

赤外線加熱による水の温度上昇

楠本 韶* 越智 利彦*
内田 武** 梶 聖悟*

Temperature Change of the Water
Heated by Infrared Radiation

by

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

The distribution of temperature in the water heated by infrared radiation emitted from the ceramic heater was investigated.

Two types of ceramic heater (type A, B) having individually different spectral radiation characteristics as shown in Fig. 2 were used.

The temperature of the emitting surface was held at about 260 °C during the experiment and the temperature change distribution in the irradiated water was recorded.

The results are as follows

- ① The energy contributed to the temperature rise of the water, excepting the evaporation energy at the water surface was about 40 percent of the emitted radiation energy for type A. It was almost 60 percent for type B which has a spectral radiation characteristics similar to a blackbody.
- ② The results of the calculation postulating the constant heat flux at the surface of the water showed some difference with the experimental results as shown in Fig. 8 (a), (b).

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

1. 緒 言

近年、赤外線による加熱方法が省資源・省エネルギーとも関連して特に産業分野で使用され、さらに医療分野、生活用品においても利用されるようになってきている。

赤外線による加熱の利点としては、しばしば次のことが挙げられる。

- ① 赤外線は、空気にほとんど吸収されず直接加熱が可能である。
- ② 電磁波の性質を利用して、集中・分散等種々の加熱方法が可能である。
- ③ 有機材料は、赤外領域に高い吸収率を有し著しい

加熱効果がある。

- ④ エネルギーのレベルが低く化学作用のない加熱が可能である。
- ⑤ 被加熱物のある程度内部より加熱することが可能である。

また、赤外線加熱利用の拡大・発展の背景として、赤外線、特に遠赤外線放射物質として、遠赤外部に高い放射率を有するセラミックが開発されている。この方面の開発・研究では、発熱体の赤外線放射特性と被加熱物の吸収特性の関係が調べられ、また、放射赤外線の集光・配光の技術等が開発、研究されている。し

昭和62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)

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、例えば市販されている赤外線ヒーターを用いた時の被加熱物の温度変化状態の把握は、必ずしも容易ではないように思われる。

本研究は、上記のような点から、セラミック系の発熱体を使用して、水を加熱した場合の温度上昇につい

て実験・検討し、赤外線による加熱機構の解明を目的として行われたものである。

被加熱物として、水を選んだ理由は、加熱の対象として、食品、塗料、生体等、水を含んでいる場合が多いこと及び、吸収係数、熱伝導率等の物理定数が分かっていて解析に便利なこと等によるものである。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装要及び実験方法

Fig. 1 に実験装要の概略図を示す。容器は、厚さ 3 mm の Al 板で、その周りを断熱材（発泡スチロール）により断熱してある。この容器の上に放射体から、放射された放射エネルギーの密度を高めるために、容器と同じ Al 板の筒を配した。放射体は、この Al 製の筒の上部に放射体置台と断熱材を介して設置した。

また、水の温度測定は容器中央に水面下 0.5 mm、2 mm、7 mm、12 mm、17 mm の位置にシース熱電対（素線径 0.3 mm、外径 1.6 mm、シース SUS-321）を固定して行った。

まず、本実験においては熱電対の応答特性が重要であるので熱電対の応答速度を調べた。

熱電対の応答速度の測定は、一方のビーカーに氷水（0°C）を用意し、他方のビーカーには、沸騰した水（約 98°C）を用意して熱電対を氷水から沸騰した水へと素早く移すことにより行った。

この結果、熱電対の応答時間は約 2 秒であり本実験においてこの熱電対を使用することに不都合はないと考えられた。

さらに、水の加熱中、対流による伝熱及び擾乱が起こることも考えられたので、水深 10、40、70、100、130 mm においてそれぞれ水平方向に中心を含めて中心より 10 mm ごとに計 5 本の熱電対を固定して放射体により加熱した場合の温度を測定した結果、水平方向での温度差は加熱中 0.1°C 以内であった。

