

## 赤外線加熱による水の温度上昇 (第3報)

越 智 利 彦\* ・ 楠 本 韶\*  
内 田 武\*\* ・ 今 田 秀 則\*Temperature Change of Water Heated  
by Infrared Radiation (Third Report)

by

Toshihiko OCHI\*, Sho KUSUMOTO\*  
Takeshi UCHIDA\*\*, Hidenori IMADA\*

Characteristic of infrared absorption of water was investigated based on Lambert absorption coefficient which was calculated from the infrared spectrum transmissivity measured by using of infrared spectrophotometer, then the distribution of temperature in water heated by infrared rays from ceramic radiant was studied.

The results of the study showed that the most of the energy of incident infrared ray to the water was absorbed in very shallow surface layer, about  $100\mu\text{m}$  depth, and the remaining part of water was heated by heat conduction.

The distribution of the temperature was calculated by usual heat conduction equation assuming constant surface heat flux.

The amount of the heat flux depended mainly on the reflectivity of water and so far as heating effect concerned, when heated by infrared ray, the reflectivity was more important factor than the value of absorption coefficient.

## 1. 緒 言

赤外線による加熱については現在のところ製品が先行し、加熱特性やその影響についての研究は十分とは言えないようであり、不明な点が多い。

著者らは、これまでセラミックス赤外線放射体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温度分布、吸収熱量等について検討してきた。

これまでの報告<sup>1),2)</sup>では温度測定に市販のシー思熱電対(外径1.6mm, 素線径0.3mm, 応答時間1.9sおよび外径0.25mm, 素線径0.04mm, 応答時間0.16s)を使用してきた。このことから温度測定の応答性誤差について

はほとんど無視し得るが熱電対の配置の方法とも関連して位置誤差と熱伝導誤差はかなり生じたと考えられた。そこで本実験では熱電対を自作して赤外線による水の加熱実験を行いその温度分布の測定を行った。また加熱実験に先立ち、水の赤外線吸収特性を調べるために、赤外線分光透過率の測定を行い、ランバート吸収係数を求めた。この吸収係数をもとに水の吸収エネルギーを計算し、その後の近似計算について検討した。

平成元年4月28日受理

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

\*\*北九州工業高等専門学校 福岡県北九州市 (Kitakyushu college of Technology, Fukuoka)

2. 実験装置及び実験方法

2. 1 赤外分光透過率の測定

水の赤外分光透過率を赤外分光光度計 (IR-810, 日本分光工業株式会社) を用いて測定した。測定には液体セルを用い, 分光光度計の試料光束路側に配した。対照光束路側は空気とした。また液体セルのスペーサーの厚さを光学的に調べ, この値を水膜厚さとした。

液体セルの窓板として用いた  $As_2Se_3$  (厚さ約 4 mm) の赤外分光透過率および水の赤外分光透過率の測定結果をそれぞれ Fig. 1, 2 に示す。

窓板の  $As_2Se_3$  の総透過率は波長 2.5~12 $\mu m$  の範囲で 0.648 とほぼ一定となっている。

水の場合, 水分子の O-H 伸縮振動による 2 つの基準振動の吸収ピークが 2.7 $\mu m$  付近に, また H-O-H 変角振動による吸収ピークが 6.2 $\mu m$  付近にあることが報告<sup>9)</sup> されている。本実験の場合, Fig. 2 を見ると波長  $\lambda = 2.8 \sim 3.1 \mu m$  付近で 3 種類の水膜厚さについて全て透過率  $T \cong 0$  となっていて吸収係数を算出するデータとならない。この点については今後さらに薄い水膜層を作製することで改善していく予定である。

