

圃場での聞き取り調査に基づく地域スケールの収量予測 —タイ東北部におけるモデル構築事例—

澤野真治¹

Modeling for simulating the regional rice yield of rain-fed lowland rice based on farm survey in Northeast Thailand
Shinji SAWANO¹

1. はじめに

広域を対象として、気候変化も含む作物の環境応答特性を評価することは、世界規模の食糧問題の解決の糸口を探る上で重要な課題である。作物の環境応答特性を総合的に評価するにあたり、養分吸収や水利用といった作物生育プロセスを取り込み、設定した条件下での成長を予測する事ができる作物モデルは有効なツールである。

一般に、作物モデルは圃場での計測結果に基づいた主要なプロセスの関数化やパラメタリゼーションによって構築される。一方、農業の生産性は、環境要因だけでなく品種改良、施肥や機械の導入といった栽培技術要因の影響も受ける。また、こうした栽培技術は、気候や経済事情を受けて地域による違いがある。従って、評価対象とする空間スケールを拡大していった場合、取り扱う農業の生産性に関するデータは、圃場スケールで生じている水・物質循環と作物の応答以外の要因の影響も含んでいる可能性がある。その結果、圃場での計測結果に基づいて構築された作物モデルをそのまま広域に適用する事は、モデルによる予測結果に不確実性が含まれていることが予想され、地域によって変わる栽培技術要因の影響を新たに作物モデルに組み込む事が必要となる。

そこで、本稿では、圃場での計測結果に基づいて構築された作物モデルを広域に適用する第一歩として、タイの国土面積の3分の1を占め、タイにおける主要な水稲生産地域であるタイ東北部の天水田を対象に行った地方行政区分スケールへのアップスケーリング事例(Hasegawa et al., 2008; Sawano et al., 2008)を通じて、広域へのアップスケーリングのために加えるべき視点について考えてみたい。

2. 作物モデルの概要

Hasegawa et al. (2008) で用いた作物の成長を予測

する作物モデルについて以下に簡単に説明する。作物の成長の予測は水利用効率を用いて推定する。これは当初降水量に依存する作付体系である天水田を対象として水ストレスが作物の成長に及ぼす影響を評価する事も考慮に入れていたためである。この作物モデルでは、気温や日射の条件以外、つまり水ストレスや病虫害といった作物生育に負の影響を及ぼす要因の制約が無い場合の最大到達可能な収量を予測している。収量の推定は以下の手順で計算される。

$$\frac{dW}{dt} = WUE \times ET_0 \times FCC \quad (1)$$

$$W = \int \frac{dW}{dt} dt \quad (2)$$

$$Y = HI \times W \quad (3)$$

ここで、WUEは水利用効率 ($g\ Kg^{-1}$)、 ET_0 はFAO基準蒸発量 ($mm\ day^{-1}$)、FCCは植被率、HIは収穫指数、Wは水稲のバイオマス量 ($g\ m^{-2}$)、またYは収量 ($g\ m^{-2}$)を表す。水利用効率と収穫指数は、それぞれ $4g\ kg^{-1}$ と 0.3の一定値とし、FAO基準蒸発量はFAO-56 (Allen et al., 1998)の手法に基づく。長期の予測を実施する際には、栽培技術の進歩も収量の趨勢に大きく影響する。Hasegawa et al. (2008)では、栽培技術の進歩が水稲の生育に及ぼす影響を、窒素肥料投入量の増加に伴う水稲群落の最大植被に現れると仮定し、最大植被率を肥料投入量の関数とした。なお、栽培期間中の植被率の増加速度は、気温と最大植被率によって表現する。また、水稲の生育の進行は有効積算温度と日長の影響を表す関数によって表現する。その際、移植から出穂までは積算気温で $1600\ ^\circ C\ day$ (基底温度 = $8\ ^\circ C$)、出穂から収穫までの積算温度を $1000\ ^\circ C\ day$ (基底温度 = $0\ ^\circ C$)とした。なお、日長は移植から出穂までの期間のみ影響するとした。

