

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22780231

研究課題名（和文） 先端的植物生産に資する温室内蒸散要求度・水耕養液管理の新展開

研究課題名（英文） Management of evaporative demand and nutrient solution for High-tech plant production in greenhouse

研究代表者

安武 大輔（YASUTAKE DAISUKE）

高知大学・教育研究部自然科学系・准教授

研究者番号：90516113

研究成果の概要（和文）：効率化・集約化・高度化した植物生産システム（園芸施設、大規模温室、植物工場）に多くの期待が集まっている。本研究では、これら先端的植物生産の課題に挙げられる統合環境制御と環境調和に対応するために、温室内蒸散要求度の確立とその環境調節への利用、根による有機態窒素の直接吸収特性の評価、および根の養水分吸収特性の評価・モデル化を行い、栽培管理の新展開に寄与する多くの知見を得た。

研究成果の概要（英文）：Much attention have been focused on efficient, intensive, and high-tech plant production systems such as large-scale greenhouses and plant factories. In this study, we studied development of index for evaporative demand and its application to environmental control, evaluation of direct uptake of organic nitrogen by roots, and evaluation and modeling of nutrient absorption by roots. Their results should attribute to developing the plant production systems mentioned above.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2011年度 | 700,000   | 210,000 | 910,000   |
| 2012年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,000,000 | 900,000 | 3,900,000 |

研究分野：生物環境調節学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：温室，環境調節，植物生体計測，気孔運動，養水分吸収

### 1. 研究開始当初の背景

世界の総人口が増加の一途をたどり農産物の需要も増加し続ける一方で、食料生産基盤である露地の生産性の限界を懸念する観点から、効率的かつ集約的な植物生産システム（すなわち施設園芸）とその高度化への期待が高まっている（佐瀬、2008）。とくに近年は、規模拡大や制御自動化によって生産効率向上を可能とする先端的植物生産（大規模温室、植物工場など）を指向した取り組みが盛んである。そこでは、統合的環境制御の技

術形成（植物生産に密接関与する複数の環境要因の統合的な把握と植物生体情報に基づく最適化）や環境調和への対処強化（地域資源の活用、省資源、周辺環境への低負荷）などの課題に直面しており（古在、2009）、それらに戦略的に対応すべく、栽培管理の新たな展開を図ることが迫られている。

### 2. 研究の目的

葉面－空気間の水分動態（蒸散）は、栽培管理において重要な要素であるが、物理的・

生理的プロセスを通して複数の環境要因（放射、気温、湿度、気流など）の影響を受ける。生産現場において、それらの複数要因の影響を統合的な指標（蒸散要求度）で把握・管理することは極めて有用と考える。また、先端的植物生産に不可欠な養液栽培においては、有機栽培との融合や低投入低排出を可能とする次世代の水耕養液管理技術が求められている。

そこで、本研究では、以下3課題を実施する。

課題Ⅰ．統合的指標“温室内蒸散要求度”の確立と蒸散速度評価・環境制御への利用

課題Ⅱ．根による有機態窒素の直接吸収特性の評価と効果的な有機養液栽培の検討

課題Ⅲ．根の養分吸収特性の評価・モデル化と低投入低排出型の水耕養液の管理

### 3. 研究の方法

課題Ⅰにおいては、超音波式小型パン蒸発計を新たに作製して（図1）、温室に導入し、パン蒸発速度を温室内蒸散要求度としてモニタリングを開始した。観測された時々刻々のパン蒸発速度と温室内の微気象要素（日射量、気温、湿度、風速など）の比較検証を行った。さらに、キュウリ植物をNFT水耕栽培システムで栽培することで、蒸散速度および葉コンダクタンスについても評価した。温室内蒸散要求度とキュウリ植物の蒸散速度・葉コンダクタンスとの関係解析を行った。さらに、温室に湿度および気流を調整するための細霧器および循環線を導入し、それらが温室内蒸散要求度および蒸散速度・葉コンダクタンスに及ぼす影響について解析した。

