

## 大気境界層班の研究目標と全成果

檜山 哲哉 (名古屋大学 地球水循環研究センター)

### 1. 研究を実施する上での問題意識

大気境界層班の研究を実施する上でのモチベーション (問題意識) は、以下の 5 項目である。

- 1) 黄河流域、特に、黄河中流域に位置する黄土高原における総観気象場と降水量は、どのように変化しているのか?
- 2) その原因は何か? (地表面変化は何らかの影響を及ぼしているのか?)
- 3) 地表面や大気境界層は降水活動に対して能動的か?
- 4) 湿潤域と乾燥域の大気境界層過程の本質的な差異は何か?
- 5) 地形は大気境界層の発達過程や境界層乱流に、どのような影響を及ぼすのか?

### 2. 研究目的

我が班は、上記の問題意識を明らかにすべく、以下に示す 4 項目を研究の目標として設定した。下記 4 項目のうち、1)および 2)は黄河プロジェクトの主な目的の一部であり、3)および 4)はそれに付随する研究目的である。

- 1) 黄土高原を含む黄河中・下流域における降水量や対流活動の年々変動とそれに影響を与える総観気象場、特に、季節内変動の様相を明らかにする。
- 2) 黄土高原における地表面過程や大気境界層過程の対流活動や降水に与える能動的側面を確認する。
- 3) 中国の湿潤域と(半)乾燥域における大気境界層の日変化過程や季節変化過程の差異を調べる。
- 4) 黄土高原における地形が、大気境界層内の乱流組織構造や局地循環の生成に及ぼす影響を調べる。

### 3. 観測およびデータ

#### 3.1. 観測

我が班は、中国科学院・水土保持研究所・長武黄土高原農業生態試験所 (緯度 35.24°N 経度 107.68°E 標高 1224 m) の小麦観測圃場内に大気境界層観測システムを 2004 年 5 月末に設置し、以来、2007 年 9 月末までの 3 年 4 ヶ月間にわたり、停電・故障による欠測を除き、継続的に下記の観測データを取得してきた (Hiyama et al., 2005)。大気境界層観測システムは、以下の 3 種の機器群から構成される。

- 1) フラックス・放射観測システム (Flux and Radiation Observation System; FROS)
- 2) ウィンドプロファイラーレーダ (Wind Profiler Radar; WPR)
- 3) マイクロ波放射計 (Microwave Radiometer; MR)

FROS は高度 2m、12m、および 32m における 3 次元風速、気温、湿度の乱流変動データを出力する。我々はそのデータをオフラインで処理し、それぞれの高度における 30 分毎の地表面フラックス (顕熱輸送量と潜熱輸送量) を計算した。3 高度のうち、粗度長の解析結果から、12m と 32m から得られる地表面フラックスは、個々の地表被覆の影響を大きく受けない領域的な地表面フラックスと定義した。WPR は風速ベクトルと風向、大気エコー強度とドップラースペクトル幅の鉛直分布データを出力する。MR は気温、相対湿度、雲水量の鉛直分布データを出力する。WPR と MR の生データは、約 1 分毎に得られている。

#### 3.2. その他の使用データ

本研究班は、解析に際して次に示すデータも使用した。

- 1) NCEP/NCAR 再解析データ
- 2) 静止気象衛星 GOES・9 号による放射輝度温度データ
- 3) 平涼 (Pingliang) における高層気象データ

#### 4. 主目的に対する研究成果

主目的、すなわち研究目的の 1) および 2) に関する結果を、以下に記載する。

##### 4.1. 黄土高原の降水量の年々変動と水収支

黄土高原～華北平原にかけての年降水量は、統計的に有意ではないが、若干の減少傾向にある。統計的に有意な減少傾向を示さない理由の一つに、降水量の大きな年々変動がある。そして、夏季（7月と8月）の季節内変動の振幅と、その年々変動が、降水量の年々変動に大きく関わっている。季節内変動の振幅の大小には、黄土高原～華北平原地域に向けての、南からの水蒸気流入量の大小が関わっている（藤波, 2007; 本報告書）。

7月～9月の降水量（P）は蒸発散量（E）より卓越する。この期間の水余剰量（P-E）は、土壌水分として表層土壌に保持され、翌年の天水農業のための重要な水資源となる（高橋ほか, 2007a; 本報告書）。夏季には、植物、特に耕作物による蒸散が蒸発散量（E）に大きく寄与するものと思われるが、冬小麦は6月下旬には刈り取られ、加えてトウモロコシの水利用効率は大きいことが、水余剰量（P-E）に寄与しているものと思われる。また、レスの保水性には、降雨後にレスの表面に素早く形成される乾燥表層（dry surface layer）による土壌面蒸発の抑制も関わっているものと考えられる。

