

中国青藏高原可可西里地域の地表付近の気象特性

手嶋, 準一
九州大学農学部農業気象学講座

小林, 哲夫
九州大学農学部農業気象学講座

Meteorological Features Near the Surface in Kokoshiri Area of the
Ching-Tang Plateau, China
Laboratory of Agricultural Meteorology, Faculty of Agriculture, Kyushu University

<https://doi.org/10.15017/23594>

出版情報 : 九州大学農学部学藝雑誌. 51 (3/4), pp.187-196, 1997-03. 九州大学農学部
バージョン :
権利関係 :

中国^{せいぞう}青蔵高原^{ここしり}可可西里地域の 地表付近の気象特性

手嶋 準一・小林 哲夫

九州大学農学部農業気象学講座

(1996年11月30日受付, 1996年12月24日受理)

Meteorological Features Near the Surface in Kokoshiri Area of the Ching-Tang Plateau, China

Junichi TESHIMA and Tetsuo KOBAYASHI

Laboratory of Agricultural Meteorology, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-81

はじめに

青蔵高原は中華人民共和国の西部、青海省から西藏(チベット)自治区を含む標高4500m以上の世界最大の高原 (Fig. 1) である。青蔵高原と日本とは遠く4000km以上も離れているが、気象的には密接なつながりを持っている。日本付近の冬の気圧配置は大陸の高気圧に支配されるが、この高気圧は青蔵高原の地表付近における強い放射冷却によって作られる。一方、

夏には青蔵高原は強い日差しで暖められるために低圧部となり、日本付近を覆う太平洋高気圧を相対的に強めている (中村ら, 1986)。

近年、地球規模での気候変化や水循環が大きな研究対象となっており、青蔵高原への関心も高まっているが、現在でも気象データの少ない空白地帯である。著者の一人 (手嶋) は、平成6年7月から8月にかけて九州大学可可西里 (ココシリ) 学術探検隊の一員として青蔵高原の北東部の可可西里地域で接地気象観測を



Fig. 1. Location of Ching-Tang Plateau and the route of the Kyushu University Scientific Expedition to Kokoshili Range.

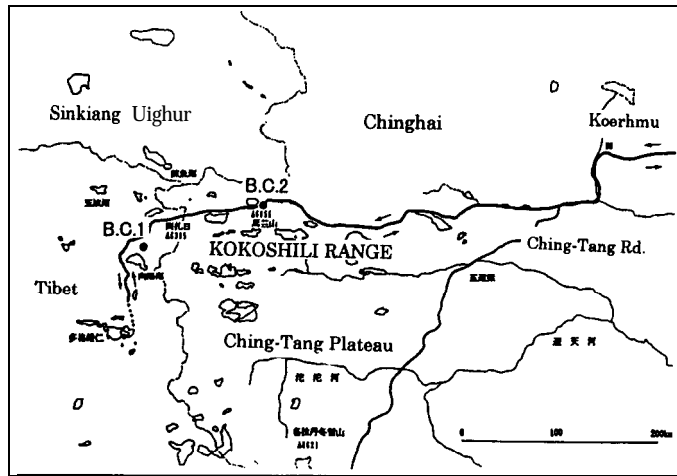


Fig. 2. Route of the field survey in Kokoshili Range and the locations of B.C.1 and B.C.2.

行なう機会を得た。本報ではフラックスの観測結果を中心に、本地域の地表付近の気象特性について報告する。

可可西里地域の概要

可可西里地域は北緯約35度、東経約90度付近に広がり (Fig. 2)、北側はコンロン山脈に、また南側はチベット高原に接している。地域内には一部6000mを越える高山もあるが、全般的には標高4500m以上のなだらかな高原状をなしている。氷河や雪山からの雪解け水を水源とする川や湖が点在しており、可可西里湖など周囲50km以上の大きな湖もある。植生は、背の低い高山植物がまばらに見られる程度で樹木類はまったく見られない。低圧と寒冷のため遊牧は行なわれず、訪れる人はほとんどいない。

