

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：23903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02314

研究課題名（和文）データ同化技術を用いたマルチスケールな収量予測技術の実証と確立

研究課題名（英文）Establishment of multi-scale crop yield prediction using data assimilation technology

研究代表者

辰己 賢一（TATSUMI, Kenichi）

名古屋市立大学・データサイエンス学部・教授

研究者番号：40505781

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、統合型作物生長モデルと数理統計手法を融合させることにより直接的に観測困難なデータや条件などのパラメータをモデルとの整合性から合理的に推定でき、空間スケールに依存しない高精度シミュレーション技術の確立を目的とした。トマトのLAIや草丈などの測定とデータ同化の効果を検証し、LAIの予測精度が向上した。一方、LAIの再現・予測精度の改善結果として期待された収量については予測精度が向上しなかった。課題として、拡大空間ベクトルにモデルパラメータを追加することやモデルパラメータを最適な値に推定するための新手法の適用などが挙げられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、統合型作物モデルと数理統計手法の融合により、観測困難なデータや条件を合理的に推定し、空間スケールに依存しない高精度なシミュレーション技術を確立することである。この技術により、作物の生長や収量の予測精度が向上し、農業の効率化と省力化に貢献できる。また、UAVや人工衛星を活用することで、広範囲の圃場情報を効率的に収集し、農家の意思決定を支援するシステムを構築することが可能である。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to establish a highly accurate simulation technique that is independent of spatial scale and can reasonably estimate parameters such as data and conditions that are difficult to observe directly by integrating an integrated crop growth model with mathematical and statistical methods, based on consistency with the model. The effectiveness of data assimilation and measurement of LAI and grass height of tomato was verified, and the prediction accuracy of LAI was improved. On the other hand, prediction accuracy did not improve for yield, which was expected because of improved LAI reproduction and prediction accuracy. Future work includes the addition of model parameters to the expanded spatial vectors and the application of new methods to optimize the estimation of model parameters. These results have been published in 13 refereed papers and 10 conference presentations during the research period.

研究分野：農業情報気象学

キーワード：統合型作物生長モデル LAI データ同化 野外圃場 数理統計手法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

作物の生長に關与する生理・生態学的な諸過程と気象環境との關係性にに基づき、作物個体群の生長モデルは農業に關わる現実問題の解決手段として発展を遂げてきた (e.g., Rosenzweig et al., 2014). その中において、代表者は複数地点の野外水田圃場や畑地において、気象観測、イネやトマトの生育・収量調査やガス交換測定を実施してきた。得られたデータを駆使し、合理的な栽培設計の実現と潜在的な栽培リスクに關する具体的な検討に資する統合型作物生長応答モデルの開発を続けている (Tatsumi et al., 2011; 2018; 2019). 一方、農家が実施する日々の灌漑や施肥は、土壌や作物の観察結果に基づいて実施されることが一般的 (Castrignano et al., 2020) であるが、農地における必要かつ複雑な意思決定を可能にするロジックの構築にモデル技術は貢献できていない。

活発に行われている作物モデル研究 (White et al., 2013) であるが、1) 農学データが少ないあるいはわからない場合におけるモデルパラメータの扱いが明瞭でない、2) センシングの進展によりデータ量は増えたが、特性が多様となりデータ解析の際の不確実性が增大しているなどの課題があり、データと計算科学を繋ぎ、実世界への適用に限界があるモデルと実測データの“良いとこ取り”を可能とする研究事例は非常に少ない。したがって、作物の養分要求量など直接観測できない値を推定することで作物内部の生育阻害要因を見える化し、トップレベル農家と同等の意思決定が可能なロジックの構築を目指すには、観測困難なデータやモデル内パラメータおよび状態変数をモデルとの整合性から統計的に推定でき、トップレベル農家のアクションに資する予測情報の提供が可能なシミュレーション技術の確立とそのために必要な検証データの蓄積が不可欠なのではないかとの学術的「問い」が生まれ、本研究の着想に至った。

### 2. 研究の目的

作物の生長およびバイオマス・収量の精緻な予測は、最適な営農ポリシーの導出、単収の増加、農作業の省力化を実現する上で必要不可欠である。しかし、農業に關与する実世界の現象は複合的かつ連鎖的で非常に複雑である。また、センシング技術の進展により取り扱えるデータ量は増えたが、特性が多様でありデータ分析の難しさが増している。本研究課題では、データ同化技術により作物モデルと数理統計手法を融合させ、直接観測できない情報を推定し、農業従事者の意思決定に資する予測情報の提供が可能な空間スケールに非依存な高精度シミュレーション技術の確立を目的とする。

