

電磁振動力を利用した新しい金属組織微細化技術

New microstructural refinement process of metallic materials by electromagnetic vibrations

基礎素材研究部門

Research Institute of Structural and Engineering Materials

概要

凝固中の金属材料に、交流電場と直流磁場を同時に加えることにより電磁振動力を与えて、金属材料中にマイクロエクスプロージョン(気泡の破裂現象)を発生させ、その時に生じる衝撃的な圧力の作用により、液体中で成長中の金属結晶を微細に破碎分散させる全く新しい金属組織微細化技術を開発した。

本技術は、アルミニウム、マグネシウム等の軽量金属材料から鉄系金属材料まで応用可能である。

Abstract

Electromagnetic vibrations are induced in metallic materials during solidification by simultaneous application of alternating electric and stationary magnetic fields. Cavities form and collapse on the surface of solid crystals by application of electromagnetic vibration and then a huge pressure is exerted on the surroundings when they collapse. This pressure may result into the refinement of solid crystals. This mechanism has been applied to aluminum alloys, magnesium alloys and cast irons during solidification. It has been clarified that primary solid crystals are extensively refined.

1. 新プロセスの原理

溶融金属に交流電場(電流密度 J 、周波数 f)と直流磁場(磁束密度 B)を同時に加えることによって、[図1](#)に示すように、液体中に交流電流の周波数と同じ周波数で振動する力(ローレンツ力 F)が発生する。この振動力により液体中に気泡(キャビテーション)が発生する。気泡が一定の大きさに成長すると気泡内外の圧力のバランスの崩れによってつぶれ、この時周囲の凝固しつつある固体に衝撃的な圧力を与えることにより、金属結晶を微細に破碎分散することが

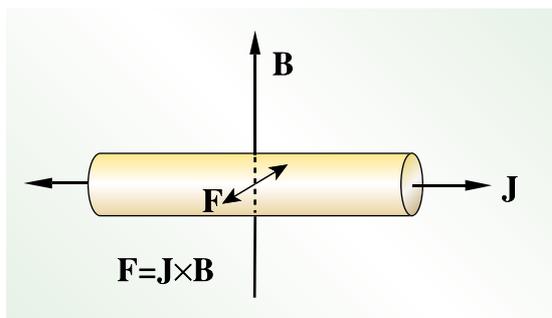


図1 交流電場と直流磁場からなる電磁振動力

可能となる。この現象はあたかも微小な爆発現象に似ているのでマイクロエクスプロージョンと呼んでいる。

実際には[図2](#)に示す実験装置で行われる。電磁石の両極間に、金属試料を容器に入れて電磁石に振動が伝わらないように固定する。試料には両端に電極を取付け、所定の周波数(～50kHz)の交流電流(～150A)を通電すると同時に直流磁場(～10テスラ)をかける。この時、あらかじめ溶解しておいた試料の温度を下げることで凝固を開始させる。試料には紙面に垂直な方向に振動力が発生し、マイクロエクスプロージョンが凝固中の金属試料中でおきる。なお、1.4テスラ以上の磁場に対しては、超電導磁石を用いる。

2. 金属組織微細化

2.1 アルミニウム合金

自動車の部品などに使用されるAl-17%Si合金に適用した例¹⁾を[図3](#)に示す。710℃まで加熱して溶解し、未溶解の初晶シリコン粒子を含んだ熔融状態で電磁振動を開始し、凝固が開始する直前(643℃)まで

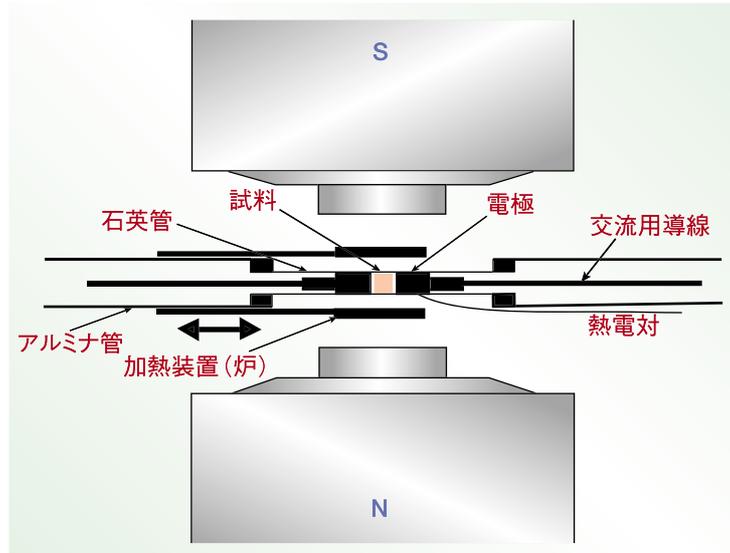


図2 実験装置

振動を加え、加えた時間の影響を調べた。電磁振動条件は、1.4テスラの磁場中に50Hzで $3 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ の電流を流すことによって、溶融金属に $2.0 \times 10^4 \text{ Pa}$ の電磁圧が加えられている。電磁振動を加えない状態での凝固の進行による温度低下に伴うシリコン粒子の大きさ、量の変化はほとんど無視できる。その結果、電磁振動を加えると同時に初晶シリコン粒子は微細化し、数が増加した。また、時間の増加と共に微細化が顕著に進行することがわかった。

