

# 中国西北部乾燥地域(HEIFE 領域)の様々な地表面における 気象要素と熱収支特性

## Meteorological and surface heat balance characteristics over different surface conditions in arid northwest China (HEIFE area)

楊 勤 (Yang Qin)<sup>1)</sup>  
 塚本 修 (Osamu Tsukamoto)<sup>2)</sup>

Surface meteorological and heat balance were analyzed based on various surface conditions over arid region in northwest China(HEIFE area). The different surface conditions were clearly observed in summer rather than in winter. Summer data were selected from the HEIFE database.

Significant evening peaks of vapor pressure were also observed in Linze oasis as well as Zhangye oasis. And the peak was accompanied by air temperature dip and relative humidity peak in the lower layer. However, the peak cannot be observed in high wind condition as the mechanical mixing reduces the vertical gradients of air temperature and humidity. The oasis can be characterized by low wind speed due to wind sheltering by plants. In winter, plant activities are reduced and surface conditions are almost similar for desert and oasis, leading to no peak of vapor pressure.

Surface heat balances were also analyzed based on 4-component radiation measurement and sensible and latent heat flux measurements by eddy covariance method. Net radiation in the oasis area is about 50% larger than desert area due to the smaller upwelling radiation in oasis. Heat distribution into sensible heat and latent heat was different between oasis and desert. This unbalance of heat can lead to local circulation between oasis and desert as "desert-oasis interaction".

**Keywords:** Vapor pressure, Oasis, Desert, HEIFE, Surface heat balance

### I. はじめに

中国西北部の乾燥地域にある甘粛省の黒河流域 (図.1 参照)を対象として 1990 年代前半に、日中共同研究「HEIFE(黒河領域における地空相互作用の研究)」プロジェクトが実施された(塚本, 1993)。これは年間の降雨量が 200mm 以下という乾燥地域に複雑に分布する様々な地表面(オアシス、砂漠、ゴビなど)と大気の相互作

用について、水の循環を中心に総合的に観測したもので、これまでも多くの成果が報告されている(光田, 1995 など)。その中で Tsukamoto et al.(1993)はオアシスにおける水蒸気圧の日変化に特異な現象があることを見出した。また Sahashi et al.(1993)も気温と水蒸気圧の日変化が、オアシスと砂漠において顕著な違いがあることを報告している。

1) 岡山大学大学院自然科学研究科, 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Okayama, 700-8530, Japan

2) 岡山大学理学部地球科学科, 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Okayama University, Okayama, 700-8530, Japan

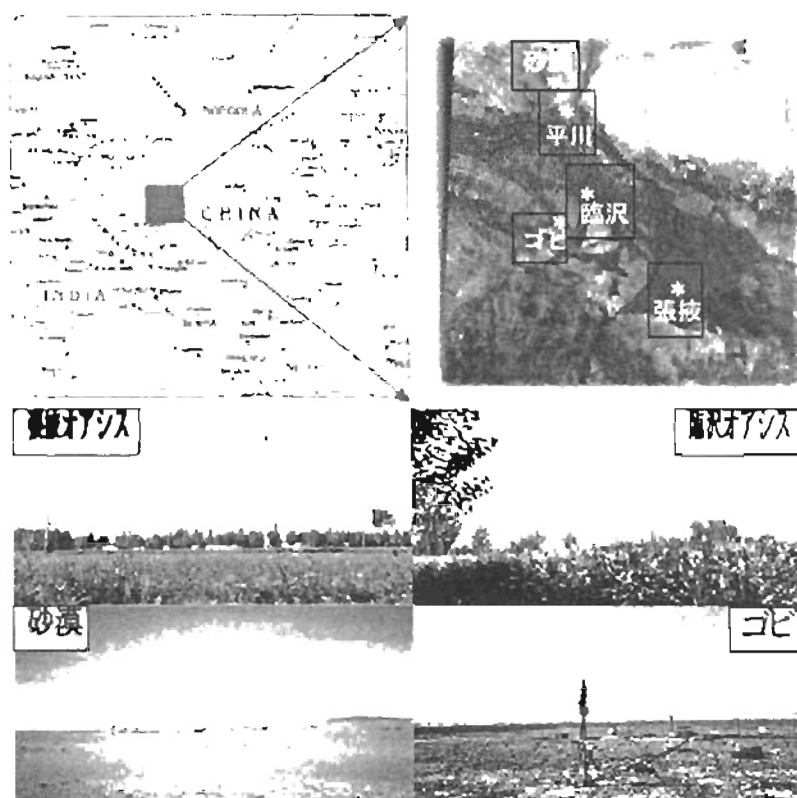


図1 黒河領域にある観測点の位置図とオアシス、砂漠、ゴビの地表面状態(8月)

表1 5つの基本観測点の特徴

観測点	特 徴
張掖 (Zhangye)	15km×25kmのオアシスの中にあり、小麦、トウモロコシ、果樹、防風林としてのポプラ並木が栽培されている。
砂漠 (Desert)	領域北側の砂漠にあり、集落のあるオアシスから4kmほど離れている。北から北西側は延々と砂漠が続いている。
臨沢 (Linze)	領域の西部にあるオアシスで張掖よりはかなり小さい。トウモロコシと高いポプラ並木がある。
ゴビ (Gobi)	臨沢から2km離れた南側にある。礫が土に埋まり、地表面が硬いが所々に短い植生がある。
平川 (Pingchuan)	砂漠観測点の近くの小さな集落の中にあり、一番小さい規模のオアシスである。