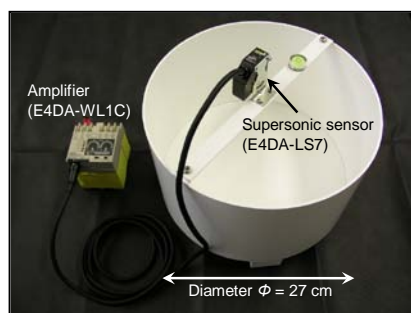


図1 超音波式小型パン蒸発計の写真。

課題Ⅱについては、任意の根圏環境下で根の養水分吸収速度を評価するためにルートプレッシャーチャンバシステム (Yasutake et al., 2011) を用いた。本システムは、高圧水流量計およびルートチャンバから構成される。高圧窒素ガスが水タンクへと導入され、その後、加圧水が任意の培養液で満たされたルートチャンバへと注入される。そのため、チャンバ内において根は周囲から加圧されることで水と養分を吸収する。その際の根の

吸水速度は流量計で計測される。さらに、茎基部から採取される道管液中のある物質Mの濃度を定量分析することで、根による物質Mの吸収速度が評価される。このシステムを用いて、トマト植物の根による有機態窒素成分（グリシン、アラニン、メチオニンなど）の吸収に関するいくつかの定量的な特性（吸水速度との関係、根圏の有機態窒素濃度との関係）を調べた。

課題Ⅲでは、多様な環境条件下（根域の温度、溶存酸素濃度、塩類濃度および吸水・蒸散に影響する気象環境）で、インタクトの根系の物質吸収機能に対する環境作用を評価するとともに、根のイオン吸収と吸水を統合した速度論的モデルを新たに構築することを試みた。

### 4. 研究成果

課題Ⅰでは、約2年半の長期間（2009年6月～2011年12月）に渡る観測によって、温室内の微気象要素（短波放射、長波放射、気温、湿度、風速）の特性とそれがもたらすパン蒸発速度を評価した（図2）。温室内は、とくに夏季の高温（最高気温 40℃）、冬季の乾燥（相対湿度 20%以下）が特徴的であった。パン蒸発速度は、日射の変動と同調した変化を示し、夏季の晴天では約 5 mm d<sup>-1</sup>、冬季の晴天では約 2 mm d<sup>-1</sup>となった。すなわち、夏季の蒸散要求度は冬季の2倍以上であることが示された。また、このパン蒸発速度と、蒸散要求度の一指標として世界的に広く利用されている基準蒸発散速度との関係解析も行った。その結果、両者には強い相関関係がみられた。基準蒸発散速度を評価するためには、複数の微気象要素を計測するセンサーが必要であり、費用は約 80 万円かかるが、本研究で開発した超音波式小型パン蒸発計は約 15 万円で作製できることから、現場への導入の観点において優位性があると思われる。

さらに、異なる季節（春、夏、秋、冬）にキュウリ植物を栽培し、温室内蒸散要求度と葉のガス交換特性（蒸散速度、葉コンダクタンス）との関係を調べた。その結果、ガス交換特性に対する蒸散要求度のインパクトが季節によって異なること、また、夏季においては過度の蒸散要求度が植物にストレスを及ぼしている可能性が示された。

そこで、湿度・気流環境に着目した蒸散要求度を調節するための新たなシステム（細霧器と循環扇）を導入し、その性能と葉のガス交換特性に及ぼす影響を調べた（図3）。導入システムの使用によって、蒸散要求度は微増し、また、葉コンダクタンスが約 50% 上昇することが確認された。これは、植物の成長を担う光合成速度も同程度増加する可能性を示唆している。