気象観測方法

接地気象観測はベースキャンプ1 (以下 B.C.1、北緯35度46分30秒、東経89度56分53秒、標高約4900m) とベースキャンプ2 (以下 B.C.2、北緯35度35分43秒、東経91度44分01秒、標高約4800m) の2地点 (Fig. 2) で行なった。B.C.1、B.C.2の観測地点はともに丘陵地の間に広がった平坦地に位置し、ほぼ様な地形が続く境界層観測には理想的な場所である。また地表面は共にまばらな植生が見られる程度でほぼ裸地面に近かった。観測項目、測定高度、測定間隔は以下に示す通りである。

気温：高さ0.3m・1.0m・3.0m, 1分間隔
 湿球温度：高さ0.3m・1.0m・3.0m, 1分間隔
 風向・風速：高さ3.0m, 毎正時前10分間の平均風速・風向と毎1時間内の最大瞬間風速と風向
 地温：深さ5mm・30cm, 1分間隔
 全天日射量：1時間毎の積算値

気温及び地温の測定は白金抵抗温度計 (白山工業 (株) 製 Data Mark LS3000-PtV)、湿球温度の測定は同じ白金抵抗温度計にガーゼを巻き付けた湿球温度計で、風向風速の測定は Young エアロベーン式風向風速計 (コーナシステム (株) 製) で、全天日射量の測定は小型セル日射センサ (IKS-35、小糸工業 (株) 製) でそれぞれ行い、観測値はすべてデジタル記録計にメモリー保存した。気温や湿球温度を測定する際には直達日射を避けるため、簡単な日除けを作成したが、強制通風は行わなかった。なお、気温や湿球温度を測定した白金抵抗温度計 (8本) は出発前に比較検定し、器差が十分小さいことを確認した。

B.C.1での観測は8月14日から20日まで、また B.C.2での観測は8月24日から9月2日まで行った。

観測結果と考察

昼間の天気と日最高・最低気温

B.C.1とB.C.2で観測した約18日間の中で日中晴天が続いたのは8月14日、16日、30日だけでその他の日は天気がめまぐるしく変化した (Table 1)。8月15日の夜から16日未明にかけて10cm以上の積雪を観

Table 1. Weather in the daytime and air temperature in Kokoshili, 1994.

date	weather (morning)	weather (afternoon)	max.temp. (°C)	min.temp. (°C)	avg.temp. (°C)
14 Aug	fine	fine			
15 Aug	fine	cloudy to hail	19.9	-0.8	8.6
16 Aug	fine (snow 10cm deep)	fine	15.3	1.5	7.5
17 Aug	cloudy	brief rain	12.1	4.3	6.2
18 Aug	hail	thunderstorm	13.2	0.1	6.2
19 Aug	cloudy to fine	fine	9.3	-0.8	2.9
20 Aug	fine		9.2	-3.6	
24 Aug	mostly cloudy	mostly cloudy	14.8		
25 Aug	cloudy	cloudy to rain	15.2	-3.8	2.9
26 Aug	mostly fine	mostly fine	15.1	-5.4	3.8
27 Aug	brief rain	fine	16.1	-4.2	5.0
28 Aug	fine	cloudy to rain	18.6	-3.6	5.6
29 Aug	brief snow	cloudy	14.7	0.7	5.6
30 Aug	fine	fine	18.2	-5.2	5.5
31 Aug	mostly cloudy	mostly cloudy	15.5	-0.8	6.4
1 Sep	fine	fine to cloudy	17.4	2.9	8.0
2 Sep	rain	cloudy to fine		1.2	
3 Sep	fine				

Observation points Base Camp 1, 14 Aug.-20 Aug.
Base Camp 2, 24 Aug.- 3 Sep.

Air temperature was observed at 1 m above the surface

Symbols

max.temp.: daily maximum air temperature

min.temp.: daily minimum air temperature

avg.temp.: daily mean air temperature

測したが、日中の晴天で午後にはほとんど融けてしまった。また8月18日午後には雷を伴った激しいひょうも観測した。日最高気温は晴天日の8月15日に19.9度(起時16時1分)、日最低気温は晴れて放射冷却の強まった8月26日朝に-5.4度(起時8時25分)を記録した(Table 1)。晴天日には気温の日較差が20度を越え(8月30日は23.4度)、日平均気温が日最高気温に較べてかなり低いことは寒冷な乾燥地であることを示している。

