

報告

ガラスハウスで生成 される結露水を利用 した渇水対策

松村 伸二

The Use of the condensed dew on the glass of greenhouse as a countermeasures against the water shortage

Shinji MATSUMURA

Abstract

The agriculture of Shodosima Island, Kagawa prefecture suffers damage almost every winter due to water shortages. A possible countermeasure to this problem is to utilize water vapor condensed on the glass of greenhouse for irrigation purposes. To this end, the experiments were carried out to evaluate the quality and the yield of condensed water vapor from different parts of the greenhouse.

It was found that the majority of water was obtained from the roof of the greenhouse with little arising from the side and gable end. The maximum daily amount of collected water was 0.026 m³ and the pH of collected water on the cleaned glass ranged from 6.5 to 7. These results have demonstrated that such a solution to the annual winter drought problem is possible but only if used together with trickle and interval irrigation.

キーワード：渇水，水蒸気，凝結，ガラスハウス

Key words : water shortage, water vapor, condensation, glasshouse

1. まえがき

香川県において最も深刻な気象災害は少雨によ

る渇水であり，全国平均の 60 % 程度という年降水量からみても渇水危険度の高さは容易に想像で

香川大学農学部
Faculty of Agriculture, Kagawa University

本報告に対する討論は平成 13 年 6 月末日まで受け付ける。

きる。過去に幾たびもの渇水にみまわれた香川県も1974年の香川用水の通水により水不足が解消されると期待された。しかし、それ以降も断続的に給水制限が実施され、特に1994年の渇水では県民生活への影響はもとより工業用水、農業用水の制限により経済活動にも大きな打撃を与え、農林水産物の被害金額だけでも20億円を超えた。また、渇水は夏季だけでなく冬季にも頻繁に発生し、特に香川用水の通水のない島しょ部では慢性的な災害となっている。

渇水対策としては海水淡水化装置の導入が考えられるが、莫大な経費がかかるため実現は容易ではなく、その他の有効な方策がないまま、現状では雨水利用の普及と日常生活における節水の呼びかけなどが行われているにすぎない。一方、渇水対策と乾燥地農業には水の確保という共通した目的が存在し、乾燥地関連の水利用技術の開発や研究は多い。例えば、イスラエルのネゲブ砂漠では豊富な降露量を利用した作物栽培が行われ、乾燥地農業に寄与してきた。最近の研究では、農業用水の節水対策としてKamichika *et al.* (1993) が地中熱交換ハウスを利用して、地中に埋設したパイプにより蒸散したハウス内の水蒸気を回収する実験を行っている。また、乾燥地の緑化を目的として早川ら(1993)は大気中の水分を夜間放射冷却によって凝結・捕集する実験を行い、さらに早川ら(1994)は冷却装置を用いた強制的な水蒸気固定方式により凝結水量を計測し、その有効性を示した。それと同様な強制冷却方式として、松村(1994)は冷却装置にエアコンを用いてその排水量を計測し、エアコンを冷房に利用した副産物としての凝結水の有効利用を提案している。また大気中の水蒸気を水資源として評価するため、神近ら(1995)は国内外の各地において強制冷却による過飽和状態を想定した水蒸気賦存量を試算し、水蒸気資源の利活用を検討している。

このように水を得るために水蒸気の凝結を利用する方法の研究は少なくなく、香川県の農業における渇水対策としても有効な手段となる可能性が高いと考えられる。そこで、本研究ではエネルギーを使うことなく、自然に水を集める方法として、

