

精密分光放射測定による小麦の分光放射特性の季節変化  
・地球観測衛星による詳細な陸域植生のマッピングに向けて・

樋口篤志<sup>1</sup>・檜山哲哉<sup>2</sup>・高橋厚裕<sup>3</sup>・西川将典<sup>4</sup>・李薇<sup>4</sup>・飯島雄<sup>5</sup>  
吉田聖治<sup>4</sup>・福嶋義宏<sup>3</sup>

- 1: 千葉大学・環境リモートセンシング研究センター
- 2: 名古屋大学・地球水循環研究センター
- 3: 総合地球環境学研究所
- 4: 名古屋大学・大学院環境学研究科
- 5: 千葉大学・大学院自然科学研究科

## 1. はじめに

昨年度の合同研究集会で報告したように、長武黄土高原農業生態試験所に設置した FROS (Flux & Radiation Observation System) 中の分光放射計測システムはデータ収録プログラムの version up により安定した連続計測が可能となった。2004 年 5 月末の測器設置から既に 2 年が経過しているが、まずは上記分光放射計測データも含め、FROS 観測要素の時系列変化を図化し、データ取得状況を確認する。

## 2. FROS におけるデータ取得状況

### 2.1. 微気象要素

図 1～図 3 に各微気象要素（下から 2m 気温、2m 相対湿度、全天日射量、直達日射量、正味長波放射 [ $L_{net}=L_{\uparrow}-L_{\downarrow}$ ]、および降水量）の季節変化を示す。縦軸は北京標準時(BST)、横軸は通年積算日数(Day of Year)である。図中黒くなった時間は計測が行われていない(欠測)、あるいはデータが有意でないこと(例えば、日射量の図の上下が黒くなっている部分は、日没後のためデータに意味が無いなど)を示している。なお、データロガー自身はバッテリー駆動であるため、商用電源が停止されてもロギング自身は行われるが、温湿度計の通風ファンへの電源供給は DC ではなく AC であるため、データ自身は得られるが得られたデータの信頼性は著しく落ちる(過大評価となる)。そのため、同時に収録されるロガー電圧(バッテリー電圧)も参照し、商用電源が停電で落ち、ロガー電圧が 12.5V 以下となった際にも欠測扱いとするようにプログラミングを行い(転倒マス式雨量計に関しては通風の影響は受けないため、この制限はかけていない)、図を作成したことを付記しておく。

図 1～図 3 を俯瞰すると、以下の特徴が認められる。

- 停電によるデータの欠測が非常に少ない。これは FROS のシステム設計もさることながら、現地スタッフの対応の良さにも助けられている。
- 2004 年～2006 年の全データを眺めた場合、明確な乾燥期と湿潤期が認められる。これは直達光の減少→正味長波放射量の減少(雲量に対応する)→相対湿度の増加(降雨イベントに対応)という順番を踏んでいる。

