

陸面過程モデルと大気水収支法による 灌漑農地からの水蒸気供給量推定

ESTIMATING VAPOR SUPPLY FROM IRRIGATED CROPLAND
USING HYDROLOGICAL LAND SURFACE MODEL
AND ATMOSPHERIC WATER BALANCE METHOD

小槻峻司¹・田中賢治²
Shunji KOTSUKI and Kenji TANAKA

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科 博士課程 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

²正会員 博(工) 京都大学 防災研究所 准教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

This study was conducted to estimate vapor supply from irrigated cropland using the hydrological land surface model and the atmospheric water balance method. Based on observation-based meteorological forcing, the authors have estimated vapor supply using the hydrological model: SiBUC. Vapor supply has been also estimated by the atmospheric water balance method using reanalyzed climate data: JRA-25. Vapor supply estimated by SiBUC with irrigation well suits to estimated vapor supply from atmospheric water balance on irrigated land in north China and United States. It suggests that land surface models including irrigation reproduce vapor supply well compared with models including no irrigation.

Key Words : irrigation, land surface model, atmospheric water balance, vapor flux, reanalysis

1. はじめに

近年、人口増加に伴って世界の食糧需要量は大きく増加している。灌漑農地は、多量な水を消費するデメリットを有する一方で食糧生産性に優れる。世界では総農地面積の約2割の灌漑農地から、約4割の食糧が生産されている。2050年には90億人にも達すると予測される人口を養う上では、灌漑農地における農業水需要量を把握することが重要である。特に気候変動が大きな問題となっている現在、農業水需要量を物理的に推定する手法を確立することが重要であろう。その様な背景のもと、世界の農業水需要量を推定する研究が行われてきた^{1),2),3),4)}。

灌漑農地は大気に対して陸面境界条件を与える陸面過程の一部としても注目されてきている。灌漑により増加する土壌水分は蒸発散量を強化させ、地表面の水・エネルギーバランスを変化させると考えられる。既に、土壌水分は地表面フラックスの配分を決定する重要な役割を担い、大気・地表面間のエネルギー・水収支を通して、気候形成やその変動に寄与することが知られている。例えば、Koster *et al.*⁵⁾は、特に乾燥・湿潤遷移地域において地表面状態が夏季降水に影響を及ぼすことを、全球気

候モデル(GCM)による数値実験において指摘した。FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations)によれば、現在世界の農用地面積は1300万km²を超えている。農用地面積の約2割を占める灌漑地が、大気陸面相互作用に与える影響についても評価する必要がある。実際に灌漑による土壌水分量の増加をGCMに組み込み、降水量の増加や気温、モンスーンに対して与える影響を評価した研究も行われている (e.g.Saeed *et al.*⁶⁾)。加えて近年では、灌漑用水が用途の多くを占める非循環系地下水からの取水と、海面上昇との関係について推定した研究も報告されている⁷⁾。

以上の様に、灌漑活動を考慮した陸面過程のオフライン解析によって需要量を推定した研究や、潜熱・顕熱フラックスに対して与える影響を評価した研究が報告されている。大気側の研究では、灌漑を陸面過程に組み込み、降水量・気温などに与える影響についての感度実験が行われてきた。本研究は、陸面過程解析において灌漑あり・灌漑なしのオフライン感度実験を行い、灌漑の考慮により大気側への水蒸気供給量の再現性が向上するかを議論するものである。大気水収支法を用いて大気場からみた水蒸気供給量を推定し、陸面過程のオフライン感度実験出力値との比較を行う。

2. 水蒸気供給量の解析手法

(1) 陸面過程モデルによる推定

陸面過程モデルは大気モデルの陸面境界条件を与えるモデルとして開発されてきた。気象強制力7要素（短波・長波放射，気温，比湿，風速，降雨，気圧）を入力として，地表面の水収支，放射収支，熱収支を解き，陸面状態量や地表面フラックスを出力する。陸面過程モデルには，灌漑を扱うことが可能であるSiBUC(Simple biosphere model including urban canopy)⁸⁾を用いた。