10月から6月において農業用ガラスハウス表面に結露する水を回収する実験を行い、その実用化を検討した結果について報告する。

2. 高松市および小豆島の渇水の実態

高松市および小豆島の地理的な位置を図1に示

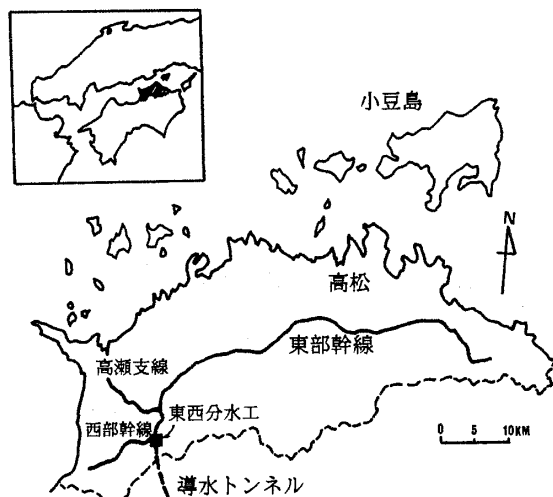


図1 高松および小豆島の位置と香川用水の経路

表1 高松および小豆島の給水制限年

年	高松市	小豆島3町	取水制限
1973	○	○	—
1974	○	○	—
1975	—	—	—
1976	—	○	—
1977	—	○	○
1978	○	○	—
1979	—	○	—
1980	—	—	—
1981	—	○	—
1982	—	○	○
1983	—	○	○
1984	○	○	—
1985	○	○	—
1986	—	○	○
1987	—	○	—
1988	—	—	○
1989	—	—	—
1990	○	—	○
1991	—	—	—
1992	—	—	○
1993	—	—	—
1994	○	○	○
1995	○	—	○
1996	○	○	○
1997	—	—	—
1998	○	—	○

○：制限があった年 —：制限がなかった年

した。香川用水の通水区間は太い実線で示したように香川県西部の東西分水工から西部幹線や東部幹線へ分水され、県下46市町のうち島しょ部を除いた5市30町で各種の用水に利用されている。

香川県内の渇水の実態について、香川県気象月報から1973年から1998年までの高松市と小豆島における給水制限の実施状況を抜き出し、年別にまとめたのが表1である。ここでいう給水制限とは、上水道の減圧措置、時間断水等を指し、○で示している。表1から香川用水の通水後においても、配水のある高松市ではほぼ2年に1回の割合で給水制限が行われており、配水のない小豆島3町（内海、池田、土庄）のいずれかでは1987年まではほぼ毎年のように断水または給水制限が繰り返されているのがわかる。

また、同じ期間の給水制限実施状況を月別に算

出したものが表2であり、給水制限の実施が2月から3月までならば、2月と3月に1頻度加えるという方法で統計をとったものである。一般に渇水は夏季の現象と考えられがちであるが、高松や小豆島においては1年を通して渇水の危険があり、特に小豆島では11月～3月にも分布が集中しているのがわかる。特に1984年～1985年と1985年～1986年の冬季渇水は小豆島3町では第2次給水制限にまで達し、給水船による水の運搬（島外給水）が行われた。

このように香川用水通水後も、その配水地域である高松市も渇水の心配が消えたわけではなく、ましてや配水のない島しょ部においてはまったく水事情は改善されていない。また、そのような状況下では生活用水が優先され、農業用水に至ってはほとんど確保できないのが現状である。特に秋

表2 高松および小豆島における月別給水制限頻度

地域名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
高松市	1	1	1	1	1	2	3	4	6	1	1	2
小豆島	4	6	2	1	1	2	3	4	3	1	3	5

