

日中共同研究 HEIFE を終えて

—1996年度日本気象学会藤原賞受賞記念講演—

光 田 寧*

1. はじめに

日中共同研究 HEIFE は、WCRP の実行計画の 1 つである HAPEX (Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment) の第 3 の実験計画として策定されたもので、乾燥地における水文学・気象学に関連した地空相互作用の研究を目的とした、黒河流域における地空相互作用の研究 (HEIFE river Field Experiment) の略称である。

この計画は、1986年ジュネーブにおける WCRP の準備会議において、中国科学院の葉教授によって最初に提案された。同時に提案された計画にはヨーロッパの HAPEX-MOBILY (Modelisation du Bilan Hydrdrique; Andre *et al.*, 1986) と米国の FIFE (First International Satellite Land Surface Experiment; Hall *et al.*, 1990) とがあり、いずれも既に実行完了している。葉教授は最初多国間協力のもとに実行する希望を持っておられたようであったが、当時の国際情勢からして日中共同事業での実施の方が現実的であると考えられ、日本の吉野教授を通じて WCRP 日本委員会の委員長山元教授に1987年正式に申し入れがあった。準備会議の後、文部省測地審議会の決議を得て、国際共同研究特別事業として1989年から1993年までの5か年計画で実行されることになった。一方、中国側では中国科学院の重大研究項目として実行されたが、研究期間は中国の5か年計画は都合で少し前に1年ほどずれてしまった。

当時の国際状況は、天安門事件が起こったりして複雑で安定しない状態にあり、中国の開放政策にもいろいろと問題のある時期であった。そのために、この計

画の実行には科学以外の解決せねばならない問題が多くあったが、中国側は蘭州高原大気物理研究所が、日本側は京都大学防災研究所が代表として両国の窓口となり協力して計画を進めた。日本側では故井上治郎博士や中国留学生、謝平平君の努力のおかげで予定通り準備が進められ、少し遅れはあったものの1991年から本格的な観測を実施することができた。観測の実施に当たっては、岡山大学佐橋教授に現地観測の総括者として努力していただき、国内各大学、研究所からの研究チームにそれぞれの専門分野について観測研究を進めていただくことが出来た。日本側としては外国の地で大規模な野外観測を実行するという経験がなかったのと、砂漠での仕事には未知の点が多かったのとでご参加いただいた方々には多大な御苦勞をかけることとなったが、何とか各々の研究目的を達成することが出来、その研究成果は1993年に国際会議を開催し(DPRI Kyoto Univ., 1993)、また気象集誌の特集 (Meteorological Society of Japan, 1995a, b) や気象研究ノート (日本気象学会, 1995) などに論文が発表されている。

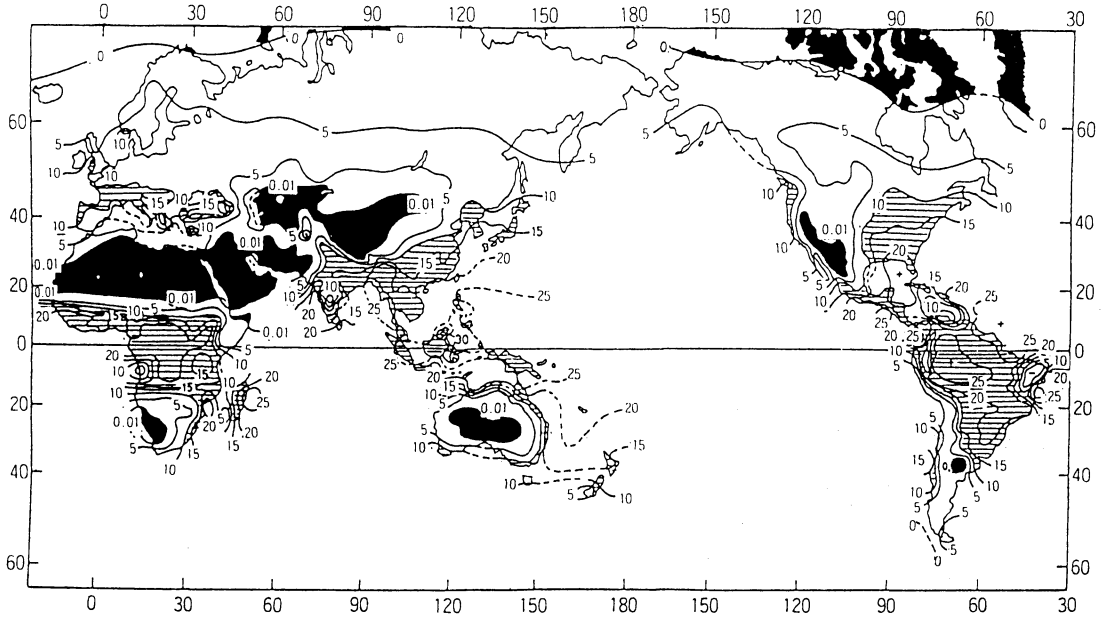
2. 研究計画の背景

地球上では広範囲に植生の少ない部分乾燥地帯がアフリカの北部から中近東を経て中国北部に連なっており、第1図に示めた世界の植物純一次生産力の分布地図上で年間の乾燥生産物が1年に1ヘクタール当たり0.01トン以下の地域に相当している(内嶋、清野, 1987)。これらの不毛の地は、亜熱帯から温帯にかけて気温の条件としては悪い場所ではなく、ただ雨量が少ないことによって生じたものである。中国ではこのような乾燥地は国土の1/4以上を占め、その詳細な分布は第2図に示したとおりである。今回の実験を行った場所は、この地図にも示されているとおり、チベット高

