

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18778

研究課題名（和文）ほ場の特異性を考慮できる高汎化型作物成長モデルの開発

研究課題名（英文）Development of robust crop growth model that can take into account variations in field

研究代表者

辰己 賢一（Kenichi, TATSUMI）

東京農工大学・（連合）農学研究科（研究院）・准教授

研究者番号：40505781

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：多様な環境場やシナリオに適用可能な高汎化型の作物成長モデルの開発は、潜在的な作物の栽培リスクやその緩和のための対策のために農業現場において希求されている。本研究では、野外圃場でのイネの生育調査と最適化手法に基づく主要モデルパラメータの精緻化および逐次更新手法の開発、それらのモデルへの融合を行った。得られたモデルを野外圃場に適用した結果、既往のパラメータ同定手法と比較して大幅にシミュレーション精度が向上することを確認し、本モデルの有効性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境場や作物の生育状況のばらつきという複雑な課題に対して、農業現場で普及可能な作物成長の再現・予測するための基盤技術の確立が求められている。本研究において、幅広い技術展開を可能とする気候変動時代における作物の生育制御を実現するための基礎的な技術の開発に成功した。得られた成果は、モデル予測に基づく農産物栽培手法への貢献、作物の精密な栽培管理システム構築のための基盤的な技術になると考えている。

研究成果の概要（英文）：The development of robust crop growth model can be applied to applied to diverse environmental fields and scenarios is an important for potential cultivation risks and their mitigation. In this study, I investigated the field growth survey of rice in the field and refine key model parameters based on the data assimilation method and the sequential updating method was developed. It was confirmed that the simulation accuracy was significantly improved compared to the model without data assimilation, thus demonstrating the effectiveness of this model.

研究分野：農業情報気象学，農業環境工学

キーワード：イネ成長応答モデル 野外圃場 生育調査 不確実性

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

国内外で開発されてきた作物成長モデルは、作物の成長・収量予測、収穫適期の推定等を一定の精度で可能にしてきた(e.g., Rosenzweig *et al.*, 2014. PNAS). しかし、複数のモデルに同じ入力を投入したとしても、収量などのモデル出力値にはばらつきが生じる。その要因として、1)モデル内の作物成長過程を表現する方程式の差異、2)モデルパラメータは、計算値と実測値間の誤差が小さくなるように同定され、また、誤差評価関数の定義は研究者によって多様であること、などが挙げられる。作物成長モデルに含まれるパラメータ数は一般に数百以上に及ぶことから、個体群成長率や収穫係数など生育調査を基に決定できる一部パラメータを除く多数のパラメータは仮定に基づき画一的に設定されている。また、モデル研究は、生産者側の課題を汲み取って実施されることはまれであり、パラメータの同定プロセスは、計算結果の精度を最重視するクロップモデラーにとって相対的に重要視されていない。このため、モデルの対象範囲やパラメータ同定手法は明瞭でなく、生育プロセスの解釈がまだ至難であるという背景がある。

### 2. 研究の目的

収量等の予測に用いられる作物成長モデルのパラメータの多くは、一般にトライアンドエラーにより同定が行われる。このため、モデルの汎化能力の低さが課題となっている。すなわち、環境特性にばらつきがあるほ場一筆ごとの成長や収量を正確に推定できない大きな要因となっている。したがって、パラメータの最適解群の導出とほ場の空間的ばらつきを動的な変量として捉えパラメータを適切に動的補正する技術の確立が必要である。本研究は、進化型多目的最適化手法によるモデルパラメータの最適解群の導出、収量予測にとって重要なターゲットパラメータの精緻化と最適な逐次バイアス補正手法の開発、とのモデルへの融合により高い汎化能力を持つ作物成長モデルの開発を目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1)進化型多目的最適化手法によるモデルパラメータの最適解群の導出

