

コメ単収・収穫面積推定モデルを用いた
タイ国雨季米生産量の将来予測

Future projection of wet-season rice production in Thailand using
rice yield and harvest area estimation model

吉田貢士*・本間香貴**・牧雅康***・前田滋哉****・黒田久雄*****

*東京大学新領域創成科学研究科（〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5）

**東北大学農学研究科（〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）

***福島大学農学群食農学類（〒960-1296 福島県福島市金谷川 1 番地）

****茨城大学農学部（〒300-0393 茨城県稲敷郡阿見町中央 3-21-1）

YOSHIDA Koshi*, HOMMA Koki**, MAKI Masayasu***, MAEDA Shigeya****, KURODA Hisao*****

*GS of Frontier Sciences, The University of Tokyo (5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8563)

**GS of Agriculture, Tohoku University (468-1 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-0845)

***Faculty of FAS, Fukushima University (1 Kanayakawa, Fukushima-shi, Fukushima, 960-1296)

****College of Agriculture, Ibaraki University (3-21-1 Chuo, Ami-machi, Ibaraki, 300-0393)

(Received 4 December 2020, Accepted 22 February 2021)

Abstract

To predict the wet-season rice production in Thailand, both harvested area and rice yield estimation are needed. In this study, rice production model which combined harvested area and plant growth sub-models was developed and applied to the whole 77 provinces in Thailand. The model simulated rice yield, harvested area and production from 2003-2013 successfully. By inputting the climate data of GCM MIROC5 during 2006-2100, future rice yield, harvested area and production were predicted. As a result, harvested area was not so changed during 2006-2100 in whole Thailand. However, rice yield was significantly decreased by 11.8% for 2041-2060 and also decreased by 25.0% for 2081-2100. Future estimated rice production showed 2.8 million ton decline for 2041-2060 and also 6.3 million ton decline for 2081-2100. Sensitivity analysis showed that temperature increase was the main factor to leads future decline of rice yield and production, while rainfall and radiation change were not significantly affected to them.

Key words: climate change, MIROC5, agricultural damage, risk assessment, Thailand

要 旨

タイ国における雨季米の生産量予測においては、単収と収穫面積の双方の変動を再現可能なモデルが必要となる。本研究では、収穫面積サブモデルと作物生長サブモデルを組み合わせたコメ生産量予測モデルをタイ国全 77 県に適用し、2003-2013 年の雨季米生産量を再現可能なモデルを構築した。構築したモデルに全球気候モデル MIROC5 の 2006-2100 年の気候予測値を入力し、単収・収穫面積・生産量の変化を予測した結果、タイ国全体の収穫面積はあまり変化しないものの、単収は 2041-2060 年では 11.8%・2081-2100 年では 25.0% 減少する結果となり、それに伴い生産量も 2041-2060 年では 280 万トン・2081-2100 年では約 630 万トン減少すると予測された。気温・降水量・日射量に対する感度分析の結果、降水量と日射量の変化による影響は小さく、気温上昇による影響が大きいことが示された。

キーワード: 気候変動, MIROC5, 農業被害, リスク評価, タイ国

1. はじめに

タイは水田面積約 1000 万 ha を有し、年間 3300 万 t のコメを産出する世界有数のコメ生産国・輸出国である。コメの市場規模は他の作物と比べ小規模であるため、タイ国におけるコメ生産量の変動は国際

市場にも大きな影響を与える。豪州で発生した干ばつを背景に 2007 年にはコメの作物価格が投機的に上昇し、前年の 1.6 倍となった。コメの高価格に後押しされ、タイ国では水田面積が 2009 年～2011 年の間に約 100 万 ha 増加し、急激な作付面積の拡大により生産が不安定な状態が続いている。

タイでは農地の 70%以上が天水に頼る天水田であるため、生産量の年々変動が大きい。2015 年にはモンスーンの影響により、北部および東北部で降水量が平年を大きく下回り大規模な干ばつが発生した。これにより農業用水の取水制限などが行われ、農業被害額は約 600 億バーツにも及び、離農した生産者および失業した農業関連企業労働者は 50 万人以上と言われている。2015/2016 年期的コメの作付面積は 2011/2012 年比でおよそ 100 万 ha 減少、同様に生産量も約 1000 万 t 減となり大きな問題となった。

加えて、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が公表した第 5 次評価報告書の第 2 次作業部会報告では、熱帯・温帯地域のコムギ・コメなどの主要穀物について、適応策がない場合、気温が 20 世紀末と比較し 2°C 上昇すると収量に負の影響を及ぼすと予測されている。例えば Babel et al.(2011)は IPCC 第 4 次評価報告の A2 シナリオを用いた場合、タイ東北部の単収が 1997-2006 年と比べ、2020 年までに 18%、2050 年までに 28%、2080 年までに 24%減少する結果を示した。また、Shreatha et al.(2017)は IPCC 第 5 次評価報告の RCP.4.5, RCP.8.5 シナリオを用いた場合、タイ東北部の単収が KDML105 品種ではそれぞれ 37%、38%減少し、RD6 品種では 13%、18%減少する結果を報告している。

