

黄土高原での大気境界層観測計画 ー 進展状況と名大 CREST での事例紹介 ー

檜山哲哉・篠田太郎・樋口篤志・坪木和久
(名古屋大学・地球水循環研究センター)

1. はじめに

本研究グループは、地球温暖化や農業活動等による人為的な地表被覆の改変が、黄河流域における水循環の変動（特に大気境界層過程や雲・降水過程）に対して、どのような影響を及ぼすのかについて調べることを目的としている。そのために、従来データの空白域であった黄土高原における大気境界層観測とデータ解析、得られた観測データを用いた雲解像モデルによる数値実験、そして衛星計測による地表面（植生）状態の広域データ解析等により明らかにしていく。特に、当該地域における地表面状態と総観気象場（水蒸気場）の季節変化に伴う陸面－大気境界層過程と、それに付随した対流雲の発達過程に着目し、水文気象現象の把握と数値モデルにおけるパラメタリゼーションの改良を目指す。

2. 黄土高原での大気境界層観測計画

本研究では、典型的な黄土高原地域に位置する中国科学院・長武黄土高原農業生態試験所の観測圃場（北緯 $35^{\circ} 12'$ 、東経 $107^{\circ} 40'$ ）において、運動量・顕熱・潜熱・ CO_2 の各地表面フラックスを測定する。同様に、衛星計測の地上検証データを取得する目的で、高波長・高時間分解能の分光放射計も設置する。このために、高さ 30m の観測タワーを設置し、フラックス・放射観測装置を取り付ける。同時に、大気境界層と自由大気下端（地表面上 5km 程度までの大気）における三次元風速の鉛直分布と、大気境界層中・下層（地表面上 2km 程度までの大気）における気温の鉛直分布を、平成 15 年度に契約・購入したウィンドプロファイラーレーダにより測定する。以上のデータにより、大気境界層と自由大気間の運動量と熱輸送過程を様々な総観気象条件のもとで明らかにする。一方、大気境界層構造と対流雲の発達過程の関係を解明するため、大気境界層と自由大気間の水蒸気輸送過程を測定する必要がある。このため、マイクロ波放射計（平成 16 年度購入予定）を用いて地表面上 5km 程度までの大気における水蒸気量の鉛直分布を測定する。

