

論文の内容の要旨

論文題目 衛星リモートセンシングによるアジアの湿原と水田分布図の作成に関する研究 Mapping of wetland and paddy field in Asia by satellite remote sensing

氏名 竹内 渉

湿原は、野鳥など多様な生物の生息域としてラムサール条約や生物多様性条約においてその環境保護の必要性がうたわれている。また、水田は、世界の総面積のおよそ 90%がアジアに分布するとされており、数十億人の食料源である米の生産場所として重要な地位を占めている。畑作に比べて高い生産性、持続可能性などの利点を持つ食料源としての水田は、これから抱える人口増加問題や水問題においてその重要性を増すと考えられる。さらに近年は、地球温暖化ガスの一つであるメタンの主要な発生源としてもその重要性が指摘されはじめた。現在、全地球レベルでの自然湿原および水田を含んだ広い意味での湿地の面積は、およそ $5.7 \times 10^6 \text{km}^2$ と推定されているが、湿地域での環境変動が激しく、どのような湿地がどこに分布しているのか、また、その湿地環境がどのように変動しているのか、正確な情報は極めて少ない。個々の湿地の環境特性にせよ精度の高い情報を収集し、世界に向けて発信していくことは、生物多様性の視点からも地球温暖化対策の視点からも緊急の課題であり、その意義は大きい。その基礎には定量的な湿地分布の把握がなくてはならない。時間的空間的に広い範囲の湿地観測の必要性が高まる中、急速に発展している人工衛星を利用したリモートセンシングによる観測を利用することが注目されている。衛星観測は、従来の地上での直接観測と精度や空間および時間分解能などの面で、必ずしも同等の性能を有するわけではないが、広範囲を定期的・継続的・均一的に観測できる特徴を有している。

本研究では、これまで衛星観測の適用が限られてきた湿地および水田の分布図作成について、可視・赤外のリモートセンシングを利用することにより、世界最大の泥炭湿原である西シベリア湿原と、世界最大の稲作地帯である東南アジアおよび東アジアに適用する研究を行った。本研究の特徴は、次のようにまとめることができる。

- 広域の湿地分布図を作成できるように、空間分解能は比較的低い観測範囲が広く、観測頻度の高い MODIS センサを使用した。
- これまでよく使用されてきた NOAA AVHRR シリーズと比べて、放射量補正・大気補正・幾何補正・合成画像作成といった前処理の精度を格段に向上させた。
- データフュージョンによる空間的な高精度化、水分状態に敏感な中間赤外チャンネルの使用、地表面温度推定精度の向上を行った。
- 継続的に利用でき実現性のある手法とするために、陸域観測衛星 Terra で利用されている MODIS センサおよび ASTER のデータを使用した。MODIS はこれまで 4 年間観測を続けており、さらに次世代極軌道衛星観測計画 (NPOESS) のもと後継機が計画中である。
- 作成した分布図の実利用を促進するために、衛星データの直接受信局と連動した処理システムを構築すると共に、Web 上での衛星データ処理および公開システムを実装した。

まず、新たに MODIS と ASTER を利用した湿地水田分布図作成手法の開発を行った。データ取得頻度の観点から湿地・水田観測への MODIS データの必要性を論じ、空間分解能の高精度化を行うためにミクセル分解手法を使用し、MODIS と ASTER データを用いて植生・土壌・水という最も簡潔なモデルに基づいてこれを適用した。その結果、対応するチャンネルにおける線形性は高く、どのカテゴリにおける誤差率も、従来の AVHRR と TM の組み合わせよりも格段に向上した。次に、可視・近赤外・中間赤外(1.6 um)での土壌・水のスペクトル特性を利用した正規化土壌指数(NDSI)と正規化水指数(NSWI)を提案し特性解析を行った。その結果、NDX が正の値を持てば、それぞれを地表面における植生、土壌、水の存在と関連づけることができることが明らかとなった。次に、代表的な光学センサである AVHRR/3, MODIS, ASTER, ETM の応答関数を用いて、NDX の違いによる感度特性解析を行った。その結果、NDX を正の値に持つ有意な各カテゴリにおいて、センサの違いが及ぼす影響は小さく、汎用的に利用できる指数であることが確認できた。最後に、MODIS と ASTER の可視近赤外データを用いてスペクトル分解を行い、スペクトルライブラリと組み合わせて、熱赤外チャンネルの放射率補正を行った。あらかじめ離散化した LUT を作成し、放射伝達モデルの係数算出の効率化を図った上で、split-window 法を用いて地表面温度を推定した。作成した地表面温度図を MODIS LST プロダクトと比較したところ、推定精度は 1 度以内であった。

新しく導入した MODIS と ASTER データの処理手法についても検討を行った。まず、MODIS データの放射量補正と幾何補正を行い、250m 以内の精度を確保した。次に、MODIS の可視近赤外 7 チャンネルについて、6S コードを用いた放射伝達シミュレーションを行い、雲に起因する影を選択しないように検討を加えた結果、輝度温度(チャンネル 31)に拘束条件を持たせた輝度温度拘束条件付き最小青チャンネル法(MinBMaxT)を提案した。AVHRR において実績のある、最大 NDVI 法(MaxN), 最大輝度温度法(MaxT), 最小青チャンネル法(MinB), MinBMaxT の 4 つの手法を用いて実際の MODIS データに適用し、雲の除去具合、衛星天頂角、画像の滑らかさ、雪氷と雲の識別、雲の陰の 5 点について検討を加えた。その結果、提案する MinBMaxT 法は、すべての評価について良好な結果を与えた。最後に、HDF-EOS フォーマットで提供されている ASTER のレベル 1b データを対象に、UTM 座標系から等緯度経度座標系に座標変換し、行政区界・海岸線境界ベクトルデータと重ね合わせて精度検証を行った結果、MODIS と自動的に重ね合わせる精度を確保できた。