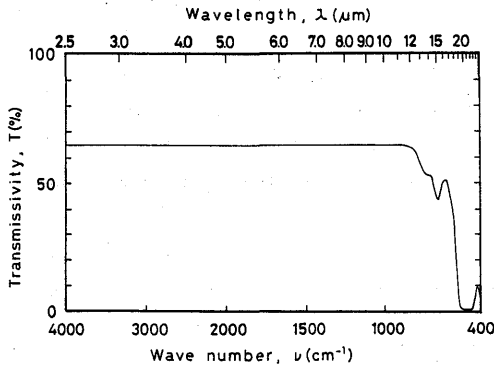


Fig. 1 Spectrum transmissivity of arsenic selenide ( $As_2Se_3$ ) window plate

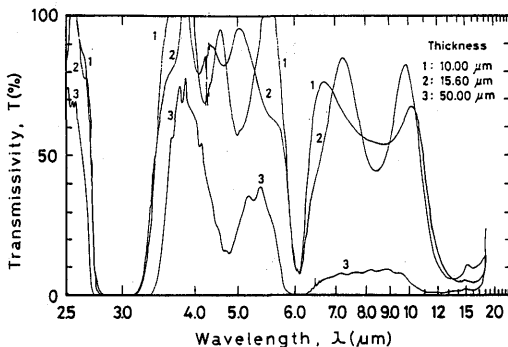


Fig. 2 Spectrum transmissivity of water film

2. 1. 1 窓板の吸収率の多重反射解析

分光光度計の試料光束路側に窓板 1 枚を設置した場合と空気層を挟む窓板 2 枚系を設置した場合について透過率測定を行う。このときの多重反射状況を Fig. 3, 4 に示す。 $r, a, n$  はそれぞれ窓板の反射率, 吸収率, 屈折率であり, 光が垂直入射する場合,

$$r = \{(n-1)/(n+1)\}^2 \tag{1}$$

である。

窓板 1 枚系における総反射率  $R$ , 総吸収率  $A$ , 総透過率  $T$  は Fig. 3 (a) の該当項を縦に加算して,

$$R = r + r(1-a)^2(1-r)^2 / \{1-r^2(1-a)^2\} \tag{2}$$

$$A = a(1-r) / \{1-r(1-a)\} \tag{3}$$

$$T = (1-r)^2(1-a) / \{1-r^2(1-a)^2\} \tag{4}$$

となる。

一方, 空気層を挟む窓板 2 枚系において総反射率  $R_2$ , 総吸収率  $A_2$ , 総透過率  $T_2$  は,  $R, A, T$  を用いて,

$$R_2 = R + RT^2 / (1-R^2) \tag{5}$$

$$A_2 = A(1 + T(1+R)) / (1-R^2) \tag{6}$$

$$T_2 = T^2 / (1-R^2) \tag{7}$$

と表される。(Fig. 4)

ここで  $T$  及び  $T_2$  を実測し, (2) 式と (7) 式と (4) 式から  $a$  を求めた。

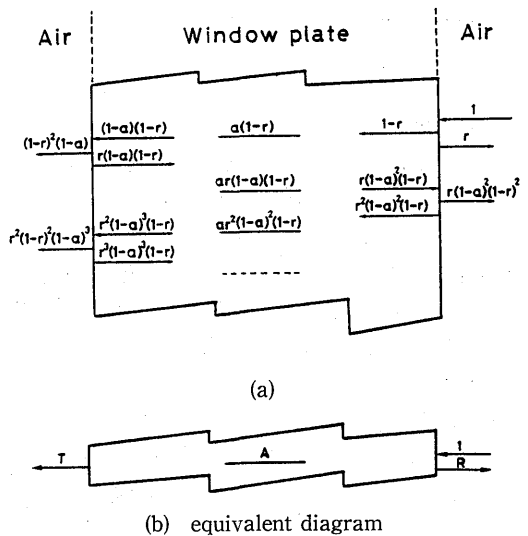


Fig. 3 Multiple reflection situation of Air-Window plate-Air situation

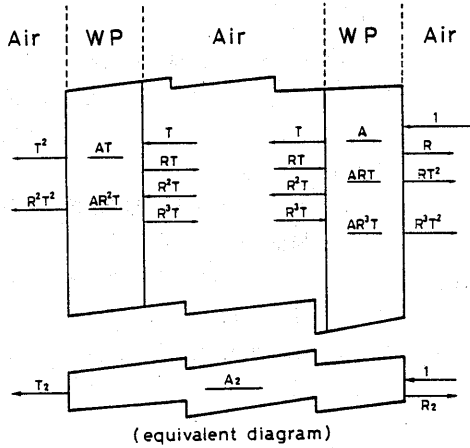


Fig. 4 Multiple reflection situation of Air-Window plates putting air layer-Air situation (WP : Window plate)

