

原著論文

## オープンソースハードウェアと UECS プラットフォームによる 自作可能なイチゴ高設栽培ベッドの精密培養液管理システム

星岳彦<sup>\*1)</sup>

1) 近畿大学生物理工学部 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930

### 要旨

イチゴ栽培における収穫・管理作業軽減のために実用化した養液栽培による高設栽培は、従来の土壌栽培と比較し、架台で空中に栽培ベッドが隔離され、栽培ベッドとの物質収支を正確に把握できる利点がある。本研究では、オープンソースハードウェア CPU 基板を用いた低コストユビキタス環境制御システムプラットフォームを使った低コスト高設栽培ベッド用培養液管理システムを開発した。本システムは、1セット約6万円で製作できた。自作化・低コスト化が進む高設栽培ベッドに見合ったコストで、供給・排出する培養液量・導電率をオンライン計測できた。さらに、精密な培養液管理による高度生産が実現可能な養水分吸収の見える化を達成した。約2年間の栽培試験を実施し、より精密・高度な培養液管理の達成に向けた知見が得られた。さらに、本システムをオープンソース化し、自作も可能にした。日本のイチゴ生産を支えてきた各地の中小規模施設に導入可能な ICT による DIY スマート化の提案ができたと考える。

### キーワード

Arduino, 施設園芸, スマート農業, ユビキタス環境制御システム, 養液栽培

### 緒言

イチゴ栽培における収穫・管理作業軽減のため、ピートモスなどの培地を利用した養液栽培による高設栽培が1990年代後半から実用化した(吉田2016)。軽労化の利点だけでなく、従来の土壌栽培と比較し、架台で空中に栽培ベッドが隔離され、栽培ベッドとの物質収支を正確に把握できる。つまり、供給・排出する培養液の液量・導電率(以下、ECと呼ぶ)の計測で、精密な培養液管理による高度生産を実現できる。

日本の2018年の施設園芸経営農家1戸あたりの施設設置面積は2,537 m<sup>2</sup>で、1棟あたり640 m<sup>2</sup>(農林水産省2020)と、施設園芸技術先進国である欧米と比較して、1生産体あたりの規模が極めて小さい。このため、日本の多くのイチゴ施設生産者は、高価な市販の高設栽培ベッド製

品にリフォームしたくとも資金力に乏しく、普及の妨げになっていた。近年では、和歌山県のハンモック方式(西森2006)など、2,500円/m<sup>2</sup>程度の材料費で生産者が自作可能な低コスト高設栽培ベッドが各所で研究・開発され、普及が進みつつある。専用の培養液管理システムについても、培養液供給(給液)装置だけでなく、ベッド排出培養液(排液)管理装置の実用化研究が行われている(竹中ら2018)。しかし、自作可能な低コスト高設栽培ベッドに対応する低価格培養液管理システムは無い。多くの高設栽培生産者は、養液供給に24時間タイマーを使用し、排液量と排液ECを手手で計測して栽培しており、高設栽培ベッドの精密な管理が可能な利点を活かしきれていない。

著者は、オープンソースハードウェアによるCPU基板を用いた低コストユビキタス環境制御システム(UECS)プラットフォーム(Hoshi et al. 2018)による低コスト高設栽培の給排液量管理システムのプロトタイプを発表した(星ら2019)。ここでは、このシステムに、給液濃度可変、EC計測、排液自動排出の各機能を加え、自作可能な低コ

\* Corresponding Author

E-mail: [hoshi@waka.kindai.ac.jp](mailto:hoshi@waka.kindai.ac.jp)

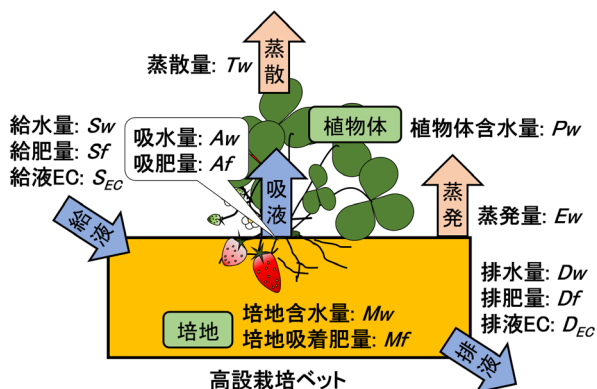


図1 高設栽培ベッドの水および肥料の模式的関係

スト自動化精密培養液管理システム（以下、培養液管理システムと略す）を開発したことについて報告する。

## 材料および方法

### 吸水量・吸肥量を求める収支モデル

図1に示した模式的高設栽培ベッドにおける水量 (L) の収支式を (1) に示す. ただし, 培地等を移動する流体の時間遅れはないと仮定している.

$$\frac{dA_w}{dt} = \frac{dS_w}{dt} - \frac{dD_w}{dt} - \frac{dE_w}{dt} - \frac{dM_w}{dt} = \frac{dT_w}{dt} + \frac{dP_w}{dt} \quad (1)$$

ここで、 $A_w$ は吸水量、 $S_w$ は給水量、 $D_w$ は排水量、 $E_w$ は蒸発量、 $M_w$ は培地含水量、 $T_w$ は蒸散量、 $P_w$ は植物体含水量である。栽培ベッドが被覆され、 $E_w$ がほぼ0と仮定でき、給液制御により培地水分がほぼ一定に保たれるなら、 $M_w$ の変化量も0と仮定できる。そして、無機肥料塩由来の1価イオン換算のmmol等量（以下、肥量とよび、単位はme）の収支式は(2)の通りになる。

$$\begin{aligned} \frac{dAf}{dt} &= \frac{dSf}{dt} - \frac{dDf}{dt} - \frac{dMf}{dx} \\ &= k_{Eq} \left( S_{EC} \cdot \frac{dSw}{dt} - D_{EC} \cdot \frac{dDw}{dt} \right) - \frac{dMf}{dx} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $Af$ は吸肥量、 $Sf$ は給肥量、 $Df$ は排肥量、 $Mf$ は培地吸着肥量、 $S_{EC}$ は給液導電率 (EC)、 $D_{EC}$ は排液導電率 (EC) である。培地への肥料の吸着が定常状態に達していれば、 $Mf$ の変化量は0と仮定できる。そして、排出培養液は供給培養液とほぼ同じイオン組成と仮定した時の、培養液の単位導電率 ( $S\ m^{-1}$ ) あたりの等電気量イオン数変換係数が  $k_{Eq}$  である。園試処方培養液の場合、 $k_{Eq}$ は理論値から約  $1\ me\ \Omega\ m\ L^{-1}$  になる (星 2019)。

以上の仮定が成立すれば、吸水量と吸肥量を、給液量、排液量、給液 EC、排液 EC から算出できる。培養液量（以下、液量と呼ぶ）は水量と肥量の和になるが、培養液に含

