

施設園芸用液肥の排水量計測に関する研究(第1報)

竹中智哉*・水江宏**・安部貞昭***・中尾浩明***

*電子・情報担当・**機械・金属担当・***大分県農林水産研究指導センター

Research on measurement of the drainage flow of liquid manure for greenhouse horticulture(The 1st)

Tomoya TAKENAKA*・Hiroshi MIZUE**・Sadaaki ABE***・Hiroaki NAKAO***

*Electronics and Information Technology Section・**Machinery and Metallurgy Section・***Oita Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Research Center.

要 旨

平成 25～26 年度に、産業科学技術センターと大分県農林水産研究指導センターは、大分県のイチゴの基幹品種であるさがほのかについて適正な灌水を実現するために、高設栽培ベッドから排出される排水量を計測する排水量センサの共同開発を実施した。3 タイプ（転倒ます型、液位センサ型、流量センサ型）について試作機を製作し、実験によって要求仕様を満たすことを確認した。転倒ます型については、農林水産研究指導センター内圃場にて実証試験を行い、栽培期間を通して必要な精度を維持しつつ安定稼働することを確認した。

1. はじめに

イチゴ高設栽培では、土耕栽培と異なり培地中水分の過不足が生じやすい。過剰な灌水は、根傷みによる収量減や施肥窒素の圃場外への流出による環境負荷およびコスト増加を招く。一方、過少な灌水は生育停滞を招くため、排水率 10～30%程度での適正な灌水が必要である。排水率とは、高設栽培ベッドに供給される水や液肥の給液量に対して、イチゴに吸収されず、高設培地にも吸着されずに余剰分として高設栽培ベッドの排水口から圃場外に排出される排水量の割合を表す。（排水量/給液量）給液量については、タイマー制御などで生産者が設定した量が供給されるため、容易に算出できる。しかし、排水量については気象条件や生育状況、季節、時刻に応じて不連続に変化する。具体的には、1 秒間に 1 回の頻度で水滴が落下する 3.5mL/min. から 4L/min. 程度の変化が起きる。このため、低価格（数万円程度）な市販の流量計では所望の精度で計測できない。そこで、産業科学技術センターと農林水産研究指導センター（以後、農研センター）は共同で、排水量計測に関する技術課題を見極め、解決を図ることとなった。

2. 要求仕様

農研センターおよび県内生産者からの情報により、排水環境と排水量センサに求められる要求仕様は Table 1, Table 2 のようにまとめられる。

排水量は主に、1 週間～1 日前までの日積算値と 3 日後までの気象予報を踏まえて、当日または翌日の給液量を

決定するために活用される。よって計測単位は L/day でよく、計測精度は±5L/day または±3～5%程度でよい。ただし今後は、日射等の気象条件の急激な変化に対応するため、フィードフォワード制御による自動制御システムで高度な灌水管理を行うことも考えられる。本制御では、排水率や日射、温度、湿度などの環境要因の関係式から次の給液（量およびタイミング）が決定される。この場合、排水量の計測単位、精度はより高分解能、高精度が求められる可能性がある。

Table 1 高設栽培ベッドから排出される排水環境

排水流量	3.5mL/min.～4L/min. 気象条件や生育状況、季節、時刻に応じて不連続に変化。
排水温度	8～30℃
排水状態	水に窒素(N)、カリウム(K)、リン(P)を含む養液であり、藻が発生しやすい。

Table 2 排水量センサ要求仕様

計測誤差(精度)	±5L/day または±3～5%程度
計測単位	日積算値 L/day
計測容量	Max.240L/day
保守	メンテナンスフリーまたは容易
価格	1 万円/年
その他	EC センサを併用可能