風向・風速

観測期間中は毎日、最大瞬間風速が10m/secを越えた(Table 2)。観測期間15日間の中で午後に最大瞬間風速を記録した日は13日間あり、そのうち18時からほぼ日没時の22時までに記録した日は9日間あった。最大瞬間風速は日平均風速の3~5倍に達した。これは午前中は風が弱くても、地表付近が暖まる午後からは対流混合層が発達し、上空の強い風の持つ運動量が接地境界層まで伝搬された結果である。観測期間中の

最多風向はB.C.1では東南東、B.C.2では西であった。最大瞬間風速の風向は北寄りや南寄りが多く、最多風向と異なる日がほとんどであった。また最大瞬間風速の風向はB.C.1、B.C.2共に日々により異なった。これらは午後の強風が局所的な現象に起因していることを示している。

相対湿度

観測期間内で最も相対湿度が低くなったのは8月20日で最少湿度は35%であった(Table 2)。これは砂漠などの乾燥地と比べればそれほど低い値ではないが、気温が低いので、水蒸気圧に換算すると4.0hPaとなり同日晴天であった福岡の日平均水蒸気圧27.6hPaの1/6以下である。

全天日射量

積算日射量の日量最大値は8月30日に記録した27.96 MJ/m²で福岡の同日の日射量21.8MJ/m²を大きく上まわった。低地以上に強い日差しが地表面付近を短時間に暖め、5000m近い高山上空の寒冷な大気との間で

Table 3. Soil temperature in Kokoshili, 1994.

date	soil temp. (5mm depth)		soil temp. (30cm depth)	
	max.temp. (°C)	min.temp. (°C)	max.temp. (°C)	min.temp. (°C)
14 Aug				
15 Aug	35.2	-1.9		6.2
16 Aug	19.5	0.8	10.9	5.0
17 Aug	12.8	0.5	8.3	4.7
18 Aug	15.2	0.4	8.3	4.0
19 Aug	18.0	-0.5	7.1	2.7
20 Aug	18.5	-1.8	5.5	2.5
24 Aug	39.7	2.3	9.3	5.6
25 Aug	36.4	-4.0	9.2	5.9
26 Aug	35.5	-5.5	8.7	4.4
27 Aug	35.9	-3.4	8.9	5.2
28 Aug	37.8	-3.1	8.9	5.5
29 Aug	35.7	1.2	9.2	6.1
30 Aug	37.2	-3.4	10.2	5.7
31 Aug	37.6	0.6	10.1	7.0
1 Sep	38.8	3.6	10.6	7.6
2 Sep	14.0	1.9	10.4	6.9

Observation points Base Camp 1, 14 Aug.-20 Aug.
Base Camp 2, 24 Aug.- 3 Sep.

Symbols

max.temp.: daily maximum soil temperature

min.temp.: daily minimum soil temperature

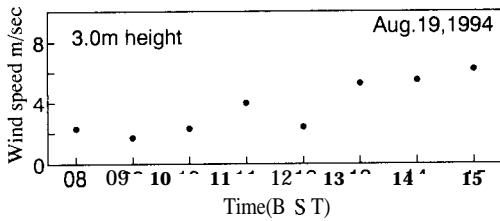


Fig. 3. Diurnal variation of wind speed.

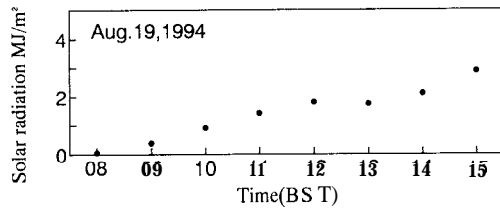


Fig. 4. Accumulated global solar radiation.

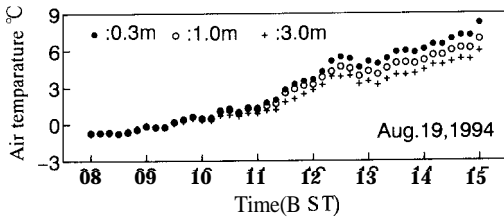


Fig. 5. Diurnal variation of air temperature at three heights.

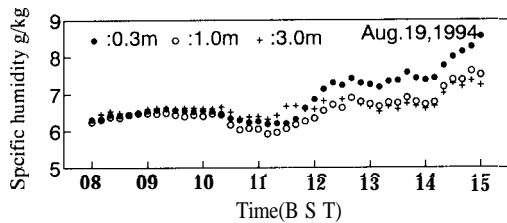


Fig. 6. Diurnal variation of specific humidity at three heights.

