

温水の掛け流し式温室に関する研究

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
著者	横田, 廉一 堀口, 郁夫
巻/号	26巻2号
掲載ページ	p. 71-75
発行年月	1970年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



温水の掛け流し式温室に関する研究

横 田 廉 一 ・ 堀 口 郁 夫

(北海道大学農学部農業物理教室)

The Observation of the Glasshouse by the Use of Warm Water Films
on the Roof and Wall.

Renichi YOKOTA and Ikuo HORIKUCHI

(Department of Agricultural Engineering, Hokkaido University, Sapporo)

1. ま え が き

温水を用いて温室を加温する方法としては、従来、温室に配管されたパイプに高温の温水を送水し、パイプよりの直接の放熱による方法か、または、温水放熱器を用いて放熱を行なう方法等が、広く行なわれてきた。しかし、温水温度が低い場合は、これらの方法では放熱面積を非常に大きくしないと、温室内の気温を作物の生育に適するまで維持することはむづかしい。このような低温の温水を、温室の加温に利用するために考えられた方法として、温水を屋根や壁の上に掛け流して屋根、壁全体を放熱板として、また、外気温に対する保温板として使用する方法がある。この方法によると、15~25°C程度の低温水でも、北海道の厳寒期に低温性の野菜を栽培することが可能で、大量にこのような温水がえられる工場等の廃水や、冷泉を、有効に利用出来る。

本報告は、昭和40年以来、北海道電力技術研究所が江別発電所の冷却廃水を利用して加温している温室について、昭和42年から44年まで、測定した結果を、とりまとめたものである。

2. 温室の形状と温水の状態

「温室の形状 測定に使用した温室は、幅 6.0m、長さ 19.5m、高さ 2.8m の大きさで、屋根の勾配が約 4 度、壁は約 70 度に傾斜した、ほぼ台形状の構造で温水は、棟の上に置かれた径 3 inch ビニール管から、毎時 13.0~19.0m³ の量を屋根、壁に掛け流すのである。屋根には、3 mm のガラスを使用し、壁は、1.0mm または 2.0mm の硬質透明ビニール板が使用され、温室の方向は中心線が南北方向に対し、21.5度、逆時計方向に傾

むいている。

「温水温度 掛け流している温水は、発電所の冷却廃水で、発電機の負荷により水温は一定でないが、昭和41年11月から42年4月までの測定では、約 12.0~22.0°C であった。

「掛け流し水の状態 温水を棟のビニール管から毎時 13.0~19.0m³ で流すと、流れはいわゆる薄層流 (Thin sheet flow) となって屋根、壁を流下する。流下中の温水は、熱を放出し、その一部が屋根面、壁面を伝わって、温室を暖ため、一部は外気に放熱される。したがって、流下する水量が多いほど、すなわち流下する水膜が厚いほど、流下中の温度低下は少なく、また、屋根面、壁面を伝わって温室に伝達される熱量も多くなる。この水膜の厚さは、一般に、つぎの式で計算されることが知られている。

$$t = \sqrt[3]{\frac{3q\nu}{g \sin \theta}} \dots \dots \dots (1)$$

t: 薄層流の厚さ q: 単位幅あたりの流量
 ν : 流体の動粘性係数 g: 重力の加速度
 θ : 勾配

この式を用いて計算すると

13.0m³/h の時 屋根 0.08cm, 壁 0.03cm

19.0m³/h の時 屋根 0.09cm, 壁 0.04cm

となる。しかし一般には、薄層流は、ある状態の時、転波列が発生し計算値とは必ずしも正確には一致せず、実際の温室においても、この現象がみられ、屋根において約 0.05~0.28cm と場所により変動があった。

流下する温水の平均流速は、

層流の場合

$$v/U_* = U_* t / (3\nu) \dots \dots \dots (2)$$

乱流の場合 (勾配があまり急でない時)

