

灌漑を考慮した陸域水循環モデルの構築

DEVELOPMENT OF WATER CIRCULATION MODEL INCLUDING IRRIGATION

小槻峻司¹・田中賢治²・小尻利治³・浜口俊雄⁴

Shunji KOTSUKI, Kenji TANAKA, Toshiharu KOJIRI and Toshio HAMAGUCHI

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒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)

³正会員 博(工) 京都大学 防災研究所 教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴正会員 博(農) 京都大学 防災研究所 助教 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

It is well known that since agricultural water withdrawal has much affect on water circulation system, accurate analysis of river discharge or water balance are difficult with less regard for it. In this study, water circulation model composed of land surface model and distributed runoff model is proposed at 10km×10km resolution. In this model, irrigation water, which is estimated with land surface model, is introduced to river discharge analysis. The model is applied to the Chao Phraya River in Thailand, and reproduced seasonal water balance. Additionally, the discharge on dry season simulated with the model is improved as a result of including irrigation. Since the model, which is basically developed from global data sets, simulated seasonal change of river discharge, it can be suggested that our model has universality to other river basins.

Key Words: water circulation model, irrigation, land surface process, crop calendar

1. はじめに

近年、アジアやアフリカを中心とした急激な人口増加や経済成長に伴い、人類の水需要量は急激に増加している。淡水供給システムとしての陸域水循環システムは、非常に重要なプロセスであり¹⁾、増加する水需要を満たす水資源管理を行う上で、流域水循環システムの理解と把握が求められている²⁾。人類の経済発展や人口増加に伴い、農業生産活動は水循環システムに大きな影響を与えるようになってきており、陸域水循環システムを考慮する上で、農業生産活動の影響を考慮することは必要不可欠である。その様な観点から、農業生産活動の影響を考慮した流域スケールでの陸域水循環モデルが強く求められている。人間活動の中でも農業は、水循環システムに最も影響を与える活動の一つである。現在、世界の水消費の80%以上は農業用水であり³⁾、人口の増加に伴い今後も増え続けると予測されている⁴⁾。特に灌漑は、農地の生産性を大きく向上させ、世界では約2割の灌漑農地から、食糧の約4割が生産されている。そこで、本研究では、これら灌漑の効果を考慮した陸域水循環モデルの構築を目的とする。世界では、農地の灌漑必要水量を推定できる物理モデルは少なく、SiBUCの他には

ORCHIDEE⁵⁾など数えるほどであり、更にそれを水循環モデルに組み込んだ研究は十分ではない。水資源管理の面からは、将来の気象予測値から灌漑必要水量を特定可能なモデルを構築することは、大きな意義があるといえる。

灌漑必要水量を求める上で、農地における農事暦情報の特定は必要不可欠であり、精度のよい推定の鍵となる。Hanasaki *et al.*は気温から最適な時期の農業を行うとして、農事暦をモデル化し、全球河川流下解析に適用している⁶⁾。また、谷口らは農地での積算降水量を条件に農事暦のモデル化を行い、水田の取排水の影響を組み込んだ水循環モデルの構築を行っている⁷⁾。本論文では、リモートセンシングデータや、正規化植生指数NDVIを用いた農事暦の作成手法⁸⁾を用いる。萬らはこの手法を全球に適用し、土壌水分との関係を調べ⁹⁾、更に降水量との相関分析を行っている¹⁰⁾。光学センサーによる分光反射情報から計算される植生指標は、植物の光合成活動そのものを観測している事になり、モデル化された指標に比して、作物生育の状態をより現実的に捉える事が可能である。

本研究では、モデル内での灌漑必要水量の推定方法、それを組み込んだ陸域水循環モデルの提案を行う。また、構築されたモデルを用いて、シミュレーションを行い、結果を観測データと比較する。

