

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14650

研究課題名（和文）粉体フラックス中のアークプラズマ-メタル-スラグ挙動の統合電磁熱流体解析

研究課題名（英文）Electromagnetic Thermo-Fluid Analysis of Arc Plasma, Metal and Slag Behaviors in Powder Flux

研究代表者

古免 久弥（Komen, Hisaya）

大阪大学・接合科学研究所・講師

研究者番号：80847989

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではサブマージアーク溶接中のキャビティ内部を実験観察するとともに、数値演算によってこの溶接現象を予測し、溶接条件が溶接現象に与える影響を明らかにすることを目的とした。その結果、実験観察においては、低電流域のサブマージアーク溶接中の溶滴移行を直接観察することに成功した。数値演算においては、サブマージアーク溶接現象特有の溶滴移行形態を再現することに成功し、サブマージアーク溶接中に壁面移行形態が生じるためには、熔融金属に働くローレンツ力とキャビティ内の圧力が重要であることを示唆した。また溶融池上のスラグ輸送についてもモデル化し、スラグが溶融池上を輸送される際に支配的となる駆動力を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果を活用することでサブマージアーク現象の理解が進み、サブマージアーク溶接施工の高度化が期待できる。そしてサブマージアーク溶接の施工技術が高度化することで、この溶接プロセスを用いて建造される大型構造物の生産能率向上が見込める。またこの溶接プロセスは電磁流体力学や粉体工学、材料工学などを含んでいる。したがって溶接分野だけではなく、これらの工学を取り扱う他分野においても、本研究で得られた知見が共有することができるため、本研究成果は学術貢献度も高いといえる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to clarify the influence of welding conditions on welding phenomena by experimentally observing the inside of cavities during submerged arc welding and predicting these welding phenomena by numerical simulations. In the experimental observation, molten metal droplet transfer during this welding at low welding currents was successfully observed directly. Developed numerical model succeeded in simulating the unique molten metal droplet transfer of submerged arc welding called the flux-wall guided transfer. Numerical results suggested that the Lorentz force and cavity pressure acting on the molten metal are important for this transfer to occur during the welding. Slag transport on a weld pool was also modeled, and the dominant driving force for slag transport on the weld pool was clarified.

研究分野：溶接工学

キーワード：アーク 溶接 流体力学 可視化

### 1. 研究開始当初の背景

橋梁や船舶は物流を支える重要な大型構造物であり、私達の生活になくてはならないものである。これらの大型構造物の建造の際、部品同士の接合には強度や気密性に優れた溶接が用いられる。中でも本研究の対象でもあるサブマージアーク溶接プロセスは

① 熱効率が高く、深い溶込みが得られる

② 大電流で多量のワイヤを溶融できるため、厚板でも少ない溶接回数で接合が完了するといった特長を有する溶接プロセスである。近年ではデジタル制御可能な溶接電源が登場し、電流電圧波形制御によるこの溶接プロセスの効率化が期待されている。

しかしながら図1の模式図に示すように、この溶接プロセスではアークプラズマ（熱源）、溶融したワイヤ（溶滴）、溶融した母材と溶滴からなる溶融池が、フラックスと呼ばれる粉体やフラックスが溶融・再凝固したスラグに覆われている。そのため外部からの溶接現象の観察が困難であり、溶接技能者は溶接後の接合部の良し悪しから経験と勘で制御パラメータを設定するしかない。すなわち、優秀な制御器たる溶接電源が既に市販され普及しているにもかかわらず、肝心の制御対象であるサブマージアーク溶接現象がブラックボックスのままなのである。国内外ではこの溶接現象の実験観察が行われているが、実験的制約のためその全貌を明らかにすることは困難であり、数値演算による現象解明が待たれている。

