潜在作物生産性モデルGAEZの北海道での適用可能性の検討と改良

田中 朱美^{1*}・高橋 潔²・申 龍熙²・増富 祐司³・
山中 康裕⁴・佐藤 友徳⁴

¹北海道大学 大学院環境科学院 (〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西5丁目)

²国立環境研究所 社会環境システム研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

³埼玉県環境科学国際センター 温暖化対策研究室 (〒347-0115 埼玉県加須市上種足914)

⁴北海道大学 大学院地球環境科学研究所 (〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西5丁目)

* E-mail: a_tanaka@ees.hokudai.ac.jp

現在気候下の北海道のコメ収量変動を再現するため、潜在作物生産性モデルGAEZの北海道への適用可能性評価および改良を実施した。改良前のGAEZでは計算対象期間の大半で北海道のほぼ全域で気温条件を満たさず収量がゼロとなり、耐冷性の強化によってコメ栽培が可能となった北海道にはそのまま適用できなかった。モデルの改良として(1)気温条件の緩和、(2)バイオマス計算論理の変更、(3)出穂日推定論理の追加、および(4)障害型冷害の考慮を実施した。(1)により寒冷地でも収量を得ることが可能となるが、観測の収量変動をほとんど再現しなかった。(1)に加え(2)、(3)、(4)を組み合わせることで再現性は大幅に向上した。特に障害型冷害の考慮と出穂日の推定が北海道の観測収量変動の再現性向上に大きく寄与した。

Key Words : *paddy rice, Hokkaido, heading date, cool summer damage due to floral impotency, effective accumulated temperature*

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書(IPCC AR4)では、気温上昇による全球での作物生産性について、中・高緯度では1~3℃の気温上昇で生産性が向上する一方、低緯度では1~2℃の気温上昇でも生産性が減少し、上記以上の気温上昇では全地域で生産性が減少すると予測している¹⁾。主要作物の生産性は食料安全保障等の観点からも重要であり、気候変動に対する脆弱性や地域特性を把握することが求められている。このような背景から、現在多くのモデルが開発され、気候変動下の作物収量予測が行われている。Masutomi et al.²⁾は潜在作物生産性モデルGAEZを改良し、複数の気候変動予測シナリオおよび排出シナリオを用いてアジア地域のコメ収量の定量的予測を行い、特に2080年代のA2シナリオの場合に収量が著しく減少することを示した。申ら³⁾はMasutomi et al.²⁾と同様の手法で全球を対象としたトウモロコシの収量変化の定量的予測を行った。

日本における作物収量の評価について、横沢ら⁴⁾は広

域コメ収量予測機構モデルPRYSBIを用いて全国4地域の気温上昇度に対するコメ収量変化を定量的に評価した。モデルのパラメータを県単位で統計的に推定することにより国内の地域特性を反映した予測を実現し、北海道・東北地域は気温上昇に伴いコメ収量は増加するが、それ以外の地域は減少することを示した。

IPCC AR4¹⁾や横沢ら⁴⁾の結果によると、北日本ではコメの増収が期待されるが、増収率や収量の安定性から作付地域の選定等を行う際にはより地域詳細な予測が求められる。特に我が国のコメ作付の北限である北海道では、たびたび冷害の被害に遭うなど気象条件による制約が大きいため、気候変動下の収量予測やそれに基づいた栽培適地の判定は重要である。適地の変化による将来の作付地域の変化が北海道の土地利用計画や食糧自給に与えるインパクトは大きい。

以上のように、北海道における気候変動下のコメ収量への影響評価は重要であるが、より信頼性の高い評価のためには現在の北海道の気候に対する応答を再現できるか確認する必要がある。そこで、本研究では将来の気候

変動による影響評価に適用することを念頭にして、北海道を対象に現在気候下のコメ収量変動を再現し、その再現性を評価することを目的とする。本研究では圃場スケールでの細かい品種別の気候感度より、北海道内のコメの気候に対する応答の地域差や収量分布を包括的に評価したいため、ある程度広域に対応したプロセスモデルを用いる方法を採用し、Masutomi et al.²⁾および申ら³⁾が使用した広域モデルのGAEZを用いることとした。GAEZモデルは気温等の条件により栽培に適しているかを判定する適性判定条件を含む。本研究ではこのような判定条件を寒冷地である北海道に適用できるようにモデル改良を行った。さらにバイオマス量の計算方法を変更の上、北海道において甚大な被害をもたらす適地評価の観点からも重要な冷害リスクを反映できるようにした。本稿ではGAEZモデルの北海道への適用可能性と改良の効果について現在気候での観測収量の再現性に基づき評価する。

2. モデルと実験設定

本研究では Masutomi et al.²⁾による改良版の GAEZ (Global Agro-Ecological Zones) モデルを用いた。元の GAEZ モデルは国際連合食糧農業機関 (FAO) と国際応用システム分析研究所 (IIASA) により開発された潜在作物生産性モデルで、詳細は Fischer et al.⁵⁾を参照された。以降では改良版 GAEZ モデルの概要および実験設定について示す。

(1) 潜在作物生産性モデルGAEZの概要

表-1 に GAEZ モデルの入力データを示す。元の気候

入力データは日平均気温[°C]、日降水量[mm/day]、日平均放射[W/m²]、日平均風速[m/s]、気温日較差[°C]であるが、本研究では日較差の代わりに日最高気温[°C]と日最低気温[°C]を用いた。

