

## 赤外線加熱による水の温度上昇(第2報)

越 智 利 彦\*・楠 本 韶\*  
内 田 武\*\*・梶 聖 悟\*Temperature Change of the Water Heated  
by Infrared Radiation (Second report)

by

Toshihiko OCHI\*, Sho KUSUMOTO\*  
Takeshi UCHIDA\*\* and Seigo KAJI\*

We have investigated the distribution of temperature in the water heated by infrared radiation from two types of ceramic heater (type A, B) having individually different spectral radiation characteristics as shown in Fig. 1.

The results are as follows.

- ① The energy loss by evaporation during our experiment was less than 1% and it was negligible compared with the energy contributed to the temperature rise of the water for both type A, B.
- ② The ratio of the energy contributed to the temperature rise of the water to the emitted radiation energy for type B was about 84% of that of type A and type A had good efficiency for heating of the water than type B.
- ③ The results of the calculation by finite difference method (explicit scheme) for one-dimensional heat-conduction equation in consideration of Lambert absorption coefficient of water showed some different tendency to the experimental results.

The reason is not yet clear and the more studies are needed.

## 1. 諸 言

赤外線による加熱技術が省資源・省エネルギーとも関連して工業用としては回路基板の半田のリフローや塗料, 食品の乾燥にまた民生用としてはストーブや家庭用サウナなど既に各方面で利用され今後ますます応用分野の拡大発展が期待されている.<sup>1), 2), 3)</sup>

しかし, 赤外線による加熱の効果についての研究は十分とはいえないようであり例えば市販の赤外線ヒーターによる被加熱物の温度変化の状態の把握は容易ではないように思われる。

そこで, 赤外線による加熱機構の解明を目的として分光放射率の異なる2種類の市販のセラミックヒータ

ーを用いて水を加熱した場合の温度上昇について実験を行い加熱効果の違い及び表面熱流束を一定として熱伝導のみを考慮した場合の水の温度変化の近似計算との比較について前報で報告した.<sup>4)</sup>

本報では水の温度計測をする熱電対の位置をさらに正確に行うためマイクロメータを使用して前報と同様の実験を行い, さらに計測中, 水面付近の水温が上昇して蒸発する際の蒸発熱損失について検討を行った。

また, 水の温度変化について前報と同様に表面熱流束を一定とした熱伝導の式を用いて表すこととし一方では水のランバート吸収係数を考慮した場合について一次元の差分方程式を用いて計算することを試みた。

昭和63年4月30日受理

\*機械工学第二学科 (Department of Mechanical Engineering II)

\*\*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

## 2. 実験装置及び実験方法

実験は側面を発泡スチロールで断熱したアルミ容器(130×130×200mm, 厚さ3mm)に蒸留水を入れ, 上方より赤外線放射体で加熱し, その時の水の温度変化の測定を行った。

赤外線放射体とアルミ容器の間にはアルミの筒(150×150×200mm, 厚さ2mm)を配して赤外線放射体からの放射エネルギーが散逸しないようにした。

温度測定には, 容器の中心部に固定したクロメル-アルメル熱電対(素線径:0.04mm, 外径:0.25mm, シース:インコネル600)を用いた。この熱電対は底面側に取り付け付けたマイクロメータのスピンドル部に固定してあり, 水深方向に可動である。

測定時間は, 水面上方に赤外線放射体を配置後3分間とした。赤外線放射体としては, Fig. 1に示す

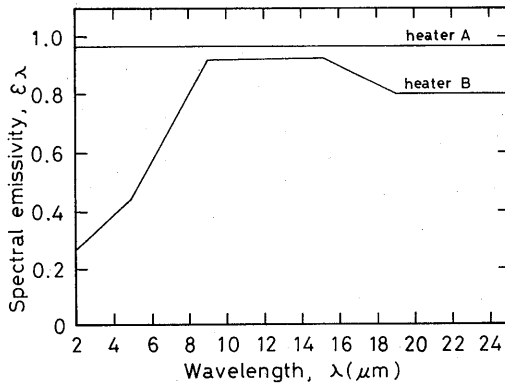


Fig. 1 Spectral emissivity of the heater A, B in the 2 to 25 μm wavelength region. (schematic)

