

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05849

研究課題名（和文）精密肥培管理による環境保全型養液栽培を支援する養分吸収代謝モデルの構築

研究課題名（英文）Development of a model of absorption and metabolism of nutrients to support environmentally friendly hydroponics based on precision fertilizer management

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） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：循環式養液栽培では、経時的に変化する気象の影響で根の養分吸収速度も時々刻々と変動し、栽培の長期化に伴い養液の肥料組成が崩れ、生産性が低下してしまう。養液肥料組成を長期安定化する方法としては、モデルを用いて養分吸収量を推測し、それに基づいて追肥量を決定する新規肥培管理法が有効であると考えられる。そこで本研究では、吸水速度の現場での実用的な評価手法と根の養分吸収モデルを確立するとともに、養分吸収モデルに基づいた新規肥培管理法は、養液の肥料濃度を随時計測し調節する方法と同程度に肥料組成を長期安定化できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境負荷が少なく生産性の高い養液栽培を実現するためには、養分の培地 植物間における動態や植物体内での蓄積・利用を推計し、時々刻々と変化する環境に対応した最適な意思決定を支援する数理モデルを構築し、そのモデルに基づき精密肥培管理を実現する必要がある。本研究により、培地 植物間の養分動態を支配する吸水速度の現場での実用的な評価手法と根の養分吸収モデルを確立するとともに、構築した養分吸収モデルを用いることで、持続的かつ生産性の高い精密肥培管理法の確立の見通しが立った。

研究成果の概要（英文）：Under closed hydroponics, the rate of nutrient absorption by the roots fluctuates with changes in weather conditions, and the fertilizer composition of the nutrient solution changes with time, resulting in reduced productivity. Therefore, a model-based estimation of nutrient absorption and a fertilizer management method that determines the amount of additional fertilizer based on this estimation may be effective for the long-term stabilization of the fertilizer composition of the nutrient solution. In this study, we established a practical evaluation method for water absorption rate under field conditions and a model of nutrient absorption by roots. Furthermore, it was demonstrated that a the new fertilizer management method stabilizes fertilizer composition over a long term to the same level as the method in which fertilizer concentration in the nutrient solution is measured and adjusted frequently.

研究分野：生物環境工学

キーワード：養液栽培 養分吸収速度 吸水速度 養分吸収モデル 肥培管理

## 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、精密な肥培管理が可能であり、水・肥料資源の消費量が少ない点で持続的かつ生産性の高い食料生産技術である。一方、営農現場での精密肥培管理は根域環境調節の困難さから実現しておらず、現状はセンサー値に基づき養液条件を一定に管理し、環境に左右される生育変化への対応は農家の経験に基づいており、結果的に必要以上の施肥と余剰養液の環境への廃棄が生じている。栽培時に発生する余剰養液の廃棄は、無駄な肥料コストや水系の富栄養化などの環境負荷の原因となるため、養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、根の養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、長期の栽培では肥料組成が崩れて生産性が低下してしまう。環境負荷が少なく生産性の高い養液栽培を実現するためには、養分の培地・植物間における動態や植物体内での蓄積・利用を推計し、時々刻々と変化する環境に対応した最適な意思決定を支援する数理モデルを構築し、そのモデルに基づき精密肥培管理を実現する必要がある。

### 2. 研究の目的

精密肥培管理を実現するためには、培地・植物間の養分動態を支配する植物の根による養分吸収機能が、どのように地下部や地上部の環境に左右されるかを定量化することが欠かせない。培地・植物間の養分動態については、これまでの研究により植物の蒸散に駆動される根の吸水速度に大きく支配されることを明らかにしてきた。しかし、根の吸水速度を評価する手法については、研究用途では様々な方法が実用化されているが、現場用途での実用的な方法はない。また、環境が複雑に変動する栽培現場において養分吸収過程を定量・モデル化し、環境調節に応用する試みはない。そこで本研究では、培地・植物間の養分動態を支配する吸水速度の現場での実用的な評価手法と根の養分吸収モデルを確立するとともに、節肥型養液栽培や余剰廃液の節減養液栽培への応用も試み、持続的かつ生産性の高い精密肥培管理法を提案する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 養液栽培現場での実用的な吸水速度評価法の開発