* 43年、44年全国大会にて発表

$$v/U_* = A_5 - 2.5 + 5.75 \log(U_* t / \nu) \dots (3)$$

v : 平均流速 U_* : 摩擦速度

A_5 : 常数(5.0~5.5)

で表わされる。層流の計算式を用いて、実際の屋根における温水の平均流速を計算すると、

13.0m³/h の時 12.7cm/sec

19.0m³/h の時 16.1cm/sec

となるが、実測値は波速の影響などでかなり速く、19.0~52.5cm/secにも達する所がある。なお、波速を次式により計算すると、

$$w = \frac{6}{5} \cdot v + \sqrt{gt + \frac{6}{25} \cdot v^2} \dots (4)$$

13.0m³/h の時 26.1cm/sec

19.0m³/h の時 31.6cm/sec

となる。

3. 温室内の気象状態

屋根や壁に温水を掛け流すことによって、形成される温室内の気温、湿度及び日射量等について、つぎのように、42年12月から43年3月までの冬期間測定を行なった。

◎温度、湿度 (通風サーミスタ乾湿計を使用)

42年12月2日~7日, 21日~31日

43年1月1日~3日, 24日~31日

2月1日~5日, 20日~29日

3月1日~10日

◎日射量 (ゴルテンスキー日射計を使用)

42年12月22日~28日

43年1月24日~30日

2月24日~29日

3月1日~10日

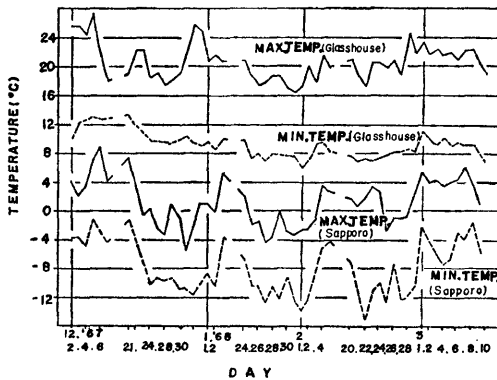


Fig. 1. Maximum and minimum air temperatures in the glasshouse using warm water films and at Sapporo Meteorological Observatory during the observation.

i) 気温

観測期間中の温室内、最高・最低気温と札幌市における屋外の最高・最低気温を図-1に示してある。夜間の最低気温は、水温、日中における地中蓄熱量及び外気温等の影響をうけて低下するが、観測期間中の最低温度は、2月1日の6.0°Cであった。しかし、図-1にみられるごとく、温室内の最低気温の変動は、外気温に比較してあまり大きくない。

図-2は、熱電対温度計で測定した温室内の気温分布で、日中は、日射を受けて室内温度は上昇し、上下の温度差が大きくなるが、夜間は小さい。

ii) 湿度

図-3に、観測期間中の日中(8時~16時)と、夜間(17時~7時)の平均湿度を示してある。全体として、温室内湿度は、内部で鏝耕栽培を行なっているためや、温水を掛け流している影響をうけて、高い値を示している。特に、夜間においては、88%以上になる日が多くなり

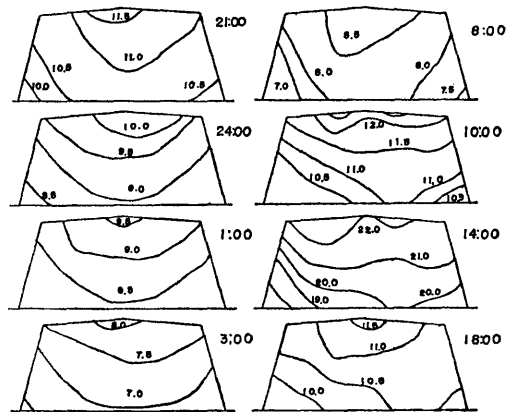


Fig. 2. Distribution of temperature in the glasshouse using warm water films on the roof and wall (4, 5 Feb. 1969).

