農業気象 *(J. Agr. Met.)* 44 (3): 195–202, 1988

温室の温水カーテンにおける熱移動の解析

小森友明・関　平和

（金沢大学工学部土木建設工学科）

A Theoretical Investigation of Heat Transfer of a Falling Hot Water Film in a Greenhouse

Tomoaki KOMORI and Hirakazu SEKI

(Department of Civil Engineering, Kanazawa University, Kodatsuno, Kanazawa, 920, Japan)

1. 緒　　言

未利用資源である農林業系副産物，廃棄物は大規模な焼却処分をすることにより廃熱回収が可能で，その回収廃熱を施設栽培等に農業利用できることから一つの熱源となることを報告した（小森ら，1987，1988）。

回収した廃熱をハウス暖房や土壌加温に利用するにあたっては，一つの方法として温水循環方式が採られるが，ハウス暖房，土壌加温のような第1次熱利用された後の温水はなおかなりの熱エネルギーを保持している。この残余エネルギーをさらに有効利用し，ハウスの暖房負荷をも軽減するという目的から，ウォーター・カーテン方式による第2次熱利用について定量的な検討を試みることとした。「温水の掛流し」および「ウォーター・カーテン」に関する研究は既に横田・堀口（1970），原・小倉（1982），小倉（1984）によって行われているが，水膜の熱移動機構や実用化にあたってのシステムの最適化等については，問題が複雑なためか，それ程詳細な理論的取り扱いは試みられていないようである。そこで，本報ではカーテン上を流れる水膜の熱移動機構を理論的に解析し，温水カーテンあるいはウォーター・カーテン・システムの最適設計のための基礎的な事柄について定量的な考察を加えることとした。

2. 解析解の導出

この種の問題の理論的な取り扱いには，移動速度論的な概念を適用するのが極めて適切であることを指摘した（小森ら，1987，1988）。 実際のウォーター・カーテンではカーテン素材表面の親水性が十分でなかったり，流路も理想的な幾何学的諸元を形成することはないが，傾斜したカーテン上を流れる水膜の流動は，便宜的に傾斜平板上を流れる「液膜流れ」に近似してモデル化することができる。いま，Fig.1のように，上部に取り付けられた散水管小孔から，定常状態で一定の水量がカーテン傾斜面に散布されたとき，水は平均巾Wの流路を形成し，流れは層流でカーテン末端Lに至るとする。そして，カーテン上を水が流れる間その粘度，密度等の物性値が変らないとすると，カーテン上を流れる水膜モデルはFig. 2のように示される。

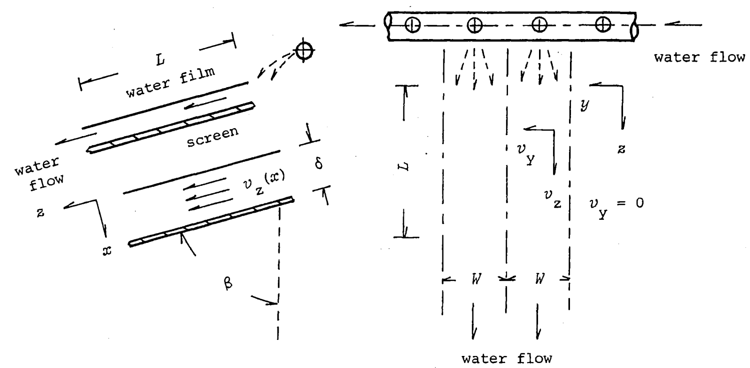

Fig. 1. Schematic representation of water spray and a falling water film on a screen

昭和62年10月29日　北陸支部大会にて一部発表（富山）
昭和63年4月14日　全国大会にて発表
昭和63年5月16日　受理

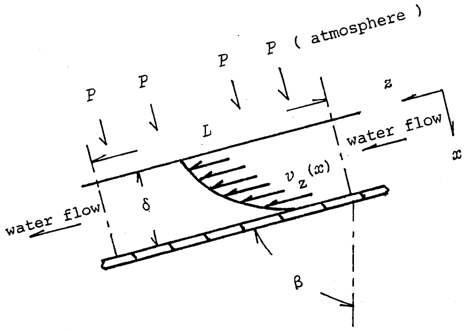

Fig. 2. Schematic representation of velocity profile of the falling water film

Fig.2に従い，傾斜カーテン上での水膜の流速分布について適当な境界条件を用いて運動方程式を解き一般解を求めると（Bird *et al*., 1961；城塚ら，1982）

$$v_z=\frac{\rho g\delta^2\cos\beta}{2\mu}\left[1-\left(\frac{x}{\delta}\right)^2\right] \tag{1}$$