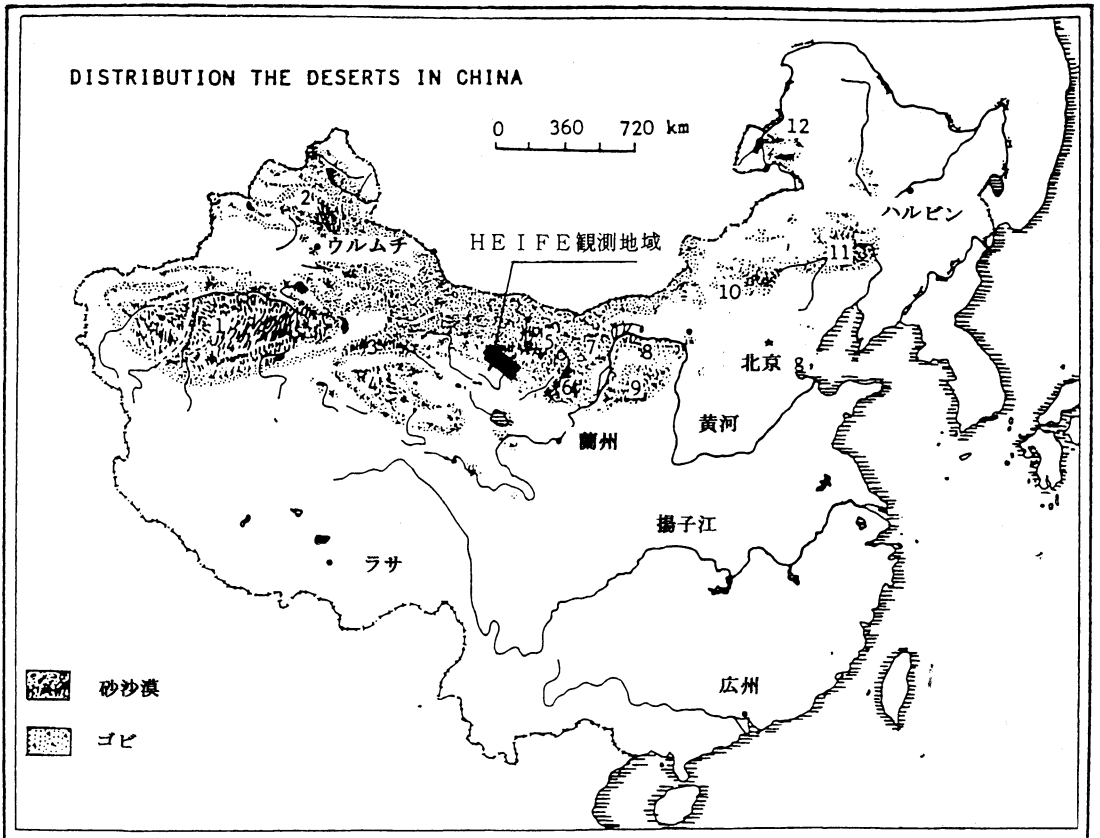
* 京都大学名誉教授

—1998年2月6日受領—

—1998年10月19日受理—



第1図 自然植生の純一次生産性の世界分布 (内嶋, 清野, 1987).
単位は乾燥重量トン/ヘクタール・年.



第2図 中国全土における砂漠の分布 (中国側資料による) と HEIFE 観測地域.

原の北東側の山麓にあり、上述の大規模乾燥地域の東端に近い位置にある。高さが5000 m以上ある祁連山(Qilian)山脈の水河に源を発した黒河が山脈に沿って北西流している、いわゆる河西回廊と呼ばれる地域の一部である。この黒河は、その先で北に流れを変えて内蒙古(Nei Mongol)で消滅する。下流端に昔は端末湖があり地図にも記載されているが、中国人科学者によれば現在はなくなっているとのことである。それでも人工衛星写真で見ると、この部分には今でも水面または湿地帯があるのではないかと推定される部分が認められる。

このように海に流出することなく消えてしまう内陸河川は中国北西部および西チベットの乾燥地域には数多く存在する。これらの多くは高地の水河に源を持ち、低地で消滅するが、その途中にはオアシスや人工灌漑農地が存在し緑が展開する。このような水系が存在することは、これらの流域だけで閉じた水環境系が存在するかのようにはみられるが、大気大循環による他地域からの水分輸送の関与も考えられ(Elfahir, 1996)、その水収支には未解決の興味深い問題が残っている。

