

金属ガラスの新しい創製技術

電磁振動力による新プロセス技術の開発

産総研サステナブルマテリアル研究部門は、従来のプロセスとは全く異なる電磁振動力を利用した、金属ガラスの新しい創製技術の開発を行っている。すなわち、電磁振動力によって結晶の芽となる結晶核の生成を抑制し、合金がもっている金属ガラスを形成する能力(金属ガラス形成能)を高めようとする技術である。この創製技術はマグネシウム合金において実証しており、さらに金属ガラスの大型化や連続鑄造技術への展開が期待されている。

In this study, we try to develop a new method for producing the bulk metallic glasses by using electromagnetic vibrations and to clarify a possibility of enhancing glass-forming ability by this process. The effects of the electromagnetic vibrations on the glass-forming ability in the Mg-based bulk metallic glasses were investigated. It was found that the new method by using the electromagnetic vibrations is effective in enhancing the glass-forming ability. Disappearance of the clusters by the electromagnetic vibrations applied to the liquid state was presumed to cause suppression of crystalline nucleation, namely, enhancing the glass-forming ability.

研究の背景

通常の金属や合金を融点以上に熱すると、溶融した液体として金属原子は自由に動き回り乱れた状態になるが、融点以下に冷却した液体(過冷却液体)は不安定で、直ちに結晶化して凝固する。しかし近年、一定の成分則をもった合金においては、比較的遅い冷却速度で金属液体を融点以下に冷却しても結晶化が起こらず、液体と同じような不規則な原子配列を保った非晶質金属である金属ガラスが形成されることが見出されている。金属ガラスは、高温領域でガラス遷移を起こし、非常に高い粘性流動性を持つガラス相になる。そのため、一度で最終製品となる形状を付与できる加工法の「ネットシェイプ加工」や「ニアネットシェイプ加工」に適していると考えられている。さらに、結晶構造を持っていないので、結晶と結晶の隙間に存在する結晶の界面(結晶粒界)がない。そのため、結晶粒界を起点とする腐食や割れなどが無く、耐食性、強度、磁性などにおいて

優れた特性を示すと同時に、大きなたわみ性を持っている。これらの特性から、電子機器、自動車用部品、マイクロマシン部品、化学プラント部品、医療機器部品などへの応用が期待されている。

しかし、比較的大きな塊(バルク)状の金属ガラスを容易に作製できるのは、パラジウム合金やジルコニウム合金など貴金属で価格が非常に高い合金系のみである。その他の合金系は、金属ガラスを形成する能力(金属ガラス形成能)が低く、数ミリの棒材を作製するにも水冷銅鑄型へ鑄込むなど、できるだけ急冷する必要がある。そのため、超精密部材、航空機や自動車などの輸送機器用構造部材、高精度計測機器用機能部材として実用化が期待される金属ガラス素材の量産化については、従来の急冷凝固法では金属ガラス化に限界があり、構造材料や機能材料としての要望に広く応えることは難しいのが現状である。