まれる肥量は約0.1% W/W 以下と小さいので，吸液量は吸水量と表記しても差し支えないと考える．本報告ではより正確に，吸液量と表記した．

## システム構成

培養液管理システムは、UECS 培養液給液ノード（以下、給液ノードと略す）と UECS 培養液排液計測ノード（以下、排液計測ノードと略す）の 2 種から構成される。これらの UECS 自律分散システムノードは、UECS プラットフォームを用いて、相互あるいは他の UECS 施設環境計測制御ノードと通信できる。給液ノードと排液計測ノードの機能の概略を図 2 に示す。各ノードは、オープンソースハードウェアの CPU 基板として、Arduino MEGA 2560 と Ethernet Shield 2 を各 1 枚使用した。

## 給液ノード

肥料混入器のある培養液供給パイプラインと原水供給パイプラインに設置された2台の電磁弁を希釈率に応じた時間比率で開閉し、1%単位で任意の設定希釈率の培養液を、一定時間給液する。予め計測した1分間当たりの給液量の設定から給液量を積算し、UECSプラットフォームに送信する。(1) 積算日射フラックスが一定値を超える毎に1回給液、(2) 1日あたり5回まで定刻に給液、(3) 一定時間以上無給液の状態が継続した時に1回給液する機能を持つ。(1)と、(2)(3)の機能の給液希釈率は独立して設定できる。ノードが送信する主なUECSデータは、株あたりの日積算培養液給液量(UECS規約のType名称(ユビキタス環境システム研究会2010): TdNtInt.cNM, 単位:  $L \cdot p^{-1} \cdot d^{-1}$ , 以下同様)、日積算原水給液量(TdWtInt.cNM,  $L \cdot p^{-1} \cdot d^{-1}$ )、日積算日射エネルギー密度(SrInt.cNM,  $kJ \cdot m^{-2}$ )である。

## 排液計測ノード

高設栽培ベッドから排出し、ポリバケツに貯留する排液量と EC を 1 分単位で計測して、UECS プラットフォームに送信する。ノード 1 台で 2 系統（ポリバケツ 2 個分）の排液を計測できる。超音波距離センサ排液量計測部、貯留排液自動排出部、排出 EC 計測部から構成される。排液計測部の概略を図 3 に示す。ノードが送信する主な UECS データは、# 区積算排液量（DLiquid#.mHN,  $\text{cm}^3 \text{d}^{-1}$ ）、# 区排液 EC（DECVal#.mHN,  $\text{dS m}^{-1}$ ）、# 区積算排肥量（DFert#.mHN,  $\text{mg d}^{-1}$ ）、# 区排液温（DNtemp#.mHN,  $^{\circ}\text{C}$ ）である。ただし、# は 1 または 2 になる。

超音波距離センサ排液量計測部は、1個450円のSainSmart製HC-SR04型低コスト超音波距離センサ（星2020）を排液貯留ポリバケツ上端に下向きに設置し、液面までの距離 $d$ を計測する。貯留している液体形状を倒円錐台として、液量を算出する。ポリバケツ底面は曲面加工され、凹凸もあるので正確な下底面積を求められない。そこで、壁面がほぼ直線の領域の2点の水平断面円の半径 $r_1$ と $r_2$ を求める。 $r_1$ と $r_2$ を底面まで外挿し、ポ

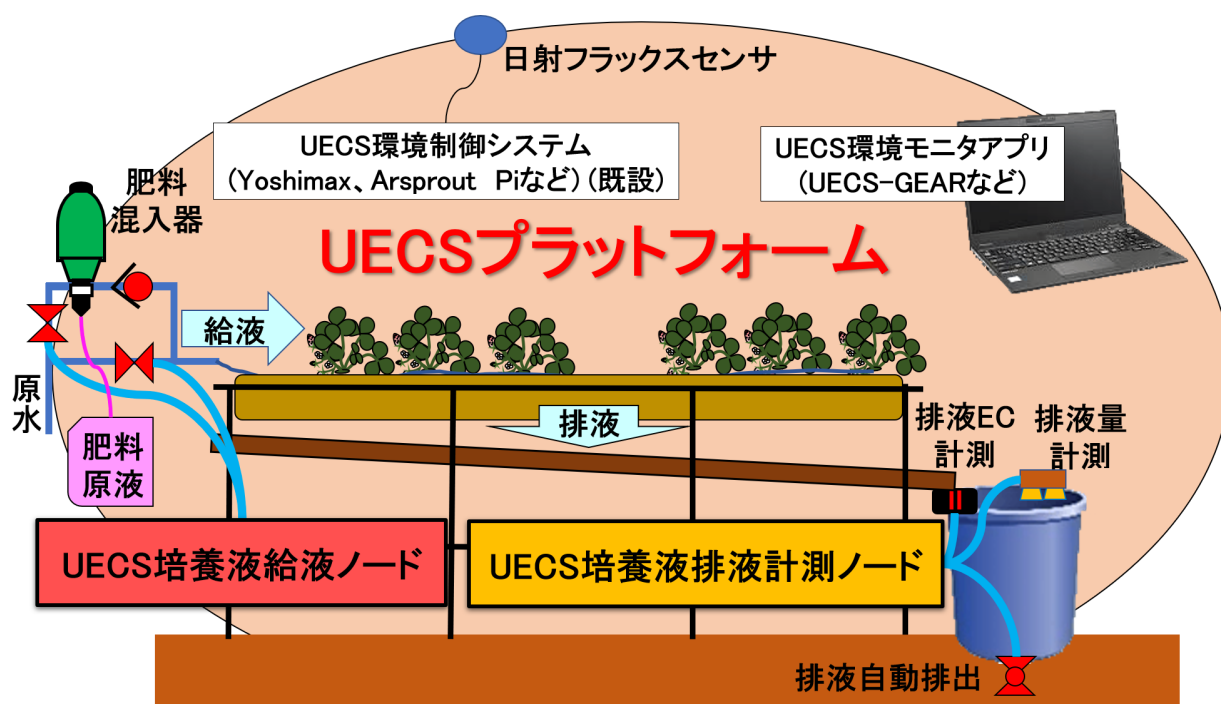


図2 自作可能な低コスト自動化精密培養液管理システムの構成

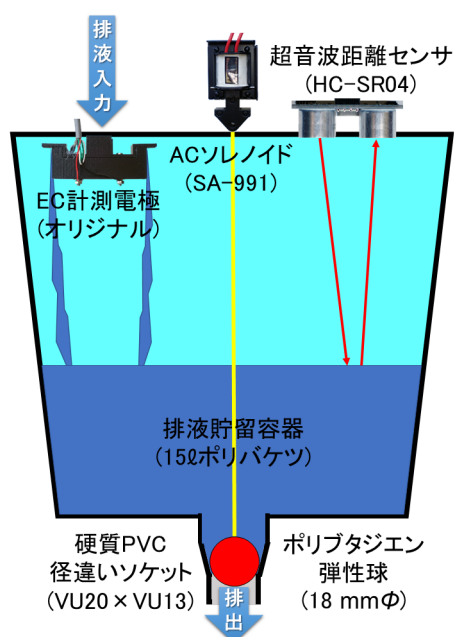


図3 UECS 培養液排水計測ノード排水計測部の概略

リバケツ空時の距離  $d_0$  の仮想的底面円半径  $r_0$  を求める。  
 $d_0 : r_0 = (d_0 - d) : r_d$  の関係から、距離  $d$  の排水表面円の半径  $r_d$  を求めれば、排水量  $V_d$  は (3) で求められる。

$$V_d = \frac{\pi(d_0 - d)(r_0^2 + r_0 r_d + r_d^2)}{3} \quad (3)$$

排水の流下や風で液面が波打って計測距離が変化し、さ

らに波面で乱反射した音波がポリバケツ側面で反射して受信されることで大きな距離が計測されるなど、異常値が時々発生する。異常値を除去するため、毎秒計測した1分間60個の中央値を毎分の計測値にした。さらに、計測値が1分前の値より小さかった時には、1分前の値を採用した。これらの信号処理アルゴリズムの付加で、安定した計測が可能になった。

