

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05163

研究課題名（和文）ブレイジングプリカーサの局所加熱によるポラスアルミニウム発泡補修

研究課題名（英文）Repari technique of aluminum foams using spot heating of brazing precursor

研究代表者

鈴木 良祐（Suzuki, Ryosuke）

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：10612400

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：直方体状のポラス純アルミニウムを試験片とし、その中央にドリルで貫通孔を付与して欠陥を模擬した。修復のためのフィラーとして、アルミニウム合金製円柱状プリカーサを用意した。フィラーは高温に加熱する発泡（膨張）する。フィラーを試験片の欠陥を模擬した孔に詰め、赤外線イメージ炉およびTIG溶接機を用いてフィラー端面を加熱し、発泡したフィラーで欠陥を充填する発泡補修を行った。フィラーを十分発泡させることができれば、局所熱源を用いて発泡補修が可能であることを明らかにした。また、欠陥近傍に熱容量の大きな金属がある場合、フィラーは発泡せず局所加熱による発泡補修が困難となることも明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

局所的に破壊したポラスアルミニウム製大型構造部材を交換せずに継続的に利用するために、局所的破壊箇所を補修する必要がある。局所的破壊箇所を補修する技術として発泡補修が提案されているが、ポラスアルミニウム製大型構造部材全体を高温に加熱する必要があるため、消費電力が大きくなり、補修コストが高くなる。本研究では、より安価に補修するために、フィラーを局所的に加熱することにより、発泡補修が可能か調べた。浅い欠陥であれば、発泡補修することで、欠陥がある場合に比べ部材強度を上昇させることが可能になった。これにより、これまでより安価にポラスアルミニウム製大型構造部材の補修が可能になった。

研究成果の概要（英文）：A rectangular pure aluminum foam was prepared as the specimen. A hole was drilled at the center of the specimen to simulate a defect. A cylindrical aluminum alloy precursor was produced to use for a repairing filler. The filler foams and fills the hole by heating to high temperature. The filler was put into the hole in the specimen and the end face of filler was heated with an infrared image furnace and a TIG welding machine for repairing. The foaming repair could be carried out using a local heating source if the filler could be sufficiently foamed. It was also found that if there was metal with a large heat capacity around the defect, the filler did not foam and foaming repair was significantly difficult.

研究分野：材料力学

キーワード：ポラスアルミニウム 発泡 補修 プリカーサ アルミニウム合金

### 1. 研究開始当初の背景

ポーラスアルミニウムは内部に多数の気孔(セル構造)を有しているため、軽量、衝撃吸収、吸音、制振および断熱といった緻密金属にはない有益な特性を有しており、輸送機器分野から軽量構造材料や機能構造材料として期待されている。

他方、大型構造部材や高価な部材が供用中に部分的に損傷した場合、溶融した金属でき裂などの損傷部を補修する補修溶接などにより補修したうえで、継続して利用されている(M.Reiman et al. 2017)。ポーラスアルミニウムは Arian5 ロケットの構造材料にも適用されたように(D. Schwingel et al., 2007)、大型部材としての利用が進んでおり、安価な一般構造用鋼と比較すると高価な材料でもある。しかしながら、緻密金属に対する補修溶接のような補修技術は現在確立されていない。セル構造に起因する優れた特性を保持するため、ポーラスアルミニウムのセル構造を破壊しないよう補修する必要があるが、補修溶接ではこれが困難である。これまで申請者は、ポーラスアルミニウムを低融点ポーラスアルミニウムろう材で接合する発泡接合を提案した(R. Suzuki, 2016)。発泡接合では、ろう付け用の低融点アルミニウム合金製プリカーサを、接合したい2つのポーラスアルミニウム部材の間で、加熱・発泡させることで接合部に低融点ポーラスアルミニウムを発生させ、低融点ポーラスアルミニウムでポーラスアルミニウム同士を接合することが可能である。接合した試験片を4点曲げ試験することで、接合強度を評価したところ、ポーラスアルミニウムは接合部ではなく母材から破断しており、発泡接合で接合した部分は、十分な接合強度を有している。溶接技術の代わりに、発泡接合の技術を応用すれば、ポーラスアルミニウムの補修技術として利用できると考えられる。しかしながら、発泡接合には低融点ポーラスアルミニウムが気孔に充填され接合されるプロセス等に不明な点がある。

