

# 鉄粉酸化反応層の熱制御に関する研究

村田圭治\*, 荒賀浩一\*

## Thermal Control of a Layer of Corroding Iron Powder

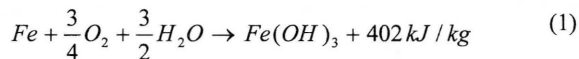
Keiji MURATA, Koichi ARAGA

This paper presents an experimental investigation of the thermal characteristics in a layer of an exothermic powder mixture that is utilized in body warmers, hot compresses, etc. The research objective is to develop a manufacturing method that enables the exothermic temperature to be controlled in order to prevent cases of low-temperature burns. This powder mixture is composed of iron powder, activated carbon powder, vermiculite and NaCl. The variation over time of the temperature distribution and the generated heat in a layer of the exothermic powder mixture is measured. Absorbent polymer and nonwoven fabric are used to control the water and oxygen volume supplied into the layer, and their effects are examined.

**Keyword** Iron Powder, Corrosion, Exothermic powder, Chemical reaction, Temperature control, Absorbent polymer, Nonwoven fabric

### 1. はじめに

金属の腐食酸化反応に伴う反応熱を携帯用カイロや温シップ等の熱源として利用する技術はよく知られており、金属が鉄の場合、主たる反応は



であるとされている<sup>1)</sup>。こうした発熱体粉末の需要は特に温熱治療の分野で世界的に大きく、就寝時にも連続して使用できる安全性が強くと求められている。しかしながら近年、発熱温度が設計値を大きく超えて低温火傷を起こす事例が数多く生じている。著者らは、こうした問題を解決するためには、粉末層の温度や発熱量を適切に保つ制御方法とこれらのバラツキを最小化できる製造方法とを確立する必要があると考え、発熱体粉末層の熱特性に関する研究を以下の手順で行ってきた。

- ① 反応速度の測定<sup>2)</sup>：腐食酸化反応により消費される酸素量から見かけの反応速度を測定し、反応速度式を作成した。
- ② 発熱体粉末層の熱特性に関する実験<sup>2)</sup>：シート状に積層した発熱体粉末層の温度分布と固体接触面からの放熱特性を実験的に調べた。

- ③ 発熱体粉末層の熱特性に関する数値解析<sup>3)</sup>：作成した反応速度式を用いてシート状発熱体粉末層における熱流動解析を行い、②の実験結果と比較・検討した。これらの実験および解析から、鉄粉、食塩、水分が共存する粉末層に酸素を供給すると腐食酸化反応が生じて層内温度が急激に上昇するが、短時間で反応は終了し発熱量や層内温度は低下してしまうことが分かった。したがって、腐食酸化反応の速度は十分に大きく、反応成分である水や酸素の供給量を適正に制御することで粉末層の温度や発熱量を長時間適正に保つことができる可能性があると考えられる。

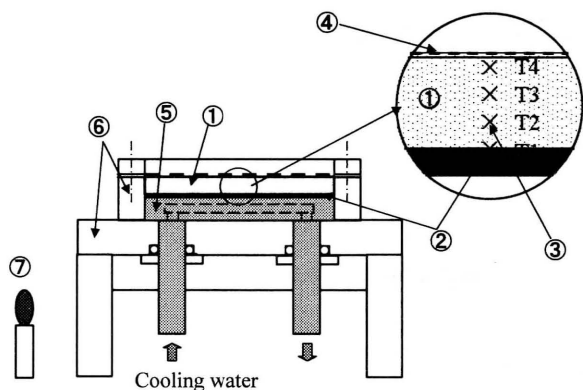
そこで、酸素量を制御する方法として、発熱体粉末層を多孔質シート（不織布）で大気から隔離し、粉末層における熱特性実験を行った。次に水量を制御する方法として、水を吸収した高吸水性ポリマーをバーミキュライト・活性炭・鉄粉等に混合して発熱体粉末とし、同様の熱特性実験を行った。本報では、これらの結果について報告する。

### 2. 実験装置および実験方法の概要

図1に実験装置の概略を、図2に実験装置の写真を示す。実験装置本体はアクリル製の実験チャンバー内（図1には示していない）に設置されており、ビニール手袋を介して外部から操作できるようになっている。実験装置はポリカーボネイト材6で構成された縦x横x深さ100mm x

\*近畿大学工業高等専門学校

総合システム工学科 機械システムコース



1. Exothermic powder mixture
2. Heat flux sensor sheet
3. Thermocouples
4. Porous sheet
5. Cooling plate
6. Polycarbonate material
7. Candle

