九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

# ビニールハウス内の水消費環境特性

**原口, 智和** 九州大学農学部灌漑利水工学講座

**中野, 芳輔** 九州大学農学部灌漑利水工学講座

**黒田, 正治** 九州大学農学部灌漑利水工学講座

https://doi.org/10.15017/23546

出版情報:九州大學農學部學藝雜誌. 49 (3/4), pp.169-177, 1995-03. 九州大學農學部 バージョン: 権利関係:

# ビニールハウス内の水消費環境特性

原 口 智 和・中 野 芳 輔・黒 田 正 治 九州大学農学部灌漑利水工学講座 (1994年12月9日受理)

Characteristic Features of Water Consumption in a Vinyle Greenhouse

Tomokazu HARAGUCHI, Yoshisuke NAKANO and Masaharu KURODA

Laboratory of Irrigation and Water Utilization, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-81

## 緒言

近年,日本における施設園芸の面積の伸びはめざま しく,1992年の調査によれば58,000ha に及んでいる. こうした施設農業の著しい普及にもかかわらず,消費 水量についての観測データが十分でないのが現状であ る.このため畑地灌漑計画の策定にあたり,施設用水 量の決定が大きな問題点となっている.ハウス内では 作物の種類,生育ステージに合わせて,土壌水分,気 温,湿度などの環境管理が行われ,人工環境条件下で の水消費システムは複雑な様相を呈している.ハウス におけるこうした多様な環境管理状態において的確に 消費水量を予測することは非常に難しい問題である.

ハウス内の水消費量の測定については, Lake et al. (1966), 古在ほか (1982), 佐藤 (1989) のポット秤量 法,小倉 (1970),岩切 (1971),内島 善兵衛 ほか (1979),河野 (1984) の熱収支法,鴨田ほか (1968) のチャンバー法,などで行われた例がある。これらは いわばそれぞれのハウス固有の構造と栽培管理状態の 下での測定値である。したがってこれらの測定から得 られた関係をそのまま他のハウスに適用することはで きない。しかも畑地灌漑計画に際し利用できるのは一 般には気象台での観測値に限られ,これらのデータか ら個々のハウス内の水消費量を推定することが必要と される。

こうした状況に鑑み、本研究では無加温ビニールハ ウスを対象に管理状態の相違とハウス内外の蒸発環境 の関係を明かとし、ハウス外の環境データからハウス 内の水消費量を推定する方法について検討を行った.

# ハウス内の環境形成に関与する要因

ハウス内の環境形成にはハウス壁面を通した放射交 換,熱交換,およびハウス床面の熱収支,換気,温湿 度管理、水管理、その他様々な人為的、自然的因子が 関与している。放射には短波放射と長波放射がある。 被覆材として利用されるビニールフィルム, ガラスは 素材によって透過,反射,吸収などの光学的特性をもっ ている。熱交換は壁面温度と周囲気温との温度差に基 づいて,ハウス内外で行われる。ハウス内の床面にお いて吸収された放射エネルギーは潜熱・顕熱・地中熱 交換に利用される. これらの熱収支各項へのエネル ギー分配量は作物の被覆状態,土壌水分状態,ハウス 内の気温・湿度・地温・風速などが関係する、換気は ハウスの側面・天井の開放、あるいは換気扇によって 行われる。温度管理はビニールフィルムによる二重被 覆、マルチ、換気、加温施設などによって行う、湿度 管理はかん水装置による水の噴射、土壌面のマルチ、 換気などで行う.

