

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K15351

研究課題名(和文) 養液栽培における根域統合環境制御に向けた根の生理機能の環境応答解析

研究課題名(英文) Analysis of environmental response of root physiology for integrated environmental control of the root zone in hydroponic cultivation

研究代表者

佐合 悠貴 (Sago, Yuki)

山口大学・大学院創成科学研究科 ・准教授

研究者番号：20648852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、養液栽培における根域の物質移動現象を解析し、持続的かつ生産性の高い肥培管理法を提案することを目的としている。まず、根域環境の解析と調節法を検討するため、培地耕条件下における根の養水分吸収速度と培地含水量および酸素量との関係を解析した。さらに、養分吸収速度、植物の成長速度および代謝速度に関するモデルを統合することで、根域の養分動態を長期シミュレーション可能なモデルを構築した。このモデル駆使して、肥料として与えた窒素を植物に効率的に全量吸収させ、栽培時に余剰な養液廃液を発生させない肥培条件を求め、その有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は、養液栽培における根域の物質移動現象を解析し、持続的かつ生産性の高い肥培管理法を提案することである。この目的を達成するために、培地耕条件下において簡易に評価可能な定量的指標を用いて根の養分吸収能を把握することを可能とし、根域環境の統合的制御の実現に向けた知見を得ることができた。さらに、肥培管理の最適化に応用可能な、根域養分動態のシミュレーションモデルを構築し、そのモデルに基づいて、与えた窒素全量を植物に吸収させきったタイミングで養液を廃棄することで、無駄な窒素を環境中に排出しない環境保全型の肥培管理を確立した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to analyze the transport phenomenon of water and nutrient in the root zone and to propose a sustainable and productive fertilization management method for hydroponics. The relationship between the rate of water and nutrient uptake by roots and the water and oxygen content of the medium in rockwool cultivation was analyzed in order to analyze and control the root zone environment. Furthermore, a model for long-term simulation of nutrient dynamics in the root zone was developed by integrating models for the rate of nutrient uptake, plant growth and metabolism. The effectiveness of this model was verified by determining the optimum fertilization conditions for plants to absorb nitrogen provided to plants without excess nutrient effluent during cultivation.

研究分野：生物環境調節学

キーワード：養液栽培 養水分吸収モデル 根域養分動態モデル シミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

養液栽培は、土耕栽培と比べて面積あたりの生産性が高く、有限な水・肥料資源の消費量が少ない点で持続的な食料生産に資する技術である。一方、根域環境調節の困難さから有機質培地の利用が進まず、廃棄処理が環境負荷となる鉱物由来培地が主に使用されている。また、養液の循環利用などの栽培時の養液余剰の抑制による、水・肥料資源消費量の節減や廃液放流による水系環境汚染の防止も求められる。

植物の根による物質吸収機能は植物生産場の物質動態を支配しているが、培地—植物間の物質動態を支配する植物の根による物質吸収に関する情報は不足している。根の物質吸収は、膜輸送タンパク質（チャンネル、トランスポーター、ポンプ）の活性や環境応答（ストレス回避や順化）に関する分子、遺伝子レベルでの研究が展開されてきた。植物体の根系はアプローチの困難な地下部に広く分布するため、植物生産場の多様な環境条件下において非破壊の根系の物質吸収機能の定量的な評価は難しい。そのため、非破壊の根系の物質吸収機能の評価法は十分に検討されておらず、植物生産場における物質動態と根系の物質吸収機能（吸水、各イオン吸収および呼吸）や膜輸送タンパク質の機能との関係性の解明が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、養液栽培における根域の物質移動現象を解析し、持続的かつ生産性の高い肥培管理法を提案することである。本研究では、まず、根域環境の解析と調節法を検討するため、培地耕条件下における根の養水分吸収速度評価システムを構築した。さらに、養分吸収速度、植物の成長速度および代謝速度に関するモデルを統合することで、根域の養分動態を長期シミュレーション可能なモデルを構築した。このモデル駆使して、肥料として与えた窒素を植物に効率的に全量吸収させ、栽培時に余剰な養液廃液を発生させない肥培条件を求め、その有効性を確認した。

