

平成 27 年 5 月 15 日現在

機関番号：23201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760127

研究課題名(和文) 電磁浮遊液滴内乱流による材料のマイクロスケール構造形成の解明

研究課題名(英文) Study on micro-scale phase separation structures in undercooled alloys using an electromagnetic levitator superimposed with a static magnetic field

研究代表者

杉岡 健一 (Sugioka, Ken-ichi)

富山県立大学・工学部・講師

研究者番号：80438233

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：静磁場印加電磁浮遊法を用いて、高い過冷却状態からの凝固をさせる際に、印加する静磁場強度を変化させると、凝固組織構造が変化することが明らかになった。また、周期加熱法で試料内の流動状態を検討した結果、周期加熱と温度応答の位相差の静磁場依存性が、低磁場域と高磁場域において異なり、遷移域が凝固組織構造の遷移域と一致したため、液滴内の流れの変化が凝固組織構造の変化を引き起こすことが分かった。また、Phase Field法による導体流体中の導体液滴の挙動解析を行うストークス流れを仮定した二次元シミュレーションコードの作成を行い、その計算結果から、静磁場を印加すると、液滴に働く揚力が強くなることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We studied the effect of melt convection on phase separation structures in undercooled alloys by using an electromagnetic levitator with a static magnetic field. It was found that, the static magnetic field changes phase separated structures drastically when the magnetic field exceeded a certain value, i.e., approximately 1.5 T in this study. Moreover, it was speculated from the result of periodic laser heating that the marked change in the phase separation structures at approximately 1.5 T might be due to a convective transition from turbulent flow to laminar flow in the molten sample. We conducted two-dimensional phase field simulation under the Stokes approximation for a droplet in the linear shear flow with a static magnetic field. The numerical results shows that the strong lift force acted on the droplet due to the static magnetic field. It was speculated that the change of the motion of the droplets due to such lift force caused the change of the phase separation structures.

研究分野：流体工学

キーワード：相分離構造形成 混相流 電磁浮遊法

### 1. 研究開始当初の背景

電磁浮遊させた溶融液滴内部の流れ場がプロセスの結果に対して重要となる。例えば、二元系及び三元系溶融合金を電磁浮遊法により浮遊させた液滴に静磁場を印加し、流れを抑制した場合や、溶融液滴を自由落下させる drop tube 法などの様々な無容器急速凝固法により凝固させた場合において、形成する微細組織が異なる(Cao et al., *Scripta Materialia*, 2003; Gao et al., *J. Phys., Conf. Ser.*144, 2009; Luo et al., *J. Appl. Phys.*, 2009)ことが知られている。これらは材料が同じにもかかわらず、液滴内部の流動状態が全く異なるために引き起こされると考えられている。

しかし、マイクロメートルオーダーの材料内構造と流れ場の相関を明らかにし、凝固構造制御法を開発しようにも、現状では材料内構造と流れ場の相関どころか電磁浮遊液滴内の流れ場の詳細すら分かっていない状態である。

電磁浮遊液滴は不透明であることから、液滴内の流れの実験的な解明は困難であり、DNS による解明が有効な方法である。しかし、電磁流体力学的対流(MHD 対流)に対する DNS は平行平板間やダクト内の流れに対しては行われているが、自由表面だけに囲まれた液滴内に対しては行われておらず、電磁浮遊液滴内部の乱流構造の詳細は明らかでない。それにもかかわらず、一般に電磁浮遊液滴内に発生する MHD 対流に対する解析は、十分に発達した乱流と仮定したレイノルズ平均乱流モデル、例えば  $k-\epsilon^2$  方程式モデルによる解析が主であった(Bojarevics & Pericleous (2003), ISIJ International; Hyers (2005), *Meas. Sci. Technol.*)。また、近年開発された静磁場印加電磁浮遊法では、流れを非常に強い静磁場で抑制することもあり、層流を仮定した軸対称定常解析が行われている程度である(Tsukada, Sugioka et al., 2009; Sugioka et al. 2010 等)。

そのため、静磁場印加時の乱流構造の詳細については全く明らかではない。また、凝固現象の時間スケールは非常に短い。そのため、流れ場の時間平均値では凝固後の構造との相関をとることは困難であると思われる、瞬時の速度データが必要であるが、その知見は得られていない。

