

# 植生指数の時間周波数応答解析による 水稲圃場抽出に関する研究

畑中勝守\*・鈴木充夫\*・金田憲和\*\*

(平成 22 年 11 月 17 日受付/平成 23 年 1 月 21 日受理)

要約：本研究では、衛星リモートセンシングより得られる正規化植生指数 (NDVI) を時系列に整備し、NDVI 波形を一次元離散ウェーブレット変換により時間周波数応答解析し、ウェーブレットパワーをはじめとする各種パラメータを用いた線形判別関数を導出することで、土地利用分類を自動的に行うための手法を提案する。特に、水稲の生育状況変化に対応した波形特徴を抽出し、水稲作付面積を自動的に推定する手法を提案する。解析対象地域は、ベトナム南部メコンデルタ地域とする。本論では、SPOT 衛星により取得された 1998 年 6 月から 4 年間の時系列 NDVI データを用いて行った解析結果について報告する。検討結果から、提案手法による水稲圃場分類は 1 年間程度の時系列 NDVI データで実施可能であることが示されるなどの成果が得られたが、比較のための現地データが不在であることから、提案手法の精度検証が課題として残った。

キーワード：正規化植生指数、水稲圃場分類、離散ウェーブレット変換、線形判別関数

## 1. はじめに

近年、ベトナムは急激な経済成長を遂げているものの、世界第 2 位のコメ輸出国であり、GSO (General Statistics Office of Vietnam) のデータ<sup>1)</sup>によれば、労働人口のおよそ 5 割が農業従事者であり全人口の 7 割は農村部に居住するとされるなど、依然として農業は重要な産業と位置づけられている。ベトナム政府は、急激なコメ輸出増加が国内市場における米価の高騰を招いたという反省から、コメ輸出量の上限を規制するなどの政策を実施しているが、輸出量上限値の決定には生産量の推定が必要であり、生産量の推定には詳細なコメ作付面積の把握が不可欠である。しかし、ベトナム最大のコメ生産地である南部メコンデルタ地域では、水稲 1 期作、2 期作、3 期作が混在して実施されており、洪水や水不足などの自然条件のみならず、時には労働力不足など農家の一時的な都合により比較的頻繁に作付け回数が変化し、精緻なコメ生産量予測が困難であるとされている。また、南部メコンデルタ地域の農地面積はおよそ 380 万 ha<sup>1)</sup> と広大であり、現地調査をくまなく実施するには限界があり、精緻なコメ生産量の推定を阻む要因の一つとなっている。また、筆者らが 2009 年 12 月に行った現地での聞き取り調査によれば、現地では衛星リモートセンシングや地理情報システム (GIS) を利用した土地利用マップ作成などの技術導入が進んでいるものの、水稲 1 期作、2 期作、3 期作を特定し作付面積を定量把握することはいまだ困難であることが分かり、これらを克服する技術支援の必要性が高いことが分かった。

従来、人工衛星データを利用した水稲作付面積の推定技術開発は、衛星リモートセンシング分野において非常に盛んに行われており、数多くの研究成果が報告されている。正規化植生指数 (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index) は、人工衛星に搭載されたセンサの多バンドデータから求められる植生の活性度を表す指標であり、圃場分類をはじめとする農業リモートセンシングに広く利用されている。その際、低解像度衛星データには水稲以外の植生情報が混在しており判別が困難になるなどの理由から、NDVI を用いた水稲圃場分類では高解像度の衛星データを利用することが多い。しかし、解像度が高くなるにつれ処理にかかわるコストが増大するなど、高解像度データの利用には問題が残る。また、前述のように、水稲の作付期が頻繁に変化する地域にて土地利用分する場合には、時期ごとに繰り返し衛星データ解析と分類を行わなければならない。このため、高解像度の衛星データを多数入手し解析することは、コスト・技術力の観点から一般的には困難である。一方、解像度は低いものの無料で頻繁にデータ取得が可能な人工衛星 (NOAA, MODIS など) によるリモートセンシングも早くから研究が行われている。これら衛星を利用するメリットは、費用が極めて低額であることと、同一地域の情報を 1 日に数回取得することが可能な点である。すなわち、これらの衛星利用の最大の利点は、時間解像度が数時間と細密であり、高解像度人工衛星では整備できないほどの多量な時系列情報を整備できることである。そこで本研究では、時間解像度が極めて高い低コスト・低解像度の人工衛星リモートセンシングデータを活用し、水