3. 広域化へのアプローチ

統計データの集計単位としてしばしば見られる地方自治体くらいの空間的な広がり集計された収量は、その

¹Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, Japan.
Corresponding author: 澤野真治, ¹森林総合研究所
2012年9月18日受稿, 2012年10月26日受理
土壌の物理性 122号, 45-50 (2012)

領域内の様々な環境条件下にある圃場での結果を集計している。対象とする領域が広がるほど、こうした圃場ごとの環境条件にはより多様性が出てくると考えられる。また、これらの圃場の環境条件は気候変動などの環境変動に対する応答が異なる可能性が考えられる。従って、作物モデルを用いて広域の水・物質循環が作物の生産性に及ぼす影響の評価や、気候変化に代表される環境変動が作物の生産性に及ぼす影響の評価には、対象領域内の各圃場のばらつきを生んでいる要因を把握してモデルに組み込む必要がある。

環境条件の違いを表現する手段として、気象や土壌などのGISデータセットを用いる事が考えられる。これは、データセットそのものが、降水量や気温といった気象条件や土壌中の窒素などの肥沃度の地理的な分布を有しているからである。一方で、こうしたGISデータを用い

てもなお、圃場の環境条件のばらつきをうまく表現できない場合もある。これは、用いるGISデータセットの空間解像度が、圃場一つの空間スケールよりもかなり粗い場合である。これは、大陸や全球といったより広い領域を対象とした場合や、より細かい土地利用形態の特徴を有する地域を対象とした場合にしばしば見られる。従って、領域内の圃場における環境条件の違いを踏まえたモデル作りは、その領域の利用可能なデータセットや圃場の空間スケールや地域的な特徴に応じてなされる事が要求される。

モデル入力に用いる気象データは、東アングリア大学気候研究所が公開しているデータセット (CRU, Mitchell et al., 2004, <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data>) を内挿したのち県単位の平均値として用いている。このデータは全球の気象データを統一的手法で構築して

