

中国西北部砂漠地域におけるプラネタリー境界層の観測

永井 晴康・山田 道夫・光田 寧

PLANETARY BOUNDARY LAYER OVER THE DESERT AREA IN THE NORTHWEST OF CHINA

By *Haruyasu* NAGAI, *Michio* YAMADA and *Yasushi* MITSUTA

Synopsis

As a part of the Sino-Japanese Co-operational Program on the Atmosphere-Land Surface Processes Experiment in the Heife River Basin (HEIFE), the planetary boundary layer was observed at the desert area in the northwest of China. From the results of this observation, the structure of the planetary boundary layer in the semiarid region was studied. Some interesting features were observed. At the sand desert, the latent heat flux from the ground reaches its maximum about two hours earlier than the sensible heat flux. The profile of specific humidity at the oasis has a large vertical gradient even in the mixed layer. And boundary layer warming process was also observed.

1. はじめに

現在、中国西北部砂漠地域において大気-地表相互作用に関する日中共同研究 HEIFE が進行中であるが、主な研究内容は次のようである。

- (1) 接地層における乱流輸送の測定とプラネタリー境界層の構造に関する観測研究。
- (2) 地表での放射収支と観測地域内での各種地表面上放射特性に関する観測研究。
- (3) 蒸発散と観測地域内での水収支に関する観測研究。
- (4) 観測資料の収集と整理および配布。
- (5) 境界層の数値モデルの研究。
- (6) この地域での水需要と農耕のための水利問題の研究。

観測は砂漠やオアシスなどさまざまな地表条件を代表する5つの基本観測点（中国側3カ所、日本側2カ所）と5つの自動観測点、34カ所の雨量計などにより実施されている。1990～1992年の3年間に連続した通常観測（FOP: Fundamental Observing Period）と、2～3週間の期間で春、夏、秋、冬の4回集中観測（IOP: Intensive Observing Period）を行うことが計画されたが、1991年12月までに夏、秋、冬の集中観測が終了している。この集中観測のうち主に夏の観測データを整理した結果を述べる。

2. 観測について

2.1 観測地

観測地は、中国西北部にある甘粛省のほぼ中央に位置する張掖市とその北方郊外の北緯39度、東経100度付近であり、南西側に5000m級の祁連山脈が南東から北西に連なり北側にはモンゴルまで続く砂漠地帯が

広がっていて、その間に挟まれて海拔 1500 m 前後の細長い平地がある。およそ $70 \times 90 \text{ km}^2$ の地域で河西回廊と呼ばれる。祁連山脈の氷河から流れ出た水が集まって黒河 (Heife River) となりこの地域の中心を北西に向かって流れ、後に北に転じて砂漠に消えてしまう。この黒河に沿ってオアシスが帯状に延びていて、いわゆるシルクロードの河西回廊として古代から知られている。またオアシスと祁連山脈の間にはゴビと呼ばれる小石で覆われた平坦な荒地が存在する。日本側の基本観測点は砂砂漠と張掖市付近のオアシス内にそれぞれ1つずつあり、中国側の基本観測点は張掖市から 40 km ほど下流のオアシス内に2つとゴビの荒地の中に1つである。日本側による自動観測点は、基本観測点の間を補うように砂砂漠の基本観測点の周囲、東・南・北西方向へ数 km の地点の3つ、オアシス内の中国側基本観測点に近い位置にある砂丘の上と祁連山脈の麓に近いゴビ地帯の中にそれぞれ1つずつ設置されている。

2.2 観測方法

観測は連続して行う通常観測 (FOP) と短期間だけ集中的に行う特別観測 (IPO) とからなっており、通常観測では基本観測点に設置された 20 m の観測塔において数高度の風向風速、気温、湿度、および気圧、雨量、地中温度、放射の連続測定と自動観測点における地上 6 m 程度での風向風速、気温、湿度、および地表温度、地中温湿度、日射の連続測定が行われている。日本側の 20 m 観測塔では1990年10月より、自動観測点では1991年6月より連続的に測定が続けられている。

集中観測は、1991年に夏期 (8月3日~8月20日)・秋期 (10月3日~10月31日)・冬期 (12月6日~12月12日) に観測が行われた。計画では春期の観測もこの年に行われる事になっていたが、進行の遅れのために1992年に延期された。これらの集中観測期間には、通常観測に加えて基本観測点において乱流輸送の測定・繫留気球観測・ドップラーソーダ観測・低層ゾンデ観測などが行われた。冬期の観測に限り極低温などの厳しい気象条件のために繫留気球観測と低層ゾンデ観測は行われなかった。

