

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：25503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11718

研究課題名(和文) 金属スクラップから複雑断面素形材への環境調和型アップグレードリサイクル法の開発

研究課題名(英文) Development of an upgrade recycling method for metallic scraps into long objects with various cross sections

研究代表者

千葉 良一 (Chiba, Ryoichi)

山陽小野田市立山口東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号：10506083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：溶解工程を必要としない金属スクラップの固相リサイクル技術に関して、従来の丸棒・板材等の単純形状素形材への再生ではなく、実産業において、より応用が期待される形材(パイプ、アングル材、六角棒)への再生を狙った「塑性加工による固体リサイクルプロセス」について研究を行った。アルミニウム合金切削屑および銅合金の細線屑をそれぞれ適切な温度で押し出し加工することによって得られる形材の表面状態、真直性、密度、機械的性質、顕微鏡組織に及ぼす加工条件の影響を調査し、良好な固相リサイクル形材が得られる条件を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の対象材料の一つである銅は日本の産業や社会にとって重要な金属であるが、その鉱石の全量を輸入に頼っているため、銅のリサイクル推進は重要な課題である。また、アルミニウムは、新地金のほとんどを輸入に頼っており、リサイクル率の一層の向上が望まれている。本研究により、「スクラップ素形材(形材)」へのプロセスが確立されると、銅およびアルミニウムが産業材料として持続的に活用されることが可能となり、社会的意義が大きい。また、本プロセスを大学・高専等の実習工場から排出される切削屑に適用すれば、材料の有効利用のみならず、学生へのリサイクル工学に関する教育効果の向上に寄与できる。

研究成果の概要(英文)：In this research, an solid-state recycling process by plastic working is investigated, which recycles metallic scraps into long objects with various cross sections, e.g., pipes, L-shaped members, and hexagonal bars. Aluminum alloy machining chips and used brass thin wires are compacted at room temperature and subsequently extruded into those long objects at an appropriate temperature. The effects of the processing conditions on the surface state, straightness accuracy, density, mechanical properties, and optical microstructure of the obtained objects, or recycled materials, are examined to produce high-quality solid-state recycled materials.

研究分野：材料加工

キーワード：塑性加工 アルミニウム合金 銅合金 機械的特性 固相リサイクル 金属スクラップ 有限要素解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

現在、工場の各種工作機械から排出される切削屑は、直接廃棄されるか若しくは金属リサイクル業者を介して回収された後に再溶解され、鋳物やダイカスト製品などの地金として再生されている。ただし、再溶解したとしても材料のリサイクル率は低く(アルミニウムで約 55%[1])、ドロスと呼ばれる残滓が発生し、一部は埋め立て処理されている。また、再溶解の際、異種材料が混ぜられるため再生地金の純度が低下し、機械的性質の劣化が問題となる。

一方、近年、学界ではリサイクル率増加と省エネルギーを目的として、切削屑の圧密体に巨大なひずみを加えて再溶解することなく固相のまま直接バルク材に再生する、いわゆる固相リサイクルプロセスに関する研究[2]が行われている。ここでいう固相リサイクルとは、切削屑を押し・圧延などの塑性加工に供することにより、金属スクラップから直接的に素形材を製造するものである。この技術は材料のリサイクル効率を飛躍的に(およそ 95%にまで)高め、また、リサイクルと同時に組織制御を行うことで、優れた機械的特性を有するリサイクル材を少ないエネルギーで得ることができるため、産業界からも注目されている。

2. 研究の目的

固相リサイクルの特長である「使用済材料の再生と同時に材料特性を向上させる」ことに加え、従来の丸棒形状ではなく、アングル材、パイプ、六角棒などの【形材】への再生を狙った金属スクラップの「塑性加工による固体リサイクル手法」の確立を目指す。対象をアルミニウム合金および銅合金に絞り、加工現場から排出される金属屑をそれぞれ適切な温度で塑性加工することによって得られる形材の表面状態、真直性、密度、機械的性質、顕微鏡組織に及ぼす加工条件の影響を調査し、良好な固相リサイクル形材が得られる条件を明らかにすることが目的である。

3. 研究の方法

アルミニウム合金切削屑および使用済み放電加工電極ワイヤをそれぞれ熱間押し加工することによって得られるアングル材、パイプ、六角棒材の表面状態、真直性、密度、機械的性質、顕微鏡組織に及ぼす押し出し条件の影響を調べ、良好な形材の得られる条件を明らかにする。また、切削屑の形状は工作機械の種類およびその加工条件に応じて、チップ状、針状のものから螺旋状にカールしたものなど様々であるので、切削屑の形状の影響についても調査する。

