

黒河流域における地空相互作用に関する 日中共同研究 (HEIFE) について

光 田 寧

Sino-Japanese Cooperational Program on Atmosphere-Land Surface
Processes Experiments in Heihe River Basin (HEIFE)

by

Yasushi MITSUTA

Synopsis

Sino-Japanese Cooperational Program on Atmosphere-Land Surface Processes Experiments in Heihe River Basin (HEIFE) was executed during the period from 1989 to 1993 in the Heihe River Basin area in Hexi Corridor, Gansu, North-Western China as the Third HAPEX (Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment) of WCRP. The objectives and observational procedures are explained with some results of the program in the present paper.

1. はじめに

水の豊富な日本では、小石が水底で堆積岩となり（変成を受けて）地上に現れ苔が生えるまでという表現が極めて長い年代を表現するのに用いられているが、乾燥した中国では、岩山が気温の変動のために崩れ、風蝕により砂となり、風に運ばれて谷を埋めて砂漠となり、そこが緑化して緑の草原となるまでというような表現が適当なのではないかと思われるほどである。すなわち、岩が風化してできた岩石ばかりのゴビと呼ばれる平地部分は一般に風が強く、砂の供給地であり、砂は偏西風に飛ばされて粒子の大きいものが谷を埋めて砂漠を作り、さらに細かい粒子は東に飛んで中国本土の黄土高原を作ったと考えることができる。

一方、中国北西部乾燥地の南側にある青海高原の周辺をなす高い山脈には夏に多くの雪が降り、氷河が存在し、氷河の水は麓に流出し、これが集まって河となり、砂漠の中にオアシスを作りながら流れて、下流の大砂漠の中に終端湖を作って消えてしまうという形態をとっている場合が多い。

農業気象の専門家によれば、日射と雨があれば植物の1次生産性は高い。一般に、両者が同時に大きいということは生じ難いが、砂漠の中のオアシスあるいは人工灌漑地はこの条件を満たす数少ない場所である。中国でも乾燥地の水の得られる農地では、生産性が非常に高い。しかし、このような地域でも人口が過剰になり、鉱工業の発達により水を大量に利用したり、過剰な灌漑水の利用を行うと河川水が減少し、終端湖が急速に縮小して地下水位が低下して砂漠化が始まることになる。

今回実施されたHEIFE（黒河流域における地空相互作用に関する日中共同研究）は、甘粛省の5000mを越す祁連山脈から流出した黒河が、山脈に沿って河西回廊を北流する間、いくつかのオアシスや人工灌漑

地を作り、最後にはモンゴルの砂漠に消えていく過程において、農業その他にどれだけ水を利用することができるかを調べるのが大きな目的となって計画されたプロジェクトである。黒河の下流端にも終端湖があったといわれているが今は存在しない。現在、この河西回廊は非常に農業の生産性が高く収量も多く、野菜も大きく育つといわれているが、増大する中国の人口を養うためには農業の増産が必要であり、砂漠化が進むというようなことは困るが灌漑水はできるだけ取水したいとの希望がある。このような実際の問題とWCRPの学問的必要性が一致したため、HEIFEが中国科学院の5ヶ年計画の一つに組み込まれ、日中共同研究という形で1989年から1993年まで実施されたのである。

2. HEIFEの目的

HEIFEは黒河流域における地空相互作用に関する日中共同研究、HEIhe river Field Experimentの略である。この計画が最初に提案されたのはジュネーブにおける1986年のWCRP, Informal Planning Meetingにおいてであって、中国科学院 葉(Ye)教授によって地空相互作用の研究の重要性と共に乾燥地での研究プロジェクトとして提案された。その後、Ye教授はこの計画を国際的なものにしようとして、1987年WCRP日本委員会の議長である山元教授に相談を持ちかけ、日本と中国の間で相談の結果、ヨーロッパにおけるHAPEX-MOBILHY¹⁾、米国のFIFE²⁾に次ぐWCRPの第3のHAPEX (Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment) として、中国北西部の乾燥地において実行することが計画された。

日本側では、文部省測地審議会の決議により、国際共同研究特別事業として京都大学防災研究所が代表となり、中国側は中国科学院の決定により蘭州高原大気物理研究所が代表となって、HEIFE 5ヶ年計画(1989~1993)の実行に関する2国間の合意書が1989年署名された。これにより中国側はYe教授、日本側は山元教授を議長とした運営委員会により計画が実行されることになった。

WCRP計画委員会によれば、HAPEXの目的は、GCM(大気大循環モデル)の1グリッドサイズに相当するぐらいの範囲で地表面および水理過程における蒸発、降雨、流出、熱輸送といった問題をパラメタライズするために必要な総合的なデータセットを作ることであり、具体的なテーマとしては

- 1)数kmから100kmぐらいの範囲の地空相互作用の理解を深める。
 - 2)気候モデルに用いる蒸発、地下水位、流出のパラメタリゼーションの手法をテストする。
 - 3)地表の水文過程に関する新しい考えに基づいたモデルを作成し、テストする。これにより物理的に意味のある基礎を確立する。
 - 4)遠隔測定データの解釈を助けるための現地観測結果の基準を得る。
- といった諸問題を解明することにある。