モデル計算の手順は申ら³⁾を参照されたいが、概要は下記の通りである。まず入力的气候条件に基づき、気温条件による適性判定、成長期間の算出、および農業気象制約を考慮した作物成長計算が行われる。さらに土壌制約(土壌の成分や傾斜など)、灌漑面積率、入力レベル等を考慮した収量が計算される。ここで入力レベルは各国の資本や労働力、施肥等の社会経済要素を考慮した高・中・低の3段階の要素で、日本は高に該当する。GAEZ モデルでは天水農地と灌漑農地(土壌水分の不足による制約がないと仮定)について計算可能であるが、日本では灌漑なしで稲作を行っているとは考えにくいいため、北海道全域で灌漑ありと仮定した。以上により収量ポテンシャル(北海道全域に作付した場合に見込まれる収量)が得られ、実際の作付面積分布でマスクすることにより作付地域だけの収量が得られる。GAEZ モデルではさらに大気中 CO₂濃度の変動による施肥効果を考慮可能であるが、今回は現在気候下の計算であるため考慮しなかった。

コメについて、GAEZ モデルでは大きく乾燥地帯品種と湿潤地帯品種に区別されており、日本型イネは湿潤地帯品種に分類される。デフォルトで日本型イネは成長期間の異なる4つの品種(105, 120, 135, 150日)の取扱いが可能である。計算は植付日および品種を固定した計算と固定しない計算が可能で、固定しない場合は年毎に収量が最大となる植付日および品種が選択される。北海道を対象とした計算では、観測収量変動との比較のため

表-1 GAEZモデルの入力データ

GAEZ入力項目名	北海道適用時の使用データ
気候データ 日平均気温[°C]、日降水量[mm/day]、日平均放射[W/m ²]、日平均風速[m/s]、気温日較差[°C]	日平均風速以外： アメダスメッシュ化データ ⁶⁾ (気温日較差は日最高気温[°C]と日最低気温[°C]から算出) 日平均風速： JRA-25長期再解析データ ⁷⁾ をWRF(Weather Research and Forecasting)モデル ⁸⁾ によりダウンスケール
行政区境界	国土数値情報 ⁹⁾
土壌タイプ	Digital Soil Map of the World ¹⁰⁾
標高	GTOPO30 ¹¹⁾
作付面積	作物統計(農林水産省) ¹²⁾¹³⁾ 、北海道農林水産統計年報 ¹⁴⁾ 、国土数値情報 ¹⁵⁾
灌漑面積率	使用しない(全域で灌漑ありと仮定)
肥料使用量(入力レベルの算出に使用)	World Development Indicators ¹⁶⁾

後述の方法で植付日と品種を固定して計算を行った。

(2) 気候データ作成方法

GAEZモデルの入力として必要な気候データのうち、日平均風速以外の要素は農業環境技術研究所作成のアメダスメッシュ化データ⁶⁾を使用した。日平均風速はJRA-25長期再解析データ⁷⁾を領域気象モデルWRF (Weather Research and Forecasting)⁸⁾により力学的にダウンスケールしたものを使用した。アメダスメッシュ化データは3次メッシュ (約1km格子)、WRFデータは10km格子出力である。本研究では北海道全域を0.05° (約5km) 格子で解像するため、アメダスメッシュ化データは単純平均により平滑化し、WRFデータは近傍4点による逆距離加重平均法にて線形内挿し使用した。

(3) 行政区域データ・作付面積データ作成方法

行政区域 (旧支庁・市町村) は国土数値情報の平成22年度の行政区域界データ⁹⁾を0.05°格子で解像し使用した。行政区域に基づくデータ作成および解析は全て平成22年度の状態 (14支庁・179市町村) に従い実施し、それ以前の合併等による変動は考慮しない。また、旧支庁は現在の総合振興局・振興局を指すが、以降本文では支庁と記載する。

観測収量変動の再現性評価には作付面積に基づく収量集計が必要である。作付面積データは作物統計¹²⁾¹³⁾および北海道農林水産統計年報¹⁴⁾の市町村別耕地面積・作付面積データと国土数値情報の土地利用3次メッシュ¹⁵⁾をもとに下記手順で作成した。

- 1) 国土数値情報¹⁵⁾の田耕地面積分布データを0.05°格子で投影し、市町村別に集計する。データは1987年、1991年、1997年、2006年のものを使用し、各々について上記作業を実施する。
- 2) 各市町村について、統計値¹²⁾¹⁴⁾の毎年の市町村別田耕地面積データと1)で作成した市町村別集計データの比を算出し、1)の0.05°格子の分布データに比を乗算する。これは耕地面積の分布は国土数値情報に従っており、市町村毎の面積集計値は統計値により補正されることを意味する。統計値のみ値ありの場合は当該市町村内の格子に統計値の耕地面積を割り当て、国土数値情報のみ値ありの場合は統計値に従い面積ゼロとした。計算対象期間は1985年～2005年とし、国土数値情報の1987年データを1985年～1989年に、1991年データを1990年～1994年に、1997年データを1995年～2001年に、2006年データを2002年～2005年にそれぞれ対応させ、各年のデータを作成した。
- 3) 各年に対し市町村毎に統計値¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾の田耕地面積データと作付面積データの比を算出し、2)で補正した耕地