\* 東京農業大学国際食料情報学部国際バイオビジネス学科

\*\* 東京農業大学国際食料情報学部食料環境経済学科

稲圃場を抽出するための手法を検討する。

本研究が提案する手法の根幹は、時系列 NDVI データの波形特徴抽出にある。例えば、空間解像度が 1 キロメートル程度の衛星データには、水稻圃場やその他の土地利用が混在していることが多い。このため、NDVI は水稻以外の植生に強く影響されることがあり、水稻圃場が含まれているかどうかの判断が困難な場合が多い。しかし、NDVI の時間変化に着目すると、対象地域に水稻圃場が含まれていれば、水稻の生育状況に対応した変化が現れる。このように、空間的な情報では判別しにくいデータであっても、時間解像度が向上することで判別が可能となることが予想される。この利点に着目し、比較的低解像度の衛星データを多時期に取得し、NDVI の季節変化に着目した水稻圃場抽出の研究<sup>2,3)</sup>も行われており、近年の衛星リモートセンシング研究のトレンドとなっている。また、SAKAMOTO らは、離散ウェーブレット変換をもとにしたフィルター手法を利用し、時系列植生指数の平滑化を行うことで波形変化と水稻生育ステージを照合し水稻圃場を抽出する手法を提案している<sup>4)</sup>。しかし、これらの研究では、NDVI の波形変化を分類結果の説明あるいは確認として利用しようとするものが多く、波形特徴を積極的に抽出し自動分類しようとする研究は少ない。一方、本研究は、NDVI データを時間方向に細密に整備し、その波形特徴を時間周波数応答解析にて抽出することで水稻圃場が含まれているか否かを判別する手法であることが特徴である。

一般に、時系列波形データの特徴抽出では、スペクトル解析による周波数応答解析が用いられる。スペクトル解析では、特定の周波数におけるパワー・スペクトルを比較することにより解析波形のエネルギー分布特性を知り特徴抽出する。このため、明らかに周波数応答特性が他より卓越する物理情報を抽出するには都合が良いが、多数の情報が混在するような波形では必ずしも特徴的な波形エネルギー分布が得られないことがある。一方、画像解析の分野などで広く利用されている離散ウェーブレット変換は、スペクトル解析と並んで多方面の周波数応答解析に利用されている手法である<sup>5)</sup>。離散ウェーブレット変換は、時間方向の成分を保持する特徴を有しているため、周波数レベルごとに波形エネルギーの時間変化を比較することができ、実現象の時間変化に対応した波形特徴を容易に捉えることができる。この特徴を利用すれば、低空間解像度の衛星データに水稻と他の植生が混在していたとしても、対象とする周波数レベルにおける波形エネルギーの時間変化から水稻圃場が含まれているか否かを判断することが可能になると期待できる。以上の理由から、本研究では時系列 NDVI データの波形特徴抽出に離散ウェーブレット変換を用いることとする。以下、本論では、提案する手法の分類アルゴリズムについてその基礎理論を示すとともに、低解像度衛星を擬した 1 km メッシュの時系列 NDVI データを使用し、ベトナム南部メコンデルタ地域における水稻 1 期作、2 期作、3 期作圃場を分類した結果について議論する。

## 2. 時系列 NDVI データの概要

解析検討にあたり、時系列 NDVI データを整備する必要がある。しかし、筆者らのように、人工衛星リモートセンシングの専門家ではない研究者が独自に NDVI データを整備することは極めて困難である。一方、現在、東京情報大学では、文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業において、東アジア地域における MODIS 衛星の自動データ解析に関する研究が進められており<sup>6)</sup>、衛星リモートセンシングの専門家以外にも衛星データ利用を可能とするための研究が進められている。また、人工衛星のデータ解析を行う企業では、MODIS のみならず各種の衛星データを自動解析し低価格にて販売するシステムを開発する技術開発が進められており、近い将来、本研究が必要とするような時系列 NDVI データの入手が可能となる。そこで本研究では、遠からず利用が可能になると予想される低解像度時系列 NDVI データを擬した 1 km メッシュの NDVI データを用いた解析検討を進めることとした。

本研究の解析対象データとして、ベトナム南部メコン川下流域のうち、北緯 9 度 42 分～10 度 7 分、東経 104 度 47 分～106 度 11 分のおよそ 200 km×200 km の矩形領域を 1 km メッシュに分割し、地球観測衛星 SPOT により得られた NDVI 値を研究協力企業に依頼して整備した。なお、使用した SPOT データは 20 m の空間解像度であったが、本研究では 1 km メッシュでの解析を検討するため、メッシュ内で平滑化し NDVI 値とした。観測点（メッシュ）総数は 45,570 点であり、観測点ごとに NDVI 値を 10 日平均し不足するデータは過去のデータから補完するなどして、すべての観測点にて 1998 年 6 月から 4 年分のデータを準備した。なお、これらのうち 155 点の観測点における植生が現地調査（GT: Ground Truth）により得られており、既知観測点ごとに時系列 NDVI の時間周波数解析を行い、解析結果から植生ごとの波形特徴を分類し、得られた特徴を使用して残る 45,415 点の植生を推定することとした。

図 1 は、GT により植生が明らかな地点の中から水稻 1 期作 (R1)、2 期作 (R2)、畑作 (F) を無作為に選び、時系列に描画したグラフである。なお、整備した NDVI 値は、-1 をゼロとし、8 ビット (256 階調) に基準化されたものである。図 1 のとおり、水稻 (R1 と R2) には 1 年に 1 度あるいは 2 度の NDVI 値のピークを示す波形がみられ、水稻作付カレンダーと整合する植生活性変化が観測できる。また、畑作 (F) は細かな変動がみられるものの、水稻と比較するとその変化の周期は明らかに短く、低周波数（長周期）領域の波形エネルギーが極めて小さい。したがって、低周波数領域の波形エネルギーの違いにより、水稻圃場が含まれた区域の NDVI 変化であるかどうか判別できることが分かる。そこで、それぞれの波形における周波数応答特性を確認するため、高速フーリエ変換によるスペクトル解析を実施した。図 2 は図 1 のデータに加え、水稻 3 期作 (R3) のデータを無作為に 1 点選び、それぞれのパワー・スペクトル (PS) を描画したものである。データのサンプリング周期は 10 日間であり、これをもとに PS が卓越す