そこで本研究では、トマトの生育初期における LAI 推定値と実測値のギャップに焦点を当て、モデルによる LAI 予測技術向上だけでなく、拡大状態空間モデルに実装されているモデルパラメータも正確に推定可能なデータ同化技術のモデルへの実装を目指した。

### 3. 研究の方法

3つのサブグループに分かれて研究を進めた。露地栽培における意思決定をトップレベルの農家と同レベルで安定的に行えるシステムの構築を目指し、野外圃場での小麦およびトマトの LAI、葉室素濃度、体積含水率の実測および地上部・地下部のバイオマス・収量の測定、UAV 計測および人工衛星データによる LAI、葉室素濃度、体積含水率の推定、統合型作物生長モデルと融合粒子フィルタの融合と および で得られた結果に基づくデータ同化効果の検証・評価を研究期間内にそれぞれ実施した。

#### 野外圃場での栽培実験

東京農工大学フィールドサイエンスセンター (以降、FS センター) が管理しているフィールドミュージアム府中 (以降、FM 府中) の野外実験圃場において、トマトの生育調査を 1 試験区 5m×5m の 2 施肥区 (無施肥区、慣行施肥区) 3 反復で実施した。なお、測定項目は、営農最適化に不可欠であり、かつ逐次データ同化としてモデルへの融合が比較的容易である LAI、葉室素濃度、土中水分量 (体積含水率) である。LAI はプラント・キャノピー・アナライザー (LAI-2200C; LI-COR Inc.)、葉中室素濃度は NC アナライザー (スミグラフ NC-220F; 島津製作所) をそれぞれ用いて 2 週間間隔で複数の株を対象に実測した。体積含水率は土壌センサー (TerraSen; Dacom Inc.) を用いて深さ 50cm までを 5 層で測定し、常時モニタリングした。時系列バイオマスは移植してから 10 日後 ~ 収穫日までにおいて 2 週間間隔で個体を抜き取り、地上部および地下部の器官別生体重および乾燥重を実測した。収穫時には収量調査を実施した。なお、水管理・防除は FM 府中において慣行的に実施されている方法に従った。

#### UAV 計測および人工衛星データによる状態変数の推定

で得られる実測値に加え、空間スケールに依存しない圃場情報を収集する上で遠隔観測技術の活用が欠かせない。そのため、の野外圃場を対象として、UAV による空撮を実施する。UAV には、5 つのマルチバンドセンサーと熱赤外センサーをもったマルチスペクトルカメラと

光学カメラを搭載した Matrice210V2 (DJI Inc.)を用いた。なお、航路上および航路間のオーバーラップはそれぞれ 90%、70%とし、2 週間に 1 度の頻度で圃場全体を空撮した。空撮写真は測量ソフト Metashape (Agisoft Inc.) でとりこみ、植生指数や植生クロロフィル II 含量指数の値を取得した。空撮画像およびこれらの指標から LAI、葉室素濃度、体積含水率の値を間接的に推定し、

得られた値との整合性を確認した。および得られた栽培試験による結果を次で示す同化モデルの検証・評価に用いることで、モデルパラメータの不確定性削減、作物窒素要求量および土中窒素量など直接観測できない圃場情報を推定・補完する技術の確立が可能となる。

### 統合型作物生長モデルと融合粒子フィルタの融合

統合型作物モデルと非線形モデルを含めた一般的な時系列モデルに適用可能な融合粒子フィルタ手法を融合させ、高精度な作物生長の予測を可能にする技術を確立する。

作物バイオマス量  $B_t$  を決めるのは、主に気象場、作物品種特性  $C$ 、葉面積指数  $L_t$ 、葉室素濃度  $N_t$ 、体積含水率  $W_t$  ありとし、不確実性がない気象場を除いた  $B_t, C, L_t, N_t, W_t$  を状態変数 (計 9 次元) として扱う。状態の時間発展を記述するドメインモデルには、統合型作物モデルを小麦、トマトに応用し、次式のシステムモデルと観測モデルを連立させた拡大状態空間モデルを考え、 $f$  内パラメータを説明変数として逐次更新する。

本研究では、出穂から開花までの時間を制御するパラメータを粒子法により作物モデルに同化した。次に同化効果を検証するために、パラメータ推定と LAI 予測を定量的に評価するため双子実験を実施した (図 1)。

