

河西回廊での水文気象研究 HEIFE

玉川一郎 (岐阜大学工学部)

概要

2001年7月13日のオアシスプロジェクト勉強会での「砂漠・オアシスからの蒸発 - HEIFE プロジェクト」と題された発表の内容を基にオアシス地域研究会報用に報告を行う。主な内容は、オアシスプロジェクトの最初の対象地で過去に行われた「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 (1989-1993)」の筆者の独断に基づく紹介である。

1 はじめに

1989年から1993年まで、中国科学院蘭州高原大気物理研究所(現、寒区旱区環境と工程研究所)と京都大学防災研究所を中心に張掖、臨澤付近で気象学・水文学的プロジェクト「黒河流域における地空相互作用に関する日中共同研究(HEIthe river Field Experiment)」が行われた。これは、World Climate Research Program (WCRP)の下に第3のHAPEX (Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment)として企画され、大循環モデル(GCM)の1グリッドのスケールである100km四方程度での地表面および水文過程における蒸発、降水、流出、熱輸送といった問題に対して役立つ総合的なデータセットを作成することを目標としていた。実際には、日本と中国の2国間プロジェクトとして行われ、既存データの収集とともに多くの観測が行われた。

包括的な紹介は、参考文献(光田1996[3]、光田1998[4])にあるが、ここではその一部に限って計画と研究結果を紹介する。しかし、本論記述後筆者はこちらの方がむしろやや包括的かも知れないと感じている。

なお、HEIFEの研究結果は、多くの論文として発表されているが、まとまった物としては、最終ワークショップの結果が、「乾燥地の自然環境」と題して日本気象学会から気象研究ノート第184号として1995年に刊行されている他、同じく日本気象学会の英文論文誌 Journal of Meteorological Society Japan も1995年の10月、12月号の特集号があり多くの論文が掲載されている。他の雑誌や別の時期に単発で論文が発表されていることは言うまでもない。

集められたデータや観測結果は、本来データセットとして配布されるはずであったが、人的資源の不足で、整備されたデータセットは結局作成できず2000年から、京都大学防災研究所大気災害部門暴風雨災害研究分野のWWWサーバ上に'as is'で公開されており誰でも利用可能になっている (<http://ssrs.dpri.kyoto-u.ac.jp/~heife/>)。

2 HEIFE の概観

HEIFEでは、既存データの収集として気象観測所(地上観測点: 高台(GAotai)、臨澤(Linze)、張掖(Zhangye)、高層観測点: 酒泉(Jiuquang)、張掖(Zhangye)、民勤(Minqin))や、流量観測所、雨量観測所のデータを収集するとともに、5つの基本観測点と5つの自動気象観測装置、およびいくつかの井戸での水位の観測が通年で行われた。また、集中観測期間(IOP)には、乱流観測による地面大気間での熱・水蒸気・運動量交換の直接観測や、係留気球などの気象観測、サンプリングに基づく地中水などの観測、なども行われた。

IOPは、光田1996[3]のまとめによると、

POP 1988.9.4 - 19: 中国側試験観測

PIOP 1990.7.30–9.1: 中国側試験集中観測

IOP-1 1991.4.10–24: 日本側は遅れた。

IOP-2 1991.7.29–8.27

IOP-3 1991.9.24–10.15

IOP-4 1991.12.2–12

IOP-1' 1992.6.3–13

BOP-1 1992.4.30–5.13: 生物気象特別観測

BOP-2 1992.6.1–16

IOP-C 1992.8.3–20: 乱流輸送観測機器の日中比較観測および境界層観測

IOP-R 1992.7.4–29: 降雨機構特別観測

AECMP'94 1994.8: 蒸発と水分の特別観測

AECMP'95 1995.8: 砂漠とオアシスの遷移層の特別観測

のように行われた。末尾の2つは、HEIFE の後の研究計画 AECMP によるものである。観測点の位置などのさらに詳しい情報は、光田 1996[3] を参照して欲しい。さまざまな観測の内、基本観測点に於ける観測の様子について次節で述べる。

2.1 基本観測点でのタワー観測

5つの基本観測点は表1のように代表的な各地表面上に設置された。

地点名 (英文)	(和文)	東経	北緯	標高	地表状態
Zhang Ye	張掖	100 度 26 分	38 度 56 分	1482.7	耕地 (麦)
Linze	臨沢	100 度 10 分	39 度 09 分	1453.7	耕地 (とうもろこし)
Ping Chuan	平川	100 度 06 分	39 度 20 分	1382	オアシス
Huayin	戈壁	?	?	?	戈壁 (岩石砂漠)
Desert Station	砂漠	100 度 10 分	39 度 23 分	1391.0	砂砂漠