他の先行した2つのHAPEXと異なっており、地球上の陸地の1/4を占めるといわれる乾燥地における上記の問題を解明しようとするのがHEIFEの目的である。年間の蒸発量がいくらあるかさえ未だにはっきりとしていない砂漠の上で、種々の観測を臨時に特別観測所を設置し、既存の観測点も含めて、日中共同で研究、観測を行うものである。特に日本にとっては、砂漠を持たないところから、このような観測は最初の経験であり、観測装置の準備から観測所の設置まで、困難な問題に多く直面した。しかし、なんとか5ヶ年の観測研究計画を完了し、1993年11月にその速報的な研究成果を報告する国際シンポジウムが京都で開催された。この計画の簡単な解説は天気³⁾に示されている。なお、この5ヶ年間で残された問題を解明するためのAECMP(Arid Ecological Comprehensive Monitoring Project)が1994年より計画され、実行されつつある。

3. HEIFE研究領域の自然と歴史

HEIFEの観測が行われた領域は、中国甘肅省のWuwei（武威）、Zhangye（張掖）およびJiuquan（酒泉）の3県にまたがる北緯37° 15'から42° 42'，東経92° 21'から104° 05'までの地域で約105km²の面積を持っている。この地域は南流する黄河の西側にあり、Qilian（祁連）山脈とLongshou（老耆）山脈の間の細長い乾燥平原であるところからHexi Corridor（河西回廊）地域とも言われている。

この部分はFig. 1に示すような位置にあり、中国の青海高原の北側に沿って東に進むシルクロードが南に転向し中原に入る入口部分にあり、万里の長城の西端の部分に当たる。河西回廊の中央部では、ZhangyeとLinzeが早くから開けたオアシスの町である。標高1300ないし2000mの高原にある。4000m以上の高さを示すQilian山脈の高所には氷河が存在し、そこから流れ出した水が集まってHeihe（黒）河となり、これらのオアシスを作りながら北西流し、最後にはMongolia（蒙古）に連なる砂漠の中の終端湖に流れ込んでいた。この終端湖は現在（数十年の間）では、なくなっているとのことである（Fig. 2）。この黒河の中流域でHEIFEが行われたのである。

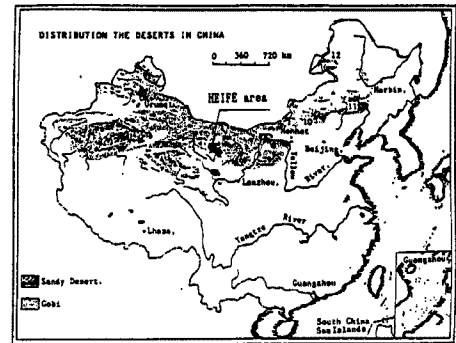


Fig. 1 Deserts in China and HEIFE Area.

この河西回廊は、昔（2000年前）は草地で放牧が行われていたが、1世紀のHan（漢）王朝頃に農地開発が始められた。10世紀前後から東西交流が始まると、チベットやモンゴルの政権によってこの地域が交互に支配されたが、13世紀以降は中国の中央政権が治めることになった。現在では面積3700km²のZhangye（張掖）県で381,000人、面積2700km²のLinze（臨澤）県で115,000人の人口を持っている。これは近代になって中央政府がこの地方の人工灌漑による開発に力を入れるようになった結果である。

河西回廊の中央低地の年雨量は200mm以下で、乾燥気候帯に属しているが、山岳地の気候と極端な乾燥気候の中間領域に当たる。寒冷期半年は偏西風がチベット高原の北側に沿ってこの地域の北側を吹くので、この地域はその風下渦の中に入る。夏にはこの部分はモンスーンの影響下に入り、東寄りの風が吹く場合も生じることになる。

Fig. 3は、1951年から1991年までの40年間のZhangyeの年平均気温と年雨量の変化を示したものである。この図には黒河がQilian山脈から平地に出るYing Luo Xiaでの年平均流量も同時に示してある。1951年から1966年にかけては温暖で流量が多く、1967年から1980年は寒冷で小流量期、また1981年から1991年に再び高温大流量期であった。今後の1994年以降は寒冷小流量期に入るものと思われる。このような年々の変化は予想外に大きく、この地域の気象条件を考える上で無視できない。

チベット高原の熱性低気圧に伴う夏のモンスーンは夏の雨水を供給する。従って下層での東風が続くことがHEIFE地域で大雨が生じる一つの条件である。この地方の農民の言い伝えに「東風が1日だけで終わったら、その後3日間は晴れである。しかし東風が3日間続けば、次の1日は雨が降る」というのがあるくら

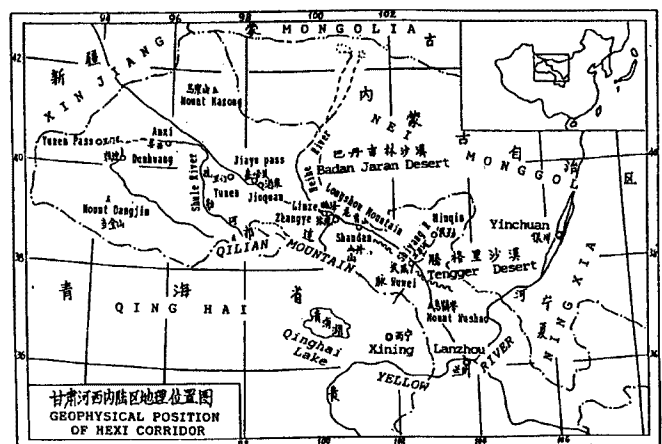


Fig. 2 Hexi Corridor area.