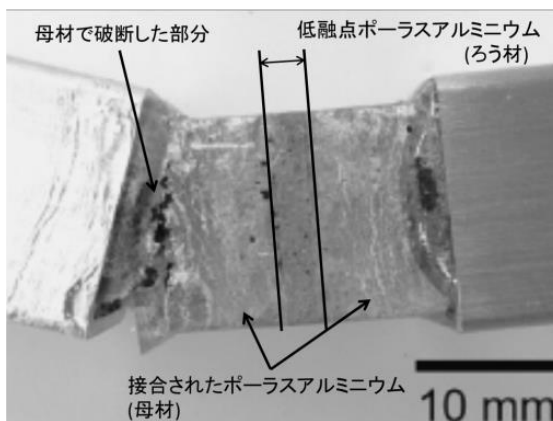


図1 発泡接合されたポーラスアルミニウムがマトリックスから破断した様子

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ポーラスアルミニウムのセル構造を破壊することなく、ポーラスアルミニウムの部分的損傷を補修する技術を確認することにある。申請者はセル構造を破壊することなくポーラスアルミニウムの部分的損傷を補修する技術として発泡補修を提案する。発泡補修では発泡接合で用いた低融点アルミニウム合金製プリカーサ(ろう材)を補修用フィラーとして用いる。まず、ポーラスアルミニウムの損傷個所にフィラーを挿入可能な加工を施したうえでフィラーを設置する(図2参照)。セル構造を破壊しないよう、ポーラスアルミニウム母材の固相線温度未満の高温でフィラーのみを局所的に加熱する。プリカーサであるフィラーのみが溶融し発泡する。ポーラスアルミニウム母材の損傷個所がポーラスアルミニウムフィラーで充填され、母材とフィラーは接合する。ポーラスアルミニウムの損傷をポーラスアルミニウムフィラーで補修するため、セル構造を破壊することなく補修できる。

一般的に、プリカーサを加熱してポーラスアルミニウムを作製するプロセスにおいては電気炉が用いられる。発泡補修におけるフィラー(プリカーサ)の加熱・発泡において、ポーラスアルミニウムの作製プロセスと同様に電気炉を用いようとする、大型電気炉を用いて全体を加熱することになる。電気炉を用いると、加熱する必要があるフィラーおよびその周辺の体積に対して、実際に加熱される体積があまりに大きく、無駄にコストや環境負荷を増大させる。そこで、本研究ではスポット熱源を用いた発泡補修を試みる。損傷のないポーラスアルミニウム、損傷を付与したポーラスアルミニウムおよび発泡補修を施したポーラスアルミニウムを試験片として作製する。これら3種類の試験片に機械試験を行うことにより、発泡補修したポーラスアルミニウムの強度が、損傷のないポーラスアルミニウムの強度近傍まで回復することを確

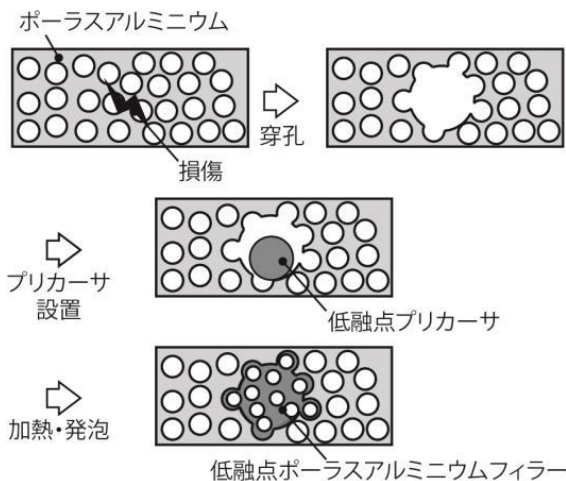


図2 発泡修復の模式図

認め、発泡補修の有用性を示す。より強固な補修を可能とするために、ポーラスアルミニウムフィラーがポーラスアルミニウム母材のセル構造に充填され、フィラーと母材が接合されるプロセスを明らかにする。本補修方法が確立されれば、ポーラスアルミニウム構造部材の長期利用が可能になりサステナビリティの向上に貢献できる。

### 3. 研究の方法

被補修材(試験片)としてポーラス純アルミニウムの直方体(15x15x50 mm<sup>3</sup>)を用意した。試験片の15x50 mm<sup>2</sup>平面中央にドリルを用いて穿孔し、欠陥(兼補修孔)を模擬した貫通孔を付与する。補修用フィラーとして、円柱状Al-Si合金製プリカーサを用意する。

フィラーを試験片の貫通孔に挿入し、スポットヒーティングトーチとして、赤外線イメージ炉およびTIG溶接機を用いて端部を加熱することで、フィラーを貫通孔内部で発泡させ、ポーラスAl-Si合金で貫通孔および貫通孔内の開放気孔を充填し、試験片セル壁とポーラスAl-Si合金セル壁を接合させた。この時のフィラーの流れの様子を高速度ビデオカメラで撮影し、セル壁同士の接合の様子を確認した。

