

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：九州大学農学部学藝雑誌. 49 (3/4), pp.169-177, 1995-03. 九州大学農学部
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) のチャンパー法、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是一般には气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。

わが国で見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ロカン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)、土壌温度(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、土壌温度、風速はデータロガーにより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じ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°Cに

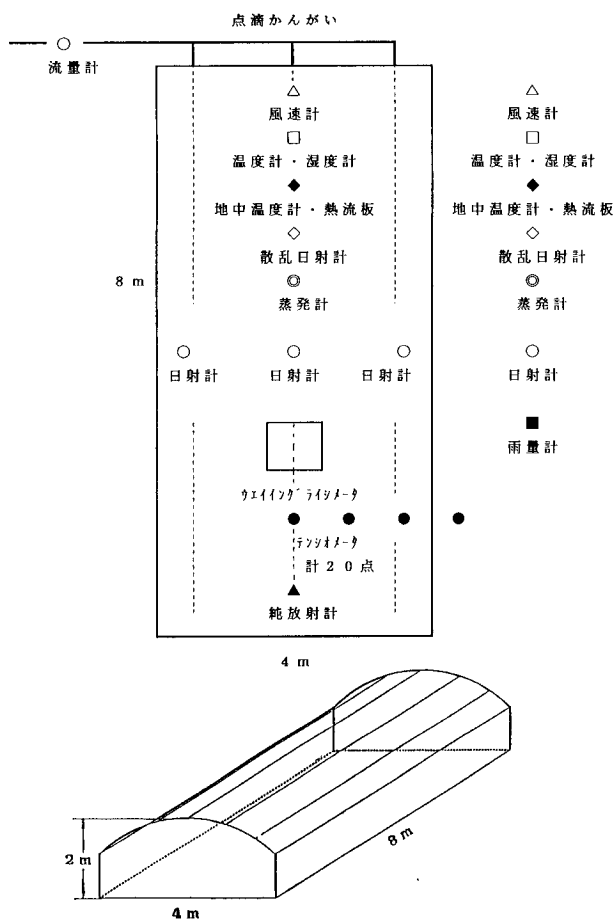


図1 計器配置状況

達しており、ハウス外との温度差は最大で15°C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°C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。

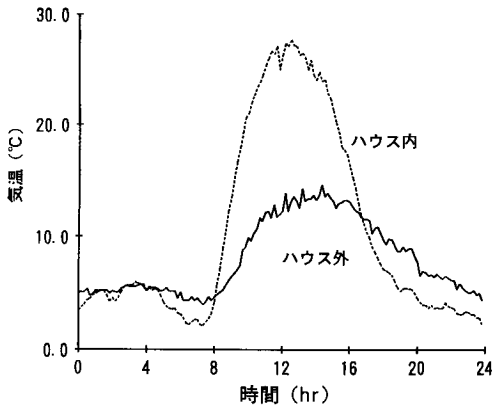


図2 密閉ハウス内外の気温経時変化 (1月9日)

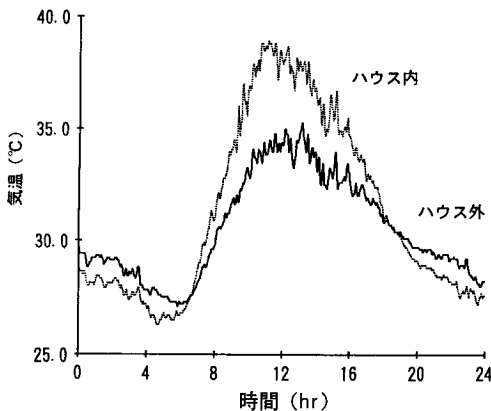


図3 側面開放ハウス内外の気温経時変化 (8月7日)

