

中国華北平原の小麦・コーンの灌漑農地における フラックス観測

FLUX OBSERVATION AT THE IRRIGATED FARMLAND IN NORTH CHINA PLAIN

近藤昭彦¹・唐 常源²・沈 彦俊³・張 永強⁴

A. Kondoh, C. Tang, Y. Shen and Y. Zhang

1 千葉大学環境リモートセンシング研究センター (〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

2 千葉大学大学院自然科学研究科 (〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

3 千葉大学大学院自然科学研究科学生 (〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

4 中国科学院石家庄農業現代化研究所 (石家庄槐中路 286 号、050032、中国)

要旨 中国華北平原の北緯 38 度線に沿って配置された三ヶ所のフラックスステーションにおける観測成果から欒城農業生態系統試験場における成果を紹介する。観測は冬小麦と夏のコーンの広大な圃場で行われている。1998 年から継続的に行われている観測の中から蒸発散量の日変化と季節変化、灌漑の影響、蒸発散量と群落コンダクタンスの関係、気孔抵抗の日変化と季節変化、気孔抵抗と土壌水分の関係、分光反射率と植生指標の関係、について報告する。ここでを行っているフラックス観測の成果は、同時に千葉大学・筑波大学・熊本大学で実施している地下水循環研究と合わせて、華北平原の総合的な水循環研究としてまとめる予定である。

キーワード：華北平原、冬小麦、コーン、フラックス、リモートセンシング

1. はじめに

華北平原は中国の中でも最も人口密度が高い地域であるが、重要な穀倉地帯でもあり食糧供給基地ともなっている。ところが、華北平原では水資源、特に地表水が不足しており、過度の地下水依存により農業生産を維持している。現在の農業・産業・都市用水はほとんど地下水に頼っている状況であり、しかも、地下水位は年々低下しつつあるのである。このような状況は華北平原に限った現象ではなく、米国ハイプレーンズ地域をはじめ(田瀬、2000)、世界各地で同様な背景のもとに進行しつつある現象である。食糧のほとんどを海外に頼る日本では食糧輸入は水の輸入と等価であり、相手国の水問題に対して国境を越えた関心を持たなければならない。この意味から水問題は基本的な地球環境問題として捉えることもできる。

中国の水問題は日本および世界の食糧安全保障の問題と結びつけられて論じられることが多い(例えば、ブラウン、1995; 農文協、1995)。食糧問題の将来予測については他の研究に任せることとして、科学的側面から水問題に取り組むことを考えたい。それは政策決定の際に、水循環について定量的な情報を与えることである。実態を把握することなしに対策は考えられないからである。

この観点から我々ができる課題は華北平原の水収支と水循環の実態を共同研究によって明らかにすることである。

筆者らを含む研究グループは河北省において水循環に関する総合的プロジェクトを展開している。数年の準備期間の後、実質的な観測は 1998 年に開始され、現在まで継続されている。その内容は山地における水文循環、平原部における地下水流動系、環境水の汚染、塩分集積、フラックスと地理情報解析、等多岐にわたる。最終的には華北平原の水循環、水収支を定量的に理解し、政策に役立つ科学の成果を発信することである。本論ではこの中から筆者らに関わるフラックス観測に関わる部分を報告する。

なお、華北平原は一般に燕山山地、太行山地、淮河に囲まれた地域の呼称であるが、中国の水文学者は黄河の北側を指して華北平原と呼ぶことが多い。それはこの地域において水問題が深刻な社会問題となっているからである(Fei, 1997)。本論で言及する華北平原も黄河の北側の河北省、山東省の平原部を中心に扱うことにする。この地域は黄淮海平原とも呼ばれており、河北省部分を指すときは海河平原と呼ぶこともあるが、本論では華北平原の呼称をとることにする。

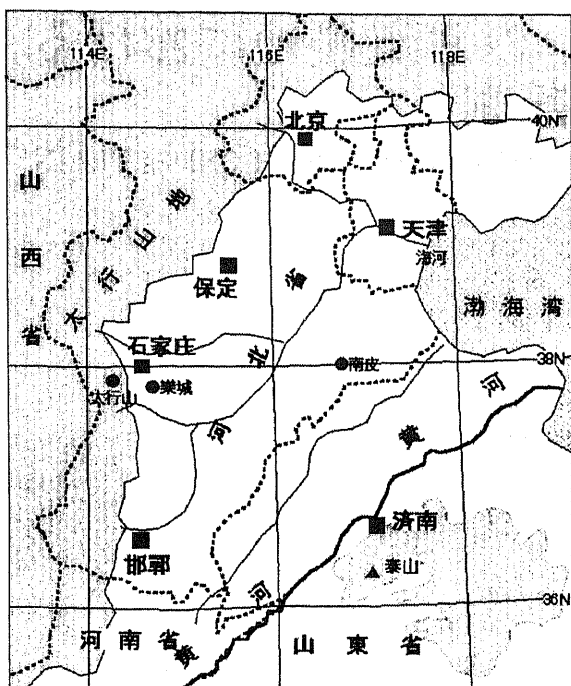


図-1 河北平原の概要。●は北緯 38 度線に沿って配置されたフラックスステーション。

Fig.1 Map showing North China Plain. ● denotes the positions of flux stations aligned along 38N line