図-1 2000年の作付面積分布と支庁の位置

表-2 4地域分類と支庁の対応関係

地域名称	支庁名
札幌	留萌, 上川, 空知, 石狩
函館	後志, 胆振, 檜山, 渡島
帯広	日高, 十勝, 釧路
北見	根室, 網走, 宗谷

表-3 本研究の実験設定

項目	設定内容
モデル	GAEZ モデル
対象期間	1985 年～2005 年 (21 年間)
対象領域	139°E～146.5°E, 41°N～46°N (北海道全域)
解像度	東西 0.05°×南北 0.05°
対象作物	日本型イネ (成長期間 128 日)
植付日	4 地域毎に固定
気候条件	日平均気温[°C], 日最高気温[°C], 日最低気温[°C], 日平均放射[W/m ²], 日降水量[mm/day], 日平均風速[m/s]

面積分布データに乗算したものを作付面積分布データとする。

図-1は以上により作成した2000年における作付面積分布と支庁の位置である。全計算対象期間を通して作付面積は空知支庁、上川支庁に集中するほか、北海道西部や十勝・網走地方に点在する。一方、宗谷・釧路・根室支庁では作付面積はゼロである。

(4) 観測耕種期日・品種および収量データ

本研究では観測収量変動の再現性を評価するため、植付日および品種を観測に基づき固定して計算を行った。

図-2 作物成長計算の流れとモデル改良方法

植付日は作物統計¹³⁾¹⁷⁾より引用した観測の耕種期日（播種期，移植期，出穂期，刈取期）のうち移植期を設定した．耕種期日は北海道内を4地域（札幌，函館，帯広，北見）に分類し収録されているため，植付日もこの4地域毎に設定した．支庁と4地域の対応関係は表-2に示す通りである．品種については観測の耕種期日に従い成長期間の調整を実施した．GAEZモデルでは直播栽培を想定し成長期間を4つの生育ステージ（initial，crop development，mid-season，late season；本稿では順にini，dev，mid，end期と略す）に分類している．元の設定では各ステージの成長期間に占める比率[%]はini，dev，mid，end期の順に10，30，30，30であった．本研究では移植日をdev期始め，出穂日をmid期末日と仮定し，4地域毎の計算対象期間での観測移植期～刈取期および移植期～出穂期の平均日数をさらに各々4地域で平均した日数（約129.8日および約71.5日）をもとに，ini，dev，mid，end期の比率[%]を20，30，15，35とし，dev期～end期を128日（ini期～end期で160日）とした．本研究では移植期を植付日としたため，収量計算等に用いる成長期間はdev期～end期の128日と設定した．成長期間以外の品種固有のパラメータはGAEZモデルの成長期間150日の品種と同様とした．ini期～dev期（播種～移植期の想定）でのバイ

オマス生産量（移植時の乾物重）は最終収量の1/100のオーダー程度と想定されるため，今回は考慮しなかった．なお，上記品種設定は北海道全域で同一の値とした．

再現性評価の際に使用する観測収量データは作物統計¹²⁾¹³⁾および北海道農林水産統計年報¹⁴⁾の市町村別収量データ（[kg/10a]）を用いた．

(5) 実験設定

以上の計算手順・データにより，北海道を対象にコメ収量のシミュレーションを実施した．実験設定は表-3の通りである．再現性評価は観測収量年変動とGAEZモデル出力の収量年変動との比較により実施した．その際，GAEZモデル出力の収量は作付面積で重み付け集計した値を用いた．

GAEZモデルの北海道への適用可能性を評価するため，モデルの改良を実施した．改良方法は3章に示す通りである．改良前と改良後の観測収量変動の再現性を比較することで，改良の効果を定量的に評価した．4章ではその結果について述べる．

3. モデル改良方法

本研究では、GAEZモデルの作物成長計算モジュール（気候条件のみを考慮した収量を計算）について改良を行った。作物成長計算モジュールの流れと改良方法の対応は図-2の通りで、モデルの改良は4段階で実施した。下記に各段階の改良方法について示す。

(1) 気温条件の変更

作物成長計算モジュールでは、まず気候条件をもとに植付可能期間の算出を行う。10年間のスピナップ計算後、積雪、降水および土壌水分の状態、日平均気温条件により各日について植付可否、休眠状態（日本型イネの場合考慮しない）について判定し、植付可能と判定された日が連続する期間を植付可能期間と設定する。このうち日平均気温は5℃以上が条件であったが、北海道東部一帯で実際には平年以上の収量であった1989年に、GAEZモデルでは条件を満たさず収量がゼロと判定された。この条件は栽培適地判定の観点に基づくもので、北海道に適した値を決定するため4℃、3℃および0℃で感度分析を行った。観測収量の再現性を吟味した結果、本研究ではこの条件を4℃に緩和することとした。

GAEZモデルでは、上記で設定した植付可能期間と品種パラメータの成長期間を照合し実際の成長期間の算出が行われる。その後、気温による適性判定が行われ、適性と判定された場合のみ収量計算が行われる。気温による適性は成長期間内の積算気温や各気温帯（10℃以上15℃未満など）日数の成長期間に占める割合から判定されるが、北海道に適用すると多くの年にほぼ全域で条件を満たさなかった。これは主に低温に関する条件（10℃以上20℃未満の日数および10℃未満の日数）を満たさないことによる。北海道は品種の耐冷性を強化しコメ作りが可能となった地域であるため、全球スケールの判定条件をそのまま適用できない。今回はこの気温判定条件を撤廃し、収量を算出することとした。

