

強磁場を利用した凝固プロセスと組織制御

Solidification Processing and Microstructure Control by High Magnetic Field

安田 秀幸
Hideyuki Yasuda
大中 逸雄
Itsuo Onaka

大阪大学 大学院工学研究科
知能・機能創成工学専攻 助教授
同上 教授

1 はじめに

磁場を利用した凝固プロセスは、鋼の連続鋳造における電磁ブレーキや大口径単結晶Siの引き上げにおいて実用化されている。約10年前から普及しはじめた無冷媒型超伝導マグネットは、長時間にわたり比較的大きな室温空間に数T以上の磁場を発生させることが可能であり、これを利用した新しい機能を有する凝固プロセスの開発を目指した研究がなされている。

電磁気力は、非接触で力を作用させる手段の一つであり、凝固プロセスではローレンツ力と磁化力（磁化と磁場の相互作用）のいずれも利用できる。特に強磁場環境では、強力な流動抑制、ミクロスケールの流動抑制、磁気異方性も含めた磁化力の作用が可能になり、凝固プロセスに新しい機能を付加させることが期待されている。本特集で紹介されている他のプロセスと同様に凝固プロセスにおける強磁場の利用には興味を持たれる。

2 流動の抑制と組織制御

強磁場による流動制御の効果を感覚的に説明すると、無磁場中の金属溶湯を水に喩えると10T中の溶湯は水飴である。強磁場では非常に大きな制動力がマクロな領域で作用するため、結晶成長時の拡散律速の実現¹⁾や包晶合金系で本質的な成長モードが顕在化する現象²⁾が報告されている。

一方、微小な領域では通過する磁束も少なく、ローレンツ力は相対的に低下するため、磁場の効果は期待できなかった。しかし、磁場強度の増加はミクロな領域の流動制御も可能にすると期待される。例えば、介在物の浮上や偏析などに関連する導電性流体中の微小球の浮上・沈降と磁場の関係について極限の条件ではあるが解析的に調べられている³⁾。浮上速度はハルトマン数 Ha ($Ba\sqrt{\sigma/\eta}$ 、 B ：磁束密度、 a ：粒径、 σ ：電気伝導率、 η ：粘性) の関数で表される。

$$U \equiv \begin{cases} U_0 \frac{1}{1 + \frac{3}{8} Ha} & (Ha < 1) \\ U_0 \frac{3}{Ha} & (Ha > 1) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 U_0 はストークス則から求められる無磁場における浮上速度である。浮上速度 U に及ぼす磁場効果は Ha 数が大きい領域で顕著である。 Ha 数は磁束密度と粒径の積に比例するので、磁束密度を増加させることができれば微細な粒子でも磁場の効果が期待される。

2液相分離する偏晶系合金では、冷却過程で分離した液滴が分散した状態が形成され、密度差により液滴は合体しながら浮上あるいは沈降する。その結果、重力偏析と呼ばれる鉛直方向の濃度差が生じ、均一な凝固組織形成は一般的に困難である。図1はCu-70.0at%Pb偏晶合金の凝固組織(0Tと10T)である⁴⁾。0Tの場合には、冷却過程でPb-rich液相中に生じたCu-rich液滴(白い相)が上部に偏析する。さらに、Cu液滴は粗大になっている。10Tの直流磁場を印加した場合には、Cu液滴の浮上や合体はローレンツ力により抑制され、微細なCu相が均一に分散した組織が形成される。

図2はAl-10at%In過偏晶合金の一方向凝固組織(成長方向に垂直な断面)である。磁場を印加していない場合、液相から生じるIn-rich液滴はAl凝固界面でプッシングされたり合体したりする。そのため、粗大なIn液滴が分散した不均

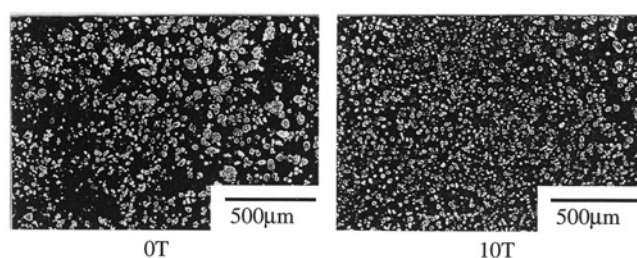


図1 Cu-70.0at%Pb偏晶合金の凝固組織に対する磁場の影響 (冷却速度10K/s)

