

# 再利用を目的としたスクラップ材からの 鉄と銅の分離に関する研究

田中 好一\*<sup>1</sup>, 伊澤 悟\*<sup>2</sup>, 川村 壮司\*<sup>2</sup>

Study on the separation of iron and copper from the scrap material for the recycling

Koichi TANAKA, Satoru IZAWA, Takashi KAWAMURA

The demand for a metallic material increases on the world scale. Then, the recycling of the metal material has become more important. Especially, a scrap of ferrous material that is demanded most is actively recycled. However, when elements such as Ni, Cr, Mo, and Cu are mixed into the melting iron in an electric furnace, the separation of these elements from iron becomes difficult. Especially, copper is a factor to deteriorate the mechanical properties of ferrous material. Therefore, the separation of copper material from ferrous material is very important in the recycling industry. In this study, the efficient separation method of copper material from ferrous material has been proposed and examined experimentally using test piece which steel and tough-pitch copper are brazed at 800°C. As a result, the conclusion that tough-pitch copper can be efficiently separated from steel by heating to 700 °C and adding a vibration has been obtained.

KEYWORDS : scrap material, recycling, separation, iron, copper, brazing, tramp element

## 1. はじめに

近年、発展途上国の台頭により、鉄を始めとした金属材料の需要は、景気変動により多少の落ち込みはあるものの、世界規模で増大している。それに伴い金属材料のリサイクルは、その重要性が非常に増している。特に、金属需要の中で最も多

い鉄スクラップ材の再利用は盛んに行われ、必要不可欠な産業でもある。

その一方で、鉄スクラップ材を電気炉で溶解するとき Ni, Cr, Mo, Cu などの元素が溶けた鉄に混入すると、分離困難な不純物成分(トランプ エレメント)として残るため、リサイクル業界においてはその対策が急務とされている。特に、再利用される鉄鋼材料に 0.4~0.6%以上の Cu (銅) の

\* 1 機械工学科 (Dept. of Mechanical engineering), E-mail : ktanaka@oyama-ct.ac.jp

\* 2 機械工学科 (Dept. of Mechanical engineering)

含有は、鉄の構造材としての機械的性能を著しく低下させるため、スクラップ材を溶解する前に、トランプエレメントを物理的に分別することが重要となる。

ところで、工業製品として生産され、使用後に廃棄されるスクラップ材の多くは、鉄鋼材料の付加価値を高めるため Ni, Cr, Mo, Cu などの元素を予め鋼材中に混ぜた廃材 (Type 1)、銅製部品を鉄鋼材にボルトやリベットなどで機械的に接合した廃材 (Type 2)、そして、溶接やロウ付けなどの方法で接合された廃材 (Type 3) などに分類できる。

現在、スクラップ材における鉄と銅の分離については、鉛に銅を吸着させて分離する冶金的方法や超伝導磁石を用いて鉄と銅を分離させる方法などが考案されている。しかし、実際の現場サイドでは、コスト面や時間的に実用化が難しく、鉄鉱石からのピュアな鋼材をスクラップ材に混ぜ、鉄中の銅含有率を低下させる方法 (薄める方法) を採用することが多く、近年ではリサイクルの繰返しによる銅の蓄積 (鉄鋼材としての劣化) が問題視<sup>(1)~(3)</sup> されつつある。

これら社会的背景のもと本研究者らは、鉄に銅をロウ付けされた鉄スクラップ材 (Type 3) に着目し、鉄と銅を効率的に分離するための方法について検討を行っている。今回の研究では、鉄に銅をロウ付けしたテストピース (スクラップ材と仮定) を作り、そのテストピースを再加熱し、鉄と銅を溶かすことなくロウ材を溶かして分離する方法を考案し、実験的な検討を行ったので報告する。