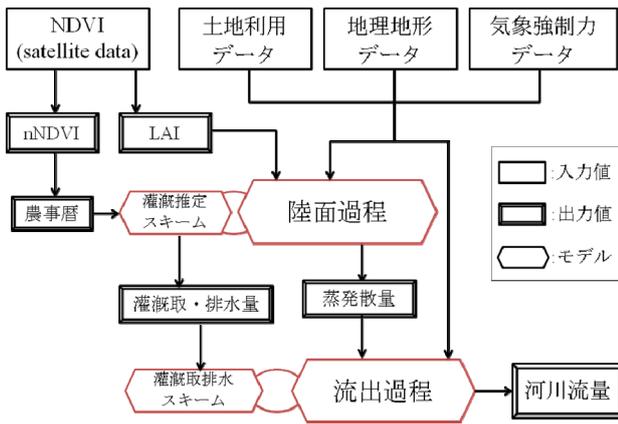


図-1 解析フロー

2. モデルの構成

構築した陸域水循環モデルは、分布型のモデルであり、陸面過程、流出・河川流下過程の要素を持つ。図-1に解析のフローを示す。モデルは、気象強制力を入力とし、各グリッドの地表面貯水量、河川流量、蒸発散量、灌漑要求水量等を出力する。特に、水資源量の把握の観点からは、蒸発散量の精度の高い推定が求められ、水・熱・放射収支を解く陸面過程解析では、それが可能である。以下にモデルの説明を行う。

(1) 陸面過程

陸面過程は、陸面過程モデルSiBUC¹¹⁾ (Simple Biosphere including Urban Canopy)を用いて表現されている。SiBUCは地表面状態を緑地・都市・水体の3つのカテゴリーに分類し、それらの混在を認めるモザイクモデルである。陸面過程は、特に鉛直方向の水の挙動の解析に適しており、気象強制力と地表面データより水収支・エネルギー収支を計算し、蒸発散量や流出量等を解析する。陸面過程モデルの中でもSiBUCは、灌漑農地における灌漑取・排水の効果を陽に扱える点を、大きな利点として有する。SiBUCでは、農地の水深や土壌水分量を追跡し、農事暦における各生育段階に必要な水深や土壌水分量を超えた場合に灌漑が行われる、といったモデル化がなされている。農事暦の作成を、以下の手順で行う。

(a) リモートセンシングデータの活用

地表面の農地情報の整備に当たり、SPOT-VEGETATION 10days-compositeデータ(<http://free.vgt.vito.be/index.php>)から、正規化植生指数NDVIを使用する。植物のクロロフィルは太陽光のうち赤領域の波長を強く吸収し、近赤外領域の波長を強く反射する特徴を有する。NDVIは、この様な植物の特徴を考慮して作成された指標である。NDVIは以下の式で与えられる。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

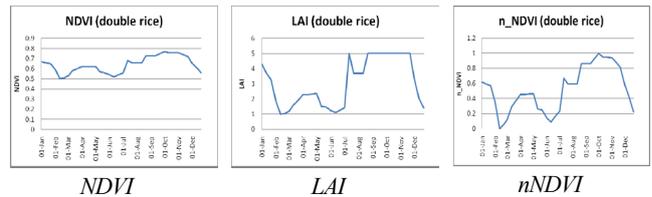


図-2 二期作地点 (Lon:99.38, Lat:15.27) 年変化 (2003年)

ここで、RED:可視域における赤領域、NIR:近赤外領域の反射率である。

また、葉面積指数LAIをNDVIデータから、BISE法¹²⁾により雲の影響を除去した上で作成する。LAIは陸面過程解析において、特に蒸散量を解析する上で重要なパラメーターである。LAIは以下の式¹³⁾で計算される。

$$SR = \frac{1 + NDVI}{1 - NDVI} \quad (2)$$

$$FPAR = FPAR_{min} + \frac{(SR - SR_{min})(FPAR_{max} - FPAR_{min})}{(SR_{max} - SR_{min})} \quad (3)$$

