

オアシス効果について

(2002年7月17日水曜日)

玉川一郎 (岐阜大学流域圏科学研究センター)

1 はじめに

本稿は、2002年7月17日に、総合地球環境学研究所で行われたオアシスプロジェクトの勉強会「水曜日」での配布文書に加筆したものである。筆者に与えられた題は「オアシス効果とは何か」というものであった。乾燥地域にオアシスのような湿潤な小地域が存在するとどのようなことが起こるのか、また、それらのうち何を携えてオアシス効果と呼ぶのか、更に、それに関して、黒河流域でどのような研究結果があるのかについて、ここで述べる。

本題に入る前に、水の蒸発と熱との関係について簡単に紹介する。地面は太陽や大気からの電磁波の放射エネルギーを受け、それを反射あるいは温度に応じて放射するという電磁波によるエネルギーの交換と、それ以外に、大気を直接加熱したり、大地を加熱したり、更にはそこに存在する水あるいは氷を蒸発/昇華させ(その水蒸気を上空に輸送し上空で凝結/凝固させることによって熱を輸送し)たりする。この関係を地表面熱収支と呼び、式で表すと式(1)のようになる。

$$(1 - \alpha)Q_s + Q_{ld} - Q_{lu} - Q_n = H + \ell E + G \quad (1)$$

ここで、式中の各項は左辺および中辺が地面にやってくる向きを正、右辺が地面から出て行く向きを正としたエネルギーの輸送を表している。 Q_s は太陽からの可視光線を中心とする放射で、 α は地面の反射率、 Q_{ld} は大気からの下向きの赤外放射、 Q_{lu} は地面からの上向き赤外放射であり、それら放射のエネルギー輸送の収支を放射収支 Q_n と呼ぶ。これらの式には、赤外線の波長域での放射が含まれていないが、これは地面の赤外放射率が理想的な放射状態(黒体)とどれだけ離れているかで表されるが、地面はほとんど黒体なのでここでは省略した。要なら Q_{lu} の部分に取り込めば良い。そして、このようなやりとりの結果地面に与えられたエネルギーは地面に接する空気を直接温める顕熱 H 、と地面での水の蒸発(氷の昇華) ℓE に使われる。そして、このようにして加熱された空気や放出された水蒸気は大気の運動によって上空へ運ばれていく。地面付近では大気運動は多くの場合乱流状態であるのでこれらを乱流輸送量と称することが多い。また、地中へと伝わって行く熱を G と表記している。これらの熱の輸送は、時間と面積に比例すると考えられるので、フラックスと呼ばれる面積当たり且つ時間当たりの輸送量で表現される。単位は、国際単位系では W/m^2 となる。

近くにある砂漠とオアシスの場合、上空からやって来る放射フラックスは同等であると考えられるので、地表面温度と植生を含む地表面の色に起因する地面からの放射量/反射量の違いと、水分の多寡を反映した蒸発量の差による ℓE の差の違いが現れると考えられる。

2 オアシス効果の定義

さて、よく耳にする「オアシス効果」であるが、どのように定義されているであろうか。インターネット上の検索エンジンで「オアシス効果」を探してみると、ほとんどはエアコンや空気清浄機の宣伝にヒットする。これらは流行のマイナスイオンなどの言葉で飾りながら「爽やかさ」をも

たらず効果について語っている。日常生活用語としてはこのようなあいまいに爽やかさを示す言葉として使われているが、気象学／気候学的には、以下のような定義が調査した所見付けられた。

乾燥した大気へ向かって地面から水が蒸発するために、(日中でも)地面の方が大気より温度が低くなって、大気から地面へと顕熱が輸送される現象

Glossary of Oceanography and the Related Geosciences with References

(<http://stommel.tamu.edu/~baum/paleo/paleogloss/paleogloss.html>)

Steven K. Baum, Texas Center for Climate Studies, Texas A&M University, Copyright 1995-1996, January 20, 1997

The Glossary (<http://stommel.tamu.edu/~baum/paleo/paleogloss/node32.html>)

oasis effect

A phenomenon where hot dry air in equilibrium with a desert flows across an oasis edge and experiences rapid evaporation using sensible heat from the air as well as radiant energy. The air is cooled by this process until it reaches equilibrium with the new surface.