2. 研究地域の概要

(1) 華北平原の地形・地質

図-1に華北平原(狭義の海河平原)の概略を示す。平原の西側境界である太行山地は古期の花崗岩、片麻岩、頁岩、石灰岩などからなる褶曲山地で、東に向かって山前平原(山麓平原、扇状地)、低平原、三角州と配列し、渤海湾に続く。

堆積盆としての華北平原は太行山地の隆起、平原部の沈降によって黄河、海河、灤河をはじめとする河川の堆積物が堆積してできた”断層沈降盆地”である。4つの断層系の活動によって平原の基盤には隆起、沈降地域が交互に現れている。構造運動によって河道は何度も変遷を経ており、基盤の沈降部分に旧河道が密集している(Xu *et al.*, 1996)。歴史時代の河道の変遷も「史記」をはじめとする中国の歴史書に記録が残されている。

華北平原は小縮尺の地形図では極めて平坦な平原に見えるが、過去繰り返り起こった河道の変遷により白洋淀や衡水湖のような低湿地や湖沼が形成され、旧河道部分にも比高数m程度の微地形が形成された。これらの地形配列が、後述の水文環

表-1 欒城における月降水量と可能蒸発散量の気候値

Table 1 Long time averages of monthly precipitation and potential evapotranspiration at Luancheng.

Month	P	Ep
Jan.	3.5	26.4
Feb.	7.7	37.2
Mar.	9.9	80.3
Apr.	13.9	123.6
May.	34.3	134.9
Jun.	65.3	172.5
Jul.	140.7	147.3
Aug.	119.9	126.5
Sep.	46.9	98.7
Oct.	25.9	78.1
Nov.	8.7	42.3
Dec.	4.2	24.5
Annual	480.7	1092.3

境形成に重要な役割を果たしている。

(2) 気候

華北平原の年降水量は400～600mm程度である。数100km南部の長江流域では1000mmを越えるが、北～北西方向に急激に低下し、黄河付近で600mm程度となる。降水は季節的に偏在しており、6月終わりから9月中旬の降水量が年降水量の70%以上を占めるが、この時期はトウモロコシの生育期にあたる。主要穀物の小麦の生育期である春は降水量が少なく、これが灌漑用地下水の大量揚水を引き起こしている原因の一つとなっている。

表-1は欒城における月平均降水量Pとペンマン法で求めた可能蒸発散量ETpである。6月から8月の降水量は325.9mmであり、これは68%に相当する。一方、ETpは4月にはすでに100mmを超えており、大気の乾燥力が高まっている。

3. フラックス観測の目的

蒸発散量は農業の観点からすると損失であり、農業生産および環境に与える影響を最小限にしながら蒸発散量を抑制することが水利用効率の向上に繋がる。華北平原は前述のように人口問題、水問題に悩む地域であり、蒸発散量とそれをコントロールする要因の理解は持続的な社会の構築のための重要課題の一つである。

食糧基地としての華北平原は典型的な冬小麦とコーンの二毛作地帯であるが、その生産は地下水揚水による灌漑で維持されている。特に3～5月の乾期に大量の水を必要とする小麦の灌漑が地下水位の継続的低下の主要要因となっている。灌漑は小麦、コーン合わせて年間に6回ほど行われる。ほとんどが畝間に湛水させる効率の高くない灌漑方法に依っており、その総量は年間で__mmに達する。後述する欒城農業生態系統試験場における予察的な土壌水分観測によると、地表面からの浸透による地下水涵養はあまり期待できない。したがって、灌漑された地下水のほとんどは蒸発散によって大気に還っていくことになる。

華北平原では1990年代まで穀物生産量は飛躍的に伸びた。それは灌漑量の増大と同期しており、そのほとんどは蒸発散によって大気に還って行ったはずである。人間活動によって加えられた水蒸気が地域の気候にどのような影響を及ぼしたのかを解明することは人間-自然系の研究における基本的な課題である。

4. 観測施設の詳細

(1) 欒城農業生態系統試験場

ここは中国の生態観測ネットワークに属する29の観測施設の一つである。石家庄市街の南東約30kmの田園地帯に位置し(北緯37°53'、東経114°41'、高度50.1m)、研究・宿泊棟と広大な観

表-2

Table 2

太行山山地生態試験場
- 15mタワー: 気温、湿度、風速(6,9,15m), 風向(15m)
- ボーエン比・熱収支システム(高度3m) (Campbell Cooled Mirror System)
欒城生態農業試験場
- 36mタワー: 気温、湿度、風速(4,16,32m), 風向(32m)
- ボーエン比・熱収支システム
- CSAT-3, KH20 (不定期)
- アルベドメーター、光量子計
- TDR 土壌水分計、自記テンシオメーター (深度 5,10,30,60,90,120,200cm)
南皮生態農業試験場
- ボーエン比・熱収支システム(圃場)

