MODIS 250m データを用いた中国の水田面積比率分布図の作成

竹内 渉¹・安岡善文

Mapping of fractional coverage of paddy fields over China using MODIS 250m data

4

1

2

3

Wataru Takeuchi and Yoshifumi Yasuoka

Abstract: In this study, spatio-temporal patterns of continuous paddy fields were examined using the 5 patterns observed in metrics calculated for 1-year of MODIS over China. Four analytical approached were used; calculation of temporal mean, maximum and minimum layers for selected metrics showing significant 7 spatial variability of channel 1, 2, NDVI; linear discriminant for input into the un-mixing analysis was 8 derived from the same multi-temporal metrics used for the classification product using National Land Cover Data (NLCD) set of China; the continuous percentage of paddy field was generated based on un-mixing 10 technique with the training data derived from the above mentioned NLCD data. The derived metrics were 11 not sensitive to time of year or the seasonal cycle and can limit the inclusion of atmospheric contamination. 12 The comparison of 250m MODIS product with the past efforts on 1km AVHRR, MODIS and SPOT-13 VEGETATION product, and statistics by IRRI showed that the finer resolution and its un-mixing played 14 a crucial role in depicting the paddy field cover over China. 15

¹⁶ Keywords: inundation, multi-temporal metrics, parameter tuning, spatio-temporal patters, un-mixing

17 はじめに

18 1.1 本研究の背景

19 中国において稲作は,歴史,文化,水環境,食料資源などの観点から極めて重要な意味を持つ。水田は米 20 を生産する場として重要であり,麦とともに中国の食料事情を左右する大きな要因である。今後の人口増加に

¹東京大学生産技術研究所

^{〒153-8505} 東京都目黒区駒場4丁目6番1号

よって食料不足が引き起こされる可能性も指摘されている。また,稲作は大量の水資源を必要とする農業形態
 の一つであり,河川,湖沼,井戸といった灌漑施設からの田畑への引水による水資源の枯渇が現実問題として
 深刻化しつつある¹⁾。さらに,水田は地球温暖化に大きな影響を及ぼすメタンガス (CH₄)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急務と
 なっている²⁾。現在のところ,稲の生育状況は,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,広い国土に散在する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。

しかし、衛星リモートセンシングによる水田の観測は、観測範囲の広さに起因する空間的な非均一性、デー 夕量に起因する計算量の増大,雲による障害などが問題となり,これまで期待されてきたほど十分な成果は 9 得られていない。大陸レベルでの水田分布図の作成には,空間的に広い観測範囲を有する可視赤外の衛星リ 10 モートセンシングが用いられてきた。代表的なものとして , IGBP が 1992 年から 1993 年にかけて取得された 11 Pathfinder AVHRRの正規化植生指数 (NDVI) データで作成した土地被覆分類図があり, これは現在のところ 12 全球レベルで得られる土地被覆分類図のうち,水田をカテゴリに有する唯一のものである³⁾。その他の例とし 13 ては,アジアリモートセンシング協会 (AARS) と千葉大学が Pathfinder AVHRR から作成した土地被覆分類 14 図⁴⁾ , 欧州の Joint Research Centre (JRC) が AVHRR と同様の機能を有する SPOT-VEGETATION のデー 15 タを用いて作成した土地被覆分類図², Boston 大学が MODIS データを用いて公開している MOD12 プロダク 16 トによる土地被覆分類図 $^{5)}$ などがある。しかし、いずれの分類図も空間分解能が $1 \mathrm{km}$ と粗く、各画素に 1 つ 17 のカテゴリを割り振っているため,水田のように空間的に複雑な分布形態をなしている土地被覆の表現方法と 18 しては不十分であると言わざるを得ない。 19

-方で, ERS-1, RADARSAT, JERS-1 をはじめとした合成開口レーダー (SAR) も水田観測には有効であ
 る。ERS-1のSARデータを用いて水稲の生長を観測が始まったのは 1995 年のことであり⁶⁾, RADARSAT
 のSARデータを使用し,中国での作付け時期の異なる4種類の水田に対して,経験式に基づいた稲の生長モ
 デルを組み入れて,米の収穫量と分布推定が可能であることが報告されている⁷⁾。マイクロ波センサは,雲の
 有無にかかわらず全天候型観測を行うことが可能であるため,水田の抽出に重要な田植え直後の水が張ってい