中国北西部の高地の乾燥地には岩石が露出しているいわゆる「ゴビ(Gobi)」と言われる地域が多く見られる(第2図)。こゝは、岩石が長い年月の間に気温の大きな変動を主原因とする風化によって小さな破片になり、さらに強い西風によって細粒化する砂の生産地である。そしてその風下には、砂が長い間に谷を埋めて砂漠となった部分が存在する。砂は嵐によって飛ばされて移動するが、そのうち特に粒子の細かいものはさらに飛ばされて黄河中流域の黄土高原を作ったと考えられる。そして、もっと細かい粒子は黄砂として日本、時にはハワイ近辺まで風で運ばれる。この中国北西部付近では、日本においては見られない砂嵐が年間20日も見られ、天気現象の中で大きな割合を占めている。

今回の実験の行われた河西回廊の黒河流域は、大昔は水河の水で樹木が育ち緑の多い地域であったとのことである。だが、文明が進みこの回廊地域を東洋と西洋とを結ぶシルクロードが通ることとなり、中国の西の出入り口としての重要性が増したことから、何度もの動乱による火災と乱伐の為に樹木がなくなり、砂漠化してしまったのだと言われている(Tang and Zheng, 1993)。万里の長城の西端部はこの付近にまで及んでおり、その遺跡がこの付近の砂漠の中に今でも見られる。いったん砂漠化すると砂が風で動くため緑地は定着せず、砂漠はどんどんと拡大していく。緑地

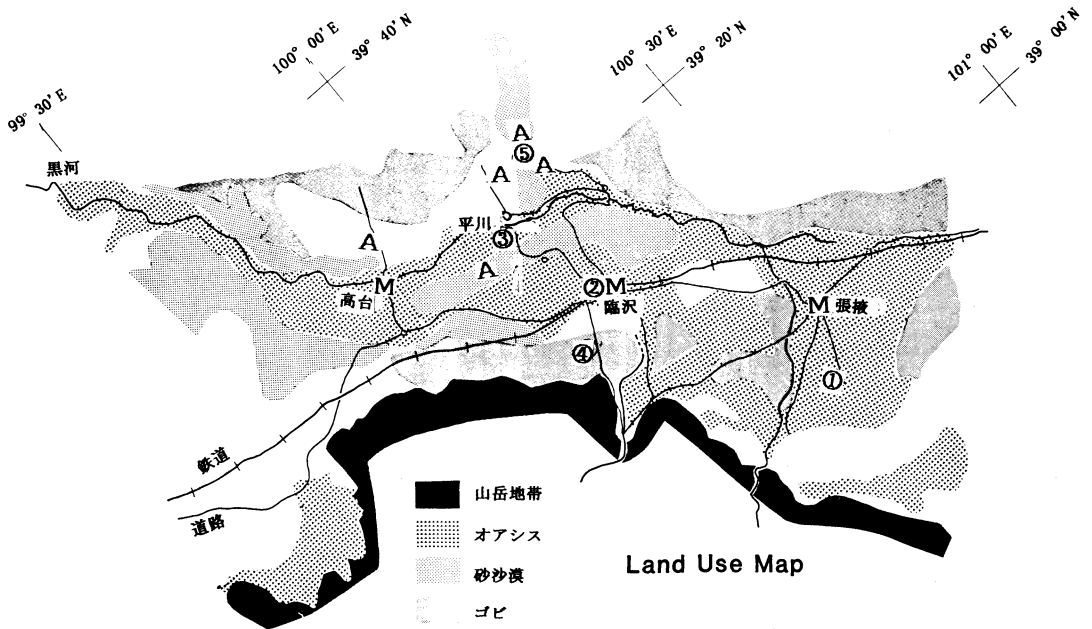
の減少は地表面からの蒸発散の防げとなり、降水の水源が不足し、砂漠化はさらに加速されることになる。しかし、砂漠の砂の下には砂で埋る前の元の地形があり、その低部には雨水の浸入したものが永年にわたって溜まって地下水として存在している。そして一部ではそれが地上に現れてオアシスを形成している。

したがって中国の砂漠では、水河からの水や地下水があって、所々にオアシスや灌漑農地が存在している。人口の急激な増加で食糧事情の悪化が心配される現在の中国においては、このような砂漠に目をつけこの地を再び有効な生産農地として開拓しようということが国家的事業となっているのである。現在でも水以外の条件では農業生産性を防げるような問題はないのであるから、現存する水資源を最大限に利用すれば、中国の他の土地よりも大きな生産性を得ることが出来る。しかし、水の過剰利用があれば、過去において多く例があるとおり、繁栄は一時のものに終わり、結局は砂漠化が進んでしまうということになる。そこで利用可能な水がどれだけあり、どのように利用すればよいかということに関する基礎的な研究の必要性が認められ、今回、このような観測研究計画が国家の5か年計画の一事業としておこなわれることになったのである。

3. 研究計画の概要

HEIFEの研究計画は既に多くの機会に説明されている(光田, 1988, 1995)とおりでであるが、観測の行われた範囲は70×100 kmぐらゐの黒河の中流域に当たる河西回廊の中部平地で、およそ数値予報モデルの1格子に相当するぐらゐの範囲である。大気大循環に関連した研究に役立てるためには、この地域の状態の全ての情報を1組のパラメータの値としてうまく表現出来ればよいのであるが、現状ではそのための最良の手法というものはまだ見当たらない。この地域は第3図に示したように、ゴビ、砂漠、オアシス、灌漑農地が混在する複雑な地表条件を持つ黒河の中流域の約9000 km²の平地で、オアシス24%、砂漠10%、ゴビ15%、丘陵地51%ぐらゐの構成となっている。