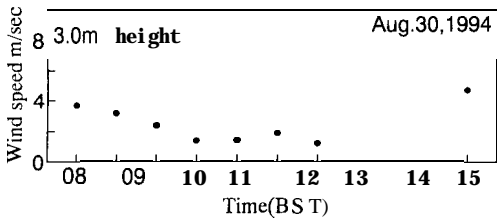


Fig. 7. Diurnal variation of wind speed

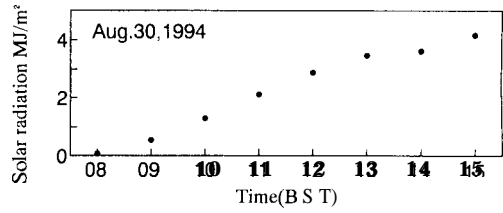


Fig. 8. Accumulated global solar radiation.

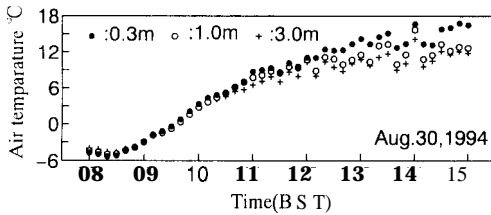


Fig. 9. Diurnal variation of air temperature at three heights.

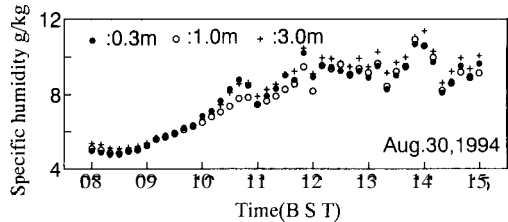


Fig. 10. Diurnal variation of specific humidity at three heights.

に示す。気温・比湿とも夜明け近くの8時から11時頃までは高度による差はほとんど見られないが、午後は地表面に近いほど気温、比湿の観測値が共に高くなった。なお、比湿を求める際に用いた飽和水蒸気圧は、標高4500m以上での低圧場を考慮して Buck の式(小柴, 1982)を用いた。

2. 8月30日の B.C.2での観測結果

(1) 風速と積算日射量の日変化

晴天でかつ地表面が乾燥していた8月30日の8時から15時までの風速と積算日射量の時間変化を Fig. 7, Fig. 8 に示す。8月19日と比較すると風速は11時から14時頃にかけて 2 m/sec 前後とほぼ半分であった。一方積算日射量は時間とともにほぼ単調に増加し、15時には 4.16 MJ/m² まで大きくなった。弱い風速と強い日射で地表面付近の大気の状態は8月19日より不安定となっていた。

(2) 気温・比湿の鉛直分布の日変化

気温・比湿の鉛直分布を Fig. 9, Fig. 10 に示す。夜明けから11時頃までは気温・比湿とも高度による差は小さかった。それ以後気温はほぼ一様に増加する傾向を示したのに対し、比湿は変動が大きくなった。これは砂漠などで観測される現象と同様で、地表面への強い加熱により接地層内で対流混合が活発化し、水蒸気濃度の高い下部と低い上部の空気が混合することに伴う現象であると説明される (Oke, 1978)。午後か

ら気温は地表面に近いほど高く観測されたのに対し、比湿は地表面に近いほど低くなり、比湿勾配の逆転現象が観測された。

顕熱・潜熱フラックスの日変化

水平で様な地面上に形成される接地境界層は、近似的に各種フラックスが高さと共に変化しないコンスタントフラックス層とみなすことができる (Monin & Obukhov, 1954)。したがって接地境界層内での観測結果から求めた顕熱フラックス Q や潜熱フラックス E/ρ を地表面におけるフラックスと見なす。

傾度法では、接地気層内の2高度で求めた気温、比湿および風速の結果から、次式によってフラックスを計算する (Thorntwaite & Holzman, 1942)。

$$Q = -u_*^2 \frac{K_h}{K_m} \frac{\Theta_2 - \Theta_1}{U_2 - U_1}$$

$$\frac{E}{\rho} = -u_*^2 \frac{K_e}{K_m} \frac{q_2 - q_1}{U_2 - U_1}$$

ここで K_h : 熱の乱流拡散係数, K_m : 運動量の乱流拡散係数, K_e : 水蒸気の乱流拡散係数, U_1, U_2 ; Θ_1, Θ_2 ; q_1, q_2 は高度 Z_1, Z_2 における平均風速; 気温; 比湿で u_* は摩擦速度である。また地表面に近い範囲では $K_h \cong K_e \cong K_m$ と仮定できる (Panofsky & Dutton, 1984)。本観測では、風速は1高度でしか観測できなかったため、風速の対数法則を仮定し、地表