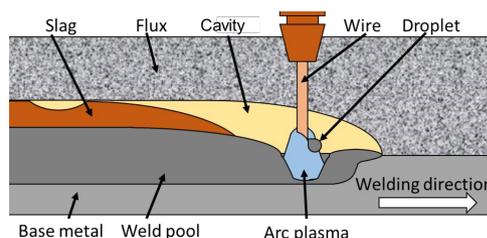


図1 サブマージアーク溶接の断面図。

### 2. 研究の目的

本研究では、実験観察においてサブマージアーク溶接中のキャビティ内部を観察するとともに、オリジナルの数値演算によってこの溶接現象を予測し、溶接条件が溶接現象に与える影響を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

実験観察においては、図2に示す実験系を構築し、低電流を用いたサブマージアーク溶接中のキャビティ内部の様子を観察した。溶接電源と溶接トーチはガスメタルアーク溶接用のものを使用し、シールドガス流量を0 L/minと設定した。フラックスは低電流域用の溶融フラックスを使用し、溶接前に母材上に散布した。観察部分には金属製のトンネルを設置し、純炭酸ガスを導入した。そしてトンネル内を溶接トーチが通過する様子を、NDフィルタを取り付けた高速ビデオカメラによって観察した。

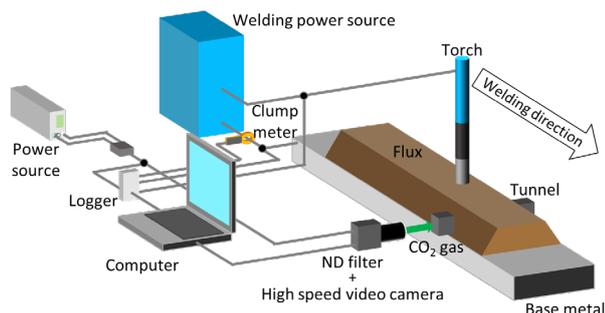


図2 直接観察による溶滴移行現象の観察。

数値演算においては、サブマージアーク溶接特有の溶滴移行形態である壁面移行形態を粒子法によってモデル化し、再現することを試みた。このモデルでは溶融金属に働く駆動力として、ローレンツ力、気流とのせん断力、キャビティ内の圧力を考慮した。これらの駆動力の計算のために必要なアークプラズマの数値データについては、格子法による数値演算モデルを用いて求めた。そして溶融金属に働く各駆動力を定量的に比較し、この移行形態の形成に必要な要因を調査した。

また研究代表者がこれまで構築してきた粒子法を用いたモデルを拡張し、溶接中に生じるスラグを流体として取り扱いつつ、溶融金属の流動も解く二流体モデルを構築した。このモデルでは溶融金属表面の酸化反応や脱酸成分による還元を考慮しており、溶融金属表面のスラグ流動過程をシミュレートした。このモデルも熱源には格子法によって求めたアークプラズマの定常計算結果を使用した。

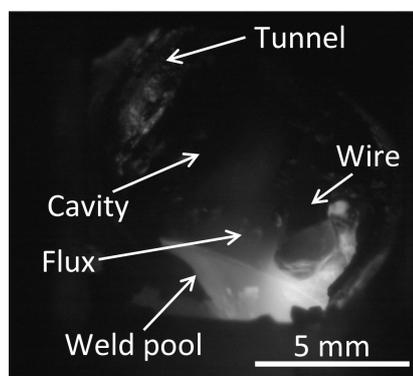


図3 サブマージアーク溶接中のキャビティ内部の可視化。

### 4. 研究成果

図3に、図2の実験系にて得られたトンネル内部の様子を示す。溶接電流は340 A、アーク電圧は34 Vと設定した。トンネル内部で生じている溶滴移行現象の他に、溶融池の流動の一部や、

キャビティ壁面，キャビティ内部を落下するフラックスを可視化することに成功した．図4はキャビティ内部で生じた溶滴移行を示している．図より，ワイヤ径よりも大きな溶滴が成長し，固液界面付近から離脱して溶融池へと輸送される様子が明らかとなった．