貯留排水自動排出部は、貯留し続けて排水が溢れてしまわないように、1日に1回、定時に排水を排出する機構である。ポリバケツ底部に排水口を開け、硬質塩化ビニル製水道配管用異径ソケット（VU20×VU13）を接着した。ここに18mmΦのポリブタジエン弾性球（商品名：スーパーボール）を入れ、バケツ上端部に設置した国際電業製SA-991型ACソレノイドと水糸で接続した。ストローク10mmのACソレノイドに通電することで弾性球が引かれ、排水される。部品コストは約1,700円で、電磁弁利用と比較して約1/10にできた。

排出EC計測に市販製品の信号出力付きEC計を使用するのは高価になる。また、ポリバケツの貯留排水にEC計測電極を浸漬する計測法では、水ストレスなどで刻々と変化するECを感度良く捕えられない。そこで、高設栽培ベッドからの排水流路のECを計測できるプローブを開発した。CAD（オートデスク製123Design WIN64 R2.1.11）で設計し、3Dプリンタ（FLASHFORGE JAPAN製Dreamer）でふたつの部品から構成されるプローブ筐体を製造した（図4）。筐体1組に黒色ABS樹脂フィラメント約30gを使用した。電極にはステンレス製M4×30mmナベネジを、補償用温度センサにはサーミスタ（SEMITEC製103AT）を使用した。



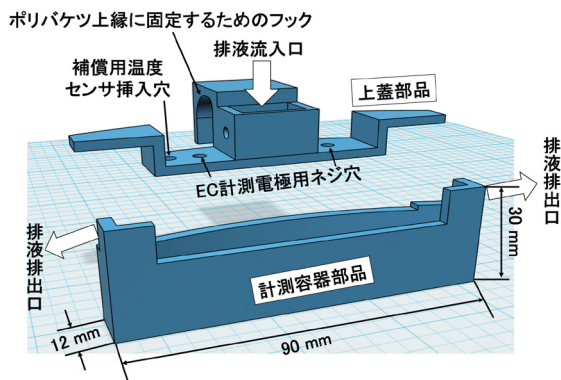


図4 排水貯留ポリバケツ上縁に設置できる排水流用の EC 計測電極プローブ筐体の設計図

プローブ 1 個あたりの材料コストを約 500 円にできた。

直流で EC 計測電極の電気抵抗値を計測する方法では、分極や気体の発生が進んで抵抗値が時間と共に増加し、液体の導電率を正確に計測できない。1 kHz 程度の交流を使い、インピーダンスを計測するのが一般的である（星 2019）。Arduino を使用した低コスト EC 計測の報告はいくつかある（例えば、Michael 2015, 西村ら 2017）が、回路設計と計測アルゴリズムが不適切だったり、外部発振回路が必要だったり、採用が難しかった。そこで、Arduino のデジタル信号出力 (Do) 2 点とアナログ直流電圧入力 (Ai) 2 点を使い、時間制御を精密にして導電率計測する方法を新たに考案した。

1 回の計測サイクルは次の通りになる。Do<sub>0</sub> と Do<sub>1</sub> の電圧出力を許可して開始し、1 ms 毎に High (5 V) と Low (0 V) に交互にスイッチし、負荷抵抗 R を通じて約 0.5 kHz の方形波交流を電極に印加する。極性の切り替え時から  $T_{setup}$  (μs) 待ち、ふたつの電極に接続した Ai<sub>0</sub> と Ai<sub>1</sub> を電圧計測して差の絶対値  $\Delta A_{in}$  を得る。スイッチするたびに計測を n 回繰り返す。その後 Do<sub>0</sub> と Do<sub>1</sub> の出力を禁止して無電圧にして計測完了する。その m<sub>r</sub> 回目から m<sub>i</sub> 回目までの平均値  $\overline{\Delta A_{in}}$  を用いて (4) で導電率 EC (dS m<sup>-1</sup>) を算出する。

$$EC = \frac{10k_{cell}(E - \overline{\Delta A_{in}})}{R \cdot \overline{\Delta A_{in}}} \cdot \{1 + 0.02(T - 25)\} \quad (4)$$

このとき、電極付近に設置したサーミスターで計測した液温 (T °C) を用いて、25°C の導電率に換算する。なお、E = 5 V とし、培養液の EC 値の範囲で電圧変化が最も大きな R = 3.3 kΩ にした。k<sub>cell</sub> は電極のセル定数である。テスト計測を繰り返し、パラメータが  $T_{setup}=0$ , n = 5, m<sub>r</sub> = 2, m<sub>i</sub> = 5 の時に最良の特性が得られ、採用した。

## ソフトウェア

ノードのソフトウェア制御プログラムの開発は、Arduino IDE 1.8.13 で行った。UECS プラットフォーム通信プロ



図5 培養液管理システムを供試した高設栽培施設内部

トコルは version 1.00-E10（ユビキタス環境制御システム研究会 2010）を使い、実装のためのミドルウェアには UAR-DECS 1.2.1（安場ら 2016）を使った。計測制御状態の取得には、ダウンロードサイト（<https://smart.uecs.org/tools.html#sw2>）, 2021 年 3 月 30 日参照）から入手できるフリーウェアの UECS モニタと、UECS-GEAR ver.1.1 を使用した。得られた CSV 形式ファイルを表計算ソフトウェアで図化した。

## 高設栽培施設での栽培試験

低コスト UECS で環境制御された、近畿大学生物理工学部内の鉄骨アーチパイプ PO 被覆の高設栽培施設（面積 120 m<sup>2</sup>）でシステムを供試した（図 5）。長さ 4.5 m のハンモック方式（西森 2006）の高設栽培ベッド 12 本に各 36 株を千鳥に植栽した（10 a あたり 6000 株の栽植密度）。品種は和歌山県推奨品種である‘まりひめ’（*Fragaria ananassa* ‘Marihime’）, ‘紀の香’（*Fragaria ananassa* ‘Kinoka’）を使用した。1 株あたり約 2 L のリサイクルポリエステル繊維培地（商品名：生産革命）を使用し、スファグナムピートモスをマルチした。ドリッパーを用い 1 分間で 1 株当たり 12.2 cm<sup>3</sup> の速度で培養液給液した。給液ノードを 2 台製作し、ドリッパー給液方式の本栽培試験施設に設置した。1 回の給液時間は 120–180 秒とし（成育ステージにより変更）、(1) 6 時, 17 時半, 18 時頃に 1 回の朝夕給液、そして、(2) 室外積算日射エネルギー密度が 2.0–2.1 MJ m<sup>-2</sup> に達する毎に 1 回の日中給液とした。培養液製造プラントを 2 台で共用するため、同時給液を避ける目的で設定条件を少しずらした。培養液供給方法試験のため 2 区を設定した。対照区は、常に 50% 濃度の培養液を供給する設定に、日中低濃度給液区は条件 (1) の給液時に 80% 濃度、条件 (2) の給液時に 20% 濃度の培養液を供給する設定にした。4 条件（2 品種 × 供給方法 2 区）を各 3 本の栽培ベッドに割り当てた。条件ごと各 1 本、計 4 本の高設栽培ベッドの培養液排出口に、排水計測ノード 2 台に接続された容量 15 L のポリバ