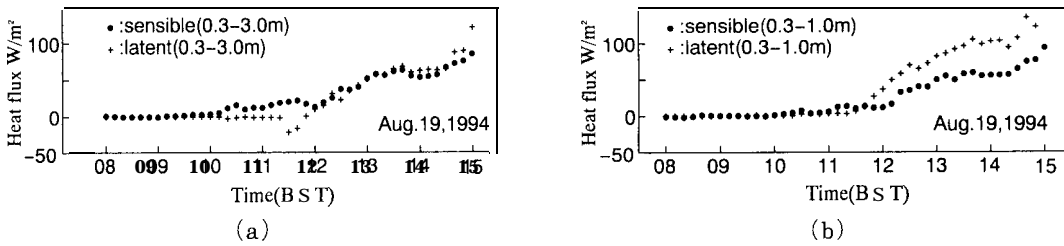


Fig. 11. Diurnal variations of sensible heat flux and latent heat flux.
 (a) Flux estimated from the data at 0.3m and 3.0m heights
 (b) Flux estimated from the data at 0.3m and 1.0m heights

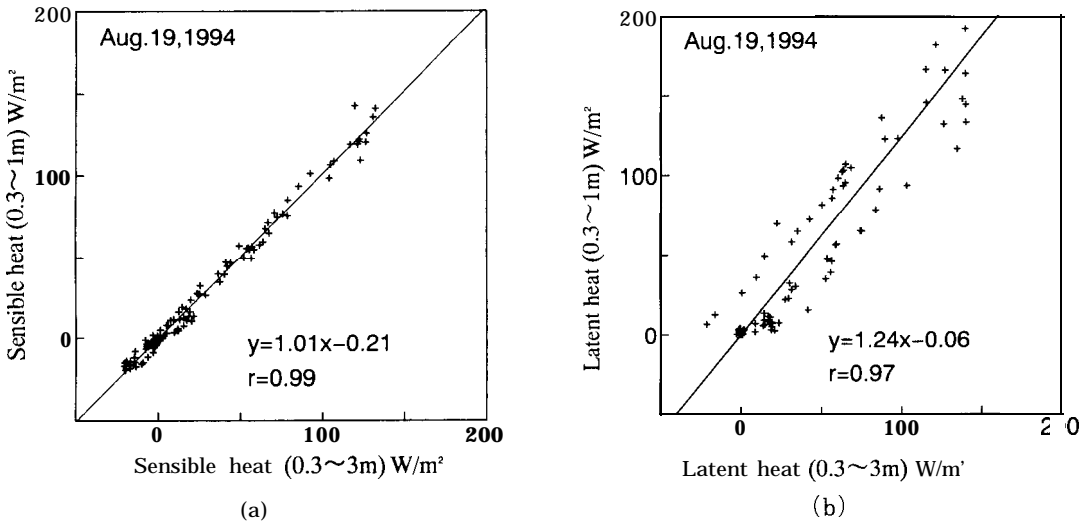


Fig. 12. Relation between heat fluxes estimated from the data at different heights.
 (a) Sensible heat flux
 (b) Latent heat flux

面の状態から粗度長 $Z_0=0.001\text{m}$ として、任意の高度の風速を算出した。地表面近傍では大気が中立状態でない場合にも対数法則が近似的に成り立つことが認められている（例えば近藤ら，1994）。

1. 8月19日の顕熱・潜熱フラックスの日変化

地表面が湿っていた8月19日に傾度法を用いて求めた顕熱・潜熱フラックスの日変化を Fig. 11 に示す。(a) は高度0.3m と3.0m の気温及び比湿のデータを用い、(b) は高度0.3m と1.0m の気温及び比湿のデータを用いて求めた結果である。共に午前中は顕熱・潜熱フラックスの値は $0\sim 20\text{W/m}^2$ と小さいが、日差しの強まる午後から正の方向（地表面から上空に向かう方向）のフラックスが 50W/m^2 以上まで大きくなった。高度0.3m と3.0m から求めたフラックスは日中

