MODIS データを用いた東アジアの水田面積比率分布図の作成

Mapping of fractional coverage of paddy fields over East Asia using MODIS data

Abstract: In this study, spatio-temporal patterns of continuous paddy fields were examined using the patterns observed in metrics calculated for six month of MODIS over Japan. Four analytical approached were used; calculation of temporal mean, maximum and minimum layers for selected metrics showing significant spatial variability of channel 1, 2, NDVI; linear discriminant for input into the un-mixing analysis was derived from the same multi-temporal metrics used for the classification product using ASTER; the continuous percentage of paddy field was generated based on un-mixing technique with the training data derived from the above mentioned ASTER data. The derived metrics were not sensitive to time of year or the seasonal cycle and can limit the inclusion of atmospheric contamination. The comparison of 250m MODIS product with the past efforts on AVHRR, SPOT-VEGETATION and MODIS sensors, and statistics by IRRI showed that the finer resolution and its un-mixing played a crucial role in depicting the paddy field cover over Japan.

1 はじめに

1.1 水田監視の重要性

アジアにおいて稲作は，歴史，文化，水環境，食料源などの観点から極めて重要な意味を持つ．特に近年では，アジアをはじめとした途上国における人口増加問題や，それに伴って起こる世界的な水資源の枯渇が懸念されており，森林と共に水田の持つ地下水の涵養機能に注目が集まっている (三野, 1982)．また水田は，地球温暖化に大きな影響を及ぼすメタンガスの一大発生源であることが知られており，大陸レベル (1000km∼) での水田分布の定量的な把握および監視方法の確立が国際的に急務となっている (Wassmann, 2003)．現在のところ，稲の作況は，日射，降水量，気温などの気候条件と単純に結びつける定式が存在しないため，水田を継続的に監視する方法としては，地表面の状態を直接リモートセンシングで計測することが非常に有効であると考えられる．

1.2 既存の水田分布図作成手法の比較検討

リモートセンシングによる水田の監視は 1980 年代から試みられてきた．しかし，観測範囲の広さに起因する空間的な非均一性，データ量に起因する計算量の増大，雲による観測頻度の低下などが問題となり，これまで期待されてきたほど十分な成果は得られていない．以下では，光学センサにおける空間スケールに着目して既存の水田分布図作成手法について述べる．なお，本研究では可視赤外のリモートセンシングを対象とする．

大陸レベルでの水田分布図の作成は，NOAA AVHRR データの利用が盛んになった 1990 年代前半に始まった．Loveland *et al.* (2000) は，1992 年から 1993 年にかけて取得された Pathfinder AVHRR の正規化植生指数 (NDVI) データを使用し，大陸毎に土地被覆分類図を作成した．提供されている 6 種類の分類図のうち，Olson の凡例に従った分類図に水田のカテゴリが含まれており，これが現在のところ全球レベルで得られる水田の唯一の分類図である．しかし，筆者自らが指摘しているように，広域の分類図作成においては，解析結果の検証を全球的に行うことが非常に難しく，この分布図ではユーラシア大陸とオーストラリア大陸において全く検証活動がなされていない．一方，アジア全域での分類例として，アジアリモートセンシング協会 (AARS) と千葉大学が作成したデータセットがある (Tateishi, 1995)．これは，Pathfinder AVHRR から得られた地表面温度と NDVI とを用いており，誤分類を減らすために階層的分類システムを採用した点が特徴である．また，JRC (2003) は，AVHRR と同様の機能を有する SPOT-VEGETATION のデータを用いて全球の土地被覆分類図を大陸ごとに作成した．この分類図は，短波長赤外チャンネルを分類に用いているところに特徴があり，アジア地域のみに水田のカテゴリが設けられている．現在のところ，水田を分類項目に有している大陸レベルの分布図はこの 3 例だけである．しかし，いずれの分類図も空間分解能が 1km と粗く，精度検証が不十分であるため，実用レベルに至っていないのが現状である．

一方，観測範囲は狭いが空間分解能が高いセンサを使用して水田分布図を作成した試みは多く報告されている．Tennakoon *et al.* (1992) は，タイのバンコク近郊において Landsat TM データを使用し，最尤法による教師付き分類により水田の作付け面積を推定した．その結果，雨季で 90%以上，乾期で 88%の精度で作付け面積を推定することができたと報告している．Okamoto *et al.* (1996) は，Landsat TM データを用いて，1995 年に起こった北朝鮮における洪水被害と稲収穫量の推定を行った．バンド 3 と 4 の散布図空間上での稲のスペクトル軌跡と生長とを関連づけて水田を抽出した結果，5%未満の推定誤差で洪水被害別に水田面積を求めることができたと報告している．村上ほか (2001) は，可視近赤外の散布図空間上で定義される VSW 指数を応用し，V 指数と W 指数との間に水田抽出の有効性を発見した．その結果，5%未満の推定誤差で大豆などの畑作作物と水田とを分離することができたと報告している．このように，目視による判読が可能な高空間分解能光学センサは，高い精度の分類図作成が期待できるものの，主にモンスーン地帯に属するアジアにおいては，雲による障害のため年間を通じて定期的にデータを入手することが困難である．

1.3　本研究の目的

このように，衛星データは，空間分解能，時間分解能，観測波長数においてトレードオフの関係を有する．従って，現在利用できる衛星データを最大限活用するためには，それぞれの長所を組み合わせて複合的に利用するための枠組みを構築する必要がある．本研究では，最終的には大陸レベルでの水田分布図の作成を目指すため，観測範囲の広い MODIS データを主に使用する．MODIS では空間分解能の粗さが問題となるため，より高空間分解能の衛星データと統計データとを補助的に用いることでこれを克服し，画素内面積比率を考慮した高精度の水田分布図を提示する．また，既存の大陸レベルでの水田分布図との比較を行うことにより，本研究で提案する手法の有効性を検討する．

2　解析手法

2.1　水田分布図作成の概要

本研究で提案する水田分布図作成の概要を図 1 に示した．提案手法による水田分布図の作成は，MODIS データの前処理，ASTER データの前処理，水田抽出モデルの作成，の大きく 3 部から構成されている．以下では，各部での処理について具体的に述べる．

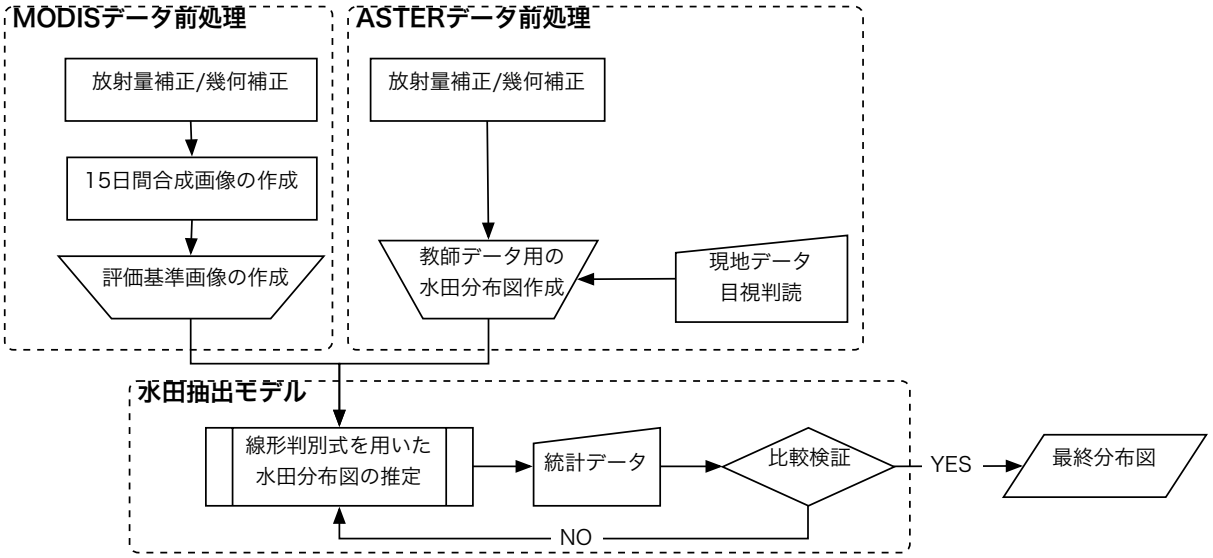


図 1 水田分布図作成の解析手順.

