

# 電磁場を利用した凝固組織制御

岩井 一彦\*

## 1. はじめに

磁場は、静磁場、交流磁場、移動磁場などに分類される。これらの磁場を液体金属などの媒質に印加すると、応力、発熱が生じる。これらの大きさ、分布状態は、磁場の強度、周波数等の空間的、時間的分布ばかりではなく、媒質の形状、サイズや、電気伝導度、透磁率などの物性値より決定される。従って、応力、発熱を制動、流動、昇温などとして工業的に利用するためには目的に相応しい磁場を選択することが必須である。例えば、鋼の連続铸造では、静磁場、移動磁場等が適宜利用されている。また、連铸プロセスにおける溶鋼

通電技術も開発されつつある<sup>(1)</sup>。通電や磁場を工業的に利用可能な環境が整いつつある一方、これらの凝固プロセスへの適用、特に電流と磁場との重畳印加による凝固組織制御は C. Vivès<sup>(2)</sup>や A. Radjai, K. Miwa<sup>(3)</sup>等により多くの研究がなされてきている。ここでは、電流と磁場との重畳印加を中心に著者が行ってきた凝固組織制御について紹介する。

## 2. いつ、どこで、微細化は起きる？

静磁場と交流電流とを Sn-10 mass%Pb 合金に重畳印加しつつ凝固させた試料の組織写真を図1に示す。通電していない試料((a), (b))は微細化されておらず、ミクロ的にはデン

