カンボジア西部穀倉地帯のコメ生産に与える 気候変動および灌漑の影響評価の試み

A TRIAL IMPACT ASSESSMENT ON RICE PRODUCTION BY CLIMATE
CHANGE AND IRRIGATION AT THE GRANARY OF WESTERN CAMBODIA

太田 哲¹・辻本久美子²・本間香貴³・小池俊雄⁴・SO IM Monichoth⁵
Tetsu OHTA, Kumiko TSUJIMOTO, Koki HOMMA, Toshio KOIKE and SO IM Monichoth

¹正会員 修(工) 東京大学地球観測データ統融合連携研究機構 特任研究員 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 博(工) 東京大学大学院工学系研究科 助教 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³非会員 博(農) 京都大学大学院農学研究科 講師 (〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)

⁴フェロー会員 工博 東京大学大学院工学系研究科 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁵MSc, Department of Meteorology, Ministry of Water Resources and Meteorology (Phnom Penh, Cambodia)

Rice yields at the Sangker river basin in western Cambodia are simulated by a coupled model of the distributed hydrological model WEB-DHM and the rice growth model SIMRIW-rainfed. The results are validated by *in-situ* statistical data and FAOSTAT. Then, future rice yields are also simulated by using GCMs outputs. In addition, a simple irrigation model is introduced into the coupled model. By using this model, rice yields in consideration of climate change and irrigation are assessed.

In this study, effectiveness of irrigation in this river basin is shown for both of the present and future climates. The results showed that, by constructing irrigation facilities, a stable rice yield can be obtained even if no yield is obtained at rain-fed paddy fields. Also, this study showed that a variation of future rainfall pattern will affect a variation of rice yield.

Key Words : rice yield, climate change, irrigation, WEB-DHM, SIMRIW-rainfed, Cambodia

1. はじめに

カンボジアの人口の80%は農民で、同国の経済産業は農業に大きく頼っており、GDPの34%、労働力の60%を占める。なかでも稲作は盛んで、水稻生産額は農産物の約80%を占める。ほとんどの水田は天水田(雨水依存)で、降水量および河川の自然流量に大きく依存している。そのため、水循環変動が大きくなると予測されている将来気候では、同国の農業は大きな影響を受けることが考えられる(以上、So Im *et al.* (2013)¹⁾より)。そうした中で、現在、灌漑施設の整備やダム建設などの新規水資源開発が行われつつあり、今後も整備が進んでいくものと予想される。

本研究では、カンボジアの中でも特に稲作が盛んな同国西部に位置するBattambang州に着目し、この州の多くの面積を占めるSangker川流域を対象とする。図-1にBattambang州の位置、および陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)／フェーズドアレイ方式Lバンド合成開口

レーダ(PALSAR)の画像解析により作成したSangker川流域の土地利用分類(文献1より引用)を示す。この流域を対象として著者らが開発した分布型水循環-水稻生育結合モデル²⁾に簡易な灌漑モデル³⁾を組み込み、天水の場合と自然河川流量から取水して灌漑した場合について、現在気候(1981~2000年)と将来気候(2046~2065年)の各条件下でコメの収量を計算する。ただし、対象流域の一部には、流域外のKamping Puoy貯水池からの流入があるが、流量データを入手できていないことと、将来気候での計算のためには貯水池に流入する河川水も計算する必要があるため、本研究では考慮しないこととした。

気候変動下での農業水資源に対する影響については、工藤ら(2012)⁴⁾が既に灌漑を考慮して検討しているが、作物生産量や作物への水ストレスについては言及していない。

また、水循環-灌漑取水-作物生産結合系モデルについては、例えばHanasaki (2010)⁵⁾が全球を対象として既に開発しているが、本研究では、対象地域とその地域の主作物であるイネに限定する。その上で、日本国内外で

