

## 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

\*西川 将典<sup>1</sup>・檜山 哲哉<sup>2</sup>・高橋 厚裕<sup>3</sup>・李 薇<sup>4</sup>・

藤波 初木<sup>2</sup>・樋口 篤志<sup>5</sup>・福嶋 義宏<sup>3</sup>

1: 名古屋大学 大学院環境学研究科

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: Department of Civil & Environmental Engineering, Duke University

5: 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター

### 1. はじめに

本研究班は、黄土高原における水循環過程の解明のため、地表面－大気境界層－雲層（自由大気）間の相互作用に着目し、黄土高原における大気境界層（Atmospheric Boundary Layer, 以下 ABL）の成立過程と積雲対流との相互作用を長期連続観測（日変化～季節変化～年々変化）から明らかにすることを目的としている [檜山, 2006]。

これまでの研究から、夏季の黄土高原南部において、晴天日に積雲や雄大積雲などの対流雲が発達することを明らかにしてきた [Hiyama *et al.*, 2007; Nishikawa *et al.*, 2007]。また、雄大積雲発達時に ABL と自由大気間で活発な水蒸気交換が行われていることを示し [Takahashi *et al.*, 2007]、ABL と積雲対流とのカップリングに総観規模擾乱が加わると、夕方から夜間の短時間に強い強度の降水を引き起こす可能性を示した [高橋ほか, 2007; 本報告書]。しかし、上記のような黄土高原南部に特徴的な積雲や降水が、どのような総観場で発生したのかについては、詳しくは解析されていない。

このような背景から、黄土高原南部において積雲や降水が、そもそもどのような場合に発生したのかを明らかにすることを目的として、2005 年を例に、大気水蒸気量が増加する季節（4月から7月まで）の総観場と地表面状態および ABL 高度の季節進行過程に関する総合的な解析を行った。本報告は、これまで観測データの空白域であった黄土高原南部の地表面フラックスと ABL 高度の季節進行を示すとともに、積雲の発生や降水が起きた条件を明らかにする。そして、ABL が降水の日変化に対して与えた影響について考察を行う。

### 2. 方法

本研究では、黄土高原南部の長武黄土高原農業生態試験所（以下、長武試験地、北緯 35.24°、東経 107.68°）において取得した観測データを使用した。ABL については、ウィンドプロファイラレーダ（Wind Profiler Radar, 以下 WPR）により取得した観測データを、地表面フラックスや気象データについては、Flux & Radiation Observation System (FROS) により取得した観測データを使用した。観測や観測サイトの詳細は Hiyama *et al.*, [2005] に記載されている。

総観場の解析は、NCEP/NCAR 再解析データ (2.5°×2.5°) [Kalnay *et al.*, 1996] と、静止衛星 GOES.9 号の輝度温度 (0.05°×0.05°) [高知大学・東京大学・気象庁提供] を使用した。

### 3. 結果と考察

#### 3-1. 地表面フラックスおよび ABL 高度の季節進行

はじめに長武試験地における気象要素の季節進行と地表面状態の推移を示す (図 1)。長武試験地付近の台地面は、小麦畑とトウモロコシ畑とリンゴ畑の混在した土地利用となっている。長武試験地においては4月中旬にトウモロコシの種まきが行われ、6月末に小麦が刈り取られる。

日降水量の季節進行 (図 1-c) より、数日～数十日毎に降水が起き、数十日毎に日降水量が 10 mm を越える降水が観測されたことが分かる。日降水量の変動の周期性を調べるために、スペクトル解析を行ったところ、3～5 日にパワースペクトルのピークが現れ、黄土高原南部においては、3～5 日の短周期で降水が起きていたことが明らかとなった。図 2 に地表面フラックスおよび日最大 ABL 高度の季節進行を示す。地表面フラックスの季節進行の詳細を調べるため、日降水量と同様にスペクトル解析を行った。その結果、潜熱フラックスのパワースペクトルのピークが 2～5 日に現れ、日降水量のパワースペクトルのピークの周期とほぼ一致した。これは、降水時に潜熱フラックスは 0 であったのが、降水直後に大きく、数日経過して地表面が乾燥するとともに潜熱フラックスが減少するのに対応したものと考えられる。一方、顕熱フラックスのパワースペクトルに明瞭なピークは現れなかった。ただし、顕熱フラックスは、降水後小さく降水後数日経過して地表面の乾燥に伴い増加する傾向にあった。