3. 下部境界層の日変化と乱流輸送

オアシスの基本観測点で行われた低層ゾンデによる観測と、砂砂漠基本観測点で行われた繫留気球観測のデータを用いて、下部境界層の気温および比湿の日変化を調べてみた。

気温の日変化については、高度が高くなるほど最低および最高になる時刻に遅れが生じ、その変動の較差が小さくなる、つまり変動の位相が遅れ振幅が小さくなるということが一般的である。Fig. 1 はオアシス上空の高度別の気温の日変化で在るが、高度と共に位相が遅れ振幅も小さくなっている。位相の遅れは 300 m で約 3 時間、振幅は地表付近の 15 K が 300 m では 6 K に減少している。一方、砂砂漠では Fig. 2 に示

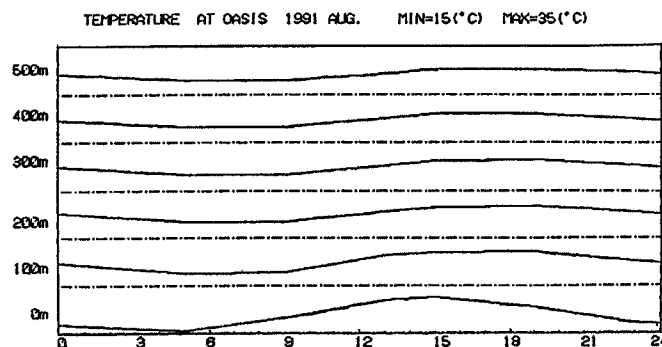


Fig. 1. Time changes of temperature averaged for fine days, measured by low level sondes at the oasis. For every height the upper and the lower lines show 15°C and 35°C respectively.

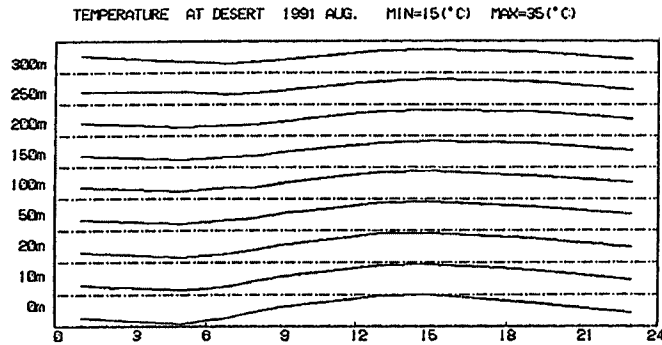


Fig. 2. As in Fig. 1 but measured by the tethered balloon at the desert.

すように最低気温の遅れは 300 m で約 2 時間であるが、最高気温は 300 m まで 15 時に発生しており遅れはほとんど無い。振幅は地表付近の 20 K が 300 m では 7 K になっている。砂漠で位相の遅れが少ないというのが特徴的である。ところで、最高気温になる時刻では遅れはないが、その後気温が大きく降下する時刻という点から見ると、2～3 時間の遅れがある。これは Fig. 3, Fig. 4 から、砂漠では地表近くで顕熱フラックスが大きいので混合層内の対流が強く混合が盛んになることから上空での気温上昇も地表近くとほぼ同時になるが、地表からの顕熱輸送がなくなった後の放射および乱流による冷却については砂漠上もオアシスも大差はないためと考えられる。

比湿の日変化については、オアシスでの高度別変化 Fig. 6 と砂漠での高度別変化 Fig. 7 を見れば、ど

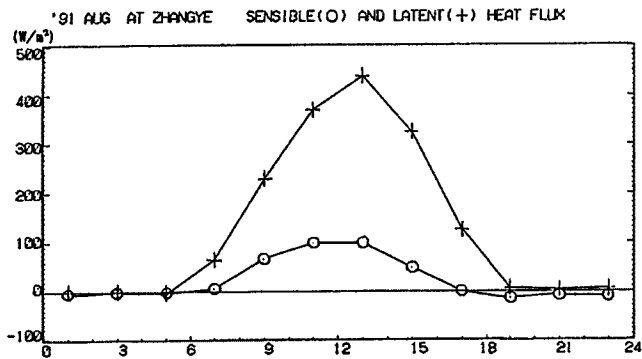


Fig. 3. Time changes of heat fluxes (○: sensible heat, +: latent heat) averaged for fine days, measured at the oasis.

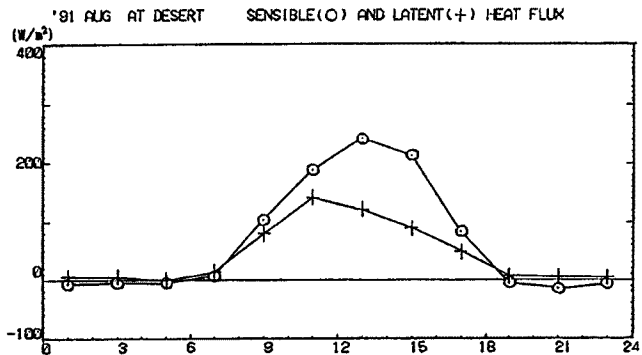


Fig. 4. As in Fig. 3 but measured at the desert.

