

## 養液土耕に用いる点滴チューブの水理学的特性並びに 点滴チューブの吐出口間隔とトマトの生育・収量

後藤ひさめ\*・川嶋和子\*\*・今川正弘\*\*・菅原真治\*\*

摘要：養液土耕で安定生産するためには、使用する点滴チューブが全長にわたるかん水の均一性を持つことが重要である。そこで数種の市販されている点滴チューブの水理学的特性を調査した。また吐出口間隔20 cm、30 cmのチューブを用いて、トマトの生育・収量に及ぼす影響について検討した。

その結果、以下のことが明らかになった。

- 1 点滴チューブは硬質タイプと軟質タイプがあり、今回試験した市販品のなかでは、硬質タイプで垂水防止機構を持つ製品が、かん水量の均一性の点で最も優れていた。
- 2 チューブの全長距離内を均一にかん水するには、使用圧力範囲内の高水圧側での利用が有効であった。
- 3 トマトの養液土耕において、定植間隔20 cmのとき、その間隔と一致する吐出口間隔20 cmを用いた方が、一致しない30 cm間隔を用いるより生育のばらつきが少なかった。10株当たりの収量や品質は同程度であった。

キーワード：養液土耕、点滴チューブ、吐出口間隔、かん水量、安定生産

## The Hydraulical Characteristics of Drip Tubes used for Drip-fertigation and the Effect of Emitter Spacing of the Drip Tube upon the Growth and Yield of Tomatoes

GOTO Hisame, KAWASHIMA Kazuko, IMAGAWA Masahiro and SUGAHARA Shinji

Abstract : It is important that the drip tube which we use is uniform in terms of the amount of irrigation it provides over its full length for the purpose of stable production by drip-fertigation. So we investigated hydraulical characteristics of several drip tubes which had been on the market. And by using the tube whose emitter spacing was 20 cm or 30 cm, we studied the effect of it upon the growth and yield of tomatoes.

As a result of these examinations, the following is what we discovered:

1. We classified drip tubes as hard-types and soft-types. In terms of the uniformity of the amount of irrigation, the hard-type drip tube having a structure which prevented the leakage of water was the best of several drip tubes which had been on the market, the best of those we tested in this examination.
2. It was effective to use the tube with higher water pressure within the limits of the pressure which could be used for irrigation uniformly along the full length of the tube.
3. With drip-fertigation on tomatoes, the case of spacing between plants was 20 cm, so using the tube whose emitter spacing was 20 cm, which was the same as the spacing between plants, yielded less difference of growth than 30 cm spacing. The yield per 10 plants and the quality of the tomato harvest were equal.

Key Words : Drip-fertigation, Drip tube, Emitter Spacing, Amount of irrigation, Stable production

## 緒言

養液土耕は、土を培地として用いながら、作物の吸収特性や生育に合わせて、必要なときに必要な量だけの肥料や水を、点滴状態で少量ずつ何回にも分けて施用する栽培法である。点滴状態でかん水するために、かん水チューブには点滴チューブ（ドリップチューブ）を利用することが必須である。またリアルタイム栄養診断を利用し、適宜、施肥やかん水量を調節することにより、肥料・水ともに過不足なく与えることができる。そのため草勢の維持など生育制御が容易になる。さらにその結果として、高品質生産、均一品生産、安定生産やストレスのない多収栽培が期待されている<sup>1,4,6,8)</sup>。

ところで、栽培上問題となるのは、かん水のムラであり、それに起因する生育の不ぞろいである。均一な生育による安定した生産を行うためにはムラなくかん水することが重要である。そして、かん水の均一性と強くかかわっているのが、チューブの水理学的特性であり、その特性を把握し、生かすことが、養液土耕を行うに当たって重要であると思われる。