そして，(1)式を用いれば，平均流速$\overline{v}_z$，1流路当りの流量Qと水膜厚さδとの関係はそれぞれ次のように与えられる。

$$\overline{v}_z=\frac{\rho g\delta^2\cos\beta}{3\mu} \tag{2}$$

$$Q=W\delta\overline{v}_z=\frac{\rho g\delta^3\cos\beta\cdot W}{3\mu} \tag{3}$$

一方，水膜およびそれと接するカーテンを界して，その内，外側気温をT_R, T_a，散水される水の温度をT_iとすると，水膜はカーテン末端へ向って流れるに従いFig. 3のような温度分布を示すと考えられる。ただし，Fig. 3の温度分布モデルは$T_i>T_R>T_a$の場合である。

ここで，Fig.2の水膜モデルと同様に系は定常で，水膜の熱伝導率，比熱，密度等の熱的物性値が一定であり，流れは安定な層流であると仮定すると，水膜のエネルギー方程式は

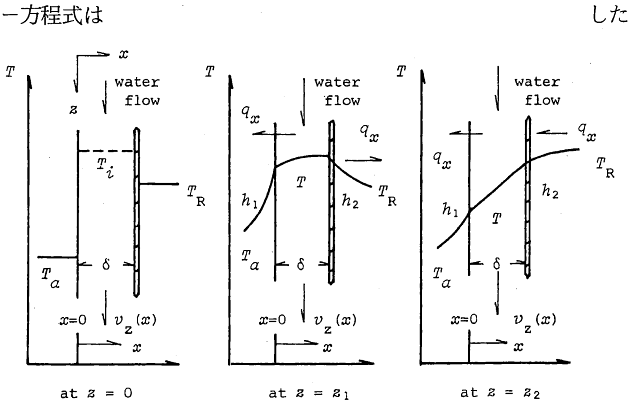

Fig. 3. Schematic representation of temperature profile of a falling hot water film

$$v_z\frac{\partial T}{\partial z}=\kappa\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{4}$$

水膜表面，カーテン接触面における水膜の熱移動流束がh_1，h_2の熱伝達係数を用いた熱放散の形で表されると想定して

$$K\frac{\partial T}{\partial x}=h_1(T-T_a) \qquad (x=0) \tag{5}$$

$$-K\frac{\partial T}{\partial x}=h_2(T-T_R) \qquad (x=\delta) \tag{6}$$

ただし，h_1は放射，対流および潜熱を含み，h_2は放射および対流を含む総合熱伝達係数である。

そして，散水点$z=0$における境界条件は水温がT_iで一定であるから

$$T=T_i \qquad (z=0) \tag{7}$$

よって，(1)式を(4)式の左辺に代入し，(5)～(7)式までの境界条件を用いて(4)式を解けば，水膜内の温度分布に関する解析解を得ることができるが，この問題はStrum Liouville 型の固有値問題で，解を導出する演算手順は相当煩雑になる。そこで，次の事柄に留意して問題を簡略化する。

(1) 実際の水膜流れは(1)式で流速分布が与えられる程理想的でなく，単純な流れでもない。したがって，必ずしも厳密な解析解ではなく，近似解を用いても水膜における熱移動機構の説明は可能であろう。

(2) 水膜厚さは概して薄く，水膜厚さ方向任意点での温度，流速の測定は不可能で，水膜について実測が行えるのは散水，流出側における平均水量と平均水温に限られそうである。

以上のことから(4)式の左辺v_zに(2)式の$\overline{v}_z$を用いて(4)式を書き改めると

$$\overline{v}_z\frac{\partial T}{\partial z}=\kappa\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{8}$$

したがって，(8)式を(5)～(7)式の境界条件を用いて解けば，この問題の近似解を求めることができる。

さて，このようにエネルギー方程式，境界条件が与えられたので，この問題の近似解を導出するが，演算を進めるにあたり次のような無次元数を導入する。

$$\Phi=\frac{T-T_a}{T_i-T_a},\quad \Phi_R=\frac{T_R-T_a}{T_i-T_a},$$
$$\varepsilon=\frac{N_2\Phi_R}{N_1(N_2+1)+N_2},\quad \xi=\frac{x}{\delta},\quad \zeta=\frac{z}{L},$$
$$\eta=\frac{\kappa L}{\overline{v}_z\delta^2},\quad N_1=\frac{h_1\delta}{K},\quad N_2=\frac{h_2\delta}{K} \tag{9}$$

これらの無次元数を用いて，エネルギー方程式，境界条件を書き換えると

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \zeta}=\eta\frac{\partial^2\Phi}{\partial \xi^2} \qquad (0<\xi<1) \qquad (10)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \xi}=N_1\Phi \qquad (\xi=0) \qquad (11)$$

