



# 岐阜大学機関リポジトリ

Gifu University Institutional Repository

## 赤外線吸収液流下式屋根を用いた温室内の昇温特性に関する基礎研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2022-06-07 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田中, 逸夫 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12099/5790">http://hdl.handle.net/20.500.12099/5790</a>

赤外線吸収液流下式屋根を用いた温室内の  
昇温特性に関する基礎研究

田 中 逸 夫

生物生産制御学講座  
(1989年8月1日受理)

A Fundamental Study on the Characteristics  
of Temperature Rise in a Greenhouse with a Fluid-Roof  
Absorbing Infrared Rays.

Itsuo TANAKA

*Department of Controlled Plant Production*  
(Received August 1, 1989)

SUMMARY

In the previous paper<sup>9)</sup> the author reported on experimental results performed with a miniature greenhouse so as to examine the effect of a roof absorber of infrared rays on a roof must be cooled in order to promote the suppression of temperature rise inside a greenhouse.

This paper deals with some experimental and analytical studies of the thermal characteristic in a greenhouse which is important to establish the performance and the operating condition of the fluid-roof. The experimental apparatus and procedure used here are much the same as those shown in the previous paper, except for varying the thickness of liquid layer on a roof and the intensity of the artificial lighting. The theoretical analysis is carried out under a condition of one-dimensional steady-state in thermal and optical transport phenomena with some assumptions.

The principal results shown in this paper are as follows:

- 1) The degree of temperature rise, defined as the difference between inner and outer air temperatures of a greenhouse, is directly proportional to the difference between liquid temperature in a double roof and outer air temperature.
- 2) The relative value of the degree of temperature rise is also proportional to the intensity of solar radiation transmitted through a roof depending on the concentration and the thickness of the absorbing liquid.
- 3) The characteristic equation of temperature rise derived from the theoretical analysis shows good agreement qualitatively with the experimental result.

Res. Bull. Fac. Agr. Gifu Univ. (54) : 105—111, 1989.

要 約

著者は前報<sup>9)</sup>において、赤外線の吸収屋根が温室内の熱的及び光学的環境に及ぼす影響を把握するために行った小模型による実験結果を報告した。そして特に、温室内温度上昇の抑制を促進するためには、屋

根部の選択吸収体を冷却する必要があることを指摘した。

本報では、この赤外線吸収屋根の性能と操作条件を確立する上で重要となる、温室内の温度特性に関して行った実験及び解析の結果について述べている。実験装置及び実験手順は、屋根の液体層厚さと人工光源の強度を変化させたことを除いて、前報で示したものとほとんど同じである。理論解析はいくつかの仮定を導入し、熱及び光学的移動現象が一次元定常状態の場合を対象として行っている。本報告で示された主な結果は以下のことである。

- 1) 温室内外の空気温度の差で定義される昇温度は屋根の液体温度と外部空気温度の差に比例する。
- 2) 昇温度の相対値は屋根面を通過して入射する日射強度（これは赤外線吸収液の濃度と厚さに応じて変化する）に比例する。
- 3) 理論解析により導出された昇温特性式は実験結果の傾向と定性的に良く一致する。

## 結 言

屋根に赤外線選択吸収液を流下させることにより温室内の昇温を抑制し、その吸収熱を蓄熱して夜間の加温に利用することを目的とした“液体流下式屋根温室”は一部の国で実用に供されているようである<sup>1,2)</sup>が、屋根を二重にして液体をその中で循環させなければならないことに付随した構造上の問題等から通常のパッシブな温室には広く採用されるには至っていない。

しかし、植物工場に代表されるような高度の環境制御を行い周年栽培をめざす気密型のアクティブな温室においては、その普及の妨げとなっているランニングコスト（空調と照明用電力がその大部分を占める）の大幅な削減という観点から、赤外線選択吸収屋根の利用は有効であると思われる。そのため高性能な赤外線選択吸収体の開発をはじめとして、この原理を利用した温室に関する研究は重要であると考えられる。従来、この赤外線吸収屋根温室を対象とした研究としては、温室モデルや作物生育モデル等を導入し特定の条件下で行った温室内諸環境の経時変化をはじめとした作物栽培に関するシミュレーション及び普通のガラス温室の場合との比較結果が一部の研究者により報告されている<sup>3-7)</sup>。しかしその詳細については必ずしも明確に示されていない。また最適な操作条件の確立のために必要となる基礎的な各種特性（例えば光学的特性、集熱特性、室内温度特性）についての系統的な研究は光学的特性<sup>8)</sup>に関するもの以外は見あたらない。

