

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05122

研究課題名(和文) マントル物質のレーザその場溶岩生成に基づくセラミックス溶接の可能性探索

研究課題名(英文) Fundamental research in possibility of ceramics welding on the basis of in situ formation from mantle material to lava with high power laser

研究代表者

川人 洋介 (Kawahito, Yosuke)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門・上席研究員

研究者番号：70379105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：これまで溶接不可能とされてきたセラミックスが超高速レーザ溶接(アブレーションではなく局所溶融)で可能になるとの研究報告がScience誌に掲載され、世界にインパクトを与えた。しかし、数億円級の高価なレーザを使用した特殊な条件であった。本研究では、地球内部のマントルではあらゆる物質が一体化しており、その原理を解明すれば、溶接不可能材料であるセラミックス同士でも溶接のような一体化が可能になることに注目した。具体的には、マントル物質のレーザ照射時における局所溶融現象の解明とともに、その溶融特性を明らかにし、溶融特性をレーザで制御して、高出力レーザを用いた汎用的なセラミックス溶接の可能性を探索する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的独自性はマントル物質に注目していることである。マントルは、プレートテクトニクスで知られるように物質の地球規模大循環の一つを担っており、マントルには地球上のあらゆる物質が含まれる。言うなれば、あらゆる物質が地球内部のマントルでは一体化している。もしその原理を解明すれば、セラミックはもちろん地球上のあらゆる物質を一体化(接合)できる方法を発見する未知の可能性がある。このような考えは、溶接・接合の工学では世界発の考え方である。また、社会的意義として、あらゆる物質の接合の可能性を秘めている本研究は、溶接・接合の工学における創造的価値も期待できる。

研究成果の概要(英文)：Nowadays a research report published in Science made an impact on the world by showing that ultra-fast laser welding (local melting) enables weld for ceramics which had previously been considered impossible. However, this method was under special conditions using ultra-expensive lasers. In this research, we focused on the fact that all materials are integrated in the Earth's mantle. if the principle of the integration is clarified, it will be possible to integrate ceramics as if they were welded together. Specifically, we will elucidate the local melting phenomena of mantle materials induced by laser irradiation, clarify their melting characteristics, control the characteristics with a high-power laser, and investigate the possibility of more-general welding for ceramics with laser.

研究分野：溶接・接合

キーワード：レーザ 溶接 マントル物質 セラミックス X線その場観察 粒子法解析

1. 研究開始当初の背景

セラミックス溶接は製造には欠かせない重要な技術であり、耐熱性の低い樹脂や電子部品などの近くでセラミックスを溶接することはできないとされてきた。しかし、溶接不可能とされてきたセラミックスのレーザー溶接が可能であると2019年にUltrafast laser welding of ceramics (Penilla et al., Science 365, 803-808, 2019)にて研究報告がなされ、この研究成果は世界にインパクトを与えた。Science誌での報告内容は、超短パルス(フェムト秒: fs)レーザーとセラミックスに関する光と物質の相互作用で、アブレーションではなく局所的な溶融を引き起こす新現象の発見だった。ただし、高額な fs レーザを使用する特殊な条件で、汎用的ではないとの課題が存在した。そこで、“Science誌とは別の手法でセラミックスの局所的なレーザー溶融が実現できる、簡易かつ新たなセラミックス溶接法が存在するのか”が本研究の学術的「問い」とした。

2. 研究の目的

研究の着眼点はマントルである。マントルでは地球上のあらゆる物質が一体化しており、その一体化機構は、溶接・接合工学では興味深い対象である。本研究の目的は、マントル物質のレーザー照射時における局所溶融現象の解明とともに、その溶融特性を明らかにし、溶融特性をレーザーで制御して、高出力レーザーを用いた汎用的なセラミックス溶接の可能性を探索することである。

3. 研究の方法

(1) マントル物質の一体化機構の解明 (令和2年度、3年度):

マントル物質の試料選定を行い、その試料に対して高出力レーザーを照射し、溶融・再凝固時の物性変化について分析・評価を実施し、溶接・接合工学の視点を踏まえてマントル物質のようなあらゆる物質を一体化するのに必要な知見を明らかにする。

(2) セラミックスの局所溶融部の設計 (令和2年度、3年度):

レーザーによるセラミックスの局所溶融現象の解明を実験的・数理的な観点から進める。実験的アプローチでは、試料内部の溶融現象を明らかにする為、大型放射光施設 SPring-8 と X線位相コントラスト法 (Scientific Reports, 12944, 2018.) を用いて溶融現象とそれに伴う過程等をその場観察する。一方、数理的アプローチでは、局所溶融現象を扱う為に、レーザー加熱で発現する相変態、液相部の挙動および蒸発粒子の再付着過程等を考慮した数値解析粒子法のアルゴリズムを開発し、それと同時に大規模計算に必要な並列化も実施する。これらの実験的・数理的な結果を基に、セラミックスの局所溶融部のプロセス設計を試みる。