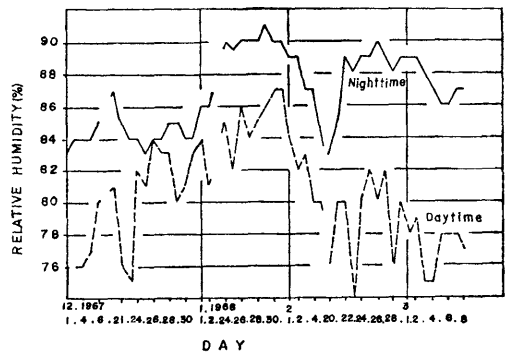


Fig. 3. Variations of humidity in the glasshouse during the observation.

られる。

湿度が高いため作物がうける主な影響は、一般に、カビ病等の病害の発生にあるが、温室内の温度が冬期間は低いので、実際の栽培中には、ほとんど影響がなかった。

iii) 日射量

観測期間中の温室内外の日射量を、比較すると、つぎの関係式であらわされる。

$$I_{in} = 0.29I_{out} + 20 \dots \dots \dots (5)$$

I_{in} : 温室内日・日射総量 I_{out} : 屋外日・日射総量
透過率の平均は、40.1%とかなり悪い。温水を屋根、壁に掛け流すと、普通の温室に比較して、掛け流し水に吸収される分だけ、透過率が悪くなる。この水膜の存在によって、日射量の透過率がどの程度、減少するかについては、2, 3の報告があり、0.1cm厚の薄層流で、約8~10%程度とされている。したがって、40.1%と日射量の透過率が非常に悪いのは、薄層流のほか温室の構造、材料に関係するものと考えられる。

4. 温水の熱収支と屋根、壁からの伝熱

屋根、壁を流れる温水は、流下しながら熱を失なって冷却する。この温水の熱収支は、

- ① 温水の蒸発によって奪われる熱量(潜熱伝達量) $\sim LE$
- ② 空气中に直接伝達される熱量(顕熱伝達量) $\sim L$
- ③ 温水自身の熱放射による伝熱量 $\sim R$
- ④ ガラスをとうして、温室内へ伝達される量、または、温室から温水に伝達される量 $\sim G$
- ⑤ 日射による受熱量 $\sim \alpha S$

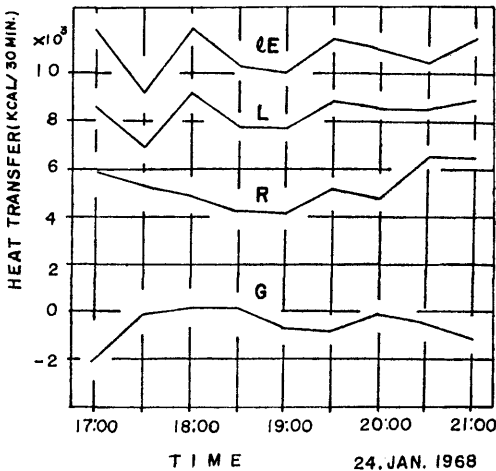


Fig. 4. Heat budget of warm water films on the roof and wall of the glasshouse.

などが、考えられ、熱収支式は、つぎの式であらわすことができる。

$$Q = LE + L + R + G + \alpha S \dots \dots \dots (6)$$

夜間は $\alpha S = 0$ となり

$$Q = LE + L + R + G \dots \dots \dots (7)$$

となる。 Q は流下中に失なわれる全熱量に等しく、温水の流出口の水温 θ_1 と、流下末端の水温 θ_2 の差より求められる。したがって、定常状態の仮定のもとで、(7)式は(8)式に示すごとくなり、 R, G を測定することによって、伝達係数 h 、および k ($k=2h$ と仮定)が、計算出来る。43年1月24日の夜間の熱収支を、計算すると、図-4のごとくなった。