2.2 MODIS データの前処理

2.2.1 放射量補正/幾何補正/合成画像作成

解析に使用した MODIS 画像は，2001 年 5 月 1 日から 2001 年 10 月 31 日にかけて東京大学生産技術研究所で昼間に受信された 226 シーンの Terra MODIS データである．これは，International MODIS/Airs Processing Package (IMAPP) ソフトウェアにより処理したレベル 1b データ (HDF フォーマット) である Justice, 1998. 一部に受信不良による欠損が見られたため，不足分を NASA から入手した GSFC, 2000. また，2001 年 6 月 16 日から 6 月 30 日までは，Terra 衛星の故障のためデータを入手することができなかった．まず，走査角の大きな画素に見られる bow-tie と呼ばれる画素の補正を行った．次に，レベル 1b データ内に格納されている変換係数を用いて，チャンネル 1 と 2 (可視および近赤外，250m 空間分解能) は大気上端反射率に変換した．最後に，10km ライン毎に格納されている位置情報を用いて，最近隣法により等緯度経度座標系に画素の再配列を行い，北緯 30 度から 46 度，東経 128 度から 146 度の範囲を切り出した．解析範囲は，日本 (島嶼部を除く)，韓国，北朝鮮の全体を含んでいる．最後に，雲を取り除くために，観測された候補画素の中からチャンネル 1 の値が最小であるものを代表値として選択し，合計 12 枚の 15 日間合成画像を作成した．

2.2.2 評価基準画像の作成

合成画像を作成しても，雲，雲の影，データ受信に伴うノイズを完全に除去することは現実的には難しいと考えられる．また，センサの機能停止や受信の不備などに起因するデータの欠損は，長期間の観測では十分考えられることである．従って，ノイズの影響を最小限にとどめ，稲の成長を観測するための何らかの方策を考えることが必要である．そこで，本研究では，次のような要件を満たす評価基準画像を作成し，これをもとに水田の分布図を算出する方法を提案する．

評価基準は，水田の時系列変動のうち他の土地被覆と判別可能という意味で特徴的な時期のデータを抽出することである．MODIS のチャンネル 1, 2, NDVI を用いて作成した評価基準の一覧を表 1 に示した．評価に使用したチャンネルは，12 枚の 15 日間合成画像から作成したチャンネル 1, 2, NDVI の合計 36 枚の画像である．作成した評価基準画像は，チャンネル 1, 2, NDVI の最小値・中央値・最大値 (合計 3x3=9 枚)，チャンネル 1, 2 の値が低い方から 3, 6, 9 シーン分の平均値 (合計 2x3=6 枚)，NDVI の値が高い方から 3, 6, 9 シーン分の平均値 (合計 1x3=3 枚)，チャンネル 1, 2, NDVI の最大値と最小値との較差 (合計 3x1=3 枚) の，合計 21 枚である．チャンネル 1, 2 の値が低い方からの平均値を用いることで，雲やノイズに起因する誤差を低減することができる．また，NDVI は，常に雲やノイズに起因する誤差を低減する働きを持つことから，値が高い方からの平均値を用いた．何シーン分の平均値を取るかの基準は，水田のスペクトルの時系列特性を考慮した．例えば，各チャンネルの最小値および値が低い方から 3 シーン分は 15 日から 45 日間に相当し，水田に水が張っている時期の特徴を抽出できると考えられる．また，NDVI の最大値および値が高い方から 3 シーン分は 15 日から 45 日間に相当し，植生の活性度が高い期間に対応することから，稲が最も繁茂する時期の特徴を抽出できると考えられる．なお，チャンネル 1, 2 の最小値には雲の影が含まれ，最大値には雲が含まれている可能性が非常に高いため，これらを除外した上で評価基準画像を作成した．

表 1 MODIS のチャンネル 1, 2, NDVI を用いて作成した評価基準画像の一覧.

評価基準	順位の評価は，各チャンネル毎に独立して行う
画像の値	チャンネル 1, 2, NDVI の最小値，中央値，最大値
画像の平均値	チャンネル 1, 2 の値が低い方から 3, 6, 9 シーン分の平均値
	NDVI の値が高い方から 3, 6, 9 シーン分の平均値
画像の較差	チャンネル 1, 2, NDVI の最大値と最小値の差

2.3 ASTER データの前処理

2.3.1 放射量補正/幾何補正

解析に使用した ASTER データは，2000 年 5 月から 2003 年 9 月にかけて撮影された合計 10 枚の ASTER 画像である．画像の選択に当たっては，5 月から 6 月にかけての水田に水が張っている時期，7 月から 8 月にかけての水田が稲で覆われている時期，9 月から 10 月にかけての刈り取りの時期，の 3 つのうち 2 つを満足する画像を有する地域を基準とした．日本の代表的な稲作地帯について，画像の検索を Web 上で行った ERSDAC, 2001．その結果，およそ 3 年間で取得された ASTER 画像は各地域で 15 枚程度存在したが，水田抽出に適した 5 月から 10 月に快晴の画像は予想以上に少なく，3 年間を通じて 2,3 枚程度であった．最終的に条件を満足する画像が存在したのは，仙台平野，新潟平野，関東平野，徳島平野，佐賀平野の 5 カ所であった．解析に使用した ASTER データの一覧を表 2 に示した．

表 2 水田分布図作成に用いた Terra ASTER データの一覧．表中の緯経度は画像中心での位置を表す．

地域	データ取得日	緯度	経度
仙台平野	2002 年 7 月 7 日 / 2001 年 9 月 24 日	北緯 38.4 度	東経 140.7 度
新潟平野	2000 年 5 月 30 日 / 2002 年 7 月 25 日	北緯 37.7 度	東経 139.0 度
関東平野	2001 年 7 月 4 日 / 2002 年 9 月 20 日	北緯 35.9 度	東経 140.2 度
徳島平野	2000 年 5 月 5 日 / 2000 年 8 月 25 日	北緯 34.1 度	東経 134.6 度
佐賀平野	2002 年 5 月 25 日 / 2002 年 7 月 28 日	北緯 33.2 度	東経 130.4 度

まず，レベル 1b データ内に格納されている変換係数を用いて，チャンネル 1,2,3 を輝度値に変換し，画像中心の太陽天頂角の余弦で全チャンネルの値を除することにより，太陽天頂角に起因するずれを補正した．次に，レベル 1b データ内に格納されている四隅の点を基準点として，アフィン変換による UTM 座標系から緯度経度座標系への座標変換式を算出した．変換式の各係数は，基準点を用いて UTM 座標系での系統的幾何補正の残留誤差を測定し，その残留誤差を用いて最小二乗法によって決定した．最後に，出力画像の座標系上に格子点を設定し，それに対応する画像データの配列に，求めた係数を使用して変換した．整数値に対応しない入力画像に対しては，共一次内挿法による内挿を行った．

2.3.2 教師データ用の水田分布図の作成

仙台平野，新潟平野，関東平野，徳島平野，佐賀平野の 5 カ所を撮影したデータセットについて目視判読を行った．その結果，水田を判読することは容易であったが，同じ画像内でも地域によって作付け時期が少しずつ異なっていた．従って，教師付き分類では，トレーニングデータに対する無作為性および独立性に問題が生じる可能性があると判断した．そこでまず，ユークリッド距離の最短距離法を用いた教師なし分類を用いて，10 のクラスタに自動的に分類した．次に，10 に分類された標本の中から，目視判読により水田であると判断された標本を抽出し，複数の標本を統合することにより水田の分布図を作成した．最後に，MODIS の空間分解能に合わせるために，16×16 画素の領域における相加平均を算出し，250m 空間分解能の水田分布図を作成した．この分布図は，空間的に平滑化された画像であり，各画素内に水田面積比率の情報を有している．なお，MODIS データは 2001 年に取得されたものを使用しているが，2000 年から 2002 年の水田面積に大きな変化がないものとして ASTER データを教師として用いた．

2.4 水田抽出モデルの作成

2.4.1 水田抽出モデル構築の際の仮定条件

水田耕作は，1) 自国の気候や地理的制限を克服し独特の利水形態，耕作形態，景観をなしている，2) 生産した米は商品作物として扱われるよりはむしろ自国で消費される傾向にある，という特徴を持つ．従って，アジア各国を中心とした水田耕作について考える場合，国ごとにその特徴を把握しモデルを構築する必要があると考えられる．東アジアに属する日本，北朝鮮，韓国における稲作形態と生産制約を IRRI (2004) より調べて表 3 に示した．これらの国々では，一部の地域で直播栽培や乳苗移植が行われているものの，ほぼ全域において灌漑および育苗による一期作が行われている点で，東南アジアを中心として行われている二期作と比較して，互いに類似した耕作形態を有すると考えられる．従って，本研究で適用する解析範囲においては，国を超えて同一の水田抽出モデルで記述できるものと仮定した．

表 3 東アジア (日本，北朝鮮，韓国) における稲作の形態と生産制約の一覧.