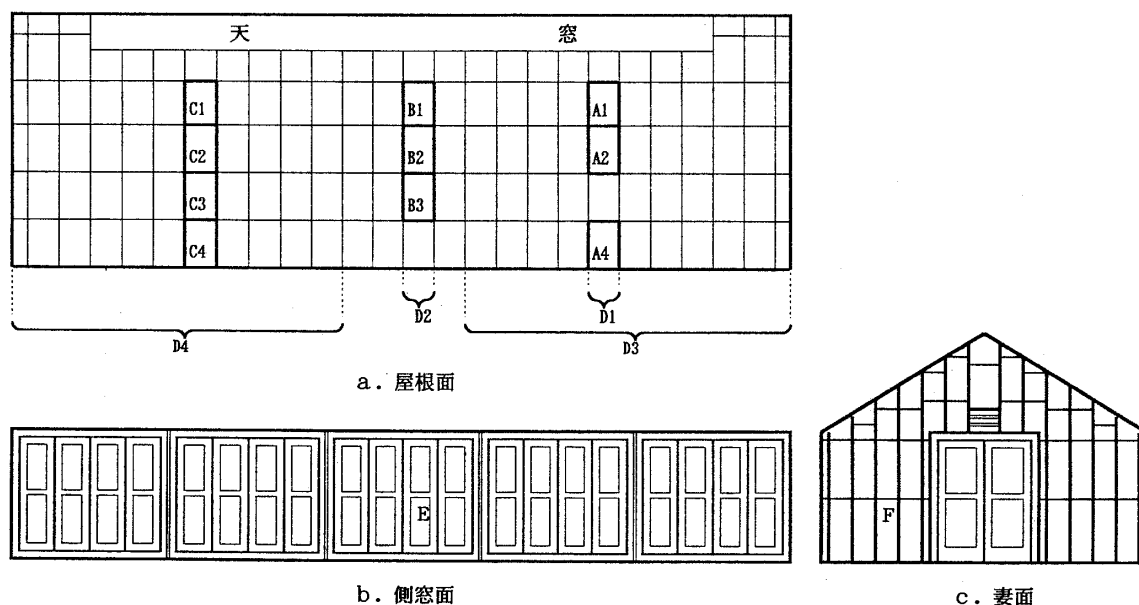


図2 ガラスハウスの概要と集水地点

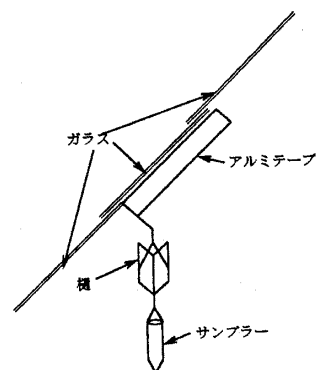
から冬にかけては小豆島において電照菊の施設栽培が盛んになる時期にあたり、この時期の水不足は島の主産品に大きな打撃を与えることになる。都市の渇水には社会的な関心が集まりやすいが、島しょ部の渇水も深刻な問題であり、農業用水の渇水対策を研究する意義は大きいと考えられる。

3. 観測方法

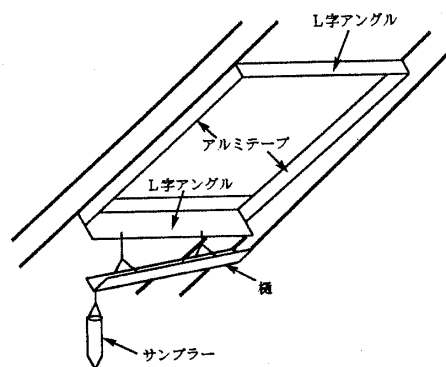
小豆島においては11月から3月が渇水のピークの一つとなっているが、この時期の晴天無風の夜間には露や霜が降りることが頻繁で、ガラスハウス内外のガラス面においては多くの結露水が生成される。その水滴は外側屋根面では軒に向かって流下し、最終的には軒先から落下するが、軒下の地面に浸潤したその痕跡を見ると、かなり水量があるものと推測できる。

この結露した水を施設栽培に有効利用するためには、その水量と水質について把握する必要があるが、1995年12月以降、香川大学農学部の実験圃場内にある南北棟のガラスハウスにおいてそれらの測定を行った。ハウスは間口7.5 m、奥行13.4 mで、屋根面のガラス1枚の大きさは0.48 m × 0.80 m、総ガラス面積は104.76 m²である。側窓は上下2枚のガラスで構成され、ガラス1枚の大きさは0.59 m × 0.83 mである。

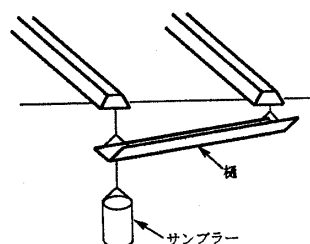
結露した水の集水位置は図2に示すように、ハウスの屋根面、側窓面、妻面のそれぞれ内側および外側において行った。屋根面内側の集水位置はA1～C4で、外側についてはD1～D4である。側窓面と妻面の集水位置はそれぞれE、Fで、この位置のガラス面の内側および外側で集水した。屋根面のガラスの合わせ方は図3aに示すように外側上方向から下に向かって重ねてあるため、外側は上から下へスムーズに流れるが、内側はガラス1枚毎に下端で流下が停止する。そのため、内側はガラス1枚単位、外側はガラス群1列単位で測定を行った。図3bは内側屋根面の集水量の測定方法を示したもので、外側から水滴が流れ込まないようにガラス面の測定範囲の境界に囲いをつけ、屋根の傾斜により自然流下してくる水滴を最下点に取り付けたトイにより集水し、サンプル瓶に貯



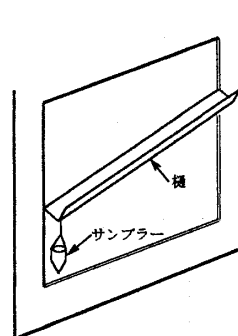
a. 屋根のガラスの重ね方



b. 内側屋根面のサンプリング方法



c. 外側屋根面のサンプリング方法



d. 側窓面のサンプリング方法

図3 地点別の集水量測定方法

めて測定した。その有効集水面積は 0.384 m^2 である。また、外側屋根面については棧に挟まれた一連のガラス群全体の集水量を、図 3c に示すように軒に設けたトイによりサンプル瓶に集水し、その有効集水面積は 2.095 m^2 である。側窓と妻面については内側、外側ともに同一位置で、垂直なガラス面上にトイを斜めに傾斜させてテープで留め、ガラスを流下してくる水滴を集水した。図 3d は測窓の集水量測定の様子を示したものである。測定における有効集水面積は 0.49 m^2 、妻面のそれは 0.98 m^2 である。なお、集水量は単位面積当たりの体積で表すため、深さ単位とした。