2. 1. 2 多重反射解析による水の Lambert 吸収係数 ( $\alpha_{wl}$ ) の導出

入射側の空気、透過側の水がともに半無限の場合の多重反射状況を Fig. 5 に示す。水の屈折率を  $n_w$ 、窓板から水へ入射する場合の相対屈折率を  $n'$  ( $= n_w/n$ ;  $n_w = 1.333$ )、反射率を  $r_w$  とすると垂直入射時には、

$$r_w = \{(n' - 1)/(n' + 1)\}^2 \quad (8)$$

となる。

この場合の総反射率  $R_w$ 、総吸収率  $A_w$ 、総透過率  $T_w$  は図の該当項を加算して、

$$R_w = r + r_w(1-r)^2(1-a)^2 / \{1 - rr_w(1-a)^2\} \quad (9)$$

$$A_w = a(1-r)\{1 + r_w(1-a)\} / \{1 - rr_w(1-a)^2\} \quad (10)$$

$$T_w = (1-r)(1-r_w)(1-a) / \{1 - rr_w(1-a)^2\} \quad (11)$$

となる。

また、入射方向を逆にして、水→窓板→空気へ透過する場合は

$$\bar{R}_w = r_w + r(1-r_w)^2(1-a)^2 / \{1 - rr_w(1-a)\} \quad (12)$$

$$\bar{A}_w = a(1-r_w)\{1 + r(1-a)\} \quad (13)$$

$$\bar{T}_w = T_w \quad (14)$$

となる。(Fig. 5 (b))

水を挟む窓板 2 枚系の多重反射状況を Fig. 6 に示

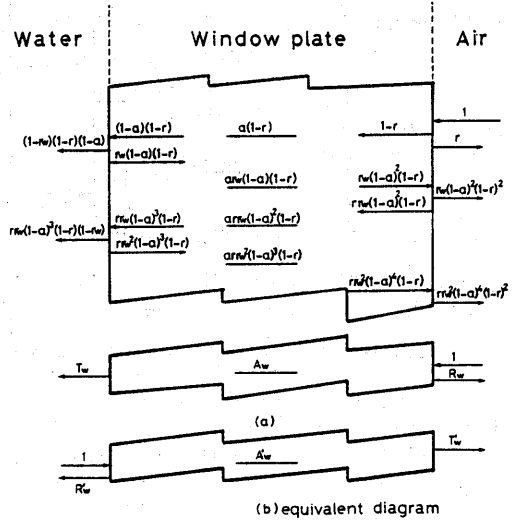


Fig. 5 Multiple reflection situation of Water-Window plate-Air situation

す。(9)~(14)式を用いて水の総反射率  $R_{ww}$ 、総吸収率  $A_{ww}$ 、総透過率  $T_{ww}$  を求めると次のようになる。

$$R_{ww} = R_w + (1-a_w)^2 \bar{R}_w T_w^2 / \{1 - (1-a_w)^2 \bar{R}_w^2\} \quad (15)$$

$$A_{ww} = a_w T_w \{1 - (1-a_w) \bar{R}_w\} / \{1 - (1-a_w)^2 \bar{R}_w^2\} \quad (16)$$

$$A_{wk1} = A_w + (1-a_w)^2 T_w \bar{R}_w \bar{A}_w / \{(1-a_w)^2 \bar{R}_w^2\} \quad (17)$$