計測容量については、様々な高設ベッド方式と栽培方法に対応するため、最大で 240L/day としている。価格につ

いては、初期費用および運用コストを併せて、年間1万円程度であれば、中小規模の農家であっても高い費用対効果が見込まれる。

また、排液ECの計測を考慮する必要がある。高設栽培では、固形肥料や液体肥料を培地に施肥するが、イチゴに吸収されるか、または高設培地に吸着される成分以外は、余剰分として高設栽培ベッドの排液口から圃場外に排出される。そのため高設栽培では肥効の過不足が生じやすい。農研センターが、高設栽培ベッド内の肥効を判断するために様々な箇所を調査した結果、窒素成分量と排液中の窒素成分量の相関が高く、排液量と共に排液ECの測定も必要とされている。

3. 排液量センサの開発

要求仕様を踏まえ、3タイプの試作検討を行った。

3.1 転倒ます型

本タイプは雨量計に用いられるシシオドシの原理を用いている。試作機の外観と排液・各種信号の流れをFig.1, Fig.2に示す。

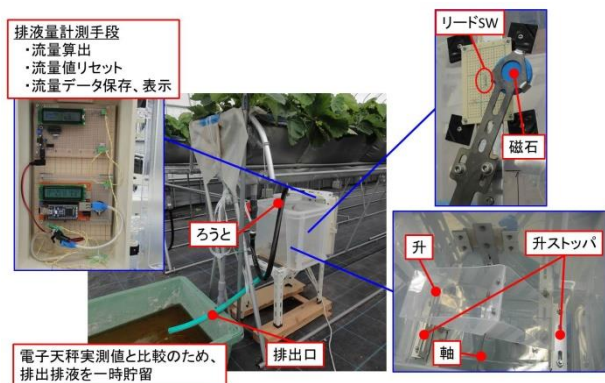


Fig. 1 転倒ます型試作機 外観

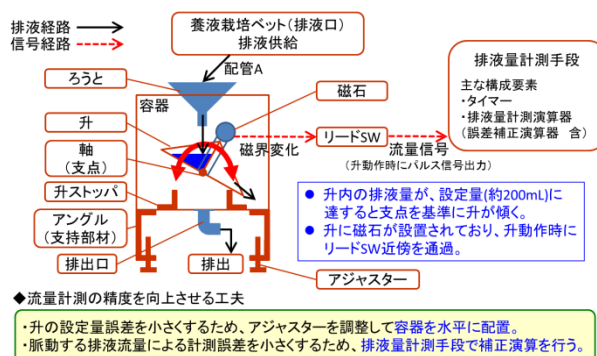


Fig. 2 転倒ます型試作機 排液・各種信号の流れ

排液を一方の升到設定量(本試作では約200mL)まで溜めると、升が支点を基準に傾き、溜めた排液を排出する。そして他方の升到排液が溜まりはじめ、設定量に達すると升が支点を基準に傾き、溜めた排液を排出する。この動きを繰り返す。

この升の傾き(動き)から、流量(排液量)を計測する。升の軸に磁石を取り付けており、升が傾く際に、リードSW近傍を通過させてパルス信号を排液量計測手段に送る。排液量計測手段では、前回のパルス発生時から今回のパルス発生時までの時間をタイマーで計測する。また、累計パルス数をカウンタで求め、計測誤差の補正計算を行い、排液量を求める。

流量計測の精度向上には、升の設定量誤差を小さくするために容器を水平に配置しなければならない。また、不連続に変化する排液流量による計測誤差を小さくするため、升から排出された液体体積[L]を求める補正演算を行わなければならない。これについて以下に解説する。升を区別するために現在排液を溜めている升を計測升とする。計測升が設定量に達すると傾きはじめるが、升ストッパにあたって傾きが停止するまでに時間がかかるため、本来他方の升到溜まるべき排液が、計測升に流入する。つまり、設定量以上の排液が計測升に流入してしまう。この流入量(取りこぼし)は、不連続に変化する排液流量により当然異なるため、補正演算を行う必要がある。本補正演算については特許出願をしており、詳細については公開特許公報に記載している。¹⁾

升ストッパは、L字アングルを容器にネジで固定して構成している。升の傾きを停止する役割の他に、升の設定量を調整する役割がある。ネジでL字アングルの高さを調整することで、升の最大傾き角を調整できる。(升の設定量を調整できる。)