3. 研究の方法

(1) 植物生産場の環境と植物の養分吸収との関係の解析

重要な生理機能である根の養水分吸収は様々な環境条件下で測定する技術が求められている。しかし、根は地下部にあるため測定が非常に困難であるため、測定例が少なく、根を対象とした環境制御はあまり行われていない。そこで、本課題では、半自動養水分吸収速度測定システムを構築した。以前の測定では、測定操作手順が多く、人為的なミスによる精度の低下が課題であったが、本システムでは養液を自動サンプリングすることで、測定の簡易化や高精度化を図った。

構築したシステムを用いて、異なる環境条件下で養水分吸収速度を測定し、本装置の精度の検討をすることで、栽培環境最適化に応用可能であるかを検証した。人工気象器内においてフリルレタス (*Lactuca sativa* L.) 品種‘フリルアイス’を栽培した。地上部環境条件としては、気温を 20℃、CO₂濃度を 1200ppm、光強度 (PPFD) を 200 μmol m⁻² s⁻¹、相対湿度を 60% になるように制御した。養液条件としては、OAT ハウス SA 処方を用い、pH を 6.2、電気伝導度 (EC) を 2.0 dS m⁻¹ とした。播種後 38±2 日後のレタスを用いて養液温度を 5℃、10℃、20℃および 35℃にそれぞれ設定し、植物を水耕チャンバに設置してから一時間後を測定の開始点とした。1 個体につき測定時間を 100 分とし、20 分毎に養液のサンプリングを行った。また、養液タンク内重量は 1 分毎に測定を行った。なお、測定は人工気象器内で実施し、地上部環境条件は栽培時と同様にした。

(2) 培地耕条件下における根域環境の解析と調節法の検討

本研究では、根の養水分吸収に対する環境作用を把握し、その情報を、閉鎖式養液栽培における適切な肥培管理に活かすことを目的に、培地耕条件下における養水分吸収特性評価システムを構築した。根の養水分吸収特性評価システムは、培地（ロックウール）を置いた栽培ベッド、養液タンク、余剰養液タンク、循環ポンプおよびこれらを繋ぐ配管で構成される。養液は、電子天秤上に設置された養液タンクからロックウールへ、3 時間おきに 1 時間循環ポンプにより供給される。さらに、ロックウールから排出された余剰養液は、余剰養液タンクに溜められる。ナスは、システム毎に 1 株ずつ定植し計 6 システムとした。養水分吸収特性評価は、3 時間毎に 2 日間測定した。測定項目は、養液供給量、余剰養液量、養液の EC、pH および養液内イオン濃度とした。また、ハウス内の気温、湿度、PPFD の変化は 10 分ごとに記録した。

(3) 余剰廃液の節減に向けた肥培管理法の開発

養液栽培は、生産性の高さや精密な肥培管理が可能などの理由から、植物工場などの先端的農業において重要な技術になっている。しかし、養液栽培で発生する排液は廃棄されると、肥料コストの無駄が発生するとともに、水系の富栄養化などの環境負荷の原因となるため、排液を循環利用する閉鎖式養液栽培の導入が図られている。しかしながら、根の養水分吸収は環境に大きく影響されるため、閉鎖式養液栽培では、肥料組成が次第に変化し、さらに長期間の栽培で肥料組成が崩れ、生産性が低下してしまうことが課題である。そこで根域養分動態のシミュレーションモデルに基づいて、与えた窒素全量を植物に吸収させきったタイミングで養液を廃棄することで、無駄な窒素を環境中に排出しない環境保全型の肥培管理の確立を試みた。

まず、山口大学内の人工光型植物工場に設置された湛液水耕栽培装置においてフリルレタス (*Lactuca sativa* L.) を 40 日間栽培した。栽培用ウレタンスポンジに播種し、気温 20℃において