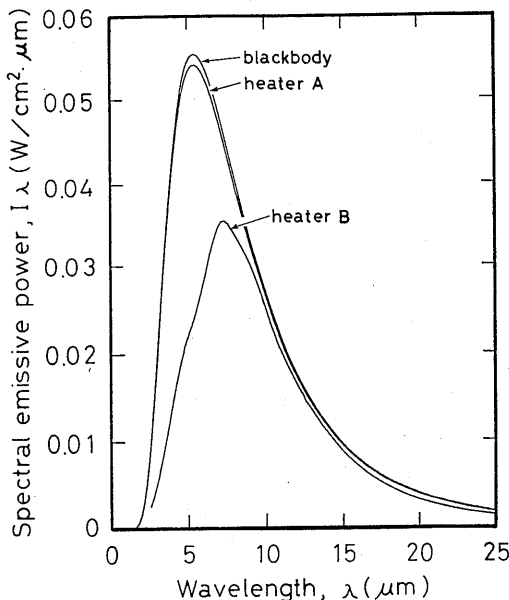


Fig. 2 Spectral emissive power of the heater A, B and blackbody in the 2 to 25 μm wavelength region. T=260°C.

ようにそれぞれ異なる分光放射率をもつ2種類のセラミックヒーターA, Bを用いた。なお, 同図はモデル化して示してある。

加熱実験の際にはスライドレギュレータを用いて赤外線放射体への供給電力を制御し, A, Bともに表面平均温度を260°Cとした。

なお実験中, 放射体の表面平均温度の変化は, ほとんどなかった。

Fig. 2は, 放射体A, Bについて分光放射率と表面平均温度とからプランクの式より求めた分光放射強度である。同図から放射エネルギーを計算すると, 放射体Aについては0.40W/cm<sup>2</sup>, Bについては0.30W/cm<sup>2</sup>となる。

また, 蒸発熱について検討するために両放射体を用いて加熱した場合の加熱前と3分間加熱後の水面の位置を熱電対の先端部によって計測した。

なお, 水の加熱中, 対流による伝熱および擾乱が起こることが考えられたが, サンドペーパー(1000番)で削ったアクリル粉末を水面に浮かべて観察し, 対流はほとんど無いものと判断した。

## 3. 実験結果と検討

### 3.1 水の蒸発による熱量損失

#### 3.1.1 放射体Aで加熱した場合

水の蒸発による熱量損失を検討するにあたって放射体Aによって3分間加熱した場合に水温の変化は水深が約20mmより浅いところでみられ, 表面付近の温度上昇は約20°Cであることがこれまでの実験で分かっていることから水面から水深20mmまでの部分が一様に10°Cから20°CにΔT<sub>A</sub>=10°Cの温度上昇をしたものと仮定して水の体積膨張による体積変化, アルミ容器の膨張による断面積変化, 及び水面の位置測定に用いたインコネルシース熱電対の線膨張による伸びを求めて蒸発エネルギーを見積った。

物性値としては, 水の体積膨張率 $\alpha_w = 0.207 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ <sup>5)</sup>, 水の密度 $\rho = 1.0\text{g}/\text{cm}^3$ , 水の比熱 $c = 4.18\text{J}/\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}$ , インコネルの線膨張係数 $\alpha_1 = 11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ <sup>6)</sup>, アルミニウムの線膨張係数 $\alpha_A = 23.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ <sup>6)</sup>, を用いた。

#### (1) 蒸発がないとした場合の水面の位置の変化

上述の仮定にもとづいて加熱前のアルミ容器の一辺の長さをL, 水の体積をVとすると, 蒸発がないとした場合にΔT<sub>A</sub>の温度変化後の水面の位置の変化をδd<sub>A</sub>とすると,

$$\delta d_A = \frac{V}{L^2} \left\{ \frac{1 + \alpha_w \cdot \Delta T_A}{(1 + \alpha_A \cdot \Delta T_A)^2} - 1 \right\} \quad (1)$$

であり、計算上 $\delta d_A = 32.0 \mu\text{m}$ となる。

(2) 熱電対の伸び

加熱前のインコネルシース熱電対の長さを $l_A$ とすれば $\Delta T_A$ の温度変化後の熱電対の伸び $\delta l_A$ は、

$$\delta l_A = \alpha_I \cdot l_A \cdot \Delta T_A \quad (2)$$

であり、計算すると $\delta l_A = 2.3 \mu\text{m}$ となる。

(3) 蒸発による熱量損失

加熱後の水面の位置の変化の実測値を $E_A$ とすれば、(1)、(2)より実際の水面の位置の変化( $E_A'$ とする)は、

$$E_A' = E_A - \delta l_A \quad (3)$$

となる。

これより蒸発した水の質量( $m_A$ とする)は、

$$m_A = \frac{(E_A' + \delta d_A) \cdot (L + \delta L)}{\rho} \quad (4)$$

となり、 $E_A$ は $35.0 \mu\text{m}$ であったから、 $m_A = 1.10\text{g}$ と計算される。これから蒸発による熱量損失は $46.0\text{J}$ となり、平均して $1.51 \times 10^{-3}\text{W}/\text{cm}^2$ となる。放射体Aの放射強度は $0.40\text{W}/\text{cm}^2$ であったから水の蒸発による熱量損失はほとんど無視できることになる。