$$LAI = LAI_{max} \frac{\log(1 - FPAR)}{\log(1 - FPAR_{max})} \quad (4)$$

ここで、SRはSimple Ratio、FPARは光合成有効放射吸収率であり、それらの最大・最小値は各植生に対して与えられている。

(b) 農事暦の作成

作物の農事暦をnNDVIデータから作成する。nNDVIは正規化されたNDVI値であり、以下の式から算出される。

$$nNDVI(t) = \frac{NDVI(t) - min}{max - min} \quad (5)$$

ここで、nNDVI(t):時刻tの正規化NDVI、NDVI(t):時刻tのNDVI、min:対象期間のNDVI最小値、max:対象期間のNDVI最大値である。

NDVI、LAI、nNDVIの時系列はいずれも、作物の生育状態を表す指標となるが(図-2)、nNDVIによる農事暦の抽出が最も適当であると判断した。NDVI、LAIは、耕作面積率に応じて値の変動範囲が大きく異なり、耕作面積率の低いグリッドでは、作物成長状況との対応関係が弱くなる。NDVIを正規化した指標であるnNDVIは、耕作面積率の低いグリッドにおいても、その変化を明確に示すため、農事暦の抽出に適当であると言える。

(2) 流出過程

流出・河川流下過程は、分布型流出モデルHydro-BEAM¹⁴⁾(Hydrological River Basin Environment Assessment Model)を用いて表現されている。流出・河川流下過程では、陸面過程解析により得られる、蒸発散量、灌漑要求水量データを引き継ぎ、流域の水平方向の水の挙動を解析する。陸面過程解析で推定された灌漑必要水量は、実際には河道から取水され、河道に排水される。灌漑取排水には、灌漑必要水量の発生したグリッドから、最も上流にある河道グリッドから取水し、最も下流にある河



図-3 対象地域

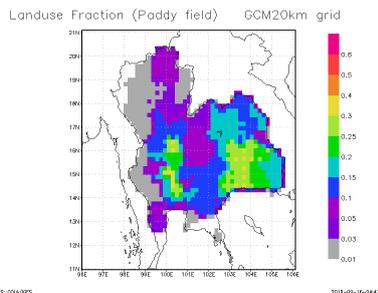
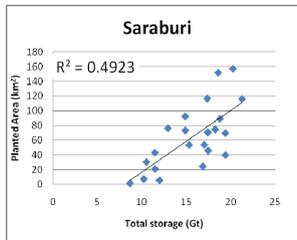
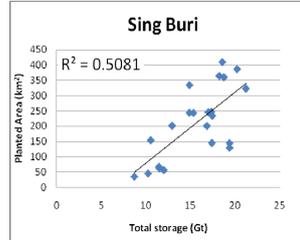


図-4 タイ水田面積率 (Agro-SEAD)



Saraburi 県



Sing Buri 県

図-5 乾季初期貯水量-乾季作付面積の散布図

道グリッドに排水とする灌漑取排水スキームを用いた。河道からの取水に際しては、灌漑水路での漏水や蒸発散の影響を考慮し、灌漑効率を乗じた値を用いる。灌漑必要水量、灌漑取水量は以下の式で求められる。

$$win = \alpha \cdot IWR \quad (6)$$

ここで、 win : 灌漑取水量、 α : 灌漑効率、 IWR : 灌漑必要水量である。

なお、本来は陸面過程の流出量を河道追跡モデルで計算する結合が理想である。しかし、陸面過程モデルによる基底流出量の再現精度が、特に山間部では不十分であった。これは陸面過程モデルが地表面の水・熱収支フラックス推定を目的として発展してきたためである。今回は蒸発散量のみを引き継ぐ結合を採ったが、陸面過程モデルの改良を行い、基底流出量の再現精度を改善していく必要があると言える。

3. モデルの適用と計算条件

構築したモデルを、農業活動が陸域水循環に与える影響が非常に大きい地域として、タイ・チャオプラヤ川流域に適用した(図-3)。流域は東南アジアモンスーン域に位置し、雨季・乾季の差が顕著な地域である。タイは広大な農地を有し(図-4)、FAO(Food and Agriculture Organization)の統計データによると、タイ国の総水使用量の90%は農業に用いられている。流域上流域には、貯水容量が10Gtを超えるダムが2つ建設されており(Bhumibol Dam, Sirikit Dam)、下流域の水循環に大きな影響を与えている。解析を、ダム上流域を含めた全流域を対象に行った。ただし、ダム下流部においては、ダムが河川流量に与える影響が非常に大きいため、EGAT(Electricity Generating Authority of Thailand)から提供され