水質測定については集水用のサンプル瓶をあらかじめ精製水で洗浄し、結露が始まる直前に設置し、翌朝サンプル瓶に溜まった水の pH を測定した。

4. 結果および考察

4.1 ガラス面の汚れによる集水量の差

ガラス面上の汚れによって水蒸気の凝結のしやすさや水滴の流下しやすさに影響があることが考えられるため、ハウスの内側において、水拭きして洗浄したガラス面(以下洗浄面)と汚れたままのガラス面(以下汚れ面)の集水量を比較した。ガラス面の洗浄は 1997 年 4 月 20 日に行い、その後の経過日数と集水量の推移を図 4 に示した。

洗浄面の集水量が 0.015 mm 以上の場合、洗浄

面と汚れ面では集水量に明瞭な差があり、洗浄面の方が集水量は多かった。これは夜間のガラス面の目視観察において、結露の開始時刻が汚れ面より洗浄面の方が早く、なおかつ水滴の付着数が洗浄面の方が多かったこととも一致している。しかし、洗浄面の集水量が 0.015 mm 以下の場合、洗浄面と汚れ面の集水量の差は小さく、またガラス面洗浄後の日数が 10 日を超えると集水量の差は小さくなるのがわかる。従って、実験に使用したハウスでは 10 日前後に 1 回はガラス面の洗浄作業を実施すれば集水効果が大きくなると考えられるが、さらに高い集水効果を期待するならば、洗浄作業はもっと短いサイクルで行う必要がある。なお、渇水時の洗浄作業には市販のガラス洗浄液やウェットティッシュ等を利用することが可能である。

4.2 ハウス内側の集水量

(1) 側窓面、妻面の集水量

ハウス内側の側窓面、妻面においては 1997 年 5 月まで集水量測定を行ったが、側窓面 E と妻面 F では全く集水できなかった。目視観測によると、側窓面と妻面は屋根面とはほぼ同じ時刻から結露が始まっているにもかかわらず、水滴はほとんどトイに流下していなかった。測窓面サンプラーには測窓上部ガラス面からも流入すると考えられるし、有効集水面積は屋根ガラス面 1 枚分よりも広く、

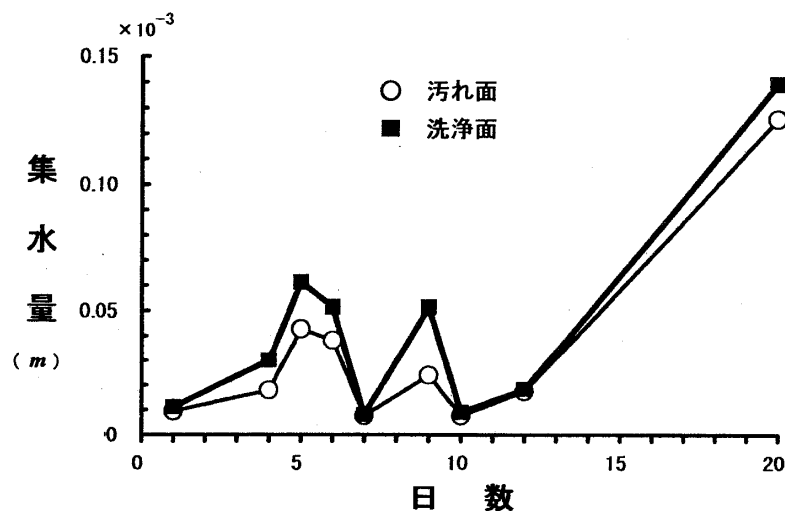


図 4 集水量に及ぼすガラス面の洗浄効果

ガラス面も垂直で流下しやすいと思われるが、集水効果はほとんど期待できないという結果となった。妻面についても同様であった。これは屋根面に比べて天空に対する開放度が小さいので、冷却が進まないためと思われる。

(2) 屋根面の集水量分布と最大集水量

屋根面の集水量を南北方向に3列(A, B, C), 各列上下方向に3または4段(1, 2, 3, 4)で測定した結果を図5に示す。なお、記号は図2における集水位置を表している。

南北方向別の集水量についてはほとんど差がなく、上下方向別の集水量についても同様であった。従って、屋根面内側における集水量については全域ではば一般的な分布を示すといえる。