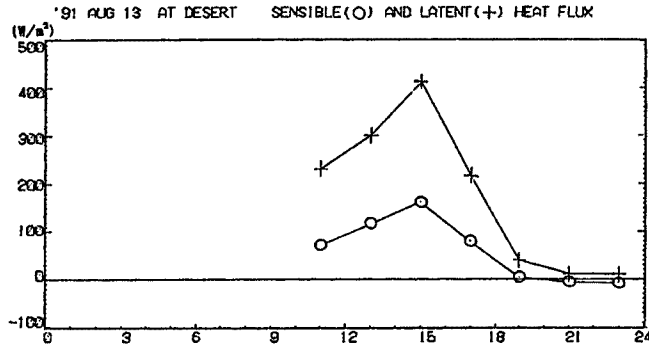


Fig. 5. As in Fig. 4 but for heat fluxes on August 13.

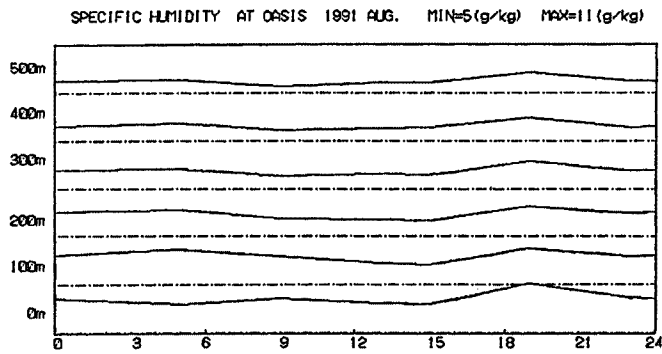


Fig. 6. As in Fig. 1 but for specific humidity. For every height the upper and the lower lines show 5 g/kg and 11 g/kg respectively.

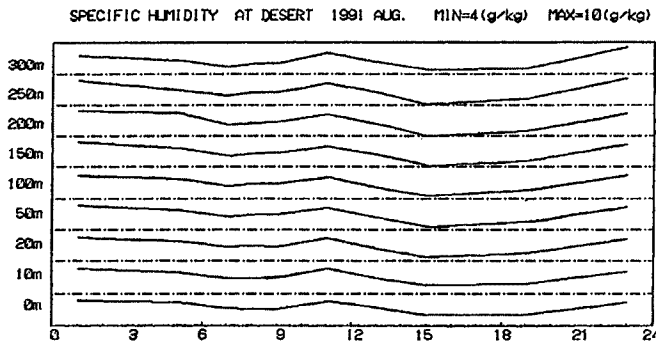


Fig. 7. As in Fig. 2 but for specific humidity. For every height the upper and the lower lines show 4 g/kg and 10 g/kg respectively.

ちらにも共通した傾向として、夜間は大きく日中特に気温が最高になる15時頃に最低となる点が上げられる。この点に関しては、日中に地表温度が高くなり対流混合による上方への拡散が非常に大きくなるため、地表面からの供給以上に上空に運ばれるためであるという説明ができ、既に観測例も出されている。このような一般的な特徴以外にここで注目すべき点としては、オアシスでは比湿が19時と地表付近だけであるが9時にピークを示し、砂砂漠では11時と夜半にピークが生じているということである。オアシスでの9時のピークは、Fig. 3からも分かるように、この時刻に潜熱フラックス（すなわち地表からの蒸発）はかなり大きいのに対して、顕熱フラックスはまだ小さいので対流混合による上方への発散はまだ小さいためである。

る。混合層の発達も初期段階（次章で述べる）であると考えれば、ピークがあるのが地表面付近だけであることも説明できる。その後、蒸発よりも対流混合による発散の方が大きくなり比湿は減少するが、対流混合が弱まる19時頃に再び蒸発による下からの供給の方が多くなり比湿が増えることになる。

砂漠のピークについては、乱流輸送の時間変化を示す Fig. 4 から、潜熱フラックスが11時に最大になっていることと対応しているようである。通常、顕熱と潜熱の比つまりボーエン比は比較的一定になると考えられているが、砂漠では日中11時から13時にかけて大きく変化している。砂地は水分量が少なくさらに地中からの水分供給速度も遅いため一般に蒸発は少ない。朝、日射が増大して地表面温度は高くなるので蒸発が増えるが、しばらくすると地表面付近が乾燥して水分が少なくなってくると、もはや蒸発は増えなくなり減少し始める。一方、蒸発が少なくなるため、さらに地表面温度は高くなり顕熱フラックスは増え続けることになる。雨が降った後など地面が湿っている時には、砂漠でも顕熱フラックスと潜熱フラックスのピークは同時に起こっていて (Fig. 5) オアシスの状態と差が無くなる、晴れた日が続き砂が乾燥すると、上に述べたような状態になる。さらにこの状態が進み、砂が極度に乾燥すると先に王および光田¹⁾によって報告されたように、砂地の水分はほとんどなくなって、日中の下向き潜熱フラックスが生じるという常識では考えられない現象が生じるようになるという推測ができる。しかし、今回の観測期間にはそのような現象は見られるところまでは至らなかった。