(2) バイオマス量計算論理の変更

バイオマス量は、光合成率（日中気温等に依存）に関連づけられたバイオマス生産率と呼吸率（日平均気温等に依存）に基づいて計算される。詳細はGAEZモデルの当該項目の説明書¹⁸⁾を参照されたい。今回用いたGAEZモデルではバイオマス生産率に関わる日射量の取り扱いについて説明書と異なる計算式を用いていたが、北海道へ適用する際に説明書に準ずる式に変更した。すなわち、バイオマス生産率は下記により計算される。

$$b_{gm} = \begin{cases} F(0.8 + 0.01P_m)b_o + (1-F)(0.5 + 0.025P_m)b_c & \text{for } P_m > 20 \\ F(0.5 + 0.025P_m)b_o + (1-F)(0.05P_m)b_c & \text{for } P_m \leq 20 \end{cases} \quad (1a)$$

ここで b_{gm} は最大総バイオマス生産率、 P_m は最大光合成率、 b_o は完全に曇りの日の総乾物生産率、 b_c は快晴日の総乾物生産率を指す。 F は日中の空に占める雲の比で、 $F = (A_c - 0.5R_g)/(0.8A_c)$ により算出される（ A_c は晴天時の最大有効短波放射[calcm²day⁻¹]で、光合成有効放射を用いた。 R_g は下向き短波放射[calcm²day⁻¹]を指す）。

GAEZモデルでは成長期間の平均気象を用いて成長曲線の変曲点での光合成率やバイオマス生産率、呼吸率を算出し、成長期間の平均バイオマス生産率を変曲点での生産率の1/2と仮定し正味のバイオマス生産量を計算するが、北海道へ適用する際、日々の気象を用いるように変更した。具体的には、必ずしも正確ではないが、平均気象による各々の計算式が日々の気象に対しても成立すると仮定し、日々のバイオマス生産率および呼吸率を求め、成長期間で積算するようにした。これは日毎に成長曲線を描きバイオマス生産量を求めることに相当する。これにより最終的な正味のバイオマス生産量および収量ポテンシャルは下記により計算される。

$$b_{n,i} = (0.36b_{gm,i} - 0.5c_{t,i} \sum_j^{i-1} b_{n,j}) \times L_i \quad (2)$$

$$B_n = \sum_i^N b_{n,i} \quad (3)$$

$$Y_p = B_n \times H \times N / N_0 \quad (4)$$

ここで添え字 i は各日を表し、 $b_{n,i}$ は各日の正味のバイオマス生産量を表す。 $c_{t,i}$ は呼吸に関する係数、 L_i は葉面積指数（LAI）から算出される係数である。 N は実際の成長期間で、 B_n は成長期間全体での正味のバイオマス生産量を表す。最終的な収量ポテンシャル Y_p は正味のバイオマス生産量に収穫指数 H および品種固有の成長期間 N_0 を考慮した値となる。

(2)式において、 L_i を算出するためにLAIを日々推定する必要がある。今回のモデル改良では、FAO¹⁹⁾による作物係数推定方法および桜谷・堀江²⁰⁾による蒸発散量とLAIの関係式を用いて日々のLAIを推定した。桜谷・堀江²⁰⁾によれば水田蒸発散量を ET 、水面蒸発量を E としたとき、LAIとの関係は下記の式で表される。

図-3 簡易有効積算気温による出穂日推定値の地域別平均と統計値の比較。推定値はモデル改良手順の(1)～(3)までを適用した場合に収量がゼロ以外の格子の出穂日を平均した値。エラーバーは各地域に含まれる格子の出穂日推定値の標準偏差を表す。

$$\frac{E}{ET} = e^{-kLAI} \quad (5)$$

ここで係数 k は0.40である。FAO¹⁹⁾による作物係数推定方法によれば、蒸発散量は基準蒸発散量 ET_0 （ペンマン・モンテース法により日々推定）に作物係数 K_c を乗算して得られ、下記が成り立つ。

$$ET = (K_{cb} + K_e)ET_0 = K_e ET_0 \quad (6)$$

ここで K_{cb} は基礎作物係数、 K_e は土壌蒸発係数である。 $E = K_e ET_0$ と考えられることから、(5)は下記のように変換できる。

$$\frac{E}{ET} = \frac{K_e}{(K_{cb} + K_e)} = e^{-kLAI} \quad (7)$$

本研究では作物係数推定方法に従い K_{cb} および K_e を推定し、(7)を用いてLAIを算出した。詳細はFAOによる説明書¹⁹⁾を参照されたいが、概要は下記の通りである。まずini, dev, mid, endの4つの作期各々について K_{cb} を算出する。本研究ではGAEZモデルのパラメータとして設定されている K_c とFAOによる説明書¹⁹⁾を勘案し、ini, mid, end期の K_{cb} をそれぞれ0.9, 1.15, 0.7とした。mid期とend期の K_{cb} は各期間の平均風速、平均日最低相対湿度、平均作物長により補正する。dev期の K_{cb} はini期の値を起点、mid期の値を終点として日々単調増加し、end期はmid期の値を起点、end期の値を終点として単調減少するように設定する。次に、下記により K_e を算出

する。

$$K_e = \min(K_r(K_{cmax} - K_{cb}), f_{ew}K_{cmax}) \quad (8)$$

ここで K_{cmax} は K_c の上限値で平均風速や平均最低相対湿度などを考慮した値である。 f_{ew} は露出した湿地の比で、 $f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w)$ により計算する。 K_r は蒸発減衰係数（完全に湿っているとき1.0）、 f_w は灌漑等により湿った土壌の比で、いずれも1.0とした。 f_c は作物により被覆された土壌の比で、 K_{cb} 等を考慮し算出した。なお、平均風速および平均日最低相対湿度について、説明書¹⁹⁾に記載のある上限・下限値は考慮しなかった。以上の算出で用いたdev, mid, end期の作物長は平成21年度北海道立中央農業試験場年報²¹⁾による北海道品種「きらら397」、「ほしのゆめ」および「ななつぼし」の平年の移植時、6月20日、7月20日の草丈および穂長平均を線形内挿したものを使用した。