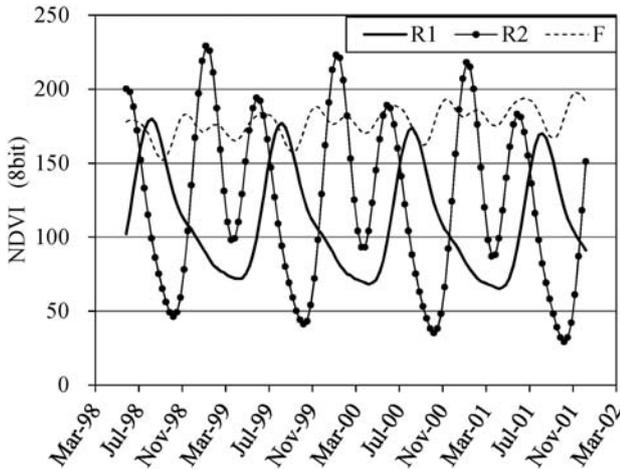


図 1 解析に使用した時系列 NDVI データの例

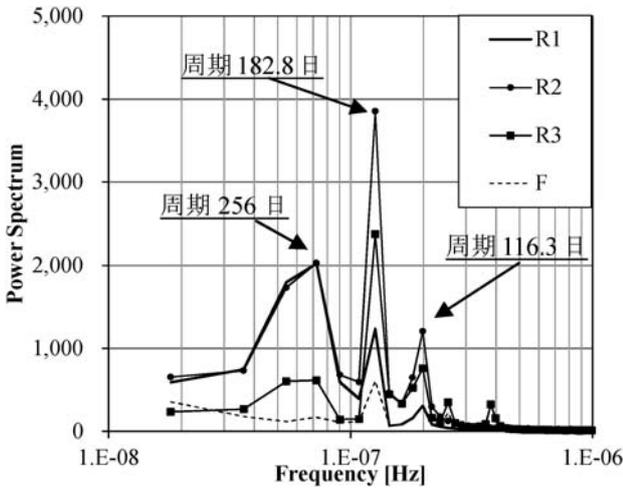


図 2 時系列 NDVI のスペクトル解析例

る周期を求めると、水稲圃場 (R1, R2, R3) はいずれも周期 183 日程度の PS が高く、畑作 (F) の PS は水稲に比べて小さいことが確認できる。また、水稲圃場は 116~256 日周期においても PS のピークがみられるなどの特徴を有している。したがって、110 日程度よりも長周期 (低周波数) の領域において波形特徴を抽出することで、水稲圃場か否かの判断が可能であると考えられる。なお、GT には森林、エビ養殖池、塩田なども含まれているが、本研究の目的は水稲圃場分類であるため、これらは分類の対象から除外した。

### 3. 離散ウェーブレット解析

本研究では、1 次元離散ウェーブレット変換 (DWT : Discrete Wavelet Transform) にて時系列 NDVI データの時間周波数応答解析を行う。DWT の特徴は、周波数のレベルごとに時系列にウェーブレット係数を求めることができる点にある。このため、ウェーブレット係数の変化と実データの変化を対応付けて考察することができ、波形特徴の抽出がスペクトル解析よりも容易になると期待できる。

DWT とその逆変換の定義式は次のように表される<sup>7)</sup>。

$$(W_{\psi}f)\left(\frac{k}{2^j}, \frac{l}{2^j}\right) = c_{j,k} \tag{1}$$

$$= \sqrt{2^j} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(2^j x - k) f(x) dx$$

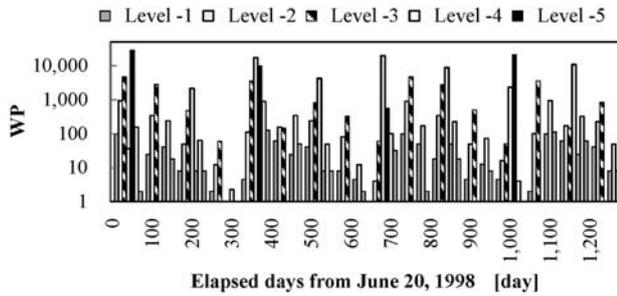
$$f(x) \approx \sum_j \sum_k c_k^j \Psi(2^j x - k) \tag{2}$$

ここに、 $W_{\psi}$  は観測値  $f(x)$  のウェーブレット変換を表し、ウェーブレット変換に 2 進移動 (dyadic translation)  $k2^{-j}$  と 2 進ダイレーション (binary dilation)  $2^{-j}$  を使用することで DWT が構成されると定義される。このとき  $c_j$  は観測値  $f$  の DWT と呼ばれ、 $\Psi$  はウェーブレット関数、 $\tilde{\Psi}$  は  $\Psi$  の複素共役である。なお、添え字の  $j$  は DWT におけるレベルを、 $k$  は観測データの並び順を表し、それぞれ周波数方向と時間方向に対応する。DWT では 2 進ダイレーションにより  $j$  が増えると、計算されるウェーブレット係数が  $2^{-j}$  と減っていくため、慣例的にレベル  $j$  を負数で表示する。例えば、本論では、使用する 10 日平均、4 年分の時系列 NDVI を一つの地点で 128 個 (=  $2^7$ , 1,280 日に相当) ずつとした。このため、DWT で計算される周波数レベルは  $-1 \sim -7$  の 7 段階に分けられることになる。

