

## 2024年度 研究成果報告書(短期)

## 研究テーマ

## 超音波マイクロバブル発生技術を用いたポーラス金属生成法の開発

## 代表研究者

## 研究要旨

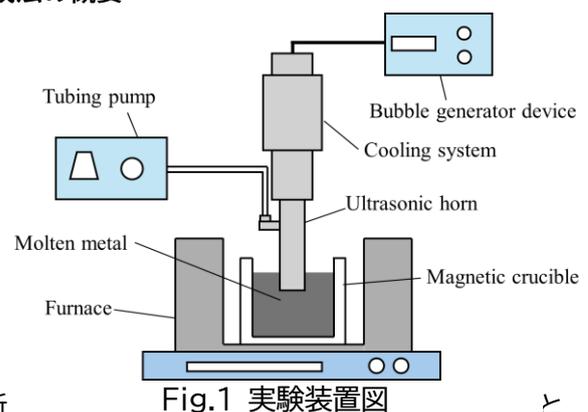
ポーラス金属は軽量性、低熱伝導率、衝撃吸収能などの優れた特性を有する工業材料として注目を集め、実用化されている(アルポラス®など)。軽量性や衝撃吸収能については自動車用構造部材として優れた性能を示した反面、複雑な工程に基づくコスト高の問題により需要拡大には繋がっていない。また、従来のポーラス金属製法にも、1 mm 以上の大きな空孔ができやすい(溶融法)、爆発の危険性がある(粉末冶金法)、など課題も多い[小橋真, 軽金属, 55(2005), pp.327-332]。そこで、研究代表者らは、“超音波マイクロバブル発生技術”を用いることで直接溶融状態の金属中にマイクロバブルを発生させ固化させることでポーラス金属を容易に生成できるのではというアイデアを着想した。“超音波マイクロバブル発生技術”は内部にガス流路を有する円筒状の超音波振動体(中空超音波ホーン)を液体中に挿入し振動させることで液体中の気液界面が激しく乱され多くのマイクロバブルが発生する技術 [Ultrasonics., 53(2013), pp.196-202.]であり、一般的なマイクロバブル発生技術と異なりポンプによる高速流動が不要であるため水以外の多種多様な液体にマイクロバブルを発生することが可能である。

本研究期間以前の研究では、溶融状態の低融点金属(鉛フリーはんだ合金)に中空超音波ホーンを挿し込み気泡を吹き込んだところ、溶融金属が盛り上がりフォーム状となり、フォームを冷却することで内部に1 mm 以下の独立気孔を多数有するポーラス金属が生成することを確認できた。その一方、気孔の制御、収量の増加、適用可能な金属種の拡大が実用化に向けた課題であった。そこで本研究期間においては、生成条件の最適化や低融点金属の事例から汎用金属であるアルミニウムのポーラス化検証、および生成したポーラス金属の特性評価を行った。本研究の結果、従来用いていた低融点金属のポーラス化については、一か所に気泡が集まり留まることを抑止するため、ホーンの差し込む方向について鉛直方向からの挿入ではなく、少し傾け角度をつけた挿入とすることで、ポーラス化領域の拡大、空孔の微細化、気孔率の増加を確認した。また、アルミニウムのポーラス化については低融点金属の事例ほどのフォーム量ではないものの、マイクロバブルの吹き込みとともに溶融アルミの一部が盛り上がり、ポーラス金属の形成が確認できた。この金属について圧縮試験も行ったところ、ひずみに対して応力が大きく変化しないプラトー領域が確認でき、衝撃吸収性の可能性も示唆された。

高融点の金属については、引き続き検討が必要ではあるものの、これらの研究成果のポーラス金属生成技術については、工程が単純で既存設備との親和性も高く、コスト増の問題についても大幅な改善に繋がると見込まれるため、引き続き本技術の開発が進むことにより自動車部品をはじめ幅広い応用展開が期待できる。これ以降は、研究内容の詳細について記載する。

## 超音波マイクロバブル発生技術を用いたポーラス金属生成法の概要

超音波マイクロバブル金属生成法については、Fig.1の概略図に示す実験装置にて行う。本研究では金属材料として、従来と同様の融点が78°Cの低融点金属(鉛フリーはんだ合金 LLS78, ソルダークोट:以下、LLS78)、もしくは、LLS78 より高い融点で汎用性の高いアルミニウムを使用した。LLS78 はホットスター、アルミニウムは電気炉を用いて溶融させた後、その溶融金属に超音波ホーン先端を差し込み、マイクロバブルを発生させる。マイクロバブル発生には、超音波振動子に中空超音波ホーンを取り付けたマイクロバブル発生装置を用いた。中空超音波ホーンは、小径円筒と大径円筒が接続された段付きの外観をしており、その両端の断