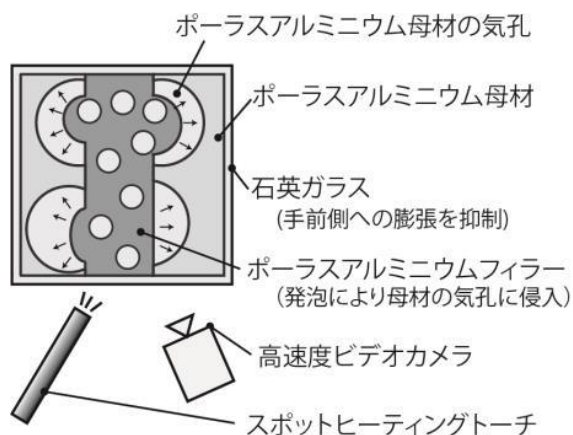


図3 発泡補修におけるポーラスアルミニウムフィラー流れの観察

### 4. 研究成果

・TIG溶接機を用いてフィラー端部を加熱して発泡補修を行う際、溶融し発泡中のフィラーの流れを観察することができた。高速度カメラを用いて溶融して発泡中のフィラーを観察した結果を図4に示す。今後、発泡中のフィラーの流れを観察・解析するとともに、フィラーセル壁と試験片のセル壁が接合する様子を観察する予定である。

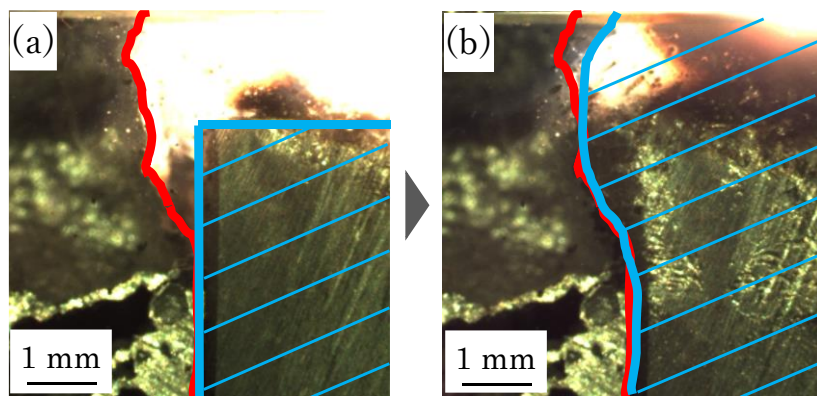


図4 高速度カメラを用いたフィラー発泡の様子(a)加熱直後、(b)フィラー溶融後。

・ポーラスアルミニウムは低強度であるため、緻密金属と複合して用いられることが想定される。そこで、補修孔にフィラーを挿入し、フィラーの片端部に熱伝導率が高く熱容量が大きい純アルミニウムブロックを接触させ、複合させる緻密金属を模擬し、TIG溶接機を用いてフィラー他端を局所加熱することで、実際に近い状態での発泡補修を試みた。比較のために純アルミニウムブロックの代わりに断熱材を接触させた場合の発泡補修も行った。純アルミニウムブロックを接触させた場合には、フィラーはほとんど発泡せず、発泡補修を行うことはできなかった。一方、断熱材を接触した場合には、補修孔内部で発泡し、発泡補修を行うことができた。緻密金属と複合したポーラスアルミニウム製の部材の欠陥について、局所加熱による発泡補修で補修することは困難であることが明らかとなった。

・赤外線イメージ炉を用いて発泡補修を施した試験片の断面観察結果を図5に示す。フィラーは補修孔内部で発泡していた。発泡フィラーは、試験片補修孔内部の開放気孔を完全に充填するには至っていなかった。発泡補修条件を最適化することにより、試験片補修孔内部の開放気孔をある程度充填することが可能と考えられる。フィラーと試験片のセル壁同士が接触している場所を光学顕微鏡で観察した結果を図6に示す。フィラーと試験片セル壁同士の界面は観察され



ず、冶金学的に接合されていることが確認された。界面が観察される場所も見られるものの、フィラーとセル壁の界面は冶金学的に接合しうる。TIG 溶接機を用いた発泡補修も同様の傾向が観察された。



図 5 赤外線イメージ炉を使って発泡補修した試験片の断面観察写真(緑円: 補修孔, 黄円: 光学顕微鏡観察部(図 5))

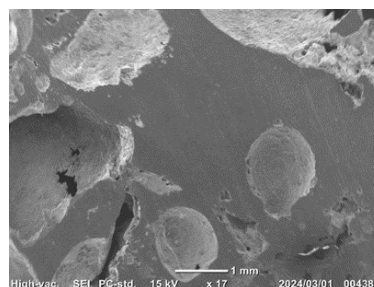


図 6 試験片セル壁とフィラーセル壁の接合部近傍の光学顕微鏡写真(図 4 黄円内部)