ている2大ダムからの実放流量を境界条件として与えた。

(1) 気象強制力

TMD(Thai Meteorological Department) と RID(Royal Irrigation Department)から提供されている雨量観測データから降水量データセットを作成した。また、H08プロダクト¹⁵⁾から気温、比湿、下向き短波、下向き放射のデータセットを作成した。また、風速、気圧のデータはGSWプロダクトのJRA25の再解析データを用いた。

(2) 地表面パラメーター

土壌、植生パラメーターを、Meteo-Franceにより提供されている Ecoclimap(http://www.cnrm.meteo.fr/gmme-PROJETS/ECOCLIMAP/page_ecoclimap.htm)より切り出し作成した。また、土地利用情報として、USGSの提供するGLCC version2(<http://edc2.usgs.gov/glcc/>)から、陸面過程解析へは15種類、流出解析へは5種類のカテゴリーに再分類して作成した。USGSのデータは、FAOの統計データと比較すると灌漑面積を過大評価していたため、FAOによる総灌漑面積と適合するように補正を行い、土地利用情報とした。

(3) 地形データ

地形情報データとして、落水方向、落水勾配、斜面勾配を、CGAIR-CSI (<http://srtm.csi.cgiar.org/Index.asp>)により提供されている90mDEMデータ及びUSGSにより提供されている1km河道位置情報 (<http://eros.usgs.gov/>)より作成した。

(4) 解析期間

第一段階として、水資源量を把握する上で重要となる蒸発散量の解析精度を検証するため、陸面過程解析をオフラインで実行した。解析期間は1980年から1999年までの20年間とした。次に、陸面過程解析からの蒸発散・灌漑取排水量を引き継いだ流出・河川流下解析を、現地データの十分に整った1998年を対象として行った。なお、陸面過程解析においてSPOT-VEGETATIONのデータの無い年度については、乾季の初期(1月1日)のBhumibol DamとSirikit Dam総貯水容量が最も近い年度のデータを用いた。タイにおいて、雨季はほぼすべての農地で耕作を行うが、乾季の耕作面積決定は、乾季初期の流域の貯水量に影響されるためである(図-5)。

4. 解析結果と考察

(1) 年間水収支の解析結果

図-6に1980年から1999年までの中流域、Nakhon Sawan(以下C2)地点集水域の年水収支の経年変化を示す。赤グラフが観測河川流量、緑グラフが解析総流出量、青

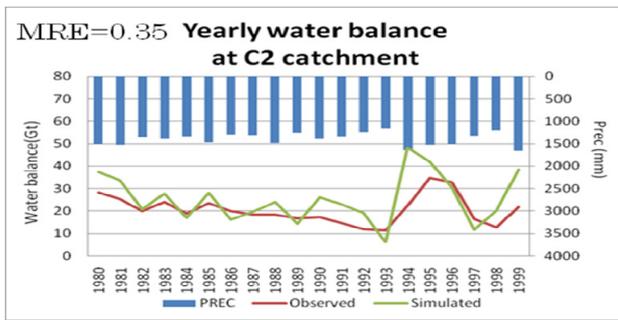


図-6 C2集水域の年水収支の経年変化

棒グラフがC2集水域平均降水量を示している。なお上流貯水池においては、豊水年に貯水量を増やし、渇水年に放流するという操作が行われているため、解析結果に上流貯水池の貯水容量増加量を加えた値を示している。年水収支は、相対誤差35%の精度で解析されたが、降水量の多い年に水収支を過大評価する傾向がみられた。これは、雨の多い年において中流域上流で河川が氾濫し、氾濫原において解析より多くの水が発散によって失われるためだと考えられる。実際にチャオプラヤ川本流域で洪水が起こった1980年、1983年、1995年等の水収支が過大評価である事が確認できる。なお、流域の水収支(WB)は以下の式によって計算され、集水域から対象期間内に流出した水量を表す。

