赤外線放射による合成樹脂板の加熱過程の定量的検討

正員 宮 永 俊 之 (電力中研)

正員 中 野 幸 夫 (電力中研)

Analysis of Infrared Radiation Heating of Plastics

Toshiyuki Miyanaga, Member, Yukio Nakano, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry)

In order to make more effective use of infrared radiation, we have developed a basic method for predicting the heating effect quantitatively.

It allows one dimensional heat transfer analysis taking account of spectral properties. We can estimate the distribution and temporal variations of temperature inside the plastic plates to be heated. This method is applicable to heating systems without vaporization and enables us to predict what kind of emitter is most suitable to the plastic plate to be heated.

キーワード：赤外線加熱，分光吸収特性

1. ま え が き

赤外線による加熱は被加熱物を直接かつ瞬時に熱することができる。また、赤外線のもつエネルギーが小さいため、被加熱物を非熱的に変質させることなく加熱できる。このため、赤外線加熱は塗装乾燥、食品加工、医療など幅広い分野において効率が良く、付加価値の高い加熱方式として注目され、従来からその適用技術の開発や適用分野の開拓が盛んに行われている。

赤外線加熱のこのような特長を十分に発揮させるためには、被加熱物の赤外線吸収特性を十分考慮し、それに応じた波長の赤外線を必要量だけ照射する必要があるが、このような加熱の過程を定量的に吟味することは一般に行われていないようである。しかし、赤外線加熱の効率をより高め、また被加熱物の加工価値をより高めるには、被加熱物の表面や内部において赤外線が吸収され、被加熱物の温度が上昇してゆく過程の理論的検討が非常に重要である。

赤外線加熱理論に関しては、西村らがソーダガラスに赤外線を照射した場合の加熱過程について検討したもの⁽¹⁾などがあるが、ここでは合成樹脂の成形加工のための予熱工程を想定して、熱源として用いる赤外線放射体の分光放射特性と、被加熱物である合成樹脂の

分光吸収特性から被加熱物の昇温特性を予測することを試みた。「どの被加熱物にはどの赤外線放射体が最適か?」といったような判断を定量的に下せるようにするためである。

本論文では、放射特性の異なる3種類の赤外線放射体(近赤外線をよく放射するランプ形放射体1種、遠赤外線をよく放射するパネル形放射体2種)からの赤外線を4種類の合成樹脂板(アクリル、テフロン、塩化ビニル、ポリエチレン)に垂直に照射した場合の加熱過程について理論解析を行い、実験結果と比較した。この結果、合成樹脂板の表面および内部の昇温特性を良い精度で予測でき、これによって、被加熱物に適した赤外線放射体の選択が定量的に行えることなどが明らかになった。用いた解析手法は合成樹脂板に照射された赤外線の吸収を波長ごとに考慮しており、蒸発など物質の移動のない加熱過程に適用できる。

2. 赤外線の放射および吸収特性を考慮した非定常一次元熱伝導解析

〈2・1〉 理論解析式 図1に示すように、大気中に水平に置いた厚さ d の無限平板(被加熱物)を想定し、上部に設置した赤外線放射体から平板表面に垂直に入射する放射熱流束を $Q_0(\text{W/m}^2)$ とする。

図 1 解析に用いた一次元モデル
Fig. 1. Model for analysis.

ここで、

$$Q_0 = \int_0^\infty q_0 \lambda \cdot d\lambda \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

であり、 $q_0 \lambda$ ($\text{W/m}^2/\mu\text{m}$) は波長 λ における分光放射熱流束である。このモデルにおける熱伝導方程式を導くにあたり、次のような仮定を置いた。

(1) 被加熱物内での熱移動は伝導および放射によるもののみとし、物質の移動を伴わないものとする。また熱の移動は垂直方向のみとする。

(2) 入射波の散乱は吸収、反射に比べて十分小さく、無視できるものとする。

(3) 熱的な物性値は温度によらない定数とする。以上の仮定に基づき被加熱物内の一次元熱伝導方程式を書くと

$$C\rho \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial Q(x)}{\partial x} \quad (2)$$