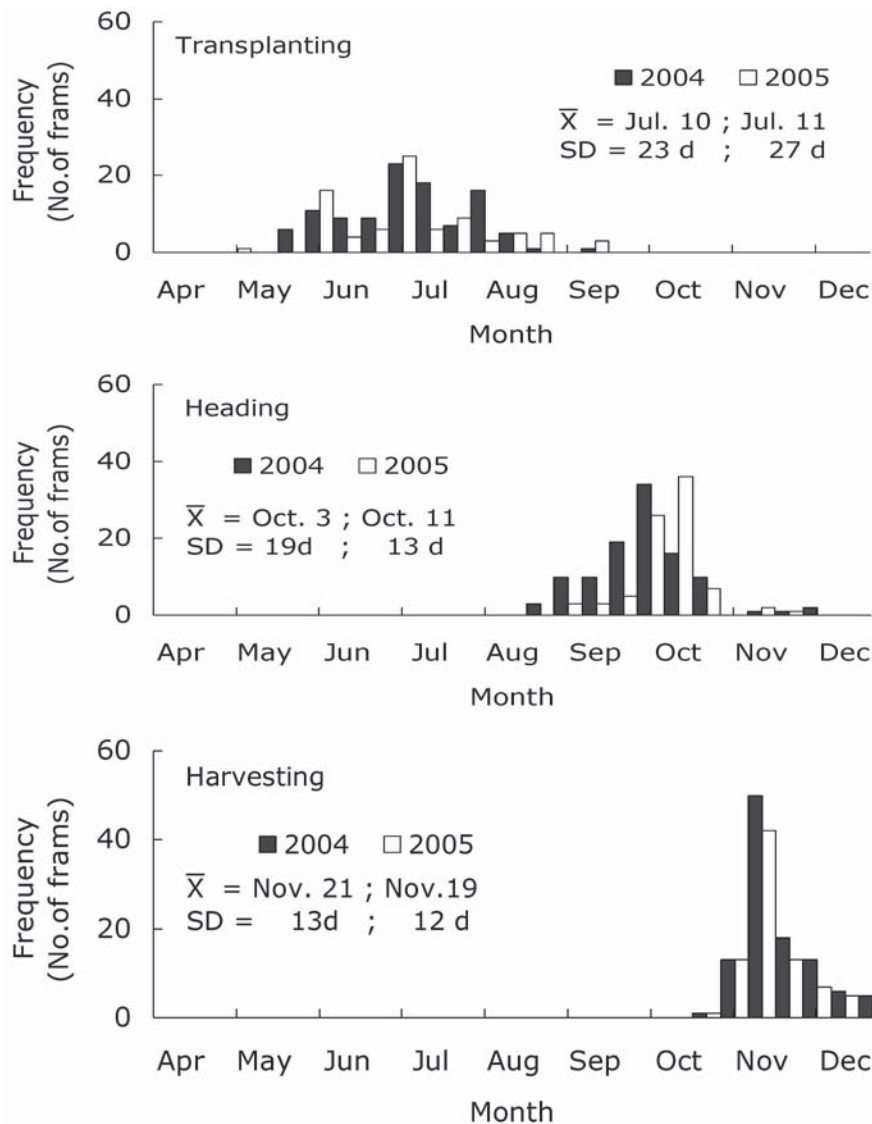


Fig. 1. タイ東北部における聞き取り調査に基づく2004年及び2005年の2カ年の移植日、出穂日及び収穫日における頻度分布。移植が実施された水田での結果のみを示す (2004年はn=106, 2005年はn=83)。図中のXはサンプルの平均値, SDは標準偏差をそれぞれ表す。Frequency distribution of sowing, transplanting, heading and harvesting dates of the farms surveyed in Northeast Thailand in 2004 and 2005. Only transplanted paddy fields are shown (n=106 in 2004 and 83 in 2005), X is the mean, and SD is the standard deviation of the dates each year.

いるという特徴があるが、データセットの空間解像度0.5度であり圃場の大きさと比べても粗い。一方、土壌の肥沃度は作物の窒素含有量に影響を及ぼし、土壌の肥沃度の空間的な不均一性は圃場ごとの収量のばらつきに大きく影響する (Miyagawa and Kuroda, 1988; Homma et al., 2001; 2003)。しかし、広域を対象に限られた情報のみで土壌の肥沃度が圃場毎の収量のばらつきに及ぼす影響を評価する事は難しい。従って、入力データとして利用可能な気象データだけではタイ東北部の圃場における環境条件の違いを表現するには不十分であり、タイ東北部における水稲生産の地域的な特徴を新たに抽出する必要がある。

Hasegawa et al. (2008) や Sawano et al. (2008) で地域スケールのモデル構築の対象としたタイ東北部は、短い水平距離に対して標高の変化があるという微地形的な特徴を有している。また、水田地帯の土地利用形態は、Nong と呼ばれる水平距離数百 m ほどの小流域を一つの単位として圃場群が分布し、個人は Nong の斜面方向に対して短冊状に圃場を所有している (Suzuki et al., 2003)。また、水稲栽培の地域的な特徴として、灌漑設備の導入がなされているものの、依然として天水田の割合が大きい事が挙げられる。この地域の年降水量は南西部で 1100 mm、東北部で 1800 mm 程度であり、南西から北東に向かって年間の降水量が増加する特徴がある。こうした土地利用形態と降水量の分布は、微地形や降水量に対する立地に応じて水環境の違いを生んでおり、圃場スケールでの観測研究においても、この水環境の違いが圃場毎の生産性のばらつきを生んでいることが明らかになっている (Homma et al., 2001; Suzuki et al., 2003)。しかしながら、タイ東北部各県の統計収量では、降水量の年変動と比較すると収量の時系列の変動は大きくない。