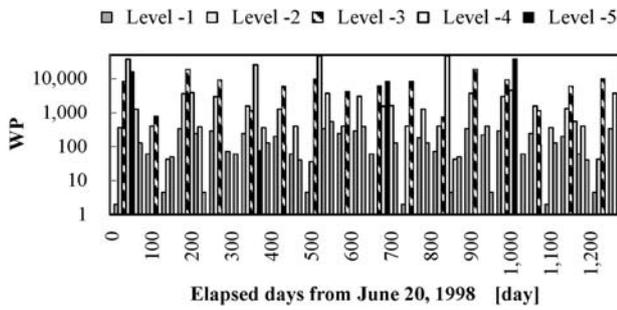
DWT では、トウスケール関係を満足しコンパクトサポートを持つマザーウェーブレットとスケーリング関数の組み合わせが種々提案されている<sup>7)</sup>。DAUBECHIES は自然数  $N$  によって番号付けられた一連のマザーウェーブレットとスケーリング関数の組を提案している<sup>8)</sup>。本研究では、 $N=1 \sim 3$  の関数の組を用いて解析を行ったが、どの組み合わせのものを使用しても解析結果に大きな差異がみられなかったことから、最も単純な  $N=1$  の関数の組み合わせを用いた。なお、DAUBECHIES の提案した  $N=1$  のマザーウェーブレットは、HARR のマザーウェーブレットと等価である<sup>9)</sup>。

HAAR のマザーウェーブレットとスケーリング関数により計算されたウェーブレット係数の例として、図 1 および 2 に示した水稲 1 期作、2 期作と畑作のウェーブレットパワー (WP : Wavelet Power, ウェーブレット係数の二乗) の時間変化を図 3 に示す。ここに、レベル  $-1$  の周期は 10~20 日、 $-2$  は 20~40 日、 $-3$  は 40~80 日、 $-4$  は 80~160 日、 $-5$  は 160~320 日にそれぞれ相当する。図 3 から、水稲 1 期作では年 1 回のピークを持つ波形エネルギーに対応するレベル  $-5$  の WP が大きく、年 2 回に対応するレベル  $-4$  の WP も大きい。また、水稲 2 期作ではレベル  $-4$  が極めて大きく、これらは作付カレンダーに良く整合しており、先のスペクトル解析の結果とも一致している。一方、畑作ではすべてのレベルで WP が小さく変化に乏しいことから、レベル  $-4$  やレベル  $-5$  の WP が高いことが水稲圃場の特徴であると理解できる。

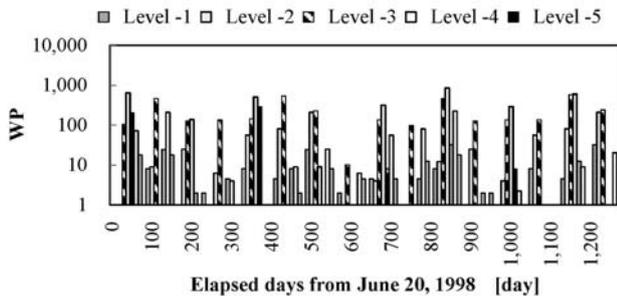
次に、GT により土地利用が判明している 155 地点について DWT により WP を求め、レベルごとの WP 分布を比較した。図 4 (a) は、水稲 1 期作 (R1), 2 期作 (R2), 3 期作 (R3), 畑作 (F) に加え、畑作と 2 期作が混在する箇所 (R2+F) と森林 (Forest) の植生において、レベル  $-4$