項目	内容
気候	温帯に属し夏期に高温多雨である．6 月から 7 月にかけてのモンスーンが年間雨量のかなりの割合を占める．夏期の日射量および気温が作況に大きく影響する．
地理的制限	国土の大半を占める山間部の斜面にも棚田が複雑に分布し，国土に対する耕作面積の割合は 5%程度と小さい．
利水形態	ほぼ 100%灌漑が行き届いているか，もしくはそれに変わる何らかの補助的な水利設備 (ため池，ダム) が付随している．
稲作形態	5 月のはじめから 6 月のはじめにかけて苗の移植による田植えを行い，8 月終わりから 9 月終わりにかけて刈り取りを行う．地域差による気候特性や作柄の違いにより，一ヶ月程度の耕作時期のずれがみられる．

2.4.2 線形判別式を用いた水田抽出のモデル化

MODIS データから作成した 21 枚の評価基準画像をすべて用いて解析を行うことは，重複した情報を取り込むことになるため，大陸レベルでの解析においては計算費用の面から考えて実用的に不適切である．そこで，線形判別式を導入し，各評価基準画像に対して水田抽出能力の判定を行い，水田分類に有効な画像を選定する．

本研究で提案する水田抽出モデルでは，式 1 に示すように，ある画素の面積 A_i が水田の面積 A_{paddy} とそれ以外のカテゴリの面積 A_{others} の線形和で構成されているものと考える．

$$A_i = A_{paddy} + A_{others} \tag{1}$$

評価基準画像の頻度分布とカテゴリ面積比率との関係を図 2 に示した．横軸は評価基準画像の画素値を，縦軸はカテゴリの面積比率の分布をそれぞれ表している．図 2 において，(a) は水田における画素の平均値と水田以外のカテゴリにおける画素の平均値との差を表し，(b) は水田における画素の分散を表している．(a) の値が大きいほど，または (b) の値が小さいほど，水田とそれ以外のカテゴリの画素の頻度分布が分離していると考えられるため，それらの値を持って評価基準画像における水田抽出能力と見なすことができる．本研究では，水田抽出能力を水田判別率と呼び，これを式 2 に示すように線形判別式として定義する．線形判別は，分類すべきカテゴリーの共分散行列が等しいという条件が必要であるが，計算時間が短いという特徴がある Iikura, 1991.

$$\psi_i = \frac{\mu_{paddy} - \mu_{others}}{\sigma_{paddy}} \tag{2}$$

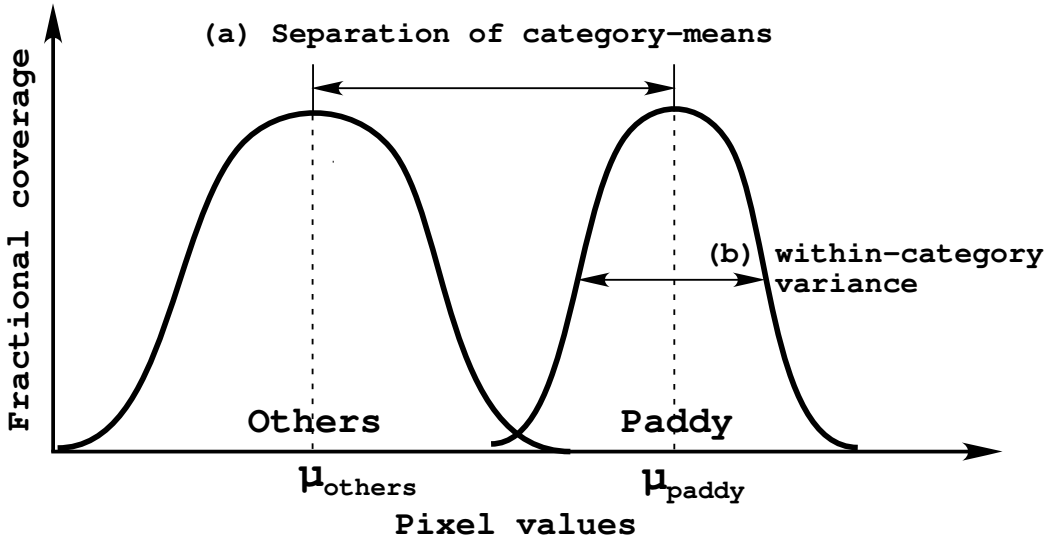


図 2 評価基準画像の頻度分布とカテゴリ面積比率との関係．図中の (a) はカテゴリ平均値の差を，(b) はカテゴリ内の分散をそれぞれ表している．

ある評価基準画像における水田判別率 ψ_i は，水田の画素の平均値 μ_{paddy} と水田以外の画素の平均値 μ_{others} との差を，水田の画素における分散 σ_{paddy} で除した式で表される．

線形判別式を用いた水田分布の推定は次のような手順で行った．1) 水田の画素もしくはそれ以外の画素の平均値及び分散を算出するために，ASTER データを用いて求めた水田分布図をトレーニングデータとして与える，2) トレーニングデータを用いて，各評価基準画像に対して ψ_i を求め，これを最大化するような評価基準画像を選出する，3) 選出された評価基準画像において，図 2 に示した水田面積比率の頻度分布に正規分布を仮定し水田面積比率の頻度分布モデルを作成する．4) 得られたモデルのチューニングを行い最適値を用いて評価基準画像全体に適用する．

2.4.3 統計データを用いた水田抽出モデルのチューニング

ASTER データから得られたトレーニングデータの情報は，空間的に限られた局所的な領域を代表しているにすぎないため，解析範囲全体にこれを適用した際には，面積の過大評価もしくは過小評価に陥ることが予想される．土地被覆分類において決定木にパラメタを与える方法はよく用いられるが，結果を容易に調節できる点で優れている Pal, 2003．そこで本研究では，データの入手性が容易な国別水田面積を制約条件として与えることにより，水田抽出モデルパラメタのチューニングを行った．モデルのチューニングは次の手順で行った．1) パラメタとして水田の分散 σ_{paddy} に着目し，初期値としてトレーニングデータから得られた平均値と分散を与える，2) 水田面積比率の分布モデルを評価基準画像全体に適用し水田の面積比率を推定する，3) 推定した水田分布図から国別の水田面積を算出し統計値と比較する，4) パラメタである分散の値を増加あるいは減少させる，5) 統計値との差が 5%未満になるまで 2) から 4) の処理を繰り返す．なお，国別水田面積として，国際的に信用度が高く多国のデータが得られる国際稲研究所 (IRRI) の統計データを使用した IRRI, 2000.

3 解析結果

3.1 水田分布図の作成

3.1.1 評価基準画像および水田判別率の算出

MODIS データを用いて作成した評価基準画像と ASTER から作成した水田分布図を元に，線形判別式を用いて水田判別率を算出した結果を表 4 に示した．これによると，最も高い判別率 8.10 を与えたのが NDVI の最大値であり，次に高い 6.11 を与えたのが NDVI の最大値から 9 シーンを平均したものであった．一方で，チャンネル 2 においては，最小値から 9 シーン分を平均したものが 4.16 と最も高く，次が最小値から 6 シーン分を平均したもので 3.64 であった．振幅の与える判別率は 1.78 となり，他の評価基準値と比較して極端に低い判別率であった．チャンネル 1 においては，最小値から 9 シーン分を平均したものが 4.88 と最も高く，次が中央値の 3.98 であった．チャンネル 1 においても振幅の与えた判別率は 0.88 であり非常に低かった．全体的に個々のシーンの値をそのまま用いて作成した評価基準よりも，NDVI を用いて作成した評価基準の方が，高い判別率を与えた．一方で，1) チャンネル 1, 2 の最小から 3, 6, 9 シーン分の平均値の値が順に高くなっていること，2) 最大値ならびに最小値が低い値を示し，中央値がそれらよりも高い値を示している，の 2 点から，最大値および最小値にはノイズが依然として含まれている可能性がある．これらのノイズの原因としては，画像間の幾何補正誤差，雲やエアロゾルに起因する大気の影響，雲の影，斜面での影などが考えられる．結果的に，これらの大気効果を抑制する働きを持つと考えられる NDVI が，判別に関してもよい結果を与えた．

表 4 MODIS の評価基準画像から作成した水田判別率の一覧.

評価基準	最小値	中央値	最大値	最小 3 平均	最小 6 平均	最小 9 平均	振幅
CH1	3.49	3.98	2.67	3.71	3.93	4.88	0.88
CH2	3.22	3.62	3.44	3.19	3.64	4.16	1.78
NDVI	5.07	5.56	8.10	5.56	5.69	6.11	1.36

水田判別率の高かった NDVI による評価基準画像は，画像の滑らかさの観点からも個々のシーンの値を単独で使用した評価基準画像よりも優れていた．そこで，判別結果が他と比較して著しく劣っていた振幅を除く NDVI の 6 つの評価基準画像を用いて，式 3 に示すように，それぞれの判別率の大きさに従って線形配分することにより重み付けをした画像を作成した．

$$\mathrm{A} = \sum a_i A_i \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \tag{3}$$

ここで，A は出力画像を，a_i は判別率の大きさを，A_i は評価基準画像の値をそれぞれ表している．

3.1.2 水田分布図作成結果の考察

重み付き評価基準画像の水田の頻度分布に対して正規分布を仮定し，水田面積比率の分布モデルを作成した．これに，国別水田面積を制約条件として与えることによりパラメータのチューニングを行った．今回は，3 カ国すべてにおいて同じパラメタを用いているため，実際には日本の統計値のみを用いてチューニングを行った．最終的に水田面積比率分布図として得られた画像を図 3 に示した．画像の濃淡は，各画素における水田の面積比率を表しており，白の濃淡が濃いほど水田が多く含まれていることを意味している．