## 2. 鉄と銅のロウ付けについて

### 2.1 ロウ付の原理について

冶金的接合法であるロウ付けは、部材と部材の接合法の一種で、一般的に知られる融接 (接合部

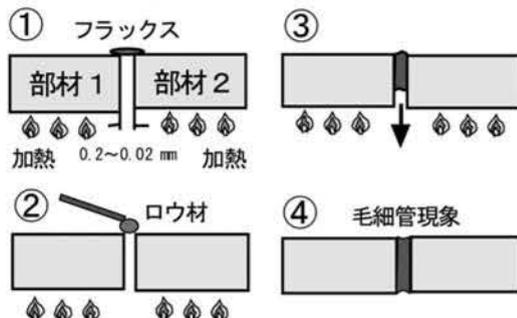


図1 ロウ付け方法の概略

を溶かして接合) と異なり、接合部を溶かすことなく、部材同士を『ロウ』のぬれ現象を利用して接合する技術である。図1は、一般的なロウ付け作業の手順について示した。ロウ付けでは、フラックスを用いて接合面のぬれ性を良くすること、部材を適切な温度に加熱することが重要である。今回の実験で使用したロウ材は、JIS (Z3261) で規定する BAg-2 (銀ロウという) を用いた。

### 2.2 ロウ材の溶融温度について

JIS で規定する BAg-2 の溶解開始温度 (固相線) は約 605°C で、溶解終了温度 (液相線) は約 700°C である。これを確認するための基礎実験として、今回用いたロウ材の溶解開始温度を調べた。実験は、るつぼ内にロウ材と温度測定用の熱電対を入れ、それを電気炉で加熱することにより、ロウ材が溶融する温度を測定した。その結果、今回使用した銀ロウ (BAg-2) の溶解開始温度は、約 610°C であることを確認した。

## 3. 実験装置及び実験方法

### 3.1 テストピース (ロウ付けした鉄と銅) の製作方法について

テストピースのロウ付け方法の概略を図2に示した。ロウ付けする鉄と銅は、直径 10mm の丸棒を用い、鉄には SS400、銅には同径のタフピッチ銅を用いた。また、接合面には銀ロウ用のフラックスを塗り、ロウ材には太さ 1.0mm の銀ロウを用いた。ロウ付けの電気炉内作業温度は 700~840°C の範囲で、20°C おきに鉄と銅をロウ付けした。なお、今回製作したロウ付け用の鉄と銅の固

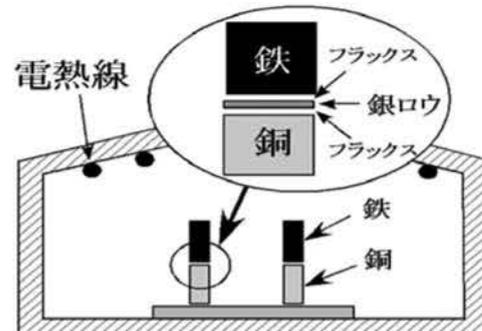


図2 テストピース (鉄と銅) の製作方法

定用ジグ（使用材料：SUS304）は、1回のロウ付けで6個のテストピースが同時に製作可能である。また、今回用いた電気炉は、横（下）210mm、横（上）115mm、縦115mm、奥行き287mmで電気炉内の電熱線は、天井にある構造となっている。そこで、電気炉内の温度とロウ付け面との温度にどの程度の差があるかを調べた。

実験は、鉄と銅の接合部に熱電対をはさみ、接合部の温度と電気炉内の温度（側面から熱電対を設置）との差を調べた。その結果、電気炉内の温度とロウ付け面の温度差を最小限にするためには、電気炉内の温度が任意に達したのち、約30分間保持すれば良いことが分かった。