そこで前報<sup>9)</sup>においては、赤外線吸収屋根が温室内の光強度と温度に及ぼす影響についての模型実験の結果を示し、特に屋根部流下液の冷却が昇温抑制の促進に重要であることを述べた。

本研究では室内の昇温特性についての基礎的知見を得ることを目的として、各種条件下での定常状態における昇温度の測定実験を行い、さらに理論解析によって昇温特性式を導出し実験結果との比較検討を行ったので、その主要な結果を報告する。

## 使 用 記 号

$C_p$	: 液体の比熱	[J/(kg · K)]	$T_f$	: 床面温度	[K]
$F$	: 屋根面と外部間の形態係数	[-]	$T_a$	: 室内空気温度	[K]
$h$	: 床面と室内空気間の熱伝達率	[W/(m <sup>2</sup> · K)]	$T_1$	: 屋根出入口間の平均液温	[K]
$I_{in}$	: 室内の照度	[klx]	$T_{1in}$	: 屋根入口液温	[K]
$K_{a1}$	: 室内空気と液間の熱通過係数	[W/(m <sup>2</sup> · K)]	$T_{1o}$	: 屋根出口液温	[K]
$K_{1o}$	: 液と外気間の熱通過係数	[W/(m <sup>2</sup> · K)]	$T_o$	: 外気温	[K]
$l$	: 屋根部液層厚さ	[mm]	$W$	: 液の屋根単位面積当たりの質量流量	[kg/(m <sup>2</sup> · s)]
$Q$	: 屋外日射量	[W/m <sup>2</sup> ]	$\alpha$	: 床面の日射吸収係数	[-]
$Q_{in}$	: 日射の室内透過量	[W/m <sup>2</sup> ]	$\epsilon$	: 液と外部間の相互放射を考慮した温度放射率	[-]
$Q_1$	: 液の日射吸収量	[W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma$	: ステファン・ボルツマン定数	$= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$
$Q_r$	: 屋根面での日射反射量	[W/m <sup>2</sup> ]	$\omega$	: 水溶液濃度	[wt%]
$q_{f-1}$	: 床面と液間の正味温度放射量	[W/m <sup>2</sup> ]			
$q_{1-s}$	: 液と外部間の正味温度放射量	[W/m <sup>2</sup> ]			

実 験

実験装置及び実験方法

今回の実験で用いた実験装置並びに実験方法は前報<sup>9)</sup>で詳細に示したものとほぼ同様であるので、以下には今回追加した部分の説明と実験方法の概要を述べる程度にとどめる。まず二重屋根部の液層厚さの影響を調べるために、新たに流路厚さが5mmの二重屋根を厚さ5mmの透明アクリル板で製作した。なお、その大きさと形状及び温度測定箇所は10mmの場合と同一である。赤外線を選択吸収液としては前回と同様に硫酸銅(CuSO<sub>4</sub>)水溶液を用い、その濃度 $\omega$ も0(水)、2.5、5.0%の三種類に設定した。また日射量は、前報で示したメタルハライドランプ(出力250W、色温度5200K)を2台又は3台使用することにより、今回の実験では二通り(Q=262, 152W/m<sup>2</sup>)に設定し、その影響も検討した。

実験はポンプによりタンク内の液を二重屋根部へ循環させ、流量(ただし約2.0リットル/minに固定)を各所のバルブで、また液温をタンク内に設置した冷却コイルに水道水を流して各々調節し、人工光源を点灯してから各部の温度が一定になる2~4時間の範囲で各測定を3分毎に繰り返して行った。なお各測定方法も前報と同様であり、以下の実験結果に示す液温度及び室内空気温度も前報で述べた理由から平均値を用いた。

実験結果

Fig. 1に室内への日射透過量 $Q_{in}$ とCuSO<sub>4</sub>水溶液濃度 $\omega$ の関係を、またFig. 2に室内の照度 $I_{in}$ とCuSO<sub>4</sub>水溶液濃度 $\omega$ の関係を示した。濃度 $\omega$ の増加とともに日射透過量は大幅に減少するのに対し、照度の低下はあ