上記のように、タイ国のコメ生産システムに対する将来の気候変動影響を評価する研究はいくつか行われてきたものの、それらの予測手法においては、単収への影響を評価するものがほとんどで、栽培面積は既知として扱われてきた。しかし、白岩ら(2001)はタイ全県を対象とした統計分析により、乾季米の生産量変動は単収よりも作付面積の変動に起因する県が多く存在すること、沼尻ら(2019)は近年においては雨季米においても生産量が作付面積の変動に規定される県が多いことを示している。また、田中ら(2014)は雨季天水田を対象に、栽培面積を減じて降水を作付されている水田に集中する現地の営農方法を反映した収量安定化戦略を考慮することにより、単収収穫量の経年変化の再現精度が向上する結果を示しており、将来の生産量予測においては降水量変動が単収と収穫面積の双方に及ぼす影響を評価する必要があると言える。そこで本研究では、田中(2014)のモデルを参考にタイ国の雨季米生産量・単収・収穫面積の変化を表現可能なコメ生産量予測モデルを構築し、全球気候モデルの将来予測値をもとに、雨季米生産量の長期トレンドを定量的に評価することを目的とした。

2. 研究の方法

2.1 対象地域

本研究の対象地はタイ国の全 77 県とした。またタイ国農業経済局 OAE(Office of Agricultural Economics)発行の Agricultural Statistics of Thailand に従い、全国を北部・東北部・中央部・南部の 4 地域に区分した。タイ国の気候は熱帯モンスーン気候に属し、5 月から 10 月までが雨季、11 月から 4 月までが乾季にあたる。Fig.1 に土地開発局 LDD (Land Development Department) から入手した 2010 年の土地利用データを示す。水田面積は国土の約 3 割、農地面積の約 5 割を占めている。水田は主にメコン川流域内にある東北部、チャオプラヤ川流域にあたる北部・中央部に集中している。稲作は灌漑が可能であれば、年 2 期作が可能であるが、東北部においては農地の灌漑率が 1 割弱と低く乾季の作付面積は少ない。そのためタイ東北部の稲作は 1 期作が中心であり、灌漑率の高い中部平原 (チャオプラヤデルタ) と比較した場合、単位面積あたりの収穫量は約半分程度となる。農業統計には灌漑農地の区分はないが、雨季と乾季の作付面積の比はおよその灌漑面積率を表すものと考えられる。Fig.2 に乾季作付面積/雨季作付面積で求めた 2003 年から 2013 年までの各県における平均灌漑率を示す。チャオプラヤデルタがある中央部

などで灌漑率が高い傾向にあり、天水で栽培を行っている東北部では平均灌漑率が7.2%と低い。

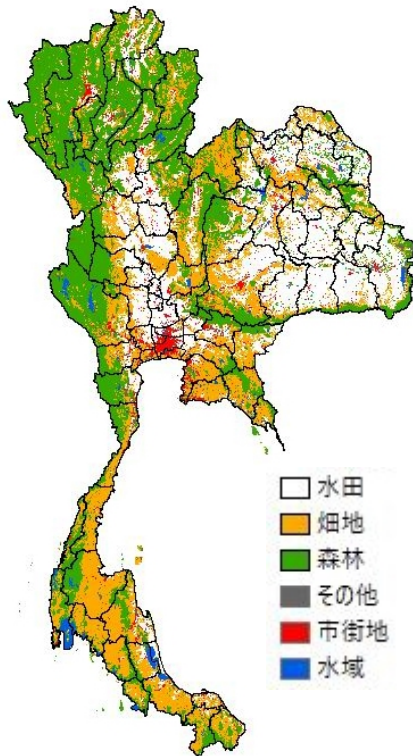


Fig.1 土地利用図 (LDD, 2010)

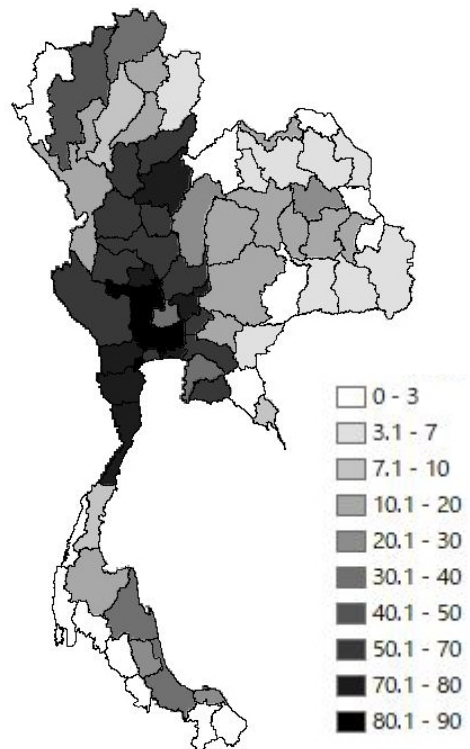


Fig.2 平均灌漑率% (2003-2013)

2.2 コメ生産量予測モデルの概要

本研究で構築したコメ生産予測モデルは、田中ら (2014) と同様に収穫面積モデルと作物生長モデルの2つのサブモデルで構成されている。収穫面積モデルは栽培期間における水田圃場水分状態の差による収穫面積の変化を、作物生長モデルは植物生理学的な生長プロセスを表現したモデルである。

