

高頻度観測衛星データを用いたインドシナ半島における農地の営農環境把握に関する研究

環境リモートセンシング研究室 西 紘史
向井幸男
力丸 厚

1. はじめに

インドシナ半島には世界有数の穀倉地帯が存在し、ここでのコメ生産は将来の食糧問題緩和を見込める地域といわれている。しかし、インドシナ半島を含む東南アジア一帯の農業は、日本におけるそれとは違い、画一的な営農方法はとられていない。それはこの地域が熱帯性の気候であり、一年を通じて農業を営むことができる気候であることもひとつの要因である。しかし、一方で洪水や干ばつなどで、ある一定の時期のみしか営農できない場合も存在する。また、日本における農業はほぼ全て灌漑農業であるが、この地域では降雨や洪水の水を利用する天水農業を行っている農地が数多く存在する。このように、インドシナ半島においては、水資源状態の不安定な状況が営農環境に大きな影響を与えていると思われる。

このような、広範囲における多様な営農形態を有する農地の把握は、地表面の状態を直接リモートセンシングで観測することが非常に有効であると考えられる。よって本研究では、広域高頻度の観測が可能な衛星画像を用いて、昼夜の地表面温度差解析と土地被覆分布情報から、利水状態に注目した、インドシナ半島における、農地の営農環境把握の検討を目的とした。

2. 解析対象地域と使用データ

解析対象地域はインドシナ半島地域とした。使用データとして、2000年3月～2001年2月、4月～10月の8日間合成EOS/TERRA MODIS Land Surface Temperature/Emissivity data set (MODIS-LST) (図2)、昨年中西らによって作成された、4時期の植生被覆密度画像(図3)と水域マスク⁽¹⁾、EC JRC (Joint Research Center) 作成の森林域マスクを用いた。検証用のデータとして、現地調査データ⁽¹⁾と、農業工学研究所作成の、高分解能衛星センサ画像を使用したカンボジア東南部土地被覆分布図⁽²⁾ (図4)を使用した。

3. 解析概要

本研究では、水の比熱・熱容量が、他の物質に比べ大きいことから、昼夜温度差に大きな影響を与えているのではないかと仮定し、昼夜温度差変化から利水状態の把握が可能ではないかと考えた。また、植生被覆密度の変化から、農地の営農時期の把握を行った。

よって、昼夜温度差画像と植生被覆密度画像を用い

て変動解析をすることによって、農地営農環境の推定を行い、検討を行った。

4.7 時期別合成・昼夜温度差画像作成

使用画像はNASAのEOS Data Gatewayより取得したMODIS-LST画像である。今回は雨季・乾季を考慮したうえで、最低限すべての時期において、陸域のデータを90%以上補完できるように、昼夜それぞれで最大値合成を行った。合成時期は7月～9月、10月～11月、12月、1月、2月、3月、4月～5月とした。6月はデータの欠損があまりにも大きかったので、除外とした。