(3) 高出力レーザーを用いた新セラミックス溶接の可能性探索 (令和3年度、4年度、5年度):

汎用的で広い分野におけるセラミックス溶接を実現するためには、1)の知見および2)の設計指針に基づき、所定の溶接位置に局所溶融部を形成する溶接法の可能性を探索する。

4. 研究成果

(1) マントル物質の一体化機構の解明:

マントル物質の試料選定の一つとして、自然に存在するマントル物質であるマントルゼノリスを調査した。具体的には、島根県・隠岐の島に露出するマントルゼノリスの地質調査・岩石試料採取を行った。採取したマントルゼノリスには、黄緑色のかんらん石といった上部マントルを構成する鉱物が含まれており、10 mm程度のサイズであった。しかしながら、図1に示すようにマントル物質以外にも多量に含まれており、本研究の試料としては適当でないことがわかった。

そこで、市販されている米国アリゾナ産のかんらん石を採用した(図2参照)。かんらん石に50 W出力、2秒間レーザーを照射し、溶融・再凝固前後の変化について、微細部X線回折(XRD)測定にて評価を実施した。XRD測定結果から、試料のかんらん石の組成は $Mg_{1.8}Fe_{0.2}(SiO_4)$ であることが判明し、レーザー照射後には新たにFeOの存在が確認された。また、レーザー照射によって単結晶が微細化し、結晶面が異なる方向に向けた複数の結晶子から成る多結晶体に変化することもわかった。これらの結果から、マントル物質にレーザー照射にて溶融・再溶融させることは、化学的・結晶的に分離する方向に進むことが判明した。よって、マントル物質の一体化機構には、物質の溶融だけでなく、地球内部の超高压が必要と推察された。ただし、溶接では溶融は接合の必要な因子であり、その点も踏まえて研究を進めた。



図1: マントルゼノリス

図2: かんらん石

(2) セラミックスの局所溶融部の設計：

実験的なアプローチとして、セラミックス（酸化アルミニウムや窒化ケイ素）の高輝度レーザーによる局所溶融現象に対して、大型放射光施設 SPring-8 の高出力・高品質 X 線の位相強調を用いたその場観察を行った。観察の結果、金属と同様にキーホールを伴う局所溶融部が形成されると同時に、その周辺部から複数のクラックが発生することが初めて観測された。これは、溶接に必要な溶融部は形成されるが、その周辺部の複数のクラックによって、セラミックス溶接部が脆弱化することが示唆された（図3 参照）。

数理的なアプローチとして、レーザー加熱で発現する相変態、液相部の挙動および蒸発粒子の再付着過程等を考慮した数値解析粒子法のアルゴリズムを開発し、海洋研究開発機構が所有する地球シミュレータを用いて、OpenMP と MPI とのハイブリッド並列高速化を行い、当初より 2 桁以上の高速化を達成し、1000 万粒子程度の数値計算を可能にした。その結果、高出力レーザーの照射箇所にてキーホールが存在し、キーホール周辺部には 2000 K/ 0.1 mm 程度の局所かつ急峻な温度勾配が生じることが明らかになった（図4 参照）。そこでは大きな熱応力が生じることが推察される。

上記の実験的・数理的な結果から、キーホールを含む局所溶融部の周辺では、大きな熱応力によるクラック過程が発生し、セラミックス溶接部が脆弱化することがわかった。よって、高出力レーザーによる汎用的なセラミックス溶接プロセスの設計には、局所溶融部周辺の熱応力によるクラック生成過程を排除または緩和する必要がある設計指針が判明した。