図中の矢印で示した部分を詳細に観察すると、図4に示すように、気泡と思われる部分の内部にあるシリコン粒子が非常に微細な粒子になった。これは気泡の破裂によって初晶シリコンが微細に破碎されている瞬間を急冷によって捕らえたことを示している。

同じく種々の商用アルミニウム合金のベースになっているAl-7%Si合金に適用した例²⁾を図5に示す。この場合には、初晶シリコン粒子より大きな電磁振動力が必要であり、10テスラの磁場中に60Hzで $4.25 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ までの電流を流した。電磁振動力を増加することにより、粗大な柱状デンドライト(樹枝状晶)組織が等軸デンドライト組織となり、さらに粒状の粒子となることがわかった。

次にこの合金に対して、磁場を10テスラ、電流を $2.14 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ と一定にし、周波数を10Hz~50kHzまで変化させて電磁振動力を加えたところ、図6に示すように、微細化が顕著におきる最適の周波数帯域のあることがわかった。この場合では、1~1.5kHzで最も微細化し、それよりも小さくても大きくても等軸デンドライトにはなるが、微細化はあまり進まない

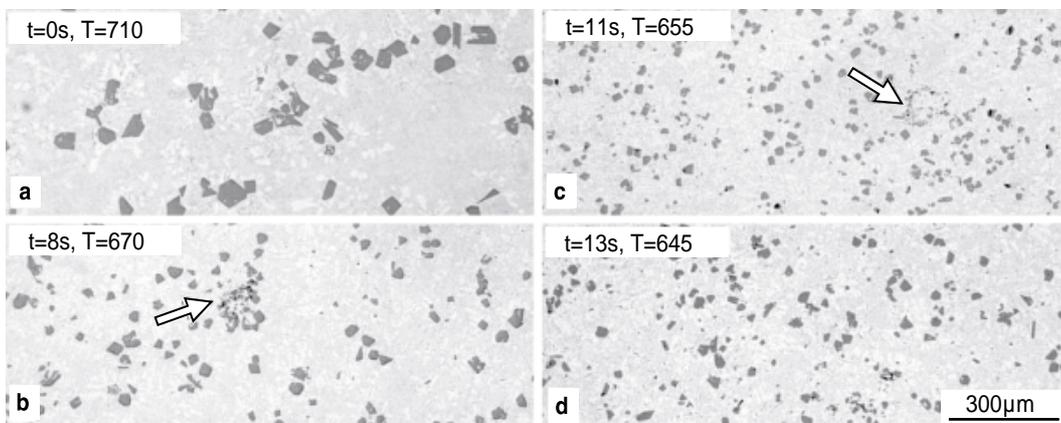


図3 Al-17%Si合金のマイクロ組織に及ぼす電磁振動($B=1.4 \text{ T}$, $J=3.0 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, $f=60 \text{ Hz}$)の影響(t:振動印加時間、T:急冷温度)

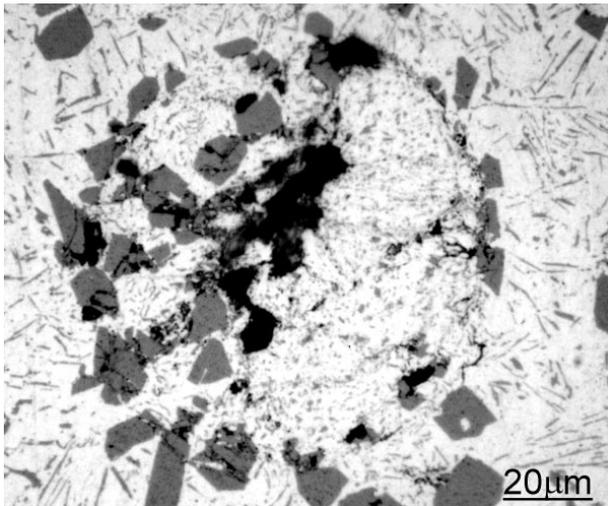


図4 キャビテーション現象による初晶シリコン粒子の微細化の瞬間

かった。また、この場合も初晶シリコンと同様、図7に示すような気泡の破裂の瞬間を示す組織が多数観察され、デンドライトが気泡破裂時の圧力により変形すると共に微細化していくことがわかった。