$$WR = \sum_i A_i \sum_t (P_{t,i} - E_{t,i}) \quad (7)$$

$$TWS = \sum_i A_i \cdot SW_i \quad (8)$$

$$IRRIG = \sum_i A_i \sum_t (\alpha \cdot IWR_{t,i} - Wout_{t,i}) \quad (9)$$

$$WB = WR - IRRIG - \Delta TWS \quad (10)$$

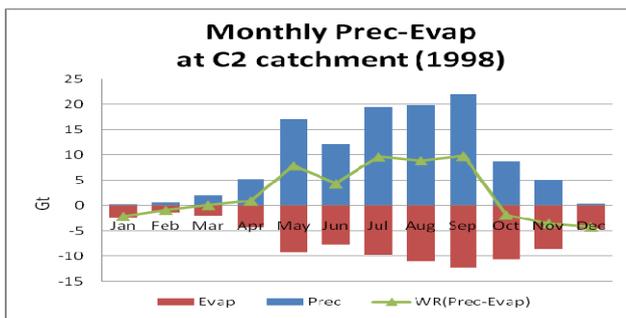
ここで、 i : グリッド、 t : 対象期間、 P : 降水量、 E : 蒸発散量、 SW : 地表面貯水量、 $Wout$: 灌漑排水量、 A : グリッド面積、 WR : 集水域水資源賦存量、 TWS : 集水域地表面貯水量、 $IRRIG$: 集水域灌漑取水量である。

(2) 月水収支の解析結果

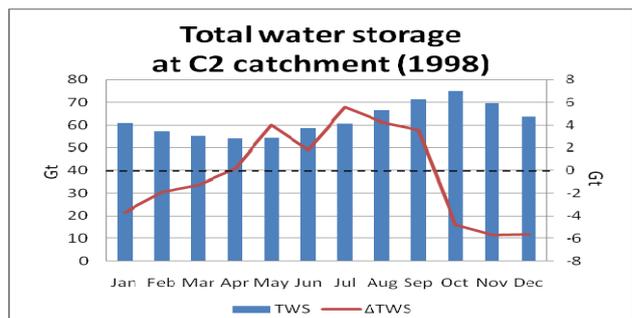
陸面過程により得られた、1998年C2集水域の月水収支解析結果を図-7に示す。図-7(a)において、青棒グラフは降水量、赤棒グラフは蒸発散量、緑グラフはその差(WR)を示す。図-7(a)より、雨季(5-10月)に降雨が集中しているのに対して、蒸発散量が乾季にも発生し、降水量を上回っている事が分かる。図-7(b)において、青棒グラフは地表面の貯水量(TWS)、赤グラフはその変化量(ΔTWS)を示す。貯水量が雨季に増加し、乾季に減少している状態が把握できる。灌漑取・排水量の解析結果を図-7(c)に示す。青棒グラフが灌漑必要水量(Win)、赤棒グラフが灌漑排水量(Wout)、緑グラフが総灌漑取水量(IRRIG)を示す。なお、灌漑効率 α は0.5とした¹⁶⁾。図-7(d)に集水域水収支(紫グラフ、WB)と、その内訳を示す。図より、雨季において水収支が正になり、逆に乾季において水収支が負になる傾向が分かる。これらの結果は、タイにおける雨季・乾季の季節変化を良く表現していると言える。

(3) 貯水池流入量の再現性

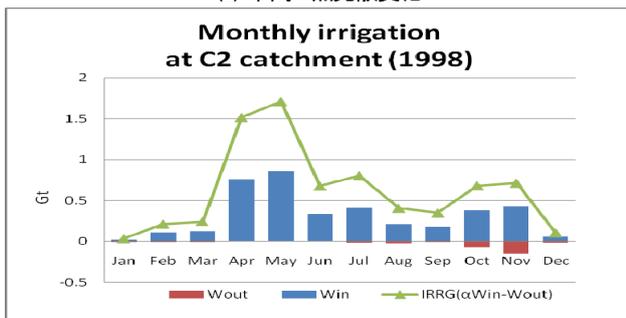
流出・河川流下過程の出力値より、上流域ダムへの流入量、及び年貯水量を追跡した。なお、年初の貯水量を初期条件としている。両ダムの貯水容量と流入量を図-