### 3.2 ロウ付けされた鉄と銅の静的分離方法と動的分離方法①について

任意の温度でロウ付けされた鉄と銅のテストピースを用い、その片側を耐火レンガで固定し、それを電気炉に入れる。その後、全体を加熱することにより接合部のロウ材が溶け、自然落下（静的分離と定義する）し、銅と鉄が分離したときの温度を調べた。また、ロウ付けされたテストピースを電気炉内に入れ、加熱しながら外力を加えて鉄と銅を分離（動的分離方法①とする）し、ロウ付けしたときの温度と、分離するときの温度との関係を調べた。図3は、そのときの実験方法を示したものである。具体的には、テストピースの片側を耐火レンガに固定し、ばねとクランク機構でテストピースに周期的（1Hz）な力を加え分離した。その力は、最大3.7Nであった。

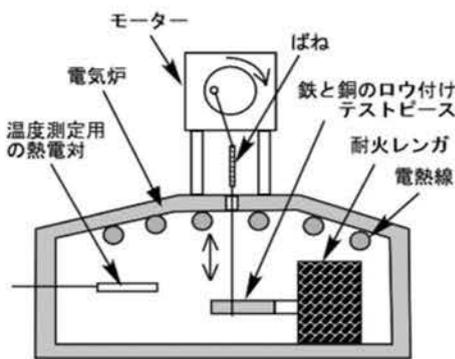


図3 ロウ付け材の動的分離方法①について

### 3.3 ロウ付けされた鉄と銅の実用的な分離方法②について

上述した動的分離方法①は、1個のテストピー

スを分離する方法であるが、ここでは、複数個のテストピースを同時に分離する方法で、実用的な分離方法②を試みた。図4は、今回製作した実験装置の概略を示す。任意の温度でロウ付けされた10個のテストピースを回転可能なステンレス製の網に入れ、それを電気炉内に入れ加熱する。

その後、任意の温度に達したときにステンレスの網を回転させ、ロウ付けされたテストピースが何個分離したかを調べる。なお、電気炉の加熱温度は、580℃～700℃の範囲で20℃おきに変化させ、鉄と銅の分離実験を行った。



図4 ロウ付け材の動的分離方法②について

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1 ロウ付け部材の接合強度について（3点曲げ試験による評価）

今回用いたロウ材の推奨される接合の温度は、約700～845℃である。そこで、これらの温度範囲でロウ付けテストピースを作り、ロウ付け温度と接合強度の関係を調べた。なお、接合強度は3点曲げ試験で行った。

図5は、ロウ付け温度が760℃における3点曲げ試験の変位と曲げ強度（縦軸に力を示す）の一例を示す。直径10mmのロウ付け材の曲げ強度は、約1.2kNで第一のピーク値を示し、その後0.6kNで第二のピーク値をとり破断する。今回の実験では、ロウ付け面の接合状態により、第二のピークが現れる場合と現れない場合があった。

また、図6はそのときの曲げ試験で破断した接合面（接合温度：760℃）の観察結果である。ロウ付けの破断面を観察すると、ロウ材が鉄や銅とのぬれ性が良好で、ロウ自体が破断する部分と、鉄や銅とのぬれが悪く、どちらか側に付着して剥が

れる場合があり、その結果として曲げ強度の大小に現れたものと考えられる。

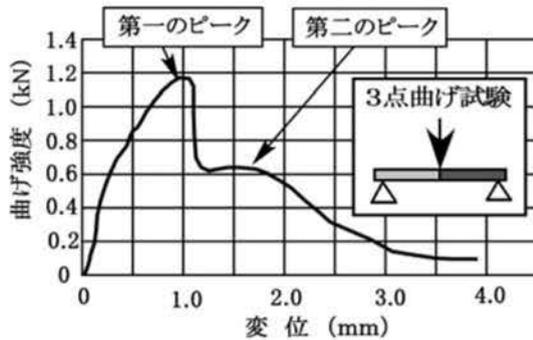


図5 3点曲げ試験による変位と曲げ強度  
(ロウ付け温度 760°Cの場合の例)