いである。
1990年から
1991年の間で
1日降雨量が
10mm以上あ
ったのは4回
(1990年7月7
日, 1991年6
月16日~17日,
8月12日~13
日, 8月24日
~25日) がある。
これらのいづ
れについても
3日ほど前か
ら700mbの東
寄りの風が強
くなり、風が

東寄りから西寄りに変わった時に雨が降っている。1991年8月24日~25日の激しい雨の時には前8日間東風が続いていた。しかし、このようなモンスーンの侵入は、極前線を西から東進して擾乱がこの地域に達した時に生じるということを強調する研究⁴⁾もある。冬の大雪は偏西風が南にずれて、Qilian山脈で強制上昇流を生じた時に生じる⁵⁾。

Hexi Corridor(河西回廊)の南側には褶曲山脈であるQilian山脈があり東のWushao(烏鞘峯)山から西のDangjin(当金)山まで約800kmの長さで延びている。最高峰は5584mで峯のほとんどが3000m以上の高さを持っている。北側のLongzhou(老首)山脈は比較的低く、多くは2000m以下であり、背後には壮大なBadan Jaran(巴丹吉林)砂漠およびTengger(騰格里)砂漠がありモンゴルに至る(Fig. 2参照)。

これらの山脈の間の細長い平原が河西回廊で、いくつかの河の流域からなっているが、その中央部が黒河流域で面積は130,000km²あり、そのうち60%ぐらいが平地である。平地のほぼ半分はゴビ(岩石が主な砂漠)砂漠または高塩分地で利用不能であり、人工および自然のオアシスはわずかに過ぎない。この流域の中流部で今回の実験が行われたのである。中流域の面積は約9000km²でオアシス24%, 砂漠10%, ゴビ15%, 丘陵地51%ぐらいの構成となっている⁶⁾。

ここでのゴビとは主に山麓平地に位置するが小石が多く混入した砂漠である。その鉛直断面を見ると砂の中に小石が混在するような状態で、小石は丸くなっており日本ならば河原のような感じがするが、すべて風の侵食によるものである。ゴビ表面の砂は風に飛ばされて石ころばかりが見える。黒河の南側の砂漠では灌漑用に水を利用するため地下水位の変動が大きい北側の砂漠では地下水位は比較的一定している。Linze(臨沢)オアシスの近くには現在でも地下水位が地表面に達しているところもある。砂の粒径分布はFig. 4に一例を示すとおりである。また地域中央部

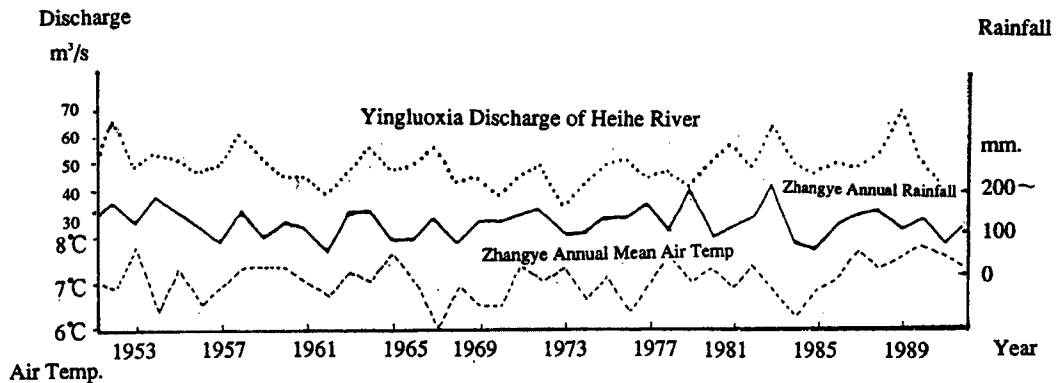


Fig. 3 Annual mean air temperature and rainfall at Zhangye, and the annual discharge at Yingluoxia about 300km up stream of Zhangye.

