

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05083

研究課題名（和文）レーザー加熱と炭化ホウ素融剤を用いた炭素系材料の口ウ付け技術の研究

研究課題名（英文）Research of welding methods of graphite composite by using B4C and a high power laser

研究代表者

正木 匡彦（Masaki, Tadahiko）

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：00360719

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）：本研究は、炭素系複合材料の溶接接合の可能性を探る一連の研究の一つであり、今回の研究助成の期間における研究では、焼結炭素に対してアルミニウムを添加した炭化ホウ素を用いることにより口ウ付けが可能であることを見出した。炭化ホウ素に対して微量のアルミニウムを添加することにより溶接部の組織が微細化し、接合強度が向上することが明らかになった。引張試験の結果では母材のグラファイトの強度の90%程度の強度となることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

グラファイト系の材料は軽量かつ高強度であるため航空機や自動車などの次世代材料として使用され始めているが、金属のような溶接による接合ができない点で応用範囲が限られてしまっていた。本研究はグラファイト系材料の溶接法を見出すことを目的としており、軽量化を求められる様々な機械への応用が可能である。

研究成果の概要（英文）：This research is one of a series of studies to explore the possibility of welded joints of carbon composite materials. In the research during the current grant period, it was found that brazing is possible by using boron carbide with aluminum. The addition of a small amount of aluminum to the boron carbide resulted in a finer microstructure in the weld zone and improved the joint strength. Tensile test results showed that the strength of the weld was about 90% of that of graphite, the base material.

研究分野：金属物理化学

キーワード：溶接接合 グラファイト 複合材料

1. 研究開始当初の背景

近年、燃費向上などの観点から自動車や航空機などの構造材料の軽量・高強度化が強く望まれている。カーボンファイバー強化樹脂 (C-FRP) はきわめて軽量かつ高強度であり、アルミやチタンなどの金属系の材料に比べ密度が $1/2$ 、比強度が 10 倍にも達しており、次世代の構造材料として様々な場所に用いられ始めている。近年では、国産の C-FRP を多用したボーイング社の 787 ジェット旅客機が日常的に運用され、社会的にも不可欠の材料となりつつある。

C-FRP は一般に炭素繊維をバインダー (エポキシ樹脂など) でモールドした後に焼成しており、バインダー部の耐熱温度 (数百°C) が使用できる上限温度になっている。そのためエンジン周辺の高熱部については依然として金属部材を使用しなくてはならず、さらなる軽量化の足かせとなっている。その一方で、ロケットエンジンのノズルなどの超高温環境に使用される耐熱性のカーボン系材料として、バインダーを完全に炭化させた炭素系複合材料である炭素繊維強化グラファイト (炭素繊維—炭素コンポジット, C-C コンポジット) やタール状の有機素材から焼成したグラッシーカーボンが開発されている。しかしながら、これらの材料は一体成型・焼結により作られるため大型の部品が作りやすく、大型機器の構造材料に使用するにはコストや精度の面に課題を有している。半田のような低融点の融剤 (フラックス) を用いることで炭素系複合材料の溶接による構造体形成が可能になれば、低コスト・高精度な小型部品のインテグレートによる大型構造物の構築が可能となり、自動車、航空機の軽量化をさらに進めることができる。

我々は、これまでの研究から純炭素と炭化ホウ素の合金をレーザーにより加熱することで完全溶融が実現することを見出ししてきた。炭素—ホウ素系の二元状態図は、図 1 に示すように炭素濃度 8% から 18% 付近に化合物 B_4C を有し、29% に共晶点を持っている。申請者による予備的な研究では、 B_4C -C の共晶組成において、いったん融解させたのちに急冷することにより B_4C 相とグラファイト相からなるサブミクロンスケールのラメラ構造が発現することを見出ししている。セラミックスにおいて金属合金のようなラメラ構造が得られる事は極めて新しい知見であり、これを利用することにより、カーボン材料に対するろう付け溶接というきわめて斬新な手法が確立できる可能性を有する。本研究はその知見を発展させ、実際のグラファイト系材料の接合の可能性を探るものである。

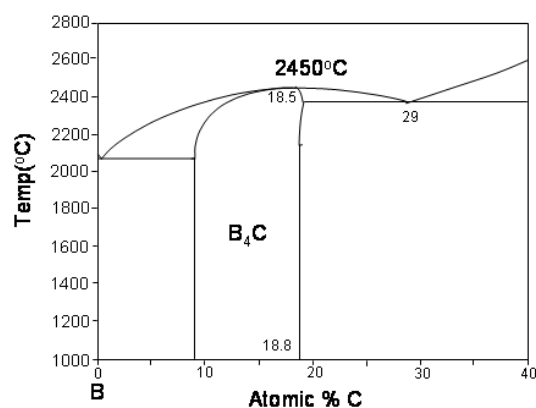


図 1 炭素-ホウ素 二元状態図

2. 研究の目的

本研究は、 B_4C -炭素合金を融材としたグラファイト系複合材料の溶接接合技術の確立を目的とする。材料工学的な視点からグラファイト系材料の溶融・凝固を解析し、従来の金属材料との共通点や差異を明らかにする。