4. プラネタリー境界層の鉛直構造

プラネタリー境界層は Carlson²⁾ によれば、発達に5つの段階がある。

- (1) 地表の顕熱フラックスが正になり対流混合層が夜間に生じた接地逆転層を解消していく段階。
- (2) 接地逆転層が解消され対流混合層が急激に発達していく段階。
- (3) 地表の顕熱フラックスが最大になり、上部境界では強いエントレインメントによる顕熱フラックスが大きい段階。
- (4) 地表の顕熱フラックスが減衰する段階。
- (5) 地表の顕熱フラックスが負になり、接地逆転層が形成される段階。

ここではオアシスでの低層ゾンデ観測のデータを用いて、この砂漠地域でもこの様なプラネタリー境界層の発達段階があるか、またこれまでの観測結果から一般的と考えられている鉛直構造²⁾⁻⁶⁾が見られるかということ調べてみた。

Fig. 8 は、オアシスで行われた低層ゾンデによる測定で得られた温位および比湿のプロファイルの1991年8月6日から8月7日の時間変化を表したものである。早朝（5時）は、地表付近の気温が最低になる時刻であり、日の出（5時30分）とともに、地表面および大気が日射を吸収して昇温し始める直前、つまり先に述べた Carlson のプラネタリー境界層の発達過程では第一段階の始まる直前の状態である。地表付近には強い安定度をもつ接地逆転層があり、温位勾配は、高度 100 m 位まで 70 K/km、250 m 位まで 20 K/km の強い逆転となっており、高度 700 m 程度で温位逆転がなくなるまでが安定層である。高度 2600 m 付近に再び 15 K/km という強い安定度をもつ層がある。比湿のプロファイルでは、2600 m の強い安定層で急激な減少がみられ、この層より上では極度に乾燥している。この高度が前日の対流混合層の発達の上限であり、地表から蒸発した水蒸気が対流混合でこの高度まで達したものと考えられる。

5時と9時の温位のプロファイルを比較してみると、地表付近の温位は 6 K 程度上昇して最下層 100 m 位の強い温位勾配がほぼ解消されている。厚さ 100 m で温位勾配 70 K/km の層が解消されるのに必要な熱量は断熱図の面積から見積もることができるがおよそ $3.5 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ である。一方、地表付近 (2.5 m) の顕熱フラックスは Fig. 3 より7時の 10 W/m^2 ($=\text{J/m}^2\text{s}$) から9時の 70 W/m^2 に増えている。これより5時から9時までの間に地表付近では上向きに約 $3.0 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ の熱量が輸送されていることになる。このように、強安定層の解消に必要な熱量と地表からの熱量供給はほぼ等しく、この変化は主に地表からの顕熱フ