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。

$$TMP_i = 0.91 TMP_o + 1.95 \quad (\text{密閉}) \quad (1)$$

$$TMP_i = 1.00 TMP_o + 0.80 \quad (\text{雨よけ}) \quad (2)$$

ここで、 TMP_i 、 TMP_o 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

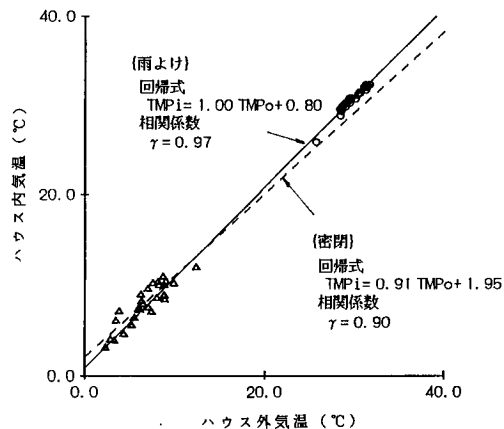


図4 密閉・側面開放(雨よけ)状態におけるハウス内外気温の相関

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。

$$HUM_i = 0.60HUM_o + 42.65 \quad (\text{密閉}) \quad (3)$$

$$HUM_i = 0.97HUM_o + 0.01 \quad (\text{雨よけ}) \quad (4)$$

ここで、 HUM_i 、 HUM_o 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。

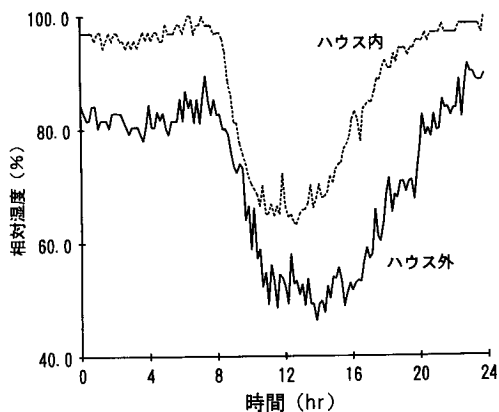


図5 密閉ハウス内外の相対湿度経時変化(1月9日)

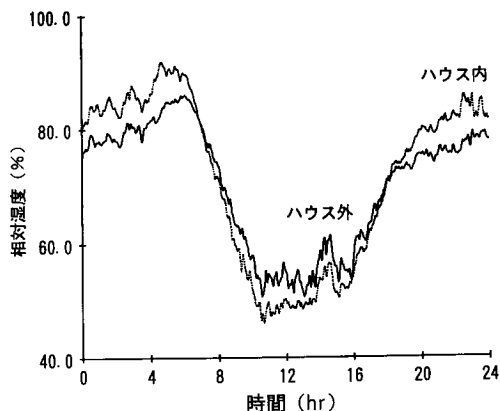


図6 側面開放ハウス内外の相対湿度経時変化(8月7日)

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

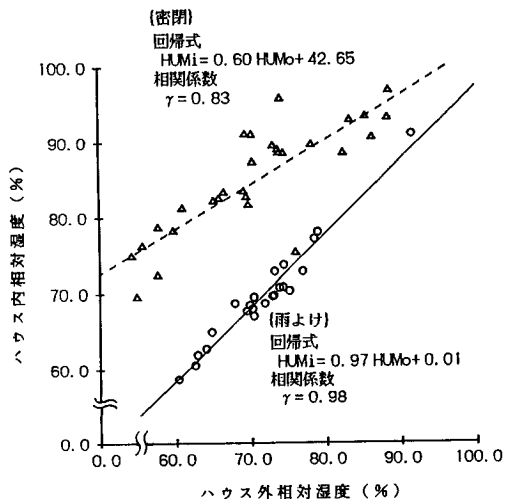


図7 密閉・側面開放(雨よけ)状態におけるハウス内外相対湿度の相関

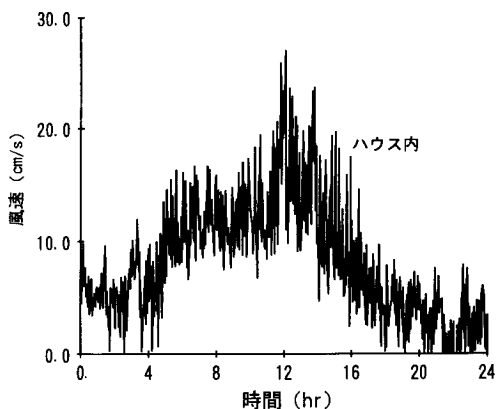


図8 密閉ハウス内の風速経時変化(1月9日)