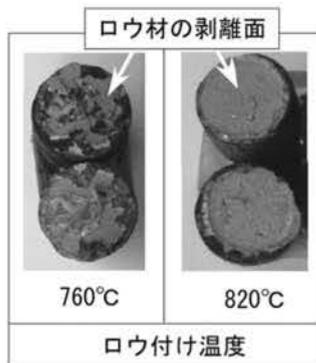


図6 曲げ試験後のロウ付け部の破断面

次に、図7は鉄と銅のロウ付け温度と曲げ強度の関係を表したものである。同図から曲げ強度は、ロウ付け温度が高くなるに従い、大きくなる傾向を示した。

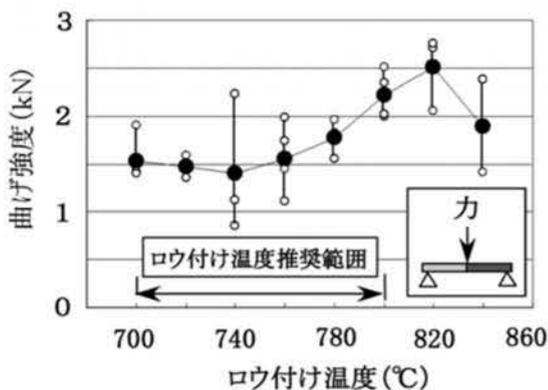


図7 ロウ付け温度と曲げ強度の関係  
(直径 10mmの鉄と銅の場合)

しかし、ロウ付け温度が約 820°C以上になると、接合部の外周部が酸化するためロウ付け不良を起し、接合強度は幾分低下する傾向を示した。従って、高温時の接合強度を維持するためには、フラックスを多めに塗布し、ロウ材の量も多めに付着させることが重要である。

#### 4. 2 ロウ付け部材の静的分離及び動的分離 方法①の実験結果について

700~840°Cの範囲でロウ付けした鉄と銅のテストピースを電気炉内で加熱し、静的分離および動的分離①の実験を行った。

図8は、静的な分離実験と動的分離①の実験の結果を併記したものである。横軸はテストピースのロウ付け温度を示し、縦軸は鉄と銅が分離したときの電気炉内の温度（鉄と銅の分離温度）を示した。同図内には、参考のため今回用いたロウ材の溶解開始温度（固相線：605°C）と溶解終了温度（液相線：700°C）を併記した。

同図から、ロウ付け温度が高くなるに従い、静的および動的分離方法①共に、鉄と銅を分離するための温度は高くなるのが分かる。また、テストピースのロウ付け温度に関係なく、静的分離に比べ、周期的な外力を加えた動的分離①の方が低い温度で分離できることが分かる。

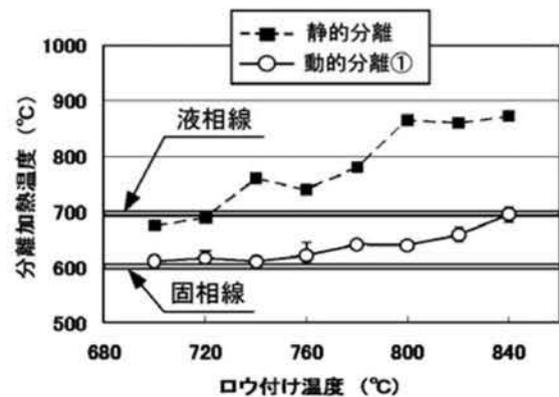


図8 静的、動的分離方法実験結果の比較

以上のことから、鉄と銅のロウ付け部を溶かして分離するためには、鉄と銅のロウ材が軟化しはじめた状態で、振動などの外力を加えることにより、より少ない熱的エネルギーで分離が可能であることが分かった。

### 4. 3 動的分離方法②の実験結果について

ロウ付けしたテストピースを図4で示した実験装置(回転網)に入れ、分離実験を行った。テストピースのロウ付け温度は、これまでの実験結果を踏まえ800℃に固定して行った。また、動的分離②で行うための電気炉内の温度設定は、580℃～700℃の範囲で20℃ごとに行った。

実験は、ステンレス製の回転網の中にテストピースを10個入れ、電気炉内の温度が任意に達してから回転網を手動で約5分間回転させ、10個のテストピースが何個分離したかを調べた。