はじめに、A6063 アルミニウム合金を旋削およびフライス加工した際に発生する切削屑を、アセトン中で超音波洗浄したのち、室温下で押し固めて円柱状ピレットを作製した。また、ワイヤカット放電加工から排出された直径 0.3 mm の使用済み C2700 黄銅ワイヤについても、長さ 10mm 程度に細断してから、同様の工程により円柱状ピレットにした。

次に、製作した押し出しサブプレスとマントルヒータを万能材料試験機に取り付け、その中にピレットを二つ重ねて装填し、加熱しながら押し出し荷重を与えることで形材へとリサイクルした。複数の押し出し温度と押し出し比の下で、アングル材と六角棒へは前方押し出しにて、パイプへは後方押し出しにてリサイクルした。

リサイクル材の表面状態、真直性、密度、長手方向の機械的性質について調べ、これら性質の優れた押し出し材が得られる押し出し加工条件を検討した。機械的性質については、引張試験片を機械加工により切り出し、降伏点と引張強さを測定した。

さらに、光学顕微鏡によるマイクロ組織観察を行い、リサイクル材内部の固相接合状態を調べた。特に、屑形状の違いが接合状態にどのような影響を及ぼすのかに注目した。

また、有限要素解析ソフト DEFORM-3D および Inspire Extrude Metal を用いて、押し出し加工によって圧密体(ピレット)に導入される加工ひずみ量およびその分布を定量的に予測し、リサイクル材の機械的性質と導入された加工ひずみ量との関係を明らかにした。この結果から、金属屑を他の形材(例えば H 型断面形材)へ固相リサイクルする際に、得られるリサイクル材の機械的性質をある程度予測可能になる。なお、硬さ試験により、リサイクル材の硬さ分布を調べ、有限要素解析から得られた塑性ひずみ分布との相関性を確認し、解析結果の妥当性を確認した。

4. 研究成果

2018 年度は A6063-T6 アルミニウム合金の旋削屑を対象にした。回転数、送り速度および切込み量をそれぞれ 555 rpm, 0.21 mm/min, 0.4 mm に設定して得られた旋削屑を超音波洗浄により脱脂した後、100 kN (303 MPa) に到達するまで押し固めることで 20.5mm の円柱形ピレットを作った。その後、ピレットには焼鈍を施した。

摩擦による押し出し荷重の増加を防ぐために耐熱 MoS₂ グリースを塗布した金型内にピレットを入れ、600 K で後方押し出しすることによりパイプ形状のリサイクル材を得た。パンチ速度は 3 mm/min とし、押し出し比は R=2, 3, 10 の 3 種類とした。また、アングル材へのリサイクルについては、実験機材はパイプ材の場合と同一の物を使用し、ダイスとパンチの形状のみを変更した。押し出し比は R=10 と 18 の 2 種類を採用した。

図 1 の左半分には、実際に押し出されたパイプ材の横断面を示す。押し出し比 R=2 および 3 におい

ては連続したパイプ材の形成が確認できた。しかし、押し比 $R = 10$ の場合は偏肉がひどく、パイプの形成に失敗した。断面を観察すると、押し比が大きくなるほど固着していない切削層が肉眼でも確認できることから、パイプ材の形成には一定以上の肉厚が必要なのことがわかる。

同図の右半分に、実際に押し出されたアングル材を示す。それぞれの押し比において連続したアングル材の形成が確認できた。先端から約 30 mm の領域は端部の影響を受け曲がっているものの、それ以外の領域は概ねまっすぐ押し出された。