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial \xi}=N_2(\Phi-\Phi_R) \qquad (\xi=1) \qquad (12)$$

$$\Phi=\Phi_i=1 \qquad (\zeta=0) \qquad (13)$$

ところで，Fig.3 の水膜温度モデルによれば，散水点から離れたところでΦはξのみの関数に漸近するので，その漸近解を$\Phi_s(\xi)$，またzが大きくなるにつれて減衰する関数を$\Phi_t(\xi,\zeta)$とすると，熱伝導方程式(10)の解は次のように仮定することができる。

$$\Phi(\xi,\zeta)=\Phi_s(\xi)+\Phi_t(\xi,\zeta) \qquad (14)$$

上式を用いて(11)〜(13)式を満足する(10)式の一般解を求めると

$$\Phi=\varepsilon(N_1\xi+1)+\sum_{n=1}^{\infty}D_n e^{-\alpha_n^2\eta\zeta}\times[N_1\sin\alpha_n\xi+\alpha_n\cos\alpha_n\xi] \qquad (15)$$

解(15)式の右辺第1項は$\Phi_s(\xi)$，第2項は$\Phi_t(\xi,\zeta)$で，D_nは次式のように示される。

$$D_n=\frac{2\{(N_1+N_2)[N_2(1-\varepsilon N_1)-\varepsilon(N_1+N_2)]\alpha_n+N_1(\alpha_n^2+N_2^2)\sin\alpha_n\}}{\alpha_n\sin\alpha_n\{N_1(\alpha_n^2+N_2^2)+(\alpha_n^2+N_1^2)(\alpha_n^2+N_2+N_2^2)\}} \qquad (16)$$

また，α_nは次式での根である。

$$(\alpha_n^2-N_1N_2)\sin\alpha_n=\alpha_n(N_1+N_2)\cos\alpha_n \qquad (17)$$

さらに，$\zeta=\zeta$における水膜の平均温度$\Phi_{av}(\zeta)$は

$$\Phi_{av}(\zeta)=\frac{\varepsilon}{2}(N_1+2)+\sum_{n=1}^{\infty}D_n e^{-\alpha_n^2\eta\zeta}\{\frac{N_1}{\alpha_n}+[1-\frac{(\alpha_n^2-N_1N_2)N_1\sin\alpha_n}{\alpha_n^2(N_1+N_2)}]\} \qquad (18)$$

そして，水膜がハウス内を加温もしくは断熱する能力をもつのは，水膜のカーテン接触面$\xi=1$で$\Phi=\Phi_R$か$(\partial\Phi/\partial\xi)=0$となる流下距離$\zeta=\zeta_R$までだが，ここでは前者を採ると

$$\Phi_R=\varepsilon(N_1+1)+\sum_{n=1}^{\infty}D_n e^{-\alpha_n^2\eta\zeta_R}[N_1\sin\alpha_n+\alpha_n\cos\alpha_n] \qquad (19)$$

となる。

3. 計算結果とその考察

水膜の熱移動を定量的に検討するにあたり，いくつかの計算例を用いて理論的な考察を試みることとする。

Table 1 には計算上で設定した物性値，条件がまとめてある。Fig.4 は(15)式によって計算された水膜内温度分布の一例を示した。

この図には同時に(18)式で求められる平均温度$\Phi_{av}(\zeta)$も記入してあるが，計算結果によれば$\Phi(1,\zeta)>\Phi_{av}(\zeta)$であるが，$\Phi(1,\zeta)\doteqdot\Phi_{av}(\zeta)$で近似的に(18)式で$\zeta_R$を求めてもよいことが解る。この場合，水膜厚さ$\delta$が極

Table 1 Physical properties of water and operating conditions for illustrative examples

L	[m]	5.0	C_p	[kcal/kg℃]	1.0
W	[m]	0.5	K	[kcal/m hr ℃]	0.51
h_1	[kcal/m² hr ℃]	40.0	κ	[m²/hr]	0.00051
h_2	[〃]	10.0	μ	[kg/m hr]	3.6
β	[deg.]	75.0	ρ	[kg/m³]	1000

δ [mm]	$\overline{v}_z'$ [m/sec]	Q' [m³/m² hr]	Re [−]
0.8	0.542	0.3124	1735.0
0.6	0.305	0.1320	733.0
0.4	0.136	0.0392	217.0
0.2	0.034	0.0049	27.1

