

10. メコンデルタを対象としたマングローブ分布域の推定方法に関する研究

桑原 祐史^{1*}・藤原 博行²・横木 裕宗³・金 鎮英⁴・伊東明彦⁵・小柳 武和¹・三村 信男³

¹茨城大学 工学部 都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

²国土交通省 国土地理院 中部地方測量部 (〒460-0001 愛知県名古屋市中区三の丸2-5-1名古屋合同庁舎)

³茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

⁴茨城大学 地球変動適応科学研究機関 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

⁵宇宙技術開発株式会社 第一事業部 衛星ビジネス推進部 (〒164-0001 東京都中野区中野5-62-1EDCビル)

* E-mail:kuwahara@mx.ibaraki.ac.jp

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)から、2007年に第4次報告書が公表された。報告によると、海面水位の上昇、熱帯低気圧の強度増加、高潮の氾濫の危険性等、低平地が直面する多くの課題が指摘されている。これらの影響による災害の減災を目的とした適応策を考える上で、マングローブは重要な資源の一つとして注目されているが、分布域の急速な減少が問題となっている。モニタリングを通して分布域の変化を把握しておくことが重要であるが、生息域が潮間帯に位置するため、厳密な調査を広域に継続的に実施することの難しさが指摘されている。本研究では、広域を扱う点で衛星画像の特徴に注目し、既往研究で行われている分析方法を整理した上で、既存調査資料を参照の上で簡易に分布域を把握するための指標の提案と検証を進めた。検討の結果、提案した指標およびマングローブ分布域の土地被覆条件による再抽出法を用いることにより、田および畑とマングローブ分布域との分離が向上した。指標の汎用性と分離精度の向上について今後の課題は残されるが、分布域の推定精度向上に寄与することが確認された。

Key Words : climate change, adaptation, mangrove, monitoring, satellite image

1. はじめに

東南アジア地域には、下流部に広大なデルタ地帯を有するメコン川やチャオプラヤ川が存在する。これら河川下流部デルタ地帯の海岸線のうち、特に潮間帯上部にマングローブは生育しており、そこに生活する人々は豊富な土壌と水資源により、食料生産や経済活動の恩恵を受けている¹⁾。しかし、これらの地域では高潮や洪水による被害が多いことが知られており²⁾、地球温暖化に伴う海面上昇およびエビ養殖場等的人的開発行為によるマングローブの減少により、将来、更なる被害拡大が懸念される。住民の生産活動の場としての利用に加えて、自然災害に対する適応策策定の観点からも、マングローブは重要な樹林であり、分布域を広域かつ時系列で捉えておくことが重要である。

このような中、本研究では検討対象領域としてベトナム南部に位置するメコンデルタに注目した。メコンデルタ地域の標高は、その多くが3m以下の平坦な低地であ

る³⁾。高潮によって河川の塩水遡上が発生した際には、海岸線からの距離にして約50km、面積にして210haが塩水に汚染されたとの報告もある²⁾。このため、海面上昇に加え高潮が起こった際に、どの程度の影響があるのか、という点を把握するためには、氾濫解析のパラメータとして、防護壁の役割を果たすマングローブの分布域を考慮することも重要となる。加えて、マングローブの分布域は人間のアクセスが困難な場所も多く、頻繁かつ広域の調査を大規模に実施することが難しいとの指摘もある⁴⁾。

以上の背景を鑑み、本研究では、可視～熱赤外に及ぶ広い観測波長帯域を有し、全球を対象とした既存のマングローブ分布域の地図・データの縮尺・空間分解能と比較して高い空間分解能を有する点を考慮し(可視-近赤外:15m)、EOS-Terra/ASTERを分析のための衛星画像として採用した^{5),6)}。また、データ解析の方法としては、従来より植生域の分析に多用されている正規化植生指標(NDVI:Normalized Differential Vegetation Index, 以下、

NDVIと記述する)を対象とし⁴⁾、新たにマングローブ分布域の抽出効果を確認するとともに、NDVIを援用したバンド間演算による方法を工夫し、作業性と精度の点から効用について考察を進めた。