### 2. 研究の目的

新規な物質創成プロセスの確立には、まず溶融液滴内に発生する流れ場、特に流れの状態、構造を正確に把握することが必要である。そこで、溶融液滴内部の乱流場の詳細を正確に把握し、乱流渦とマイクロメートルオーダーの材料内構造との相関を明らかにすることに取り組む。将来的にはその知見を用い、乱流構造を外力場などにより制御し、利用価値の高い構造を形成可能とすることを目指す。

本申請課題の研究期間では、全体構想の初期段階として、相分離や凝固という材料内構造を司る現象の支配的因子である浮遊液滴内の流れ場の詳細解明を行った。

### 3. 研究の方法

#### (1) 電磁浮遊液滴内の流れ場の三次元直接数値シミュレーション

流れの支配方程式である Navier-Stokes 方程式を直接数値計算法で解析した。付加する外力としては、交流磁場による力の時間平均値と流れと静磁場の作用により発生するローレンツ力を考慮した。ただし、空間解像度や計算負荷の問題から、印加する交流磁場による力を実験の実験値より  $1/9$ ,  $1/25$ ,  $1/100$  とした。

#### (2) せん断流場及び疑似乱流場での Phase field シミュレーションコードの開発

Cahn-Hilliard 方程式と Stokes 近似を適用した二次元的な Navier-Stokes 方程式を解析する数値シミュレーションを行った。自由エネルギーには相分離系のエネルギー関数を与え、初期値は相分離後の液滴を想定し、円形を与えた。

#### (3) 電磁浮遊法を用いた過冷却凝固による凝固組織構造形成実験

静磁場重畳電磁浮遊法により、過冷却凝固を行った。電磁浮遊炉および超電導磁石は超高温熱物性計測システム(PROSPECT)を用いた。試料として、CuCo 合金を用いた。

### 4. 研究成果

CuCo 合金に対して静磁場印加電磁浮遊法による過冷却凝固組織構造形成実験において、静磁場を印加し、流れを変化させると、図1に示すように凝固組織構造が変化することが明らかになった。凝固組織は、およそ 1.5T に置いて、微細な滴状の構造から、粗大な構造に変化することが分かった。

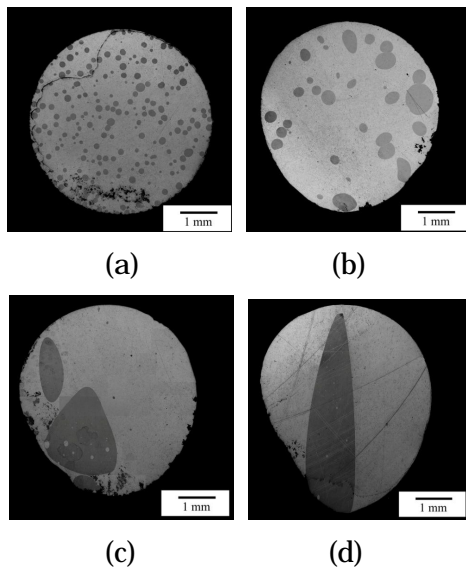


図 1 静磁場印加の際の凝固組織構造  
静磁場印加方向は上から下向き :  
(a)0, (b)1, (c)2, (d)4T

そこで、周期加熱法により、試料内対流の流動状態の把握を行った。図 2 に電磁浮遊液滴の上方界面を周期加熱した際の周期と、周期加熱と加熱に伴う液滴下面の温度変化の位相差を示す。周期加熱と温度応答の位相差の静磁場依存性が、低磁場域と高磁場域において異なることが分かった。そのことから、遷移域に相当する条件に置いて、流動状態が変化したと考えられる。また、その遷移域が凝固組織構造の遷移域と同様におよそ 1.5T であることから、液滴内の流動状態が変化したため、凝固組織構造が変化したと考えられる。

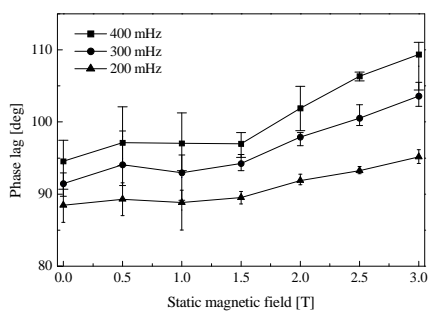


図 2 静磁場強度と周期加熱の温度応答の位相差の関係

また、直接数値計算により、計算された層流と乱流の遷移領域は、流れを発生させる交流磁場により印加されるローレンツ力と流れを抑制する静磁場により印加されるローレンツ力の比で決定されることが分かった。また、実験で得られた交流磁場と静磁場によるローレンツ力の比は、計算で得