乾燥地の中の湿潤地が蒸発の冷却によって周囲よりも常に冷たい現象

Oke, 'Boundary Layer Climates (2nd. Ed.)', p.165, 1987,

(iii) Oasis Effect

Due to the evaporation cooling, an isolated moisture source always finds itself cooler than its surroundings in an otherwise rather arid region. the desert oasis is the most obvious example of this situation.

同じ面積の水面(湿潤面)であっても、それが点在することにより、一つの水面である時よりも効率的に多くの蒸発が起きる現象

水環境の気象学(近藤純正)

1.1 エネルギーの循環

。。。植物の気孔は $10\mu\text{m}$ 程度の大きさで、 $100\mu\text{m}$ 程度の間隔に並んでおり、葉面の 1cm^2 あたりに 10^4 個程度存在し、気孔部分の面積は葉面の0.3%を占めるにすぎない。水の蒸散は、この面積比に比例するわけではなく、一種のオアシス効果(水面の点在効果)によって効率良く行われる。

これらは、乾燥地に囲まれた湿潤地であるオアシスで蒸発が活発におこることに関連した定義であり、上2つは活発な蒸発により地温あるいは気温が前節で述べた地表面熱収支の関係より低くなることに注目して定義されており、その低さを周囲の気温との差からとるのか、大気地面間でとるのか、の違いに過ぎない。オアシスでの大気の気温は周囲の気温を持つ空気の流入の影響を受けるので若干の定量的な違いはあるが本質的には同じことを指している。

それに対して、最後の定義は蒸発の活発さそのものを定義しており少々意味が違う。しかし、これも連続して蒸発面があるよりも点在する方が良く冷えその結果前述の2つの定義のような状況が起こる(例えば、オアシスが充分広ければ下層大気は湿潤化し蒸発が活発にならないので冷却が強く起こったりはしない)訳で、まったく別の現象を指し示している訳ではない。上述のどの意味でもこの言葉は使われており、その定義の細部は使用者によってそのたびに決められていると言ってよい状況である。

さて、その「オアシス効果」であるが、上述の Oke の教科書「境界層の気候」のその説明の部分には、以下のような観測結果が掲載されている。図 1 は、乾燥地を越えて来た乾燥した暖かい風

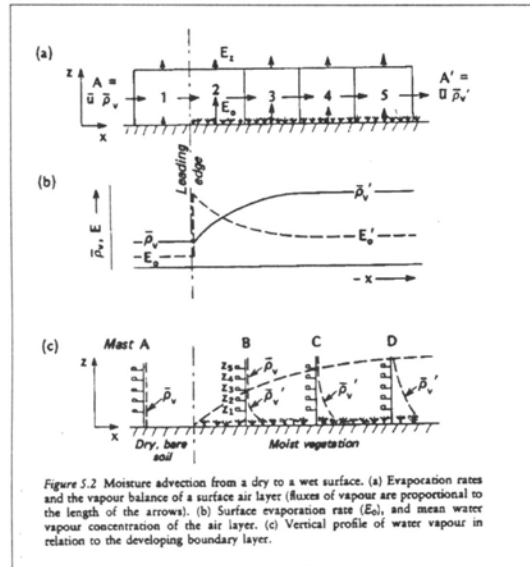


図 1: 乾燥地から植生地への断面図 (Oke 1987 より)

が、植生地に入り地表との水蒸気量の差によって大きな蒸発 (蒸発散) を引き起こして、地表に近い部分から加湿されていく様子を示している。図の中で ρ_v で表されているのが水蒸気の密度であり、 E_0 が地表面からの蒸発量である。植生地の最も風上の部分では流入して来た大気が乾燥していること (および、不安定な成層による活発な乱流輸送状態を保っていること) より、非常に大きな蒸発を示し風下に向かって急速に平衡状態に近付いて行く。

この風上での蒸発量の立上りの効果が、上述の定義の 3 番目のオアシス効果に相当し、植生域全体で乾燥域よりも蒸発が大きいと言うことが上述の定義 1、2 番目に対応する。