3.2 液位センサ型

本タイプは排液を貯留槽に溜めて液位変化を計測し、その計測結果から排液量を算出する。試作機の外観と排液・各種信号の流れをFig.3, Fig.4に示す。液位はFig.4に示すA(本試作では6cm)からB(22cm)の間で変化する。液位がBを超えると、排液量計測を停止してポンプが起動し、貯留槽内に貯留された排液を排出し、液位がAまで低下するとポンプが停止する。ポンプ停止後、貯留槽内の水面が安定するのを(1分程度)待ち、排液量計測を再開する。

本手法では、ポンプの駆動中でも高設栽培ベッドから排液が供給されるため、排液の取りこぼしが発生し、計測誤差を生じる。電磁弁等を用いて、ポンプの駆動中は排液の供給を停止できれば本課題を解決できる。しかし、電磁弁は約1万円程度する高価な部品であり、低コスト化が要求される本装置には不向きである。そこで、液位AからBまでの貯留槽の液量(本試作では12.4L)を排出するのに必要なポンプの駆動時間Tp(本試作では62.57sec.)をマイコンに設定し、液位がAまで低下するより前にポンプの駆動時間がTpを超えた場合にはポンプを停止させ、ポンプの駆動中に供給される排液量を貯留槽から排出しないようにして課題の解決を図っている。

貯留槽には、藻の発生を抑止するため遮光性に優れる20Lポリタンク(OWK-20GR 尾上製作所製)を用いてい

る。液位センサやポンプ、排水量計測手段が故障した場合のオーバーフロー対策として貯留槽にオーバーフロー管を設けている。

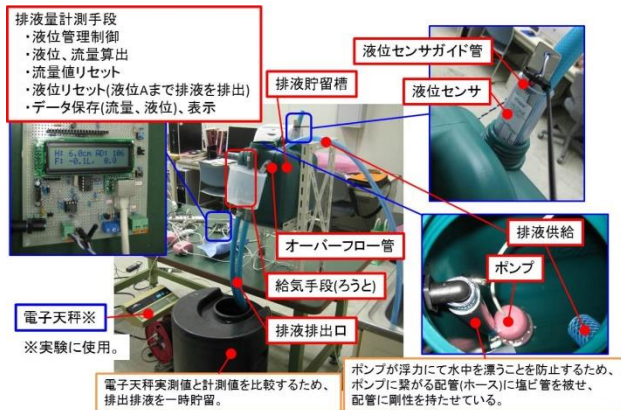


Fig. 3 液位センサ型試作機 外観

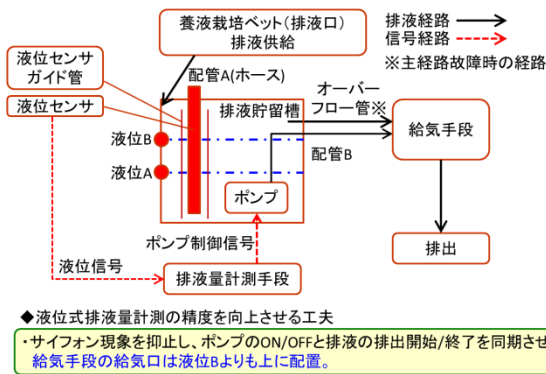


Fig. 4 液位センサ型試作機 排水・各種信号の流れ

液位センサには、圧力式を用いている。(eTape 12inch milone Technologis 製) 圧力式はメカ可動部がないため耐久性が期待でき、誘電率変化の影響がないため排水の電気特性変化の影響を受けない。本試作で用いた eTape は実験の結果、温度特性も安定していることがわかった。(Fig.5) ただし、eTape は柔らかく剛性が低いため、剛性の高い平面金物(ステンレス)と液位センサガイド管(塩ビ

