の意を申し上げたいと思います。

論文副査の大内和夫教授には、論文原稿の添削において多くの貴重な指摘と助言を頂いたことに大変感謝しております。

東京生産技術研究所の安岡善文教授、越智士郎助手には、MODIS データの提供ならびにIDL 講習会において大変お世話になりました。

プログラムや研究に関する色々な識を教えてくれた留学生のジョンさん。どうも有り難うございました。

私の研究の一端を担うと同時に、多大な時間も奪ってくれた学部の浦岡君。君が私とともに成してきた労力を考えると色々な意味で感涙の極みです。

思えば研究初期の頃、MODIS センサ画像という未知のデータを前にして、私は途方に暮れていました。HDF 形式のデータなど知る由も無かった当時の私は、画像を見ることすら間々ならず、研究以前の段階で右往左往しておりました。当初、MODIS センサ画像が新しいデータということもあって、周りに参考となる資料もほとんど無く、また可視化するツールも無かったため、スタートラインに立つまでかなりの月日を要した記憶があります。

そこに一筋の光明とし、MODIS 処理の援護に用意されたツールが、IDL という画像処理に特化したプログラムツールでした。しかし、これまた誰もその使い方を知らず、自由にプログラムが組めるようになるまでは、ひとり苦悶の日々だったことは言うまでもありません。これほど未知なものを突きつけられたのは、生まれて初めての経験でした。けれどもよく考えると、色々な知識や経験が増え、逆に良い勉強と妙な自信が付いてしまったことは感謝すべきことだと思います。

そして最後に、研究室の皆さん、私の友人、知人、家族に感謝を述べたいと思います。