2. 研究の着目点

既存研究におけるマングローブ分布域の抽出では、LANDSAT/TMのバンド5(短波長赤外)を利用し、マングローブ林と陸域植生の区分を行った後に、マングローブの樹種の区分にバンド4(近赤外)、バンド5(短波長赤外)およびバンド7(短波長赤外)を用いることが有効であるとの報告がある^{4),7)}。また、短波長赤外の有効性に注目し、LANDSATより高空間分解能な衛星画像であるEOS-Terra/ASTERを用い、植物の活性度が高い地域をNDVIにより抽出し、可視～短波長赤外データの分布を検討した事例もある⁴⁾。結論として、緑が多い地域(NDVIが高い値を示す地域)では、①マングローブ分布域に比べて、農地のNDVIおよび可視～近赤外の衛星画像の値(DN:Digital Number, DN値と示す)は大きい、②マングローブ分布域は一般の植生と比較すると短波長赤外データのDN値が低い、以上が報告されている⁴⁾。このため、マングローブ分布域の抽出を試みる際には、短波長赤外データに注目することが有効である。

続いて、分布域抽出のための方法に注目する。衛星画像より土地被覆を分類する方法は、主成分分析、クラスタ法および教師付き最尤法が代表的であり⁸⁾、これらの方法を組み合わせたマングローブ分布域抽出の事例報告がある⁴⁾。事例では、まず、衛星画像分析に先立つマングローブに関する樹種分類図が無い場合を想定し、衛星画像分析を進めている。主成分分析による分析結果よりトレーニングエリアを再選定し、最尤法による分類処理を改めて行うことにより、マングローブ分布域とその樹種の区分が可能であるとの報告がある⁴⁾。一方、既存の樹種分類図がある場合には、主成分分析および最尤法といった統計分析を用いず、各波長帯のDN値を利用したレベルスライス法によりマングローブ分布域とその中の樹種区分ができるとの報告がある⁴⁾。

本研究では、全球を対象とした氾濫解析を行う際にマングローブ分布域を地理情報の1つとして使用することを想定している。既存のデータとして、全球マングローブアトラス(約1/400万)⁵⁾およびISCGM(地球地図)のLanduse(約1kmメッシュ)⁶⁾を入手した。これらのデータからは、マングローブの概略分布域を知ることができるものの、氾濫解析への援用という観点では、解像度の不足は否めない。このため、前述の樹種分類図は無いものの、概略の分布域は既存資料で把握することができる、

という観点に立ち、広域をなるべく簡易な方法で処理/解析することを目指し、バンド間演算法に注目することとした。このため、本研究で提案する方法は、土地被覆分類や樹種分類図援用によるレベルスライス法等、従前の方法を否定するものではなく、処理効率を考慮に入れた「マングローブ分布域」のみの推定方法を提案・検証するものである。

3. 対象領域および使用データ

図-1に対象領域を示す。メコンデルタはベトナム国南部に位置する大規模なデルタ地帯である。海岸から約100km内陸までの地域が標高3m以下であり、勾配が極めて緩い水平に近い状態にある地域である¹⁾。この地域では、2000年9月に大規模な水害が発生し、デルタの1/3近くが浸水し、犠牲者約500人が出たり、水が完全に引くまでに4カ月もかかった地域があるとの報告があり¹⁾。災害に対する適切な対策を講じて行くことが重要である。

研究で注目したマングローブ分布域を把握するために、本研究では表-1に示す衛星画像を準備した。全領域を同一観測日の画像で網羅することは難しい。図-1に接合した衛星画像の撮影範囲を記述した。デルタ陸域部(AREA1, AREA2)は2002年2月(乾期終期)、デルタ水域部(AREA3, AREA4)は2002年10月(乾期初期)、そして、主対象となる沿岸域(陸域-水域)(AREA5, AREA6, AREA7)は2004年12月(乾期)、以上の観測日における衛星画像を使用した。マングローブは、種によっては乾期に落葉するものもあるが、多くの種は常緑であるため、雲量が低く、沿岸域の被覆が良好に観測されている点を考慮し、12月の衛星画像を決定した。なお、選定したデータの補正レベルは3A01である。このため、本研究の成果は、衛星画像に含まれる地形の凹凸の影響が補正されているオルソ画像を

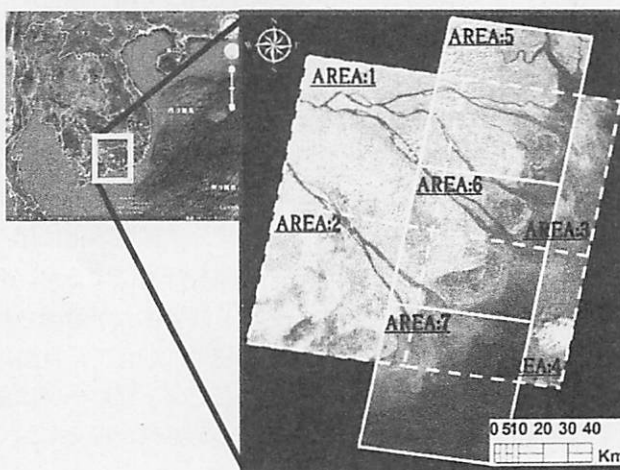


図-1 対象領域および使用データ
(「AREA」は接合した個々の衛星画像領域を示す)

