

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006・2008

課題番号：18560716

研究課題名(和文)

直流ローレンツ力によるメタル内の異相微粒子の分離・合体挙動と粒子近傍の流速の効果

研究課題名(英文)

Separating and agglomerating behavior of micro-particles in molten metal due to DC Lorentz force and the effect of convection around the particle

研究代表者

小塚 敏之(KOZUKA TOSHIYUKI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：60205424

研究成果の概要：

鉄鋼やアルミニウム等の金属材料の製錬・鋳造分野で重要な課題となっている非金属粒子の除去方法として、直流電流と直流磁場の重畳印加による直流ローレンツ力を利用する方法を提案する。本年度まで、単一の非導電性粒子に及ぼす直流ローレンツ力の浮力への寄与を、LeenovとKolinの理論により確認し、続いて2体間の粒子の相互作用とローレンツ力の関係を見いだしていた。さらに、実際の適用の場で問題となる対流の影響を明確にした。得られた知見を以下に示す。

- (1)重力制御効果は単一粒子と同等に現れるものの、ローレンツ力の増加に伴い、非回転力成分の割合が減少した。これは2つの粒子の存在が単一粒子よりも電流の経路に大きな影響を与え、対流が生じたためであると考えられる。
- (2)2つの粒子の間隔が減少すると、非回転力成分の割合が変化し、2つの粒子が相対的に合体あるいは反発することがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,900,000	0	1,900,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	480,000	3,980,000

研究分野：材料プロセッシング，材料電磁プロセッシング

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：材料電磁プロセッシング，介在物除去，ローレンツ力，電磁アルキメデス力，浮力制御，みかけの重力，チャンネル製錬

## 1. 研究開始当初の背景

鉄鋼やアルミニウム等の金属材料の製錬・鋳造分野では、従来から二次精錬炉やタンディッシュ、鋳型内における熔融金属中に含まれる非金属粒子の除去が重要な課題となっている。非金属粒子として、アルミナ、シリカ等の固体あるいは巻き込まれたスラグ細粒子

等の液体、吹き込まれたアルゴン気泡等の気体などが考えられ、それらを除去する方法として、熔融金属との比重差を利用する浮上除去、電気伝導度差を利用する除去法が提案されている。中でも、直流電流と直流磁場の重畳印加による直流ローレンツ力を利用する非金属粒子の混合制御(混合・分離除去の総合

的な制御)は、装置の簡便さや作用させる力のコントロール性の観点からその将来性が注目されている。この磁気アルキメデス力は、対流の発生により作用しないと考えられているが、磁気アルキメデス力は確実に作用しており、対流の作用に隠れて顕に現れないものの、流速場からの粒子の軌跡のずれや、粒子同士の分離や合体挙動に潜在的に重要な影響を与えている。現状では、流動が生じている場合の磁気アルキメデス力の効果についてはほとんど研究されておらず、そもそも、磁気アルキメデス力の定義すら明確になっていない。

## 2. 研究の目的

比較的小さいサイズの粒子を対象として、それに作用する直流ローレンツ力の非回転力成分(ポテンシャル力成分)に及ぼす流動の影響を粒子の種類(固相、液相、気相の区別とその物性値)、サイズ、形状の観点から明らかにする。すなわち、ローレンツ力により流動する系における磁気アルキメデス力の及ぼす領域をある程度明らかにする。一方、粒子の分解や合体挙動に及ぼす磁気アルキメデス力の効果を明確にする。

## 3. 研究の方法

本実験の実験装置の概略を図1に示す。Ga-In合金に電流を流すための電極はCu板を貼り重ねた積層電極であり、容器側面に装着した。容器上部にはローレンツ力による飛散を防ぐため蓋をとりつける。容器の内寸法(幅×高さ×厚さ)は30mm×34mm×20mmである。これは磁場装置の磁場発生部分の直径10cmに収まるように設計した。