また、もっとスケールの大きい観測例としては、図 2 にあげられているものがある。これは航空機観測に基づき地表面状態が異なる場所での気温の違いを表したものである。湖や灌漑地でのオアシス効果による冷却が上空数十 m に達することが見てとれる。

3 HEIFE (1989–1993) 関連研究例

さて、このようにオアシスでは大きな蒸発とそれによる冷却で特徴付けられるオアシス効果が見られる訳であるが、河西回廊地区ではどのような観測結果が得られているだろうか。HEIFE (1989–1993) での観測に基づく研究から一部を報告したい。

まず最初に、観測対象領域から示す。図 3 はオアシス効果について調べた Kai *et. al.* 1997 からの引用である。図中斜線で示された領域がオアシスである。甲斐らは、砂砂漠にある砂漠観測点 (DESERT STA.) とオアシスにある張掖観測点 (ZHANGYE STA.) での気象要素の鉛直分布観測を比較解析してオアシス効果について以下に述べるような報告をしている。

図 4 は、オアシスと砂漠で、タワー観測による風速・気温・水蒸気量高度分布のデータを使い、式 (1) の地表面熱収支の関係を良く晴れた日について求めたものである。これによると、日中のオ

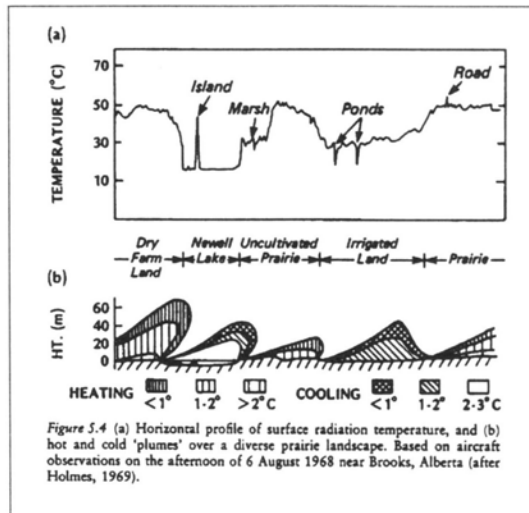


図 2: 航空機観測によるさまざまな地表面状態上での気温分布 (Oke 1987 より)

アサヒでは、放射によって得たエネルギー (放射収支: Q_n) と蒸発散による潜熱 (LE 図では LE と表記) とがほとんど同じ大きさであり地面を温めるエネルギー G は、午後になると大気から地面へと通常とは逆に輸送されている顕熱 H によってまかなわれている。それに対して砂漠では、高い地表面温度による大きな赤外線の放射 Q_{ud} と砂の反射 α の大きさによって、 Q_n が小さい。そして、この解析例では降水があった後の時期でもあり午前中を中心に比較的大きな潜熱 LE が見られるが、それでもオアシスと比較すると小さく地表面の乾燥のためか午後になると無くなってしまふ。そのかわり顕熱 H は大きく Q_n の大半を使ってしまふ。

また、図 5 は砂漠とオアシスでの気温の高度分布を日中について比較した図である。両者を見ると明らかに鉛直勾配が逆になっている。砂漠では日射による加熱を蒸発に使うことができないために、大気は下層から強く加熱され、下層わずか 8m で 3 度以上の温度差が生じている。それに対して、オアシスでは活発な蒸発によるエネルギー消費により大気は下層から冷却されて下層 8m で 1.5 度以上下層が低い砂漠とは逆の温度差が起きている。

また、オアシスでの気温の変化を図にしたのが図 6 であるが、これによると地表面直上の気温の上昇は 12BST (太陽高度から言うと 11 時前である) には地表面にある植生 (小麦) からの蒸発による冷却で停止し、これ以上上昇しなくなるのに対し、2, 4, 8m など上空では、周囲からの高温の空気の流入の影響により午後まで上昇を続けていることが分かる。この結果、日中にも係わらず気温の逆転が生じ熱は大気から地面へと輸送される。