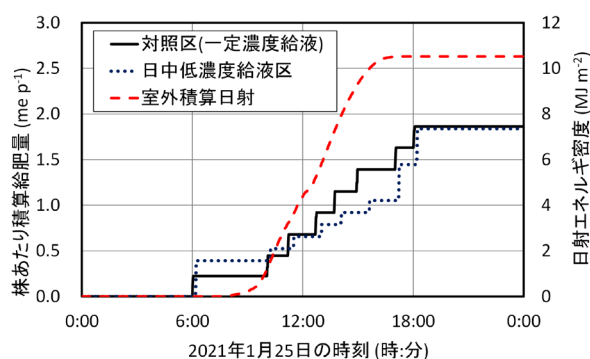


図6 朝夕と日中の給液濃度変化制御の有無が日積算給肥量に及ぼす影響

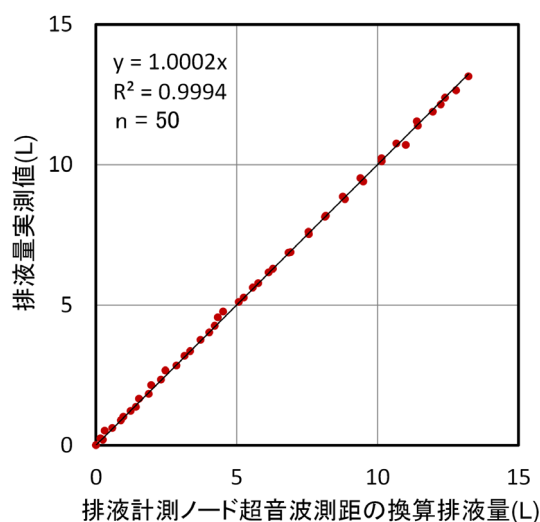


図7 超音波距離センサで得た排水量計測値と実測値との相関

ケツ4個を設置して試験した。

2019年度の栽培試験は2019年9月30日に開始（直径10.5 cm ポット苗を定植）し、2020年5月30日に終了した。2020年度は2020年9月28日に開始し、2021年5月31日に終了した。

## 結果および考察

### 給液ノード

給液ノードの動作例として、室外日積算日射エネルギー密度が  $10.5 \text{ MJ m}^{-2}$ （晴天）の1日の給肥量の推移を図6に示した。蒸散速度が大きな日中の水ストレス緩和を狙うような高度な培養液管理が実現できた。

### 排水計測ノード

設計した超音波距離センサによる15 L ポリバケツ排水量計測の評価結果を図7に示す。0–12 L の培養液を50回計測した結果、平均絶対誤差  $\pm 70 \text{ cm}^3$  程度で液量を計測できることが確かめられた。フルスケールに対する測定精度は約  $\pm 0.59\%$  になった。

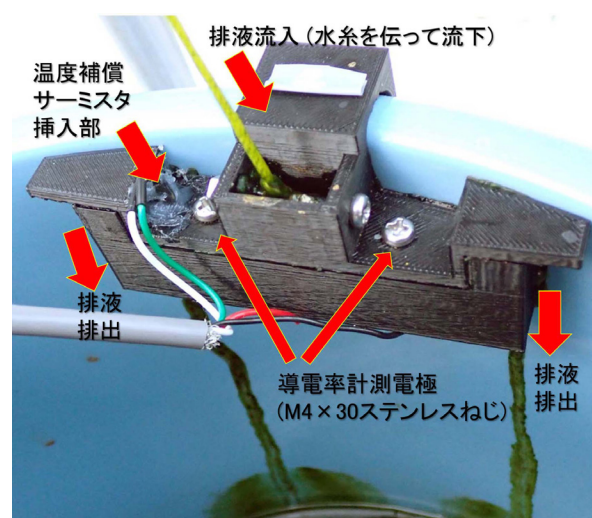


図8 排水ポリバケツへの設置から約1ヶ月が経過したEC計測電極プローブの状況

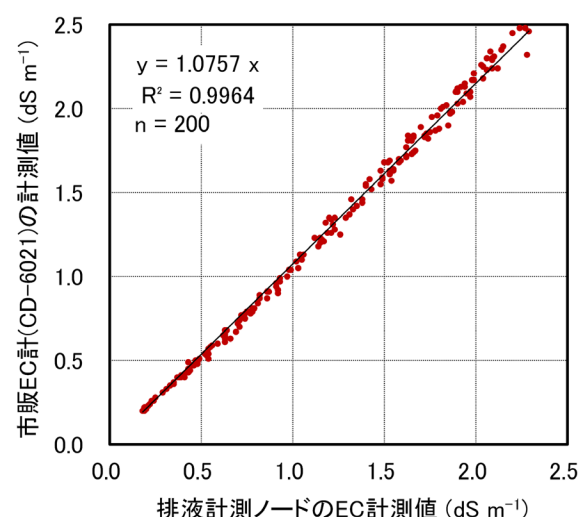


図9 排水計測ノード用に開発したEC計の計測値と市販EC計の計測値との相関

3Dプリンタで製造したABS製部品に、電極と補償用温度センサを組付けたEC計測電極プローブの排水ポリバケツへの設置状況を図8に示した。図8は設置から約1ヶ月が経過した状況で、排水排出口から流下する培養液は光が当たり藻類が発生している。しかし、黒色樹脂で製造したので、プローブ内部は暗黒に保たれ、汚損は見られなかった。半年経過後も、ABS樹脂の劣化、セル定数の変化はほぼ見られなかった。もし、電極などの汚損が進んだ場合は、電極のネジを外してプローブをふたつに分解でき、内部の清掃が容易な構造になっている。

この計測電極プローブを用いたEC計測の評価結果を図9に示す。レファレンスに市販の携帯型ECメータ（カスタム製CD-6021）を使用した。OATアグリオ製の養液栽培用A処方の培養液を各種濃度で200種調製し、両者の計測値を比較した。平均絶対誤差  $\pm 0.082 \text{ dS m}^{-1}$  程度で液量を計測できることが確かめられた。フルスケールに対

