

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289240

研究課題名(和文) レーザ照射部の溶接ポロシティ制御によるその場局所マイクロポーラス金属の創成

研究課題名(英文) Creation of in-situ-local microporous metal by porosity controlled at the laser-irradiated unit

研究代表者

川人 洋介 (Kawahito, Yousuke)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号：70379105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：低炭素社会では、金属の軽量化と高機能化が同時に必要で、ポーラス金属は期待される材料である。本研究では、レーザ照射された金属部に生じる空孔(溶接ポロシティ)を、その場局所に制御したマイクロポーラス金属を世界に先駆けて創成する為の基盤的な研究を実施する。この為、チタン、(ステンレス鋼を含む)鉄鋼、アルミニウム合金に対する種々のレーザ溶接条件における世界初の高輝度X線透過三次元観察に基づくポロシティ生成過程の明確化、相変態と大変形に対応できる流体解析粒子法によるポロシティの素なるキーホール生成機構の解明、レーザ照射部のポロシティ制御によるその場局所マイクロポーラス金属の創成を行う。

研究成果の概要(英文)：It is necessary to simultaneously reduce weight and enhance functionality of materials in low carbon society. Porous metals are one of promising materials. In this research, we conduct a fundamental research to create a microporous metal in the world by controls of the vacancies (porosity: welding defect) formed in the laser-irradiated weld metal. Therefore, we clarified the porosity formation process based on the world's first high-intensity X-ray transmission three-dimensional observation under various laser welding conditions for titanium, steel including stainless steel and aluminum alloy. We numerically analyze formation of a keyhole which causes porosity by fluid analysis particle method suitable for phase transformation and large deformation. Moreover, we control porosity formation at the laser-irradiated unit for creation of in-situ-local microporous metal.

研究分野：溶接・接合

キーワード：レーザ 溶接 ポロシティ 制御 その場局所 マイクロポーラス 金属

### 1. 研究開始当初の背景

低炭素社会では、金属の軽量化と同時に高機能化が必要である。ポーラス金属は、軽量化だけでなく、機械的性質、衝撃吸収性、熱伝導性及び生体適合性等が改善できる。しかし、従来のバルクポーラス金属では、細孔の位置、サイズ、形状等が不均一で制御が困難である。

金属部材の任意の箇所における局所ポーラス化は、材料構造設計を可能とし、異方性や傾斜機能等を付加でき、新たな機能発現が期待できる。さらに、バルクポーラス金属の溶接・接合の困難さを解決し利用拡大もできる。

一方、レーザ溶接金属部に点在する空孔は、継手強度に影響し、溶接ポロシティとされる。レーザ溶接は、高密度光エネルギー（レーザ光）で金属を瞬時に熔融・蒸発させ、図1に示すように蒸発金属の反力によって生じる熔融池の深い穴（キーホール）を通して、金属内部を直に加熱し、熱伝導では得られない高効率・深溶込みを実現する画期的な溶接法である。しかし、キーホール先端部から、シールドガスの成分を一部含む気泡が発生し、凝固界面でトラップされ、ポロシティとなる。これはレーザ溶接特有の現象である。

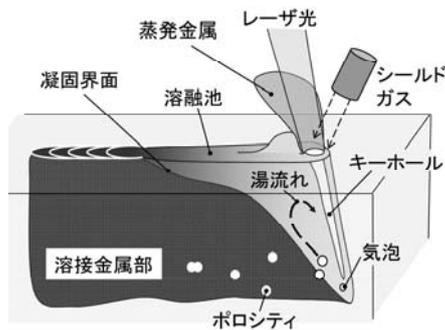


図1: レーザ溶接のポロシティ生成.

研究代表者の平成23年度基盤研究Cの成果からポロシティ生成について新しい知見が得られた。すなわち、チタンのパルスレーザ溶接中のX線透視観察結果より、キーホールの成長速度には、加速域と減速域があり、減速域で、レーザ照射を停止すると、キーホール底部に局所的にポロシティを形成できることが判明した(図2参照)。減速域のポロシティ生成機構を明確に解明すれば、点在する溶接ポロシティを狙った位置に制御でき

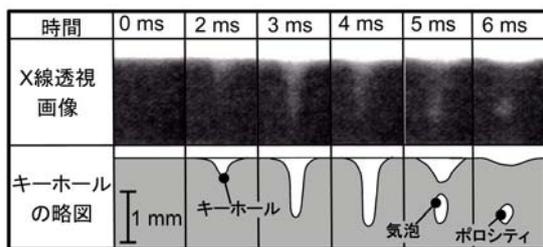


図2: ポロシティ生成のX線透視観察結果.