²Global Land Cover 2000 database. European Commission, Joint Research Centre (JRC), http://www.gvm.jrc.it/glc2000/

3 る時期と稲の成熟期はじめのデータを,雲に阻害されることなく確実に取得することが出来る⁸⁾。しかし,マ
 イクロ波のデータは,入射角が異なると後方散乱係数が大きく変化すること,データ取得の条件に応じて画像
 の状態が大きく異なり判読が難しいこと,スペックルノイズのため画素中に粒状の雑音が生じること,などの
 問題点も同時に指摘されている⁹⁾。そのため,光学センサに比べて分類精度は低く,分類精度を向上させるに
 は,比較的均一な耕作パターンを有する地域ごとのマスク画像や数値標高モデル (DEM) が必要となる¹⁰⁾。観
 測範囲の狭さや回帰日数の長さから考えても,大陸規模での水田分布図の作成に適しているとは現段階では言
 い難い。

。1.2本研究の目的

本研究では,観測範囲が広く高頻度に同一地点を観測可能な MODIS データを用いて中国全土での水田分布
 図の作成を行うことを目的とする。MODIS では空間分解能の粗さと雲によるノイズが問題となるため,既存
 の水田分布図と省別の水田面積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土地被覆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 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 Figure 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,教師データの作成,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。



Figure 1 Flowchart of rice paddy mapping.

。2.2 MODIS データの前処理

7 2.2.1 雲なし合成画像の作成

8 解析に使用した MODIS 画像は,2002 年1月1日から2002 年12月31日にかけて取得された Terra MODIS
 9 データから作成された48枚の8日間合成画像(MOD09)である。これは,放射量補正,大気補正,幾何補正

を施したのちに,雲を取り除くために8日間ごとに合成された高次プロダクトである³。本研究では,MODIS 1 の 36 チャンネルの中で最も高い 250m の空間分解能を有することと, NOAA AVHRR や NPOESS VIIRS と 2 の継続性を考慮してチャンネル1(赤)および2(近赤外)を使用した。まず, HDF-EOS フォーマットで配布さ 3 れているデータから画像部分を抜き出し、等緯度座標系に再配列を行った。次に、複数枚の画像をモザイクし 4 て広域の画像を作成し、北緯20度から50度、東経90度から125度(16800x14400画素に相当)を切り出した。 5 解析範囲は,中国のほぼ全域を含んでいる。作成した8日間合成画像を目視により判読したところ,雲南地方 6 の山間部を中心に雲が取り除かれていない地域が確認されたので,観測された候補画素の中からチャンネル1 7 の値が最小であるものを代表値として選択することにより48枚の8日間合成画像を集約し,24枚の15日間合 成画像を作成した。

10 2.2.2 評価基準画像の作成

11 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
 12 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
 13 考えられることである。従って,ノイズの影響を最小限に抑えるための何らかの方策が必要である。本研究で
 14 は,次のような要件を満たす評価基準画像を作成し,これをもとに水田面積比率分布図を算出した。評価基準
 15 画像は,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ため
 16 に作成するものである¹¹⁾。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 Table 1 に
 17 示した。

³Distributed Active Archive Center at NASA GSFC, http://daac.gsfc.nasa.gov/

Metic type	Ranking criteria: each channel is individually ranked ¹
Bi-weekly values	Minimum, median, maximum channel 1 reflectance values
Means	Mean of three, six and nine darkest channel 1 reflectance values 2
Amplitudes	Amplitude of channel 1 reflectance between maximum and minimum

Table 1 Multi-temporal metrics with MODIS Ch. 1, 2 and NDVI

 1 The same metrics are calculated for channel 2 and NDVI

 2 Mean of brightest values are used for NDVI

1

評価に使用したチャンネルは,24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72枚の 2 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), 3 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, 5 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 6 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 8 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シーン分の平均値は,観測期間に換算して15 9 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 10 値および値が高い方から3シーン分の平均値は,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 11 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¹²⁾。なお,チャンネル1、2の最小値 12 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 13 画像を作成した。 14