タイ東北部の圃場での生産性を積み上げたデータである統計データで、圃場毎の水環境の違いによって変動す

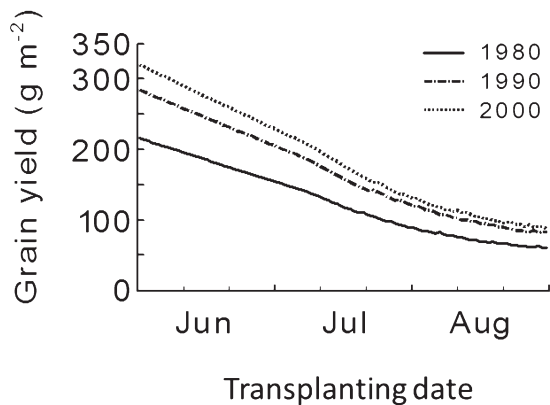


Fig. 2. モデル計算により示される移植日の違いが水稲収量に及ぼす影響。移植日は6月1日から8月31日までとし、Khon Kean 県を対象に1980年、1990年及び2000年の気象データ及び窒素肥料投入量を用いて計算を行った。Simulated response of rice grain yield to transplanting dates from June 1 to August 31 for Khon Kaen Province in 1980, 1990, and 2000

る水稲生産性の影響が見えなくなるのはなぜだろうか？筆者らのグループは、ここに見られるギャップの原因をモデル化する事で、タイ東北部の県単位の水稲生産性の特徴を理解する事ができると考え、そのための聞き取り調査を実施した。聞き取り調査は、2004年と2005年の2カ年で実施し、タイ東北部の19の県のうち11県で149の農家を対象とした。聞き取り項目は主に栽培管理に関するもので、植え付け方法、水管理手法、栽培品種及び、播種、移植、出穂と収穫の日付である。

特徴的な結果として、栽培暦が挙げられる。播種や移植といった栽培を始める時期は地域的に大きくばらつきがあるが、出穂や収穫といった栽培期間後半のイベントが起こる時期の地域的なばらつきは少ない (Fig. 1)。これは、場所によって生育期間が大きく異なる事を意味しており、生育期間の違いに起因して収量も違ってくる可能性が予想される。聞き取り調査の結果では15の水稲品種が栽培されている事が確認されたが、Khao Dawk Mali 105 (KDML105), RD6 や RD15 といった比較的古い感光性品種がサンプルの90%以上を占めており、Miyagawa (1995) や FAO (2002) といった他の報告と合わせても、これらの品種は長い期間栽培され続けている。Sawano et al. (2008) では水稲の感光性を考慮した栽培暦モデルを構築しており、この栽培暦モデルと前節の作物モデルとを組み合わせることで移植時期に対応した収量を計算した例が Fig. 2 になる。ここでは、3カ年の気象データと窒素肥料投入量を用いて計算した例を示しており、移植時期の違いによって収量が大きく異なり、早い時期に移植した場合ほど栽培期間が長いことを通じて収量が大きくなる事が示されている。そのため、“いつどのくらいの面積の水田で移植を行ったのか”という事を知ることが、タイ東北部の水稲収量予測において重要