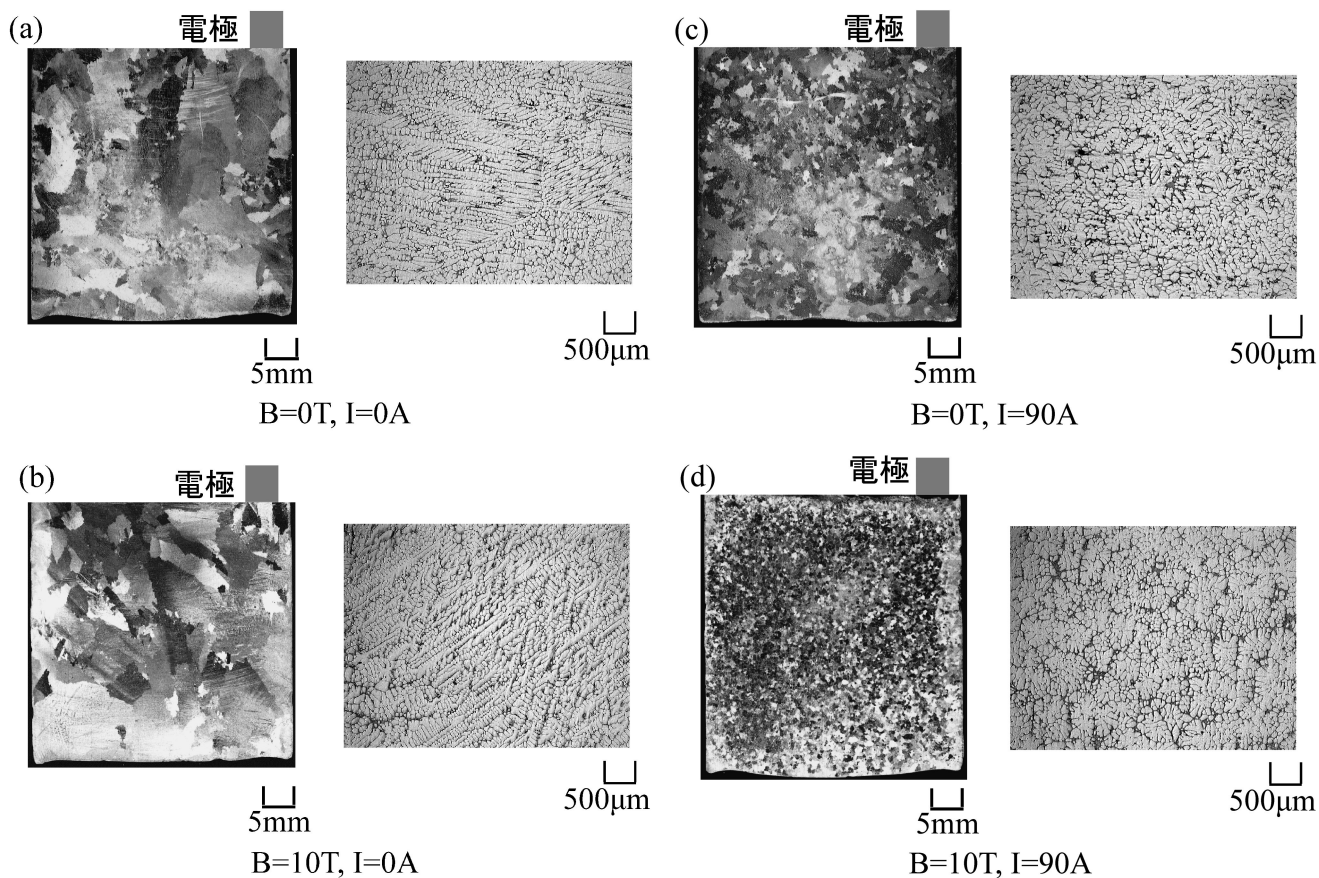


図1 磁場、電流の有無によるマクロおよびミクロ組織の違い<sup>(4)</sup>。

\* 北海道大学教授；大学院工学研究院(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)  
Solidified Structure Control Using Electromagnetic Fields; Iwai Kazuhiko(Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo)  
Keywords: solidification, magnetic field, electrical current, vibration  
2014年5月30日受理[doi:10.2320/materia.53.450]

ドライトを呈している。一方、交流電流通電、あるいは電流と磁場との重畳印加試料((c), (d))は微細化されている。すなわち電磁的に与えた振動は凝固組織に影響を及ぼすことが分かる。

溶融した試料(Sn-10 mass%Pb 合金)を入れた矩形容器の左側面と右側面に温度差をつけた状態で冷却するとき静磁場を印加すれば、対流が抑制されるので温度差が維持される(図2)<sup>(5)</sup>。試料の一部が液相線(219°C)以下の215°C以下になったときに通電を開始すると、磁場強度が1 Tのときには試料内の温度差が減少するとともに引き続き温度低下してゆくことから、対流は誘起されるものの核生成は誘起されないことが分かる。一方、磁場強度が5 Tと強ければ通電開始直後に温度低下が止まることから、核生成が誘起されるこ

とが分かる。従って、微細化の機構は印加電磁場の強度により異なる。

微細化が行われる箇所を特定するために、先ほどの容器に金網を入れて凝固実験を行ったときの組織を図3に示す<sup>(5)</sup>。金網を境界として、電極を含む領域と電極を含まない領域との組織の違いが一目瞭然である。ここで示した結果は、電極を低温側側面の近傍に挿入した結果であるが、電極挿入位置を高温側にしても、電極を含まない領域は dendrite であることから、微細化は電極近傍で行われることがわかった。上述の振動印加による流動誘起と併せて考えると、微細化された固相粒子が電極から遠く離れた領域まで対流によって運ばれることが理解できる。