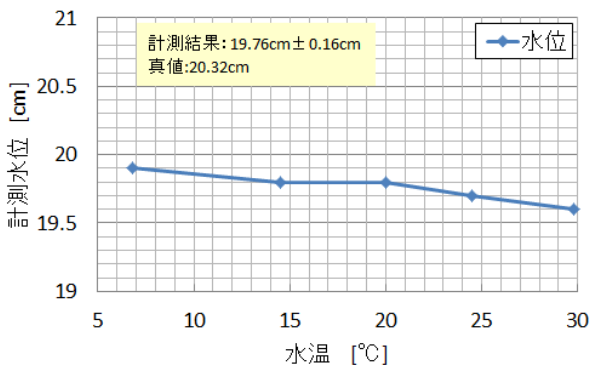


Fig. 5 水位 8inch 一定時の液位センサ eTape 温度特性

管) に沿わせて鉛直方向へ直線的に設置している。平面金物は、液位センサガイド管内に糸入りホースで固定している。液位センサが水平方向に曲がることないように、平面金物と液位センサガイド管で、半円柱状のスペースを形成している。液位センサガイド管には、ポリタンクのコック穴の穴径と同じ外径をもつ VP30 管を用いており、追加加工なくポリタンクに差し込むだけでポリタンクに垂直に固定される。

ポンプは、安価で入手性のよい家庭用バスポンプ (KP-201 工進製) を用いている。本ポンプは貯留槽内に配置し、ホースを接続して使用する。ポンプが排水に浸かり、浮力にて排水中を漂うことを防止するため、ポンプに繋がるホースに塩ビ管を被せ、剛性を持たせている。また、本ポンプは AC100V で動作するため、電源制御にはフォトカプラ用いている。サイフォン現象を抑止し、ポンプのオン、オフと排水の貯留槽からの排出開始、停止を同期させるため、給気手段の給気口を液位 B よりも上に設けている。給気手段を設けなければサイフォン現象が起き、ポンプを停止してもポンプおよび配管内に空気が侵入するまで排水が排出され続けてしまう。

3.3 流量センサ型

本タイプは排水を貯留槽に溜めた後にポンプで流量センサに排水を送り、排水量を計測する。試作機の外観と排水・各種信号の流れを Fig.6, Fig.7 に示す。

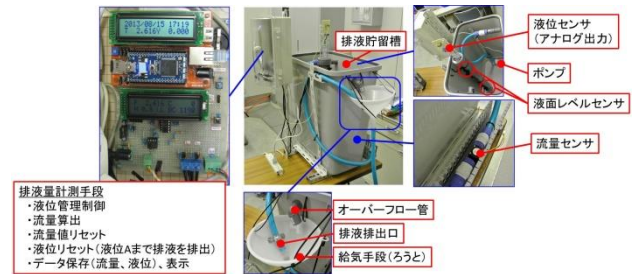


Fig. 6 流量センサ型試作機 外観

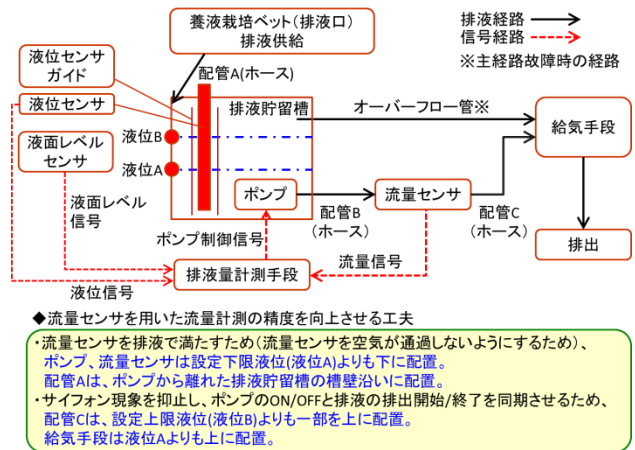


Fig. 7 流量センサ型試作機 排水・各種信号の流れ

液位は Fig.7 に示す A から B の間で変化する。液位 B を超えると、ポンプが起動して流量センサに排液を送り排液量計測を開始する。液位 A まで低下するとポンプが停止し、排液量計測も停止する。これを繰り返して計測を行う。