このようにオアシス地表面では活発な蒸発が生じているが、そこでは通常の蒸発のように、潜熱の消費による温度低下と上述の図では明らかではないが湿潤化による蒸発の抑制と言う機構が周囲の乾燥域からの乾燥した高温の空気の流入により起こりにくくなっていることが分かる。

このように、オアシス効果は 1 次元的、平衡的な現象ではなく周囲の乾燥域との空気塊交換を通じた 2 次元的な現象である。

さらに、同日の顕熱フラックス H と風速の関係を調べると図 7 のようになる。風速の増加に伴い、砂漠では H が増加し地表面近くの大気をより強く加熱するのに対し、オアシスでは風速の増加とともにより強く地面を冷却するようになる。一義的にはこれは、地表面に接する空気内での乱流混合が風速が強いほど活発になることに対応しているが、前に触れた図 4 と見比べると午後には風

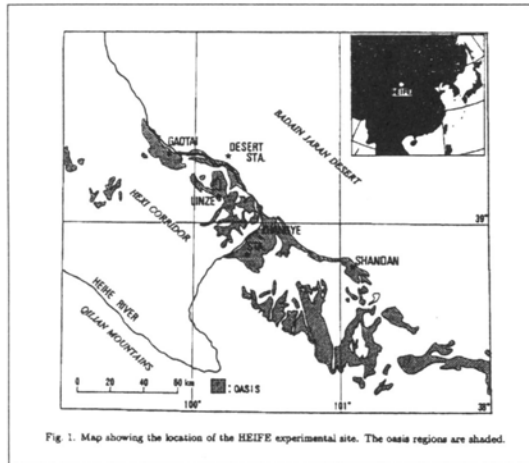


Fig. 1. Map showing the location of the HEIFE experimental site. The oasis regions are shaded.

図 3: HEIFE 観測領域 (Kai *et. al.* 1997 より) の地図

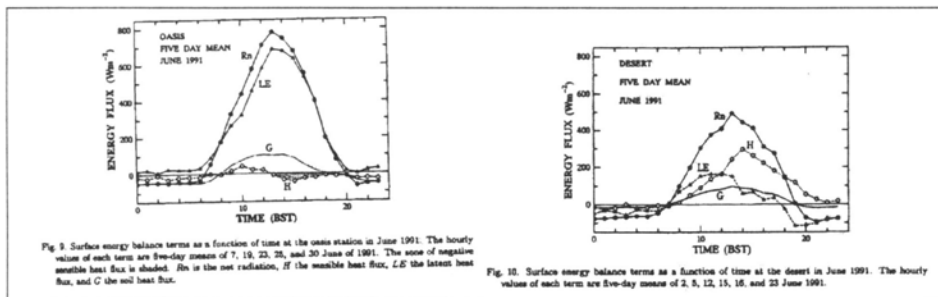


Fig. 9. Surface energy balance terms as a function of time at the oasis station in June 1991. The hourly values of each term are five-day means of 7, 19, 23, 25, and 30 June of 1991. The sense of negative sensible heat flux is shaded. Ra is the net radiation, H the sensible heat flux, LE the latent heat flux, and G the soil heat flux.

Fig. 10. Surface energy balance terms as a function of time at the desert in June 1991. The hourly values of each term are five-day means of 2, 5, 12, 15, 16, and 23 June 1991.

図 4: オアシス (左) と砂漠 (右) でのある日の熱収支の状況 (Kai *et. al.* 1997 より)

が強くなっていることが分かる。地上での風速は下層大気的不安定化による混合層の発達が上空の運動量の下方向への輸送の増加、あるいは熱的コントラストによる局地循環の発達と関係しており、砂漠での地表面温度の上昇と強く関係していることが推測される。

さて、オアシス効果を概念図にまとめると図 8 のようになる。甲斐らは、顕熱 H の下向き輸送をオアシス効果の定義として採用しており、その下向き輸送の起こっている時間帯の砂漠とオアシスでの様子を表現している。内容は今まで述べた通りである。

