

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14946

研究課題名（和文）果菜個体群の炭素収支に基づいた開花・着果の予測手法の確立

研究課題名（英文）Carbon-balance-based prediction of flowering and fruiting of crop canopies

研究代表者

野村 浩一（Nomura, Koichi）

高知大学・教育研究部自然科学系農学部門・准教授

研究者番号：90897852

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、温室での果菜（例：ナス、トマトなど）の開花・着果数を、作物個体群の炭素収支（＝炭水化物の合成量および消費量）に基づいて予測する技術（数理モデル）を確立することであった。このために、まず、作物個体群の純光合成速度を予測する数理モデルを開発した。また、作物個体群の葉面積指数（LAI）や開花・着果数を、画像からリアルタイムで推定する手法を開発した。さらに、ナス個体の成長・開花・着果・収穫を、炭素収支に基づいてシミュレートする手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温室での果菜の開花・着果数を、作物個体群の炭素収支に基づいて予測する技術について、様々な知見を得るとともに、論文として国内外に発表した。本研究で開発した技術によって、施設園芸作物に関する様々な有益情報（例：純光合成速度、開花数・着果数、葉面積指数など）を、センサや画像などの情報に基づいて推定することが可能になった。このことは、国内外の施設園芸技術の高度化、生産者の収益向上、施設園芸作物の安定生産に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This project was conducted to develop a method (i.e., mathematical model) for predicting the numbers of flowers and fruits of fruit vegetables (e.g., tomato and eggplant) based on the carbon budget of a crop canopy. To achieve this, several types of canopy photosynthesis models were developed and tested. We also developed methods to estimate the leaf area index (LAI) and numbers of flowers and fruits of a crop canopy from digital photographs. Moreover, we developed a mathematical model that can simulate the growth, flowering, fruiting, and harvesting of a fruit vegetable crop based on the carbon budget of the crop.

研究分野：農業気象学

キーワード：光合成 呼吸 葉面積指数 開花数 着果負担 画像解析 モデリング 施設園芸

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

温室での果菜(ナス、トマトなど)の生産においては、収量や収穫時期を予測し、それらを市場の需給状況に応じてコントロールする技術の開発が切望されている。しかしながら、実際の生産では、収量が多い時期と少ない時期とが周期的に現れる、いわゆる“収量の山谷”現象が発生

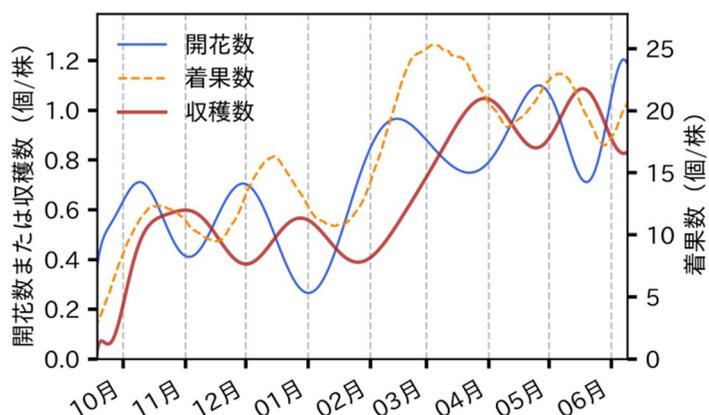


図1 ナスの開花数、着果数、収穫数の経日変化(二週間の移動平均)。

する(図1)。この現象は、作物に着果する果実(着果負担)の増加に伴って、新たな花芽の形成が抑制されること(逆に、収穫による果実数の減少に伴って、新たな花芽の形成が促進されること)によって発生する。この現象の詳細なメカニズムは解明されていないが、光合成によって獲得される炭素(糖)が、果実の肥大・成熟に優先的に使われる結果、花芽の形成に必要な糖に過不足が生じ、開花数が周期的に増減することが原因だと考えられる。収量の山の部分では、果実への供給糖の不足に起因する品質低下も生じやすい。収量の山谷を予測するためには、収穫の数週間前の“開花”および“着果”の数を予測する必要がある。しかしながら、既往研究において、開花・着果を高精度に予測し、収量の山谷を数理モデル等で再現した例はない。そこで本研究では、「栽培現場において、将来の開花・着果数を予測することが可能かどうか」を「問い」に掲げ、各種検討をおこなった。