15 2.3 水田抽出モデルの作成

1 2.3.1 中国における稲作形態の分類

中国は,南部の亜熱帯地域から北部の亜寒帯地域まで幅広い気候区分に属しており,多様な稲作形態を持
 つ。そこで,中国における稲作形態の分類を Frolking (2002)より作成し,省ごとにまとめて Table 2 に示し
 た。Table 2 によると,中国では,西部のチベット自治区やウイグル自治区などを除いて,ほぼ全国において
 灌漑および育苗による一期作が行われている。また,冬小麦との二毛作も多くみられる。南部や南西部の一部
 においては温暖な気候と豊富な降水を利用して,二期作や三期作も行われている。本研究では,稲作形態と水
 田面積に関する統計データや行政区界データの入手のし易さを考慮した結果,省ごとにゾーニングを行い,互
 いに独立した 32 の水田抽出モデルを作成した。Figure 2 は,中国における各省の地理的位置と稲作形態の分
 類から見た 5 つの地域区分を示しており,32 の省は大まかに分類して,1.東北部/北部,2.華北平原/中央部/
 西部,3.南西部,4.黄河中流域から下流域,5.南部から成り立っている。

11 2.3.2 線形判別式を用いた水田抽出モデルの作成

12 水田抽出モデルを作成するために,次に示すような線形判別式を導入し,各評価基準画像の水田抽出能力を
 13 判定した。本研究で提案する水田抽出モデルは,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}
 14 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。

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

線形判別式の概念は,Figure 3 に示すように,評価基準画像の頻度分布とカテゴリ面積比率との関係で表さ
 れる。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。Figure 3 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の距離が離れていることになり,水田とそれ以外のカテゴリの判別が容易にな
 る。これをも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,ここに示された水
 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
 ベ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¹³⁾。



Figure 2 Geographical location of provinces in China; 1. Northeast/north, 2. North China plain, central and western, 3. Southwest, 4. Middle and lower Yangtze river, 5. Southern China

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

1 式 (2) に示されるように,ある評価基準画像における水田判別率 ψ_i は,水田に対応する画素の平均値 μ_{paddy} 2 と水田以外のカテゴリに対応する画素の平均値 μ_{others} との差を,水田に対応する画素における分散 σ_{paddy} で 3 除した式で表される。線形判別式を用いた水田面積比率分布の推定は次のような手順で行った。なお,教師 4 データとして使用した NLRS(National Land Cover Remote Sensing Data)は,1996年に作成された中国全土 5 を網羅する 1km 空間分解能の土地被覆分類図である。Landsat TM データ,航空写真,現地観測情報を用い,





| 中国全土を 867 にゾーニングした領域ごとに教師付き分類を用いて作成された $^{14)}$ 。

2 1. 水田に対応する画素ならびにそれ以外のカテゴリの画素の平均値と分散を NLRS から得られた教師デー

3 タから算出する

- $_4$ 2. 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, Figure 3 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
 抽出モデルを作成する
- 4. 省別水田面積を用いてモデルパラメタのチューニングを行い,最適値を用いて水田面積比率分布図を求
 める

。2.3.3 統計データを用いた水田抽出モデルのチューニング

10 教師データの情報は,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,ゾーニングした領域 11 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。本研究では,恣意

1	性を排除し再現性に優れたモデルの構築を念頭に置き,32の省ごとにゾーニングを行い,水田抽出モデルパラ
2	メタのチューニングを行った。土地被覆分類においては,決定木にパラメタを与える方法はよく用いられるが
3	結果を容易に調節できる点や再現性がある点で優れている ¹⁵⁾ 。なお,制約条件としては,中国農業科学院発行
4	の 2002 年全国水田面積統計データ ¹⁶⁾ を与えた。水田抽出モデルのチューニングは次のような手順で行った。
5	1. パラメタとして σ_{paddy} に着目し , $ ext{NLRS}$ から得られた平均値と分散を初期値として与える
6	2. 水田面積比率の分布モデルを省ごとにゾーニングした範囲に適用し水田面積比率を推定する

- 7 3. 推定した水田面積比率分布図から省ごとに水田面積を算出し統計値と比較する
- 8 4. パラメタである分散の値を増減させる
- ₉ 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