(3) 出穂日推定論理の追加

北海道の水稲移植栽培では安定生産をはかるために作付品種の基準が作成されている（丹野ら²²⁾、北海道ほか²³⁾）。1989年より導入された基準では出穂日を基準とした気温条件から安全出穂期間（早限出穂期～晩限出穂期）を設定し、簡易有効積算気温から推定した出穂日が安全出穂期間内となるような品種を選定する。2008年に導入された方法では、水稲生育システムを用いて发育速度を計算することにより出穂日を推定し、安全出穂期間を求めている。上記のいずれの方法でも、出穂日を予測

することが水稻生育の予測において重要であることが示唆されるが、GAEZモデルでは出穂日の推定論理は含まれていない。このため、新たに出穂日を推定する論理を追加することとした。

本研究では簡易有効積算気温による出穂日推定論理を採用した。簡易有効積算気温とは、日最高最低平均気温から稲の生育に有効な温度（簡易有効気温）だけ使用した積算値である（北海道ほか²³⁾）。丹野ら²²⁾は簡易有効気温 θ を下記により計算している。

$$\theta = (a - b) / (1 + (T_{mean} / c)^b + d) \quad (9)$$

ここで、 a 、 b 、 c 、 d はそれぞれ55.89942、-4.165141、21.84576、0.9107297で、 T_{mean} は日平均気温である。本研究でも(9)を用いて θ を算出した。 T_{mean} について、丹野ら²²⁾は日平均風速および日照時間を考慮した値を用いているが、簡略化のため入力の日最高気温と日最低気温の平均値を設定することとした。

植付日から θ を積算し、基準値に達した日を出穂日とした。基準値は北海道ほか²³⁾による簡易有効積算気温と晩限指標品種との対応関係をもとに4地域分類で調整・設定し、中生のうち米品種が主の札幌・函館地域は950℃、早生のもち米が主の支庁を含む帯広・北見地域は850℃とした。図-3は4地域毎に平均した出穂日推定値の統計値¹³⁾¹⁷⁾との比較である。年・地域により誤差にばらつきはあるが、二乗平均平方根誤差（RMSE）は札幌、函館、帯広、北見の順に1.75、1.58、2.35、2.91[日]で、概ね3日以内の精度で出穂日を予測できる。

イネのLAIは出穂日付近で最大となることから、先述のLAI算出方法に出穂日による変動を考慮した。GAEZの設定ではini, dev, mid, end期の成長期間に占める割合は固定であったが、 K_{cb} を求める際に出穂日がmid期末日となるようにし、dev, end期の割合を可変とした。すなわち、GAEZ設定のmid期末日より出穂が早い場合はdev期の割合が減少し、その分end期の割合が増加する。出穂が遅い場合はdev期の割合が増加し、end期の割合が減少する。ただしend期が減少する場合、 K_{cb} は本来のend期間日数から算出するとした。これはLAIが成長期間内に成熟期の値まで減少しきらないことを表す。さらに出穂遅延による成熟不良を想定し、end期が減少する場合は最終収量（(4)式の Y_p ）にGAEZ設定のend期間に対する実際のend期間の比を乗算した。なお、成長期間内にし出穂しない場合は収量ゼロとした。

(4) 障害型冷害推定論理の追加

冷害は低温障害で不稔粒多発により減収する障害型と低温による生育遅延で減収する遅延型、および両者の併

表-4 障害型冷害の不稔歩合[%]。北海道ほか²⁴⁾による不稔歩合の低位値を引用。ただし網掛け部分は本研究による拡張である。

前 歴 期 間 平 均 気温[℃]	危 険 期 間 平 均 気温[℃]	開花期間最高気温[℃]			
		<20	<21	<23	≥23
<16	<16	100	100	100	100
	<17	100	92.5	90	90
	<18.2	90	82.5	80	77.5
	<19	70	57.5	37.5	27.5
	≥19	65	47.5	22.5	12.5
<18	<16	100	92.5	90	90
	<17	92.5	85	80	80
	<18.2	82.5	75	65	60
	<19	57.5	45	25	20
	≥19	47.5	30	5	5
≥18	<16	95	85	80	77.5
	<17	85	75	70	65
	<18.2	72.5	55	40	35
	<19	57.5	45	25	20
	≥19	47.5	30	5	5

行型の3つに区分される（北海道ほか²⁴⁾）。出穂日を推定しLAIを変動させる方法は遅延型冷害を想定しており障害型の冷害は考慮していないため、さらに論理追加を行った。北海道ほか²⁴⁾では障害型冷害の影響を受けやすい前歴期間、冷害危険期間、開花期間の気温分類による北海道品種「きらら397」の不稔歩合推定を行っている。本研究ではこの推定不稔歩合[%]を利用し、（1-不稔歩合/100）を冷害係数として収量ポテンシャルに乗算することで障害型冷害の影響を考慮することとした。表-4に今回設定した各期間の気温分類による不稔歩合推定値を示す。前歴期間は出穂前24～15日、冷害危険期間は出穂前14～8日、開花期間は出穂後7日間とした。また、推定元の北海道ほか²⁴⁾の注釈に従い、5～15%の不稔発生は収量ポテンシャルに影響しない（冷害係数=1）とした。