図 2-c に晴天日における ABL 高度の季節進行を示す。ここで晴天日とは、快晴日だけではなく積雲などの対流雲が発達した日も含むものと定義した [Nishikawa et al., 2007]。棒グラフ (緑) は median filtering method [Angvine et al., 1994] (以下、median 法) を用いて WPR により観測されたエコー強度から求めた ABL 高度であり、積雲が発達したときの ABL 高度も含む。棒グラフ (黒) は slab model [Tennekes, 1973; Garratt, 1992] を用いて主に顕熱フラックスの日中積算から算出・推定した ABL 高度である。median 法から求めた日最大 ABL 高度が slab model の推定結果に比べて大きくなる場合、ABL 高度が日最大値を示す時間帯において、積雲、特に好天積雲の発達を全天空写真から確認した。しかし、両者が良く一致する場合、そのような時間帯において積雲の発達は全天空写真から確認されなかった。そこで、median 法から求めた日最大 ABL 高度が slab model と比較して大きくなる場合を、本研究では積雲が発達した場合とすることにした。2005 年 4 月～7 月の全期間を通して median 法から求めた日最大 ABL 高度は slab model から求めた日最大 ABL 高度と比較して過大となる日が多く、解析した全期間を通して積雲が頻繁に発生していたことが明らかとなった。

#### 3-2. 積雲発生の要因について

顕熱フラックスが大きかった日 (cf. DOY=170) のみならず、顕熱フラックスが小さかった日 (cf. DOY=141) にも、積雲の発生が確認されており、積雲の発生を顕熱フラックスのみに帰着させることはできなかった。そこで、積雲発生の要因を考察するために、温位の鉛直分布を NCEP/NCAR のデータを用いて調べた。その事例として、顕熱フラックスと潜熱フラックスの日中平均値が同程度 (顕熱フラックス: 約  $150 \text{ W/m}^2$ , 潜熱フラックス: 約  $240 \text{ W/m}^2$ ) であった 6 月 6 日と 7 月 11 日における温位鉛直分布の日変化を図 3 に示す。6

月 6 日には積雲は発達せず、7 月 11 日には積雲が発達した。700~850 hPa (台地面上~高度約 2 km まで) では、両日とも現地時間で 8BST (北京標準時; Beijing Standard Time) から 14 BST、20 BST にかけて、ABL の発達に伴い温位鉛直分布が安定な状態からほぼ中立な状態に変化した。しかし、その上空の 600~700 hPa (高度約 2~3 km まで) の温位鉛直分布は、積雲が発生した 7 月 11 日では中立、積雲が発生しなかった 6 月 6 日では安定であった。7 月 11 日では高度約 2~3 km に積雲の発達が確認されたため、高度約 2~3 km にあたる 600~700 hPa の大気の安定度が積雲の発生に影響すると考えた。そこで、図 4 に示したように ABL 高度の季節進行と、600 hPa と 700 hPa との間の温位差を比較すると、積雲が発達し ABL 高度が高くなった場合には温位差は小さくなった。つまり、温位差が大きく安定な場合は、上空の capping inversion が強く積雲の発達は抑制されるが、温位差が小さく中立に近い場合は、上空の capping inversion が弱くなり、積雲が発達しやすくなると考えられた。7 月 11 日の場合、総観場は亜熱帯ジェット気流が蛇行し、トラフ後面の高気圧場に位置していた。そのため、北方から上空に寒気が流入し、上空の温位が低下し中立な状態に近づいたものと推測される。以上から、黄土高原南部において観測された積雲の発生は、地表面フラックスだけではなく上空の大気の安定度と大きな関係があることが裏付けられた。

### 3-3. ABL の総観規模擾乱に及ぼす影響

次に ABL が降水に与える影響について考察を行う。その前に、黄土高原南部における降水時の総観場について示す。図 5 は 5 月 13~19 日 (世界標準時) の長武試験地付近における輝度温度の経度時間断面図である。図中で暖色系の部分は、輝度温度が低い部分を表し、雲頂高度が高いことを示す。黄土高原南部は中緯度に位置し、亜熱帯ジェット気流の影響を受ける。5 月 15~16 日 (BST) に長武試験地において観測された降水は、擾乱に伴い対流活動が活発な部分が東進し、通過したことによりもたらされたことを確認した。