電磁振動の印加時期が Sn-10 mass%Pb 合金の微細化に与

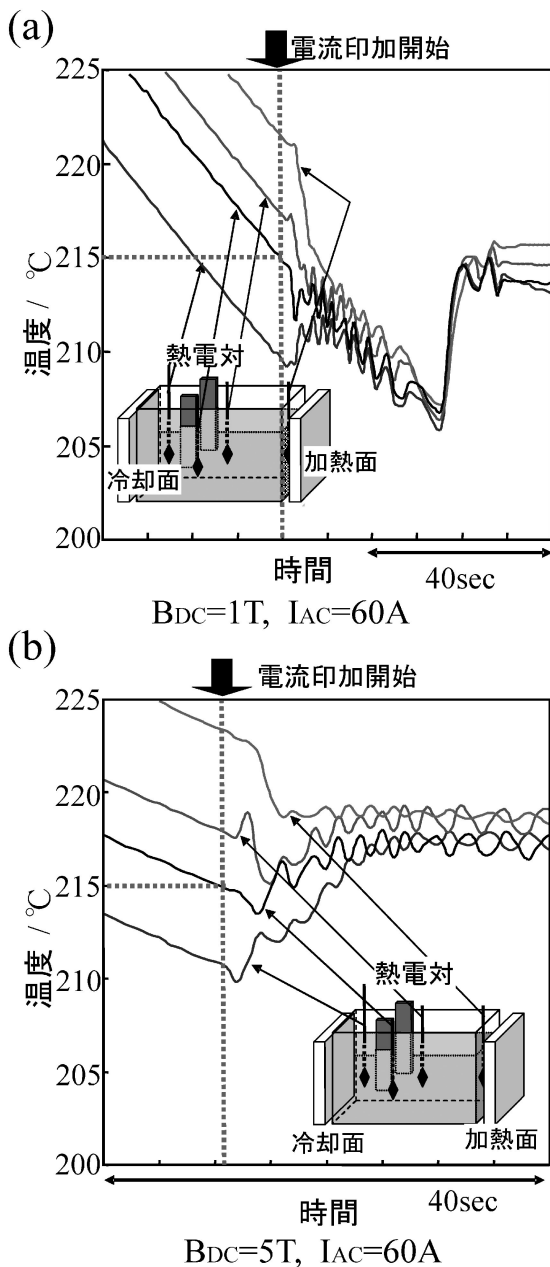


図2 過冷試料に電磁場印加したときの温度変化<sup>(5)</sup>。

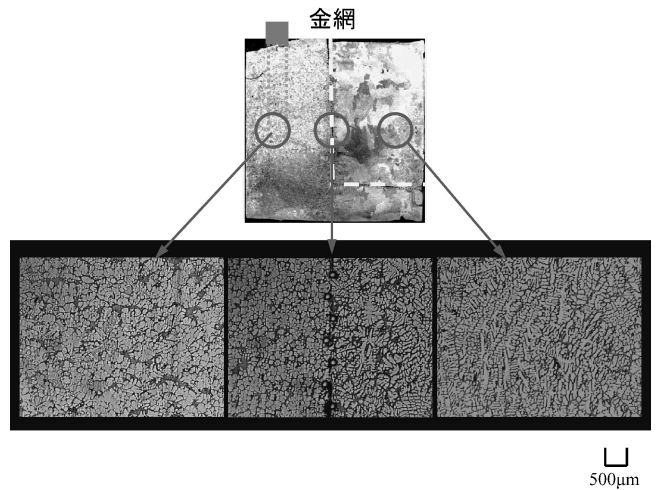


図3 金網を入れた容器で、電流と磁場とを重畳印加した試料のマイクロ組織<sup>(5)</sup>。

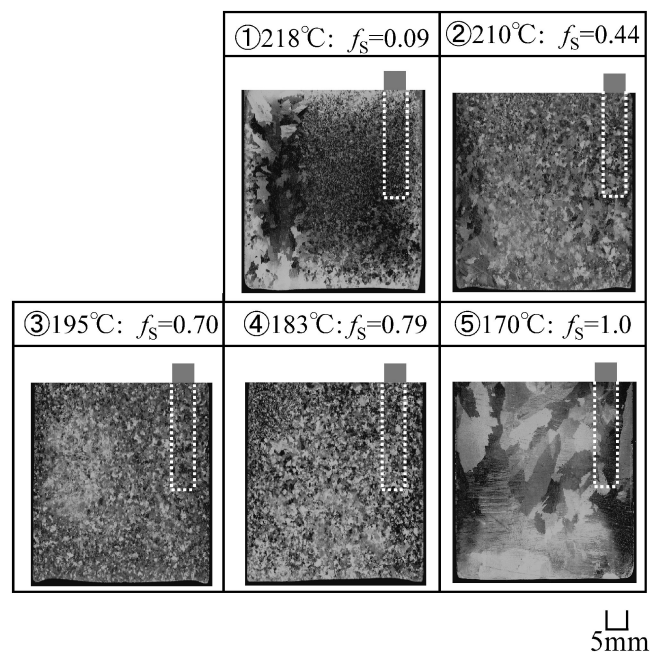


図4 通電時期がマクロ組織に与える影響<sup>(6)</sup>。

える効果を調査した結果を図4に示す<sup>(6)</sup>。図中の①から⑤は試料番号を表している。いずれの試料に対しても磁場は常に印加されており、かつ試料⑤以外の通電開始温度は液相線より高温の250℃である。試料⑤はリカレッセンス終了後から通電を開始し、凝固が完全に終了した170℃で通電を終了した。図中には通電終了時の固相率が示してある。試料①から④の組織は大部分が微細化されているものの、リカレッセンス終了後から通電開始した試料⑤は微細化されていない。従って、凝固初期に微細化されることが分かる。

### 3. 使い方は？

#### (1) 通電による微細化

凝固初期の電磁場印加で微細化可能であることから、溶解るつばから鋳型へ鋳込む流路で通電したときの組織変化を調査した。鋳造用Al合金であるAC4C合金のマクロ組織をみると、ポロシティは通電により減少することが見て取れる(図5<sup>(7)</sup>)。また、全ての領域ではないものの、デンドライトが粒状化している(図6<sup>(7)</sup>)。

#### (2) 金属間化合物の分断

Mg-Si 過共晶合金を凝固させたときに晶出する長く伸びた初晶  $Mg_2Si$ (図7(a)<sup>(8)</sup>)は機械特性低下の原因となる。そこで、交流電流を通電しながら凝固させたところ、初晶形態が大きく変化し、長く伸びた  $Mg_2Si$  が消失した(図7(b)<sup>(8)</sup>)。通電凝固は合金ばかりではなく金属間化合物の形態改質にも適用可能である。

