

マイクロ波照射場での熱電対による温度測定に関する研究 Study of Temperature Measurements by Thermocouples under Microwave Heating

高島 武雄, 池貝清隆*

Takeo TAKASHIMA and Kiyotaka Ikegai*

The objective of this study was experimentally to confirm the ability of measuring temperature of materials by a thermocouple during microwave heating. Heat generation and electric discharge occur at metal surface under microwave heating or under high voltage fields. Therefore, it is difficult to measure the temperature using thermocouples in an electronic oven. The development of the method measuring temperature of materials in an electronic oven combined with thermocouples makes scientific and industrial senses. It is possible to measure correct temperature using the sheathed thermocouples with a grounded shield which is made thin metal meshed wires. The boiling temperature of water at the normal atmosphere pressure was measured with a high accuracy from 0.4 to 1.3% and a high precision of $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$.

Key words: microwave, thermocouple, temperature measurement, heating instrument, experiment.

1. はじめに

高周波や高電圧などの過酷な環境下での接触式の温度計測には、電気式の温度計である熱電対、白金抵抗測温体、サーミスタなどは使用することが困難とされている。それは、熱電対に限らず金属は金属表面の自由電子が、電磁波を反射させるため、一般に上記の温度センサーは、マイクロ波照射場では使用できないとされている。具体的にはセンサーとマイクロ照射装置間でスパークが発生して熱電対が損傷または破損することや、発熱による温度上昇のため正確な温度の測定ができないことがあげられる。これらのことが原因で、

現在、マイクロ波照射場での熱電対の使用は行われていない。このため、マイクロ波照射場での温度測定には、光ファイバーをセンサーに用いた赤外線温度計などが使用されている。しかし、熱電対温度計やサーミスタなど、広く使用されている温度計に較べて高価であり、汎用性に欠ける。従って、加熱装置として安価で手軽な電子レンジを使用しながら、被加熱物質や雰囲気温度測定を行っていない実験例がみられる。このことは熱電対がマイクロ波照射場で温度計として使用することができれば、加熱中の物質や雰囲気温度変化、さらに温度分布を把握することができるので、電子レンジを加熱装置に用いた実験や研究の進展に多大な寄与をもたらすことを意味する。

光ファイバー式温度計以外の温度計による

* 2002 年度機械工学科卒業生

マイクロ波加熱時の容器内試料の温度測定を行った研究には、サーミスタをセンサーに持つ超小型記憶式温度計を用いた渡邊ら⁽¹⁾の研究が報告されているが、熱電対を用いた研究例は見あたらない。そこで本研究では、被覆材やシールド材を用いることで、スパークによる熱電対の損傷や破損を防ぐことを試みた。さらに、マイクロ波の照射が熱電対自身の発熱を引き起こすとされているので、発熱が熱電対の温度測定の精度や確度に及ぼす影響を、実験を通して調べた。以上の測定結果に基づいて測定法の改善を行い、最終的には、熱電対をこれまでは使用することができないとされてきたマイクロ波照射場という過酷環境下で使用可能にすることを目的とする実験を行った。

2. 実験装置と方法

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。加熱には出力 700W、周波数 2450MHz の市販の電子レンジを使用した。電子レンジの出力は、変圧器を用いて制御した。

温度測定は、熱電対素線とシース (SUS304) が絶縁されている K 型熱電対 (シース外径 1mm) を冷接点を介して、デジタルマルチメーターに接続して行った。熱電対は電子レンジ上部に直径約 10mm 程度の穴を開けて挿入する。

熱電対には必要に応じて被覆材 (テフロンチューブ、シリコンゴムチューブ、セラミックスパイプ)、接地したシールド (ステンレス細線編み上げ) を施した。被覆材の寸法は、いずれも内径がほぼ 1.0mm、外径が 2mm である。