表-1 使用した衛星画像一覧

AREA No.	観測日	データ利用範囲	補正レベル
1	2002. 2. 13	内陸部(陸域)	3A01
2	2002. 2. 13	内陸部(陸域)	3A01
3	2002. 10. 11	海部(水域)	3A01
4	2002. 10. 11	海部(水域)	3A01
5	2004. 12. 12	沿岸域(陸域-水域)	3A01
6	2004. 12. 12	沿岸域(陸域-水域)	3A01
7	2004. 12. 12	沿岸域(陸域-水域)	3A01

注) 3A01 : 地形歪を除いたオルソ画像まで補正された衛星画像

用いた結果となる。

4. NDVI援用によるマングローブ分布域の抽出

(1) NDVIによるマングローブ域の抽出

NDVI は式(1)で定義される指標であり、可視域(赤)および近赤外域を用いるレッドエッジの特性に着目した植生指標である。指標値が大きい程、植生の活性度や分布密度が高いということを示す。EOS-Terra/ASTER を用いた本研究では、可視域データとしてバンド2、近赤外域データとしてバンド3を使用した。図-2 および図-3 に対象領域内局所の検討結果を示す。図を対象とし、マングローブアトラスおよび高空間分解能画像を分布域判断の援用情報とし、指標値の分布を確認した結果、マングローブは $NDVI=0.35\sim0.50$ 、田は $NDVI=0.3\sim0.55$ 、畑は $NDVI=0.00\sim0.50$ であった。類似した値であり、かつ、値の分布が被覆間で重複するため、NDVI 単独利用による分布域の抽出は困難であることが確認できた。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad \dots \text{式(1)}$$

但し、NIRは近赤外バンド、Rは可視赤色バンド

(2) 短波長赤外データ援用による指標の提案

1) 短波長赤外データの利用検討

NDVIを用いた検討結果を踏まえ、短波長赤外データを用いた指標提案の準備として、マングローブ分布域のDN値分布特性の検証まで立ち戻ることとした。具体的に、田・畑およびマングローブ、各々の分布領域から5箇所ずつ3×3メッシュの範囲でDN値を抽出し、メッシュ内DN値の平均値を求めた。続いて、図-4に示すグラフを作成し、衛星画像の波長毎に分布を考察した。図より、マングローブ分布域のDN値は、近赤外域(ASTER: バンド3)で高い値を示すことが分かる。一方、NDVIのレッドエッジとして用いる可視域(赤)(ASTER: バンド2)では、マングローブ分布域、田および畑の値が比較的類似し、混在した状態にあることが確認できる。ここで、短波長赤外域(ASTER: バンド4以降)に注目すると、バンド5、バンド6およびバンド7では、田および畑のDN

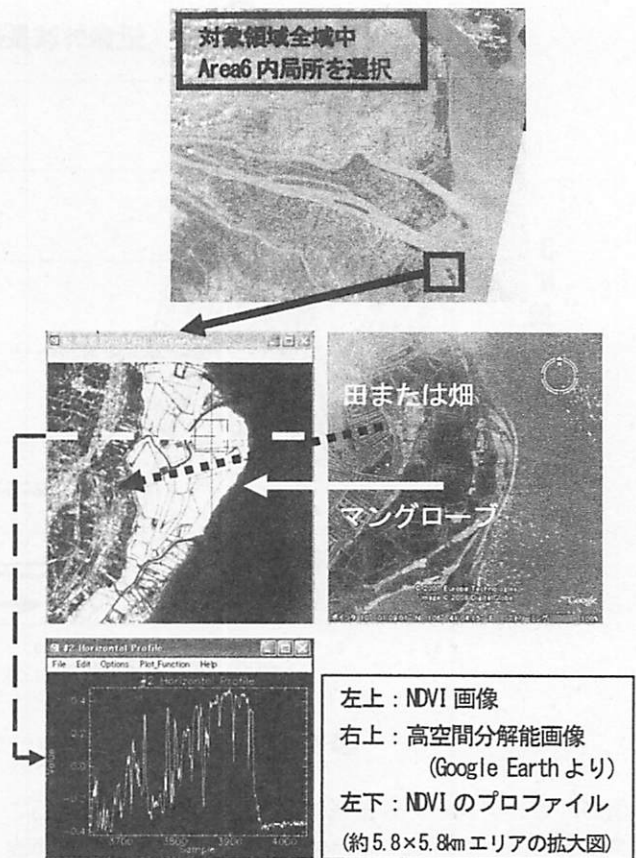


図-2 マングローブ・田の混在地域のNDVI画像(1)

