

水耕栽培用液肥管理システムの開発

上原嘉織¹ 池田宏道^{†1} 佐藤証¹

概要: 本稿では、小型水耕栽培に液肥濃度の自動管理システムを実装するため、オペアンプ発振回路を用いた濃度センサモジュールの開発と、エアポンプによる追肥装置の試作を行い、その性能評価を行った。液肥濃度 EC によって変化する電気伝導率を発振回路の周波数として測定し、それに水温もパラメータに加えた三次元曲面を求めたことで、EC=0.25~3.5 mS/cm、水温 8~40°Cという広い範囲で 8.4%以下という高い精度を実現した。また追肥装置では、エアポンプの個体差、原液濃度、揚高、駆動時間などのパラメータを変化させた評価実験により、液肥濃度を設定した値に±2.5%の精度で調整可能であることを明らかにした。

1. はじめに

近年の農業において、労働および生産コストの低減と収量の増加を目的に、栽培環境の監視と制御に各種センサを用いた IoT 技術の導入が進んでいる。生産性の向上には施設を大規模化する必要があるため、郊外や地方の広い土地を利用することとなる。

これに対して我々は、ビルの屋上や個人宅のベランダ等の空スペースを利用した新たな都市農業の実現を目的に遠隔管理機能を備えた水耕栽培装置[1]-[3]の研究を続けている。農作物の生産が主目的ではなく、植物を育てることを楽しみ、イベントスペースとしてバーベキューを行うなど(図1)、農のエンターテインメントとしての可能性を広げるものである。個人でも手軽に楽しめるように、図2に示した高さ 1m 程の小型装置も開発している。従来の農業のような単一作物の大量生産を目指したものではないため、一つの装置でトマト、苺、メロン、パプリカ等の果菜類をはじめとして、花やハーブ等、根菜類以外、様々な野菜を一つの装置で同時に育てている。ユーザは家庭菜園等の経験がない人も対象としているため、水耕栽培装置が備えたセンサ(図2)で取得したデータをスマートフォン等でモニタでき、問題が生じたときにはメールでエラーを通知する管理ツール(図3)も開発している。

センサは現在、温湿度、水温、水位、液肥濃度、照度、ポンプ駆動状態をサポートしている。水は減った分だけ自



図1 大学の屋上でのバーベキューの様子

動で注水されるが、そのままでは液肥が薄くなるため現在は定期的に人手で追肥している。しかし個人利用においては旅行などで長期間に手入れができない場合等もあるため、自動的に液肥を追加するシステムを開発することとした。そのため本論文では、新規に開発した液肥濃度センサと、追肥のためのポンプ制御機構の性能評価を行い、実用性についての検討を行う。



図2 小型水耕栽培装置の外観(左)と内部機構(右)



図3 水耕栽培装置の管理ツール

2. 液肥濃度センサ

2.1 市販の液肥濃度計の精度測定

濃度計は、液肥に浸けた二本の電極の間に電流を流し、濃度が濃くなると高くなる電気伝導率 (EC: Electro Conductivity) を計測する方法が広く用いられている。濃度

¹ 国立大学法人電気通信大学

^{†1} 現在、(株)アマダホールディングス

は EC 値、濃度計は EC 計とも呼ばれる。液肥に浸けた電極の面積が大きくまた距離が近いほど抵抗は小さく、逆に面積が小さく距離が離れば抵抗は大きくなる。面積 A の電極が距離 L で向かい合っており、電極と液肥には接触抵抗がなく、 $A \times L$ の直方体の液肥を通じてのみ電流が流れるとき、抵抗率を ρ (単位は Ωm) とすると、抵抗 R は次式で表される。

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (\Omega) \quad (1)$$

電気伝導率 EC は ρ の逆数で、基本単位は $\text{S/m} = 1/\Omega\text{m}$ であるが、これは実用には大き過ぎるので mS/cm が通常用いられる。

植物栽培用の液肥濃度計として広く使われている市販の二種類、アタゴ DEC-2 と EZ-1 を図 4 に、その諸元を表 1 に示す。



図 4 市販の EC 計

表 1 EC 計の諸元

	DEC-2	EZ-1
計測範囲	0~19.0 mS/cm	0~9,999 $\mu\text{S/cm}$
分解能	0.1 mS/cm	1 $\mu\text{S/cm}$
温度範囲	0~50 °C	0~80 °C
精度	$\pm 0.2 \text{ mS/cm}$ (0.0~10.0 mS/cm) $\pm 0.4 \text{ mS/cm}$ (10.1~19.9 mS/cm)	$\pm 2\%$
価格	約 15,000 円	約 1,500 円

DEC-2 [4]は小数点 2 桁まで表示されるが、分解能は 0.1 mS/cm なので、2 桁目は常に 0 である。精度は 2 mS/cm までは、 $\pm 0.2 \text{ mS/cm}$ であるが、育苗から通常の栽培までは 0.6~1.2 mS/cm 程度の濃度の液肥を用いているので、やや難がある。EZ-1 は $\mu\text{S/cm}$ 表示で、スペックによると分解能は DEC-2 の 1/100 の 1 $\mu\text{S/cm}$ 、動作温度範囲は 0~80 °C と広く、精度も $\pm 2\%$ と高い。なおかつ価格は DEC-2 の 1/10 である。そこで、両者の実際の性能を比較するため、後述の図 11 の実験と同様に、8~40°C の範囲で湯煎した 9 種類の濃度 (0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 mS/cm) の液肥に EC 計を浸けて、ディスプレイに表示される値を調べた結果を図 5 と 6 に示す。なお EZ-1 は 4 本に対して実験を行った。