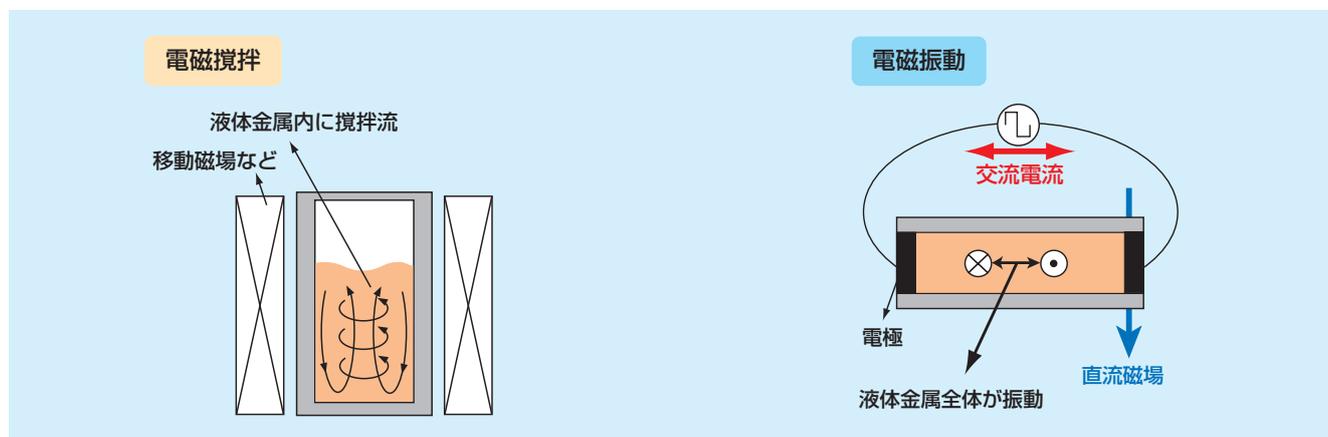


図1 電磁攪拌と電磁振動力の模式図

(左) 電磁攪拌 液体金属が回り、攪拌されるだけ。

(右) 電磁振動 紙面に垂直な方向に液体金属全体が振動している。



図2 さまざまな電磁振動力の下で作製したマグネシウム合金の光学顕微鏡写真

A：電磁振動力を印加しない場合。全面に結晶が出現している。

B：弱い電磁振動力を印加した場合。金属ガラス相の中に結晶の粒が出現している。

C：強い電磁振動力を印加した場合。全面に金属ガラス相が出現している。

電磁振動力とは？

そこでわれわれは、従来の急冷凝固法とは全く異なる視点から、電磁振動力を利用した金属ガラスの新しい創製技術の開発を行っている。一般的によく知られている電磁力としては、電磁攪拌がある。電磁攪拌とは、液体金属の攪拌に広く用いられている方法で、移動磁場などにより液体金属内に攪拌流を作り出して攪拌する方法である。しかし、新たに開発した技術に使用する電磁振動力は、直流磁場内で液体金属中に直流磁場と直交する交流電流を印加することにより、液体内部に発生する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）であり、金属の液体全体を振動させる力となる。図1に電磁攪拌と電磁振動力の違いについて示す。電磁振動力が電磁攪拌とは本質的に異なるプロセスであることがわかるだろう。

われわれの研究グループでは、この電磁振動力により従来の金属合金が非常に緩やかな冷却速度でも結晶粒が微細化することを見出していた。この技術は、凝固中にできる結晶粒子を電磁振動力によって粉々に砕いて微細化するものである。従来の金属合金では、結晶粒をできるだけ小さくすることが、強度をはじめ種々の特性を向上させる最も良い方法だからである。

一方、金属ガラスでは、結晶核の生成を抑制することができれば、比較的緩やかな冷却でも金属ガラスを形成することが可能だと報告されている。結晶が液体金属から出現する際は、その基になる原子の集団（クラスター）を核として成長し、結晶になると考えられている。そこで、この研究開発では、電磁振動力によって結晶の核となるクラスターなどをより小さくして、結晶核の生成を抑制し、合金

が持っている金属ガラス形成能を高めてやることをコンセプトとしてその実現に取り組んだ。

合金としては、金属ガラスが比較的できやすく、溶解時の雰囲気制御が容易なマグネシウム合金を選択した。電磁振動力の印加装置としては、10T（テスラ）までの磁場を作り出せる超電導マグネットを用いている。試料は保持容器であるアルミナ管内にセットし、電極棒で挟んだ。電磁振動力は、所定の磁場の中で両端の電極棒を用いて試料に電流を流すことにより印加している。マグネシウム合金は550℃まで加熱して液体状態にした後、電磁振動力を印加しながらアルミナ管へ水を吹きかけて冷却した。

電磁振動力の効果

図2にさまざまな電磁振動力下で作製したマグネシウム合金の光学顕微鏡写真を示す。電磁振動力は図3に示すように、磁束密度と電流のベクトルの積となるので、磁場強度を変化させることによって試料にかかる電磁振動力の強さを変化させることができる。これらの試料は、液体状態において10秒間電磁振動力を印加した後、電磁振動力を印加しながら冷却している。磁場強度が0Tの場合、電磁振動力は発生せずに通常の状態での冷却された試料であるが、いろいろな模様が出ていることがわかる。この模様は結晶粒界により出てくる模様である。このことより、電磁振動力を印加せずに作製した合金は、金属ガラスとはならず完全な結晶相であることがわかる。しかし、磁場強度が2Tの場合、弱い電磁振動力が試料に印加されるが、この試料では単調な灰色の下地に粒状の模様が観察される。粒状の模様のように見えるのは結晶の粒で、単調な灰