催芽し、播種後 2 日目より光を照射した。播種後 10 日目に栽培パネルに 48 株仮植し、育苗した。地上部環境条件は、光強度 (PPFD) を $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、気温を 20°C 、相対湿度を 60%、 CO_2 濃度を $1200 \mu\text{mol mol}^{-1}$ に制御した。日長は、播種後 20 日目までは常時照射とし、20 日目から 20h とした。養液は、OAT ハウス SA 処方を用い、1 株当たりの初期窒素施用量を 150 および 200mg-N (それぞれ 150N 区および 200N 区) に設定して量的管理した。測定項目は、播種後 20 日目から 5 日おきに収穫した植物体の地上部と地下部の新鮮重と乾物重、葉内 NO_3^- 含量および養液内 NO_3^- 濃度とした。

4. 研究成果

(1) 植物生産場の環境と植物の養分吸収との関係の解析

初めに、根の養水分吸収速度に対する養液温度、成長段階および養液濃度の作用の評価をした。供試植物はフリルレタスとし、人工光型植物工場で栽培した。栽培条件は、気温を 20°C 、 CO_2 濃度を 1200 ppm、光強度を $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、相対湿度を 50~70%、養液条件は、OAT ハウス SA 処方を用い、電気伝導度 (EC) を 2.0dS m^{-1} 、pH を 6.2 とした。測定中の環境条件は、処理条件以外は栽培時と同様にした。測定時間は 1 個体につき 100 分とし、20 分間隔で養液のサンプリングをした。まず、養液温度を $5\sim 35^\circ\text{C}$ の 4 段階に設定したところ、 35°C において養水分吸収速度が最大になった (図 1, 図 2)。これは、吸水に伴うマスフローの増加によるものであると考えられる。次に、成長段階を播種後 23~38±2 日の 4 段階に設定したところ、播種後 33 日前後の個体において養分吸収速度が最大になった。これは、播種後 33 日を過ぎると根の老化が進み、活性が低下したためであると考えられる。最後に、養液の EC を調節することで Ca^{2+} 濃度を 2.3~27.2ppm の 5 段階に設定したところ、20.0ppm において Ca^{2+} 吸収速度が最大になった。これは、膜輸送タンパク質と Ca^{2+} が出会う頻度は濃度に依存するが、ある一定以上になると飽和する。さらに、浸透圧上昇により、吸水に伴うマスフローが低下し、吸収が抑制されたと考えられる。また、精度に関しては、多くの養分吸収速度測定値において二点よりも多点から求めた方が標準誤差は小さくなっていった。すなわち、構築したシステムは養水分吸収速度を簡易かつ高精度に測定可能であると示唆された。

次に、吸収に対する環境作用の測定データを栽培環境最適化に応用した。本研究では、日本人に不足しがちな Ca に着目し、フリルレタスの葉内 Ca 含量を増やすための環境制御を検討した。根域温度を 20°C かつ Ca^{2+} 濃度を 12.5ppm に設定した対照区および根域温度を 35°C かつ養液内 Ca^{2+} 濃度を 20.0ppm に設定した処理区を設けた。播種後 20 日目に各処理区に定植し、播種後 33 日目に収穫をした。その結果、フリルレタスの葉内 Ca 含量は対照区よりも処理区で増加した。すなわち、養水分吸収に対する環境作用の評価は、栽培環境最適化に寄与できると示唆された。

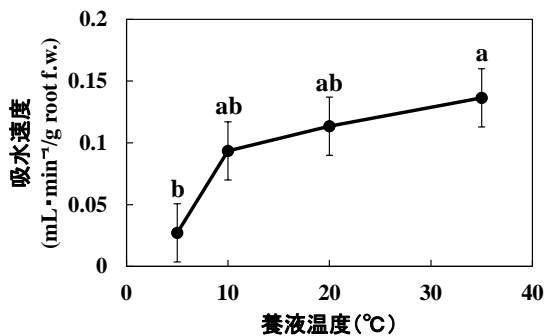


図 1. 異なる養液温度における吸水速度。エラーバーは標準誤差を示す。異なるアルファベット間で有意差あり (Tukey-Kramer test, $p < 0.05$)。