同様に、2005 年 4 月~7 月の長武試験地において、降水が観測された場合の輝度温度の経度時間断面を解析した結果、すべての降水イベント時に擾乱が東進していた。長武試験地における降水は、亜熱帯ジェット気流下を東進する擾乱によって起きており、その周期は、上述した 3~5 日の短周期であったことが明らかとなった。

最後に ABL が降水の日変化に与えたと考えられる 6 月 19 日の事例を示し、ABL の総観規模擾乱に及ぼした影響について考察を行う。長武試験地において 6 月 19 日 19 BST 頃に降水が観測されたが、この降水は擾乱の東進により起きたことが図 6 より明らかである。東進する擾乱が黄土高原南部の長武試験地付近に到達すると、擾乱が強められ、その後しばらく経過して擾乱が衰退した。6 月 19 日の日中、長武試験地は晴天であり、午後に積雲が発達し、ABL が最大高度約 3 km まで発達した。つまり、日中の ABL の発達により高度約 3 km まで中立な状態だったと考えられた。積雲のスケールは小さく、静止衛星の解像度では解像できなかったため輝度温度の変化に現れなかった。この擾乱の発達と衰退を通じた水蒸気輸送量を解析した (図 7)。この図より、降水前後で水蒸気輸送に大きな変化が見られず、擾乱の発達に対して、総観規模での水蒸気の移流の寄与は無いものと考えられた。すなわち、6 月 19 日のケースでは、ABL が擾乱に対して能動的に働きかけ、夕方以降に降水をもたらしたものと言える。

#### 4. まとめ

黄土高原南部において積雲や降水がどのような場合に発生したかを明らかにするために、黄土高原南部における2005年4月～7月の総観場と地表面状態およびABL高度の季節進行過程に関する解析を行った。潜熱フラックスは降水後増加し、その後減少するという短周期的な時間変動を示した。その周期は数日(2～5日)であり、降水の周期(3～5日)とほぼ一致した。一方、顕熱フラックスは潜熱フラックスとは異なる周期を示し、明瞭な周期は現れなかった。また、ABL高度が積雲の発達によって高い高度にまで発達するため、ABL高度の明確な季節変化は見られなかった。これは4月～7月の全期間を通して、黄土高原南部では積雲が発生したことを示している。このような積雲の発生は、地表面フラックスだけではなく、高度約2～3kmの大気の安定度が関係した。上空の安定度が大きいと、capping inversionが強くなり積雲の発達は抑制されるが、上空の安定度が小さいと、capping inversionが弱くなり積雲が発達しやすくなった。

本地域で観測された降水は、亜熱帯ジェット気流を東進する擾乱の通過により起きたことを確認した。その周期は3～5日の短周期であった。そして、ABLが降水の日変化に対して影響を与えたと考えられる事例を示した。6月19日の夕方以降に起きた降水は、擾乱の東進によりもたらされた。このとき日中は晴天であり積雲が発生し、ABL高度が約3kmまで発達した。降水前後では水蒸気輸送に大きな変化が見られなかったため、ABLの発達により、ABL内の大気が不安定化し、擾乱が強化された可能性を示した。

#### 参考文献

- Angevine, W. M., A. B. White, and S. K. Avery (1994), Boundary-layer depth and entrainment zone characterization with a boundary-layer profiler, *Bound.-Layer Meteor.*, 68, 375-385.
- Garratt, J. R. (1992), *The Atmospheric Boundary Layer*, 316 pp., Cambridge Univ. Press, New York.
- 檜山哲哉 (2006), 大気境界層斑のこれまでの成果と今後の研究課題, 黄河合同研究会報告書 2006年11月(京都), 123-124.
- Hiyama, T., A. Takahashi, A. Higuchi, M. Nishikawa, W. Li, W. Liu, and Y. Fukushima (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., A. Takahashi, M. Nishikawa, Y. Liu, H. Tanaka, A. Higuchi, W. Liu, and Y. Fukushima, (2007), Progress in hydro-meteorological studies in Changwu, the Loess Plateau of China. *Proc. The Third International Workshop on Yellow River Studies*, 61-64.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, (1996), The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 77, 437 - 471.
- Nishikawa, M., T. Hiyama, A. Takahashi, W. Li, A. Higuchi, W. Liu, and Y. Fukushima, (2007), Seasonal and diurnal changes of atmospheric boundary layer heights over Changwu, the Loess Plateau of China. *Proc. The Third International Workshop on Yellow River Studies*, 69-72.
- Takahashi, A., T. Hiyama, M. Nishikawa, A. Higuchi, W. Li, W. Liu, and Y. Fukushima, (2007),

Vertical mixing of water vapor between the atmospheric boundary layer and free atmosphere over Changwu, the Loess Plateau of China. *Proc. The Third International Workshop on Yellow River Studies*, 73-76.