これより対流による伝熱及び擾乱はほとんどないものと判断した。

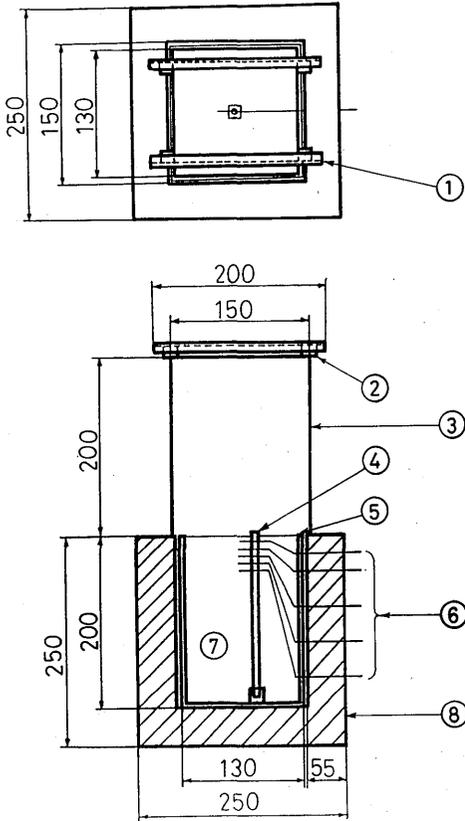
2.2 赤外線放射体

2.2.1 放射体

赤外線放射体として市販のセラミックヒーター 2 種類を用いた。

A はコージェライト ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) を主成分としたセラミック基板を層状に重ね焼成したもので Fig. 2 に示すように波長 8 μm 程度以上で分光放射率が高いという特性を持っている。

また、B は、SiC、SiN を主成分として、さらに、数種の物質を添加し焼成したもので同図に示すようにか



- ① Heater setting bar
- ② Heat-resisting insulation
- ③ Al boarding
- ④ Thermocouple supporting rod
- ⑤ Al case
- ⑥ Thermocouple
- ⑦ Water
- ⑧ Styrofoam case

Fig. 1 Conspectus of the experimental setup

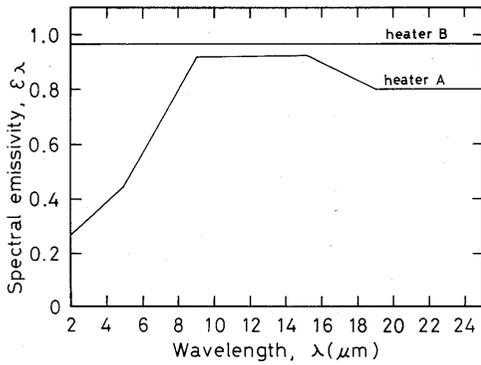


Fig. 2 Spectral emissivity of the heater A, B in the 2 to 25 μm wavelength region; schematic.

なり黒体に近い分光放射率を持っている。なお、同図は、モデル化して示してある。

2. 2. 2 放射強度

(1) 水の加熱実験中 スライダック及び電圧計を用いて表面温度が一定となるように供給電力を制御した。実験中A, Bの表面平均温度は、それぞれ260°C, 266°Cであった。なお、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の計算値を Fig. 3 に示す。

(2) セラミックヒーター A, Bについて1~50 μm の波長領域での放射強度を遠赤外線パワーメータ (OPTEX; HEAT-PICKER, ER-1 PS) を用いて測定した。Aは表面平均温度260°Cにおいて0.35W/cm²,