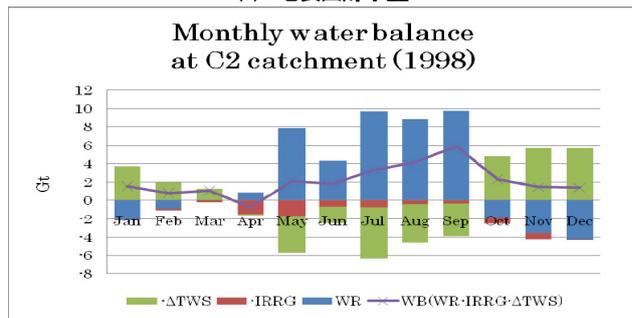
(a) 降水-蒸発散変化



(b) 地表面貯水量



(c) 灌漑取・排水量



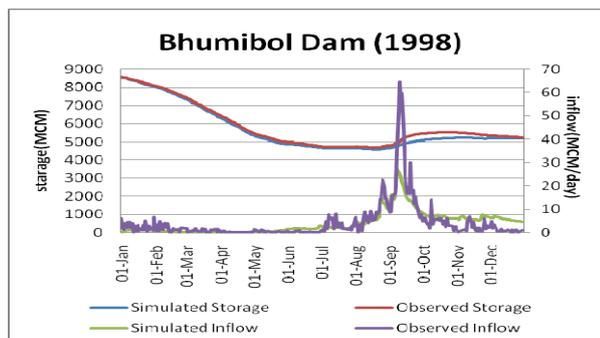
(d) 水収支

図-7 陸面過程解析結果(1998年, C2集水域)

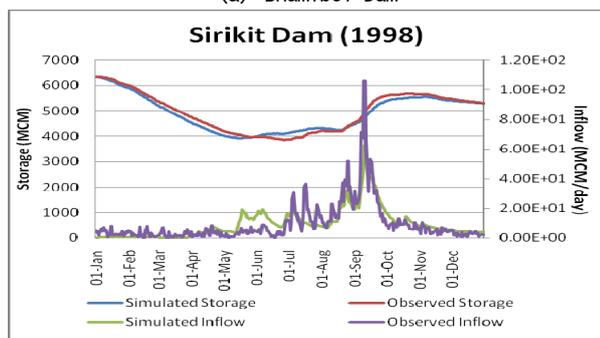
8(a), (b)に示す。青グラフ・緑グラフが解析された貯水量変化，日流入量を，赤グラフ・紫グラフが観測された貯水量変化，日流入量を示している。モデルの解析値は，貯水池への流入量を精度よく再現している事が分かる。また，一年間を通して貯水容量を再現している事から，陸面過程解析において，貯水池上流域での水収支が精度よく解析されている事が示唆される。既に述べたように，乾季貯水容量は，その期の乾季作農地面積を定める上で，重要な要素である。中長期の気象予測が得られた場合に，長期的な貯水池操作計画を定める上で，貯水容量を追跡可能な点は大きな効果を持つと期待される。

(4) 流出過程解析結果

ここでは，C2地点乾季の河川流量結果を示す。灌漑を組み込んだ効果を議論するため，灌漑を組み込んだ流量解析と，組み込まずに流量解析を行う2ケースで解析を行った。図-9に解析結果を示す。黒グラフが観測河川流量，赤グラフが灌漑を組み込んだ流量解析結果，緑グラフが灌漑を組み込まずに行った流量解析結果，青のヒストグラムが集水域の平均時間降雨量である。図-9より，灌漑取水を考慮しなかった場合に，解析流量が過大評価である事が確認できる。しかしながら，灌漑を組み込んだ解析結果より，陸面過程での灌漑取水の発生時期，発生量の推定が不十分であったと確認できる。なお，河川流量が定期的に振動するのは，境界条件に用いている貯水池放流量は，土，日曜日にその放流量を減少させるためである。



(a) Bhumibol Dam



(b) Sirikit Dam

図-8 貯水池貯水量，流入量年変化 (1998年)

