

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06041

研究課題名(和文) 溶けた金属に吹き込むだけ！超音波マイクロバブルを用いたポーラス金属の革新的生成法

研究課題名(英文) Novel fabrication method for porous metals using ultrasonic microbubble generation technique

研究代表者

幕田 寿典 (Makuta, Toshinori)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：40451661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ポーラス金属とは、内部に多孔質構造を有する金属材料のことで、金属の軽量化や衝撃吸収特性・断熱特性・吸音特性を有する機能性材料として期待されている。本研究では、超音波を用いたマイクロバブル発生技術を利用して熔融金属に気体を吹き込むという操作のみで安全にポーラス金属を生成することに成功した。また、圧縮試験・吸音試験より、本ポーラス金属はポーラス金属特有のプラトー領域が存在することを確認し、吸音性も有することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、環境負荷低減の観点から自動車等の輸送機器の軽量化が求められており、ポーラス金属は緻密材をポーラス化することから、これらの軽金属を上回る超軽量化を可能にするものとして期待されている。ポーラス金属の生成方法は、金属粉末と発泡剤粉末とを圧粉成形し加熱することで生成させる方法や、熔融金属に増粘剤と発泡剤を添加し生成させる方法等がある。しかしこれらの方法では、金属粉末による爆発の危険性や工程の複雑化が課題である。本研究で金属の溶融体に直接マイクロバブルを吹き込んで固めるポーラス金属製法が確立できれば微細な気孔を有するポーラス金属を安全かつ単純な工程で生成可能になると期待される。

研究成果の概要(英文)：Porous metal is a metal material that has a porous structure inside. Porous metal is considered to be a promising functional material with high impact energy absorption, heat insulation, and sound absorption properties due to the presence of voids inside. In this study, we succeeded in generating porous metal safely only by blowing gas into molten metal using microbubble generation technology using ultrasonic waves. From the mechanical properties test, it was confirmed that the porous metal had a plateau region peculiar to the porous metal in the compression test, and it was confirmed in the sound absorption test that it also exhibited sound absorption depending on the frequency band.

研究分野：流体力学

キーワード：マイクロバブル ポーラス金属 超音波

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ポーラス金属は軽量性、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す反面、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、1mm以上の大きな空孔ができやすく（溶融法）、爆発の危険性がある（粉末冶金法）、などといった課題も多い。研究代表者らは、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“超音波マイクロバブル発生技術”を有しており、この超音波マイクロバブル発生技術は水以外の多種多様な液体にマイクロバブルを発生できることから、これまで報告事例のない熔融金属中でのマイクロバブル発生の可能性に着目した。

2. 研究の目的

超音波の振動伝達体の内部に気体放出口を設け、気体供給と超音波印加を同時に行うことで微細な気泡（マイクロバブル）が発生する独自の超音波マイクロバブル発生技術を活用し、熔融金属中でマイクロバブルを発生させるだけで熔融金属が発泡してフォーム状になることを見出した。本研究はこの発見を基に超音波で発生したマイクロバブルを利用したマイクロポーラス金属生成技術を確立することを目的とし、ポーラス金属生成のメカニズム解明、およびポーラス金属の空孔制御や収量増加を目標に研究を行う。

3. 研究の方法

本研究は、超音波で発生したマイクロバブルを利用したポーラス金属生成技術を確立することを目的として、次の3つの研究項目について研究開発と特性評価を行う。

(1) ポーラス金属生成の現象把握と最適条件の抽出

（最適化パラメータ：超音波周波数および出力、吹出し位置、ガスの種類・流量）

マイクロバブル供給開始からの時間をパラメータとして供給開始から安定化までの経時的なポーラス金属サンプルから形成挙動を把握する。また、最適条件の抽出にあたっては気孔率（気孔が占める体積/ポーラス金属体積）を評価パラメータとし、気孔率の目標として市販品と同等かそれ以上となることを成否の判断材料とする。

(2) ポーラス金属の特性評価（評価項目：機械的特性、振動吸収特性）

ポーラス金属は中実の材料に比べ軽量性、衝撃吸収性に優れることが特徴であるため、次の2つの特性について評価する。

①機械的特性：圧縮試験を行い、ヤング率や応力-ひずみ特性などのデータを取得する。ポーラス金属はプラトー領域と呼ばれる応力が一定で変形する領域を有することが特徴であり、この領域で高いエネルギー吸収特性が発現するため、各条件でのプラトー応力およびプラトー領域（ひずみ量）について測定する。