ハウス外の気温、湿度は、アスマン通風乾湿計で測定し、 LE, L 、算出のための水温は、温室中央の横断面上で、10ヶ所、測定しその各点について、潜熱伝達量、顕熱伝達量を計算して、合計した。また、放射量は、温室の屋根の上、1.5mにネットラジオメーターをとりつけて測定し、ガラス面をとうしての熱の移動量 G は、水温の測定点と同じ所のガラス内外面に、0.3mmの熱電対をはりつけて、その温度差より計算して求めた。なお、図-4は、温室面全体の熱量について、計算したものである。

温室内に伝達される熱量は、水温や、温室内の温度に影響されて、温室から温水に伝達されたり、また、温水から温室内に伝達されたりするが、その量は、潜熱伝達量や、顕熱伝達量に比較して、きわめて少ない。温室の屋根、壁面の伝熱について、さらに詳細にみるため、ガラス内外面の温度差を図示すると、図-5のごとくなり、日中は常に、温室内より温水に熱が流れていることを示し(黒の部分)、日射によって暖められた温室内の熱

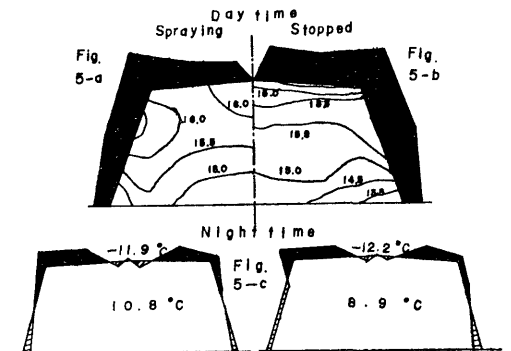


Fig. 5. Heat transfer on the roof and wall. Black portion: Heat transfer from glasshouse air to warm water films. Hatched portion: Heat transfer from warm water films to glasshouse air.

が、常に、温水に奪いとられているのがわかる。しかし、掛け流し温水を止めた場合、その温度差は、さらに大きくなり、温水が一種の保温の役割をはたしている(図-5a, 5b)。

一方、夜間においては、複雑な伝熱状態を示し、場所により、また、温室内部の温度および、温水の状態によって、温室内部に熱が加えられたり、放熱状態になったりする。44年2月の観測時には、図-5cのごとく、屋根付近は、温室内の高い気温のため、ガラス外面より内面の方が高く、放熱状態にあるが、地表付近の壁は、内部の気温が温水より低いいため、受熱状態を示すのが、一般的であった。

5. 夜間における温室内部温度の予測

冬期においては、夜間の温度低下が栽培作物の種類及び品種を決定する一つの要因となるばかりでなく、栽培管理の上で、重要な事項となる。この夜間温度を、正確に予測することは非常に困難であるが、44年2月~3月の観測結果をもとに計算を行なってみた。

温水の夜間の熱収支式は、(7)式で表わされるが定常状態のもとでは、つぎのように書き換えられる。

$$\frac{c_w \cdot \rho_w (\theta_1 - \theta_2) V_w}{A_w \times 60 \times 60} = h(\theta_w - \theta_{ou}) + k(e_w - e_{ou}) + R + G \dots\dots\dots(8)$$

- ここに θ_1 : ビニールパイプ流出口の水溫
- θ_2 : 流下末端の水溫
- θ_w : 流下中の温水の平均水溫
- θ_{ou} : 外氣溫
- e_w : θ_w 時の温水の飽和水蒸氣圧
- e_{ou} : θ_{ou} 時の外氣の水蒸氣圧
- c_w : 温水の比熱 h : 顕熱伝達係数
- ρ_w : 温水の密度 k : 潜熱伝達係数

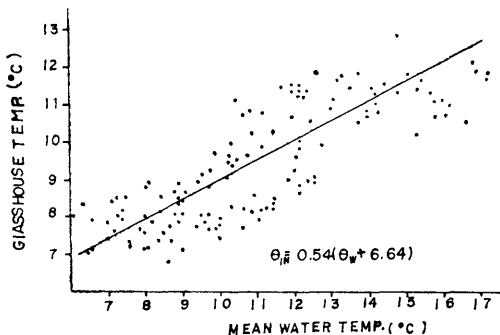


Fig. 6. Relationships between glasshouse temperature (θ_{in}) and mean water temperature (θ_w).