DEC-2 は水温が高くなると、EC 値が低く表示される傾向にあるが、ほぼスペック通りの性能が示された。これに対して EZ-1 は 1.5 mS/cm 程度までの濃度では比較的安定しているものの、それ以上では不安定であった。25°C 以下では液肥温度の上昇につれて EC 値が直線状に下がって

くため、EC 計の反応が温度変化に追いついていない可能性も考えられたが、一定温度に保って長時間計測しても測定結果に差はなかった。電気伝導率は液肥の濃度が同じでも温度によって変化するため、農業で用いる EC 計は 25°C の電気伝導率を基準に値を補正するようにしている。図 6 では全ての EC 値で 25°C を境に左右で傾向が異なっていることがわかる。また、EC が高い場合に値が急に飛ぶことがあり、回路的にこのような離散値を取ることは考えにくいことから、温度補正のアルゴリズムに問題があると考えられる。さらに 2.0 mS/cm 付近から不安定になるのは、多くの EC 計がそうであるように広い範囲をカバーするために、EC 値の高低によって内部で動作を切り替えている可能性がある。また仕様上の精度は $\pm 2\%$ であるが、安定している 1.0 mS/cm でも $\pm 20\%$ ($\pm 0.2 \text{ mS/cm}$) もの誤差が出ている。これは、計測範囲 0~9.999 mS/cm の $\pm 2\%$ ($\pm 0.2 \text{ mS/cm}$) という意味と考えられ、であれば仕様上の精度は DEC-2 と同等ということになる。

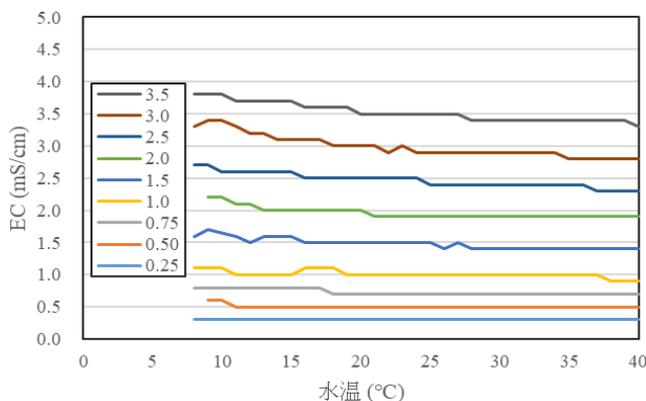


図 5 DEC-2 の温度特性

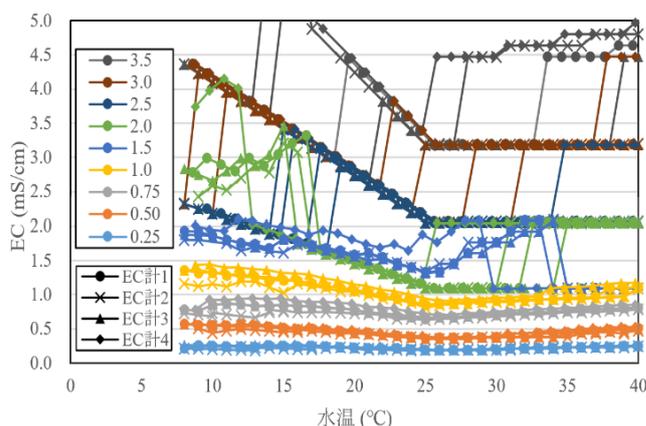


図 6 EZ-1 の温度特性

開発を進めている液肥管理システムでは、EC 値を計測しながらそれが設定した値になるよう原液をポンプで追加するが、制御にも誤差が生じる。このことと合わせて、市販の安価な EC 計の精度では難がある。また、それらはディスプレイに値が表示されるだけなので、それを制御に用いることはできない。施設園芸用ではデータを送信可能なものもあるが[5]、数十万円と高価であり、一般ユーザが利

用できるものではない。

2.2 3 インバータ発振回路

そこで、図 2 のセンサモジュールに、自作の発振回路を用いた EC センサを実装した。実装が簡単なことから、液肥濃度センサに図 7 の 3 インバータ発振回路を用い、液肥の抵抗 R によって変化する発振周波数から液肥濃度を計算した。直流を用いれば抵抗 1 本の回路で R を求めることができるが、一方向に流れる電流によって電極が溶けてしまうのを避けるため、発振回路による交流とした。

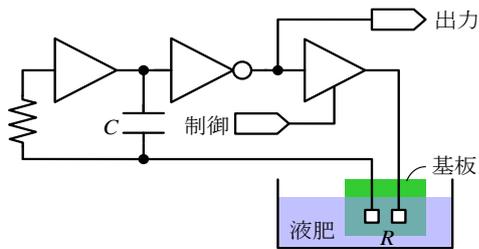


図 7 3 インバータ発振回路を用いた液肥濃度センサ

この回路の発振周波数 f は、インバータのしきい値電圧を電源の 1/2 とするとき、液肥の抵抗 R を用いて次式で表される。

$$f = \frac{1}{2\ln 3 \cdot CR} \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