最大集水量は地点C1における1998年5月21日に測定された0.189 mmである。しかし、1998年4月までは集水に60 cc サンプラーを使用しており、1998年4月16日と20日については結露水がオーバーフローしたため、実際の最大値はさらに多かった可能性もある。仮にこの0.189 mmを最大値として屋根面内側のガラス全体で得られる集水量を試算すると、総量は0.0198 m³となる。

また、1997年4月までの期間についてはハウス内では作物栽培が行われていなかったため、かん水がほとんど行われず、土壌はかなりの乾燥状態にあった。しかし、それ以降では栽培が継続的に行われ、かん水が行きわたり、土壌は常に湿潤状態にあった。前者を乾燥期、後者を湿潤期とし、地点A2における両時期の最大集水量を比較すると、乾燥期では1997年1月19日の0.120 mmが最大となる。湿潤期については結露水がオーバーフローした時の値が最大値となるため、この値(60 cc)から計算すると0.156 mmとなり、湿潤期の最大値の方が多い。この結果から Kamichika *et al.* (1993) が地気熱交換温室で灌漑水の30%ほどの水量を回収したように、ハウス内が湿潤である場合には回収可能な水蒸気量が多くなるためであろうと示唆されるが、同一環境条件での比較ではないためこの測定からは結論づけることはできなかった。

