

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22246095

研究課題名（和文） 溶接アークプラズマ中の金属蒸気の元素分離ダイナミクスと微粒子の生成過程メカニズム

研究課題名（英文） Dynamics of elemental separation of metal vapor in arc plasma during welding and mechanism of fume formation

研究代表者

田中 学 (TANAKA MANABU)

大阪大学・接合科学研究所・教授

研究者番号：20243272

研究成果の概要（和文）：ものづくりに必須の基盤技術でありながら、未だ「巧みの世界」と言われるアーク溶接技術を科学に立脚した技術に発展させる目的で、(1)アーク溶接プロセスで生じるプラズマ中の金属蒸気の元素分離とそれに伴う金属クラスター微粒子の生成過程を可視化するとともに、(2)アーク溶接プロセスの総合的な数値計算シミュレーションを実施することにより、(3)金属蒸気の元素分離ダイナミクスと金属微粒子の生成過程メカニズムを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The future goal of this research is to innovate on arc welding technology from “skill” to “science”, because arc welding technology is necessary as a basic technology for manufacturing industries. The approach of this research for getting the future goal is firstly (1) the visualization of metal vapor behavior and fume formation in arc plasma during welding and also is secondary (2) the numerical simulation of total system of arc welding process. From both results of experiments and calculations, (3) dynamics of elemental separation of metal vapor in arc plasma during welding and mechanism of fume formation are revealed.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2010年度 | 23,000,000 | 6,900,000 | 29,900,000 |
| 2011年度 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |
| 2012年度 | 2,000,000 | 600,000 | 2,600,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 27,300,000 | 8,190,000 | 35,490,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学、材料加工・処理

キーワード：接合・溶接

1. 研究開始当初の背景

アーク溶接プロセスでは、アークプラズマによる局所的な加熱・溶融・凝固・冷却という一連の過程をたどり材料の接合部が形成される。しかし、その過程には、電極加熱と電子放出、高温プラズマと熔融金属との相互作用、熔融金属の流動による熱輸送と熔融プール形成など、高々 1 cm^3 の世界で、数秒の時

間に、固体、液体、気体、プラズマの4つの状態が混相する複雑なシステムが成り立っている。温度としては2万度近い高温のアークプラズマから3千度近いタングステン電極、2千度近い溶鋼、そして室温と極めて広範な温度範囲を呈している。また、熔融プールとなっている溶鋼からは鉄やマンガン等の金属蒸気が発生し、アークプラズマの状態

をいっそう複雑なものとしている。未だ「巧みの世界」と言われるように、アーク溶接プロセスで生じる現象を正確な科学の言葉で説明できる者は世界のどこを探してもいない。すなわち、溶接技術は、ものづくりのプロセスに必須の基盤技術でありながら、ノウハウや生産現場の知恵に支えられた技術であり、熟練を必要とする技術である。これが溶接技術における最大の問題であり、今後の課題である。過酷でグローバルな国際競争の中で、いま日本のものづくりにとって必要なのは、ものづくりの一つ一つのプロセスを科学的に十分に理解し、科学に基づく徹底した高能率化、省エネルギー化、高機能化をはかり、ものづくりプロセス技術の高度化を絶え間なく推し進めることである。したがって、新興工業国の労働力を退け、他の先進工業国の技術を打破するには、溶接技能の伝承よりも科学に立脚した溶接技術が必要である。

2. 研究の目的

ものづくりに必須の基盤技術でありながら、未だ「巧みの世界」と言われるアーク溶接技術を科学に立脚した技術に発展させるため、アーク溶接プロセスで生じるプラズマ中の金属蒸気の元素分離とそれに伴う金属クラスター微粒子の生成過程を可視化するとともに、アーク溶接プロセスの総合的な数値計算シミュレーションを実施することにより、金属蒸気の元素分離ダイナミクスと金属微粒子の生成過程メカニズムを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