このような場所に、各々の特徴的な地表面条件毎に、乱流輸送測定装置を含む総合的な観測装置を備えた5つの基本観測点を設置した。さらに、その間を埋めるため比較的簡単な自動観測装置5点及び雨量観測点5点をHEIFEのために新設した。これらに、既存の中国側による気象観測点、雨量観測点、河川流量観測点お



第3図 HEIFE 観測地域の土地利用図と観測点の配置。Mは中国側気象台，○はHEIFE 特別観測点（1；張掖，2；臨沢，3；平川，4；ゴビ，5；砂漠），Aは自動観測装置の位置を示す。

よび地下水水位観測点を加えて，総合的な観測網を展開した。

基本観測点は第3図に示した次の5か所である。

- ① 張掖 (Zhangye)；耕地 (麦畑)，
- ② 臨沢 (Linze)；耕地 (とうもろこし畑)，
- ③ 平川 (Pingchuan)；緑地 (オアシス)，
- ④ ゴビ (Huayin)；岩石砂漠，および，
- ⑤ 砂漠 (Yigongheag)；砂沙漠。

このうち，①と⑤を日本側が，②，③および④を中国側で担当することになった。各基本観測点では20-40 mの観測塔で気象要素の高度分布を測定し，同時に日射，雨量，地表面温度，地中温度等の常時連続観測を行った。それとともに，これらではある特定期間だけ観測員を集中して乱流輸送その他の特別観測を行うことが出来るような設備を準備した。乱流輸送の測定装置は，日本側から中国に技術を提供し，事前に記録解析の打合せを行った。自動観測点は日本側が準備し，風向，風速，気温，湿度，雨量，地表面温度または気圧，および地中の温湿度の測定を10分間隔で行い連続的に記録するもので，完全に無人運転が可能である。観測点の配置は第3図に示すとおりである。なお日本側の観測点，張掖および砂漠ではオゾンおよびダストなどの連続観測も行っている。

観測期間は，常時観測のみを行う FOP と，各観測点で乱流輸送の観測や地中水分その他の特別な観測を集中して行う各季節数週間ずつの特別強化観測，IOP の2種類を分け，中国側は FOP に先立って，1988年に乱流輸送に関する試験観測 (POP) を行った。日本側も臨沢砂漠において自動気象観測装置の試験を1988年から1990年にかけて実施した。FOP は1990年から1993年までと計画したが，中国側は都合で1991年末に一部観測を中止した。また，日本側は器材の搬入が遅れたため，1991年より開始し1993年まで続けた後，さらに中国側の協力のもとに1995年まで AECMP (Arid Environment Comprehensive Monitoring Project) として観測を継続した (光田，1996)。この間 IOP は春夏秋冬の各季節の特別観測，乱流計測器の比較観測，生物気象特別観測などを含め7回ほど行われている。

得られた観測記録は，各々の観測を行った研究グループが責任を持って解析し，その結果を中国蘭州高原大気物理研究所と日本の京都大学防災研究所に集めてデータベースを作ることにし，作業は現在も進行中である。現在までに収集されたものについては，研究者の必要に応じてコピーを作成し送付するサービスを行っている。

ゴビ及び砂漠は人家のない所なので，観測装置と観

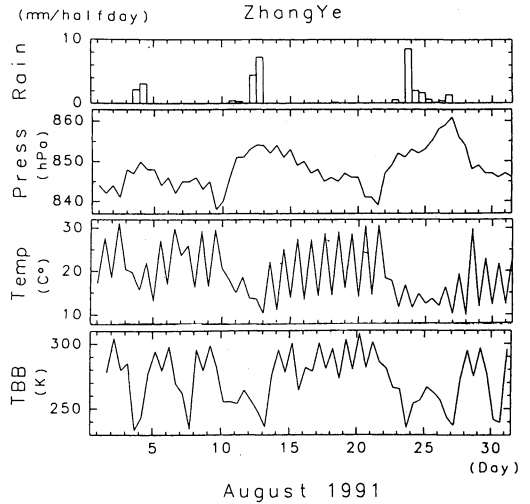
測員を収容する小屋を作らねばならなかった。砂漠については日本からプレハブの小屋を輸送したが、中国側はゴビに地下式観測室を作った。観測員は近くの家屋を借上げてそこから通勤することになるので、条件は楽ではなかった。この間、中国側の習慣に従って料理人を現地で雇いあげて食事を作ってもらったが、日本からの研究者は環境の差の大きな事で困られたと思う。現地での輸送は万博記念協会の御援助で自動車2台を持って行ったので比較的問題はなかったが、色々ところで日中の考えの違いが見られた。たとえば観測装置にしても中国側は最新のものをを用いることに興味があり、基本観測点の観測記録を無線伝送で1か所に実時間的に集めることを考えたり、大型ライシメータを作ったりしようとした。これに対して、日本側は比較的保守的であり、より確実に記録を得ることに努力し、利用経験のある測器の使用に重点をおいた。