Region	Provinces	Multicrop rotation priorities		
1. Northeast/north	Heilongjang (黒竜江省), Jilin (吉林	Predominantly single cropping		
	省), Liaoning (遼寧省), Inner mon-			
	golia (内蒙古自治区), Xingiang (ウ			
	イグル自治区)			
2. North China plain,	Hebei (河北省), Shanxi (山西省),	Single cropping, winter		
central and western	Shaanxi (陝西省), Gansu (甘粛省),	wheat/rice, rice vegetable		
	Shandong (山東省), Henan (河南省),			
	Beijing (北京市), Tentin (天津市),			
	Ningxia (寧夏回族自治区), Qinghai			
	(青海省) and Tibet (チベット自治区)			
3. Southwest	Sichuan (四川省), Guizhou (貴州省),	Rice/rice/alfalfa, winter		
	Yunnan (雲南省) and Thionshin (重	wheat/rice/ rice/rice		
	慶市)			
4. Middle and lower	Jiangsu (江蘇省), Zheijiang (浙江	rice/rice/winter wheat,		
Yangtze river	省), Anhui (安徽省), Jiangxi (江西	rice/vegetable, rice/soybean,		
	省), Hubei (湖北省), Henan (湖南省)	rice/rice		
	and Shianghai (上海市)			
5. Southern China	Fujian (福建省), Guangdong (広東	rice/rice, rice/rice/rice		
	省), Guangxi (広西自治区), Hainan			
	(海南省) and Taiwan (台湾)			

 Table 2 Regional multi-cropping rotations in China (modified from Frolking, 2002)

3 解析結果

23.1 最適水田判別画像の算出

MODIS データを用いて作成した 21 種類の評価基準画像と教師データから,線形判別式を用いて水田判別率 3 を算出した。それぞれの評価基準画像のうち,水田判別率が最も高い最適水田判別画像をTable 3 に示した。表 4 中の数字は, NDVI, Ch. 1, Ch. 2の各評価基準画像に次のように割り振った番号に対応している; 最小値=1, 5 中央値=2,最大値=3,NDVIの値が高い方から(Ch.1,2の値が低い方から)3シーン分の平均値=4,6シーン 6 分の平均値=5,9シーン分の平均値=6,年間の較差=7。なお,1-4の内蒙古自治区,2-10の青海省,2-10の青 7 海省は,砂漠地域に相当し水田耕作がほとんど行われていないこと,水田面積に関して政府報告の統計データ 8 が存在しないことから解析から除外した。また,5-4の海南省は衛星データの解析範囲から外れていたので解 9 析から除外した。省ごとに選択された最適水田判別画像は、次のような特徴を持つ。 10

	NDVI ^a	Ch. 1 $^{\rm b}$	Ch. 2 $^{\rm b}$		NDVI ^a	Ch. 1 $^{\rm b}$	Ch. 2 $^{\rm b}$
1-1 Heilongjiang	3	1	5	3-1 Sichuan	4	1	4
1-2 Jilin	3	1	5	3-2 Guizhou	4	1	5
1-3 Liaoning	2	6	5	3-3 Yunnan	3	1	5
1-4 Inner mongolia	2	2	5	3-4 Thionshin	4	4	5
1-5 Xingiang	-	-	-	4-1 Jiangsu	3	1	5
2-1 Hebei	3	1	1	4-2 Zheijiang	3	1	5
2-2 Shanxi	1	6	1	4-3 Anhui	3	1	5
2-3 Shaanxi	3	1	5	4-4 Jiangxi	3	1	5
2-4 Gansu	1	3	6	4-5 Hubei	3	1	5
2-5 Shandong	3	1	5	4-6 Henan	3	1	5
2-6 Henan	3	1	5	4-7 Shianghai	1	2	1
2-7 Beijing	1	2	5	5-1 Fujian	3	1	5
2-8 Tentin	2	6	5	5-2 Guangdong	3	1	5
2-9 Ningxia	1	2	5	5-3 Guangxi	3	1	5
2-10 Qinghai	-	-	-	5-4 Hainan	-	-	-
2-11 Tibet	-	-	-	5-5 Taiwan	3	1	5

Table 3 List of selected MODIS metrics in China provinces for paddy fields mapping.