しかし、この段階では代表的な2つの観測点以外の観測データが十分に揃っていなかった。そこで、今回それらを含む5つの基本観測点(張掖オアシス、臨沢オアシス、平川、砂漠、ゴビ)の観測塔のデータを統合して気温、相対湿度、

風速などの気象要素と放射各成分及び顕熱・潜熱のフラックスを合わせて時間的・空間的な変化特性について検討した。HEIFE領域における5つの基本観測点の位置と特徴を図1と表1に示している。

## II. 気象要素の日変化

図 2~5 に 5 つの基本観測点における代表的な夏の 4 日間について気温、湿度、水蒸気圧、風速の時間変化を示す。また図 6, 7 にはこの 4 日間について各時刻毎に平均値を作成して、夏の代表的な気象要素の日変化を時間高度断面図で示した。

まず、気温の時間的・空間的な変化を見ると、午前中の気温の上昇時の様子はどの地点も良く似ていて、高度による差もあまりない。しかし、午後から夜間にかけての気温の降下時には地点と高度による差が特徴的に見られる。つまり砂漠とゴビでは一般的なサインカーブ型の日変化をするのに対して、オアシスと平川では気温の降下が(特に夕方に)急激に起こり、朝の最低気温は砂漠より 5°C 以上低くなる。この時に、オアシスでは鉛直方向の勾配が砂漠やゴビに比べて、かなり大きく、1m 高度での気温の急低下が顕著になり、強い逆転層(安定層)をつくる。そして、夕方に気温が急激に下がっていったん極小値を示した後に、一時的に気温は上昇して再び翌朝まで降下を続けるという変化を伴っている。また平川は砂漠の中の小さなオアシスあるので、鉛直方向の温度差はオアシスと砂漠の中間位になる。

この 4 日間では Tsukamoto et al.(1993)らが指摘したように、張掖と臨沢の水蒸気圧に顕著な夕方のピークがほとんど毎日見られる。この夕方の水蒸気圧の急増は先に述べた気温の急降下及び相対湿度の急増と密接に関係して起こっているのがわかる。これと対照的に、張掖の 8 月 18 日と臨沢の 8 月 27 日には水蒸気圧のピークは見られなかった。この時の図 4 に示す風速データについて見ると、さらに興味深い。つまり、夕方の水蒸気圧のピークや気温の急低下があまり大きくない日には風速が急に増大することがわかった。風速の増大は夕方における上下方向の乱流混合を強めるため、鉛直方向の気温や水蒸気圧についての勾配が小さくなり、水蒸気圧のピークや気温の急低下が見られなかった。一般にオアシスにおいては地表面付近に多くの

木や植生が存在するために、風速は他の観測所より小さくなる。それはオアシスにおける夕方の急激な放射冷却を加速し、気温の急激な低下を引き起こしている原因でもあったと考えられる。

## III. 水蒸気圧の時間的・空間的な変化

Tsukamoto et al.(1993), Sahashi et al. (1993)では張掖オアシスにおける水蒸気圧の日変化が砂漠と比較して晴天日の夕方に顕著なピークを示すことが明らかになった。水蒸気圧は気温と相対湿度から計算され、その日変化については幾つかのパターンがあることが知られている。Baumgartner(1982)は以下の三つの型に分類している。

①砂漠型：午後に極小を持つ

②海洋型：午後に極大を持つ

③大陸型：朝と午後に極小を持つ

そして、これらの変化は地表面から供給される水蒸気量(蒸発量)と大気境界層(混合層)高度の時間変化の兼ね合いで決まる、とされている(白柳,2000)。上で示した夕方の顕著な水蒸気圧のピークは③の大陸型に近いものであるが、通常に見られるもの(例えば Acevedo and Fitzjarrald,2001)と比べて夕方の振幅が非常に大きく、10hPa 程度もある。

代表的なオアシスにある張掖と臨沢の時間変化を見ると、1日に極小と極大を 2 回ずつ持つような日変化をする。つまり明け方と夕方に極大(ピーク)を持つが、下層(1m)での夕方のピークが特に顕著になる。しかしオアシスとしての張掖と臨沢は水蒸気圧の日変化にやや違いがある。張掖オアシスでは水蒸気圧が夕方に急増した後、徐々に減少して、翌朝の日出前後に二番目のピークに達し、昼間に最小値を持つ。一方、臨沢オアシスでは翌朝の二番目のピークはかなり弱くなり、昼間の極小値は張掖よりかなり小さい。それは地表面の植生密度に深く関係していると考えられる。それらのオアシスに対して砂漠では一般的な砂漠型の変化で、極小値を午後に 1 回だけ持つ日変化を示して、高度による変化が昼間でも夜でもあまり無い。ゴビと