日本における大規模な水田は，石狩川，北上川，最上川，信濃川，利根川，吉野川，筑後川などの沖積平野に分布しており比較的東日本に多い．同様にして，韓国のハン川，クム川，ナクトン川，北朝鮮のテードン川，チョンチョン川などの沖積平野にも大規模な水田が見られる．沖積平野は，灌漑が容易であることから水田が空間的に連続して分布していると考えられる．一方で，山間地の谷間や海岸線に沿った地域にも小さい面積の水田が抽出された．棚田や谷津田と考えられるこれらの水田は，日本，韓国，北朝鮮において空間的な偏りが

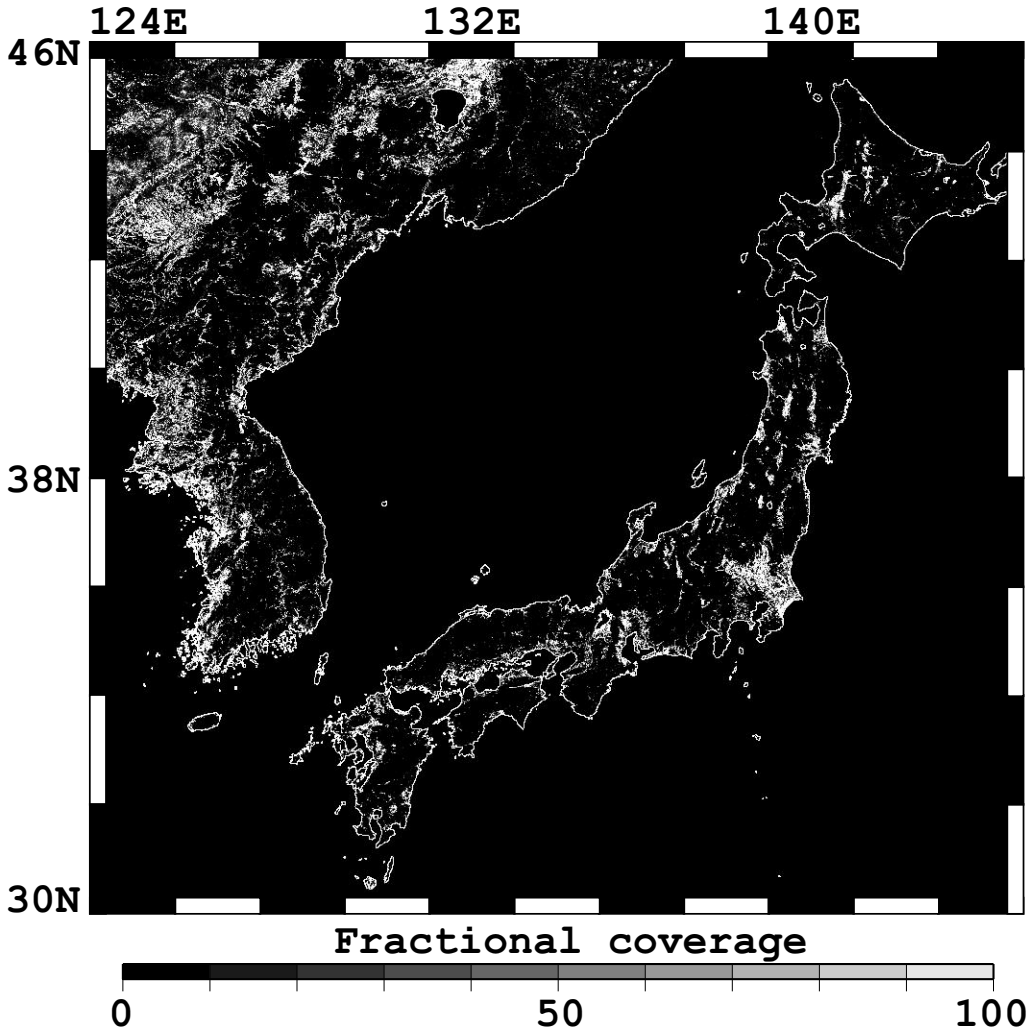


図 3 MODIS データから求めた 2001 年度の東アジア水田分布図 (250m 空間分解能)．画像の濃淡は，各画素における水田の面積比率を表しており，白の濃淡が濃いほど水田が多く含まれていることを意味している．

あるものの，ほぼ全国的に分布していた．棚田や谷津田における米の生産性は大規模な水田と比べて低いが，傾斜地における洪水や土壌浸食を防ぐ集水地としての役割を果たしている (増本, 2004)．こういった多面的機能を有する棚田や谷津田は保全していく必要があり，本研究で提示した，画素内面積比率を考慮した水田抽出手法は，これら小面積の水田を監視する方法としても有効であると考えられる．

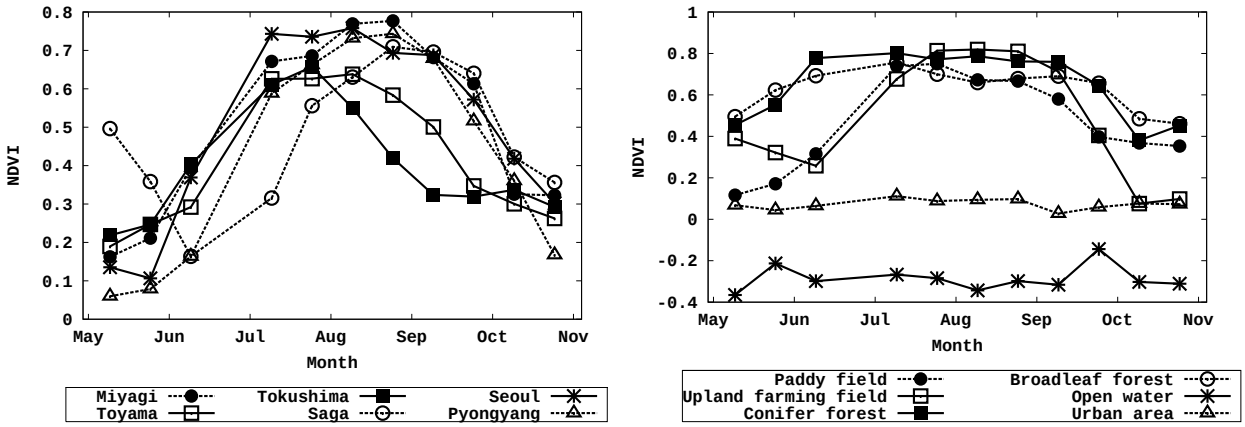
3.1.3 水田 NDVI の時系列特性の考察

次に，得られた水田分布図から耕作時期の異なる仙台平野，富山平野，徳島平野，佐賀平野，ソウル近郊，ピョンヤン近郊の複数の水田を選び出し，他の代表的な土地被覆カテゴリとともに MODIS NDVI の時系列変動を比較した．

まず，作付け時期の異なる水田における MODIS NDVI の時系列変動の比較を図 4 の (a) に示した．一期作水田の時系列特性は，5 月の田植え直後は NDVI の値は低く，6 月から 7 月にかけて値が増加し，7 月の終わりから 9 月のはじめまで 0.7 程度のほぼ一定の値を維持し，9 月の半ばに急激に減少する．(a) によると，東アジアでも 2ヶ月程度の耕作時期のずれがあることがわかる．通常の分類手法ではこれらの違いを抽出するためにはそれぞれについて教師を与える必要があると考えられる．本研究のように評価基準画像を用いれば，稲の

生育期間がほとんど同じであるという条件の下では，作付け時期の異なる水田を抽出することができる．

次に，水田，畑作 (大豆)，針葉樹林，広葉樹林，水，都市域での MODIS NDVI の時系列変動の比較を図 4 の (b) に示した．針葉樹林と広葉樹林に代表される森林は，5 月から 6 月の半ばにかけて値が 0.4 から 0.8 程度まで上昇し，10 月のはじめ頃から減少するという時系列変動を示した．水域は，データのノイズに起因したやや大きな値が見られるものの，おおむね-0.3 程度の一定の値であった．都市域は，地表面が主にコンクリートやアスファルトで覆われているため，年間を通じて NDVI の値はほとんど変わらずおよそ 0.08 の一定の値であった．従って，時系列特性から判断すると，水田は，針葉樹林，広葉樹林，水，都市域といったカテゴリとは比較的容易に判別することができる．一方で，大豆，トウモロコシ，小麦などが栽培されている畑作地域と水田の時系列特性は，夏期の植生活性度が高くなる時期には非常に類似しており，判別は困難であると考えられる．判別に有利であると考えられる時期は，田植えをする前もしくは田植え直後のように，水田に特徴的である地表面に水が張っている時期である．従って，作成した水田分布図の品質は，5 月から 6 月中旬にかけての水田が湛水している時期に，雲のない良好なデータを取得できているかどうかに大きく左右されると考えられる．