- 雨は一時期にまとめて降る半乾燥域の特徴的な降水特性が認められる。ただし、IOPでは雨量計で捉えられないドリズル（霧雨）や霧が多いことも付記しておく。

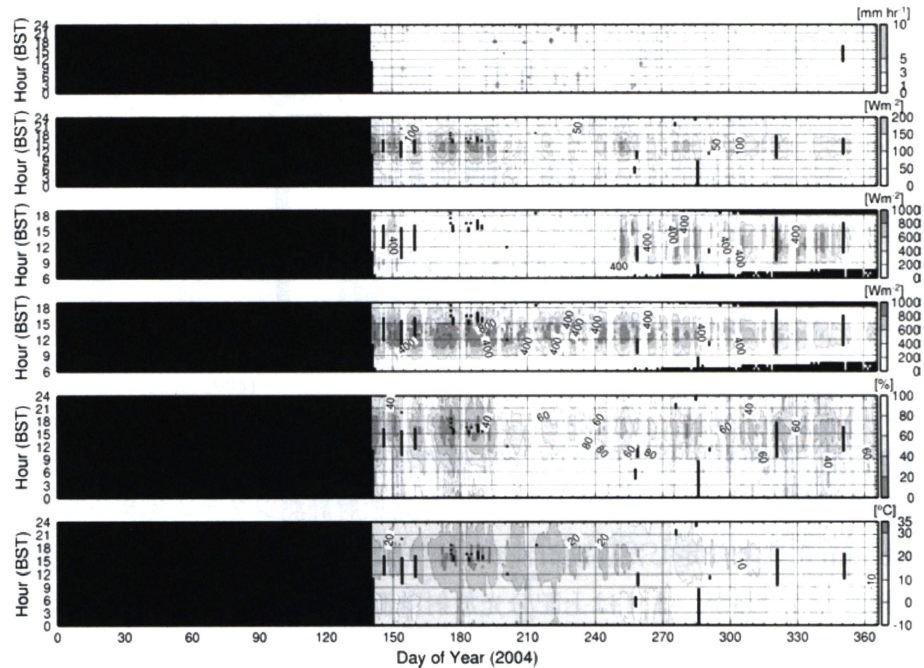


図 1: FROS で得られた 2004 年の各種微気象・放射要素の季節変化。縦軸に時間 (BST), 横軸に通年積算日数 (DOY)を示す。要素は下から 2mでの気温 (°C), 2m での相対湿度 (%), 全天日射量 ( $W m^{-2}$ ), 直達日射量 ( $W m^{-2}$ ), 正味長波放射量 ( $W m^{-2}$ ), および降水量 ( $mm hour^{-1}$ ) である。黒いところは欠測を示す。