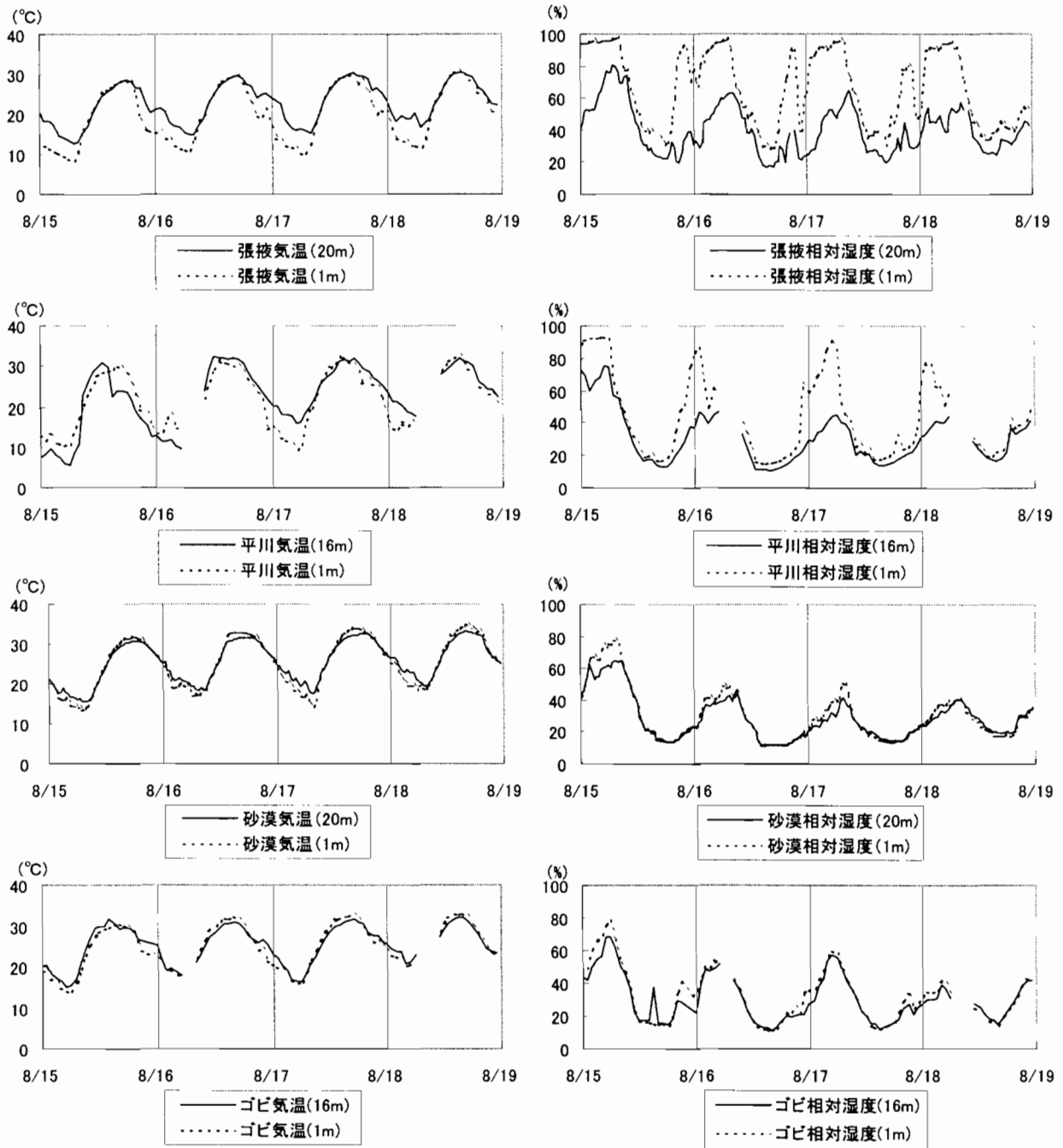


図2 張掖オアシス、平川、砂漠、戈壁における気温と相対湿度の時間的空間的な変化(1991/8/15~18)

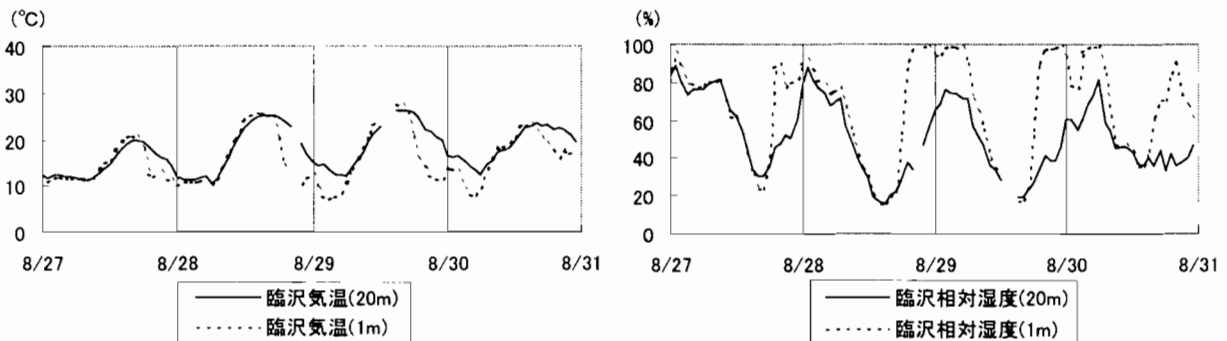


図3 臨沢オアシスにおける気温と相対湿度の時間的空間的な変化(1991/8/27~30)