### 2. 研究の目的

本研究は、「ナスの開花・着果数を、作物個体群の炭素収支に基づいて予測する技術(数理モデル)を確立する」ことを目的に実施された。

### 3. 研究の方法

#### (1) 作物の炭素収支の詳細検討

##### 個体群の純光合成速度の計測

作物個体群全体の純光合成速度( $A_c$ )および夜間の呼吸速度( $R_c$ )を、開放型チャンバー法(通気空気の入り口の $CO_2$ 濃度と通気流量の積から、光合成・呼吸速度を推定する手法)によって、長期・連続的に計測した(図2)。温室内で栽培中のナス個体群を、高さ2.4 m×幅1.2 m×奥行1.2 mの透明なチャンバーで囲い、ファンを用いて連続的に通気した。通気流量は超音波風速計で計測するとともに、通気の入り口・出口の空気を、電磁弁および小型ポンプを用いて交互にサンプリングし、 $CO_2$ 濃度を計測した。得られた値から $A_c$ および $R_c$ を算出した。

##### 個葉の光合成パラメータの計測

携帯型個葉光合成・蒸散計測装置(LI-6800)を用いて、個葉スケールでの純光合成速度( $A_L$ )および呼吸速度( $R_L$ )の時間変化等を計測した。また、光合成速度のモデル化に必要な個葉パラメータ(最大カルボキシル化速度 $V_{cmax}$ 、最大電子伝達速度 $J_{max}$ など)の同定を試みた。



図2 開放型チャンバー法による個体群光合成速度の計測。

#### (2) 栽培現場での炭素収支の推定方法の確立

##### 定点カメラによる葉面積指数の推定方法の確立

作物個体群スケールでの炭素収支には、葉面積の多寡が決定的な影響を及ぼすことから、葉面積指数(LAI)の経時変化を長期・連続的に推定する手法について検討した。作物個体群の上部(温室の梁部分)に定点カメラを設置し(図3)、様々な角度からナス個体群の画像を撮影した。得られた画像のうち、葉の部分と葉以外の部分とをセマンティックセグメンテーション(DeepLabv3+, Chen et al., 2018)を用いて二値化し、それらの比率から、ポアソン分布モデルによってLAIを推定した。

##### 定点カメラによる花数、果実数の計測

定点カメラの画像を用いて、画像中の花数および果実数の経時変化を推定する手法について

検討した。イチゴを対象に、作物個体群の上部(温室の梁部分)に定点カメラを設置し、一時間ごとの画像を取得した。得られた画像から、物体認識 (Faster R-CNN, Ren et al., 2015) を用いて、花数、果実数を推定した。



図 3 定点カメラによる葉面積指数 (LAI) の推定。

### (3) 光合成・成長・開花・着果・収穫のモデル化

#### 個体群の純光合成速度のモデル化

計測した  $A_c$  および  $R_c$  を様々な方法でモデル化した。簡易モデルとして、群落上部に降り注ぐ光合成光量子束密度 (PPFD;  $I$ ) と  $A_c$  との関係を、非直角双曲線で表現することを試みた。また、計測データのパターンを”学習”する人工ニューラルネットワーク (ANN) モデルについても検討した。この際、 $A_c$  および LAI を ANN の入力変数とすることによって、 $A_c$  を推定することを試みた。さらに、より詳細な物理・生化学プロセス (列状に植えられた作物個体群中の光透過や吸収、個葉表面の生化学プロセスなど) に基づいたモデルについても検討した。

#### 成長・開花・着果・収穫のモデル化

ナス個体の成長・開花・着果・収穫のモデル化を試みた。生長点、果実、根などが、光合成で生成された糖を引き付ける強さ (シンク強度) を定式化し、それらの器官に分配される糖の量を算出する仕組みとした。また、各器官の分化のパターンについては、L-system (Lindenmayer 1968) によって表現した。さらに、各器官が成長する速度を、利用可能な糖や温度の関数で表現した。各器官に割り当てられた各種パラメータについては、遺伝的アルゴリズムを用いて、数学的に推定することを試みた。