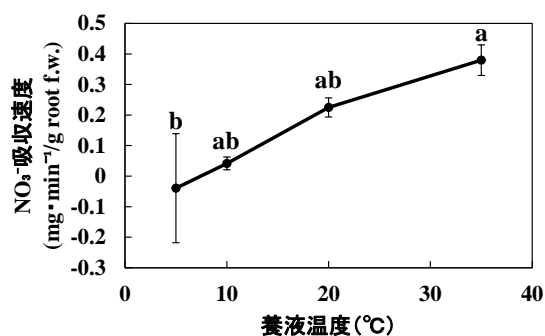


図 2. 異なる養液温度におけるレタスの NO_3^- 吸収速度。エラーバーは標準誤差を示す。異なるアルファベット間で有意差あり (Tukey-Kramer test, $p < 0.05$)。

(2) 培地耕条件下における根域環境の解析と調節法の検討

測定期間は 2 日間とも快晴であった (図 3)。養液供給量は 1 回の養液供給量は、1 システムあたり約 2.2L であった。余剰養液量は昼間に減少し、夜間に増加した。養液供給量と余剰養液量の差から吸水速度を求めたところ、昼間に増加し、夜間に減少した (図 4)。また、PPFD から求めた積算光量子量と吸水速度との関係を求めたところ、PPFD が高いほど吸水速度も大きくなり、この 2 つは線形関係にあることが分かった。EC と pH については測定期間中大きな変化は見られなかった。養液タンク内の養液をサンプリングし、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} および SO_4^{2-} の各イオンについてイオンクロマトグラフィーを用いて濃度を測定した。各イオン濃度とシステム内養液の体積の変化からシステム内イオン量の経時変化を求めた。さらにイオン吸収速度は吸水速度と養液イオン濃度に依存すると仮定して、実測したシステム内イオン量の変化を最も上手くシミュレートできるイオン吸収モデルを検討した。その結果、養液イオン濃度と吸水速度の積を変数とした線形モデルにより最も上手くシミュレートできた。このモデルを用いて、測定期間中のイオン吸収速度の経時変化を得たところ、イオン吸収速度は、昼間に増加し、夜間に

減少した (図 5)。以上より、構築したシステムは、培地耕条件において簡易に評価可能な定量的指標を用いて根の養分吸収能を把握することを可能とし、根域環境の統合的制御の実現に向けた知見を得ることができた。さらに、肥培管理の最適化に応用可能な、根域養分動態のシミュレーションモデルを構築し、そのモデルに基づいて、与えた窒素全量を植物に吸収させきったタイミングで養液を廃棄することで、無駄な窒素を環境中に排出しない環境保全型の肥培管理を確立した。