潜熱フラックスが顕熱フラックスとほぼ等しくなった。高度0.3m と1.0m から求めたフラックスでは午後から潜熱フラックスが顕熱フラックスの約2倍まで大きくなった。これは水蒸気の鉛直勾配が地表面に近いほど大きいことを示している。

次に、コンスタントフラックス層の存在を検証するため異なる観測高度のデータに基づいて計算した顕熱・潜熱フラックスについての散布図を Fig. 12(a), (b) に示す。横軸は高度0.3m と3.0m の気温及び比湿のデータから求めたフラックス、縦軸は高度0.3m と1.0m の気温及び比湿のデータから求めたフラックスである。Fig. 12(a) の顕熱フラックスは観測高度による差がほとんどなく、コンスタントフラックス層の仮定がよく成り立っていたことがわかる。Fig. 12(b)

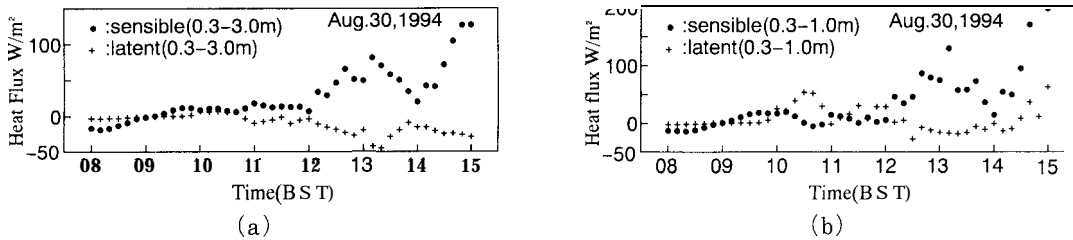


Fig. 13. Diurnal variations of sensible heat flux and latent heat flux.
 (a) Flux estimated from the data at 0.3m and 3.0m heights
 (b) Flux estimated from the data at 0.3m and 1.0m heights

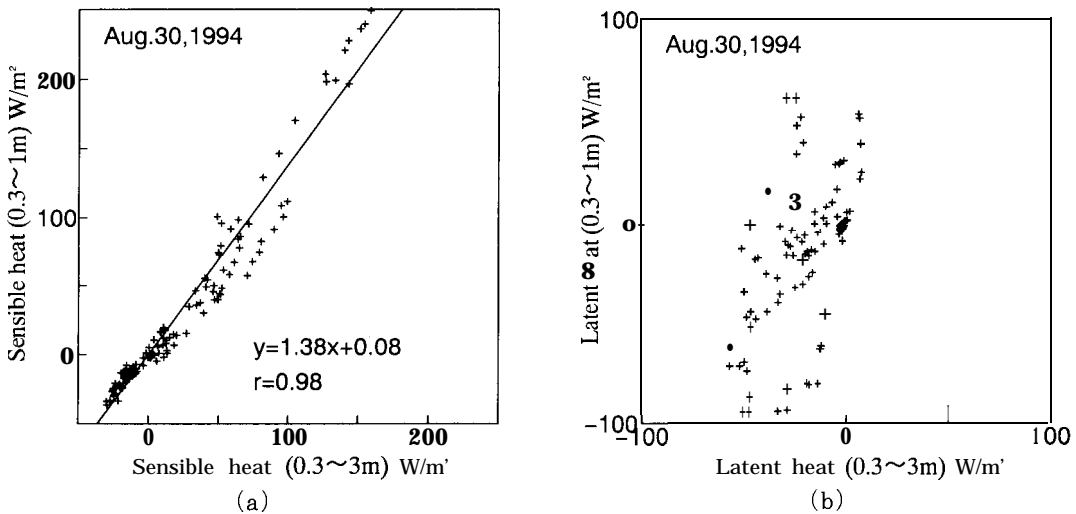


Fig. 14. Relation between heat fluxes estimated from the data at different heights.
 (a) Sensible heat flux
 (b) Latent heat flux

の潜熱フラックスは顕熱フラックスに較べるとややばらつきが大きいですが、その差はほぼ25%以内でコンスタントフラックス層の仮定は近似的に成立していたと見なすことができる。