・赤外線イメージ炉を用いて発泡補修した試験片(Repaired)の補修強度を 4 点曲げ試験で評価した結果として曲げ荷重と変位の関係を図 7 に示す。比較のために、補修孔を施していない作製ままの試験片(Base Metal)と補修孔を付与した試験片(Drilled)の試験結果も同図にプロットする。発泡補修した試験片の最大曲げ荷重は、補修前に比べて約 50%高い。局所加熱による発泡補修により、ポーラスアルミニウム部材の強度が上昇することが明らかになった。しかしながら、発泡補修した試験片の最大曲げ荷重は、作製ままの試験片よりも低い。これは、フィラーが十分に発泡せず試験片のセル壁同士の冶金学的接合が不十分であったためと考えられる。発泡補修条件を最適化し、フィラーと試験片のセル壁同士の接触・接合が十分なされれば、補修強度の高い補修を達成可能と考えられる。TIG 溶接機を用いた発泡補修も同様の傾向が確認された。

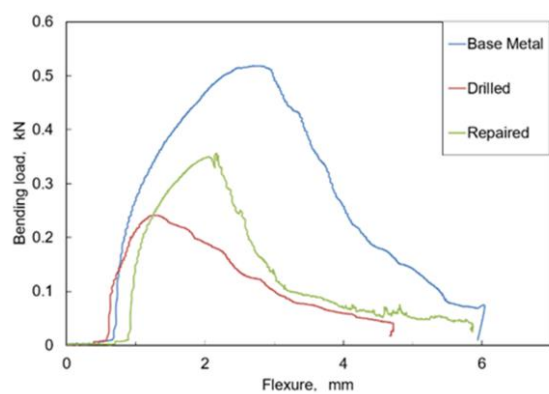


図 7 曲げ荷重と変位の関係

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 鈴木 良祐, 増淵 匠, 西田 進一, 荘司 郁夫, 半谷 禎彦, 藤井 英俊, 松原 雅昭	4. 巻 92
2. 論文標題 縦型双ロールキャストを用いたブリカーサ法によるポーラスアルミニウムの製作	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鑄造工学	6. 最初と最後の頁 577-582
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11279/jfes.92.577	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 Ryosuke Suzuki, Yoshihiko Hangai, Yusuke Asakawa, Ikuo Shohji, Hidetoshi Fujii and Masaaki Matsubara	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of Si Concentration of a Brazing Precursor on the Bonding Strength of Aluminum Foam Bonded via Foaming Bonding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 0件）

1. 発表者名 伊藤 勇人, 鈴木 良祐
2. 発表標題 光加熱を用いたポーラスアルミニウムの発泡補修
3. 学会等名 群馬ブロック研究・技術交流会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤原 敬士, 鈴木 良祐, 松原 雅昭, 簾谷 竜平
2. 発表標題 溶湯直接圧延法を用いて製作したポーラスアルミニウムの気孔形態に及ぼすTiH <sub>2</sub> 添加量の影響
3. 学会等名 日本材料試験技術協会 第296回材料試験技術シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鹿沼優人, 鈴木良祐, 半谷禎彦, 藤井英俊
2. 発表標題 TIGアークを用いた局所加熱によるポーラスアルミニウムの発泡補修
3. 学会等名 軽金属学会関東支部 2023 年度 第9回若手研究者ポスター発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 簾谷竜平, 鈴木良祐, 松原雅昭
2. 発表標題 溶湯直接圧延を用いたポーラスアルミニウム製作 における発泡剤添加量の影響
3. 学会等名 日本機械学会関東支部群馬ブロック研究・技術交流会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田貴也, 松原雅昭, 鈴木良祐
2. 発表標題 溶湯直接圧延を用いて製作した発泡アルミニウムに及ぼす増粘剤添加量の影響
3. 学会等名 日本材料試験技術 第288回材料試験技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 良祐, 浅川 友祐, 松原 雅昭, 半谷 禎彦, 荘司 郁夫, 藤井 英俊
2. 発表標題 Al-Si プリカーサの発泡を利用したポーラスアルミニウムの 補修
3. 学会等名 日本金属学会 2021 年春期 (第168 回) 講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木良祐, 浅川友祐, 松原雅昭, 半谷禎彦, 莊司郁夫, 藤井英俊
2. 発表標題 発泡補修における補修部材の気孔率制御
3. 学会等名 第140回春期大会 - 一般社団法人 軽金属学会
4. 発表年 2021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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関