(a) 作付け時期の異なる水田どうしの比較　　(b) 水田と他の土地被覆との比較

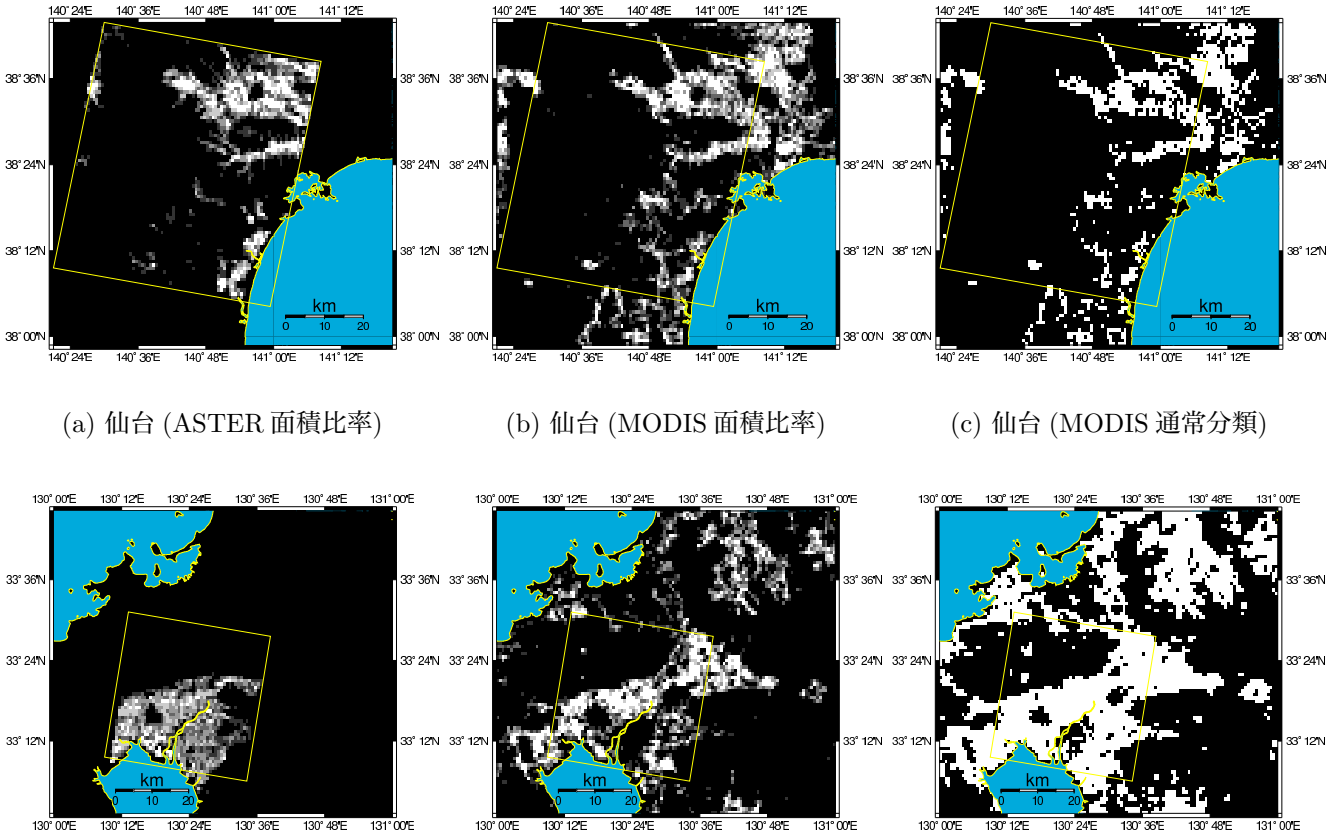
図 4 様々な土地被覆における MODIS NDVI の時系列変動の比較.

3.2 水田分布図作成結果の検証

3.2.1 ASTER との比較によるモデルの精度検証

MODIS から求めた水田分布図の精度検証を行うために，ASTER を使用して求めた水田面積比率分布図および MODIS を使用して画素内面積比率を考慮しない通常の分類図との比較を行った．ASTER および MODIS から抽出した水田分布図のうち，仙台平野および佐賀平野周辺を切り出して図 5 に示した．画像の濃淡は各画素における水田の面積比率を表しており，白の濃淡が濃いほど水田が多く含まれていることを意味している．また図中の矩形領域は解析に使用した ASTER の範囲を表している．

図 5 の (a) に示した仙台平野における ASTER の分類結果では，図中の矩形領域で示される観測範囲の右上部を東西に流れる江合川や鳴瀬川流域に大規模な水田が見られる．(b) に示した MODIS の分類結果でも河川流域の大規模な水田を確認することができるが，支流にあたる領域では，ASTER では抽出されているが MODIS では抽出されていない水田が多数見られる．また，ASTER では図中に淡く表示されている比較的面積の小さい水田が多く見られるが，MODIS ではそれらが過大に評価されて濃く表示されていたり，過小に評価されて淡く表示される傾向にある．(c) に示した通常の分類では，比較的面積の小さい水田はないがしろにされており抽出されていない．全体的には，MODIS と ASTER の分類結果は，互いによく対応がとれた分布図が得られたが，面積比率を考慮した (b) の結果の方が (c) と比較してより (a) に近い結果が得られたと考えられる．



(a) 仙台 (ASTER 面積比率)　(b) 仙台 (MODIS 面積比率)　(c) 仙台 (MODIS 通常分類)

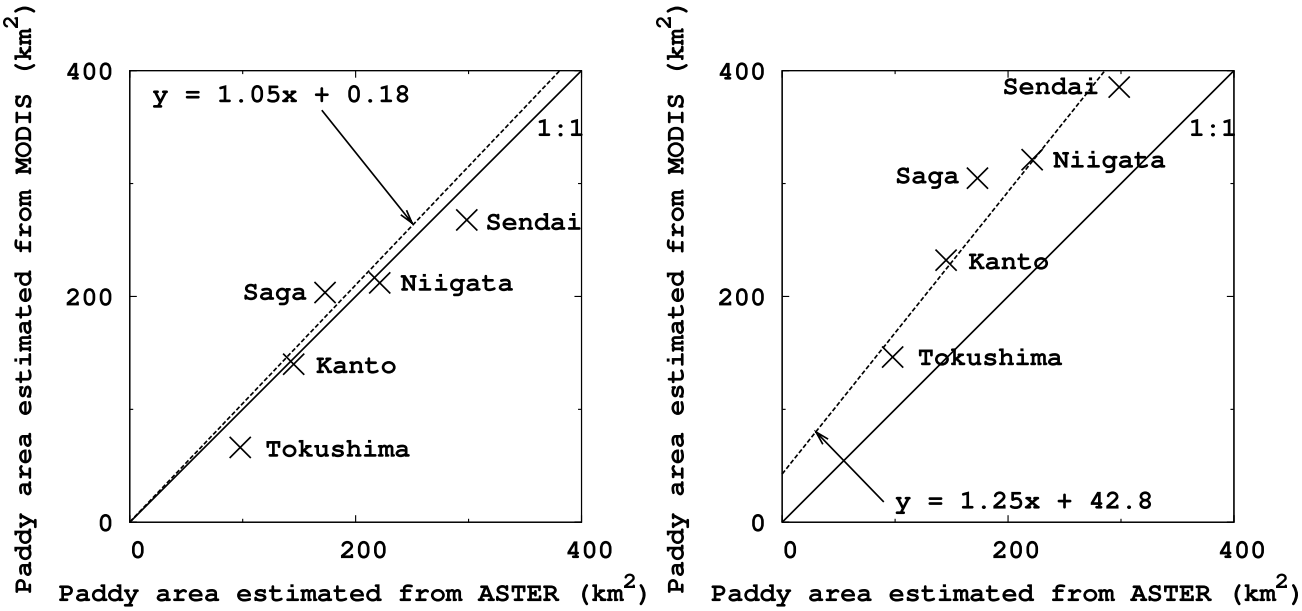
(d) 佐賀 (ASTER 面積比率)　(e) 佐賀 (MODIS 面積比率)　(f) 佐賀 (MODIS 通常分類)

図 5 ASTER と MODIS から求めた水田分布図の比較．(c) と (f) は通常の分類を行った結果を表している．画像の濃淡は各画素における水田の面積比率を表しており，白の濃淡が濃いほど水田が多く含まれていることを意味している．図中の矩形領域は解析に使用した ASTER の範囲を表している．

図 5 の (d) に示した佐賀平野における ASTER の分類結果では，図中の矩形領域で示される観測範囲の中央を南北に流れる筑後川流域に大規模な水田が見られる．また，耕地利用率が高い佐賀平野では，5 月の水田で麦類が生育している．解析に使用した 7 月後半の画像では水田と畑作の区別が難しい地域が画像中央部に存在し，(d) に示した ASTER では水田が抽出されているが，(e) に示した MODIS ではそれが抽出されていない．仙台平野における分類結果と同様に，ASTER では図中に淡く表示されている比較的面積の小さい水田が多く見られるが，MODIS ではそれらが過大に評価されて濃く表示されていたり，過小に評価されて淡く表示される傾向にある．(f) に示した通常の分類では，面積比率を考慮していないため (c) と同様に面積の小さい水田は抽出されていない．