## 4. 研究成果

### (1) 個体群の純光合成速度

$A_c$  の計測および推定結果の一例を図 4(a) に示す。図において、 $A_c$  の推定は ANN モデルによって実施した。図に示す通り、個体群チャンパー法により、ナス個体群の  $A_c$  を連続的に計測することが可能となった (黒線)。また、計測データの一部を ANN モデルに学習させることによって  $A_c$  を高精度で推定することが可能であった (赤線)。また、同様の方法は、個体群の蒸散速度 ( $E_c$ ) の推定にも応用可能であることが示唆された (図 4 (b))。

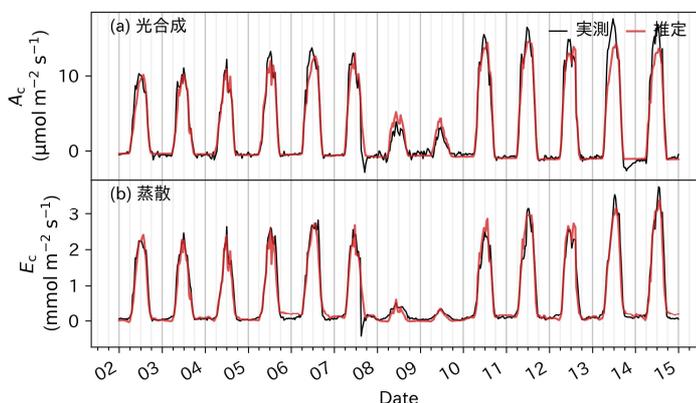


図 4 ナス個体群の光合成速度 ( $A_c$ ) および蒸散速度 ( $E_c$ ) の実測値および推定値。

ANN モデルに加えて、より詳細な物理・生化学プロセスに基づいた個体群光合成モデルについても検討を行った (図 5)。列状に植えられた作物個体群を直方体として表現することによって、列幅や通路幅、太陽の位置、散乱光率、群落の高さなどの違いが  $A_c$  に及ぼす影響について、シミュレートすることが可能となった。

2023-06-16 10時00分,  
太陽高度 = 61°, 方位角 = 102°,  
直射光 = 740, 散乱光 = 361,  
LAI = 3.0 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>,  
群落光合成速度 = 23.0 μmol m<sup>-2</sup> ground s<sup>-1</sup>

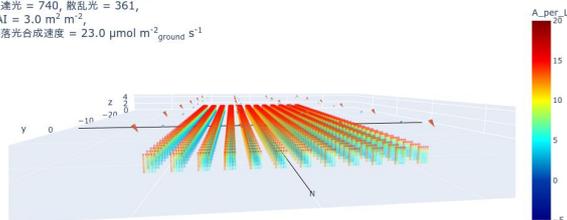


図 5 列状の作物個体群における光合成モデル。

### (2) 定点カメラによる作物状態の推定

定点カメラを用いて、LAI、花数、果実数の推定を試みた。結果の一例を図 6 および 7 に示す。最新の深層学習を用いた画像解析技術 (DeepLabv3+ および Faster R-CNN) によって、作物個体群の様々な情報を抽出できることが明らかになった。一方、栽培現場への実装にあたっては、栽培方法 (例: 作物の高さ) によって、適切なカメラの設置位置や角度を検討する必要があることが示唆された。

### (3) 成長・開花・着果・収穫のモデル化

新たに構築したナス個体の成長・開花・着果・収穫モデルにより、環境要素から、ナス個体の成長等をリアルに再現することに成功した (図 8)。実測値を用いてパラメータをキャリブレーションすることで、様々な個体の成長・開花・着果・収穫の様子を再現することが可能となった。一方、パラメータのキャリブレーションには、日単位での逐次計算を数百回繰り返す必要がある

ため、計算負荷が大きいことが課題であった。

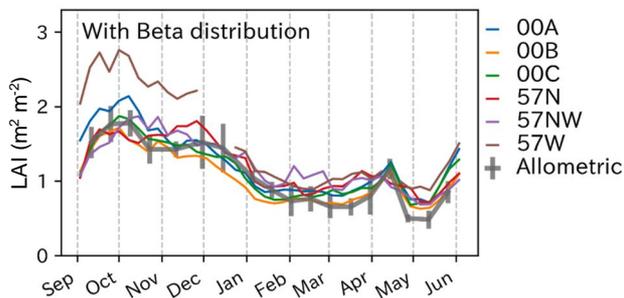


図6 定点画像によるナス葉面積指数(LAI)の長期推定. 00A~57Wまでの6台の定点カメラでLAIを推定した. なお、図中のAllometricは、メジャーで計測した葉長・葉幅を基に、回帰式を用いて推定したLAIである.