#### (3) 結晶配向

強磁場は結晶配向機能を有する。そこで、第一段階として凝固の初期に電流と磁場との重畳印加により結晶を増殖させる。次に、通電を中止して静磁場のみを印加し続けると、結

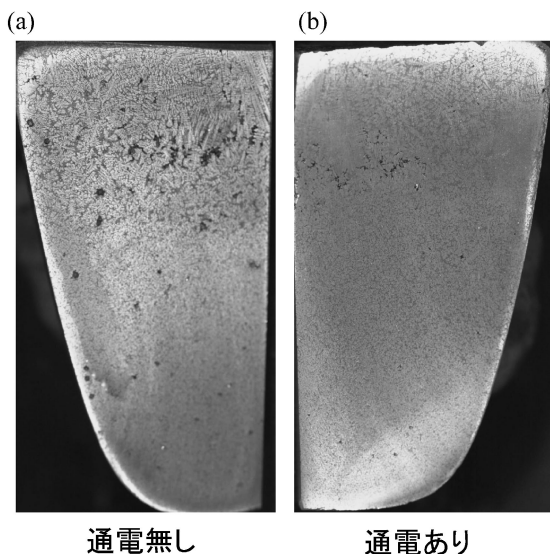


図5 流路内通電の有無による、アルミ合金マクロ組織の違い<sup>(7)</sup>。

晶に磁気異方性があれば液相内で磁気エネルギーを減少させる向きに回転する。従って、結晶軸あるいは結晶面がある特定の向きに揃った多結晶体を作製可能である。Sn-10 mass%Pb 合金の結晶配向の程度をXRDにより評価した結果を図8に示す<sup>(9)</sup>。図中の主なピークは初晶Snによるものであり、それぞれ指数を示してある。Sample Iは磁場を印加せず、凝固の最初から最後まで通電した試料、Samples II, III, IVは凝固開始から終了まで磁場印加しつつ、液相状態で通電開始した試料であり、通電終了時期が異なる。Sample IIはリカレッセンスによる温度回復から10秒後に通電を終了、Sample IIIは40秒後に通電を終了、Sample IVは凝固終了まで通電し続けた試料である。磁場を印加しなかったSample Iの第一ピークは(101)であるものの、Samples II, III, IVのいずれも磁気エネルギーの観点から安定である(200)が第一ピークとなっている。また、凝固初期に通電を止めることで、結晶配向の度合いが向上する。この方法を使

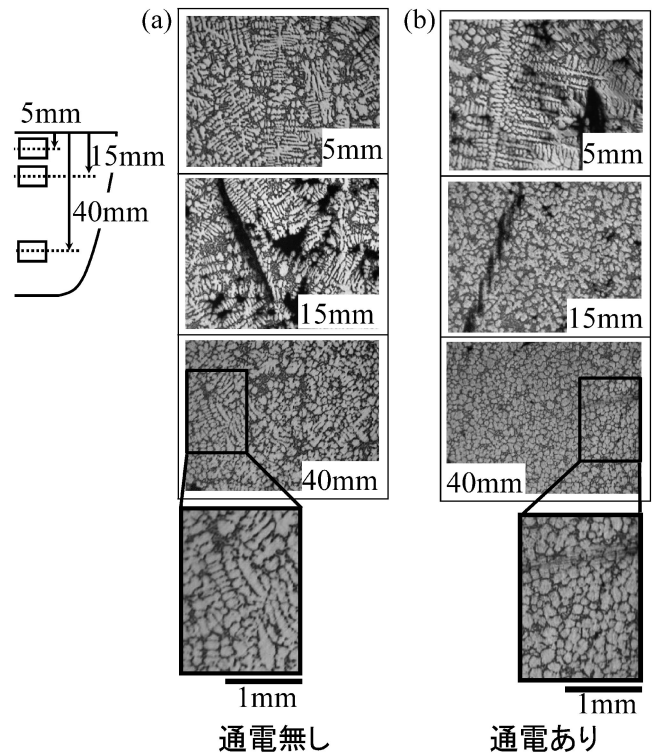


図6 流路内通電の有無による、アルミ合金のマイクロ組織の違い<sup>(7)</sup>。

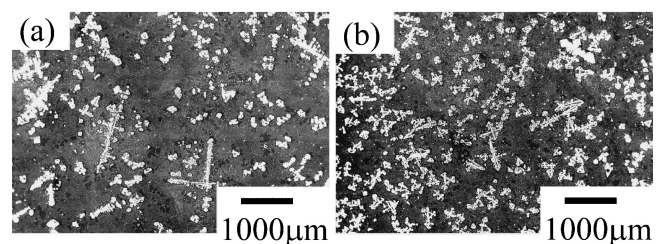


図7 過共晶Mg-Si合金のマイクロ組織。(a) 通電無し (b) 通電あり(770-740℃)<sup>(8)</sup>。