$$A_{wk2} = (1-a_w) T_w \bar{A}_w / \{1 - a_w^2 \bar{R}_w^2\} \quad (18)$$

$$A_{ww} = A_{wk1} + A_{wk2} = A_w + (1-a_w) T_w \bar{A}_w / \{1 + (1-a_w) \bar{R}_w\} \quad (19)$$

$$T_{ww} = (1-a_w) T_w^2 / \{1 - (1-a_w)^2 \bar{R}_w^2\} \quad (20)$$

ただし、 $a_w$  は与えられた厚さの水の吸収率である。

(21)式を整理すれば、

$$a_w = 1 + \frac{T_w^2 - \{T_w^4 + 4 \bar{R}_w^2 T_w^2\}^{1/2}}{2 T_{ww} \bar{R}_w^2} \quad (21)$$

となる。

ここで水中の光の強度はランバートの法則に従うと考えられるから、水の Lambert 吸収係数 ( $\alpha_w$ ) は水の

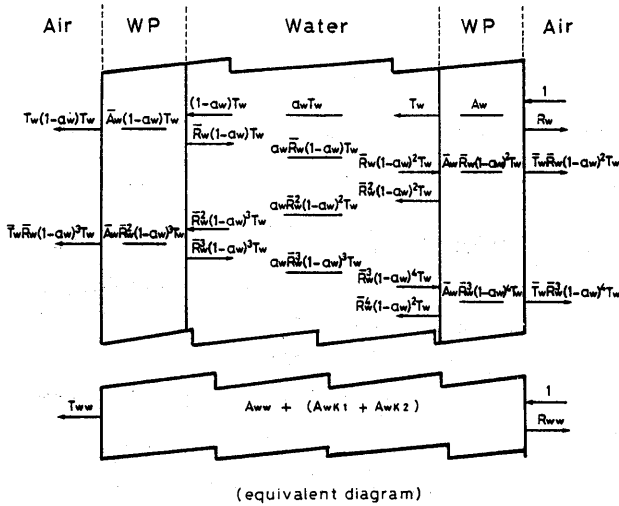


Fig. 6 Multiple reflection situation of Air-Window plates putting water film-Air situation (WP : Window plate)

厚さ  $d$  と  $a_w$  から

$$a_w = -d^{-1} \ln(1 - a_w) \quad (22)$$

と求められる。得られた水の吸収係数を Fig. 7 に破線で示す。図中導出されていない波長域があるがこれは吸収の小さい（すなわち総透過率の値が大きい）波長域では、前進波と反射後退波の干渉の影響が現れるため水の吸収率を算出するデータとならないことから、 $T_{ww}$  が約40%以上については棄却し、また吸収が大きい波長域では測定器の性質上誤差が多く含まれることから  $T_{ww}$  が5%以下のデータを棄却したことによるものである<sup>4)</sup>。また、文献<sup>5)</sup>による水の消衰係数  $k_\lambda$  の理論値を用いて  $a_\lambda = 4\pi k_\lambda / \lambda$  の関係より求めた吸収係数

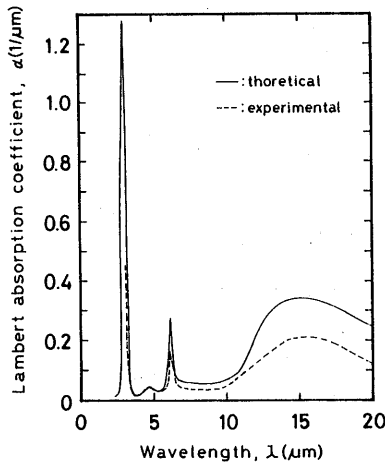


Fig. 7 Lambert absorptoin coefficient of water in the 2 to 20 $\mu$ m wavelength region