図7 定点画像によるイチゴの花数・果実数の推定.

(4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、今後の展望

本研究で得られた成果を、査読付論文6報によって、国内外に発表した。また、未発表の成果についても、今後、論文として発表予定である。本研究で構築した $A_c$ の推定モデル(ANNモデル)については、流行中の機械学習手法を施設園芸の現場に応用した好例と考える。また、画像解析によるLAIや花数・果実数の推定についても、機械学習手法をうまく施設園芸現場に応用しており、実用的な価値が高いと考える。炭素収支に基づいたナスの成長・開花・着果・収穫モデルにつ

いては、炭素収支から作物の成長等をリアルに予測可能であることを示した一例と言え、論文発表を行うことで、大きな注目を集める可能性があると考え。今後は、より詳細な炭素収支の計測結果に基づいて、各パラメータの値の妥当性について検証する必要がある。

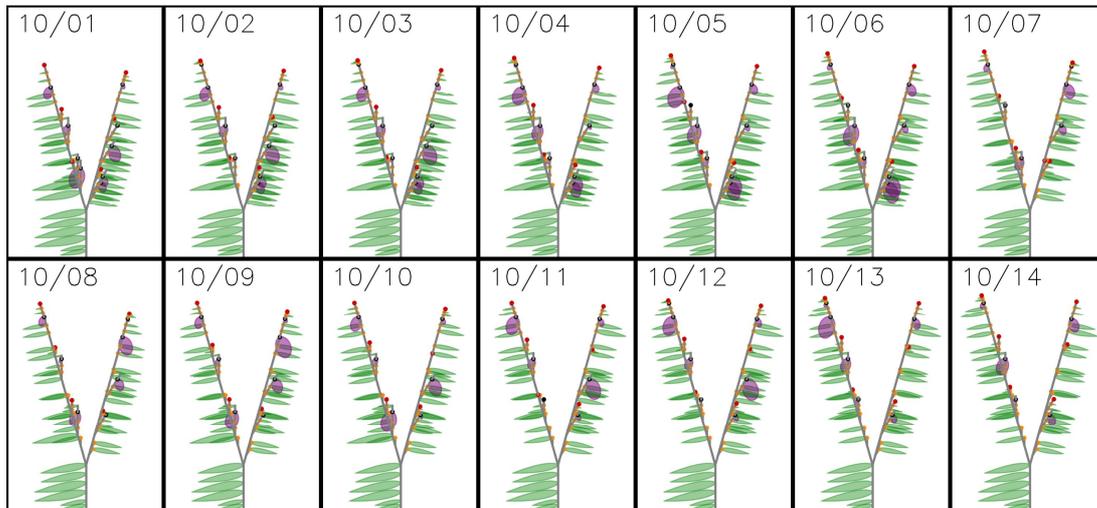


図8 炭素収支に基づいたナスの成長・開花・着果・収穫モデルによるシミュレーション例。

<引用文献>

Chen, Liang-Chieh, Yukun Zhu, George Papandreou, Florian Schroff, and Hartwig Adam. 2018. "Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation." In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11211 LNCS:833-51.

Lindenmayer, A. 1968. "Mathematical Models for Cellular Interactions in Development. II. Simple and Branching Filaments with Two-Sided Inputs." *Journal of Theoretical Biology* 18 (3): 300-315.

Ren, Shaoqing, Kaiming He, Ross Girshick, and Jian Sun. 2015. "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks." *ArXiv [Cs.CV]*. arXiv. <http://arxiv.org/abs/1506.01497>.