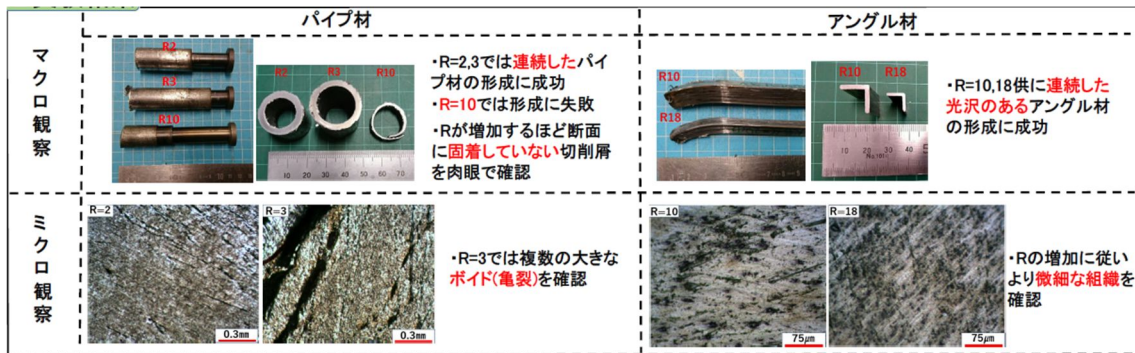


図1 アルミニウム合金旋削屑のリサイクル

2019年度は、A6063丸棒をフライス盤と旋盤の2種類の工作機械で湿式切削することで発生させた切削屑を対象にした。それぞれの切削屑から作った圧密体(ビレット)を、600Kかつ押し比 $R = 10$ と 18 の熱間押しによりアングル材へとリサイクルし、屑形状の違いが固相接合状態にどのような影響を及ぼすのか調査した。

両者を比較すると、リサイクル材の表面粗さは旋削屑の方がフライス切削屑よりも小さかったが、リサイクル材の真直度はフライス切削屑の方が優れていた。一方、ピッカース硬さや引張強さは旋削屑由来のリサイクル材の方が約 50% も大きかった。

2020年度は、押し加工によってビレットに導入される加工ひずみ量およびその分布を定量的に予測し、リサイクル材の機械的性質と導入された加工ひずみ量との関係を明らかにした。

2021年度は、0.3mm径の放電加工用の使用済み黄銅ワイヤを長さ10mm程度に細断し、アセトン中で超音波洗浄してから、それらを100kNで押し固めて20.5mm径の円柱状ビレットを作製した。その後、押しサブプレスの中にビレットを二つ重ねて装填し、650℃で熱間押しを行った。押し比4.4および9.0に相当する六角穴が中央に設けられたダイスを用いて、押し速度10mm/minで押し出した。押し出されたリサイクル材は旋削によってダンベル形に加工され、引張試験と硬さ試験により機械的強度を測定するとともに光学顕微鏡による組織観察も行った。

リサイクル材(押し比4.4)の引張強さは約285MPaであった。これは市販のC2700黄銅棒と比べて約24%低い。しかしながら、一般機械部品の用途であれば十分な強度である。図2に示す引張試験片の破断部には軸方向に整列した繊維状物が視認できた。この試験片は旋削で加工したものであるが、その加工面はなめらかであり金属光沢が確認できたため、この再生材は機械的な除去加工による二次加工が可能であることがわかった。横断面を顕微鏡で観察すると、ワイヤ同士の界面が残存していたため、より大きな押し比を採用すれば強度向上が期待できる。



図2 黄銅ワイヤのリサイクル材

本研究の特色は、金属屑を再溶解することなく塑性加工を利用して固相リサイクルする技術に関し、その第一段階である「最も単純な形状である丸棒/板状バルク材へと再生する」基礎研究からさらに一歩進んで、実産業において需要が拡大してきている「アングル材、パイプ材、六角棒のような型材へと再生する」点を目的としている。これまでに(特に国内で)少なからず行われてきた丸棒形状への再生に関する研究では、高温環境下での切削屑同士の固相接合の良否および丸棒材の表面割れと押し条件との関係が明らかにされた。本研究でターゲットとしている型材は、その多くが軸対称形状でないため、押し加工するにせよダイス穴へのマテリアルフローが場所毎に異なり、導入される加工ひずみ量が断面内に分布するため、再生材の固相接合状態や材料特性は一様でない。また、非軸対称押し出であるが故に生じる押し再生材の曲がり・割れ等の形状不整、押し条件が再生材の表面状態に及ぼす影響が丸棒材と比べて大(単位体積あたりの表面積が丸棒に比べて著しく大きい)なる点など、高品質の固相リサイクル材を得るためには乗り越えるべき問題が多い。本研究は、これらの諸問題を実験と数値解析の双方から解決しようとしたものであり、実用に向けて有用な基礎データを実験室レベルで取得した。

参考文献

- [1] G. Lazzaro and C. Atzori, Light Metals, 3 (1992), 1379-1384.
- [2] A. Wagiman *et al.*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106 (2020), 641-653.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大谷快世, 千葉良一
2. 発表標題 6063アルミニウム合金切削屑のアンクル材およびパイプ材への固相リサイクル
3. 学会等名 日本機械学会北海道支部 第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------