根の吸水速度は、植物体の水分生理だけでなく、根の養分吸収にも作用するため、肥培管理における重要な指標である。すなわち、吸水速度を指標とした蒸散統合型養分吸収モデルを用いることで、営農現場における根域の物質動態をリアルタイムに予測でき、持続的な肥培管理が可能となる。とくに、ハウス内では環境の時空間的変動により吸水速度にムラが生じるため、適切な肥培管理を実現するには、個体または群落レベルでの吸水速度の把握が欠かせない。研究現場では、評価システムを構築することで、培地における給水量と排水量の差から個体単位の根の吸水速度を求めることができる。一方、営農現場では、灌水システムがハウス単位で構成されるため、群落や個体レベルでの吸水速度の把握は難しい。そこで本研究では、営農現場で計測可能な培地内の体積含水率 (VWC) の減少速度から吸水速度を求める方法を開発した。ナス (*Solanum melongena* L.) 品種‘竜馬’をヤシ殻培地耕栽培し、VWC センサーにより、培地 (厚み 11cm) の VWC を経時計測した。養液栽培システムは、培地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。養液には OAT ハウス SA 処方を用い、3 時間おきに 1 時間循環ポンプにより供給した。吸水速度の実測値は、養液タンクから培地への養液供給量と、培地から余剰養液タンクへ排液された余剰養液量との差から計算され、養液供給間かく毎に求められる。一方、吸水速度の推定値は、VWC 減少速度と培地体積との積から求めた。推定値の計算では、養液供給に関連する培地の VWC 変化の影響を除外するため、養液供給が停止している 2 時間のうち、培地から養液が排液される 30 分間を省いた 90 分間を対象とした。

#### (2) 養水分吸収に基づいた培地内養分濃度予測モデルの構築

培地内養分濃度は、根の吸水速度と養分吸収速度および培地への養分供給速度のバランスにより決まるため、培地内養分濃度予測を実現するためには養分吸収速度の予測が必要である。これまでに我々は、吸水速度と養液イオン濃度を指標として養分吸収速度を予測する蒸散統合型養分吸収モデルを提案した。本研究では、様々な養液条件下で養水分吸収速度を評価して養分吸収モデルのパラメータを取得し、異なる環境条件下での根域物質動態推定の可能性を検討した。評価システムは、ヤシ殻培地を置いた栽培ベッド、循環養液タンク、補給養液タンク、水位センサー、流量計、循環ポンプおよびこれらをつなぐ配管で構成した。養液は循環養液タンクから培地へ、3 時間おきに 30 分間循環ポンプにより供給される。さらに、培地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。循環ポンプが停止している時間には、植物体の吸水に伴う循環養液タンク水位減少を水位センサーで感知し、補給養液タンクの養液を循環養液タンクに供給した。吸水速度は、流量計により計測されるこのときの補給量から求めた。養分吸収速度は、システム内養液量と各イオンの養液中濃度の経時変化から求めた。養液イオン濃度は、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  $SO_4^{2-}$  の濃度をイオンクロマトグ

ラフで分析した。

### (3) 養分吸収代謝モデルに基づいた新規肥培管理技術の開発

養液栽培の管理方式としては、余剰養液による水系への環境負荷が発生するかけ流し式から、余剰養液を再利用する循環式への転換が望まれている。しかし循環式養液栽培では、時々刻々と変化する気象の影響で根の養分吸収速度も変動し、栽培の長期化に伴い養液の肥料組成が崩れて生産性が低下してしまう。養液肥料濃度を随時計測し肥料組成を調節する方法もあるが、コストがかかるため大規模な栽培施設のみでしか取り入れられていない。そこで、養液肥料組成の長期安定化を目的として、モデルを用いて養分吸収量を推測し、それに基づいて追肥量を決定する新規肥培管理法が有効であると考えられる。本研究では、異なる肥培管理法でナスを養液栽培し、養液の肥料濃度と収量を経時観測することで、新規肥培管理法の有効性を検証した。

