

金属 3D プリント用粉末の振動分離技術開発と都市鉱山からの材料マイニング

研究代表者 大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 教授 小泉 雄一郎
共同研究者 大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 大学院生 喜多 駿介
共同研究者 大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 助教 奥川 将行
共同研究者 大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 助教 小西 宏和
(現 鈴鹿工業高等専門学校 材料工学科 准教授)

1. 研究背景

付加製造 (Additive Manufacturing: AM)、所謂 3D プリンティング (3DP) 技術の開発が急速に進んでいる[1,2]。金属 AM においては、指向性エネルギー堆積 (DED) 法や、主流である粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion: PBF) 方式を用いた造形技術が広く用いられている。異種金属材料を組み合わせる技術も開発されている。高熱伝導率を有する銅とステンレス鋼やマルエージング鋼などの高強度な材料を組み合わせ、冷却性能が高い射出成形用金型などより高性能な製品の造形が期待されている。複数材料を使用する場合、造形体の周囲に取り残された金属粉末を再利用するために異種金属粉末の分離が必要となるが、その分離方法が課題となる[3,4]。一方、異種金属材料を組み合わせたマルチマテリアル造形や、複数材料を扱う生産現場の拡大に伴い、造形後に回収される未溶融粉末が異種金属混合粉末となる例が増している。これらの混合粉末は、現状では再利用手法が確立されておらず、品質保証や経済性の観点から廃棄される例も少なくない。

資源制約および地球温暖化対策の観点から、金属材料のリサイクル技術の確立は極めて重要な課題である。特に鉄鋼材料やアルミニウムは、社会インフラおよび製造業を支える基幹材料であり、そのリサイクルの高度化は環境負荷低減に直結する。さらに材料リサイクルの高度化と効率化はカーボンニュートラル実現を牽引する最重要課題の一つである。一方、EV やドローンのモータなど、鉄鋼材料と非鉄金属が複雑微細に混在する部材が増しており、これらを構成する材料のリサイクルは新しい課題となっている。社会全体の電動化の進展により、電動モータや発電機等を起源とする鉄鋼-銅混合スクラップの発生量が増加している[16-18]。この結果、トランプエレメントとして問題視される銅が鉄鋼材料に混入することが増している。トランプエレメントである銅は、鉄鋼において微量でも機械特性や加工性に悪影響を及ぼすことから、溶解前に銅を低減・分離する技術の確立が強く求められている。そのためには、部材毎の分離回収が理想であるが、部材の微細化につれ分離回収が困難となっている。その解決策として、微小な部材で構成される部品を、粉碎し各粉末粒子が単一材料で構成されるまでに小さくし、上記の粉末粒子分離技術を適用して分別することで各構成材料を分離して回収できると考えられる (図 1)。

磁性材料と非磁性材料では磁気分離が可能であり、密度差の大きな材料は浮選が可能であるが液体につけるため汚染の懸念がある。一方で、密度の近い非磁性材料同士の分離は

特に困難である。従来の湿式分離や高温処理はエネルギー消費が大きく、脱炭素社会の要請と必ずしも整合しない。このような背景のもと、低エネルギーかつ環境負荷の小さい乾式分離プロセスを確立し、AM 分野および都市鉱山リサイクル分野の双方に適用可能な基盤技術として提示することには、学術的にも社会的にも意義が高い[16, 19]。

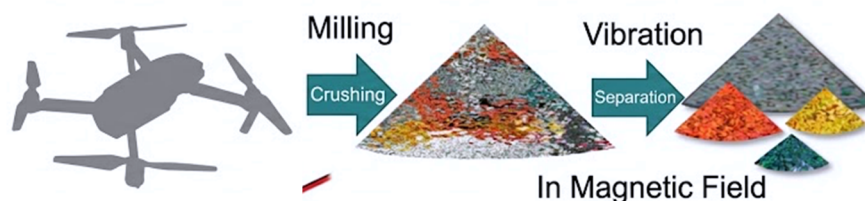


図1 微小・複雑なマルチマテリアル部品からの粉碎および分離による材料回収のコンセプト図

異種粉末の分離技術として、浮選、比重選別、振動分離、磁選などの手法が知られている。浮選や比重選別は液体を介するため粉末の洗浄や乾燥といった工程が必要となり、材料汚染やエネルギー消費の課題がある。溶液を用いない乾式プロセスとして磁選と振動分離に注目した。磁選については従来から知られているが、振動分離は研究者らが考案したプロセスである。粉末粒子を容器に入れて振動させると粒子の性質の差によって分離する現象、特に大きい粒子が上に分離する現象はブラジルナッツ効果として知られている。しかし振動分離に関する既往研究は、粒子サイズが大きく異なる粒子や樹脂と金属など性質の大きく異なる粒子の分離のみが対象であった。研究者らは、PBF で使用する粒子径 100 μm 程度の金属粉末同士でも分離可能であることを見出した。具体的には、Ti-6Al-4V 合金と Cu の混合粉末に種々の条件で振動を与えて分離挙動を調査した。その結果、粒子径が同程度であっても分離が生じることが確認された。しかも密度の大きい銅粒子が上方に偏在した。本研究では、これを銅粒子とステンレス鋼粒子の分離へと適用するとともに、より広い範囲のリサイクル技術へと展開することを発案した。