計測した周波数 f から簡単に R を求めることができるが、この R は単純な抵抗素子を想定したものであり、同じ濃度の液肥であったとしても、電極の形状によってまったく異なった値となる。今回は図 8 の腐食に強いステンレス素材の電極を用いた。平行平板ではなくまた直接向き合っている面以外からも回り込んで電流が流れるため、簡単に抵抗値を計算することは不可能であり、複雑な 3 次元シミュレーションが必要となる。そのため実験によって、数種類の濃度の液肥と周波数の関係を調べ、周波数から補完式によって EC 値を算出した。また電気伝導率は水温が高くなると上がるので、この補完も行うこととした [3]。しかし、インバータのしきい値電圧のばらつきが大きく、センサモジュールによって発振周波数が数十パーセントも異なってしまう、モジュールに共通した補完式の導出ができないという問題が生じてしまった。



図 8 液肥濃度計測用電極

2.3 オペアンプ発振回路

3 インバータ発振回路のばらつきの問題を解決するため、今回、図 9 のオペアンプを用いた発振回路による EC センサを実装した図 10 のセンサモジュールを開発した。

この回路の発振周波数は式(3)となり、そのばらつきは 3

つの R とコンデンサ C に大きく依存する。そこで、5%精度の素子を用いた。

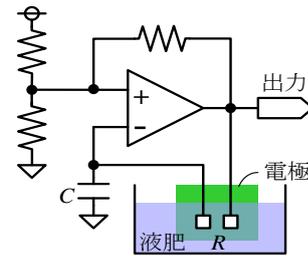


図 9 本論文のオペアンプを用いた液肥濃度センサ

$$f = \frac{1}{2\ln 2 \cdot CR} \quad (\text{Hz}) \quad (3)$$

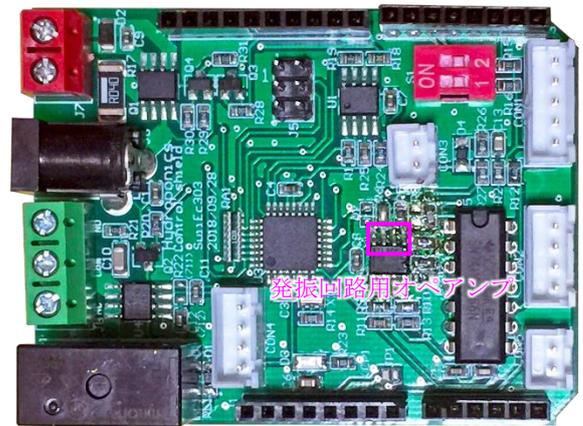


図 10 オペアンプ発振回路を実装したセンサモジュール

2.4 周波数計測と補完式の導出

図 10 のセンサモジュールを 3 つ用意し、図 8 の電極を接続して、9 種類の濃度 (0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 mS/cm) の液肥に対する発振周波数を測定した。また温度補正も行うため、冷蔵庫で冷やしておいた液肥を図 11 のようにペットボトルを半分にした容器に入れ、その周りに熱湯を注いで 8~40°C の範囲で湯煎を行った。温度測定用のサーミスタをセンサモジュールに接続し、EC 測定用電極と束ねて液肥に浸け、秒間隔で自動的に計測したデータを PC に転送した。図 12 に計測した 9 種類の液肥のうち 5