わが国でみられるビニールハウスは、寒冷期には密 閉状態で保温に利用され、春期から秋期にかけては側 面を開放し、雨よけ栽培に利用されるパターンが多い。 雨よけ栽培は降雨を遮断し、土壌水分をマイクロかん がいなどで最適状態に管理することを目的としている。 また側面は温度上昇を防止するため開放するので、ハ ウス内水消費環境は密閉時とは異なった状態を呈する と思われる。

## 実験の方法

九州大学農学部貝塚圃場(東経130°26',北緯33°38') に、単棟のビニールハウスを南北向きに設置し、ハウ ス内部の日射量(3点),散乱日射量,純放射量,乾球・ 湿球温度(50cm),土壤温度(深さ0,5,10,20, 50cm),計器蒸発量,風速(50cm)の測定を行った。 同時にハウス外についても同様の測定を行った。ハウ スの管理状態は、冬期は密閉,無植栽,無かん水状態 であり、夏期は側面開放,植栽,点滴灌漑状態である。 測定は1994年の冬期と夏期に実施した。測定期間は、 冬期は1月、2月の53日間、夏期は7月、8月の62日 間である。乾球・湿球温度,土壤温度,風速はデーター ロガーにより1分間隔で,日射量は打点レコーダーに より5秒間隔で,計器蒸発量は電子天秤により30分間 隔で自記記録した。

計測器の配置状況は図1に示すとおりである。

#### ハウス内環境の特徴

ハウス内の消費水量にかかわる要因は,気象要因(短 波・長波放射量,気温,湿度,風速),土壌要因(土壌 水分量,透水係数,熱伝導係数),作物要因(栽培密 度,生育ステージ,葉面積指数)などである。これら はハウスの管理状態によって様々に異なる。ここでは 実験結果に基づき,管理状態を異にするハウス内の水 消費環境の特徴とその物理的形成過程について考察を 行った。

#### 1. 温度環境

ハウス内の温度環境の形成は、密閉時にはビニール 壁面を通した熱伝導とハウス床面(土壌面・作物面) における顕熱伝達によって行われ、部分開放時には自 然換気によっても影響される。密閉時における外気温 度との関係を晴天日の時間変化でみると図2のように なる。冬期にもかかわらずハウス内温度は最大28℃に



達しており,ハウス外との温度差は最大で15℃もある. ハウス内のピーク温度の出現時間は,約2時間程度外 気より早くなっている.これは密閉されたハウス内の 温度上昇が日射量に敏感に反応するためと思われる. また夜間に内気温が外気より下回るのは,ハウス内の 日中の地中熱伝達量が露地より小さく,このため夜間 の土壌面からの放熱が露地に比べ小さいためである. ビニール面は長波について透過性が高く,夜間には露 地と同様に放射冷却が行われることも原因の1つであ る.

図3は側面開放幅が約1mの雨よけ状態での観測値 である.夏期にもかかわらずハウス内温度は野外より 2℃程度の上昇にとどまっており、ピーク温度出現時 間もほとんど同時である.しかし、密閉時と同様にハ ウス内気温の特徴として日中の温度上昇と夜間の温度 低下の傾向は明確に認めることが出来る.





図3 側面開放ハウス内外の気温経時変化(8月7 日)

ハウス内外の日平均温度について約50日間の相関は 図4に示すとおりであった。相関係数は密閉状態で 0.90,側面開放状態で0.98と高い値を示しているが, 密閉状態は側面開放状態に比べて若干相関は低くなる。 このことから日平均温度に関しては次式を用い,ハウ ス内の値を野外値から推定することは可能であると思 われる。

$$TMPi = 0.91 TMP_0 + 1.95$$
 (密閉) (1)

$$TMPi = 1.00 TMP_0 + 0.80$$
(雨よけ) (2)

ここで,TMPi,TMP。はハウス内,外の日平均気温(°C) である.ただし蒸発は主として日中の土壌面温度が上 昇したときに生じるので,時間単位の推定が必要とな る.これについては雨よけの場合は図3のとおり野外 変化に追従しているので内外の相関は高く推定可能で あるが,密閉時は位相のずれのために相関は低く回帰 直線の作成は難しいと思われる.

