戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「環境変動に対する植物の頑健性の解明と応用に向けた基盤技術の創出」
研究課題「フィールド向け頑健計器と作物循環系流体回路モデルによる形質変化推定技術に関する研究」

研究終了報告書

研究期間 2015年12月～2021年3月

研究代表者:三宅 亮
（東京大学工学系研究科、教授）

§１ 研究実施の概要

(1)実施概要

本研究では、フィールドにおける作物の頑健性を評価するために、ｉ)①作物近傍の環境情報を記録可能とする超軽量環境計、ｉ)②根域周辺の養分濃度履歴を計測するための超小型養分計、及びｉ)③作物の形質変化をとらえる作物形状3D 計から成る三種の計器を開発する。またⅱ)作物内の光合成産物の転流等を記述したモデルを作成、計器による取得観測値と同化を行うことで形質変化を推定する技術を開発する。更にⅲ)計器類と形質変化推定技術、精密施肥による形質変化の人為的発現を行う。

以上を受けて、ｉ)①環境計に関しては、CO_2 濃度センサ、風速計も含めた環境計6項目との統合・小型集積化を推進、省電力かつ軽量小型の環境計を開発し、作物近傍の光合成に関係する環境情報を一括で取得できることを示した。また領域内チーム連携促進研究として、圃場で栽培されたオオムギの近傍環境計測用に環境計の高度化と現場設置、運用を行った。本連携研究に伴い土壌の状態(温度、水分等)も計測可能なように改造・開発を行い、南北に隣接する栽培列間の地温に差異があることを明らかにした。また社会実装・商品化に向け環境計の高度化(完全自律・無給電駆動化、多項目対応、ゲートウェイ小型・高度化)・低コスト化(ボード化、新構造パッケージ)を推し進めた。

ｉ)②養分計に関しては、従来の液状試薬に代わり、まったく新しいタブレット状の固形試薬を開発、それらを備えた小型養分計(40 ㎜キューブ)を試作し、夾雑物を含む水稲向け水耕液を対象に分析性能を確認した。固形試薬の長期利用性を向上させるために組成別固形試薬と独自のクラスター型流路構造を提案、試薬品質保持性能向上を図った。また作物内から成分を直接抽出する超微細採取機構を開発し、実際に低カリウム処理を施した葉物野菜の作物体内(茎部)のカリウム濃度の変化を捉えることに成功した。また質量分析計と連携し、葉物作物(コマツナ)体内の微量試料(100 nL)から多項目成分の分析が可能なことを示した。

ｉ)③作物形状3D計については、作物の形質パラメータ(葉面積(分げつ数)、葉色、葉温、穂温、草丈)を効率的に抽出するための画像処理基盤技術をベースに水稲の生長観測に適用し、従来、人手に頼って直接計量していた草丈やSPAD 値を連続的に取得可能であることを示した。また画像処理機能を搭載した簡便、低コストの3D 計を試作した。

ⅱ)作物循環系流体回路モデルについては、同化技術と連動させ、栽培環境データ(約70日間)及び画像解析から求めた生育データ(SPAD 相当値、葉面積相当値、草丈相当値)を入力値として、地下部の窒素濃度等の逐次日毎の変化の推定を行い、外観形質から作物内部の動態変化を推定可能であることを示した。また葉物作物(レタス、コマツナ等)に重点を置き、低カリウム処理を施した際の形質発現、湿度環境に対して生長量が変化する事象の予測が可能なモデルを作成した。

ⅲ)精密施肥のための施肥装置については、適所へのオンデマンド施肥を可能とするために、水田条間を検知して自走し、オープン型マイクロミキサにより所定の位置に所定量の肥料を高倍率希釈で迅速に分散する機能を備えた自動施肥装置を実現した。また社会実装を想定した性能評価・仕様等を含めた設計まとめ、コスト算定を実施した。

ⅲ)計器・モデルの精度検証のために、秋田県立大学の実験圃場内に水稲を対象として施肥条件を3パターン設定可能な地上部・地下部の生育を観測する養液循環型の大型ライシメータ観測系を新たに構築した。さらにこれらの観測系を用いて高温耐性がある品種(ふさおとめ)の光合成活性を調査した結果、成熟後期においても高い光合成活性を維持しており、その要因として上位葉の伸長が抑制されて下位葉の光合成活性が活発である点、地下部の伸長で養分を吸収しやすくしている点などを明らかにした。これらの形質発現を基に、作物循環系モデルを高度化し、同化プログラムと組み合わせることで、良質な作物生産に向けた栽培方法(作物体内の窒素量や光合成産物の有効利用率などのモニタリングと随時施肥、ストレス栽培の組み合わせ)を提案・検証した。一方、葉物作物を対象として、水耕液成分の最適制御条件(カリウムの段階的濃度調整)や最適湿度管理等の探索・評価を実施し、これらの形質発現をモデルに反映させ、良質、良好な生育を得る栽培条件を提案した。

(2)顕著な成果
＜優れた基礎研究としての成果＞
1.
概要：葉物作物の地上部・地下部の同期観測系による連続的な生育観測、特に根部の生長の様子を明瞭な動画として初めて取得した（国際会議 TENCON2018, 10/28-30＠Jeju, Korea）にて発表（査読有））。またそれらの生長画像処理から地上部・地下部への光合成産物の転流分配を推定、それらを考慮した作物循環系流体回路基本モデルを構築した（国際会議 IMRET2018、μTAS2019（オーラル採択率10％）にて発表）。