と

なっている。また、内部に気体流路を有し、最も大きい振動が発生する小端面のホーン先端に気体を供給することで、液体に供給された気体が振動によって微細化してマイクロバブルとなる。本手法では、本ホーンを用いて8~10分程度熔融金属にマイクロバブルを発生させた後、ホーンを金属から引き抜き室温環境で静置することで、金属が固化し、内部に気泡由来の空洞を有するポーラス金属を生成させる。

### 低融点金属のポーラス化における条件最適化

まず、これまで作成していた LLS78 のポーラス金属の生成量を増加させるため、中空超音波ホーンの差し込み位置と角度を変更する手法を検証した。ホーンの差し込み位置を容器の中央から逸らし、ホーンを 10° の角度をつけて差し込むことで、発泡部をホーン差し込み部分とは反対側に集中させた。これ以降、本節で説明した生成手法を“角度変更方式”とし、従来の生成手法を“従来方式”とする。

Fig.2、Fig.3 にそれぞれ従来方式と角度変更方式で吹き込んだポーラス金属の断面図をしめす。なお、それぞれの図の(a)は断面外観、(b)は 100 倍の拡大図を表しており、Fig.2(a)の中央の窪みと Fig.3(a) 右側の窪みは、ホーンを差し込んでいた箇所である。従来方式と角度変更方式で生成したポーラス金属の体積はそれぞれ 78.0mL、89.0 mL であり、角度変更方式において収量増加が確認された。また、気孔率を算出するとそれぞれ 70.1%、72.7%であった。ポーラス金属は気孔率が 45%以上の場合、金属材料の変形様式は曲げおよび座屈の変形が支配的になり、衝撃吸収性の向上が期待できるとされていることから、どちらの製法で生成したポーラス金属も衝撃吸収性が期待できる。

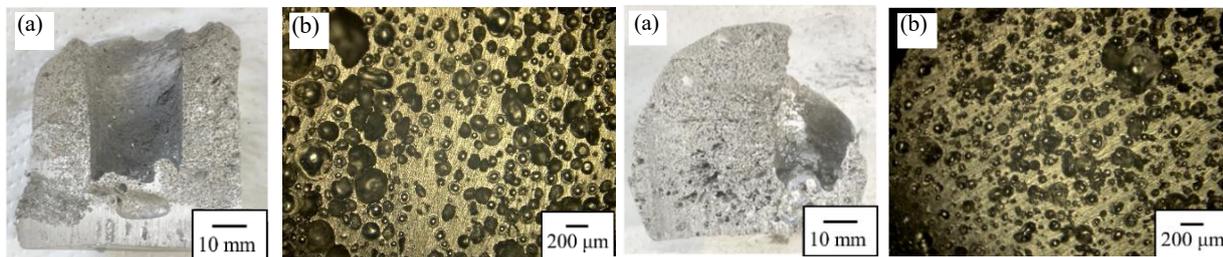


Fig.2 生成ポーラス金属断面（従来方式） Fig.3 生成ポーラス金属断面（角度変更方式）

Fig.4 にそれぞれの製法で作成したポーラス金属の気孔径分布図((a)既存法, (b)角度変更方式)を示す。この気孔径分布測定では、ポーラス金属の断面の光学顕微鏡画像を、画像解析式粒度分布ソフトウェア (Mac-View Ver.4, マウンテック) を用いた画像処理を行うことで算出した。Fig.4 からは生成したポーラス金属は 20~100 μm の大きさの空孔を有しており、概ね 100 μm 前後の気孔が最も多くなったことが判る。また、角度変更方式では従来方式より 100 μm 以下の空孔の頻度が高くなっており、ホーンの上方からの差し込み角度を鉛直方向から傾げることで、気泡放出方向と気泡浮上方向をずらし、気泡同士の合体による空孔の大径化の抑制につながったと思われる。したがって、差し込み角度の変更による、ポーラス金属の収量増加と空孔の小径化が本結果より示唆された。

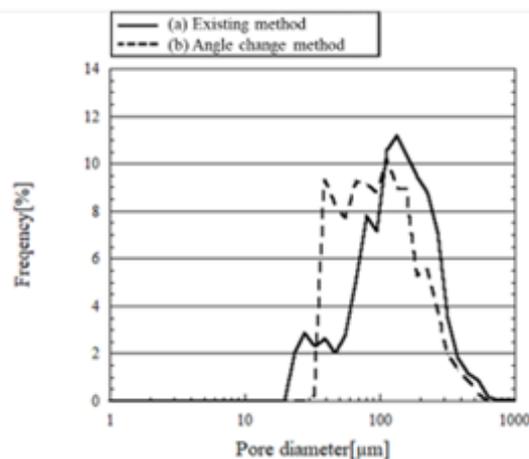


Fig.4 ポーラス金属の空孔径分布

### アルミニウムのポーラス化検討

これまでの研究においては低融点金属を用いたポーラス化製法について検討してきたが、低融点金属のポーラス金属については特定のニーズがあるわけではなく、汎用性について課題があった。そこで、より汎用的な金属への適用として融点 660°C のアルミニウムへのマイクロバブルの吹き込みを検討する。融点の上昇に伴い、ホーン材料のチタン合金の熱膨張や超音波振動子の熱による振動阻害などの影響が考えられるため、高融点金属への本手法の適用においては超音波ホーンの大径円筒部側面に冷却水を循環可能な冷却ジャケットの追加や気体供給の継手の耐熱化を施すことで、高温環境下での吹き込みおよびポーラス金属生成の可能性について検討した。