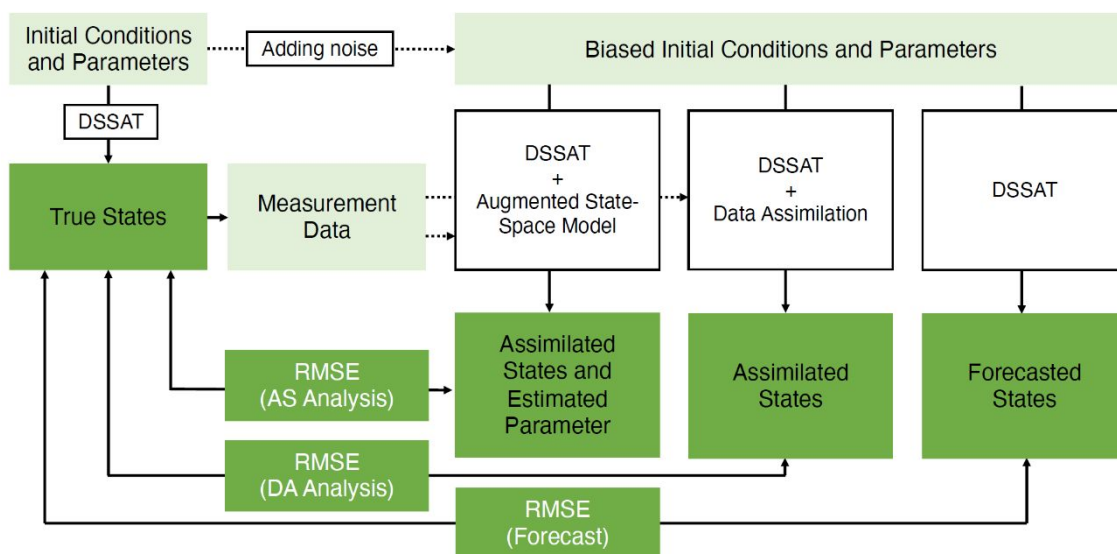


図 1. 双子実験フロー

次に、移植後 0 日から 20 日後の True run にノイズを加え、2 種類の測定データを作成した (図 2)。

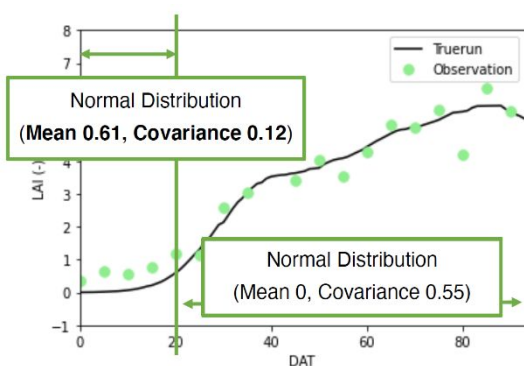


図 2. ビッグノイズを付加した実測値

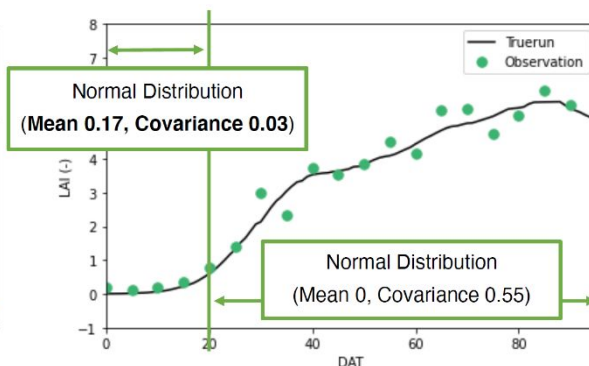


図 3. スモールノイズを付加した実測値

データ同化の効果は、LAI 解析と LAI の True run の同化ウィンドウ買いにおける結果を RMSE 指標で比較した (図 4)。

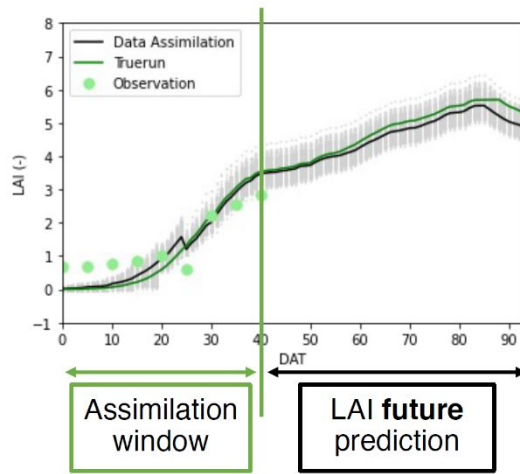


図 4. 同化ウィンドウと LAI 予測の関係

#### 4. 研究成果

研究の方法で記載した および の結果はここでは割愛し、 で得た結果の一部をここでは述べる。

真の状態に大きなノイズを測定データに加え、同化ウィンドウを変化させて EM-FL パラメータ推定を実施した結果、AS 解析の RMSE は Forecast 解析と比較し改善しない結果となった (図 5 左)。一方、LAI の将来予測では、同化ウィンドウを長くすると、AS 解析の RMSE は DA 解析および Forecast 解析に比べて減少した (図 5 右)。