次に，仙台平野，新潟平野，関東平野，徳島平野，佐賀平野の 5 カ所について ASTER と MODIS から水田面積を求めて図 6 に示した．横軸は MODIS による推定値を，縦軸は ASTER による推定値を示している．図 6-(a) は画素内面積比率を考慮した場合の推定値，図 6-(b) は通常の分類による推定値をそれぞれ表している．

ASTER による推定結果を基準として MODIS による推定結果を評価すると，5 つの検証サイトにおける誤差の大きさは，画素内面積比率を考慮した場合には，仙台平野，新潟平野，関東平野，徳島平野，佐賀平野の順に，10.3%, 4.2%, 3.5%, 32.2%, 17.6%となり，これらの二乗平均誤差は 16.5%であった．ASTER と MODIS による推定結果は，正の線形関係にあり相関係数は 0.9 であった．ASTER による推定結果と比較すると，MODIS による推定結果は佐賀平野を除いては過小評価する結果となった．一方，面積比率を考慮せずに通常の分類を行った場合には，仙台平野，新潟平野，関東平野，徳島平野，佐賀平野の順に，29.1%, 60.0%, 76.3%, 49.6%,



(a) 画素内面積比率を考慮した推定　　(b) 通常の分類による推定

図 6 ASTER および MODIS から求めた水田面積の比較．(a) は画素内面積比率を考慮した場合の推定値，(b) は通常の分類による推定値をそれぞれ表している．

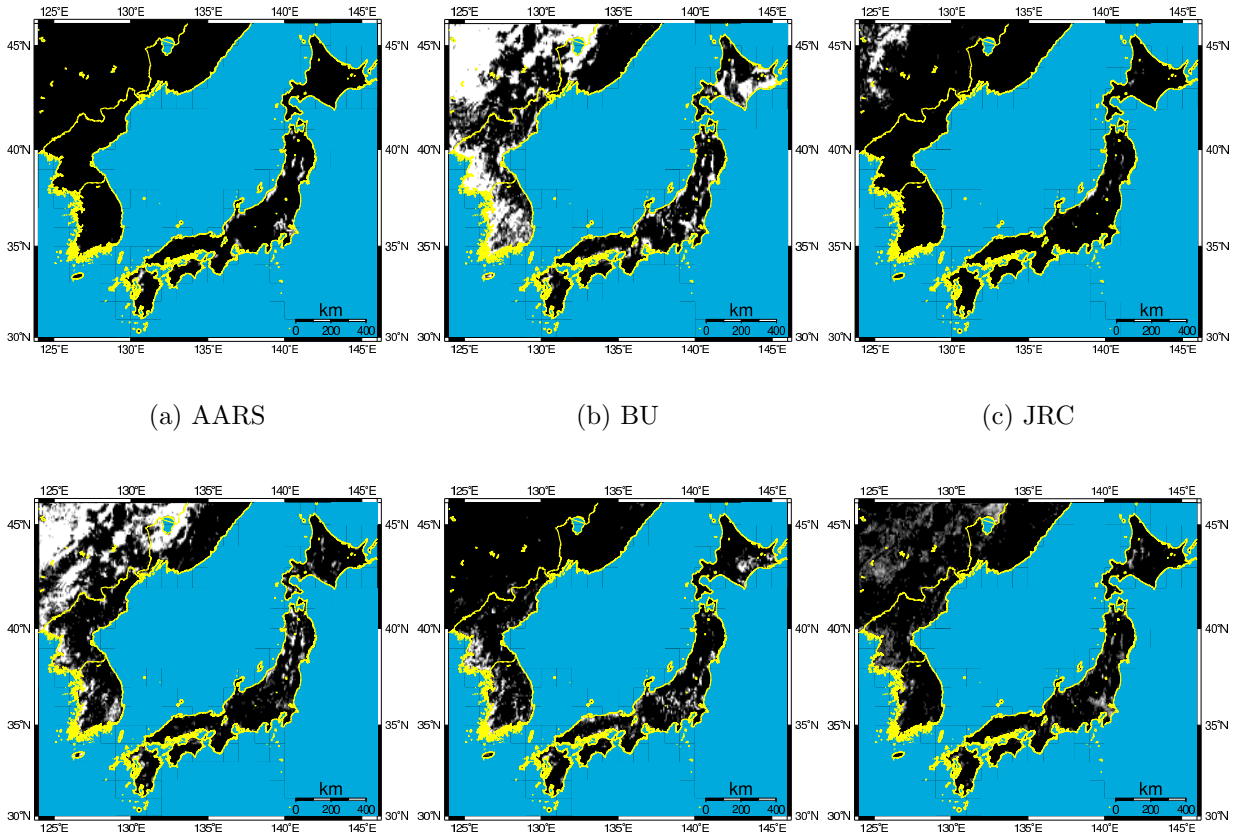
45.1%となり，これらの二乗平均誤差は 54.3%であった．ASTER と MODIS による推定結果は，正の線形関係にあり相関係数は 0.86 であった．ASTER による推定結果と比較すると，MODIS による推定結果はすべての検証サイトにおいて大幅に過大評価する結果となった．この理由としては，MODIS の方が空間分解能が低いため，衛星の空間分解能よりも面積の小さい水田を十分に抽出できなかったことが考えられる．以上から，画素内面積比率を考慮した推定手法を用いることにより，通常の分類ではないがしろにされてしまう面積の小さい水田を抽出することができ，モデルの精度が大きく向上することが示された．

3.2.2　既存の水田分布図および統計値との比較による考察

次に，現在大陸レベルで整備されている水田分布図である AARS, JRC, USGS のデータに加えて，ボストン大学 (BU) が MODIS データを用いて MOD12 プロダクトとして公開している土地被覆分類図 (Friedl, 2002) およびメリーランド大学 (UMD) が AVHRR の Pathfinder データを用いて作成した土地被覆分類図 (Hansen, 2000) を収集した．BU と UMD の土地被覆分類図には水田のカテゴリが含まれていないが，気候モデルなどの入力パラメータとして現在世界中で広く使用されている (Dickinson, 1995)．そこで，最も水田に近いと考えられる cropland のカテゴリを用いて本研究で作成した水田面積比率分布図 (UT) との比較を行った．AARS, UMD, USGS の分類図は 1992 年の衛星データを基に解析され，BU, JRC, UT の分類図は 2001 年の衛星データを基に解析された．

そこで，まず提案手法を用いて求めた水田分布図と既存の水田分布図との比較を図 7 に示した．UT が本研究で提案する手法を用いた結果であり，UT の推定結果のみが画素内面積比率を考慮しており，図中の白の濃淡が濃いほど水田が多く含まれていることを意味している．AARS および JRC の分類図においては，北朝鮮及び韓国において水田がほとんど検出されていない点が明らかに不適切である．BU と UMD の分類図においては，本研究の解析範囲からは外れているが，画像左上部の中国東北部において明らかに多くの画素が検出されたが，これらの多くは水田ではなく畑作地域であると考えられる．同様の畑作地域が北海道の東部にも見られる．北上川沿いの北上盆地，雄物川沿いの横手盆地，信濃川沿いの新潟平野における大規模な水田は，どの分類図においても検出された．UMD, USGS, UT の分類図においては，北朝鮮と韓国の西海岸において類似