ナス品種‘竜馬’をビニールハウス内の養液栽培システムにシステム毎に6株ずつ2本仕立てで定植し、計3システム設けた。栽培システムは、ヤシ殻培地を置いた栽培ベッド、循環養液タンク、追肥養液タンク、流量計、循環ポンプおよびこれらをつなぐ配管で構成した。養液は3時間おきに45分間循環ポンプにより供給した。供給を終了した75分後に、植物の吸水による減少量を追肥養液タンクから循環養液タンクに養液を補充した。吸水速度は養液の補充量を流量計で計測することで求めた。養液イオン濃度は、養液タンク内の養液をサンプリングし $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $NO_3^-$ および $PO_4^{3-}$ の各イオンについてイオンクロマトグラフィーで分析した。肥培管理法として、モデルにより求めた養分吸収量に基づいて管理するモデル区、養液の肥料濃度測定から求めたみかけの吸収濃度に基づいて管理する補正区、追肥養液を山崎ナス処方( $EC = 1.7 \text{ dS m}^{-1}$ )とする対照区の3処理区を設けた。モデルには植物の吸水速度と培地の肥料濃度から養分吸収速度を求められる蒸散統合型養分吸収モデルを使用した。各処理区の果実収量として、処理開始後90日間に収穫した果実の重量を測定した。環境条件として、ハウス内の気温、湿度および光合成有効量子束密度(PPFD)を測定した。さらに電気伝導度(EC)をECメータで計測した。

## 4. 研究成果

### (1) 養液栽培現場での実用的な吸水速度評価法の開発

まず、VWCセンサーを埋設する位置を検討した。栽培システムに、ナスを1株ずつ定植し、計6システムを設けた。VWCセンサーは、培地底面から3cm、5.5cmおよび8cmの高さに、システム毎に1本ずつ株元直下の側面から水平に刺して埋設した。測定期間は2日間とした。その結果、養液供給停止時間におけるVWCの減少は、埋設位置にかかわらず、日中は多く、夜間は少なかった。VWC減少速度から吸水速度を推定したところ、培地底面からの高さが低いほど推定値は大きくなり、底面から3cmの高さで実測値とよく合った(図1;  $R^2=0.87$ )。

次に、営農現場での計測に必要なVWCセンサーの本数を検討した。栽培システムには、ナスを6株定植した。VWCセンサーは、うち3個体の株元直下に培地底面から3cmの高さで側面から水平に刺して埋設した。測定期間は7日間とした。その結果、個体ごとに推定値は異なったが、3個体の推定値の平均は実測値とよく合った(図2)。これは、個体によって植物体の大きさや吸水活性に違いがあったためと考えられる。したがって、以上より、VWC減少速度の経時計測により吸水速度の把握が可能であることが示され、VWCセンサーは、培地底面から深さ3cmの位置に、営農現場での個体ごとの吸水速度のばらつきを考慮して複数設置するとよいことが示唆された。