表 1: HEIFE 基本観測点 (光田 1996[3] より)。Huayin 観測点の位置が不明だが、黒河の南側の道路沿いの観測点であり、Huayin の街より少し離れた戈壁にあったと思う。(著者註)

この内、日本側担当の Desert Station(図 1) と ZhangYe (図 2) では、Vaisala 社製の気象観測装置が 20m のタワーに取り付けられ、他に EKO 社製の放射観測装置が設置され、数高度での風向風速、気温、湿度、上下方向の可視光のフラックス、上下方向の赤外線フラックス、降雨量、地中温度などが 30 分間隔で記録され続けた。

太陽電池で稼働するタワーや放射計などの装置による通年観測で、大気–陸面間での放射によるエネルギー輸送や降水量を観測し、さらに、タワーで気温、湿度、風速などの気象要素を複数の高度で観測して鉛直方向の変化をとらえることにより、地表面からの顕熱 (熱)、潜熱 (水蒸気) の鉛



図 1: 砂漠観測点の様子と現場の小屋 (別に事務所も一工程に借りていた)



図 2: 張掖観測点のタワーの様子と観測事務所として借りていた九公里にある事務所

直輸送量の算出の為に基礎データを得た。これと、IOP 期間中に発電機を動かして行う乱流輸送量の直接観測 (図 3) を比較し、関連付けることによって年間の熱の交換量と水蒸気の交換量を得ようという計画であった。

3 地表面熱収支と水収支

太陽から降り注ぐ日射はもちろん電磁波であるが、そのエネルギーは大気中では若干減衰するだけで多くは地表面に到達する (Q_s)。一部は反射される (αQ_s) が、その残りのエネルギーは、地面、大気を直接温める (G, H) だけでなく、水分の蒸発 (LE) に利用される。また、上空大気の温度に応じて上から赤外線がやって来る (Q_i) が、一部は反射され (εQ_i)、地表面もその温度に応じて赤外線を上空へ向けて放出する ($\varepsilon \sigma T^4$)。これらのエネルギーは、面 (ここでは地表面) を考えてその面を面積あたり時間あたりに通過する量 (フラックス) で表すのが普通である。地表面という面を考え、上の () の記号でフラックスを表した場合、式 (1) が成立し、この関係を地表面熱収支と言う。

$$(1 - \alpha)Q_s + (1 - \varepsilon)Q_i = H + LE + G + \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

これらの中で、 Q_s 、 αQ_s 、 Q_i 、 $\varepsilon \sigma T^4$ は放射計で直接観測できるので、残り H 、 G 、 LE を求める事ができればエネルギー的にはその場所の状況を把握できたことになる。

また、地表面には、降水として降って来る水 (P) と地面からの蒸発 (E) および、よそへ流れて行く量 (R) があり、これらの収支の結果、その地面に蓄えられている水の量が変化する (dS/dT)。式で書くと式 (2) のようになる。

$$dS/dT = P - E - R \quad (2)$$

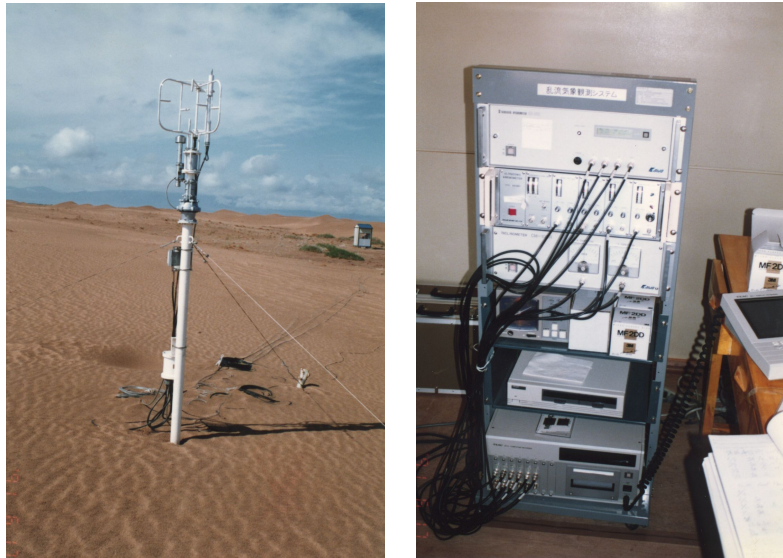


図 3: 砂漠観測点の乱流輸送観測装置 (センサーと本体)。本体は小屋の中にあった。

式 (1) と式 (2) を見比べると E が共通にあることがわかる。この蒸発量が両式を結び付けており、熱の収支と水の収支は独立には起こり得ない。

また、蒸発の結果、塩分が析出して地表面が白くなれば式 (1) の α (可視の反射率) が大きくなって、その結果、蒸発を含む熱収支に影響を与える可能性があるなど、各項は、さまざまな過程によって結びつけられている。