中国西北部乾燥地域（HEIFE 領域）の様々な地表面における気象要素と熱収支特性

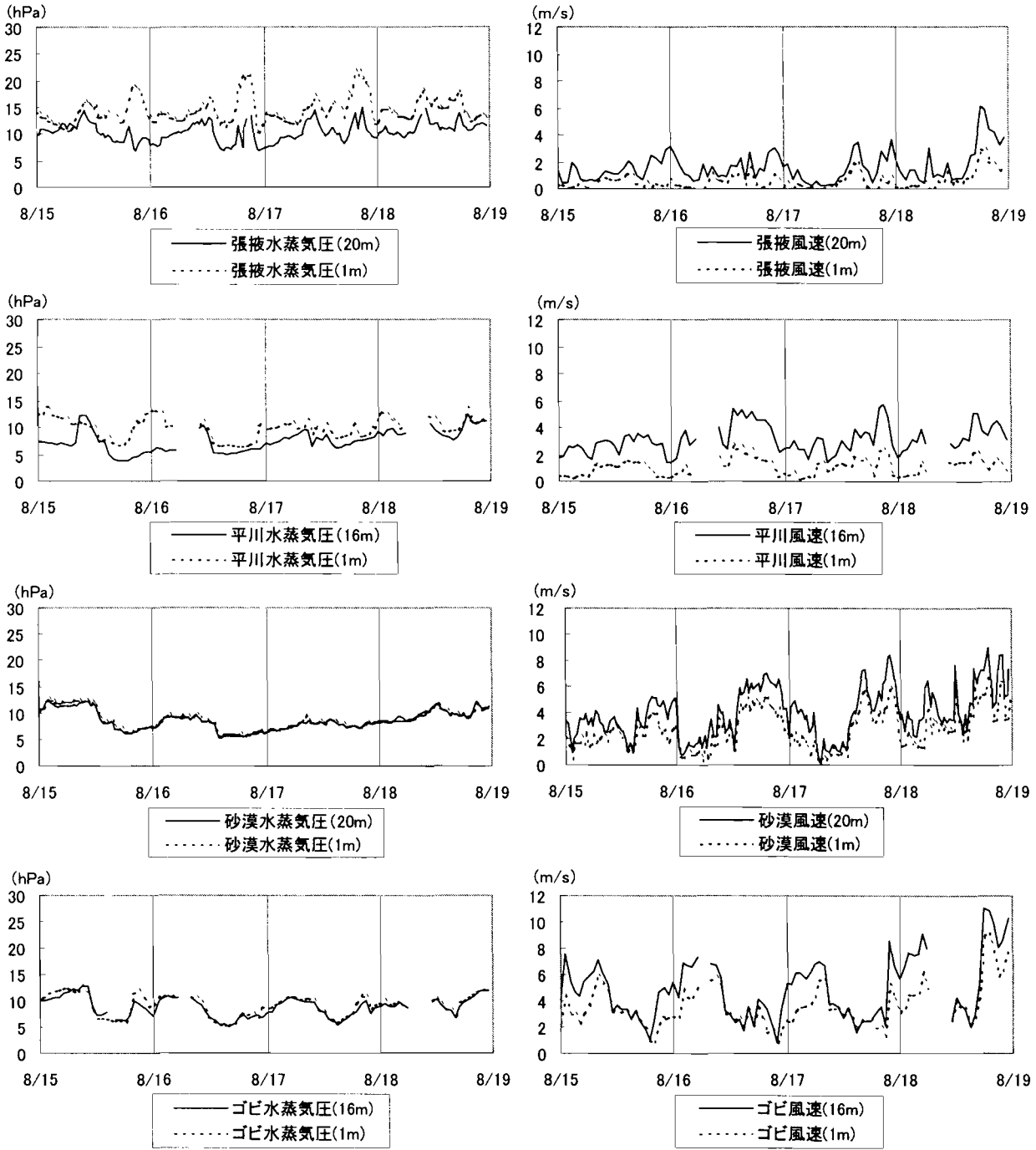


図4 張掖、平川、砂漠、ゴビにおける水蒸気圧と風速の時間的空間的な変化(1991/8/15~18)

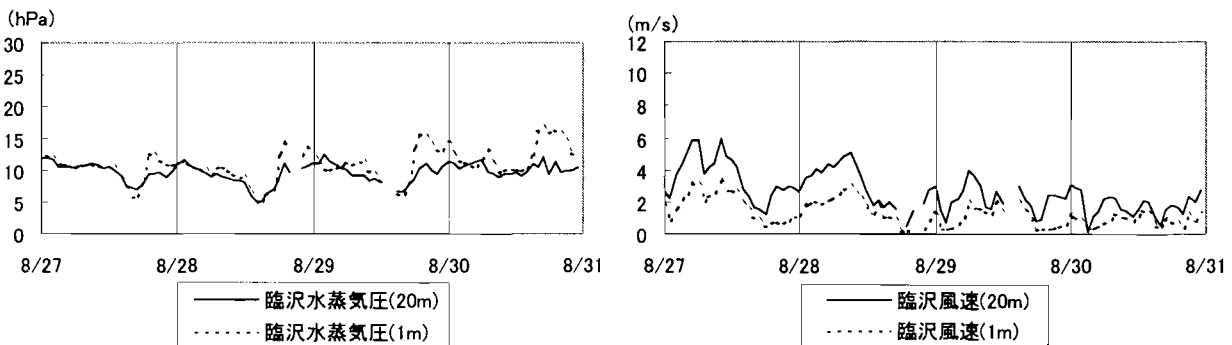


図5 臨沢オアシスにおける水蒸気圧と風速の時間的空間的な変化(1991/8/27~30)