高橋厚裕・檜山哲哉・西川将典・樋口篤志・福嶋義宏 (2007), 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).

Tennekes, H. (1973), A model for the dynamics of inversion above a convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 30, 558-567.

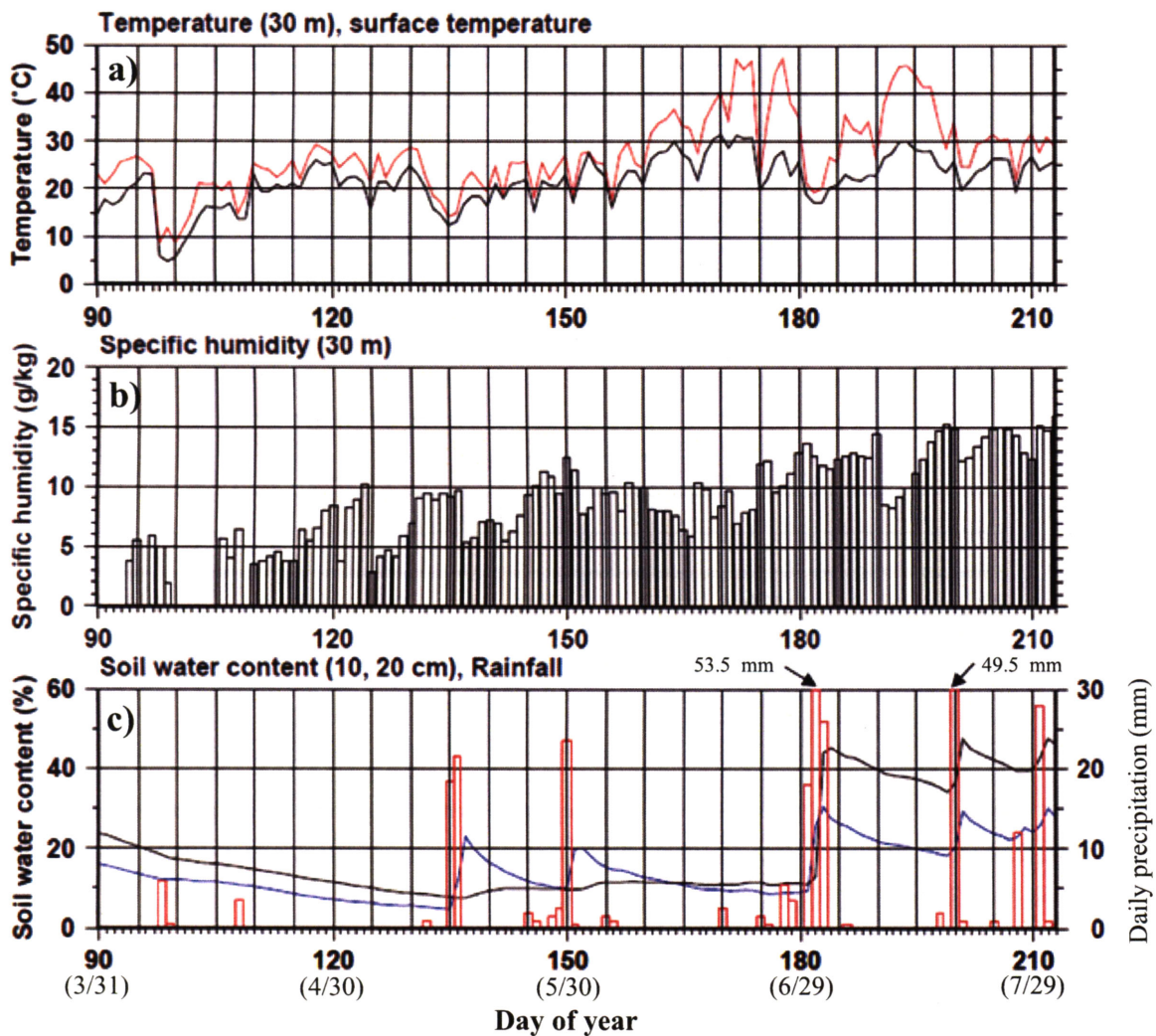


図1 長武試験地における気象要素の季節進行と地表面状態の推移。a) 表面温度 (赤), 30 m での気温 (黒) の日中平均値 b) 30 m での比湿の日中平均値, c) 日降水量 (赤), 土壌水分量 (青: 10 cm, 黒: 20 cm) の日平均値, d) 小麦とトウモロコシの生育期間, をそれぞれ示す。