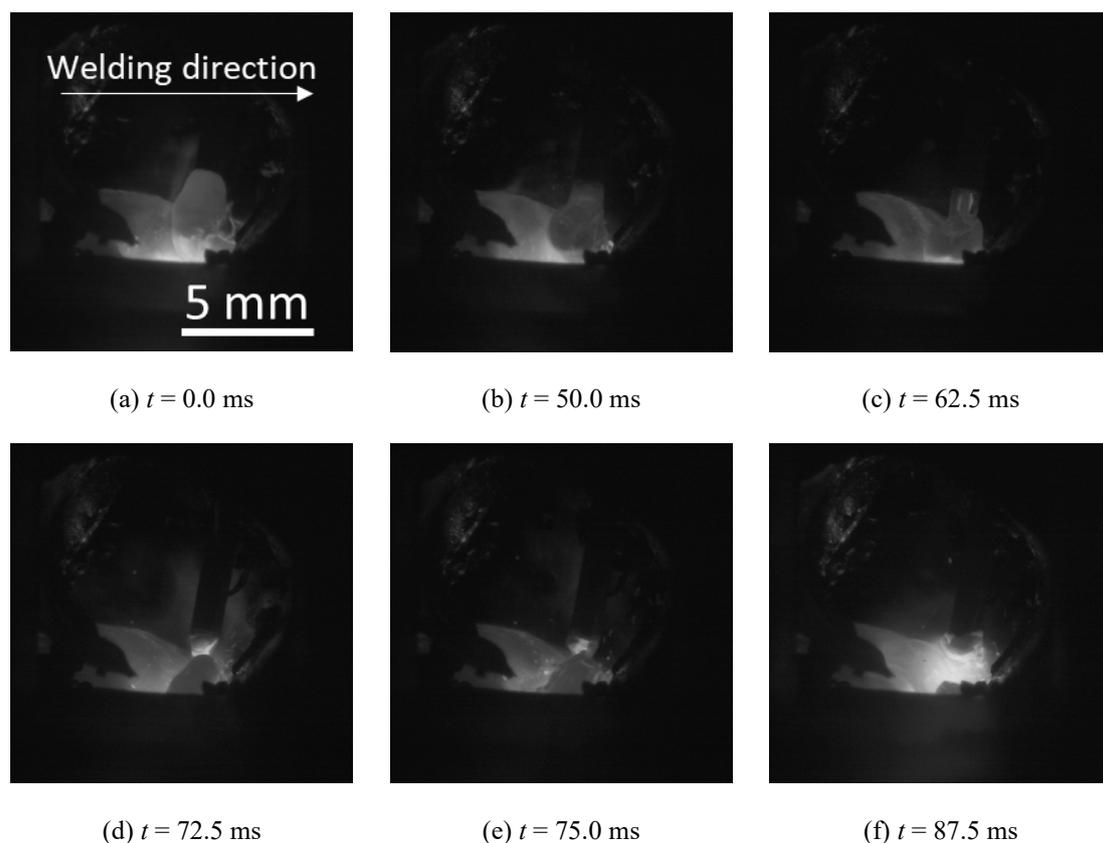


図4 キャビティ内部で生じる溶滴移行現象．

図5に，粒子法を用いた数値演算モデルによるサブマージアーク溶接中の溶滴移行を示す．濃い灰色がワイヤと溶融金属，茶色がキャビティを模した壁面であり，時刻は計算開始からの時間を表している．この演算では粒子の温度変化を解いておらず，図5(a)に示した赤の実線よりワイヤ粒子が下に移動すると，相変化して流体の運動を開始するものと取り扱った．

数値演算の結果，実際の壁面移行形態と同様に溶融金属液柱がキャビティ壁面へと衝突し，溶滴が離脱する壁面移行形態を再現することに成功した．また図6はこのモデルを用いて，溶融金属に働く駆動力を1つずつ考慮しなかった場合の数値演算を行った結果である．これらの数値実験の結果，ローレンツ力やキャビティ内の圧力を考慮しなかった場合は壁面移行形態とならなかったが，気流とのせん断力を考慮しなかった場合はこれら全ての駆動力を考慮した場合と同様に，壁面移行形態が再現された．したがって，サブマージアーク溶接中に壁面移行形態が生じるためには，溶融金属に働くローレンツ力とキャビティ内の圧力が重要であることが示唆された．