図-1 Battambang州の位置（左図の赤色）とSangker川流域の土地利用分類（右図）。灌漑地域は右図の×印より右上方向の下流域に対して設定した。

長年の実績があるイネの生理学的メカニズムに基づいた水稻生育モデルSimulation Model for Rice-Weather Relations (SIMRIW)⁹⁾を天水田用に発展させて水ストレスの影響を精度よく表現できるモデル（通称“SIMRIW-rainfed”）⁷⁾を用いる。また、現地調査を重ねて行い、現地で貴重な統計データを集め、それを用いて収量のモデル計算結果を検証する。将来気候を評価するための大気循環モデル（GCM）の選定過程においても、カンボジア上空域を選択した上で、現在気候の計算で降水量分布（空間分布および月別値）と気圧分布が観測値と比べて再現性の高いモデルを用いる。このように、本研究では、カンボジアの地域特性を重視して、コメ生産に与える気候変動および灌漑の影響を評価する。SIMRIWを用いた同様の研究は、例えば田中ら(2011)⁸⁾が行っているが、水ストレスを考慮しない潜在成長をシミュレートしており、また、土壌水分が十分にあると仮定することによって「灌漑水田」を表現している。本研究では、モデル内で河川水から仮想的に灌漑するため、河川水が少なくなれば灌漑用水も十分に得られなくなることを表現できるようになっている。

2. 方法

(1) 水循環－水稻生育結合モデル（「天水版」）

分布型水循環モデルWater and Energy Budget-based Distributed Hydrological Model (WEB-DHM)^{9)~11)}と水稻生育モデルSIMRIW-rainfedを結合したモデル²⁾を用いる。このモデルは天水用に開発され、土壌水分量に応じてイネに水ストレスが与えられ、それによって成長速度や乾物重量が変化する現象を表現できるようになっている。

(2) 水田域の同定および土壌物理特性の決定

既往研究¹⁾と同様に、水田域の同定にはALOS/

図-2 Battambang州で収集したコメの収量統計データ

PALSARの2010年9~10月の画像解析から得られた結果を用いる（図-1右）。また、土壌物理特性（土性の割合、透水系数）には地球観測衛星「Aqua」搭載の高性能マイクロ波放射計（AMSR-E）の輝度温度データを用いた陸面データ同化システム（LDAS-UT）により算出された結果を用いる。これらの値は、現在気候と将来気候とで変わらないものとする。

(3) 収量統計データの収集

Battambang州において、1979~2003年の農業統計データを収集した。対象のSangker川流域と同州の地理的範囲は必ずしも一致しているわけではないが、水田の範囲は概ね重なっている。このデータには、収穫可能な水田の収量が含まれており、雨季作（6~12月）と乾季作（1~5月）に分けて集計されている（図-2）。図-2より、概して乾季作のほうが雨季作よりも収量が多いことが分かる。これは、乾季作においては、灌漑が可能で、かつ施肥が十分に行える水田でのみ栽培しているためである。したがって、乾季作の収量から潜在収量を推測することができ、本研究では3 t/haとする。

また、より長期の統計データを得るために、国際連合食糧農業機関（FAO）発表の統計データ（FAOSTAT, 1981~2012年、カンボジア全土平均、<http://faostat.fao.org/>）も併せて用いる。

(4) 作付日の設定

So Im *et al.* (2013)¹⁾によると、対象地域での作付けは8月下旬頃に行われることが多い。そこで、本研究では雨季作を対象とし、作付日を8月20日（閏年の場合は8月19日）に設定する。この地域のイネの品種は約3カ月で収穫を迎えるため、生育期間は概ね9~11月となる。

(5) 現在気候計算に用いる入力データ

Battambang州において、1981~2008年の1地点の日雨量データを収集した。現在気候でのモデル計算には、日雨量を24時間に均等配分した時間雨量を用いる。

また、風速・風向・気温・気圧・短波放射・長波放射

図-3 現在気候における雨季作米の収量のモデル計算結果（縦棒：9～11月の積算降水量，緑色破線：窒素供給パラメータ調整前の計算結果，緑色実線：窒素供給パラメータ調整後の計算結果，青色実線：雨季作米の現地収量統計値，黒色実線：FAOSTATの統計値，灰色点線：FAOSTATの統計値の回帰直線）