^a The numberling in the table follows the rule; minimum=1, median=2, maximum=3, three scenes of average from maximum=4, six scenes of average from maximum=5, nice scenes of average from maximum=6, maximum-minimum=7.

^b The numberling in the table follows the rule; minimum=1, median=2, maximum=3, three scenes of average from minimum=4, six scenes of average from minimum=5, nice scenes of average from minimum=6, maximum-minimum=7.

1

2

3

NDVI においては,全28省のうち17省においては最大値画像が,また3省においては高い方から3シーン 分の平均値画像が,最適水田判別画像であると判断された。このようにNDVIの値が高い画像において水田判

1 別率が高くなるのは,水田の表面が生長した稲で覆われている時期にこれらの画像が対応しているものと考え
 2 られる。一方で,1-4の内蒙古自治区,2-2の山西省,2-4の甘粛省,2-7の北京市,2-8の天津市,2-9の寧夏
 3 自治区,4-7の上海市では,NDVIの最小値もしくは中央値画像が,水田判別率が最大となる画像であると判
 4 定された。このようにNDVIの値が低い画像が対応する地域は,畑作地帯,砂漠地域,都市域などに相当し,
 5 水田面積が少ない地域に相当した.

チャンネル1においては,全28省のうち19省において最小値画像が最適水田判別画像であると判断された。
 このようにチャンネル1の値が低い画像において水田判別率が高くなるのは,田植え前もしくは田植え直後に
 水田の表面が水で覆われている時期にこれらの画像が対応しているものと考えられる。これは,小麦,大豆,
 トウモロコシといった稲作以外の耕作には見られない特徴であり,水田を抽出する上で重要な情報である。ま
 た,2-7の北京市,4-7の上海市でもチャンネル1の最小値画像が最適水田判別画像であると判断されたのは,
 都市域では年間を通じて反射率の変動が小さく,反射率が小さいためであると考えられる。

チャンネル2においては,全28省のうち24省において,低い方から6シーン分の平均値画像が最適水田判
 別画像であると判断された。近赤外を観測するチャンネル2もNDVIと同様に,稲が生長して水田の表面が植
 生で覆われている時期に対応する最大値画像において水田判別率が高くなると推測されたが,結果は異なって
 いた。その原因としては,合成画像の作成段階で取り除くことが出来なかった雲が最大値画像において存在し
 ていたことが考えられる。また,3シーン分ではなく6シーン分の平均値画像が最適水田判別画像であると判
 断された原因としては,年間のスペクトルパターンにおいて,作物の生長に起因するチャンネル2の反射率の
 上昇ピークが,二期作や二毛作などにより複数回存在したことに起因するものと推測される。

NDVI, チャンネル1, チャンネル2の評価基準画像の組み合わせをみると, NDVI:Ch.1:Ch.2=3:1:5 となる
 組み合わせが全28 省のうち16 省と最も多かった。特に,大水田耕作地域である黄河中流域から下流域および
 南部地域においては,都市部である上海市を除くすべての省においてこの組み合わせが水田判別率が最大にな
 ると判定された。これらの画像は,地表面に水が張っている時期と地表面が生長した稲で覆われている時のス
 ペクトルの特徴を抽出した結果であるものと考えられる。

₂₄ 3.2 水田面積比率分布図作成結果

次に,省ごとに選択された最適水田判別画像を用いて水田面積比率の分布モデルを作成した。これに,統計 1 値から得られた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。最終的に水 2 田面積比率分布図として得られた画像を Figure 4 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 3 表している。

トレーニングデータとの比較によるモデルの精度検証 3.2.1

19

MODIS から求めた水田面積比率分布図の精度検証を行うために, Landsat による分類結果から得られた検 証データおよび MODIS を使用した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。一期作の代 表範囲として瀋陽周辺 (北緯 40-44 度,東経 121-125 度) を,冬小麦との二毛作の代表範囲として上海周辺 (北 8 緯 29 - 33 度, 東経 118 - 122 度)を切り出して Figure 5 に示した。なお, 画像の濃淡は各画素における水田 9 の面積比率を表している。 10