4. 中国北西部乾燥地の気象の特徴

HEIFE の各種の研究成果は既に各参加者から1993年の HEIFE に関する国際会議 (DPRI Kyoto Univ., 1993), あるいは気象集誌の特集 (Meteorological Society Japan, 1995) や気象研究ノート (日本気象学会1995) などにいろいろな立場から発表されている。従って、ここでは中国北西部の砂漠地域に見られる気象環境の特徴の中で特に興味がありそうなものを選んで紹介したい。

HEIFE の研究領域はチベット高原の北に広がった乾燥地域の一部で、モンゴルの草原地域に連なっており年間雨量が100~200 mm しか期待できないが、Chen *et al.* (1991) によれば実はこの地域は極東域で最も数多く低気圧の発生の見られる地域である。すなわち、1958年から1987年までの平均で、この地域の2.5°×2.5°の範囲で1か月に最大で0.18回の閉じた等圧線の発生が地表天気図において検出された。この値が2番目に多いのは九州西方の東シナ海上であり、その地域は前線の活動が活発な地域で下流は西日本などの多雨域と重なっている。モンゴルの方も、極前線の活動によるものと考えられるが、低気圧の発生が多く見られるにもかかわらず、年間雨量分布から見ると非常に雨の少ない地域が連なっている (Yatagai and Yasunari, 1994)。

もっとも、HEIFE 地域の砂漠でも雨は全く降らないのではなく、晴天が続くなかでも低気圧の発生に伴って、周期的に1週間に1回ぐらい天気が悪くなる



第4図 張掖における各気象要素の時間変化の一例 (1991年8月)。上から、半日当たり雨量 (mm)、地上気圧 (hPa)、地上気温 (°C)、および人工衛星からの放射黒体温度 (K)。Itano, (1997) による。

時があり、雨がわずかながら降ることが多い。すなわち、中緯度の他の場所と同じような周期的な天気の変化が見られるのである。この点アフリカのサハラ砂漠などとは異なっている。ただ、悪天候時にも1回の雨量が少なく、さらに、晴天時に積雲が発達し夕立が降るといことが見られないため、年間総雨量が100 mm と極端に少ないのである。そして、この地域の気候はこのような降雨の周期によって支配されている。

この地域の天気変化の1例を示した第4図 (Itano, 1997) に見られるように、この地域の気温は降雨の時は比較的低くなり、晴天になると大きな日変化を示しながら少しずつ上昇していく。この間、地空境界面での熱収支は1日24時間では平衡せず、平均的に地面が受熱過剰となり、日平均気温が少しずつ上昇していく。そして、何日か過ぎると気温や地表面温度は高くなり、色々砂漠に特徴的な特異なことが見られるようになるが、それも1週間ぐらいたると次の降雨が生じ、一気に地面は冷却される。そしてまたその次のサイクルが始まるという周期変化を示すのである。この降雨時の気温および地表面温度の低下は10°C以上に達し、この1週間ないし10日間の周期変化は、日変化と同等にこの付近の気候における大きな特徴である。

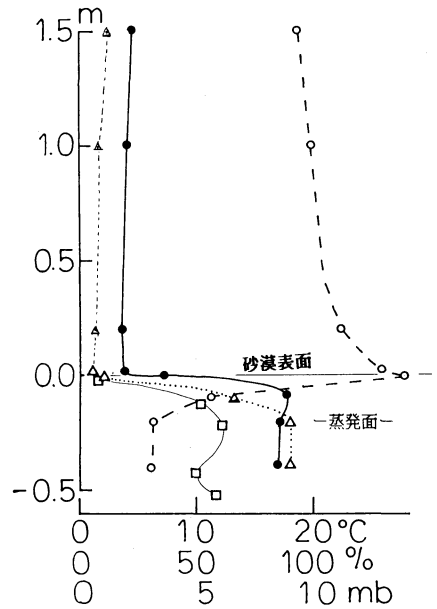
このような1週間から10日周期の周期変化は、この付近を極前線のトラフが通過するのに対応している。

そして、トラフがチベット高原の北端を通過する時に高い山の影響を受けてジェット気流が強化され、その風下のデルタ領域にあたるモンゴル付近がCyclogeneicになることに、先の低気圧の発生が、対応していると考えられる。低気圧の発生が多いのにもかかわらず、この付近で総雨量が少ないのは地表面高度が高く可降水量が他の地域の半分以下しか無い（それでも、500 hPa 面以上の高度での可降水量は他の地域とほとんど同じである）ことと、地表面が砂漠であるために境界層が高くしかも低相対湿度であるため降った雨が落下途中地面に達するまでに蒸発してしまうためではないかと考えられる (Itano, 1998)。事実、この HEIFE 領域西側の祁連 (Quilian) 山脈の山腹3000 m ぐらいの高所では砂漠から数10 km しか離れていないにもかかわらず、年間600 mm 以上の降雨量があり、水河が涵養されている。この高所と砂漠とのあいだの雨量の差は、高所では同緯度の他の場所よりすこし少ない程度の雨が生じているにも係わらず、乾燥した高い境界層内で雨滴が蒸発することにより地表に達する量が少なくなることによると考えられる。従って、同じ砂漠でも低緯度のサハラ砂漠とは状況がかなり異なっているといえる。