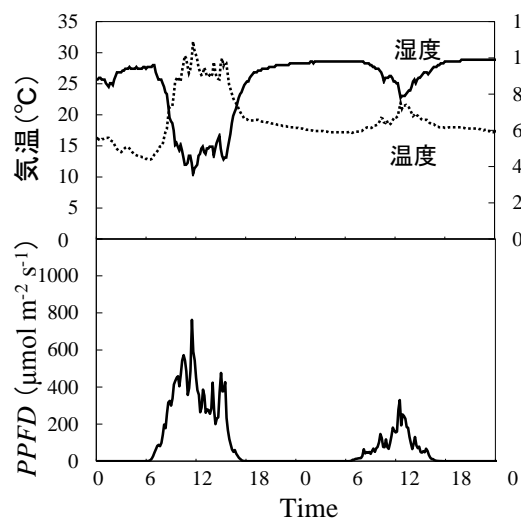


図 3. 測定期間中の温度、湿度および PPFD の経時変化。

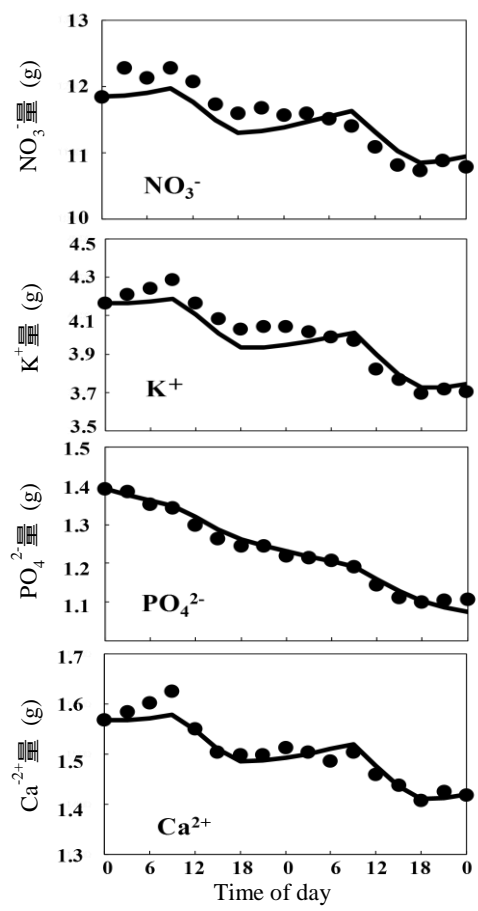


図 5. 3 時間毎のシステム内イオン量の実測値 (点) とモデルに基づくシミュレーション値 (実線)。

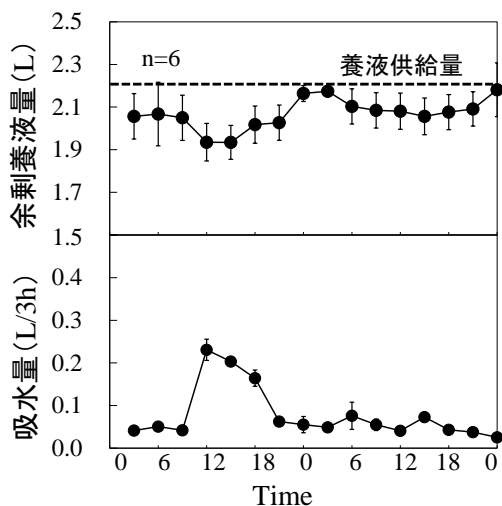


図 4. 3 時間毎の余剰養液量と吸水量の経時変化。エラーバーは標準誤差を示す。

(3) 余剰廃液の節減に向けた肥培管理法の開発

播種後 40 日目の新鮮重は、150N 区および 200N 区のどちらも出荷基準の 80g を超えたが、全ての重さで 200N 区よりも 150N 区が高かった (図 6)。これは、定植時の重さが 200N 区より大きかったためであると考えられ、相対成長速度は 200N 区の方が高かった。両区の測定値はそれぞれロジスティック式によくあてはまった (図 6)。また、両区の $[\text{NO}_3^-]$ は、根の吸収に伴い減少し、収穫の数日前に 0 になった (図 7)。200N 区の $[\text{NO}_3^-]$ の変化量から求めた F_{Nu} は、ミカエリス・メンテン式を基にしたモデルにあてはめることができ、モデルから計算した $[\text{NO}_3^-]$ の推移は概ね実測値に近かった。さらに、 M_{Nv} は定植後増加したが、 $[\text{NO}_3^-]$ の減少に伴って減少した (図 8)。200N 区の F_{Nu} および M_{Nv} の測定値から求めた F_{Nvs} は、 M_{Nv} と相関関係が見られ、一次式にあてはめることができた。 F_{Nvs} および F_{Nu} から M_{Nv} を予測すると、パラメータを求めた 200N 区だけでなく、バリデーションとして計算した 150N 区においても概ね実測値と近くなった (図 8)。以上のことから、構築したモデルは余剰廃液を効率的に節減する量的管理条件の最適化することが可能であることが確かめられ、量的管理条件の最適化に応用できることが示唆された。