4. 結果と考察

はじめに、各改良方法の効果について示す。改良方法(1)の実施により、北海道のほぼ全域で収量が計算されるようになった。収量の平均値は観測収量と近いが、年々変動はほとんどみられず観測収量の再現性は低かった。(2)のバイオマス生産率計算の変更により年々変動はやや大きくなったが、収量は大幅に過大となった。(2)の残りの手順を行うことで収量の過大傾向は緩和さ

(1) 1993年

(2) 2000年

図-4 1993年，2000年における改良前・改良後1・改良後2の収量ポテンシャル計算結果

図-5 GAEZ改良前，改良後1，改良後2の北海道全域平均収量の観測との比較。エラーバーは収量標準偏差で，GAEZは格子単位，統計値は市町村単位である。

表-5 GAEZによる北海道全域平均収量の観測との比較。

MBEは平均誤差，RMSEは二乗平均平方根誤差，Rは相関係数。**は1%危険率で有意な相関であることを示す。

	改良前	改良後 1	改良後 2
MBE [kg/ha]	128.51	665.86	65.03
RMSE [kg/ha]	742.40	848.73	701.11
R	0.390	0.768**	0.835**

した。(4)の実施により観測収量の再現性は大幅に向上した。(1)は栽培適性判定に関する変更で，(2)および(3)は日々の気象条件を収量計算に反映するための改良，(4)は障害型冷害の考慮により障害リスクを収量に反映する改良と大きく分けられることから，以降では(1)のみ実施した場合を「改良前」，(1)～(3)を実施した場合を「改良後1」，(1)～(4)を実施した場合を「改良後2」として結果を述べる。

図-4は記録的な冷害となった1993年と平年以上の収量となった2000年におけるGAEZモデルの改良前・改良後1・改良後2での収量ポテンシャル計算結果である。改良前と比較改良後は両年とも地域差が拡大している。また，改良後は両年の収量ポテンシャルの差が大きくなっている。改良後1で収量減少がみられる地域は出穂遅延によるもので，改良後2で収量減少がみられる地域は出穂遅延に加えて障害型冷害の影響を受けたことを示し

れた。(3)では，出穂遅延による成熟期間の短縮の考慮(end期間の比の乗算)により観測収量の再現性が向上

図-6 GAEZの改良後1, 改良後2の支庁平均収量の観測収量との比較。上から空知（北海道中央内陸部），網走（東部オホーツク海側），渡島（南部太平洋側），十勝（東部太平洋側），後志支庁（西部日本海側）。改良後2は障害型の冷害係数を棒グラフで示している。

ており、1993年で顕著である。

以降は作付地域で集計した値を用いて観測収量との比較を行う。図-5は改良前, 改良後1, 改良後2における北海道全域平均収量の比較結果である。改良前は観測の収量変動をほとんど再現しないのに対し、改良後1では収量は過大となるが変動の再現性は向上する。先述の通り、過大傾向は主にバイオマス生産率の計算式変更によるものである。変更はバイオマス生産率計算のための日射量

の計算方法に対して行ったことから、日射量の処理方法については今後精緻化が必要である。変動の再現性向上は出穂遅延による成熟期間短縮の効果を考慮したことの寄与が大きく、併行型の冷害といわれる1992年、1993年、2002年、2003年（北海道ほか²⁴⁾）で収量にやや落ち込みがみられる。しかし、1993年や2003年などの大幅な収量減少は再現しきれておらず、2002年や2003年の収量減少は冷害のなかった1998年の収量と同程度となっている。

表-6 GAEZ収量と観測の支庁別・市町村別比較。
MBE, RMSE, Rは作付地域のない3支庁を除く11支庁の平均。1%危険率で有意な相関となる市町村数は1985～2005年全てで収量がゼロではない市町村のみについて集計した。

	改良前	改良後1	改良後2
MBE [kg/ha]	569.71	934.24	258.01
RMSE [kg/ha]	1217.84	1238.56	899.11
R	0.420	0.695**	0.814**
1%危険率で有意な相関となる市町村数	15/110	101/110	106/110

障害型冷害を考慮した改良後2ではこれら併行型の冷害時の収量減少を再現し、変動の再現性がさらに向上する（表-5）。また、障害型の冷害といわれる1987年（北海道ほか²⁴⁾）で改良後1と比較し収量の減少がみられるようになった。以上より北海道の観測収量変動の再現には障害型冷害の考慮が特に重要であることが分かった。障害型冷害は出穂日を基準とした特定期間の気温条件に基づき推定していることから、適確な出穂日を推定することも重要であると考えられる。

本研究の結果から、気温条件のみから推定した障害型冷害の影響によって北海道におけるコメ収量の冷害影響を概ね再現可能であることが分かった。これは北海道のコメの品種が感温性の高い性質を持つことによる（北海道ほか²⁵⁾）と考えられる。一方、1988年には観測にはない収量の大幅な減少が計算され、逆に2003年の冷害時の収量減少は過大評価となっている。出穂日の推定値の統計値との誤差は2003年の函館地域で約3.2日、1988年の北見地域で約2.2日であるが大幅な誤差ではなく、出穂日のずれが障害型冷害推定の誤差に寄与したとは考えにくい。不稔発生の多少は昼夜の気温差やその継続日数、日照時間、品種の耐冷性、稲体の窒素濃度などにより変わるといわれており（北海道ほか²⁴⁾）、再現性悪化の要因はこれらの要素を考慮していないことによる可能性があると考えられる。