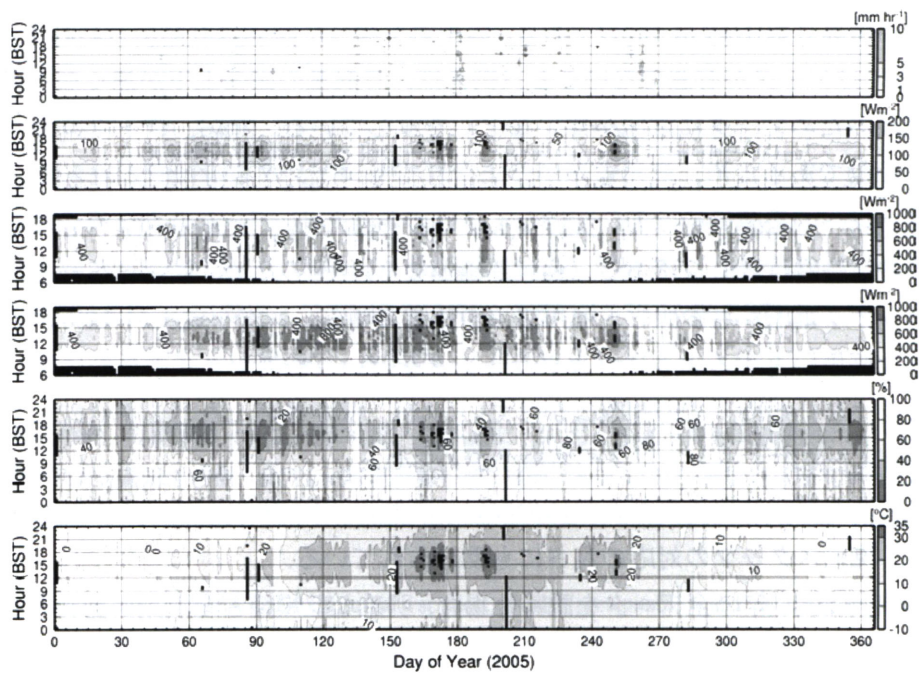


図 2: 図 1 と同じ。ただし 2005 年。

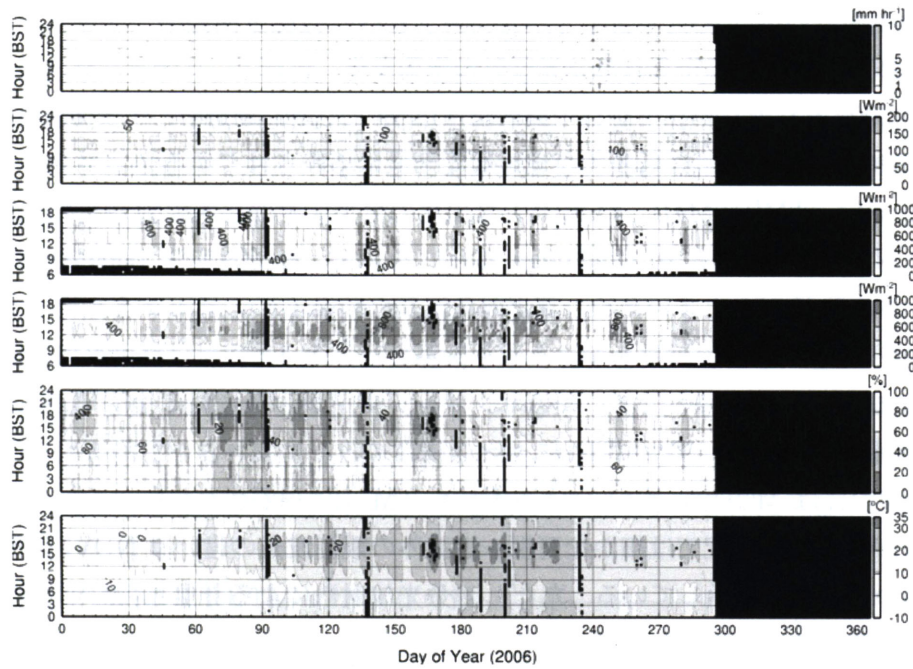


図3: 図1と同じ。ただし2006年。

## 2.2. 地中水（土壌水分）

例として2005年の季節変化を図4に示す。表層は比較的弱い降水イベントにも対応し土壌水分は増加するが、20cmを境にして応答特性が鈍くなっている。20cm以下では強い擾乱によってもたらされた降水によって涵養され、その後緩やかに減少する。これは黄土特有の応答特性であると考えられる。

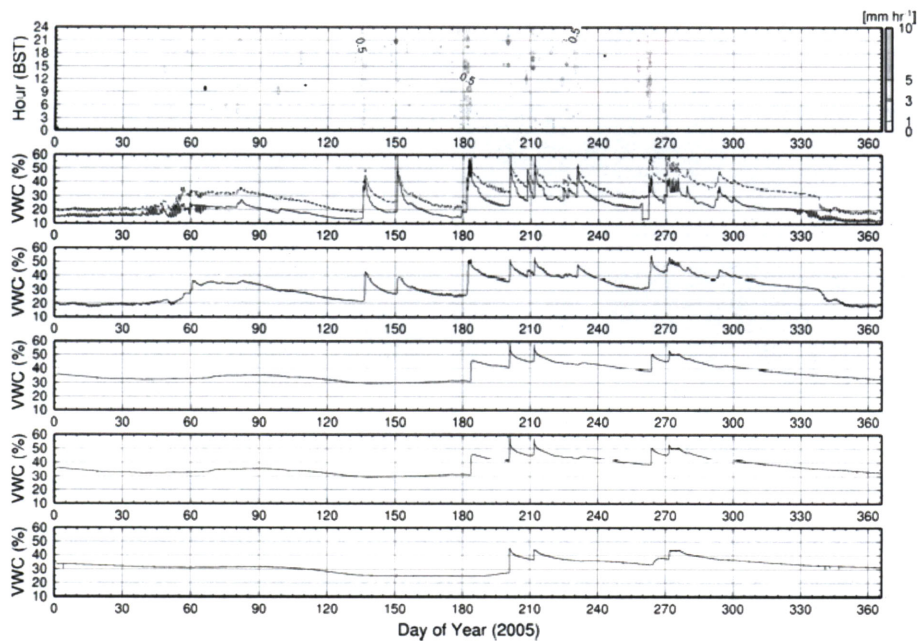


図4: FROS で得られたTDRによる体積含水率の季節変化(2005年). 下から80cm, 40cm, 20cm, 10cm, 5cm (2カ所), 単位は%, および降水量をそれぞれ示す。