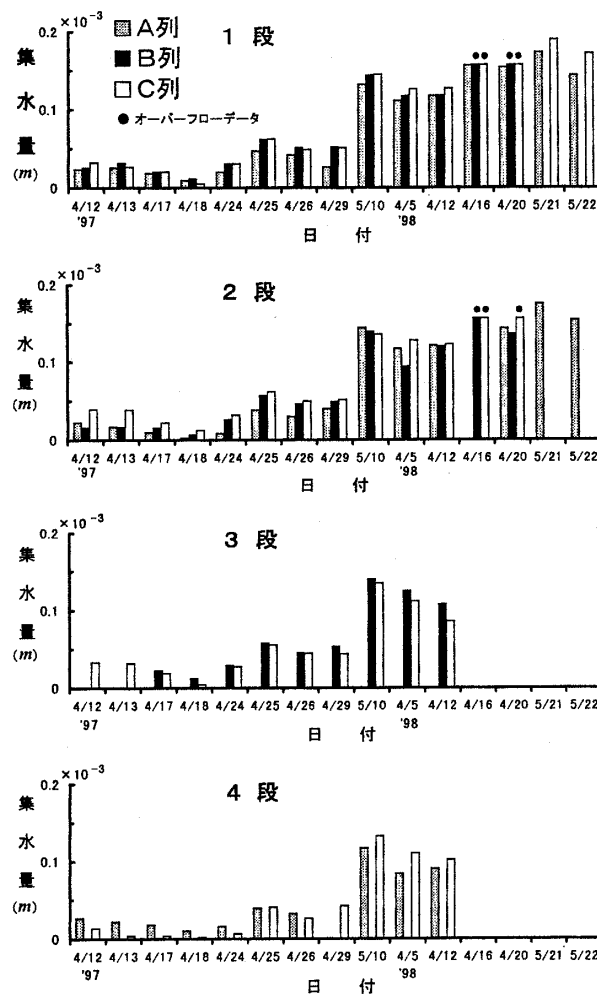


図5 屋根面内側の集水量分布

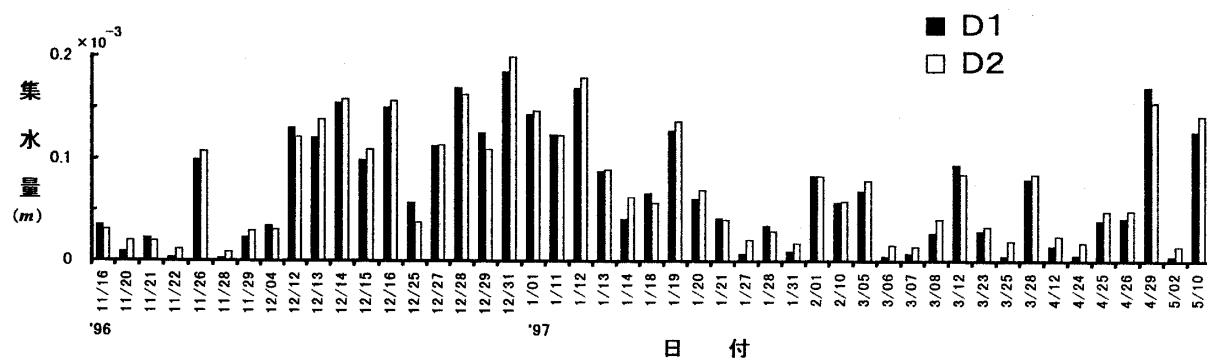
4.3 ハウス外側の集水量

(1) 側窓面、妻面の集水量

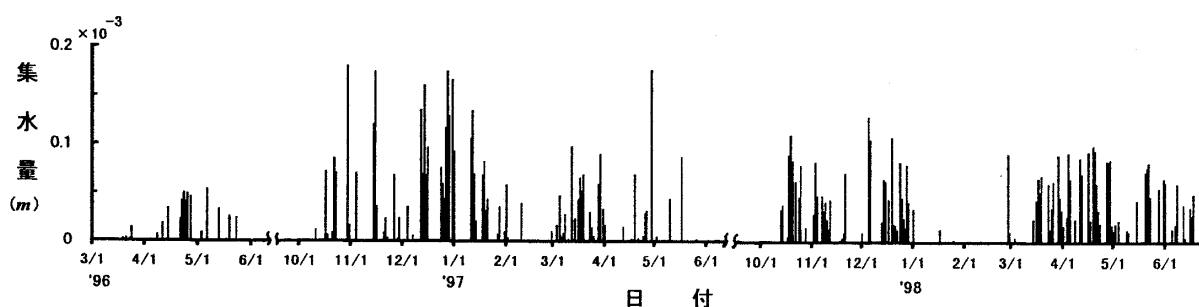
ハウスの外側についても側窓面、妻面において内側と同一地点で測定を行ったが、内側と同様に側窓面Eと妻面Fでは全く集水できなかった。従って、これらの面では内側、外側ともに結露による集水は期待できないものと考えられる。

(2) 屋根面の集水量分布と最大集水量

1996年11月から1997年5月までの期間について地点D1とD2において集水量を比較したのが図6aであり、両地点でほぼ同一の集水量が得られた。従って、屋根面外側の集水量も南北方向による差はほとんどないと考えられる。図6bに地点D1における1996年3月から1998年6月



a. D1地点とD2地点の集水量の比較



b. D1地点における集水量

図6 屋根面外側の集水量分布と推移

までの集水量を示したが、期間中の最大集水量は0.175 mmであり、その値から屋根面外側のガラス面全体の集水量を試算すると約0.0183 m³ほどの水量が期待できる。

4.4 集水した水のpH値

1997年4月から1998年5月にかけて屋根面の内側と外側において集水した水のpH測定を行い、その結果を表3に示した。また、ハウス周辺に精製水で洗浄したガラスロートを設置し、ガラス面に結露した水を集めてpH測定を行った結果も示した。

屋根面の内側や洗浄した外側では集水した水のpHは6.5以上であったが、未洗浄の外側面で集水した水はpH 6.5未満と酸性側に傾いた値を示した。内側面は未洗浄であるが、同じ未洗浄の外側面に比較してpH値が7により近かった理由としては、汚れやすい外側面に比べて内側面は汚れの程度が小さいことが考えられる。外側面において洗浄の有無によりpH値に差がでていることか

表3 各地点で集水した水のpH値

集水場所	地点番号	pH
屋根面外側(未洗浄)	D1	6.2 ± 0.2
屋根面外側(洗浄)	D2	6.5 ± 0.1
屋根面内側(未洗浄)	B2	6.7 ± 0.1
	C2	6.8 ± 0.1
屋根面外側(未洗浄)	D3	4.8 ± 0.2
	D4	4.7 ± 0.2
ガラスロート	-	6.9 ± 0.1

(測定回数12回)

らも、結露するガラス面の清浄状態によって集水した水のpHに違いが出るといえる。従って、ガラス面や水滴を受けるトイの洗浄を定期的に行えば、水質を酸性に偏るのを防ぐことができると考えられるが、屋根面内側についてはそのまま農業用水として利用が可能であると思われる。

また、地点D3やD4ではトイにより集水した水をビニールチューブを通してビーカーに貯水しており、その水のpHは5以下の高い酸性値を示した。屋根面で結露した水がトイまで達する流下

経路は D1 や D2 と同じであるにもかかわらず、D3 や D4 の方が強い酸性を示したということは、ビニールチューブを通過する過程で大きく酸性に傾いたことを意味している。そこでチューブの内壁を調べてみると、泥状の汚れが所々溜まっており、水がかろうじて通る状態になっていた。この汚れを採取し、精製水に溶かして pH 値を測定したところ、4.7 とかなり低い値となり、極度の酸性化の原因はこの汚れであることがわかった。このチューブを洗浄した後に再び設置し、それ以後の最初の pH 測定値は 6.1 であった。従って、集水した水をチューブやパイプ等で導水する場合には、ガラス面やトイだけでなく、その部分の洗浄も恒常的に行う必要があるといえる。