図 11 周波数計測実験の様子

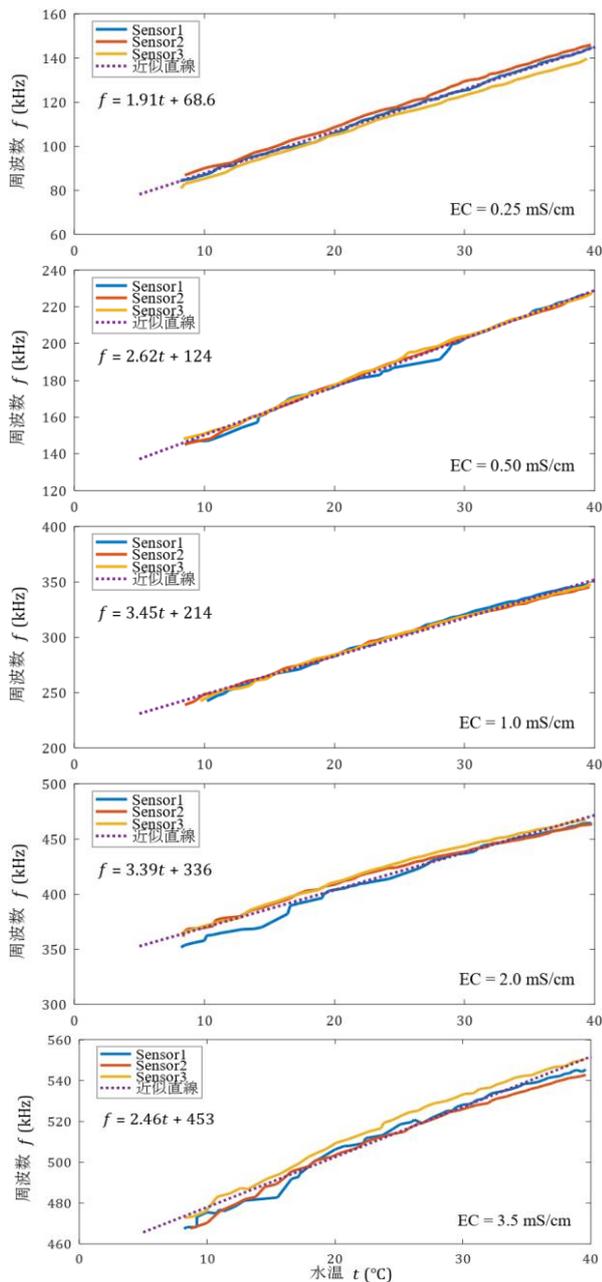


図 12 各濃度の液肥に対する周波数対温度特性

種類 (0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.5 mS/cm) の測定結果を示す。3つのセンサモジュールの特性のばらつきは非常に小さいことがわかる。また EC=1.0 程度までは、周波数は水温に対して比較的良い線形成を有している。様々な作物に適した濃度は 1.0 前後なので、線形近似でも実用的な精度が得られるが、広範囲で高い精度が得られるように、周波数 f と水温 t をパラメータとする EC 値の近似曲面を求めた。

まず、測定データを近似する式(4)の二次曲面を最小二乗法により求めた。またその曲面の上に実測値を乗せたものを図 13 に示す。表 2 は、各液肥に対して、センサ毎に周波数と温度の測定値から式(4)で EC 値を求め、その最小値と最大値(対応する周波数と温度は省略)、誤差をまとめたものである。

$$EC = p_0 f^2 + p_1 f t + p_2 t^2 + p_3 f + p_4 t + p_5 \quad (\text{mS/cm})$$

$$\begin{cases} p_0 = 1.91 \times 10^{-5} \\ p_1 = -1.06 \times 10^{-4} \\ p_2 = 4.06 \times 10^{-4} \\ p_3 = -1.77 \times 10^{-3} \\ p_4 = -9.87 \times 10^{-3} \\ p_5 = 5.45 \times 10^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

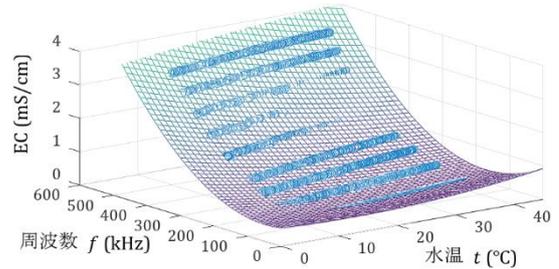


図 13 2次曲面による EC 値の近似

表 2 曲面近似による EC 値の範囲と誤差 (式(4))

EC (mS/cm)	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	
Sensor 1	最小	0.293	0.379	0.611	0.918	1.43	1.88	2.40	2.91	3.22
	%	17.1	-24.2	-18.6	-8.2	-4.7	-5.9	-3.9	-3.1	-8.1
	最大	0.405	0.505	0.700	1.03	1.62	2.15	2.61	3.03	3.47
Sensor 2	最小	0.293	0.397	0.653	0.940	1.48	2.02	2.55	2.91	3.18
	%	17.0	-20.7	-12.9	-6.0	-1.1	1.2	1.9	-3.0	-9.1
	最大	0.402	0.506	0.717	1.01	1.60	2.14	2.63	3.08	3.44
Sensor 3	最小	0.293	0.397	0.630	0.921	1.47	2.04	2.59	2.98	3.30
	%	17.2	-20.5	-16.1	-7.9	-2.1	2.2	3.6	-0.6	-5.7
	最大	0.403	0.516	0.727	1.02	1.62	2.19	2.68	3.12	3.54
	%	61.1	3.2	-3.1	2.4	7.8	9.5	7.1	3.9	1.2

式(4)の曲面による近似誤差は低い EC 値ほど顕著で、Sensor 1 において 0.25 mS/cm の液肥で、近似値が 0.405 mS/cm と 61.8 %もの誤差となった。ただし、値としては 0.145 mS/cm であるので、スペック上は市販のセンサと同じ 0.2 mS/cm 範囲内である。回路に電流が流れず発振しない場合は電気伝導率である EC は 0 となるべきであるが、図 13 から明らかなように、発振周波数 150kHz 付近から、下がるべき EC 値が上昇に転じ、青の丸印で示した測定値が大きく外れて曲面の下に隠れてしまっている。

一般的には EC=1.0 前後の液肥が使われ、低い値での精度が重要となる。そこで、これを改善するため、低い EC 値に対して表 3 のような大きな重み付けをすることとした。2次式は(4)と同じなのでパラメータだけを式(5)に、曲面の形を図 14 に、EC 値の誤差を表 4 に示す。