測圃場を持つ。圃場には高さ36mの観測タワーと気象観測露場、ライシメーター等の実験設備を有する。

圃場では筆ごとに種類や生育条件を変えた実験が行われている。周囲と同様な小麦、コーンの二毛作が行われているため、フラックス観測も10月から翌年6月までの冬小麦期間、6月から9月までのコーンの期間に分けて実施されている。

設置してある機器は表-2の通りであり、①タワーによる温湿度プロファイルのルーチン観測、②圃場における熱収支、土壌水分、分光反射率のルーチン観測、③渦相関法によるフラックスの集中観測、に分けて実施している。これ以外に、タワー上部からのNDVI観測(近赤外カメラ)、放射温度観測を定期的に行っている。

熱収支観測はCampbellのCooled Mirror Systemによるボーエン比観測を主体とし、熱収支法を組み合わせた蒸発散観測を行っている。ボーエン比の観測高度は小麦あるいはコーンの成長に伴い、順次変更し、キャノピー直上の値を得ている。

(2) 太行山山地生態研究站・南皮生態農業試験場

石家庄農業現代化研究所の附属施設であり、前者は太行山の山地農業、後者は平原部における塩分集積のため生産性が低い地域の農業に関する研究を主な研究課題としている。太行山(37°54'、114°15')における観測地点はザクロの果樹園として利用されている緩斜面において15mタワーを設置し、温湿度プロファイル、ボーエン比・熱収支法によるフラックス観測を行っている。

南皮(38°5'、116°42')では小麦、コーン、綿花等の植栽された圃場における観測であるが、観測地点は小麦およびコーンの直上で観測が行われるようにしている。

5. 結果

ここでは測器の維持管理がうまく機能している欒城農業生態系統試験場における結果についてまとめる。太行山および南皮については別の機会に報告する予定である。

(1) ライシメーター法とボーエン比・熱収支法の比較

欒城には大型ウエイングライシメーターが設備されている。ライシメーターの面積は3m²、深さは2.5mで不攪乱土壌が充填されている。秤量

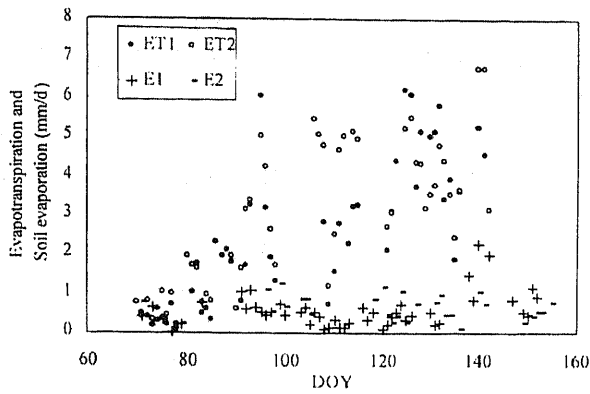


図-2 BREB法 (ET1) と大型ウェイングライシメーター (ET2) によって求めた蒸発散量と、土壌面蒸発量 (E1: 圃場、E2: ライシメーター内)。

Fig. 2 Seasonal trend of evapotranspiration by BREB method (ET1), weighing lysimeter (ET2) and soil evaporation (E1: wheat field, E2: within weighing lysimeter).

精度は水深換算すると 0.2mm となり、高精度で蒸発散量を計測できる。また、直径 10cm、深さ 15cm のマイクロライシメーターを圃場に設置し土壌面蒸発量の計測を行った。どちらのライシメーターも 8:00 と 20:00 に計測を行い、その重量差をもって日蒸発 (散) 量とした。

ウェイングライシメーターの精度は極めて高いため、その計測値を基準にして BREB 法 (ボーエン比・熱収支法) の精度を確認することができる。両者の測定値の相関は決定係数 r^2 が 0.8 と高く、BREB 法では十分に高い精度で蒸発散量の計測が行われていると考えられる。

図-2 は 1999 年の小麦シーズンにおける日蒸発散量の計測値である。●の BREB と○のライ

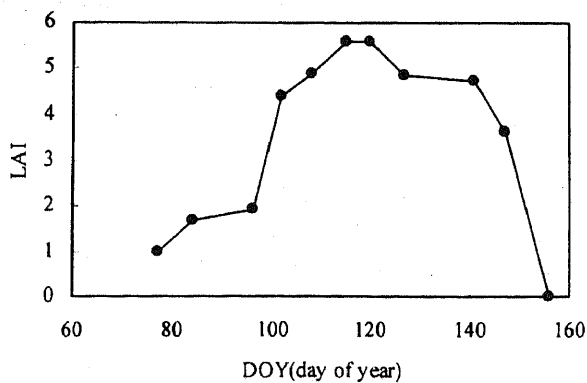


図-4 樂城における 1999 年小麦生育期の LAI の季節変化

Fig. 4 Seasonal trend of Leaf Area Index (LAI) in 1999 winter wheat season at Luancheng.