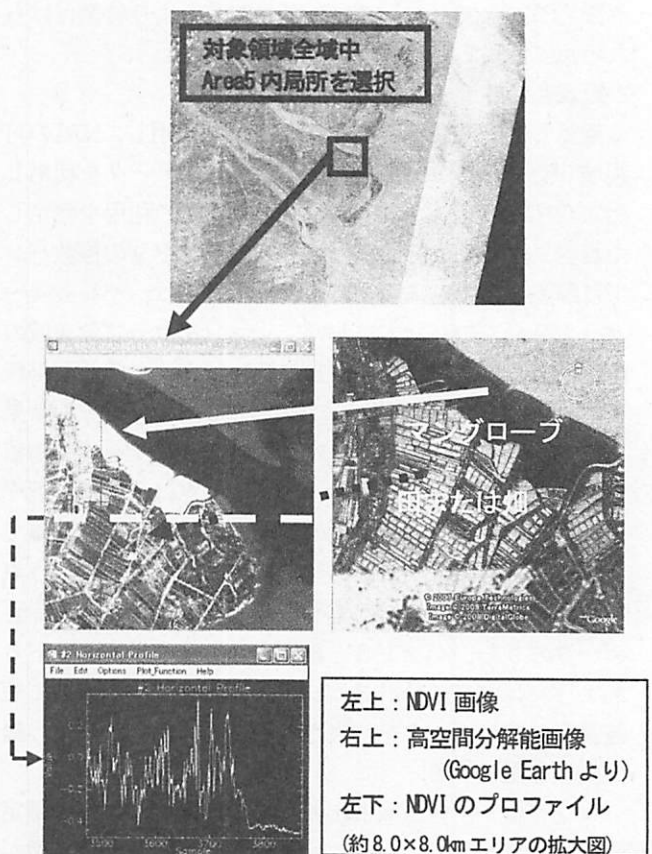


図-3 マングローブ・田の混在地域のNDVI画像(2)