4.5 総集水量の試算と施設栽培への有効性

集水量の測定期間中の日数は 578 日であり、その約 42 % にあたる 244 日で集水量を得ることができた。集水日における各地点の集水量測定値をもとに、ハウス全体における 1 日ごとの総集水量の試算を行った。計算にあたっては測窓面と妻面

からの集水量は見込めないとし、屋根面内側および外側の集水量平均値にガラス面積を乗じて求めた。その結果を図 7 に示したが、同一日の内側および外側集水量のいずれかが欠測した場合は除いている。総集水量は 0.026 m^3 が最大値であり、内側および外側面の各最大集水量の単純合計値 0.0381 m^3 に比べてはるかに少ない値となった。また、図 8 は総集水量 0.016 m^3 以上の日における内側および外側集水量の値を比較したものである。1997 年 4 月までの傾向としては外側集水量の方が内側より多く、それ以降では逆のパターンとなっており、その転換時期はハウス内の乾燥期と湿潤期の境界に一致している。また、総集水量が多い場合については、内側集水量が多い時には外側が少なく、逆に外側が多い時には内側が少ないという関係があることも示唆しており、内側と外側の凝結現象の動態はガラス面付近の微気象に密接に関係していると考えられる。

表 4 は集水日の総集水量を 0.005 m^3 毎に階級別に分け、その頻度を集計したものである。 0.005 m^3 以下の日が 120 日あり、全体のほぼ半数を占