そして作成した昼夜の画像間で差分を取り、昼夜温度差画像を作成した。その作成方法を以下に示す。

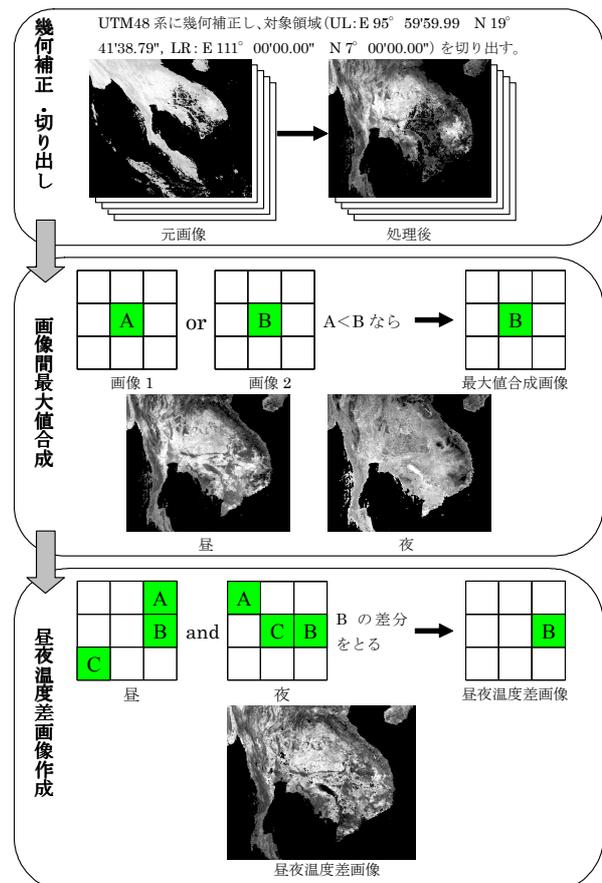


図1 昼夜温度差画像作成までの流れ

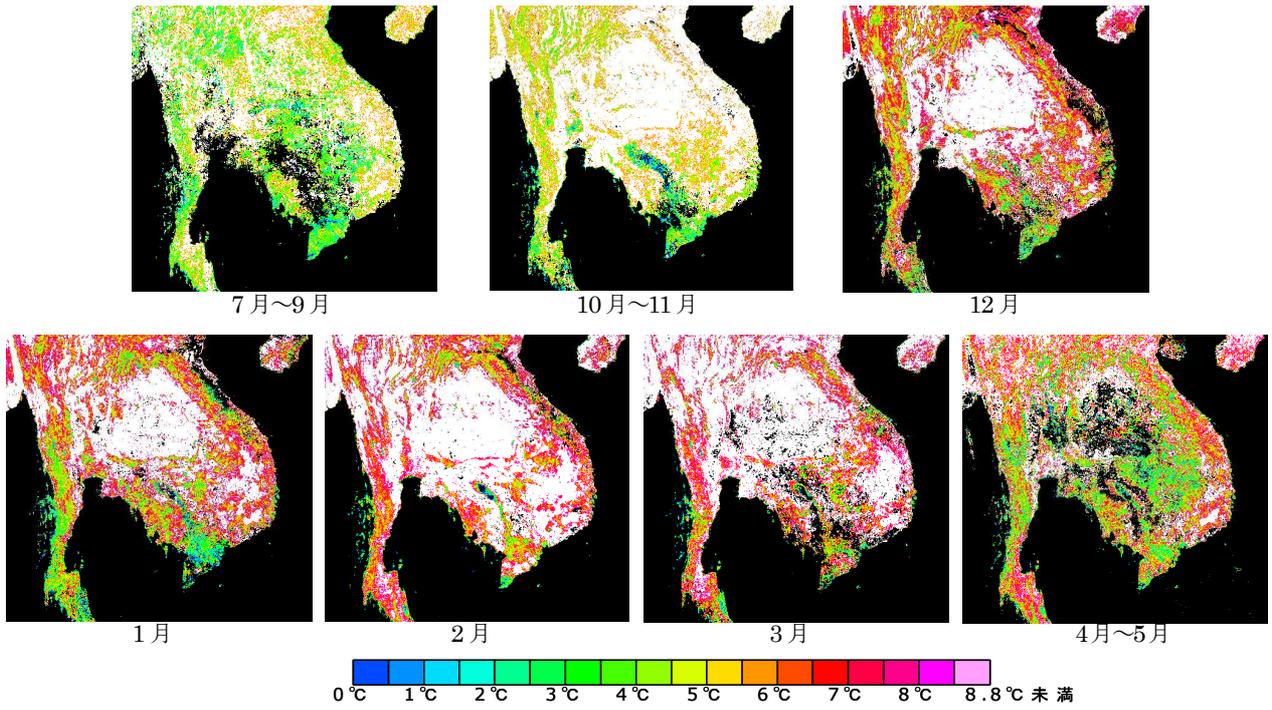


図2 7時期昼夜温度差画像

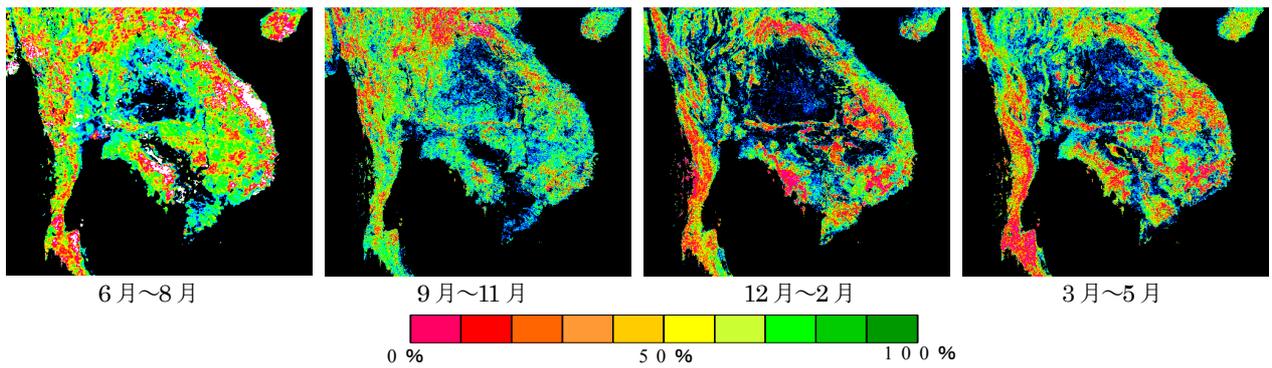


図3 植生被覆密度画像

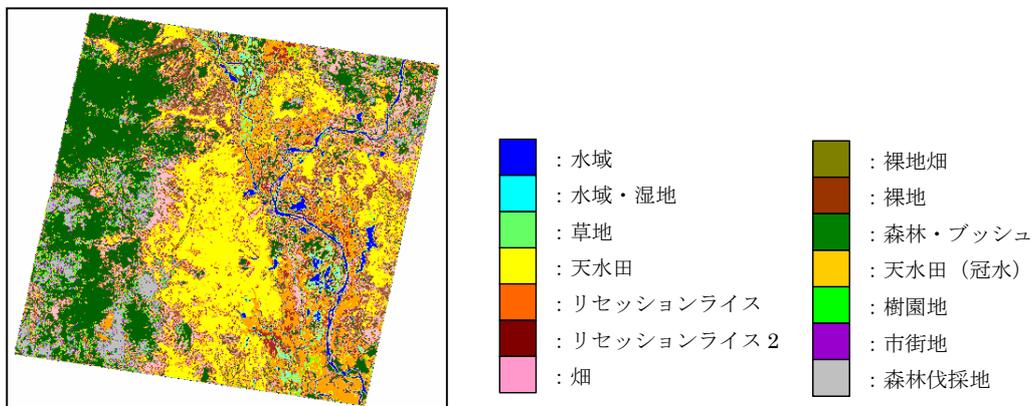


図4 LANDSAT カンボジア東南部土地被覆分布図

5. 温度差閾値の算出

昼夜温度差から利水状態の判別を行うために、閾値の算出を行った。その閾値は都市域（バンコク、ヤンゴン）の昼夜温度差データから求め、その閾値以上の温度差を示す場合は、乾燥状態にあると仮定した。算出方法を以下に示す。

$$\text{温度差閾値} = \mu_{1,2} - 2\sigma_{1,2}$$

- μ_1 : 雨季都市域平均昼夜温度差