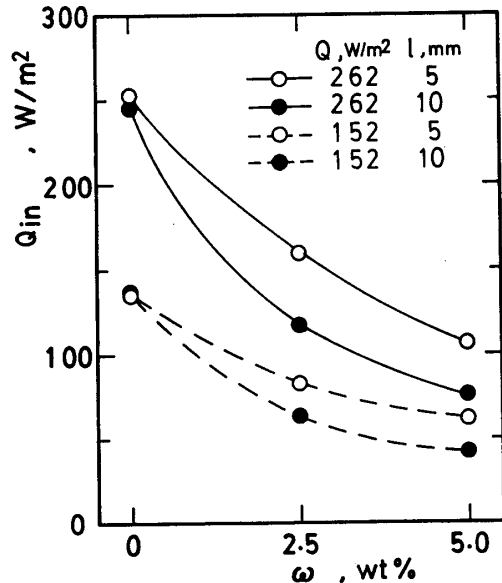


Fig. 1 Variation of the amount of light transmitted in a greenhouse with concentration of aqueous copper sulphate solution.

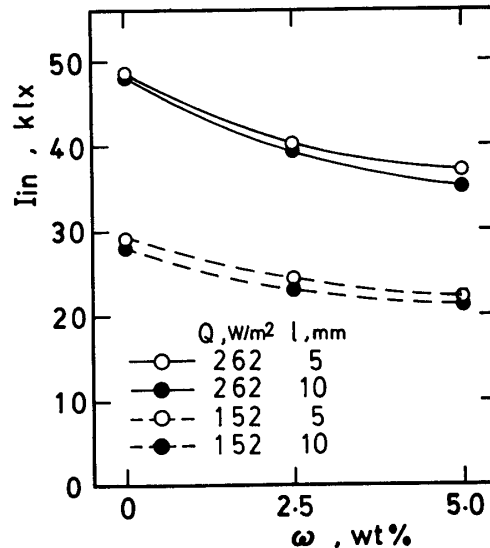


Fig. 2 Variation of illuminance in a greenhouse with concentration of aqueous copper sulphate solution.

まりないというCuSO<sub>4</sub>水溶液の赤外線選択吸収特性の良さが明確に示されている。また当然のことながら、同一の屋外日射量Q及び濃度 $\omega$ の場合に液層厚さ $l$ が大きくなるほど $Q_{in}$ 、 $I_{in}$ 共に減少している。それらの関係は一般に $l$ に対して指数関数的に減少することが光の透過吸収の理論から予測されるが、CuSO<sub>4</sub>水溶液についての光の透過率と液層厚さの関係はMorrisら<sup>8)</sup>の実験で詳細に示されている。

Fig. 3に各部が定常状態に達した時の室内の空気温と外気温の差( $T_a - T_o$ )、ここでは昇温度と呼ぶ、と屋根部流下液の温度と外気温の差( $T_l - T_o$ )の関係を示した。同図から同一濃度 $\omega$ 、同一液層厚さ $l$ における昇温度はいずれの場合も図中に示した直線ではほぼ近似でき、液温と外気温の差( $T_l - T_o$ )にほぼ比例する特性があることがわかる。また、濃度の増加とともに透過量 $Q_{in}$ が減少するために昇温度も相対的に減

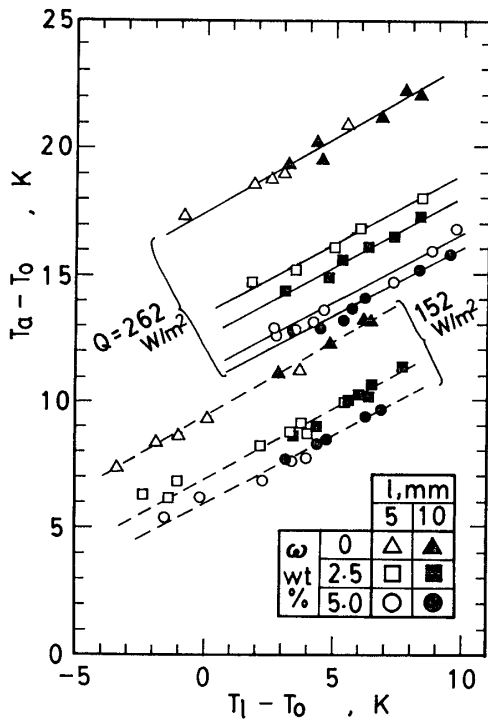


Fig. 3 Relation between the degree of temperature rise in a greenhouse and the temperature difference between liquid in a roof and open air.