を実線で示した。

実験値は赤外短波長域で理論値とよく一致しているが、10 $\mu$ m以上の波長域では理論値から大きくはずれている。この原因は現段階では明らかでない。

### 2. 2 セラミックス赤外線放射体による加熱

セラミック赤外線放射体による加熱の実験はこれまでと同様に断熱容器に水を入れ、上方より赤外線放射体で加熱し、温度変化を測定した<sup>1),2)</sup>。本実験では赤外線放射体は2.5~25 $\mu$ mの赤外線波長域にわたって放射率( $\epsilon_\lambda$ )が約0.93である市販のセラミックスヒーターを使用した。温度測定には素線径50 $\mu$ mのクロメルとアルメルの素線を突き合わせて溶接して熱電対とし、これを水中に水平に配置した。また、水面とヒーターの間には、放射された赤外線の散逸を防ぐために内側を研磨したステンレス管を置き、加熱実験中、このステンレス管の温度上昇に伴う水への熱の影響を防ぐために管の周りに水を流し続けた。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3. 1. 1 ランバート吸収係数による赤外線吸収エネルギーについて

水について表面での赤外線の反射がないものとしてランバートの法則を用いて水中での赤外線吸収エネルギーを求めた。

赤外線放射体の分光放射強度を  $I_{\lambda 0}$  とし水深を  $x$  とすれば、水深  $x$  での単位体積当りの赤外線吸収エネルギー ( $= q(x)$ ) は次式のように求められる。

$$q(x) = -\frac{dI}{dx} = \int_0^\infty \alpha_\lambda I_{\lambda 0} \exp(-\alpha_\lambda x) d\lambda \quad (23)$$

ここで  $I_{\lambda 0}$  は放射体の放射率 ( $\epsilon_\lambda$ ) を用いてプランクの法則から次式のように求められる。

$$I_{\lambda 0} = \frac{\epsilon_\lambda C_1}{\lambda^5} \{ \exp(C_2/\lambda T) - 1 \}^{-1} \quad (24)$$

$T$  : 放射体の温度 (K)

$\lambda$  : 波長 ( $\mu$ m)

$C_1$  :  $3.7420 \times 10^8$  ( $W \cdot \mu$ m/m<sup>2</sup>)

$C_2$  :  $1.4388 \times 10^4$  ( $\mu$ m $\cdot$ K)

(23)式により求めた放射体の各表面温度での水の赤外線吸収エネルギーを Fig. 8 (a), (b)に示す。この図よ

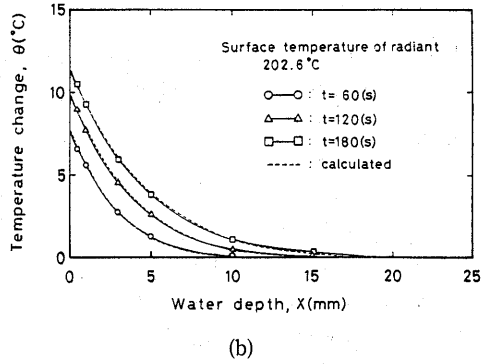
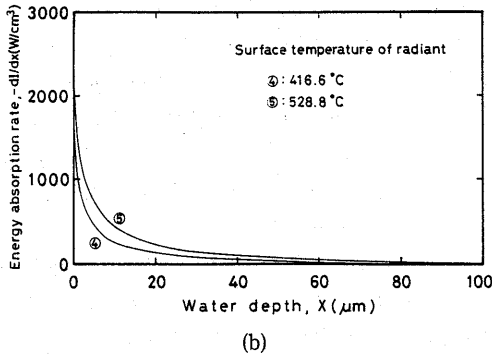
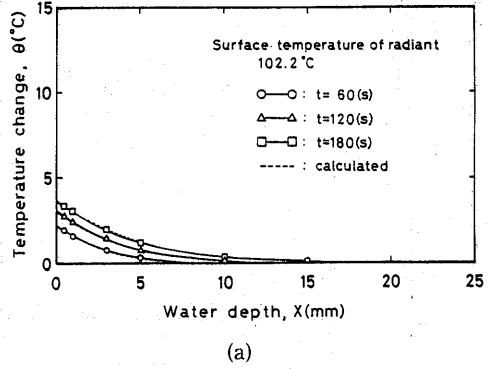
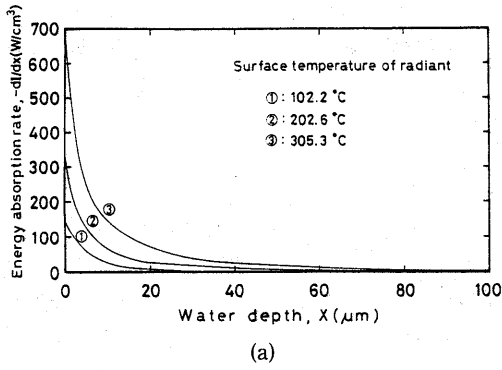