作物成長モデルの主要なモデルパラメータに対し、平均収量重視、最大収量重視、年々収量変動重視の計 4 種の誤差評価関数をそれぞれ目的関数として、これらを同時に満足させるパレート最適解群を求める。具体的な手順は、パラメータ値を初期値探索範囲内の乱数により生成し、 $n$  次元実数ベクトルを作成する。これを 1 つの個体とみなし、初期個体数  $s$  を作る。パレートランキングにより各個体のランク付けを行う。 $R_{\max}$ (個体集合内の最大ランク)の個体を 1 個選択し、さらに重複を許して  $m$  個の個体を選択することで、 $m+1$  個からなる個体群を構成する。個体群の数が  $R_{\max}$  の個体数に等しくなるまでを繰り返す。各個体群に含まれる  $R_{\max}$  の個体を進化(改善)させる。すなわち、個体群中から  $R_{\max}$  の個体を除いて重心を計算し、重心について  $R_{\max}$  の個体と対象な位置に新しい個体を生成する。 $R_{\max}=1$  ならば個体群の表現するパラメータセットの集合を解として出力する。 $R_{\max}>1$  ならば  $R_{\max}$  に戻る、となる。以上により得られた解はある評価尺度を良くするために他のどれかの評価尺度を悪くせざるをえないというぎりぎりの競合関係を表すパレート最適解群となる。

#### (2) LAI、作物体 N 濃度の時系列測定とその利用によるターゲットパラメータの精緻化

LAI とヒートユニットおよび作物体 N 濃度と LAI の関係式がバイオマス値に大きく影響を与えることがわかっている。したがって、自動葉面積計による LAI 計測および NC アナライザによる作物体 N 濃度の実測をイネ・コムギのそれぞれ 10 筆と 3 筆のほ場で、10 日おきに各ほ場 3 ヶ所合計 18 株を刈り取ることで実施した。得られた LAI-HU、N-LAI の時系列変動関数を方程式として組み込み、ターゲットパラメータの精緻化を実施した。

#### (3)(2)で精緻化されたパラメータの最適な逐次バイアス補正手法の開発

LAI-HU、N-LAI の時系列変動関数は、ほ場一筆ごとに異なる。このため、ほ場間の統計的特徴を比較し、動的にターゲットパラメータを逐次更新させることによりパラメータの校正を適切に行うことで、ほ場の特異性を凌駕できる最適なバイアス補正手法の開発を実施した。補正手法として補正関数型と確率分布関数型を開発した。また、成長初期のみの LAI、作物体 N 濃度の情報で校正が十分かどうか、データ同化の対象期間、有効性について考察した。

### 4. 研究成果

本研究では、1. 進化型多目的最適化手法によるモデルパラメータの最適解群の導出、2. 作物収量予測にとって重要なモデルパラメータの精緻化と逐次更新手法の開発により、高い汎化能力を持つイネ生長応答モデルの開発してきた。(1)野外圃場での生育調査とモデル開発これまで行ってきたイネ生長モデルの開発を進めると同時に、野外圃場において、コシヒカリおよびアキタコマチの生育調査を定期的に行い、時系列の地上部における器官別乾物重測定を実施した。収穫時には収量調査および収量構成要素調査を実施した。また、研究期間全体を通して得られた実測データの整備を行った。モデルは得られた圃場データを活用して開発を進めた。なお、開発したモデルは、1)イネのフェノロジーと葉面積推定、2)葉面積と葉傾斜角の鉛直分布推定、3)イネキ

ャノピーのエネルギーバランスと微気象推定, 4)キャノピー光合成推定, 5)バイオマス分配, 6)窒素および水ストレス推定, 7)土壌および作物の窒素収支推定, の各モジュールからなるものである。(2)開発したモデルの野外圃場への適用とデータ同化研究期間を通して開発を進めてきたモデルをFM 府中本町で得られた生育調査結果の解析に利用した。その結果, イネの葉・茎・穂の器官別乾物重の時系列変化を概ね良好な精度で推定することができた。また, データ同化をモデル内パラメータに適用し, その結果の精度検証を行った。その結果, データ同化を入れない計算結果と比較して, データ同化を入れたほうがシミュレーション結果と実測値の差を小さくできることを確認した。

〔雑誌論文〕計 6 件

Tatsumi, K. “Effects of automatic multi-objective optimization of crop models on corn yield reproducibility in the U.S.A.,” *Ecological Modelling*, **322**, 124–137 (2016).