3. 1. 2 放射体Bで加熱した場合

放射体Bで加熱した場合についても、3.1.1で述べた放射体Aについてと同様に考えて蒸発による熱量損失を見積った。ただし、温度変化は $\Delta T_B = 10^\circ\text{C}$ とした。

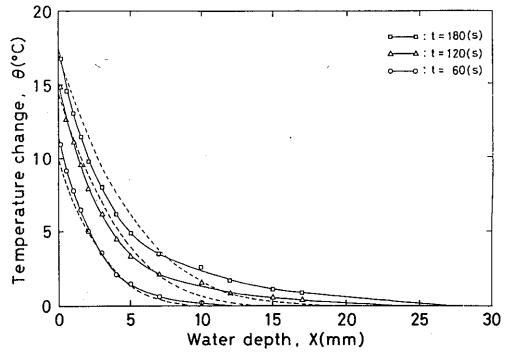
$\Delta T_B$ の温度変化後、蒸発がないとした場合の水面の位置の変化 $\delta d_B$ は、 $16.0 \mu\text{m}$ となる。また、熱電対の伸び $\delta l_B$ は、 $1.2 \mu\text{m}$ 、水面の位置の変化の実測値 $E_B$ は、 $19.2 \mu\text{m}$ であったから蒸発した水の量 $m_B$ は $0.57\text{g}$ と計算され、これより蒸発による熱量損失は $11.9\text{J}$ となり、平均して $3.91 \times 10^{-4}\text{W}/\text{cm}^2$ となる。放射体Bの放射強度は $0.30\text{W}/\text{cm}^2$ であったから、放射体Bについても水の蒸発による熱量損失はほとんど無視できることになる。

3. 2 水の温度上昇と吸収エネルギー

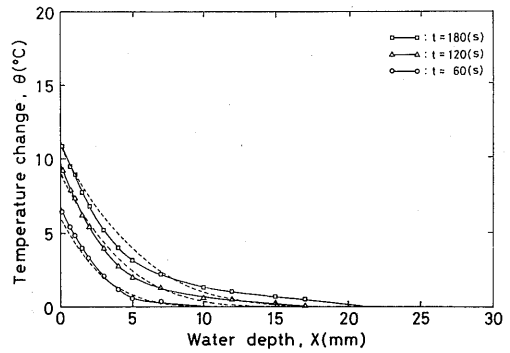
Fig. 3 (a), (b) は、それぞれA, B各ヒーターで加熱した場合の60s, 120s, 180sの各時間後における水深方向の温度上昇である。これらの曲線と両軸で囲まれた面積から水に吸収された熱量を近似的に求めることができる。

Fig. 4は、加熱開始後の各20sの間について上述のようにして求めた水の吸収エネルギー $Q_w$ とヒーターからの放射エネルギー $Q_0$ との比を示す。

同図から $Q_w/Q_0$ は $0.4 \sim 0.6$ 程度であって、かなりの熱量損失がある。この熱量損失については、3.1で述べたように蒸発による熱量損失はほとんど無視



(a): heater A (T=260°C)



(b): heater B (T=260°C)

Fig. 3 Temperature change distributions in the direction of the depth.  
— : experiment  
--- : calculation for the constant heat flux case

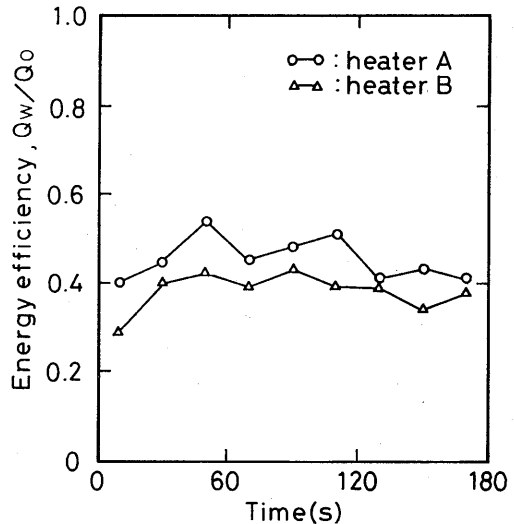


Fig. 4 Ratio of the energy absorbed in the water to the total energy emitted from the heater during each 20s of the experiment.