### 3. 分光反射特性の季節変化

#### 3.1. 分光放射計によって得られた分光反射の季節変化

図5に2005年における、下から午前衛星 (Terra で代表) 通過時, 午後衛星 (Aqua で代表) 通過時の分光放射特性, 代表的な地球観測衛星に搭載されている光学センサー(MODIS, AVHRR, GLI, TM[ETM+]), の NDVI 算出用の分光反射率を本観測データから算出し, 算出した NDVI, 波長間差分 (Red edge 抽出) を示す. 波長間差分 (傾き抽出) は得られるチャンネル数が 256 と多いため, 算出対象波長の前後 2 つのチャンネルデータ (総サンプル5つ) を用い, 重み付けをかけた傾き計算を行った (重み付け移動平均と同様の処置である). まず特徴的な点として, 疑似センサーデータから得られる NDVI 値に関しては AVHRR を除いて殆ど差がない(TM による NDVI のみしかプロットされていないように見えるが, 実際には MODIS, GLI によるそれも TM 上に線が引かれている). このことは, 従前の NDVI による研究では細かな可視~近赤外の観測波長の違いは NDVI 値そのものには強く効かないことを示している. ただし, 分光放射計による計測は積分球での計測であるため, 視野角による違いを考慮することができない. そのため, この知見がそのまま衛星計測での NDVI の類似性に直接繋がるとは現段階では断言できない.