Tatsumi, K. “Cropping intensity and seasonality parameters across Asia extracted by multi-temporal SPOT vegetation data,” *Journal of Agricultural Meteorology*, **72** (3-4), 142–150 (2016).

Tatsumi, K. “Integrated assessment of climate change impacts on corn yield in the U.S. using a crop model”, *Transactions of the ASABE*, **60**(6), 2123-2136 (2017).

Tatsumi, K., Kuwabara, Y., Motobayashi, T. “Monthly variability in the photosynthetic capacities, leaf mass per area and leaf nitrogen contents of rice (*Oryza sativa* L.) plants and their correlations”, *Journal of Agricultural Meteorology*, **75**(2), 111–119 (2019).

Tatsumi, K., Abiko, T., Kinose, Y., Inagaki, S., Izuta, T. “Effects of ozone on the growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.) under different nitrogen fertilization regimes,” *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 32103-32113 (2019).

Tatsumi, K., Kuwabara, Y., Motobayashi, T. “Photosynthetic light-use efficiency of rice leaves under fluctuating incident light,” *Agrosystems, Geosciences & Environment*, **3**, 1–11 (2020)

〔学会発表等〕計 12 件

Kenichi TATSUMI. Effects of climate change on corn yield in the U.S. using a parameter optimized crop model with multiple general circulation models. JpGU. 2016.

辰己賢一 . 将来気候変動が農産物生産性に与える影響の定量的評価とその適応策 . アグリビジネス創出フェア . 2016 年 .

辰己賢一 . 確率光合成モデルによる高汎化型イネ成長応答モデルの開発 . さきがけ情報協働栽培研究領域公開ワークショップ 「栽培モデル研究の最前線」 . 2017 年 .

辰己賢一 . 気候変動が作物成長に与える影響の定量的予測分析とその適応策 . “未来へのバイオ技術” 勉強会 . 2017 年 .

辰己賢一 . 広域スケールで作物の成長を予測するために必要な シームレスモデル技術 . 日本農業気象学会 . 2017 年 .

乗原良樹, 辰己賢一 . 地形による光環境の差異が水稻の生長・収量に及ぼす影響 . 日本農業気象学会 . 2018 年 .

乗原良樹, 辰己賢一 . 地形による日射特性の差異がイネ個葉の光合成特性に及ぼす影響 . 日本作物学会 . 2018 年 .

Li Cuizhengyang, Toshiyuki Hirata, Kenichi Tatsumi, Yoshiki Kuwabara, Takashi Motobayashi and Hajime Araki. Difference of growth characteristics of rice ‘Akitakomachi’ grown near the southern and northern limits. 日本作物学会 . 2018 年 .

辰己賢一 . 気候変動が作物生産性に与える影響とその不確実性 ~ マルチスケールな視点から ~ . 第 52 回植物バイオテクノロジーシンポジウム . 2018 年 .

本多誠之, 辰己賢一 . 機械学習を用いたイネ個葉の光合成速度の予測 . 日本農業気象学会 . 2020

年 .