##### 4.2. 大気境界層の降水活動（擾乱）に対する能動的役割

春季～夏季の降水量と潜熱輸送量は、4～5日周期で変動する。これには、中緯度ならではの低気圧性擾乱の、当該地域における通過頻度と関係がある。ところが、顕熱輸送量には4～5日周期以下の短期変動が卓越する（西川ほか, 2007a; 本報告書）。

大気境界層高度の変動の周期性には、顕熱輸送量と同様の周期性がある。ただし、大気境界層高度は、積雲の発生や大気安定度（大気中層への寒気の流入や、地表面からの顕熱輸送による昇温の結果として生じる大気の温位構造）にも関係している。すなわち、大気境界層高度の変動の周期性には、顕熱輸送量の変動のみならず、総観気象場の変動の影響を受けることになる。

春季（4月）から夏季（7月）にかけての積雲生成と低気圧性擾乱（メソ降水システム）に対して、地表面は能動的に作用し、夕方～夜間にかけて、強雨を誘引することがある。2005年には、4月から7月までの4ヶ月間に計4回、夕方から夜間にかけて、時間雨量10mmを超える比較的強い降雨を経験した。この降雨は、4回とも低気圧性擾乱の通過に伴うものであった。静止気象衛星（GOES 9号）の雲頂放射輝度温度の時間変化を調べた結果、寒冷前線に伴う雲頂放射輝度温度は明瞭に日変化し、雲頂高度が夕方に向けて高くなるような日変化がみられるため、地表面が大気境界層を介して擾乱の発達に寄与することが示唆された（西川ほか, 2007a; 本報告書）。

##### 4.3. 地表面湿潤度および地形の大気境界層発達や積雲生成に及ぼす影響

名古屋大学地球水循環研究センターで開発された雲解像モデル（Cloud Resolving Storm Simulator; CReSS）を用いて、研究対象領域（数十km四方スケール）の大気境界層の日変化過程や雲水量の発生過程に関する数値実験を行った。その際、地表面の湿潤度（蒸発効率）に対する大気境界層や雲水量の感度を調べるために、観測から得られた蒸発効率の季節変化（Li et al., 2008）を参考にして、境界条件を設定した。

下端（地表面）の条件を平坦地形として数値実験した場合、蒸発効率と大気水蒸気量（あるいは相対湿度）は、積雲（雲水）の生成に（双方とも）重要な因子であった（高橋ほか, 2007b; 本報告書）。しかしながら、平坦地形の場合には、ベナール・レイリー型の組織的なセル状構造はみられたものの、局地循環は生成しなかった。一方、黄土高原の実地形を下端に設定した場合、黄土高原特有の地形が午後における大気境界層の急激な発達を促し、数km程度の空間スケールをもつ局地循環を形成した（西川ほか, 2007b; 本報告書）。この場合、蒸発効率が大きいほど、積雲の生成量が大きくなった。

#### 5. その他の研究成果

研究目的のうち、3) および 4) に関する研究結果と、我が班の研究活動に関わるその他の成果を、以下

に記載する。

### 5.1. 大気境界層過程に関する研究 (湿潤域との比較)

晴天時における大気境界層高度 (日最大値) の季節変動を中国湿潤域と比較した。その結果、黄土高原における大気境界層高度の季節変化に顕著な周期性は無く、非常に不明瞭であった。その原因として、①農耕地としての土地利用 (地表被覆) が非常に不均一なため、顕熱輸送量や潜熱輸送量の季節変化が明瞭でないこと、および、②総観規模での沈降流が湿潤域に比べて弱く、地表面近傍から鉛直的に生成するサーマルやプルームが比較的高高度にまで達し、積雲などの下層雲の生成とリンクすることによって大気境界層の上端が不明瞭になること、が考えられた (Hiyama et al., 2007)。

上記のうち、①は黄土高原の土地利用の特徴が反映されたものであり、②は、内陸の乾燥・半乾燥地としての特徴であると言える。

### 5.2. 接地境界層乱流に関する研究 (主に地形の効果に着目して)

鉛直風速成分( $w$  成分)のパワースペクトルは、浸食谷方向から吹送してくる場合であっても、平坦地表面上の接地境界層でみられるスペクトル形状と一致した。したがって、黄土高原の台地上の接地境界層では、谷地形が渦相関法による顕熱輸送量や潜熱輸送量の決定に対して大きな影響を及ぼさないことがわかった (Li et al., 2007)。

一方、風向方向に平行な風速成分( $u$  成分)及びそれに直交する水平風速成分( $v$  成分)には、高周波数領域において慣性小領域が得られたにも関わらず、低周波数領域との間に大きなスペクトルギャップが得られた。この原因として、流れ方向渦 (縦渦) や馬蹄形の乱流組織構造の生成と、地形によるそれらの増幅が考えられた。浸食谷底と台地面との高低差に大気境界層高度を加えた長さスケールが、水平風速成分の低周波数領域における、代表的な乱渦の長さスケールになることを示唆した。

