近赤外吸収イメージング法を応用した 高周波磁場下における微小磁性球の発熱量推定 Prediction of Heat Generation Rates of a Small Magnetic Sphere under High Frequency Magnetic Field using Near-Infrared Absorption Imaging Method

○学 山田 健太 (首都大院) 正 角田 直人 (首都大)
学 藤岡 良太 (首都大院) 近藤 克哉 (鳥取大)
有本 英伸 (産総研) 正 山田 幸生 (電通大)

Kenta YAMADA¹, Naoto KAKUTA¹, Ryota FUJIIOKA¹, Katsuya KONDO², Hidenobu ARIMOTO³, Yukio YAMADA⁴

¹Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-0397

²Tottori University, 4-101 Koyama-Minami, Tottori 680-8552

³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

⁴The University of Electro-Communications, 1-5-1 Choufugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

This paper presents a novel method for reconstructing the temperature distributions of water around a small heated sphere and predicting the heat generation rates of the sphere. This method is based on the temperature dependence of the absorbance of water at the wavelength of 1150 nm. Absorbance images at 1150 nm were obtained when a 1 mm diameter steel sphere located in water contained in a glass cell with a light path length of 10 mm was heated by a 760 kHz alternating magnetic field. Inverse Abel transform is applied to the line profiles of the absorbance, and radial temperature distributions are reconstructed. The heat generation rates calculated from these temperature distributions well agree with induction heating power levels.

Key Words: Temperature distribution, Heat generation rate, Near-infrared absorption, Inverse Abel transform, Induction heating

1. 緒言

磁気ハイパーサーミアは、癌細胞に吸着させた磁性粒子に高周波磁場を印加して発熱させ、癌細胞を選択的に加熱殺傷する治療法である⁽¹⁾。癌細胞の確実な殺傷と正常組織保護の成否は到達温度とその範囲で決まるため、磁気ハイパーサーミアにとって温度制御は極めて重要である。しかし、磁性体の誘導加熱機序は複雑であるため、発熱量の計算予測は非常に難しい。それ故、実際の磁場条件と磁性粒子を用いた *in vitro* 実験によって加熱特性を評価することが多く、その際の温度測定には非磁性の温度センサーや赤外放射温度計が用いられてきた。しかし、これらの方法では、液体などの内部にある粒子周りの温度分布の時空間情報を原理的に取得できないため、発熱量を正確に算出することができない。

これまで我々は、水中の抵抗加熱された微細金属ワイヤおよび誘導加熱された磁性微小球の周りにそれぞれ形成される軸対称および球対称温度分布を、近赤外温度イメージング法と Abel 逆変換を用いて推定できることを示した⁽²⁻⁴⁾。

本研究では、直径 1 mm の磁性球を 10 mm 厚さの水の内部に位置させ、交番磁場を印加したときの波長 1150 nm の吸光度画像を取得し、Abel 逆変換によって温度分布を求めた。さらに、温度分布の時間変化から磁性球の発熱量を推定し考察した。

2. 理論

2.1 水の近赤外吸収バンドと温度依存性

水の近赤外吸収スペクトルは温度依存性を有しており、波長 1150 nm 付近に存在する $\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$ 吸収バンドの吸収係数は温度変化する⁽⁵⁾。故に、バンド内で温度感度が高い波長の吸光度画像は、光路上の温度情報が積分された形で反映された投影画像といえる。実用的には、室温などの基準温度からの温度変化を求めることが多いため、吸光度 A と基準吸光度 A_r の差 ΔA を求める。吸光度は吸収係数 μ を光路に沿って積分した量である。

2.2 ガウス関数と近似と Abel 逆変換

水中に発熱球がある場合、発熱開始から特定の時間内においては、熱伝導によって球対称の温度分布が形成されると予想される。このとき、 $\Delta A(x, y)$ 画像から球中心を通る形で抽出したラインプロファイル $\Delta A(x)$ は、円対称の半径方向 r の吸収係数差分布 $\Delta \mu(r)$ が描かれる断面の投影データである。よって、 $\Delta \mu(r)$ と $\Delta A(x)$ の間には Abel 変換が成り立つため、その逆変換を用いて、測定された $\Delta A(x)$ から $\Delta \mu(r)$ を計算することができる^(3,4)。

今回は単一微小熱源からの熱伝導問題であるため、 $\Delta A(x)$ が単調減少する点と、解析的逆変換が可能である点を考慮し、ガウス関数の線形和による近似法⁽⁴⁾を採用する。

$$\Delta A(x) = \sum_{i=1}^n a_i \left[\exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_i^2}\right) - \exp\left(-\frac{R^2}{\sigma_i^2}\right) \right] \quad (1)$$

式(1)の Abel 逆変換は解析的に得られる⁽⁴⁾。

$$\Delta \mu(r) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{a_i}{\sigma_i} \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma_i^2}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{\sigma_i}\right) \quad (2)$$

ここで、 r は発熱球中心からの距離、 R は対象領域の最大半径であり、 $\Delta A(R) = 0$ となる。今回は光路長に対応し、この条件を満足する $R = 5 \text{ mm}$ とした。 a_i と σ_i はガウス関数パラメータであり、 $n = 2$ 以上のガウス関数では結果的に近似度に大きな差がなかったため $n = 2$ とした。