磁選は粉末の汚染が少なく連続プロセスに適するが、非磁性粉末同士の分離には適さない。しかし、SUS316L 鋼と銅粉末の混合系において 10T 級の強磁場により分離可能であるとの報告があり、磁場利用による乾式分離の可能性が示唆されている。本研究では、汎用ネオジム磁石と振動を組み合わせることで、強磁場を用いない分離プロセスの実現を目指した。実装可能性の高い低コストプロセスへの展開を視野に入れた試みである。

さらに、本研究では AM 用粉末と都市鉱山由来粉末も対象とすることで、分離メカニズムの普遍性を検証しようとした。AM 用粉末は、粒径が 100 μm 程度以下の球状粉末が主体であり、粒形状や粒径分布が比較的制御されている。一方、都市鉱山由来粉末は、スクラップの粉碎によって得られるため粒径や形状、組成が多様である。このように性状の異

なる粉末に共通の分離プロセスの適用性を検討することにより、技術の汎用性と応用範囲を評価する。

以上の背景により本研究では、磁場および振動場を活用した低エネルギー乾式分離プロセスを構築し、金属 AM 用混合粉末および都市鉱山由来混合粉末に対して、材料非限定で適用可能な分離技術の基盤を確立することを目的とする。本研究は、特定の合金系や用途に限定した技術開発ではなく、粉末の磁性、粒径、形状、付着状態といった物理特性に基づく分離メカニズムの一般化を目指し、将来的に多様な金属材料や廃材へ展開可能な基盤技術としての可能性を検討する。

2. 実験方法

2.1 金属 AM 用混合粉末の分離

金属 AM で広く用いられているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L ステンレス鋼（以下 316L 鋼）粉末と銅粉末を対象とした。両粉末を既定の配合比で混合し、ネオジム磁石を磁場源として磁場と振動場を併用した分離実験を実施した[5-7]。磁石は直径 20 mm、高さ 10 mm の円柱形状のものを用いた。なお、磁場強度は磁石表面から 9.5 mm の位置で約 0.12T である。分離実験では、混合粉末層上部に葉包紙で包んだ磁石を接触させ、磁石に付着する粉末と残留粉末に分離した。分離後の粉末中の銅粉末とステンレス粉末の割合は、光学顕微鏡像を用いて行った。具体的には、目視により銅粉末とステンレス粉末を識別できることから、研究者による判定結果を教師データとして用いた。これを、ImageJ 上の機械学習プラグインである Trainable Weka Segmentation (TWS) に学習させ、粉末種の自動判別を行った。なお、銅と 316L 鋼粉末の場合単純な二値化では、金属光沢に起因するハレーションや、ステンレス鋼粒子表面に映り込んだ銅粉末像が誤って銅粒子として判定される問題があった。そこで本研究では、これを研究者が判定した結果を TWS に学習させ、その判定基準を用いる。この手法は、鉄鋼材料の組織におけるマルテンサイト、パーライト、ベイナイトなどの組織の自動判定にも用いられている手法の応用である。熟練者の技能を AI に学習させる手法としても有用である。これにより、各領域の 316L 粉末と銅粉末の割合を求めた。また、316L 粉末の磁性制御を検討するため、フェライト(BCC)相の形成が期待される 400°C で 1 時間保持する熱処理を施した粉末についても同様の分離実験を行った。熱処理前後で粉末の組織と磁性の変化を評価するために、X 線回折(XRD)測定を実施した。さらに、Y 字型に分岐したガラス管とシリコンチューブを接続し、その分岐点の片側にネオジム磁石を配置し、その中に混合粉末を流動させることにより、磁石（以下適宜 Mag と記す）側と反対（以下適宜 Blank と記す）側とに分かれた粉末を回収しその中の 316L 鋼粉末と銅粉末の割合を上述の画像解析により評価した。

2.2 都市鉱山由来粉末（モータ粉砕粉末）の作製とその分離

都市鉱山を模擬した試料として小型電動モータを対象とした。モータは鉄鋼部材および銅線から構成されており、スクラップとして典型的な複合材料系である。モータ試料の粉砕は、以下の手順にて 2 段階で行った。圧縮加工や塑性加工のみではモータ粉砕することが困難であったため、前処理として圧縮変形を施し、モータ内部に存在する空隙を潰すことを目的とした。圧縮にはアムスラー試験機を用い、モータ全体に一軸圧縮変形を付与して扁平にした。さらにそれを樹脂で固定したものをエンドミルカッターにて切削して切削粉とした。その切削粉を、窒化ケイ素内張をもつ容器内に、直径 20 mm 密度は 3.6 g/cm^3 のアルミナボールとともに装填し、遊星型ボールミル（フリッチェ遊星ボールミル）にて、回転速度 300 rpm、ミリング時間最大 10 時間まで粉砕した。