アーク溶接プロセスで生じる動的な金属蒸気の元素分離とそれに伴う金属クラスター微粒子の生成過程の時間変化を実験的に可視化するため、高感度・高速度アークプラズマ診断システムを構築した。本システムは、対物レンズ、回折格子分光器、結像レンズ、高速度デジタルビデオカメラ、パルス YAG レーザ、シート光学系、2次元デジタル検出器、ならびに画像処理用パソコンによって構成されている。分光の波長分解能は 0.4nm であり、標準の撮影速度は毎秒 500 コマとした。

一方、タングステン電極の表面温度を測定するため、高速度二色放射温度計測システムを用いた。対物レンズから入射した高温物体の熱放射光を小型の画像分光器によって 2 分割し、それぞれが異なる 2 つの波長の干渉フィルター（中心波長 950nm, 980nm, 共に波長分解能 6nm）を通過して、1 つの高速度デジタルビデオカメラの素子表面で結像して録画される。高速度デジタルビデオカメラで撮影された 2 波長の画像データの相対強度比から、プランクの放射則に従い温度データが導かれる。

なお、溶接電源はインバータ制御式アーク溶接機を用いた。

4. 研究成果

(1) 金属蒸気の元素分離

① 金属蒸気の可視化

図 1 は、ステンレス鋼のアーク溶接を行った場合のヘリウム (He I)、鉄 (Fe I)、クロム (Cr I)、マンガン (Mn I) の各元素 (原子) の線スペクトル画像であり、特に、溶接開始 0.5 秒後、5 秒後、10 秒後の場合を抜き出して整理したものである。なお、実験で使用したステンレス鋼には、鉄以外に、18.2 wt% のクロムや 0.86 wt% のマンガンなど、他の元素も含まれている。ヘリウムの線スペクトルは時間が経つにつれて、明らかに弱くなっていくことがわかる。逆に、クロムとマンガンの線スペクトルは、時間とともに強度が増していることがわかる。一方、鉄の線スペクトルは、溶融池表面のごく近傍においてのみ観察されるのが特徴である。これらの結果をまとめると、母材の溶融池の形成と成長とともに、溶融池表面から少なくともクロムとマンガンがアークプラズマ中に浸入する。クロムやマンガンなどの金属原子は、シールドガスのヘリウム原子に比べてイオン化エネルギーが非常に小さい。このため、高温のアークプラズマ中で簡単にイオンとなり、プラズマ中にたくさんの電子を生むことになる。結果的に、プラズマの電気伝導率が上昇し、ジュール加熱の低下によってアークプラズマの温度が低下することになる。ここで、ヘリウムの線スペクトルは、励起エネルギーが高い

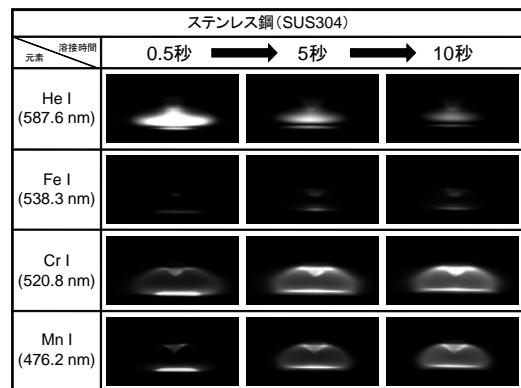


図 1 ステンレス鋼のアーク溶接

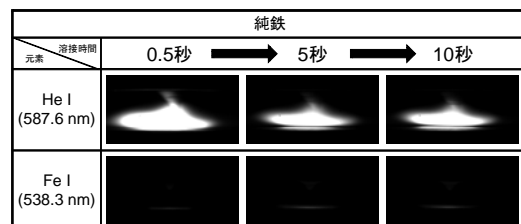


図 2 純鉄のアーク溶接

ため、2万度を超える高温において高い強度を有するが、1万度以下のプラズマではほとんど放射されない。したがって、アークプラズマ中へのクロムやマンガンの蒸発が原因となってプラズマ温度が徐々に低下し、その温度低下に伴ってヘリウムの線スペクトルの強度が弱くなっていったものと考えられる。