この他に、実用マグネシウム合金であるAZ91合金についてもAl-Si合金と同様に電磁振動力を加え、周波数の影響を調べたところ、電磁振動力の増加と共にデンドライト組織は微細化し、さらに周波数を最適化することにより、顕著な微細化が達成された。マグネシウム合金もアルミニウム合金と同様に気泡の破裂現象で微細化が説明できた。

2.2 鉄系合金

鉄系合金の例として鑄鉄に電磁振動力を適用したところ³⁾、アルミニウム合金やマグネシウム合金と同

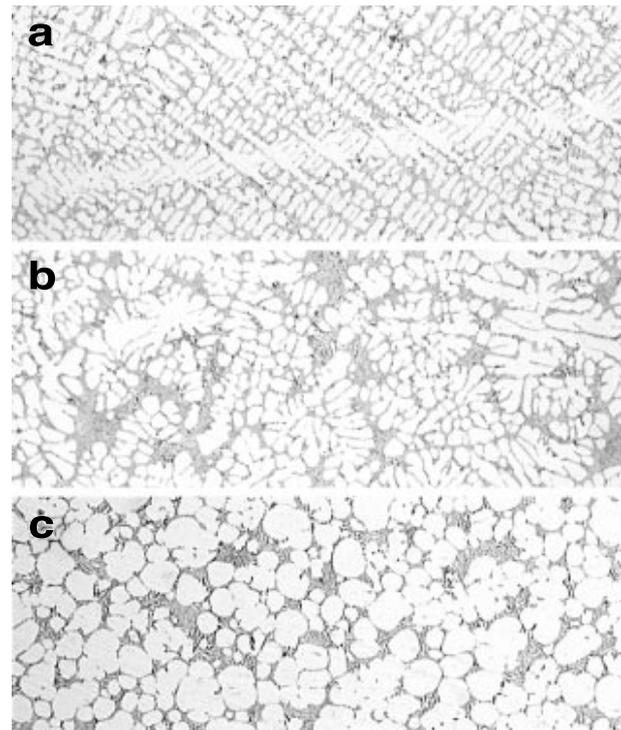


図5 Al-7%Si合金の組織微細化に及ぼす電磁振動の強さの影響

(a): $B=10\text{T}$, $J=0\text{A/m}^2$, (b): $B=10\text{T}$, $J=0.71\times 10^6\text{A/m}^2$,
 $f=60\text{Hz}$, (c): $B=10\text{T}$, $J=4.24\times 10^6\text{A/m}^2$, $f=60\text{Hz}$

様、初晶デンドライト組織は電磁振動力の増加に伴い微細化した。また、周波数の影響についても、200~500Hzの範囲で特に微細化が顕著におこることがわかった。さらに、鑄鉄の共晶組織に対して電磁振動を加えたところ、図8に示すように共晶組織についても顕著に微細化することがわかった。なお、図8は、a及びbで示されるミクロ組織を特殊な液で腐食

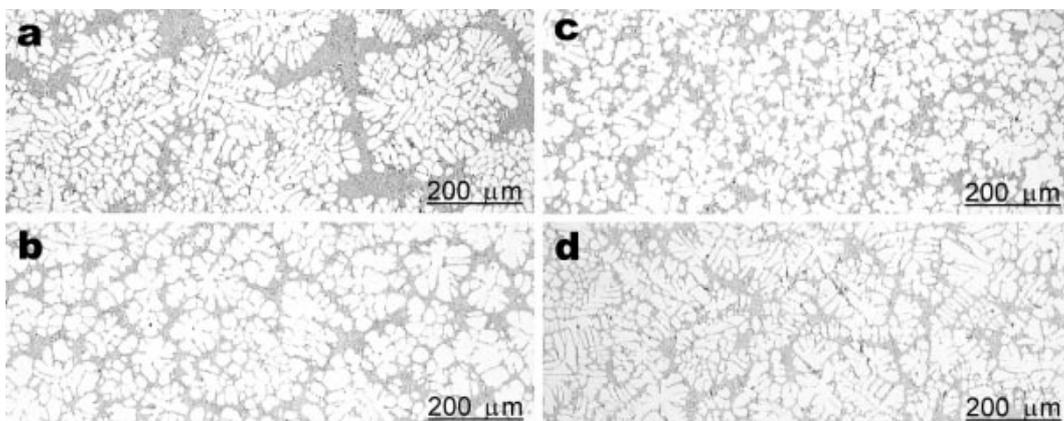


図6 Al-7%Si合金の組織微細化に及ぼす電磁振動の周波数の影響

(a): $B=10\text{T}$, $J=2.14\times 10^6\text{A/m}^2$, $f=10\text{Hz}$, (b): $B=10\text{T}$, $J=2.14\times 10^6\text{A/m}^2$, $f=50\text{Hz}$, (c): $B=10\text{T}$, $J=2.14\times 10^6\text{A/m}^2$, $f=500\text{Hz}$,
(d): $B=10\text{T}$, $J=2.14\times 10^6\text{A/m}^2$, $f=5\text{kHz}$