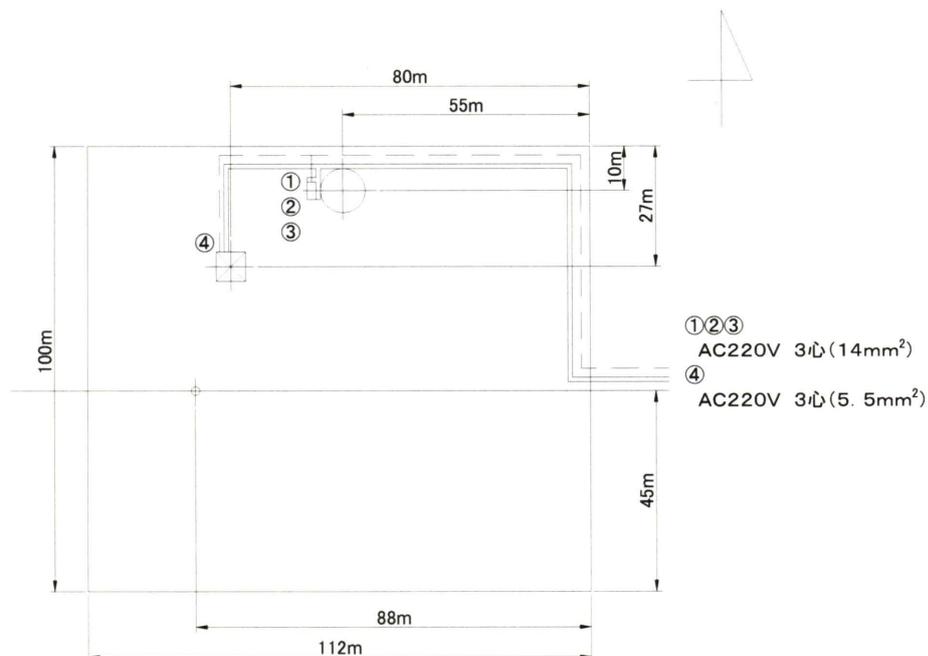


図 1 中国科学院・長武黄土高原農業生態試験所の西圃場における大気境界層観測装置の配置設計図

3. 名大 CREST での観測事例

3-1. マイクロ波放射計

科学技術振興事業団が行う戦略的創造研究推進事業の研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」の「湿潤・乾燥大気境界層の降水システムに与える影響の解明と降水予測精度の向上」(研究代表者: 中村健治・名古屋大学教授)の研究(以下、名大 CREST と略す)において既に購入し、中国安徽省・寿县気象局に設置されたマイクロ波放射計 (Radiometrics 社(USA)製・TP/WVP-3000) のデータについて、現時点で手元にある 2003 年 8 月 1 日~9 月 8 日のデータの初期解析を行った。マイクロ波放射計は本黄河プロジェクトにおいても平成 16 年度に購入を予定している高額な機器であるため、本報告ではデータの信頼性等の検討を行った。期間中、停電等を除いては、データの取得を行っていた。主な初期解析結果は、以下の通りである。

- (1) 全期間の時系列グラフから、1 日あたり 15 分間隔データの 하나가、欠測と判断される場合がある。ただし、この多くは生データとしては存在しているので、描画時のエラーと思われる。
- (2) 描いた時系列グラフは、温位、相当温位、水蒸気混合比、相対湿度の高度-時間断面図である。その他、Liquid Water Content も描画し、チェックを行った。高度-時間断面図は全期