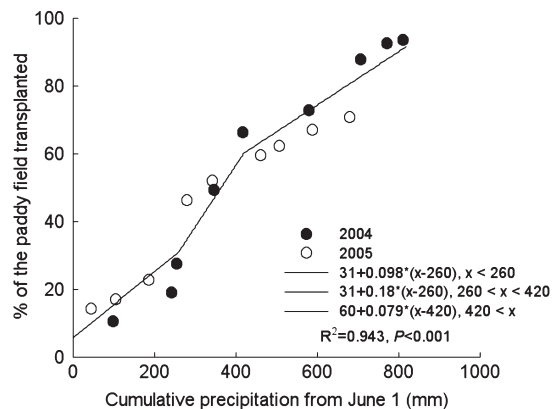


Fig. 3. 6月1日からの積算降水量で表される移植面積割合の増加。2005年は雨季の開始の遅れにより直播圃場が2004年より増えたため、移植面積割合の算出には2004年の移植された圃場の数 (n=106) を元としている。Progress of percentage of the paddy fields transplanted in 2004 and 2005 in 11 provinces in Northeast Thailand, as a function of cumulative precipitation from June averaged for 11 WMO stations each year. The percentage is based on the number of farms transplanted in 2004 (n=106).

になってくる。なお、年次による収量の計算値の違いは窒素肥料投入量の違いに起因している。

天水田が湛水を開始する時期は当然降水パターンに依存する。従って、播種や移植時期のばらつきは降水条件の違いに起因していると考えられる。タイ東北部では、北東部ほど降水量が多いという降水量の地理的な分布の特徴がある。聞き取り調査を行った2004年と2005年でも降水量の地理的な分布は同様であり、また栽培期間である4月から10月までの総降水量に大きな違いは無かったが、2004年は2005年に比べて雨季の開始及び終了が早く、その結果4月から8月上旬までの雨季前半から中盤にかけての降水量が多かったという降水量の季節的なパターンに違いが見られた。聞き取り調査で得られたタイ東北部の移植時期には、タイ東北部内の降水量の地理的な分布の違いによらず広範なばらつきが見られた。一方で、移植された水田の面積割合の推移は雨季前半の降水量が多かった2004年の方が2005年に比べて早く、2カ年の降水量の季節的なパターンに起因する移植面積割合の推移の違いは、移植が本格的に開始される6月1日からの積算降水量を用いる事で統一的に表現することが可能であった (Fig. 3)。これは、タイ東北部の農家の土地所有形態と併せて考えると、それぞれの農家は微地形的に湛水しやすい圃場から移植を始めるという水環境の立地条件に応じた移植スケジュールを選択しているのでは

ないかということが推察される。また、移植面積割合の推移には傾きが異なる3つの領域がある。このことは、移植の進捗状況が降水だけでなく、苗や労働力の調達といった要因の制約を受けている事を反映している可能性がある。

これらの結果を受けて、栽培を開始する時期である移植のイベントの降水依存性が生育期間の長さを通じて、タイ東北部の地域的な水稲生産が特徴付けられているという仮説を立て、移植面積の増加を雨季の季節進行を表す指標で表現する事とした。年々の雨季の進行は、6月から積算降水量と6月からの3ヶ月降水量の気候値との比を用いて表す事とする。

4. モデル適用結果及び考察

このようにして、雨季の進行に伴って移植された水田面積割合が増加する様子をモデル化することで、実際の県単位の収量の再現性はどのように向上するのだろうか？ここでは、2つの条件を設けて比較することでその効果を示す。一つ目の条件は、県の降水量が一定量に達した時に移植が実施されるというものであり、Hasegawa et al. (2008) において case1 として各県の4月1日からの降水量が600 mm に達したときにその県で移植が一斉に実施されるとしたものである (Fig. 4 中の case1)。この場合、県内部の移植日のばらつきは無視さ