Figure 5の(a) に示した瀋陽周辺の Landsat による検証データでは, 図中の中央を北東から南西方向に流れ 11 る遼東川の流域に大規模な水田が見られる。(b) に示した MODIS の面積比率図でも河川流域の大規模な水田 12 を確認することができるが,支流にあたる領域では Landsat では抽出されているが MODIS では抽出されてい 13 ない水田が多数見られる。画像右上の領域では , Landsat では抽出されていないが MODIS では抽出されてい 14 るなど誤分類と考えられる領域も見られる。また,Landsatでは図中に淡く表示されている比較的面積の小さ 15 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 17 り抽出されていない。全体的には, MODIS と Landsat の分類結果は, 互いによく対応がとれた分布図が得ら 18 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る。

Figure 5の(d)に示した上海周辺のLandsatによる検証データでは、図中の中央を西から東に流れる長江流 20 域および図中の中央に位置する太湖周辺に大規模な水田が見られる。(d)に示したLandsatでは水田が抽出され 21 ているが,(e) に示した MODIS ではそれが抽出されていない。瀋陽周辺における分類結果と同様に,Landsat 22 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 23 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。

1 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 2 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 ⁵⁾ およびメ 3 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¹⁷⁾, CASW Data Technology Co., Ltd が作成した NLGIS(National Land Cover Geographical Information System)⁴を収集し た。BUとUMDの土地被覆分類図は,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 6 いるが¹⁸⁾,水田のカテゴリは含まれていない。双方のプロダクトに含まれているカテゴリを目視判読で検討 した結果,水田に最も近い空間分布を有している cropland 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, 9 UT の分類図は 2002 年の衛星データを基に解析されたものである。提案手法を用いて求めた水田分布図と既 存の水田分布図を10kmの空間分解能に集約しFigure 6に示した。各図において濃淡が濃いほど水田が多く含 11 まれていることを意味している。 12

これら水田分布図の空間的分布特性を評価するために、省ごとに水田面積を算出し、中国農業科学院が発行 13 している統計値との比較を行った¹⁶⁾。既存の水田分布図から求めた省別水田面積と統計値との比較を,東北 14 部/北部,華北平原/中央部/西部,南西部,黄河中流域から下流域,南部の5つの区分ごとに Figure 7 に示し 15 た。衛星データから求めた推定値と統計値との間で相関係数Rを算出した結果, AARS, BU, JRC, NLGIS, 16 NLRS, UMD, USGS, UT の順に 0.185, 0.051, 0.047, 0.812, 0.854, 0.273, 0.427, 0.999 となった。UT 以外の 17 分類図においては , 衛星による推定値が統計値を大きく上回る結果となった。比較として用いた各分類図のう 18 ち, BU, JRC, UMD の推定結果は, cropland として定義されているカテゴリの面積を表しているため, その 19 他の分類図の結果よりも相関係数が小さく推定精度が低い。これら3つの分類図のうち,特に Figure 7中に+ 20 で示される華北平原/中央部/西部においては,統計値と比較して衛星による推定面積が過大評価の傾向を示し 21 ており,最大で10倍程度の差が生じている。これは,croplandとして定義されているカテゴリ中に占める水田 22 の割合は非常に低く、大半が小麦、大豆、トウモロコシといった畑作であることを反映しているものと推測さ 23 れる。また , や で示される黄河中流域から下流域あるいは南部においては , UT 以外のいずれの分類図に 24 おいても,衛星による推定値と統計値とは,北部と比較して相対的近い値が得られている。これは, cropland

⁴http://www.casw.com.cn/

として定義されているカテゴリ中に占める水田の割合が高いことを反映しているものと考えられる。一方で、
 UTの分類結果から得られた推定値は、いずれの省においても統計値と非常に近い値を有していることがわか
 る。省別の水田面積を拘束条件としてパラメタをチューニングしているため推定結果が統計値と近くなること
 は当然の結果であるが、トレーニングデータやその他の分類結果とも整合性のある空間分布特性が得られたこ
 とから、本研究で提案する手法の有効性が示されたものと考える。



UT paddy field map at China

Figure 4 Paddy field fractional coverage map over China in 2002 derived from MODIS 250m data.



(a) Shengyang (validation data) (b) Shengyang (fractional coverage) (c) Shengyang (discrete classifica-





(d) Shanghai (validation data) (e) Shanghai (fractional coverage) (f) Shanghai (discrete classification)

Figure 5 Comparison of paddy fields fractional coverage and validation data.