となる。

ここで、 $T(x, t)$: 平板内部の温度(K)、 C : 平板の比熱(J/kg/K)、 ρ : 平板の比重(kg/m^3)、 k : 平板の x 方向の熱伝導率(W/m/K)、 $Q(x)$: $x=x$ における平板に入射した赤外線放射熱流束(W/m^2)、 t : 時間(s)

また、境界条件は以下のとおりである。

$t=0, 0 \leq x \leq d$ において

$$T(x, 0) = Ta = \text{const} \quad (3)$$

Ta : 大気温度(K)

$t>0, x=0, d$ において

$$-k \frac{\partial T|_{x=0, d}}{\partial x} = H|_{x=0, d} + R|_{x=0, d} \quad (\text{W/m}^2) \quad (4)$$

$$H|_{x=0, d} = h|_{x=0, d} (T|_{x=0, d} - Ta) \quad (\text{W/m}^2) \quad (5)$$

$$R|_{x=0, d} = \pi \int_0^\infty \{ \epsilon(\lambda) Eb\lambda(T|_{x=0, d}) \} d\lambda - \epsilon' \sigma Ta^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (6)$$

ここで、 $H, R|_{x=0, d}$: $x=0, d$ (平板表面、裏面) における熱伝達量および平板表面を取り囲む半球面空間との単位面積あたりの放射熱交換量

$h|_{x=0, d}$: $x=0, d$ における熱伝達係数($\text{W/m}^2/\text{K}$)

$\epsilon(\lambda)$: $x=0, d$ における平板表面の波長 λ における分光放射率

$Eb\lambda(T)$: 温度 T における黒体の分光放射輝度は次式で与えられる。

$$Eb\lambda(T|_{x=0, d}) = \frac{2C_1}{\lambda^5 [\exp\{C_2/(\lambda \cdot T|_{x=0, d})\} - 1]} \quad (\text{W/m}^2/\mu\text{m/str}) \quad (7)$$

$$C_1 = 5.9548 \times 10^7 (\text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2)$$

$$C_2 = 1.4388 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$$

σ : ステファンボルツマン定数 $5.67 \times$

$$10^{-8} (\text{W/m}^2/\text{K}^4)$$

である。また、平板を取り囲む背景(温度 Ta)は放射率 ϵ' の灰色体として考えた。

<2・2> 放射熱流束 平板内で反射や散乱がなく、平板の厚さ方向に伝搬する赤外線では、その減衰に関して次式が成り立つ。

$$I(\lambda, x) = I(\lambda, 0) \exp(-a\lambda \cdot x) \quad (\text{W/m}^2/\mu\text{m}) \quad (8)$$

$I(\lambda, x)$: $x=x$ での分光強度、 $a\lambda$: 分光吸収係数(1/m)

平板に垂直に入射した赤外線は、図2に示すように内部境界面において多重反射を繰返しながら強度が減衰すると考えられる。従って、赤外線放射による加熱効果を定量的に評価するために、平板内部の放射熱流束を図1に示すようにモデル化した。この図において、

Q_{ref} : 多重反射を繰返す過程で平板の表面側に反射する放射熱流束、 Q_{out} : 多重反射を繰返す過程で平板の裏面側に透過する放射熱流束、 $q_{\text{ref}}(\lambda)$: Q_{ref} の分光成分、 $q_{\text{out}}(\lambda)$: Q_{out} の分光成分、 $q\lambda(x)$: $Q(x)$ の分光成分である。

また、図2に示したように、平板境界面でのある波長における真の分光反射率を $x(\lambda)$ 、平板(厚さ d)の真の分光透過率を $\tau(\lambda) = \exp(-a\lambda \cdot d)$ とすると、図1における $q_{\text{ref}}(\lambda)$ 、 $q_{\text{out}}(\lambda)$ 、 $q\lambda(x)$ は

$$q_{\text{ref}}(\lambda) = \left[x + \frac{x\{(1-x)\tau\}^2}{1-(x \cdot \tau)^2} \right] q_0 \lambda \quad (9)$$

$$q_{\text{out}}(\lambda) = \frac{(1-x)^2 \tau}{1-(x \cdot \tau)^2} q_0 \lambda \quad (10)$$