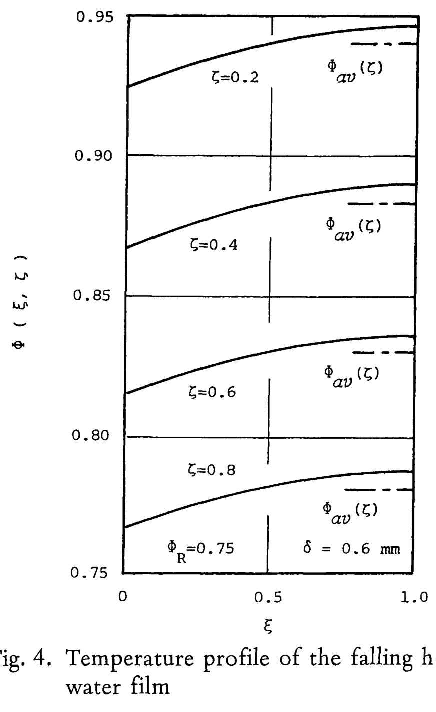

Fig. 4. Temperature profile of the falling hot water film

めて小さいため，パラメータである N_1，N_2 はともに小さい値となり，結果的に上述の近似が成立するが，厳密には(19)式により ζ_R を求めるのが正しい。

以上のことから Fig. 5 には $\Phi_{av}(\zeta)$ と ζ の関係を点綴したが，Fig. 5 によれば，$\delta=0.2$ mm のとき $\zeta\geq0.6$ で水膜の温度分布はほぼ一定となり，$\Phi_R=0.5$ の場合，$\delta=0.4$ mm で $\zeta_R\doteqdot0.63$ ($\Phi\doteqdot\Phi_R\doteqdot0.5$)，$\Phi_R=0.75$ の場合には $\zeta_R\doteqdot0.27$ となるので，$\zeta_R=1$ まで暖房もしくは断熱の効果を図るとすれば，温水量の増加か温水の再散布を考慮しなければならない。また，$\delta=0.6$ mm では $\Phi_R=0.5$ の場合，棟上で1回の温水散布でよく，$\Phi_R=0.75$ の場合では辛うじて温水の再散布がなしでもよいことになる。

Fig. 6 は水膜流下末端 $\zeta=1$ における平均温度 $\Phi_{av}(1)$ と水膜厚さ δ の関係を示すが，この関係は任意の Φ_R に対し $\zeta=1$ まで水膜による暖房と断熱効果を保持するに足る水膜厚さ δ を見積る相関図となる。例えば，$\Phi_R=0.5$ のとき水膜流下末端 $\zeta=1$ まで，暖房と断熱効果を維持するとすれば理論水膜厚さ δ は約 0.48 mm で，この値から棟上での散布理論水量を算出することができる。

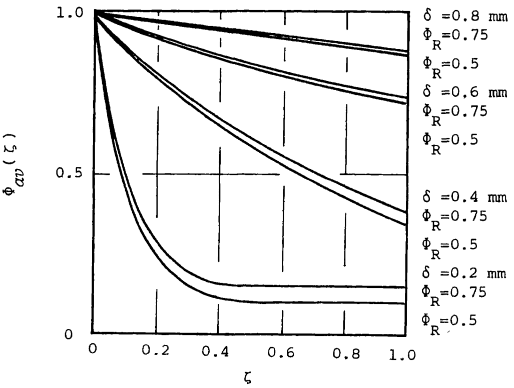

Fig. 5. Relationship between $\Phi_{av}(\zeta)$ and ζ

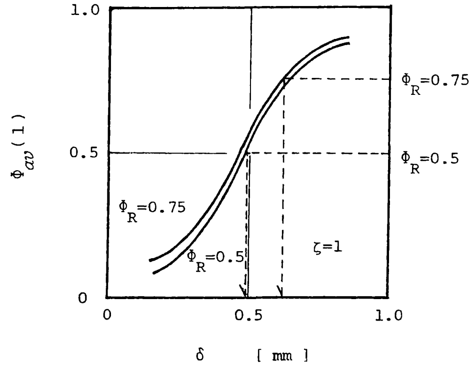

Fig. 6. Relationship between $\Phi_{av}(\zeta)$ and δ at $\zeta=1$

さて，ここで得られた解析解は散布水が温水なので基本的には $\zeta=0$ で $\Phi_i=1$，$\Phi_R<1.0$ の場合に適用できるとした。しかし，計算結果によれば水膜が流下するに従い $\Phi(1,\zeta)<\Phi_R$ となり，カーテン内側から水膜側に向って熱が流れることが明らかとなった。この場合，水膜はカーテン内側から外に向う熱流に対し，抵抗として機能している（以下，本論文ではこの機能を"保温"という）。すなわち，$\zeta_R<1$ となる条件下では，水膜の機能は暖房→断熱→保温と推移する。

ここで，境界条件(12)式を想起すれば，$\Phi_R>\Phi_i$ のとき散水当初から $\zeta\geq0$ でも $\xi=1$ における熱流が逆方向となることを意味しており，(12)式はとくに $\Phi_R>\Phi_i$，$\Phi_R<\Phi_i$ にかかわらず成立することを示唆している。したがって，解析解(15)，(18)式は散水開始点 $\zeta=0$ で散水水温が T_R より低い場合にも適用できる。ただし，この場合は $T_i<T_R$ であるから水膜は棟上で散水した直後から既に物理的な意味での保温能力しかない。