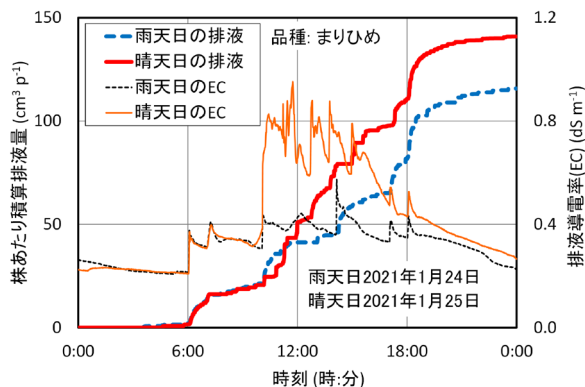


図 10 天候の違う日に排水計測ノードから得られた対照区（一定濃度給液）の積算排水量・EC 計測値の経時変化の違い

する測定精度は約  $\pm 3.26\%$  になった。数万円程度の市販の EC メータと遜色ない精度が確認された。

EC 計測電極筐体内容積は約  $24 \text{ cm}^3$  になった。この筐体を通して排水の EC を逐次計測することが可能なので、給液培養液肥料濃度が一定であれば、この計測で作物の吸肥状態の変化がわかる。つまり、作物が水ストレスにより、肥料より水の吸収の割合が勝るようになれば、排出培養液の肥料濃度は上昇するので、排水 EC の計測値が上昇する。図 10 は、‘まりひめ’に、図 6 の一定濃度の培養液を給液した区の、2021 年 1 月 24 日（雨天日）と 25 日（晴天日）の 1 日の排水量と EC の推移を 1 分毎に計測したものである。朝方夕方の定時給液時の排水量増加が大きく、培養液の利用効率が落ちていることが分かる。培養液供給設定の改良につながる情報が得られている。また、日中の培養液濃度を低下させたほうが、肥料の節約と育成促進につながると予想できる。バケツに貯留した排水の量と EC を 1 日に 1 回だけ手計測するのとは比べ、養水分吸収に関する、より詳細な情報が得られた。

### 培養液管理システムによる栽培試験

給液ノードと排水計測ノードの計測制御データは、UECS プラットフォームに配信され、これらをパソコンにインストールしたフリーウェアの UECS 対応ソフトウェアで収集し CSV 形式で記録できる。表計算ソフトを使い、収支式に従って計算することで、吸液・吸肥を 1 分単位で解析可能になった。給液ノードから培養液はステップ状に栽培ベッドへ供給される（図 6）。しかし、給液された培養液の余剰分が栽培ベッドから排出されるまでに時間遅れ（時定数： $\tau$ ）が発生する。給液ノードから得られた給液量と排水計測ノードからの排水量の差を、そのまま日積算吸液量にすると、図 11 の時定数 0 分のグラフの通り、オーバーシュートが顕著になる。オーバーシュートなどの積算値として不自然な積算給液量の減少が最も抑えられたのは、グラフより時定数 60 分の給液量を遅らせる信号処理した場合であった。このことから、本栽培試験ベッドの培養液給

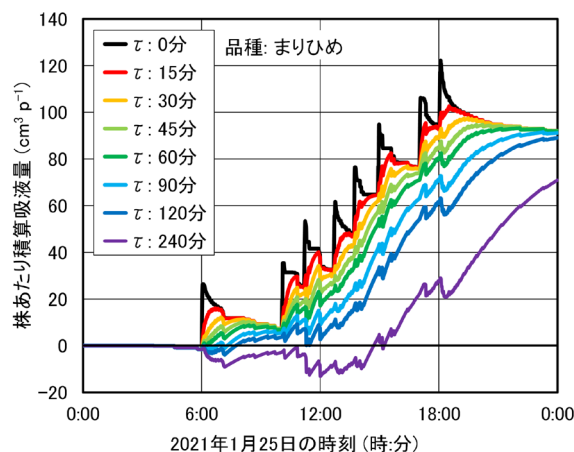


図 11 遅れがある排水量に合わせて培養液給液量に遅れ信号処理を加えた場合の時定数と対照区（一定濃度給液）の積算吸液量の推移

排出間の遅れの時定数は約 60 分と推察できた。

時定数 60 分の遅延信号処理した給液量・給肥量を用い、雨天日と晴天日の日吸液量と日吸肥量を算出した例を図 12 に示した。一定濃度を給液した対照区で、雨天日の吸液量は晴天日と比べ、‘まりひめ’が 34.8%、‘紀の香’が 39.2% になった。対して雨天日の吸肥量は晴天日と比べ、‘まりひめ’が 75.4%、‘紀の香’が 64.7% と、あまり減少しなかった。また、‘紀の香’は成育良好で、株あたりの蒸散が大きくなったため、日吸液量と日吸肥量が‘まりひめ’より大きくなった。

図 12 より算出した、吸液量に対する吸肥量の割合 (N/W) を図 13 に示した。1 分ごとの計算値は変動が大きいので、算出時までの平均 N/W で示した。グラフ線が水平の期間は水と肥料の吸収割合が不変であり、グラフ線が下降する期間は、植物が肥料より水を多く吸収していることを示す。この図では、‘まりひめ’、‘紀の香’とも晴天日の日中に顕著にグラフ線が下降している。これは、植物が晴天日の日中に雨天日より増加する蒸散量を維持するため能動的に水を多く吸収していることを示し、水ストレスを受けている可能性がある。したがって、晴天日の培養液では肥料濃度を下げ水分を多く供給したほうが、水ストレスを緩和できる可能性が示唆された。

この知見を検証するため、‘まりひめ’の 2019 年度栽培試験時の日吸液量と吸肥量を算出した結果を図 14 と図 15 に示した。

日吸液量と日射エネルギーの回帰式は、1 次式より 2 次式の時に最も高い相関が得られた。この理由は、晩春に向かうほど日射エネルギー密度が増加するのに加えてイチゴは大きく成長するので、株あたりの蒸散量が増大し、これらの 2 つの要因が同時に作用したのが原因と推察する。対照区と比較して日中に培養液濃度を低下させた区の日吸液量が大きくなり、水ストレスが緩和された結果であると考えられる。