2.2.1 収穫面積モデル基礎式

農作物の収穫面積を推定することは、水利用量や作物生産を解析する上で重要な要素である。特に水田農地は湛水状態で水管理が行われるため、他の作物に比べ必要水量が多く、稲の生長に応じた水需要量の期別変化も大きい。谷口ら (2009) は、メコン川流域を対象に、水田水利用のメカニズムを取り込んだ水循環モデルの開発のため、作付け体系の違いや、年ごとの降水に応じた水田の作付け時期・面積を推定するモデルを提案した。また、田中ら (2014) は面積減少に応じて利用可能水量を集中化させる方法を提案している。本研究では、田中らの手法を参考に、収穫面積モデルを構築した。モデル構築には、Irrigation and Drainage Paper No.33 (FAO,1979) の収穫量と水ストレスの関係を援用し、基準蒸発散量から得られる水分需要量と実蒸発散量から得られる実際に利用可能であった水分量の割合から減少面積を推定する。基礎式を以下に示す。

$$Ka_i = \frac{(\sum_{j=1}^i ETa_{j+a}) \cdot AP}{(\sum_{j=1}^i ETp_{j+a}) \cdot AP} \quad (1)$$

ただし、 $Ka_i > Ka_{i-1}$ のとき、以下の条件を課した。

$$Ka_i = Ka_{i-1} \quad (2)$$

ここで, Ka_i : i 時の収穫面積減少率[-], ETa_i : 実蒸発散量[mm·day⁻¹], ETp_i : 可能蒸発散量[mm·day⁻¹], AP : 総水田面積[km²], a : 緩和定数[mm]である. 緩和定数 a は田植え時の初期水分を保障するための定数で, 本稿では 80 mm に設定した. 面積減少係数 Ka_i は必要水量に対する利用可能水量の割合を意味し, 収穫時の値が収穫面積率を示す. また一度栽培を中止した水田では再び作付けされることはないため, i 時点の値が $i-1$ 時点より大きい場合は前日の値を入力する条件を課した.

2.2.2 作物生長モデル基礎式

本研究で用いた作物生長モデルは, Monteith(1977)が提案した炭素同化モデルを基礎とし, 熱量の累積関数で作物の生育度合いが表現される.

$$HUI_i = \frac{\sum_{k=1}^i (T_i - T_b)_k}{PHU} \quad (3)$$

ここで HUI_i : i 時の有効積算温度を PHU_i で基準化した値[-], T_i : 日平均気温[°C], T_b : 生長停止温度[°C], PHU_i : 収穫までに必要な有効積算温度[°C]である. PHU_i は検証県での誤差が最小となるように設定した. HUI_i は植え付け時に 0 であり, 0.5 で出穂, 0.8 で葉面積の減少が始まり, 1 で収穫期を表す.

作物のバイオマス量は以下のように計算される.

$$Bm = \sum_{i=1}^{ndays} \Delta B_i \quad (4)$$

$$\Delta B_i = \Delta Bp_i \cdot (PAR)_i \cdot \min(Ts_i \text{ or } Ks_i) \quad (5)$$

$$PAR_i = 0.5Rn_i(1.0 - e^{-0.65LAI_i}) \quad (6)$$

ここで Bm : 栽培期間におけるバイオマス量[kg·m²], ΔB_i : i 時点でのバイオマス増加量[kg·m²·day⁻¹], BE : 日射ーバイオマス変換係数[g·MJ⁻²·day⁻¹], PAR_i : 葉が受けた光合成有効放射量[MJ·m²·day⁻¹], Rn_i : 純放射量[MJ·m²·day⁻¹], LAI_i : 葉面積指数[-]である. BE はモデルのフィッティングパラメータの一つで, FAO Soil Nitrogen の関数として設定した. PAR_i は Beer の法則に基づいて計算され, 純放射量 Rn_i と葉面積指数 LAI_i の関数で表現される.

一日当たりのバイオマス増加量は以下の温度ストレス・水ストレスによって補正される.

$$Ts_i = \sin \left[\frac{\pi}{2} \frac{T_i - T_b}{T_a - T_b} \right] \quad (7)$$

$$Ks_i = \frac{TAW_i - SWD_i}{TAW_i - RAW_i} \quad (8)$$

$$SWD_i = SWD_{i-1} - AW_i + Pp_i + ETa_i \quad (9)$$

ここで Ts_i : i 時点での温度ストレス, Ks_i : 水ストレスであり, それぞれ 0 (ストレス最大) から 1 (ストレスなし) までの値を取り, 日毎にこれらストレス係数の小さいほう (ストレスが大きいほう) がバイオマス増加量に乘じられる. 稲の最適生長温度 T_a と生長停止温度 T_b は, それぞれ 30 °C, 15 °C に設定した. また本稿では, Allen et al. (1998) の根層水収支計算を導入することで, 作物生長と土壌の水分状態に応じた水ストレスを計算する. ここで, TAW_i : 根層域における全利用可能水量[mm], RAW_i : 根層域における迅速利用可能水量[mm], SWD_i : 土壌水分不足量[mm], ET_i : 蒸発散量[mm], Pp_i : 浸透水量[mm]である. また, AW_i は圃場における利用可能水量[mm]であり, 天水田では降水量のみが, 灌漑水田では降水量に加えて水分不足量と灌漑率から計算される補給水が入力される.