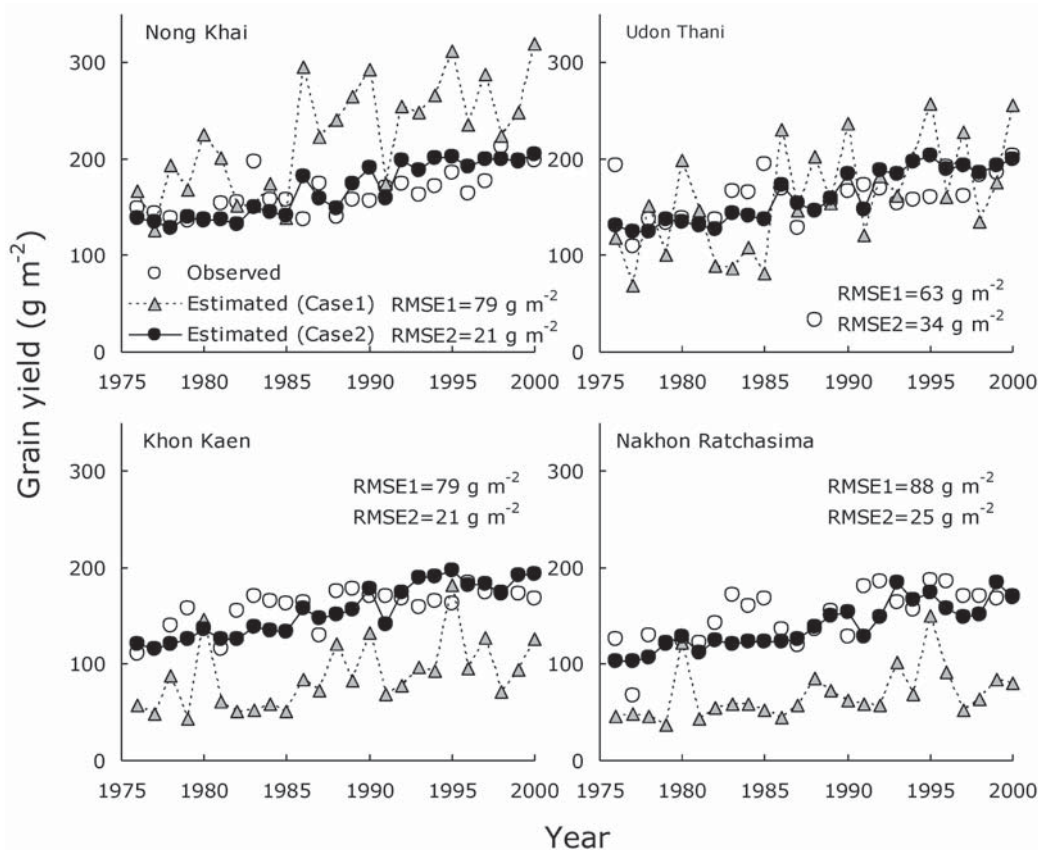


Fig. 4. 1976年から2000年までの降水量が異なる4県での統計収量及びモデルシミュレーション結果の時系列変化。モデルシミュレーションは本文中で示した2つの条件での結果を示している。

Time courses for observed and simulated grain yield for 4 provinces in Northeast Thailand from 1976 to 2000. The simulation was conducted for each of two cases described in the text.

れるが、降水量の地域的な違いに起因して県毎の移植日にはばらつきが生じる。二つ目の条件は、ここで導入した雨季の進行に伴う移植された水田面積割合の増加のサブモデルによって、県内部及び県毎に移植日にばらつきが見られる (Fig. 4 中の case2)。この二つの条件で 1971 年から 2003 年までの期間で計算した結果が Fig. 4 である。一つ目の条件で行った計算は、降水量の年変動の影響を受けて推定された収量の年変動が統計収量の年変動と比較して大きかった。また、推定された収量の絶対値は、降水量の多寡の影響を受けており、降水量がタイ東北部の中で多い北東部の Nong Khai では統計収量よりも値が大きく、降水量が少ない Khon Kaen や Nakhon Ratchasima では統計収量よりも値が小さくなる傾向が見られた。一方で、移植面積変化のサブモデルを導入する事で、降水量の年変動や地理的分布の影響が薄まり、降水量の年変動に比べ収量の変動が小さいという県単位の統計収量の趨勢を良好に再現することができた。なお、統計収量に見られる長期的な上昇トレンドは主に窒素肥料投入量の増加が反映している。ここで用いた作物モデルでは窒素肥料投入量が植被率を通じて収量に及ぼす影響を取り扱っており、モデルで計算した収量も統計収量と同様な長期的なトレンドを再現することができた。このことは環境変動が作物の生産性に及ぼす影響に加え、窒素肥料投入量という栽培技術オプションによる環境変動への適応手法の効果を広域で考察する事が可能となる。