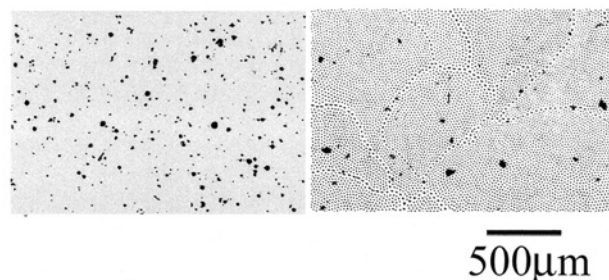


図2 Al-10at%In合金の一方向凝固組織に対する磁場の影響 (成長方向に垂直な断面、成長速度2.7 μm/s)
左：0T 右：10T

一な組織になる。一方、10Tの磁場を印加するとローレンツ力によりIn-rich液相の凝固界面付近での移動は困難になる。その結果、In-rich液相は固相のように振る舞い、共晶組織で見られる規則的なロッド組織が形成される。このように、数T以上の磁場印加は、数 μm から数十 μm オーダーの流動現象の抑制にも効果があり、微細組織制御にも応用できる可能性がある。

3 磁気異方性を利用した組織制御

強磁場を利用できるようになり、磁化力を利用した凝固プロセスの応用範囲は拡大されている。例えば、酸化物超伝導体の磁化率の異方性を利用して、磁場中凝固プロセスにより結晶配向組織を得ることが可能なことが示された⁵⁾。凝固過程で結晶配向組織を形成できることが示された意義は大きいと考えられる。

凝固過程で磁気的な異方性を利用して配向組織が形成されるためには、半熔融状態の制御が重要である⁶⁾。BiMn化合物は2回の包晶反応により生成する。包晶反応で初晶Mn上に晶出したBiMn化合物は自由に回転できず、配向組織が形成されない。一方、図3のような急冷凝固により作製した微細な初晶MnとBi/BiMnの共晶組織をBiの融点以上で包晶温度以下に加熱すると、BiおよびBi/BiMn界面で溶解が起こり、BiMn化合物が融液中に分散した状態が形成される。この状態で磁場が印加されていると、結晶磁気異方性により結晶方位が配向する。さらに、配向を保ったままBiMn化合物が成長するため、化学量論組成においても配向組織が形成される。

固相状態で磁気効果を顕在化させる上でも、凝固プロセスが重要な役割を担っている場合がある⁷⁾。Bi-20at%Mn合金を急冷凝固すると、1 μm 程度のBiMnが微細に分散した組織が形成される。この組織を磁場中で粗大化させると、磁気的エネルギーが有利な結晶粒が優先的に成長し、結果的に配向組織が得られている。図4は磁場中粗大化したBi-20at%Mnの磁化曲線である。磁化曲線に異方性が生じてお

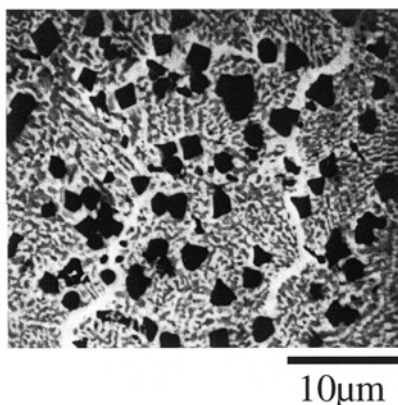


図3 Bi-50at%Mn合金の急冷凝固組織（黒：Mn、灰：BiMn、白：Bi）包晶温度以下の加熱でBiが溶解し、BiMnが融液中に孤立する状態が実現される。

り、粗大化過程でBiMn化合物が結晶配向したことを示している。

4 複合した磁場環境の利用

直流磁場を印加するだけでなく、他の要素を組み合わせることにより機能的なプロセスが開発できる可能性も示されている。直流強磁場と交流電流を組み合わせた磁気音波を用いた凝固組織の微細化が報告されている⁸⁾。この手法による微細化の模式図を図5に示す⁸⁾。直流強磁場は、局所的に通電された交流電流とのローレンツ力の発生だけでなく、溶湯全体へ効率的に疎密波を伝播させることにも寄与している。このような疎密波の金属溶湯中の伝播は凝固組織の微細化だけでなく、反応速度の向上など材料プロセスにとって魅力的な効果を有している。