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。

$$U_i = 0.49 U_o - 0.40 \quad (\text{雨よけ}) \quad (5)$$

ここで、 U_i 、 U_o 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

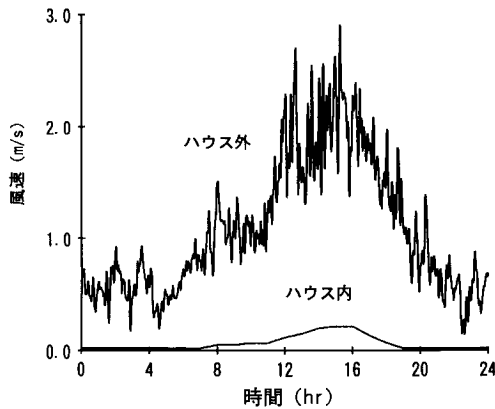


図9 側面開放(雨よけ)状態におけるハウス内外風速の経時変化(8月7日)

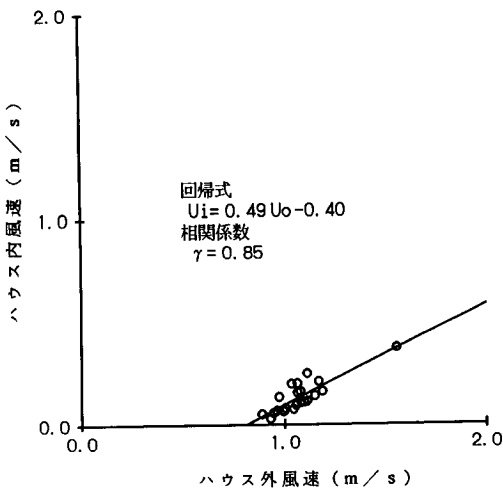


図10 側面開放(雨よけ)状態におけるハウス内外風速の相関

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は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ヶ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。

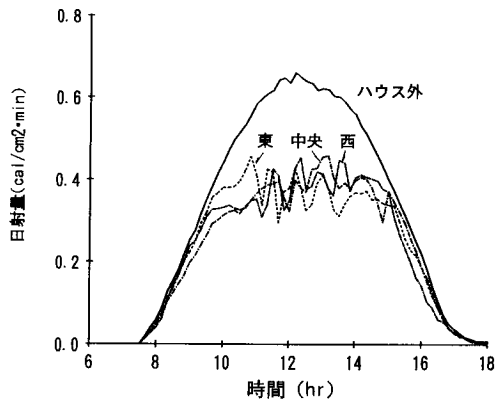


図11 ハウス内外日射量の経時変化(1月9日)

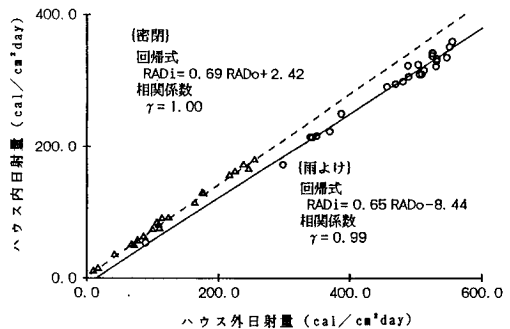


図12 ハウス内外日射量の相関(1月9日)

$$RAD_i = 0.69RAD_0 + 2.42 \quad (\text{密閉}) \quad (6)$$

$$RAD_i = 0.65RAD_0 - 8.44 \quad (\text{雨よけ}) \quad (7)$$

ここで、 RAD_i 、 RAD_0 はハウス内、外の1日当たり日射量 ($cal/cm^2/day$) 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発散量を求める方法として、温度法といわれるブラネイクリドル (Blaney-Criddle) 法、ソーンズウェイト (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やすい情報である。ブラネイクリドル法は次式で示される。

$$ET_p = f \quad (\text{温度, 日照時間}) \quad (8)$$

ここで、 ET_p 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 $f(\quad)$ は関数形を意味している。また、ソーンズウェイト法は次式で示される。

$$ET_p = f \quad (\text{温度, 昼間の長さ}) \quad (9)$$

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減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。

$$ET_p = f \quad (\text{計器蒸発量}) \quad (10)$$

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。

$$ET_p = f \quad (\text{純放射量, 風速, 温度, 湿度}) \quad (11)$$

これを書き直すと次式となる。

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

ここで、 Δ 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^0 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。