このように降雨と降雨の間は毎日平均気温が上昇していくが、もしそのまま雨が降らなかつたらどのような状態で平衡に達するのであろうか。それが意味では極限的な砂漠の状況であるといえるかも知れないが、それは今後の問題である。

雨が降って表面が湿っている間は、地表面温度及び気温の日変化は少なく蒸発は地表面で生じており、一般の地域で見られる地空相互作用の知識で現象を論じることが出来る状態にある。しかし、数日の間に地表面は乾燥し、地表面温度および気温の日変化は非常に大きくなり、地表面付近の砂は乾燥しきって、相対湿度は非常に低くなる。そうすると、水分の蒸発は地表面においてではなく、地表面下10ないし数10 cm において進行し、水蒸気は地表面近くの砂粒の間隙を通過して空中に出ていくことになる。地中温度の変化から考えて、このような場合の蒸発は1日を通して時間的に同じぐらいの割合で進行するため、地表面上の接地気層の様相は特異な状況になる(第5図参照, Sahashi *et al.*, 1990)。

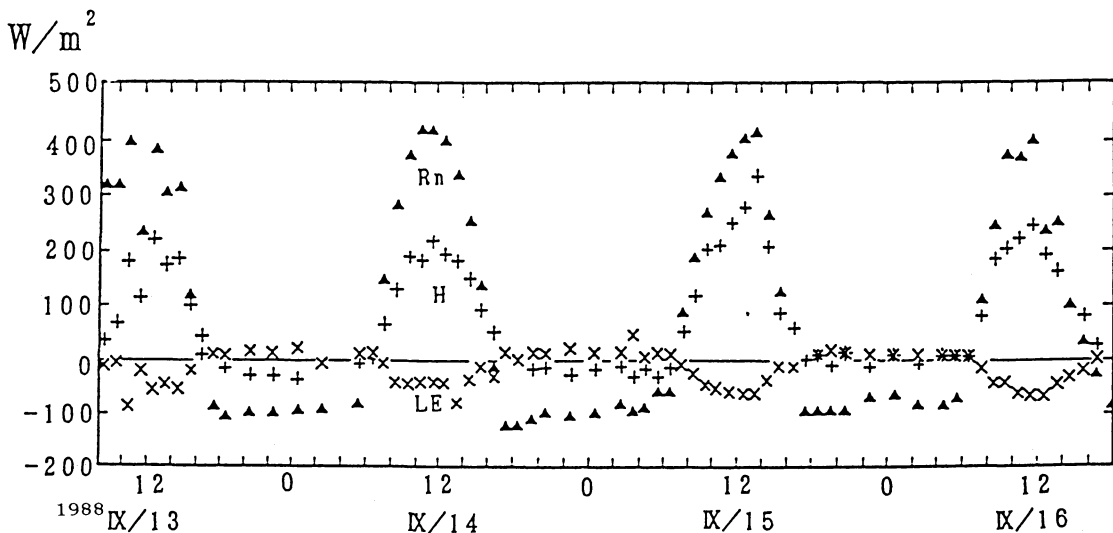
最も特異なのは、乾燥時において砂漠表面上1.5 m ぐらいで測定した水蒸気の乱流輸送量が昼間に下向きの輸送を示すことである (Wang and Mitsuta, 1990)。



第5図 砂漠上に於ける各要素の鉛直分布 (1990年3月17日の正午頃)。○は温度(°C)、●は水蒸気圧(hPa, 地中においては砂粒空隙空間におけるもの)、△はこれらから決定した相対湿度(%), □は乾燥法による砂中水分含有量(%). Sahashi *et al.* (1990) による。

その結果は第6図に示すとおりである。この観測を行った場所は砂漠の中心部にあり、周囲からの移流が影響しているとは考え難い。そして、この観測は赤外線温度変動計と超音波風速温度計とを組合せて行ったものであり、信頼できる。このような現象の生じている時に水蒸気混合比の勾配を近くの20 m の塔で観測した結果は、その時、明らかに高さと共に比湿が一定か、あるいは減少することを示しており、特異な現象のように思われる。このことは、HEIFE 観測の期間の始めから気付かれ色々議論されてきたが (Wang and Mitsuta, 1990, 1992; Tsukamoto, 1993; Kobayashi *et al.*, 1993), やはり現象として存在することは間違いない。

この問題について著者は現在次のような考えを持っている。すなわち、昼間の砂漠表面は非常に高温となり、接地気層の気温の高度減率は非常に大きくなる。砂漠の表面より下の砂の中で蒸発した水蒸気は砂粒の間隙を通過して上昇し空中に出るが、地表面での相対湿



第6図 ゴビ砂漠上(高さ1.5 m)における乱流輸送量と純放射量の時間変化, ▲は純放射量, +は顕熱輸送量, xは潜熱輸送量をしめす (W/m²). Wang and Mitsuta (1990) による.