さて、上述の甲斐らによる結果は、気温、水蒸気量、風速の鉛直分布のタワー観測に接地境界層で水平一様定常な場合によく成立する Monin-Obukhov の相似則を組み合わせると顕熱・潜熱を推定した結果に基づいていたが、HEIFE では乱流の直接観測に基づく顕熱・潜熱の観測結果も集中観測期間時に限り得られている。Tsukamoto *et. al.* 1995 からの図 9 では、HEIFE 集中観測時の乱流輸送の測定結果の平均値に関して、オアシスと砂漠を対比させながら示したものである。ここでは潜熱を λE と表記していることに注意されたい。それぞれの棒グラフは数日～数週間にもわたる各集中観測期間の平均である。さて、この図では、式 (1) での放射収支量 Q_n と顕熱 H および潜熱 λE が描かれており、 Q_n の方が $H + \lambda E$ よりも大きくなっている。この差は、地中への熱流量 G を含むが G そのものは複数日での平均ではかなり小さな値になり、また季節的に正負がでて一年でほぼ 0 になるべきものである。従って、特にオアシスでの大きな残差は、顕熱・潜熱輸送量

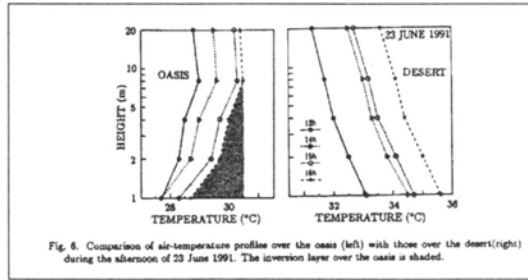


図 5: オアシスと砂漠での日中の気温鉛直分布の比較 (Kai *et. al.* 1997 より)

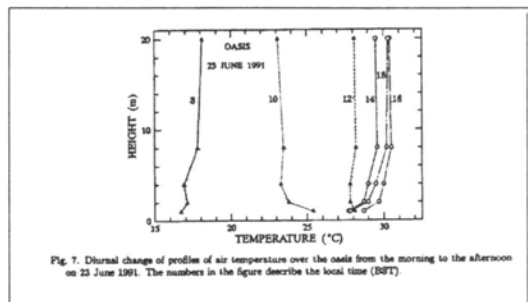


図 6: オアシスでの気温鉛直分布の日変化 (Kai *et. al.* 1997 より)

を計測する際の計測技術的問題あるいは、地上 3m と地表の間での水平方向の熱あるいは水蒸気の発散を示していると考えられる。乱流輸送量 H , ℓE の測定においては、技術的理由から潜熱 ℓE の測定が特に輸送量の小さい場合について難しいが、相対的に計測が楽なオアシスで残差が大きいは、技術的問題よりむしろ、地面直上の気層での熱/水蒸気の発散の存在を示唆している。この傾向は、前述のオアシス効果の特徴である水平方向からの乾燥した高温の空気の流入とその流入した空気の冷却湿潤化とあわせて考えると興味深い。図 1 のような現象が実際に起こっているように考えられる。

熱の収支の 1 次元的インバランス以外に特徴的なのは、オアシスでの顕熱の小ささと砂漠での潜

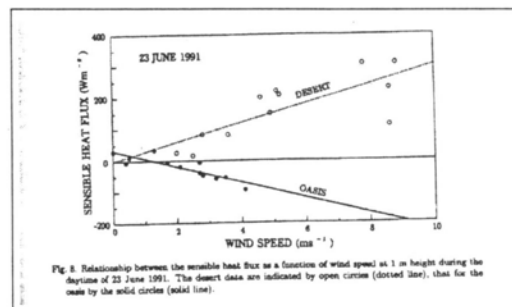


図 7: 顕熱フラックスと風速との比較 (Kai *et. al.* 1997 より)