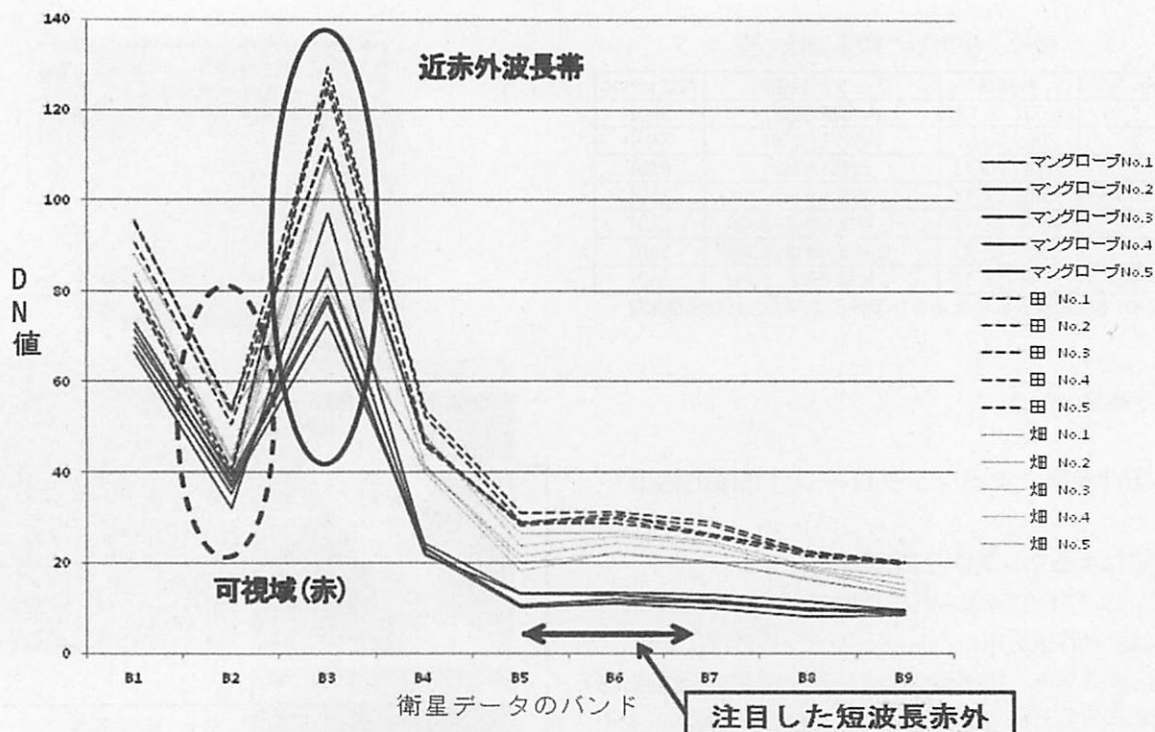


図-4 田、畑およびマングローブ分布域を対象としたDN値分布特性

値が、マングローブ分布域のDN値と明確に区別できることが判る。このため、画素毎に植生の分光特性を指標表現している式(1)のうち、植生による太陽光吸収の程度を意味づけるR(可視域(赤))を短波長赤外データで置き換えることで、マングローブ分布域をより特徴付けられる点に注目した。

2) 短波長赤外データ援用による指標

確認した短波長赤外データの特徴を援用し、NDVIの可視域(赤)データの替わりに短波長赤外データを利用した式(2)に示す演算式を作成した。ASTERの利用を想定した場合、短波長赤外は、バンド4～バンド9の複数バンドに跨る。この点について、既往研究では、バンド4～バンド9全てのバンドにおいて、マングローブ分布域のDN値は、田および畑と比較して低い傾向にあることが報告されている⁴⁾。本研究での検証においても同一の結果を得た。ここで、本研究では、短波長赤外データのDN値の最小値はバンド5で得られた。この点は、指標が近赤外波長と短波長赤外の2種のデータの和と差の比演算で計算されるものであるため、指標値の強調表現という点で重要となる。そこで、本研究では、複数の短波長赤外データのうち、バンド5と類似するDN値を示すバンド6およびバンド7の合計3バンドのDN値の平均をもって短波長赤外域のデータを代表させることにした。以下、提案指標と記述する。

マングローブ分布域抽出のための最適なバンドの選定やNDVIとの比較に関しては、対象地域毎に微妙に特徴が異なることも想定される。これらの点に関しては、同種

$$Cn = \frac{B3 - \overline{SWIR}}{B3 + \overline{SWIR}} \quad \dots \text{式(2)}$$

但し、B3: EOS-Terra/ASTERの近赤外波長(Band3)

$\overline{SWIR}$: 短波長赤外データの平均

$$\overline{SWIR} = \frac{1}{3} \sum_{n=5}^7 DNn \quad (n: \text{ASTER-バンド})$$

の検討を他地域に対して進め、多くの比較を通した厳密な議論と汎用性立証へ展開したく、今後の課題としたい。

3) 提案指標を用いた分類結果

提案指標による指標値画像を図-5(1)～図-5(3)に示す。図中のグラフは、画像内で赤い四角で囲まれている地域のメッシュ(9×9(pixel))範囲で指標値を取得し、等値を線で結びグラフとしたものである。マングローブ分布域、田および畑の土地被覆毎に5領域ずつ図を作成し指標値を集計した結果、マングローブの値の範囲は0.70～0.82となった。田の範囲は0.30～0.70、畑の範囲は0.45～0.70であった。NDVIを用いた検討では、3つの土地被覆間でNDVIの分布範囲が大きく重複したが、提案指標を用いた場合には、マングローブ分布域と田および畑との間で指標値の重複がほぼ見受けられなかった。これにより、提案指標を導入することでマングローブ分布域と、類似したDN値の分布特性を有する畑および田との分離が概ね可能であることが確認された。

(3) マングローブ分布域の調整

1) 水域の除去

提案指標によると、指標値が大きい値で表現されるマングローブだけでなく、海域、河川および内水湖沼を含めた水域の値も0.70以上となっていることが分かった。そこで、水域の区分に多用されている近赤外データを用い⁸⁾、閾値処理(本研究ではDN値=20を選定)により水域を除去することにした。閾値より低いDN値を示す領域を提案指標画像にオーバーレイ処理することにより、マングローブ分布域と水域を区分した。

2) マングローブ分布域の土地被覆状態への着目

本研究では、マングローブアトラスおよび高空間分解能画像をマングローブ分布域の事前情報とし、提案指標の値の閾値処理を通して分布域を推定した。試行検討の結果、提案指標値が0.7以上をマングローブと判断し、抽出を行ったが、畑の一部がマングローブ分布域として抽出される誤抽出も存在した。この点を調整するために、マングローブ分布域の土地被覆状態に着目した。

