九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

中国青蔵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:九州大學農學部學藝雜誌.51 (3/4), pp.187-196, 1997-03.九州大學農學部 バージョン: 権利関係: 九大農学芸誌(Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ.) 第51巻第3·4号 187-196 (1997)

中国青蔵高原可可西里地域の 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,青海省から西蔵 (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 面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,ほぼ一様な地 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

date	weather (morning)	weather (afternoon)	max.temp. (℃)	min.temp. (℃)	avg.temp. (℃)
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	
Ũ					
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	,			

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

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, 気温が低いため,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

	14010 5. 5	on temperature	III KOKOSIIIII,	1334.
date	soil temp. max.temp. (℃)	(5mm depth) min.temp. (℃)	soil temp. (max.temp. (°C)	30cm depth) min.temp. (℃)
14 Aug 15 Aug	35.2	-1.9		6.2
16 Aug 17 Aug	19.5 12.8	0.8 0.5	10.9 8.3	5.0 4.7
18 Aug	15.2	0.4	8.3	4.0
19 Aug 20 Aug	18.0	-0.5 -1.8	7.1 5.5	2.7 2.5
24 Aug	39.7	2.3	9.3	5.6
25 Aug 26 Aug	$\frac{36.4}{35.5}$	-4.0 -5.5	9.2 8.7	5.9 4.4
27 Aug 28 Aug	35.9 37.8	-3.4 -3.1	8.9 8.9	5.2 5.5
29 Aug	35.7	1.2	9.2	6.1
30 Aug 31 Aug	37.2 37.6	-3.4 0.6	10.2 10.1	5.7 7.0
1 Sep	38.8	3.6	10.6	7.6
2 Sep	14.0	1.9	10.4	6.9

Table 3. Soil temperature in Kokoshili, 1994

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, 5. Diurnal variation of air tempera ture at three heights.



Fig. 4. Accumulated global solar radiation.



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



Fig. 7. Diurnal variation of wind speed



Fig. 9. Diurnal variation of air temperature 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 615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 614時頃にかけて2m/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4.16MJ/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



Fig. 8. Accumulated global solar radiation.



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

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

水平で一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 & Obukohov, 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 (Thornthwaite & Holzman, 1942).

$$Q = -u_*^2 \frac{K_h \quad \Theta_2 - \Theta_1}{K_m \quad U_2 - U_1}$$
$$\frac{E}{\rho} = -u_*^2 \frac{K_e}{K_m} \frac{q_2 - q_1}{U_2 - U_1}$$

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 測できなかったので, 風速の対数法則を仮定し、地表









面の状態から粗度長 2a=0.001m 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0~20W/m²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/m²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1.0 m 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)









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/m² (Fig. 13(a),起時14時10分),また は14.4W/m² (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/ m²(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,ボー エ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 & Finningan, 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 定の関係をみる. 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).

$$\mathbf{R}_{i} = \frac{g \left(\frac{\partial \overline{T}}{\partial z} \right)}{T \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \right)^{2}}$$

ここで Tは気層内の平均温度 (K), 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 ほ一定であるが, 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っ

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蔵高原可可 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、その原因解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ィー 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・斉藤直輔訳 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.