吸肥量については、1 次回帰式が最も高い相関を示した。



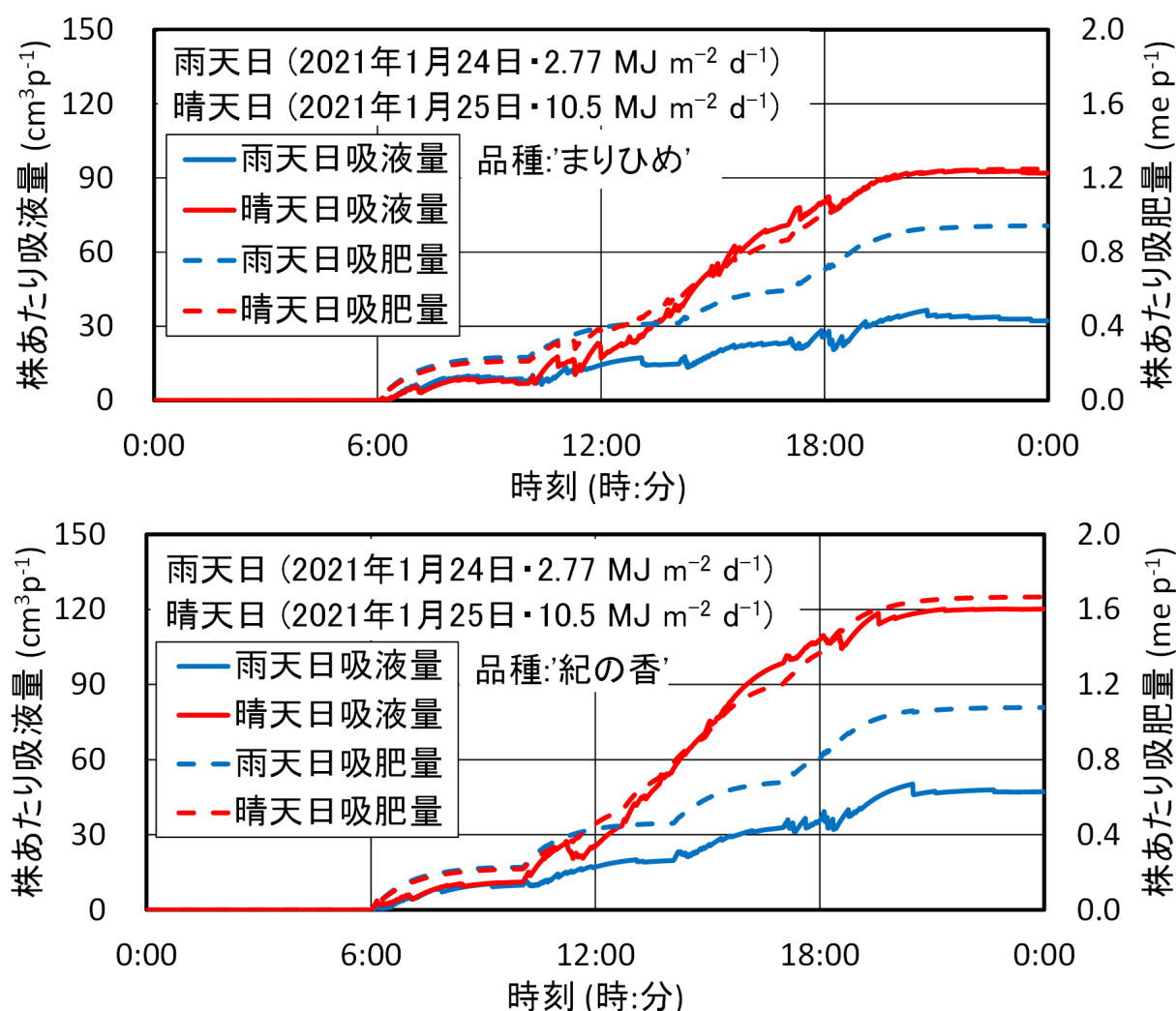


図 12 2 品種で天候が違う時の対照区（一定濃度給液）の吸液量・吸肥量の経時変化

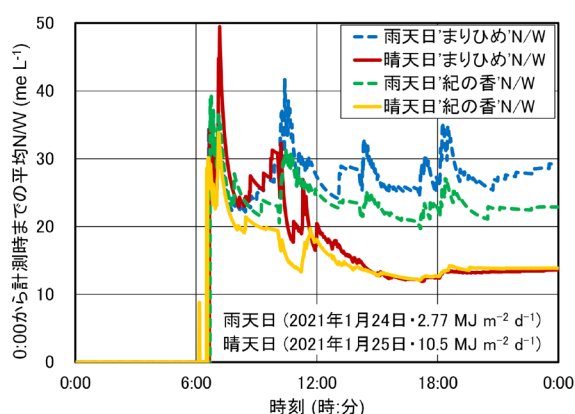


図 13 2 品種で天候が違う時の対照区（一定濃度給液）の吸収 N/W の経時変化

$R^2$  値が低くなっているのは、養分吸収が、蒸散によるポテンシャルだけでなく、イオンチャンネルなどの能動的メカニズムにも支配されているためと考える。6 MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>程度の日積算日射エネルギー密度を境界にして、培養液濃度を变化させた区が低日射日にはより大きく、高日射日には逆の傾向を示した。図 12 に現れている養水分吸収の特性と

合わせ、培養液濃度を变化させる給液アルゴリズムを改善できたと考える。本栽培試験の日中低濃度給液区のイチゴ果収量は、対照区と比較して、総収量で約 14%、可販果収量で約 11% の増収になった（各区 n = 108 株）。

#### 培養液管理システムの自作可能性

研究成果の普及・活用を促進するため、各ノードの回路図、制御ソフトウェアのソースプログラム、EC 計測電極プローブ筐体の 3D プリント製造用 STL ファイル等は、Web サイト（〈<https://hoshi-lab.info/interface/IchigoHpNcs.zip>〉, 2021 年 4 月 1 日参照）からダウンロード可能にし、オープンソース化した。培養液管理システムの製作に必要な部品の概算価格は合計約 57,983 円であった（表 1, 表 2）。給液ノードは Arduino 低コスト UECS 制御用 Shield キット（星ら 2018）を使い、排液計測ノードはユニバーサル基板である Arduino 用バニラシールドを使う。これらを日東工業製プラボックス P12-1525 に収容する。本システムの組み立てに必要な部品は、制御用 Shield キットの専用基板と EC 計測電極プローブ筐体を除き、通販等で入手可能な汎用品を用いている。給液ノードの制御用 Shield キット