るポロシティを狙った位置に制御できる可能性がある。制御されたポロシティは、マイクロポーラスを構成する細孔として活用でき、金属部材のその場局所マイクロポーラス化が可能となる。

### 2. 研究の目的

レーザ照射された金属部に生じる空孔（溶接ポロシティ）を、その場局所に制御したマイクロポーラス金属を世界に先駆けて創成する為の基盤的な研究を実施する。この為、チタン、(ステンレス鋼を含む)鉄鋼、アルミニウム合金に対する種々のレーザ溶接条件における高輝度X線透過三次元観察に基づくポロシティ生成過程の明確化、相変態と大変形に対応できる流体解析粒子法によるポロシティの素となるキーホール生成機構の解明、レーザ照射部のポロシティ制御によるその場局所マイクロポーラス金属の創成を行う。

### 3. 研究の方法

①ポロシティに関するX線透過三次元観察: 研究代表者が独自開発した金属内部における熔融・蒸発現象を三次元で高速観察できる高輝度X線透過型溶接接合機構四次元(三次元空間+時間軸)可視化システムを用いて、熔融池内部の三次元的なキーホール挙動、湯流れ、気泡及びポロシティ生成過程等を高分解時間軸で詳細に明らかにした。

#### ②粒子法に基づくポロシティの素となるキーホール生成機構の解明

流体解析粒子法は、解析対象を領域分割することなく、計算対象に均等に配置した点の情報に基づき、連続体の力学計算が可能であり、キーホールのような大変化を伴う自由表面の計算に適している。そこでレーザ溶接専用のMPSを独自開発した。図3に示すようなWall Focusing効果レーザ光がキーホール底へ進むに伴い多重散乱を繰り返し、見かけ上キーホール底にレーザを集光する効果)を考慮するため、レーザ光を光速で弾性散乱してエネルギー授与を行う粒子として扱う全く新しい流体解析粒子法を世界で初めて試みた。

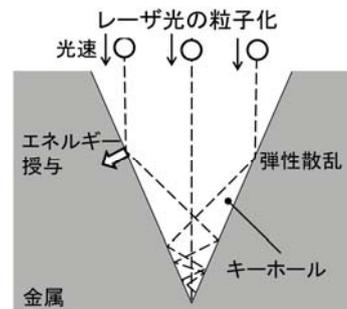


図3: Self-focusing現象

### ③ポロシティ制御によるその場局所マイクロポーラス金属の創成

ポロシティ制御法としてレーザ適応制御に注目した。レーザ適応制御は、人間に例えると、モニタ（目）の情報で、適応制御アルゴリズム（頭）で判断し、適切な指令をレーザ発振器（手）に与える自己完結型の制御である。具体的には、反射及び溶融池からの熱放射等々の最適なプローブ信号計測から、キーホールをリアルタイムモニタする。得られたモニタ情報を、ポロシティ生成機構の解明で得られた知見を基に改良したレーザ適応制御アルゴリズム（基本となる制御アルゴリズムは平成 21 年度若手研究 B で確認済）で処理し、加工レーザの出力を適切に変化させ、レーザ照射部のポロシティ生成を制御した。

## 4. 研究成果

### ①ポロシティに関する X 線透過観察結果：

ポロシティ（溶接金属に生じる空洞）、アンダーフィル（溶接ビード表面の凹み）、スパッタ（溶融金属の飛散）等の溶接欠陥の生成には、溶融金属の移動が深く関係する。

そこで、溶融池内部の溶融金属の移動（湯流れ）を観察する為、高輝度 X 線透過型溶接接合機構四次元可視化システムを使用した（図 4 参照）。四次元 X 線透視装置は、ミニフォーカス X 線源（視点 1）とマイクロフォーカス X 線源（視点 2）の異なる線源を有することが特徴である。供試材を通過した X 線は、高速応答イメージングイテンシファイア、高速カメラを通して観察でき、異なる角度で同時計測した 2 画像データから、人間と同じ様に視差を利用して三次元の湯流れ速度を算出した。なお、湯流れのトレーサとしては密度が高い WC タングステンカーバイドの超硬合金球（直径 0.5 mm）を供試材に埋め込んで使用した。