新たに開発した手法と衛星データを基に、現地調査の結果を参考にしながら湿地と水田分布図の作成を行った。西シベリア湿原においては、現地調査を通じて得た湿地生態系の位置情報を基に、アカマツ、シラカバ、ボグ、パルサ、水域、裸地の 6 つのカテゴリに土地被覆分類を行った。その結果、直径 20m 程度から大きいもので数 km の大小様々な池が分布し、池の周囲にはパルサおよび湿原が非常に複雑に入り組んだ地形をなしており、高空間分解能データによる分類の有効性を確認することができた。また、湿原を流れる河川沿いにはアカマツによる針葉樹林帯が卓越しており、所々にシラカバ林が混ざっていることが分かった。次に、ASTER の分類結果を基に MODIS データに線形ミクセルモデルを適用し、各カテゴリの面積比率を推定した。最後に、対応領域における最小二乗誤差を算出することによりモデルの精度検証を行った。その結果、どのカテゴリにおいても許容できる範囲の精度を確保することができた。MODIS の中間赤外チャンネル 6 は湿地の分類に有効に働き、湿原植生の活性度が最も高くなる時期のデータを使用することにより、湿地の植生分類が可能であることがわかった。また、現地調査を行ったとしても空間的な位置情報は十分得られているとは言い難く、適切な分類カテゴリの選択や分類手法

の採用が大切であることが示唆された。

水田については、単期作と多季作の観点から、東アジアと東南アジアに分けて分布図作成を行った。日本、韓国、北朝鮮を含む東アジアは、およそ一ヶ月程度の耕作時期の違いがあるものの、ほぼ同一期作を営んでおり、山間部を含んだ入り組んだ地形にまで水田景観をなしていることから、空間分解能が 250m と最も高いチャンネル 1, 2, NDVI のみ用いた水田分布図作成を行った。まず、15 日間 MODIS 合成画像を用いて評価基準画像を作成し、季節変動を失わないようにデータ圧縮を行った。これに、ASTER データから作成した水田分布図を教師として、水田とそれ以外のカテゴリについて、クラス平均および分散を用いた判別距離を定義し、MODIS データから作成した評価基準画像のそれぞれについて判別距離を算出した。その結果、個別のチャンネルを用いるよりも、NDVI を用いた方が判別率が高いことが明らかとなった。次に、判別率の高さに従って重み付けをした NDVI 画像を作成し、カテゴリ分解を行うことにより水田の分布図を作成した。MODIS データから作成した水田分布画像を、ASTER データから作成した水田分布画像を用いて検証した結果、5 つの評価地域における MODIS による推定値はいずれも ASTER に比較して小さい値になり、二乗平均誤差は 15.3%であった。最後に、作成した水田分布画像を、現在大陸レベルで唯一入手可能な IGBP-DIS データと国際稲研究所 (IRRI) が公表している国別統計データとの比較を行った。その結果、MODIS を用いて作成した水田分布画像から求めた水田面積は、IRRI が公表している値と矛盾しない結果を得た。

東南アジアは、カンボジア、ラオス、ミャンマー、タイ、ベトナムを含む水田分布図を作成した。雨季の洪水を利用した天水による稲作が、大河川の沖積平野や河口部のデルタ地域で大規模に行われており、一部の地域では東アジアと同じように灌漑稲作が行われていることから、水田分布図の作成には年間を通じて取得した合成画像データを作成した。次に、東アジアの解析結果から、チャンネルの値をそのまま用いるよりも、正規化した値を用いた方が大気効果を抑制することができることが明らかとなったため、MODIS データから正規化植生・土壌・水指数と地表面温度を作成した。これらの画像から評価基準画像を作成し、季節変動を失わないようにデータ圧縮を行った。次に、乾期については ASTER データから作成した水田分布図を教師データとして作成し、雨季については現地調査により取得した水田の緯度経度情報を用いて教師データを作成し、評価基準画像を使用して水田の一期作と二期作を区別した分布図を求め、湛水時期と稲の生長度合いの年間変動を空間的に求めた。最後に、作成した水田分布画像を、IGBP-DIS データと IRRI が公表している国別統計データとの比較を行った結果、MODIS を用いて作成した水田分布画像から求めた水田面積は、従来の AVHRR を使用して求めた推定値よりも格段に精度が向上した。

これまで難しいとされてきた湿地や水田の分布図作成を、高頻度広範囲観測データを利用することにより実現した。可視赤外データの欠点である雲をはじめとしたノイズや幾何補正誤差は、大気補正、放射量補正、幾何補正、合成画像作成手法といった前処理手法の開発により改善された。また、時間分解能と引き替えに失われる空間分解能の粗さを克服し、湛水状態に着目した時系列変動を定量化することで、分布図作成手法を確立することができた。今後の観測の継続性を考えると、MODIS やそれに続く次世代環境観測衛星シリーズである NPOESS の VIIRS センサによる湿地水田分類図の提供および提案手法の評価はもちろんのこと、入手可能になるであろうマイクロ波による全天候型観測も視野に入れた長期的な展望が必要である。