Figs. 7, 8, 9 は $\Phi_R=1.5$ の場合における計算結果を示すが，この場合の水膜を通しての熱移動は，水膜が一つの熱抵抗となるため，カーテン内側から外側へ向っての放熱量が減少し，カーテン内側の保温効果が図られると考える方が妥当なようである。

このように，ここで得られた解析解は温水を使用しない普通のウォーター・カーテンの場合にも十分適用できるが，この場合には ζ_R は無関係となるので，前出(19)式は不要となる。

ところで，温水カーテン，ウォーター・カーテンの如何を問わず，水膜の効果がどの程度で如何なる機能を持つか定量的に検討することは極めて興味のあることであ

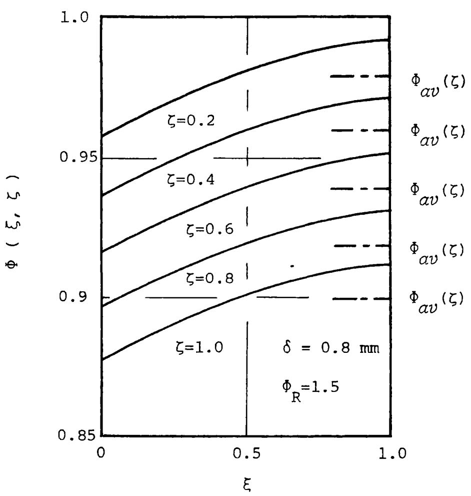

Fig. 7. Temperature profile of the falling water film for the case of $\Phi_R=1.5$

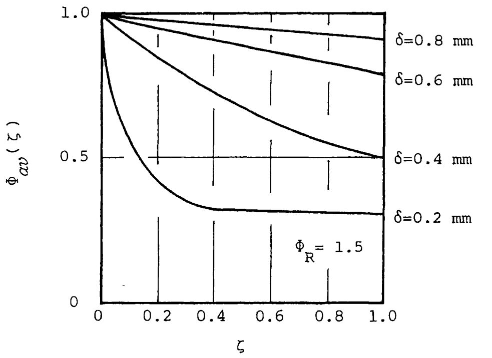

Fig. 8. Relationship between $\Phi_{av}(\zeta)$ and ζ for the case of $\Phi_R=1.5$

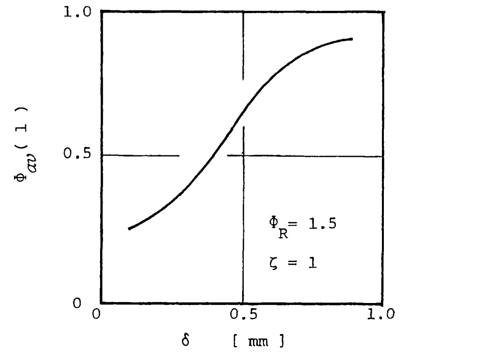

Fig. 9. Relationship between $\Phi_{av}(\zeta)$ and δ at $\zeta=1$ for the case of $\Phi_R=1.5$

る。水膜の熱移動を考えると現象的には次の三つの形式に区別することができる。すなわち，

1）$\Phi_i>\Phi_R$ で $\zeta_R\geq1$ ならば，散水直後から水膜からカーテン内側へ熱移動が起り，ハウス室内が加温される（$\zeta=0$ ～ $\zeta=1$ の全域で室内加温）。

2）$\Phi_i>\Phi_R$ で $0<\zeta_R<1$ ならば，散水直後の $\zeta=0$ ～ $\zeta=\zeta_R$ まで室内加温，$\zeta=\zeta_R$ で断熱，$\zeta=\zeta_R$～ $\zeta=1$ ではカーテン内側より水膜側へ放熱が起る（室内加温→断熱→保温と推移する）。

3）$\Phi_i<\Phi_R$ では $0\leq\zeta\leq1$ の全域でカーテン内側より水膜側への放熱が起る（$\zeta=0$ ～ $\zeta=1$ の全域で保温のみ）。

いま，上記の各項を踏まえて水膜の総括的な熱収支を単位面積当りで考えると

$$\Delta q_l=q_i-q_o=q_{la}+q_H-q_{lC} \qquad (20)$$

ここで，Δq_l は水膜が流下中に失った熱量，q_i は散水膜保有熱量，q_o は流出水膜持出熱量，q_{la} は水膜表面からの大気側放熱量，q_H は水膜からカーテン内側への移動熱量（加温熱量），q_{lC} はカーテン内側から水膜への移動熱量（放熱量）である。そして，(20) 式は次のように書くことができる。

$$\Delta q_l=\frac{Q\rho C_p}{LW}\left[1-\Phi_{av}(\zeta)_{\zeta=1}\right](T_i-T_a)$$
$$=\{h_1\overline{\Phi}(\xi)_{\xi=0}+h_2[\overline{\Phi}(\xi)_{\xi=1}-\Phi_R]-h_2[\Phi_R-\overline{\Phi}(\xi)_{\xi=1}]\}(T_i-T_a) \qquad (21)$$