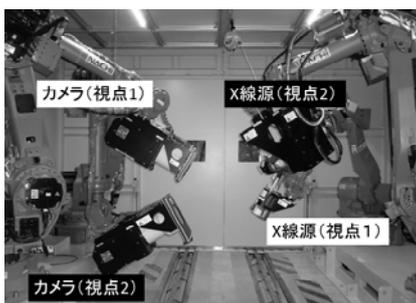


図 4 高輝度 X 線透過型溶四次元可視化システム

ステンレス鋼に対し余盛りのある良好な溶込みが得られたレーザ溶接条件（レーザ出力：6 kW、溶接速度：100 mm/s）において、複数の超硬合金球を用い、三次元 X 線透視観察を行い、溶融池内部の湯流れについてまとめた測定結果と模式図を図 5 と図 6 に示す。溶融池内部の湯流れの速度は、場所によって異なり、キーホール口およびキーホール先端部でそれぞれ 0.72 m/s および 0.25 m/s であ

り、溶融池全体の湯流れ平均速度 0.34 m/s に比べキーホール口部では 2 倍程度速いことが定量的に把握することができた。また、溶融池内部では、図 6 が示すように溶融池上部と下部に大別できる二つの循環する湯流れが発生していることが明らかになった。さらに観測された湯流れの数値データを基に、レーザ溶接における熱伝導と対流熱伝達について検討を行った。熱伝導と対流のどちらが支配的な機構かは、ペクレ数  $Pe$  という指標で判断可能である。ペクレ数が 10 以上では定性的に対流の寄与が大きいことが知られているので、図 5 で観測された湯流れは 35 以上であり、溶融池におけるエネルギー輸送に関して、湯流れによる熱輸送が支配的であることが判明した。

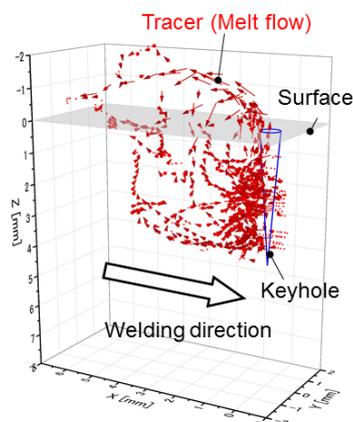


図 5 湯流れの 3 次元計測結果。

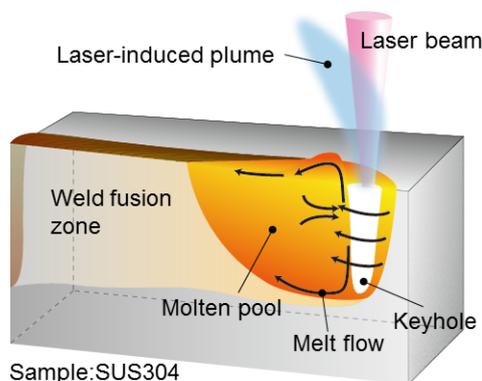


図 6 溶融池内部の湯流れの模式図。

次に、深溶込み溶接部にポロシティが生成したレーザ溶接条件（レーザ出力：6 kW、溶接速度：50 mm/s）において、複数の超硬合金球を用い、三次元 X 線透視観察を行い、溶融池内部の湯流れについてまとめた測定結果と模式図を図 7 と図 8 に示す。図 7 に示す湯流れ速度は、キーホール口および先端部では、それぞれ 0.55 m/s および 0.95 m/s であり、溶融池全体の速度 0.37 m/s の湯流れであった。各位置での溶接速度 100 mm/s 時と比較して、キーホール口で約 0.76 倍と減少し、キーホール先端で約 3.8 倍と増加していることがわかった。また、溶融池内部には、溶接速度 100

mm/s で観察された熔融池上部と下部の 2 種類の湯流れが確認できた。熔融池下部の湯流れは、溶込み中央部から下の熔融部幅が 1 mm 以下の狭いところから、明瞭な循環流が生じ、キーホール周辺に存在する沸点付近の高温の熔融金属が、キーホールの中央部から先端部にキーホールに沿って流れるため、深溶込みに対し有効であると考えられる。