- μ_2 : 乾季都市域平均昼夜温度差
- σ_1 : μ_1 の標準偏差
- σ_2 : μ_2 の標準偏差

雨季と乾季では平均昼夜温度差に大きな差が見られたため、別々に算出を行った。以上の式から雨季・乾季それぞれの閾値を算出した結果、雨季 6.5°C、乾季 8.8°Cとなった。図2の昼夜温度差画像は、その閾値を適用しており、白の領域は閾値以上の温度差を示している。

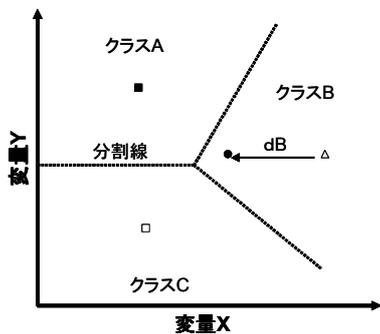
6. 昼夜温度差・植生被覆密度変動解析

7 時期の昼夜温度差・植生変動パターンを把握するために、K-means 法により、クラスター分析を行った。

6-1 K-means 法によるクラスター分析

クラスター分析は、似ているデータ同士は同じ振る舞いをするという前提のもとに、データをグループ化する分析である。この分析では、通常、データを多次元空間内の点とみなし、距離を定義し、距離の近いものを似ているとする（図5）。距離の計算では、カテゴリデータに対しては数量化を行い距離を計算する。