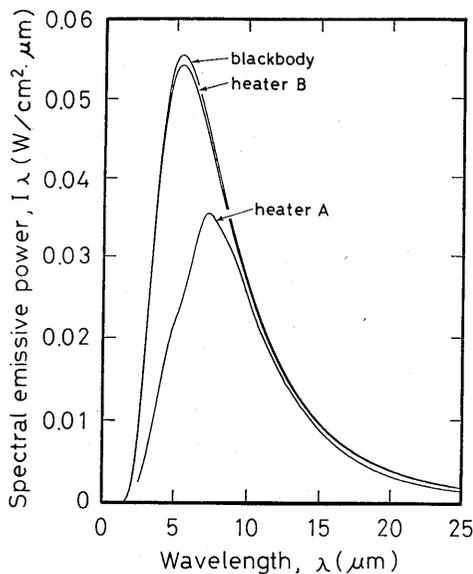


Fig. 3 Spectral emissive power of the heater A (surface temperature $T=260^\circ\text{C}$), B ($T=266^\circ\text{C}$) and blackbody ($T=260^\circ\text{C}$) in the 2 to 25 μm wavelength region.

Bは同じく266°Cにおいて0.42W/cm²であった。

また、Fig. 3より求めた、2~25 μm の波長範囲での放射強度の計算値は、Aは0.30W/cm², Bは0.40W/cm²であった。

25~50 μm の波長範囲の放射強度を考慮すれば、それぞれの放射体の放射強度の計算値と実測値は、ほぼ一致する。

一方、260°Cの黒体の全放射強度に対する1~50 μm の波長領域での放射強度は約99.3%、2~25 μm の波長領域でのそれは約95.7%であることから以後の解析には分光放射率が分かっている2~25 μm の波長範囲での放射強度、すなわちAについては0.30W/cm², Bについては0.40W/cm²を用いることにした。

3. 水の吸収係数の検討

一般に光の吸収に関して、一様な吸収層に入射した単色平行光の強度 I_0 と透過光の強度 I_x の関係はランバートの法則として

$$I_x = I_0 \exp(-\alpha_x x) \tag{1}$$

と表される。

ここで、 α_x はランバート吸収係数、 x は吸収層の厚さである。 α_x は消衰係数 k_λ を用いて

$$\alpha_x = 4\pi k_\lambda / \lambda \tag{2}$$

と求めることができる。本報では k_λ として、George. M. Hale 他¹⁾による文献の値を用いて水のランバート吸収係数 α_x を求めた。

1~25 μm の波長領域での水のランバート吸収係数を Fig. 4 に示す。

また、ランバート吸収係数の逆数 α^{-1} は入射光のエネルギーが $1/e$ に減衰する距離を表す。

1~25 μm の波長領域での α^{-1} の値を Fig. 5 に示す。ランバートの法則を用いると水深 x での透過光のエネルギーは

$$I(x) = \int_0^\infty I_{\lambda 0} \exp(-\alpha_x x) d\lambda \tag{3}$$

で表され水深 x での水の吸収エネルギーは上式から

$$-\frac{dI}{dx} = \int_0^\infty I_{\lambda 0} \exp(-\alpha_x x) d\lambda \tag{4}$$

で求められる。

Fig. 6 には、A, B 2種類のセラミックヒーターを用いてヒーター温度がそれぞれ260°C, 266°Cの条件で水を加熱した場合の水の吸収エネルギーの計算値を示した。

赤外線による加熱は物体を内部より加熱することが可能であるという表現がしばしば用いられるが今の場合、赤外線は、水中では100 μm より短い距離でそのほ

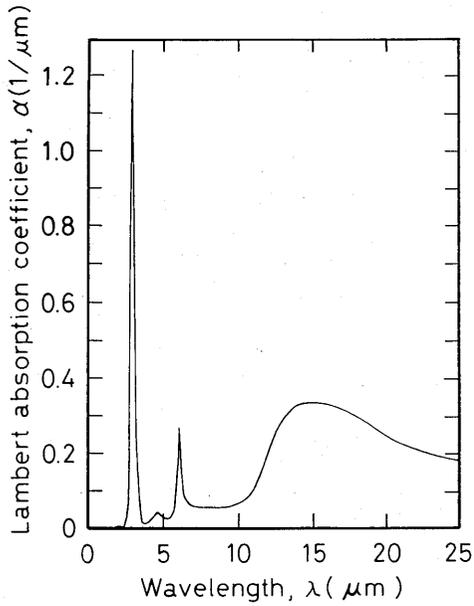


Fig. 4 Lambert absorption coefficient of water in the 2 to 25 μm wavelength region.