度は極端に低い。逆に空中においては、気温が地表面より相対的に低くなり高さ方向に急速に減少する。そのため、水蒸気混合比の勾配は高さ方向に少しずつ減じるか増加するかにかかわらず、その絶対値は小さいので、相対湿度は高さと共に増加することになることがあり得る。

ここで、空中の水分子の輸送が混合比の勾配によって支配されるのではなく、相対湿度の減少する向き、あるいは飽和差が大きくなる向きに進行すると考えたらどうか。そうすれば砂漠上の地表面近くの晴天時の昼間近くに、下向きの水蒸気輸送が生じることが合理的に説明されることになる。砂漠表面付近の砂粒間隙の空気は高温で相対湿度が低いから、地面に向かって下向きに輸送されたわずかの水蒸気は相対湿度を少し上昇させるだけで、あたかも砂が吸湿剤のように作用しているようにみえる。このような様子は第5図に見られる。

このような水蒸気輸送の考えは、拡散に関する Fick の法則において、水蒸気の拡散は空中では水蒸気比湿の勾配ではなく飽和差の勾配に比例して、その大きくなる向きに進行するとするものである。このことは、高温の砂漠の上の乾燥した境界層中では、水蒸気比湿は Monin-Obkhov の相似則に従わないのではないかということを示す観測事実 (Tamagawa, 1995) もあり、一般的に正しいのではないかと考えている。この場合、比湿飽和差 ($\Delta q = q_s - q$) の高さ (Z) 方向の勾

配は次のように書ける。すなわち、

$$\frac{\partial(\Delta q)}{\partial Z} = \frac{\partial q_s}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial Z} - \frac{\partial q}{\partial Z}$$

ここで q は比湿 (kg/kg), q_s は飽和比湿, T はその時の気温 (°C) を示す。普通の場合、この式の右辺第1項は第2項に比して小さいから、 Δq の増加の向きと q の減少の向きは同じで、 Δq を考えても q で考えても輸送の向きに差の無いことが多い。しかし、砂漠の接地気層内のように気温の高いところでは、 $\partial q_s / \partial T$ は正でその値は大きく、気温勾配 $\partial T / \partial Z$ は負でこれも大きな値を示す。一方、 $\partial q / \partial Z$ は小さいので、これが負で、 $-\partial q / \partial Z > 0$ であっても、第1項が負で大きな値を示すために、 $\partial(\Delta q) / \partial Z$ は負となることがあり得る。すなわち、 $\partial q_s / \partial T$ は 20°C 付近で 1°C あたり約 0.001 kg/kg であり、 $\partial T / \partial Z$ は、昼間の砂漠では、-5 (deg/m) ぐらいになるから、比湿の勾配が負でも絶対値が 0.005 (Kg/Kgm) 以下であれば $\partial(\Delta q) / \partial Z$ は負となり、下向きの水蒸気輸送が生じ得ることになる。

このように、高温低湿の砂漠では、昼間でも、接地気層での飽和差が高さ方向に減少する (相対湿度が増大する) ために、下向きの水蒸気乱流輸送が生じ得る。また、砂漠での蒸発は地下で生じ 1 日中継続するから、表層の砂粒間の空隙を通じて水蒸気は上向きに輸送さ

れる。これでは、水蒸気が地表面に収斂することになるが、その量はわずかであり、非定常な地表面過程において飽和差を小さくする向きに役立っていると考えられる。地表面付近の水蒸気は、夜間には上向きに乱流輸送され接地気層内に貯えられるが、一部は、接地気層の上部から次の日の日中自由大気中に拡散して行く。

このように、砂漠面での蒸発の機構は雨が降った後の表面が湿っている場合と、表面の砂が多量の昼間の蒸発により乾燥してしまって蒸発が地下で生じるようになった時とでは全く異なっている。また、砂層の中での水の重力による移動は予想外に遅く、降雨による地中水分のピークはなかなか砂中の深いところには進んでいかない。そして、時にはこの乾燥地でも、異常な大雨が年雨量の何分の1かを1日で降らせ、砂漠の表面の低部が池になってしまって1か月ぐらゐも水が残っているということが数年に1回ぐらゐ見られる(Hayashi, 1993)。このように何年かに1回降る砂漠の大雨については別に研究が必要である。

また、逆に、砂漠の中に散在するオアシスでは、昼間植物からの蒸発散のために大量の潜熱が消費され、その結果接地層で下向きの顕熱の乱流輸送が見られることがある(Wang *et al.*, 1993)。これは「オアシス効果」と呼ばれる現象であるが、実測により確認できた例は少ない。

5. おわりに

このように、中国北西部黒河中流域の乾燥地域で、地空相互作用を中心とした日中共同観測計画を無事に実行することが出来、いくつかの興味ある観測結果が得られた。その結果は今後もまだ色々発表されるものと思われるので、注意して見て頂きたいと思う。また、気象集誌に発表された論文を中心に HEIFE の論文集を近くまとめる予定であり、観測資料も簡単に利用できる形で保存するべく努力を行っている。

砂漠という1つの極限的な気象条件の下での現象には特異なものであるが、それは同時に世界の気象現象の解明と関連している。今後さらに色々な研究が進められることを期待する。また、ここで示した比湿の勾配ではなく、飽和差の勾配によって、水蒸気乱流輸送の向きが決定されるという考えに関連して、混合層の中では、温位が一様化されると同時に、比湿も一様化されるという考えに疑問が生じる。すなわち、砂漠上のように高い混合層では頂部での気温が非常に低くな