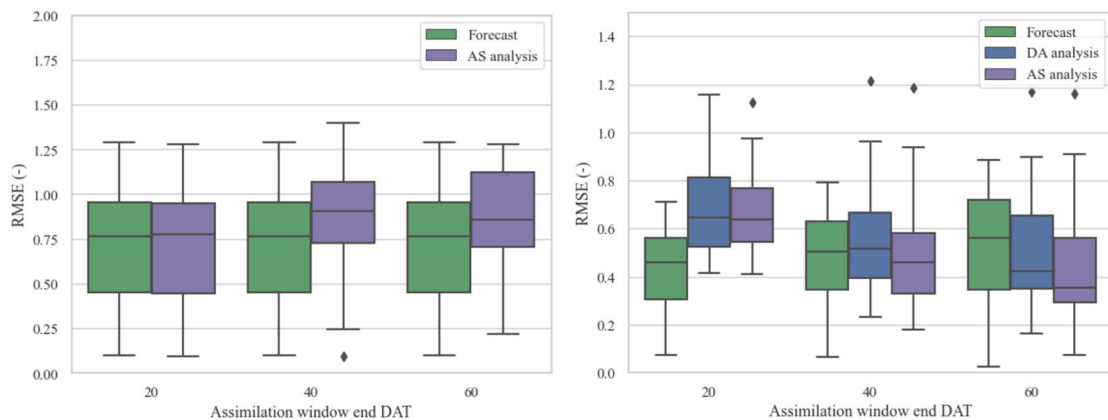


図 5. 同化ウィンドウを変化させた際の EM-FL パラメータ (左図) および LAI 予測値 (右図) の RMSE

さらに真の状態に小さなノイズを加えて測定データを使った結果、同化ウィンドウを変化させた場合の LAI 将来予測精度は、AS 解析および DA 解析の RMSE が、すべての同化ウィンドウで Forecast 解析と比較して減少した (図 6)。

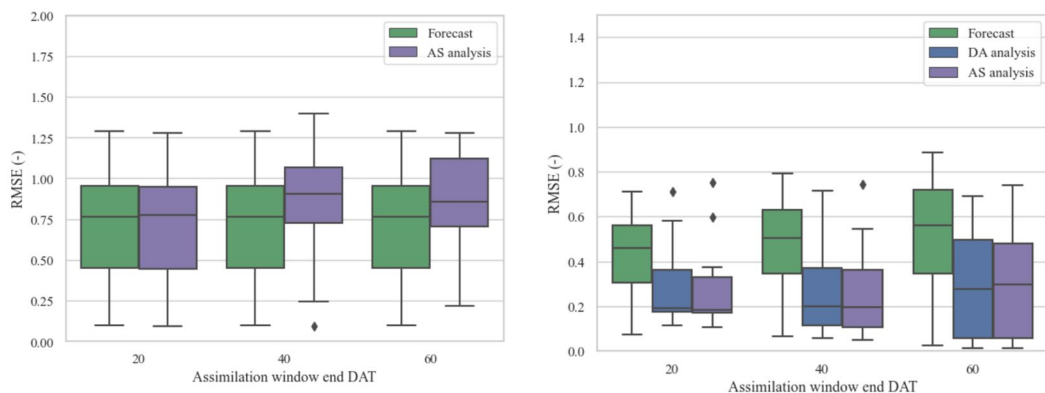


図 6. 同化ウィンドウを変化させた際の EM-FL パラメータ (左図) および LAI 予測値 (右図) の RMSE

以上より、トマトの初期 LAI のシミュレーションに寄与するモデルパラメータをより多く拡大状態空間モデルに組み込むことで、モデルパラメータの推定精度が向上する可能性があることが明らかになり、また、トマトの LAI 将来予測の性能を向上させるためには、生育初期の LAI をどのように精度よく測定・推定するかがモデルの予測精度向上にとって重要であることを示唆する結果が得られた。