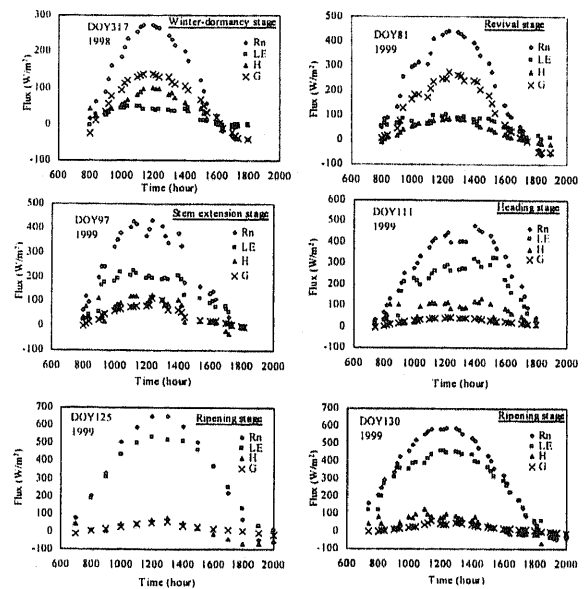


図-3 小麦の冬の休眠期 (DOY317,1998) から成熟期 (DOY130,1999) の熱収支各項の日変化。◇:Rn, □:LE, △:H, ×:G。

Fig. 3 Seasonal changes in heat budget from winter-dormancy stage (DOY317, 1998) to ripening stage (DOY130,1999).

シメーター法による計測値は概ねよく一致している。DOY71 から DOY155 の間の平均蒸発散量は BREB 法が 2.51mm、ライシメーター法が 2.93mm と概ね一致している。土壌面蒸発量 (+と-) はこの期間を通じて 1mm 弱であり、蒸発散量に占める土壌面蒸発の割合は 20%程度であった。

(2) 熱収支の日変化と季節変化 - 1999 年の結果 -

図-3 は小麦の生育ステージごとに表示した熱

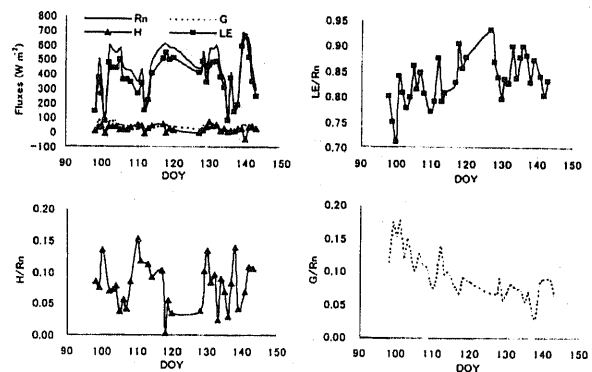


図-5 樂城におけ 1999 年小麦生育期における熱収支項目の季節変化

Fig. 5 Seasonal changes of the heat budget in 1999 winter wheat season at Luancheng.

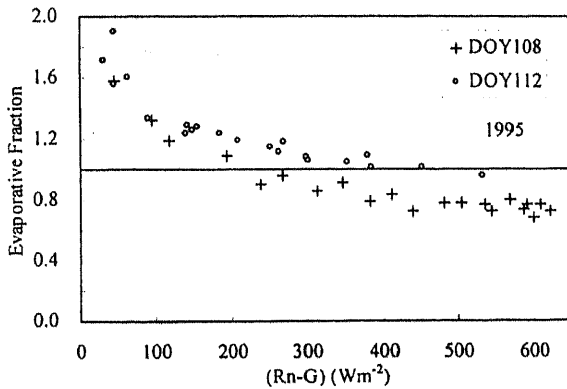


図-6 灌漑前(DOY108)と灌漑後(DOY112)における蒸発比と有効エネルギーの関係。

Fig. 6 Relationship between evaporation ratio and available energy at before irrigation(DOY108) and after irrigation(DOY112).

収支の日変化である。冬の休眠期から春の成熟期にかけて潜熱フラックスは徐々に増加し、収穫直前の成熟期には正味放射量のほとんどを占めるようになった。

このような熱収支の変化は葉面積指数の季節変化と調和的である。図-4は刈り取りによって計測した小麦のLAIである。DOY100付近からLAIは急激に増加するが、この時E/RnはDOY81の0.27からDOY97の0.55に増加した。全体的に図-4のLAIと図-2の蒸発散量の季節変化は類似している。

図-5は熱収支の季節変化である。午前9:00から午後15:00の間の平均値をプロットしてある。LE/Rnは小麦の成熟とともに増加し、DOY130付近のblooming stageに最大値に達する。この時、H/Rnは減少傾向にあるように見える。blooming