降水量データには，観測情報を基に整備されたデータを用いた。ユーラシア大陸域は，APHRODITE V1003R1(Yatagai *et al.*⁹⁾)の日降水量データを使用し，それ以外の地域にはドイツ気象庁(DWD)のGPCC(Global Precipitation Climatology Centre)月降水量を使用した。風速・気圧データは，電力中央研究所の長期再解析データ(JRA-25; Onogi *et al.*¹⁰⁾)を用い，その他の気象強制力は統計的手法から作成されたHirabayashi *et al.*¹¹⁾を用いた。入力となる地表面パラメータのうち，灌漑マップはSiebert *et al.*¹²⁾を使用し，土地被覆はUSGS (U. S. Geological Survey)のGLCC version2.0を用いた。その他，農事暦データ等パラメータは小槻ら¹³⁾に従った。

(2) 大気水収支法による推定

大気水収支法は，適切に選択した大気中の有限な大きさの支配体積に対する水収支式より，蒸発散量を未知数として決定する。落下しない液相の水(雲水)の項を無視した大気の水収支は，以下の式で記述される。

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\nabla_{\text{H}} \bar{Q} + (E - P) \quad (1)$$

ここに， W : 可降水量[kg/m^2]， E : 蒸発散量[kg/m^2]， P : 降水量[kg/m^2]， \bar{Q} : 水蒸気フラックスベクトル[kg/m^2]であり， ∇ は水平二次元の発散を表す。陸面の水収支と同様に，水の全流入量から全発散量を差し引いたものが，支配体積中の貯留量変化に等しいことを示しており，可降水量，降水量，水蒸気の収束量が分かれば，蒸発散量を決定できる。可降水量 W ，水蒸気フラックス $\bar{Q}=(Q_{\lambda}, Q_{\phi})$ の鉛直積算は以下の様に離散化して求めた。

$$W = \int_0^{P_s} q \cdot dp / g = \sum_{i=1}^n q_i \delta p_i / g \quad (2)$$

$$Q_{\lambda} = \int_0^{P_s} q \cdot u \cdot dp / g = \sum_{i=1}^n q_i \cdot u_i \delta p_i / g \quad (3)$$

$$Q_{\phi} = \int_0^{P_s} q \cdot v \cdot dp / g = \sum_{i=1}^n q_i \cdot v_i \delta p_i / g \quad (4)$$

ここに， q : 比湿[kg/kg]， u, v : 東西,南北方向風速[m/s]， p : 大気圧[Pa]， p_s : 地表面気圧， g : 重力加速度[m/s^2]であり， n は再解析データの層数，添字の λ, ϕ は経度方向，緯度方向を表す。より詳細な可降水量・収束水蒸気量の計算方法については，Oki *et al.*¹⁴⁾を参照されたい。本研究で

は，再解析データにJRA-25を用いた。

大気場の可降水量・収束水蒸気量の推定に用いた再解析データは，数値予報を行うために必要な，空間三次元格子状の初期値データとして作成されたものである。6ないし12時間前の再解析データを初期値としてモデル計算された第一推定値と，観測値，及びそれらの誤差分散によって三次元格子点の値が定められる。この四次元変分法では，空間・時間分解能や誤差特性等が不均質なデータを扱うことが可能であり，ゾンデを用いた高層観測データや，静止衛星の画像解析により推定された雲移動ベクトル，極軌道衛星の放射観測から推定された可降水量データ等が用いられている。信頼度の高いデータが多く得られる地域ほど精度良い解析値が得られる。

再解析データは降水量についても予報しているが，降水量は同化されていない。そこで，式(1)における降水量データは，陸面過程解析と同様に観測情報から整備されたAPHRODITEとGPCCを併用する。以上の手順により，大気水収支法によって地表面の水蒸気供給量を算出した。

(3) 推定値の比較

陸面過程における水収支と，大気水収支を比較すると図-1の様になり，異なる水収支計算から水蒸気供給量を推定できる。ただし，本研究での陸面過程解析では，メッシュ間の地下水移動は考慮していない。本研究では，灌漑を考慮することによる水蒸気供給量の違いについて議論を行うため，灌漑あり・灌漑なしのオフライン感度実験を行う。灌漑なしの実験では，灌漑農地を天水農地として扱い，植生パラメータについても天水農地のデータを用いた。また，再解析データを作成する同化システムも陸面モデルを含んでおり，予報値として計算される陸面状態量や地表面フラックスが得られる。再解析同化システムに用いられている陸面モデルでは，人間活動の効果は考慮されていない。以降では，灌漑農地・天水農地における4手法の出力する水蒸気供給量(大気水収支法，灌漑あり・なしの陸面過程解析値，再解析陸面予報値)を比較した。解析・整備期間は，1994-2003年の10年間とした。