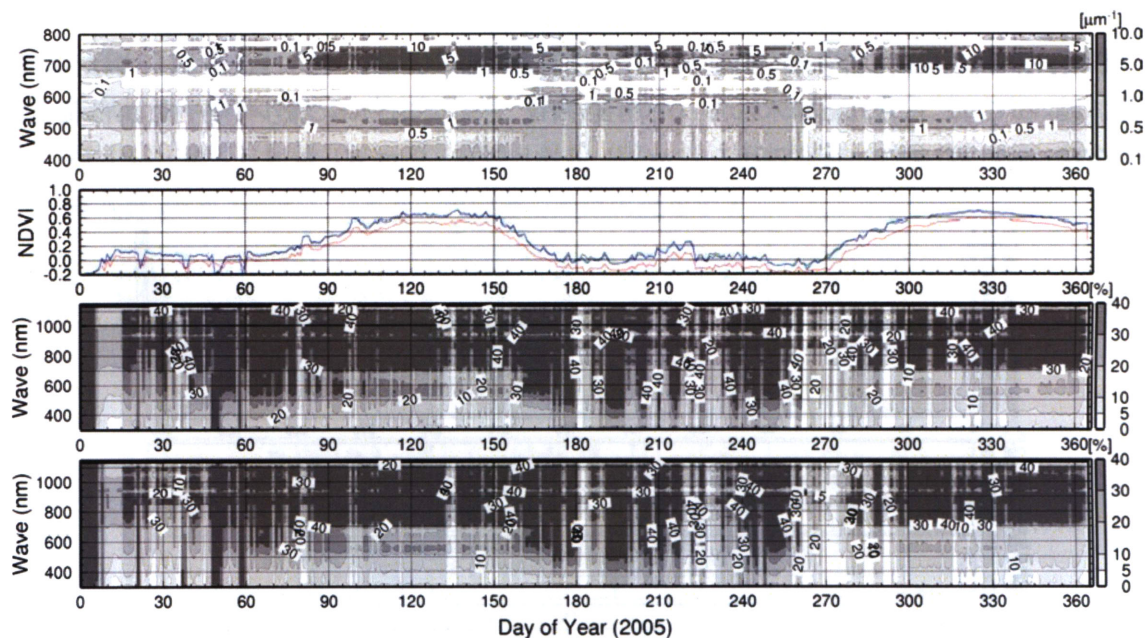


図5: 分光放射計によって得られた分光反射特性, 各種衛星搭載光学センサー相当の NDVI, および波長間差分の 2005 年における季節変化. 下から Terra 衛星通過時(10:45BST)の分光反射特性, Aqua 衛星通過時(13:45BST)の分光反射特性, 各種衛星搭載光学センサー相当の NDVI (MODIS を黒, AVHRR を赤, GLI を緑, TM[ETM+]を青でそれぞれ示す. Terra 通過時のデータから作成), および波長間差分 (同じく Terra 通過時より作成). 波長間差分の計算法に関しては本文を参照のこと.

その証拠として、午前衛星通過時の分光放射特性と午後衛星通過時の分光放射特性は似て非なる者となっており、これは、2つの要因：太陽入力光の日変化に伴う反射特性変化、（特に麦が植えられている時期では）麦の植物生理（日変化特性）に伴う反射特性変化、が混在して得られた結果であり、全体として、緑付近の反射率は午後衛星通過時の方が高く、一方麦が開花し、穂を着け枯れていくフェーズではレッドエッジのシフトでは午後の反射特性の方が早くシフトしている。

波長間差分はより明瞭に麦が枯れていく過程をモニターしている。赤と近赤外の境(700nm: Red Edge)の波長間差分は150DOYから変化を始めている。地上計測NDVIでもほぼ同時期から減少が認められるが、2006年のケースでは700nmの波長間差分の減少は130DOYに表れているのに対し、NDVIでの減少は130DOYでは緩やかであり（急激な減少は2005年と同様150DOYであった；図省略）、年による応答特性の違いが認められている。

図6にAVHRR, MODIS, TMのNDVIの散布図を示す。横軸がMODIS baseのNDVIであり、縦軸が同一観測日での他のNDVIである。TM（青）に多少のばらつきがあるが、ほぼ1:1の関係にあり、AVHRR（赤）は全体として過小評価方向にバイアスがかかった状態であることがわかる。AVHRRのch.2(近赤外)は水蒸気の吸収帯も含んでいるため衛星での計測ではこの知見にプラスして水蒸気補正が正しく行われている必要があるが、これらの結果はデータの連続性（AVHRR～SPOT Vegetation～MODIS product）の検証にも役立つ結果であると思われる。

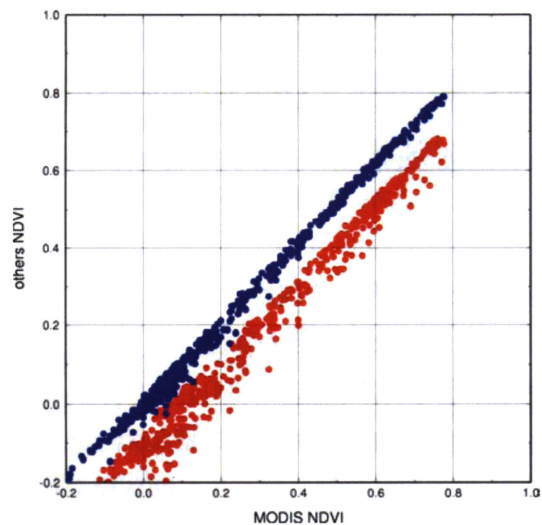


図6: MODISの分光反射率を用いて換算したNDVI(横軸)と、AVHRR(赤)、TM(青)のそれらとの関係

### 3.2. フラックスとの関係

図7に12m, 32mでの乱流計測で算出された顕熱・潜熱フラックスの季節変化を示す。2mでのフラックス(含むNEE)に関しては、麦の状態変化との対応が良いことが解析によって示されたので、ここではスケールアップ(地表面不均質性)との関連性、および12m, 32mの乱流計測の取得状況を示す意味合いを持つ。