マングローブは塩分が高く、砂泥の通気性が低く、一般の陸上植物には適さない生育環境に分布しているという特徴がある⁹⁾。この状態にある被覆は、一般に潮間帯であり、マングローブの分布に加えて、土壌、水域が混在している状態と考えることができる。そこで、水分量の多寡および土壌特性の多寡、これらの状態を示す正規化水指標(NDWI: Normalized Differential Water Index 式(3))および正規化土壌指標(NDSI: Normalized Differential Soil Index 式(4))を利用し¹⁰⁾、植生(マングローブ)、水および土壌、三つの観点から分布域を絞り込むことを目指した。なお、NDWI および NDSI の両指標で用いる SWIR(短波長赤外)のデータは、EOS-Terra/ASTER の BAND4 を用いた¹⁰⁾。EOS-Terra/ASTER の BAND4 は、LANDSAT の短波長赤外データである BAND5 と観測波長帯が類似しており¹¹⁾、地表水分含有量の推定や水陸の境界の把握等に利用されている。

$$NDWI = \frac{R - SWIR}{R + SWIR} \quad \dots \text{式(3)}$$

$$NDSI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad \dots \text{式(4)}$$

但し、R: 可視(赤), NIR: 近赤外, SWIR: 短波長赤外(BAND4)

3) 土地被覆状態の特性を用いた分類

マングローブアトラスおよび高空間分解能画像をマングローブ分布域の事前情報とし、分布域に該当する領域のNDVI, NDWIおよびNDSIの断面プロファイルを複数作成した。紙面の関係上、全てを掲載することはできないた

め、代表例を図-6に示す。作成した全てのグラフを確認した結果、マングローブ分布域では、NDVI>NDWIの関係が代表的であった。さらに、マングローブが潮間帯に存在すると考えられることから、NDWIは0.15以上の高い値を示した。また、NDSIはマングローブ分布域において多くが-0.5以下の小さな値を示した。これは、潮間帯の多くがマングローブに覆われているため、土壌の特性が地上表面に現れにくいことによると考えられる。以上の特性を対象エリアの区分に取り入れた。結果のうち、一部領域の拡大図を図-7に示す。左から順に、マングローブ分布域(提案指標のみ使用)、マングローブ分布域(被覆特性を用いた再抽出後)、高解像度画像となる。なお、

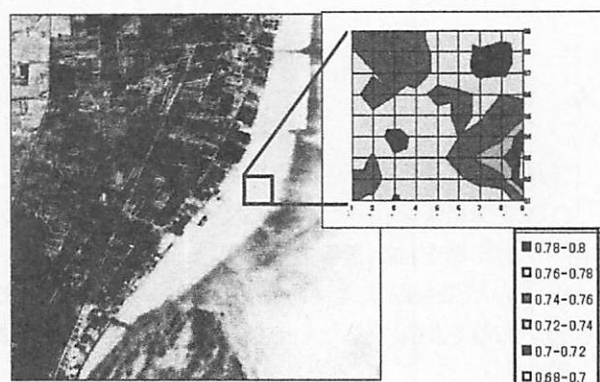


図-5(1) マングローブ域における指標値の分布特性(約1.6×1.6km)

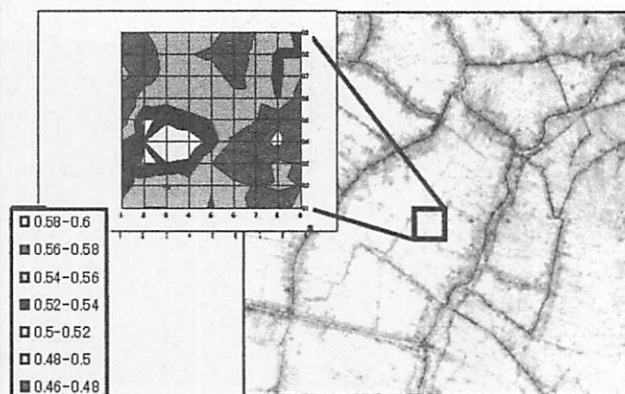


図-5(2) 田における指標値の分布特性(約1.6×1.6km)