できることから、そのほとんどが水面での反射によるものと考えられる。

またAとBの $Q_w/Q_0$ を比較すると、Bの $Q_w/Q_0$ はAのその約84%である。

これはAの方がBより水の加熱に関して効率の良い赤外線成分の割合が多いためと考えられる。

3. 3 近似計算

赤外線により水を加熱する場合、Fig. 5に示す

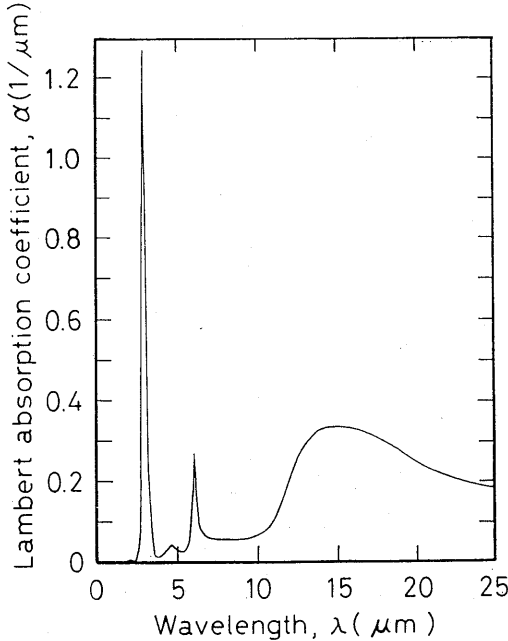


Fig. 5 Lambert absorption coefficient of water in the 2 to 25  $\mu\text{m}$  wavelength region.

ランバート吸収係数を考慮すると赤外線のエネルギーは水面から100  $\mu\text{m}$ 以内の深さの間でそのほとんどが吸収されることから、例えば1mm以上という十分な深さにおける温度変化について水面での熱流束を一定とした熱伝導のみによる熱伝導方程式を用いて表すことを試みて前報で報告した。このとき表面熱流束としては、3.2で述べた水の吸収エネルギー $Q_w$ を与えた。

本報でも前報と同様に表面熱流束を一定とした熱伝導のみによる熱伝導方程式を用いて水の温度変化を表した。計算の結果をFig.4に点線で示した。

前報と同様に、“赤外線はある程度内部まで浸透して内部より加熱することができる”と一般に言われるように実験値はある程度深いところでは表面熱流束を一定とした熱伝導のみによる場合に比べ高い温度上昇を示してはいるが計算値と実験値との両曲線は2点で交差しかなりの差がみられる。これから赤外線で水を加熱する場合に赤外線のエネルギーは水面近くでそのほとんどが吸収されるが表面熱流束を一定とした熱伝導の式を用いては表せないものと考えられた。

そこで放射体Bで加熱した場合について水のランバ

ート吸収係数を考慮にいたれた熱伝導方程式を一次元の差分方程式として解くことを試みた。

基礎方程式は、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{Q}{\rho c} \tag{5}$$

である。

ここで、

- $\theta$  : 水の温度上昇 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $t$  : 時間 ( $\text{s}$ )
- $\kappa$  : 水の熱伝導率 ( $\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )
- $\rho$  : 水の比熱 ( $\text{J/g}\cdot^{\circ}\text{C}$ )
- $c$  : 水の密度 ( $\text{g/m}^3$ )
- $Q$  : 吸収エネルギー ( $\text{W/m}^2$ )

である。さらにQは、

$$Q(x) = a \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} \epsilon_{\lambda} I_{b\lambda} \exp(-\alpha_{\lambda} x) dx \tag{6}$$

ただし、

- $\alpha_{\lambda}$  : 水のランバート吸収係数
- $\epsilon_{\lambda}$  : 放射体の分光放射強度
- $I_{b\lambda}$  : 黒体の分光放射強度
- $\lambda$  : 波長
- $a$  :  $0 \leq a \leq 1$ の定数