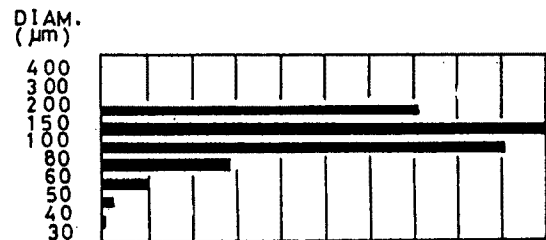


Fig. 4 An example of size distribution of sand particles in Linze Desert, in weight per particle size class in arbitrary scale. Specific weight of rock particle; 2.4, porosity; 0.34, medium of particle size; 118 μm , 25% size; 91 μm , 75% size; 147 μm , specific particle surface area 0.023 m²/g³.

Table 1 Climate of Zhangye (38° 56'N, 100° 26'E, h=1482.7m) (1951~1980)

Month		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Year
Mean Air Temp.	℃	-10.2	-6.1	2.0	9.5	15.4	19.4	21.4	20.5	14.6	7.0	-1.4	-8.3	7.0
Mean Surface Temp.	℃	-8.8	-3.9	4.6	13.3	21.5	26.6	27.9	26.3	18.8	9.5	-0.2	-7.8	10.7
Mean Relative Hum.	%	56	56	44	40	43	50	57	57	58	56	60	60	52
Precipitation	mm	1.8	1.3	3.2	4.3	13.0	19.3	27.7	30.9	18.0	5.0	2.4	1.6	129
Wind speed	m/s	1.9	2.1	2.6	3.0	2.9	2.4	2.2	2.1	1.9	1.9	1.9	1.8	2.2
Most Frequent Wind Dir.		NW	NW	NW	NW	NW	SE	SE	NW	NW	NW	NW	NW	NW
Storm Days		0.4	0.6	1.6	2.8	2.5	1.9	2.0	1.3	0.6	0.5	0.4	0.4	14.9
Sand storm Days		1.4	1.4	3.1	3.8	2.7	2.1	2.1	1.2	0.6	0.6	0.5	0.8	20.3
Snow Days		2.98	2.3	2.4	1.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	2.2	2.7	14.8
Extreme Max. Air Temp.	℃	17.9	21.5	27.2	32.2	34.0	38.1	37.7	38.6	33.4	29.6	24.0	16.5	38.6
Extreme Min. Air Temp.	℃	-28.7	-27.1	-21.2	-10.5	-3.5	1.3	5.8	4.4	-3.2	-9.7	-26.3	-27.5	-28.7

のZhangye（張掖）オアシスの気候表はTable 1に示すとおりである。

4. HEIFEの観測計画の概要

HEIFEの大きな目的は乾燥地域における気象水文過程のできる限り広範囲にわたる正確な観測を行ってデータセットを作成し、今後の各種の研究の検証に役立つような資料を残すというHAPEXの共通目標を実行することにあった。そのために河西回廊中部での既存の気象および水理観測点の観測資料を収集することに努力すると共に新たに、ゴビ、砂漠、オアシスなど各種の地表条件毎に基本観測点を設置し、その他いくつかの補助観測点を設置して基本観測点を補助する観測を行い、全体の状態を知ることができるように計画した。5つの基本観測点のうち3点（Gobi, Linze（臨沢）, Pinchuan（平川））は中国側が、2点（Zhangye（張掖）, Desert）は日本側がその設備と観測の実行を受持った。

中国側は最新の技術を用いることに意欲を持ち基本観測点間のデータ伝送を無線で行ったり、地下観測室を設けたり、大型のライシメータを作るなどを計画したが、日本側は砂漠での観測は全く経験がなかったこともあって、なるべく保守的で確実に観測の行えるものとするにこだわった。それでも電源事情から全ての観測点は自家発電機を持ち、特に全く電源のない砂漠観測点ではルーチン観測は太陽電池電源システムによる必要があった。また、この観測点は人家から数kmも離れた砂漠の中にあるためプレハブの観測小屋を日本から運び、発電機を持ち数人が泊まれるような観測設備を作る必要があった。また、日本側はほとんどの観測は現場でEPROMまたはICカードに記録し事務室に持ち帰ってコンピュータにより処理をするようなシステムを用いた。

HEIFEの観測期間は、日本側では1989年度から1993年度までの5ヶ年計画で進めたが、中国側は1年先行して期間が設定され1990年および1991年をFOP（Field Observation Period）として野外観測をこの間にまとめようとした。最初の1年は準備期間とし本格的観測は2年目以降に実行したが、本観測開始までの間に予備観測として日本側は砂漠に試験的に自動観測装置を1ヶ年設置して様子を調べ、中国側は乱流輸送の観測の経験が少なかったため、事前に日本の技術提供を受けてゴビで試験観測を行った。ルーチン観測は中国側の一部が1992年で終了したほかは1990年から1993年まで行われた。しかし、乾燥地の気候は年々変化が大きく、先にも述べたように乾燥期と湿潤期が交互にやってくるということも解ってきたので、1993年に行われた国際HEIFEシンポジウムにおいて、基本観測だけでもできるだけ長く行うことの意義が大きいこ

とが確認され、HEIFE終了後も一部の観測を継続することが決議された。その結果臨沢 (Linze) 砂漠付近と新たに民勤 (Minqin) 砂漠に設置した観測点を利用して、AECMP (Arid Environment Comprehensive Monitoring Project) として1994年以降も観測を続けることとなった。