また、例えば乾燥した空気が地面上にあれば蒸発は盛んになるが、蒸発が盛んになってもなおその空気が乾燥していられるかどうかは、大気除湿現象である雲と降水、あるいはその空気塊の移動による。このように、両式であらわされる範囲の外を通しての結び付きも多く存在する。水文・気象学的にはこれらの関係を物理的に理解する事が重要であり、かつ面白い所であると筆者は考える。

4 砂漠とオアシスの熱・水収支

実際に式 (1) の H や E を求めるには、まず乱流観測から始めた。図 3 の装置で直接得られるデータは、図 4 のような風速と気温、水蒸気量の時系列である。ここで、鉛直方向の風速と気温 (水蒸気量) が得られていることが重要である。つまり、これはある瞬間に上下方向に熱 (水蒸気) がどれだけ輸送されているかを計測していることになっており、共分散が乱流によるフラックスを表す。これは、理論的には大きな仮定無く熱 (水蒸気) フラックスを直接計測したことになり、適切に観測解析された場合、最も信頼のおけるデータとなると考えられている。(マニアな方は、玉川 1999[2] をどうぞ) 信頼性については、Mistuta *et. al.* 1995 や Tamagawa 2000[21] にあるように、毎時や毎日で見ると熱収支に大きな誤差があるが、数日の平均をとれば数 W/m^2 でバランスしていることから系統的な誤差が非常に小さい程度にはあることが分かる。

さて、このようにして得られた熱や水蒸気のフラックスの信頼性の高いデータは IOP の短い期間にしか存在しない。そこでこれらのデータを通年観測されている風速、気温、湿度の高度分布のデータと比較する。このところには、Monin-Obukhov の相似則と呼ばれる有名な半理論式が水

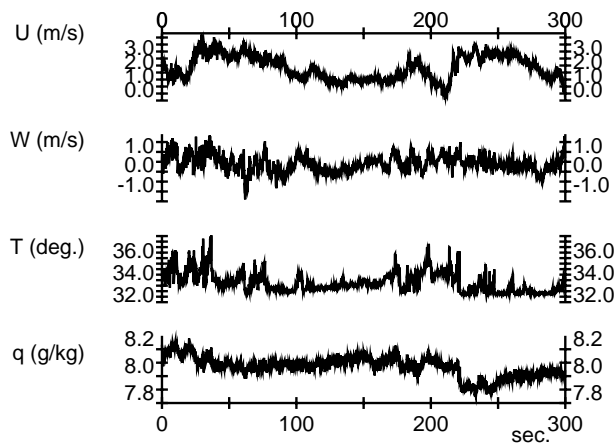


図 4: HEIFE での観測結果 (1991 年 8 月 8 日北京標準時 13 時 45 分～50 分)、U: 平均風向方向の風速成分、W: 鉛直風、T: 気温、q: 比湿。玉川 2000[1]

平一様で定常という理想的な場合に成立することが知られているが、乾燥地のような場所で、しかも条件の良いデータだけを選び出すこと無しに成立するかどうかは、疑問がある。また、例え成立するとしても、幾つかのパラメータは現地に合わせて決定する必要がある。

この作業は、オアシスでは Tsukamoto *et. al.* 1995[22] で、砂漠では、Tamagawa 1996[20] と Mitsuta *et. al.* 1995[10] で行われた。詳細は専門的になりすぎるので省略するが、砂漠での水蒸気に関しては、Monin-Obukhov 則の成立は一般的には認められず、熱収支式 (1) を利用した推定のみ可能であった。また、オアシスでは水平方向の乾湿の変化の激しさにより、観測点と地面の間の小さな空間でも水平方向に熱が多く輸送されており、観測値をそのまま当てはめると熱収支式が成立しなかった。また、HEIFE 初期の研究結果である Wang and Mitsuta 1990[23] では地面が加熱される日中に大気から地面への水蒸気輸送が観測され、話題となった。ちなみに、数値モデルでよく使われる β 法と呼ばれる方法では、この現象は原理的に再現できない。