図7より、麦の季節変化特性と12mおよび32mの水・熱フラックスとの関連性は殆ど認められない。これは言うまでも無くフットプリントの違いであるが、これらの得られたデータから地域の蒸発散量を算出する際には、スケールアップ的な発想よりも大気側のアプローチ(大気水収支、補完法とCBLモデルを併用した領域蒸発散量の算出等)を用いることの方が望ましい、ということを示唆させる結果でもある。

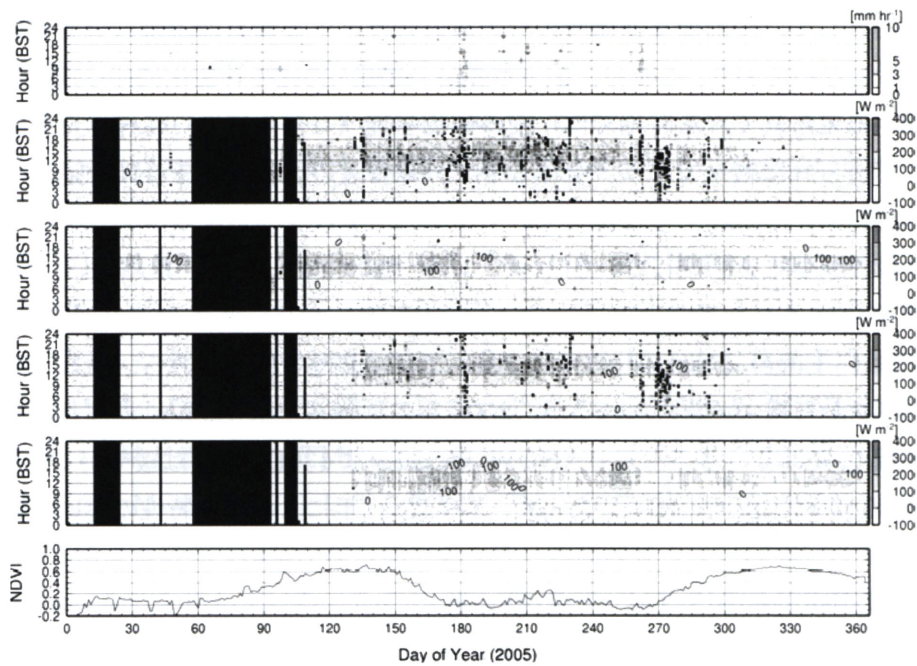


図 7: 2005 年での MODIS 相当の NDVI と各種フラックスの季節変化. 下から NDVI, 12m での顕熱フラックス, 同高度での潜熱フラックス, 32m での顕熱フラックス, 潜熱フラックス, 降水量を示す.

#### 4. まとめと今後の課題

まとめ, 及び今後の課題は以下の通りとなる.

- FROS での計測は 2004 年 6 月から継続して行われているが, 現地の協力もあり, 海外計測としてはかなり良質なデータが連続して取得されている.
- 分光放射特性に関しても同様である. また 2 年分のデータ蓄積により, 2005 年と 2006 年での応答特性の違いも得られている.
- 各種疑似センサーによる NDVI においては AVHRR を除き, ほぼ同じ値となった. これは観測波長の違い自身は NDVI 値にクリティカルには効かないことを示している. むしろ, 太陽高度やセンサー角度といった BRDF に関連する要素が強く値の違いとして表れる可能性が認められた.
- IOP データで得られた詳細な現地観測と, 分光放射計測で得られた分光反射特性の変化との関連性について, 詳細かつ丁寧な解析と論文化を急ぐ必要がある.
- プロジェクト最終年に向け, 黄土高原における正確な蒸発散量算出, 水循環過程理解のための研究 (スケールアップとスケールダウンの両方から) を他の研究チームも含めて早急に取り組む必要があると思われる.