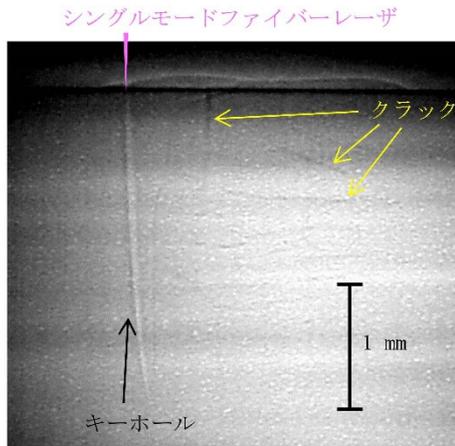


図3 Al₂O₃の局所溶融のその場観察結果

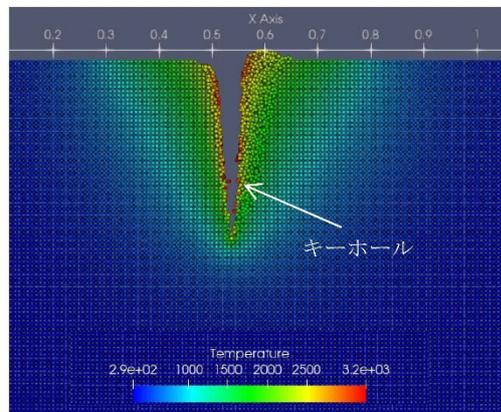


図4 Al₂O₃の局所溶融の数値計算結果

(3) 高出力レーザーを用いた新セラミックス溶接の可能性探索：

汎用的で広い分野におけるセラミックス溶接の実現において、超高压の利用は汎用性を著しく低下させるので、局所溶融部周辺の熱応力によるクラック生成過程を排除または緩和する対策に集中することにした。応力の緩和を狙い、局所溶融部にできるだけ大きい溶融部を形成することにした。具体的には、SiO₂（レーザーで溶融部の塊形成の実績有）を Al₂O₃ に混ぜたセラミック（マシナブルセラミックス）を採用した。マシナブルセラミックスに種々の条件でレーザー照射し、SiO₂の溶融特性に注目して、セラミックスの局所溶融部を形成する溶接法の可能性を探索した。しかしながら、熱応力による破壊過程を排除または緩和するのは難しいことが判明した。

そこで視点を変え、このクラック生成過程に基づく脆弱性に関する知見を活かし、『レーザー切断』における新たな可能性に結び付けた。その結果、熱応力による脆弱化を活用して、1m 鉄筋コンクリート（セラミックスは、ガラス、セメント、陶磁器などのような非金属・無機固体材料の総称であり、コンクリートもセラミックスに含まれる）に対して、レーザー切断を可能にした。本成果は世界初であり、Optics and Lasers in Engineering (IF:4.6) に 2024 年 6 月に掲載された（図5 参照）。

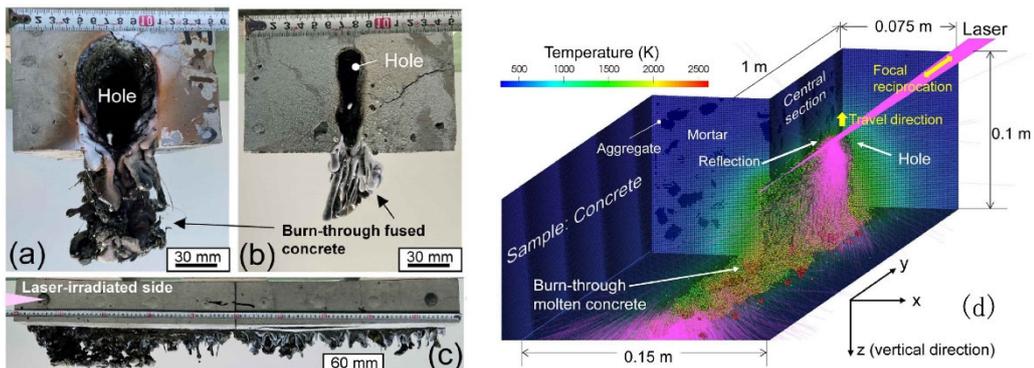


図5 本研究で得られた知見を活用した新たなレーザー切断法（実験結果、数値結果）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yosuke Kawahito, Hitoshi Ozaki, Michiko Mori, Yuya Kino, Tsuyoshi Nakamura, Hiroyuki Yoshida, Hiroshi Kawakami, Muneo Hori	4. 巻 180
2. 論文標題 Ultra high power laser cutting of 1-m reinforced concrete with gravity	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering	6. 最初と最後の頁 108258
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optlaseng.2024.108258	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0件

〔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
研究分担者	伊藤 元雄 (Ito Motoo) (40606109)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・調査役 (82706)	
研究分担者	嶋根 康弘 (Shimane Yasuhiro) (40638251)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(超先鋭研究プログラム)・准研究副主任 (82706)	
研究分担者	松井 洋平 (Matsui Youhei) (90756199)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(超先鋭技術開発プログラム)・特任技術副主任 (82706)	
研究分担者	鄭 美嘉 (Tei Mika) (00846438)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・作物研究部門・研究員 (82111)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	真砂 啓 (Masago Akira) (70510551)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門・特任研究員 (82706)	

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