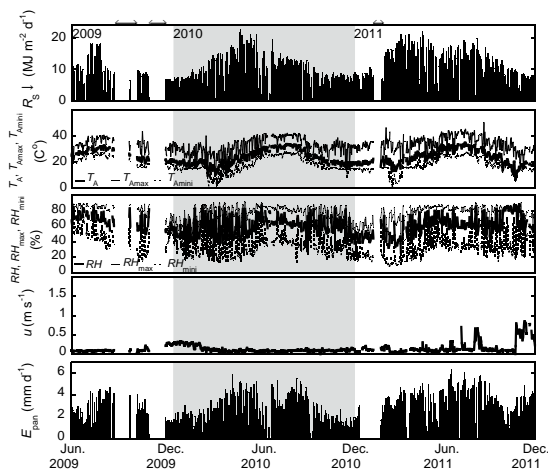


図2 日積算日射量 ( $R_g$ )、日平均気温 ( $T_A$ )、日最高気温と日最低気温 ( $T_{Amax}$ 、 $T_{Amin}$ )、日平均相対湿度 ( $RH$ )、日最大相対湿度と日最低相対湿度 ( $RH_{max}$ 、 $RH_{min}$ )、日平均風速 ( $u$ ) およびパン蒸発速度 ( $E_{pan}$ ) の季節変化 (2009年6月～2011年12月)。

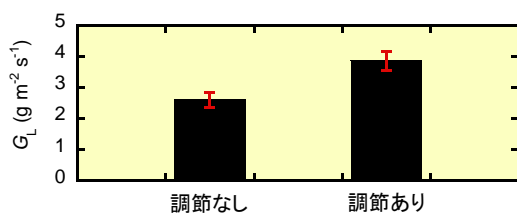


図3 湿度・気流の調節システムの稼働有無条件下におけるキュウリ植物の葉コンダクタンス。

課題Ⅱでは、ルートチャンバへの負荷圧力を増加させて吸水速度が増すほど、道管液中の硝酸態窒素濃度は漸減する一方、導管中のグリシンとアラニンの濃度は外液に対して約1/3の濃度 ( $0.6 \sim 0.7 \text{ mmol L}^{-1}$ ) で一定で

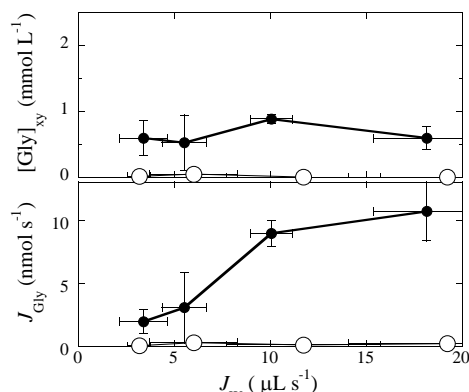


図4 道管液の Gly 濃度 ( $[Gly]_{xy}$ ) および根の Gly 吸収速度 ( $J_{Gly}$ ) と根の吸水速度 ( $J_W$ ) との関係。●; チャンバに Gly を 2 mM 添加, ○; Gly 添加無し。

あった (図4)。結果として、吸水速度が増加するほど硝酸態窒素、グリシン、アラニンの吸収速度の全てが増加する傾向となったが、全窒素吸収に占める有機態窒素の吸収の割合も増加することが明らかとなった。

課題Ⅲでは、インタクトの根群の吸水速度、イオン吸収速度および呼吸速度を計測するための養液栽培システムを構築し、根の吸水およびイオン吸収速度が相対誤差 3.5% 以内で評価可能であることを示した。構築したシステムを用いて、高品質野菜の養液栽培の視点から、ネギの養液栽培を対象にして、根の水吸収、イオン吸収および呼吸に対する温度効果を定量的に評価し、とくに夏季の養液栽培で発生する水耕液の高温条件や低溶存酸素濃度条件の影響を調べた。健全な根に対する短時間の高温かつ低溶存酸素濃度の条件下における顕著な呼吸速度の低下が観察され、長期間高温条件下で栽培されて褐変を生じた根における、吸水およびイオン吸収の著しい抑制を確認した。