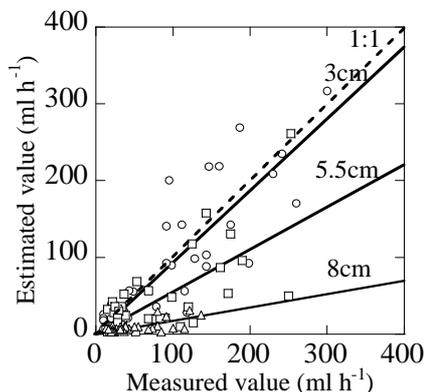


図1 ナスの養液栽培における吸水速度の実測値と異なるセンサー埋設深における体積含水率減少量から求めた推定値の関係。

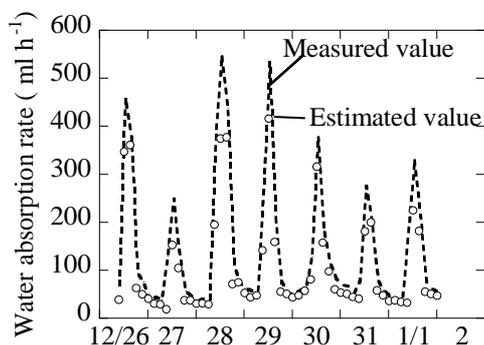


図2 ナスの養液栽培における吸水速度の実測値と体積含水率減少量から求めた推定値の推移。

## (2) 養水分吸収に基づいた培地内養分濃度予測モデルの構築

様々な養液条件下におけるナスの吸水速度は、いずれの処理区でも昼間に増加し、夜間に減少した。一般的に用いられる養液 EC である  $1\sim 2\text{ dS m}^{-1}$  の処理区では、 $\text{PO}_4^{3-}$ 以外のイオンの養液中濃度は時間経過に伴って増加し、 $\text{PO}_4^{3-}$ では減少していった。一方、通常より高い EC  $3\sim 7\text{ dS m}^{-1}$  の処理区では、全イオンの養液中濃度が時間経過に伴って増加していき、通常より低い EC  $0.5\text{ dS m}^{-1}$  では、イオン種により異なった。養分吸収速度は、イオン濃度と吸水速度の積に依存すると仮定して、蒸散統合型養分吸収モデルのパラメータを数値解析により取得した。さらに、パラメータを求めた期間とは異なる期間における各イオンの養液中濃度の推移をモデルにより予測した(図3)。その結果、各イオンの養液中濃度の実測値と予測値は近い値で推移した。

以上より、構築したモデルは養分吸収量の予測が可能であることが示唆された。さらに、養分吸収速度の吸水や養液濃度への依存性はイオン種により異なることが示され、これが循環式養液栽培で栽培中に肥料組成が崩れることの原因と考えられた。本モデルを用いることで、営農現場における根域の物質動態をリアルタイムに予測でき、持続的な肥培管理が可能となると考えられる。

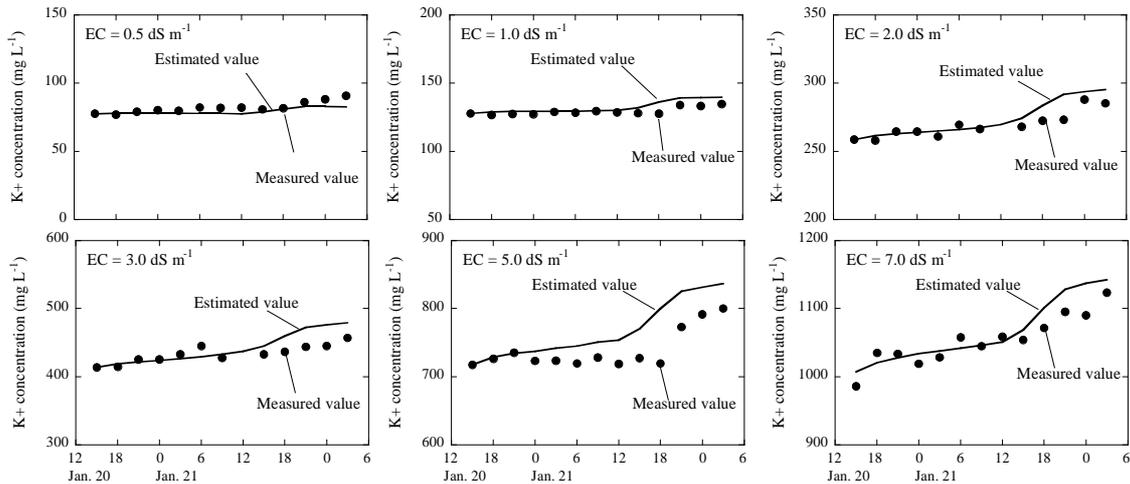


図3 異なる養液 EC における根域  $\text{K}^+$ 濃度推移の実測値とモデルによるフィッティング。

## (3) 養分吸収代謝モデルに基づいた新規肥培管理技術の開発

EC は、モデル区で  $2\text{ dS m}^{-1}$  以下、補正区では  $3\text{ dS m}^{-1}$  以下に維持されたが、対照区では  $5\text{ dS m}^{-1}$  まで上昇した。養液イオン濃度は、モデル区および補正区では各イオンの顕著な蓄積は見られなかったが、対照区では  $\text{NO}_3^-$  および  $\text{K}^+$  の蓄積が見られた(図4)。このことから、対照区では肥料組成が不安定化し、EC が上昇したと考えられる。収量は、3 処理区とも 50 日間まで同程度であったが、それ以降はモデル区および補正区が対照区を上回った(図5)。これは、対照区の肥料濃度が不安定化し、栽培後半に生育が停滞したことによるものと考えられる。以上より、養分吸収モデルに基づいた新規肥培管理法は、養液の肥料濃度を随時計測し調節する方法と同程度に肥料組成の長期安定化することが示唆された。