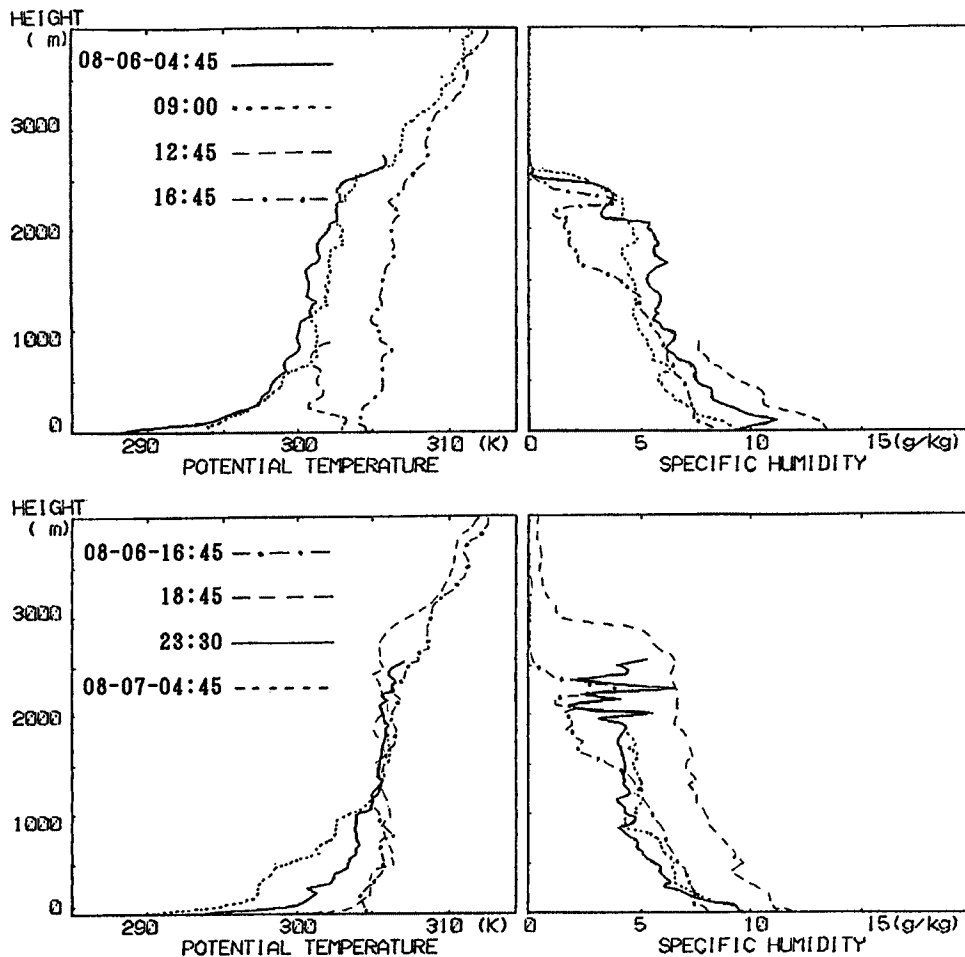


Fig. 8. The profiles of potential temperature and specific humidity for 04:45 on August 6 to 04:45 on August 7, measured by low level sondes at the oasis.

ラックスで起こっていることが定量的に説明できる。

13時は高度 700 m までの接地逆転層が全て解消された直後と思われる。9時から13時までの変化が生じるのに必要な熱量は約 $2.5 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ である。オアシスでの乱流測定では、地表付近の顕熱フラックスは約 $1.4 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ で必要な熱量と比べると 1/2 しかない。現実には大気の上昇は地表からの熱輸送の他に上層からの熱輸送、大気自身の日射の吸収、他からの移流などが考えられるが、層の厚さがこれくらい大きくなるともはや地表からの 1 地点での熱輸送だけでは見積はできないことが分かる。砂漠での顕熱フラックスから求めたこの間の熱輸送量は約 $2.6 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ であり、このような気温変化に必要な量以上の供給となる。従ってオアシス上空でも 10 km くらい離れた砂漠上空から熱が移流してくるものと考えられる。

17時になると地表から 2300 m までがほぼ温位一定となっていて対流混合層がこの高度まで発達していることが分かる。この時刻では発達の段階は既に第 4 段階に入っているものと思われる。この間の比湿の変化はあまり大きくない。

17時から19時の間には、地表付近の温位は 5 K 近く降下していて 100 m 程度の厚さの接地逆転層が形成されている。つまり第 5 段階の接地逆転層の形成および発達の段階に入っている。また混合層の頂部は、この時間にも少し上昇し 2800 m 位に達し、前日より少し高くなっている。また比湿も全層で 5 g/kg 位増えている。しかしこの時は測定に誤差があったのではないと思われる。

19時から23時では、地表付近では大きな温位勾配を持つ層の形で冷却が進んでいるが、上空でも高度1300 m 付近まで冷却が進んでいる。この層内の冷却は低い高度ほど大きくなっている。

23時から次の日の5時までの変化でも、最下層で温位勾配が急であり高度と共に減少し約1000 m までの安定層が強化されるという形で夜間接地逆転層は形成されていくことが分かる。

夜間の冷却過程には、地表近くでの乱流による地表面への顕熱輸送と大気中の水蒸気などからの放射による冷却があり、乱流による冷却は地表近くに限られるが冷却率は大きく、放射による冷却は乱流によるものよりは冷却率は小さいが冷却する高度の範囲は広い^{7),8)}。

比湿のプロファイルについては、1000 m までの層で勾配が大きくなっているのが特徴的である。対流混合層の中では上下方向の対流拡散により温位および比湿が一定になっていると言われているが、対流混合層が発達している17時のプロファイルでも下層の極端な勾配はなくなっているが、やはり勾配は残っている。このような混合層内での比湿の鉛直勾配については、Mahrt⁹⁾が観測の結果から指摘している。この鉛直勾配の原因として対流混合層上端のエントレインメントによる水蒸気フラックスの効果¹⁰⁾と移流を上げているがはっきりした結論は出ていない。しかし、比湿のプロファイルは一日の間でそれほど大きな変化を示さないということは興味あることである。観測地が乾燥地帯の中にあるオアシスであり、水蒸気の量が水平方向でかなり差があることを考えれば、移流の効果は大きいはずである。現在は風速のデータがないので移流の効果調べる事はできない。しかしこの比湿の鉛直勾配は地表面からの蒸発量に大きく影響するので、砂漠化現象との関連からも特に重要な問題と考えられる。