さて、その結果オアシスでは、1991 年に年間 535mm の蒸発散¹があることが、Tsukamoto *et. al.* 1995[22] で示され年間の蒸発量の変化も図 5 のように示された。灌漑が行われ麦の植えられている夏期に多量の蒸発散が観測されていることが見て取れる。ここでの降水量は 100mm 程度であるので、その 5 倍もの水を蒸発させていることになる。ちなみに簡易な蒸発量観測である蒸発皿の観測では 2000mm などという観測値が得られるそうである。

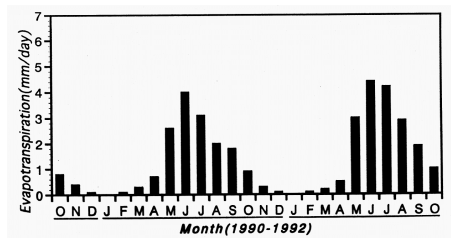


図 5: 張掖観測点での蒸発散量の推定値 Tsukamoto *et. al.* 1995[22] から引用

砂漠では、Mitsuta *et. al.* 1995[10] によると図 6 のように蒸発量が推定され、年間に 120mm の

¹植物の光合成や呼吸の作用による蒸発を含む蒸発量

蒸発が起きていること、また夏期の降水によく対応して蒸発が増加することが示された。直接観測によって蒸発が観測された降水イベントに対しては、その降水が数日程度で蒸発で消費されることが示された。年間の収支で見ると降水量約 100mm に対して 20mm ほど多いことになるが、ここでの地下水位は地表から約 5m 下にあることから、地下水面からの直接蒸発とみるにはこの値は大きく、精度の問題も含めて分からないことは多い。砂漠には当然のことながら砂丘と丘間地が存在していることや本砂漠は地形的には低い場所にあることなども関係しているかも知れないが、特にそれを解析で示した例は筆者は知らない。大雑把には、降水量+少しの水が蒸発していると考えられる。

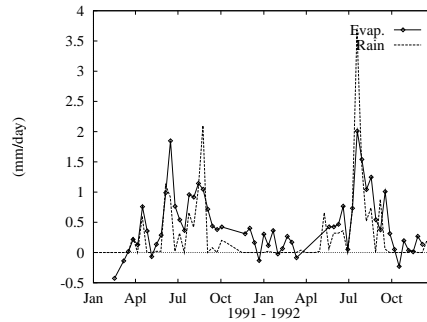


図 6: 砂漠観測点での蒸発量と降水量 Mitsuta *et. al.* 1995[10] より引用

熱収支の図は省略するが、例えばオアシスでは地表面温度が低いことから、地面から上向きに放出される赤外線が少なく、植物がある為、地面の反射が少ないことから、砂漠に比べて多くの放射のエネルギーを H 、 LE 、 G に使用することができることや、年間の熱収支を見るためには、砂漠では、1年周期の G の変動を計算する必要があることなども示されている。

他に、砂漠での蒸発量を見るのに、地表面付近から下へ向かって発達して行く乾燥層と呼ばれる乾燥した砂の層の厚みを計測し、水蒸気拡散で輸送できる水蒸気量を求める DSL 法という方法を、Kobayashi and Nagai 1995[9] が提唱し使用している。本質的に乾燥状態での蒸発量は地中での輸送量で決められるので非常に的を射た方法であるが、連続観測の難しさが問題である。また、オアシスでの熱収支状況について、Kai *et. al.* 1997a[7] でタワーのデータを使って詳しく解析されている。

5 黒河の水収支

これらを使って、非常に大雑把な流域の水収支を考える。まず、黒河の流量観測点であるが、上流側から鶯落溪 (Yingluoxia)、高崖 (Gaoyao)、正義峡 (Zhengyixia) の3つの観測点が、図7のように観測領域付近に存在している。

これら観測点の流量は、図8のようになっており、夏期には、途中で河川流量がなくなり水が下流へ届いていない日が多いことや、逆に冬期には下流流量が増加する傾向にあることが分かる。

これらの流量と、砂漠、オアシスでの蒸発量推定値と、降水量の観測値を合わせると大雑把な水収支解析ができることになる。筆者のところの学生の木村君が卒業論文で解析してくれたところ、以下のような状況であると示された。

Yingluoxia-Gaoyao 間と、Gaoyao-Zhengyixia 間のオアシスの面積を地図より求め (オアシスのパターンは、Wang *et. al.* 1995[24] に示されている同年7月の NVI などの衛星写真による解析