2. 8月30日の顕熱・潜熱フラックスの日変化

地表面が乾燥していた8月30日の顕熱・潜熱フラックスの日変化を Fig. 13 に示す。Fig. 11 と同様に Fig. 13(a) は高度0.3m と3.0m のデータを、Fig. 13(b) は高度0.3m と1.0m のデータを用いて求めた結果である。顕熱フラックスは午後から正の範囲で大きく変動した。14時頃には一時的に顕熱フラックスの値が 20.1W/m^2 (Fig. 13(a), 起時14時10分)、または 14.4W/m^2 (Fig. 13(b), 起時14時00分)まで減少した。これらはともに測定高度間の気温差が1度近く

まで減少し、気温の鉛直勾配が小さくなったことによるものである。この現象は比湿と同様に接地層内の対流混合と関係があると思われる。最も興味深いことは比湿勾配の逆転に伴い日中でも潜熱フラックスが下向き(上空の大気から地表面に向かう方向)に 44.6W/m^2 (Fig. 13(a), 起時13時20分)観測されたことである。また Fig. 13(a) で見られるように午後は顕熱フラックスと潜熱フラックスがフラックスの0線をはさんでほぼ対称となったことも興味深い。一般に顕熱フラックスと潜熱フラックスの向きが異なり、ポアソン比が負となるのは周辺部からの移流による効果と説明されるが (Kaimal & Finnigan, 1994), 観測点付近に移流をもたらすような地形や地面状態の変化は認められない。Wang & Mitsuta (1990)

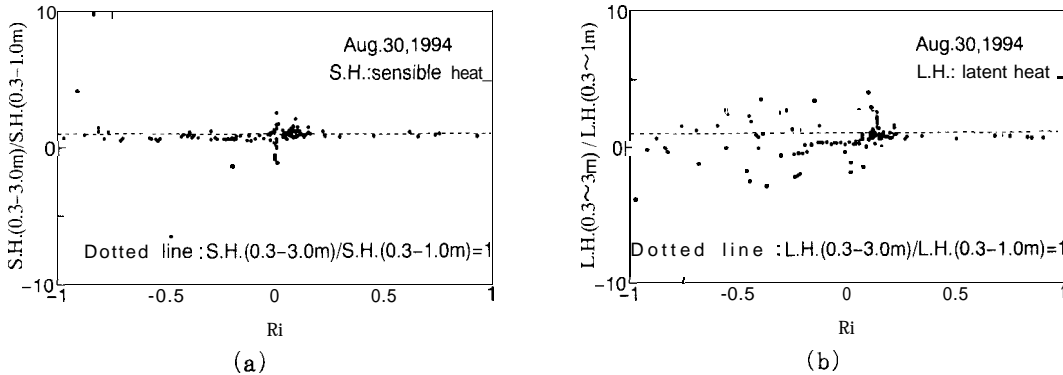


Fig. 15. Relation between the ratio of heat fluxes estimated from the data at different heights and Richardson number, Ri.

- (a) Sensible heat flux
(b) Latent heat flux

や Kobayashi & Nagai (1995) は中国北西部の HEIFE 砂漠観測点において日中に潜熱フラックスが地面方向を向く今回と同様な観測結果を得ている。この原因については、現在研究が進められている段階で (小林ら, 1996) 今後の成果を待たなければならない。

Fig. 12 と同様に異なる観測高度のデータに基づいて計算したフラックス間の散布図を Fig. 14(a), (b) に示す。これより顕熱フラックスは観測高度による差がほとんどなくコンスタントフラックス層の仮定が近似的に成り立っていたが、潜熱フラックスの場合は相関が弱く、高度0.3m と3.0m 間の気層ではコンスタントフラックス層の仮定が成り立っていなかったことが明白である。

次に大気の安定度とコンスタントフラックス層の仮定の関係を見る。Fig. 15の縦軸は高度0.3m と3.0m 間のフラックスと高度0.3m と1.0m 間のフラックスの比、横軸は安定度 Ri 数 (Richardson number) である。Ri 数は次式によって計算した (例えば Oke, 1978)。

$$Ri = \frac{g (\partial \bar{T} / \partial z)}{T (\partial \bar{u} / \partial z)^2}$$