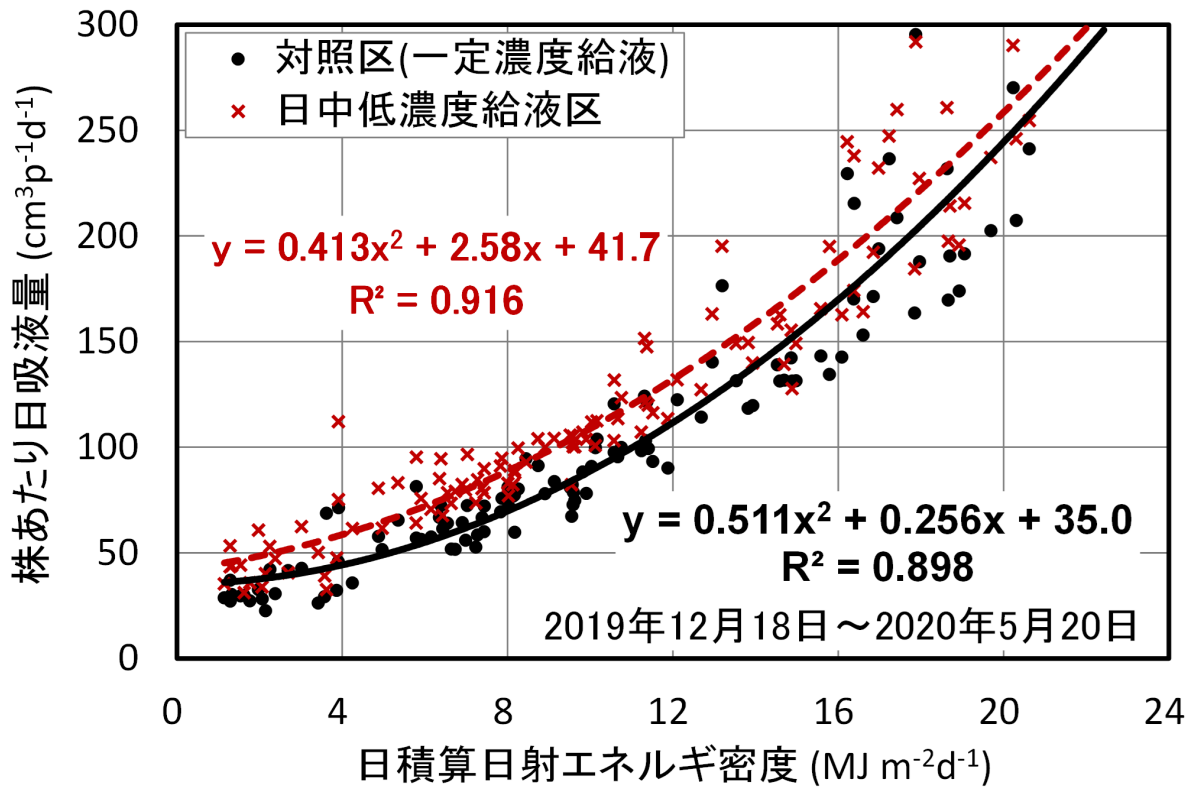


図 14 朝夕と日中の給液濃度変化制御の有無が‘まりひめ’の日積算日射エネルギー密度と日吸液量の相関におよぼす影響

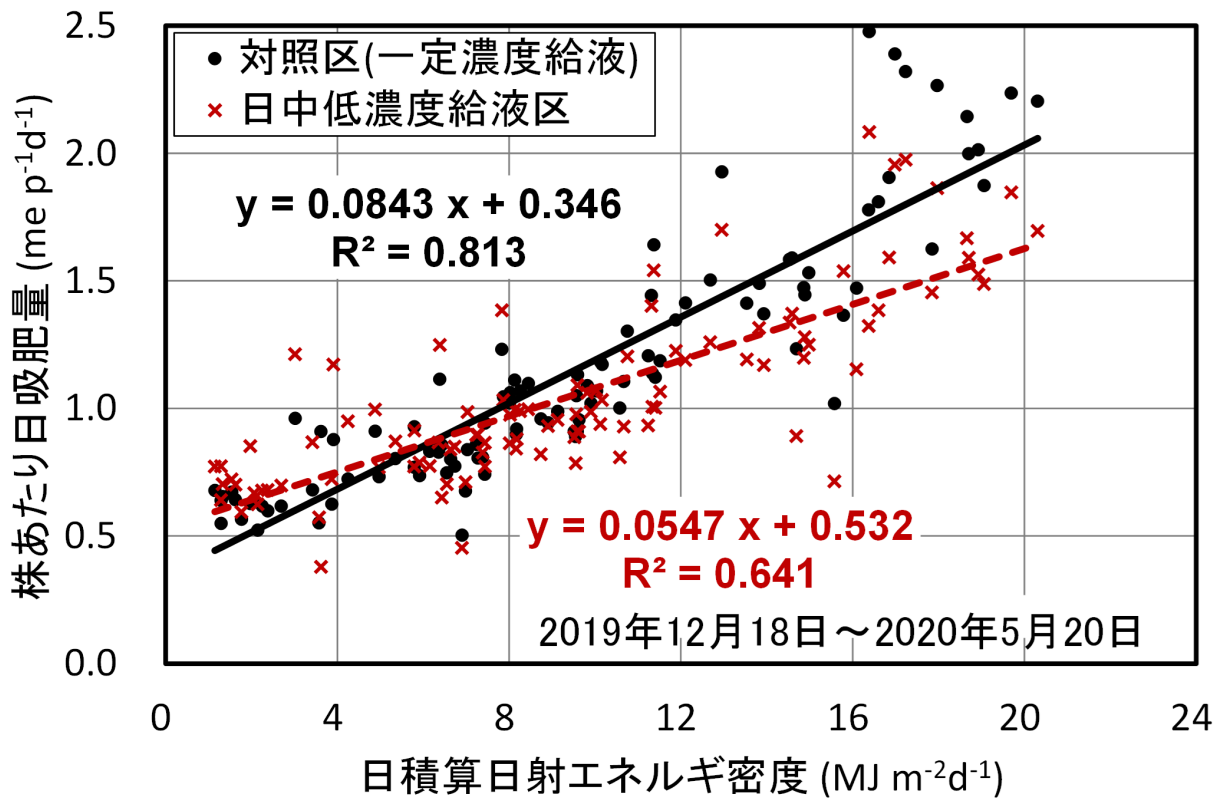


図 15 朝夕と日中の給液濃度変化制御の有無が‘まりひめ’の日積算日射エネルギー密度と日吸肥量の相関におよぼす影響



表 1 給液ノードの製作に必要な部品の概算価格

Arduino MEGA 2560	¥5,937
Ethernet Shield2	¥3,300
低コスト UECS 制御 Shield キット	¥13,000
電源 TDK VS10C-5	¥1,690
ブラボックス P12-1525	¥1,550
端子台・基板固定部材	¥1,000
ケーブル類	¥1,000
計	¥27,477

表 2 排液計測ノード（2 点計測分）の製作に必要な部品の概算価格

Arduino MEGA 2560	¥5,937
Ethernet Shield2	¥3,300
電源 TDK VS10C-5	¥1,690
ブラボックス 日東 P12-1525	¥1,550
ユニバーサル基板（バニラシールド）	¥408
RTC RX8900 DIP 化モジュール	¥500
液晶表示器キット AE-AQM1602A	¥550
防水押しボタン MS-382-1	¥231
リレー G6B-2114P-US DC5V	¥780
超音波距離センサ HC-SR04 × 2	¥900
アウトレットボックス日動 P 付 40B × 2	¥570
EC 計測電極部品 × 2	¥1,000
15 L ポリバケツ × 2	¥1,500
自動排液部部品（AC ソレノイド他）× 2	¥3,400
I2C ドライバ PCA9600D 基板 × 4	¥2,540
抵抗、コンデンサなどのその他電子部品	¥1,150
端子台・基板固定部材・シール材・接着剤	¥1,500
ケーブル類	¥3,000
計	¥30,506

専用基板を入手できなくても、バニラシールドなどのユニバーサル基板を使い回路図通りに作ることができる。また、排液計測ノードの EC 計測電極プローブ筐体についても、STL ファイルをダウンロードし、個人使用可能な 3D プリントなどのデジタル工作機械を備えた実験的地域工房である FabLab 等を利用すれば製造可能である。