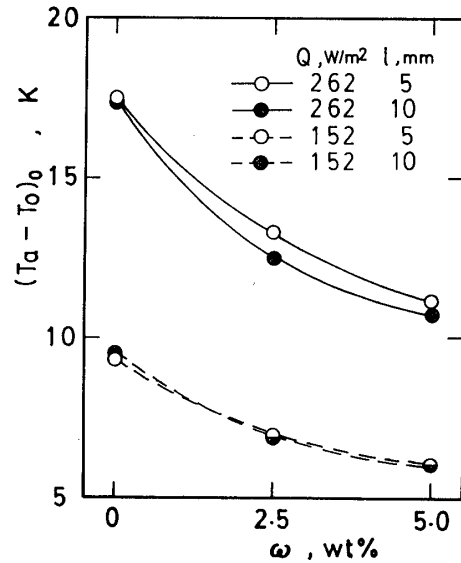


Fig. 4 Relation between the degree of temperature rise in a greenhouse at  $T_l - T_o = 0K$  and concentration of aqueous copper sulphate solution.

少すること、 $\omega = 0$  すなわち水の場合及び屋外日射量がかなり小さい  $Q = 152 W/m^2$  の場合には液層厚さ  $l$  の影響は殆ど見られないこともわかる。そこで濃度及び液層厚さが昇温度に及ぼす影響を定量的に比較する目的で、 $T_l - T_o = 0 K$  における各条件での昇温度(ただし Fig. 3 に示した直線で近似した値を用いた)の比較を Fig. 4 に示した。屋外日射量  $Q$  が増加するにつれて、 $\omega$  及び  $l$  の影響はいずれも大きくなっていく傾向が見られる。実際の太陽日射強度は夏季の昼間には  $700 \sim 800 W/m^2$  にもなることを考慮すれば、日射強度に応じた適切な濃度、液層厚さの選択も温室内の昇温抑制には重要となることが予想される。ただし、濃度や液層厚さを過剰に増加させると植物の生育に必要な近赤外線の減少という問題が生じるので各種条件下での分光透過率を明確にしておく必要がある。

### 解 析

前節の模型実験の結果で明らかになった、温室内の昇温度が二重屋根部を流下する液体の温度と外気温の差に比例するという昇温特性を理論的に検証する目的で解析を行った。以下に解析過程とその結果について述べる。

#### 解析モデル

解析は模型実験との対応及び解析の単純化のために、

- ① 温室の周囲は屋根部を除いて外部と完全に断熱、② 熱及び日射の収支に及ぼす側壁の影響は無視、③ 屋外の日射、温度等の気象条件は一定、④ 屋根と床の面積は等しい、⑤ 室内の空気温度は一樣、⑥ 屋根部流入液の温度は一定、の条件を用い、熱及び光の移動現象が温室の高さ方向のみの一次元定常状態を対象として行う。

Fig. 5 に本解析で対象とする物理モデル及び各量記号を示した。図の中央に白抜き矢印で示したものが日射に関するもので、上の方から屋外日射量を  $Q$ 、屋根部での反射量を  $Q_r$ 、液に吸収される量を  $Q_{in}$ 、そのうち床面に吸収される量を  $\alpha Q_{in}$  (ただし  $\alpha$  は床面の吸収係数) とすれば、反射される量は  $(1 - \alpha) Q_{in}$