V_w : 温水の流量 (m^3/h)

A_w : 温室の屋根、壁の面積 ($1,728 \times 10^3 cm^2$)

(8)式において、 $\theta_w = \theta_1$ $e_w = e_1$ $k = 2h$ と仮定し、また外氣溫が、冬期間は非常に低く e_{ou} は e_w に比して無視しえるほど小さいので、 $e_{ou} = 0$, R は、43年1月24日から3月10日までの観測期間中の平均値、 $0.0012ly/sec$ と仮定して、伝達係数 h を計算すると

$$h = (3.93v_a + 0.65) \times 10^{-5} ly/sec \cdot ^\circ C \dots\dots (9)$$

v_a : 風速

となり(8)式は、

$$\theta_2 = \theta_1 - \frac{6,220.8}{V_w} \{ (3.93v_a + 0.65) \times 10^{-5} \times (\theta_1 - \theta_{out} + 2e_w) + 0.0012 \} \dots(10)$$

で近似される。

一方温室内部の熱収支は、つぎのような式で表わされる。

$$G + V_{en} + S_0 + C = 0 \dots\dots\dots(11)$$

G : 温水から温室へ、または、温室から温水に加えられる熱量で、 $h_G(\theta_w - \theta_{in})$ で表わされる。

h_G : 温水と温室の熱伝達係数、 θ_w : 平均水溫、 θ_{in} : 温室内部温度

V_{en} : 自然換気によって、失なわれる熱量で、 $h_{ven}(\theta_{ou} - \theta_{in})$ で表わされる。

h_{ven} : 換気による熱伝達係数

S_0 : 地表面より、温室内部への伝熱量で、 $h_{s_0}(\theta_{in} - \theta_{s_0})$ で表わされる。 h_{s_0} : 地表面と温室の熱伝達係数、 θ_{s_0} : 地溫

C : 温室内部空気自体が、冷却して失なう熱量で、 $c_a \rho_a V_g \frac{d\theta_{in}}{dt}$ で表わされる。

c_a : 空気の定圧比熱、 ρ_a : 空気の密度、 V_g : 温室内部体積、 $d\theta_{in}/dt$: 温室内部温度の時間あたり低下率

したがって(11)式は、定常状態の時は、つぎの式で表わされる。

$$c_a \rho_a V_g \frac{d\theta_{in}}{dt} = A_w h_G (\theta_w - \theta_{in}) + A_w h_{ven} (\theta_{ou} - \theta_{in}) + A_g h_{s_0} (\theta_{s_0} - \theta_{in}) \dots\dots\dots(12)$$

今、温室は掛け流しを行なっているため、自然換気量が非常に小さいと仮定し、また、温室内部の空気自体が冷却して失う熱量も定常状態を考えて、 $d\theta_{in}/dt = 0$ と仮定すると、(12)式は、

$$\theta_{in} = A\theta_w + B\theta_{s_0} \dots\dots\dots(13)$$

ただし

$$A = \frac{A_w h_G}{A_w h_G + A_g h_{S_0}}, \quad B = \frac{A_g h_{S_0}}{A_w h_G + A_g h_{S_0}}$$

となり、平均水温と地温によって夜間温度が形成されることがわかる。今、観測期間中の平均水温と室温の関係を、図示すると、図-6のごとくになり、平均水温がわかれば、室温の大略の予測が出来る。