る。そこでの比湿が混合層内での混合の結果、接地気層の上端と同じ値になるとしたのでは、たとえ、それが小さくても、頂部では飽和に達し雲が出来てしまう。しかし、砂漠上では、晴天時、積雲が生じることはまづないので、これは適当な考えではない。だからと言って、混合層内で飽和差あるいは相対湿度が一様になるとも考え難い。これは今後の問題である。

最後にこの HEIFE の研究に参加して頂いた多くの方々に感謝すると共に、藤原賞を頂きながらその報告が大変遅くなったことを皆様にお詫びしたい。

参考文献

- Andre, J. C., J. P. Gouforbe and A. Pwerrier, 1986 : HAPEX-MOBILHY : A hydrologic atmospheric experiment for the study of water budget and evaporation flux at the climate scale, Bull. Amer. Meteor. Soc., **67**, 138-144.
- Chen, S., Y. Kuo, P. Zhang and Q. Bai, 1991 : Synoptic climatology of cyclogenesis over East Asia, 1958-1987, Mon. Wea. Rev., **119**, 1407-1418.
- DPRI, Kyoto University and LIPAP, Academia Sinica, 1993 : Proc. of Intern. Symp. on HEIFE, Kyoto, (Y. Mitsuta, Ed.), 722pp.,
- Elfaihr, E. A. B. 1996 : Precipitation recycling, Rev. Geophys., **34**, 367-378.
- Hall, F. G., B. J. Markham, J. R. Wang and F. Huemmmerich, 1990 : FIFE : results overview, Symp. on FIFE, Anaheim, Calif., Amer. Meteor. Soc., 17-24.
- Hayashi, T., 1993 : Surface observation of thunderstorm at desert, Proc. Intern. Symp. HEIFE, Kyoto, 236-241.
- Itano, T., 1997 : Rainfall over the arid area in the North-western China, J. Meteor. Soc. Japan, **75**, 851-865.
- Itano, T., 1998 : Cyclogenesis and rainfall over the arid area in the northwestern China, J. Meteor. Soc. Japan, **76**, 325-333.
- Kobayashi, T., H. Nagai and S. Shibata, 1983 : Another comment on "Peculiar downward water vapor flux over Gobi desert in the daytime", J. Meteor. Soc. Japan, **71**, 407-411.
- Meteorological Society of Japan, 1995 a, b : Special Edition on HEIFE, J. Meteor. Soc. Japan, **73**, Part 1, 891-974, Part 2, 1191-1300.
- 光田 寧, 1988 : 大気-地表相互作用に関する共同研究 (HEIFE), 天気, **35**, 501-505.
- 光田 寧, 1995 : 黒河流域における地空相互作用に関する

- る日中共同研究 (HAIFE) について, 京都大学防災研究所年報, 38号 A, 1-11.
- 光田 寧, 1996: 日中共同乾燥地自然環境総合モニタリング計画, 研究報告書, Severe Storm Research Note, 京都大学防災研究所, (12), 153pp.
- 日本気象学会, 1995: 乾燥地の自然環境, (光田寧編) 気象研究ノート, 184, 153pp.
- Sahashi, K., O. Tsukamoto and J. Wang, 1990: Vertical distribution of humidity in the sand, HEIFE Report, No. 5, 123-129.
- Tamagawa, I., 1995: Turbulent characteristics and bulk transfer in HEIFE area, Bound. Layer Meteor., 77, 1-20.
- Tang, T. and G. Zheng, 1993: History and climatology of HEIFE area, Hexi Corridor, Proc. Intern. Symp. HEIFE, Kyoto, 6-15.
- Tsukamoto, O., 1993: Comment on "Peculiar downward water vapor flux over Gobi desert in the daytime", J. Meteor. Soc. Japan, 71, 407-411.
- 内嶋善兵衛, 清野 裕, 1987: 世界における自然植生の純一次生産力の分布, 農業環境技術研究所, 102pp.
- Yatagai, A. and T. Yasunari, 1995: Interannual variations of summer precipitation in the arid/semi-arid regions in China and Mongolia, J. Meteor. Soc. Japan, 73, 909-923.
- Wang, J. and Y. Mitsuta, 1990: Peculiar downward water vapor flux over Gobi desert in the daytime, J. Meteor. Soc. Japan, 60, 399-402.
- Wang, J. and Y. Mitsuta, 1992: Evaporation from the desert, Boundary-Layer Meteor., 59, 413-418.
- Wang J., K. Sahashi, E. Ohtaki, T. Maitani, O. Tsukamoto, Y. Mitsuta, T. Kobayashi, E. Shimojima, H. Zheng, Q. Li and Z. Xie, 1993: Energy mass transfer characteristics of soil-vegetation-atmosphere system in oasis area—Outline of the biometeorological observation period (BOP), Proc. Intern. Symp. on HEIFE, Kyoto, 507-514.

Sino-Japan Joint Research Project HEIFE : A General View and Results

Yasushi Mitsuta*

* *Professor Emeritus, Kyoto University*

(Received 6 February 1998 ; Accepted 19 October 1998)