となる。なおこの反射成分は全て液に吸収されるものとする。

つぎに床面温度を $T_f$ 、室内空気温度を $T_a$ 、屋根出入口間の平均液温を $T_l$ 、外気温度を $T_o$ とすると、定常状態における各温度の大小関係は $T_f > T_a > T_l$ となる。ただし $T_o$ と他の温度の大小関係は理論上特に限定されない。そこで図中には熱の正味の移動方向を矢印で示した。図の右側に黒抜き矢印で示したものが対流と伝導による熱輸送に関するもので、 $h(T_f - T_a)$ ：床面から室内空気への熱伝達による伝熱量、 $K_{a1}(T_a - T_l)$ ：室内空気と液間の熱通過による伝熱量、 $K_{l0}(T_l - T_o)$ ：液と外気間の熱通過による伝熱量である。また左側に普通の矢印で示したものが温度（熱）放射による熱輸送に関するもので、 $q_{f-1}$ ：床面と液間の正味の温度放射量、 $q_{l-s}$ ：液と外部間の正味の温度放射量である。ただし、これら温度放射には本来屋根部個体壁の存在を考慮しなければならないが、固体壁及び液側の伝熱抵抗は空気側のそれに比べて十分小さいので屋根部の固体壁と液の温度は流れ方向に垂直な断面では一様であると考えられるため、便宜的に屋根部での温度放射は固体壁の存在を無視して全て液によるものとした。

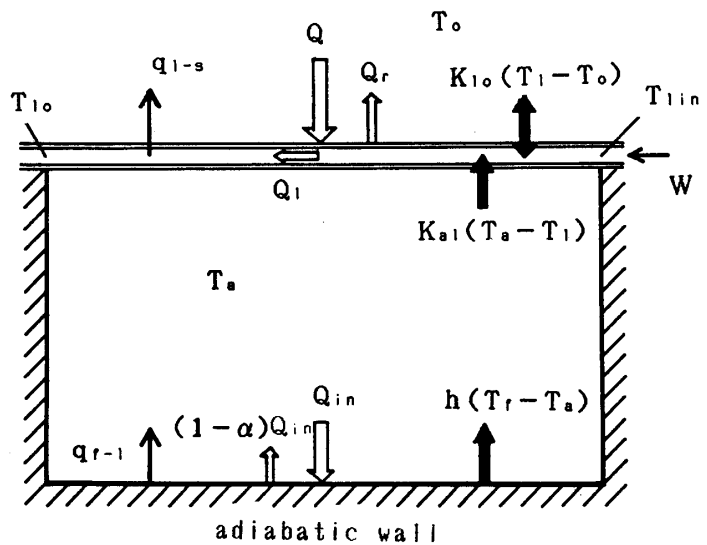


Fig. 5 Physical model for theoretical analysis.

なおこれらの諸量は全て単位時間単位床（屋根）面積当たりの量である。

また二重屋根部を流れる液の単位時間単位屋根面積当たりの質量流量を $W$ 、入口液温度を $T_{lin}$ 、出口液温度を $T_{lo}$ で表すことにする。

**昇温特性式の導出**

定常状態における単位床（屋根）面積・単位時間当りの日射の収支及び各部の熱収支をとると、各々以下ようになる。

[日射の収支]

$$Q = Q_l + Q_{in} + Q_r \dots \textcircled{1}$$

[熱収支]

床面に関して

$$\alpha Q_{in} = q_{f-1} + h(T_f - T_a) \dots \textcircled{2}$$

室内空気に関して

$$h(T_f - T_a) = K_{a1}(T_a - T_l) \dots \textcircled{3}$$

屋根部流下液に関して

$$Q_l + (1 - \alpha)Q_{in} + q_{f-1} + K_{a1}(T_a - T_l) = K_{l0}(T_l - T_o) + q_{l-s} + WC_p(T_{lo} - T_{lin}) \dots \textcircled{4}$$

ただし、左辺第二項は床面での日射の反射成分は全て液に吸収されるとしている。

以上の各式をもとに室内空気の昇温特性式を導くために、まず式④を空気温度 $T_a$ に関して整理し、さらにその両辺に $-T_o$ を加えると次式が得られる。

$$T_a - T_o = 1/K_{a1} [(K_{a1} + K_{l0})(T_l - T_o) + q_{l-s} + WC_p(T_{lo} - T_{lin}) - \{Q_l + (1 - \alpha)Q_{in} + q_{f-1}\}] \dots \textcircled{5}$$