Fig.5 に本手法で生成したポーラスアルミニウムを示す。Fig.5(a)は吹き込み後のアルミニウムの外観、Fig.5(b)は発泡部の断面図である。Fig.5(a)に示すように、下部の非発泡部から上部にせり上がる形で発泡部が形成され、気泡の吹き込み自体は可能であることが確認できた。その一方、LLS78 はほぼ一定の速度で発泡部が生成され上方に膨らんでいくのに対し、アルミニウムは吹き込み直後に急速に発泡後、発泡部の生成が停滞した。Fig.5(b)に示す断面からは、LLS78 を用いた際に確認できた 100 μm 以下の球形気

孔がほとんど確認されず、薄膜の層状構造が確認された。したがって、アルミニウム中では十分に微細化されない気体が多く、大気孔の形成、酸化膜の積層を繰り返し、層状構造を形成したと考えられる。

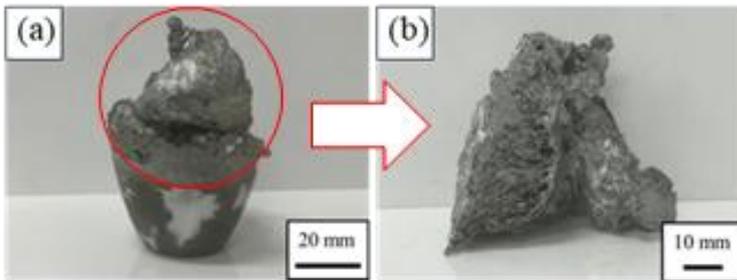


Fig.5 溶融アルミニウムへのマイクロバブル吹き込み結果



Fig.6 圧縮試験試験片

このアルミニウムについて機械的特性の評価のために圧縮試験を行った。作成したポーラスアルミニウムの発泡部及び未処理のアルミニウムから Fig.6 のような 1 辺 10 mm の立方体の圧縮試験片を切り出した。ポーラスアルミニウム試験片の気孔率は 59.2% である。試験片を圧縮した際の圧縮応力-ひずみ線図を Fig.7 に示す。ポーラスアルミニウムの圧縮応力-ひずみ線図にプラトー領域が記録され、衝撃吸収性が確認できた。しかし、低融点金属 LLS78 と比較すると、LLS78 のプラトー領域での圧縮応力が  $1 \text{ N/mm}^2$  周辺であるのに対し、ポーラスアルミニウムは  $0.01 \text{ N/mm}^2$  以下であった。この原因として、今回で作成したポーラスアルミニウムは層状の内部構造をしており、強度が低下したものと考えられる。

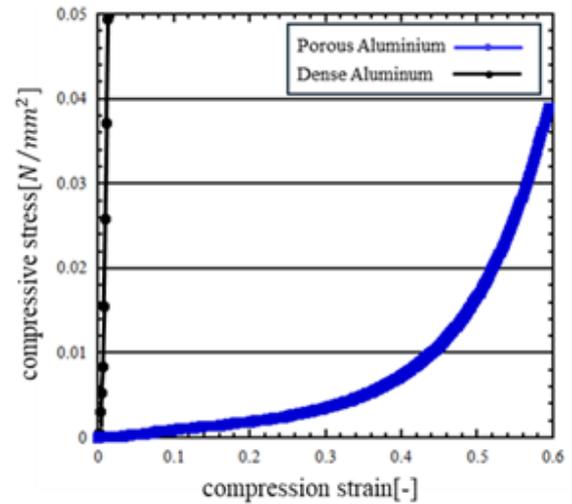


Fig.7 圧縮試験の応力-ひずみ線図

この気孔層状化については、溶融金属の粘性を上げて気泡の液中滞在性を向上させることでアルミニウム中の球形気孔の形成を促すため、溶融金属にカルシウムを添加することで球形空孔が形成すること自体は確認できているが、LLS78 レベルの良好なポーラス金属形成までは至っていないため、引き続き条件の最適化を図る予定である。したがって、ポーラスアルミニウムへの本手法の適用については溶融アルミニウムへのマイクロバブル吹き込み、および金属中の空孔形成自体は確認できたものの、安定かつ量的に十分な空孔形成には至っておらず引き続き条件の最適化を図り、実用的かつ低コストなポーラスアルミニウム製法の実現に努めていく予定である。

#### 学会発表

※詳細は当財団までお問い合わせ願います。