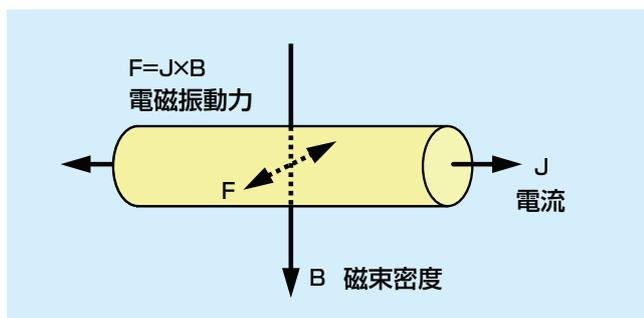


図3 電磁振動強度の説明図

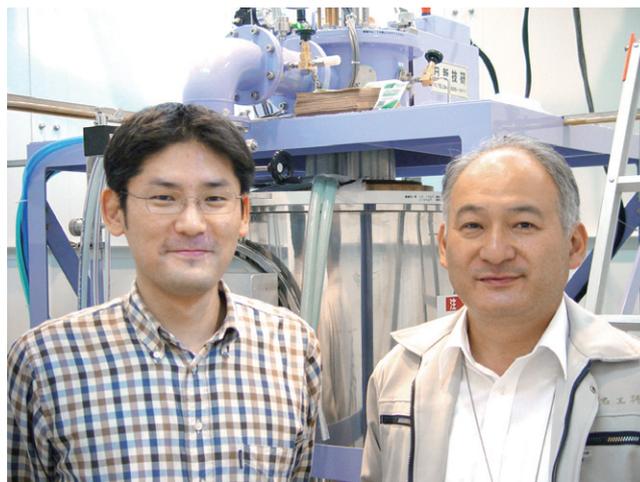
電磁振動力は磁束密度と電流のベクトル積となる。

色の下地は金属ガラス相である。さらに、磁場強度が10Tの場合には、強い電磁振動力が試料に印加されることとなる。この試料では、ほとんどが単調な灰色を示す金属ガラス相で構成されていることがわかる。また、これらの結果は微小部X線回折装置や透過電子顕微鏡でも確認している。これらの結果から、電磁振動力の強さが増すにいたって、金属ガラス相が形成されやすくなっていることがわかる。つまり、この溶解、冷却条件において、合金の金属ガラス形成能を電磁振動力で高めることができることを示している。われわれは、種々の実験から、このような金属ガラス形成能の向上は、液体金属や過冷却液体中に存在する結晶の核になりうるクラスターなどが電磁振動力によって減少するためだと推測している。

今後の展開

新たに開発した電磁振動力による金属ガラス創製技術は、金属ガラス相の形成に有用であることが判明した。しかし、理論的に未解明の点も多く、非常に興味深い研究であるといえる。また、この技術を実用化レベルまで高めるために、量産化を考慮して電磁振動力を使用した連続鋳造技術の開発を行っていく予定である。

この研究は平成14年度から開始した「NEDO委託事業：革新的部材産業創出プログラム 金属ガラスの成形加工技術プロジェクト」において、行われた。本件に関する詳しい内容は、Nature Materials 4 (2005) April pp. 289-292. に「Electromagnetic vibration process for producing bulk metallic glasses」というタイトルで掲載されている。



サステナブルマテリアル研究部門 凝固プロセス研究グループ
総括研究員 三輪謙治氏(右)と、研究員 田村卓也氏(左)。

用語解説

◆金属ガラス

金属ガラスは、原子配列が全く不規則なガラス状態の非晶質金属である。結晶体ではないため粒界がなく、そのため強度、耐食性、磁性などにおいて優れた特性を示す。例えば、金属ガラスは結晶質合金に比べて遙かに高い強度を持っていると同時に大きなたわみ性を有している。また、外部磁力にも直ちに反応する優れた軟磁気特性を持つ。さらに金属ガラスは、二次加工性にも優れているため、ネットシェイプ加工することが可能である。金属ガラスの中に、微細なナノ結晶が分散していても質的には変わりがなく、これを含めて広義の金属ガラスという。

◆電磁振動力

導体に直流電流と直流磁場をそれぞれ直行する方向に同時に加えることにより、これらの両場と直行する方向に力が発生する。今、この電流を交流にすると、発生する力もこの交流電流と同じ周波数で振動する。これを電磁振動力という。溶融金属は導体であるので、同じように電磁振動力を作用させることができる。機械的な振動と違って、電磁振動力の場合は、電荷単体に振動力が作用するため、導体に均一に振動を与えることができる。

◆ネットシェイプ加工

素材が最終製品となるまでに、通常は何回かの加工工程を経る。しかし、加工法によっては、一度の加工工程で最終製品に仕上げることができる。このように、一度で最終製品となる形状を付与する加工法のことをネットシェイプ加工と言う。例えば、ダイカスト法では、溶けた金属を射出成形機で金型へ圧入することにより、最終製品を得ることができる。

◆ニアネットシェイプ部品

ネットシェイプ加工に比べて、最終製品を得るために、さらに1～2工程多い成形加工プロセスをニアネットシェイプ加工といい、それによって得られる部品をニアネットシェイプ部品という。

◆バルク

粉末や箔帯や細線のような細かなものと違って、棒材や塊状物のようなある程度のまとまった大きさ、量のあるものをこのことをいう。細かなものを構造材料として使用するためには、ある程度の大きさにまで固めて大きくする必要がある。バルク材では、圧延、押出、成形加工により形状付与することにより、種々の構造部材として使用することができる。

● 問い合わせ先

独立行政法人 産業技術総合研究所 中部センター
サステナブルマテリアル研究部門 凝固プロセス研究グループ

総括研究員 三輪謙治

研究員 田村卓也

E-mail: k-miwa@aist.go.jp

〒463-8560

名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98