加熱試料には、①ビーカーに入れた水、②水を含んだ鋳物砂、③円柱形に成形したサツマイモの 3 種類を用いた。

実験は以下の手順で行う。試料にマイクロ波を照射して、温度上昇を熱電対、マルチメーターで測定する。スパーク発生の有無の観察と、測定確度、精度の検討を行う。

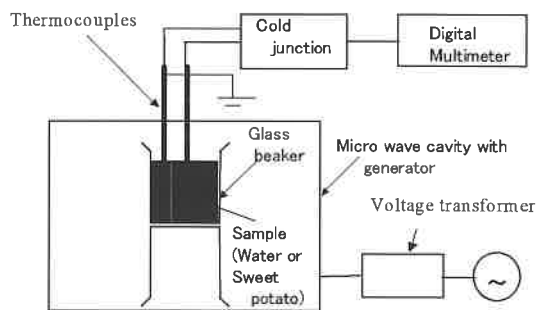


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

3. 実験結果および考察

3.1 被覆材によるスパーク抑止能力の確認

測定試料を置かないマイクロ波照射場では、被覆材を装着しない熱電対では電圧を 100 V 付近まで上げると熱電対の先端と電子レンジ上面の間、熱電対側面と電子レンジ上面の挿入口間の 2 ヶ所でスパークの発生が観察される。しかし熱電対に上記の被覆材を装着することで、スパークの発生を防ぐことができる。

Fig.2 は、①ビーカーに入れ水を試料としてマイクロ波を照射した時の温度変化を、(1)被覆を施さない熱電対 (◆印) と、各種被覆材 (2)シリコンゴムチューブ○印、(3)テフロンチューブ□印、(4)セラミックスパイプ△印)

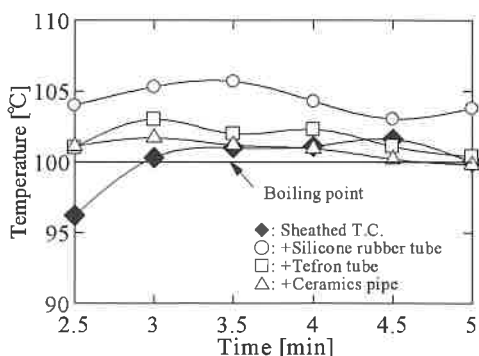


Fig.2 Experimental results of water temperature change measured by a sheathed bare thermocouple or covered thermocouples.

を装着した熱電対で測定した結果を比較して示したものである。加熱開始から 2.5 分以降の結果をプロットした。被覆を施さない熱電対は、スパークが発生しない電圧で、各種被覆材を装着した熱電対は 100V でそれぞれ使用した。

いずれの場合も、参照値である水の沸点より高い値を示している。この原因は、熱電対自体がマイクロ波の影響を受けることによって発熱するためであろう。被覆材によって温度が高くなるのは被覆材の熱伝導率の相違によると思われる。発熱量が熱電対内で一様と仮定し、熱電対中心温度、被覆材外表面温度を、それぞれ θ_c 、 θ_o とすると、温度差は被覆材の熱伝導率 k に反比例するので Eq. (1) となる。

$$\theta_c - \theta_o = A + \frac{B}{k} \quad (1)$$

ただし、 A 、 B は比例定数で単位は、それぞれ $^{\circ}\text{C}$ 、 $[\text{W}/\text{m}]$ である。

Fig. 3 は被覆材の熱伝導率 k と温度差 $\theta_c - \theta_o$ の測定値をプロットしたもので、実線は Eq. (1) の $A=1.5^{\circ}\text{C}$ 、 $B=0.78 \text{ W}/\text{m}$ とした時の近似曲線である。測定値は被覆材の熱抵抗の影響を強く受けることを示している。

被覆材がない時の熱電対の温度は 101.5°C となっている。熱電対表面が 100°C で、熱電

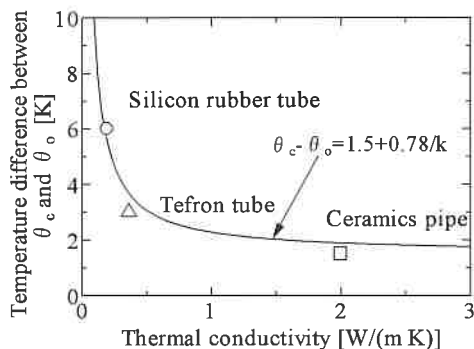


Fig. 3 Effect of thermal conductivity of cover materials on measuring temperature.