2.3 発熱量の算出

波長 1150 nm の $\Delta \mu$ は温度と良好な比例関係があるため、その係数(温度係数)を測定データ⁽³⁾から $2.8 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ と求め、温度変化 ΔT に変換した。球対称の温度分布では、 $t = t_1 \sim t_2$ で時間平均された磁性粒子の発熱量 $\bar{Q}$ (W) は全領域の受熱量と等しいため、次式で表される。

$$\bar{Q}(t_1, t_2) = \frac{4\pi}{t_2 - t_1} \left[\rho_m c_m \int_0^R \Delta T(r) r^2 dr + \rho_w c_w \int_R^R \Delta T(r) r^2 dr \right] \quad (3)$$

Fig. 1 (a) Images of absorbance difference, $\Delta A(x, y)$, of water at $t = 0.2, 0.5, 0.8$, and 1.5 s after the start of induction heating. The black semicircles indicate a part of the steel sphere. (b) Data and fitted curves of $\Delta A(x)$ along the H-H' line indicated in the top left image in (a).

ここで、 ρ は密度、 c は比熱、 r_1 は球の半径、添字の m と w はそれぞれ磁性球と水を表す。ガウス関数と和の場合、解析的に式(3)を計算できないため、数値積分を実行した。右辺大括弧内第1項の球内温度は、相対的に熱伝導率の大きいため集中熱容量モデルを仮定し、 $\Delta T(r_1)$ に等しいとした。

3. 実験方法

実験装置は既報⁽³⁾のものと同一である。光路長 10 mm、高さ 45 mm の石英セルに水を入れ、直径 1 mm の鋼球を先鋭アクリル棒(先端径約 0.4 mm)に取り付け、セル中心に設置し、高周波誘導加熱装置 (SPW900/56, CEIA) に接続したコイル(直径 20 mm, 2 巻)を用いて誘導加熱した。加熱時の発振周波数は 760 kHz、出力は最大 5.6 kW を 10~99 % で調整した。コイル下面から 7 mm の距離に鋼球を位置させた。ハロゲンランプからの光を透過ピーク波長 1150 nm、半

Fig. 2 (a) Temporal change in the radial profile of temperature difference, $\Delta T(r)$, at a heating power level of 40 %. The vertical dashed line at $r = 0.5$ mm indicates the sphere surface. (b) $\Delta T(r)$ at $t = 1.3$ s for different heating power levels.

Fig. 3 (a) Heat generation rates calculated from $\Delta T(r)$ at different times. (b) Time-averaged heat generation rates for the four heating power levels.

値全幅 10 nm の Narrow bandpass filter を通してセルに照射した。水を透過した光は、テレセントリックレンズを介して近赤外カメラ (Alpha NIR, FLIR) によって検出された。カメラ素子は $320 (H) \times 256 (V)$ の InGaAs アレイ、波長感度域 800~1700 nm、出力信号 12 bit である。加熱前の画像を基準として $\Delta A(x, y)$ 画像を構成し、球中心を通る水平方向のラインプロファイル $\Delta A(x)$ を取得した。

4. 結果と考察

Fig. 1(a)は、装置出力 40%での加熱開始から 0.2, 0.5, 0.8, 1.5 s 後の ΔA 画像である。鋼球付近での ΔA の明らかな上昇すなわち温度上昇を確認できた。 ΔA の等値線 (非表示) によって、この時間内では自然対流による特定方向への有意な偏りがなく、 ΔA 分布は同心円に近いことを確かめた。Fig. 2(b)は鋼球近傍の ΔA データと式(1)による近似曲線である。熱伝導の結果として球表面から単調減少する ΔA 分布となり、また、良好な近似を確認できた。

Fig. 2 は、Abel 逆変換により得られた $\Delta \mu(r)$ を温度係数によって変換した温度変化 $\Delta T(r)$ である。半径方向の熱伝導により球表面付近に大きな温度勾配が観察され、光路上で平均化される $\Delta A(x)$ とは異なるプロファイルである。出力による違いも反映された。

Fig. 3(a)は、 $t_1 = 0$ s と異なる 4 つの t_2 における $\Delta T(r)$ を用いて計算した発熱量 $\bar{Q}$ である。すべての出力において t_2 が小さいほど $\bar{Q}$ が大きくなる傾向があった。この結果は発熱量が時間によって異なる可能性を示唆しているが、一方で、例えば $t_2 = 0.2$ s のように加熱開始直後は球近傍でも $\Delta T(r)$ が小さく、上昇した領域も狭いため、 $\bar{Q}$ の計算の信頼性が相対的に低下した影響も考えられる。Fig. 3(b)は、4 つの t_2 で求めた発熱量の平均値である。出力に比例して増加し、出力 50 % では 0.16 W の発熱量と推定された。

5. 結言

近赤外吸収イメージング法を用いて直径 1 mm の発熱球周りの水の吸光度変化を測定し、半径方向の温度分布および発熱量を推定した。誘導加熱による発熱量を定量的且つ時間毎に分析できる意義は大きいと考えている。今後は、磁場条件に対する発熱特性を詳細に調査する予定である。

謝辞

本研究は日本学術振興会科研費 No.25630069 と精密測定技術振興財団助成事業の支援を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Ito et al., J. Biosci. Bioeng. 100, 1 (2005)
- (2) 山田他, 熱工学コンファレンス講演論文集, 167 (2013)
- (3) 山田他, 伝熱シンガ講演論文集, A323 (2014)
- (4) Kakuta et al., Int. J. Heat Mass Trans. 77, 852 (2014)