ただし，

$$\overline{\Phi}(\xi)_{\xi=0}=\int_0^1\Phi(0,\zeta)\,d\zeta \qquad (22)$$

$$\overline{\Phi}(\xi)_{\xi=1}=\int_0^1\Phi(1,\zeta)\,d\zeta \qquad (\zeta_R\geq1,\ \zeta_R\leq0) \qquad (23)$$

$$\overline{\Phi}(\xi)_{\xi=1}=\frac{1}{\zeta_R}\int_0^{\zeta_R}\Phi(1,\zeta)\,d\zeta \qquad (0<\zeta_R<1,\ 0<\zeta<\zeta_R) \qquad (24)$$

$$\overline{\Phi}(\xi)_{\xi=1}=\frac{1}{1-\zeta_R}\int_{\zeta_R}^1\Phi(1,\zeta)\,d\zeta \qquad (0<\zeta_R<1,\ \zeta_R<\zeta<1) \qquad (25)$$

であり，(20) 式においてカーテン内側から水膜側へ放熱がある場合は右辺第 2 項を，水膜側からカーテン内側へ熱が移動する室内加温の場合は右辺第 3 項を消去すればよい。

Figs.10, 11, 12 は上述の三つの形式について，(20) 式により熱収支を計算した例を図示した。ここで，Fig. 10 は全域室内加温の場合，Fig.12 は全域保温となる場合であり，Fig.11 は水膜が加温→断熱→保温と推移する場合の一例である。

これらの結果は (T_i-T_a) を設定してないが，(20) 式の各熱量項の占める割合がよく解る。その結果によれば，概して水膜の保有熱量のほとんどが水膜から大気への放熱に消費され，室内加温の効果は小さいが，カーテン内側から水膜への放熱も小さいことから，断熱もしくは放熱低減による暖房負荷の軽減効果はかなり期待できることを示唆している。おそらく実例においても相似的な傾向が得られるであろうから，ハウスの暖房負荷を軽減するため一つの補助的手段として温水カーテン，あるいはウォーター・カーテン・システムを導入することは有益であろうが，とくに散布水を加熱する専用加熱装置や水量を確保するため別途地下水を大量に汲み上げる専用ポンプ等を設置することは必ずしも有利にならない場合も考えられる。したがって，とくに温水カーテンでは残熱を有効に利用する第 2 次熱利用を指向することが望ましいことになる。

以上に述べた計算結果と考察はあくまで理論の域を脱しないが，散水量もしくは水膜厚さ，水温，気象条件との関係は複雑であることが解る。実際例では必ずしも理論値と一致するとは断定できないだろうが，ここで述べ

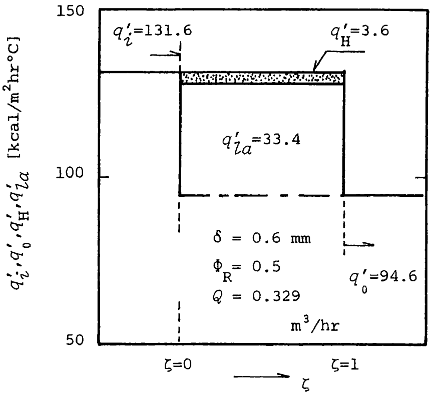

Fig. 10. Over-all Heat Balance of the Water Film for the case of $\Phi_i > \Phi_R$ and $\zeta_R > 1$
(where $q_i' = Q\rho C_p/LW$, $q_o' = Q\rho C_p \Phi_{av}(\zeta)_{\zeta=1}/LW$, $q_{la}' = h_1 \overline{\Phi}(\xi)_{\xi=0}$, $q_H' = h_2[\overline{\Phi}(\xi)_{\xi=1} - \Phi_R]$ and $q_{lC}' = h_2[\Phi_R - \overline{\Phi}(\xi)_{\xi=1}]$)

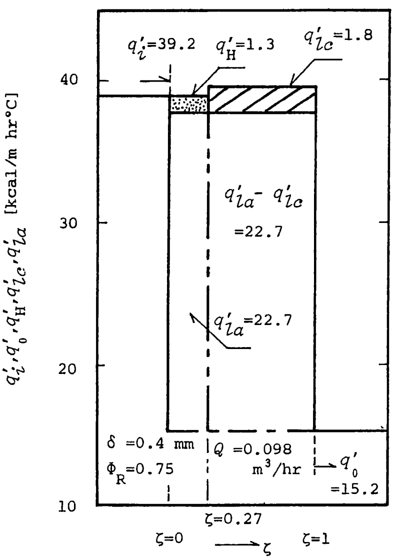

Fig. 11. Over-all Heat Balance of the Water Film for the case of $\Phi_i > \Phi_R$ and $0 < \zeta_R < 1$