次に、イオン吸収速度の濃度依存性を酵素反応速度論に基づいて解析した結果、イオン吸収速度の濃度依存性はミカエリス・メンテン式で表現でき、さらにイオン吸収に対する高温ストレス、低温ストレス、低溶存酸素濃度などの影響が、ミカエリス・メンテン式を構成する最大イオン吸収速度とミカエリス定数の変化によって評価できることを確認した。一方、導管液中のイオン濃度に対する環境作用は小さかったことから、根のイオン吸収に対する環境作用には、吸水の変動も大きく関与していることを示した。そこで、蒸散によって駆動される根の吸水は、膜輸送タンパク質が存在する細胞膜へのイオンのマスフローを伴い、膜輸送タンパク質とイオンの邂逅頻度への作用を通してイオン吸収速度に影響するとの考えのもとに、蒸散統合型イオン吸収モデルを新規に提案した。蒸散統合型イオン吸収モデルに基づいたイオン吸収に対する環境作用の解析により、イオン吸収に対する多様な環境要素および蒸散 (根の吸水) の作用を定量的に評価することが可能となった。

さらに、作物生産における収量損失の最大の要因となっている水ストレス条件下 (培養液の  $EC=4.0 \text{ dS m}^{-1}$ ) において、上記のモデルが適用できるのか検証することを目的とした温室内でのキュウリ栽培実験とモデル解析を行った (対照区は  $EC=1.6 \text{ dS m}^{-1}$ ; 図5)。1日あたりの平均吸水速度は対照区で  $0.56 \text{ L d}^{-1}/\text{plant}$ 、水ストレス区で  $0.41 \text{ L d}^{-1}/\text{plant}$  であり、実験終了時の1個体あたりの平均葉面積は対照区で  $0.97 \text{ m}^2/\text{plant}$ 、水ストレス区で  $0.81 \text{ m}^2/\text{plant}$  あった。NaとCl以外の各イオンの吸収速度は水ストレス区において対照区よりも小さい値となった。これらは、

植物に対する水ストレスの影響だと思われる。得られた各イオンの吸収速度のデータをモデル解析した結果、両処理区における最大イオン吸収速度および根圏のイオンのマスフローに対する親和性は同程度であることが示された。以上より、本モデルは水ストレス下の根の吸収特性に対して適用可能であるとともに、温室内の変動環境下においての有用性も確認された。

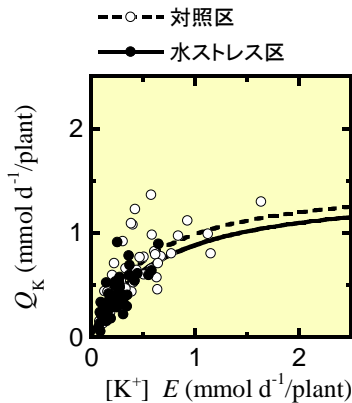


図5 対照区および水ストレス区におけるキュウリ植物のカリウム吸収速度と、根域におけるカリウムのマスフロー（カリウム濃度×吸水速度）との関係。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計17件）