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

ここで、 u_{200} は高度200cmの風速 (km/day) である。本式は野外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。

$$PEN = 0.81PAN + 0.24 \quad (\text{密閉}) \quad (14)$$

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

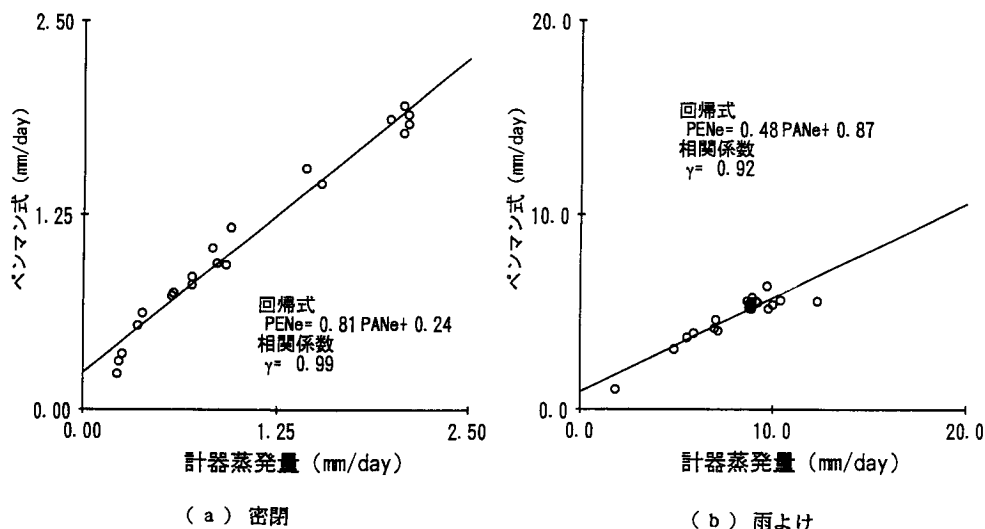


図13 (a) 密閉時のペンマン法と計器蒸発量の相関
(b) 側面開放時のペンマン法と計器蒸発量の相関

あった。このとき回帰直線は次式となった。

$$PEN = 0.34 PAN + 0.95 \quad (\text{雨よけ}) \quad (15)$$

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 EVP_i , EVP_o (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。

$$EVP_i = 0.77 EVP_o - 0.17 \quad (\text{密閉}) \quad (16)$$

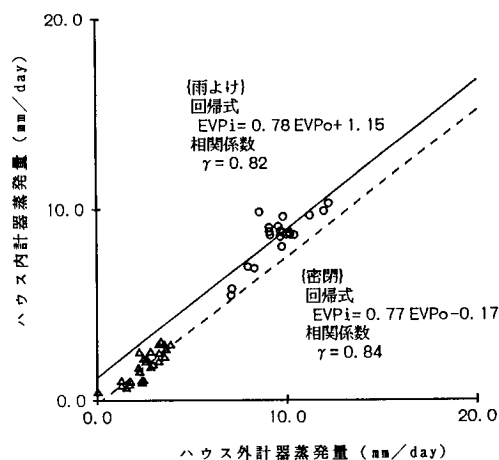


図14 密閉・側面開放(雨よけ)状態におけるハウス内外計器蒸発量の相関

$$EVP_i = 0.78 EVP_o + 1.15 \quad (\text{雨よけ}) \quad (17)$$

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

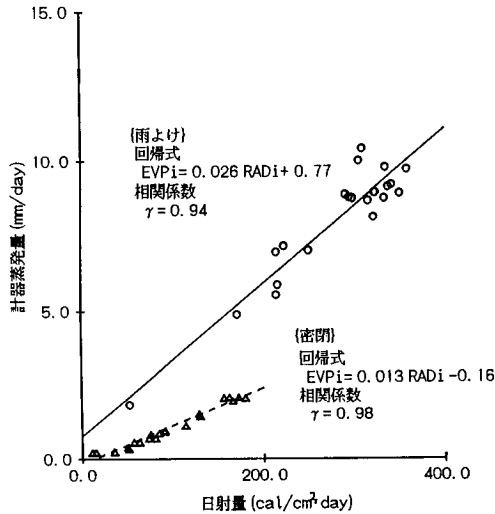


図15 ハウス内の日射量と計器蒸発量の相関

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	-0.43	0.41	0.94	—
側面開放状態の計器蒸発量	-0.85	0.76	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。

$$EVP_i = 0.013RAD_i - 0.16 \quad (\text{密閉}) \quad (17)$$

$$EVP_i = 0.026RAD_i + 0.77 \quad (\text{雨よけ}) \quad (18)$$

ここで、 EVP_i はハウス内の計器蒸発量 (mm/day), RAD_i はハウス内日射量 ($cal/cm^2 day$) 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らかとなった。

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ーと蒸散の関係。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

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 developement 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 evaporationin 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.