た理論的な取り扱いに基づき関連諸変数の相関について理論値と実測値との相似性を予め把握しておけば，システムの最適設計は比較的容易に可能となるであろう。

4. 解析解の適用限界

ここで得られた解析解は温水カーテンのみならず普通のウォーター・カーテンの基本設計にも適用できることは前述の通りであるが，設計上重要な要因となる T_i，T_a は計算の都合から設定しなかった。しかし，実際の事例では気象条件である T_a，選定される T_i との相関か

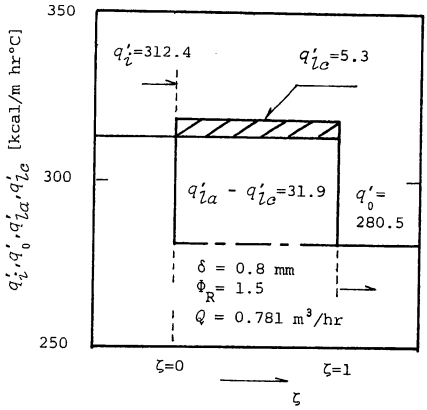

Fig. 12. Over-all Heat Balance of the Water Film for the case of $\Phi_i < \Phi_R$

らカーテン上の水膜が流下途中で凍結することがある。

温水カーテン，ウォーター・カーテンのいずれにおいても $T_a > 0$℃，$T_i > T_a$ なら凍結は起らないが，$T_a < 0$℃ の場合には水膜凍結のおそれが十分懸念される。水膜の凍結は一種の相変化で，ここで述べたエネルギー方程式，境界条件，解析解は相変化現象が起る場合を含まない。差し当り，散水を内張りカーテン上に限らず，ハウス棟上に散水する場合も考慮し，水膜が凍結しないためには無次元温度 Φ と T_i，T_a との間に次式のような関係が成立しなければならない。

$$\Phi\,(T_i - T_a) + T_a = T > 0 \tag{26}$$

もしくは

$$\Phi\left(1 - \frac{T_a}{T_i}\right) + \frac{T_a}{T_i} > 0 \tag{27}$$

換言すれば，(27)式が成立する範囲で解析解は有意義である。そこで，$T_a < 0$℃ で T_i，T_a を任意に仮定し (27) 式を満たす Φ の下限値 Φ_{crit} を求め図示すると Fig. 13 のような相関曲線が得られる。

Fig.13 の各曲線は設定した T_i と任意の T_a に対し T

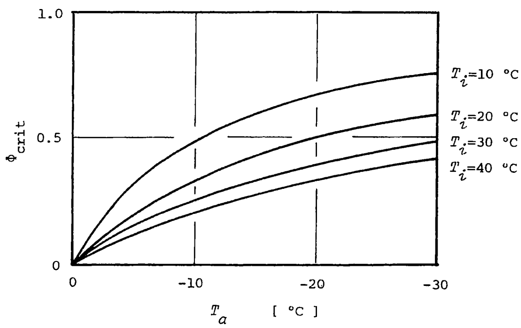

Fig. 13. Relationship between Φ_{crit} and T_a (Parameter: T_i)

＝0℃となるΦの値Φ_{crit}を与えるが，ここで得られた解はΦがΦ_{crit}を超える範囲で妥当性があり，T_iとT_aによって解の適用範囲が制限されることが解る。なお，ここでは第2次の熱利用を対象とした温水カーテンを前提としているのでT_iについては最高40℃までを検討の範囲とした。

5. 結　　言

温室内カーテンあるいは温室屋根上を流れる温水膜の熱移動現象を移動速度論的な概念に基づき理論的に解析し，以下のような結論を得た。

1）水膜の流下距離任意点における温度分布，平均水温について一般化された解析解を求め，それらの解を計算例に適用して温水，ウォーター・カーテンの散水量，散水温，室温，気象条件等の相関を理論的に明らかにした。それらの相関は実用的なプロセスおよび装置の設計手法ならびに運転操作の確立に必要となる基礎的な知見として極めて有益である。