クラスター分析では分類分析と違い既存のクラスに対応する教師値が存在しない。これは教師なし学習と呼ばれ、データの傾向を明らかにするのに使われる。

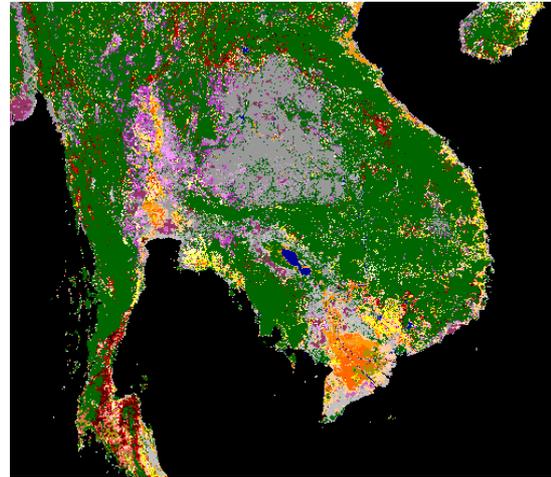


- この場合、画素データXYは
- : クラスAの平均値
 - △: クラスBの平均値
 - : クラスCの平均値
 - : 画素データXY
 - dB: クラスBと画素データの距離

図5 2次元の場合のクラスター分析

K-Means 法は Partitioning Method と呼ばれるクラスタリングの一種で、データを与えられた k 個のクラスターに分割し、クラスターの中心値をそのクラスターを代表する値とする。クラスターの中心値との距離を計算することで、データがどのクラスターに属するかを判断し、最も近いクラスターにデータを配分する。全てのデータに対してクラスターにデータを配分し終わったあと、クラスターの中心値を更新する。クラスターの中心値は全ての点の平均値である。上記の操作を、全てのデータとデータが属するクラスターの中心値との距離の合計が最小になるまで（更新されなくなるまで）繰り返す。今回のクラスター数 k の決定は、クラスターの中心値に対する標準偏差があまり変化しなくなるクラスター数とし、36 クラスとなった。

その結果を植生変動の傾向別に営農形態別カテゴリに割り振り（表1）、水域・森林マスクをオーバーレイして、営農形態別利水状態変動図を作成した。（図6）。



非農地①	: クラス 1,37		: クラス 21
非農地②	: クラス 3,4,6		: クラス 24
乾季中心営農型	: クラス 2		: クラス 25
	: クラス 8		: クラス 26
	: クラス 20		: クラス 27
雨季中心営農型	: クラス 5		: クラス 28
	: クラス 7		: クラス 29
	: クラス 9		: クラス 30
	: クラス 11		: クラス 31
雨季乾季混合営農型	: クラス 13		: クラス 32
	: クラス 10		: クラス 33
	: クラス 12		: クラス 34
	: クラス 14		: クラス 35
	: クラス 15		: クラス 36
	: クラス 16		
	: クラス 17		
	: クラス 18		
	: クラス 19		
	: クラス 22		
	: クラス 23		
			多期作型
		森林域	緑色
		水域	青色
		海域	黒色