中国北西部における気象観測所の数は予想外に多く、各県毎に設置されている。HEIFE領域内ではGaotai(高台), Linze(臨沢), Zhangye(張掖)の3つの地上気象観測点が存在し、それらの観測結果のうち、中国側のFOP期間 (1990年8月～1991年2月)

のものについては中国側で収集され磁気テープに編集されている。また高層観測については、近くのJiuquang (酒泉), Zhangye (張掖), Minqin (民勤) の3地点についてFOP期間中の特異点を含む全ての記録が磁気テープ化されている。

またHEIFE領域およびその周辺にFig. 5に示すように流量観測所、雨量観測所などが約30点存在する。これらの地点の記録についてもFOP期間中のものは磁気テープ化されて収集されている。

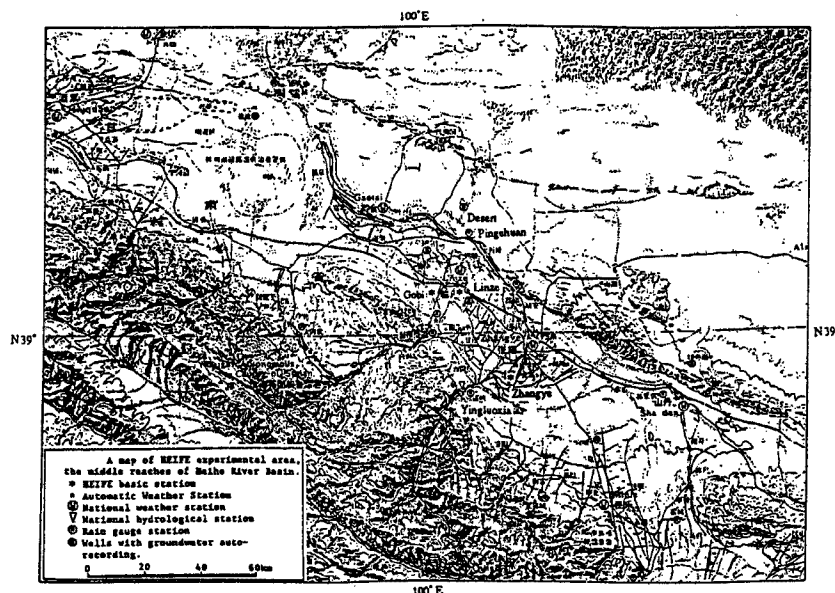


Fig. 5 Distribution of observing stations in HEIFE area.

5. 基本観測点による観測

HEIFEの研究のため特別に設置された観測所で、下に示すような5ヶ所にあり、それぞれ代表的な地表条件の場所の中央付近に位置している (Fig. 5参照)。

001 Zhangye	張掖 (日)	農地 (オアシス)
002 Linze	臨沢 (中)	畑地 (とうもろこし)
003 Pingchuan	平川 (中)	農地 (オアシス)
004 Gobi (Huayin Gobi)	ゴビ (中)	ゴビ (岩石砂漠)
005 Desert (Yigongcheng Desert)	砂漠 (日)	砂漠 (砂砂漠)

これらの点では16mまたは20mの塔 (後に一部で40m) を用いて風向、平均風速、気温、湿度のプロファイルおよび地中温度と地中水分のプロファイルを30分または1時間毎に連続して測定記録し、同時に上下短波放射、上下赤外線放射、入射紫外線および純放射量を同じ時間間隔で記録している。さらに日本側の地点では気圧、雨量、地表面放射温度も同時に記録されている。また定時にはSunphotometerによる大気濁度の観測を行うようになっている。これ以外にZhangyeではエアロゾルの粒度分布、地中水分量、大気オゾン濃度等の連続観測が行われ、Zhangye, Linze, Pingchuanでは中国側によってライシメータによる蒸発散量の観測

が行われた。

また四季には数週間ずつ特別強化観測（IOP）期間を設定し、乱流輸送、地中水分測定その他人力によらねばならない観測が特別観測として、これらの基本観測点において行われた。砂漠観測点の外観はFig. 6に示すとおりである。

6. 自動気象観測点（AWS）による観測

基本観測点での観測を補うために簡易自動観測装置（AWS）を5台準備して、3台を砂漠観測点の周りに約10km離れた位置に三角形に配置し（Desert NW (013), Desert S (014), Desert E: New Oasis (015) Fig. 5参照）、1台（012）はゴビ観測点の南、Qilian山脈の山麓に（Gobi South）、残り（011）は臨沢北方の黒河左岸の小砂漠（G-9）に地下水位計と共に設置した。

これらのAWSは6mの柱の頂上にプロペラ式風向風速計と日射計を設置、2mに気温湿度計を、0.8mに地表面放射温度計を、さらに地中温湿度計または雨量計を太陽電池を用いて10分間毎に連続して観測カードに記録する方式のものである。風速はフィルタを用いて1分間平均ぐらいのsustained wind speedを記録している。Gobi SouthのAWSの外観をFig. 7に示す。