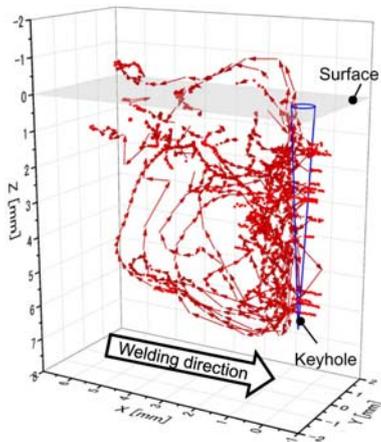


図 7 ポロシティ生成時の湯流れ。

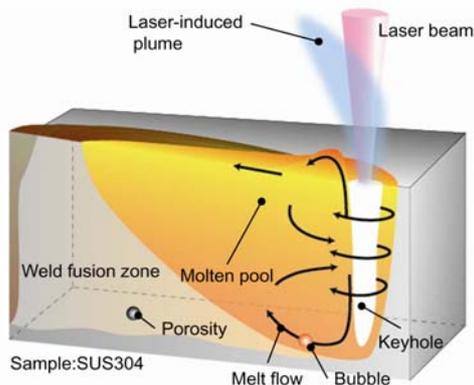


図 8 ポロシティ生成時の湯流れの模式図。

溶接速度の条件を変えると循環する湯流れの速度・形態は敏感に変化し、スパッタの発生と深く関連することもわかった。スパッタの生成過程は、図 9 に示すように湯流れがキーホール内部から加速し、キーホール口付近で局所的に絞られた流れとなり、加速し、最終的にスパッタとして飛散するメカニズムであることが判明した。言い換えれば、スパッタの生成は熔融池表面だけの現象でなく、内部とも関連づいた現象であることを明らかにした。

本研究は、世界で初めてレーザー溶接時の熔融池内部における湯流れの 3 次元観察に成功した。熔融池上部と下部に大別できる循環する流れが存在し、湯流れが熱輸送に支配的であることを示した。また、金属蒸気で満たされたキーホールを冷やすラジエータのよう

に熔融金属が流れ、熱を強制的に奪う熱輸送が成り立っている可能性も示唆した。さらに、溶接条件により湯流れが敏感に変化し、湯流れが溶接欠陥スパッタとポロシティの発生と関連することも明らかにした。本成果は、2016 年 溶接学会 溶接アーク物理研究賞を受賞した。

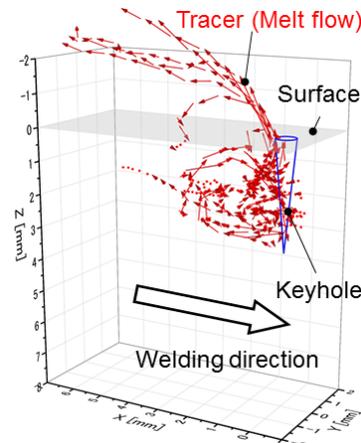


図 9 スパッタ生成時の湯流れ。

## ②粒子法によるキーホール生成機構の解明

ポロシティの生成の核となるキーホールに関する形成機構は十分に明らかにされていない。そこで、キーホール形成機構について粒子法を用いて解析を行い、解明を試みた。開発した数値計算結果と X 線透過観察による実験観測結果との比較について述べる。6 kW レーザ出力(パワー密度: 100 kW/mm<sup>2</sup>)、溶接速度 100 mm/s の X 線透視観察結果を図 10 に示す。なお、材料はステンレス鋼であり、0 ms はレーザー照射開始時間である。照射開始 0.5 ms 後にキーホール先端は 1.5 mm に達し、20 ms 後では 4 mm にまで成長した。

Time	0 ms	0.5 ms	2 ms
X-ray images of keyhole			
Keyhole depth	0 mm	1.5 mm	3.3 mm
Time	3 ms	10 ms	20 ms
X-ray images of keyhole			
Keyhole depth	3.8 mm	4.2 mm	4 mm

図 10 キーホール生成の X 線透視観察結果

一方、同溶接条件における粒子法による数値計算結果の中央断面の温度分布を図 11 に示す。照射開始 0.5 ms 後にキーホール先端は 1.4 mm に達し、20 ms 後では 4.2 mm で成長する