タイ東北部天水田地域における圃場スケールでの観測研究では、水環境の違いが圃場毎の生産性のばらつきを生んでいることが明らかになっている (Homma et al., 2001; Suzuki et al., 2003)。圃場でのモニタリングに基づいて作物モデルを構築する場合、例えば水環境が圃場毎の生産性に大きく影響を及ぼす時には、水ストレスが作物の成長に影響を及ぼす効果をサブモデルとして作物モデルに導入するという形で、モニタリングにより得られた知見がモデル構築に反映される。

一方で、タイ東北部各県の統計収量では、降水量の年変動や地理的な分布と比較すると収量の時系列や地域的なばらつきは圃場での研究結果と比べ大きくない。一般に、作物の統計には作付面積と収穫面積の両者が記載されていることが多い。また、洪水、渇水や病虫害などが発生した年には、作付面積と収穫面積が大きく違う事がある。これは、収穫量の著しい低下が予想される場合には収穫を放棄することがあるからである。

ところが、多くの作物モデル (例えば, Bouman et al., 2001) は、単位面積あたりの値を出力値として扱っており、栽培期間中の気象等の影響によって栽培面積が変化しうることを想定していない。この点について、単純に圃場スケールの作物モデルを広域に適用した場合、仮に計算結果が統計収量を良好に再現していたとしても、得られた結果は現実と乖離している可能性を含んでいる。

ここでのアプローチは、移植の有無にかかわる要因の

みで環境の影響が考慮されている。一方で、移植が実施された後の期間で気象害が生じ栽培が放棄されるような場合はどのような事を考慮すべきであろうか。例えば、この地域には洪水による影響も気象害の一つとして報告されている。雨季中盤から終盤にかけて洪水が起こった場合、移植が既に終わった水田が被害を受けることになる。この場合、圃場において生産活動が持続可能かどうかについての予測をする必要がある。例えば、水文モデルを用いて湛水している領域の推定と作付面積との間に一定の関係が得られた場合 (例えば, Ishigooka et al., 2010)、湛水面積を通じて作付時期、最終的な作付面積や水不足により放棄された面積といった圃場の情報を作物生産の予測に役立てる事ができるようになるかもしれない。このように水循環モデルと作物モデルとを、広域の作物生産に影響を及ぼす要因で統合することで、対象とする領域の水稲生産の特徴を踏まえることができ、気候変化など未知の環境変動に対する作物生産も含んだ水・物質循環のモデルシミュレーションが可能になると考えられる。

5. おわりに

本稿では、圃場での計測結果に基づいて構築された作物モデルを広域に適用する第一歩として、タイ東部の天水田を対象に行った県単位収量予測のためのアップスケリング事例を通じて、広域へのアップスケリングのために加えるべき視点について考えてみた。

圃場スケールにおけるモニタリングでの結果と統計収量との間に見られるギャップを明らかにするために、現地の農家への聞き取り調査を実施し、地域スケールで見たタイ東部の天水田における水稲生産の特徴の把握を行った。その結果、既往のモデリングアプローチよりも統計収量の時系列や地理的な特徴を良好に再現することができた。

広域を対象とする場合、検証データとして統計値を用いることが一般的である。しかし、統計値の集計と圃場でのモニタリングが同様の条件で行われているかどうか不明である場合がある。この場合、対象領域の特徴を把握するための調査を別途行う必要がある。なぜならば、気候変化や環境の変化といった未知の状況下における予測を行う際、地域の環境に適応した栽培方法などの特徴を踏まえること無く予測した結果は、将来起こりうる影響から大きく外れている可能性を有することになるからである。