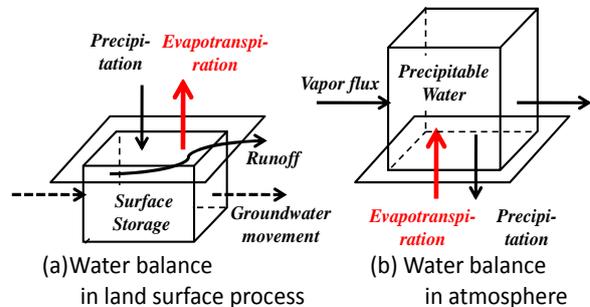


図-1 陸面過程水収支(a)と大気水収支(b)。ただし，本研究の陸面過程解析ではメッシュ間の地下水移動については考慮していない。

表-1 水蒸気供給量の解析手法と計算に用いられたデータ

Name	Method	Irrigation	Precipitation	Other forcing
Atm.	Atmospheric water balance	-	GPCC, APHRODITE	-
SiBUC _{irr}	Land surface process	Included	GPCC, APHRODITE	JRA-25, Hirabayashi et al. ¹¹⁾
SiBUC _{no irr}	Land surface process	Not included	GPCC, APHRODITE	JRA-25, Hirabayashi et al. ¹¹⁾
JRA_land	Land surface process	Not included	JRA-25	JRA-25

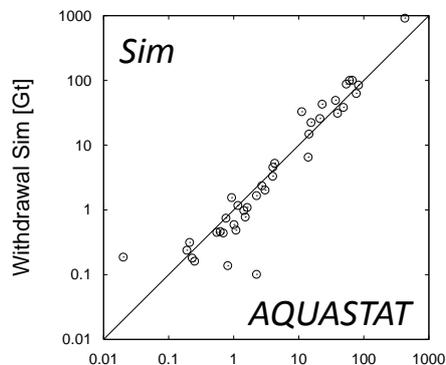


図-2 各国の農業取水量統計値(AQUASTAT)と解析値(Sim)の比較[Gt/year]. どちらも2000年の値である.

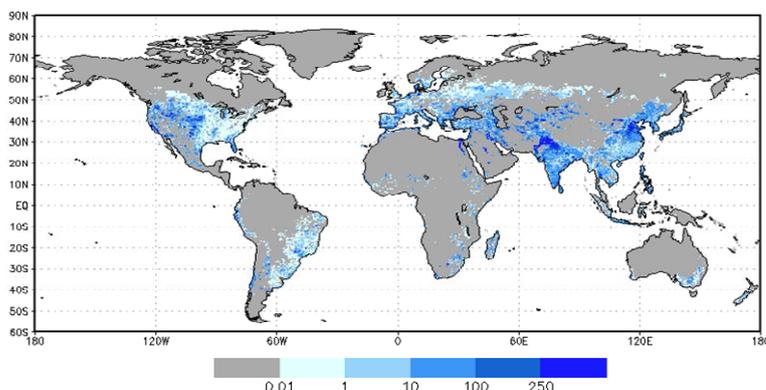


図-3 灌漑要求水量の分布[mm/year]. 中国の華北平原やインド北部、中央アジア、北米で多量の要求水量が発生している(1994-2003年の平均値).

3. 解析結果と考察

(1) 農業水需要量の検証

灌漑が水蒸気供給量へ与える影響を評価するに先立ち、陸面過程解析で推定された灌漑要求水量を検証した。世界各国の農業取水量データは、FAOが提供している統計データ(AQUASTAT)等で公開されている。しかし、AQUASTATが公開しているのは、農地への取水量データであるのに対し、モデルは農地でポテンシャルに要する灌漑要求水量を出力している。取水された水は、灌漑水路からの蒸発・漏水を経て農地に供給されるため、取水量は要求水量よりも大きくなる。灌漑効率²⁾はDoll and Siebert²⁾を参照し、要求水量から取水量を算出した。