対を直径 1mm のステンレス棒と仮定して、発熱量 $H[\text{W}/\text{m}^3]$ を求めると $H=0.38 \text{ MW}/\text{m}^3$ となった。また、Fig. 2 の測定値が変動している。これはマイクロ波が照射されている時と休止している時間と対応している。

このように各種被覆材を装着することによって、100V の状態で測定は可能になるが測定精度や確度に問題があることがわかる。

2.2 シールドと接地の効果

測定精度と測定確度を向上させる方法としてシールド材を用い、さらに接地を施した。Fig. 4 に加熱開始から 2.5 分以降の実験結果を示した。シールドしない場合の Fig. 2 に較べて、精度、確度とも大幅に改善されているのがわかる。温度の変動も見られないことから、マイクロ波の影響をほとんど受けていないと言える。

測定精度は最大でも $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ で、測定確度は -0.6 から -1.3°C の範囲である。被覆材にセラミックスパイプを用いたものは、測定確度がやや劣るが、シリコンチューブ、テフロンチューブを被覆材としたものは、被覆材を使用しないシース熱電対とともにほぼ満足できる値と判断される。

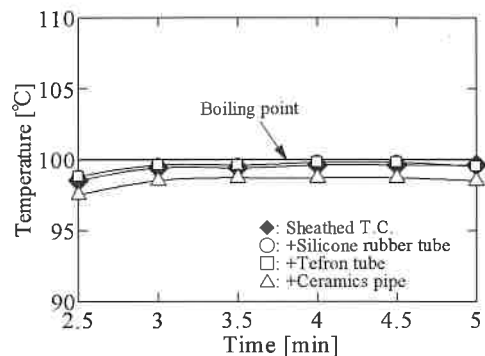


Fig. 4 Experimental results of water temperature change measured by a bare sheathed thermocouple or a covered thermocouple with a grounded shield.

2.3 水を含んだ鑄物砂の温度変化

測定値の健全性を調べる目的で、マイクロ波照射下での②水を含んだ鑄物砂層の乾燥実験を行った。測定結果は、赤外線線センサーを用いて温度変化を測定した青木ら⁽³⁾の乾燥実験の結果と比較した。

Fig.5 は直径 40mm、高さが約 100mm の水を含んだ鑄物砂の試料測定部である。熱電対は、層表面から $x=10, 20\text{mm}$ の位置に設置した。層の直径、高さ、容器寸法、断熱材などは、青木ら⁽³⁾の乾燥実験の結果と比較するため、おなじ寸法とした。

Fig.6 は測定結果を白抜ききの○と△で示す。電圧を 70V にして測定を行った。青木ら⁽³⁾の実験のマイクロ波の出力は明かでないが、

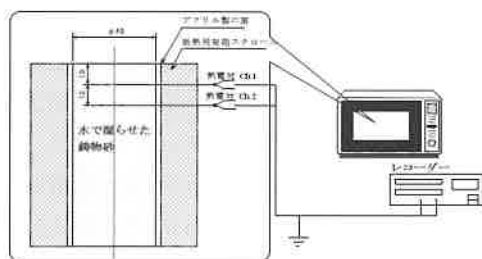


Fig.5 Experimental apparatus for measurement of temperature in water content packed beds

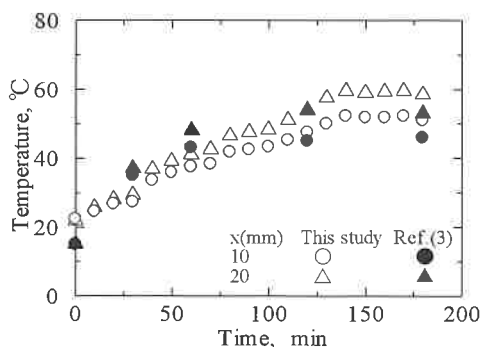


Fig.6 Experimental results of temperature change in water content packed beds.