しかし、現状では点滴チューブの特性が十分に理解されていないとは言い難く、養液土耕を導入する際のチューブの選択に当たり、判断資料が不足している。

そこで今回、点滴チューブの水理学的特性を明らかにするとともに、点滴チューブの吐出口間隔がトマトの生育・収量に及ぼす影響について検討したので報告する。

## 材料及び方法

### 試験 1 点滴チューブの水理学的特性

点滴チューブの水理学的特性を調べるため、表 1 に示したように、数種の市販されている点滴チューブ及び参考として散水チューブ（エバーフロー S 型）を用いた。なお、それらの仕様・性能を表 2 に示した。それぞれのチューブは未使用の約 6 m を供試した。タンクにためておいた水道水を、点滴チューブでは水圧 64 kPa 前後、エバーフロー S 型では水圧 54 kPa 前後となるよう、あらかじめ流量を調節しておいたポンプを用いて 5 分間給水し、3～4 か所の吐出口からの吐出量を計量した。測

定位置は表 3 に示した。また給水終了時の垂水の程度を目視で観察した。なお、ストレーナーは使用しなかった。反復は 2 回とした。

### 試験 2 チューブ長 60 m における吐出量の均一性

エデン A とダブルウォールドリップチューブ（以下ダブルウォール）について、それぞれ未使用の約 60 m を用いた。ストレーナーを通した農業用水を、あらかじめ試験する水圧となるよう流量を調節した上で、電磁弁を用いて給水し、給水口から約 0.5、2、10、20、30、40、50、60 m 地点にある吐出口に置いた容器にたまった水量を計量した。給水時間は、エデン A は 5 分間、ダブルウォールは 10 分間とし、エデン A は給水終了直後、ダブルウォールは給水終了後 10 分間放置した後の量を吐出量とした。反復は 2～4 回とした。

### 試験 3 点滴チューブの吐出口間隔がトマトの生育・収量に及ぼす影響

トマト（品種：ラクナファースト）を 2001 年 8 月 10 日には種し、8 月 20 日に 10.5 cm ポリポットに鉢上げした。9 月 19 日にうね幅 200 cm、株間 20 cm で定植した。1 条植え振分けで栽培し、11 月 26 日に 6 段で摘心した。施肥は、基肥は無施用とし、定植から第 3 花房開花期までは 1 株当たり 0.06 g day<sup>-1</sup>、それ以後はリアルタイム栄養診断の結果に基づき、第 6 果房肥大盛期までは葉柄汁液中の硝酸イオン濃度が 3,000～4,500 mg L<sup>-1</sup> となるように<sup>7,11,12)</sup>、日窒素施用量を調整した。なおリアルタイム栄養診断には、果実がピンポン玉の大きさになった果房直下葉の中位にある小葉を用いた。給液管理は、9

表 1 供試チューブ

チューブのタイプ	チューブ名(商品名)	メーカー
点滴	エデン A	イスラエル プラストロ社
	カティーフ	イスラエル プラストロ社
	ダガン B	イスラエル プラストロ社
	ハイドロドリップ	イスラエル プラストロ社
	ラム 17	イスラエル ネタフィム社
軟質	ダブルウォール	アメリカ チャピン社
	ドリップチューブ	アメリカ チャピン社
散水	チャピン	アメリカ チャピン社
	エバーフロー S 型	三井化学(株)

表 2 供試チューブの仕様・性能 (カタログより、一部換算)

チューブ名	吐出量	吐出口間隔	使用水圧	耐用年数 <sup>1)</sup>	重量	価格
	ml min <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	cm	kPa	年	kg	円 m <sup>-1</sup>
エデン A	183 <sup>2)</sup>	10-150	39-343	10	7	240 <sup>6)</sup>
カティーフ	192 <sup>2)</sup>	10-50	60-350	10	6	230 <sup>6)</sup>
ダガン B	167 <sup>2)</sup>	10-50	39-343	10	6	100 <sup>6)</sup>
ハイドロドリップ	133 <sup>3)</sup>	15-50	49-147	5	5	80 <sup>6)</sup>
ラム 17	192 <sup>2)</sup>	20-150	49-392	10	6	340 <sup>6)</sup>
ダブルウォールドリップチューブ	124 <sup>4)</sup>	10	15-82	4	2	80
チャピン	170 <sup>5)</sup>	5	20-98	4	2	60
エバーフロー S 型	383 <sup>5)</sup>	2.5	9.8-49	1-3	2	63