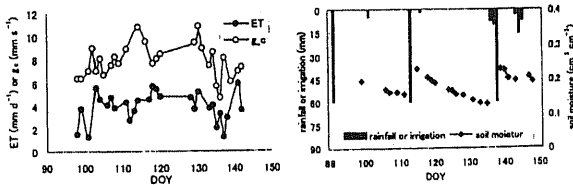


図-7 群落コンダクタンスと蒸発散量の関係(左)および降水量+灌漑量と土壌水分量(右)。灌漑はDOY89、113、138に行われた。

Fig. 7 Seasonal changes in ET and gc(left) and soil moisture. Soil moisture is average of 0-60cm depth. Irrigations were applied at DOY89, 113, and 138.

stageの後、LE/Rnは減少するが、この時H/Rnは急激に増加する。

一方、G/Rnは小麦の生育期間を通して減少傾向にあるが、これは図-4によるLAIの変化と調和的である。LAIと相関の高いNDVI等の衛星指標によるGの推定の可能性を伺わせる。

(3) 灌漑の影響

華北平原の主要穀物は冬小麦と夏のコーンであり、両者とも灌漑によって生産量を過去数十年にわたって伸ばしてきた。その結果が地下水位の低下であり、礫城では年間1mの水位低下が過去数十年間継続している。帯水層の有効空隙率を0.3とすると、年間の灌漑量は300mmにも達し、年降水量の60%に達する。灌漑が地域の熱収支に及ぼす影響は少ないと思われるが、まず灌漑前後の熱収支の違いを検討してみる。

図-6は1995年のDOY108とDOY112における有効エネルギーと蒸発比EF(LE/(LE+H))の関係である。この時、DOY109に60mmの灌漑が行われた。したがって、DOY108は灌漑前の乾燥した状態、DOY112は湿潤な状態を表す。

湿潤なDOY112では有効エネルギーが増加するとともに、EFは1に漸近する。これは顕熱フラックスが極めて小さいことを表す。乾燥したDOY108では有効エネルギーが増加するとEFは1を下回り、顕熱フラックスが大きくなっていることを表している。

(4) 蒸発散量と群落コンダクタンスの関係

観測期間中に灌漑はDOY89,113,138の3回行われたが、その方法は水を畝間に導水した後、畝を壊して圃場に引き入れる湛水灌漑である。図-7(左)に観測期間の日蒸発散量(7:00~18:00の積算値)とPenman-Montieth法による群落コンダクタンスを示す。図-7(右)は表層0~60cmの含水量と降水量および灌漑量である。

DOY89と113の灌漑の直後には蒸発散量に大きな変化は認められないが、DOY138の灌漑の直後に蒸発散量は急激に増大した。この直前は群落コンダクタンスが減少傾向にあり、小麦が水ストレスを受けていたと考えられる。それによって蒸散も抑制されていたが、灌漑により復活したと考えられる。

(5) 気孔抵抗の日変化と季節変化

華北平原における穀物生産量は灌漑によってコ

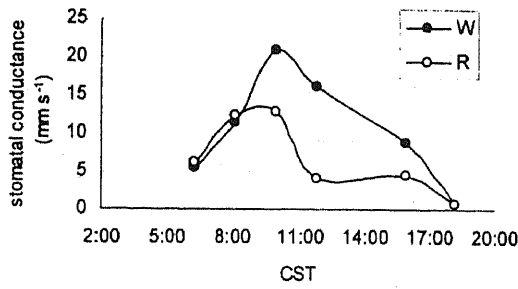


図-8 良く灌水された圃場(W)と天水のみによる圃場(R)における気孔コンダクタンスの日変化。

Fig. 8 Diurnal pattern of stomatal conductance (W: well-watered; R: rain-fed).

ントロールされている。平原西部の”山前平原”と呼ばれている地域は太行山地に建設された水庫からの用水と豊富な地下水による灌漑が高い穀物生産量を維持している。一方、平原東部では表流水は農業用水としての利用が制限されており、浅層地下水も塩分を多く含むため、穀物生産量は低い。

そこで、水の供給の多寡による蒸発散量の特性を明らかにするために、水を供給した圃場と、天水のみによる圃場において気孔抵抗の計測を行った。図-8は天水のみによる区画(R)と水を十分供給した区画(W)におけるDOY119における気孔コンダクタンスの日変化である。早朝は結露が生じたため、両者の差は顕著ではないが、その後はR区画はコンダクタンスが極めて小さくなっている。恐らくR区画では9時頃までに結露した水分の蒸発が終了し、その直後に水ストレスのため蒸発を抑制させたと考えられる。W区画は10時頃に最大のコンダクタンスを示した後、夕方までに徐々に下がっている。

観測期間中の14:00に気孔抵抗(コンダクタンス)の計測を継続して行った。図-9は気孔抵抗の季節変化を日射量、土壌水分量、相対湿度、気温とともに示す。気孔抵抗は全体としてU字型を呈しており、pre-jointingとpost-milkingの時期は気孔抵抗は高く、jointingの後は低くなっている。post-milkingの時期は葉はsenescentになっており、bloomingとmilkingのステージは重要な成長期で水要求に対してセンシティブな時期である。