これまでの研究において、焼結炭素やグラッシーカーボン上において B_4C -炭素合金の溶融実験を行ったところ、炭化ホウ素側への炭素の良好な溶け込みと微細な組織の形成が明らかになった。グラファイトと B_4C の合金においてこのような微細な組織が形成されることを見出したのはこれが初めてである。本研究は、これを更に発展させ、グラファイト材料間の接合に応用する方法を模索する。また、接合部の強度にも着目し、接合部における組織形成やより高い接合強度を得るための方法などについて明らかにする。

3. 研究の方法

いくつかの炭素系複合材料 (焼結グラファイト、炭素繊維—炭素コンポジット材料、グラッシーカーボンなど) と上記の B_4C -炭素合金を接触溶融させ、接合の際の溶け込みの状況や接合部の組織形成を調べた。炭素、ホウ素ともに高温での酸素との親和性が高いことから、この溶接実験において雰囲気中の酸素濃度の制御は極めて重要である。我々は、酸素除去装置を附属させたグローブボックス内にレーザー溶接機およびアーク溶接機を設置した。また、高速度ビデオカメラを設置し、溶融—凝固—接合の一連のプロセスの詳細な観察を行った。

初期の実験の配置としては、図 2 (左) に示すように棒状の端面に B_4C -炭素合金を付着させ、高出力レーザーを用いて接合部を局所的に加熱することで B_4C の炭素材料への溶け込みなどを観察した。続いて B_4C にシリコンやアルミニウムなど耐熱の炭素化合物 (SiC など) を形成する元素を添加し、その際の凝固組織変化を調査した。凝固組織の組織分布、元素分布などを SEM を用いて調査し、溶接条件と得られる凝固相から溶接の可否について検討した。

次に、図2（右）に示すように二本の焼結グラファイト棒（断面 5mm×5mm）の端面を合わせるように配置し、その接合部に炭化ホウ素をおいて突き合わせ溶接を試みた。レーザーでは入熱が不足したためアーク溶接機を用いて接合を行った。SEM による接合部の組織観察および引張試験機を用いた強度試験を行い、凝固組織と接合強度の関係を調べた。

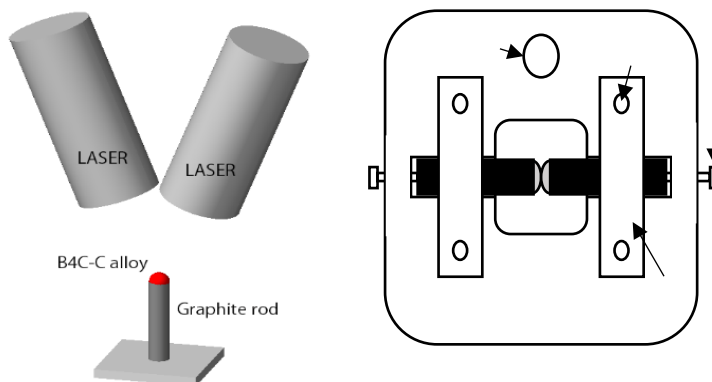


図2 溶接接合試験装置 左：レーザー溶接，右：アーク溶接

4. 研究成果

炭化ホウ素とグラファイトの濡れ性を向上させるために微量のアルミニウムを添加し、焼結グラファイト棒の先端にそれを付着させた状態でレーザー加熱をしたところ、良好な溶け込みと微細化した組織の形成が明らかになった。焼結グラファイト棒の突き合わせ溶接の際にはレーザー加熱では入熱が不足したため、アーク溶接に替えて試験を行った。アーク溶接により白熱したグラファイトの一部が蒸発したが、図3に示すようにグラファイトを接合することができた。溶接部に生じている物質についてX線構造解析をしたところ、 $B_{13}C_2$ および AlB_{12} が生成したことが確認された。溶接した試料の引張方向の接合強度について引張試験機を用いて測定した。炭化ホウ素単体を用いたときよりもアルミニウムを添加したほうが強度が向上したが、アルミニウムが過剰になると逆に強度が低下した。炭化ホウ素に対して質量比で数%程度のときが最も強度が高く、母材の焼結グラファイトの90%程度の強度が得られることが明らかになった。



図3 溶接した試料の接合部

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤田耕平, 正木匡彦, 鈴木進補
2. 発表標題 蛍光X線を用いた拡散係数のその場計測の可能性の検討
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子達彦, 正木匡彦
2. 発表標題 炭化ホウ素とアルミニウムを用いた焼結グラファイトの溶接接合
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会
4. 発表年 2022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
---------	---------