- ① 石川真純、安武大輔（計6名中2番目）、温室内における蒸散要求度とそれがキュウリ植物の蒸散・葉コンダクタンスに及ぼす影響の季節変動—超音波式小型パン蒸発計を用いた実験—、Eco-Engineering、査読有、Vol. 24、2012、97-103
- ② Nomiya R., Yasutake D.（計14名中6番目）、Root absorptive functions drive salt accumulation in crop fields under desertification. II. Effect of different plant species, Eco-Engineering、査読有、Vol. 24、2012、69-75
- ③ Yasutake D., Osman A. K.（計8名中1番目）、Quantitative evaluation of direct uptake of organic nitrogen by tomato roots associated with plant growth and water uptake: use of a root chamber with HPPFM, Environment Control in Biology、査読有、Vol. 50、2012、173-179
- ④ Nomiya R., Yasutake D.（計4名中3番目）、Application of a kinetic model for analysis of salt absorption of crop roots under the salinized condition、Environment Control in Biology、査読有、Vol. 50、2012、153-179
- ⑤ Yasutake D., Kimura C.（計9名中1番目）、Analyzing evapotranspiration components and crop coefficients for catch crop field with small area at different plant densities in a greenhouse、Environment Control in Biology、査読有、Vol. 49、2011、217-225.
- ⑥ Yasutake D., Kitano M.（計6名中1番目）、Use of a high-pressure flowmeter for evaluating hydraulic characteristics of plant organs and absorption functions of roots、Environment Control in Biology、査読有、Vol. 49、2011、99-105
- ⑦ Sago Y., Yasutake D.（計7名中2番目）、Kinetics of root ion absorption affected by environmental factors and transpiration III. A kinetic model integrated with transpiration、Environment Control in Biology、査読有、Vol. 49、2011、41-46
- ⑧ Sago Y., Yasutake D.（計7名中2番目）、Kinetics of root ion absorption affected by environmental factors and transpiration II. Environmental effects and a concentration-dependent model、Environment Control in Biology、査読有、Vol. 49、2011、33-40
- ⑨ Sago Y., Yasutake D.（計7名中2番目）、Kinetics of root ion absorption affected by environmental factors and transpiration I. Measurement system for intact roots、Environment Control in Biology、査読有、Vol. 49、2011、23-31.
- ⑩ Yasutake D., Ishikawa M.（計5名中1番目）、Development of a supersonic pan-evaporimeter for dynamic analysis of evaporative demand in a greenhouse、Journal of Agricultural Meteorology、査読有、Vol. 67、2011、193-198
- ⑪ 日高浩太、安武大輔（計9名中5番目）、濃縮海洋深層水の高品質トマト水耕栽培への有効利用 5. 短期塩ストレス処理の多段栽培への応用、Eco-Engineering、査読有、Vol. 22、2010、131-140
- ⑫ Ebihara K., Yasutake D.（計11名中6番目）、Root absorptive functions drive salt accumulation in crop fields under desertification. I. Effects of leaf transpiration and soil evaporation、Eco-Engineering、査読有、Vol. 22、2010、93-99