(6) 気孔抵抗と土壌水分の関係

半乾燥地域は水不足が蒸発を抑制する地域であ

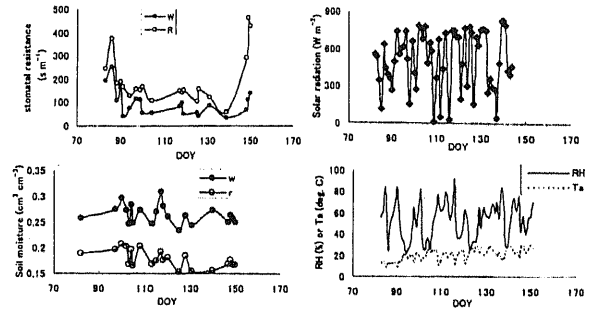


図-9 気孔抵抗、日射量、土壌水分量、気温、相対湿度の季節変化。

Fig. 9 Seasonal trends of stomatal resistance, soil moisture, solar radiation, relative humidity, and air temperature.

り、降水と灌漑による土壌水分の変動によって蒸発散量は変動するだろう。ここでは、土壌水分量と気孔コンダクタンスの関係を小麦の生育段階ごとに計測した。

図-10は小麦のjointing(拔節)、tasseling(抽穂)、milking(灌)およびpost-milking(乳熟)後に対する気孔コンダクタンスと土壌水分量の関係である。ここで、土壌水分はESW(extractable soil water)として次式で求めた。

$$ESW = (\theta_a - \theta_w) / (\theta_f - \theta_w)$$

ここで、 θ_a 、 θ_w 、 θ_f はそれぞれ土壌水分含水量、しおれ点の含水量、圃場揚水量で、欒城の圃場では θ_w は0.108、 θ_f は0.355という値が得られている。

図-10によると小麦の生育ステージによって

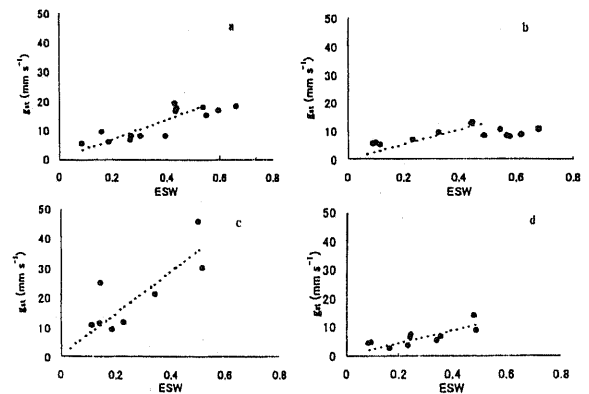


図-10 気孔コンダクタンスと土壌水分量の関係。土壌水分量はシオレ点と圃場容水量の間の百分率。

Fig. 10 Relationship between stomatal conductance and ESW in different growing stages.

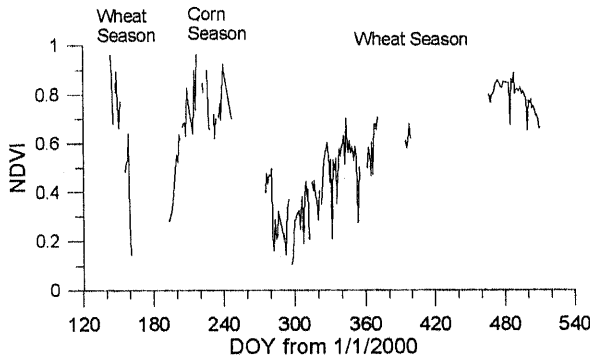


図-11 アルベドメーターと光量子計によって地上で計測されたNDVIの時系列。

Fig. 11 Time series of NDVI measured at ground by albedo meter and PAR sensor.

気孔コンダクタンスの最大値は異なるものの、どのステージでもESWが0.5付近を境として、ESWがそれを下回ると気孔コンダクタンスは直線的に低下している。このことは土壌水分量を知ることによって蒸発散の抑制効果をモデリングできることを示している。

(7) 分光反射率と植生指標の季節変化

以上の研究は単一の圃場における実験結果をまとめた成果であるが、最終的には人工衛星リモートセンシングによる広域フラックスの推定を目指している。そこで、衛星データと同じ性質の観測データを地上で得るために、欒城においてアルベドメーターと光量子計を組み合わせ可視域と近赤外域の分光反射率の連続観測を行った。

図-11は地上で計測された2000年と2001年春のNDVIの季節変化で、2回の小麦シーズンと1回のコーンシーズンを含む。電源トラブル等による欠測もあるが、小麦とコーンの生育に伴うNDVIの変化が記録されている。

図-12はNOAA/AVHRRによる1999年の欒城のNDVIの季節変化である。最初のピークは小麦、2番目のピークはコーン、3番目の小さいピークは越冬に入る前の小麦の最大LAI期を表している。今後、フラックス観測値との関係を検討することによって衛星による広域化の糸口をつかむ予定である。