#### 2. 湿度環境

ハウス内の湿度環境は作物・土壌面の蒸発散による 水分補給と換気による外気との水蒸気交換などによっ て影響される。図5は密閉時のハウス内外の相対湿度 を示したものである。ハウス内の相対湿度は野外に比 べ,約15%~20%程度大きな値を示している。また温 度と同じく両者には約2時間の位相のずれが認められ る.夜間の相対湿度は密閉時には100%近くに達してい る.水蒸気圧に換算した場合,野外では夜間・日中と も約8mbで推移しているが,ハウス内は日中24mbの ピーク値を示し,野外と16mbの違いが認められた.一 方,雨よけ状態では図6に見られるように,側面開放



図4 密閉・側面開放(雨よけ)状態におけるハウス 内外気温の相関

面における通気のため野外の影響を大きく受けている ことがわかる。ハウス内外の相対湿度は夜間と日中で 逆転するが、最大で5%程度の範囲に留まっている。

図7はハウス内外の日平均相対湿度の相関を示した ものである。密閉時の相関係数は0.83とであったが, 側面開放時は通気の影響で0.98と極めて高い値が得ら れた。これらの回帰直線は次式である。

$$HUMi = 0.60 HUM_0 + 42.65$$
 (密閉) (3)

$$HUMi = 0.97 HUM_0 + 0.01$$
(雨よけ) (4)

ここで, *HUMi*, *HUM*<sub>0</sub>は日平均相対湿度(%)である. これらの式を用いて,野外値からハウス内の値を 推定することができる.

#### 3. 風速環境

風速は水蒸気や熱の拡散に関わる重要な因子である が、ハウス内の風速についての測定例は極めて少ない。 図8は熱線風速計による密閉ハウス内の観測例である。 密閉時の風速は床面と空気層との温度差に基づく自然 対流による。図に示すように温度差が大きくなる日中 で最大値で25cm/sが認められたが、夜間では10cm/s 以下であった。図9は風杯式風速計による側面開放時 の内外の風速である。ハウス内風速は時間平均値で示 しているが実際にはピーク値は1m/sに達している。 通常の風速条件下で野外に比べハウス内は約10%程度 に減衰する結果となっている。ただしここでは自然対 流の影響は評価されていない。図10はハウス内外の日



**図5** 密閉ハウス内外の相対湿度経時変化(1月9 日)



図6 側面開放ハウス内外の相対湿度経時変化(8月 7日)



図7 密閉・側面開放(雨よけ)状態におけるハウス 内外相対湿度の相関



図8 密閉ハウス内の風速経時変化(1月9日)

平均風速について相関を調べたものである。側面から の風の流入のため相関係数は0.85と高くなっている。 回帰直線は次式の関係が得られた。

$$Ui = 0.49 U_0 - 0.40$$
 (雨よけ) (5)

ここで, Ui, U<sub>0</sub>はハウス内外の日平均風速 (m/s) で ある.ハウス内の風速は,風向,ハウスの設置の方位, 開放状態,周囲の状況などによって大きく影響される ので,ハウス外の観測値からハウス内の値を推定する ためには個々のハウスについて(5)式に類した関係を 定めるべきであろう.

#### 4. 日射環境

ハウス内の日射環境は日射の入射角、ビニールフィ







ルムの光学特性、フレーム率、ハウスの構造、設置方 位などが関係する。ビニールフィルムは時間の経過に つれ汚れや劣化が生じるので光学特性は変化する.日 射量には直達日射量、散乱日射量があり、これらの割 合によっても到達量は異なる。図11はビニールフィル ム張り替え直後のハウス内外の日射量を示したもので ある、ハウス内の日射量は図1の配置状況に示したよ うに、ハウス中央と両壁面下部に設置した3点の日射 計の値を示している、ハウスの方位は南北であったが, 東側は西側に比べ午前中大きく午後に小さい傾向を示 している。このように時間経過につれ各点の日射量は それぞれ異なった値を示すが、日平均ではほぼ同じ到 達量を示した。図12は張り替え直後と、6ケ月経過後 のハウス内外の日総量日射量について相関をとったも のである、冬期,夏期ともに相関係数が高いのは当然 であるが、ハウス内の到達率は張り替え直後には約 70%であったものが、半年後には約62%に低下してい る。このとき回帰直線は次式が得られた。



図11 ハウス内外日射量の経時変化(1月9日)



図12 ハウス内外日射量の相関(1月9日)

 $RADi = 0.69RAD_0 + 2.42$  (密閉) (6)  $RADi = 0.65RAD_0 - 8.44$  (雨よけ) (7)

ここで, *RADi*, *RAD*<sub>0</sub>はハウス内, 外の1日当たり日 **射量** (*cal/cm<sup>2</sup>day*) である.