5. 気象環境の長周期変化について

Fig. 9 はオアシス近くの自動観測点でのデータから8月6日～8月18日の日射・地表面温度・気温・比湿の変動を表したものである。この図より、この期間では10・11・12日を除いて晴れている。10日から3日間では日射が少なく地表面温度は日中あまり上昇していない。そして、最も特徴的なのは気温が大きく低下していることである。その後また晴天日が続き地表面温度および気温が次第に上昇している。比湿はこの期間に減少する傾向がある。これは定常状態の上に日変化が重なっているのではなく、1日毎の変化に残差が

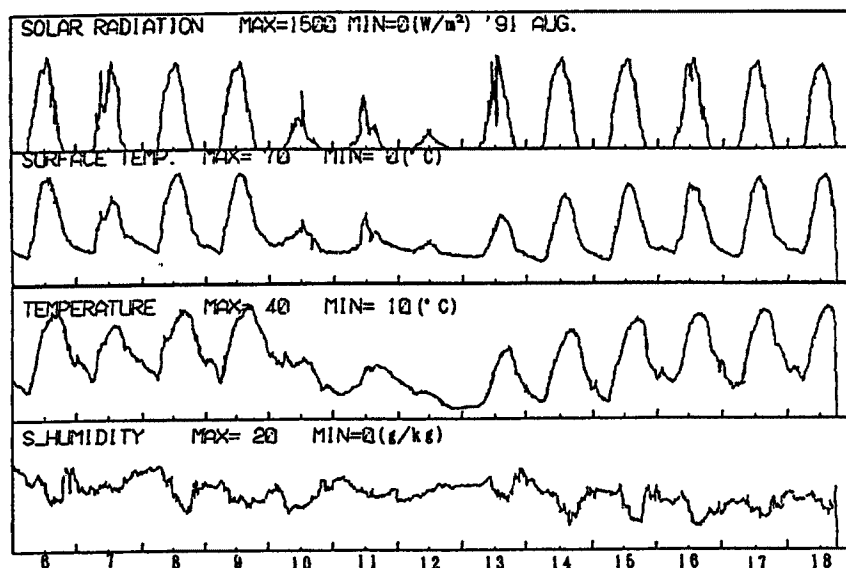


Fig. 9. Time changes of solar radiation, surface temperature, air temperature and specific humidity for August 6 to August 18.

生じることを示しており、状態を定常とすることは出来ないことになる。

Fig. 10 は8月10日～19日の温位のプロファイルのうち気温が最高と最低になる時刻のものを示したが、欠測の日は別の時刻を代用した。10日～12日までの間、地表付近の気温が大きく降下していきプラネタリー境界層の温位も特に10日から11日にかけて大きく降下している。11日の図の中の実線は10日のプロファイルを大まかに表すものであり、地表付近では10 K、2000 m 付近でも7 Kも降温していることがわかる。これだけの熱量が夜間の冷却だけでなくとは考えられない。Fig. 11 は8月11日の温位と相対湿度のプロファイルであるが、温位が急に高くなる2500 m～3000 m 付近で相対湿度が100%近くになっていることからこの高度から上に雲があることが想像できる。8月10日の夜と12日に雨が降ったことも観測されている。Fig. 12 は8月10日の風速ベクトルと気温、比湿の変動の様子で、祁連山脈にはほぼ垂直に並んだ3つの自動観測点(ゴビ、オアシス付近、砂漠の南)について示したものである。これを見ると8月10日の6時頃から、祁連山脈に沿って南東から北西に延びる大きな谷状構造を南東方向へ吹き上がりつつ発散するような強風が始まっている。この時比湿は減り始めるが、気温は一瞬上昇するがその後ほぼ一定で13時頃から降下し始めている。この時強風のため砂嵐が起こっていたことも観測されている。これより、8月10日に起こった