Figure 6 Comparison of paddy field cover map with other cropland maps derived from

AVHRR, MODIS and SPOT-VEGETATION.



Figure 7 Comparison of satellite derived paddy field and cropland area with paddy area

derived from CYB report in 2002.

,4 まとめ

本研究では,250m 空間分解能を持つ MODIS データを用いて,中国全土における水田面積比率分布図を作 2 成した。まず 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 3 画像を作成した。次に, MODIS の合成画像を用いて 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,中国農業科学院が提供している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評価を行った。次に,水田判別率の最も高かった評 価基準画像を省別に算出し,統計値から得られた水田面積を制約条件として収束計算を行うことにより,水田 面積比率分布図を作成した。Landsat データから作成した水田分布画像を用いて水田抽出モデルの精度検証を 行った結果,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 10 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、 11 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 12 入手し,省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 13 率分布図による推定値は,統計値と相関係数0.99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。 15

16 最後に,本研究で得られた知見および今後の方針を次に示す。

- NDVIが年間の最大値をとる時期は,稲が最大限に生長した時期に相当し,チャンネル1が年間の最小
 値をとる時期は,水田が灌水した時期に相当する。特に灌水時期の推定は,水田とその他の耕作地域を
 区別するために大きく寄与すると考えられる。
- 水田抽出に有効な評価基準画像の組み合わせから,北部の黒竜江省や吉林省,華北平原の河北省,陝西
 省,山東省,河南省,黄河中流域から下流域および南部の全域では,類似したモデルが構築された。
- 本研究で使用した水田抽出モデルでは、年間に一度以上水が張った時期と植生が繁茂したデータが得ら
 れた地点があれば、これを水田と判断しているにすぎない。従って、二期作や三期作の区別を行う、あるいは、同じ一期作でもいつの時期に水が張った水田なのか、などの情報を判別するためには、更なる
 解析が必要である。

- 本研究では、一年分のデータのみを解析対象としたにすぎないので、複数年に渡って同様の手法を適用
 - し,構築されたモデルの安定性や得られた水田面積比率分布図の空間特性を評価する必要がある。

謝辞

1

2

本研究で使用した MODIS データの入手に関して総合地球環境学研究所の松岡真如博士に多大なるご協力を 頂いた.ここに厚くお礼を申し上げる.また中国の省別水田面積データの入手には東京大学気候システム研究 センターの楊鵬博士にご協力を頂いた.ここに厚くお礼を申し上げる.

参考文献

- Brown, L. R., and Bernie, F. R., 2001. Worsening Water Shortages Threaten China's Food Security. *The Earth Policy Reader*, World Research Institute.
- Wassmann, R. et al.: Methane emissions from major rice ecosystems. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- Loveland, T. R. et al.: 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, 2000.
- Tateishi, R. et al.: Land cover classification system for continental/global applications. In: Proc. of the 15th Asian Conference on Remote Sensing, 23-27, 1995.
- Friedl, M. A. et al.: Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. Remote Sens. Environ., 83 (1-2), 287-302, 2002.
- Kurosu, T., Fujita, M., and Chiba, K., 1995. Monitoring of rice crop growth from space using ERS-1
 C-band SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 33(6), 1092-1096.
- Shao, Y. et al.: Rice monitoring and production estimation using multitemporal RADARSAT. Remote Sens. Environ., 76(3), 310-325, 2001.