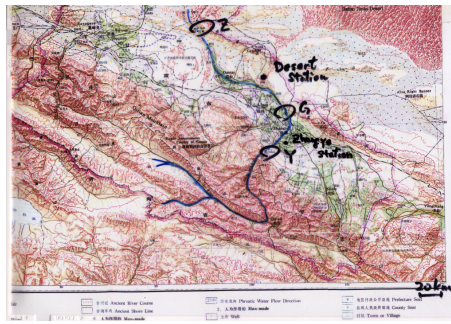


図 7: HEIFE 観測領域の地図。Y: Yingluoxia、G: Gaoyao、Z: Zhengyixia である。

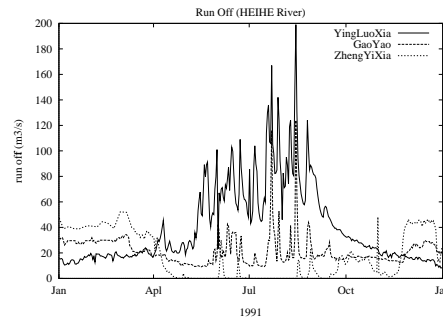


図 8: 黒河流量観測点での観測データ

とよく一致している)、その面積に、Zhangye 観測点での蒸発量と降水量の差をかけてオアシスの消費量とする。河川流量の減少分から、オアシスでの消費量を差し引いた残りは、砂漠での消費量と考えると、砂漠観測点の蒸発量と降水量の差を用いて、年平均で収支が合うように水消費に関わる砂漠の面積を決め、その外側では降水が全部蒸発しているだけと仮定しておく。こうした荒っぽい処理の結果得られるのは、河川流量の発散とオアシス、砂漠それぞれでの消費量の年変化である。木村の卒論より図を図 9 に示す。図は、Gaoyao-Zhengyixia 間について示す。推定された水を消費する砂漠の面積を観測点間の距離で割ると幅約 5km となる。Yingluoxia-Gaoyao 間では、地形を考えると大きすぎる“水消費に寄与する砂漠”の面積が得られることから、オアシスの水消費量が本当はもっと大きい、あるいは、伏流水など地下水で他のところへ移動しているなどがあるのではないかと想像される。

さて、図 9 によると、砂漠での冬期の凝結を示す 1-3 月が怪しいが、夏場の消費を見るとオアシスの 1/3 近くの消費を砂漠が行っているように見える。また、夏場の水消費は河川流量の減少分を説明するには少なく、また、冬場の河川流量の増加を説明する負の値も上記の怪しい砂漠を除けば見られない。従って、暖候期に陸へ上げられた水が、表層水あるいは地下水として寒候期に河川へ戻っていることが考えられる。これは、同位体を使って水を調べた Taniguchi *et. al.* 1995[19]とも一致する方向の結論である。

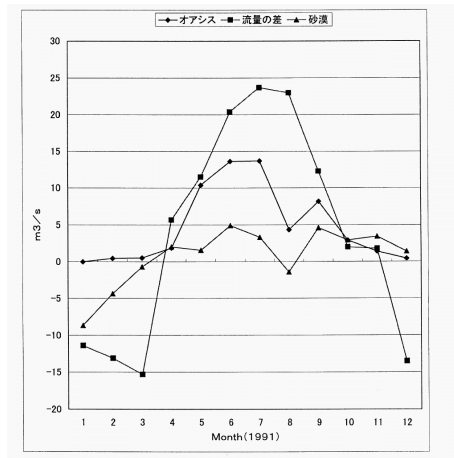


図 9: 黒河の大雑把な水収支解析

6 蒸発、水収支まとめ

以上見てきたように、蒸発量を正確に測定しようとするには観測に非常に多くの資金と人手を必要とし、さらに解析にも多くの労力が必要となる。観測設備として、タワー、乱流計測機それぞれ1点で1,000万日本円程度、また、HEIFE全体の観測を維持するのに、70人くらいの人に関わったと言われている。オアシスプロジェクトは、歴史を中心に据えたプロジェクトであり、水利用を考える上で、蒸発は非常に重要な因子であるが、ある場所の限られた時間の実態の把握のために、これほど大きな資源を費す訳にはいかない。水の消費に関わる機構の解明を中心として比較的小さい領域に資源を投下し、解明された機構を用いたモデリングで歴史的な時間スケールでの水収支の解明へと向かうべきであると筆者は考える。

オアシスでは明らかに強い人間活動の影響が見られ、汲み上げられた水が、耕作地で、あるいは再び河川に戻って、あるいは地下水で砂漠から、蒸発して消費されている。この過程を定量的に理解することが大切であろう。