流量センサには羽根車式を用いている。(POW110D3B Seeed Studio 製) 羽根車式は、液体が流れると羽根車形状のロータが回転してホールセンサが流量に対応したパルス信号を出力する。POW110D3B の仕様から流量センサを通過した液量 $F[L]$ とパルス累計値 $P[count]$ の関係は式 (1) で表される。

$$F = \frac{P}{7.5 \times 60} \quad (1)$$

このパルス累計値 P を排液量計測手段内のカウンタで求め、式(1)に誤差補正を行い、排液量を求める。Fig. 8 に、排液を模擬した水道水の液量 F と誤差の関係を示す。本誤差は、電子天秤による計測値と式(1)で求めた流量センサ計測値の差を表す。液量と誤差は正比例の関係にあり、線形近似式上に計測データが重なるため、試作機では Fig. 8 の線形近似式を用いて誤差補正をする。誤差の要因は、流量センサの製造バラツキやポンプ起動時(流量センサ内の羽根車式ロータ始動時)のロータ過回転などと考えられる。

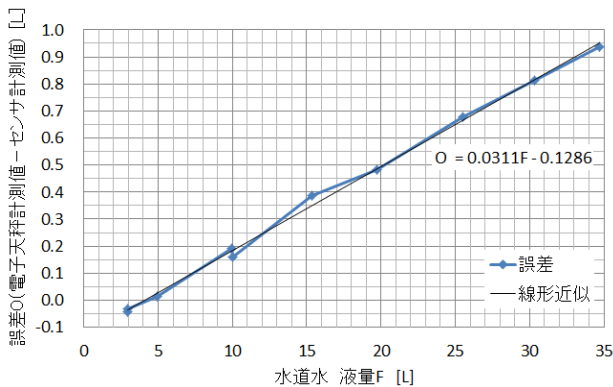


Fig. 8 試作機における水道水液量と誤差の関係

貯留槽には藻の発生を抑止するため、遮光性に優れた 60L ポリタンクを用いている。液面レベルセンサやポンプ、排液量計測手段が故障した場合のオーバーフロー対策として貯留槽にオーバーフロー管を設けている。

液面レベルセンサは市販の AC コードを、液位センサは eTape(24inch)を用いている。液位 A, B を検出するためには液面レベルセンサのみでよい。本液位センサは液位センサ型と流量センサ型の併用によって、時間分解能と精度を高める改良を見据え、参考までに設けている。液位センサガイド管の設置目的は、3.2 で説明したとおり液位センサを貯留槽に対して垂直に設置するためである。

る。

ポンプには、家庭用バスポンプを用いている。ポンプの駆動方法は 3.2 と同様である。サイフォン現象の防止策として、配管 C を設定上限液位(液位 B)よりも一部を上配置し、給気手段は液位 A よりも上に配置している。また、流量センサを気泡が通過すると流量計測の精度が低下してしまう。したがって、ポンプと流量センサは設定下限液位(液位 A)よりも下に配置し、配管 A は、ポンプから離れた貯留槽の槽壁沿いに配置(ポンプ近傍の泡立ち抑止)を行い、流量センサへの気泡の侵入を低減している。

4. 実験結果

試作機の実験結果を 3 タイプ毎に示す。

4.1 転倒ます型

4.1.1 水道水での試験

水道水で排液を模擬して行った実験の実験系を Fig. 9 に示す。水道蛇口から一定流量の水道水を供給し、試作機から排出された水道水を電子天秤にて計測した。平均流量は水道水の供給開始から供給停止までの時間と電子天秤計測値から求めた。

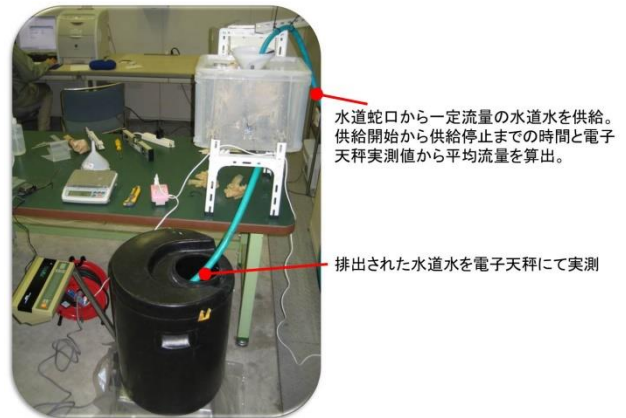


Fig. 9 転倒ます型試作機における水道水での実験

0.81~8.15L/min.の流量における試作機と電子天秤の計測値を比較した実験結果を Table 3 に示す。試作機と電子天秤による計測値の誤差は±3%未満で、要求仕様を満たす精度となった。