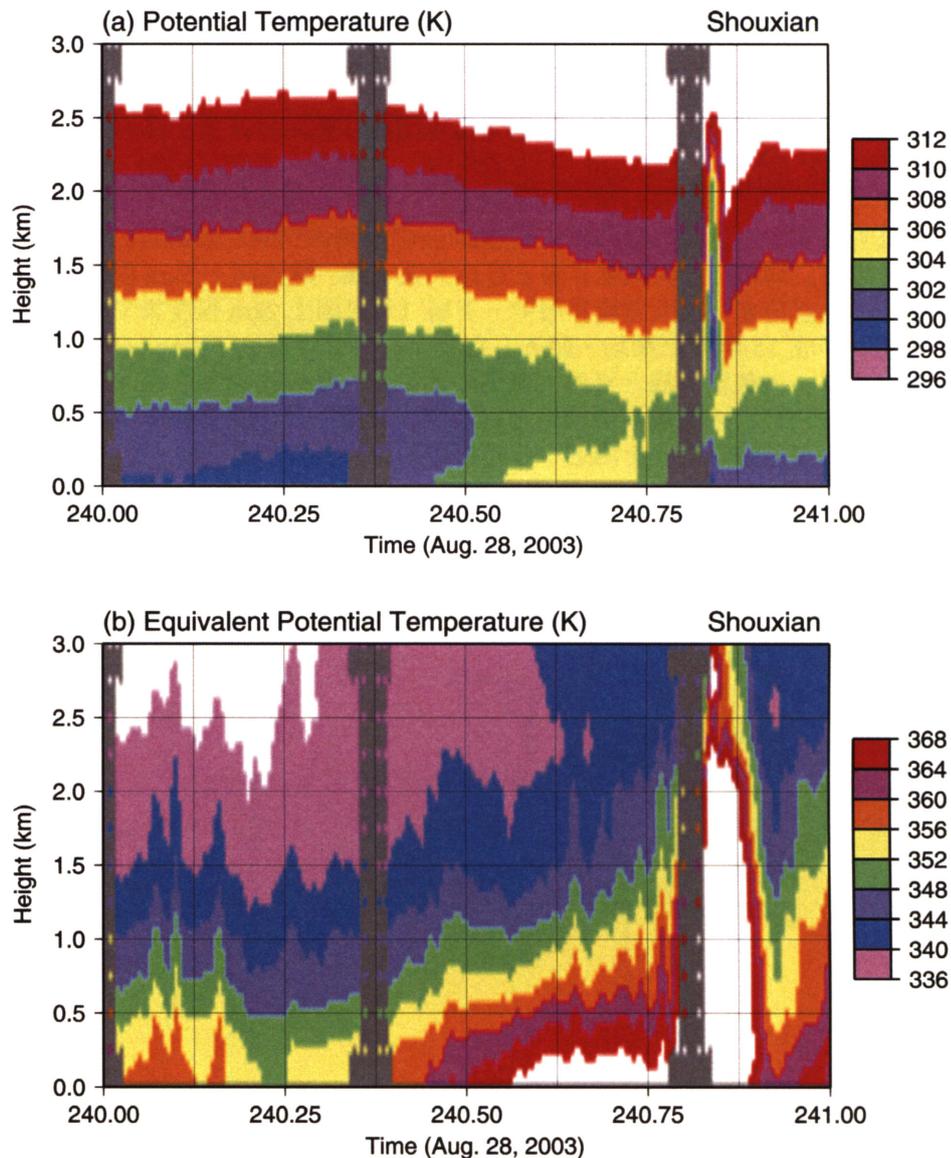


図2 中国安徽省・寿县気象局においてマイクロ波放射計を用いて得られた温位(a)と相当温位(b)の日変化(2003年8月28日)