②振動吸収特性：JIS A1405に基づき音響管を用いて吸音率を測定する。

(3) ポーラス金属生成の連続処理化と本手法適用金属種の拡張

バッチプロセスではなく、連続処理による実用的な収量確保について検討する。具体的には熔融金属を流す流路中に中空超音波ホーンを配置し、流動する熔融金属のフォーム形成の有無およびフォーム形成挙動について評価する。金属種の拡張については、ホーンと超音波振動子の間に冷却水が循環可能な振動伝達体を挿入することで高温環境下での超音波駆動の実現を図り、より高融点の金属のポーラス化の成功を目指す。

4. 研究成果

(1) ポーラス金属生成の現象把握と最適条件の抽出

ポーラス金属の生成については超音波出力を上げ、より多くのマイクロバブルを安定して発生させるようにしたところ図1に示すようにより多くのポーラス金属を生成させることが可能となった。また、ポーラス金属が生成されるメカニズムとして、これまではマイクロバブルの浮上速度が遅いことや、酸化系ガスのみ発泡が確認されたことから酸化膜の形成などが主な要因と考えられていた。本研究では、温度を変えて熔融金属の粘度を変えた環境でポーラス金属生成

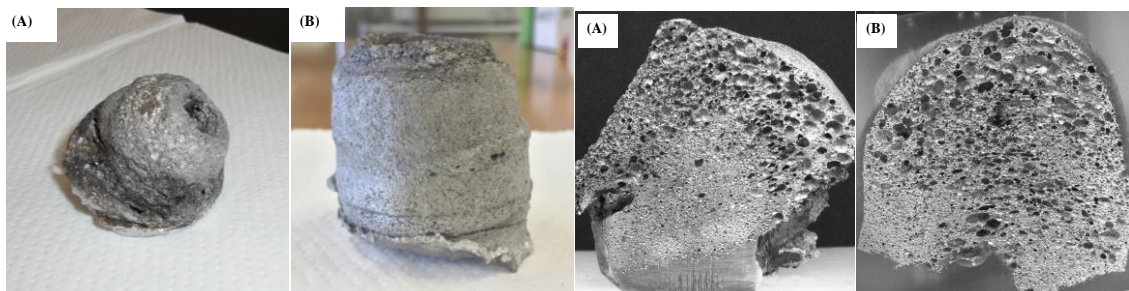


図1 生成したポーラス金属の概観と断面画像
(A：超音波50 W条件， B：超音波100 W条件)

図2 生成したポーラス金属の概観
(A：粘度45.8[mPa・s]条件， B：81.1粘度[mPa・s]条件)

を行ったところ、図2のように低粘度条件では気孔構造に偏りがあるのに対し、高粘度条件では一様に気孔が分布し、平均気孔径についても低粘度条件と比べ小さくなる事から、粘性による気泡分散安定性・浮上速度の低下も要因の一つであることを確認した。

これらの結果を踏まえ、マイクロバブルの気泡径が非常に小さいために浮上速度が遅くなったこと、気泡表面で酸化膜が形成すること、そして、熔融金属の粘性を高くすることによる気泡の分散安定性の向上の3つの要因から、熔融金属中での気泡の長時間滞在が可能になり、ポーラス金属が生成されたと考えられる。

(2) ポーラス金属の特性評価

本手法のデフォルト条件で作製したポーラス金属において、圧縮試験および音響試験を行なった。圧縮特性に関しては、図3に示すようにポーラス金属特有のプラトー領域が存在することを確認し、その領域では変形量が大きいことから、衝撃エネルギー吸収能を持つ材料であると考えられる。また、気孔率によってプラトー領域が変化していることから、このパラメータを気泡の吹き込み条件でコントロールすれば、衝撃吸収特性を変化させることができる可能性が示唆された。

吸音特性に関しては図4に示すように、各周波数帯で吸音効果を確認し、また5kHzの周波数帯近辺で優れた吸音ピークが確認されたことから、本ポーラス金属は良好な吸音性能を有していることが確認された。