引用文献

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. pp.15–86, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome.
- Bouman, B. A. M., Kropff, M. J., Tuong, T. P., Woperies, M. C. S., ten Berge, H. F. M., and van Laar, H. H. (2001): ORYZA2000: Modeling lowland rice. pp.23–77, International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, Wageningen University and Research Center, Wageningen, The

- Netherlands.
- Food Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2002): FAO rice information, vol. 3, p.222, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Hasegawa, T., Sawano, S., Goto, S., Konghakote, P., Polthanee, A., Ishigooka, Y., Kuwagata, T., Toritani, H. and Furuya, J. (2008): A model driven by crop water use and nitrogen supply for simulating changes in the regional yield of rain-fed lowland rice in Northeast Thailand. *Paddy water Environ*, 6:73-82.
- Homma, K., Horie, T., Ohnishi, M., Shiraiwa, T., Supapoj, N., Matsumoto, N., and Kabaki, N. (2001): Quantifying the toposequential distribution of environmental resources and its relationship with rice productivity. In: Fukai, S., Basnayake, J. (ed.) *Increased lowland rice production in the Mekong Region*, pp.281-291. Proceedings of an International Workshop, Vientiane, Laos.
- Homma, K., Horie, T., Shiraiwa, T., Supapoj, N., Matsumoto, N., and Kabaki, N. (2003): Toposequential variation in soil fertility and rice productivity of rainfed lowland paddy fields in mini-watershed (Nong) in Northeast Thailand. *Plant Prod. Sci.*, 6:147-153.
- Ishigooka, Y., Kuwagata, T., Goto, S., Toritani, H., Hasegawa, T., Sawano, S., and Ohno, H. (2010): Estimation of water saturated areas in Northeast Thailand using a large-scale water balance model. *J. Agric. Meteorol.*, 66:91-101.
- Mitchell, T. D., Carter, T. R., Jones, P. D., Hulme, M., and New, M. (2004): A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). *Tyndall Center Working Paper* 55:1-25.
- Miyagawa, S., Kuroda, T. (1988): Variability of yield and yield components of rice in rain-fed paddy fields of Northeast Thailand. *Jpn. J. Crop Sci.*, 57:527-534.
- Miyagawa, S. (1995): Expansion of an improved variety into rain-fed rice cultivation in Northeast Thailand. *J. South-east Asian Stud.*, 33:187-203.
- Sawano, S., Hasegawa, T., Goto, S., Konghakote, P., Polthanee, A., Ishigooka, Y., Kuwagata, T., and Toritani, H. (2008): Modeling the dependence of the crop calendar for rain-fed rice on precipitation in Northeast Thailand. *Paddy Water Environ.*, 6:83-90.
- Suzuki, K., Goto, A., Mizutani, M., Sriboonlue, V. (2003): Simulation model of rainfed rice production on sloping land in northeast Thailand. *Paddy Water Environ.*, 1:91-97

要 旨

気候変動といった広域で起こる環境変動に対する作物の応答を総合的に評価する際に有効なツールである作物モデルを広域に適用する際に加えるべき視点について、圃場での聞き取り調査の結果から広域の収量予測モデルを構築したタイ東北部の事例を用いて論じた。

聞き取り調査により把握したタイ東北部天水田の地域的な特徴である、地域的な移植時期のばらつきが水稻の生育期間の長さを通じて収量に影響するという事を表現したサブモデルを導入することで、タイ東北部の県単位の統計収量の時系列や地理的な特徴を良好に再現する事ができた。これらのことから、対象領域を広げる際には、作物生産において対象領域内のばらつきを生んでいる要因を把握し、圃場のモニタリングを通じて得られた知見に組み合わせることが必要であると考えられる。

キーワード：作物モデル，アップスケーリング，水稻，県収量，タイ東北部