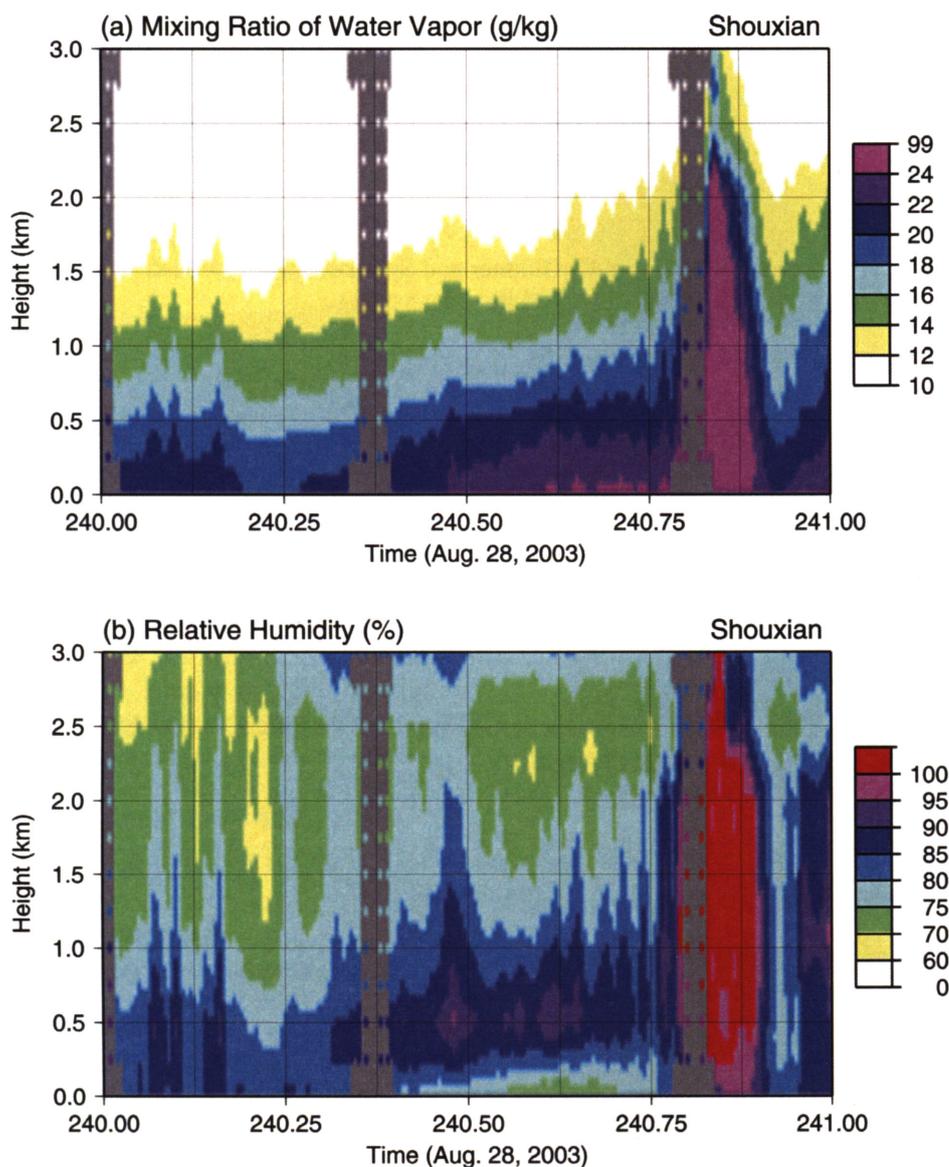


図3 中国安徽省・寿县气象局においてマイクロ波放射計を用いて得られた混合比(a)と相対湿度(b)の日変化 (2003年8月28日)

間の時系列と境界層の日変化をターゲットとした高度 3km までの 1 日毎の時系列を描いた (図2および図3に、2003年8月28日の例を示す)。

- (3) 対流混合層の発達を明瞭に見取れるのは、8月22日、8月23日、8月26日、8月28日、9月1日、9月2日、9月3日、9月4日、9月5日、9月6日である。対流混合層の高度は 1km 以下 (相対湿度が最大になるのは 0.5km) であった。
- (4) データを連続的に取得できているものの、精度については若干の疑問が残る。特に、高度 4~7km の相対湿度が常時大きな値となっており、Liquid Water Content がその高度に集中して存在するのはおかしい。ある高度に湿潤層が存在すると、その上層のデータは、著しく信頼性を欠くものと思われる。
- (5) 最初の4日分について、ワイオミング大サイトのゾンデデータ (指定面のみ) との比較を行ったところ、850hPa より下層では高温で水蒸気量が多目であり、850hPa より上層では低温で水蒸気量少な目という傾向があった。今後、Radiometrics 社内で、データを再評価してもらう必要がある。おそらくは鉛直プロファイルの retrieve に使用する初期値に原因がある。

報告会当日（2003年10月28日）、マイクロ波放射計に関する報告会での議論として、下記の2点が話題に出た。

- ・雨が降った場合のデータに、信頼性はあるのか？
- ・湿潤層より上層のデータに、信頼性はあるのか？

以上の答えは、双方ともに「信頼性は著しく低い」である。マイクロ波放射計の開発とその後の研究論文として、Solheim et al.(1998)やGüldner and Spänkuch(2001)がある。これらの研究論文を十分に吟味しながらより良いデータ取得を目指していきたい。

3-2. ウィンドプロファイラーレーダ

報告会では、名大CRESTにおいて購入し、マイクロ波放射計とともに中国安徽省・寿县気象局に設置されたウィンドプロファイラーレーダ（住友電工(日本)製・L-28）の解析例を報告した。このウィンドプロファイラーレーダは、本黄河プロジェクトにおいて平成15年度に既に購入している同型機である。主に、下記の2点について報告・議論した。

- ・ウィンドプロファイラーレーダにより得られた3次元風速の各成分データから、パワースペクトルやコスペクトルを描画することにより、卓越渦スケールを判定できるかどうかについて検討した。
- ・30m観測タワーに設置した超音波風速計から得られた3次元風速の各成分データから、同様に接地境界層内の卓越渦スケールを描画し、ウィンドプロファイラーレーダから得られた対流混合層内の卓越渦スケールと比較した。