Fig. 8 Distribution of energy absorption rate in water (calculated)

り放射体の表面温度を100~500°Cの範囲で変化させて赤外線の分光放射強度および強度の比を変化させても赤外線は水深約100μmまでにほとんど吸収され、分光吸収係数特性による赤外線吸収エネルギーの分布への影響は著しいものではないと言える。

3. 1. 2 実験結果および近似計算

水の赤外線放射体による加熱実験の結果を Fig. 9 (a), (b), (c), (d), (e) に示す。

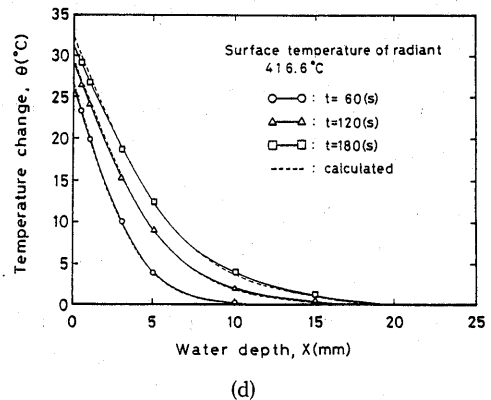
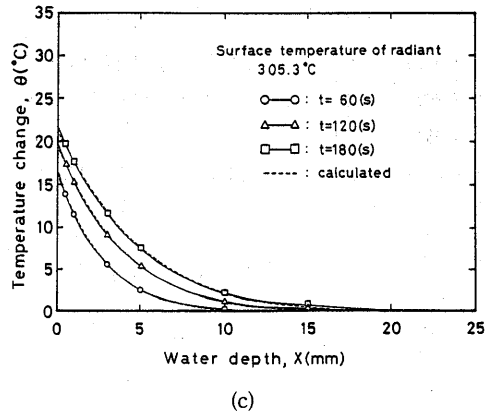
3. 1. 1 で述べたように水に入射した赤外線は表面より100μmといった非常に浅いところまでにほとんど吸収されてしまうことから、例えば数mm以上といった試料の比較的内部の温度分布は熱伝導方程式で十分近似されると考えられる。そこで加熱実験の結果を熱伝導解で近似することを試みる。

基礎方程式は、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (25)$$

境界条件は、

$$\begin{aligned} \theta(x, 0) &= 0 \\ -\kappa \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} &= Q_0 = \text{const} \quad (t > 0) \end{aligned} \quad (26)$$



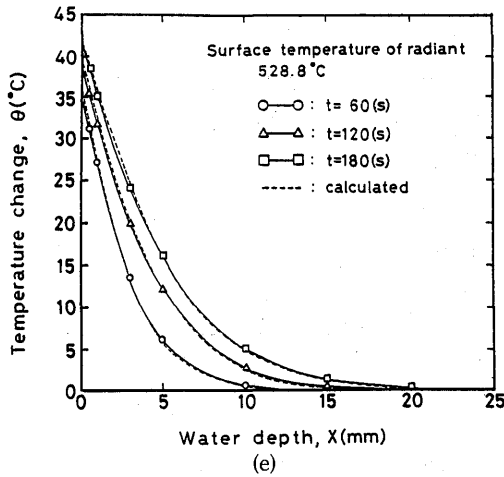


Fig.9 Temperature change distributions in the direction of the depth

である。

ここで、

- $\theta$  : 水の温度上昇 (°C)  
 $t$  : 時間 (s)  
 $\kappa$  : 水の熱伝導率 (W/m·°C)  
 $\rho$  : 水の密度 (g/m<sup>3</sup>)  
 $c$  : 水の比熱 (J/g·K)  
 $Q_0$  : 表面熱流束 (W/m<sup>2</sup>)