図2 境界面における多重反射
Fig.2. Multiple internal reflections at boundaries.

$$q\lambda(x) = \frac{\exp\{-a\lambda \cdot x\} + \kappa \tau^2 \exp\{a\lambda \cdot x\}}{1 - (\kappa \cdot \tau)^2} \times (1-\kappa) q_0 \lambda \dots (11)$$

となる。これらを波長全域で積分することによって

$$Q_{ref} = \int_0^\infty q_{ref}(\lambda) d\lambda \dots (12)$$

$$Q_{out} = \int_0^\infty q_{out}(\lambda) d\lambda \dots (13)$$

$$Q(x) = \int_0^\infty q\lambda(x) d\lambda \dots (14)$$

となる。また、分光光度計を用いて測定される平板の分光透過率を $T(\lambda)$ 、分光反射率を $R(\lambda)$ とすると、各々の定量化は

$$T(\lambda) = \frac{q_{out}(\lambda)}{q_0 \lambda} = \frac{(1-\kappa)^2 \tau}{1 - (\kappa \cdot \tau)^2} \dots (15)$$

$$R(\lambda) = \frac{q_{ref}(\lambda)}{q_0 \lambda} = \kappa + \frac{\kappa((1-\kappa)\tau)^2}{1 - (\kappa \cdot \tau)^2} \dots (16)$$

である。(15)、(16)式から、真の分光反射率 $\kappa(\lambda)$ および分光透過率 $\tau(\lambda)$ が求まる。

〈2・3〉 数値解析 (2)式を差分法を用いて解き、平板断面各点の温度変化を計算した。

なお、(2)式の $Q(x)$ を求めるには波長積分を必要とするが、これに関しては以下のように扱った。ま

図3 分光吸収係数の近似
Fig.3. Approximation of spectral absorption coefficient.

表1 被加熱物の熱的物性値
Table 1. Thermal properties of test pieces.

試料	比重 $\times 10^{-3} (\text{kg/m}^3)$	熱伝導率 $(\text{W/m} \cdot \text{K})$	比熱 $\times 10^{-3} (\text{J/kg} \cdot \text{K})$
アクリル	1.2	0.20	1.50
塩化ビニル	1.3	0.23	1.54
テフロン	2.4	0.26	1.04
ポリエチレン	0.9	0.32	2.30

ず、放射体の分光放射率および平板の分光透過率、分光反射率をステップ状の関数で近似した。ポリエチレン板(厚さ 1 mm)の分光透過率の例を図3の一点鎖線で示す。これらから、図3の破線で例示するような分光吸収係数 $\alpha\lambda$ を求めた。こうして求めた分光吸収係数から、波長区域ごとに平板が吸収する放射熱流束を算出し、すべて加算することによって、(14)式の値を求めた。この値を差分式に代入し、平板断面各点の温度の時間変化を、初期条件式(3)～(6)に従い計算した。なお、数値解析に用いた合成樹脂板の熱的物性値を表1に示す。これらのうち、比重と熱伝導率は測定値であり、比熱は文献(2)の値を採用した。また、合成樹脂板の表面および裏面における大気熱伝達係数は、文献(3)の自然対流熱伝達の式を用いて計算し、大気温度が 300 K のとき、合成樹脂板の表面で $6 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 、裏面で $3 \text{ W/m}^2/\text{K}$ とした。さらに、(6)式の合成樹脂板周囲の大気の放射率 ϵ' を 1.0 とした。赤外線放射体から平板に放射される放射熱流束は、次章で述べる加熱実験と同じ 790 W/m^2 を用いた。

3. 実験装置および方法

実験装置の概略を図4に示す。実験に使用した赤外線ランプ1種(100 V, 375 W, フィラメント温度約2,400°C)、遠赤外線ヒータ2種(A, B, 各々表面温度330°C)の分光放射輝度を図5に示す。なお、赤外線ランプの1.4 μm 以下における分光放射輝度は文献(1)から引用した。放射体から平板に入射する放射熱流束 Q_0 が790 W/m²になるように放射体と平板の距離を調整した。

被加熱試料の平板として、縦100 mm, 横100 mm, 厚さ1 mmの合成樹脂板4種(アクリル, 塩化ビニル, テフロン, ポリエチレン)を用いた。各合成樹脂板の分光透過率, 分光反射率を図6, 図7に示す。これらの分光特性測定において, 波長2.5 μm までは分散形分光光度計を, それ以上の波長領域ではフーリエ変換分光光度計を用いた。

実験に際し, 赤外線ランプは定格入力電力で使用し, 遠赤外線ヒータはセラミック系の接着剤によって

図4 実験装置の概略

Fig.4. Apparatus for infrared radiation heating test.