さて、次に図2は、母材を純鉄に変更して、アーク溶接を行った場合である。純鉄からはクロムやマンガンの蒸発はないので、ヘリウムと鉄のそれぞれの線スペクトル画像のみを示している。ここで、ヘリウムの線スペクトル画像に注目してもらいたい。溶接開始直後の0.5秒後のみ線スペクトルの強度が若干強いが、その後、図1のように時間の経過とともに低下することはなく、溶接終了の20秒後までほぼ一定の強度を保っていた。この時の鉄の線スペクトルは、図にみるように、熔融池表面のごく近傍においてのみ観察された。これは、図1と図2の結果をまとめると、明らかに鉄がアークプラズマの中心部まで浸入していないことを示している。

②電極表面およびスマットの分析

図3は、ステンレス鋼の20秒間のアーク溶接を行った後、エネルギー分散型X線分析装置(EDAX)によってタングステン電極表面の元素組成分析を行った結果である。左側が走査型電子顕微鏡(SEM)写真、右側がクロムの元素マッピング分析結果である。図から明らかなように、電極表面にはクロムが付着している。ただし、注目すべきポイントは、電極先端から約1.8mmの位置まではクロムが見られず、1.8mmより離れた位置においてク

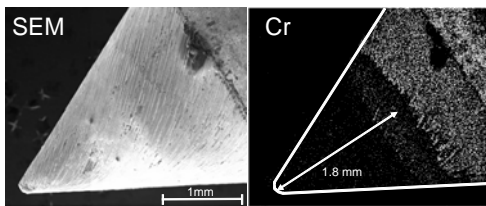


図3 アーク溶接後の電極表面

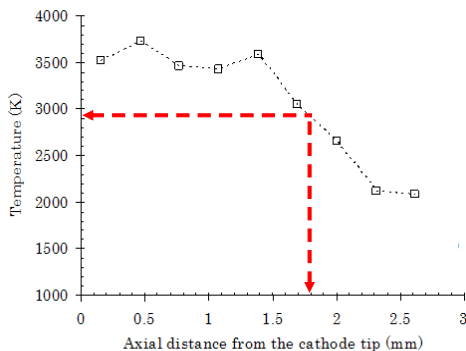


図4 実験計測による電極表面温度分布

ロムの存在が明瞭に示される点である。なお、同様に鉄とマンガンの元素マッピング分析を行ったものの、マンガンに関しては均一に付着していたが、検出される量はごくわずかであった。また、鉄に関しては検出できなかった。

図4は、高速度二色放射温度計測システムを用いて測定した、ステンレス鋼の静止ティグ溶接中のタングステン電極表面の温度分布である。電極先端部では約3,500Kに達しており、電極先端から1.8mmの位置において約3,000Kまで低下するものの、2.6mmの位置においても約2,100Kの高温を保持している。ここで、今まで着目してきた鉄、クロム、およびマンガンの沸点を調べてみると、それぞれ3,160K、2,933K、2,305Kであった。すなわち、図3の電極表面の元素マッピング分析結果と比較すると、図4より電極先端から1.8mmの位置で約3,000Kになっていることから、沸点以下の温度になる領域にクロムが付着していることがわかる。つまり、プラズマ中に金属元素が存在していれば電極表面の沸点以下の領域に付着することが可能と言える。一方、マンガンでは、その沸点が2,305Kと低いため、2,100Kを超える高温の電極表面には付着が難しかったものと考えられよう。しかしながら、鉄に関しては、約1.6mmの位置で鉄の沸点と同程度の3,200Kになるが、