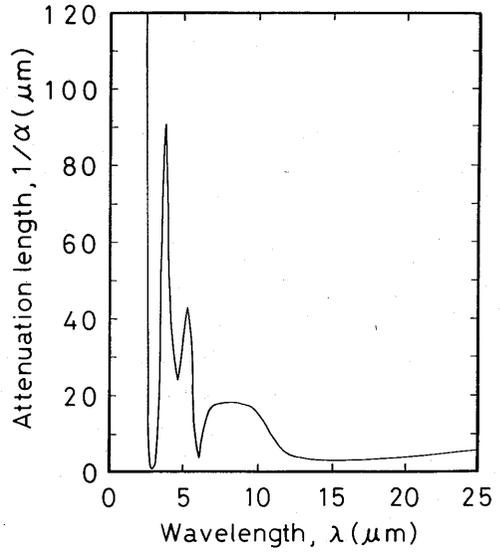


Fig. 5 Energy attenuation length of water in the 2 to 25 μm wavelength region.

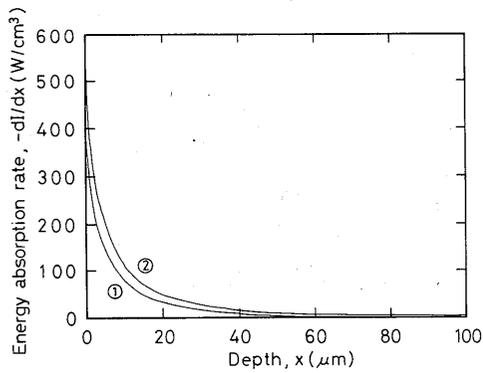
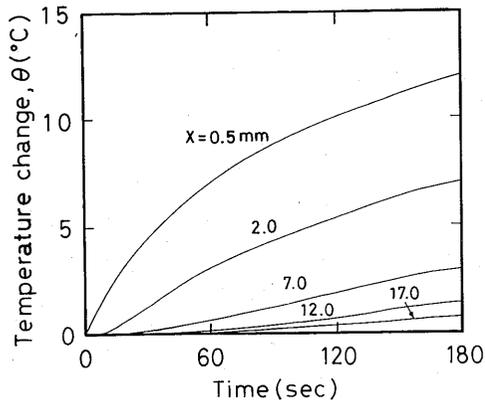


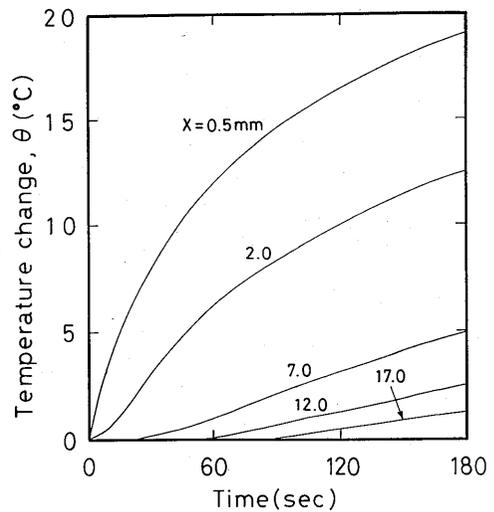
Fig. 6 Distribution of energy absorption rate in the water; calculated.

① : heater A ($T=260^\circ\text{C}$)

② : heater B ($T=266^\circ\text{C}$)



(a) : heater A ($T=260^\circ\text{C}$)



(b) : heater B ($T=266^\circ\text{C}$)

Fig. 7 Temperature change curves of the water irradiated by the heater.