Fig.1 Experimental apparatus

100mm x 30mm の箱型容器で、冷却水により一定温度（約 30~35℃）に保持した銅製の冷却板 5 が底面にはめ込まれている。冷却板上面に厚さ 0.4mm の熱流束センサシート 2 を密着させて冷却板への放熱熱流束を測定した。接触熱抵抗を抑えるため、冷却板と熱流束センサシートの間隙にシリコンオイルを含ませた。熱流束センサシートの上に食塩水を吸収させたバーミキュライト粉末、活性炭粉末、鉄粉からなる発熱体粉末をシート状に深さ 10mm まで充填して発熱体粉末層 1 とし、層内温度分布と冷却板への放熱熱流束の経時変化を測定した。温度測定点は、発熱体粉末層中央の位置で、熱流束センサシート内部  $T_0$ 、熱流束センサシート表面  $T_1$  および粉末層下面から高さ  $T_2:3\text{mm}$ 、 $T_3:6\text{mm}$ 、 $T_4:9\text{mm}$ 、および実験チャンバー内の雰囲気温度  $T_5$  である。主な試験手順は以下のとおりである。

- (1) 活性炭とバーミキュライトの粉末を電気乾燥機にて 100℃ 雰囲気下で 2 時間以上乾燥させた後、室温まで放冷する。
- (2) このバーミキュライト粉末に所定量の食塩水を吸収させ、活性炭粉末とよく混合する。
- (3) 上記の活性炭粉末とバーミキュライト粉末の混合物、および鉄粉をアクリル製の実験チャンバー内に置き、実験

Table1 Components of the exothermic powder mixture

Iron powder (average particle size=100 $\mu\text{m}$ )	41.6g
Activated carbon (particle size<150 $\mu\text{m}$ )	8.3g
Absorbent polymer	2.1g
Salt water (30wt%)	20.1cc
Vermiculite	5.4g
Temperature of cooling plate	30~35degC



Fig.2 Photograph of experimental chamber

チャンバーの扉を閉める。同時に、実験チャンバー内に点火したろうソク 7 を設置する。

- (4) 実験チャンバー内に下方から窒素ガスを送ってガス置換し、ろうソクの灯が消えるのを確認する。
- (5) 所定温度の冷却水を、冷却板の中に設けた流路に送り、冷却板を所定温度に保持する。
- (6) 活性炭粉末とバーミキュライト粉末の混合物を鉄粉と実験チャンバー内で良く混合し、これを試験用発熱体粉末とする。
- (7) 作成した試験用発熱体粉末を熱流束センサーシートの上に所定の深さまで充填する。
- (8) 熱電対を発熱体粉末層内の所定の位置に設置する。
- (9) 実験チャンバーの扉を開放し、チャンバー内の窒素ガスを一挙に大気と置換する。
- (10) 温度分布および熱流束の経時変化を反応が終わるまで測定する。

ここでは、発熱体粉末層の上面に多孔質シート（不織布）4 をフランジ留めして反応する酸素供給量を制御すること、さらに水を直接混合するのではなく水を吸収した高吸水性ポリマーを発熱体粉末に混合して給水量を制御することを狙った実験を行った。なお、試験用発熱体粉末は、鉄粉（平均粒径 100 $\mu\text{m}$ ）41.6g、活性炭粉末（粒径 150 $\mu\text{m}$  以下）8.3g、バーミキュライト粉末 5.4g、イオン交換水 20.1cc（反応式(1)で鉄粉全量が反応するために必要な化学量論量）、食塩は上記イオン交換水と混合すると濃度 30wt%の食塩水になる量とした、これらをまとめて表 1 に示す。

### 3. 不織布を用いた酸素量制御

図 3 に実験結果の一例を示す。(b)は発熱体粉末層の上面に多孔質シート（不織布）をフランジ留めし、酸素供給量を制御することを狙った実験結果、(a)は多孔

質シートを設置しない場合の実験結果である。まず、(a) について説明する。発熱体粉末を装置内に充填直後（経過時間  $t=100\text{sec}$ ），熱流束  $q$  や温度  $T_3$ ,  $T_4$  が急激に上昇している。こうしたことから、チャンパー内を窒素置換したにもかかわらず粉末層内やチャンパー内に酸素が残存し、鉄粉を活性炭粉末やパーミキュライト粉末と混合した直後から反応が始まっていたことがわかる。経過時間約  $300\text{sec}$  にチャンパーの扉を開け大気を供給すると、粉末層内の温度  $T_3$ ,  $T_4$  および熱流束  $q$  は再び急上昇し、経過時間約  $500\text{sec}$  に最大値 ( $T_4=55^\circ\text{C}$ ,  $q=1350\text{W/m}^2$ ) を示しその後徐々に低下していく。この低下は、反応の進行により粉末が凝集し反応速度が低下したことや、蒸発により水分が粉末層の外に放出したことによると思われる<sup>2)</sup>。  $T_4$  が  $T_3$  よりも低くなっているのは、雰囲気温度  $T_5$  が粉末層内の温度よりも低いために粉末層の上面からも放熱が生じているためであると思われる。粉末層内の温度  $T_3$ ,  $T_4$  は経過時間約  $2500\text{sec}$  で少し上昇している。これは、当初生じていた反応とは異なる反応が生じたためではないかと考えている（二段反応）。