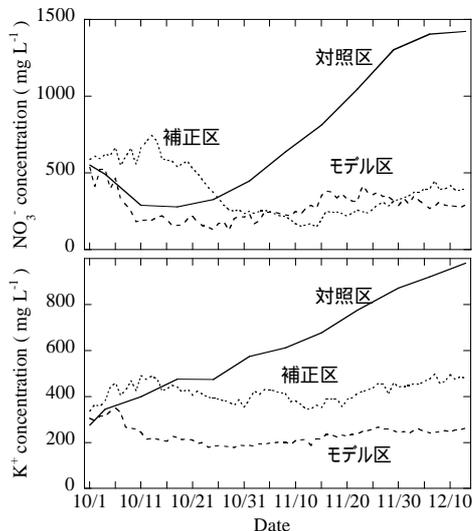


図4 異なる肥培管理条件における養液イオン濃度の推移。

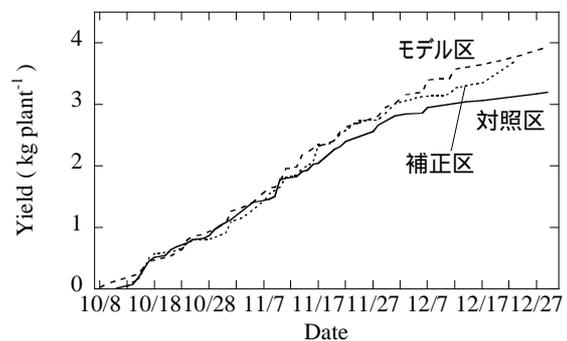


図5 異なる肥培管理条件におけるナスの株あたり収量の推移。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 城川大輔, 大山恭吾, 田村香菜, 佐合悠貴
2. 発表標題 循環式養液栽培における養分吸収モデルを用いた肥培管理の実現性検証
3. 学会等名 2023年日本農業気象学会中国四国支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐合悠貴, 城川大輔, 田村香菜, 大山恭吾
2. 発表標題 ナス養液栽培における養分吸収モデルに基づく新規肥培管理法
3. 学会等名 日本生物環境工学会2023年豊橋大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sago Y. and Tashiro K.
2. 発表標題 Leaf lettuce growth model based on estimation of photosynthetic rate per plant under community conditions
3. 学会等名 HorchiModel2023, International Symposium on Models for Plant Growth, Environments, Farm Management in Orchards and Protected Cultivation
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐合悠貴
2. 発表標題 都市農業研究における農業気象学の役割
3. 学会等名 日本農業気象学会2023年全国大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐合悠貴
2. 発表標題 水環境への栄養塩排出を抑制する循環式養液栽培の検討
3. 学会等名 第59回水環境フォーラム山口（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐合悠貴，大山恭吾，藤本倫太郎
2. 発表標題 精密肥培管理に向けた根域物資動態推定モデルの構築
3. 学会等名 日本生物環境工学会2022年福岡大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐合悠貴，澤春奈，矢部光保
2. 発表標題 濃縮有機液肥を活用した養液栽培法の検討
3. 学会等名 日本生物環境工学会2022年福岡大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tashiro K. and Sago Y.
2. 発表標題 Development of a leaf lettuce growth model in a plant factory.
3. 学会等名 The 6th Priority Universities Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤春奈, 藤本倫太郎, 大山恭吾, 田代菜菜, 佐合悠貴
2. 発表標題 新規量的管理法による養液栽培廃液の抑制
3. 学会等名 日本農業気象学会2022年全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐合悠貴
2. 発表標題 根域の物質動態の把握に基づいた循環式養液栽培
3. 学会等名 第24回日本水環境学会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田代菜菜, 澤春奈, 佐合悠貴
2. 発表標題 養液栽培の肥培管理への適用を目指した窒素炭素吸収代謝モデルの構築
3. 学会等名 日本農業気象学会2022年全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤春奈, 佐合悠貴
2. 発表標題 量的管理栽培におけるリーフレタスの葉内硝酸塩含量の低減 適切な肥料組成の検討
3. 学会等名 2021年日本農業気象学会中国四国支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田代菜菜, 佐合悠貴
2. 発表標題 植物工場におけるリーフレタス成長速度の品種比較 成長モデル構成因子の解析
3. 学会等名 2021年日本農業気象学会中国四国支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田代菜菜, 佐合悠貴
2. 発表標題 群落条件における個体光合成速度の推定に基づいたリーフレタス成長モデルの構築
3. 学会等名 2021年度日本生物環境工学会オンライン次世代研究発表会
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

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