温室内気温が、 10°C になるためには、(10)式及び図-6を用いて計算すると、外気温 -15.0°C 、流量 $18.0\text{m}^3/\text{h}$ 、平均風速 $2\text{m}/\text{sec}$ の時、流入水温が 13.0°C 、末端水温が 11.0°C 、平均水温 12.0°C であればよいことになる。

6. あとがき

温水を掛け流して、温室を加温する方法は、大量に温水がえられる所では、きわめて有効な方法である。夏期においては、この配管に水を通水することによって、温室の冷却にも利用することが出来る。しかし、反面、欠点としてはガラス面の汚染、室内の多湿など解決しなければならない問題も多い。今後、これらの問題点が解決され、工場の廃水や、冷泉が多量に得られる所において、積極的な利用が行なわれることを、要望する。

この観測を行なうにあたり、物心両面から、種々、御援助をいただいた。北電技術研究所の加藤所長をはじめ、同所の野沢稔氏ら、研究所々員の諸氏、及び、江別発電所のかたがたに、謝意を表する次第である。

引用文献

- 1) 船田周, 増田典良, (1968), Controlled Green-

house における環境条件について (IV) — 屋根撒水およびすだれ遮光の効果 —, 生物環境調節, 6, 1.

- 2) 石原藤次郎, 本間仁, (昭和37年版), 応用水理学中 I, 丸善, 101~102.
- 3) 石原藤次郎, 本間仁, (昭和38年版), 応用水理学中 II, 丸善, 404~408.
- 4) Koppe, H., (1658), Möglichkeiten der Verwertung von Industrieabwärme für Gewächshausanlagen, Der Deutsche Gartenbau, 5, 2, 32~34.
- 5) Lanckow, J., (1965), Ergebnisse der Untersuchungen über das Hydrogewächshaus, Archiv für Gartenbau, 7, 3, 205~219.
- 6) Lanckow, J., und G. Vogel, (1960), Die Verwertung von Industrienutzwärme im Gemüsebau-eine wichtige Aufgabe., Der Deutsche Gartenbau, 7, 8, 199~202.
- 7) Morris, L.G., E.S. Trickett, F.H. Vanstone, and D.A. Wells, (1958), The limitation of maximum temperature in a glasshouse by the use of a water film on the roof, J. Agr. Eng. Res., 3, 121~130.
- 8) 南彰, 北林茂, (昭和41年), 温排水を利用した温室の保温効果, 北海道電力株式会社技術研究所年報, 11, 194~200.
- 9) 野沢稔, (昭和42年), 火力発電所温排水利用による温室の保温の研究 (その2), 同上, 12, 294~299.
- 10) 野沢稔, (昭和43年), 同上 (その3), 同上, 13, 232~259.
- 11) 杉二郎他, (1963), 九州大学環境制御実験室における環境条件について (I), 生物環境調節, 1, 25~32.

Summary

Cooling water from a steam power plant was found to be useful as a heat source in heating the glasshouse. The experiments were made at the glasshouse with 19.5 m long and 6.0 m wide. The water with temperature 12 to 22°C was sprinkled on the roof top by the amount from 13 to 19m^3 per hour. Figs 1, 2, and 3 show the temperature and humidity regimes in the glasshouse, respectively. It was found that heat was always upwards i.e., from the glasshouse to the water film, for the daylight period. When the sprinkling was ceased, more heat was transferred from the glasshouse to the outside air. This denotes that the sprinkling of warm water on the roof protects the glasshouse from cooler outside conditions. Fig. 5 shows characteristic in heat transfer between the glasswall and water film at the nighttime. The heat transfer at the side wall was from water film to glasswall, while one at the roof was from glasswall to the water film.

Heat budget equations for both the water film and the glasshouse for the nighttime are expressed respectively by Eqs. (7) and (8), finally by Eqs. (10) and (13). Eq. (13) denotes that the glasshouse temperature is given as a function of mean water temperature and of soil temperature. The relationship between glasshouse and mean water temperatures is shown in Fig. 6.