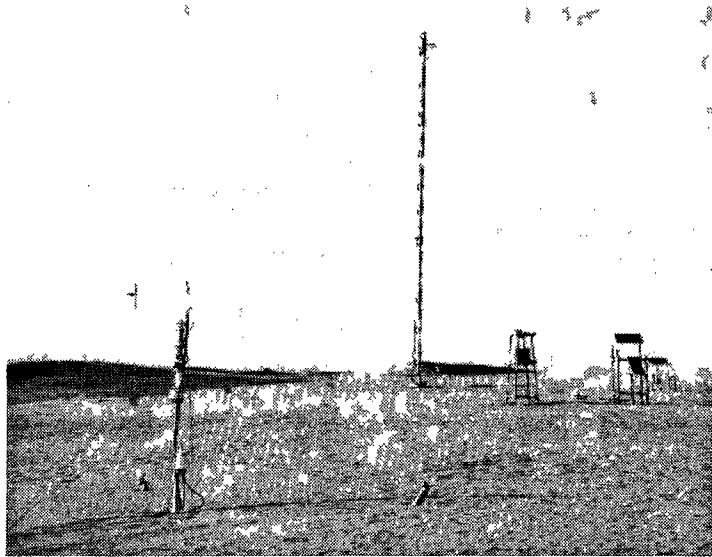


Fig. 6 Desert Station.



Fig. 7 Gobi-South AWS.

7. 強化観測期間（IOP）の観測

HEIFEの目的からすれば、全観測期間を通じて乱流輸送の直接観測を行い年間の蒸発量や熱収支を調べるべきであるが、残念ながら乱流輸送の観測を年間観測者が操作調節することなく実行することは現在のところ不可能であり、地中水分の観測についても観測者の手によって測定をしなければ必要な精度を得ることができない。その他プラネタリー境界層の観測や植物同化作用観測なども自動測定は不可能である。そこで各季節毎に数週間の強化観測期間（IOP）を設定しその期間だけ観測員の必要な観測を集中して行い、その間の観測結果とルーチン観測の結果を用いて、残りの期間の蒸発量や熱収支を推定するという方法を採らざるを得なかった。

IOPの最初のものは、1991年4月に計画されたが日本側の計測器の輸送が間に合わなかったため中国側のみで実施された。そのため観測に少しずつのずれがその後も見られた。また、IOP以外に特別な目的を限定した特別観測期間もいくつか計画されたり、観測期間前に試験的に行われたものもある。それらを含

めた特別観測期間の内容は次の通りである。なお、この表には1994年以後のAECMPの間に行われる特別観測も含めてある。

○1988年9月4日～19日	POP (Pilot Observation Period) 中国側による試験観測
○1990年7月30日～9月1日	PIOP (Pilot IOP) 中国側による試験観測
○1991年4月10日～24日	IOP-1 (中国側のみ参加)
○1991年7月29日～8月27日	IOP-2 乱流輸送とプラネタリー境界層観測
○1991年9月24日～10月15日	IOP-3 層観測
○1991年12月2日～12日	IOP-4冬期乱流輸送観測
○1992年6月3日～13日	IOP-1' 乱流輸送観測の追加 (日本側)
○1992年4月30日～5月13日	BOP-1 (Biometeorological Observation Period) 生物気象の特別観測 (張掖, 麦島)
○1992年6月1日～16日	BOP-2 生物気象の特別観測 (張掖, 麦島)
○1992年8月3日～20日	IOP-C (IOP-Comparison) 乱流輸送観測計器の日中比較および境界層 (ゴビ)
○1992年7月4日～29日	IOP-R (IOP-Rainfall) 降雨機構特別観測 (Pingliang)
○1994年8月	AECMP'94 蒸発と地中水分の特別観測
○1995年8月	AECMP'95 砂漠とオアシスの遷移境界層の特別観測

上記以外にも中規模の特別目的を持った観測が行われた期間もある。

これらの特別観測期間中に用いられた計測器には次のようなものがある。すなわち自動乱流輸送計測システム、低層ゾンデ、滞留気球、ソーダ、Sunphotometer、ライダー、エアロゾルサンプラー、地中水分圧計、エアロゾル粒径分布測定装置、オゾン計、水質分析装置 (Hack)、飛砂計、中性子水分計、光合成計測装置 (Advanced System, E009) および氷晶核測定ゾンデなどである。これらの観測器は主に強化観測期間に使用されているが一部特別な期間に行われたものもある。

8. 観測結果とデータベース

これらの観測の結果はいずれも観測担当者の手によって整理され、HEIFE委員会 (日本及び中国) にその結果を送付することになっている。一部砂漠地で用いたためCalibrationが予想外に大きく変化したもの、例えばSunphotometer、観測塔用の風速計、湿度計がある。いずれも出来る限りの補正を行っているが普通に用いた場合よりやや誤差の大きいものもあることはやむを得ない。

集められた資料は日中両国の委員会によって独自にデータベースが作られつつあるが、最終的には日本側の防災研究所の手によってMO diskかCD-ROMの形で全てを収録し、全世界の研究者に公開する予定である。現在既に一部は利用可能な形に整理されている。