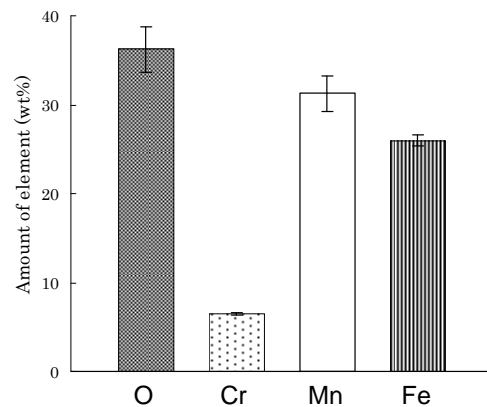


図5 マットのEDAXによる定量分析結果

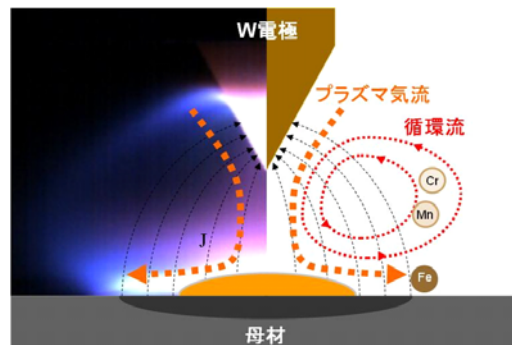


図6 元素分離を伴う金属蒸気挙動

クロムと同様の傾向は見られなかった。このことから、鉄はプラズマ中にほとんど存在していないことが明らかになった。

次に、ステンレス鋼の 20 秒間のアーク溶接を行った後のスマットの定量分析を行った。スマットとは、溶接後に母材表面に付着している黒いスス状の金属クラスター微粒子のことである。図 5 に EDAX によって元素分析を行った結果を示す。この定量分析結果から、プラズマ中にほとんど存在していなかった鉄が多く含まれていることが明らかになった。

③金属元素分離

以上の一連の実験結果から、図 6 に示すような金属蒸気挙動が存在することが示された。すなわち、母材の溶融池から発生した金属蒸気は、その大部分が高速のプラズマ気流によって母材表面に沿ってアーク外周域へ吐き出されるが、一部はプラズマ気流の上層側に位置する循環流に乗ってタングステン電極側まで輸送されるものと考えられる。

すなわち、溶融池から鉄、クロム、マンガンなどステンレス鋼に含まれる多種の金属元素が蒸発する。ここで、クロムやマンガンのような金属蒸気圧の高い元素については、容易にプラズマ気流を横切って循環流に入り込めるものと考えられる。加えて、クロムに関しては、イオン化エネルギーが他の元素よりも低いため、より低温域でプラスの電荷を帯びたイオンとなりやすく、アークの電界による拡散によってプラズマ中の循環流に到達しやすいものと推察される。しかしながら、鉄に関しては、蒸気圧の低さからプラズマ気流を横切って循環流に到達することが困難となり、そのため、プラズマ気流によって溶融池表面に沿ってアーク外周域へ吐き出されるものと考えられよう。したがって、プラズマ中心部へ輸送される鉄はほとんどなく、アーク外周域で急速に冷却される結果、核生成・凝縮・凝集を経て微粒子を形成し、スマットとなって母材表面に堆積するものと考えられる。

以上の議論は、ステンレス鋼を溶接した際に発生する金属蒸気がアークプラズマ内に侵入するものの、元素の種類によってアークプラズマ中で分離されることを意味している。すなわち、鉄は秒速 100 メートルを越える高速のプラズマ気流によって溶融池表面近傍に沿って吐き出されるが、クロムやマンガンはプラズマ気流によって吐き出されずにプラズマ中を上方へ環状的に泳動し、タングステン電極に達する。ほぼ同じ質量の元素でありながら、アークプラズマ中での挙動の違いは劇的である。アーク溶解による金属精錬については古くから示されているが、アークプラズマを媒体とした金属元素分離の現象が可視化されたのは世界で初めてである。

(2) 理想的な一次元流れ場における金属クラスター微粒子生成の可視化

①一次元流れ場の創成

図 7 に実験装置の構成図を示す。中心に貫通穴の開いた水冷銅陽極を製作し、アーク溶接トーチのノズルを押し付ける形で設置した。水冷銅陽極側面に空いた穴からヒューム（金属クラスター微粒子）の原料となる金属ワイヤを挿入し先端を溶融させることで金属蒸気を発生させる。また、水冷銅下端からはステンレス管を接続し、不活性雰囲気中、かつ、理想的な一次元流れの中でヒュームを発生・成長させることが可能となっている。

②数値解析モデルの妥当性評価

実験観察の結果、金属蒸気圧が高くなるほど生成する金属微粒子径が増大し、一方、冷却速度が増加するほど生成する金属微粒子径が低下することが実験的に明らかになった。これらの定量的な実験結果と同じ入力条件で粒子生成の数値計算シミュレーションを行った結果、双方ともよい一致を示した。以上のことから、本研究で構築した数値解析モデル化の妥当性が確認された。