については，気象庁の長期再解析データ（JRA-25，1979～2004年，<http://jra.kishou.go.jp/JRA-25/>）を用いる。

(6) 「天水版」モデルの検証

(1)の「天水版」モデルを現在気候（1981～2000年）の各年について実行した。モデルにより計算されたコメの収量を図-3の緑色破線で示す。同図の雨季作米の現地収量統計値（青色実線）と比較すると，年々変動は比較的良好に再現できているが，絶対値が2倍ほど大きい。その主な原因としては，対象期間に実際に栽培されたイネの品種やその割合，施肥量が分かっていないことが挙げられる。

図-3の雨季作米の現地収量統計値（青色実線）およびFAOSTATの統計値（黒色実線）の双方について収量の増加傾向が見られるのに対し，緑色破線のモデル計算では収量の顕著な増加傾向は見られないことから，人為的な影響が現れている可能性が考えられる。そこで，肥料の量や質が年々向上してきたのではないかと仮説を立てた。本研究では，SIMRIW-rainfedの窒素供給パラメータと収量の間に線形に近い関係がある（図-4）ことに着目し，そのパラメータを調整することでモデルの再現性の向上を図る。

パラメータの調整にあたっては，より長期の統計値が利用可能なFAOSTATを用いた。図-3のFAOSTATの統計値の回帰直線（灰色点線）にモデルの計算結果の回帰直線が乗るように，窒素供給パラメータの値を毎年単調増加させるという条件（仮定）で調整した。その結果を同図の緑色実線で示す。このとき，1981年におけるパラメータの値は $0.001942 \text{ g/m}^2/\text{C}$ （調整前の0.33倍），2000

図-4 水ストレスのない条件下での窒素供給パラメータとコメの収量の関係（シミュレーション結果）

年では $0.004241 \text{ g/m}^2/\text{C}$ （同0.73倍）で，他の年は線形補間した値を設定している。その結果，収量の増加傾向を再現することができた。年々変動の傾向が調整前後で多少変化している部分があるが，これは窒素供給量を減少させたことによって収穫可能な水田グリッド数も変化したことが影響しているものと推測される。

1980年頃は無施肥あるいはそれに近い状況であったと考えられるため，調整後の窒素供給パラメータの値は妥当な範囲内であると思われる。

現地収量統計値（青色実線）については，日本のそれと比べて精度が悪いことが知られているが，雨季の降雨や日射量などの気象変動に起因する収量変化が現れているものと考えられる。イネの生育期間である9～11月の降水量と比較すると，収量の変動と降水量の変動は概ね一致しているものの，不一致も認められる。これについては，日単位のデータで詳しく検証する必要がある。また，モデル計算では作付日を固定しているため，作付日の調

図-5 現在気候（1981～2000年）と将来気候（2046～2065年）の平均月別降水量（9～11月がイネの生育期間）

整によって再現性を高められる可能性は残されているが、検証に必要なデータが揃っていないため、本研究では、窒素供給パラメータ以外は調整しないこととした。

(7) 将来の窒素供給パラメータの設定

(3)で述べたように、理想の条件下に近い乾季作の収量を3 t/haとしたため、十分な施肥条件下での収量も同程度になると考えられることから、収量が3 t/haに達するときの窒素供給パラメータを逆推定し、将来気候での計算では固定値として設定した。図-3のFAOSTATの統計値の回帰直線より、収量が3 t/haに達するのは2015年と分かり、そのときの窒素供給パラメータの値は0.006056 g/m²/°C（調整前の1.04倍）である。

(8) 簡易灌漑モデルの導入（「灌漑版」）

(1)の「天水版」に対し、簡易な灌漑モデル³⁾を導入した。現地調査から、地形勾配を利用した自然氾濫および小規模ポンプ灌漑が主流であることが確認されたことから、ここでは、地形に応じて氾濫し得る範囲で水田グリッドに導水できるとする。現地では、あちらこちらの川辺から取水している様子が見られたため、本モデルでは、「河川」グリッドのすべてが取水堰であると仮定する。また、現地でのヒアリングにより、上流側で取水し過ぎないように話し合いで決めていることがわかったため、灌漑区域では下流の水需要を考慮して取水するように灌漑モデルは工夫されている。