XIAO Mengxue, Yaobin Sheng, Kenichi TATSUMI. Correlation analysis between land surface temperature and vegetation coverage based on Landsat-8 remote sensing imagery: a case study of Beijing, China. ISAM2020. 2020 年

辰己賢一 . イネの鉛直葉群構造を考慮した成長応答モデルの開発 . 日本農業気象学会 . 2020 年

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kenichi Tatsumi	4. 巻 60
2. 論文標題 Integrated assessment of climate change impacts on corn yield in the U.S. using a crop model	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Transactions of the ASABE	6. 最初と最後の頁 2123-2136
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.13031/trans.12314	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenichi Tatsumi	4. 巻 72
2. 論文標題 Cropping intensity and seasonality parameters across Asia extracted by multi-temporal SPOT vegetation data	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 142-150
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2480/agrmet.D-16-00003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenichi Tatsumi	4. 巻 322
2. 論文標題 Effects of automatic multi-objective optimization of crop models on corn yield reproducibility in the U.S.A.	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Ecological Modelling	6. 最初と最後の頁 124-137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ecolmodel.2015.11.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenichi Tatsumi, Yoshiki Kuwabara, Takashi Motobayashi	4. 巻 75
2. 論文標題 Monthly variability in the photosynthetic capacities, leaf mass per area and leaf nitrogen contents of rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) plants and their correlations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 111-119
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2480/agrmet.D-18-00043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenichi Tatsumi, Tamami Abiko, Yoshiyuki Kinose, Shiro Inagaki, Takeshi Izuta	4. 巻 26
2. 論文標題 Effects of ozone on the growth and yield of rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) under different nitrogen fertilization regimes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Environmental Science and Pollution Research	6. 最初と最後の頁 32103-32113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11356-019-06358-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenichi Tatsumi, Yoshiki Kuwabara, Takashi Motobayashi	4. 巻 3
2. 論文標題 Photosynthetic light-use efficiency of rice leaves under fluctuating incident light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Agrosystems, Geosciences & Environment	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/agg2.20030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 本多誠之, 辰己賢一
2. 発表標題 機械学習を用いたイネ個葉の光合成速度の予測
3. 学会等名 日本農業気象学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 XIAO Mengxue, Yaobin Sheng, Kenichi TATSUMI
2. 発表標題 Correlation analysis between land surface temperature and vegetation coverage based on Landsat-8 remote sensing imagery: a case study of Beijing, China
3. 学会等名 ISAM2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辰己賢一
2. 発表標題 イネの鉛直葉群構造を考慮した成長応答モデルの開発
3. 学会等名 日本農業気象学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 萩原良樹, 辰己賢一
2. 発表標題 地形による光環境の差異が 水稻の生長・収量に及ぼす影響
3. 学会等名 日本農業気象学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 萩原良樹, 辰己賢一
2. 発表標題 地形による日射特性の差異が イネ個葉の光合成特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本作物学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Li Cuizhengyang, Toshiyuki Hirata, Kenichi Tatsumi, Yoshiki Kuwabara, Takashi Motobayashi and Hajime Araki
2. 発表標題 Difference of growth characteristics of rice 'Akitakomachi' grown near the southern and northern limits
3. 学会等名 日本作物学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辰巳賢一
2. 発表標題 気候変動が作物生産性に与える影響とその不確実性～マルチスケールな視点から～
3. 学会等名 第52回植物バイテクシンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenichi TATSUMI
2. 発表標題 Effects of climate change on corn yield in the U.S. using a parameter optimized crop model with multiple general circulation models
3. 学会等名 JpGU
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 辰巳賢一
2. 発表標題 将来気候変動が農産物生産性に与える影響の定量的評価とその適応策
3. 学会等名 アグリビジネス創出フェア
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 辰巳賢一
2. 発表標題 確率光合成モデルによる高汎化型イネ成長応答モデルの開発
3. 学会等名 さきがけ情報協働栽培 研究領域公開ワークショップ 「栽培モデル研究の最前線」（招待講演）
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 辰巳賢一
2. 発表標題 気候変動が作物成長に与える影響の定量的予測分析とその適応策
3. 学会等名 "未来へのバイオ技術" 勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辰巳賢一
2. 発表標題 広域スケールで作物の成長を予測するために必要な シームレスモデル技術
3. 学会等名 日本農業気象学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----