粉砕後の試料について各種分析を行った。粉砕後の混合粉末について、2.1 節に示した金属 AM 用ガスアトマイズ粉の分離と同様に、ネオジム磁石による磁場分離、ならびに容器に取り付けたネオジム磁石による磁場と、分岐経路に磁石を配した分離実験による分離を行った。なお、磁場による力を受ける時間を増すために、経路は垂直ではなく傾斜した板の上に載せた。ただし、流動性が低いため、音響スピーカを用いた板を振動させ流動を促しながら分離実験を行った。回収された粉末中の銅と 316L 鋼の割合を光学顕微鏡観察により評価した。

3. 結果

3.1 金属 AM 用混合粉末の分離挙動

3.1.1 振動分離実験結果

銅粉末と Ti-6Al-4V 合金を用いた研究にて良好な振動分離が生じた条件（振動数 60 Hz, 振幅 100 μm ）にて、316L ステンレス鋼粉末と銅粉末の混合粉末の振動分離を試みたが分離は生じなかった。これは、銅と Ti-6Al-4V 合金の密度差に対して、銅と 316L 鋼の密度差が小さいことに由来すると考えられる。銅、316L ステンレス鋼、Ti-6Al-4V 合金の密度はそれぞれ、 $8,960 \text{ kg/m}^3$ 、 $8,000 \text{ kg/m}^3$ 、 $4,430 \text{ kg/m}^3$ である。銅粉末と Ti-6Al-4V 合金の混合粉末の場合、最大加速度の重力加速度に対する比である無次元加速度 Γ が 0.8 以上にて分離が生じた。特に Γ が 1.0 以上の条件では、重力加速度を上回る加速度での運動が生じ、運動が顕著となる。慣性力と空気抵抗の比から次式にて与えられる動的 Stokes 数 [8]

$$St = \rho_p d^2 \omega / (18\mu)$$

の差により運動に差が生じることに起因する。ここで、 ρ_p は粒子の密度、 d は粒子径、 ω は角速度、 μ は空気の粘性係数である。粒子径が同じである場合、密度の比は動的 Stokes 数の比と等しくなる。銅と Ti-6Al-4V とでは密度比が 2 以上であるのに 316L 鋼とでは密度比が 1.1 程度しかない。そのため振動分離が生じなかったといえる。

3.1.2 磁石への接触実験結果

図2に葉包紙に包んだネオジム磁石による磁場のみでの条件による分離結果を示す。予想に反して、比較的低い磁場強度条件においても、316L 鋼粉末と銅粉末の間に顕著な分離が確認された。比較的低い磁場強度条件においても有効な分離が可能であることが示された。これは、急冷凝固や加工履歴に起因する微弱な磁性の存在が、分離挙動に寄与している可能性を示唆するものである。AM 用粉末の分離実験では、磁石を接触させる方法（方法(i)）において、磁石に付着した粉末中の SUS316L 粉末割合が 96.4%となり、残留粉末中の銅粉末割合が 80.1%に達した。これは、ネオジム磁石による比較的低い磁場でも、SUS316L 粉末に含まれる加工誘起磁性や微弱な磁性が分離挙動に寄与し、銅粉末と分離できることを示している。また、分岐管を用いた方法(ii)では、磁石側に回収された粉末中で SUS316L 鋼粉末が約 90%となり、残りの粉末中で銅粉末が 80%となるなど、連続プロセスへの適用可能性が示唆された。

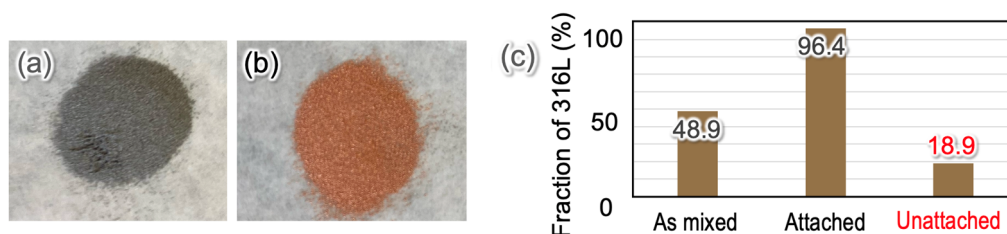


図2 ネオジム磁石により分離した粉末の概観：(a) 磁石に付着した粉末，
(b) 磁石に付着しなかった粉末，ネオジム磁石による分離前後の粉末における
316L ステンレス鋼の割合