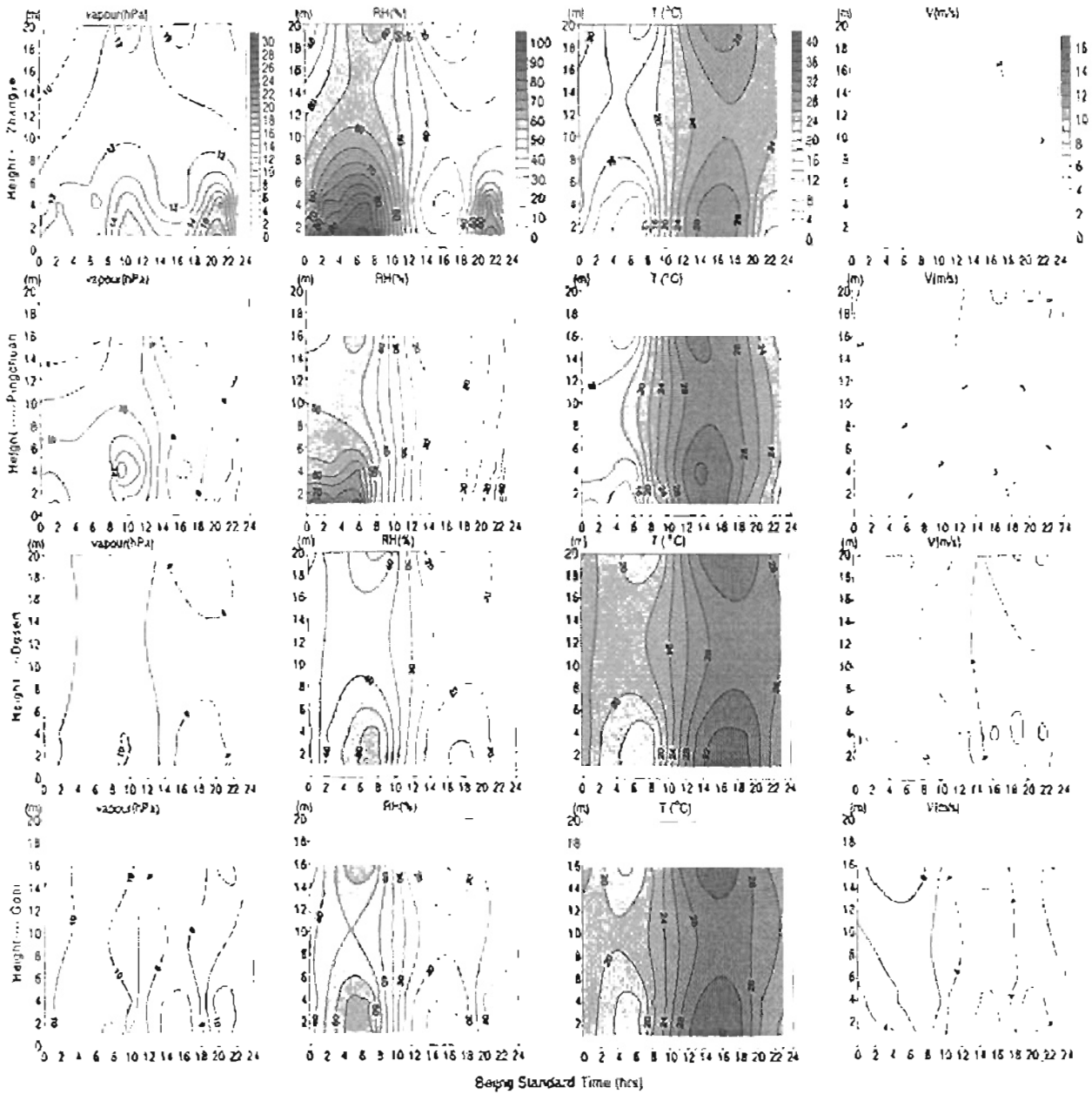


図6 張掖オアシス、平川、砂漠、ゴビにおける水蒸気圧、相対湿度、気温、風速の時間高度断面図(1991/8/15~18の4日間の平均値)