2）解析解を用いた計算結果によれば，カーテン上を流下する水膜は設定される散水量，散水温，温室内外の気象条件により基本的に三つの現象特性形態に区別される。

（1）水膜が流下する全域で温室内空気を加温する場合。

（2）水膜が流下過程で温室内空気を加温→断熱→保温と推移する場合。

（3）水膜が流下する全域にわたって温室内を保温する場合。

なお，これらの特徴は既報の実験的な研究においても定性的に指摘されているが，本報で述べた理論解析はそれらの各特性を定量的かつ統一的に説明することができる。

3）水膜から温室内へ移動する加温熱量，温室内から水膜へ移動する放熱量は概して小さく，散水水膜の保有する熱量のほとんどは大気側への放熱に消費される。即ち，加温，保温の如何を問わず水膜～温室間の移動熱量は小さく，水膜の熱量は大気側への放熱として失われるが，このことはカーテン～水膜接触面での断熱を意味することから，水膜は一種の断熱層か保温層となる。

水膜の断熱，あるいは保温効果は温室暖房負荷軽減相当熱量に換算して評価されるが，ここでの理論解析は室内暖房負荷軽減相当熱量を定量的に求める方法を提示しており，その理論熱量は（21）式によって算出することができる。

なお，水膜の断熱効果に相当する熱量は散水量，散水水温，温室内外の気象条件等によって異なるが，放熱面であるカーテン部面積の温室表面積に占める割合の大きさを考慮すれば，水膜はかなり温室内暖房所要熱量の軽減に寄与する。

使 用 記 号

C_p	: heat capacity of water	[kcal/kg °C]
g	: gravity force	[m/hr^2]
h	: heat transfer coefficient	[kcal/m^2 hr ℃]
K	: thermal conductivity of water	[kcal/m hr °C]
L	: length of water flow	[m]
Q	: rate of water flow	[m^3/hr]
T	: temperature	[℃]
v_z	: velocity of falling water film	[m/hr]
$\overline{v}_z$	: average velocity of falling water film	[m/hr]
W	: width of water flow	[m]
x	: direction of water film thickness	[m]
z	: direction of water flow	[m]

greek letter

β	: inclination of screen	[deg.]
δ	: thickness of water film	[m]
κ	: thermal diffusivity of water	[m^2/hr]
μ	: viscosity of water	[kg/m hr]
ρ	: density of water	[kg/m^3]

Subscripts

1, a	: outside	(ambient)
2, R	: inside	(room)
i	: initial	(at $z=0$)

引 用 文 献

小森友明・関　平和・山本良子，1987：回収廃熱の農業利用について．昭和62年度北陸支部発表講演要旨集．

小森友明，1987：農業気象と作物生育過程への工学モデルの適用．昭和62年度日本農業気象学会北陸支部シンポジウム講演要旨集，資料．

小森友明・関　平和・山本良子，1988：回収廃熱の農業利用について．日本農業気象学会北陸支部会誌，**13**，21－29．

横田廉一・堀口郁夫，1970：温水の掛け流し温室に関する研究．農業気象，**26**，71－75．

小倉祐幸，1984：井水散水ハウスの散水量，散水温度に関する研究．生物環境調節，**22**，1－6．

原　道宏・小倉祐幸，1982：井水散水の重被覆ハウスにおける温度環境の形成機構．生物環境調節，**20**，25－34．

Bird, R. B., Stewart, E. S. and Lightfoot, E. N., 1961: *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, Inc., 37－41.

城塚　正・平田　彰・村上昭彦，1982：化学技術者のための移動速度論．オーム社，43－44．

Summary

Heating and thermal insulation characteristics of a falling hot water film on the roof or the screen sheet of a greenhouse may be analysed by evaluating the temperature profile of the thin water film. The temperature profile of the falling water film can be obtained by solving the conduction equation with several suitable boundary conditions, based on the concept of "Transfer and Rate of Processes". The generalized analytical solution of the temperature profile of the water film was given by Eq. (15) and the average temperature at an arbitrary distance along the direction of water flow, $\zeta=\zeta$ was given by Eq. (18).

From the calculated results of illustrative examples by the analytical solutions, the temperature of the water film at the water film-roof interface, $\xi=1$ could be approximated by the average temperature of the water film, an effective distance for heating the air in the greenhouse, ζ_R was determined from the relation between $\Phi_{av}(\zeta)$ and the dimensionless temperature of the greenhouse Φ_R and the most suitable thickness of the water film δ could be estimated by plotting $\Phi_{av}(1)$ against δ with a parameter Φ_R, as shown in Fig. 6.

The relationship between $\Phi_{av}(1)$ and δ in Fig. 6 will be also applicable to estimate the suitable flow rate of water.

According to the calculated results, the water film performs broadly the task of thermal insulation at the water-roof interface. The corresponding amount of heat to the thermal insulation effect of the water film was given by Eq. (21), theoretically. Figs. 10, 11 and 12 show the over-all heat balance of the water film obtained by Eq. (21) and the amount of heat calculated from Eq. (21) is evaluated quantitatively by the rate of reduction of heating load for heating the greenhouse. Therefore, the analytical solutions and procedures described here are useful for the calculation of actual heat requirement for heating a greenhouse, the design and operations of the practical water curtain system.