- 8) Frolking, S. *et al.*: Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China. *Global biogeochem. cycles*, 16(4), 1091-1107, 2002.
- Rosenqvist, A.: Temporal and spatial characteristics of irrigated rice in JERS-1 L-band SAR data. Int. J. Remote Sens., 20(8), 1567-1587, 1999.
- Li, Y., et al.: Towards an operational system for regional-scale rice yield estimation using a time-series of Radarsat ScanSAR images. J. Remote Sens., 24(21), 4207-4220, 2003.
- DeFries, R. S. et al.: A new global 1-km dataset of percentage tree cover derived from remote sensing. Global Change Biology, 6, 247-254, 2000.
- 12) 竹内渉, 安岡善文: 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. 写真測量とリモートセンシング, 43(6), 20-33, 2004.
- Iikura, Y., and Yasuoka, Y.: Utilization of a best linear discriminant function for designing the binary decision tree. Int. J. Remote Sens., 12(1), 55-67, 1991.
- Liu, M., X. Tang, J. Liu, and D. Zhuang: Research on scaling effect based on 1 km grid cell data (in Chinese). J. Remote Sens., 5(3), 183-190, 2001.
- Pal, M. et al.: An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification. Remote Sens. Environ., 86, 554-565, 2003.
- Compiling committee of Chinese agriculture (ed.): Chinese agriculture yearly book (in Chinese). Agricultural press, Beijing, China, 2002.
- 17) Hansen, M. C. et al.: Global land cover classification at 1km spatial resolution using a classification tree approach. Int. J. Remote Sens., 21, 1331-1364, 2000.
- 18) Dickinson, R. E.: Land Processes in Climate Models. Remote Sens. Environ., 51, 27-38, 1995.

著者略歴

竹内 渉 (タケウチ ワタル)



1975年生まれ。1999年東京大学工学部土木工学科卒業。2004年東京大学大学院博士課程修了(社会基盤工 学専攻,博士(工学))。同年東京大学生産技術研究所入所,特任助手として MODIS や AVHRR を用いた陸域 生態系衛星観測の研究に従事する。2001年計測自動制御学会より論文奨励賞を,2001年,2002年日本写真測 量学会より学術講演会論文賞を,2005年日本写真測量学会より学会奨励賞を受賞。日本写真測量学会,日本リ モートセンシング学会,米国写真測量学会,米国物理学連合の各会員。

安岡善文 (ヤスオカ ヨシフミ)



1947年生まれ。1969年東京大学工学部計数工学科卒業,1974年東京大学大学院博士課程修了(計数工学専 攻,工学博士)。同年環境庁国立公害研究所(現国立環境研究所)入所,環境情報部,総合解析部等を経て, 1996年より地球環境研究センター総括研究管理官。1998年より東京大学生産技術研究所教授,現在に至る。 2001-2004年地球フロンティア研究システム,生態系変動研究領域長を併任。日本写真測量学会,計測自動制御 学会,環境科学会,米国電気電子工学会(IEEE)等の会員。2002-2004年日本リモートセンシング学会会長。 目 次

1	はじ	めに		1
	1.1	本研究	の背景	1
	1.2	本研究	の目的	3
2	解析	ī手法		4
	2.1	水田分	↑布図作成の概要	4
	2.2	MOD	S データの前処理	4
		2.2.1	雲なし合成画像の作成	4
		2.2.2	評価基準画像の作成	5
	2.3	水田抽	出モデルの作成	7
		2.3.1	中国における稲作形態の分類	7
		2.3.2	線形判別式を用いた水田抽出モデルの作成	7
		2.3.3	統計データを用いた水田抽出モデルのチューニング	9
3 解析結果				12
	3.1 最適水田判別画像の算出			
	3.2	3.2 水田面積比率分布図作成結果		
		3.2.1	トレーニングデータとの比較によるモデルの精度検証................	15
		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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16

4	ま	と	め
4	ま	E	の

 $\mathbf{22}$

表目次

1	Multi-temporal metrics with MODIS Ch. 1, 2 and NDVI	6
2	Regional multi-cropping rotations in China (modified from Frolking, 2002)	11
3	List of selected MODIS metrics in China provinces for paddy fields mapping.	13

図目次

1	Flowchart of rice paddy mapping	4
2	Geographical location of provinces in China; 1. Northeast/north, 2. North China plain,	
	central and western, 3. Southwest, 4. Middle and lower Yangtze river, 5. Southern China $$.	8
3	Cenceptual description of separation of category-means and variance between paddy and others.	9
4	Paddy field fractional coverage map over China in 2002 derived from MODIS 250m data. $\ .$.	18
5	Comparison of paddy fields fractional coverage and validation data	19
6	Comparison of paddy field cover map with other cropland maps derived from AVHRR, MODIS	
	and SPOT-VEGETATION.	20
7	Comparison of satellite derived paddy field and cropland area with paddy area derived from	
	CYB report in 2002	21