9. 研究の成果の発表

HEIFE関連の研究の速報はHEIFE実行委員会により発行されたHEIFE Report (No1~No6) に報告されており、完成したものは各研究者が雑誌等に適時投稿している。また最後年度の1993年11月には京都でInternational Symposium on HEIFEが開催され合計722頁におよぶProceedings⁷⁾ が刊行されている。中国側の発表論文はChina Meteorological PressよりAdvances in HEIFE Research⁸⁾ 全191頁が刊行されており、日本側では気象学会気象研究ノートの1号として国際シンポジウム発表論文を中心としたHEIFEの紹介「乾燥地の自然環境」(和文)⁹⁾、および気象集誌にHEIFE関係のオリジナル論文を集めたHEIFE特集号(英文)¹⁰⁾ が1995年中に刊行の予定である。HEIFEに関連した研究の成果はこれらの印刷物を見ていただければ全容を知っていただくことができるであろう。

10. 防災研究所からの参加

防災研究所からは水資源研究センター(池淵)、災害気候部門(村松)および暴風雨災害部門(光田)のメンバーが水理学、および気象学の立場からこの研究プロジェクトに参加した。その研究成果は準備段階のものを含めて防災研究所年報に随時発表されている。この日中共同研究が提案された頃からそれへの参加を目標として半自動化した境界層観測装置の可能性について研究を始め、宇治グラウンド横の地空相互作用実験施設において色々な準備研究を始めた^{11) 12) 13) 14) 15)}。その結果としてこのプロジェクトに用いる乱流輸送観測装置¹⁶⁾ の設計を直前に完了した。一方ライシメーターも実用機を地空相互作用実験施設に設置することに試験的に成功した¹⁷⁾ がこれと同等のものを中国において設置するには技術的に困難なものがあまりにも多いので日本側としては実施することは断念した。このような準備の上で先に述べたHEIFEの観測計画が中国側と話し合われ合意に達したのである³⁾。

1989年から日本側の予算が本格的に利用できるようになったので計測器の購入を開始、1990年には連続観測用の装置と基本観測的の設備を中国に送り完成したものから観測を開始し、同時に中国側若手研究員の研修を本研究所で行った。1991年から特別観測を始めることにして準備を始めたが予想外に輸送に時間がかかったため中国側との協定によるIOP-1には日本側は参加できなかった。IOP-2からは計画どおり進めることができた。そしてIOP-1については1992年春に日本側だけで基本観測点において実施しIOP-1'と呼んでいる。

乱流輸送量は現地でco-varianceの計算値がプリントされるようになってはいるが、実際には持ち帰った記録で輸送量を全て計算し直すという方法をとることになった。これは砂漠における計測器の傾きが大きかったのと砂丘の影響を取り除く手法に確信が持てなかったので研究室に持ち帰って、砂漠でのデータは防災研究所が、張掖でのデータは岡山大で解析することになった。その結果はHEIFE最終年¹⁸⁾ とその翌年¹⁹⁾ に発表されるということになり、研究の方が少し遅れる原因を作ってしまった。繫留気球および低層ゾンテについても色々と問題があり、1992年²⁰⁾ に速報が出されたが最終研究結果についてはこれから発表されることになる。

水資源研究センターにおいては砂漠の砂を持ち帰ってコントロールされた条件下での蒸発の実験が行われた。放射を考えない恒温恒湿風洞中での蒸発実験では、観測から考えられたように蒸発が表面ではなく表面から少し入った砂中で蒸発が進むということが確認された。これを数値シミュレーションによって再現し確認する試みも²¹⁾ 行われたがまだ完成していない。放射、エアロゾル、その他の面においてもまだ研究は進められている。防災研究所以外の研究機関においても次々と研究成果を発表しつつある。

11. 結語

HEIFEの観測資料を用いての研究はまだ各研究機関で進められているが、今日の時点で簡単にまとめると次のようになる。

1) 砂漠での蒸発については次の3つの段階に分けて考えるべきであることが明らかになった。

①湿潤期：雨が降った後の砂の湿った状態で、普通の土壌の場合と同様に蒸発と顕熱輸送が並行して進行し正午過ぎにその最大を示す。

②半乾燥期：雨量に相当する程度の蒸発が雨後数日間に生じるが、その終わり頃には砂の表面は午前中に乾燥してしまい、蒸発の最大は午前中に、顕熱の輸送は正午過ぎに最大を示すようになる。

③乾燥期：さらに乾燥が進むと表面近くの砂は乾燥し、水分の蒸発は地中数十cmのところで生じ、水蒸気の形でのみ水分は砂中から表面に輸送される。昼間空中では水蒸気の乱流輸送は非常に小さく、時には下向きになることもあり、比湿の変動がMonin-Obukhovの相似側に従わなくなる。

2) オアシスにおいては、砂漠からの顕熱の移流のため、地面から放出される潜熱が非常に大きくなり、顕熱の輸送との和が太陽からの入射熱量よりも大きくなることもある（オアシス効果）。