パラメータ推定の結果、拡大状態ベクトルにモデルパラメータを追加する必要があることが明らかとなった(図 7)。本研究では、拡大状態空間モデルには 1 つのパラメータのみ実装しているため、真の状態と拡大状態空間モデル解析間の初期条件やパラメータのバイアス誤差をすべて吸収することは困難であることがわかった。また、LAI の将来予測を実施するため、トマトの生育初期の LAI に大きな不確実性があると仮定した。その結果、小さなノイズを加えた測定データを用いた場合の LAI の将来予測は、大きなノイズを加えた場合よりも良好な結果が得られた。

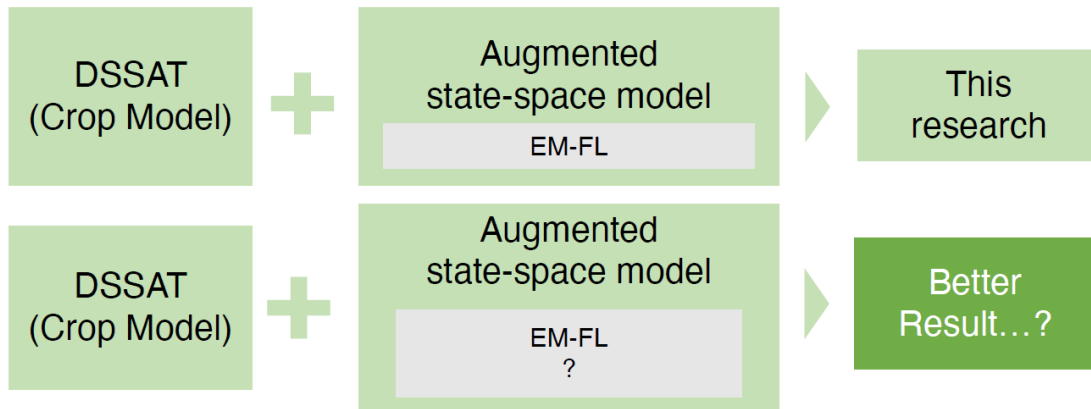


図 7. データ同化のフローと課題

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Diep Nguyen Thi HONG, Kenichi TATSUMI, Minh Vo QUANG, Megumi YAMASHITA, Truong Phan NHAT and Nhi Nguyen Thi BICH	4. 巻 78
2. 論文標題 Coastline dynamics and erosion/accretion in the estuaries of the lower Mekong Delta, Vietnam	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 121-136
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2480/agrmet.D-21-00048	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 該当する
1. 著者名 Kenichi TATSUMI	4. 巻 78
2. 論文標題 Rice yield reductions due to ozone exposure and the roles of VOCs and NOx in ozone production in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 89-100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2480/agrmet.D-21-00051	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 Mitsuaki Horiguchi, Kenichi Tatsumi, Alexandros-Panagiotis Poulidis, Toshiya Yoshida Tetsuya Takemi	4. 巻 184
2. 論文標題 Large-Scale Turbulence Structures in the Atmospheric Boundary Layer Observed above the Suburbs of Kyoto City, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Boundary-Layer Meteorology	6. 最初と最後の頁 333-354
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10546-022-00707-8	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 該当する
1. 著者名 Quang Chi Truong, Thao Hong Nguyen, Kenichi Tatsumi, Vu Thanh Pham, Van Pham Dang Tri	4. 巻 11
2. 論文標題 A Land-Use Change Model to Support Land-Use Planning in the Mekong Delta (MEKOLUC)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Land	6. 最初と最後の頁 297
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/land11020297	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 該当する

1. 著者名 Kenichi Tatsumi	4. 巻 36
2. 論文標題 Vegetation Indices Using Unmanned Aerial Vehicle to Monitor Plant-level Tomato Plant Height under Till and No-till Farming Conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 環境情報科学 学術研究論文集	6. 最初と最後の頁 44-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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, Tomoya Yamazaki and Hirohiko Ishikawa	4. 巻 9
2. 論文標題 An Open-Source, Low-Cost Measurement System for Collecting Hydrometeorological Data in the Open Field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 technologies	6. 最初と最後の頁 78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/technologies9040078	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 -