(a) 水稲 1 期作の WP 計算例

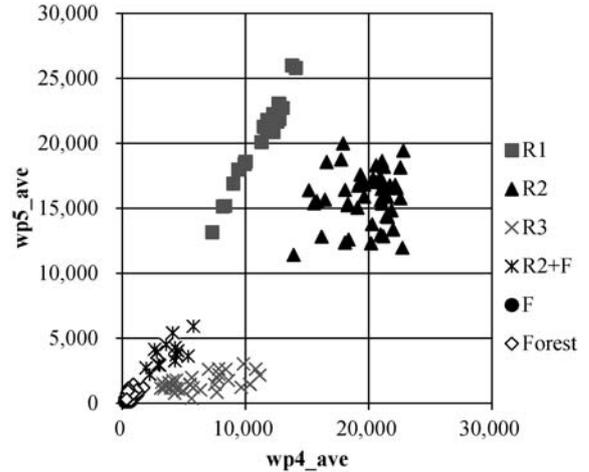


(b) 水稲 2 期作の WP 計算例

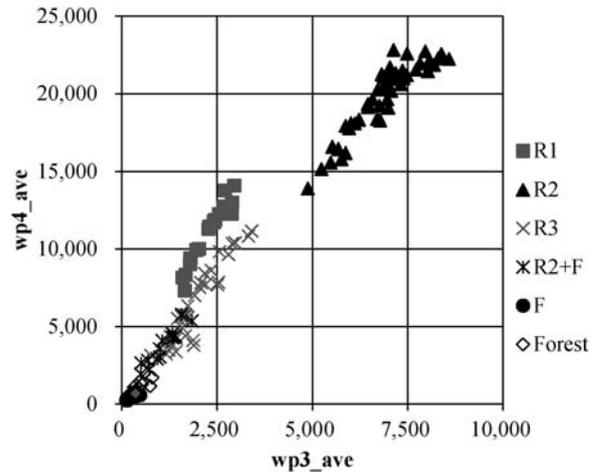


(c) 畑作の WP 計算例

図 3 時系列 NDVI の WP 分布解析例



(a) レベル 4 と 5 の WP 平均分布



(b) レベル 3 と 4 の WP 平均分布

図 4 植生ごとの WP 平均値の分布

における WP の平均 (wp4\_ave) を横軸に、レベル 5 の WP 平均 (wp5\_ave) を縦軸にとり、それぞれの植生における WP 平均値の分布を表示したものである。また図 4 (b) は (a) と同様に、レベル 3 の WP 平均 (wp3\_ave) を横軸にしたものである。図 4 より、レベル 3 ~ 5 の 2 次元パラメータ空間においては、R1 と R2 は明瞭に他と分離できる分布になっていることが分かる。また、R3 や R2 + F も WP 平均値こそ小さいものの、他と分離可能とみなせる分布を呈している。このことから、適切な順序にて水稲圃場を判別し他より分離することで、水稲圃場の抽出が可能であるものと考えられる。以上から、これらの特徴を利用し自動的に水稲圃場を分類するため、本研究では、離散ウェーブレット変換の解析結果をパラメータとする線形判別関数を導入し、分類アルゴリズムを検討することとした。

#### 4. 分類アルゴリズムの検討

離散ウェーブレット解析の結果から、低周波数帯に相当するレベル 3 から 5 における WP の値を利用することで、水稲圃場と他の植生を分類できることが示された。そこで、GT により植生が判明している 155 地点の時系列 NDVI 波形の基本統計量 (平均, 分散) ならびにレベル 3 ~ 5 の WP の基本統計量 (平均, 最大) の合計 8 個のパラメータを用いた判別分析を行った。判別分析から、次に示す線形判別関数を導出し、自動分類のためのアルゴリズムを検討した。

$$z = c_0 + \sum c_i d_i \tag{3}$$

ここに、 $z$  は線形判別関数であり、 $c_i$  は関数の定数項およびパラメータ係数である。また、 $d_i$  は上記に示した 8 つのパラメータである。(3) 式のパラメータである NDVI の基本統計量や WP の平均値, 最大値は自作プログラムにて計算

し、定数項とパラメータ係数は統計解析ソフト SPSS によりそれぞれ計算した。なお、(3) 式の線形判別関数は、ある特定の植生を他と分類するために計算するものであり、本研究では、i) 水稲 2 期作、ii) 1 期作、iii) 3 期作、iv) 2 期作と畑の混在地、v) その他の植生の 5 種類に分類することとし、i)~iv) までの分類のため合計 4 種類の判別関数をそれぞれ求めた。また、分類の順番は、上記 i)~iv) の植生の順に行うこととした。その結果、SPSS による判別分析では、水稲 1 期作、2 期作、3 期作の判別精度が 100%、2 期作と畑作の混在地の判別精度が 97.3% といずれも高い数値となり、GT により植生が判別しているこれら 155 地点においては、判別分類が可能であるとの結果を得た。ただし、これらの精度はあくまでも GT により植生が明らかな点のみの分類精度にすぎず、本手法による分類精度を示すものではない。

以上により求めた判別関数を用い、植生が不明な残り 45,415 点の判別分類を試みた。なお、分類にあたっては、(3) 式で与えられた線形判別関数と NDVI 基本統計量ならびに WP を計算し分類するためのプログラムを Microsoft Excel VBA にて作成し実施した。また、NDVI がゼロである（すなわち表面に植物が存在しない）地点は水領域であるとし、判別分類の最初に分類するものとした。図 5 は、上記のアルゴリズムにより分類された土地利用の結果を ArcGIS にて表示したものである。なお、図 5 のうち、O は水稲圃場以外の土地利用を表しており、W は水領域を表している。

図 5 の結果を確認すると、南部海岸域において多数の水稲 3 期作の領域が見られる。しかし、現地観測により得られた情報から、これらの地域では図 5 の結果のように水稲 3 期作が盛んであるとは報告されておらず、明らかな誤分類であると考えられる。そこで、この地域に多いエビ養殖池の NDVI の例と水稲 3 期作のそれを比較したところ（図 6）、