## 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 6件）

1. 著者名 Nomura Koichi, Wada Eriko, Saito Masahiko, Yamasaki Hiromi, Yasutake Daisuke, Iwao Tadashige, Tada Ikunao, Yamazaki Tomihiro, Kitano Masaharu	4. 巻 57
2. 論文標題 Estimation of the Leaf Area Index, Leaf Fresh Weight, and Leaf Length of Chinese Chive ( <i>Allium tuberosum</i> ) Using Nadir-looking Photography in Combination with Allometric Relationships	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 HortScience	6. 最初と最後の頁 777 ~ 784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21273/HORTSCI16569-22	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 NOMURA K., SAITO M., ITO M., YAMANE S., IWAO T., TADA I., YAMAZAKI T., ONO S., YASUTAKE D., KITANO M.	4. 巻 60
2. 論文標題 Diurnal decline in the photosynthetic capacity of uppermost leaves in an eggplant canopy grown in a horticultural greenhouse	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Photosynthetica	6. 最初と最後の頁 457 ~ 464
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32615/ps.2022.040	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 NOMURA Koichi, ITO Masashi, KUSABA Yusuke, SAITO Masahiko, MORI Makito, YAMANE Shinzo, IWAO Tadashige, TADA Ikunao, YAMAZAKI Tomihiro, KITANO Masaharu	4. 巻 307
2. 論文標題 Estimation of the optimal leaf area index (LAI) of an eggplant canopy based on the relationship between the nighttime respiration and daytime photosynthesis of the lowermost leaves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientia Horticulturae	6. 最初と最後の頁 111525 ~ 111525
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scienta.2022.111525	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 Nomura Koichi, Kaneko Takahiro, Iwao Tadashige, Kitayama Mizuho, Goto Yudai, Kitano Masaharu	4. 巻 155
2. 論文標題 Hybrid AI model for estimating the canopy photosynthesis of eggplants	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Photosynthesis Research	6. 最初と最後の頁 77 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11120-022-00974-z	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 Nomura Koichi, Saito Masahiko, Kitayama Mizuho, Goto Yudai, Nagao Koyo, Yamasaki Hiromi, Iwao Tadashige, Yamazaki Tomihiro, Tada Ikunao, Kitano Masaharu	4. 巻 319
2. 論文標題 Leaf area index estimation of a row-planted eggplant canopy using wide-angle time-lapse photography divided according to view-zenith-angle contours	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 108930 ~ 108930
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.agrformet.2022.108930	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 Nomura Koichi, Saito Masahiko, Tada Ikunao, Iwao Tadashige, Yamazaki Tomihiro, Kira Nobuyuki, Nishimura Yasuyo, Mori Makito, Baeza Esteban, Kitano Masaharu	4. 巻 57
2. 論文標題 Estimation of Photosynthesis Loss Due to Greenhouse Superstructures and Shade Nets: A Case Study with Paprika and Tomato Canopies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 HortScience	6. 最初と最後の頁 464 ~ 471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21273/HORTSCI16384-21	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23件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 永尾航洋, 野村浩一, 岩尾忠重, 山崎浩実, 森牧人, 北野雅治
2. 発表標題 高知ナスの養液栽培における果実肥大予測モデルの検討
3. 学会等名 日本農業気象学会中四国支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 横山岳, 張替創太, 安武大輔, 広田知良, 野村浩一, 北野雅治