であり、 $Q_0$  は Fig. 9 の実験結果の曲線と両軸で囲まれた面積から求めたエネルギーを測定時間で除したものである。

(25)式の熱伝導方程式を(26)式の境界条件のもとで解くと、

$$\theta(x, t) = \frac{2Q_0\sqrt{kt/\pi}}{k} \exp(-x^2/4kt) - \frac{Q_0x}{k} \{1 - \operatorname{erf}(x/2\sqrt{kt})\} \quad (27)$$

となる。

ただし、 $k$  は水の熱拡散率 ( $= \kappa/\rho c$ )、 $\operatorname{erf}$  はガウスの誤差関数であって、

$$\operatorname{erf}(x/2\sqrt{kt}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/2\sqrt{kt}} \exp(-y^2) dy \quad (28)$$

である。

(27)式による温度分布の計算値を Fig. 9 に破線で示した。同図から表面熱流束を一定とした熱伝導方程式による計算値と実験値は非常によく一致していることが分かる。一般に赤外線は物質の内部に浸透し内部より加熱すると言われているが、実際に加熱対象となる食品や生体は含水率が高く、加熱効果については水

と同様の結果が予想される。つまり赤外線は物質のごく表面で吸収され、その内部の加熱は表面付近で吸収されたエネルギーが伝導により伝えられると考えられる。

#### 4. 結言

赤外分光光度計を用いて水の赤外分光透過率を測定し、これよりランバート吸収係数を求めてその赤外線吸収特性を調べた。また、市販のセラミックス赤外線放射体を用いて水の加熱実験を行い以下の結果を得た。

ランバート吸収係数をもとに水内部での赤外線吸収エネルギーを計算した結果、赤外線はそのエネルギーを水のごく表面層 (約100 $\mu$ mまで) で吸収されることが分かった。このことから例えば水内部数mm以上といった深さの加熱は水の表面層で吸収された赤外線のエネルギーが熱伝導により伝えられたものであって、そのような深さでの温度分布は表面熱流束を一定として与えた熱伝導方程式で十分表される。

また赤外線により物質を加熱する場合、その物質が照射する赤外線の波長域に吸収帯を有することは必要であるが、加熱の効率という点からは吸収係数よりも、むしろ反射率が重要な因子となると考えられる。

また、実際の生体への赤外線の効果はまだ十分には明らかでなく水以外の物質の赤外吸収特性を把握することも重要であってこのような研究は今後の課題であると思われる。

#### 参考文献

- 1) 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, No. 29(1987)
- 2) 越智利彦 他; 赤外線加熱による水の温度上昇 (第2報), 長崎大学工学部研究報告, Vol. 18, No. 31 (1988)
- 3) D. Eisenberg and W. Kauzmann, THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WATER, OXFORD UNIVERSITY PRESS (1969)  
日本語訳: 関 集三, 松尾隆祐訳, 水の構造と物性みすず書房
- 4) 市川真人 他; 中, 遠赤外線放射に対する水の吸収率と浸透深さの分光特性, 照明学会誌, Vol. 72, No. 2 (1988)
- 5) George M. Hale and Marvin R. Querry; Optical Constants of Water in the 200nm to 200 $\mu$ m Wavelength Region, Applied Optics, Vol. 12, No. 3 (1973)
- 6) 清水 賢; 食品工業における遠赤外線の利用技術

- の基礎, セラミックス, Vol. 23, No. 4 (1988)
- 7) 高嶋廣夫; やさしい遠赤外線工学 (ブームに惑わされるな), 工業調査会 (1988)
- 8) 根岸直樹 他; 赤外線の生体作用, セラミックス, Vol. 23, No. 4 (1988)