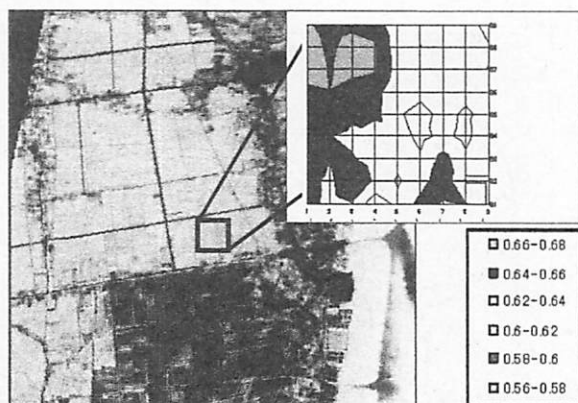


図-5(3) 畑における指標値の分布特性(約1.6×1.6km)

図-7において、黒色で表示された領域が再抽出処理前後のマングローブ分布域であり、灰色および白色で表現された領域は分布域以外の領域(田・畑・宅地・水域)となる。画像より、陸域の内部に存在していた細かく点状に分布しているマングローブ誤抽出域が減少していることが確認できる。

この点を定量的に確認するために、再抽出処理前後におけるマングローブ分布域の画素数をカウントした。再抽出処理前にはマングローブ分布域が36386(pixel)であったものが、再抽出処理後には23115(pixel)となっていた。再抽出処理後を基準とすると、主として陸域の田および畑に該当する36.5(%)の画素が補正されたことが分かった。

5. まとめ

本研究の成果は以下の2点である。

①植生分析で多用されているNDVIを対象とし、マングローブ分布域を抽出する上での課題を確認した。

②①の結果を踏まえ、既存調査資料を参照の上で簡易に分布域を把握するための指標を提案し、検証を進

めた。結果、提案指標を用いた場合、マングローブ分布域と田および畑の間で、NDVIと比較すると指標値の分離性が向上したことが確認された。概ね、良好な区分結果が得られたが、水域、田および畑に誤抽出される領域があることは否めない。この点について、既存調査資料および高解像度画像で明らかにマングローブ分布域である地点を対象とし、「植生(マングローブ)・水・土壌」の各指標の特徴を確認し、再抽出する方法を提案した。

本研究で提案した方法は、マングローブ種の区分は対象とせず、既存調査資料を援用情報とし、広領域を簡易に区分することを念頭に置いたものである。指標値の閾値処理によってマングローブ分布域を抽出するため、閾値そのものは対象とする領域に依存する。提案の要点は、田および畑との分離性の良い指標の提案と、再抽出のプロセスにある。

マングローブ分布域の高精度な抽出について、衛星画像以外の情報を積極的に取り入れ、分布域抽出の精度を向上させてゆく点は重要と考えている。今後、衛星画像観測時間と合わせた潮位補正を行い、地形特性の点から抽出精度の向上に取り組むことを考えている。