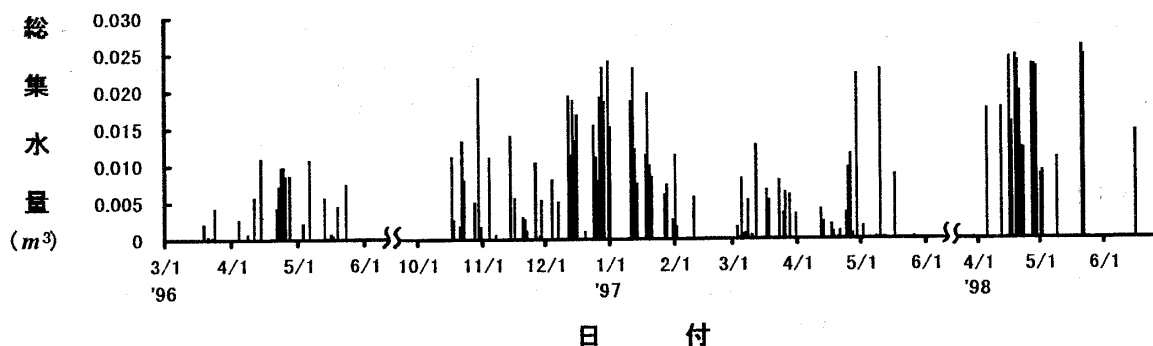


図7 ハウス全体について試算した総集水量

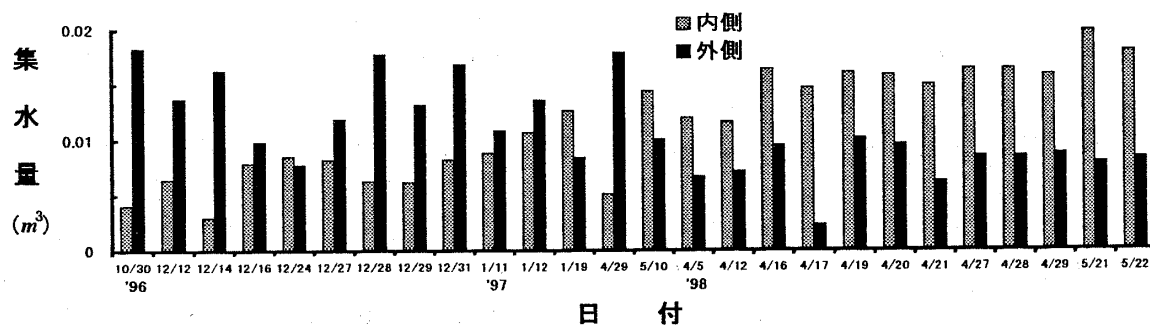


図8 内側集水量と外側集水量の比較

めているが、 0.01 m^3 以上の日は 57 日で約 25% にすぎない。また、表 5 は集水日の各年の月別日数を示したもので、計測を行っていない 7 月から 9 月を除いて、ほぼ毎月 10 日程度の集水日数があるが、 0.01 m^3 以上を計測できる日数はわずか 1～3 日程度である。しかし、集水量は水蒸気の凝結現象に依存するため、日々の気象要因に大きく左右され、1996 年 12 月や 1997 年 1 月、1998 年 4 月のように 0.01 m^3 以上の集水日数が多い場合もある。また、集水できなかった日には雨天が 207 日あったが、渇水時にはないわけであることから、集水日数はもっと増えると考えられる。しかし、これについては実際の渇水時の気象状況をもっと詳しく解析して見る必要がある。このように、どの時期にどれだけの集水量が得られるかを予測することは難しいが、1 日に 0.01 m^3 以上集水することが可能であるのも事実である。

また、電照菊栽培に必要なかん水量はハウスの規模、栽植密度、土質等により異なるが、一般に 2～3 mm と言われる。仮に、このハウスにおける最大集水量 0.026 m^3 を集水量とし、ハウス面積の 70% を栽培有効面積としてかん水可能な量を求めると、 $0.026 / (7.5 \times 13.4 \times 0.7)$ から 0.37

mm となる。かん水量を 2 mm とすれば、この量は約 1/5 程度であるが、ドリップ灌漑や間断灌漑などの効率的な節水栽培を利用すれば、この水量が栽培に有効となる可能性があると考えられる。

5. まとめと今後の課題

ガラスハウスにおいて結露した水滴の集水量を測定し、施設栽培への利用について検討した結果、集水量については通常の栽培には十分ではないが、大気中の水蒸気からまとまった水量を得る手段となることは確認できた。また、その水質を保つためや凝結水量を維持するためには、ガラス面の洗浄が必要ながわかった。今後、節水栽培技術の進展により、この水量の有効性が確認できるようになれば、寒候期の渇水対策の一技術になりえると期待される。

また、本実験は農学部圃場において行ったが、降露・降霜の状況は島しょ部とは異なることが予想されるため、実用化に向けてはそれらの地域における観測による実証が必要であると思われる。なお、本報告では実際的な集水量を把握することに着目したため、早川ら (1994) が行ったような気象要因との関連については解析していない。気象要因と結露量については近藤 (1996) が熱収支的に結露量を算出した結果を示しており、このような気象値と実際の集水量との関係を明らかにすることによって、集水量をさらに増大させるような施設の開発や本方式の他地域への適用を気候的に評価することが可能になると考えられる。

表 4 総集水量の階級別日数

総集水量 (m^3)	日数
～0.005	120
0.005～0.010	67
0.010～0.015	28
0.015～0.020	11
0.020～0.025	12
0.025～	6

表 5 集水日数の年別月別頻度 (内数は 0.01 m^3 以上の日数)

年 \ 月	1	2	3	4	5	6	10	11	12
1996	-	-	4	12(3)	9(1)	-	9(3)	13(4)	18(11)
1997	14(7)	6(1)	20(1)	14(3)	6(1)	-	11(1)	12	20(3)
1998	4	9	16	22(14)	15(3)	10(1)	-	-	-

参 考 文 献

- 1) 早川誠而・谷 宏・吉沢知展・中本恭子・田畑宗徳・神近牧男：大気中の水蒸気固定による乾燥地の緑化に関する基礎的研究,中国・四国の農業気象, No.6, pp.100-101, 1993.
- 2) 早川誠而・谷 宏・山本晴彦・久下孝幸・神近牧男・阿部靖志：大気中の水蒸気固定による乾燥地の緑化について-露形成に及ぼす外的要因, 中国・四国の農業気象, No.7, pp.70-71, 1994.
- 3) 神近牧男・大槻恭一・早川誠而：接地気層水蒸気の水資源としての評価, 中国・四国の農業気象, No.8, pp.49-52, 1995.
- 4) Kamichika,M., Yamamoto,T., Otsuki,K. and Abe,Y. : Recycling use of irrigated water by earth-air heat exchange distillation. J. Agric. Meteorol., Vol.48, No.5, pp.667-669, 1993.
- 5) 近藤純正：夜間の結露量についての熱収支の計算, 農業気象, Vol.52, No.1, pp.29-32, 1996.
- 6) 松村伸二：大気中の‘水’の有効利用について, 中国・四国の農業気象, No.7, pp.68-69, 1994.

(投 稿 受 理：平成11年12月 2 日

訂正稿受理：平成12年 3 月27日)