表 3 曲面近似の重み付け

EC	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
重み	14.0	7.00	4.67	3.50	2.33	1.75	1.40	1.17	1.00

$$\begin{cases} p_0 = 1.39 \times 10^{-5} \\ p_1 = -9.85 \times 10^{-5} \\ p_2 = 1.71 \times 10^{-4} \\ p_3 = 1.04 \times 10^{-3} \\ p_4 = -5.60 \times 10^{-4} \\ p_5 = 1.36 \times 10^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

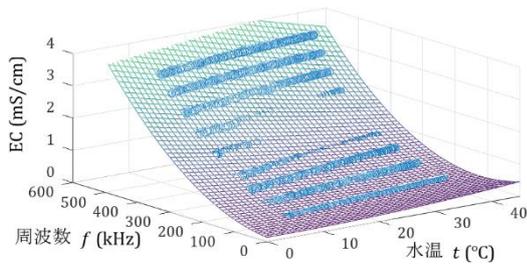


図 14 重み付けした 2 次曲面による EC 値の近似

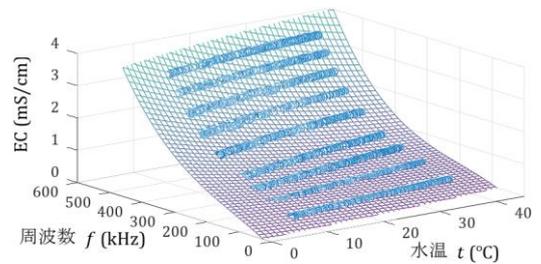


図 15 重み付けした 3 次曲面による EC 値の近似

表 4 曲面近似による EC 値の範囲と誤差 (式(5))

EC (mS/cm)	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	
Sensor 1	最小	0.248	0.434	0.690	0.973	1.48	1.92	2.37	2.70	2.96
	%	-0.6	-13.2	-8.0	-2.7	-1.0	-3.8	-5.2	-10.0	-15.5
	最大	0.262	0.475	0.771	1.09	1.65	2.12	2.53	2.95	3.32
Sensor 2	最小	0.254	0.448	0.724	0.985	1.52	2.03	2.40	2.70	2.93
	%	1.8	-10.3	-3.5	-1.5	1.6	1.7	-3.9	-10.1	-16.4
	最大	0.266	0.469	0.762	1.08	1.64	2.15	2.58	2.98	3.29
Sensor 3	最小	0.247	0.447	0.710	0.983	1.53	2.07	2.47	2.76	3.03
	%	-1.1	-10.6	-5.4	-1.7	2.0	3.4	-1.4	-8.1	-13.5
	最大	0.256	0.480	0.754	1.08	1.65	2.18	2.62	3.01	3.38
%	2.5	-3.9	0.5	7.8	9.9	8.9	4.8	0.4	-3.3	

表 5 曲面近似による EC 値の範囲と誤差 (式(6))

EC (mS/cm)	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	
Sensor 1	最小	0.240	0.477	0.705	0.973	1.41	1.83	2.32	2.89	3.28
	%	-4.0	-4.6	-5.9	-2.7	-6.2	-8.4	-7.2	-3.8	-6.4
	最大	0.254	0.523	0.763	1.02	1.54	2.06	2.55	3.04	3.57
Sensor 2	最小	0.252	0.495	0.739	0.986	1.47	1.99	2.50	2.91	3.24
	%	1.0	-1.1	-1.5	-1.4	-1.8	-0.4	-0.1	-3.1	-7.5
	最大	0.262	0.525	0.781	1.01	1.52	2.06	2.56	3.08	3.51
Sensor 3	最小	0.234	0.496	0.722	0.976	1.46	1.99	2.55	2.99	3.38
	%	-6.5	-0.8	-3.7	-2.4	-2.9	-0.3	2.2	-0.4	-3.4
	最大	0.245	0.539	0.787	1.01	1.54	2.10	2.62	3.12	3.65
%	-1.9	7.7	5.0	1.5	2.4	5.0	4.7	4.1	4.3	

重み付けにより 0.25 mS/cm の液肥における最大の誤差は、Sensor 2 で 0.266 mS/cm の 6.4%と大幅に精度が向上した。しかしながら、重みを小さくした 3.5 mS/cm の液肥に対しては、Sensor 2 で 2.93 mS/cm の -16.4%と精度が下がっている。全体では誤差が 61.8%から-16.4%に、特に低い EC 値の誤差が大幅に改善しているので実用上十分なレベルではあるが、追肥装置の制御の誤差も考慮し、さらに精度を向上させることとした。

図 13 と 14 からわかるように、2 次曲面では $f=0$ Hz で $EC=0$ mS/cm に近づけようとする、どうしても周波数が高い部分で誤差が大きくなってしまふ。そこで 3 次曲面を用いたのが式(6)および図 15 である。なお重み付けは表 2 と同じものを用いた。これらにより、誤差の最大値は液肥濃度 2.0 mS/cm に対する Sensor 1 の 1.83 mS/cm で -8.4%に改善された。図 15 のグラフからも、測定値が曲面全体にきれいに乗っていることがわかる。

$$\begin{aligned}
 EC = & p_0 f^3 + p_1 f^2 t + p_2 f t^2 + p_3 t^3 + p_4 f^2 + p_5 f t \\
 & + p_6 t^2 + p_7 f + p_8 t + p_9 \quad (\text{mS/cm})
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases}
 p_0 = 4.02 \times 10^{-8} \\
 p_1 = -2.19 \times 10^{-7} \\
 p_2 = 1.59 \times 10^{-6} \\
 p_3 = -2.95 \times 10^{-6} \\
 p_4 = -1.38 \times 10^{-5} \\
 p_5 = -5.75 \times 10^{-5} \\
 p_6 = 1.14 \times 10^{-4} \\
 p_7 = 6.87 \times 10^{-3} \\
 p_8 = -6.47 \times 10^{-3} \\
 p_9 = -1.65 \times 10^{-1}
 \end{cases} \quad (6)$$