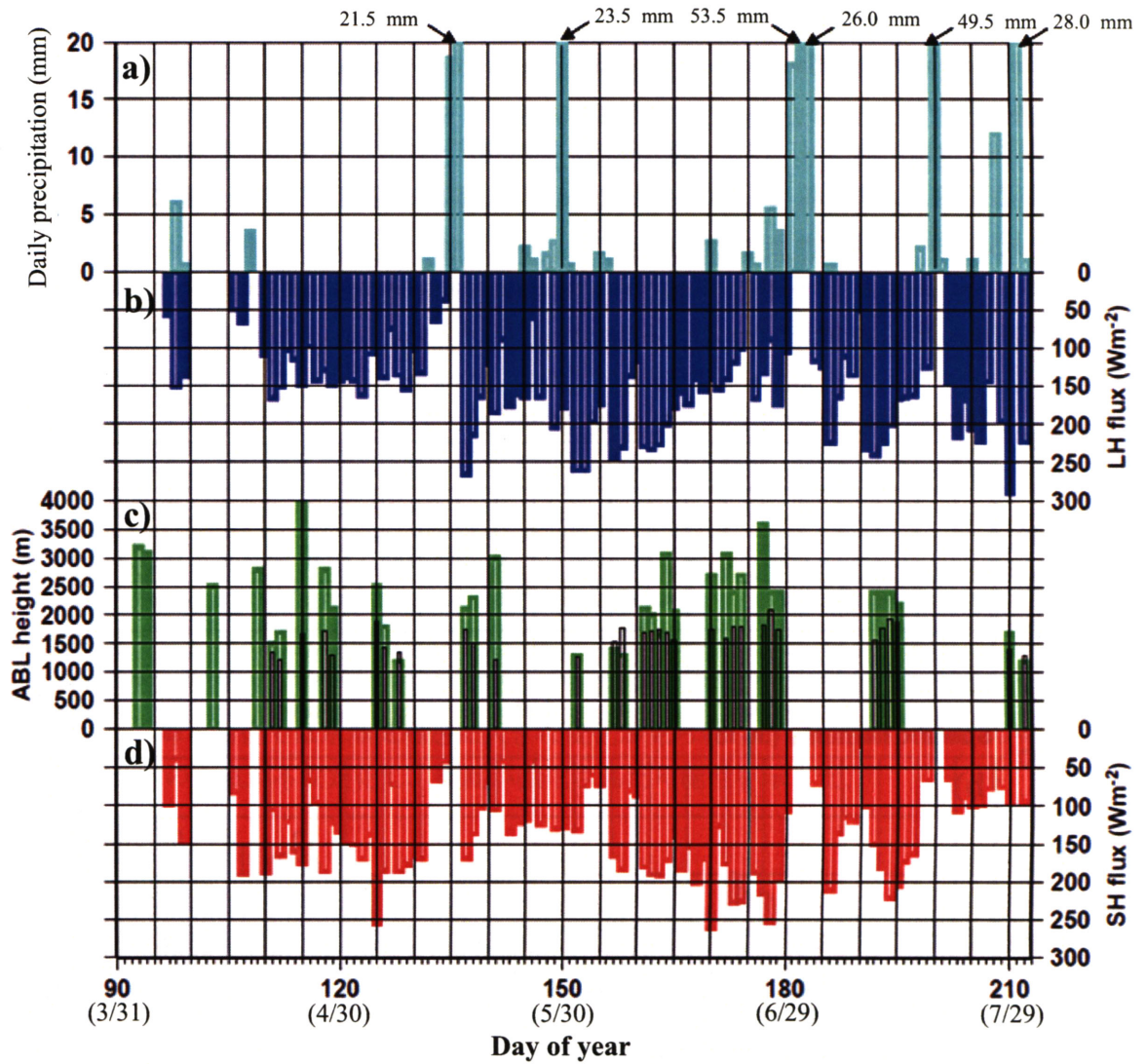


図2 長武試験地における地表面フラックスおよびABL高度の季節進行。a) 日降水量 (水色), b) 潜熱フラックス (青) の日中平均値, c) median filtering method [Angevine et al., 1994] で推定したABL高度の日最大値 (緑), slab model [Tennekes, 