Table 3 試作機と電子天秤計測値との比較

水道水 流量 L/min.	排液量計測値		誤差	
	試作機 L	電子天秤 L(=kg)	L	%
0.81	19.8	20.26	-0.46	-2.27
1.38	19.9	20.303	-0.40	-1.98
3.79	20.3	20.467	-0.17	-0.82
5.55	21.3	21.001	0.30	1.42
8.15	21	21.2	-0.20	-0.94

不連続に変化する排水量による計測誤差を小さくするために用いた補正演算の精度を検証するために、0.75～8.3L/min.の流量における1カウント（1回の升転倒）あたりの平均周期と平均計測誤差（升設定値を超えて取りこぼす平均流量）の関係を実測した。結果をFig. 10に示す。緑の点が実測値を、青線が補正演算により求めた計算値を示す。緑の点が青線の近傍に分布しており、補正演算の精度が高いことが確認できた。

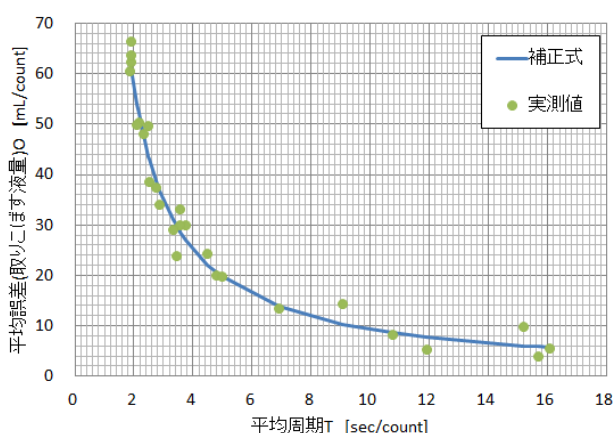


Fig. 10 1カウントあたりの平均周期と平均誤差の関係

4.1.2 フィールド試験

農研センター（三重町）のイチゴ圃場で、フィールド試験を行った。CO₂ 無施用ハウス(No.1)とCO₂ 施用ハウス(No.2)に1台ずつ試験機を設置した。実験系はFig. 1のとおりである。試作機から排出された排水を貯留槽に溜めて、排水量を電子天秤にて計測し、試作機での計測値と比較した。実験結果をTable 4に示す。

試作機と電子天秤による計測値との誤差は最大で5%程度となり、要求仕様を満たす精度となった。試作機の構造上、試作機に供給された排水の一部が容器底部に溜まる。しかし、今回は転倒ます容器底部が空の状態ですべて排水を計測を開始したため、No.1 圃場設置の翌日である10/18は誤差が大きくなったと考えられる。電子天秤実測値との比較を行う場合には、計測を開始する前に予め試運転を行い、転倒ます容器底部に水溜りを作っておけば計測開始日から精度の高い結果を得られると考えられる。No.1の10/21の誤差要因は不明であるが、巡回監視のない土日を挟んだ月曜の計測結果であり、電子天秤で実測するために貯留槽に溜めた排水の蒸発等による誤差が関係している可能性が高い。No.1の10/21の結果を除けば試作機と電子天秤による計測値との誤差は5%未満で、高精度な結果が得られている。県内の生産現場での栽培期間を想定して、No.1はH25/10/18に設置以降、No.2はH25/11/18に設置以降からH26/7/11まで動作試験を継続したが、同程度の精度で計測ができた。