3. 追肥機構

3.1 追肥ハードウェア

液肥を設定した EC 値に調整する追肥ハードウェアの構成を図 16 に、追肥コントローラを図 17 に示す。先に説明し

た EC センサで計測した値が低いとき、追肥コントローラはエアポンプを動かして、原液の入った 20 ペットボトルに空気を送る。それによって原液が押し出されて液肥タンクに注入される。液肥は 2 種類の肥料(水耕栽培の定番は OTA ハウス 1 号と 2 号)を同量混合することが多く、微小成分を含む 3 液目を混合する場合もあるため、追肥コントローラは制御用 USB コネクタを 3 系統用意している。なおエアポンプは、5V 200mA の USB タイプを用いた。

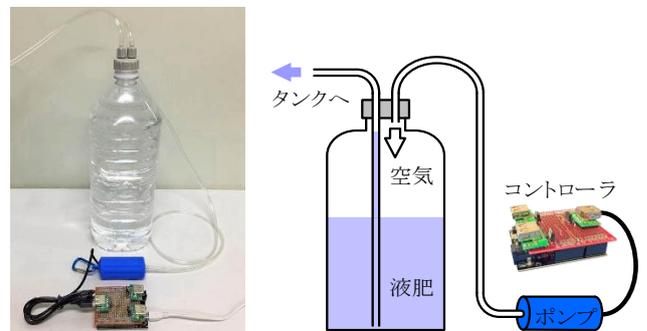


図 16 追肥ハードウェアの構成

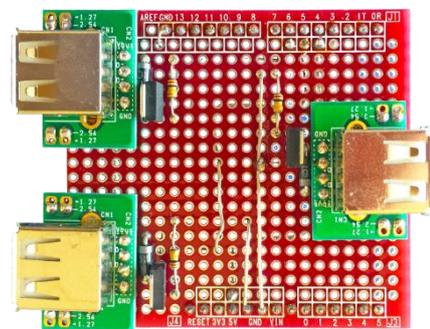


図 17 追肥コントローラ

3.2 追肥実験

追肥は EC 値を計測しながら、少しずつポンプを稼働させて行が、エアポンプや原液濃度のばらつき、設置場所の違いに

よる揚程変化の影響があるため、実用的な制御が可能かどうかを調べる必要がある。

そこでまず、10個のポンプを無作為に選び、図18の設定で10秒稼動したときの抽出量を測定した結果を図19に示す。この実験と次の揚高の実験では水道水を用いた。各ポンプで30回測定を行い、その最大値と最小値を青とオレンジの点で、平均値を灰色の点で示した。およそ60mlを中心に±10%程度のばらつきが見られる。なお、以下の実験では、最大値と最小値のばらつきが大きかった最左のポンプを用いている。ところでこのグラフのばらつきがそのままECの誤差となるわけではなく、注入された原液は数十倍に薄められるので、この程度の誤差は問題とならない。



図18 ポンプの個体差評価実験の様子

次に、原液の揚高を30, 53, 76, 99, 122cmと変えたときの抽出量を調べる。エアポンプは10秒間の稼動と10秒間の停止を繰り返し、動作中の抽出量をつなげてプロットした結果が図20である。各揚高の点がきれいに直線に乗っていることから、押し出される液肥の量はペットボトル内の水の量には影響されず、ポンプの駆動時間のみで決まることがわかる。ユーザは原液が完全になくなってから原液を入れるということは通常行わず、減ってきた途中で追加するため、抽出量が液肥の残存量に左右されないのは都合のよい性質である。また当然ではあるが、抽出先が高くなるほど抽出量は減少する。揚高と抽出量は直線に乗っており、高さが30cmから122cmと90cm以上変わっても抽出量は4割程度しか変わらない。液肥を122cmという高さまで汲み上げることは通常ないので、揚高の変化によるばらつきは2割も見込めば充分である。

水耕栽培では、植物の三大栄養素である窒素(N)、リン(P)、カリウム(K)が主成分の原液と、石灰が主成分の原液を混合して追肥する。また、土中の微量元素等の第三液を追加することもある。これらを最初から適切な配合比で混ぜた原液を作ればよいように思えるが、成分が固まって沈殿してしまうので分ける必要がある。また粉末の肥料を水に溶かして原液を作る場合、定番のOATハウスの肥料の1号、2号[6]では1ℓの水で200g程度が限界である。一般的な1号と2号の配合比は3:2で、1ℓの水に1号を150g溶かし