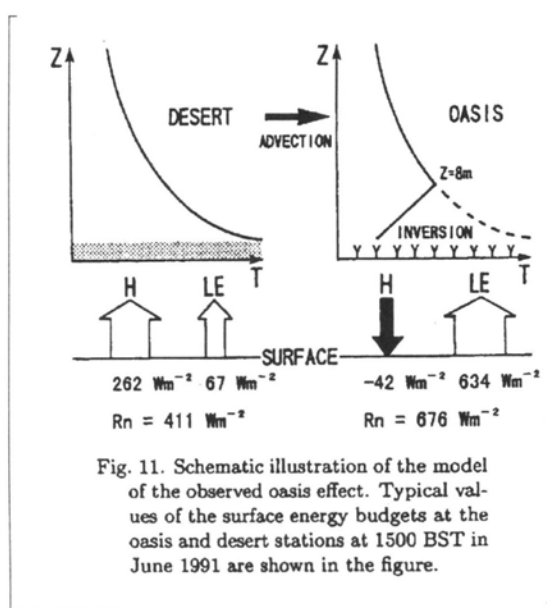


図 8: オアシス効果の概念図 (Kai *et. al.* 1997 より)

熱 (=蒸発) の小ささであり、甲斐らの推定と同様の結果になっている。この結果によるとオアシスでも平均すると顕熱 H は正ではあるが、小さな値をしめす。

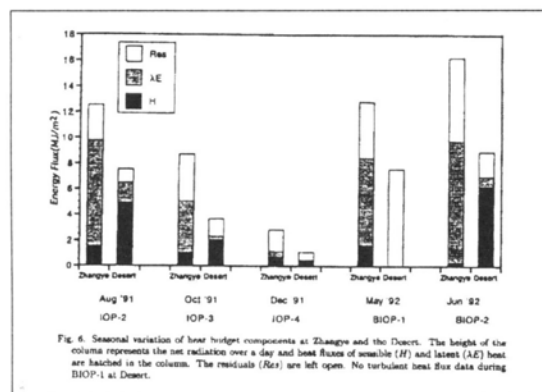


図 9: オアシスと砂漠での顕熱・潜熱の乱流輸送量観測の結果 (Tsukamoto *et. al.* 1995 より)

では蒸発によって生じた水蒸気はどのような現象をもたらすのか、これについて、Tsukamoto *et. al.* 1992 では、オアシスの水蒸気量を解析し、水蒸気濃度である比湿は朝と晩の 2 回極大値を取ることが報告されている。この傾向は、オアシスのタワー観測では 20m まで全ての高度で見られ、張掖オアシスではないが、小屯での低層気球の結果から 500m 程度までの高度で見られる (図 10)。このうち、日中の水蒸気の減少は、オアシスを囲む砂漠での日中の昇温にともなう混合層の発達をもたらす活発な鉛直混合が、オアシスから蒸発した水蒸気を、乾燥した上空の空気と混ぜることによって起こると議論されている。Tsukamoto *et. al.* では触れられていないが、局地循環により日中は山岳域へ夜間は盆地底へと水蒸気が輸送される現象もよく報告されておりそれとも関係

していると考えられる。他に、夕方の極大は夏場の晴れた日に見られることなどから植生からの蒸発の影響を示していると議論されている。

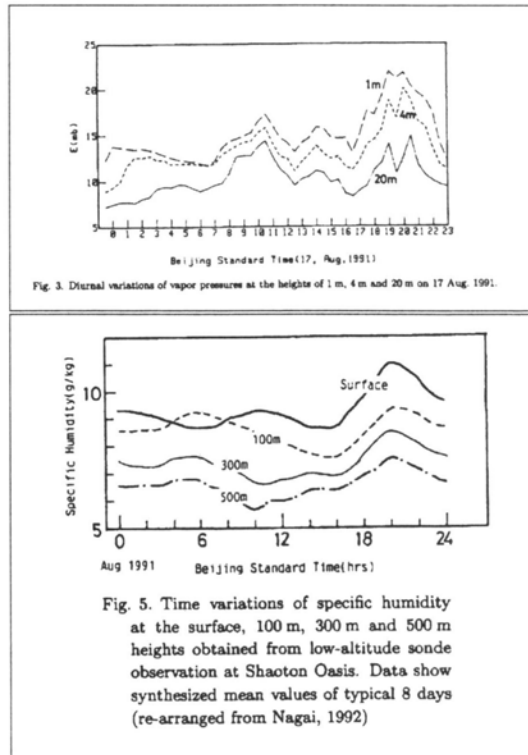


図 10: オアシスでの水蒸気の日変化 (Tsukamoto *et. al.* 1995 より)