温度の上昇の様子は青木らの結果(●と▲印)とほぼ一致している。特に $x=20\text{mm}$ の位置の温度が 10mm の位置の値より高くなっている点にマイクロ波加熱の特徴が表れている。

2.4 サツマイモの加熱時の温度変化

マイクロ波(電子レンジ)による実際の加熱時の食品の温度変化を測定するため、③サツマイモの加熱実験を行った。

Fig.7 は直径と高さがそれぞれ約 50mm のサツマイモ試料の中心と半径 20mm の位置の温度変化の測定結果である。熱電対は試料にドリルで穴を開け、被覆やシールドを施したまま試料内部に差し込んで測定を行った。

Fig.7 によると約 1 分を境にして、その前後で大きく分けることができる。

まず、1 分以前では両方とも 100°C に近い値を示している。中心部の温度の方が外側の温度と比べて約 10°C ほど高い値を示しているが、これは電子レンジでものを温めた場合、外側より中心部の温度が高くなるためだと考えられる。

しかし 1 分を過ぎると、外側の温度は 100°C 付近で一定の温度を保っているのにも関わらず中心部の温度は上昇を始め、 200°C を超えても上昇し続けた。これは中心部の温度上昇により試料内部から外側へ水分が移動したことが原因だと推測できる。そのため最初に乾燥を始めた中心部では 100°C を超えても温度が上昇し続けたが、外側の水分は内部から供給されるため蒸発しきらず温度が 100°C 付近で一定になったと考えられる。このことは実験に使用した試料の断面を観察することで確認した。

以上のことから、使用した熱電対は正しい値を示したと言える。

サツマイモの加熱時の温度変化を測定した研究例としては Hongyong and Hara⁽²⁾の報告がある。この実験では、加熱温度を 200°C としてあるが、どこが 200°C なのか定かではない。加熱方法は、「遠赤外線などの熱放射」とある

ので、電子レンジとは異なる赤外線による加熱と思われる。このため試料内部で発熱する本実験の結果とそのまま比較することはできないが、参考にはなる。それによると、直径56mmの円柱状サツマイモ試料を加熱したところ、65～70℃付近で温度上昇が穏やかになることが報告されている。中心部では、加熱から30分まではほぼ直線的に55℃まで温度が上昇し、その後は60分で約65℃まで上昇している。このような温度変化挙動を示すのは、サツマイモのでんぷんの変性温度が70℃前後であるため、熱伝導率が変化することによるとしている。本研究の一部の測定例にこの傾向が現れているが、他の測定例には見られない。むしろ100℃をわずかに上回った温度で一定になる傾向が見られる。

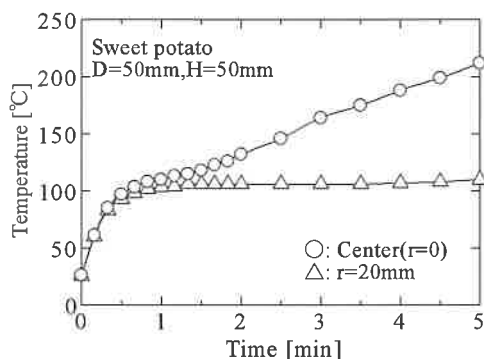


Fig.7 Temperature change of sweet potato under microwave heating measured by thermocouples with an grounded shield.

4. まとめ

従来使用することが出来ないとされていたマイクロ波照射場で熱電対の使用の可能性を調べる実験を行った。おもな結果は以下の通りである。

(1) シース熱電対をセラミックス管やシリコンゴムチューブ、テフロンチューブなどの絶縁物で電気的に絶縁を施せば、接地を施さなくても、被覆材の熱伝導率によるが、100℃に対して+1.5～5℃の確度で温度測定が

できる。

(2) シース熱電対に金属細線で作製されたシールドを施し、シールドを接地することによって、100℃に対して-0.4～-1.3℃の高い確度と、±0.1～0.2℃の高い精度で温度測定ができる。

文 献

- (1) Watanabe, R., M. Kikuchi, S. Ishikawa and J. Otsuji; "Measurement of Temperature-Time Profile of Packed Food under Microwave Heating," *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, 21, 835-838 (1994).
- (2) Hongyong, S., and T. Hara; "Investigation of temperature distribution in heated foods," *Pro. Thermal Engeng. Conf.'02*, C224, 387-388 (2002).
- (3) 青木和夫・ほか3名, マイクロ波加熱による粒子層の乾燥, 第33回日本伝熱シンポジウム講演論文集, C142 (1996), 129-130.

小山工業高等専門学校 機械工学科

E-mail: takasima@oyama-ct.ac.jp

「受理年月日 2004年8月25日」