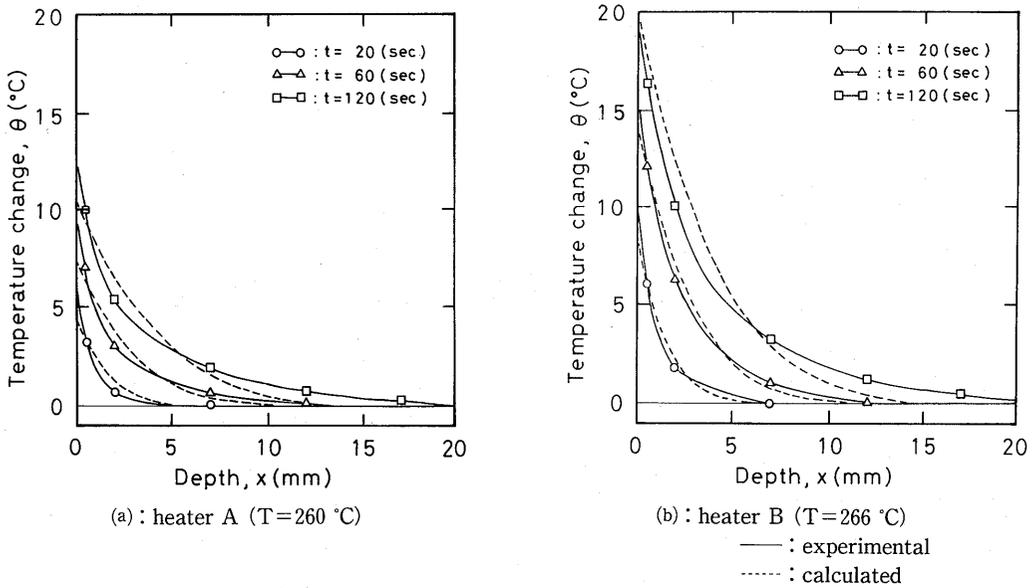


Fig. 8 Temperature change distributions in the direction of the depth.

とんどが吸収され、また数十 μm 以上では水が吸収する赤外線のエネルギーは、ほとんど無視できるくらいに小さいことになる。

4. 実験結果と検討

4. 1 水の温度上昇

A, B各ヒーターで加熱した場合の水の温度上昇の測定結果をそれぞれ Fig. 7(a), (b)に示す。

A, Bによる加熱効果は、Fig. 3からも当然予想されるようにBの方が、はるかに大きい。また水深 $x = 2\text{mm}$ 以上での測定結果にみられるように曲線の立ち上がり付近が上に凹であるのは、温度上昇が赤外線による直接の加熱よりも主として水面付近の温度上昇に伴って生じた熱伝導によるものであることを示している。

4. 2 吸収エネルギー

Fig. 8(a), (b)はそれぞれ Fig. 7(a), (b)の結果を深さと温度との関係に整理し直したものである。これらの曲線と両軸とで囲まれた面積から水に吸収された熱量を各時間ごとに近似的に求めることができる。

Fig. 9は、こ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 との比を示した。同図からわかるように Q_w/Q_0 は0.4~0.6程度であって、かなりのエネルギーが水面で反射され、もしくは蒸発熱として奪われている。

また、 Q_w/Q_0 が時間経過とともに減少する傾向があるが、これは水面近くの浅い層の水温が上昇して気化

し蒸発熱が奪われることやヒーター~水面間の空気中の水分による赤外線の吸収増加等によるものと思われる。

また、AはBに比べて Q_w/Q_0 が小さいが、これはAの方が長波長側の赤外線成分が多く吸収係数の関係で加熱される水の層が浅いため蒸発などによるエネルギーの損失が多いためではないかと考えられる。