図7に示すのは，溶接中に生じるスラグを流体として取り扱いつつ，溶融金属の流動も解く二流体モデルによってシミュレートした溶融池とスラグの形成過程である．図は溶接開始から5秒後の演算結果であり，濃い灰色，薄い灰色，青色，赤色の粒子はそれぞれ母材，再凝固金属（溶接ビード），溶融金属，スラグを表している．構築した数値演算モデルにより，形成されたスラグが溶融池上を漂い，後方へと輸送される過程が明らかとなった．また図は数値演算結果から得られた，スラグ輸送を決定する溶融池駆動力の分布である．その結果，熱源近傍においてはマランゴニ効果による力や気流とのせん断力，溶滴移行によってスラグが輸送され，溶融池の後方においてはマランゴニ効果による力で輸送されていることが明らかとなった．

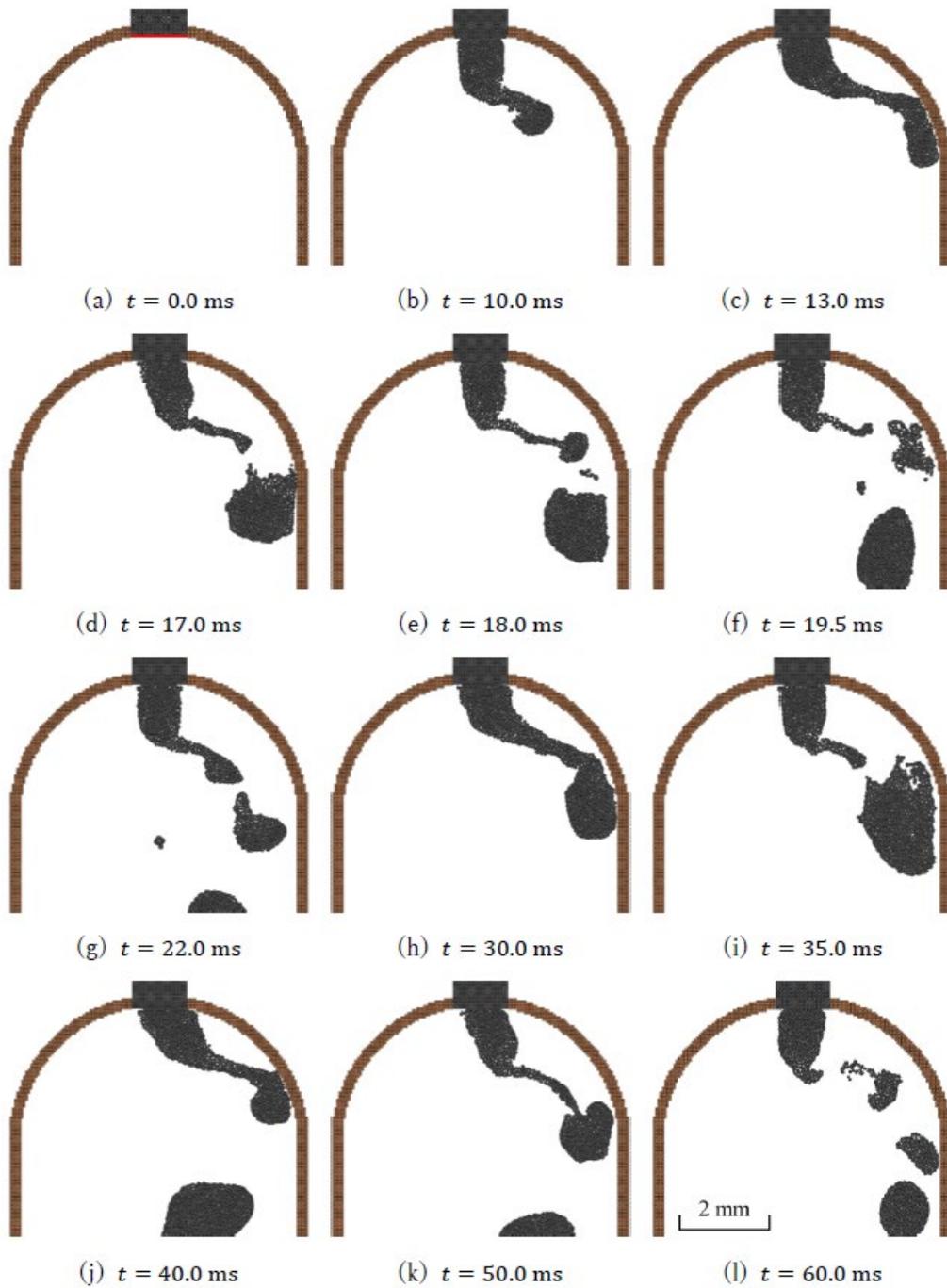


図5 サブマージアーク溶接中の壁面移行形態.

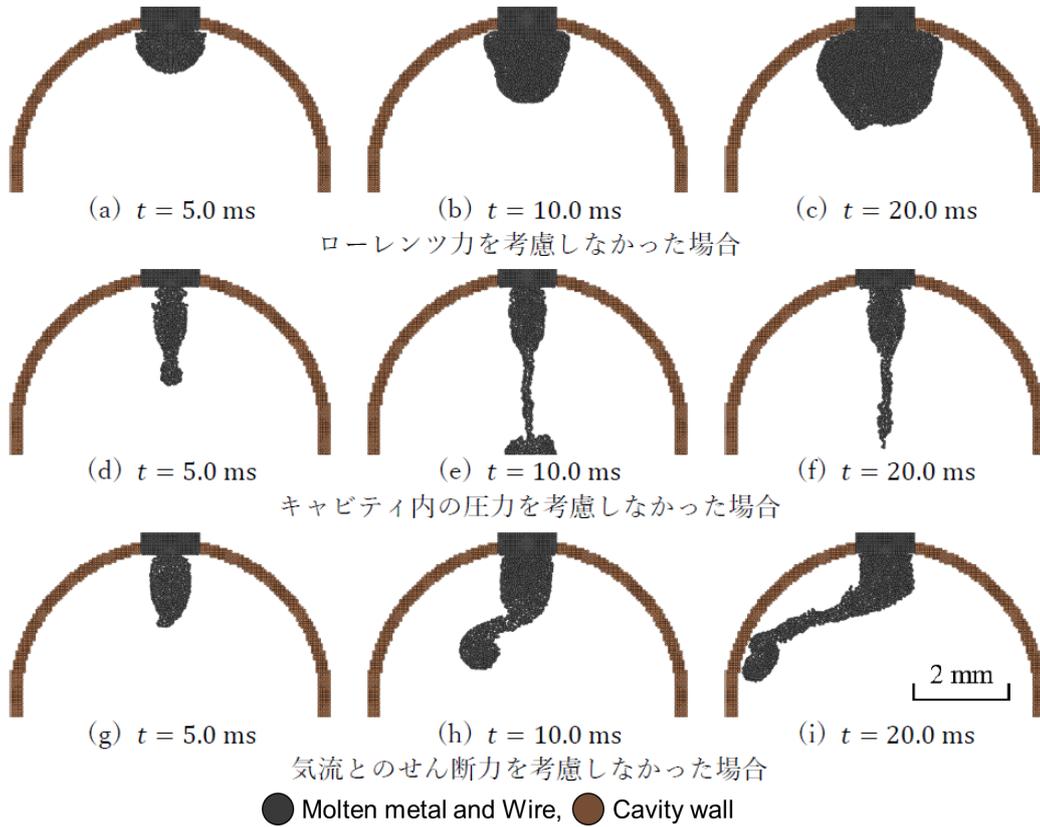


図6 溶融金属に働く各駆動力をカットした数値演算結果.