この結果に基づき、磁場と振動場を併用することで、密度差の小さい 316L 鋼と銅の混合粉末でも振動により分離できることを期待し振動分離の実験を行った。しかしながら、図3に示すように明瞭な分離は得られなかった。振動数を 10Hz から 500 Hz まで変化させて振動したところ、200Hz までは変化がなく、250Hz (図3(m)) と 300Hz (図3(n)) において粉末の流動が生じた。しかしながら、銅と Ti-6Al-4V の組み合わせでは見られていたような明瞭な分離挙動を確認することができなかった。銅粉末と 316L 鋼の振動分離は実現しなかった。

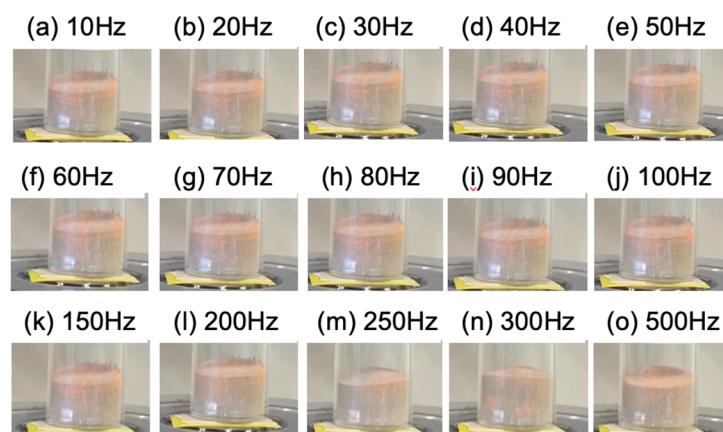


図3 ネオジム磁石を上部に配置した容器における振動実験後の混合粉末
(振幅は全て 100 μ m)

3.1.3 逆 Y 字型分岐路にネオジム磁石を配したデバイスによる分離実験結果

図 4 (a) に示すようなセットアップにて、上部から落下する混合粉末粒子を分離した結果、図 4(b)に示すように、1 段階目で磁石側、2 段階目でも磁石側に流れた粒子においては、89.5%が 316L 鋼粉末、10%が銅粉末と、高い割合で 316L 鋼粉末を得ることができた

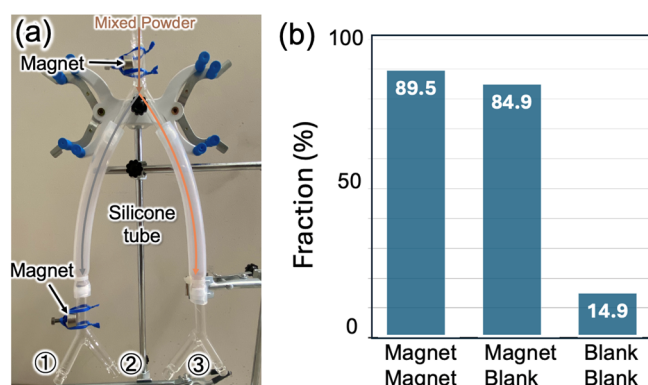


図 4 (a) 逆 Y 字分岐経路型磁気分離実験セットアップと、(b) 分離結果：

- ① 磁石側—磁石側 (Magnet-Magnet), ② 磁石側—反対側 (Magnet-Blank),
③ 反対側 (Blank-Blank)

(図 5(a))。さらに 1 段階目では磁石と反対側に流れたあと 2 段階目で磁石側に流れた粉末 (図 5(b)) においても、316L 粉末が 84.9%、銅粉末が 15%と、やや分離率は低下するものの、316L 鋼粉末の割合が明らかに高くなった。1 段階目、2 段階目ともに磁石と反対側に流れた粉末は、銅粉末が 85%、316L 粉末が 15%と、2 段階目で磁石側に流れた粉末とはほぼ割合が逆転し、高い割合で銅粉末が得られた。このプロセスは、連続プロセスとすることが可能であり、AM 用粉末の再利用プロセスとして有用であるといえる。ただし、実用には、分離率の向上が必要である。そのためには、さらに多段階にしたり、経路の太

さと流量を最適化する、磁力を高めるなどが考えられる。図 4 (b)には、各経路を通過した粉末中の 316L 鋼粉末の割合を示している。1 段階目ではほぼ分離は完了しているようにも思われる。これは、重力加速度により、おそらく 2 段階目では速度が大きく、磁力による引力の効果が薄れているものと思われる。したがって、この方法による分離では粉末の速度の小さい段階で分離する。さらに次項のリサイクル粉末の分離実験にて示すように傾斜させて粉末の移動の速度を低下させることが有効であると考えられる。