4. 3 近似計算

3節で述べた通り本実験の場合水への入熱の大部分は水面近くの100 μm 以下の深さの間で吸収されるものと考えられたので例えば $x > 1\text{mm}$ という程度の十分な深さの温度変化は、水面 ($x = 0$) での熱流束を一定とした熱伝導の式を用いて表すことを試みた。

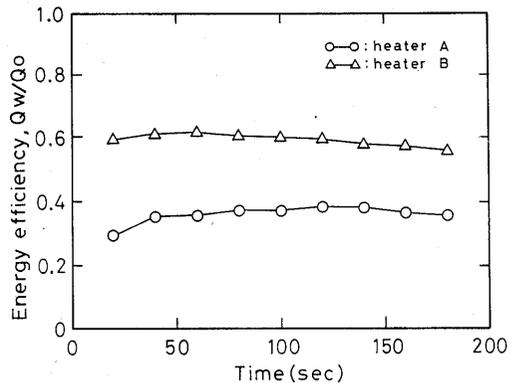


Fig. 9 Ratio of the energy absorbed in the water to the total energy emitted from the heater.

すなわち、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (4)$$

周辺条件は、

$$\theta(x, 0) = 0$$

$$-k \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=0} = Q_0 = \text{const} \quad (t > 0) \quad (5)$$

ただし、

θ : 水の温度上昇 (°C)

t : 時間 (sec)

k : 水の熱伝導率 (W/m·K)

c : 水の比熱 (J/g·K)

ρ : 水の密度 (g/m³)

Q_0 : 表面熱流束 (W/m²)

であり、解は次式で示される。²⁾

$$\theta(x, t) = \frac{2Q_0\sqrt{at/\pi}}{k} \exp(-x^2/4at) - \frac{Q_0x}{k} (1 - \text{erf } x/2\sqrt{at}) \quad (6)$$

ここで、

$a = k/\rho c$ であり、また、erf はガウスの誤差関数とよばれるもので次のように定義される。

$$\text{erf } x/2\sqrt{at} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/2\sqrt{at}} \exp(-y^2) dy \quad (7)$$

実際の計算ではガウスの誤差関数の値は文献²⁾の付録Aの表より求めた。また、 Q_0 は Fig. 9 で示したように本実験では次のようになる。

Aの場合 $Q_0 = 2.52 \times 10^3$ (W/m²)

Bの場合 $Q_0 = 1.35 \times 10^3$ (W/m²)

計算結果を Fig. 8 (a), (b) の中に点線で示した。計算値と実験値との曲線は交差していて、かなり差がみられる。この差はたとえば a の値を変化させてもあまり

影響がない。このような差が生じた原因については実験方法の改善も含めて今後検討の予定である。

4. 結 言

分光放射特性の異なる A, B 2 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、次の結果を得た。

(1) 放射エネルギーのうち水温上昇に寄与する割合は、A, B それぞれ約 40%, 60% 程度であって、黒体に近い B の方が有効であった。

(2) 水面からの入熱の時間割合を一定とした近似計算による水温上昇は実験値と比べ Fig. 8 に示すような差があった。計算値はどちらの場合にも、 x が小さい範囲では実験値よりも高く、 x が大きい範囲では実験値よりも低い値となった。

これらの結果はまだ限られた実験条件の下であり、今後さらに検討を加えたい。

最後に本研究に当たって有益な援助を戴いた本学金丸邦康助教授及び熱心に研究に従事された卒業研究の学生諸君に厚く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) George M. Hale and Marvin R. Querry; Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- μ m Wavelength Region, Appl. Opt, 12, 3 (1973)
- 2) J. P. Holman, Heat Transfer, 5th edition, (1981), 116, McGRAW-HILL
- 3) 高嶋廣夫; セラミック赤外線放射体の加熱効果, 材料科学, 18, 1 (1981), 64-69
- 4) 日本電熱協会編集; 電熱, No22, (1985)