図6 営農形態別利水状態変動図

表1 営農型別に割り振ったクラスと各クラスの利水状態・植生被覆状態の変動

■ : 乾燥状態 ■ : 営農時期

※単位 °C

カテゴリ	クラス	7月~9月	10月~11月	12月	1月	2月	3月	4月~5月
非農地①	1	4.5	4.8	6.8	5.5	8.6	3.9	4.7
	37	1.0	0.6	1.5	0.8	0.9	0.6	0.8
非農地②	3	6.6	9.3	12.5	12.7	16.1	15.3	5.9
	4	6.3	8.9	12.5	11.9	16.3	13.5	5.8
	6	7.4	9.5	11.8	11.6	15.0	13.4	6.9
乾季営農型	2	5.1	5.8	6.6	5.9	9.8	7.4	7.6
	8	4.9	5.0	6.1	4.8	6.9	6.8	6.4
	20	4.3	4.3	5.4	4.2	6.8	6.0	5.7
雨季営農型	5	7.4	8.0	11.4	11.0	14.8	12.1	6.6
	7	6.6	8.1	9.4	9.9	13.2	12.2	7.4
	9	7.7	8.7	11.1	11.4	14.5	14.1	8.7
	11	5.6	7.4	8.7	9.7	12.7	10.9	6.3
	13	7.0	7.5	9.2	10.1	12.6	13.8	8.7
雨季乾季混合 営農型	10	6.2	7.7	8.8	8.5	11.6	9.6	6.6
	12	6.4	7.5	7.8	7.8	10.3	10.5	7.5
	14	6.6	7.4	8.6	8.6	11.2	10.3	6.9
	15	6.6	7.0	7.6	8.2	10.3	11.7	8.1
	16	6.7	6.9	7.4	7.9	9.5	10.7	7.2
	17	6.1	7.1	6.9	6.9	9.2	8.8	7.6
	18	6.0	7.1	5.6	6.0	7.9	7.7	6.6
	19	6.6	7.1	8.0	7.9	9.6	9.9	7.8
	22	5.3	5.7	5.7	5.3	6.8	6.4	5.3
	23	5.7	6.2	5.2	5.4	6.9	6.8	6.0
多期作型	21	5.8	6.3	6.2	6.1	7.7	7.7	6.4
	24	6.0	6.6	6.7	6.5	8.5	8.2	6.3
	25	5.4	5.8	5.9	5.5	7.0	6.6	5.4
	26	6.3	7.0	6.5	6.5	8.1	9.3	7.2
	27	5.7	5.8	6.2	5.7	7.1	7.0	5.8
	28	6.4	6.7	6.9	7.2	8.5	9.7	7.0
	29	5.9	6.4	6.5	6.2	7.8	7.9	6.1
	30	6.3	7.2	5.3	5.7	7.2	7.5	6.7
	31	6.3	6.4	6.4	6.3	7.1	8.3	6.4
	32	6.6	6.8	6.6	6.6	7.8	9.1	7.0
	33	6.3	6.7	5.9	5.9	7.5	7.7	6.4
	34	5.9	6.1	5.6	5.5	7.0	7.0	6.0
	35	6.5	6.3	6.0	5.8	6.9	7.3	6.2
36	5.9	6.2	6.1	5.7	7.0	7.1	5.8	

表1は植生被覆密度変動の傾向別に、営農形態別カテゴリに割り振った結果である。各クラスの上側に各時期の平均昼夜温度差と利水状態、下側に植生被覆状態を示している。利水状態は、5において都市域昼夜温度差から算出された温度差閾値を用いて、閾値以上の温度差を示す場合を乾燥状態とした。植生被覆状態は31%以上を示している場合を、営農状態とした。

7. 営農環境の推定・考察

表1を見てみると、各営農形態の利水状態変化の特徴が見られる。乾季中心型農地は1年を通して乾燥状態になる時期が少なく、雨季の昼夜温度差は他の営農形態の農地と比べて、低い値を示している。これはリセッションライス（雨季時の洪水や降水の水を利用して、乾季に農業を行う農地。洪水の際には水中に没している農地も多々ある。）の利水状態変化と酷似している。

雨季中心型農地は一年の大半が乾燥状態にあり、天水田・畑の利水状態を表している可能性が高い。

多期作型については、乾燥時期が雨季と乾季に定期的に訪れているクラスがある。これらは、その規則的な動きから、この時期に収穫時期を迎えている農地が多いからではないかと思われる。また、全体的に利水状態は一年を通して良好であることから、やはり灌漑施設の整った農地である可能性が高く、そのため多期作が可能であると考えられる。

雨季乾季混合型農地については、多期作型と同様に定期的に乾燥状態になるという特徴が見られた。このことから、このカテゴリの営農環境は、多期作型ほどではないが、2期作以上行っており、灌漑施設がある程度整っている農地であると推測される。