した空間分布が得られた．



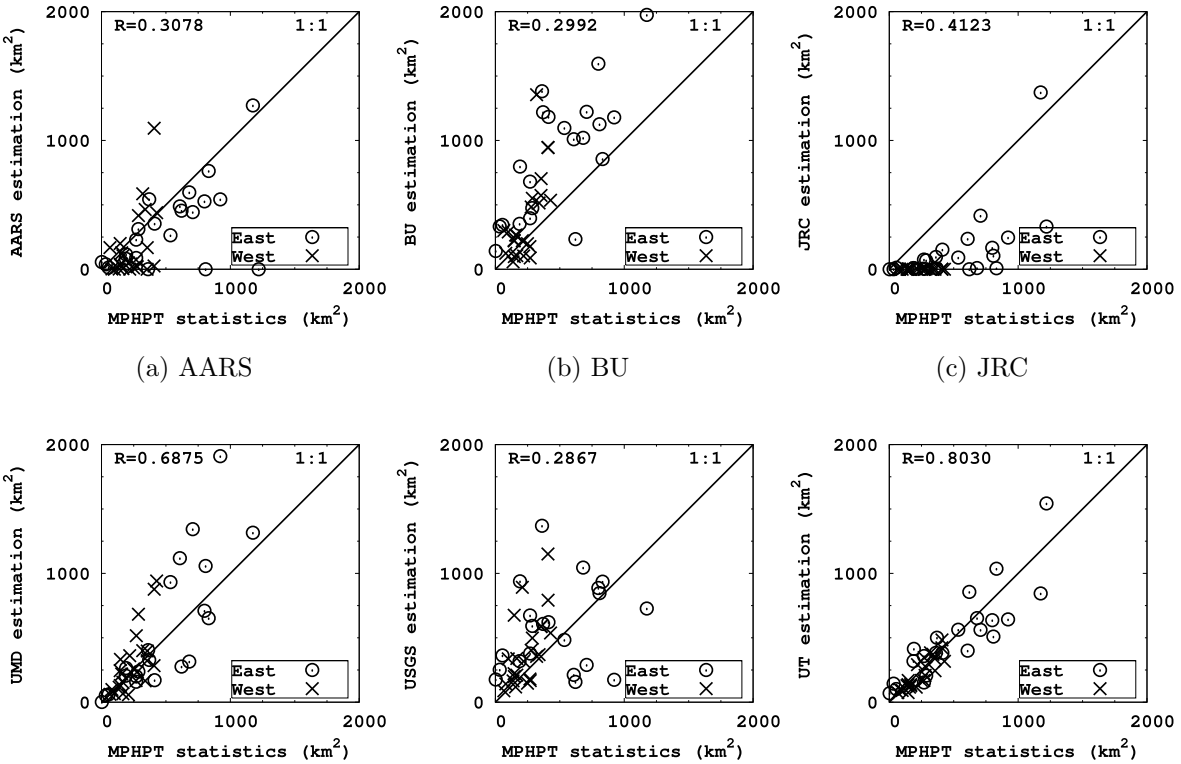
(a) AARS (b) BU (c) JRC

(d) UMD (e) USGS (f) UT (提案手法)

図 7 提案手法を用いて求めた水田分布図と既存の水田分布図との比較．提案手法 (UT) のみが画素内面積比率を考慮しており，図中の白の濃淡が濃いほど水田が多く含まれていることを意味している．

次に，これら水田分布図の空間的分布特性を詳細に評価するために，日本において都道府県別の水田面積を算出し，総務省 (MPHPT) が発行している統計値との比較を行った (総務省, 2001)．既存の水田分布図から求めた都道府県別水田面積と統計値との比較を，岐阜県を境に東日本と西日本とに分けて図 8 に示した．どの分類図においても水田の面積が大きくなるほど，統計値と衛星による推定値の誤差が大きくなる傾向にあった．統計値と衛星データから求めた推定値との間で相関係数 R を算出した結果，AARS, BU, JRC, UMD, USGS, UT の順に 0.3078, 0.2992, 0.4123, 0.6875, 0.2867, 0.8030 となった．AARS による推定では，5 県において面積が 0 となり，全く水田が抽出されてい地域が多数存在した．BU による推定では，畑作を含んでいるため水田と単純に比較することは難しいが，特に北海道で統計値とのずれが大きく，衛星による推定値は統計値と比較して全体的に過大評価する傾向にあった．JRC による推定では，15 県において面積が 0 となった他，衛星による推定値は統計値と比較して全体的に過小評価する傾向にあった．UMD による推定では，BU と同様に畑作を含んでいるため水田と単純比比較することは難しいが，衛星による推定値と統計値とのばらつきは比較的小さかった．USGS による推定では，北海道の東部や中部地方の山間部において明らかに水田ではないと考えられる画素が抽出されていた．UT による推定では，全体的に水田の分布が適切に表現されており，衛星による推定値と統計値はよく一致した．また，東日本は比較的水田の大きな単作地帯であり，西日本は広い沖積平野が少なく小さい水田が多いが，これら水田面積の大小に起因するばらつきの傾向は見られなかった．

次に，これらの分類図から日本，北朝鮮，韓国の 3 カ国における国別水田面積を算出し，IRRI が公開している統計データとの比較を行った (IRRI, 2000)．既存の水田分布図から求めた国別水田面積と統計値との比較

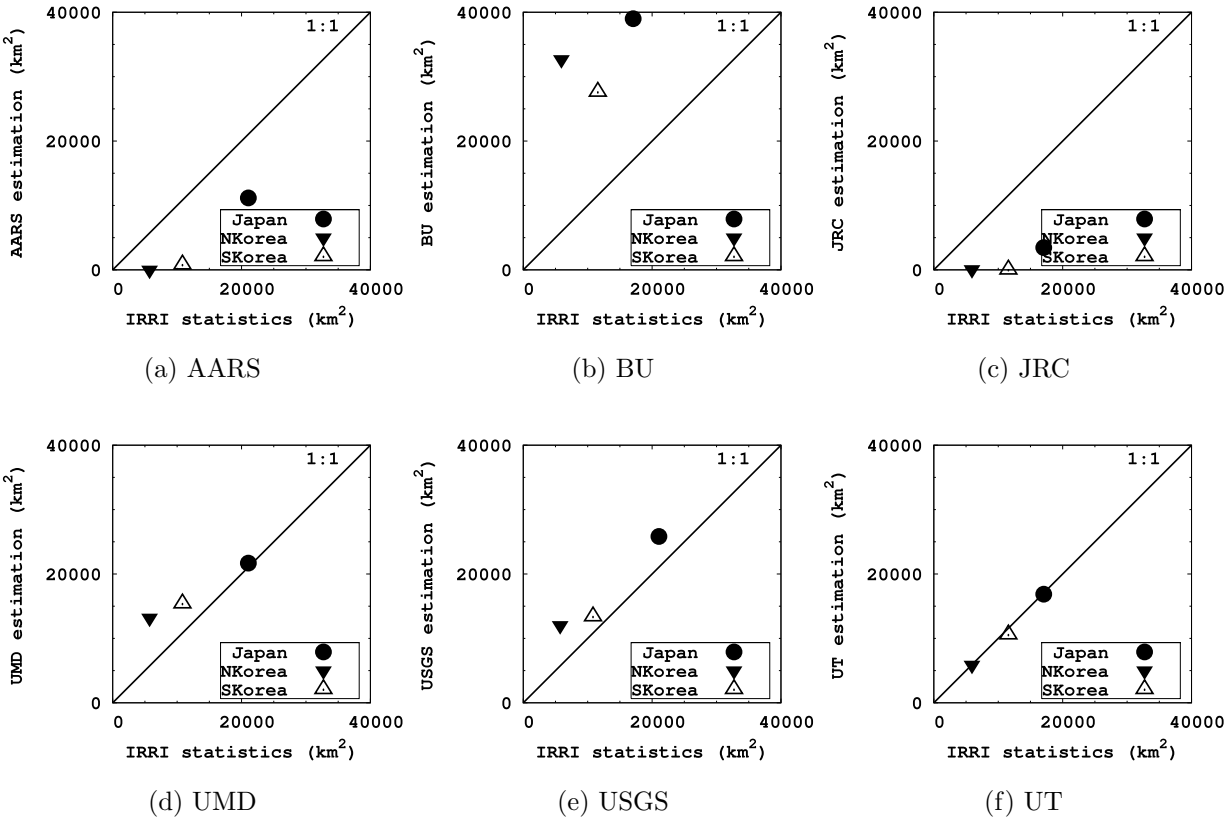


(a) AARS (b) BU (c) JRC

(d) UMD (e) USGS (f) UT (提案手法)

図 8 既存の水田分布図から求めた都道府県別水田面積と統計値との比較.

を図 9 に示した．AARS による推定では，北朝鮮においてほとんど水田が検知されず，いずれの国においても衛星による推定は統計値と比較して過小評価する傾向にあった． BU による推定では，統計値に対する衛星による推定値の大きさは，日本ではおよそ 2 倍，北朝鮮ではおよそ 4 倍，韓国ではおよそ 3 倍であり，いずれの国においても大幅に過大評価する傾向にあった．JRC による推定では，AARS の場合と同様に，北朝鮮と韓国における水田面積がほとんど 0 であると推定されており，日本においても統計値と比較しておよそ 25%の大幅な過小評価であった．UMD による推定では，北朝鮮での衛星による推定値が統計値の 2 倍となったが，日本と韓国では統計値に対しておよそ 10%の誤差で推定値が得られており，比較的良好な結果を与えた．USGS による推定では，3 カ国とも 10%程度の過大評価であり，UMD と同等に良好な結果を与えた．UT による推定では，衛星による推定と統計値とのばらつきは非常に小さく，3 カ国ともおよそ 3%の誤差で推定が行われた．本手法以外ではチューニングがなされていないが，比較的入手しやすい IRRI の国別水田面積を信用することとして，これを用いてチューニングを行うことで，解析結果が大きく改善された．また，日本の統計値のみを用いてチューニングを行い，これを日本，韓国，北朝鮮に適用した結果，日本の水田面積が統計値に近くなるのは当然であるが，北朝鮮と韓国においても統計値と近い結果が得られたということは，3 カ国における水田耕作形態がほぼ一様であるという仮定が成立することと整合性が得られる．



(a) AARS (b) BU (c) JRC

(d) UMD (e) USGS (f) UT

図 9 既存の水田分布図から求めた国別水田面積と IRRI の統計値との比較.