6. おわりに

中国華北平原における小麦とコーン畑を対象としてフラックス観測を行った結果を報告した。今後は太行山、南皮といった土地条件が異なる観測

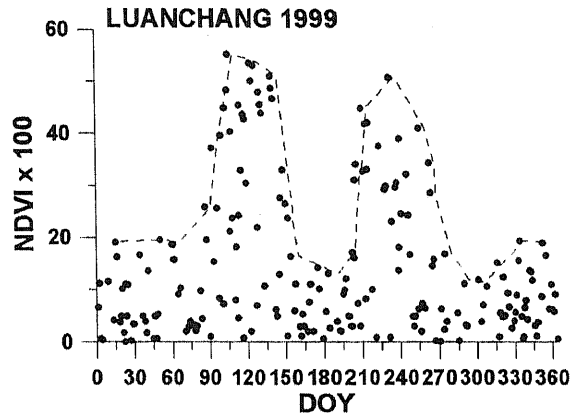


図-12 NOAA/AVHRRによる1999年の欒城のNDVI時系列。

Fig. 12 Time series of NDVI by NOAA/AVHRR at Luancheng in 1999.

点におけるデータを集積するとともに、リモートセンシングによる広域フラックスの推定を行う予定である。

その成果は別に行っている地中水循環の研究成果と結びつけて華北平原、狭義には海河流域における総合的な水循環の理解に発展させたいと考えている。蒸発散は地表面から上向きのフラックスであり、水文循環の一素過程である。地表面から下向きのフラックスである浸透に関する観測も実施中であり、地中水循環システムおよび地表水システムとともに流域水循環として認識することを試みる。

そのためには流域の空間性の認識が重要であると考えている。これまでの成果で華北平原における水循環はいくつかのユニットに分割でき、資源としての地下水を考える際には扇状地の水循環が重要であることがわかってきた。その他、山地の水循環、低地の水循環の階層構造として華北平原の水循環を捉えることができる可能性が明らかにされつつある。

本研究は地域の観点からは一つの事例研究に過ぎないが、特定の気候、地形、地質条件における水循環の理解は水循環に対するプロトタイプを与え、これを全球スケールを持つ知識ベースシステムの中で集積することによって、事例研究の位置付けが可能となる。このようなデータベースの構築の念頭に置いて野外観測を行っている。

謝辞

今回は千葉大学、筑波大学、熊本大学と中国科学院石家庄農業現代化研究所・連合水問題研究セ

ンターと共同で行っている河北平原プロジェクトからフラックス観測に関わる部分の紹介を行った。このプロジェクトは劉昌明先生始め中国科学院の同志、千葉大学名誉教授新藤静夫先生、千葉大学理学部佐倉保夫先生、筑波大学田中正先生、熊本大学理学部嶋田純先生と協同して行っている。プロジェクトの実施にあたっては中国科学院の皆様、その他多くの方々のお世話になっている。

参考文献

- Y. Zhang, C. Liu, Y. Shen, A. Kondoh, C. Tang, T. Tanaka (2002): Measurement of Evapotranspiration in a Winter Wheat Field. Hydrological Processes, (accepted)
- Kondoh, A and Oyamada, Y. (2000): Monitoring surface moisture and vegetation status by NOAA

and GMS over North China Plain. Advances in Space Research, 26 (7), 1055-1058.

- Y. Shen, A. Kondoh, C. Tang, Y. Zhang, J. Chen, W. Li, Y. Sakura, C. Liu, T. Tanaka, J. Shimada (2002): Measurement and analysis of evapotranspiration and surface conductance of wheat canopy. Hydrological Processes, (submitted).

- Y. Zhang, C. Liu, Q. Yu, Y. Shen, A. Kondoh, C. Tang (2002): Seasonal Variation of surface energy flux and Priestley-Taylor Parameter in a field Level in NCP. Hydrological Processes, (submitted).

- 近藤昭彦・田中正・唐常源・佐倉保夫・嶋田純・芝野博文・劉昌明・張万軍・胡春勝・劉小京・陳建耀・沈彦俊 (2001): 中国華北平原の水問題. 水文・水資源学会誌、14、376-387.

FLUX OBSERVATION AT THE IRRIGATED FARMLAND IN NORTH CHINA PLAIN

A. Kondoh¹, C. Tang², Y. Shen¹ and Y. Zhang³

1 Center for Environmental remote Sensing, Chiba University, 1-33 Yayoi, Inage, Chiba 263-8522, Japan

2 Graduate School of Science and Technology, Chiba University, 1-33 Yayoi, Inage, Chiba 263-8522, Japan

3 Inst. Shijiazhuang Agricultural Modernization, CAS, 286 Huaizhong Rd., Shijiazhuang 050021, P.R.China

This paper presents some of outcomes from NCP (North China Plain) N38° project. This is a synthetic project concerning whole hydrological processes including evapotranspiration, subsurface water, water contamination, mountain hydrology, and so on. Flux is an important part of NCP N38° project.

Three flux stations are disposed along N38° line, and fluxes have been measured continuously from 1999. The results from Luancheng Agro-Ecosystem Station are presented in this paper. Experimental site is large field of winter wheat and summer maize. Wheat is seeded in a field on around October and harvested on next June. Maize season is from June to September.