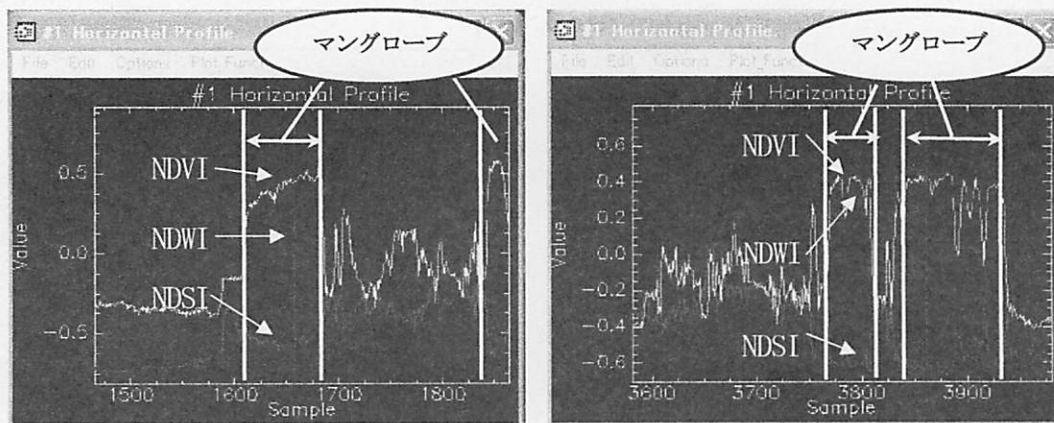


図-6 マングローブ分布域近傍でのNDVI/NDWI/NDSIの特徴

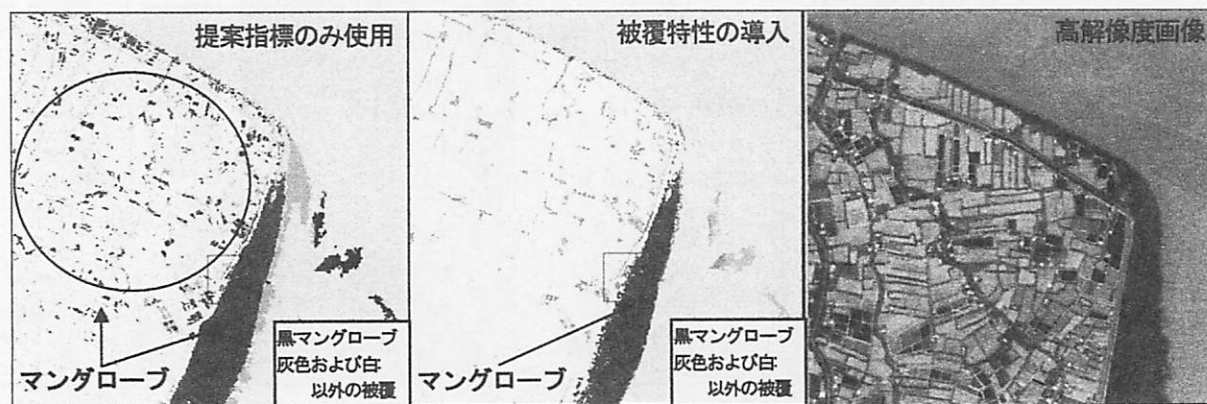


図-7 マングローブ分布域の再抽出結果の比較(一部領域5.6×5.6kmの拡大)

謝辞：本研究は文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラムのプロジェクトの一環で実施されたものである。また、本研究は、科学技術振興調整費(戦略的拠点育成)事業のフラッグシッププロジェクト(茨城大学担当分である持続可能な温暖化対策研究)の一環として行われたものである。記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 海津正倫・平井幸弘 編：海面上昇とアジアの海岸，古今書院，pp. 35-50, 2001.
- 2) 香川広海：ベトナム領メコン・デルタ開発の現状とその影響，現代社会文化研究，No. 26, pp149, 2003.
- 3) 谷塚直樹：多時期 ASTER 画像による土地被覆分類，2004 年度プロジェクト研究成果報告書
- 4) 財団法人 資源環境観測解析センター：資源・環境リモートセンシング実用シリーズ⑤ 地球観測データの利用 (2)，pp. 53-67, 2005.
- 5) Mark Spalding, Francois Blasco, Colin Field: World MANGROVE ATLAS, p. 178, 1997.

- 6) ISOGM: Global Map Version 1.3 Specifications, p. 57, 2007.
- 7) Kotera, Y., M. Ochi, M. Hato: Generation of seismic base mapping using satellite images in the southern deltaic area, people's republic of Bangladesh, Proceedings of the 18th Asian Conference on Remote Sensing, 1997.
- 8) 大林成行編著：実務者のためのリモートセンシング，株式会社フジ・テクノシステム，p. 346, 1995.
- 9) 指田朝久：インド洋津波被害とマングローブ，環境管理，vol142, No. 9, 2006.
- 10) 伊東明彦・石山隆・西尾文彦・阿布都沙拉木加拉力丁：タクラマカン沙漠北縁のオアシス周辺における塩類化土壌分布の評価 (3)，(社)日本リモートセンシング学会第43回年次学術講演会講演論文集，pp. 211-212, 2007.
- 11) 財団法人 資源環境観測解析センター：宇宙からの地球観測，p. 275, 2001.

(2009.3.6 受付)

(2009.6.3 受理)

Research for Estimation Method of Mangrove Area on Mekong Delta

Yuji KUWAHARA¹, Hiroyuki FUJIWARA², Hiromune YOKOKI³, Jinyoung KIM⁴,
Akihiko ITO⁵, Takekazu KOYANAGI¹ and Nobuo MIMURA³

¹Dept. of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University

²Geographical Survey Institute of Japan

³Center for Water Environment Studies, Ibaraki University

⁴Institute for Global Change Adaptation Science, Ibaraki University

⁵Space Engineering Development Co., Ltd.

The objective of this study is to propose the estimation method of mangrove area on Mekong delta. Global warming and sea-level rise are projected to affect seriously on low-land area. Therefore, recently, the mangrove forest is important to decrease the damage which is received from storm surge and sea-level rise. However, because of the mangrove forest distribution area decreases, it is thought that the monitoring becomes important to confirm the area. Then, we proposed that the estimation method of mangrove area that was able to analyze the large area simply by using satellite image. It was found that the accuracy of mangrove area division is good by using the short wavelength infrared. Additionally, if the condition for the mangrove growth was arranged, and classified again, it was found that the accuracy goes up.