次に、(b)について説明する。発熱体粉末を装置内に充填直後（経過時間約  $500\text{sec}$ ），チャンパー内に残存していた酸素によって酸化反応が始まり、熱流束  $q$  や層内温度  $T_3$ ,  $T_4$  は急激に上昇する。しかし、経過時間約  $600\text{sec}$  に不織布を設置すると、供給酸素量が抑制され熱流束と層内温度は急激に低下する。経過時間約  $750\text{sec}$  にチャンパーの前面を開放すると、再び熱流束  $q$  や層内温度  $T_3$ ,  $T_4$  は上昇するが、その後の変化は小さくほぼ一定に保たれている。また不織布を設置した場合には、粉末層の内部温度  $T_3$  は表面に近い温度  $T_4$  よりも低くなっている。こうしたことは、粉末層に供給される酸素量が不織布によって抑制され、酸素が粉末層内部まで十分に到達できないためであると考えられる。さらに、不織布が水蒸気の外部流出を防

ぐ効果も有しているのではないかとと思われる。粉末層に供給される酸素量は、粉末層内と大気との圧力差で決まり、粉末層の温度や発熱量は不織布の透過率によって制御できると考えられる。

#### 4. 高吸水性ポリマーによる水量制御

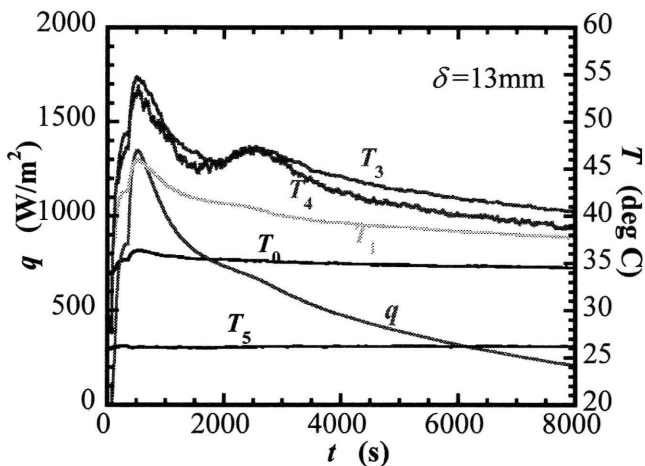
水を吸収させた高吸水性ポリマーを発熱体粉末に混合し、ポリマーの吸収・放出特性を利用することで給水量を制御することを狙った実験を行った。しかし、その熱特性は、食塩水を直接混合した場合と大きな違いはなく、チャンパーの扉を開け大気を供給すると、粉末層内の温度  $T_3$ ,  $T_4$  および熱流束  $q$  は急上昇して最大値を示すが、その後は徐々に低下した。

#### 5. おわりに

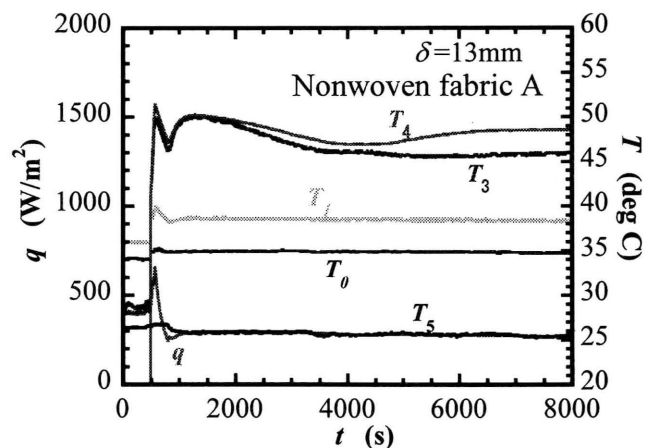
多孔質シート（不織布）を用いて酸素や水蒸気の透過量を抑制することで、鉄粉酸化反応層の熱特性を適切に制御できる可能性を見出すことができた。しかし、高吸水性ポリマーによる給水量制御の効果は明確ではなく、今後検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) Uhlig, H.H., 腐食反応とその制御, 産業図書, 1968.
- 2) Murata, K., Nakahata, H., Araga, K. and Komatsu, Y., Thermal characteristics in a layer of corroding iron powder, Proceedings of 7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics(2009), 1231-1238.
- 3) 村田, 山川, 荒賀, 小松, 鉄粉酸化反応層の熱特性に関する研究（解析的検討）, 実験力学学会年次大会講演論文集(2010), 95-98.



(a) Without nonwoven fabric



(b) With nonwoven fabric A

Fig.3 Control of thermal characteristics in a layer of exothermic powder mixtures by nonwoven fabrics