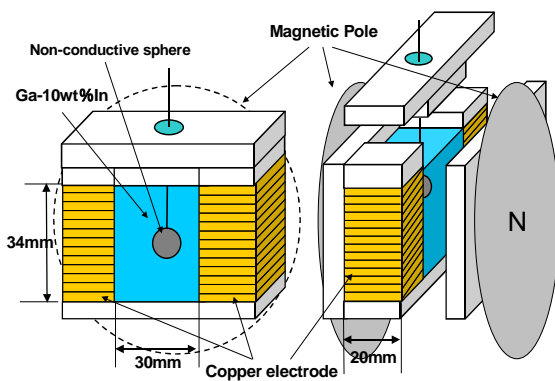


図1 実験装置の概略図

矩形容器は電磁石の磁極間に設置され、印加磁場と印加電流(それぞれ直流)は直交しており、直流ローレンツ力が鉛直下方、あるいは鉛直上方に作用する。溶融合金中の粒子は上部の天秤によりその重量が測定されてお

り、ローレンツ力を印加した状態でその重量の変化を調べた。実験条件を表1に示す。

粒子体積(m <sup>3</sup> )	1.45 × 10 <sup>-7</sup> (Pt) 4.60 × 10 <sup>-8</sup> (Au)							
合金液高 (mm)	34							
磁束密度 (T)	0.13	0.26	0.52	0.74	0.89			
印加電流 (A)	0	4	8	12	16	20	24	30

## 4. 研究成果

鉛直下向きのローレンツ力を印加した結果を図2に示す。

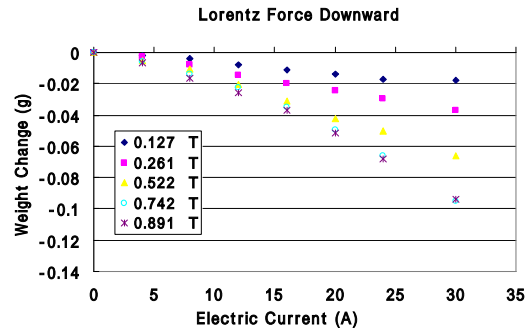


図2 非導電性粒子の重量変化

非導電性粒子は鉛直下向きのローレンツ力が作用しないので、相対的に上向きの力が作用し、天秤の指示値が減少する。これらはほぼ、ローレンツ力に比例し、理論的に与えられる値とほぼ一致している。この測定値と理論値を比較した。その一例を図3に示す。

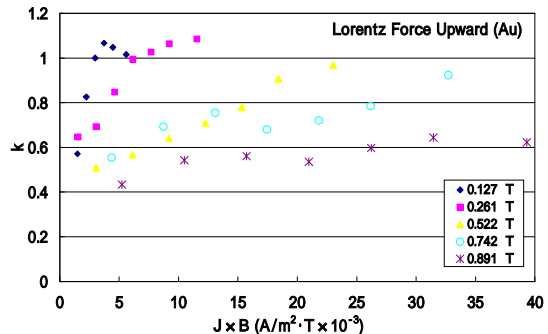


図3 実効値kとローレンツ力の関係

図の横軸はローレンツ力であり、理論的には1になるはずであるが、ほとんどの場合、1を下回っている。これは、対流の影響と考えられ、ローレンツ力は回転力と非回転力の成分で構成されており、対流が大きくなれば、非回転力の成分が小さくなり、効率は低下する。すべての条件で、差はあるものの、ローレンツ力が大きくなることで回転力成分が増大する結果を得ており、それが本質と結論した。対流発生の原因は、磁場装置によって発生する磁束に不均一性と、球形粒子周りで生じた電流の不均一性が挙げられる。前者であれば、電流の増加とともに不均一性が増し、後者であれば逆となる。結果は総じて前者の傾

向を示し、非金属粒子がその回りに不均一性粒子径は十分小さいと考えることができる。一連の結果から、粒子の径とほぼ同等の領域に影響が及ぶと考えられ、2粒子の相互作用、あるいは多体の粒子間での相互作用も粒子系を基準に考えればよいことがわかった。測定結果の一例を図4に示す。

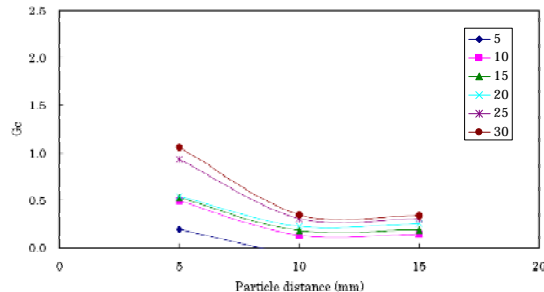


図4 補正係数と粒子感距離の関係

補正係数は電磁力と非回転力の比であり、理論値は0.75である。この場合、対流が発生しており、粒子間距離が10mm以上で一定値になっていることから、この一定値を対流が存在する場合の効率と考えれば、粒子間距離が5mm程度で相互作用が現れていることがわかる。この場合の粒子径は3-4mmであり、前述の結果が検証されたことになる。また、電流が大きくなるに従ってその効果も顕著となっている。一般に、直流磁場には流動抑制機能があるので、高磁場では、対流が抑制されるとも考えられるが、1T未満ではその効果は期待できない。