以上の検討から、ウィンドプロファイラーレーダにより得られた3次元風速の各成分データを用いれば、対流混合層内の卓越渦スケールを判定できることが明らかになった。30m観測タワーに設置するフラックス・放射観測装置と組み合わせることにより、接地境界層と対流混合層内の様々な大気状態での乱流プリューム構造や大気境界層構造の把握が可能であると考えられる。

3. 今後の計画と研究のねらい

観測はなるべく長期に（継続的に）実施していく。最低でも、2004年～2007年の3年間の継続的な観測を行う予定である。得られた観測データは、混合層バルク相似則等におけるエントレメントパラメータの再評価に使用するとともに、雲解像モデルの入力値として使用し、大気境界層過程や積雲対流過程のパラメタリゼーションの再評価に供する。特に、半乾燥地特有の気象条件下におけるエントレメントパラメータの改良が行えるのが特徴である。雲解像モデルの初期条件には、領域気候モデルの出力値を用いる。このため、なるべく精緻な（空間解像度 1° 以内の）客観解析データや再解析データも使用していきたい。パラメタリゼーションの改良が行えれば、より現実的な領域気候モデルを再構築し、陸面状態の変化による黄河流域の水循環変動（特に大気境界層過程と雲・降水過程）を再評価することが可能となると思われる。本研究では、その足掛かりを提示する。

参考文献

- Güldner, J. and Spänkuch, D. (2001): Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **18**, 925 – 933.
- Solheim, F., Godwin, J. R., Westwater, E. R., Han, Y., Keihm, S. J., Marsh, K. and Ware, R. (1998): Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods. *Radio Science*, **33**, 393 – 404.

衛星で黄河プロに貢献できるのは何か？ 樋口篤志 (名古屋大学地球水循環研究センター)

1. はじめに

現在、名大 HyARC 主導で“雲につながる大気境界層研究”として、CREST/LAPS (駐：略語は本稿末にまとめて表示)での中国・淮河流域での3点 (Shouxian: 寿県, Feixi: 肥西, Xiaoxian: 肅県) での連続計測が本年度夏よりスタートしている。さらに本黄河プロジェクトでは、LAPS の super site である Shouxian とほぼ同様の計測機器群が今年度末に導入予定である (図1および図6, 本レポート群の檜山ほかを参照のこと)。

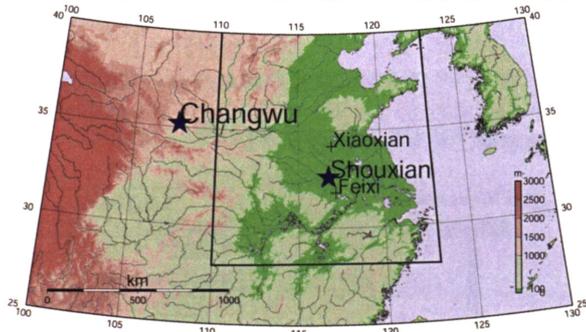


図1 CREST/LAPS 及び YRIS での ABL 計測サイト

ここで図1に、千葉大 CEReS で受信されている AVHRR データの受信範囲 (図中四角で囲われた範囲。Original データでは日本も含むが、使用しているデータセットは中国のみでカットされている) を示す。ここから分かるように、CREST/LAPS 観測地点は全て CEReS 受信データでカバーできるが、Changwu はカバーできないことが分かる。HRPT data あるいは GAC data であれば、EOS データセンターからフリーで download できるが、画像変換の手間 (radiometric 補正は大した手間ではないが、幾何補正は手間がかかる) を考えると積極的に作業を行う、という気にはなれない。そこで、本稿では；

- a. できるだけ Free で手に入る衛星データは何か？
- b. かつ扱いやすいデータセット (緯度経度情報がしっかりしている、変換の手間ができるだけ少ないもの)