収穫量は以下の式で計算される.

$$YLD = HIA \cdot Bm \quad (10)$$

$$HIA_i = HIO_i \cdot f(WS_i) \cdot f(HUI_i)$$

ここで、 YLD : 単位収穫量[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$], HIA_i : i 時点での修正収穫指標[-]であり、 HIO_i は作物固有の最適環境下での収穫指標[-]で、稲の場合は0.5に設定される。また、 f は単純な関数で指標化されることを示しているが詳細は Monteith(1977)を参照されたい。

作付け日と収穫日の栽培スケジュールは、積算降水量と、積算温度を用いて設定する。作付け日は積算降水量を水田の水分状態の指標とし、積算降水量が250mmを超過した日に設定する。なお、雨季のはじまりを5月1日とし、降水量の積算開始日とした。一方で収穫日は、作付け日からの有効積算温度を生育の指標とし、 HUI_i を計算して収穫までに必要な積算温度に到達した日に設定した。以上より、作付け日と収穫日は、降水量や気温等の気象条件によって年毎に決定される。

2.3 使用データ、モデルパラメータの同定および将来予測手法

本研究における使用データを Table1 に示す。本研究では2003～2013年の気象データをコメ生産予測モデルに入力し、単収・収穫面積のRMSEが最小となるようパラメータ同定を行った。Table2に主なモデルパラメータを示す。このうち、まず各県で $HUI_i=1$ となる時期が現地の収穫期である11月下旬～12月上旬に入るよう Tb を決定する。そして、収穫面積減少率と総計値の収穫面積率(=収穫面積/作付面積)のRMSEが最小となるよう(1)式の緩和定数 a を決定し、最後に単収の計算値と統計値のRMSEが最小となるよう T_a を決定した。その他のパラメータについては Neitsch et al.(2002)の値を用いた。

Table1 使用データ

	データ種類	期間	取得元
気象データ	降水量	2003-2013	TMD
	気温	2003-2013	NOAA
	相対湿度	2003-2013	TMD
	風速	2003-2013	NOAA
	日射量	2003-2013	JASMIN
農業データ	生産量	2003-2013	OAE
	作付面積	2003-2013	
	収穫面積	2003-2013	

Table2 モデルパラメータ

最大葉面積指数	LAI_{max}	5
成熟までの有効積算温度	PHU	1700
生長の最低温度	Tb	15
生長の最適温度	To	30
葉が枯れ始めるHUI	$Flai$	0.8
最大高さ	$Hmax$	1.2
最大根の長さ	$Rdmax$	0.3
根のバイオマス配分割合	Rsr	0.1
最適収穫指数	HIO	0.5

タイ国農業経済局(OAE)より入手した収穫面積率(=収穫面積/作付面積)と収穫面積モデルによる計算値を比較したものを Fig. 3 に示す。統計値と計算値の誤差を評価した結果、Chiang Rai 県ではRMSE: 0.012, 相対誤差率: 3.4%, Khon kaen 県ではRMSE: 0.025, 相対誤差率: 7.6%, Suphan Buri 県ではRMSE: 0.014, 相対誤差率: 8.7%となり概ね統計値を再現できた。計算上、収穫面積率は雨期前半5～7月の積算降水量に依存するため Khon kaen 県の2007年と2012年、Suphan Buri 県の2007年と2008年では雨期前半の降水量が例年より極端に少なく収穫面積率が大きく減少する結果となった。

Fig.4 にタイ国南部を除く地方を代表する県として北部の Chiang Rai 県、東北部の Khon Kean 県、中央部の Suphan Buri 県における単収の計算値と実測値の比較を示す。統計値と計算値の誤差を評価した結果、Chiang Rai 県ではRMSE: 0.287 ton/year, 相対誤差率: 6.0%, Khon kaen 県ではRMSE: 0.351 ton/year, 相対誤差率: 9.8%, Suphan Buri 県ではRMSE: 0.221 ton/year, 相対誤差率: 6.4%

となり概ね統計値を再現できた。また、灌漑率が 91%と高い Suphan Buri 県と比較して、灌漑率が 7.8%と低い Khon Kaen 県では単収がおよそ半分以下となる結果となり、灌漑率が高いほど単収が高くなる傾向が再現された。一方で、Chiang Rai 県の 2008 年や 2012 年、Khon Kean 県の 2011 年では過大評価となった。本研究では、洪水による減収を考慮しておらず、雨季後半 8~10 月の積算降水量が多いほど単収は大きく計算される。しかし、現実には雨季後半の降水量が極端に多いと洪水が生じ平均単収はその影響を受ける。今後は、水循環モデルとの結合により、洪水による湛水ストレスも考慮することが課題となる。