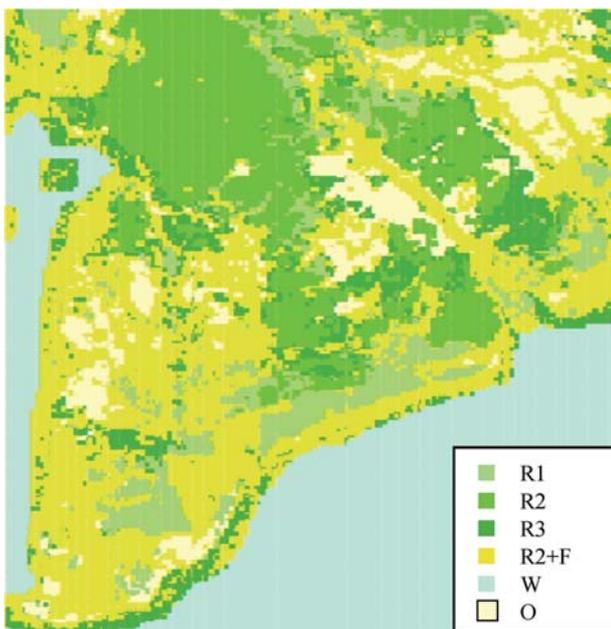


図 5 自動判別アルゴリズムによる分類結果

エビ養殖池の NDVI 値は平均的に水稲 3 期作の NDVI 値より低いものの、その変化の周期性が似ていることが分かった。また、水稲 3 期作の圃場抽出に使用した線形判別関数の構造行列を調べたところ表 1 のような値であった。表 1 から、水稲 3 期作の判別では、レベル-3 と-4 の WP 最大値や平均値の相関の絶対値が 0.4~0.6 と大きく支配的であり、NDVI の平均値の相関は 0.1 程度と小さい。このため、水稲 3 期作の波形と類似した波形特徴を持つエビ養殖池が水稲 3 期作として誤って判別されたものと理解できる。すなわち、前述のアルゴリズムにおいてエビ養殖池を分類項目に含まなかったことから、NDVI 平均値による補正が必要なが分かった。そこで、GT にてエビ養殖地であることが明らかな 20 地点にて NDVI の基本統計量を求めたところ、NDVI 平均が 113.2、標準偏差が 11.7 であった。以上を考慮し、水稲圃場分類の前に NDVI 平均値が 100 以下であれば、水稲以外の土地利用とする判断分岐を新たに追加し、誤分類を回避した。再計算による分類結果を ArcGIS により表示したものを図 7 に示す。図 7 より、海岸線の水稲 3 期作の誤判別が減少していることが分かる。また、これら海岸線の土地利用は図 7 の再計算後には水稲圃場以外の土地利用と分類されたものが多く、水稲 2 期作の分類結果も減少している。これは、修正前には水稲圃場の時間変化と類似した NDVI 変化を持つ地点はすべて水稲圃場として判別していたものが、NDVI 平均が 100

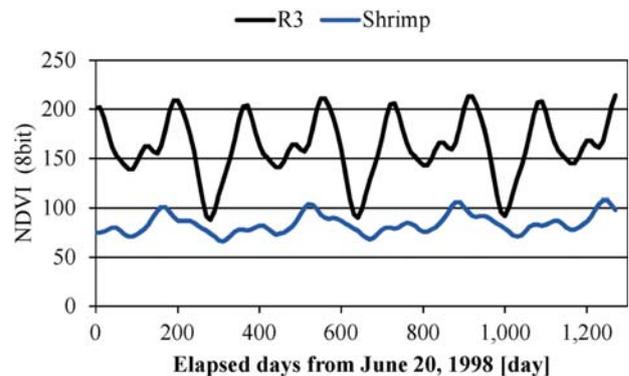


図 6 水稲 3 期作 (R3) とエビ養殖池 (Shrimp) の NDVI 値の変化例

表 1 水稲 3 期作判別のための線形判別関数における構造行列 (SPSS による計算結果)

パラメータ	相関
レベル-3 の WP 最大値	-0.672
レベル-4 の WP 最大値	-0.473
レベル-3 の WP 平均値	-0.410
NDVI の分散	-0.396
レベル-4 の WP 平均値	-0.388
NDVI の平均	0.116
レベル-5 の WP 平均値	-0.012
レベル-5 の WP 最大値	0.003