図-6に改良後1および改良後2の支庁平均での観測収量との比較結果を示す。観測の収量変動は地域による差が大きく、網走地方や十勝地方では年ごとの変動が大きいのにに対し、空知地方や上川地方（図略）では安定しており、渡島地方や後志地方などは両者の中間的な特徴を持つ。出穂遅延の影響を考慮した改良後1では収量の変動は良く再現しており、市町村別にみても再現性は大きく向上する（表-6）。観測ほど変動に地域差はみられないが、空知や後志と比較し網走、渡島、十勝地方では変動

幅がやや大きくなっており、出穂遅延による成熟不良のリスクが高いことが示唆される。改良後2では各地域の冷害時の収量減少幅や頻度を良く再現し、地域差を非常に良く再現している。改良後2は改良後1にさらに障害型冷害を考慮した状態であることから、北海道の収量変動の地域差をもたらす要因として障害型の冷害が関係していることが示唆される。障害型冷害の収量変動への寄与の大きさは冷害係数と改良後2の収量変動がほぼ同期していることから推測できる。網走地方や十勝地方は冷害係数の変動が大きく、障害型冷害のリスクが高いのに対し、空知や渡島、後志地方では係数がほぼ1で安定しており、リスクが低いことが示唆される。網走地方や十勝地方では先述の通り出穂遅延の影響も受けやすく、冷害リスクが非常に高い地域であることが示唆される。

5. まとめ

本研究では、広域スケールの潜在作物生産性モデルであるGAEZを北海道へ適用するためにモデルの改良を実施し、改良前と改良後で観測のコメ収量変動の再現性を評価した。GAEZモデルにおける日本型イネの適性判定条件では、多くの年に北海道のほぼ全域で低温の条件を満たさず収量がゼロとなったことから、広域モデルをそのまま北海道には適用できないことが分かった。しかし、適性判定条件を撤廃し、さらにバイオマス計算論理の変更、出穂日推定論理の追加、そして障害型冷害推定論理の追加を行うことで観測収量変動の再現性が大幅に向上した。

まず、バイオマス量の計算のためLAIを作物係数から推定し、簡易有効積算気温から推定した出穂日によるLAIの変動と出穂遅延による成熟不良を考慮した場合、観測収量変動の再現性は向上するが冷害時の大幅な収量減少は再現しなかった。さらに、出穂日を基準とした特定期間の気温条件により障害型冷害の影響を推定し反映したところ、観測収量の再現性は大幅に向上した。このことから、北海道の観測収量変動の再現には障害型冷害の考慮とそのための出穂日の推定が特に重要であることが分かった。また、障害型冷害の考慮により北海道内の収量変動の地域差も非常に良く再現できるようになったことから、収量変動の地域差をもたらす要因として障害型の冷害が関係していると考えられた。本研究では出穂日の推定および障害型冷害の推定は気温条件のみに基づいているため、北海道のコメ収量変動は気温条件で概ね説明できることが示された。これは北海道のコメ品種が感温性の高い性質を持つことによるものと考えられる。

本研究でGAEZモデルの改良を行う際、北海道固有の

パラメータとして新たに用いたのは出穂日までの簡易有効積算気温（道内で2地域に分類）、品種の成長期間（耕種期日の統計値より推定）、作物長、および障害型冷害の不稔歩合のみであり、これらは公表されているデータに基づいている。本結果から、比較的容易なチューニングにより冷害も含めた変動を再現可能であることが分かった。北海道において主要な障害である冷害リスクを評価できるようになったことで、現在および将来の北海道におけるより信頼性の高い影響評価が可能になると考える。

一方で、冷害に関して課題も残されている。本研究では遅延型冷害として出穂遅延による登熟期間の短縮を考慮し、観測の収量変動と有意な相関が得られた。しかし、実際には出穂遅延のため秋冷により登熟不良となる場合や、出穂が遅延しなくても登熟期の低温により登熟不良となる場合に遅延型の冷害が発生する（北海道ほか²⁴⁾）。このため、低温による登熟割合への影響の考慮が必要となる可能性があり、さらなる検討が必要である。

本研究は気候変動による北海道のコメ収量変動への影響評価を行う前段階として、現在気候下でのGAEZモデルの適用可能性を確認した。その結果、モデル改良により北海道における収量変動を再現可能であることが示されたが、今後将来気候に適用する際にいくつかの課題が挙げられる。本研究では冷害影響は考慮したが高温障害の影響は考慮していない。北海道の気候がイネの高温障害に影響を及ぼすほど変化する場合には、モデルに高温障害の論理を組み込む必要がある。また、本研究ではCO₂の施肥効果を考慮しなかった。気候変動だけでなく、CO₂濃度の増加に伴い収量にどの程度の影響があるのか検討する必要がある。

GAEZモデルでは灌漑地域は水ストレスを受けないと仮定している。しかし、将来の気候変動により融雪が早期化し、必要な時期に十分な灌漑用水を確保できなくなる可能性も否定できないため、水ストレスの仮定についてさらなる検討が必要になると考えられる。

謝辞：著者は、グローバルCOEプログラム「統合フィールド環境科学の教育研究拠点形成」のリサーチアシスタントとして支援を受けた。WRFによるダウンスケールは、環境省環境研究総合推進費（S-8-I(2)）により実施された。

参考文献

1) Easterling, W.E., Aggarwal P.K., Batima P., Brander K.M., Erda L., Howden S.M., Kirilenko A., Morton J., Soussana J., Schmidhuber J. and Tubiello F.N.: Food, fibre and forest products, In: Parry M.L., Canziani O.F.,

Palutikof J.P., Vander Linden P.J., Hanson C.E.(Eds.): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK., 2007.