2000年における、解析された各国の農業取水量とAQUASTAT統計値の比較を図-2に示す。1つのプロットが1つの国に対応しており、解析された各国の取水量が統計とよく一致していることが分かる。解析された灌漑要求水量の分布は図-3に示される。濃青色の地域は多量の灌漑要求水量が発生している地域である。中国北部や、インド北部、北米、中央アジアの様に、一般的に知られる農業用水の大消費地で、多量の要求水量が発生していることが分かる。

続く三節では、中国北部・北米において推定された水蒸気供給量を比較し、議論する。灌漑あり・灌漑なしのオフライン実験を行った陸面過程解析値、再解析データの陸面予報値、大気水収支法推定値を比較する。また、再解析データの降水量予報値についても議論する。中国北部と北米を選択した理由は、多量の灌漑要求水量が発

生しており、灌漑による水蒸気供給量の違いが顕著に見られると推測されるためである。加えて、再解析データは、観測精度・観測密度の高い中高緯度地域において精度が高いと考えられる。大気水収支法から計算される長年の水蒸気供給量と観測河川流量を比較した研究でも、北半球の中高緯度で整合性の高い結果が報告されている¹²⁾。灌漑農地の有る無しに関わらない、陸面過程解析の精度も検証する必要があるため、中国北部・北米において、灌漑農地地域・天水農地地域をそれぞれ決定し、両地域での水蒸気供給量推定値を比較する。

ここで、水蒸気供給量(以下LHF: Latent Heat Flux)の解析手法、用いたデータを整理する(表-1)。本研究では、大気水収支LHFの推定値が最も現実に近いと仮定して議論する。中国北部・北米に於いては、データ同化される大気場の可降水量・収束水蒸気量の信頼性が高いと考えられるためである。SiBUCの感度実験LHFと大気水収支LHFの比較では、灌漑を考慮することで陸面過程解析LHFが、大気水収支LHFに近づくかを測る。しかし、一つのモデル事例となるため、灌漑を考慮していない陸面過程モデルとしてJRA陸面予報LHFも大気水収支LHFと比較する。ただし、JRAの陸面計算は、JRA-25再解析の気象強制力を用いており、SiBUCの陸面計算値とはモデルと気象外力の両方が異なる。特に、SiBUCとJRA陸面モデルでは、LHFに大きな影響を与える降水量の外力が異なることに注意して、以下では議論を行う。

(2) 中国北部の水蒸気供給量

中国北部における灌漑農地・天水農地は図-4(a), (b)の様分布しており、灌漑農地地域・天水農地地域を決定した(表-2)。それぞれの地域で灌漑農地が占める割

合は、30.5%、6.4%である。図-4(c)は陸面過程解析で灌漑を考慮したことによるLHFの増加量を示しており、灌漑面積の高い地域において大きな差となっている。1994-2003年にかけて、4つの手法で出力されたLHF年平均値、大気水収支LHFからの推定誤差を10年間の月推定値を用いたNashの効率係数として計算した(表-2)。両地域において、各手法で出力されたLHFの季節変動は図-5(a), (b)に示される。

天水農地地域では、出力されたNash値や図-5(b)より、陸面過程LHF、再解析陸面予報LHF共に、大気水収支LHFへの一致度が高い。しかしながら、年平均LHFを比較すると、大気水収支出力LHFに比べて、陸面過程解析LHFは低い。図-5(b)では、乾季の陸面過程LHFが、再解析陸面予報LHF、大気水収支LHFに比して過小である一方で、雨季のLHFは良く一致している。そのため、乾季の陸面過程LHFが過小なのは、基底流出が早く、土壌の水分が早く失われた原因が考えられる。陸面過程の流出速度については、該当地域の河川流量データを取得して検証していく必要がある。中国北部の天水農地では、

雨季には陸面過程LHF、陸面予報LHF共に、現実的である大気水収支LHFへ良く一致していることが確認された。

灌漑地域では、出力されたNash値や図-5(a)より、灌漑を考慮した陸面過程LHFは、大気水収支LHFへの一致度が高い。灌漑あり・なしのオフライン感度実験LHFの間には、灌漑期の月最大で40mm程度の差があり、陸面過程の月LHFの30%程度の寄与であった。再解析陸面予報LHFと比較しても、灌漑期の陸面過程LHFが大きく、大気水収支LHFへの一致度が高い。再解析の陸面モデルに灌漑を導入することで、この地域の灌漑期LHFが現実に近づく可能性が高いと言える。