ここで上式の右辺に含まれる、屋根部の液と外部間の正味の温度放射 $q_{l-s}$ は次式

$$q_{l-s} = F\epsilon\sigma(T_l^4 - T_o^4) = F\epsilon\sigma(T_l^3 + T_l^2T_o + T_lT_o^2 + T_o^3)(T_l - T_o)$$

で近似できるが、狭い範囲の温度変化の場合には上式右辺の絶対温度の3乗の項の変化率は温度差の項の

変化率に比較してかなり小さく、従ってこの項はほぼ一定と見なせるので、 $q_{1-s}$ を次式のように液温と外気温の差の関数で近似する。

$$q_{1-s} = k(T_1 - T_o) \dots \textcircled{6}$$

ここで、 $k = F\epsilon\sigma(T_1^3 + T_1^2T_o + T_1T_o^2 + T_o^3)$ である。

また、 $q_{r-1}$ には式②、③の関係から得られる次式、

$$q_{r-1} = \alpha Q_{in} - h(T_f - T_a) = \alpha Q_{in} - K_{a1}(T_a - T_1) \dots \textcircled{7}$$

を用い、さらに屋根面の流下液が入口から出口までに受け取る正味の熱量が次式、

$$WC_p(T_{10} - T_{1in}) = C_1(T_a - T_1) - C_2(T_1 - T_o) + Q_1 \dots \textcircled{8}$$

(ただし、 $C_1$ 、 $C_2$ は正の定数)で与えられると仮定して、これらを式⑤へ代入すると、

$$\begin{aligned} T_a - T_o &= 1/K_{a1} [(K_{a1} + K_{10})(T_1 - T_o) + k(T_1 - T_o) + C_1(T_a - T_1) \\ &\quad - C_2(T_1 - T_o) + Q_1 - \{Q_1 + (1 - \alpha)Q_{in} + \alpha Q_{in} - K_{a1}(T_a - T_1)\}] \\ &= 1/K_{a1} [(K_{a1} + K_{10} + k - C_2)(T_1 - T_o) + (C_1 + K_{a1})(T_a - T_1) - Q_{in}] \dots \textcircled{9} \end{aligned}$$

上式右辺第二項の $(T_a - T_1)$ を $(T_a - T_o) - (T_1 - T_o)$ と置き換えて整理すれば、最終的に次の昇温特性式が導かれる。

$$T_a - T_o = \{1 - (K_{10} + k - C_2)/C_1\}(T_1 - T_o) + Q_{in}/C_1 \dots \textcircled{10}$$

### 実験結果との比較及び考察

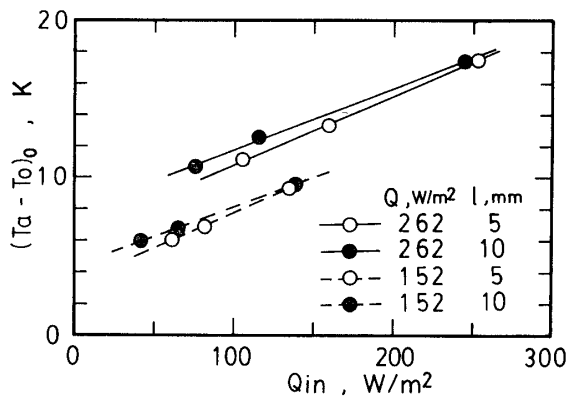


Fig. 6 Relation between the degree of temperature rise in a greenhouse at  $T_1 - T_o = 0K$  and the amount of light transmitted in a greenhouse.

さらに、式⑩からは $T_1 = T_o$ の場合の昇温度 $(T_a - T_o)_0$ は日射の室内透過量 $Q_{in}$ に比例する事もわかる。そこでFigs. 1,4に示した値を用いて実際に $(T_a - T_o)_0$ を $Q_{in}$ に対してプロットするとFig. 6のような直線関係になり、確かに実測値も比例関係になることがわかる。なお $C_1$ の値は、いずれの日射条件でも、液層厚さ5mmの場合は $20W/(m^2 \cdot K)$ 、10mmの場合は $25W/(m^2 \cdot K)$ である。この値はWalkerら<sup>10)</sup>が屋根上面に温水を流下させて測定した温水と外部空気間の熱伝達係数(無風状態で $19.45W/(m^2 \cdot K)$ )に近い値である。しかしFig. 6の関係はその原点を通る傾向にない点で式⑩と若干異なる結果となっている。実測値の範囲よりもさらに小さい $Q_{in}$ の範囲で室内の自然対流が弱まる事に起因して $C_1$ の値がさらに小さくなることも十分予想されるが、いずれにしても本解析で仮定した式⑧の妥当性及び式⑩の実用規模の温室での適応性の検証も含めて今後さらに検討が必要と思われる。