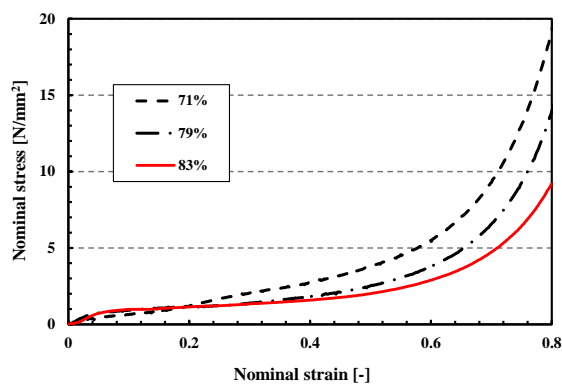


図3 気孔率71%, 79%, 83%試験片の圧縮応力-ひずみ線図

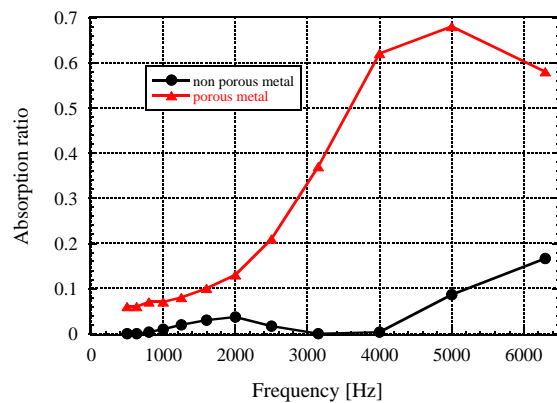


図4 各周波数に対する吸音率

(3) ポーラス金属生成の連続処理化と本手法適用金属種の拡張

連続処理として熔融金属の静置しているステージを移動しながら生成を行なうことで連続プロセス化の検討を行い、結果として中空超音波ホーンの熔融金属への挿し込み角度を設けることで、図5に示すようにポーラス金属の連続生成が可能であることを確認した。角度にも最適条件が存在したことから、その他条件の最適化検討により、今後更なる収量の増加を見込んでいる。

また、従来の実験装置に冷却装置を取り付けた新たな実験装置の開発に取り

組んだ。冷却機能付きホモジナイザーに取り付ける中空超音波ホーンおよびホーン先端チップを設計し、マイクロバブルの発生およびポーラス金属生成の検証を行なった。この新しい冷却機能付きの装置では、現在までのところ227℃までの融点の金属を用いて問題なく実験することが可能となっており、ポーラス化についてこれまでの78℃の低融点金属の事例しかなかったが、109℃、138℃の低融点金属のポーラス化まで成功している。今後、各金属でのポーラス金属生成条件の最適化により更に高融点の金属のポーラス化が達成可能と見込んでいる。

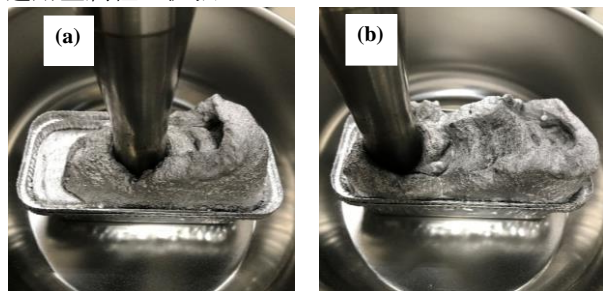


図5 連続生成処理時の挙動(挿し込み角度5°条件): (a): 1.5分経過時, (b): 3分経過時

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yokose Ryosuke, Makuta Toshinori	4. 巻 214
2. 論文標題 Fabrication of hollow metal nanoparticles by ultrasonically generated microbubbles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Letters	6. 最初と最後の頁 20 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matlet.2017.11.109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kouyo TAMAKI, Toshinori MAKUTA	4. 巻 4
2. 論文標題 Fabrication method of porous metal using ultrasonic microbubble generator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 22-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11395/aem.4.0_22	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kouyo TAMAKI, Toshinori MAKUTA
2. 発表標題 Fabrication method of porous metal using ultrasonic microbubble generator
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上原 雅広, 幕田 寿典
2. 発表標題 超音波マイクロバブルを利用した金属ナノ粒子の生成法
3. 学会等名 日本機械学会東北学生会 第49回卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片寄礼夏, 田巻皓陽, 幕田寿典
2. 発表標題 超音波マイクロバブルを利用して作るポーラス金属とその特徴
3. 学会等名 日本実験力学会 2017年度年次講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田巻 皓陽, 幕田 寿典
2. 発表標題 超音波マイクロバブルを利用したポーラス金属の生成及び生成条件の検討
3. 学会等名 日本機械学会 機械材料・材料加工部門 第1回 若手ポスターシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 横瀬 諒介, 幕田 寿典
2. 発表標題 超音波マイクロバブルを利用した金属ナノ粒子生成
3. 学会等名 日本機械学会 機械材料・材料加工部門 第1回 若手ポスターシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kouyo TAMAKI, Toshinori MAKUTA
2. 発表標題 Fabrication and Acoustic Examination for Porous Metals Using Ultrasonically Generated Microbubbles
3. 学会等名 7th International Conference on Smart Systems Engineering 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田巻皓陽, 幕田寿典
2. 発表標題 超音波マイクロバブル発生技術を用いたポーラス金属の作製方法
3. 学会等名 日本金属学会 2020年春期大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----