降水量を比較した図-6(a), (b)では、天水農地地域の再解析降水量が、APHRODITEに良く一致している。一方で、灌漑地域では再解析データが過大である。これは、再解析陸面予報LHFが大気水収支LHFより低いことに矛盾する。つまり、再解析陸面モデルでは、観測情報より多い降水量を受けているにも関わらず、再解析LHFは大気水収支LHFより過小である。再解析陸面モデルの予報流出が、現実より大きく過大となっている可能性が考え

表-2 中国北部の灌漑地域・天水農地地域の範囲と、両地域の灌漑農地面積率。1994-2003年の年平均水蒸気供給量を4つの手法で推定し (Atm:大気水収支法, SiBUC_{ir}:灌漑ありの陸面過程解析値, SiBUC_{no ir}:灌漑なしの陸面過程解析値, JRA_land:再解析データの陸面予報値), 大気水収支法推定値との誤差を、10年間の月推定値からNashの効率係数として計算した。

China	Domain	Irrigated area [%]	Annual vapor flux [mm/year]				Nash-Sutcliffe efficiency coefficient		
			Atm.	SiBUC _{ir}	SiBUC _{no ir}	JRA_land	SiBUC _{ir}	SiBUC _{no ir}	JRA_land
Irrigated	E112.5-E120, N34-N40	30.5	714.2	640.2	500.4	618.0	0.656	0.368	0.614
Rain-fed	E117.5-E127.5, N40-N48	6.4	552.8	433.9	416.5	513.8	0.812	0.784	0.774

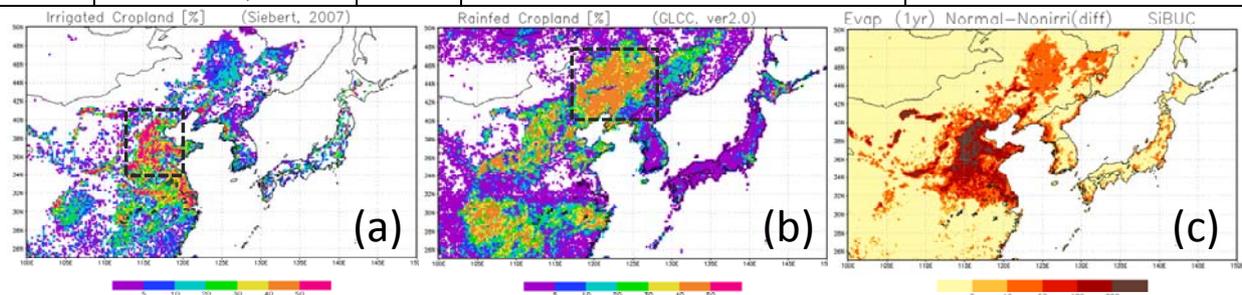


図-4 中国北部における、(a)灌漑面積率[%], (b)天水農地面積[%], および、(c) 陸面過程解析で灌漑農地を考慮したことによる蒸発量増加量 [mm/year]. (a), (b)図中の黒破線で囲まれた地域は、灌漑地域、天水農地地域とした地域である。

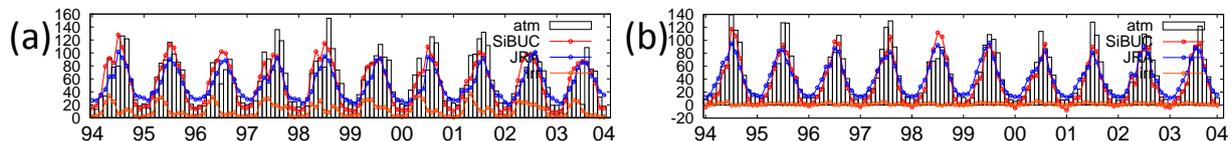


図-5 中国北部の水蒸気供給量比較[mm/month]. (a)は灌漑地域, (b)は天水農地地域である。黒棒グラフは大気水収支法の推定値, 青線グラフは再解析データの陸面予報値, 赤線グラフは灌漑ありのSiBUC解析値, 橙線グラフはSiBUCで灌漑を考慮した場合の水蒸気供給増加量である。灌漑なしのSiBUC解析値は赤線から橙線を引いた値となる。