図5 赤外線放射体の分光放射輝度
Fig.5. Spectral radiation intensity.

熱電対を表面に取付け, 表面温度を一定に保つように入力電力を制御した。以上のような装置において, 合成樹脂板を加熱し, 表面と裏面の温度の時間変化を測定した。

4. 結果および検討

〈4・1〉 解析手法の妥当性の検証 加熱実験および数値解析の結果の一例としてアクリル板, テフロン板およびポリエチレン板(各々厚さ1 mm)の表面と裏面の昇温特性を図8, 図9, 図10に示す。赤外線放射体と加熱される合成樹脂板の組合せによっては, 解

(a) 0 μm < λ (μm) < 3.2 μm

(b) 2.5 μm < λ (μm) < 20.0 μm

図6 合成樹脂板の分光透過率
Fig.6. Spectral transmittance of test pieces.

(a) $0 \mu\text{m} < \lambda(\mu\text{m}) < 3.2 \mu\text{m}$ (b) $2.5 \mu\text{m} < \lambda(\mu\text{m}) < 20.0 \mu\text{m}$

図 7 合成樹脂板の分光反射率
Fig. 7. Spectral reflectivity of test pieces.

析結果と実験結果にやや大きな差異が生じているが、解析結果は遠赤外線ヒータ A, B に対する各合成樹脂板の昇温特性の傾向の差異(アクリル、テフロンについては遠赤外線ヒータ A のほうが遠赤外線ヒータ B より加熱結果が大きく、逆にポリエチレン板については遠赤外線ヒータ B のほうが大きいこと)や、赤外線ランプの加熱効果が遠赤外線ヒータより著しく劣ることを明確に示している。

図 8 の遠赤外線ヒータ A, B の解析結果は実験結果に対し昇温過程で 14% 程度の差異を生じているが、平衡温度(合成樹脂板が最終的に到達する温度)および平衡温度に達するまでの所要時間に関する差異は 5%

図 8 アクリル板(厚さ 1 mm)の昇温特性
Fig. 8. Temporal variations of temperature.

図 9 テフロン板(厚さ 1 mm)の昇温特性
Fig. 9. Temporal variations of temperature.

以下であった。また、図 9、図 10 では昇温過程についても平衡温度および平衡温度に達する所要時間についても解析結果と実験結果の差異は 10% 以下であった。このことから解析結果と実験結果は比較的良好一致を示しているといえる。

解析結果と実験結果の差異の原因として、合成樹脂板の分光透過率をステップ状に近似していることに伴う誤差の蓄積や合成樹脂板の比熱を文献より引用し、一つの値で代表させていることなどが挙げられる。

今後、更に詳細な近似や正確な熱的物性値の把握により予測精度の向上が期待される。

図 10 ポリエチレン板(厚さ 1 mm)の昇温特性

Fig. 10. Temporal variations of temperature.

図 11 アクリル板(厚さ 3 mm)内部の温度分布

Fig. 11. Distribution of temperature in the test piece.

また、厚さ 3 mm のアクリル平板を対象に合成樹脂板内部の温度分布について解析と実験を行った。なお、実験では合成樹脂板の側面に直径 0.6 mm のドリルで穴をあけ、直径 0.1 mm の K 熱電対を挿入し、

図 12 合成樹脂板内部の吸収熱量分布 (遠赤外線ヒータ)

Fig. 12. Distribution of absorbed radiation heat flux by long infrared emitter A, B.