Some selected results in last three years are explained below:

1) Comparison between lysimeter method and bowen ratio energy balance technique (BREB)

Seasonal trend of evapotranspiration in 1999 wheat season was measured by both large weighing lysimeter and BREB method (Fig.2). Both methods gave consistent results and proved the accuracy of the BREB method. The average evaporation in winter wheat season was 2.93mm by lysimeter, and 2.51mm by BREB method. Soil evaporation measured by micro-lysimeter was about 1mm, and corresponded to about 20% of total evapotranspiration.

2) Diurnal and seasonal changes in heat budget in 1999

Diurnal change in heat budget in 1999 wheat season are shown in Fig. 3. The ratio of latent heat (LE) to net radiation (Rn) was gradually increased accompanied by the growth of wheat. Fig. 5 shows seasonal changes in heat budget. The changing trend of LE/Rn was clear from DOY (Day of Year) 100 to DOY120, and it was proportional to the changes in LAI (Leaf Area Index) in Fig.4.

3) Influence of irrigation

The grain production in NCP has been maintained by abundant irrigation water extracted from groundwater, however, groundwater level has been declining at a rate of 1m/year. Assuming the effective porosity of the aquifer as 30%, annual amount of irrigation reached 300mm. It is comparable with annual precipitation in this area.

Fig. 6 shows the relationship between available energy and evaporation ratio ($EF=LE/(LE+H)$). Irrigation was applied at DOY 109 with 60mm of water. In wet case at DOY112, EF approaches unity. On the other hand, EF falls below unity in the dry case at DOY108, and means large sensitive heat flux. Irrigation certainly affects the heat budget on the field.

4) Relationship between evapotranspiration and crop conductance

Irrigation was applied at DOY89, 113, 138 in 1999 wheat season. Fig. 7 shows the seasonal changes in ET and crop conductance (left), daily precipitation, and average soil moisture between ground surface and 60cm depth. There were little changes at the irrigation of DOY89 and 113, however, ET showed sharp increase after irrigation at DOY138. The crop conductance was in the decreasing tendency just before the irrigation at DOY138, and wheat was in the stressed condition. ET was controlled by the low soil moisture, however, the

irrigation promoted the transpiration.

5) Diurnal and seasonal variations in stomatal resistance/conductance

The crop production in the NCP is strongly controlled by the irrigation. Amount of available water is different between the districts because of the different land condition, such as geomorphic units, or salinity, and so on. The effect of irrigation should be revealed to understand the actual nature of evapotranspiration under human management.

Fig. 8 shows the diurnal pattern of stomatal conductance in well-watered (W) and rain-fed (R) experimental field. There is little difference in the early morning, however, stomatal conductance in rain-fed field became very low compared with that of well-watered field. The stomatal conductance at the well-watered field showed its maximum at around 10 a.m., and the gradually decreased to the evening minimum.

Fig. 9 shows the seasonal changes in stomatal resistance measured at 14 a.m. with soil moisture and meteorological components. The trend in stomatal resistance showed U-shaped change. Stomatal resistance was high in pre-jointing and post-milking stage, and low after jointing stage.

6) Relationship between stomatal resistance and soil moisture

Evapotranspiration is controlled by the soil moisture especially in the semi-arid region. The relationship between soil moisture and stomatal conductance is shown in Fig. 10. Soil moisture is expressed as an extractable soil water (ESW) shown below:

$$ESW = (\theta_a - \theta_w) / (\theta_f - \theta_w)$$

where θ_a , θ_w , and θ_f are soil moisture content, wilting point, field capacity, respectively. In Luancheng station, θ_w is 0.108 and θ_f is 0.355.

Although the maximum conductance is different in growing stages, stomatal conductance decreases linearly with decreasing ESW when ESW fall below 0.5. This means the possibility to model control of soil moisture to evapotranspiration.

7) Seasonal variations in spectral reflectance and vegetation index

The results in field experiments are planning to reflect the estimation of areal flux by satellite remote sensing. As a ground truth experiments, spectral reflectance is measured at the ground level in Luancheng station.

Fig. 11 shows the seasonal trend of NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) by albedo meter and PAR (Photosynthetically Active Radiation) sensor. Two wheat seasons and one maize season are included in the time series. Time changes in NDVI accompanied by the growth of wheat and maize are clearly recorded in the figure.

Fig. 12 shows the time series of NDVI by NOAA/AVHRR at Luancheng station. There recognizes three NDVI peaks. First peak denotes the winter wheat, and second one is summer maize. Third peak means the maximum LAI of wheat just before the winter dormancy stage. The trend is strongly related to the change in evapotranspiration, and used to expand point flux measurement to wide area.

Some preliminary results for extensive wheat and maize irrigated field in NCP are described in this paper. The observation at other two stations are continued to get data with different land conditions, and planning to expand point data to wide are by satellite remote sensing.

The outcomes will be combined with the results from subsurface unit of the project, and aims at general understanding of the hydrological cycle in NCP.