7 降水、その他

筆者の専門の地面熱収支・水収支に話が偏りすぎてしまった。簡単に、降水に関する研究を幾つか紹介しておく。HEIFEでは、レーダこそ持ち込まなかったが、雲粒子を直接観測するビデオゾンデによる観測で、氷粒子が多いことなどを観測したTakahashi *et. al.* 1995[15]なども行われたが、基本的には地上で観測される降水量と、GMS (ひまわり)などの衛星からの観測に基づいて行われた。

降水に関しては、その高度依存性が、Itano 1997[5]で示されるとともに、その降水が、同時期に起こること、また総観規模の擾乱が日本と同様にしばしば通過するしそれに合わせて降水が起こることが、Itano 1998[6]などで示され、また降水現象自身が局所的でなく、非常に長距離に渡って追跡可能であることなどがSahashi 1995[13]で示された。また、大規模なパターンとの関係は、Yatagai and Yasunari 1995[25]などで示された。

これらの内、ごく一部の図を紹介する。図10は、HEIFE領域の降水観測値を高度順に並べた

もので、降水量には高度依存性があり、標高が高い程降水が多いこと、しかし、その降水現象は局所的におこる独立な物ではなく領域内でほぼ同時に起こることを示している。

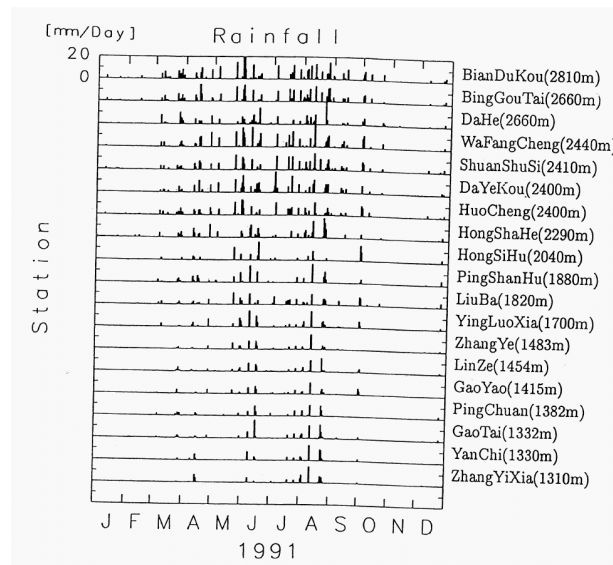


図 10: 高度順にならべた日降水量の時系列 Itano 1997[5] より

また、年降水量の高度依存性も同じく Itano 1997[5] より図 11 に示されている。

また、降水を追跡した Sahashi 1995[13] では図 12 のように、2000km に渡って降水現象が移動して来ることが示されており、乾燥地の降水は局所的という考えは大きな誤解であることが分かる。降水は、Itano 1997[5], 1998[6] で示されているように、上空のトラフの通過と対応した物であることが分かる。夏期には南東から東の風がこの領域にはいることも示されており、モンスーンによる水蒸気がこのあたりまで到達していることも合わせて解析されている。

他にも、Takemi 1999a[16] では雲からの降水の降下中の蒸発を調べ、降水時に地上で観測される気象変化は蒸発の影響と考えられることを示し、また、Takemi 1999b[17] では当地で見られるスコールラインあるいは dust storm の構造を調べ、環境の違いにも関わらずアメリカなどで見られるものと同様の特徴を持つことを示し、更に Takemi and Satomura 2000[18] では Storm の構造を数値モデルを使って詳しく調べているが、ここでは割愛する。

エアロゾルやダスト関係では、HEIFE ではダストやエアロゾルの現地観測が行われており、その結果 Zaizen *et. al.* 1995[26] ではエアロゾルの粒径分布などのデータが示されており、エアロゾル粒子の組成は Okada and Kai 1995[11] や、Ren *et. al.* 1995 [12] で示されている。また、大気の濁りに関しては、Kai *et. al.* 1997[8] に解析結果がある。

他に、Shimajima *et. al.* 1996[14] では砂漠の砂から溶出する塩類の組成や、蒸発に伴う移動について議論されている。蒸発に伴い表層に形成されるクラスターと呼ばれる表面は、隙間があるせいか蒸発を余り抑制しないとされている。