1973; Garratt, 1992] で推定したABL高度の日最大値 (黒), d) 顕熱フラックス (赤) の日中平均値, をそれぞれ示す。

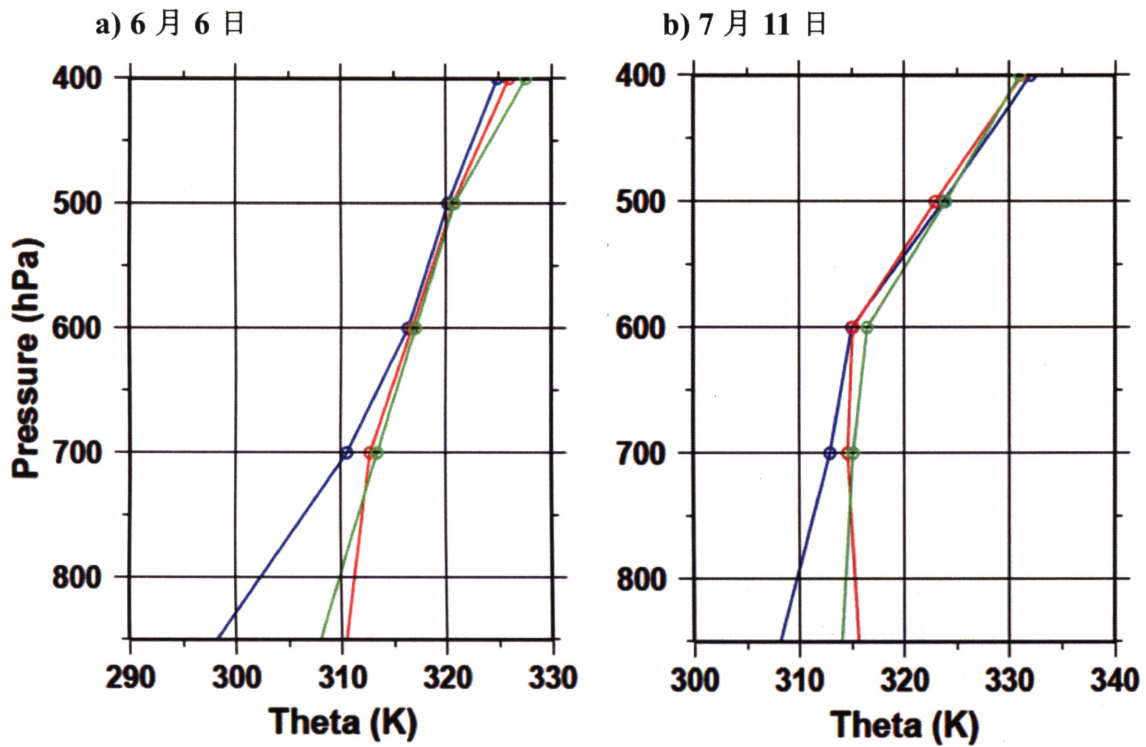


図3 温位鉛直分布の日変化 (青: 8 BST, 赤: 14 BST, 緑: 20 BST)。 a) 積雲が発達しなかった6月6日と、b) 積雲が発達した7月11日の例を示す。