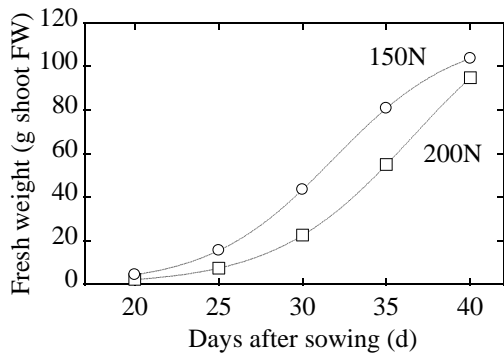


図 6. 地上部新鮮重の推移。

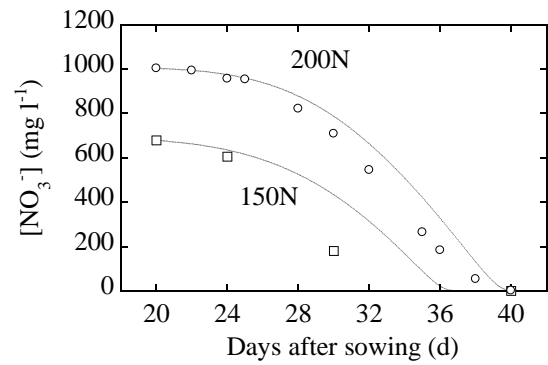


図 7. 養液内 NO₃⁻濃度([NO₃⁻])の推移。

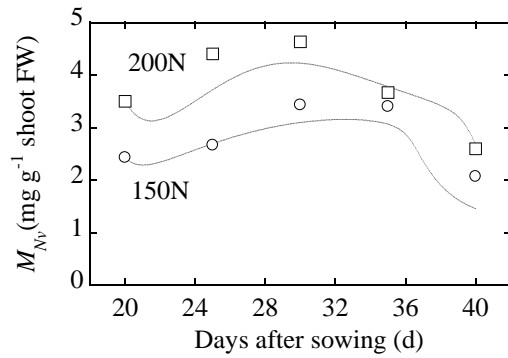


図 8. 葉内 NO₃⁻濃度(M_{Nv})の推移。

(4) まとめ

本研究は、培地耕条件において簡易に評価可能な定量的指標を用いて根の養分吸収能を把握することを可能とし、根域環境の統合的制御の実現に向けた知見を得ることができた。さらに、肥培管理の最適化に応用可能な、根域養分動態のシミュレーションモデルを構築し、そのモデルに基づいて、与えた窒素全量を植物に吸収させきったタイミングで養液を廃棄することで、無駄な窒素を環境中に排出しない環境保全型の肥培管理を確立した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Sago Y., Watanabe N. and Minami Y.	4. 巻 74
2. 論文標題 Zinc biofortification of hydroponic baby leaf lettuce grown under artificial lighting with elevated wind speed and root zone temperature	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 173 ~ 177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2480/agrmet.D-17-00048	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 Sago Y. and Shigemura A.	4. 巻 53
2. 論文標題 Quantitative Nutrient Management Reduces Nitrate Accumulation in Hydroponic Butterhead Lettuces Grown under Artificial Lighting	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 HortScience	6. 最初と最後の頁 963 ~ 967
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21273/HORTSC112418-17	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 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 澤春奈, 佐合悠貴, 田代菜菜
2. 発表標題 リーフレタスにおける硝酸塩の吸収と代謝に対する光条件の影響
3. 学会等名 日本農業気象学会2020年全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田代菜菜, 佐合悠貴, 澤春奈
2. 発表標題 リーフレタス成長モデルの構築に向けた個体および個葉における光合成速度の評価
3. 学会等名 日本農業気象学会2020年全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福丸千聖, 佐合悠貴
2. 発表標題 ナスの養液栽培における養水分吸収特性の把握 評価システムの検討
3. 学会等名 2019年日本農業気象学会中四国支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田代菜菜, 佐合悠貴
2. 発表標題 リーフレタス成長モデルの構築に向けた同化箱法による光合成速度の評価
3. 学会等名 2019年日本農業気象学会中四国支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤春奈, 佐合悠貴
2. 発表標題 量的管理によるリーフレタスの葉内硝酸塩含量の低減 低減効果に対する光条件の影響
3. 学会等名 2019年日本農業気象学会中四国支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐合悠貴, 竹本拓海
2. 発表標題 NiCoLetモデルによる水耕栽培リーフレタスの葉内硝酸塩含量推定