給液ノードと排液計測ノード（ポリバケツ計測部を含む）の製作時間は、接着剤・コーキングの固化時間を除き、延べ約 8 時間だった。生物系の大学学部 4 年の学生でも、前記の 1.5 倍程度の時間で製作できることも確かめた。また、EC 計測電極プローブ筐体の 3D プリントでの成形時間は、1 組約 3 時間を要した。半田付けによる電子工作と合成樹脂の穴あけ加工の技術があれば、部品代のみで極めて安価に自作可能である。

## 結言

低コスト UECS プラットフォームを用いて、約 6 万円

の部品代で製作できる高設栽培ベッドの精密培養液管理システムを開発した。2018 年の施設イチゴ平均収量が 10 a あたり約 3.6 t である（農林水産省 2020）。1 kg の平均単価を 1,000 円とすると、もし、本システムの導入で約 1 割の増収が得られたとすれば、2 a 程度の小規模施設でも 1 年間の増収分で償却が可能になった。自作化・低コスト化が進む高設栽培ベッドに見合ったコストで、土耕栽培では困難だった養水分吸収の見える化を達成した。約 2 年間の栽培試験を通じ、より精密・高度な培養液管理につながる知見が得られた。さらに、本システムをオープンソース化し、自作も可能にした。UECS を活用し、日本のイチゴ生産を支えてきた各地の中小規模施設に導入可能な ICT による DIY スマート化の提案ができたと考える。得られた知見を活かし、深層学習などの判別アルゴリズムを使い、リアルタイム養水分吸収データから適切な養液管理設定値を提案できる高度栽培支援システムの構築を今後目指したい。

## 謝辞

本研究の推進に際し、種苗の提供、栽培助言、現地実証にご支援・ご協力を賜った、和歌山県の西森裕夫氏、東卓弥氏、川西孝秀氏、谷口正幸氏、和歌山県生産者の吉村学氏、西崎誠氏に深謝の意を表する。近畿大学の卒業研究において、機器製作、栽培試験、データ整理にご協力いただいた、生物生産工学研究室専攻生であった掛樋祐太、北坂雄大、山本修司、山下裕大、伊藤幸熙、小笠原豊、李澄、高山大樹、鈴木幹也、有田祥子、林智陽の各氏、試験施設整備・研究推進にご協力いただいた研究室同僚の瀧川義浩氏に御礼申し上げる。なお、本研究の一部は、科学研究費（19K06323）の支援による成果である。

## 引用文献

- 星岳彦, 瀧川義浩, 坂本勝, 戸板裕康, 小林一晴, 安場 健一郎, 吉田裕一, 後藤丹十郎, 黒崎秀仁, 岡安崇史 (2018) Arduino 低コスト UECS による自律分散型複合環境制御システムのイチゴ高設養液栽培ハウス導入試験, 農業情報学会 2018 年度年次大会講演要旨, 25–26.
- Hoshi, T., K. Yasuba, H. Kurosaki and T. Okayasu (2018) Ubiquitous environment control system: an internet-of-things-based decentralized autonomous measurement and control system for a greenhouse environment, ed. Hussmann, S., 'Automation in Agriculture—Securing Food Supplies for Future Generations', IntechOpen, 107–123, DOI: 10.5772/intechopen.71661.
- 星岳彦 (2019) 2.12 電気伝導度計, 農業食料工学会編, 「ポストハーベスト工学辞典」, 朝倉書店, 東京, 106–107.
- 星岳彦, 鈴木幹也 (2019) Arduino を用いたイチゴ高設養液栽培の低コスト UECS 培養液管理システムの開発, 日本生物環境工学会 2019 年千葉大会講演要旨, 82–83.
- 星岳彦 (2020) 農業センシングの世界・その 19…ワンコイン超音波距離センサ, Interface, 2020 年 4 月号, 10–11.

- Michael, R. (2015) Three dollar EC-PPM meter [Arduino], <<https://hackaday.io/project/7008-fly-wars-a-hackers-solution-to-world-hunger/log/24646-three-dollar-ec-ppm-meter-arduino>>, 2021 年 3 月 30 日参照.
- 西森裕夫 (2006) 和歌山県型イチゴの低コスト高設栽培システム, <[https://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/070100/070109/gaiyou/001/nougyoushikenjyou/shikenkenkyuuseika/seikaselect100\\_d/fil/13-jtd.pdf](https://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/070100/070109/gaiyou/001/nougyoushikenjyou/shikenkenkyuuseika/seikaselect100_d/fil/13-jtd.pdf)>, 2021 年 3 月 29 日参照.
- 西村知紘, 奥山雄司, 松下綾香, 佐藤証 (2017) 水耕栽培用センサの小型回路実装と性能評価, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2017 論文集, 電子情報通信学会, 2017, 1215–1218.
- 農林水産省 (2020) 園芸用施設の設置等の状況 (H30), <[https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/haipura/setti\\_30.html](https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/haipura/setti_30.html)>, 2021 年 3 月 29 日参照.
- 竹中智也, 山田晴夫, 上曾山大, 岡安崇史 (2018) イチゴ高設栽培における排液情報の計測と活用, 農業情報学会 2018 年度年次大会講演要旨集, 25–26.
- 安場健一郎, 多根知周, 田中義行, 後藤丹十郎, 吉田裕一, 黒崎秀仁, 岡安崇史, 星岳彦 (2016) 低コスト環境制御システム構築のためのプログラムライブラリの開発, 農業情報研究, 25 (1), 12–18.
- 吉田裕一 (2016) イチゴ栽培の基本技術・高設栽培, 農文協編, 「イチゴ大辞典」, 農文協, 東京, 197–230.
- ユビキタス環境制御システム研究会 (2010) UECS の通信規約, <<https://uecs.jp/uecs/uecs-5.html>>, 2021 年 3 月 29 日参照.
- 受付日 2021 年 4 月 5 日  
受理日 2021 年 6 月 14 日  
担当部会 工学分野

Agricultural Information Research 30 (3), 2021. 121–130

# A DIY Precision Nutrient Management System for Elevated Strawberry Culture Beds Made with Open-source Arduino and a Ubiquitous Environment Control System Platform

Takehiko Hoshi<sup>\*1)</sup>

1) Faculty of Biology-Oriented Science and Technology, Kindai University,  
Nishimitani 930, Kinokawa Shi, Wakayama 649-6493, Japan

## Abstract

Elevated hydroponic strawberry culture has advantages in saving labor over conventional ground-based soil culture. As the growing beds stand off the ground, inputs and outputs of matter can be measured accurately. I developed a low-cost nutrient management system using a ubiquitous environment control system platform with open-source Arduino hardware for a total cost of about JPY 60,000 per set. The system precisely and continuously measures the volume and electric conductivity of the input and output nutrient solutions. Visualization of water and nutrient uptake by strawberries improves production through precise control of the hydroponic system. Results of practical tests over 2 years improved the management of strawberry culture. The system has been made open source as a smart agricultural tool to support small- to medium-scale greenhouses that grow strawberries in Japan.

## Keywords

Arduino, protected horticulture, smart agriculture, UECS, hydroponics

---

\* Corresponding Author

E-mail: [hoshi@waka.kindai.ac.jp](mailto:hoshi@waka.kindai.ac.jp)