である。

差分方程式では水深方向にメッシュ幅を $\Delta x = 1 \mu\text{m}$ とし、時間ステップは解の安定条件より $\Delta t = 1.0 \times 10^{-6} \text{s}$ として、水深200  $\mu\text{m}$ までを計算した。

水深方向*i*番目、時間ステップ*j*番目の温度を $\theta_i^j$ と表し、エネルギーバランスを考えて整理すると次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \theta_0^{j+1} \\ \theta_1^{j+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_{199}^{j+1} \\ \theta_{200}^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-2r & 2r & & & & & \\ r & 1-2r & r & & & & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ 0 & & & & r & 1-2r & r \\ & & & & & 2r & 1-2r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_0^j \\ \theta_1^j \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_{199}^j \\ \theta_{200}^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_0 \cdot \Delta t / \rho c \\ Q_1 \cdot \Delta t / \rho c \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_{199} \cdot \Delta t / \rho c \\ Q_{200} \cdot \Delta t / \rho c \end{bmatrix} \tag{7}$$

(ただし、 $r = \kappa \Delta t / \rho c (\Delta x)^2$ )

計算の結果をFig. 6に実線で示した。Fig. 6には表面熱流束を一定として与えた場合の熱伝導のみによる

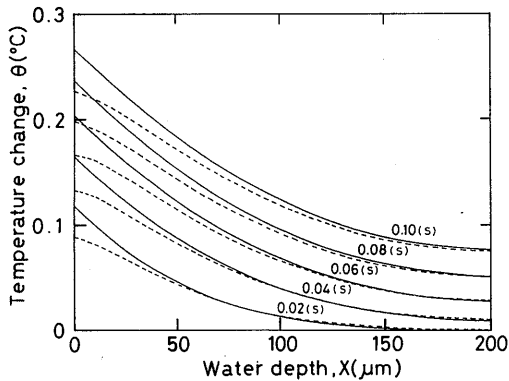


Fig. 6 Calculation of the temperature change distribution in the direction of the water depth.  
 — : Lambert absorption coefficient considered.  
 - - - : constant surface heat flux considered.

場合の計算結果を破線で示してある。

同図からわかるように表面熱流束を一定として熱伝導のみによる場合に比べ、ランバート吸収係数を考慮した場合は表面の温度が上昇していない。また、両曲線は1点で交差し、水深の深いところではランバート吸収係数を考慮した場合の方が表面熱流束を一定とした熱伝導のみによる場合よりも温度の上昇が大きく、さらに、この交点は時間がたつにつれて水深の深い方へ移行している。

今回のランバート吸収係数を考慮した場合の計算は深さが200 $\mu\text{m}$ まで、時間は0.1sまでであって実験値と直接比較できる領域ではないが、実験値のように表面熱流束を一定とした熱伝導のみによる計算と2点で交差するような傾向は示されない。

このような差異の原因については、水面における反射を考慮した計算を試みるとともに実験方法の改善も含めて今後検討していく予定である。

#### 4. 結 言

分光放射特性の異なるA, B2種類の市販の赤外線ヒーターを用いて水の加熱実験を行い以下の結果を得た。

- (1) 水の加熱中、蒸発によるエネルギーの損失は、A, Bともに1%以下であって、ほとんど無視できる。
- (2) A, Bの放射エネルギーのうち、水温上昇に寄与するエネルギーの割合の比は約0.84であってAの方が水の加熱について有効であった。これより、水の加熱に関しては比較的短波長の赤外線が有効であると考えられる。
- (3) ランバート吸収係数を考慮した熱伝導方程式の一次元の差分法による水の温度上昇の近似計算値と実験値はFig. 6に示すようにその傾向に差異がみられる。

#### 参考文献

- 1) 日本電熱協会編集; 電熱, No22, (1985)
- 2) 日本電熱協会編集; 電熱, No30, (1986)
- 3) 工業技術会:「遠赤外線利用の現況と展望」講習会 (1986.9.24~25)テキスト
- 4) 楠本 韶 他; 赤外線加熱による水の温度上昇, 長崎大学工学部研究報告, Vol. 17, No29, 1987
- 5) 東京天文台編纂; 理科年表, 丸善
- 6) 日本機械学会編; 機械工学便覧, 5-1
- 7) George M. Hale and Marvin R. Querry; Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- $\mu\text{m}$  Wavelength Region, Appl. Opt, 12, 3(1973)
- 8) Charles W. Robertson and Dudley Williams; Lambert Absorption Coefficient of Water in the Infrared, J. Opt. Soc. Am, 61, 10(1971)