(3) 金属微粒子の生成過程メカニズム

図 8 は、本研究で構築したアーク溶接の数値計算シミュレーションの結果である。「電極-アーク-母材」を同時に解く電磁熱流体モデルであり、この場合、特に金属蒸気の発生量が多いガスメタルアーク溶接の場合を取り上げた。電極ワイヤ端の溶滴表面からと母材の溶融池表面からの金属蒸発、ならびに溶滴移行を合わせて考慮に入れている。図の左側が温度分布を示し、右側が鉄蒸気濃度分布（モル濃度）を示している。アークプラズマの最高温度は、溶滴を包むように中心軸か

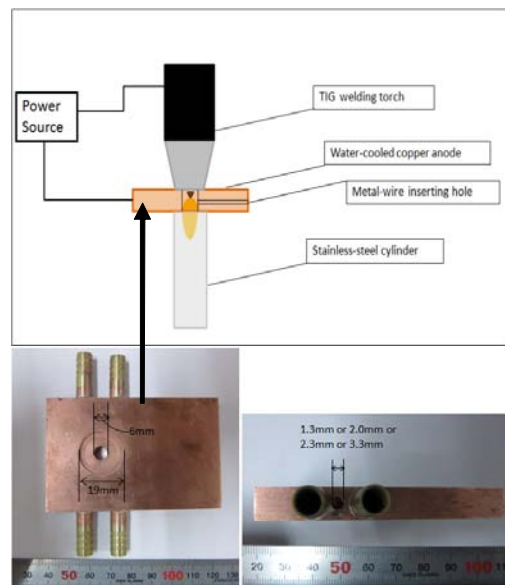


図 7 一次元流れ場によるヒューム生成

らずれた位置でみられ、約 16,000K に達している。また、アークプラズマ中には、ワイヤから母材に向けて秒速数百メートルに達する高速のプラズマ気流が存在している。このプラズマ気流は、溶滴表面から発生した鉄蒸気をアーク中心部に導き、その後、溶融池表面に沿って半径方向のアーク外部へ吹き出す役割を果たしている。この場合、アーク中心部で鉄蒸気濃度が最大となり、モル濃度で約 40% に達している。なお、溶融池表面からの鉄蒸気の発生は少なく、アーク中心部の鉄蒸気のほぼ全てが溶滴表面からの鉄蒸気である。プラズマ気流によってアーク外部に吹き出された鉄蒸気は、シールドガスのアルゴンによって急激に稀釈され、図中の位置 2 (アークプラズマ温度は約 3,000 K) では、既に 100 ppm (0.01%) 程度まで希薄になっている。

図 9 は微粒子生成の数値計算シミュレーションの結果である。図 8 のアークプラズマ温度、プラズマ気流速度、鉄蒸気濃度の情報をもとに、過冷却下における鉄蒸気の過飽和状態に伴う核生成・凝縮による一次粒子の生成と成長、ならびに生成した一次粒子同士の凝集による二次粒子の成長をダイナミックにビジュアル化した。各図の左上部に明示したように、「位置 1」、「位置 2」、「位置 3」は、それぞれ図 8 の各位置で生成されるヒュームの最終形態である。位置 2 および位置 3 では、プラズマ気流によって稀釈された鉄蒸気から生成されるヒュームを示しており、数から数十ナノメートル程度の微細な一次粒子がクラスターを形成しているのが特徴である。これは、溶滴表面から蒸発した鉄蒸気が高速のプラズマ気流に乗った場合、アーク柱を經由してアーク外周に吹き出されるが、その際にはシールドガスによって稀釈され、鉄蒸気濃度が大きく低下した結果、核生成す