2. 発表標題 植物生理生態モデルとANNモデルの併用による畑作物群落の蒸発散速度の推定
3. 学会等名 The 31st Symposium on Fuzzy, Artificial Intelligence, Neural Networks and Computational Intelligence
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張替創太, 横山岳, 安武大輔, 野村浩一, 北野雅治, 広田知良
2. 発表標題 Hybrid ANNモデルの水ストレス環境における群落蒸発散量の推定精度の評価
3. 学会等名 日本農業気象学会九州支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野村浩一, 斉藤雅彦, 但田育直, 岩尾忠重, 山崎富弘, 北野雅治
2. 発表標題 温室内の列作物個体群の光合成シミュレーション
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小野信太郎, 横山岳, 安武大輔, 中井鴻美, 日高功太, 木村建介, 野村浩一, 北野雅治, 広田知良
2. 発表標題 温室内の微風速環境において風がイチゴの個葉光合成速度に及ぼす影響 - 拡散抵抗と葉の熱収支に基づく解析 -
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 横山岳, 張替創太, 安武大輔, 野村浩一, 北野雅治, 廣田知良
2. 発表標題 機械学習モデルによる作物群落の蒸発散の推定: プロセスモデルを用いた特徴エンジニアリングによる汎化性と解釈性の向上
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 但田育直, 野村浩一, 斉藤雅彦, 岩尾忠重, 山崎富弘, 北野雅治
2. 発表標題 ハイブリッドAIモデルを用いたナス群落葉温の推定
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Sutan Muhamad Sadam Awal, Koichi Nomura, Takashi Okayasu, Masaharu Kitano
2. 発表標題 Development of Low-Cost Farming Support Robot and Verification of Its Validity Based on ROS (Robot Operating System)
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural Meteorology (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤寿樹, 安武大輔, 横山岳, 北野雅治, 野村浩一, 広田知良
2. 発表標題 二つ葉の異なる成長段階における光合成モデルパラメータの分布
3. 学会等名 日本生物環境工学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安武 大輔, 北内 拓樹, 野村 浩一, 北野 雅治, 岡安 崇史, 尾崎 行生, 広田 知良
2. 発表標題 NFT水耕栽培における根群の成長モニタリングシステム - 地上部も含めた統合評価に向けて -
3. 学会等名 日本生物環境工学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤寿樹, 安武大輔, 野村浩一, 横山岳, 広田知良, 北野雅治
2. 発表標題 ニラの葉の成長に伴う光合成産物分配の動態
3. 学会等名 日本生物環境工学会九州支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野村浩一
2. 発表標題 作物の環境応答のモデリング：施設園芸分野における現状と課題
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北野雅治, 齋藤雅彦, 岩尾忠重, 野村浩一, 但田育直, 山崎富弘
2. 発表標題 葉面对流センサの開発とその特性
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北野雅治, 岩尾忠重, 野村浩一, 齋藤雅彦, 但田育直, 山崎富弘, 永尾航洋
2. 発表標題 作物生理生態Hybrid AI Modelの効用について
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩尾忠重, 北野雅治, 野村浩一
2. 発表標題 IoP(Internet of Plants)でのAI利用と課題について
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中井鴻美, 安武大輔, 日高功太, 野村浩一, 江口壽彦, 横山岳, 広田知良
2. 発表標題 イチゴ葉におけるスクロース-デンプン間の炭素分配の特性評価 - グロースチャンバーを用いた光環境制御実験に基づいて -
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張替創太, 横山岳, 安武大輔, 野村浩一, 北野雅治, 広田知良
2. 発表標題 植物生理生態モデルとANNを併用したハイブリッドモデルによるC4作物群落の蒸発散速度の推定
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永尾航洋, 野村浩一, 岩尾忠重, 北野雅治, 山崎浩実
2. 発表標題 ナスにおける果実新鮮重および果実肥大の非破壊計測
3. 学会等名 園芸学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高尾海星, 浜田和俊, 野村浩一, 齊藤雅彦, 北野雅治
2. 発表標題 チャンバー法によるユズ樹の長期的な光合成速度の計測と推定
3. 学会等名 園芸学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子尚弘, 野村浩一, 安武大輔, 岩尾忠重, 岡安崇史, 尾崎行生, 広田知良, 北野雅治
2. 発表標題 植物生理生態モデルとニューラルネットワークを併用したハイブリッドモデルによる群落蒸散速度の推定
3. 学会等名 日本生物環境工学会九州支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichi Nomura
2. 発表標題 Development of crop physioecological AI engines
3. 学会等名 International Symposium on IoP Projects (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高尾海星, 浜田和俊, 野村浩一, 齊藤雅彦, 北野雅治
2. 発表標題 チャンバー法によるユズ樹の長期的な光合成速度の計測
3. 学会等名 園芸学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野村浩一, 北野雅治
2. 発表標題 Internet of Plants (IoP) の共創(2) 作物群落の生理生態の可視化
3. 学会等名 日本農業気象学会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------