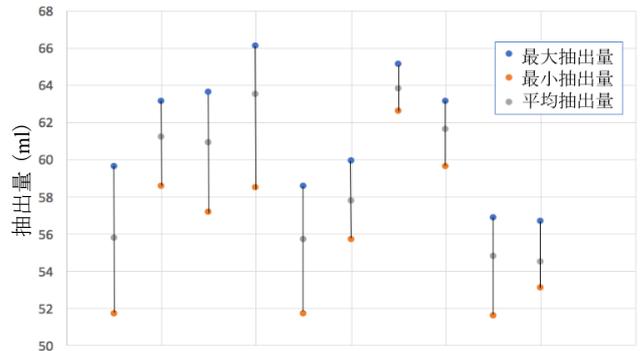


図19 10個のポンプの10秒間の抽出量

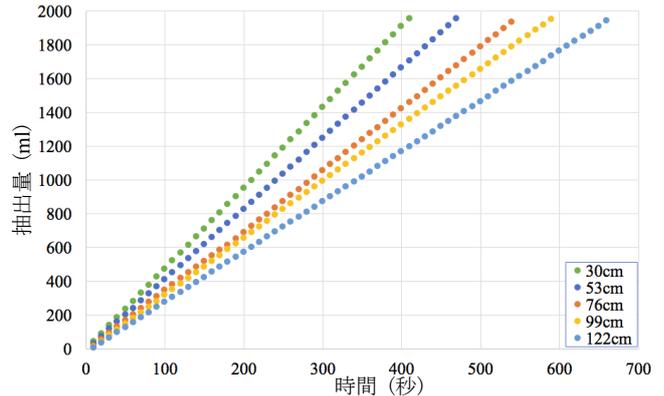


図20 対揚高特性

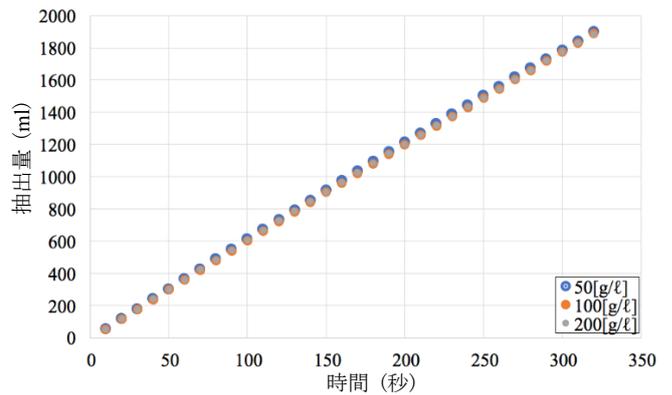


図21 対比重特性

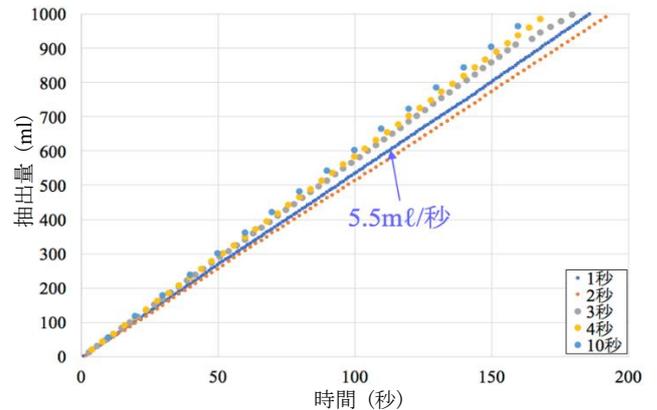


図22 対断続稼働時間特性

た場合、2号は100gとなる。ここで原液の比重が異なるため、同じ時間ポンプを駆動しても同量注入されない可能性がある。そこで肥料100g、200g、400gをそれぞれ溶かして2ℓとした3種類の液肥(50g/l, 100g/l, 200g/l)を、図18の

セッティングで 10 秒ずつ断続的にポンプを動かして抽出量を計測した結果を図 21 に示す。ポンプのエアの吹き出しの力が十分なため、高々15%程度の比重の違い(150g/lの肥料の差)は抽出量に影響を与えないことがわかる。

上記の実験では、ポンプを 10 秒間駆動して抽出量の変化を計測していたが、EC 値の調整にはより短い時間の注入を要する場合がある。また駆動時間は、原液の濃度によっても調整が必要である。そこでポンプを 1, 2, 3, 4, 5, 10 秒間、これまでと同様に図 18 のセッティングで断続的に駆動したときの抽出量を計測したのが図 22 のグラフである。時間が 1~2 秒と短くなると、最初に 30cm の高さまで原液を汲み上げる時間のオーバーヘッドによりやや傾きが緩くなるが、その他はほぼ同じとなっている。つまり、ポンプ駆動時間に比例した量の液肥注入が可能になることがわかる。

ここで、液肥の注入量に対する EC 値の変化を調べる。OAT ハウス 1 号 150g と 2 号 100g をそれぞれ溶かして 2ℓ とした 2 液 (75g/l および 50g/l) を、これを 1:1 の比率で 1, 2, 3, 4ℓ の水に滴下し結果を図 23 に示す。実験開始時の 0.2mS/cm は大学西の水道水の EC 値である。