本研究では、灌漑施設の建設が計画されている下流域を対象に、モデル上で灌漑区域を設定する（図-1右の×印より右上方向）。また、×印地点での2008年の河川流量データによると、渇水流量はほぼ6 m³/sであった（それ以外の年の流量は観測していない）ため、環境流量を6 m³/sと設定し、河川流量がそれより下回る場合は取水できないこととする。

(9) 将来気候の評価

第3次結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP3）に

図-6 現在気候（1981～2000年）と将来気候（2046～2065年）の年毎の月別降水量（9～11月がイネの生育期間）

参加している24の大気循環モデル（GCM）の中から2つを選ぶ。既往研究¹⁾と同様に、カンボジア領域において現在気候の計算が全球降水気候計画（GPCP）と降水空間分布が相似しているモデルを選ぶ。その結果、アメリカ地球物理流体力学研究所のGFDL CM2.1と日本のMIROC 3.2 HIRESが選ばれた。これを、現在気候（1981～2000年）の現地観測降水量を用いて、Nyunt *et al.* (2012)¹²⁾ による方法でバイアス補正した。その結果を図-5に示す。また、20年分の月平均を取る前の月別降水量を図-6に示す。これより、将来気候では現在よりも降水量の変動が大きくなることが分かる。これらの雨量データは実際には日単位であるため、日雨量を24時間に均等配分した時間雨量を用いる。

(10) 総合評価

以上のプロセスを経て、現在気候（1981～2000年）および将来気候（2046～2065年）の天水および灌漑開発下でのコメ生産について検討する。

図-7 現在気候（1981～2000年）と将来気候（2046～2065年）のSangker川流域におけるコメの収量

図-8 現在気候（1981～2000年）と将来気候（2046～2065年）のSangker川流域におけるコメの収穫面積

3. 結果と考察

図-7に、現在気候（1981～2000年）と将来気候（2046～2065年）のSangker川流域におけるコメの収量を示す。また、図-8に、同じくコメの収穫面積を示す。

これらの図から、現在および将来気候条件下においても、天水では収穫が少ない年であっても河川からの灌漑により収量および収穫面積を増やせることが分かる。特に、MIROC 3.1 HIRESでは2050年頃に流域全体で天水では収穫できない年があるが、河川からの灌漑だけでも収穫できることが分かる。裏を返せば、灌漑施設を建設しなかった場合、将来危機的な状況になる可能性があることを示唆している。

図-7の中で、天水のほうがわずかに収量の多いときがあるが、これは、適切な水ストレスを与えたほうがコメの収量が増えるという現象のためであると考えられ、灌漑の場合でも実際には中干しをして適度な水ストレスを与えるものと思われる。

図-8より、灌漑した場合には一定の収穫量が確保できることが分かり、安定した食糧生産につながる事が期待される。

図-6より、将来気候においてはGFDL CM2.1のほうがイネの生育期間の降水量のばらつきが大きく、同期間が少雨の年も多いため、収穫面積が減る年が多くなると考

えたが、むしろMIROC 3.2 HIRESのほうが少なかった。図-5の月別の20年平均を見ても、現在気候に比べて降水量が少ないわけではないにもかかわらず、現在気候よりも収穫面積が少ない。これについては、例えば無降雨日数などのより細かい情報を調べることで解明できる可能性がある。

4. おわりに

本研究では、利用できる情報に制限のある流域を対象として、気候変動や灌漑がコメの生産に与える影響について、流域スケールで評価を試みた。十分な検証はできておらず、モデルの計算結果はまだ実用レベルには達していないが、実際のイネの作付日や品種、水田の分布などが分かれば、より精度の高いシミュレーションができるものと期待している。また、イネが枯れても条件が整えば再び作付けするなどの人間活動のモデル化も、シミュレーション精度を上げるためには必要な要素であると考えている。