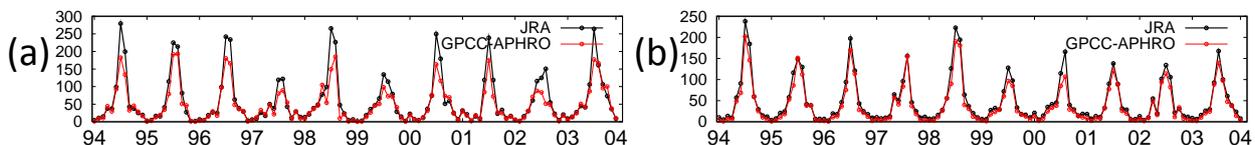


図-6 中国北部の降水量比較[mm/month]. (a)は灌漑地域, (b)は天水農地地域である。赤線グラフは観測情報プロダクト値, 黒線グラフは再解析データ出力値である。

られるが、JRA-25は陸面流出量データを公開していないため、今回は流出量の検証は行えなかった。大気水収支法計算式の降水量を、APHRODITEから降水量の多い再解析予報値に変更すると、灌漑地の大気水収支LHFは大きくなる。この場合は、雨季の再解析陸面予報LHF過小は、より顕著になる。そのため、再解析モデル中の水蒸気量は、主にデータ同化によって決定されていると考えられる。予報降水量が観測情報より過大である理由については、今後も検討を続ける。

陸面過程オフライン実験では、灌漑の考慮が、陸面解析LHFを現実的である大気水収支LHFへ近づける事を示した。また、APHRODITEより多いJRA降水量を用いているにも関わらず、再解析陸面LHFは、灌漑を含んだ陸面解析LHFよりも低い。中国北部の灌漑地域では、陸面過程解析に灌漑を含めることで、現実的なLHFに近づく可能性が高いと言える。

(3) 北米の水蒸気供給量

北米における灌漑農地・天水農地は図-7(a), (b)の様に分布しており、図-7(c)は陸面過程解析で灌漑を考慮したことによるLHFの増加量である。灌漑農地地域・天水農地地域を表-2の様に決定し、両地域の灌漑農地面積率は18.7%, 2.2%であった。1994-2003年にかけて、4つの手法で出力されたLHF年平均値、大気水収支法から推定

されたLHFからの推定誤差 (Nashの効率係数) は表-3に示される。両地域での、各手法で出力されたLHFの季節変動は図-8(a), (b)に示される。

天水農地地域では、出力されたNash値や図-8(b)より、陸面過程LHF, 再解析陸面予報LHF共に、最も現実的である大気水収支LHFへの整合性が高く、中国北部の解析結果と一致した。図-8(b)より、乾季の陸面過程LHFが、再解析陸面予報LHF, 大気水収支LHFに比して過小であることも中国北部と同様である。

灌漑地域では、陸面過程オフライン実験間では、灌漑の考慮によりLHFが増加し、大気水収支LHFへの一致度が僅かに高くなった。陸面過程LHFが再解析陸面予報LHFより低い点は、中国北部の解析結果と異なる。図-9(a), (b)からは、天水農地と灌漑地域共に再解析降水量がGPCCより過大であるが、灌漑地域の過大は天水農地の過大より顕著である。北米では、再解析モデル中で現実より多くの降水が発生し、それに伴い陸面予報LHFが大きくなったと考えられる。

(4) 中国北部・北米の結果を通した考察

中国北部・北米の解析結果より、以下のことが考察される。再解析モデル中の水蒸気量は、主にデータ同化によって決定されていると考えられる。同化の際に水収支は保存されておらず、陸面予報LHFと大気水収支法によ

表-3 北米の灌漑地域・天水農地地域の範囲と、両地域の灌漑農地面積率。水蒸気推定結果の読み取り方は表-2と同じである。

U. S.	Domain	Irrigated area [%]	Annual vapor flux [mm/year]				Nash-Sutcliffe efficiency coefficient		
			Atm.	SiBUC _{irr}	SiBUC _{no irr}	JRA_land	SiBUC _{irr}	SiBUC _{no irr}	JRA_land
Irrigated	W97-W102.5, N39.5-N42.6	18.7	480.0	580.9	501.0	732.8	0.649	0.621	0.335
Rain-fed	W90-E97.5, N40-N46	2.2	662.5	641.1	636.0	658.5	0.865	0.861	0.841