最後に、砂漠とオアシスの上空での温位、水蒸気量(比湿)の鉛直分布を比較したのが図 11 である。小屯オアシスと砂漠観測点でのゾンデ観測が描かれているが、500m 付近でそれらは一致し、それ以上ではオアシスの直接的影響(湿潤、低温)は見られず、河西回廊地区全体の地表面状況を反映した境界層が見られている。観測は南中時に近い時刻のもので混合層とよばれる対流混合の盛んな境界層が発達している最中のものである。水平一様な場所でよく発達した混合層内では、温位・比湿はほぼ一定になると言われている。図からは、下層の砂漠・オアシスのそれぞれの影響を受けた層として、砂漠での、あまりに強い地表面の加熱のために大気の成層が絶対不安定な下層ほど温位の高い層が 500m 以上発達していて、その中で比湿はほぼ一定に近い状況になっていることが見られ、オアシスでは同様に 500m 程度まで下層程冷たい安定な成層状態で下層ほど湿っている層が見られる。全体としての混合層は、高度約 2500m 程度まで発達していることが特に温位の図よりみてとれる。

4 まとめ

以上みてきたように、オアシス効果とは乾燥域に囲まれた湿潤域という非一様な地表面が示す強い蒸発、およびそれによる冷却を表すものであり、黒河中流域の河西回廊地区でも、オアシス(張

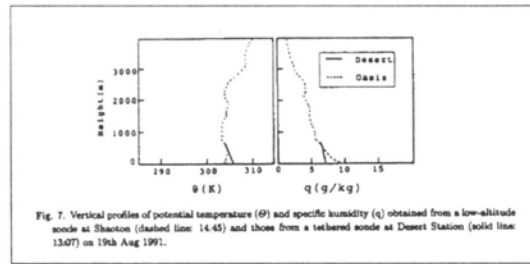


図 11: オアシスと砂漠での温位 (左)、水蒸気量 (右、単位は比湿) の鉛直分布 (Tsukamoto *et. al.* 1995 より)

掖、小屯)での観測が示すように、明瞭に見られ、この効果により、周囲に比べれば冷涼かつ湿潤なオアシスの気候が形成されている。

このオアシス効果という現象は、決して鉛直1次元的なものではなく、周囲からの乾燥空気の流入や上空での活発な乱流混合など水平方向の分布を考えなければならない本質的に2次元的な現象である。また、定量的には、オアシス地域の歴史的な拡大によってその効果の度合を変えつつ現在に至っていると考えられる。

参考文献

- [1] Steven K. Baum, Glossary of Oceanography and the Related Geosciences with References, <http://stommel.tamu.edu/~baum/paleo/paleogloss/paleogloss.html>
Texas Center for Climate Studies, Texas A&M University, Copyright 1995-1996, January 20, 1997
- [2] Kenji Kai, Mayumi Matsuda and Ritsuko Sato, Oasis effect observed at Zhangye oasis in the Hexi corridor, China, *Journal of the meteorological society of Japan*, **75**, pp. 1171-1178, 1997.
- [3] 近藤純正 編著, 水環境の気象学 — 地表面の水収支・熱収支 —, 朝倉書店, 1994
- [4] T. R. Oke, Boundary layer climate, second ed., Routledge, 1987
- [5] Osamu Tsukamoto, Jiemin Wang, and Yasushi Mitsuta, A significant evening peak of vapor pressure at an oasis in the semi-arid region, *Journal of the meteorological society of Japan*, **70**, pp. 1155-1159, 1992.
- [6] Osamu Tsukamoto, Ken Sahashi and Jiemin Wang, Heat budget and evapotranspiration at oasis surface surrounded by desert, *Journal of the meteorological society of Japan*, **73**, pp. 925-935, 1995.
- [7] Jiemin Wang and Yasushi Mitsuta, An observational study of turbulent structure and transfer characteristics in Heihe Oasis, *Journal of the meteorological society of Japan*, **70**, pp. 1147-1154, 1992.