注 1) 目安の年数 2) 水圧 196 kPa、吐出口間隔 20 cm の場合 3) 水圧 98 kPa の場合 4) 水圧 67 kPa の場合  
5) 水圧 49 kPa の場合 6) 吐出口間隔 20 cm での価格

表3 1 吐出口からの吐出量、変動係数及び給水終了後の吐出口からの垂水の程度

チューブ名	測定位置 <sup>1)</sup> cm	吐出量 mL (5min) <sup>-1</sup>	変動係数 <sup>2)</sup> %	給水終了後の垂水の程度
エデン A	30,170,330	165	1.2	みられない
カティーフ	35,180,340	223	5.8	みられない
ダガン B	25,165,325	127	0.6	低いところからわずかに垂水
ハイドロドリッブ	30,180,360	149	3.4	最初全体に、のち低いところからやや垂水
ラム17	45,195,340	221	1.1	低いところから垂水
ダブルウォールドリッブチューブ	36,176,336	57	4.3	全体に若干垂水
チャビン	30,170,330	39	5.4	全体に若干垂水
エバーフローS型	40,160,360	75	7.0	全体にしばらく垂水

注 1) 給水口からの距離 2) 測定位置間の変動係数

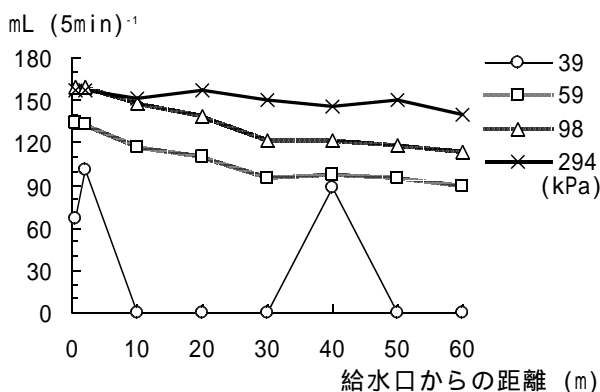


図1 エデンAにおける各水圧での各吐出口からの吐出量

月22日から自動化したが、既往試験の結果から得られたかん水施肥栽培の培養液給液量<sup>7)</sup>を参考にして、9時に液肥（微量成分を含まない園試処方培養液）又は水道水を、12時と15時に水道水を給液した。なお1回の給液量は1株当たり250 mLとした。かん水チューブは吐出口間隔が20 cm及び30 cm（以下、20 cm ピッチ及び30 cm ピッチ）のエデンAを用い、20 cm ピッチのチューブは、吐出口が株元にくるよう設置した。なお1区50株反復なし、ただし生育調査は3株×2か所、収量は10株を1群として2か所調査した。

### 試験結果

#### 試験1 点滴チューブの水理学的特性

いずれの点滴チューブも、エバーフローに比べると、測定位置間の変動係数は小さかった。中でもエデンA、ダガンB、ラム17は、それぞれ1.2%、0.6%、1.1%と特に変動が小さかった。給液終了後もチューブ内の残水が垂水として吐出するチューブが多かったが、エデンAとカティーフは給水終了後すぐに吐出が止まった（表3）。

#### 試験2 チューブ長60 mにおける吐出量の均一性

図1に示したように、エデンAは、39 kPaでは給水口から0.5、2、40 m地点にある吐出口からは吐出したが、その他からは吐出がなく、吐出の有無は給水口からの距離とは無関係であった。また吐出量も不均一であった。59、98 kPaでは給水口から離れるにつれ吐出量が

表4 各水圧における1吐出口からの平均吐出量及び変動係数

チューブ名	水圧 kPa	平均吐出量 <sup>1)</sup>	変動係数
		mL	%
エデン A	39	35	138.4
	59	109	16.1
	98	135	13.9
	294	151	3.8
ダブルウォールドリッブチューブ	34	64	20.8
	49	74	20.4
	69	91	15.1
	82	106	13.6