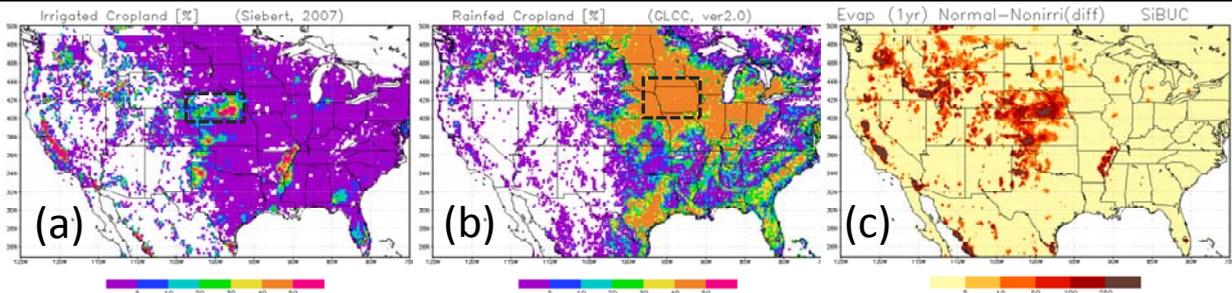


図-7 北米における、(a)灌漑面積率[%], (b)天水農地面積[%], および、(c) 陸面過程解析で灌漑農地を考慮したことによる蒸発量の増加量 [mm/year]. (a), (b)図中の黒破線で囲まれた地域は、灌漑地域、天水農地地域とした地域である。

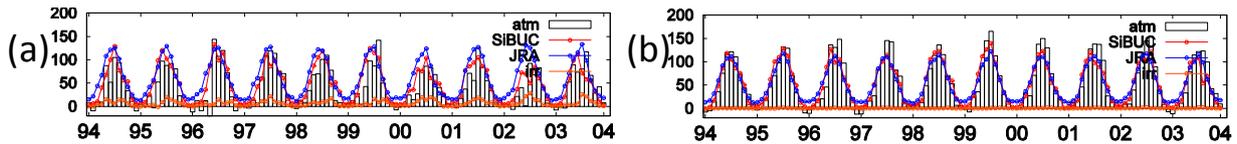


図-8 北米の水蒸気供給量比較[mm/month]. 図の読み取り方は、図-5と同じである。

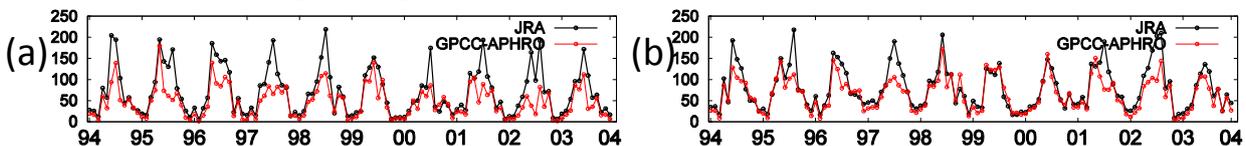


図-9 中国北部の降水量比較[mm/month]. 図の読み取り方は、図-6と同じである。

るLHFは閉じていない。再解析降水量は同化された可降水量から決定されるが、中国北部・北米の灌漑地域において再解析降水量が観測プロダクトに比して過大であった。この原因については、他の灌漑地域で同様の検討を行っていく必要がある。

陸面過程オフライン感度実験では、中国北部・北米の灌漑農地におけるLHFは、灌漑の考慮によって、現実的である大気水収支LHFへの一致度が高まることを示した。再解析モデル中では、可降水量は刻々と同化されるため、再解析陸面モデルにおいて灌漑を考慮した場合も、降水量予報値等の出力は大きく変化しない可能性もある。しかし、数値気象予報計算では、灌漑を考慮した陸面過程の導入により灌漑期LHFの再現性が向上すると言える。

4. 結論

本研究では、農地からの水蒸気供給（LHF）を、大気水収支法、灌漑あり・なしのオフライン感度実験により推定した。推定したLHFと再解析陸面予報LHFを中国北部及び北米の灌漑地域・天水農地地域で比較した。得られた主要な成果は以下の通りである。