3. 学会等名 日本生物環境工学会2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐合悠貴, 竹本拓海
2. 発表標題 レタスの量的管理水耕栽培における葉内硝酸塩含量予測モデルの検討
3. 学会等名 日本農業気象学会2019年全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sago Y., Watanabe N. and Minami Y.
2. 発表標題 Zinc biofortification of hydroponic baby leaf lettuce grown under environmentally controlled conditions
3. 学会等名 The 5th International Zinc Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐合悠貴, 井本達宏
2. 発表標題 根のイオン吸収速度測定の半自動化による簡易化と精度向上
3. 学会等名 日本生物環境工学会2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐合悠貴, 井本達宏
2. 発表標題 根のイオン吸収速度に対する環境作用の計測と植物工場栽培管理への応用
3. 学会等名 農業環境工学関連5学会2018年合同大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹本拓海, 佐合悠貴
2. 発表標題 レタスの葉内硝酸塩含量を低減する量的管理条件の最適化へ向けた窒素吸収・代謝モデルの構築
3. 学会等名 日本農業気象学会中四国・近畿支部2018年合同大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鶴川匠, 佐合悠貴
2. 発表標題 成長速度と葉内Ca含量への環境作用に基づくサラダナのチップバーン発生予測モデルの検討
3. 学会等名 日本農業気象学会中四国・近畿支部2018年合同大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北内拓樹, 井本達宏, 佐合悠貴
2. 発表標題 半自動測定装置を用いた養水分吸収に対する環境作用の評価 栽培環境最適化への応用
3. 学会等名 日本農業気象学会中四国・近畿支部2018年合同大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐合悠貴, 竹本拓海
2. 発表標題 レタスの量的管理水耕栽培における葉内硝酸塩含量予測モデルの検討
3. 学会等名 日本農業気象学会2019年全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐合悠貴, 宮本拓弥, 渡邊尚也.
2. 発表標題 植物工場での蒸散促進によるペピーリーフの垂鉛含量向上
3. 学会等名 日本農業気象学会2018年全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井本達宏, 佐合悠貴
2. 発表標題 根の養水分吸収速度測定システムの構築 半自動化による簡易化と精度向上
3. 学会等名 日本農業気象学会中四国支部2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮本拓弥, 渡邊尚也, 佐合悠貴
2. 発表標題 植物工場での蒸散促進によるペピーリーフのFe含量向上
3. 学会等名 日本農業気象学会中四国支部2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 重藤奨之介, 佐合悠貴
2. 発表標題 植物工場での根域低温ストレスによるスイスチャードの高品質化 シュウ酸含量に対する光環境の影響
3. 学会等名 日本農業気象学会中四国支部2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 成富恭平, 佐合悠貴
2. 発表標題 人工光型植物工場でのサラダナ栽培におけるチップパーンの回避 局所照射法の検討
3. 学会等名 日本農業気象学会中四国支部2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐合悠貴, 重村愛理, 重藤奨之介
2. 発表標題 植物工場における根の窒素吸収量評価に基づく葉菜類の硝酸塩含量低減
3. 学会等名 日本生物環境工学会2017年大会
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