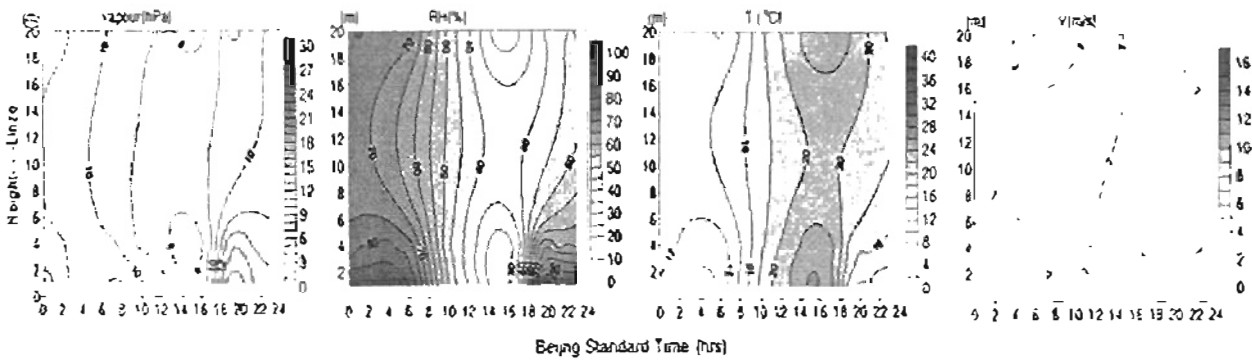


図7 臨沢オアシスにおける水蒸気圧、相対湿度、気温、風速の時間高度断面図(1991/8/27~30の4日間の平均値)

平川ではオアシスの近くにあるのでオアシスの影響を受け、夕方と翌朝の日出前後に水蒸気圧が少し増え、昼間に極小値を持つようになる。

このような夕方の水蒸気圧のピークについて季節変化を調べた。図8に張掖における8月と12月の水蒸気圧の変化について、高さ20mと1mでのものを示す。8月には図2に図示したものと同様な夕方のピークが顕著に見られたが、12月には水蒸気圧の高度変化や時間変化もほとんど無くなった。また水蒸気圧は夏の約1/3倍に減少した。この変化は地表面の植生が冬には萎れることで地表面の乾燥化が進み、蒸発量は減少しているためと考えられる。つまり秋から冬にかけてオアシスでは砂漠やゴビと同じような地表面状態になるためと考えられる。気温についてオアシスでは1mでの気温の急低下が冬季の場合にも見られるが、20mでは見られず、これについては季節による差はないようである。

#### IV. 地表面放射量

地表面放射は以下の4成分を持ち、その総和として純放射量(正味放射量),  $R_n$  が定義される。

$$R_n = S \downarrow - S \uparrow + L \downarrow - L \uparrow$$

$S \downarrow$ : 下向きの短波放射

$S \uparrow$ : 上向きの短波放射

$L \downarrow$ : 下向きの長波放射

$L \uparrow$ : 上向きの長波放射

オアシス、砂漠、ゴビでは地表面植生の分布がかなり違い、図1の写真のような夏には特にその点が著しい。この地表面植生の違いの影響を受け、地表面の放射収支が大きく異なっている。

臨沢オアシス(1991/7/5~8日)と張掖オアシス、砂漠、ゴビ(1991/8/15~18日)の各4日間のデータを取り込んで、放射収支の各成分日変化を調べ、図9に示している。4つの場所では太陽放射(下向き短波放射)と下向きの長波放射はあまり変わらない。一方、オアシスでは上向きの短波放射は日最大値が  $100 \text{ W/m}^2$ 、砂漠とゴビでは  $200 \text{ W/m}^2$  であり、これは砂漠とゴビの反射率(アルベド)はオアシスより大きいことを示している。反射率とは上向きの短波放射と下

向きの短波放射の比である( $A = S \uparrow / S \downarrow$ )。4つの基本観測点について日射量が最大になる正午頃の反射率はオアシスでは  $0.1 \sim 0.15$ 、砂漠では  $0.24 \sim 0.25$ 、ゴビでは  $0.21 \sim 0.22$  の範囲であり、砂漠の反射率は一番大きいのがわかった。日平均値については表2に示すとおりである。

上向きの長波放射についてオアシスで日最大値は  $400 \text{ W/m}^2$ 、砂漠とゴビで  $510 \sim 580 \text{ W/m}^2$  位である。上向きの長波放射についてオアシスは砂漠に比べて日変化が小さくなる。その原因は地表面を植生が覆っているので地中水分が大きく、土壌温度が低くなり、地表面から上向きへの赤外放射が小さくて、日変化も小さい(Shen and Zou, 1993)。これに対して砂漠とゴビでは地表面温度が大きく変化し、上向き長波放射量の日変化が大きくなる。

これらの4地点で下向き短波放射と下向き長波放射の違いはほとんどないものの、地表面状態の違いから上向き短波放射と上向き長波放射に大きな差を生み出して、結果的に張掖オアシスと臨沢オアシスでは純放射量  $R_n$  が砂漠とゴビよりかなり大きくなる。砂漠とゴビにおける昼間の最大値は  $460 \sim 510 \text{ W/m}^2$ 、張掖オアシスと臨沢オアシスでは  $710 \sim 750 \text{ W/m}^2$  と約1.5倍もの違いになる。表2に4地点の各放射成分、反射率、顕熱・潜熱、ポ-エン比の日平均値(4日間)を示している。

#### V. 地表面潜熱・顕熱フラックス

上に述べた放射収支の4成分から得られる正味放射量,  $R_n$  は地表面の大気を加熱する顕熱・潜熱フラックス( $H, LE$ )、土壌を加熱する地中フラックス( $G$ )に配分される。

$$R_n = H + LE + G$$

張掖オアシス、砂漠、ゴビ(1991/8/15~18)と臨沢オアシス(1991/7/5~8)における顕熱・潜熱フラックスについて検討した。4地点におけるフラックスについて図9を見ると、張掖や臨沢オアシスでは昼間に上向きの潜熱輸送量が顕熱輸送量よりかなり大きくなる。そして、張掖オアシスでは午後のある時間から顕熱フラックス