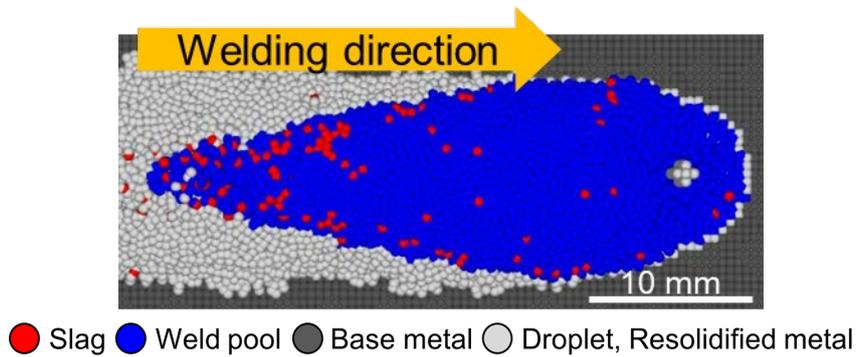
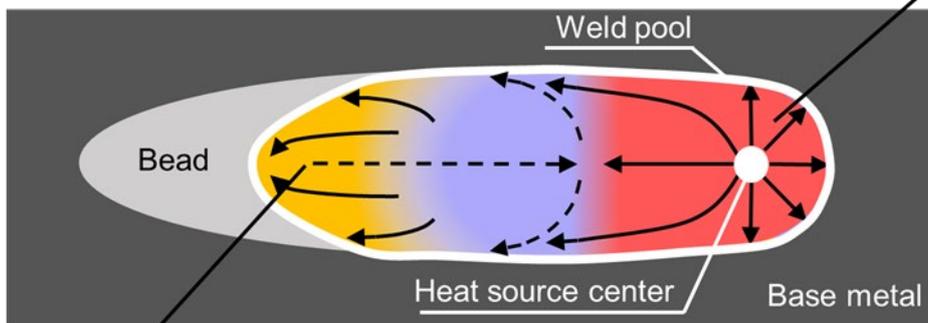


図7 溶融池表面に形成されたスラグ<sup>1)</sup>.

Transferred by force due to Marangoni effect, shearing force and droplet transfer



Transferred by force due to the Marangoni effect

図8 溶融池表面でのスラグ輸送を決定する溶融池駆動力<sup>1)</sup>.

参考文献

- <sup>1)</sup> M. Fukazawa et al.: Three-dimensional numerical simulation of slag formation and transfer processes during metal active gas welding using particle method, IIW joint intermediate meeting Commission I, IV and XII, (2023), Doc.XII-2568-2023 / IV-1534-2023 / I-1529-2023.

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 古免 久弥, 森本 堅太, 田中 学, 寺崎 秀紀	4. 巻 12
2. 論文標題 サブマージーク溶接中の壁面移行形態の二次元粒子法シミュレーション	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 スマートプロセス学会誌	6. 最初と最後の頁 91 ~ 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7791/jspmee.12.91	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5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 深澤 孝公, 古免 久弥, 茂田 正哉, 田中 学
2. 発表標題 粒子法シミュレーションを用いたマグ溶接時のスラグ輸送過程の支配的因子の調査
3. 学会等名 (一社)溶接学会 2021年度 秋季全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古免 久弥
2. 発表標題 SPH粒子法に基づくアーク接合シミュレーション
3. 学会等名 (独)日本学術振興会第153委員会第151回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hisaya Komen
2. 発表標題 Particle-based simulation of molten metal behavior during arc welding process
3. 学会等名 The 1st Okinawa-International Conference on Welding and Allied Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takamasa Fukazawa, Hisaya Komen, Masaya Shigeta, Manabu Tanaka, Mitsugi Fukahori, Naoko Saito, Tetsuo Yamada
2. 発表標題 Particle-based Simulation of Slag Transfer Process During Metal Active Gas Welding
3. 学会等名 Visual-JW 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takamasa Fukazawa, Hisaya Komen, Masaya Shigeta, Manabu Tanaka, Tetsuo Yamada, Naoko Saito, Mitsugi Fukahori
2. 発表標題 Three-dimensional numerical simulation of slag formation and transfer processes during metal active gas welding using particle method
3. 学会等名 IIW Commission I, IV, XII Intermediate Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023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