(5) 農事暦作成手法の改善

流出過程解析で課題であった，灌漑取水の発生時期，発生量推定方法の改善を行った。図-9より，灌漑取水の発生が3-5月に集中し，1-2月の乾季河川流量は過大評価である。現状の農事暦作成手法では，乾季初期での耕作が農事暦を反映されていない可能性が示唆される。

農事暦の作成に用いる各グリッドの $nNDVI$ は，今回のケースでは水田の判定された1kmメッシュ $nNDVI$ 値を抽出し，その平均値を用いている。しかし，公開されているグローバル土地利用プロダクトには精度の限界がある。例えば土地被覆データは，最も基本的かつ重要なデータであり，複数の機関から1km全球土地被覆データが提供されているが，最近の比較研究では，ピクセル毎の土地被覆の一致度は60%程度とされている¹⁷⁾。そこで，現在当研究室で開発が進められている，全球1km作物分類図¹⁸⁾を用いて水田の抽出を行った。全球1km作物分類図は，萬らの手法⁸⁾を用いて解像度1kmで5作物（稲，小麦，大豆，コーン，冬小麦）に分類されたプロダクトである。このプロダクトにおいて稲と判定されたピクセルから，水田のフェノロジーの抽出を行った。また，京都大学東南アジア研究所から提供されている，AgroSEAD(<http://sead.cseas.kyoto-u.ac.jp/index.htm>)を用いて土地利用データを作成した。Agro-SEADは県単位での作物の作付面積を整備しており，FAOと比較して高精度の土地利用分布データの作成が可能である。これらの手法を適用し，灌漑取水量を陸面過程で推定し，流出過程に組み込み得られた解析結果を図-10に示す。図-10より河川流量の再現性が大きく向上していることが確認され

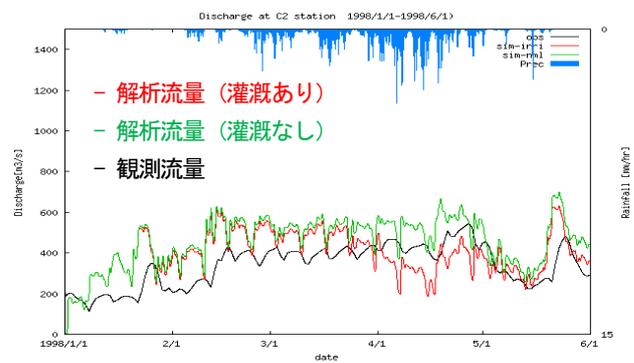


図-9 農事暦改善前C2地点時間河川流量 (1998年，乾季)

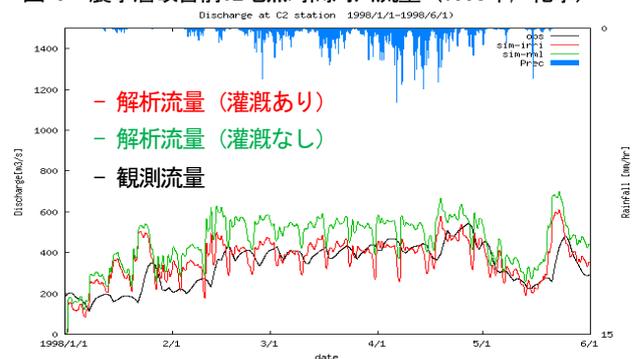


図-10 農事暦改善後C2地点時間河川流量 (1998年，乾季)

る。新たな農事暦作成手法が、乾季灌漑必要水量とその発生時期の推定精度改善に大きく寄与したといえる。農事暦の作成手法の改善による最も大きな点は、二期作のフェノロジーが抽出可能になった点である。これにより、従来の手法で問題であった「乾季初期において、実際には耕作が行われているが、農期と判定されない」グリッドをなくすことが可能となった。なお、1-2月には、河川流量の再現性に大きな改善が見られない。この問題は、農事暦作成時における、農期開始時期の特定手法に原因があるが、水面の存在が抽出可能なリモートセンシングデータNDWIの活用により解決可能である。今後、NDWIにより稲作の開始時期に水田に水を張る時期をとらえる、新たな農期開始時期の特定手法を確立する必要がある。