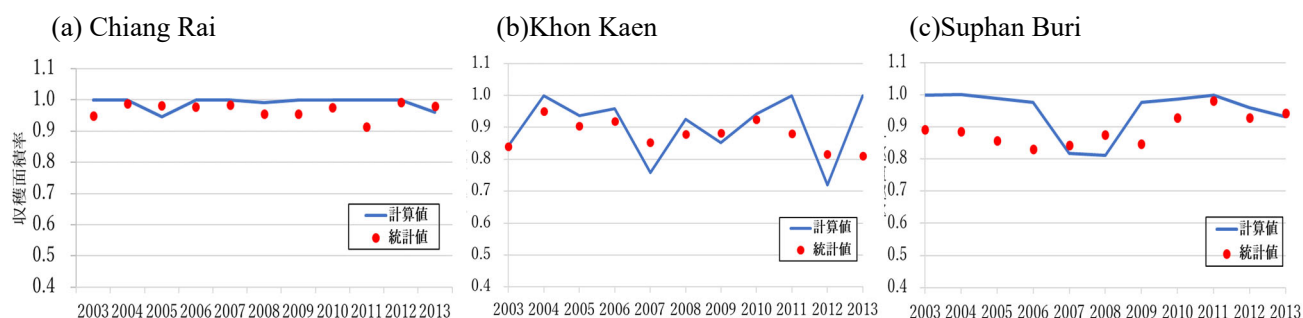


Fig. 3 雨季米の収穫面積率の統計値と計算値の比較

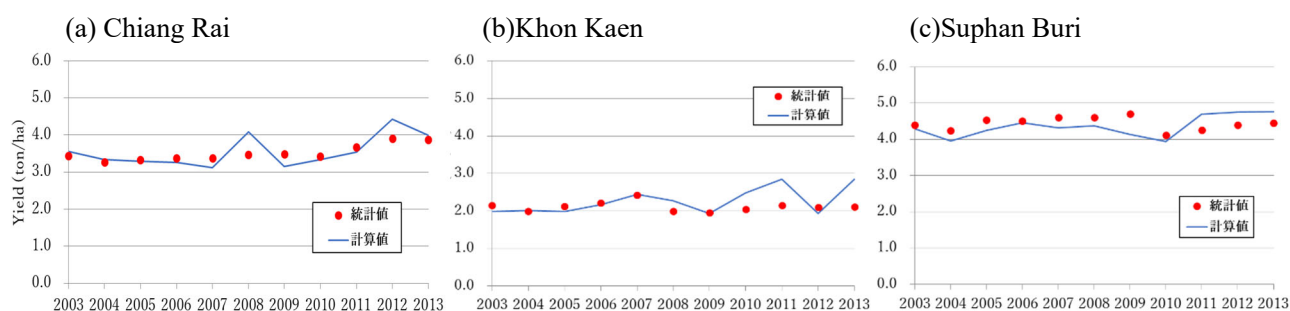


Fig. 4 雨季米の単収の統計値と計算値の比較

本研究では将来予測において、東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所、海洋開発研究機構で共同開発・維持管理されている全球気候モデル (MIROC5) の気候予測値を使用した。解析には DIAS データベースにおいて公開されている空間解像度が 1.4 度×1.4 度、時間解像度が月単位の 2006~2100 年の出力値を県ごとにバイアス補正して用いた。具体的には渡部(2020)を参考に、2006~2013 年の観測データをもとに、月別降水量・気温・日射量の平均値を一致させるよう補正量を求めた。IPCC 第 5 次評価報告書では、RCP (代表的濃度経路: Representative Concentration Pathways) シナリオが用いられている。RCP シナリオでは、2100 年における放射強制力 (W/m^2) が小さいものから 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 の 4 つのシナリオが存在し、本研究では最も極端な将来気候条件である Rcp8.5 シナリオを採用しコメ生産量に及ぼす影響を評価することとした。2006-2025 年の 20 年間を「現在」、2041-2060 年の 20 年間を「近い未来」、2081-2100 年の 20 年間を「遠い未来」と定義し、それぞれの期間におけるコメ単収・収穫面積・生産量の平均値および標準偏差を比較することにより、将来のトレンドを評価した。

3. 雨季米生産量の将来予測

3.1 単収・収穫面積・生産量の変化

Fig.5 に現在に対する近い未来、遠い未来における各県のコメ単収の減少率を示す。近い未来では各県でおよそ 2.0-20.0%の範囲で減少傾向となり、東北部の Nakhon Ratchasima 県で最大 18.3%減少する結果