### 5.3. 衛星リモートセンシング研究

平坦地表面では、地表被覆に空間的異質性を有している場合であっても、ASTER と MODIS による地表面温度に大きな差異が生じなかった。一方、地形の凹凸を加味した場合、衛星の方位角、天頂角、太陽入射角、地形傾斜角により生じる地表面温度の差が大きくなり、地形を考慮した地表面温度の推定が必要であり、すなわち、それが精度良い蒸発散量の推定にとって必要不可欠であることがわかった (Liu et al., 2006)。

MODIS などのように、日中に一度きりの衛星リモートセンシング観測から蒸発散量を推定する場合、日々変化が日変動に埋もれず、検知可能かどうか、について解析した。その結果、可能であることを見出した。特に、ES (下向き短波放射量に対する潜熱輸送量の比) の方が、EF (有効放射エネルギーに対する潜熱輸送量の比) よりも日変化幅が小さくなり、日々変化がより効果的に検出可能であることがわかった (Liu and Hiyama, 2007) (図 1)。

## 6. 残された課題

これまでの研究において、地表面変化が降水量の長期トレンドに影響を及ぼしているか否かについて、観測的研究からは明らかに出来なかった。これには、総観気象場など、他の要因による影響と地表面変化の影響の分離が、非常に困難であることが原因した。

また、大気大循環モデル (AGCM) を用いた、陸面を裸地にするなどした場合の降水量分布の変化に関する仮想実験が行われているが、相互作用は含まれておらず、裸地にした後の降水量分布の変化が、大気との相互作用を介してどのように植生分布を変え、その後どのように降水量分布が変化するのか、などに関する実験は行われていない。特に、全球の陸面を全て裸地にするなど、極端な条件での仮想実験のみが行われており、地表面変化の空間スケールに依存すると思われる大気-陸面相互作用とその結果としての降水量分布に関する研究は皆無である。今後の研究に期待したい。

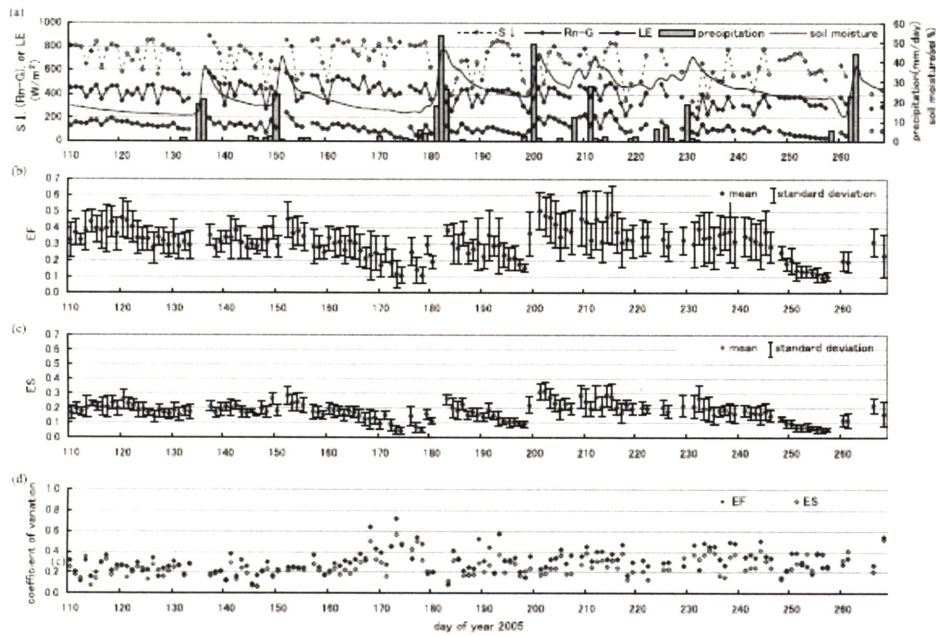


図1 長武黄土高原農業生態試験所で観測された a) 下向き短波放射量 ( $S\downarrow$ )、有効放射エネルギー ( $Rn-G$ )、降水量、表層土壌水分量、b) EF、c) ES、d) EF と ES の変動係数の季節変化。2005年の4月20日 (DOY: 110) から9月27日 (DOY: 270) までの日値で示している (Liu and Hiyama, 2007)。