ハウス内のポテンシャル蒸発散量

#### 1. ポテンシャル蒸発散量の推定式

わが国では露地のポテンシャル蒸散発量を求める方 法として,温度法といわれるブラネイークリドル (Blaney-Criddle)法,ソーンスウエイト(Thornthwaite)法がよく使われてきた.温度は気象データの 内,最も基本的なデータであり入手し易い情報である. ブラネイークリドル法は次式で示される.

$$ET_p = f$$
 (温度,日照時間) (8)

ここで, *ET*<sub>p</sub>はポテンシャル蒸発量. これは温度, 日照時間を使って消費水量を推定する方法である. ただし f()は関数形を意味している. また, ソーンスウエ イト法は次式で示される.

$$ET_{p}=f$$
(温度, 昼間の長さ) (9)

これは温度,昼間の長さを使って消費水量を推定する 方法である。とくにブラネイークリドル法は,簡易な 式にもかかわらず,月単位の蒸発散量推定式としては 精度が高いことが知られている。これらの式のハウス 内への適用性については,放射量が日照時間あるいは 昼間の長さから間接的に評価されている点と,湿度, 風速が考慮されていない点とに問題が残る。とくにビ ニールを通した光の滅衰についての補正が必要となる。

計器蒸発量もポテンシャル蒸発散量を求める方法と して広く用いられている。計器蒸発量はパンの大きさ, 色彩,設置場所などによって影響されるので,それら によって定まるある関数を用いてポテンシャル蒸発散 量を求める。

$$ET_{P}=f$$
 (計器蒸発量) (10)

一般に(10)式は簡単な1次式で表すことができる.計 器蒸発量の値には水消費に関わる諸環境因子の影響が すべて含まれているので,ハウス内の気象測定に代用 できるという原理に基づいている.野外観測例によれ ば,直径20cmの計器蒸発量はポテンシャル蒸発散量 に近い値を示すとの報告が見られる.

混合法であるペンマン式は水面蒸発量を求める式と して提案された.ペンマン式は次のように表示できる. ET<sub>p</sub>=f(純放射量,風速,温度,湿度) (11)
これを書き直すと次式となる。

$$ET_{p} = \frac{\Delta}{\Delta + r} (Rn - G) + \frac{r}{\Delta + r} f(u) (ez^{0} - ez)$$
(12)

ここで、 $\Delta$ は飽和水蒸気圧曲線の温度に対する勾配 ( $mb^{\circ}$ C)、rは乾湿計定数( $mb^{\circ}$ C)、Rnは純放射量 ( $cal/cm^{2}day$ )、Gは地中熱伝達量( $cal/cm^{2}day$ )、f(u)は風速関数、 $u_{200}$ 、 $ez^{\circ}$ は気温換算した飽和水蒸気 圧(mb)、ezは水蒸気圧(mb)である。第2項の風速 関数には次の経験式が用いられている。

$$f(u) = 15.36(1.0 + 0.0062u_{200}) \tag{13}$$

ここで, u<sub>200</sub>は高度 200cm の風速 (km/day) である. 本式は野外接地気層内で風速分布が対数則に従う条件 下で得られたもので,自然対流,強制対流が同時に存 在するハウス内に適用するためには検討が必要である.

以上,野外におけるポテンシャル蒸発散量を推定す る4つの方法の中で,計器蒸発量法とペンマン法は原 理的にハウス内へも適用が可能と思われる.ただし, 計器蒸発量法ではパン係数,ペンマン法では風速関数 の設定が検討課題となる.