### 結 言

赤外線吸収液流下式屋根を用いた場合の温室昇温特性を解明する目的で、人工光を用いた屋内模型実験を行い昇温度に及ぼす液濃度と液層厚さの影響を定量的に調べた。さらに、単純化したモデルによる解析を行い昇温特性式を導出して実測値との比較を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

本解析により得られた昇温特性式⑩は室内空気の昇温度 $(T_a - T_o)$ が液温と外気温の差 $(T_1 - T_o)$ に比例するというFig. 3に示した実測値の傾向と一致することがわかる。またその勾配は伝熱諸係数の関数となっている。これらの値は温室の材料や形状及び内外の空気流動の状態に大きく影響されるものである。本模型実験から得られているこの勾配はいずれも約0.55~0.6の範囲の大きさであり、各種条件間での顕著な相違は見られない。このことは本実験では液層厚さを5mmと10mmに変化させたこと以外にはこれら伝熱係数に影響する要因を一定に保ったからであろう。

- 1) 定常状態における室内の昇温度は、屋外日射強度、赤外線吸収液の濃度及び液層厚さが同じであれば、液温と外気温との差に正比例する。
- 2) 昇温度は赤外線吸収液の濃度及び液層厚さの増加、すなわち日射の室内透過量の減少とともに減少し、昇温度の相対値（液温と外気温の差が等しい場合について比較した各条件下での昇温度）は日射の室内透過量に比例する。
- 3) 解析により導出した昇温特性式は実測値の傾向と良く一致する。

今後残された問題点及び実用規模温室における変動する気象条件下での実測値を収集して本研究結果の適応性の検討を加える必要がある。

最後に、実験の遂行に当たっては当時本学部農業工学科四年生であった岡田尚志、古橋友雄両君の協力があったことをここに記して誠意を表します。

## 文 献

- 1) Damagnez, J.: フランスでの施設栽培と省エネルギー対策, 施設園芸とエネルギー (施設園芸国際シンポジウム組織委員会編・日本農村情報システム協会): 48-60, 1980.
- 2) 高倉 直: イスラエルの施設園芸, 農業気象37(4): 343-349, 1982.
- 3) Van Bavel, C. H. M. & Damagnez, J.: A simulation model for energy storage and savings of a fluid-roof solar greenhouse, *Acta Hortic.*, 76: 229-236, 1978.
- 4) Van Bavel, C. H. M., Sadler, E. J. & Damagnez, J.: Analysis of heat and water stress of plants in greenhouse, *ibid.* 107: 71-78, 1980.
- 5) Van Bavel, C. H. M., Damagnez, J. & Sadler, E. J.: The fluid-roof solar greenhouse: energy budget analysis by simulation, *Agric. Meteorol.* 23: 61-76, 1981.
- 6) Chiapale, J. P., Van Bavel, C. H. M. & Sadler, E. J.: Comparison of calculated and measured performance of a fluid-roof and a standard greenhouse, *Energy in Agric.*, 2: 75-89, 1983.
- 7) Van Bavel, C. H. M.: Projecting crop growth in a fluid-roof solar greenhouse, *Acta Hortic.* 87: 301-310, 1987.
- 8) Morris, L. G., Trickett, E. S., Vanstone, F. H. & Wells, D. A.: The limitation of maximum temperature in a glasshouse by the use of a water film on the roof, *J. Agric. Eng. Res.*, 3: 121-130, 1958.
- 9) 田中逸夫・石井征亜: 赤外線吸収屋根を用いた温室内の熱環境制御に関する基礎研究, 岐阜大農研報(53): 159-165, 1988.
- 10) Walker, P. N., Scarborough, J. N. & Rand, H. J.: An experimental surface-heated greenhouse, *Trans. ASAE*, 25 (4): 1022-1025, 1982.