結果が得られた。X線観察結果と比較した結果、キーホール形成過程が数値計算でよく一致していることが確認された。

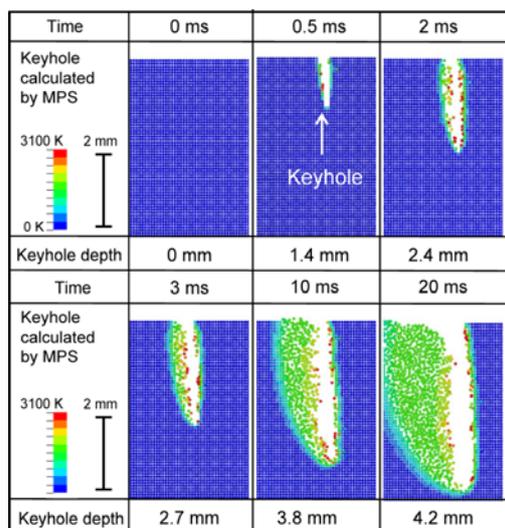


図 11 キーホール生成の数値計算結果。

本研究では、レーザー照射による温度変化や相変化、熔融部の挙動を明らかにするとともに、キーホール生成と Wall Focusing 効果 (図 12 参照) との関係を示し、理論的な視点からキーホール形成機構を解明した。以上の数値計算結果を踏まえ、キーホール先端で過剰入熱が発生した場合に、ポロシティ生成が起きることが推察された。本研究成果は、2017 年 レーザ加工学会 ベストオーサー賞を受賞した。

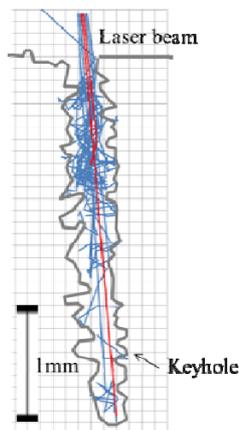


図 12 キーホールにおける Wall Focusing 効果。

### ③ポロシティ制御によるその場局所マイクロポーラス金属の創成

鉄鋼(炭素鋼)、チタンおよびアルミニウム合金のレーザスポット溶接では、深い位置にポロシティを生成する場合、熔融金属表面が凹む(アンダーフィル)が発生した。アンダーフィルの原因はスパッタの大量飛散の場合が多く、本研究のこれまでの成果としてスパッタ発生が熔融池内部の熔融金属の流れと関係していることを査読付き論文にて報告している。

そこで、熔融池サイズを変えて、熔融金属の流れる方向を制御してスパッタ低減のレー

ザ制御を行った。具体的には、キーホールが形成されず対象材料が熔融する低出力でレーザー照射を行い、熱放射光をインプロセスモニタリングし、目的に熔融池サイズになるようにレーザー照射時間を制御した。結果、アンダーフィルは大幅に改善された。さらに、アンダーフィル制御した後、連続してポロシティ生成のためのレーザー照射を行った(図 12 参照)。その結果、5 ms 以下のレーザー照射時間では、キーホールの最大深さの位置にキーホールの先端と同様なサイズの溶接ポロシティを概ね制御できることを確認した。

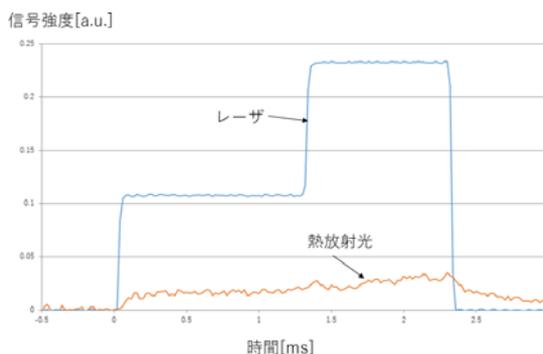


図 12 熱放射光に基づくレーザー出力制御。

新しい知見として、溶接速度を遅くし、レーザー誘起プルーム(蒸発金属)を吹き飛ばすファンを利用することで、図 13 に示すように多量のポロシティを生成できることも明らかにできた。本結果は現在、査読付き海外雑誌に投稿中である。

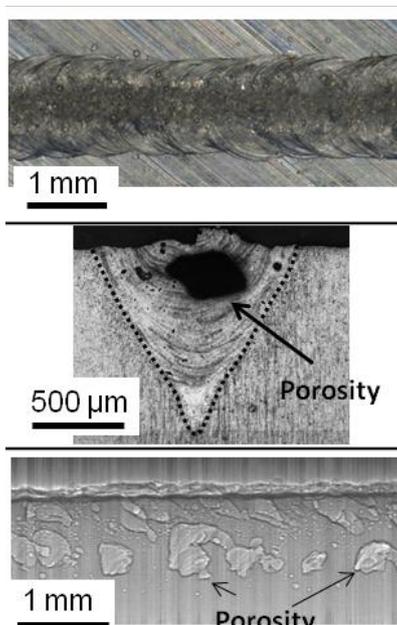


図 13 多量の溶接ポロシティ

## 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4件)

①千村伊作, 川人洋介, 村川英一, 片山聖二, X線透視観察と粒子法に基づくチタンのレーザー溶接におけるキーホール形成因子の解明, 軽金属溶接, 54, 2016, pp.18-25.