- ⑬ Falah M. A. F., Yasutake D. (5名中3番目)、Responses of root uptake to high temperature of tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in soil-less culture、*Journal of Agricultural Technology*、査読有、Vol. 6、2010、543-558
- [学会発表] (計 76 件)
- ① 安武大輔、CO<sub>2</sub> 施用温室における CO<sub>2</sub> 動態評価システムの構築、日本農業気象学会 2013 年全国大会、2013 年 3 月 27-29 日、石川県立大学 (石川県野々市市)
- ② 安武大輔、温室内の異なる栽植密度条件下におけるクリーニング作物の塩類吸収特性、日本農業気象学会 2013 年全国大会、2013 年 3 月 27-29 日、石川県立大学 (石川県野々市市)
- ③ 浅野智樹、温室における湿度・気流の調節とその効果 - 蒸散要求度と葉のガス交換特性の観点から -、日本農業気象学会中国四国支部大会、2012 年 11 月 8-9 日、島根県農業技術センター (島根県出雲市)
- ④ 安武大輔、作物畑の蒸発散解析を目的とする放射温度計の利用 - 露地および温室を対象として -、日本農業気象学会中国四国支部大会、2012 年 11 月 8-9 日、島根県農業技術センター (島根県出雲市)
- ⑤ 宮内樹代史、中小規模園芸ハウスを対象とした複合エコ環境制御技術開発の取り組み、農業環境工学関連学会 2012 年合同大会、2012 年 9 月 11~14 日、宇都宮大学 (栃木県宇都宮市)
- ⑥ 安武大輔、温室内の異なる栽植密度条件下におけるクリーニング作物の成長解析、日本生物環境工学会 2012 年東京大会、2012 年 9 月 4-7 日、東京大学 (東京都文京区)
- ⑦ 安武大輔、根による有機態窒素の直接吸収特性の定量的評価 - 根域の有機態窒素濃度の影響 -、2012 年東京大会、2012 年 9 月 4-7 日、東京大学 (東京都文京区)
- ⑧ 浅野智樹、温室内における蒸散要求度と葉のガス交換特性の季節変動、日本農業気象学会 2012 年大会、2012 年 3 月 13-16 日、大阪府立大学 (大阪府堺市)
- ⑨ 安武大輔、根圏温度が根による有機態窒素の直接吸収特性に及ぼす影響、日本農業気象学会中国四国支部会、2011 年 11 月 11-12 日、香川大学 (香川県高松市)
- ⑩ 石川真純、温室内におけるパン蒸発量と農地の蒸発散特性との関係解析、日本農業気象学会中国四国支部会、2011 年 11 月 11-12 日、香川大学 (香川県高松市)
- ⑪ 木村知代、温室内での異なる植栽密度のクリーニング作物栽培における蒸散、蒸発および作物係数の評価、日本農業気象学会中国四国支部会、2011 年 11 月 11-12 日、香川大学 (香川県高松市)
- ⑫ 浅野智樹、異なる季節における蒸散要求度が葉のガス交換特性に及ぼす影響、日本農業気象学会中国四国支部会、2011 年 11 月 11-12 日、香川大学 (香川県高松市)
- ⑬ 安武大輔、温室内の狭小面からの群落蒸散と土壌面蒸発の分別評価、日本生物環境工学会 2011 年大会、2011 年 9 月 6-8 日、北海道大学 (北海道札幌市)
- ⑭ Yu Xiang、Use of sprayers and circulation fans for controlling humidity and windspeed in a greenhouse in different seasons、日本生物環境工学会 2011 年大会、2011 年 9 月 6-8 日、北海道大学 (北海道札幌市)
- ⑮ 石川真純、温室内蒸散要求度が葉のガス交換特性に及ぼす影響 - キュウリ植物の栽培期間における解析 -、日本生物環境工学会 2011 年大会、2011 年 9 月 6-8 日、北海道大学 (北海道札幌市)
- ⑯ 佐合悠貴、根のイオン吸収に対する環境要素および蒸散の作用 - 養水分吸収統合モデルの応用による評価 -、日本農業気象学会 2011 年大会、2011 年 3 月 16-18 日、鹿児島大学 (鹿児島市)
- ⑰ 安武大輔、スイカ果実の省エネルギー局所温度調節とその効果、日本農業気象学会 2011 年大会、2011 年 3 月 16-18 日、鹿児島大学 (鹿児島市)
- ⑱ 石川真純、温室内蒸散要求度の解析を目的とする超音波式小型パン蒸発計の作製と利用、日本農業気象学会 2011 年大会、2011 年 3 月 16-18 日、鹿児島大学 (鹿児島市)
- ⑲ 安武大輔、ルートプレッシャーチャンバを用いた根による有機態窒素の直接吸収特性の評価、日本農業気象学会中国・四国支部大会、2010 年 12 月 16-17 日、白兔会館 (鳥取県鳥取市)
- ⑳ 安武大輔、根による有機態窒素の直接吸収特性の定量的評価 - ルートプレッシャーチャンバを用いた実験 -、日本生物環境工学会 2010 年大会、2010 年 9 月 8-10 日、京都大学 (京都府京都市)
- [図書] (計 1 件)
- ① Yasutake D., 他, *World Scientific, The Yellow River*, 2010, 175 (56-63)
- [その他]  
ホームページ等  
<http://www.cc.kochi-u.ac.jp/~yasutake/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安武 大輔 (YASUTAKE DAISUKE)

高知大学・教育研究部自然科学系・准教授

研究者番号：90516113