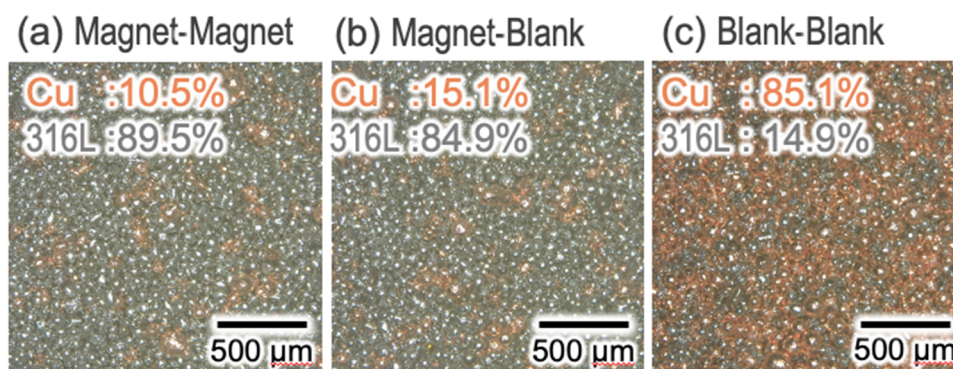


図 5 分岐経路に分離したネオジム磁石による分離前後の粉末の光学顕微鏡像と 316L 鋼の割合

3.2 都市鉱山由来粉末における分離挙動

3.2.1 小型電動モータの粉砕挙動

模型用のモータを圧縮、切削した後ボールミルにかけて得られた試料の写真を図 6 に示す。

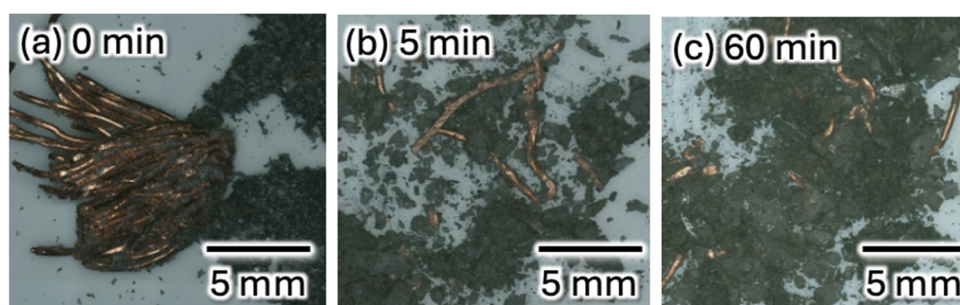


図 6 模型用モータ，圧縮，切削後，遊星ボールミルにより粉砕した粉末の OM 像
(a) ミリング前、(b) 5 min ミリング後、(c) 60 min ミリング後

ボールミル前の状態にて、銅線の固まりが見られたが、その他の材料は 1mm 以下の粒子となっていた。ミリングが進むにつれて、銅線の束がほぐれて、さらに短いセグメントに分断された。

振動分離実験の結果、電動モータ破砕粉に対しては、粉砕工程を適切に制御することで、銅成分が空間的に偏在する傾向が確認された。特に、銅線が鉄鋼成分と比較して粉砕されにくい点が、粒径差に基づく分離を助長する要因として機能した。本研究では実施しなかったが、篩い分けという単純なプロセスで銅の成分とその他の成分を分離できる可能性が見出された。

加えてAM用粉末の混合粉末の分離にて用いたのと同様の連続プロセス磁気デバイスを用いた分離を試みた結果を図7に示す。磁石側—磁石側（Mag-Mag）の経路を経た粒子は黒色の比較的微細な粒子は、銅は極僅かに含まれていた。磁石側—反対側（Mag-Blank）の経路を通った粒子には、より多くの銅線が含まれ、反対側—磁石側（Blank-Mag）の経路を通った粒子にはさらに銅線が多くなり、反対側—反対側（Blank-Blank）の経路を通った粒子では、黒色の粒子は少なく、銅線が支配的となった。また、比較的大きな固まりのままであった外装板と思われる板も含まれていた。ちなみに、10時間の粉砕を行った場合には、これらの銅線も1mm以下の粒子となった。この結果より、適度なミリング時間での粉砕によって、篩い分けと磁気を併用した分離が可能であることが示された。