注 1) エデンAは5分間、ダブルウォールドリッブチューブは10分間当たりの吐出量

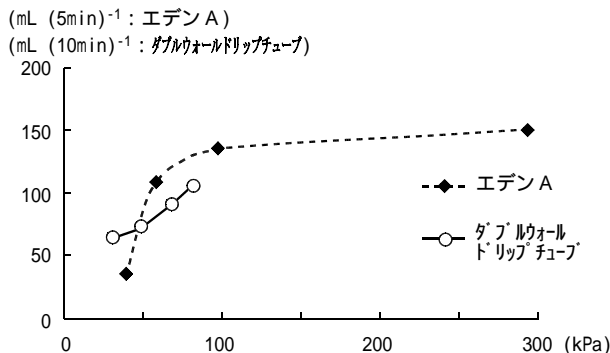


図2 エデンAとダブルウォールドリッブチューブにおける各水圧と1吐出口からの吐出量\*

\* 給水口から約0.5、10、20、30、40、50、60 m地点にある吐出口からの吐出量の平均量

減少する傾向であったが、294 kPaでは全体で吐出量はほぼ均一であった。

平均吐出量は59、98、294 kPaでそれぞれ5分間当たり109、135、151 mLと水圧が高くなるにつれて増加したが（表4）、59 kPaと98 kPaでの平均吐出量の差が26 mLであるのに比べ、98 kPaと294 kPaでの差は16 mLと小さかった（図2）。変動係数は59、98、294 kPaでそれぞれ16.1、13.9、3.8%と水圧が高くなるにつれて、小さくなった（表4）。

ダブルウォールは、図3で示したように、34、49、69 kPaでは給水口から0.5 m地点から30 m地点までの吐出口で給水口からの距離が離れるに従って、吐出量が減

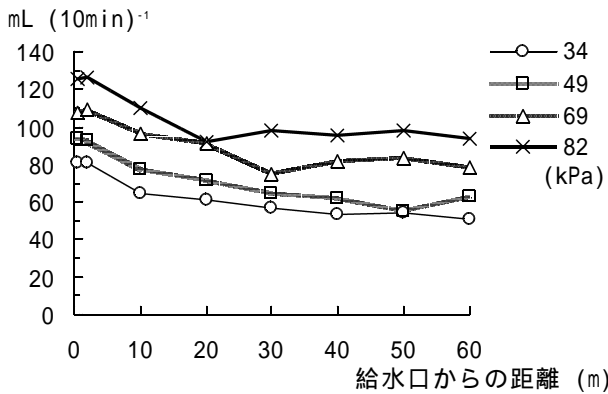


図3 ダブルウォールドリップチューブにおける各水圧での各吐出口からの吐出量\*  
\* 給水終了後10分間放置した際の吐出量

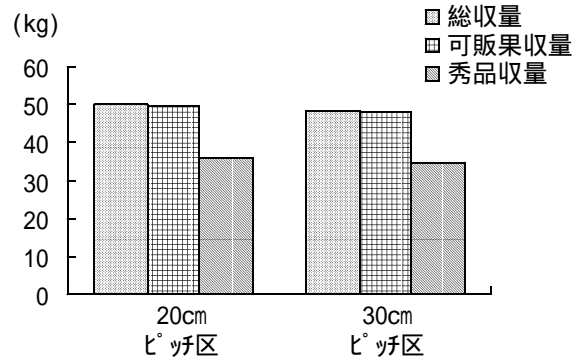


図4 点滴チューブの吐出口間隔とトマトの10株当たり収量

表6 点滴チューブの吐出口間隔とトマトの秀品率及び可販果率

試験区	秀品率 (%)	可販果率 (%)
20cm ピッチ区	72	99
30cm ピッチ区	72	99

少し、0.5 m 地点と30 m 地点との吐出量の差は10分間当たり20~30 mL であった。しかし、いずれの水圧においても30 m 地点から先ではほぼ均一であった。なお69 kPa での30 m 地点、82 kPa での20 m 地点における吐出量は、給水口からの距離が離れている地点における吐出量より少なかった。