5. 結論

本研究では、灌漑取水の影響を考慮した陸域水循環モデルの構築を行った。灌漑取・排水を流出・河川流下過程に組み込んだ結果、灌漑の影響を考慮した河川流量を解析する事が可能になった。構築されたモデルを、タイのチャオプラヤ川流域に適用した結果、中流域上流部の水収支が精度良く再現され、貯水池貯水量の再現も可能であった。また、灌漑の効果を組み込んだ結果、中流域における乾季の河川流量の再現性が大きく向上する事が確認された。本研究で構築されたモデルは、グローバルなデータセットから構築を行っており、流域独自のデータとしての大規模貯水池情報と降水量のデータが得られると、他流域への適用も可能なモデルである。今後は他流域でのモデルの検証を行っていく予定である。

参考文献

- 1) Oki, T. and Kanae, S.: Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313, pp1068-1072, 2006.
- 2) H. G. Savenije, P. Van der Zaag : Integrated water resources management: Concepts and issues, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 33, In Press, Corrected Proof, pp290-297,2008.
- 3) Shiklomanov, I.A : Appraisal and assessment of world water resources, *Water international*, Vol.25, No.6, pp.11-32,2000.
- 4) Shiklomanov, I.A : State Hydrological Institute (SHI) and United National Educational, Scientific and Cultural Organization UNESCO, Paris, 1999.
- 5) N.de Noblet-Ducoudre, S. Gervois: Coupling the soil-vegetation-atmosphere-transfer scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets, *Agronomie*, Vol.24, pp397-407,2004.
- 6) N. Hanasaki, S. Kanae, T. Oki.: An integrated model for the assessment of global water resources, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, pp 1007-1025, 1027-37, 2008.
- 7) 谷口智之, 増本隆夫ら: 多様な水田水利利用を考慮した分布型水循環モデルの開発 (I),(II),(III), *水文・水資源学会誌*,22(2),pp101-140,2009.
- 8) 萬和明, 田中賢治, 池淵周一: NDVI 時系列解析による全球作物分類図の作成, *水工学論文集*, 第 49 卷, pp379-384,2005.
- 9) Yorozu, K., K. Tanaka, and S. Ikebuchi : Creating a global 1-degree dataset of crop type and cropping calendar through the time series analysis of NDVI for GSWP2 simulation considering irrigation effect, Proc. of 85th AMS Annual Meeting, 19th conference of Hydrology, 6.8, 2005.
- 10) 萬和明, 田中賢治, 池淵周一: 全球灌漑要求水量と降水量の相関分析, *水工学論文集*, 第 50 卷, pp535-540,2005.
- 11) Kenji Tanaka: Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model, doctoral dissertation, Kyoto University, 2004.
- 12) Viovy N., Arino O., Belward A. S.: The Best Index Slope Extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time-series. *Int. J. Remote Sens.*, 13(8), pp1585-1590, 1992.
- 13) Sellers, P.J., Y. Mintz, Y.C. Sud, and A. Dalcher: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.43, No.6, pp.505-531, 1986.
- 14) 小尻利治, 東海明宏, 木内陽一. シュミレーションモデルでの流域環境評価手順の開発, *京都大学防災研究所年報*, 第 41 号 B-2, pp119-134,1998.
- 15) 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* 2: pp36-40, pp65-69, 2008.
- 16) Razzaque, A., Rainer L., M.M. Islam.: Water use Efficiency of Thabua irrigation project, Thailand, *Journal of Civil Engineering*, Vol.CE28, No.2, 2000.
- 17) Herold, M., Woodcock, C., Mayaux, P., Baccini, A. and C. Schmullius: Some challenges in global land cover mapping: an assessment of agreement and accuracy in existing 1 km datasets, *Remote Sensing of Environment*, 112, pp2538-2556, 2008.
- 18) 北宅洋, 田中賢治ら: NDVI 及び分光反射率の時系列解析による全球 1km メッシュ作物分類図の作成, *水文・水資源学会 2010 年度研究発表要旨集*, pp74-75,2010.

(2010. 9. 30受付)