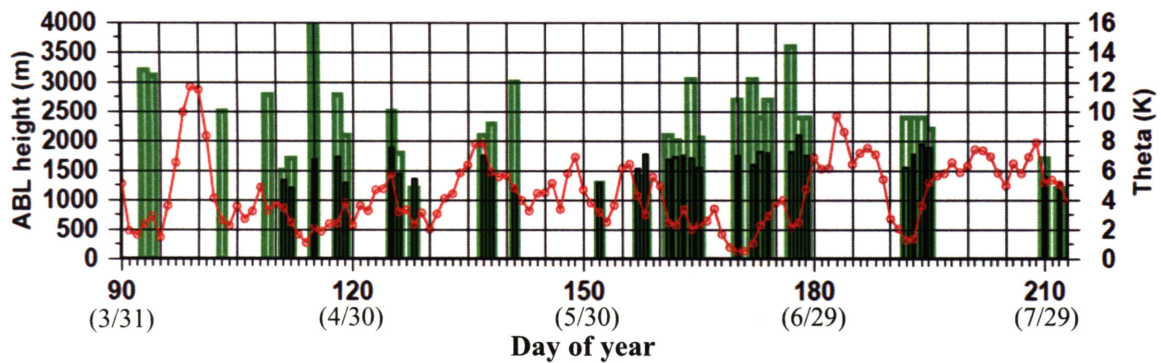


図4 長武試験地における ABL 高度 (緑, 黒の棒グラフは図 2-c と同じ) の季節進行と NCEP/NCAR 再解析データから計算した 600 hPa の温位と 700 hPa の温位の差 (赤)。

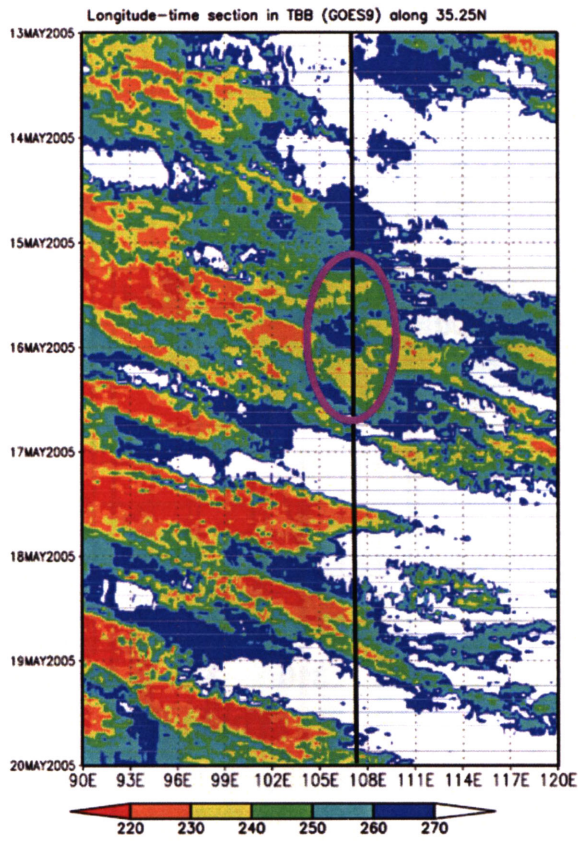


図5 5月13～19日(世界標準時)の北緯35.25°における輝度温度の経度時間断面図。直線(黒)は長武試験地(東経107.68°)の位置に相当する。楕円(ピンク色)で囲んだ部分は、長武試験地に降水をもたらしたと考えられる雲域に相当する。