1. 著者名 Kenichi Tatsumi	4. 巻 64
2. 論文標題 A Dynamic Model for the Relationship between Rice Growth and Meteorology, Water, Nitrogen, and Canopy Structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of ASABE	6. 最初と最後の頁 1581-1610
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.13031/trans.14371	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, Noa Igarashi, Xiao Mengxue	4. 巻 17
2. 論文標題 Prediction of plant-level tomato biomass and yield using machine learning with unmanned aerial vehicle imagery	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant Methods	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s13007-021-00761-2	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 -

1. 著者名 本多誠之, 辰己賢一*, 中川正樹	4. 巻 30
2. 論文標題 LSTMによる光環境変動下におけるイネ個葉の光合成速度の予測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 農業情報研究	6. 最初と最後の頁 96-108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3173/air.30.96	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 栗原良樹, 辰己賢一	4. 巻 89
2. 論文標題 中山間地域における光環境の差異が水稻の収量に与える影響の定量的評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 63-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.89.l_63	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 辰己賢一
2. 発表標題 Vegetation Indices Using Unmanned Aerial Vehicle to Monitor Plant-level Tomato Plant Height under Till and No-till Farming Conditions
3. 学会等名 環境情報科学
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川又美月, 栗原良樹, 辰己賢一, 田島亮介, 茄子川恒
2. 発表標題 営農型太陽光発電パネルが水稻生育に与える影響
3. 学会等名 作物学会東北支部会第65回講演会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Igarashi Noa, Yusuke Kikuchi, Nineto Sato, Kenichi Tatsumi
2. 発表標題 The improvement of Crop Model Tomato LAI prediction by implementing Data Assimilation system
3. 学会等名 AGU (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Igarashi Noa, Yusuke Kikuchi, Kenichi Tatsumi
2. 発表標題 Development of Data Assimilation Crop Model contributing to the improvement of Crop Model parameter prediction
3. 学会等名 The XX CIGR World Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wang Xuyuan, Kenichi Tatsumi
2. 発表標題 Analysis of troposphere ozone effect on East-Asia grain production by WRF-chem model
3. 学会等名 The XX CIGR World Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rahman, A. S., Hamamoto, S., Saito, H., Tatsumi, K., Miyoshi, T., Nihei, N., & Ichihashi, Y.
2. 発表標題 Coupling of Data Assimilation and Hydrus for Modeling Soil-Water and Heat Transport of Rain-Fed Soybean Field throughout Japan
3. 学会等名 ASA, CSSA, SSSA International Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. T. M. Sakiur Rahman, Shoichiro Hamamoto, Hirotake Saito, Kenichi Tatsumi, Takemasa Miyoshi, Naoto Nihei, Yasunori Ichihashi
2. 発表標題 Modeling soil-water and heat transport of rain-fed soybean fields under different hydroclimatic settings throughout Japan
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五十嵐乃愛, 菊池祐介, 辰己賢一
2. 発表標題 データ同化を実装した作物モデルによるトマトLAIの再現・予測シミュレーション
3. 学会等名 日本農業気象学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 五十嵐乃愛, 辰己賢一, 菊池祐介
2. 発表標題 データ同化を実装した作物モデルによるトマトの生育及び収量の再現シミュレーション
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辰己賢一
2. 発表標題 作物成長モデルの高精度化に向けた根群域モデルの役割と課題
3. 学会等名 土壌物理学学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辰己賢一
2. 発表標題 UAV 撮影画像を用いた機械学習によるトマトの果実重予測に関する研究
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本多誠之, 辰己賢一
2. 発表標題 深層学習を用いた画像の作物検出およびその領域抽出に関する研究
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenichi Tatsumi , Noa Igarashi , Xiao Mengxue
2. 発表標題 Vegetation indices using unmanned aerial vehicle to monitor plant-level tomato plant height under till and no-till farming conditions
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究 分担者	本林 隆  (Motobayashi Takashi)  (20262230)	東京農工大学・農学部・教授   (12605)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	桂 圭佑  (Katsura Keisuke)  (20432338)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授    (12605)	
研究分担者	斎藤 広隆  (Saito Hirotaka)  (70447514)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授    (12605)	
研究分担者	山下 恵  (Yamashita Megumi)  (70523596)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授    (12605)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関