計測した排水量の推移をFig. 11に示す。CO₂ 無施用ハウスに比べ、CO₂ 施用ハウスの排水量が1月以降に少なくなっていることがわかる。これは、CO₂ 施用によりイチゴの吸水量が増加しており、生育が進んでいることを裏づけている。このように排水量の推移を見える化することで適正な灌水を実現できる。

Table 4 フィールド試験(連続稼働試験)

■No.1 2013年10月17日設置～2014年7月11日

測定日	排水量計測値		誤差 %	備考
	試作機 L	電子天秤 L		
10月18日	34.0	32.7	4.10	設置翌日
10月21日	11.5	10.88	5.70	
10月23日	23.9	23.9	0.00	
10月24日	37.6	37.4	0.53	
10月25日	40.8	40.4	0.99	
11月6日	13.5	13.36	1.05	
11月11日	18.4	18.3	0.55	
2月18日	14.9	14.61	1.98	
7月5日	8.88	9.1	-2.42	
7月8日	11.16	11.5	-2.96	
7月10日	10.34	10.1	2.38	
7月11日	13.28	13.1	1.37	

■No.2 2013年11月18日設置～2014年7月11日

測定日	試作機 L	電子天秤 L	誤差 %
	11月27日	11.4	
11月28日	11.5	11.8	-2.54
11月29日	27	28	-3.57
2月13日	11.7	12.06	-2.99
7月5日	7.5	7.5	0.00
7月8日	15.3	15.2	0.66
7月10日	13.1	12.5	4.80
7月11日	13.28	13	2.15

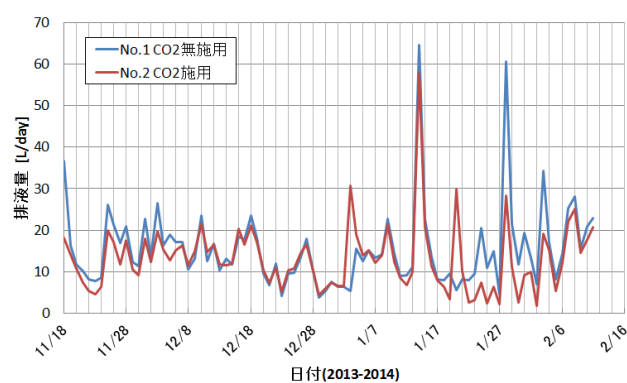


Fig. 11 排水量の推移

4.2 液位センサ型（水道水での試験）

Fig. 3のとおり、水道水(約6L～30L)を貯留槽に溜めて、電子天秤と試作機の計測値を比較した。実験結果をTable 5に示す。試作機と電子天秤による実測値の誤差は±5L未満で、要求仕様を満たす精度となった。

Table 5 試作機と電子天秤計測値との比較

排液量計測値		誤差	
電子天秤	試作機		
L(=kg)/day	L/day	%	L/day
5.746	5.1	-11.24	-0.65
6.306	5.6	-11.20	-0.71
10.165	9.8	-3.59	-0.36
11.263	10.7	-5.00	-0.56
16.029	15.4	-3.92	-0.63
20.875	20.3	-2.75	-0.57
21.282	20.4	-4.14	-0.88
24.917	24.6	-1.27	-0.32
29.917	29.7	-0.73	-0.22

4.3 流量センサ型（水道水での試験）

水道水（約 500mL～35L）を貯留槽に溜め、電子天秤と試作機の計測値を比較した。実験結果を Table 6 に示す。

Table 6 試作機と電子天秤計測値との比較

排液量計測値		誤差	
電子天秤	試作機		
L(=kg)/day	L/day	%	L/day
0.472	0.474	0.42	0.00
0.973	0.967	-0.62	-0.01
2.022	1.998	-1.19	-0.02
2.988	2.962	-0.87	-0.03
4.012	3.996	-0.40	-0.02
5.013	4.997	-0.32	-0.02
5.963	5.9	-1.06	-0.06
7.012	7.057	0.64	0.05
8.24	8.184	-0.68	-0.06
10.477	10.398	-0.75	-0.08
19.919	19.817	-0.51	-0.10
35.313	35.181	-0.37	-0.13