②千村伊作, 川人洋介, 村川英一, 粒子法とX線その場観察を用いたステンレス鋼レーザー溶接時のキーホール形成機構解明, レーザ加工学会誌, 23, 2016, pp. 45-52.

③川人洋介, 中田光紀, 上村洋輔, 水谷正海, 西本浩司, 川上博士, 片山聖二, ステンレス鋼の高出力レーザー溶接における3次元X線透視その場観察による湯流れと入射角および焦点はずし距離によるスパッタ抑制との関係, 溶接学会論文集, 34-4, 2016, pp. 239-248.

④川人洋介, 上村洋輔, 土井雄一郎, 水谷正海, 西本浩司, 川上博士, 田中学, 藤井英俊, 中田一博, 片山聖二, ステンレス鋼の高輝度・高出力レーザー溶接時の熔融池内湯流れに及ぼす溶接速度の影響の三次元X線透視その場観察法による解明, 溶接学会論文集, 33-1, 2015, pp. 13-19.

### 〔学会発表〕(計6件)

①Y. Kawahito, K. Nakada, Y. Uemura, M. Mizutani, H. Kawakami, K. Nishimoto, S. Katayama, Effects of incident laser angle or defocused position upon spatter reduction on basis of three-dimensional X-ray transmission in-situ observation of laser welding phenomena, 10th International Conference on Trends in Welding Research, Tokyo, Japan, 2016.10.

②中田光紀, 片山聖二, 川人洋介, 近藤勝義, 菖蒲敬久, 今井久志, 川上博士, アルミニウム合金のシングルモードファイバーレーザー溶接時におけるキーホール挙動と欠陥生成機構, 溶接学会平成27年度春季全国大会, 東京, 2015.4.

③上村洋輔, 中村浩, 土井雄一郎, 水谷正海, 川人洋介, 片山聖二, 三次元X線透過観察法によるスパッタの形成機構の解明, 溶接学会平成26年度秋季全国大会, 富山, 2014.9.

④土井雄一郎, 川人洋介, 片山聖二, 水谷正海, 中村浩, 三次元X線リアルタイム透視観察法による高輝度・高出力レーザー溶接現象の解明, 第80回レーザー加工学会講演会, 東京, 2013.12.

⑤土井雄一郎, 川人洋介, 片山聖二, 三次元X線リアルタイム透視観察法による高輝度・高出力レーザー溶接現象の解明, 溶接学会平成25年度秋季全国大会, 岡山, 2013.9.

⑥ Y. Doi, Y. Kawahito, S. Katayama, Three-dimensional visualization of laser welding phenomena with X-ray real-time transmission system, HPL2013-The 6th International Symposium on High Power Laser Processing, Niigata, Japan, 2013.7.

### 〔その他〕(計2件)

①レーザー加工学会 ベストオーサー賞受賞, 千村伊作, 川人洋介, 村川英一, 2017.6.

②溶接学会 溶接法研究委員会 溶接アーク物理研究賞, 川人洋介, 上村洋輔, 中田光紀, 片山聖二, 2016.8.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

川人 洋介 (KAWAHITO YOUSUKE)  
大阪大学・接合科学研究所・准教授  
研究者番号：70379105

### (2)研究分担者

川上 博士 (KAWAKAMI HIROSHI)  
三重大学・工学研究科・准教授  
研究者：00252338

### (3)研究分担者

西本 浩司 (NISHIMOTO KOUJI)  
阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・准教授  
研究者：405011169

### (4)研究分担者

村川 英一 (MURAKAWA HIDEKAZU)  
大阪大学・接合科学研究所・教授  
研究者：60166270

### (5)研究分担者

片山 聖二 (KATAYAMA SEIJI)  
大阪大学・接合科学研究所・教授  
研究者：10144528