に焦点を当てて報告する。

2. できるだけフリーで得られる衛星データセットは何か？

フリーで手に入る衛星データの代表格として、PAL が挙げられる。これは 1981-2001 までで、GAC データを元に、 1° グリッドデータセット及び 8km データセットが提供されている^{*1}。8km データセットに関しては図法がグッド図法 (Goode Interrupted Homolosine Projection) であること、大気補正が中途半端に行われている、長期解析を行う際にセンサーの drift 補正がかかっていない (とはいえ、未だに drift noise 除去の決定打は出ていないため、補正をかけるにはムリがある) 等々の問題点があるが、現時点で global に長期解析を行う際にはこのデータセットしか有り得ない。

このデータセットを用いて、黄河流域あるいは黄河流域の一部の長期変動解析を行う際に問題となるのが、空間解像度である。Original データセットが 8km であるため、これを緯度経度直交座標系 (lat-long) に変更した (0.1° : 中緯度帯で約 10km に相当, 0.2° : 同じく約 20km に相当) 際の 2000 年年平均 NDVI 分布を図2(a)及び図2(b)に示す。

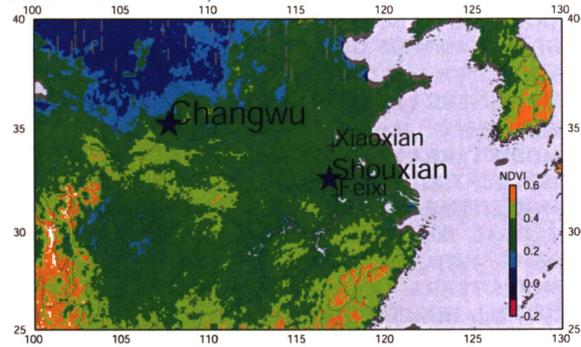


図2(a) PAL から緯度経度直交系座標 (0.1°) に変換した画像。高緯度帯で見かけ上のデータの抜けが発生する

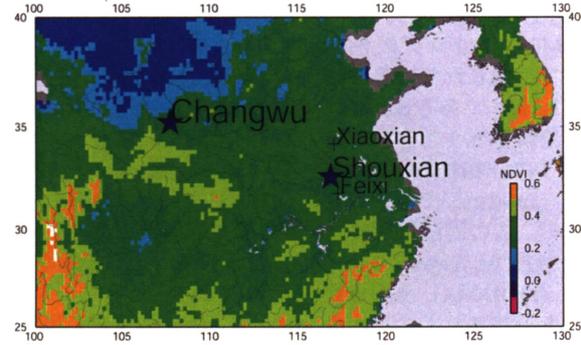


図2(b). 図2(a)と同様。ただし、 0.2° 。データの抜けは見られなくなるが、海岸付近のデータが表現できない

図2(a), (b)に示すように、空間分解能の違いによって、表現方法が大きく異なることが分かる。特に沿岸地域では、original の 8km でも不十分であることが分かる。

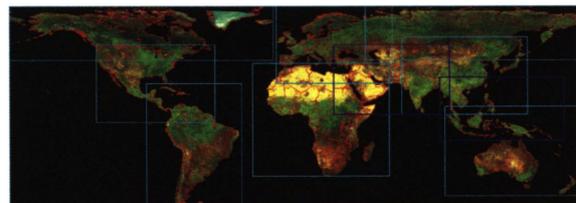


図3 SPOT VEGETATION で扱えるデータ範囲 (画像中枠で示された地域)

長期解析が必要ではなく、“急激な都市化”をキーワードにして、近年の変動“のみ”を衛星で捉える、という観点で考えると複数の Free なデータセットを扱うことが可能である。例えば、図3に示した、SPOT VEGETATION データセット^{*2}が挙げられる。このデータセットの空間分解能は HRV を平均化したもので 1km で、1998 年 4 月～である。データセットは当然緯度経度情報も含まれ、NDVI 及び radiometric データセット (大気補正済かどうかは現在調査中) からなる。Radiometric データだが、HRV データを使うため、可視[2ch: 緑・赤]・近赤外(780-890nm)・および中間赤外 (1580-1750nm) のみである。近赤外の波長域が狭いため、AVHRR を扱う際に必ず問題となる水蒸気のコンタミ (AVHRR の ch.2 は水蒸気の吸収帯も含む) を気にする必要が無い、というメリットはあるが、熱バンドを含んでいないため、植生と熱、という解析 (例えば VI-Ts 関係を用いた地表面湿度度解析) は行えない点がデメリットではある。