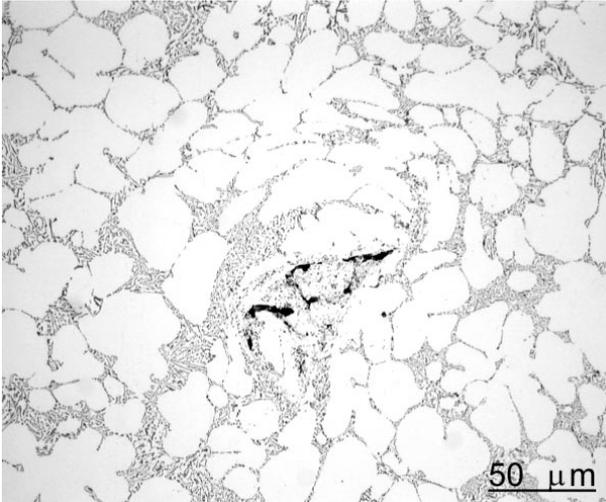


図7 キャピテーション現象による初晶 デンドライトの微細化の瞬間

することにより、共晶組織を明らかにしたものである。この現象を応用すると共晶組織のように等軸な組織の粒子においても微細化できることがわかる。

3 本技術の優位性

金属材料の組織を凝固時に微細化するために、従来は、他の合金成分を添加したり、微細化剤などの異物を添加すること、あるいは液体金属を過熱するなどの処理により、微細化を行っていた。

本方法では、それらの必要が全くなく、単に凝固中の金属材料に電場と磁場を加えるだけでよいため、従来金属材料の特性を飛躍的に向上させると共に、廃棄の際にはそのまま再溶解するだけでリサイクルが可能である等の特徴を持つ。加えた電磁場は直接原子に作用するため、短時間の作用でも効果があり、省エネルギー的なプロセスである。

4 産業展開

現在、アルミニウム産業や鉄鋼産業では、1次素材を製造するのに、量産効果で低コスト化するために、連続鋳造を行っている。本開発プロセスをこれらの連続鋳造設備に加えることにより、従来生産されている素材の結晶粒度が約1桁ほど小さくできることになり、強度的には2~3倍の向上が期待される。

詳細は下記の文献をご覧ください。

参考文献

- 1) A. Radjai, K. Miwa and T. Nishio: Metall. Mater. Trans., 29A, (1998)1477-1484.
- 2) A. Radjai and K. Miwa: Metall. Mater. Trans., 31A, (2000) 755-762.
- 3) A. Radjai and K. Miwa: Metall. Mater. Trans., to be published.

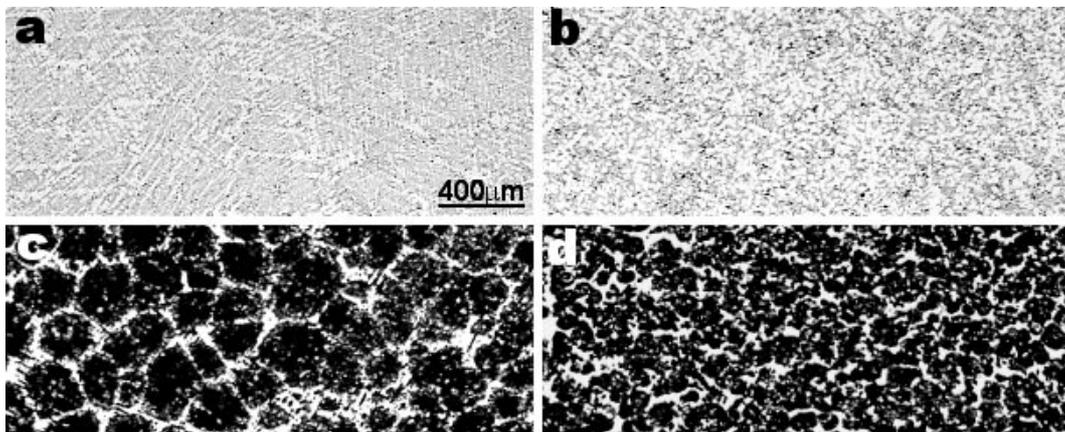


図8 電磁振動によるねずみ鉄の初晶オーステナイト及び共晶セル組織の微細化

(a)&(c): $B=0, J=0, f=0$, (b)&(d): $B=10T, J=2.12 \times 10^6 A/m^2, f=200Hz$, (c)&(d):ステッド試薬によって腐食