また、直流強磁場と交流磁場を重ねた電磁浮遊法が提案されている¹⁰⁾。通常の交流磁場のみの電磁浮遊では液滴内に強い対流が生じ重心位置も変動する。直流強磁場を数T以上印加すると、浮遊液滴内の流動は抑制され、剛体球の回転運動に近い状態で液滴が保持できることが明らかになっている。過冷却凝固、物性測定、介在物の分離や他のプロセスへの応用が提案されている。

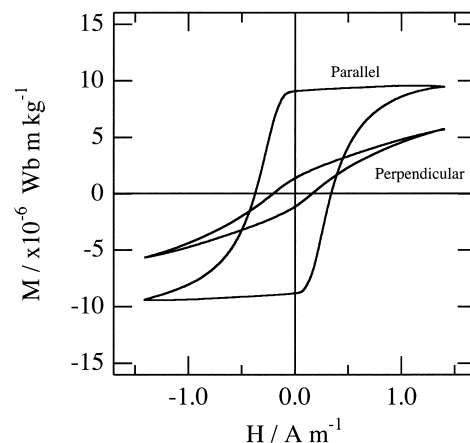


図4 急冷凝固Bi-20at%Mn合金を10Tの磁場中で240℃48h粗大化した試料の磁化曲線

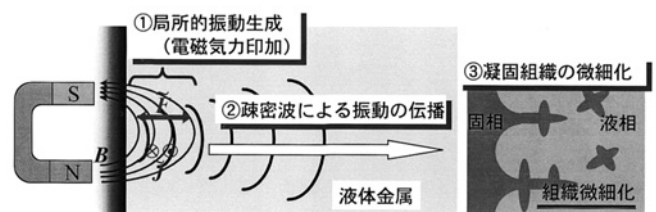


図5 電磁力による疎密波の発生と凝固組織微細化⁹⁾

5 まとめ

導電性流体である金属材料の凝固プロセスでは、ローレンツ力、磁化力のいずれもの利用が可能であり、その効果を顕在化させるために強磁場は有効である。また、磁場を顕在させるためには、初期組織を制御することも重要であり、この面を活用した凝固プロセスの応用も考えられる。また、ここでは紹介できなかったが、磁気力を利用した非磁性物質の無容器プロセスや強磁場を利用した分離・除去も凝固プロセスの機能を高めることが期待されており、興味ある研究課題である。

参考文献

- 1) V.H. Matthesen, M.J. Wargo, S. Motakef, D.J. Carlson J.S. Nakos, W.F. Witt and J. Cryst : Growth, 85 (1987), 557.
- 2) H. Yasuda, K.Tokieda and I. Ohnaka : Mater. Trans., 41 (2000), 1005.
- 3) W. Chester and J. Fluid : Mech., 3 (1957) 3., 10 (1961), 459.
- 4) H.Yasuda, I.Ohnaka, O.Kawakami, K.Ueno and K.Kishio : submitted to ISIJ Int.
- 5) P. de Rango, et al., Nature, 349 (1991), 770.
- 6) H.Yasuda, I.Ohnaka, K.Simamura, T.Fukuda and K.Watanabe : Proc. 3 rd Symp. on EPM, ISIJ, Nagoya, (2000), 647.
- 7) H. Yasuda, Y.Yamamoto, I.Ohnaka and K.Kishio : Proc. 4th Symp. Magneto- Science, Tsukuba, (2000), 106.
- 8) 岩井一彦, 浅井滋生 : 精錬・凝固プロセスの高効率化への革新的技術提案, 日本鉄鋼協会 No.9650, (2002), 27.
- 9) 岩井一彦 : 私信
- 10) 安田秀幸, 大中逸雄, 二宮裕樹, 石井倫太郎, 岸尾光二 : CAMP- ISIJ, 15 (2002), 807.

(2002年12月11日受付)