試作機と電子天秤による計測値の誤差は最大で±1%程度と高精度で、要求仕様を満たす精度となった。

参考までに流量センサ POW110D3B を通過する水道水の流量を計測したところ、どの液量においても流速は 7.5L/min. 程度だった。これにより、流量センサの正常動作範囲である流速(1～30L/min.)が確保されていることがわかった。流量センサを通過する流量は、ポンプの性能によって決まる。

5. 各型の比較

試作機での実験結果を踏まえ、要求仕様に対する各タイプの性能をまとめた。(Table 7)

計測精度は 3 タイプともに要求仕様を満たした。特に、流量センサ型の精度が高かった。

保守について、転倒ます型はフィールド試験で栽培期間を通してメンテナンスフリーで連続稼働を行うことができた。センサを遮光フィルムで覆っていたため、計測に障害になるほどの藻は発生しなかった。他型はフィールド試験を行っていないため推測になるが、液位センサ型と流量センサ型はポンプに羽根車を有し、流量センサ型はセンサが羽根車式であるため、内部に藻や泥などの異物が混入するとメンテナンスが必要となる。そこで、転倒ます型と同様にセンサを遮光し、排液供給経路に異物除去用ネットを設ければ、メンテナンスフリーで連続稼働できると考える。保守に関連して寿命については、原価を考慮すると、5 年以上を確保したい。転倒ます型はフィールド試験の結果、大きな劣化が見られなかったため、5 年以上の利用が期待できる。液位センサ型と流量センサ型についてはフィールド試験を行っていないため不明であるが、劣化の早い部品としてポンプが考えられる。ポンプの目安寿命とワースト使用条件から試算すると約 4～5 年の寿命を期待できる。

試作機の原材料は、3 タイプともに Web 通販やホームセンターで入手可能な資材のみで構成している。原材料費は転倒ます型が最も安価だった。追加工数で比較すると、液位センサ型と流量センサ型が少なく、原材料費に追加工・組立費は含めた原価は転倒ます型が最も高くなると考えられる。これについて現在見直しを進めており、追加工・組立の大幅な低減を実現できる見込みである。

EC センサの併用については、液位センサ型と流量センサ型は排液貯留槽を有し、槽の定常貯留排液内に設置ができる。転倒ます型も他型と同様に、容器底部の排液の定常貯留部に設置できる。または、排液供給経路に塩ビ管などで排液の一時貯留部を設けてもよい。

その他に、設置(セットアップ)については、3 タイプともに水

Table 7 要求仕様に対する排液量センサ試作機の性能比較

タイプ	転倒ます型	液位センサ型	流量センサ型
計測精度	±5%	±5L/day	±1%
計測単位	L/min.～L/day	L/min.～L/day	L/min.※～L/day ※液位センサ併用時
計測容量	240L/day 以上	240L/day 以上	240L/day 以上
設置・保守・推測寿命	栽培期間中メンテナンスフリー 設置時に水平出し要 5 年	— 設置時に水平出し、初期液位セット要 4～5 年	— 設置時に水平出し、経路気泡抜き要 4～5 年
原材料費	17,000 円	26,000 円	23,000 円
EC センサ併用	併用可	併用可	併用可

平出しが必要になる。これに加えて設置時に、液位式では初期液位のセットが必要となる。流量センサ型では流量センサ経路内の気泡抜きが必要となる。また、リアルタイム性については、転倒ます型と液位センサ型が L/min. を実現できる。流量センサ型についても液位センサを併用すれば、液位センサ型と同様の時間分解能を実現できる。

6. まとめ

3 タイプ（転倒ます型、液位センサ型、流量センサ型）の排液量センサを試作開発し、実験によって要求仕様を満たすことを確認した。転倒ます型については、農研センター内圃場にてフィールド試験を行い、栽培期間を通して必要な精度を維持しつつ安定稼働することを確認した。

参考文献

- (1) 特開 2015-187557 「転倒ます型流量計測装置」
(2014)