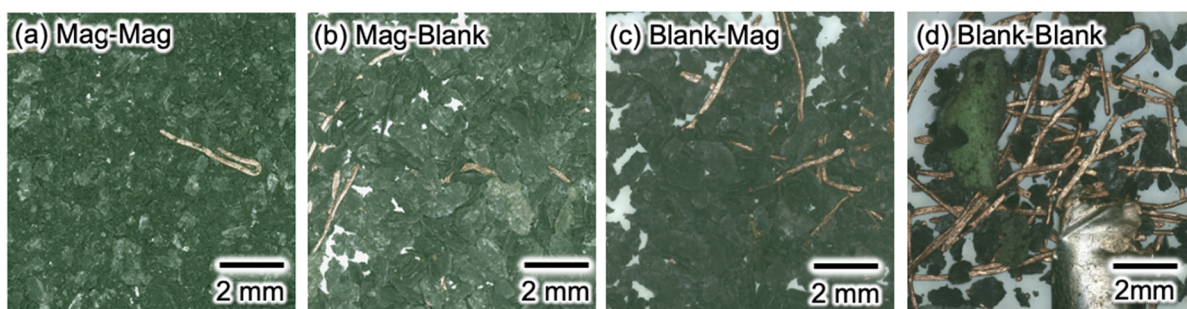


図7 模型用モータ、圧縮、切削後、遊星ボールミルにより1時間粉砕した粉末を、逆Y字分岐経路での磁気分離に供した結果

4. 考察

4.1 316L ステンレス鋼粉末と銅粉末の分離について

本研究では、磁場および振動場を組み合わせ、非磁性金属粉末系の乾式分離を検討した。特に、316L 鋼粉末では加工誘起磁性や熱処理により誘起されるフェライト相が分離挙動に大きく寄与しており、材料の製造履歴や熱履歴が磁気応答に影響を与えている可能性が示された。銅粉末は反磁性材料であり磁場に対して弱い反発を示すため、磁場分離においては磁化の差が駆動力となる。研究者らのPBFにおける凝固組織制御の研究でも示したように[10,11]、316L 鋼は一般にオーステナイト単相で非磁性とされるが、急冷凝固、加工履歴、組成偏析により、弱磁性を示す相が局所的に存在し得る。316L 鋼がネオジム磁石の0.1 T程度の磁力分離[12,13]できた理由について検討する。なお、オーステナイト系ステンレス鋼の磁性については詳細な研究がある[14,15]。図8に、316L 鋼の平衡状態図

を示す。図 8(a)は、縦軸を温度、横軸を Cr 濃度とした断面であり、図 8(b)は、縦軸を各相の体積分率横軸を温度とした一軸状態図である。これらより、高温では 1300～1400℃の温度にてフェライト相が形成されることがわかる。通常の凝固冷却過程においては、 δ 相