平均吐出量は34、49、69、82 kPa でそれぞれ10分間当たり64、74、91、106 mL であった(表4)。水圧が高くなるにつれて、吐出量は増加したが、34 kPa と49 kPa での平均吐出量の差が10 mL であったのに対し、69 kPa と82 kPa での差は15 mL で、高圧になるほど吐出量の増加割合は大きかった(図2)。エデンAと同様、最も水圧の高い82 kPa で最も均一性が高く、変動係数は13.6%であった(表4)。ただし給水終了後10分間放置した後も垂水がみられる吐出口があった。

試験3 点滴チューブの吐出口間隔がトマトの生育・収量に及ぼす影響

トマトの栽培終了時の草姿について表5に示した。

第3果房直下の茎径は20 cm ピッチ区が1.2 cm に対し、30 cm ピッチ区は1.5 cm で有意差はなく、変動係数はそれぞれ14.5%、12.3%で、ばらつきも同程度であった。第6果房直下の茎径は20 cm ピッチ区が1.0 cm に対し、30 cm ピッチ区は1.3 cm で太かったが、変動係数がそれぞれ14.5%、19.3%で、ばらつきは同程度であった。

第3果房直下葉の葉長は両試験区とも50 cm、葉幅は60数 cm で試験区間に差はなかった。葉長、葉幅の変動係数は20 cm ピッチ区が9.0%、9.5%に対し、30 cm ピ

ッチ区は13.3%、26.6%で、ばらつきは30 cm ピッチ区がやや大きかった。第6果房直下葉においては、葉長は両試験区とも40数 cm、葉幅は55 cm で試験区間に差はなかった。葉長、葉幅の変動係数は20cm ピッチ区が7.1%、6.7%に対し、30cm ピッチ区は10.5%、14.3%で、第3果房直下葉におけると同様、ばらつきは30 cm ピッチ区がやや大きかった。

10株当たりの収量については図4に示した。総収量は20 cm ピッチ区が50 kg に対し、30 cm ピッチ区は49 kg であった。可販果収量は20 cm ピッチ区が50 kg に対し、30 cm ピッチ区は48 kg、秀品果収量は20 cm ピッチ区が36 kg に対し、30 cm ピッチ区は35 kg であった。いずれの収量も、両試験区においてほぼ同等であった。

秀品率は20 cm、30 cm ピッチ区ともに72%、可販果率は両試験区とも99%で、秀品率、可販果率ともに両試験区において同等に高かった(表6)。

考 察

点滴チューブはその材質により硬質タイプと軟質タイプに分けられ、硬質タイプの方が吐出量の均一性が高い

表5 点滴チューブの吐出口間隔とトマトの栽培終了時の草姿

試験区	茎径				第3果房				第6果房			
	第3果房		第6果房		葉長		葉幅		葉長		葉幅	
	(cm)	cv(%)	(cm)	cv(%)	(cm)	cv(%)	(cm)	cv(%)	(cm)	cv(%)	(cm)	cv(%)
20cmピッチ区	1.2	14.5	1.0	17.3	50	9.0	64	9.5	42	7.1	55	6.7
30cmピッチ区	1.5	12.3	1.3	19.3	50	13.3	60	26.6	46	10.5	55	14.3

\* cv = 変動係数

とされている<sup>2,3)</sup>が、今回の試験においても同様な結果が得られた。両者とも減圧機構を有し吐出量が均一になる構造となっている<sup>4,9)</sup>が、軟質タイプは従来の散水チューブ同様、通水により形状が変化するため、給水元に近い部分から吐出が開始され、チューブが長いほど、また水圧が低いほど、その影響が顕著になり、先端と末端との吐出量の差が大きくなるように思われる。一方、硬質タイプのひとつであるエデンAは、特殊な構造を持つ一次ラピルスとダイヤフラムによって二重に流量を調整し、さらに水垂れ防止装置を内蔵することで、水圧に関わらず流量が一定(39 kPa でかん水を開始し、59~343 kPa で一定流量)に保たれる構造となっており、垂水はほとんどなく、吐出量の均一性は高かった。