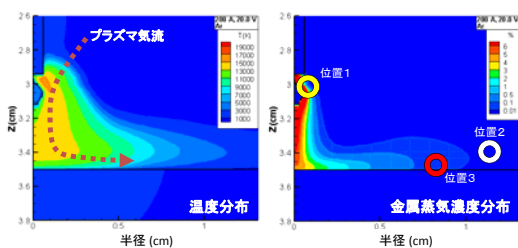


図 8 アーク溶接の数値計算シミュレーション

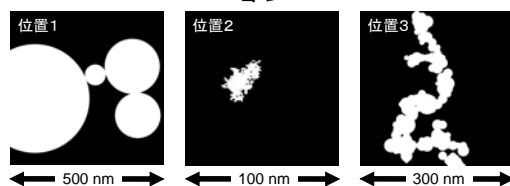


図 9 ヒューム生成の数値計算シミュレーション予測

る粒子の周囲に十分な鉄蒸気がなく、凝縮による粒子の成長が少なくなるため、微細な粒子がクラスター状になることを示唆している。一方、位置 1 では、数百ナノメートル程度の比較的大きな粒子がクラスターを形成しているのが特徴である。これは、溶滴表面から蒸発した鉄蒸気がプラズマ気流に乗らずに、直接、溶滴の周囲方向へ急激に冷却される場合を仮想したものである。位置 1 での鉄蒸気濃度は約 30% 程度であり、この高濃度のまま急激に冷却されると (毎秒 10 万度程度)、核生成する粒子の周囲に多量の鉄蒸気が存在するため、凝縮による粒子の成長が著しく大きくなる。さらに、高温域で過飽和状態になる結果、一次粒子同士の衝突が鉄の融点以上で発生し、融合によって体積を保存しながら大きな球体を形成するため (数値計算モデルの仮定)、大きな粒子がクラスター状になることを示唆している。

以上の数値計算シミュレーションは、アーク溶接において、金属蒸気の発生から微粒子クラスターの形成に至るヒューム生成メカニズムを明確に示している。本研究を通じて、アーク溶接プロセスにおけるプラズマ中の金属蒸気のエLEMENT分離ダイナミクスと金属微粒子の生成過程メカニズムを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Manabu Tanaka, Yoshihiro Tsujimura, Kei Yamazaki, Dynamic behavior of metal vapor in arc plasma during TIG welding, *Welding in the World*, 査読有、56 巻、2012、30-36
<http://link.springer.com/article/10.1007/BF03321142>
ISSN: 0043-2288
- ② 田中学、辻村吉寛、ティグ溶接における金属蒸気挙動の可視化、*溶接学会論文集*、査読有、30 巻、2012、164-170
https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjaws/30/2/30_164/_pdf
- ③ 辻村吉寛、中谷光良、田中学、画像分光法による消耗電極式ガスシールドアーク溶接の金属蒸気挙動解析、鉄と鋼、査読有、98 巻、2012、534-540
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tetsutohagane/98/10/98_534/_pdf
- ④ 辻村吉寛、田中学、ティグ溶接におけるプラズマ温度場と金属蒸気濃度場の挙動解析、*溶接学会論文集*、査読有、30 巻、2012、281-287
https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjaws/30/4/30_281/_pdf

- ⑤ 辻村吉寛、田中学、ミグ溶接の溶滴移行現象を伴うアークプラズマ状態の挙動解析、溶接学会論文集、査読有、30巻、2012、288-297
https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjjws/30/4/30_288/_pdf

〔学会発表〕(計3件)

- ① 沢登寛、田代真一、田中学、山本恵理、山崎圭、鈴木啓一、ヘリウムティグ溶接におけるプラズマ中の金属蒸気挙動の実験観察、日本鉄鋼協会第160回秋季講演大会、2010年9月25日、札幌市
- ② 伊藤邦義、沢登寛、辻村吉寛、田代真一、田中学、画像分光法によるガスタングステンアーク溶接中のプラズマ温度と金属蒸気濃度の動的解析、溶接学会平成23年度秋季全国大会、2011年9月7日、伊勢市
- ③ 松井翔、田代真一、田中学、ガスシールドアーク溶接におけるヒューム生成メカニズムに関する研究、溶接学会平成24年度秋季全国大会、2012年9月27日、奈良市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 学 (TANAKA MANABU)
大阪大学・接合科学研究所・教授
研究者番号：20243272

(2) 研究分担者

田代 真一 (TASHIRO SHINICH)
大阪大学・接合科学研究所・助教
研究者番号：70432424