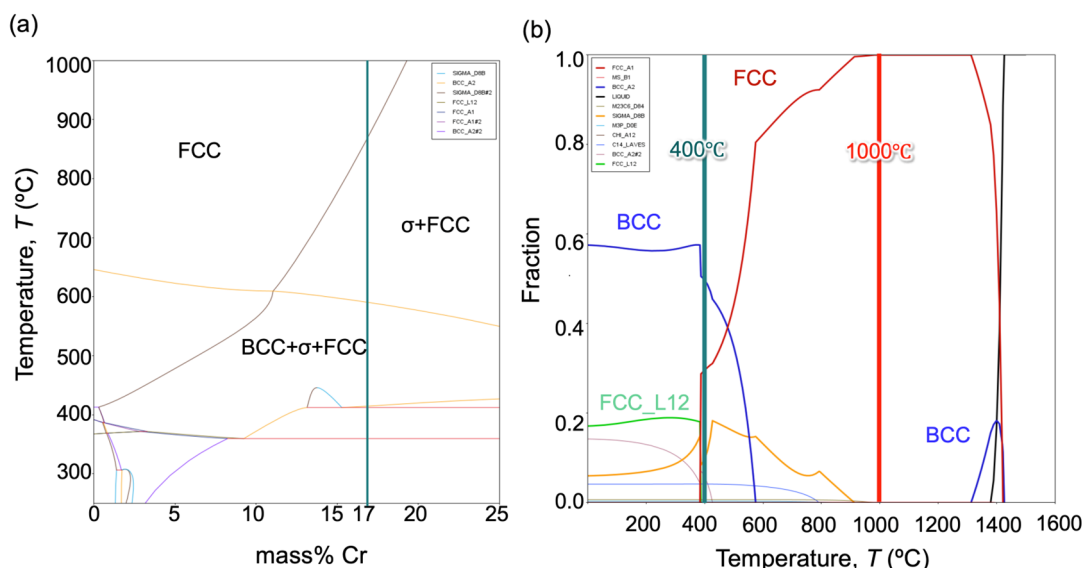


図 8 316L ステンレス鋼の平衡状態図

(a) 縦軸を温度と横軸 Cr 濃度とした断面, (b) 一軸状態図

は FCC 構造をもつ γ -オーステナイト相へと相変態し、平衡凝固では 100%FCC 相となる。316L ステンレス鋼の組成の規格範囲は $C \leq 0.030$ mass%、 $Si \leq 1.00$ mass%、 $Mn \leq 2.00$ mass%、 $P \leq 0.045$ mass%、 $S \leq 0.030$ mass%、 $Ni = 10.00\text{--}14.00$ mass%、 $Cr = 16.00\text{--}18.00$ mass%、 $Mo = 2.00\text{--}3.00$ mass%である。Schaeffler 型状態図に基づけば、組成が $Cr \text{ 当量} / Ni \text{ 当量} \geq 1.48$ (≈ 1.5) である場合、凝固の初期には、 δ 相が形成される。その後オーステナイトになる。有限速度の凝固では凝固偏析が生じ、最終凝固部には低融点の相や脆性相が形成される。オーステナイト相単相となる 1000℃程度の温度に均質化熱処理が施される。ガスアトマイズ粉にフェライト相が存在した理由としては、以下のようなことが考えられる。(i) 急冷凝固により δ 相が凍結される、(ii) オーステナイト相が焼入れられてマルテンサイト変態によりフェライトになる、(iii) 凝固偏析によりフェライト相が安定な組成の部分が形成される。Cu-K α 線 (波長 0.15406 nm) を用いた X 線回折の結果、43.5°で強度が最大となるピーク位置とすることが認められた (図 9)。このピークで最大強度を示すのは、オーステナイト相であると考えられるが、ピークの形状が左右非対象であり、43.4°付近に上向きの凸の肩 (ショルダー) が観測され、オーステナイト相以外の相の存在が示唆された。

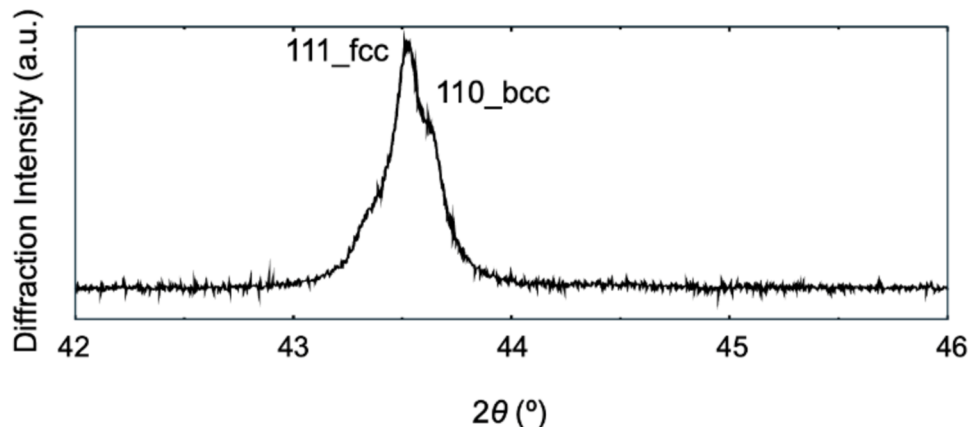


図9 316L ステンレス鋼粉末の X 線回折プロファイル

熱処理により BCC 相の形成を促した 316L 鋼粉末では、磁性の増加に伴い分離効率がさらに向上した。XRD 解析では、400℃熱処理後の 316L 鋼粉末においてオーステナイト相に加えてフェライト相が検出され、これが磁気応答の増大に寄与したと考えられる。

4.2 他の手法との比較

4.2.1 サイクロン分離

サイクロン分離は、金属のガスアトマイズ粉の分離に低コストで堅牢だが、微細粉の分離が難しく、鉄鋼・銅のような非磁性粉末混合物には適用が難しい。サイクロンは構造が単純で可動部がなく、運転・保守コストが低いことから化学工業や環境工学など広く利用されている。高流速における粗粒子の除去には有効であり、装置を大型化せずに流量変動に対応できるため、工業現場で扱いやすいとされている。サイクロンは粒径が 5 μm 以下の微細粒子に対して分離効率が低いことが最大の課題である。また、内部分布には主渦とは異なる二次流れが発生しており、再巻き上げや短絡流が分離効率を低下させることが報告されている。数値流体解析により幾何パラメータを最適化する研究が進んでいるが、微粒子分離に対しては限界がある。

4.2.2 渦電流分離 (Eddy Current Separator)

渦電流分離は、交番磁場によって導電性粒子内部に誘導電流を発生させ、その反発力で非鉄金属を他の物質から分離する技術である。スクラップリサイクル産業では非鉄金属を効率的に回収する主力技術となっており、ベルト駆動型ロータリー・ドラム方式が一般的である。乾式かつ連続式で処理でき、アルミニウムや銅などの非鉄金属を他の非導電性粒子から迅速に分離できる点が長所として挙げられる。電率が低い粒子や粒径が極めて小さい粉末に対しては、誘導される渦電流が弱く分離力が低下する。また、設備コストが比較的高く、主に粗破碎スクラップや大きめの粒子に適用されるため、100 μm 級の微細粉末

分離にはそのまま適用できないことが多い。渦電流分離は非鉄金属を効率的に分離できるが、粒径がある程度大きい導電性粒子向けであり、100 μm 程度の粉末には適用が難しい。ボールミル粉砕+ふるい分けは粒径差を利用して銅を濃縮できるが、過粉砕による回収率低下や、他元素との分離の難しさがある。