かん水ムラは、給水時にチューブから吐出される量のみならず、給水終了後にチューブから漏れる垂水による影響も大きく、垂水が多いことはかん水ムラをつくる大きな原因となっている。垂水の発生する状況としては、給水終了後にチューブ内の残水が圧力のかかる部分、すなわち相対的に高さが低い部分から垂水として吐出するチューブが多かった。実際の栽培では、うね面における高さが栽培中に自然に変わることはなく、低い箇所は常に低い。そのため常に同じ吐出口から垂水が発生し、その部分にある個体は他の個体より多くの水分を得ることになり、不均一さは広がっていく。よって、均一かん水による安定生産のためには、できる限り垂水を少なくすることが必要となる。

ほ場における実際の栽培を考えると、数十~数百 m にわたる均一性が求められる。チューブ長60 m では、チューブの種類にかかわらず、使用圧力範囲内において、水圧が高い方が均一性が高かった。特にエデンAの294 kPaでの利用が非常に優れていた。ただし、エデンAをかん水開始点(最低使用水圧)である39 kPa で用いたときは、水圧計により水圧が維持されていることを確認していたが、給水口からの距離と無関係に吐出の有無がみられ、非常にかん水ムラがあった。使用圧力範囲内であっても最低水圧で利用することは、水圧計の精度はもとより、わずかな水量の減少により即座に水圧不足に陥ることも考えられる。使用圧力範囲内であっても水圧の減少に伴ってかん水の均一性が低下することから、水圧不足の場合、かん水が非常に不均一になると考えられる。よってチューブを利用する際は、最低使用水圧での利用は避けるのが賢明で、できるだけ水圧を確保することが重要である。

エデンAとダブルウォールを同じ水圧で利用した場合、エデンAの5分間のかん水とダブルウォールの10分間のかん水による1吐出口からの吐出量の均一性に大差はない。しかし、実際に株間20 cmの作物に水圧78 kPaで1株当たり100 mLのかん水をするとき、20 cmピッチのエデンAは約4分、ダブルウォールは約5分のかん水時間となる。ダブルウォールは、チューブが膨らんでから吐出が開始され、末端から吐出が開始されるまでに時間を要するため、かん水時間が短くなると、かん水時間に占める末端から吐出が開始されるまでの時間の割合が

大きくなり、さらに吐出量に対し垂水の占める割合も大きくなる。そのため5分間のかん水は10分間のそれよりも、吐出量の均一性が低下することが懸念される。

さらにダブルウォールでは69 kPaでの30 m地点、82 kPaでの20 m地点における吐出量が、給水口からの距離が離れている地点における吐出量より少なかったが(図3)、これはほ場の勾配や凹凸による影響だと考えられる。それに対し、エデンAでは同じほ場で試験を行ったにもかかわらず、それらの影響はみられなかった。

試験1、2の結果を併せて考慮すると、吐出量の均一性、垂水の発生状況、ほ場の勾配や凹凸の影響といった点から、今回試験した中では、硬質タイプで、垂水防止機構を持つチューブであるエデンAが最も優れており、このチューブを利用することにより、生育のそろった安定生産の可能性が高まると考えられる。

表2に示したように、硬質タイプの点滴チューブには吐出口間隔が10~50 cmのうちから選択できるものが多い。そこで株間と吐出口間隔が一致した20 cmピッチとそうでない30 cmピッチを使用して生育・収量を調査したところ、株による生育のばらつきは30 cmピッチがやや大きかったが、単位面積当たりの収量や品質に差はみられなかった。これは個体として考えた場合、30 cmピッチ区は生育にばらつきがみられるものの、個体群として考えた場合には両試験区は同等の生育状態であり、そのため個体群としての収量は同等であったと考えられる。ただし、収量を調査した2群の総収量はそれぞれ20 cmピッチ区は48 kgと52 kg、30 cmピッチ区は42 kgと55 kgであり、20 cmピッチ区の方が両群の差が小さかった(データ省略)。今回は明らかにできなかったが、収量においても20 cmピッチ区の方が安定している可能性があると考えられる。