ここで \bar{T} は気層内の平均温度 (K), \bar{u} は平均風速, g は重力加速度である。Fig. 15(a) より明らかなように顕熱フラックスの比は大気の安定度に関わらずほぼ一定であるが、Fig. 15(b) の潜熱フラックスの比は大気の状態が不安定 ($Ri < 0$) の場合にばらつきが大きくなっている。

今回の観測結果から顕熱フラックスは地表面が湿つ

ていた8月19日、地表面が乾燥していた8月30日共にコンスタントフラックス層の仮定が近似的に成立した。一方、潜熱フラックスは8月19日にはコンスタントフラックス層の仮定が近似的に成立したが、8月30日には成立しなかった。地表面が乾燥している場合は、日中の強い不安定状態の下では地表面付近で水蒸気に関するコンスタントフラックス層の仮定は成り立たず、これまで一般には等しいとされている熱と水蒸気の乱流拡散係数が大きく異なることが考えられる。

ま と め

これまで気象学的に空白地帯であった青藏高原可西里地域で接地気象観測を行ない、高地特有の気象現象の一部を観測できた。標高5000m 近い高地での強い日射が地表付近の大気の状態を不安定にし、可西里地域特有の変わりやすい天気や午後の強風などをもたらしている。また乾燥裸地面上での顕熱と潜熱フラックスの観測結果から、熱と水蒸気の乱流拡散係数が異なることや水蒸気についてのコンスタントフラックス層の仮定が乾燥裸地面上では成り立たないことなどが明らかになった。特に興味深い現象としては日中、乾燥地表面付近で観測された水蒸気勾配の逆転があげられるが、その原因説明は今後の研究に待たなければならない。

謝 辞

今回の観測に際し、無電源地帯で使用可能な気象観測機器を、快く長期間お貸しいただいた白山工業 (株) とコーナシステム (株) に深く感謝する。

参 考 文 献

- 小柴 厚 1982 飽和水蒸気圧の計算式. 気象庁技術通信, 28
- 小林哲夫・賀 文君・永井秀幸・足立和彦 1996 高温乾燥土壌面における水蒸気密度鉛直プロファイルの不連続性について. 水文・水資源学会誌, 9: 438-443
- 近藤純正 1994 水環境の気象学. 朝倉書店, 東京, 99-108頁
- 中村和郎・木村竜治・内嶋善兵衛 1986 日本の気候. 岩波書店, 東京, 8-15頁
- Kiamal, J. C. and J. J. Finningan 1994 *Atmospheric Boundary Layer Flow*. Oxford Univ. Press, Oxford (England) :pp.66-77
- Kobayashi, T. and H. Nagai 1995 Measuring the evaporation from a sand surface at the HEIFE desert station by the dry surface layer (DSL) method. *J. Meteor. Soc. Japan*, 73 : 280-294
- Monin, A. S. and A. M. Obukohov 1954 Basic turbulent mixing laws in the atmospheric surface layer. *Trudy Geofiz Inst, AN SSSR*, 24(151): 163-187
- Oke, T. R. 1978 *Boundary Layer Climates*. Methuen & Co Ltd, London
- 新田 尚・齊藤直輔訳 1980 オーク: 境界層の気候. 朝倉書店, 東京, 52-53頁, 284-290頁
- Panofsky, H. A. and J. A. Dutton 1984 *Atmospheric Turbulence*. Wiley-Interscience, New York, 397pp
- Thornthwaite, C. W. and B. Holtzman 1942 Measurement of evaporation from land and water surface. *USDA Tech. Bull.*, 817: 75
- Wang, J. and Y. Mitsuta 1990 Peculiar downward water vapor flux over Gobi Desert in the daytime. *J. Meteor. Soc. Japan*, 68 : 399-402

Summary

Intensive observations of some meteorological elements were made near the surface in Kokoshiri area at over 4500m elevation, Chin-Tang Plateau, China, in summer of 1994.

The results obtained by analyzing the data are as follows:

- a) Strong solar radiation heats the ground and causes changeable weather and strong winds in the afternoon.
- b) The constant-flux layer of water vapor was not observed in the surface air layer when the soil surface was dry, although it was confirmed to be approximately developed when the soil surface was wet.
- c) Humidity inversion was observed over dry soil surfaces in the daytime. However, much more work is needed to clarify the cause or its mechanism.