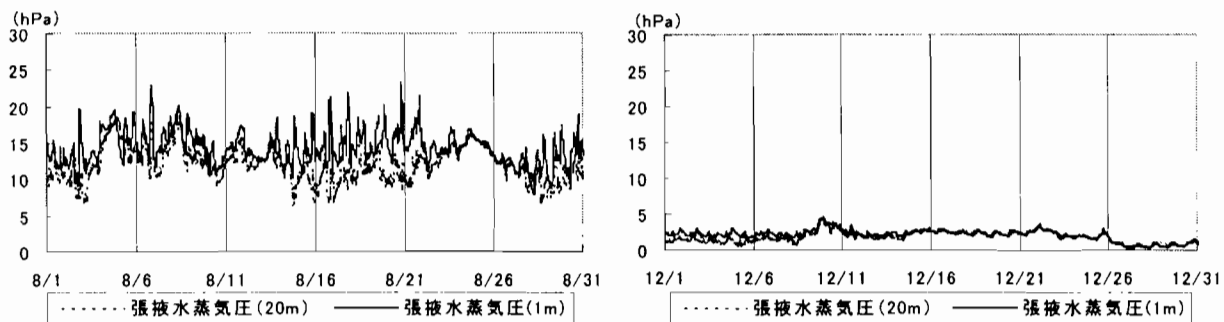


図8 張掖オアシスにおける水蒸気圧の日変化についての夏季と冬季の対比(1991年8月,12月)

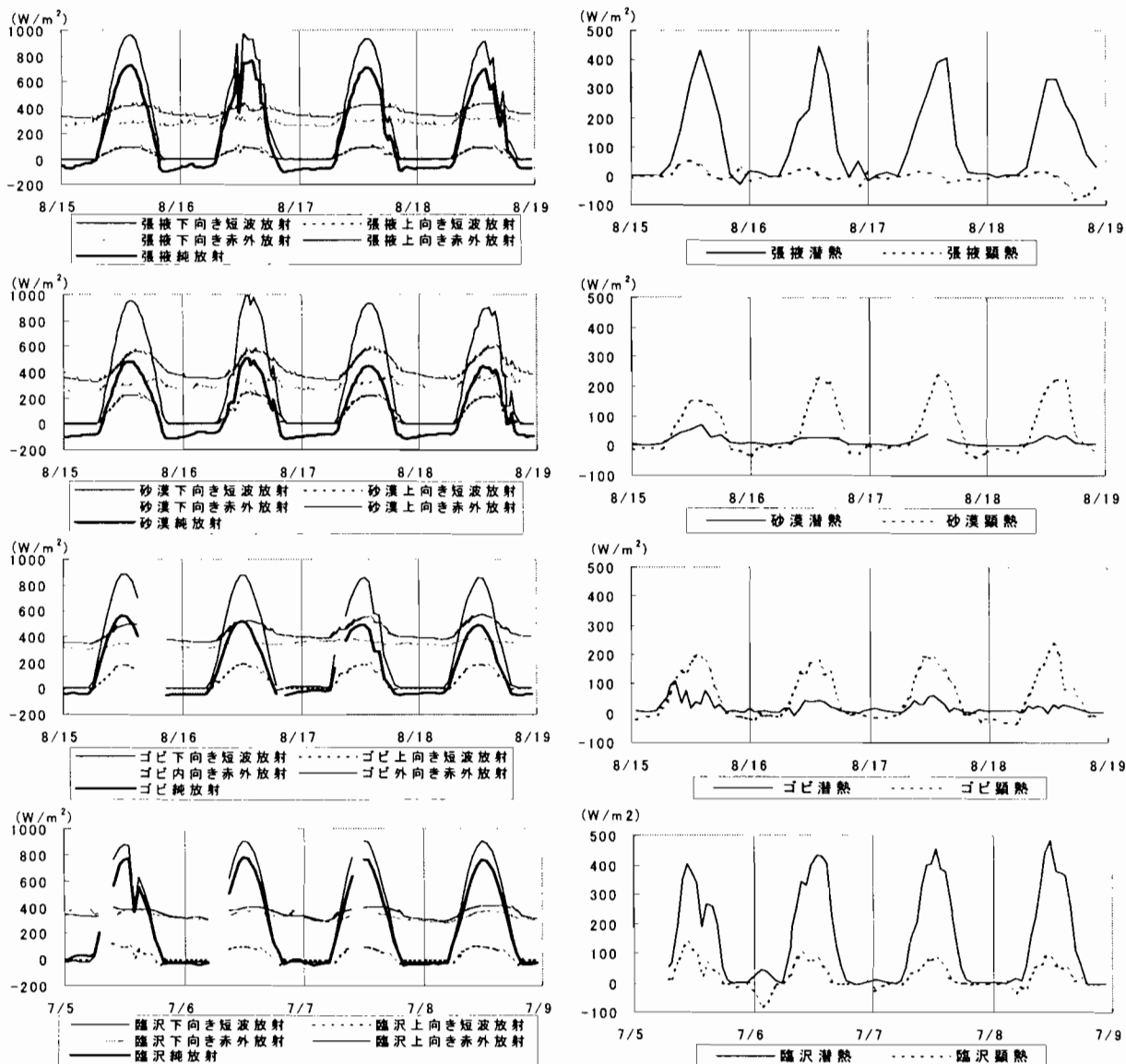


図9 張掖、砂漠、ゴビ(1991/8/15-18)と臨沢(1991/7/5-8)における放射量(左)と顕熱フラックス、潜熱フラックス(右)の時間変化

表2 4地点の各放射成分、反射率、顕熱、潜熱フラックスの日平均値(夏の4日間)