一方、1999 年に打ち上げられた terra に搭載された MODIS センサーからは、現在多くのプロダクトが出

され、そのほとんどが Free で提供されている³⁾。陸域プロダクトに関する限りでも以下のプロダクトを挙げることができる：

- MODIS/TERRA SURFACE REFLECTANCE 8-DAY L3 GLOBAL 500M SIN GRID V004** ... MOD09A1: 分光反射率. 500m, 8日.
- MODIS/TERRA LAND Ts / ε DAILY L3** ... MOD11A2: 陸面温度・放射率. 1km, 毎日.
- MODIS/TERRA LAND COVER TYPE 96-DAY L3 GLOBAL 1KM ISIN GRID V003** ... MOD12Q1: 土地被覆分類図. 1km.
- MODIS/TERRA VEGETATION INDICES 16-DAY L3 GLOBAL 1km SIN GRID V004** ... MOD13A2: 植生指標 (NDVI・EVI). 1km, 16日.
- MODIS/TERRA LEAF AREA INDEX/FPAR 8-DAY L4 GLOBAL 1KM SIN GRID V004** ... MOD15A2: 葉面積指数 (LAI)・光合成有効放射吸収率 (FPAR). 1km, 8日.
- MODIS/TERRA NET PHOTOSYNTHESIS 8-DAY L4 GLOBAL 1KM ISIN GRID V003** ... MOD17A2: 純一次生産量 (NPP). 1km, 8日.

MODIS プロダクトを処理するためには、同じく Free で提供されている解析 tool (ModisTool)を用いて、data format である eos-hdf を解読し、Mosaicあるいはformat変換を行うことが可能である。ただし、図4に示すように、MODIS プロダクトは sub-region でタイル (cut-data) で管理され、その図法も独自である。そこで、この図法を緯度経度直交系に ModisTool を使って単純な 2byte バイナリに変換し、図示した例 (MOD09A1: ch.1[赤]) を示す。Original のデータセットが 500m であるため、0.01° (1km 相当) に変換した。表現力の差は図1と見比べるまでも無く強力で、しかも大気補正・エアロゾル補正も済んでいる。また、定性的には図1で NDVI の低い地域 (黄土高原北部) では赤の反射率が高い、黄河からの濁水の流出 (河口を越えて若干高い反射率が認められる) 等々の特徴が認められ、より高い精度の解析が可能でありそうな期待を持つことができる。