2) Masutomi Y., Takahashi K., Harasawa H. and Matsuoka Y.: Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 131, pp. 281-291, 2009.

3) 申龍熙, 高橋潔, 脇岡靖明, 花崎直太, 山本隆広, 増富祐司: 気候予測の不確実性を考慮した世界のトウモロコシ生産性の温暖化影響評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 67, No. 5, pp. I_61-I_70, 2011.

4) 横沢正幸, 飯泉仁之直, 岡田将誌: 気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価, 地球環境, Vol. 14, No. 2, pp. 199-206, 2009.

5) Fischer G., van Veldhuizen H., Shah M. and Nachtergaele F.O.: *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*, IIASARR-02-02, IIASA, Laxenburg, Austria, 2002.

6) 清野 裕: アメダスデータのメッシュ化について, 農業気象, Vol. 48, No. 4, pp. 379-383, 1993.

7) Onogi K., Tsutsui J., Koide H., Sakamoto M., Kobayashi S., Hatsushika H., Matsumoto T., Yamazaki N., Kamahori H., Takahashi K., Kadokura S., Wada K., Kato K., Oyama R., Ose T., Mannoji N. and Taira R.: The JRA-25 Reanalysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 85, pp. 369-432, 2007.

8) Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W. and Powers J.G.: *A description of the Advanced Research WRF version 3*, Tech. Note NCAR/TN-475+STR, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo, 113 pp., 2008.

9) 国土交通省: 国土数値情報 (行政区域) .

10) FAO: *Digital Soil Map of the World (Version 3.5)*, Food and Agriculture Organization Press, Rome, Italy, 1995.

11) USGS: *GTOPO30*, United States Geological Survey; <http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/gtopo30.html>

12) 農林水産省農林経済局統計調査部: 作物統計; http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sityo_tyouti/

13) 農林水産省農林経済局統計調査部: 作物統計.

14) 農林水産省北海道統計情報事務所 [編集]: 北海道農林水産統計年報. 農業統計市町村別編.

15) 国土交通省: 国土数値情報 (土地利用3次メッシュ) .

16) World Bank: *World Development Indicators 2006*, World Bank, Washington, CD-ROM, 2006.

17) 農林水産省農林経済局統計調査部: 作物統計; http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?_toGL08020103_&listID=000001069790&requestSender=dsearch

18) Fischer G., van Velthuisen H., Serge M. and Nachtergaele F.: *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century CD-ROM*:

- 19) Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M: *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56: Chapter 7 - ETC - Dual crop coefficient ($K_c = K_{cb} + K_e$)*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1998; <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm>
- 20) 桜谷哲夫, 堀江武: 作物の蒸発散に関する研究 (I) 水田蒸発散の季節・品種別特性と簡易推定法, 農業気象, Vol. 41, No. 1, pp.45-55, 1985.
- 21) 北海道立総合研究機構 農業研究本部 中央農業試験場: 平成 21 年度 北海道立中央農業試験場年報.
- 22) 丹野久, 田中英彦, 古原洋, 佐々木亮, 三浦周: 寒地水稻の湛水土中直播栽培における簡易有効積算気温による品種選定, 日作紀, Vol. 76, No. 4, pp. 591-599, 2007.
- 23) 北海道, 道総研農業研究本部, ホクレン農業協同組合連合会, 社団法人 北海道米麦改良協会: 北海道の米づくり [2011 年版]: III. 水稻地帯別作付け指標と品種特性; http://www.beibaku.net/rice/2011/manual/ricetext/ricetext_05.pdf
- 24) 北海道, 道総研農業研究本部, ホクレン農業協同組合連合会, 社団法人 北海道米麦改良協会: 北海道の米づくり [2011 年版]: IX. 冷害の発生と対策; http://www.beibaku.net/rice/2011/manual/ricetext/ricetext_11.pdf
- 25) 北海道, 道総研農業研究本部, ホクレン農業協同組合連合会, 社団法人 北海道米麦改良協会: 北海道の米づくり [2011 年版]: II. 北海道稲作の生い立ちと水稻生育の特徴; http://www.beibaku.net/rice/2011/manual/ricetext/ricetext_04.pdf

(2012.4.3 受付)

(2012.7.7 受理)

Assessment and Improvement of the Global Agro-Ecological Zones Model for Estimation of Rice Productivity in Hokkaido

Akemi TANAKA¹, Kiyoshi TAKAHASHI², Yonghee SHIN², Yuji MASUTOMI³,
 Yasuhiro YAMANAKA⁴ and Tomonori SATO⁴

¹Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

²Center for Social and Environmental Systems Research, National Institute for Environmental Studies

³Global Warming Research Lab., Center for Environmental Science in Saitama

⁴Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

We assessed possibility of the Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) model for applying to rice productivity in Hokkaido, Japan, and improved it in order to simulate rice yield change responding to climate in Hokkaido. Before improving GAEZ model, the simulated yield was almost zero in most of the calculated periods, which means, the original GAEZ model is not applicable to Hokkaido where strengthening cool tolerance of rice variety has been developed. We improved four points: (1) easing temperature requirement, (2) modifying biomass calculation, (3) predicting heading date and (4) predicting cool summer damage due to floral impotency. The improvement of (1) enables GAEZ model to apply for cold regions; but, it did not simulate the observed yield variation. A simulation with combination of (1), (2), (3) and (4) simulated the variation of observed data. Especially, taking account of cool summer damage due to floral impotency and predicting heading date contribute to more accurate simulation of the observed yield variation.