(a) 2041-2060 年

(b) 2081-2100 年

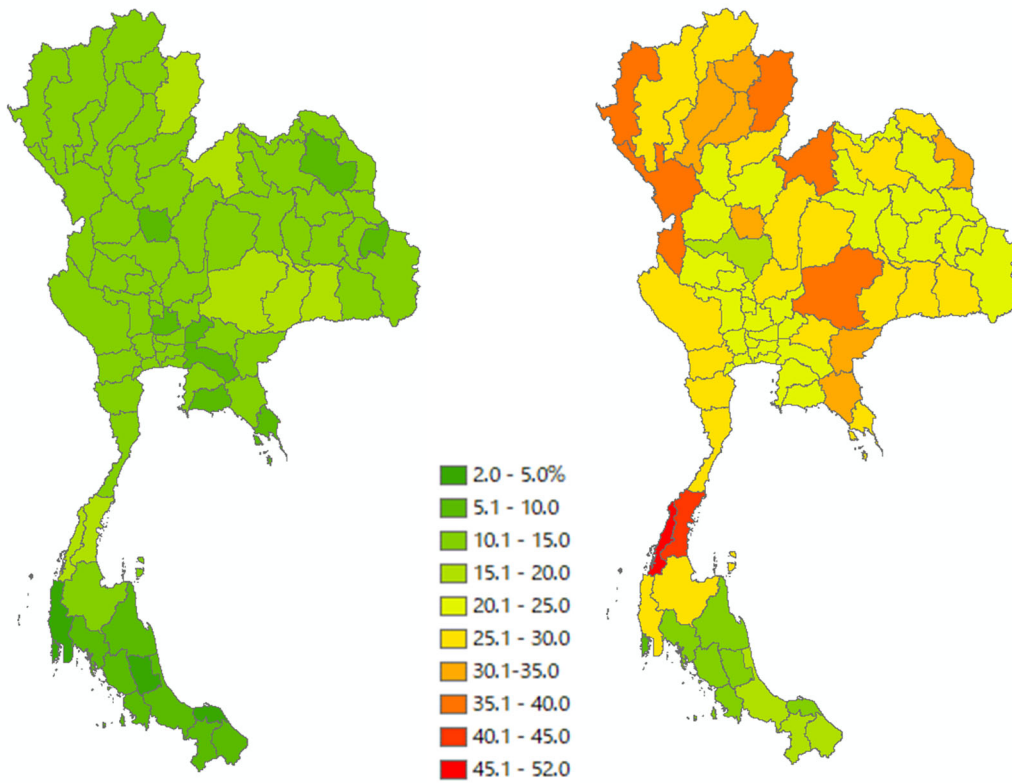


Fig.5 現在に対する近い未来（左），遠い未来（右）における各県の単収減少率

(a) 2041-2060 年

(b) 2081-2100 年

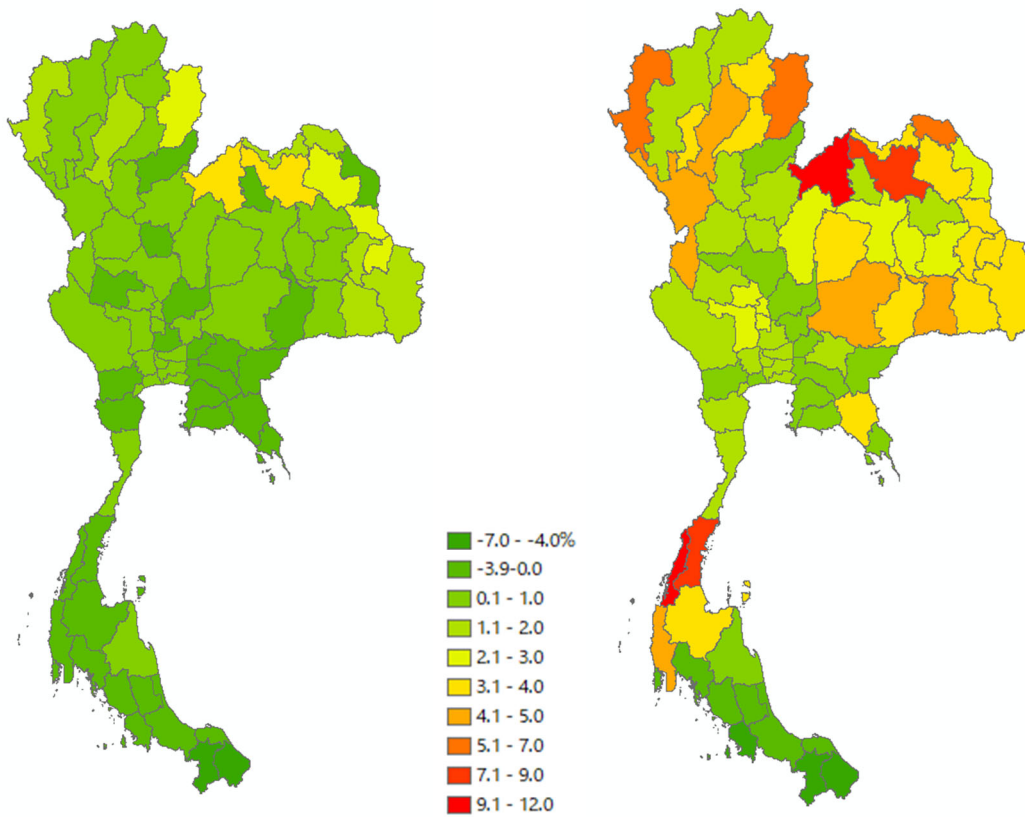


Fig.6 現在に対する近い未来（左），遠い未来（右）における各県の収穫面積率の減少率

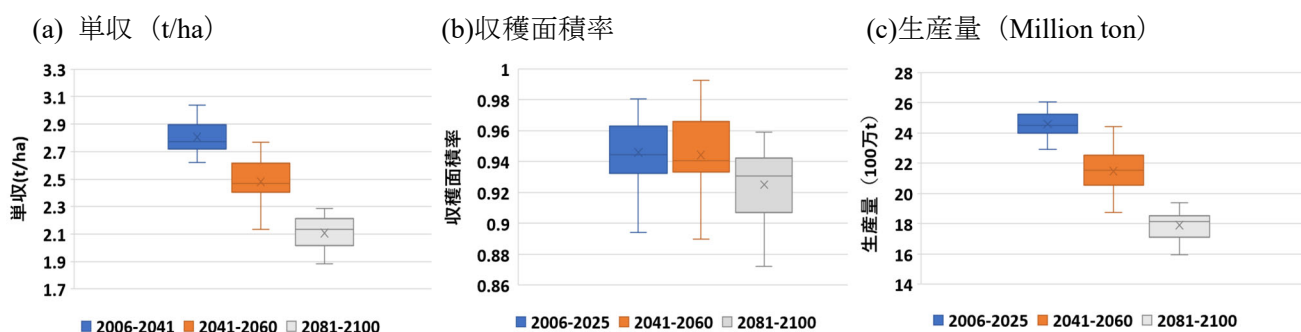


Fig.7 タイ全土における単収・収穫面積率・生産量の変化

となった。遠い未来では各県で 10.0-52.0%の範囲で減少する結果となり、北部・東北部・中央部で特に大きく減少傾向が見られる県が存在する。南部の Ranong 県で最大 51.8%と半分以下にまで減少する結果となり、近い未来と比べ各県の減少率に差が見られた。Chun et al.(2016)は RCP8.5 シナリオを用いた場合、雨季米の単収が 15-45%の範囲で減少すると述べており、本研究の結果は同程度の傾向を示した。

Fig.6 に現在に対する近い未来、遠い未来における各県の収穫面積率の減少率を示す。近い未来では中央部や南部でやや増加傾向にあり、北部や東北部ではあまり大きな変化は見られなかった。遠い未来では北部・東北部・南部の一部で 5-12%の範囲で減少する結果となり、中央部ではあまり大きな変化は見られなかった。

Fig.7 にタイ全土における単収・収穫面積・生産量の変化を示す。タイ全体の雨季米の単収は現在と比べ、近い未来では 11.8%減少、遠い未来までに 25.0%減少する結果となった。現在と遠い未来では標準偏差は同程度であったが、近い未来では年変動が大きくなった。収穫面積率は現在と比べ、近い未来では変化なし、遠い未来でも 0.02 の減少となり、大きな変化は見られなかった。現在と比べ遠い未来では同程度の標準偏差であるが、近い未来ではやや変動が大きくなる。コメ生産量は現在と比べ、近い未来では 280 万 t 減少、遠い未来までに 630 万 t 減少する結果となった。現在と遠い未来では同程度の標準偏差であるが、近い未来ではやや変動が大きい結果となった。

3.2 影響因子の評価

将来気候下における気温、降水量、日射量のそれぞれが雨季米生産にどのような影響を与えるかを分析するため、近い未来・遠い未来の気候因子（気温・降雨量・日射量）を個別にモデルに入力し、生産量・単収・収穫面積率に及ぼす影響を評価した。Table3 は気温データのみを変化させた場合の生産量・単収・収穫面積率の計算値およびそれらを現在気候の値と比較した増減率を示す。近い未来では生産量・単収はおおよそ 10%、遠い未来ではおおよそ 23%減少する結果となった。