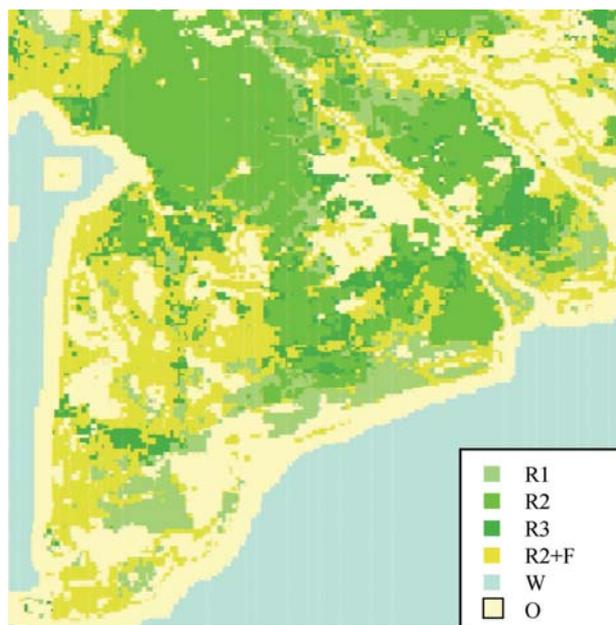


図 7 再計算後の分類結果

以下の場合には水稻以外の土地利用として分類されたためである。水稻圃場かどうかの判別に NDVI 平均が 100 以下かどうかという閾値の設定には更なる検討が必要であるが、GT による水稻圃場の NDVI と比較すると、平均が 100 以下であれば水稻圃場が卓越しない領域であると言え、水稻圃場面積としてカウントしない方が妥当な結果であると考えることができる。なお、以上の考察が正しい否かを確認するには、本来であれば正解となるベトナム南部メコンデルタ地域の土地利用図との比較による精度検証を行うべきであるが、現地に関い合わせた結果、土地利用図そのものは複数存在するものの、そのいずれもが信憑性に欠け参考にはならないとの回答が寄せられた。よって、本提案手法の精度検証は行えておらず、課題が残った。

### 5. サンプル数の違いによる分類結果の比較

本提案手法は、低解像度の人工衛星により取得された時系列 NDVI を用い、自動的に水稻圃場を抽出することを目的としている。このため、どの程度の期間、NDVI のデータサンプリングが必要かを検討する必要がある。これまでのアルゴリズム検討においては、10 日平均されたデータを 128 個使用し分類を行ったが、これはおよそ 3.5 年に相当するため、圃場の作付状況が変化する現地に適用することは現実的ではない。そこで、NDVI のサンプリングを 2 年間実施した場合を想定した 64 個 (=2<sup>6</sup>, 640 日) のデータを使用する場合と、1 年間を想定した 32 個 (=2<sup>5</sup>, 320 日) のデータを使用する場合について判別分類を試みた。解析アルゴリズムは、前述のように GT による土地利用が判明している 155 地点のデータを 2002 年 3 月より遡って 64 個あるいは 32 個ずつ選択し、それぞれ DWT と NDVI の基本統計量を求め、SPSS により線形判別関数を求めた。また、それぞれに応じて土地利用が不明な点のデータを 64 個あるいは 32 個ずつ選択して実施した。

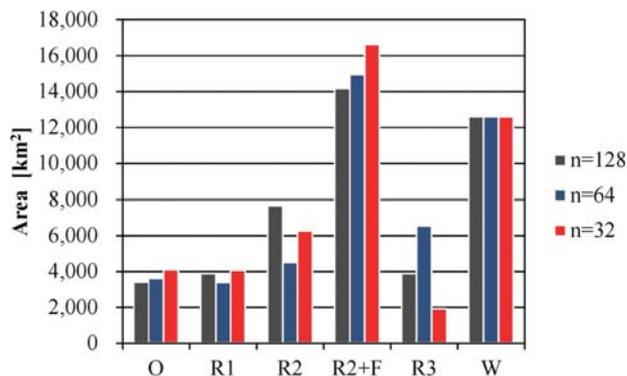


図 8 NDVI データ数の違いによる判別分類の比較

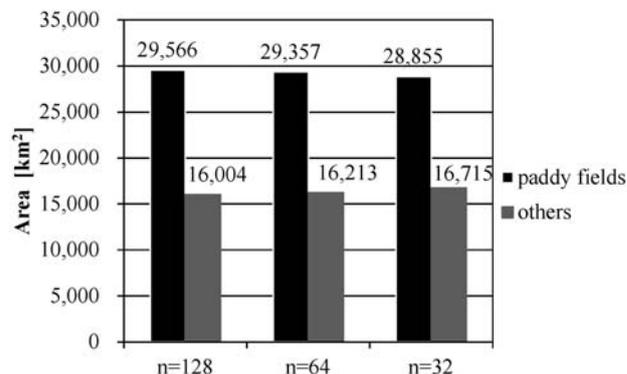


図 9 NDVI データ数の違いによる水稻圃場面積の変化

図 8 は、時系列 NDVI のサンプル数  $n$  に対し、判別の結果、それぞれの水稻圃場面積がどれほど変化したかを比較したものである。なお、図 8 の O は水稻圃場以外の土地利用を表す。図 8 から、水稻 1 期作 (R1) に大きな変化はみられなかったものの、水稻 2 期作 (R2)、3 期作 (R3) や水稻 2 期作と畑作の混在地 (R2+F) の面積が大きく変化したことが分かる。この理由は、本手法の誤判別によるものが、自然条件の変化などにより実際に作付期が変化したものが、判断がつかない。このため、本来であれば精度検証を実施すべきであるが、先の事情から精度検証は行えていない。そこで、抽出結果を水稻圃場とその他に分け、NDVI サンプル数の違いによる面積合計を比較した (図 9)。図 9 から、いずれのサンプル数を用いた場合でも、水稻圃場面積合計には大きな差はなく、その違いは、最大でも  $n=128$  と  $n=32$  の 2.4% に過ぎない。このことから、 $n=32$  の 1 年弱 (320 日) のデータであっても水稻圃場の分類が可能であると考えられる。よって、本提案手法の精度検証は未着手ではあるものの、離散ウェーブレット解析により水稻圃場の時系列 NDVI 波形を特徴抽出することで、頻繁に作付期が変化した場合でも分類が可能であったと考えることができる。なお、単に計算するだけであれば  $n=16$  (160 日) として判別分析を行うことも可能ではある。しかし、図 2 のスペクトル解析結果が示す通り、水稻圃場の特徴の一つである周期 180 日以上波形応答は当然ながら抽出できないため、水稻圃場は分類できたとしても作付期を判断