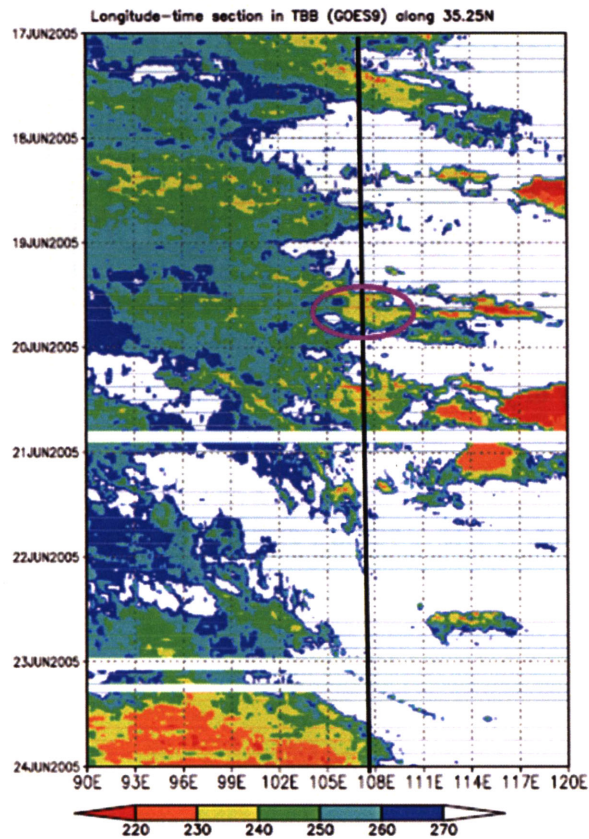


図6 図5と同じ。ただし期間は6月17～23日(世界標準時)。



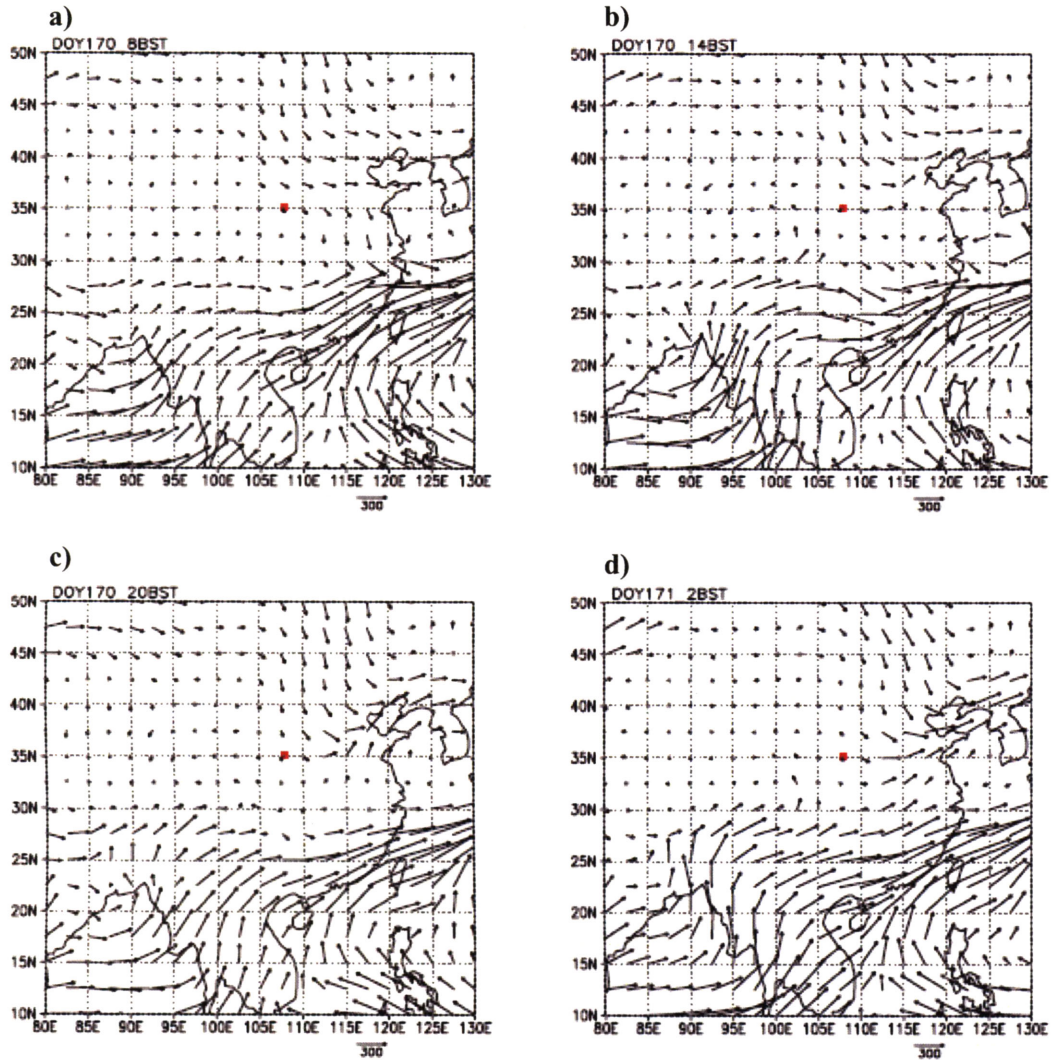


図7 地上～300 hPa面における水蒸気輸送の分布。ベクトルは水蒸気輸送 ( $\text{kg m / s}$ ) を表す。四角 (赤) は長武試験地の位置を示す。a) 6月19日8 BST, b) 6月19日14 BST, c) 6月19日20 BST, d) 6月20日2 BST, をそれぞれ示す。