非農地①②は、一年を通して植生が低いカテゴリであるが、利水状態変化に2通りの変化があった。よって、①は水域で②は裸地だと思われる。

8. 営農形態別利水状態変動図の検証と考察

作成した営農形態別利水状態変動図の検証には、MODISよりも比較的高分解能である、図4のLANDSATによるカンボジア東南部土地被覆分布図のデータと、昨年中西らによって取得された、現地調査データを用いて行った。

8-1 高分解能センサ画像による検証と考察

高分解能センサ画像による検証は、検証画像の各カテゴリでマスクを作成し、同領域における営農形態別利水状態変動図の、クラス別検証画像カテゴリ面積占有率を算出した（図7）。そして、その結果と表1およ

び営農形態別利水状態変動図を照らし合わせ、考察を行った。

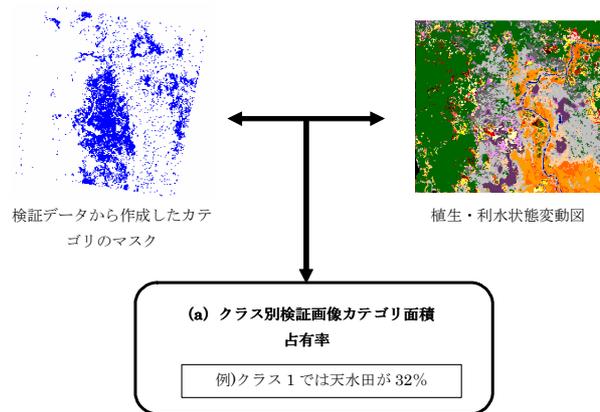


図7 クラス別検証画像カテゴリ面積占有率の算出

表1のカテゴリ別にそれぞれの検証結果を考察する。低植生は植生が一年を通じて低い状態にあるカテゴリである。しかし、利水状態の変化に、大きく分けて2つの傾向が見られた。1：乾燥状態にならない場合と、2：大半の時期が乾燥状態の場合である。まず1の場合に当てはまる、クラス37におけるクラス別検証画像カテゴリ面積占有率は、水域で41.2%あり最も高い。その分布を見てみると、主にトンレサップ湖中央部や湖水など、比較的水量の豊富な領域に分布している。よって、植生被覆密度と昼夜温度差が一年を通してともに低いものと思われる。

クラス1は天水田が占有率30%以上で最も多く存在している。しかし、植生被覆密度が年中低い。さらに天水田は、雨季の降水等を利用した農業が主であり、乾季に昼夜温度差が低いことは考えづらい。この原因としては、画像データ欠損の影響により（欠損データは画素値0なので）、植生被覆密度・昼夜温度差がともに低く算出されたことが考えられる。分布は河川やトンレサップ湖沿岸部など、比較的浅い水域に分布しているが、トンレサップ湖周辺、下流域、沿岸部などにも多く分布している。沿岸部については、海水の影響で昼夜温度差が小さくなっていることが考えられる。

2の場合であるクラス3,4,6においても、天水田において高い面積占有率を示している。特にクラス4では61.3%もあり、このクラスの利水状態変化も天水田のと酷似している。植生が低いのは、クラス2の場合と同様、植生被覆密度データの欠損などが原因ではないかと思われる。クラス3,6は裸地畑、畑、裸地、などにもある程度高い占有率をしめしていることから、それらのミクセルであるものと考えられる。

高植生型は、一年中植生が高い状態にあるカテゴリである。昼夜気温差も同様に、ほぼ安定している。こ

のことから灌漑施設の整った農地である可能性が高い。その理由として、灌漑施設の整っている、タイのチャオプラヤ河中流域～上流域に多く存在が見られることが挙げられる。もしくは、このカテゴリの各クラスが森林・ブッシュにおいて面積占有率が極端に高い値を示していることと、森林マスクの境界線に多く存在していることを考慮すると、低木地・森林・ブッシュであることも考えられる。また、これらのことは雨季乾季混合高植生型農地にもいえることである。このカテゴリの特徴としては、利水状態は定期的に乾燥状態と非乾燥状態を繰り返していることが挙げられる。おそらく、乾燥状態の時に収穫を迎えているものと思われ、2期作の可能性も示唆される。しかも、分布は高植生型と同じチャオプラヤ河流域と、同じく灌漑施設の整っている、ベトナム南部のメコンデルタに多く分布している。以上のことから、高植生型は森林・3期作農地、雨季乾季混合高植生型はブッシュ・2期作農地の可能性があると考えられる。