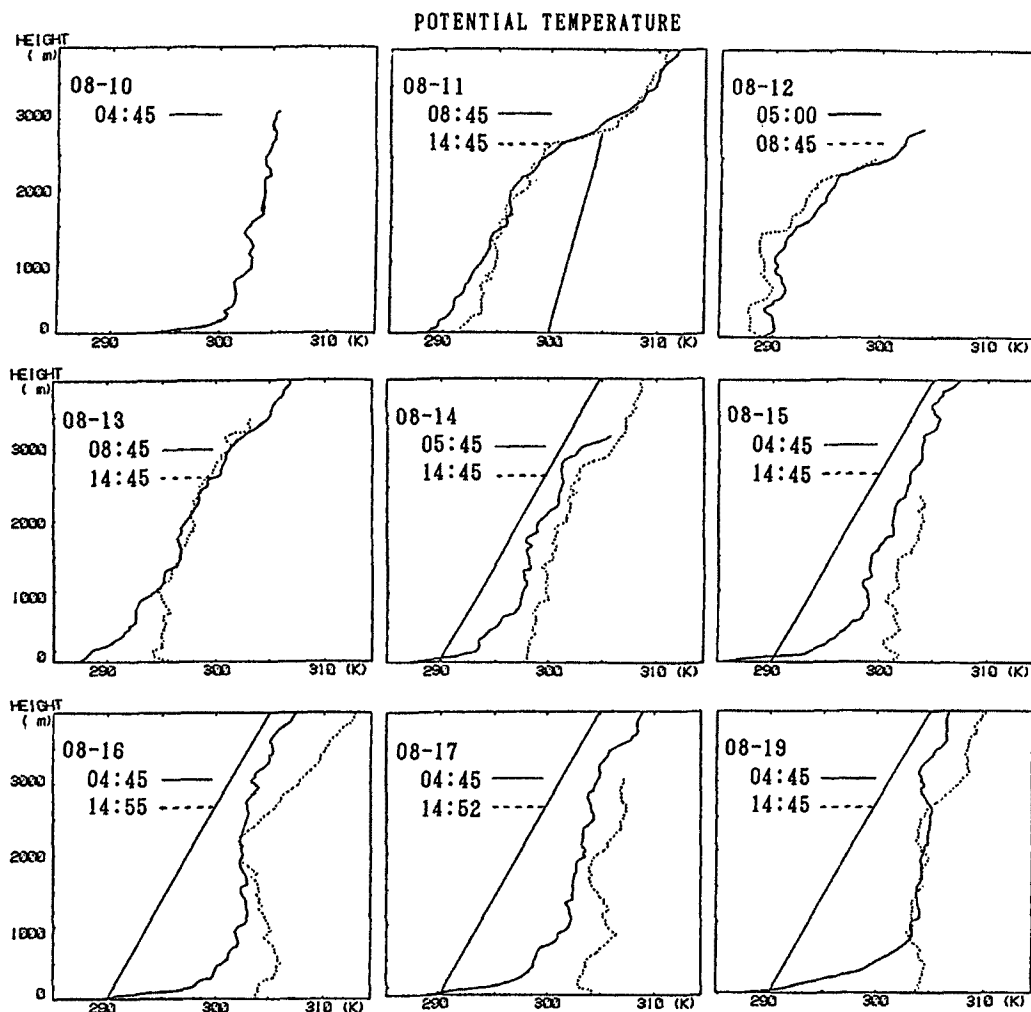


Fig. 10. The profiles of potential temperature from August 10 to August 19. The straight lines in the graphs indicate the profile on August 10 for the graph for August 11 and the profile on August 13 for the graphs from August 14 to August 19.

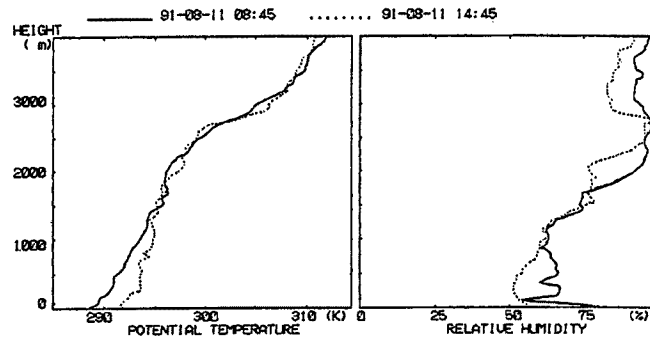


Fig. 11. The profiles of potential temperature and relative humidity on August 11.

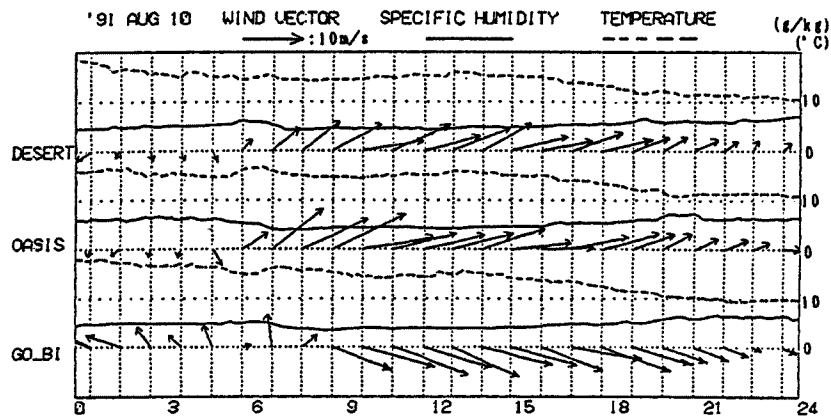


Fig. 12. Time changes of wind vector, specific humidity and temperature at three observation points on August 10. For the wind vectors the vertical axis is the direction vertical to the Qilen Mountains (NE).