## 7. 本研究班の公表論文リスト

本研究班の活動を基に、これまでに公表された論文は、以下の通りである。

- 1) Hiyama, T., Takahashi, A., Higuchi, A., Nishikawa, M., Li, W., Liu, W. and Fukushima, Y. (2005): Atmospheric Boundary Layer (ABL) observations on the "Changwu Agro-Ecological Experimental Station" over the Loess Plateau, China. *AsiaFlux Newsletter*, **16**, 5-9.
- 2) Liu, Y., Hiyama, T. and Yamaguchi, Y. (2006): Scaling of land surface temperature using satellite data: A case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous terrain area. *Remote Sensing of Environment*, **105**, 115-128.
- 3) Kobayashi, N., Hiyama, T., Fukushima, Y., Lopez, M.L., Hirano, T. and Fujinuma, Y. (2007): Nighttime transpiration observed over a larch forest in Hokkaido, Japan. *Water Resources Research*, **43**, W03407, doi:10.1029/2006WR005556.
- 4) Higuchi, A., Hiyama, T., Fukuta, Y., Suzuki, R. and Fukushima, Y. (2007): The behaviour of a surface temperature / vegetation index (TVX) matrix derived from 10-day composite AVHRR images over monsoon Asia. *Hydrological Processes*, **21**, 1157-1166.
- 5) Li, W., Hiyama, T. and Kobayashi, N. (2007): Turbulence spectra in the near-neutral surface layer over the Loess Plateau in China. *Boundary-Layer Meteorology*, **124**, 449-463.
- 6) Liu, Y. and Hiyama, T. (2007): Detectability of day-to-day variability in the evaporative flux ratio: A field examination in the Loess Plateau of China. *Water Resources Research*, **43**, W08503, doi:10.1029/2006WR005726.
- 7) Li, W., Hiyama, T., Takahashi, A., Nishikawa, M., Kobayashi, N., Higuchi, A., Liu W. and Fukushima, Y. (2008): Seasonal variations in the surface fluxes and surface parameters over the Loess Plateau in China. *Hydrological Processes*, (revised).

## 参考文献

- 藤波初木 (2007): 黄河流域における降水量の年々変動とそれに及ぼす総観場の季節内変動の影響. 黄河研究会報告書 2007年10月(石川), (本報告書).
- Hiyama, T., Takahashi, A., Higuchi, A., Nishikawa, M., Li, W., Liu, W. and Fukushima, Y. (2005): Atmospheric Boundary Layer (ABL) observations on the "Changwu Agro-Ecological Experimental Station" over the Loess Plateau, China. *AsiaFlux Newsletter*, **16**, 5-9.
- Hiyama, T., Takahashi, A., Nishikawa, M., Liu, Y., Tanaka, H., Higuchi, A., Liu, W. and Fukushima, Y. (2007): Progress in hydro-meteorological studies in Changwu, the Loess Plateau of China. Proceedings of third International Workshop on Yellow River Studies, Research Institute for Humanity and Nature, 61-64.
- Li, W., Hiyama, T. and Kobayashi, N. (2007): Turbulence spectra in the near-neutral surface layer over the Loess Plateau in China. *Boundary-Layer Meteorology*, **124**, 449-463.
- Li, W., Hiyama, T., Takahashi, A., Nishikawa, M., Kobayashi, N., Higuchi, A., Liu W. and Fukushima, Y. (2008): Seasonal variations in the surface fluxes and surface parameters over the Loess Plateau in China. *Hydrological Processes*, (revised).
- Liu, Y., Hiyama, T. and Yamaguchi, Y. (2006): Scaling of land surface temperature using satellite data: A case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous terrain area. *Remote Sensing of Environment*, **105**, 115-128.
- Liu, Y. and Hiyama, T. (2007): Detectability of day-to-day variability in the evaporative flux ratio: A field examination in the Loess Plateau of China. *Water Resources Research*, **43**, W08503, doi:10.1029/2006WR005726.
- 西川将典・檜山哲哉・高橋厚裕・李薇・藤波初木・樋口篤志・福嶋義宏 (2007a): 黄土高原南部における総観場と地表面状態および大気境界層の季節進行過程. 黄河研究会報告書 2007年10月(石川), (本報告書).
- 西川将典・檜山哲哉・坪木和久・福嶋義宏 (2007b): 黄土高原南部における局地循環と積雲発生に関する数値実験. 黄河研究会報告書 2007年10月(石川), (本報告書).
- 高橋厚裕・檜山哲哉・西川将典・樋口篤志・福嶋義宏 (2007a): 黄土高原南部における水蒸気の鉛直輸送と大気水収支 -2005年と2006年の比較-. 黄河研究会報告書 2007年10月(石川), (本報告書).
- 高橋厚裕・檜山哲哉・西川将典・福嶋義宏 (2007b): 黄土高原南部における地表面状態の変化が大気境界層と積雲発生に及ぼす影響 -数値実験による考察-. 黄河研究会報告書 2007年10月(石川), (本報告書).