することはできない。作付期が判断できなければ収量予測のための情報としての有用性は低いと言えることから、本研究では、提案手法による水稲圃場抽出は1年間程度のデータを使用して実施することが妥当であると結論づけた。

## 6. おわりに

低解像度の人工衛星により取得された時系列 NDVI を離散ウェーブレット変換により解析し、NDVI の波形特徴を利用することで水稲圃場を判別分類する手法を提案した。その結果、本手法は水稲1期作、2期作、3期作などの作付変化に対応した分類が可能であることが示唆された。しかし、手法の分類精度は検証できておらず課題が残った。今後は、精度検証のため、本論で検討したような広範囲な領域ではなく、領域を限定し、確かな土地利用情報が得られる地域を選定して解析を行い、精度検証を進めたいと考えている。また、本報告では SPOT 衛星による NDVI を 1 km メッシュにて平滑化したデータを用いて解析を行ったが、MODIS や NOAA などの低解像度人工衛星による実データでの解析は未着手である。以上の課題を検討するため、現在、ベトナム南部メコンデルタの特定の地域において、MODIS による時系列 NDVI データの取得を継続して実施しており、現地において正確な土地利用分類（水稲圃場面積）データを手直しし、精度検証を行う準備を進めている。また今後は、NDVI だけでなく、正規化水指数（NDWI : Normalized Difference Water Index）や正規化土壌指数（NDSI : Normalized Difference Soil Index）を組み合わせた水稲圃場分類手法の検討を行っていく所存である。

謝辞：本研究の実施にあたり、ベトナム Cuu Long Rice Research Institute 副所長の NGUYEN Zuan Lai 博士には、

現地観測への協力と研究に対する貴重なご意見を頂戴しました。ここに記して感謝の意を表します。また本研究は、文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「東アジア地域における MODIS 衛星の自動データ解析に関する研究」（研究代表者、新沼勝利）の補助を得て実施されました。ここに記して感謝の意を表します。

## 引用文献

- 1) General Statistics Office of Vietnam (GSO) ホームページ: <http://www.gso.gov.vn/>
- 2) 大澤一雅, 國井大輔, 斎藤元也: 多時期 ASTER 画像による宮城県大崎地域での農地の作付け分類, システム農学, Vol. 26, No. 2, pp. 67-77, 2010.
- 3) 坂本利弘, 岡本勝男, 川島博之: 多時期 RADARSAT 画像を用いた水稲田植日の空間分布推定—石狩川中上流域における田植日と環境要因の面的比較—, システム農学, Vol. 21, No. 1, pp. 25-32, 2005.
- 4) T. SAKAMOTO, N.V. NGUYEN, H. OHNO, N. ISHITSUKA and M. YOKOZAWA, Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers, Remote Sensing of Environment, vol. 100, pp. 1-16, 2006.
- 5) Y. MEYER: Wavelets Algorithm and Applications, Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, 1993.
- 6) 東京情報大学ホームページ: 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・東アジア地域における MODIS 衛星の自動データ解析に関する研究, <http://e-asia.tuis.ac.jp/>
- 7) C.K. CHUI (桜井 明, 新井勉共訳): ウェーブレット入門, 東京電機大学出版, 1991.
- 8) 榊原 進: ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版, 1995.
- 9) I. DAUBECHIES: Orthonormal Basis of Compactly Supported Wavelets, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 41, pp. 909-996, 1988.

# Study on the Classification of Paddy Fields Based on Time-Frequency Analysis of NDVI

By

Katsumori HATANAKA\*, Mitsuo SUZUKI\* and Norikazu KANADA\*\*

(Received November 17, 2010/Accepted January 21, 2011)

**Summary** : This paper presents an algorithm for the classification of paddy fields based on the time-frequency analysis of the series of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained by remote sensing. The discrete wavelet transform is selected as the method for time-frequency analysis and the calculated wavelet powers of the waves of NDVI are used for extraction of characteristics of paddy fields corresponding to the calendar of rice cropping. The wavelet powers and statistical data of NDVI are used for the parameters of the linear discrimination functions for the automatic classification. The analytical area for this study is Mekong delta, in the southern part of Vietnam. In this paper, the authors discuss the classification results using the four years NDVI data from June 1998 observed by the earth observation satellite SPOT. The results show that the present method can well classify paddy fields as well as being applied to almost one year NDVI data. However the verification of accuracy of the present method has not yet been carried out because of the lack of accurate land use data of the target area, so this is a future subject for study.

**Key words** : NDVI, Classification of paddy fields, Discrete wavelet transform, Linear discrimination function

---

\* Department of International Bio-Business Studies, Faculty of International Agriculture and Food Studies, Tokyo University of Agriculture

\*\* Department of Food Environment Economics, Faculty of International Agriculture and Food Studies, Tokyo University of Agriculture