### 2. 計器蒸発量法とペンマン法

ハウス内のポテンシャル蒸発散量を推定する方法と して計器蒸発量法とペンマン法を選択し、両者の比較 を試みた。図13(a),(b)はそれぞれ密閉状態,側面開 放状態の場合について計器蒸発量とペンマン法の相関 を示したものである。密閉時の相関係数は(a)図に示 すように0.99と極めて高い。このとき回帰直線は次式 となった。

ここで、PEN、PAN はそれぞれペンマン法,計器蒸 発量法(mm/day)である。密閉条件下の風速は図 8 に示したように日中でも 20cm/s 程度である。こうし た弱風条件の場合,ペンマン式の第 2 項は第 1 項の放 射項に比較して極端に小さくなる。野外用の風速関数 が含まれる第 2 項の重みが小さいことは,密閉時のペ ンマン法は原理的にポテンシャル蒸発散量に近い値を 示すと考えられる。一方,この条件下で計器蒸発量が ペンマン法とほぼ1:1の対応を示していることは, 計器蒸発量の値もポテンシャル蒸発散量をよく表して いると推察できる。

雨よけ時の相関係数は(b)図に示すように0.90で



あった。このとき回帰直線は次式となった。

PEN = 0.34 PAN + 0.95 (雨よけ) (15)

この場合,計器蒸発量はペンマン法の2倍以上の値を 示している。側面からの外気流入の影響で計器蒸発計 の蒸発が促進されたものと思われる。一方,ペンマン 式は強制・自然対流が共存すること,ハウス内風速が 対数則でないこと等のため風速関数が適切でなく,第 2項の増加が十分でなく計器蒸発量と大きな差が生じ たものと思われる。

#### 3. ハウス内のポテンシャル蒸発散量の推定

1) 計器蒸発量

先に示したように、側面開放状態ではハウス内外の 温度,湿度,風速,日射量などの環境因子の間には比 較的高い相関があることが明かとなった。このことは 野外のポテンシャル蒸発散量の観測値から、雨よけハ ウス内の値を推定できることを意味している。密閉状 態では日射量,温度の相関は高いが,湿度,風速の相 関が低下するので,野外の値からの推定精度は低下す る。図14は密閉状態,側面開放状態におけるハウス内 外の計器蒸発量の相関を調べたものである。相関係数 は密閉,側面開放状態でそれぞれ0.84,0.82であった。 ハウス内外の計器蒸発量の値をそれぞれ EVPi, EVP。 (*mm/day*)とすれば両者の間には密閉状態,側面開 放状態についてそれぞれ次式の関係が得られた。

$$EVPi = 0.77 EVP_0 - 0.17$$
 (密閉) (16)





$$EVPi = 0.78EVP_0 + 1.15$$
(雨よけ) (17)

先にハウス外の計器蒸発量はポテンシャル蒸発散量に 近い値を示すことを指摘した。したがって、今回実験 に用いたハウス内のポテンシャル蒸発散量は、密閉時、 側面開放時でそれぞれ野外の約80%、90%に相当する 値であったと判断される。

2) 日射量

図15はハウス内の計器蒸発量と日射量との相関を示



図15 ハウス内の日射量と計器蒸発量の相関

表1 ハウス内の水消費環境因子と計器蒸発量の相関 係数

	湿度	温度	日射量	風速
密閉状態の計器蒸発量 側面開放状態の計器蒸発量	$-0.43 \\ -0.85$	0.41 0.76	0.94 0.98	0.37

したものである。相関係数は密閉時,側面開放時でそ れぞれ0.94,0.98であった。ハウス内における他の環 境因子と計器蒸発量との相関をまとめたものが表1で ある。とくに日射量との間には極めて高い相関が認め られる。

また先にハウス内外の日射量の間には1.0近くの相 関があることを示した。ビニール面の汚れのために透 過率は減少するが、(6)、(7)式に類した関係を用い てハウス外の日射量からハウス内の日射量を推定する ことは可能である。一方、ハウス内日射量からハウス 内の計器蒸発量を推定する式は図15より次式で与えら れる。

EVPi = 0.013RADi - 0.16 (密閉) (17)

EVPi = 0.026 RADi + 0.77(雨よけ) (18)

ここで, *EVPi* はハウス内の計器蒸発量 (*mm/day*), *RADi* はハウス内日射量 (*cal/cm<sup>2</sup>day*) である.