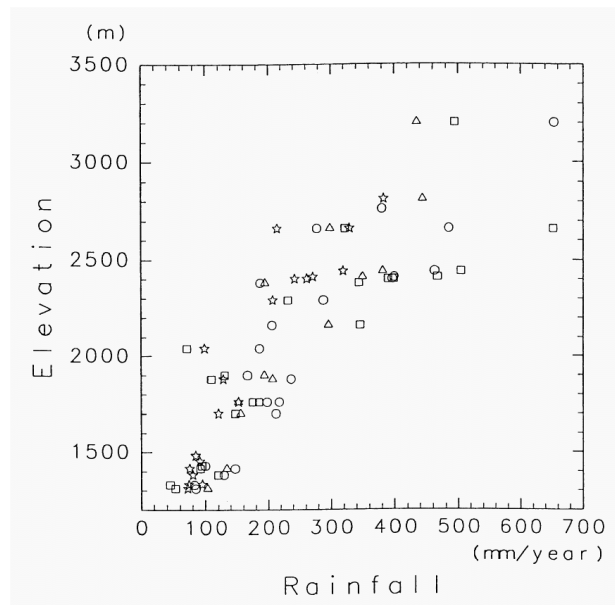


図 11: 高度と年降水量との関係 Itano 1997[5] より

8 まとめ

オアシスプロジェクトの気象水文過程の研究に対する先行研究となる HEIFE プロジェクトを断片的に紹介した。黒河流域と言っても張掖、臨澤付近の河西回廊に集中した研究であったが、多くの種類の観測を行い、様々なことが研究された。準備も含めると 80 年代後半から始まる研究であり、気象の分野で中国で最初期に行われた大型プロジェクトとしては比較的多くの成果を残したと言える。

しかし、データ公開など、計画終了後へ続く活動が弱く、取得データに比べて研究の広がりが少なかったことも事実である。特に、水文学的研究は充分とは言えなかった。また、乾燥・半乾燥地という環境条件下の自然現象に強く興味が集中し、オアシスなどの人間活動に関してはほとんど研究されなかったと言える。

氷河や末端湖など、手付かずであった場所を除けば、河西回廊地区では、観測としては人間活動の影響が強く出るオアシスを中心に水の循環（消費）を研究し、他は既存データの収集や既往研究の成果の統合に勤めるのが良い方策ではないかと考える。

最後に、引用論文の著者を見て頂きたいのだが、本当に多数の研究者が多くの事柄を研究して研究が行われたことが、よく見て取れる。研究は最終的に研究者という人の頭の中にあり、材料を集めた上で、どれだけの人がどれだけの時間を使って対象の解明に当たるかが、もっとも重要である。少なくとも、筆者はそう強く感じた。

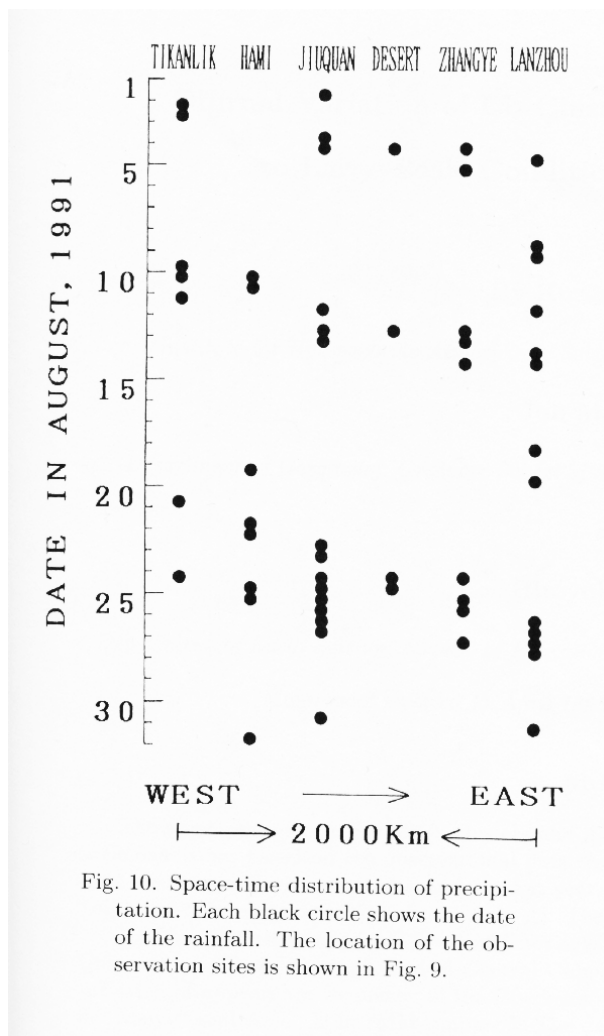


Fig. 10. Space-time distribution of precipitation. Each black circle shows the date of the rainfall. The location of the observation sites is shown in Fig. 9.