2.
概要：作物体内の微量試料（100 nL）を採取可能な微細採取機構とその周辺システムを開発した。これにより、作物を破壊することなく、低侵襲・低ダメージにて、作物内の養分の動態変化を把握可能とした（国際会議 μTAS2018、Transducers（口頭採択率9％）にて発表）。本微細採取機構は、比色分析の他、質量分析計や炎光分析計など多種類の分析計器とフローにて連動可能な冗長性を有しており、将来的には様々な作物・植物の研究に対して有用なツールとなりうる。

＜科学技術イノベーションに大きく寄与する成果＞
1.
概要：超小型で多項目のセンシング機能を集積化した環境計を開発した。特にセンシング項目を拡張、変更容易なプラットフォームタイプとし、ニーズに応じて項目数を増大できる構成とした。また電源供給が不要なように太陽電池を一体化、省電力化、耐久性を高めるためにキャパシタ型電池を新たに採用した。またこれらを多数配置し遠隔にて多点の情報収集可能な無線ネットワーク系も併せて構築した。

2.
概要：作物の形質変化パラメータに関する特徴量抽出のための各種画像処理技術を開発した。特に広域、立体的な葉群画像から SPAD 代表値を自動抽出する画像処理技術や、同じく立体的な葉群側面画像から葉面展開ベクトルを応用して草丈代表値を自動抽出する画像処理技術など実用性の高い技術を開発した。

3.
概要：従来の液状試薬に代わる全く新しい固形試薬による分析プロトコルを新たに提案した。またそれに基づく超小型の養分計を試作し、機能を確認した。極めて簡素な構造、安価な構成のため、将来的には屋外圃場に多点に設置可能となり、今まで取得できなかった圃場の養分分布や、場所毎の作物の養分吸収動向の把握などが可能となる。その結果、場所、気候など地域の特性に応じた栽培方法の確立に貢献するものと期待される。

＜代表的な論文＞
1. P. Gao, T. Kasama, M. Godonoga, R. Miyake, Dragonfly-like micro sampling device for extracting nano-liter sample from plants, Proceedings of Transducers 2019, DOI;10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808598
概要：作物体内の継続的モニタリングのために開発した微量採取機構を用いて葉物野菜(コマツナ)を対象に、低カリウム処理を実施した直後から1週間程度の作物体内(茎部)のカリウムの濃度の変化を計測し、その結果、カリウム濃度が徐々に低下する様子を捉えることに成功した。また同機構によって取得した試料液を質量分析計と連携させ植物ホルモン等の微量物質の動態変化を捉えた。このように生育させた状態で、狙った場所の組織液を微量（100 nL）かつ定量性を持って採取できる手段は今までになく、幅広い基礎研究のツールとしての利用価値

があると思われる。

2. R. Miyake, T. Kasama, M. Godonoga, Y. Endo, T. Okamoto, T. Koide, C. Sone, M. Komine, Y. Yaji, Y. Kaneta, and A. Ogawa, NOVEL MICRO-FLUIDIC CIRCUIT MODEL OF PLANT VASCULAR SYSTEM FOR THE GROWTH NAVIGATION. MicroTAS 2019 - 23rd International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences 2019, DOI;10.1016/j.ifacol.2019.12.526

概要:植物体内の導管、師管をマイクロチャネル網、また光合成部をマイクロリアクタに置き換え、全体をマイクロ流体回路モデルとして構成、生長に伴う回路定数の時間変化も加えることで、栄養生長期の植物の形質変化を解析可能とした。これと同化技術を用いることで植物体内の未知な動態変化を予測可能とした。これらのモデル化はマイクロ化学分野では、過去にない取り組みであり、現在、当該分野で注目を集めつつある" Plant on a chip"を加速する研究成果として評価された。

§2 研究実施体制

(1)研究チームの体制について

東大マイクログループ

① 研究代表者:三宅 亮 (東京大学工学系研究科、教授)

② 研究項目

・頑健計器(環境計・養分計)及び形質変化推定技術の開発・検証

秋田県大グループ

① 主たる共同研究者:小川 敦史 (秋田県大学生物資源科学部、教授)

② 研究項目

・制御空間設備・実験圃場における開発技術の評価・検証

広大グループ

① 主たる共同研究者:小出 哲士 (広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所、准教授)

② 研究項目

・頑健計器(3D計)の開発・検証

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

我々のチームは当初から工学、農学、バイオなど幅広い研究者で構成されていたが、実フィールドでの利用をより深く検証するために、県立の農業試験場や農機具関連の企業などとのネットワークを拡充してきた。またチーム間連携のプログラムに参画したことで、開発した機器の新たな用途やニーズの把握も可能となった。今後は、さらに幅広い作物種を対象として用途開拓に努めていく。一方、産業界とのネットワークとしては、スマート農業事業を事業展開している企業(日立パワーソリューションズほか)と超小型環境計の利用に関して共同研究を実施中である。また植物循環系モデルと同化技術を用いたソリューション事業にも積極的であり、前記共同研究テーマに含めている。後者の植物循環系モデルと同化技術の組み合わせについては、植物工場を新規事業として展開中の大手電子部品メーカからも、植物工場での栽培効率向上を狙ったシステムに組み込むことに対する共同研究の引き合いがあり、経済実用的な観点で、稲作に限定せず、幅広い、応用先に対する権利化等を現在検討中である。