図9は実際に使用した回転網を示し、図10は10個のテストピースにおいて、動的分離②の実験で、炉内温度と分離できたテストピースの個数の関係を表したものである。

これより、ロウ付けされた鉄と銅は、約640℃から分離し始めることが分かった。そして、電気

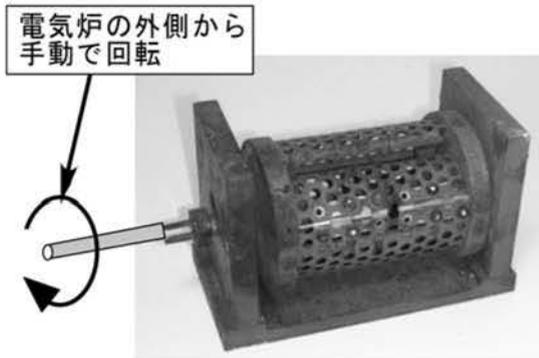


図9 分離方法②の実験で使用した回転網

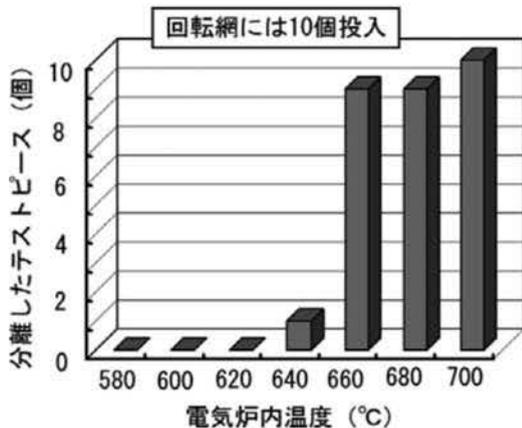


図10 800℃でロウ付けした鉄と銅の分離方法②の結果(ロウ材:BAg-2)

炉の加熱温度が660℃に達すると鉄と銅の分離は急激に多くなる。さらに、700℃以上では、鉄と銅の分離がほぼ100%可能となり、振動を加えながらロウ材を溶かすことによって、鉄と銅を効率的に分離できることが分かった。

### 5. まとめ

本研究は、直径10mmの鉄と銅を任意の温度でロウ付けしたテストピース(スクラップ材と仮定)を作り、そのテストピースを電気炉内で加熱し、鉄と銅を溶かすことなくロウ材を溶かして分離する方法を考案し、その基礎的な研究を行った。

その結果、800℃のロウ付け温度で接合した鉄と銅のテストピース10個を電気炉内で回転する網の中に入れ、電気炉で加熱と同時に回転する(間接的に振動を加える)ことで、鉄と銅は約640℃から分離し始め、約700℃ではほぼ100%分離できることが分かった。

今後の課題としては、実際のロウ付けされた鉄と銅のスクラップ材を用い、その分離状態の検証が必要となる。

### 謝辞

本研究に協力してくれた本校機械工学科卒業生である早川健太、古河将章(H16卒)、増渕亨、白井芳和(H17卒)、都留崎剛(H18卒)、池将太郎(H19卒)の諸氏に感謝の意を表します。

また、本研究を進めるのにあたって、栃木県小山市萱場の株式会社ツルオカからスクラップ材の見本として試料を提供して頂いた。ここに謹んで御礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 日刊市況通信社：“スクラップ業にとって怖い話”，平成15年11月12日
- 2) 角館慶治，足立芳寛，鈴木俊夫：“銅の混入を制約要因とした循環型社会における鉄スクラップリサイクルの定量化モデル”，『鉄と鋼』86(12)(2000)，P837-843
- 3) 醍醐市朗，藤巻大輔，他2名：“鋼材循環利用における環境負荷誘発量解析のための動態モデルの構築”，『鉄と鋼』90(1)，(2005)，P171-178

【受理年月日 2013年 9月30日】