4　おわりに

本研究では，250m 空間分解能を持つ MODIS データを用いて，日本，韓国，北朝鮮を含む東アジアにおける水田分布図を作成した．まず，地理的制約条件と気候条件について考察を加えた結果，これら 3 カ国についてはおよそ 1ヶ月程度の耕作時期の違いがあるものの，ほぼ同様に灌漑と育苗による一期作を営んでいると仮定を行った．次に，MODIS データに対して前処理を施し，雲をはじめとしたノイズを取り除くために 15 日間合成画像を作成した．次に，MODIS データを用いて 21 種類の評価基準画像を作成し，季節変動をとらえる特徴を抽出しデータ圧縮を行った．次に，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，カテゴリ平均および分散を用いた線形判別式を定義し，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水田判別率を算出した．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，判別率の低かった年間振幅を除いた標準基準画像を用いて，判別率に従って重み付けをした画像を作成し，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．ASTER データから推定した水田面積を用いて水田抽出モデルの精度検証を行った結果，MODIS データから推定した水田面積は，佐賀平野を除いては ASTER と比較してやや小さい値であった．画素内面積比率を考慮しない通常の分類結果と比較した結果，本研究で提示した画素内面積比率を考慮した手法を用いることにより，水田抽出モデルの精度が大きく向上することが明らかとなった．最後に，作成した水田面積比率画像の妥当性を検討するために，現在大陸レベルで入手可能な種々の土地被覆分類図を入手し，都道府県別の水田面積および国別の水田面積の統計値と比較した．その結果，本研究で提示した水田面積比率分布図による推定値は，国別でおよそ 3%の精度で推定が行われており，既存の水田分布図と比較してより適切な推定結果が得られた．

以下に，本研究で得られた知見を次に示す．

- 湛水した時期のデータが得られていれば 2ヶ月程度の時期の差が見られる水田でも抽出することができる．
- 個別のチャンネルを用いるよりも雲の影響が取り除かれた評価基準を用いた方が判別率が高い．
- 水田抽出に適した 5 月から 10 月に ASTER によって撮影された快晴のシーンは予想以上に少ないため，Landsat や SPOT などの光学衛星データやマイクロ波データの併用も考えるべきである．

最後に，今後の指針を次に示す．

- 単年度のみならず年々変動に手法を適用した際の安定性の評価を行う．
- NDVI のみでは畑地との分類が難しいことがあるため，水分条件に敏感な中間赤外のチャンネルや熱チャンネルを併用した手法の開発を行う．
- MODIS から求めた水田分布図の空間的な精度を確認するためにより詳細な検証データが必要である．
- リモートセンシングのみでは不完全であるが，他に広域的に観測を行うことができないため，継続的に水田分布図を提供しつつ提案手法の評価を行う．

謝辞

本研究で使用した ASTER データは，資源・環境観測解析センター (ERSDAC) より提供していただいた．ここに厚くお礼を申し上げる．また本研究は，科学技術振興機構 (JST) による計算科学技術活用型特定研究開発推進事業の研究開発課題である「環境・災害監視のためのアジア衛星観測ネットワークの構築」プロジェクトの一環として実施したものである．関係各位に感謝の意を表する．

参考文献

Dickinson, R. E., 1995. Land Processes in Climate Models. *Remote Sens. Environ.*, 51, 27-38.

ERSDAC, 2001. ASTER GDS, http://www.gds.aster.ersdac.or.jp/ (accessed 30 June 2004).

Friedl, M. A. et. al., 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sens. Environ.*, 83 (1-2), 287-302.

GSFC/NASA, 2000. Distributed Active Archive Center GSFC, http://daac.gsfc.nasa.gov/ (accessed 30 June 2004).

Hansen, M. C., DeFries, R. S., Townshend, J. R. G., and Sohlberg, R., 2000. Global land cover classification at 1km spatial resolution using a classification tree approach. *Int. J. Remote Sens.*, 21, 1331-1364.

Iikura, Y., and Yasuoka, Y., 1991. Utilization of a best linear discriminant function for designing the binary decision tree. *Int. J. Remote Sens.*, 12(1), 55-67.

IRRI, 2000. International Rice Research Institute Rice Stat, http://www.irri.org/science/ricestat/ (accessed 20 August 2004).

IRRI, 2004. International Rice Research Institute Rice Web, http://www.riceweb.org/ (accessed 20 August 2004).

JRC, 2003. Global Land Cover 2000 database. European Commission, Joint Research Centre, http://www.gvm.jrc.it/glc2000/ (accessed 30 June 2004).

Justice, C. O., et. al, 1998. The Moderate Resolution Imaging spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 36(4), 1228-1249.

Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, Z., Yang, L., and Merchant, J.W., 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, 21(6&7), 1303-1330.

増本隆夫, 2004. モンスーンアジア水田灌漑の多面的機能．農業土木学会誌, 72(7), 11-16.

三野徹，小林慎太郎，丸山利輔, 1982. 水田の地下水涵養機能ー濃尾平野の地下水収支解析を事例としてー．農業土木学会誌, 50(1), 11-18.

村上拓彦，斎藤元也，小川進，石塚直樹, 2001. VSW 指数を応用した水稲作付面積推定．日本リモートセンシング学会誌, 21, 330-341.

Okamoto, K., and Fukuhara, M., 1996. Estimation of paddy field area using the area ratio of categories in each mixel of Landsat TM. *Int. J. Remote Sens.*, 17(9), 1735-1749.

Pal, M., and Mather, P. M., 2003. An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification. *Remote Sens. Environ.*, 86, 554-565.

総務省, 2001. 総務省統計局のホームページ, http://www.stat.go.jp/ (accessed 30 June 2004).

Tateishi, R., Gang, W. C., and Perera, L. K., 1995. Land cover classification system for continental/global applications. *In: Proc. of the 15th Asian Conference on Remote Sensing*, 23-27.

Tennakoon, S. B., and Murty, V. V. N., 1992. Estimation of cropped area and grain yield of rice using remote sensing data. *Int. J. Remote Sens.*, 13(3), 427-439.

Wassmann, R., Lantin, R. S., and Neue, H. U., 2003. Methane emissions from major rice ecosystems. *Kluwer Academic Publishers.*

目 次

1 はじめに **1**
1.1 水田監視の重要性 1
1.2 既存の水田分布図作成手法の比較検討 1
1.3 本研究の目的 2

2 解析手法 **2**
2.1 水田分布図作成の概要 2
2.2 MODIS データの前処理 3
2.2.1 放射量補正/幾何補正/合成画像作成 3
2.2.2 評価基準画像の作成 3
2.3 ASTER データの前処理 4
2.3.1 放射量補正/幾何補正 4
2.3.2 教師データ用の水田分布図の作成 4
2.4 水田抽出モデルの作成 5
2.4.1 水田抽出モデル構築の際の仮定条件 5
2.4.2 線形判別式を用いた水田抽出のモデル化 5
2.4.3 統計データを用いた水田抽出モデルのチューニング 6

3 解析結果 **7**
3.1 水田分布図の作成 7
3.1.1 評価基準画像および水田判別率の算出 7
3.1.2 水田分布図作成結果の考察 7
3.1.3 水田 NDVI の時系列特性の考察 8
3.2 水田分布図作成結果の検証 9
3.2.1 ASTER との比較によるモデルの精度検証 9
3.2.2 既存の水田分布図および統計値との比較による考察 11

4 おわりに **15**

表 目 次

1 MODIS のチャンネル 1, 2, NDVI を用いて作成した評価基準画像の一覧. 3
2 水田分布図作成に用いた Terra ASTER データの一覧．表中の緯経度は画像中心での位置を表す. 4
3 東アジア (日本，北朝鮮，韓国) における稲作の形態と生産制約の一覧. 5
4 MODIS の評価基準画像から作成した水田判別率の一覧. 7

図 目 次

1 水田分布図作成の解析手順. 2
2 評価基準画像の頻度分布とカテゴリ面積比率との関係．図中の (a) はカテゴリ平均値の差を，(b) はカテゴリ内の分散をそれぞれ表している． 6
3 MODIS データから求めた 2001 年度の東アジア水田分布図 (250m 空間分解能)．画像の濃淡は，各画素における水田の面積比率を表しており，白の濃淡が濃いほど水田が多く含まれていることを意味している． 8
4 様々な土地被覆における MODIS NDVI の時系列変動の比較． 9
5 ASTER と MODIS から求めた水田分布図の比較．(c) と (f) は通常の分類を行った結果を表している．画像の濃淡は各画素における水田の面積比率を表しており，白の濃淡が濃いほど水田が多く含まれていることを意味している．図中の矩形領域は解析に使用した ASTER の範囲を表している. 10
6 ASTER および MODIS から求めた水田面積の比較．(a) は画素内面積比率を考慮した場合の推定値，(b) は通常の分類による推定値をそれぞれ表している． 11
7 提案手法を用いて求めた水田分布図と既存の水田分布図との比較．提案手法 (UT) のみが画素内面積比率を考慮しており，図中の白の濃淡が濃いほど水田が多く含まれていることを意味している． 12
8 既存の水田分布図から求めた都道府県別水田面積と統計値との比較． 13
9 既存の水田分布図から求めた国別水田面積と IRRI の統計値との比較． 14