観測所	S↓ (W/m <sup>2</sup> )	S↑ (W/m <sup>2</sup> )	L↓ (W/m <sup>2</sup> )	L↑ (W/m <sup>2</sup> )	Rn (W/m <sup>2</sup> )	アルベド (S↑/S↓)	H (W/m <sup>2</sup> )	LE (W/m <sup>2</sup> )	ボーエン比 (H/LE)
張掖	318.1	37.0	285.4	368.8	197.7	0.12	-2.2	120.0	-0.02
砂漠	302.4	82.0	304.2	433.9	90.8	0.27	55.2	15.4	3.59
ゴビ	298.8	61.9	346.0	432.1	150.4	0.21	61.7	19.1	3.23
臨沢	288.3	27.8	335.9	357.6	239.1	0.10	28.1	166.4	0.17



が負になることがある。一般に昼間の大気は不安定状態で顕熱フラックスが正として上向きに輸送される。しかし、オアシスの周りは砂漠やゴビに囲まれており、周囲との相互作用のためオアシスでは顕熱が下向きへ輸送される現象(いわゆる「オアシス効果」, Kai et al.1997)が現れた。これは特に風の強い8月18日に最も顕著であった。一方、砂漠とゴビでは上向きの顕熱輸送量が地表面蒸発による潜熱の輸送量より顕著に大きいことがわかった。これについてオアシスでは地表面近くの空気は低温、湿潤であり、砂漠では高温、乾燥であることが大きく影響していると考えられる。

## VI. まとめ

中国の乾燥地域(HEIFE 領域)を含むオアシスや砂漠の間の5つの基本観測点について地表面状態が大きく異なる夏の期間について、気象要素の時間的・空間的特性、顕熱、潜熱、放射の特性を中心にして検討した。張掖と臨沢オアシスでは夕方の水蒸気圧のピークが出現する条件は温度の急低下や風速の急減にあることがわかった。夕方の水蒸気圧のピークの大きさは高度とともに減衰した。一方、砂漠やゴビや平川といった植生の乏しい地点では、夕方の水蒸気圧のピークが見られなかった。そして、この現象はオアシスで植生の乏しくなる冬季には見られなくなることがわかった。

オアシスと砂漠、ゴビについて純放射量を比較すると、下向き短波放射と長波放射は4地点ではあまり変わらない。しかし、オアシスでは上向き短波放射は砂漠やゴビの半分程度で、上向き長波放射は約0.7倍に小さくなるため、純放射量は砂漠やゴビの1.7倍と大きくなる。顕熱や潜熱フラックスの日変化について見ると、オアシスでは昼間に潜熱フラックスは顕熱フラックスより約4.5倍と大きくなる。逆に砂漠やゴビでは顕熱フラックスは潜熱フラックスに比べて約4倍程度に大きくなる。このような地表

面の熱収支に大きな差が見られることから、オアシスと砂漠の間にエネルギーを輸送する局地循環が存在すると考えられる。このような循環はオアシスでの昼間の下向き熱輸送やゴビでの水蒸気圧の逆転現象の原因と考えられる。これらについては、今後の研究課題として検討を進めて行く。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、HEIFE 計画に関わった日本・中国双方の多くの関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。また、本 HEIFE 計画は文部省国際共同研究事業費、科学研究費の交付を受けて実施されたものである。

## 参考文献

- Acevedo, O.C. and D.R. Fitzjarrald (2001): The early evening surface-layer transition: Temporal and spatial variability, *Jour. Atmos. Sci.*, 58, 2650-2667
- Kai, K., M. Matsuda and R. Sato (1997): Oasis effect observed at Zhangye oasis in the Hexi Corridor, China, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 75, 1171-1178.
- 光田 寧 (1995): 乾燥地の自然環境, 気象研究ノート, 第184号, 日本気象学会, 158p.
- Sahashi, K., O. Tsukamoto, Y. Mitsuta and J. Wang (1993): Peculiar daily course of the specific humidity and air temperature over Zhangye field, *Proc. International Symp. HEIFE*, 430-436.
- Shen, Z. and J. Zou (1993): The energy budget on the ground surface over desert and Oasis in HEIFE area, *Proc. International Symp. HEIFE*, 596-602.
- 白柳文朗 (2000): 水蒸気圧の日変化特性, 岡山大学理学部地球科学科平成12年度卒業論文
- 塚本 修 (1993): HEIFE (HEIFE river Field Experiment; ハイフェ), *農業気象*, 49, 205-206.
- Tsukamoto O., J. Wang and Y. Mitsuta (1992): A significant evening peak of vapor pressure at an oasis in the semi-arid region, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 70, 1155-1160