定植位置に吐出口がある点滴チューブを用いることで、定植当初の手かん水の手間を省くことが可能であると見え、定植3日後から自動給液を開始したが、20 cmピッチでは株元に給液されるのに対し、30 cmピッチでは吐出口と株元にズレが生じる。井口<sup>5)</sup>によると、土壌がある程度の湿潤状態であるなら速やかに横浸透をするが、乾燥している場合には横浸透が少ないことが報告されている。今回の試験においては、定植時の土壌が乾燥気味であったため、土壌中の水分分布が定植後数日間、ばらついていたと考えられる。これが、生育にばらつきが生じた要因のひとつであろう。この問題を解消する手段のひとつとして、事前に畝を湿潤状態にしておくことが考えられる。定植後すぐに自動かん水を開始する場合、植穴と吐出口が一致していないなら特に必要である。また安定生産を考えるなら、定植苗のそろいは当然ながら、初期生育を始めとした生育のそろいが必須であり、そのためには、チューブの性能のみならず、土壌の均一性、ほ場の勾配や凹凸についても、注意を払う必要がある。

点滴チューブは輸入に頼るところが大きいが、これは点滴かん水技術が水の貴重なイスラエルなどで発達してきた技術である<sup>10)</sup>ことによる。それらは機能的に多様であり、例えばエデンAは先に述べたような構造を持ち、

ラムは内蔵する圧力補正機構付きドリッパーの働きにより使用水压範囲内で同じ吐出量を保つ機構を持ち、またカティーフはノズルが交換可能となっている。また同時に価格も多様である。軟質タイプの価格は従来の散水チューブと同等～1.5倍程度と比較的安価であるが、吐出量の均一性は保証されにくい。これに対し、硬質タイプは、吐出量の均一性は保証されるが、価格は軟質タイプの2～4倍と高価である(表2)。しかし、養液土耕の利点を生かすためには、均等なかん水の精度が最も重要で、それはチューブの性能に負うところが大きく、目的を達成するためには最適なチューブを用いることが重要である。

今回用いたエデンAのような点滴チューブを用いることで、数十 m にわたり均一にかん水され、結果として安定生産の可能性が高まる。また定植間隔と吐出口間隔を合わせることで、生育がそろうことに加え、自動かん水を定植直後から行うことで手かん水の手間が省け、省力化が可能となると考えられる。

### 引用文献

1. 青木宏史, 梅津憲治, 小野信一. 養液土耕栽培の理論と実際. 東京, 誠文堂新光社, 2001, 264p
2. 古口光夫. 養液土耕の基礎知識. 農耕と園芸. 54(5), 53-57(1999)
3. 古口光夫, 船山卓也, 鈴木智久. 花き類の養液土

- 耕法マニュアル. 東京, 誠文堂新光社, 2000, 108p
4. 後藤ひさめ. 養液土耕栽培に用いるドリップチューブの特性. 施設園芸. 42(8), 52-56(2000)
  5. 井手治. 点滴かん水による畝内水分の動態. 施設園芸. 43(6), 66-69(2001)
  6. 加藤俊博. 養液土耕栽培の問題点と研究方向. 平成11年度課題別研究会 施設野菜・花き生産における水研究の最前線. 愛知, 1991-11, 農業水産省野菜・茶業試験場. 平成11年度課題別研究会資料. 68-75(1999)
  7. 大川浩司, 林悟朗. トマトのセル成型苗直接定植における生育制御のためのかん水施肥栽培法. 愛知農総試研報. 30, 121-129(1998)
  8. 六本木和夫, 加藤俊博. 野菜・花卉の養液土耕. 東京, 農文協, 2000, 215p
  9. 遠山枉雄. 点滴かん水と野菜の生育. 農業技術大系野菜編12. 東京, 農文協, 1993, 76の22-33.
  10. 渡辺和彦. 養液土耕の歴史. Hydroponics. 141, 27-29(2000)
  11. 山田良三, 加藤俊博, 関稔, 早川岩夫. リアルタイム土壌・栄養診断に基づくトマトの効率的肥培管理(第2報)持続的生産のための施肥管理技術. 愛知農総試研報. 28, 133-140(1996)
  12. 山田良三. 栄養診断に基づいたトマト・メロンの養液土耕栽培. 農業と科学. 520, 11-16(2001)