図 12: 降水現象の追跡例。Sahashi 1995[13] より。

参考文献

- [1] 玉川一郎, 2000, 超音波風速温度計を使った観測, 身近な気象・気候調査の基礎、牛山素行編、古今書院, pp.76–79.
- [2] 玉川一郎, 1999, 超音波風速温度計と赤外線湿度変動計を用いた渦相関法による乱流輸送量測定 of 解析法の検討, 水文・水資源学会誌、Vol.12, No.2, pp.130–138.
- [3] 光田寧, 1996, 序章, 光田寧編乾燥地の自然環境, 気象研究ノート, 184, 日本気象学会
- [4] 光田寧, 1998, 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, 天気, **45**, pp.855–893
- [5] Itano, T., 1997, Rainfall over the arid area in the northwestern China, — An Analysis during HEIFE —, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **75**, pp.851–865.
- [6] Itano, T., 1998, Synoptic disturbance and rainfall over the arid area in northwestern China, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **76**, pp. 325–333.
- [7] Kai, K., M. Matsuda and R. Sato, 1997, Oasis effect observed at Zhangye oasis in the Hexi corridor, China, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **75**, pp.1171–1178.
- [8] Kai, K., Z. Huang, M. shiobara, Z. Shen and Y. Mitsuta, 1997, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **75**, pp.1153–1163.
- [9] Kobayashi, T. and H. Nagai, 1995, Measuring the evaporation from sand surface at HEIFE desert station by the dry surface layer method, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp.937–945.
- [10] Mitsuta, Y., I. Tamagawa, K. Sahashi and J. Wang, 1995, Estimation of annual evaporation from the Linze desert during HEIFE, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp.967–973.
- [11] Okada, K. and K. Kai, 1995, Features and elemental composition of mineral particles collected in Zhangye, China, 1995, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp.947–957.
- [12] Ren, L., W. Lei, W. Lu, W. Zhang and G. Zhu, 1995, The physical and chemical characteristics of desert aerosols in the HEIFE region, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp.1269–1284.
- [13] Sahashi, K., 1995, A wet period in the desert station in HEIFE, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp.1213–1217.
- [14] Shimojima, E., R. Yoshioka and I. Tamagawa, 1996, Salinization owing to evaporation from bare-soil surfaces and its influences on the evaporation, *J. Hydrology*, **178**, pp.109–136.
- [15] Takahashi, T., K. Suzuki, C. Wang and C. Guo, 1995, Precipitation mechanisms of cloud systems developed in a semi-arid area of Pingliang, China: Videosonde observation, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp.1191–1211.
- [16] Takemi, T., 1999, Evaporation of rain falling below a cloud base through a deep atmospheric boundary layer over an arid region, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **77**, pp.387–397.

- [17] Takemi, T., 1999, Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China, *Mon. Weath. Rev.*, **127**, pp.1301–1309.
- [18] Takemi, T. and T. Satomura, 2000, Numerical experiments on the mechanisms for the development and maintainance of long-lived squall lines in dry enviroments, *Jour. Atmos., Sci*, **57**, pp.1718-1740.
- [19] Taniguchi, M., I. Kaihotsu and K. Kotoda, 1995, Isotope studies of precipitation, river water and groundwater in the HEIFE area, northern China, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp.1285–1291.
- [20] Tamagawa, I., 1996, Turbulent characteristics and bulk transfer coefficients over the desert in the HEIFE area, *Boundary-Layer Meteor.*, **77**, pp.1–20.
- [21] Tamagawa, I., 2000, On the water cycle in arid and semi-arid areas, *Water in Arid Terrain Research (WATER)*, Research report of IHAS, Apr. 2000., 名古屋大学大気水圏科学研究所, pp.35–45.
- [22] Tsukamoto, O., K. Sahashi and J. Wang, 1995, Heat budget and evapotranspiration at an oasis surface surrounded by desert, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp.925-935.
- [23] Wang, J. and Y. Mitsuta, 1990, Peculiar downward water vapor flux over Gobi desert in the daytime, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **68**, pp.399–402.
- [24] Wang, J., Y. Ma, M. Nenenti, W. Bastiaanssen and Y. Mistuta, 1995, The scaling-up processes in the heterogeneous landscape of HEIFE with the aid of satellite remote sensing, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp.1235–1244.
- [25] Yatagai, A. and T. Yasunari, 1995, Interannual variations of summer precipitation in the arid/semi-arid regions in China and Mongolia: Their regionarity and relation to the Asian summer monsoon, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp.909–923
- [26] Zaizen, Y., M. Ikegami, K. Okada and Y. Makino, 1995, Aerosol concentration observed at Zhangye in China, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, **73**, pp.891–897.