- ・陸面過程解析による農業水需要量推定値を各国の統計農業取水量データと比較し、良く一致することを示した。

- ・中国北部・北米の天水農地では、陸面過程LHF、再解析陸面予報LHF共に、現実的である大気水収支から推定されたLHFに良く整合した。灌漑農地では、陸面過程解析LHFは灌漑の考慮により、大気水収支法から求めたLHFへの一致度が高くなることを示した。

- ・中国北部・北米の両地域で、灌漑農地における再解析予報降水量が観測プロダクトに比して過大であった。中国における再解析陸面予報LHFは大気水収支LHFより過小であり、流出量が現実より過大である可能性がある。

今後の課題は、使用する再解析データと対象地域を増やすことである。再解析データは、ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）のERA40を用いて同様の検証を行っていく予定である。また、観測精度・観測密度の高い中高緯度地域で対象地域を増やす必要がある。

本研究では、陸面過程解析に灌漑を考慮することで、LHFがより現実的になることを示した。しかし、灌漑によるLHFの差異が、気象モデルの出力する降水量や地表面気象強制力等にどの程度寄与するかは、陸面オフライン実験では不可能である。既に、SiBUCを陸面境界条件に用いた非静力学気象モデルも開発されており、今後はこういったカップリングモデルを用いて、灌漑による地表面のエネルギー・水収支変化が大気陸面相互作用に及ぼす影響について研究を進めたい。

謝辞： 日本学術振興会「特別研究員奨励費」の支援を

受け実施されました。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) FAO: Review of agricultural water use per country, 2005. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use_agr/index.stm (参照:2012/9/18).
- 2) Doll P and Siebert S.: Global modeling of irrigated water requirements, *Water Resources Research*, Vol.38-4, p.1-10, 2002.
- 3) Hanasaki N, Kanae S, Oki T, Masuda K, Motoya K, Shirakawa N, Shen Y, Tanaka K.: An integrated model for the assessment of global water resources—part 2: applications and assessments, *Hydrol. and Earth Syst. Sci.*, Vol.12, p.1007-1025, 2008.
- 4) Pokhrel Y, Hanasaki N, Koirala S, Cho J, Yeh P. J. F, Kim H, Kanae S, Oki T.: Incorporating anthropogenic water regulation modules into a land surface model, *J. Hydrometeorol.*, Vol.13, p.255-269, 2012.
- 5) The GLACE Team: Koster, R and Coauthors: Regions of Strong Coupling Between Soil Moisture and Precipitation, *Science*, Vol.305, p.1138-1140, 2004.
- 6) Saeed F, Hagemann S, Jacob D.: Impact of irrigation on the South Asian summer monsoon, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.36, p.L20711, 2009.
- 7) Pokhrel Y, Hanasaki N, Yeh P. J. F, Yamada J. T, Kanae S, Oki T.: Model estimates of sea-level change due to anthropogenic impacts on terrestrial water storage, *Nature Geoscience*, Vol.5, p.389-391, 2012.
- 8) Tanaka K.: Development of the New Land Surface Scheme SiBUC Commonly Applicable to Basin Water Management and Numerical Weather Prediction Model. Doctoral Dissertation, Graduate School of Engineering, Kyoto University, p.1-289, 2004.
- 9) Yatagai A, Arakawa O, Kamiguchi K, Kawamoto H, Nodzu I, Hamada A.: A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges, *SOLA*, Vol.5, p.137-140, 2009.
- 10) Onogi K and Coauthors: The JRA-25 reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 85, p.369-432, 2007.
- 11) Hirabayashi Y, Kanae S, Motoya K, Masuda K, Doll P.: A 59-year (1948-2006) global near-surface meteorological data set for land surface models, *Hydrological Research Letters*, Vol.2, p36-40, 2008.
- 12) Siebert S, Doll P, Hoogeveen J, Faures JM, Frenken K, Feick S.: Development and validation of the global map of irrigated areas., *Hydrol. and Earth Syst. Sci.*, Vol.9, p535-547, 2005.
- 13) 小槻峻司, 田中賢治, 小尻利治, 浜口俊雄: 衛星データから作成した農事暦を活用した全球陸域水循環解析, *水文・水資源学会誌*, Vol. 25-6, 2012. (受理済)
- 14) Oki T. and Musiak K.: Global atmospheric water balance and runoff from large river basins, *Hydrological Processes*, Vol.9, p.655-678, 1995.

(2012. 9. 30受付)