以上を以下のようにまとめる。

- (1) 重力制御効果は単一粒子と同等に現れるものの、ローレンツ力の増加に伴い、非回転力成分の割合が減少した。これは2つの粒子の存在が単一粒子よりも電流の経路に大きな影響を与え、対流が生じたためであると考えられる。
- (2) 2つの粒子の間隔が減少すると、非回転力成分の割合が変化し、2つの粒子が相対的に合体あるいは反発することがわかった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

小塚敏之、下舞和智、権・孝弘、河原正泰  
Effect of Intense Magnetic Field on Electro-deposited Thin Film of CdTe  
Proc. of Intern. Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing, 査読無, 2008, pp.156-160

小塚敏之、下舞和智、小山準市、河原正泰  
Crystal Orientation in Electro-Deposition Process under Intense Magnetic Field  
Proc. of 4th international congress on HES, 査読有, 2007, 178-181

小塚敏之、下舞和智、河原正泰  
Electro-deposition Phenomena under Intense Magnetic Field  
Proc. of 2nd summer school of EPM, 査読無, 2007, 37-38

小山準市、小塚敏之、河原正泰  
Buoyancy Control of Non-conducting Particles by Imposing DC Lorentz Force  
Proc. of 2nd summer school of EPM, 査読無, 2007, 69-70

小塚敏之、下舞和智、河原正  
An Application of Intense Magnetic Field to the Production of CdTe with Large Grain Size  
Proc. of 3rd Asian Workshop and Summer School of EP, 査読無, 2007, pp.157-159

櫻井翔、小塚敏之、下舞和智  
Influence of Magnetic Field on Copper Electrodeposition  
Proc. of 3rd Asian Workshop and Summer School of EP, 査読無, 2007, pp.215-218

小塚敏之、稲葉栄吉、河原正泰、  
Effect of Fluid Flow on Behavior of Particles in Molten Metal under DC Lorentz Force  
Proc. of the 5<sup>th</sup> International Sympo. on Electromagnetic Processing of Materials 査読有, 2006, pp.424-427

小塚敏之、隅田育伸、下舞和智、河原正泰  
Crystal Control of CdTe Electro-Deposits by Use of Intense Magnetic Field  
Proc. of Sohn International Sympo. on Advanced Processing of Metal and Materials, 査読有, 2006, pp.217-222

[学会発表](計6件)

Kozuka Toshiyuki

Crystal Control of CdTe Electro-Deposits by Use of Intense Magnetic Field

Sohn International Sympo. on Advanced Processing of Metal and Materials , 2006.8.30, San-Diego, US

Kozuka Toshiyuki

Effect of Fluid Flow on Behavior of Particles in Molten Metal under DC Lorentz Force

5th International Sympo. on Electro-magnetic Processing of Materials

2006.10.26, Sendai, Japan

Kozuka Toshiyuki

Crystal Orientation in Electro-Deposition Process under Intense Magnetic Field

4th international congress on HES , 2007.6.20, Padova, Italy

Kozuka Toshiyuki

Electro-deposition Phenomena under Intense Magnetic Field

Proc. of 2nd summer school of EPM, 2007.7.11, Pohang, Korea

Kozuka Toshiyuki

Effect of Intense Magnetic Field on Electro-deposited Thin Film of CdTe

International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing , 2008.10.28, Hannover, Germany

Kozuka Toshiyuki

An Application of Intense Magnetic Field to the Production of CdTe with Large Grain Size

Proc.of 3rd Asian Workshop and Summer School of EPM, 2007.10.13, Shanghai, China

6 . 研究組織

(1)研究代表者

小塚 敏之 (KOZUKA TOSHIYUKI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授 ,  
研究者番号 : 60205424

(2)研究分担者

(3)連携研究者