5. まとめと今後の展望

本研究では、磁場と振動場を組み合わせた乾式分離技術を用いて、金属 AM 用粉末および都市鉱山由来粉末の分離を試み、その有効性を示した。AM 用粉末においては、SUS316L 鋼粉末と銅粉末の混合系を対象に、比較的低い磁場でも分離が可能であることを示し、熱処理による磁性制御が分離効率向上に寄与することを明らかにした。但し、AM 用粉末のリサイクル性については、異種材料の分離だけではなく、流動性などの粉末の性状[20]にも注意が必要である。

都市鉱山由来粉末においては、粉砕条件や振動の付与が分離挙動に大きな影響を与えることを示し、磁場と振動場の併用が多様な粒径・形状を持つ粉末に対しても有効な分離手法となり得ることを示した。今後は、分離効率の定量化およびモデル化を進め、連続プロセスへのスケールアップを図るとともに、多様な金属組み合わせに適用可能な技術へ展開することが求められる。また、粉末の前処理や分離後の粉末の品質評価を体系化し、実際のリサイクルプロセスへの統合を進めることで、資源循環社会の実現に貢献したい。

謝辞

本研究は公益財団法人 JFE21 世紀財団 技術研究助成の支援によって実施いたしました。ここに記し感謝の意を表します。研究遂行にご協力いただきました皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, 2nd ed., Springer, New York (2015).
- [2] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, J. P. Oliveira, “Current status and perspectives on metal additive manufacturing,” *Materials*, 12 (2019) 1121.
- [3] J. J. Slotwinski, E. J. Garboczi, “Characterization of metal powders used for additive manufacturing,” *JOM*, 119 (2014) 460-493.
- [4] L. E. Cordova, T. Bor, M. de Smit, I. M. Richardson, “Effects of powder reuse on properties of additive manufactured stainless steel,” *Materials*, 13 (2020) 123.
- [5] R. Rosato, K. J. Strandburg, F. Prinz, R. H. Swendsen, “Why the Brazil nuts are on top: Size segregation of particulate matter by shaking,” *Physical Review Letters*,

58 (1987) 1038–1040.

- [6] H. M. Jaeger, S. R. Nagel, R. P. Behringer, “Granular solids, liquids, and gases,” *Reviews of Modern Physics*, 68 (1996) 1259–1273.
- [7] D. L. Huerta, J. C. Ruiz-Suárez, “Vibration-induced granular segregation: A phenomenon driven by air,” *Physical Review Letters*, 92 (2004) 114301.
- [8] M. R. Maxey, J. J. Riley, “Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow,” *Physics of Fluids*, 26 (1983) 883–889.
- [9] Y. Koizumi, M. Okugawa, “Digital twin science of metal powder bed fusion additive manufacturing: A selective review of simulations for integrated computational materials engineering and science,” *ISIJ International*, 62 (11) (2022) 2183–2196.
- [10] Y. Miyata, M. Okugawa, Y. Koizumi, T. Nakano, “Inverse columnar–equiaxed transition (CET) in 304 and 316L stainless steels melted by electron beam for additive manufacturing,” *Crystals*, 11 (8) (2021) 856.
- [11] Y. Liu, M. Okugawa, K. Saito, D. Izumikawa, C. Zhu, Y. Seguchi, Y. Koizumi, “Phase-field modeling of spinodal decomposition in Fe–Cr–Co alloy under continuous temperature-changing conditions,” *ISIJ International*, 63 (2023).
- [12] J. Oberteuffer, “High gradient magnetic separation,” *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-10 (1974) 223–238.
- [13] J. Svoboda, *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2004).
- [14] K. Ishida, T. Nishizawa, “Phase transformations and magnetic behavior in austenitic stainless steels,” *ISIJ International*, 41 (2001) 132–142.
- [15] Y. Tomota, J. W. Morris Jr., “Magnetic properties of austenitic and ferritic steels,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, 17 (1986) 13–19.
- [16] T. Nakamura, K. Halada, “Urban mining and recycling of critical metals,” *Materials Transactions*, 48 (2007) 310–318.
- [17] J. Cullen, M. Allwood, “Mapping the global flow of materials,” *Nature*, 482 (2012) 337–340.
- [18] J. H. Kim, S. H. Lee, “Effect of copper as a tramp element in steel recycling,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44 (2013) 123–131.
- [19] A. Buchert, S. Degreif, “Recycling of complex multi-material products,” *Journal of Cleaner Production*, 64 (2014) 238–248.
- [20] A. A. Martin, S. H. J. Lim, J. R. R. Irvine, “Powder characteristics and flowability for powder bed fusion additive manufacturing,” *Progress in Materials Science*, 120 (2021) 100706.