本研究を通して明らかになったモデルの問題点については今後の課題として取り組み、カンボジアの現地の方々が必要とする情報を発信できるようなモデル開発を目指す。

謝辞：本研究は、大学発グリーンイノベーション創出事業「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス（GRENE）」環境情報分野「分野連携による地球環境情報統融合ワークベンチを活用した流域レジリエンスの向上」（代表 柴崎亮介）、気候変動適応戦略イニシアチブ「地球環境情報統融合プログラム」（代表 小池俊雄）、宇宙航空研究開発機構（JAXA）「環境のための宇宙利用（SAFE）」統合水資源管理分野「カンボジア西部における気候変化下での水と食料の安全保障」（代表 小池俊雄）の支援を受けて実施した。また、カンボジア水資源気象省には、現地調査等において多大なるご尽力を賜りました。ここに記して深く謝意を表す。

参考文献

- 1) So Im, M., Tsujimoto, K., Aida, K., Tamagawa, K., Ohta, T., Koike, T., Nukui, T., Sobue, S. and Homma, K.: Water and food security under climate change in Cambodia, *The ISTS special issue of Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan*, minor revision, 2013.
- 2) 辻本久美子, 本間香貴, 小池俊雄, 太田哲：天水農業に必要な水文気象情報の把握のための分布型水循環－水稻生育結合モデルの開発, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69-4, pp.I_511-I_516, 2013.
- 3) Tsujimoto, K., Homma, K., Koike, T. and Ohta, T.: Development of a coupled model of a distributed hydrological model and a rice growth model for optimizing irrigation schedule, *European Geosciences Union (EGU)*, Vienna, Austria, 2013.
- 4) 工藤亮治, 増本隆夫, 吉田武郎, 堀川直紀：気候変動が灌漑主体流域における農業水利用に与える影響の定量的評価法, 農業農村工学会論文集, Vol.277, pp.31-42, 2012.
- 5) Hanasaki, N.: A brief review of development and application of H08, a global water resources model, *Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol.7, No.3, pp.79-90, 2010.
- 6) Horie, T.: A model for evaluating climatic productivity and water balance of irrigated rice and its application to Southeast Asia, *Southeast Asian Studies*, Vol.25, No.1, pp.62-74, 1987.
- 7) Homma, K. and Horie, T.: The present situation and the future improvement of fertilizer applications by farmers in rainfed rice culture in Northeast Thailand, *Fertilizers: properties, applications and effects*, ISBN: 978-1-60456-483-9, Editors: L.R. Elsworth and W.O. Paley, Nova Science Publishers, Inc., N.Y., Chapter VII, pp.147-180, 2009.
- 8) 田中 慶, 木浦卓治, 杉村昌彦, 二宮正士, 溝口 勝：SIMRIWを利用した水稻栽培可能性予測支援ツール, 農業情報研究, Vol.20(1), pp.1-12, 2011.
- 9) Wang, L., Koike, T., Yang, K., Jackson, T., Bindlish, R. and Yang, D.: Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99), *Journal of Geophysical Research*, Vol.114, D08107, doi: 10.1029/2008JD010800, 2009a.
- 10) Wang, L., Koike, T., Yang, K. and Yeh, P.: Assessment of a distributed biosphere hydrological model against streamflow and MODIS land surface temperature in the upper Tone river basin, *Journal of Hydrology*, Vol.377(1-2), pp.21-34, 2009b.
- 11) Wang, L., Koike, T., Yang, D. and Yang, K.: Improving the hydrology of the Simple Biosphere Model 2 and its evaluation within the framework of a distributed hydrological model, *Hydrological Sciences Journal*, Vol.54(6), pp.989-1006, 2009c.
- 12) Nyunt, C.T., Yamamoto, H., Yamamoto, A., Nemoto, T., Kitsuregawa, M. and Koike, T.: Application of bias-correction and downscaling method to Kalu Ganga basin in Sri Lanka, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol.68, No.4, pp.I_115-I_120, 2012.

(2013. 9. 30受付)