られた値とほぼ等しく、計算結果が実験結果を裏付けるものとなった。

Phase Field 法による導体流体中の導体液滴の挙動解析を行うシミュレーションコードの作成を行った。そのシミュレーションにより、静磁場印加時では、静磁場を印加しない場合と単一液滴の挙動が大きく異なり、揚力が強く働くことが分かった。そのため、相分離構造の主要因であると思われる衝突合体挙動が大きく変化するためであると思われる。また、静磁場印加により、図 3 のように液滴の形状が扁平な形状となった。

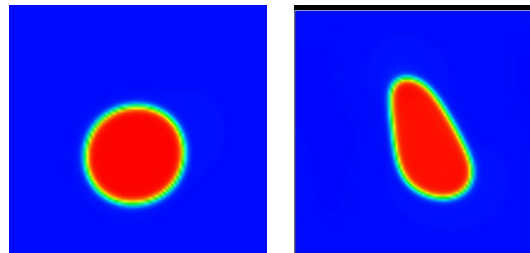


図 3 一様せん断流中の CuCo 液滴への静磁場印加による形状の変化(左:静磁場なし; 右:静磁場を上から下へ印加)

#### 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 1 件)

Ken-ichi Sugioka、Takamitsu Inoue、Tsubasa Kitahara、Ryo Kurosawa、Masaki Kubo、Takao Tsukada、Masahito Uchikoshi、Hiroyuki Fukuyama、Study on the effect of melt convection on phase separation structures in undercooled CuCo alloys using an electromagnetic levitator superimposed with a static magnetic field、査読有、Metallurgical and Materials Transactions B、45-4、2014、1439-1445

〔学会発表〕(計 6 件)

Yuya Baba、Ken-ichi Sugioka、Masaki Kubo、Takao Tsukada、Kazutoshi Sugie、Hidekazu Kobatake、Hiroyuki Fukuyama、Relationship between Applied Static Magnetic Field Strength and Thermal Conductivity Values of Molten Materials Measured Using an EML Technique、化学工学会第 44 回秋季大会、2012 年 9 月 19-21 日

井上 貴充、黒澤 亮、北原 翼、杉岡健一、久保正樹、塚田隆夫、打越 雅仁、福山 博之、静磁場重畳電磁浮遊による CuCo 合金液滴の過冷却凝固組織構造に及ぼす融液内対流の影響の検討、第 12 回宮城化学工学懇話会先端研究発表会、2013 年 3 月 7 日

井上 貴充、黒澤 亮、北原 翼、杉岡健一、久保正樹、塚田隆夫、打越 雅仁、福山 博之、静磁場重畳電磁浮遊 CuCo 合金液滴の過冷却凝固組織構造に及ぼす融液内対流の影響、化

学工学会第 78 年会、2013 年 3 月 17-19 日

北原翼、井上貴充、黒澤亮、杉岡健一、久保正樹、塚田隆夫、打越雅仁、福山博之、CuCo 合金融体の相分離構造に及ぼす融体内対流の影響、第 34 回日本熱物性シンポジウム、2013 年 11 月 20-22 日

杉岡健一、井上 貴充、北原 翼、黒澤 亮、久保 正樹、塚田 隆夫、打越 雅仁、福山 博之、静磁場重畳電磁浮遊技術を利用した CuCo 合金液滴の相分離及び過冷却凝固組織構造に及ぼす融液内対流の影響の検討、資源素材学会平成 26 年度春季大会、2014 年 3 月 26-28 日

北原翼、上野翔也、杉岡健一、久保正樹、塚田隆夫、福山博之、静磁場下での電磁浮遊溶融 CuCo 液滴の過冷却凝固、日本鉄鋼協会第 168 回秋季講演大会、2014 年 9 月 24-26 日

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

杉岡 健一 (SUGIOKA, Kenichi)

富山県立大学・工学部・講師

研究者番号：80438233