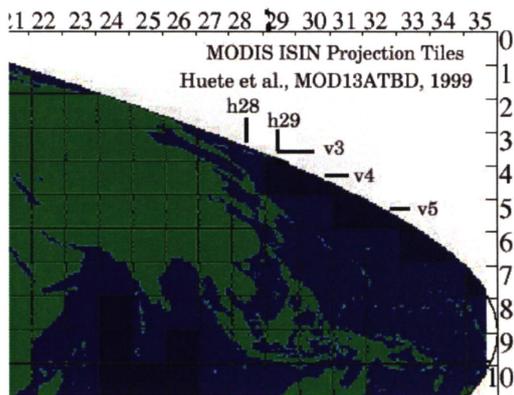


図4 MODIS でのアジア域のタイル構成。MODIS 独自の図法を使っているため、混乱を招いている。

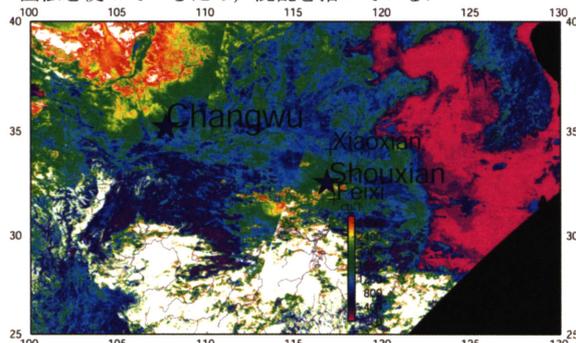


図5 MOD09A1 データをモザイクし、緯度経度直交座系に変換した画像例 (0.01°)。

ただし、問題点もある。現時点では、eos-hdf 自身に 16bit の記載が多いため (hdf version 5 になり、解消されたという話もあるが、eos-hdf は version4 系に多くを未だに依存している)、1file で 2Gbyte を超えることができない。これは大した問題では無いように思えるが、mosaic 画像を作成し、黄河領域・もっと大きくモンスーンアジア全体を一気に解析を行う際には上記の file size の制限によって分割せざるを得なくなる (図5は mosaic するタイル数をチューニングすることによって作成可能)。ただし、これは解析ツールが version up することによって解決すると思われる。

なお、MODIS データで得られる、より細かな波長分解能データで得られた知見が地上で何を示しているのかを検証するために、Changwu site では CREST/LAPS Shouxian site では計測されていない分光放射計を上下方向に向け設置する。このデータは現象理解のみならず、衛星検証データとしても役立つと思われる (同セットは筑波大 TERC 実験圃場にも今年度設置する)。

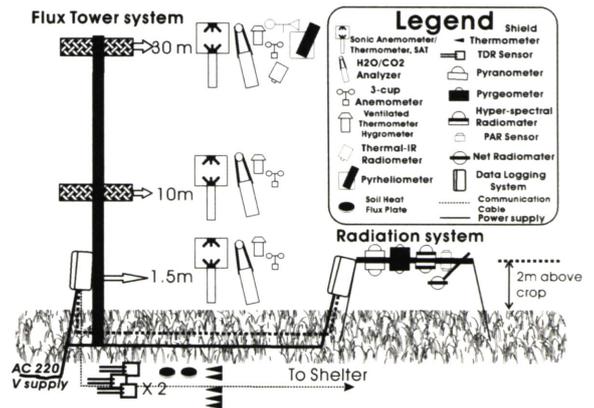


図6 Changwu に設置するフラックス・放射計測システム

3. まとめ

まとめると以下の通りになる：

- ・長期解析は PAL であるしかない。解像度が流域ベースで考えると粗すぎる。・“急激な”という観点では、SPOT VEGETATION が使える。ただし、熱バンドがない。
- ・MODIS はさすが新世代衛星だけあって、見事な空間表現力を持つ。Path 毎の差もきれいに補正されており、可視光内の“差”でも議論ができるレベルにある。ただし、大きなファイルが“現状”では作れないため、source を弄るの処理が必要。時間が解決？

略語説明

- AVHRR:** Advanced Very High Resolution Radiometer
- CEReS:** Center for Environmental Remote Sensing
- CREST:** Core Research for Evolutional Science and Technology
- GAC:** Global area coverage
- HRPT:** High-resolution picture transmission
- HRV:** High Resolution Visible
- HyARC:** Hydrospheric Atmospheric Research Center
- LAPS:** Lower Atmospheric and Precipitation Study
- MODIS:** MODerate Resolution Imaging Spectrometer
- NDVI:** Normalized Difference Vegetation Index
- PAL:** Pathfinder AVHRR Land
- SPOT:** Systeme Probatoire d'Observation de la Terre
- TERC:** Terrestrial Environment Research Center
- YRIS:** Yellow River Studies

*1: <ftp://daac.gsfc.nasa.gov/data/avhrr> (anonymous ftp)

*2: <http://free.vgt.vito.be/> (registration 必要)

*3: http://redhook.gsfc.nasa.gov/~imswwww/pub/imswel_come/

(NASA Earth Observing system data gateway, HRPT 等の他の衛星データも手に入る。Registration 必要)