Table4 に降水量データのみ、Table5 に日射量のみを変化させた場合の生産量・単収・収穫面積率の計算値およびそれらを現在気候の値と比較した増減率を示す。将来の降水量や日射量が計算結果に及ぼす影響はわずか 1%程度であった。これにより将来気候下では気温・降水量・日射量の中で、特に気温が雨季米の生産量に影響を与える主要因であることが示された。Chun et al.(2016)は単収減少の 73%が気温の上昇によって引き起こされ、日中の気温が 35°Cを超えると作物に負のダメージを与えると述べている。RCP8.5 シナリオにおいてはタイ国の平均気温が 2100 年までに約 2.5°C上昇する。それにより蒸発散量は 14%増加し、作物にかかる水ストレスの増加が単収・生産量の減少に影響する主要因と考えられた。また、本研究のモデルでは生長の最適温度を 30°Cに設定しており、平均気温が 30°Cを超えると温度ストレスがかかる仕組みとなって

いる。現在気候と比べ近い未来、さらに遠い未来で平均気温が 30℃を超える日は増加傾向にあるため、温度ストレスと水ストレスによる影響が複合的に作用したと考えられる。

Table3 気温のみを変化させた場合の生産量・単収・収穫面積率の変化

気温	変更前	変更後（気温だけ各期間のデータ）		増減率(%)	
	2006-2025	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
生産量(t)	24,585,280	22,058,958	18,705,203	-10.3	-23.9
単収(t/ha)	2.80	2.52	2.16	-10.2	-23.0
収穫面積率	0.946	0.936	0.922	-1.0	-2.6

Table4 降水量のみを変化させた場合の生産量・単収・収穫面積率の変化

降水量	変更前	変更後（降水量だけ各期間のデータ）		増減率(%)	
	2006-2025	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
生産量(t)	24,585,280	24,735,248	24,480,118	0.6	-0.4
単収(t/ha)	2.80	2.82	2.78	0.4	-0.9
収穫面積率	0.946	0.953	0.951	0.8	0.5

Table5 日射量のみを変化させた場合の生産量・単収・収穫面積率の変化

日射量	変更前	変更後（日射量だけ各期間のデータ）		増減率(%)	
	2006-2025	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
生産量(t)	24,585,280	24,388,761	24,661,078	-0.8	0.3
単収(t/ha)	2.80	2.77	2.82	-1.1	0.4
収穫面積率	0.946	0.944	0.944	-0.2	-0.2