プラネタリー境界層の大幅な冷却は、砂嵐の後に冷気が移流してきたことによるか、冷たい雨が低温をもたらしたことによるかが考えられるが、現時点でははっきりしていない。

次に8月13日～19日までのプラネタリー境界層が昇温していく様子を見てみる。13日の早朝の温位のプロファイルは、3000 m 付近までが温位勾配 4 K/km 程度の安定成層となっている。このプロファイルを近似する直線が14日以降の図の中に示してある。この直線と比較すると14日以降のプラネタリー境界層の昇温過程では、約 1000 m の高度で昇温が大きく、13日にはほぼ直線状であった安定層がS字形に変わっていく様子が分かる。

8月16日～19日のプロファイルには変化がほとんどないので、境界層の昇温は止まり平衡状態になっていると思われる。

このようにこの地域の変化は熱の収支が一日で平衡するのではなく夏の晴れた日は少しずつ残差が残って日平均気温が少しずつ上昇していきある平衡点に達する。そして降雨などによって地表が冷却され一気にプラネタリー境界層の温位が低下する。そして晴れた日が続くとまた上昇するというサイクルを繰り返しているようである。気温が低下する冬にも同じことが生じているものと考えられる。このように長周期の変化を追っていくことが砂漠地域の気候を調べる上で重要であり、さらに研究を必要とする。

6. 結 語

中国西北部砂漠地域における大気—地表相互作用に関する日中共同研究 HEIFE に参加し、プラネタリー境界層の観測を行った。またそのデータを整理して乾燥地域におけるプラネタリー境界層の特徴を調べた。

気温の日変化においては、砂漠の上空では変動の位相差が小さくなることが観測されたが、砂漠上空の混合層内の混合速度が速いためと考えられる。

比湿の日変化については、対流混合による拡散が大きくなる日中に減少することと、オアシスでは9時と19時にピークがあり、砂漠では夜半と11時にピークがあることが観測された。それぞれのピークは乱流測定により得られた顕熱および潜熱フラックスとの関連から説明が可能である。特に砂漠の11時のピークが、地表面付近の潜熱フラックスが11時に最大になることに対応しているようで、この潜熱フラックスの最大が日射が最大になる13時頃ではなく11時に起こるのは砂がある程度乾燥した時であり、砂漠の特徴的な現象であると思われる。

またプラネタリー境界層の構造についても調べたが、この砂漠地域でも日中の対流混合層および夜間の接地逆転の発達過程は現在一般的と考えられているものと大差はなかった。しかし比湿のプロファイルには日中でも鉛直勾配があることが観測された。

プラネタリー境界層の日々の変化を調べ、境界層内が昇温していく過程が見られた。このような長周期変化を調べることも砂漠地域の気候を知る上で重要であることが分かった。

謝 辞

本研究で使用した繫留気球のデータを提供して頂いた岡山大学教育学部の佐橋謙教授および低層ゾンデのデータを提供して頂いた中国環境科学院の范錫安教授に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Jiemin, W. and Y. Mitsuta: Peculiar Downward Water Vapor Flux Over Gobi Desert in The Day Time., HEIFE Report No. 5, 1991, pp. 155-157.
- 2) Carlson, D. J.: The Development of A Dry Inversion-Capped Convectively Unstable Boundary Layer., Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 99, 1973, pp. 450-467.
- 3) Ball, F. K.: Control of Inversion Height by Surface Heating., Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 86, 1960, pp. 483-494.
- 4) Clarke, R. H.: Observational Study in The Atmospheric Boundary Layer., Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 96, 1970a, pp. 91-114.
- 5) Deardorff, J. W. and G. E. Willis: The Free-Convection Temperature Profile., Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 93, 1967, pp. 166-175.
- 6) Deardorff, J. W.: Prediction of Convective Mixed-Layer Entrainment for Realistic Capping Inversion Structure., J. Atmos. Sci., Vol. 36, 1979, pp. 424-436.
- 7) Andre, J. C. and L. Mahrt: The Nocturnal Surface Inversion and Influence of Clear Air Radiative Cooling., J. Atmos. Sci., Vol. 139, 1982, pp. 864-878.
- 8) Carratt, J. R. and R. A. Brost: Radiative Cooling Effects Within and Above The Nocturnal Boundary Layer., J. Atmos. Sci., Vol. 38, 1981, pp. 2730-2746.
- 9) Mahrt, L.: Mixed Layer Moisture Structure., Mon. Wea. Rev., Vol. 104, 1976, pp. 1403-1418.
- 10) Wyngaard, J. C. and R. A. Brost: Top-Down and Bottom-Up Diffusion of a Scalar in Convective Boundary Layer., J. Atmos. Sci., Vol. 41, 1984, pp. 102-112.