乾季中心高植生型のクラス2,8,20は、主にリセセッションライスの占有率が高い。リセセッションライスとは7でも述べたが、乾季に作付けする農地であり、雨季時の水を利用する。このことから、その利水状態変化をよく捕らえているものと考えられる。リセセッションライス農地の分布はカンボジアにおける、メコン河下流域などに多く分布している。営農時期ではない雨季に昼夜温度差が低いのは、洪水の影響で利水状態は良好であるが、営農できないため植生が低いものと考えられる。そしてこのカテゴリの3つのクラスがそろって2月に利水状態が低下しており、この時期に収穫を行っているものと思われる。

雨季中心高植生型のクラスは、天水田または畑で高い占有率を示している。利水状態の変化は、ほぼ乾燥状態か、そうでないとしても、降水量が多くなる4月～9月である。また、これは多くが河川から離れた内陸部に存在しており、主に雨季時の降水を利用する天水農業と見られ、天水田・畑の利水状態をよくとらえているものと思われる。特にクラス5と9にその傾向が強く見られる。

8-2 現地調査情報による検証と考察

昨年10月、中西らにより収集された現地調査情報を用いて、全14点で検証・考察を行った。図8に全体の調査地点を示す。

検証の結果、14点中9点で、昼夜温度差変化からの利水状態・営農環境推定と現地との適合が見られた。特に乾季中心型農地であるクラス2,8は、現地の利水状態をよく把握していると思われた。

また、非農地のカテゴリが現地の状況で農地である場合があったことなどから、やはり植生被覆データの欠損が大きく影響していると考えられる。

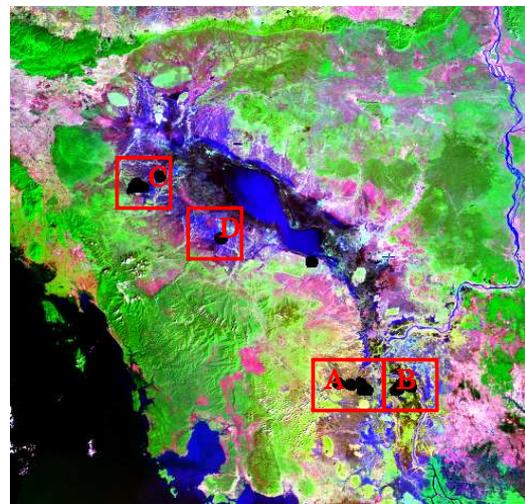


図8 調査地点全域図

9. まとめ

本研究では、水の比熱・熱容量が、地表を構成する他の物質に比べ大きいという物性に着目し、高頻度観測衛星の熱画像を用いて、日中と夜間の地表面温度差の時期変化から、農地の利水状態変化の把握し、同時に植生の変化を把握することで、農地の営農環境把握の検討を行った。以下に本研究の結論を示す。

高分解能センサ衛星画像データから作成された分類画像と現地調査情報を使用した検証により、いくつかのカテゴリ、およびクラスとの整合が見られた。特に乾季中心高植生型の利水状態変化が、リセセッションライス等の植生・利水状態の変化などとよく適合した。雨季中心営農型においては、天水田・畑との適合が見られる。非農地は大きく分けて、水域と裸地域の2種類の特徴が見られたが、植生被覆密度画像データ欠損の影響により、非農地であると判断された可能性も考えられる。

以上より、営農形態別に昼夜温度差変化から利水状態の変化をとらえることによって、農地の営農環境を広域的に把握できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 中西芳彦他：メコン河流域における雨季・乾季を考慮した現況農地分類と湛水分布の把握、日本写真測量学会平成16年度年次学術講演界発表論文集 pp263-266 2003
- 2) 小川茂男他：メコン河下流域における水田作付状況の把握：2004