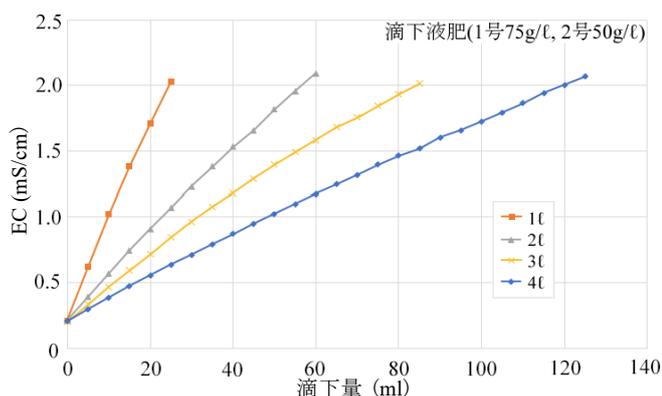


図 23 滴下量と EC 値の関係

EC 値を水耕栽培で標準的な 1mS/cm とするには、4ℓ の水に 1 号と 2 号を合計で約 50ml を滴下する。図 2 の小型水耕栽培装置では、タンク容量が 36ℓ なので 450ml の原液滴下となる。また 36ℓ の 0.95mS/cm の溶液を 1mS/cm にするためには、約 30ml (1 号と 2 号を各 15ml) となる。図 22 のグラフから、ポンプを 1 秒間駆動したときの液肥の抽出量は 5.5ml で、ポンプの図 19 のポンプのばらつき±10%を考慮すると、1 秒駆動時の最大抽出量は高々 7ml である。タンクの高さはこの実験よりも 10cm 高い 40cm なので、抽出量はわずかだが少ない。従って、濃度 150g/l の原液で EC 値 0.05mS/cm (±5%) の制御、さらには半分の 0.025mS/cm (±2.5%) と高い精度での制御が可能であることがわかる。

最後に、実運用においてどの程度の原液追加の頻度が必要となるかについて考える。図 2 の水耕栽培装置は最大で約 3m×3m のエリアをカバーすることができるが、それだけ茂らせると夏の最盛期に、36ℓ の 1mS/cm 液肥を 3 日で消費されてしまう。1 号 150g と 2 号 100g の原液は液肥を

36ℓ×9 杯分作ることができるので、3 日で 36ℓ が消費されるならば 3 日×9 回=27 日、つまりペットボトルに原液を足すことなく約一ヶ月自動追肥が可能になることがわかる。

原液の消費量は合計で一日当たり最大 150ml、一液では 75ml/日となる。一回の注入量を少なめに 5ml と見積もっても、一日当たりのポンプ駆動回数は高々 15 回 (= 75ml÷5ml) で、一時間に一回にも満たない。EC 値の計測は、液肥注入後に循環ポンプでタンク内の液肥を攪拌してから行うが、循環ポンプは通常一時間に 6 回 (10 分間隔) 動作するので、液肥が均一に混ざるのに十分である。

4. むすび

本論文では、水耕栽培装置の液肥自動管理システムのための EC センサの開発と性能評価、およびエアポンプを用いた追肥機構の評価実験を行った。

EC の計測には、濃度や温度によって変化する液肥の電気伝導率をオペアンプ発振回路で周波数として測定し、その周波数と温度をパラメータとする三次元曲面によって EC 値を求める手法を提案した。3 つのセンサを用いた測定値のばらつきも小さく、EC 値 0.25~3.5 mS/cm、温度 8~40 ℃ の範囲で 8.4% 以下という高い精度が得られた。

このセンサで EC 値を測定して液肥濃度を自動制御するため、エアポンプを用いた追肥装置を試作した。エアポンプの個体差、原液濃度、揚高、駆動時間など、様々なパラメータを変化させて性能評価を行った結果、±2.5% の精度で一か月間自動追肥が可能になることが示された。これと EC センサのばらつきや誤差を合わせても、およそ 10% 程度の誤差で液肥濃度を管理できることがわかる。

今後は、自動追肥機構を水耕栽培装置と遠隔管理ツールに組み込み、実際の栽培を通じてその性能と信頼性を検証していきたい。

参考文献

- [1] A. Satoh: A Hydroponic Planter System to Enable an Urban Agriculture Service Industry, IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2018), OS-ICE(1)-1, Oct. 2018.
- [2] T. Nishimura, Y. Okuyama, A. Matsushita, H. Ikeda, and A. Satoh: A Compact Hardware Design of a Sensor Module for Hydroponics, IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2017), OS-ICE(1)-4, Oct. 2017.
- [3] 佐藤研究室: 都市型スマート農業, <<http://satoh.cs.ucc.ac.jp/ja/research/hydroponics/index.html>> (参照 2019-05-01).
- [4] 株式会社アタゴ: EC メーター, <<https://www.atago.net/product/?l=ja&f=new/products-ec-top.php>> (参照 2019-05-01).
- [5] 株式会社セコムコーポレーション: 水耕栽培機「らくらく肥料管理機 4」 <<https://www.cemco.jp/hydroponics/rakuraku4/>> (参照 2019-05-01).
- [6] OAT ハウス: 溶液栽培用肥料 OAT ハウス肥料シリーズ, <<https://www.oat-agrio.co.jp/cgi/psearch/item/2013101716413104/index.html>> (参照 2019-05-01).