以上から、ハウス外日射量を測定することによりハ ウス内の計器蒸発量、すなわちポテンシャル蒸発散量 を推定することが可能となる.

## 摘 要

ハウス内の水消費環境について、密閉状態,側面開 放状態の条件で実験を行った。その結果次の事項が明 かとなった。

1. ハウス内外の水消費環境因子相互の相関を調査 した結果,密閉状態は側面開放状態に比べ,日射量以 外の環境因子はいずれも相関が低下する傾向が得られ た.

2. ハウス内における水消費環境因子と計器蒸発量 との相関の高さは日射量,湿度,温度,風速の順であっ た.とくに計器蒸発量と日射量の相関が極めて高くな ることが明かとなった.

3.密閉状態では計器蒸発量はペンマン法とは相関 が高く,またほぼ1:1の対応を示した。微風条件で はペンマン式第2項の重みは小さく,ハウス内に風速 関数を適用することの誤差は無視できるので,ペンマ ン式はポテンシャル蒸発散量を与えることになる。し たがって,今回用いた直径20cmの計器蒸発量によっ てハウス内のポテンシャル蒸発散量をよく推定できる ことが明かとなった。

## 文 献

- 岩切 敏 1971 栽培用ハウス内温度環境の予測と制 御に関する研究.国立防災科学技術センター研究 報告,6:1-139
- 鴨田福也,谷口利英,加藤一郎,坂田公男 1972 作 物の水分消費特性に関する研究第6報、東近農試 報、24:76-93
- 古在豊樹,林 真紀夫,鈴木 等,渡辺一郎 1982 温 室水耕栽培キュウリの蒸散発量と環境要因の関係. 農業気象,38(2):153-159
- 河野徳義 1984 ビニールハウスにおける強制換気時 の熱収支,農業気象,40(2):125-132
- Lake, J. V., J. D. Postlethwaite, G. SlaCK. and R. I. Edwards 1966 Seasonal variation in the transpiration of glasshouse plants. Agr. Meteorol. 3: 187-196
- 小倉裕幸 1969 空気調和ガラス室における入射エネ ルギと蒸散の関係。日作紀,38:163-167
- 佐藤展之 1989 パーソナルコンピュータによる温室 メロンかん水プログラムの試作.静岡農試報,34: 1-21
- 内島善兵衛,平木英二,井上君夫 1979 キュウリ栽 培ビニールハウスの熱収支. 農技研報, A36:89 -112

#### Summary

The development of greenhouse culture in Japan is outstanding. In 1992 the total greenhouse area reached to 58,300 ha. Consumptive use of water inside the greenhouses are not studied enough inspite of the development of greenhouse culture. In this paper, we discussed about the characteristic features of meterological conditons related to evapotranspiration, refering to the data observed in closed and partly opened greenhouses.

Regression coefficents were calculated on humidity, temperature, solar radiation and windspeed between the inside and the outside of greenhouse. The meteorological factors in the partly opened greenhouse showed higher regression than the factors in the closed condition. Solar radiation showed the highest regression with the pan evaporation both closed and partly opened conditions.

The applicability of Penman method was examined on estimating potential evapotranspiration in greenhouse. In the closed condition, pan evaporation data showed good agreement with Penman method but the data was 2 times higher than Penman method in the partly opened condition. These results shows that potential evapotranspiration is able to be estimated by Penman method, when windspeed is extreamly low as in closed greenhouse.

When convective conditions are affected by outside wind, Penman method has some difficulties in application, as wind term in the Penman equation include empirical constant derived from open field observation. The observed results shows pan evaporation is a good indicator on potential evapotranspiration, although it is affected by diameter, color, height, place and so on.