シリコングリスを注入し、熱電対を固定した。加熱開始から 0 秒、200 秒、1,000 秒後の合成樹脂板内部の温度分布についての実験と解析の結果を図 11 に示す。両者はほぼ一致した。

以上から本解析手法の妥当性が検証された。

〈4・2〉 合成樹脂板内部での吸収熱量分布 放射熱流束が合成樹脂板内部のある場所での程度吸収されるかを知るために、吸収熱量分布 $-\partial Q(x)/\partial x$ を計算した。計算結果を図 12 (遠赤外線ヒータ A, B で加熱した場合) および図 13 (赤外線ランプで加熱した場合) に示す。図の横軸は合成樹脂板表面からの深さである。

図 12 から、アクリル、テフロンおよび塩化ビニルでは放射熱流の大部分が表面付近で吸収され表面加熱に近い傾向であること、また、ポリエチレンでは表面加熱の傾向はみられるが、アクリルなどに比べて全体的に吸収熱量が小さいことなどがわかる。これは図 6、図 7 に示した分光透過率、分光反射率から求めた分光吸収係数(図 14)および図 5 に示した放射体の分光放射輝度から定性的にわかるように、アクリル、テ

図 13 合成樹脂板内部の吸収熱量分布
(赤外線ランプ)

Fig. 13. Distribution of absorbed radiation heat flux by infrared lamp.

フロンおよび塩化ビニルでは遠赤外線ヒータ A, B の主要放射波長領域(大きな放射熱流束をもつような波長区間)において放射の吸収が非常に大きいこと、逆にポリエチレンではこの区間での放射の吸収が小さいことによる。

更に、ポリエチレンは他の合成樹脂板とは異なり遠赤外線ヒータ B で加熱するほうが遠赤外線ヒータ A の場合よりも全体的に吸収熱量が大きい。これはポリエチレンの吸収係数が遠赤外線ヒータ B の分光放射輝度のピーク波長付近で大きな値をもつことによる。

また、赤外線ランプ(図 13)では主要放射波長領域において合成樹脂板の分光吸収係数が非常に小さいため、合成樹脂板内部で吸収される放射熱流束は遠赤外線ヒータに比べて 1~2 けた小さい。

〈4・3〉 赤外線放射による加熱効果の予測 本解析手法では赤外線放射体の分光放射特性ならびに合成樹脂板の分光透過率、分光反射率ならびに熱的物性値を与えることによって、加熱開始後の昇温特性ならびに合成樹脂板内部の各場所での吸収熱量を計算するこ

図 14 合成樹脂板の分光吸収係数

Fig. 14. Absorption coefficient of test pieces.

とができる。このため、本手法は赤外線加熱を有効に行うための放射体の選択や加熱効果の定量的な予測に有効である。

5. ま と め

溶融や蒸発などの物質移動を伴わない温度範囲で 4 種の合成樹脂板を赤外線ランプおよび遠赤外線ヒータを用いて加熱する実験を行うと共に、赤外線放射体の分光放射率および合成樹脂板の分光透過率、分光反射率を考慮した一次元熱移動モデルを用いて加熱過程を理論的に検討した。その結果、数値解析結果は実験結果と比較的良好一致を示し、本解析の妥当性が検証できた。また、本手法は赤外線加熱を有効に行うための放射体の選択や加熱効果の定量的な予測に有効である。

(平成元年 10 月 25 日受付, 同 2 年 4 月 18 日再受付)

文 献

- (1) 西村: 「一次元輻射半透過性媒体の輻射加熱における内部加熱効果」, 化学工学論文集, 7, 245 (1981)
- (2) 伊藤編: プラスティック・データ・ハンドブック, p. 48, 63 (1984) 工業調査会
- (3) 日本機械学会: 伝熱工学資料 改訂第 4 版, p. 69 (1986)

宮 永 俊 之 (正員)

昭和 39 年 3 月 3 日生。61 年 3 月九州大学工学部電子工学科卒業。63 年 3 月同大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所、現在に至る。主に、赤外線加熱に関する研究に従事。

中 野 幸 夫 (正員)

昭和 32 年 3 月 4 日生。54 年 3 月名古屋大学工学部電気学科卒業。56 年 3 月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程前期課程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所、現在に至る。主に、架空送電線の電気環境問題および赤外線加熱に関する研究に従事。IEEE、赤外線技術研究会会員。