4. 結論

本研究では、タイ国における雨季米生産を対象として、単収と収穫面積の変動を再現可能なモデルの構築を行い、将来気候下における雨季米生産量の予測を行った。単収の再現結果は、Chiang Rai 県では RMSE : 0.287 ton/year, 相対誤差率 : 6.0%, Khon kaen 県で RMSE : 0.351 ton/year, 相対誤差率 : 9.8%, Suphan Buri 県で RMSE : 0.221 ton/year, 相対誤差率 : 6.4% となり概ね実測収量を再現できた。また、収穫面積の再現結果についても、Chiang Rai 県で RMSE : 0.012, 相対誤差率 : 3.4%, Khon kaen 県で RMSE : 0.025, 相対誤差率 : 7.6%, Suphan Buri 県で RMSE : 0.014, 相対誤差率 : 8.7% となり概ね統計値を再現できた。

将来気候 (MIROC5、RCP8.5 シナリオ) における雨季米の生産量を推計した結果、タイ全体の雨季米生産量は現在と比べ、近い未来では 280 万トン、遠い未来までに 630 万 t 減少する結果となった。現在と遠い未来では同程度の標準偏差であったが、近い未来ではやや年々変動が大きくなる結果が得られた。タイ全体の雨季米の単収は現在と比べ、近い未来では 11.8% 減少、遠い未来では 25.0% 減少するものの、収穫面積率の減少は相対的に小さかった。また、将来気候における気象要因がコメ生産に与える影響を評価するため、気温・降雨量・日射量のそれぞれの影響を分析した結果、気温が最も大きく生産量・単収の減少に影響を及ぼすことが示された。

今後の課題として、全球気候モデル GCM の出力値を用いた将来気候予測では、MIROC5 の RCP8.5 シナリオのみを用いた分析にとどまった。全球気候モデルはそれぞれ固有のバイアスを有しており、一般的には複数の GCM による影響評価を行い、そのアンサンブル評価を行う必要がある。また、今回使用

した MIROC5 の出力値は 1.4 度(約 154km)解像度であり、タイ東北部が 9 メッシュでカバーされるほど粗い。今回の分析は県別で行ったが、農業被害推計においては郡や村レベルでの分析が必要である。そのため、より空間解像度・時間解像度が高い複数の全球モデルの予測値を入手・利用する必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム SATREPS「タイ国における統合的な気候変動適応戦略の共創推進に関する研究」(代表：沖大幹)および科研費(基盤 B：19H03069)の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998) : Crop evapotranspiration –guideline for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper, NO56, 300p.
- Babel, M.S., Agarwal, A., Swain, D.K., Herath, S. (2011): Evaluation of climate change impacts and adaptation measures for rice cultivation in Northeast Thailand. *Climate Research*. 46 (2), pp.137-146.
- Chun JA, Li S, Wang Q, Lee W-S, Lee E-J, Horstmann N, Park H, Veasna T, Vannady L, Pros K, Vang S. (2016) Assessing rice productivity and adaptation strategies for Southeast Asia under climate change through multi-scale crop modeling *Agricultural Systems*, 143, pp.14-21.
- FAO (1979): Yield response to water, FAO Irrigation and drainage paper, No33, 193p.
- Monteith, J.L. (1977): Climate and efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. Roy. Soc. London. B.*, 281, pp.277-329.
- Neitsch, S. L. , Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R. (2002) : Soil and Water Assessment User's Manual(version2000)-AppendixA model databases, Texas Water Resources Institute.
- 沼尻奈央・吉田貢士・前田滋哉・黒田久雄 (2019) : タイ国における作付面積および単収の地域的変動特性, 第 70 回農業農村工学会関東支部大会講演要旨, pp.74-75.
- OAE(Office of Agricultural Economics) : Agricultural Statistic of Thailand.
- 白岩立彦, 中川博視, 堀江武, 松井勤, 本間香貴 (2001) : タイ稲作の生産変動実態ならびに降雨量が生産変動に及ぼす影響, *地球環境*, Vol.6(2), pp.207-215.
- Shrestha, S., Chapagain, R., Babel, M.S., (2017): Quantifying the impact of climate change on crop yield and water footprint of rice in the Nam Oon Irrigation Project, Thailand. *Science of the Total Environment*, 599, pp.689-699.
- 田中健二・吉田貢士・針谷龍之介・安瀬地一作・乃田啓吾 (2014) : メコン川流域における天水田の収量安定化戦略を考慮した水循環－作物生産モデルの構築, *土木学会論文集 B1(水工学)*, 70(4), pp. I_277-282.
- 谷口智之・増本隆夫・清水克之・堀川直樹・吉田武郎 (2009) : 多様な水田水利用を考慮した分布型水循環モデルの開発 (I)－作付時期・作付面積推定モデル－, *水文・水資源学会誌*, Vol.22(2), pp101-113.
- 渡部哲史(2020) : 気候モデル出力値のバイアス補正(1), *水文水資源学会誌*, Vol.33(6), pp.243-262.
- 吉田昌一 (1986) : 稲作科学の基礎, 博友社, 292p.