3) 砂漠における降水の地中への浸透は予想外に遅く、その間に蒸発する量が大いなので、砂漠の年間蒸発量は年間降水量よりも大きく、雨水が地下水の涵養に役立つのは非常に頻度の低い大雨の時だけである。

4) 砂漠上空の氷晶核は $10/\text{m}^3$ と多く、水分の供給があれば積乱雲の発達が見られ、急速な霰の形成が観測された。

5) 河西回廊程度の規模では底部平地内でのオアシスと砂漠に分布は年雨量の分布に影響を与えることはなく一様に雨は降り、山地では高度と共に雨量が増加する。

6) 砂漠での気候の変動は年々大きな差があり、乾燥した年が数年続いた後に、突然大雨が降って砂漠に急に湖が出現したりするのが見られた。

謝辞

本研究は中国側は中国科学院、国家自然科学基金委員会、および甘粛省の資金により、日本側は文部省国際共同研究特別事業費、科学研究費国際学術研究補助金、文部省国際シンポジウム補助金および万国博覧会記念基金からの援助によって実行出来た。ここにまとめて感謝の意を表したい。

また、本研究の計画および準備段階において重要な役割を果たされた本研究所井上治郎博士は1991年梅里雪山で研究登山中に亡くなられた。深く哀悼の意を表すものである。

参考文献

- 1) Andre, J. C., J. P. Goutorbe and A. Perrier; HAPEX-MOBILHY: A hydrologic atmospheric experiment for the study of water budget and evaporation flux at the climate scale, Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 67, pp. 138-144, 1986.
- 2) Hall, F. G., B. J. Markham, J. R. Wang and F. Huemmerich; FIFE results overview, Symp. on FIFE, Anaheim, California, Amer. Meteor. Soc., pp. 17-24, 1990.

- 3) 光田 寧；大気・地表相互作用に関する日中共同研究 (HEIFE)，天気，35巻，8号，pp. 501-505，1988.
- 4) Itano, T.; On the rainfall over the arid area in the Northwestern China, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 73, No. 12, 1995 (to be published).
- 5) Tang, M. and Zeng, G.; History and climatology of HEIFE Area, Hexi Corridor, Proc. of International Symp. on HEIFE, Kyoto, 1993, pp. 6-15.
- 6) Wang, J.; Geography and land use of Hexi Corridor, Proc. of International Symp. on HEIFE, Kyoto, 1993, pp. 16-21.
- 7) Mitsuta, Y. (ed) ; Proceedings of International Symposium on HEIFE, Kyoto, 1993, p. 772.
- 8) Gao, Y. and Y. Hu (ed) ; Advances in HEIFE Research, China Meteorological Press, p. 191, 1994.
- 9) 光田 寧 (編) ; 乾燥地の自然環境，気象研究ノート，p. 153, 1995.
- 10) Special Issue of HEIFE; J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 73, No. 12, 1995 (to be published).
- 11) 光田 寧・池淵周一・田中正昭・文字信貴・小尻利治；大気と地表面間のエネルギー交換過程の観測 (1)，京都大学防災研究所年報，29号B-1，pp. 271-281，1986.
- 12) 光田 寧・池淵周一・田中正昭・文字信貴・小尻利治；大気と地表面間のエネルギー交換過程の観測 (2)，京都大学防災研究所年報，30号B-1，pp. 287-295，1987.
- 13) 玉川一郎・山田道夫・池淵周一・光田 寧；地表面水分量と地表面温度との関係について，京都大学防災研究所年報，31号B-1，pp. 237-241，1988.
- 14) 池淵周一・土谷史郎・久保和幸・光田 寧；裸地蒸発量のモデル解析とその実証的研究，京都大学防災研究所年報，32号B-1，pp. 319-336，1989.
- 15) 玉川一郎・光田 寧；裸地における蒸発と地面水分量の関係について，京都大学防災研究所年報，32号B-1，pp. 299-309，1989.
- 16) 玉川一郎・今木和裕・光田 寧；新しい乱流輸送観測装置について，京都大学防災研究所年報，34号B-1，pp. 19-27，1991.
- 17) 池淵周一・土谷史郎・久保和幸・光田 寧；大型ライシメータによる裸地蒸発量の観測・評価，京都大学防災研究所年報，31号B-2，pp. 275-285，1988.
- 18) 玉川一郎・堀口光章・光田 寧；中国砂漠地域での乱流輸送の観測，京都大学防災研究所年報，36号B-1，pp. 37-48，1993.
- 19) 玉川一郎・光田 寧；砂漠からの蒸発について，京都大学防災研究所年報，37号B-1，pp. 1-8，1994.
- 20) 永井晴康・山田道夫・光田 寧；中国西北部砂漠地域におけるプラネタリー境界層の観測，京都大学防災研究所年報，35号B-1，pp. 235-244，1992.
- 21) 光田 寧・池淵周一・山田道夫・玉川一郎；境界層過程の数値シミュレーション (1)，京都大学防災研究所年報，32号B-1，pp. 381-387，1989.