

令和元年5月14日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06748

研究課題名(和文) 異種異材継手作製のための低入熱LFW(線形摩擦圧接)装置の開発とLFW現象の解明

研究課題名(英文) Development of low heat input LFW (Linear Friction Welding) system and clarification of LFW phenomena for dissimilar joint making

研究代表者

木村 真晃 (Kimura, Masaaki)

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90285338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：線形摩擦圧接(LFW)法とは、一方の部材に所定の振幅と周期的な往復直線運動を与え、他方の部材に推力を負荷して接触させて摩擦熱を発生させ、部材同士の接合を行う溶接方法である。しかし、自動化等が容易という特徴があるもののその詳細のほとんどが明らかにされていないため、簡便に用いることが出来ない。本研究では、これまであまり明らかにされていないLFWの接合現象の解明のための接合実験装置の製作と、圧接条件の選定指針になりうる圧接面温度のシミュレーションを行った。また、LFWによる接合を行う際の知見を得るために非常に有用な基礎データを収集するため、異種材料の組み合わせに対して回転式の摩擦圧接も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、2種類の検討を行った。低入熱LFW装置の開発に関する検討では、構造がシンプルでかつ機械的な運動を行うことができる機構を提案し、その仕組みを有する低入熱LFW装置を製作した。また、圧接条件の選定指針になりうる圧接面温度シミュレーションも行った。一方、LFWによる接合の際に役立つ基礎データ収集のため、回転式の摩擦圧接による各種異種材料の接合実験を行い、どのような条件を満たしたときに接合部から破断しない良好な継手を得られるかを調べた。今後、これらの内容を発展させることで、これまで設計・製造等分野では考えつかなかった新しい異材継手製品の開発やその利用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Linear friction welding (LFW) is a joining technique of two rectangular shapes with friction heat that produced at the weld surfaces, which is carried out with amplitude distance and cyclic reciprocating moving. However, this welding technique can not be easily used for joint making because the joining mechanism such as the joining phenomena and joint strength as well as the selection guide of friction welding condition for obtaining good joint was hardly clarified. In this study, the LFW system for the actually experiments was developed and the temperature at the weld interface during the welding process for the useful selection guide of the friction welding condition was simulated for the clarification of the joining phenomena in LFW. In addition, the joining phenomena and joint strength of joints at various dissimilar materials combinations by rotary friction welding method were investigated for the basic data collection of the useful welding to LFW.

研究分野：溶接工学

キーワード：線形摩擦圧接 異種異材継手 接合現象 シミュレーション 継手強度

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

我が国において、今世紀の「ものづくり」を持続的に発展させ、かつそれを次世代へと繋げるためには、現在よりもより一層の省エネルギー化、低コスト化を図りながら実施することが望まれる。地球環境保全の観点から各種工業製品を考えると、例えば自動車では、車両重量を減少させることで燃費を向上させることが出来る、すなわち、車体軽量化を目指すことで、地球環境への負荷低減を図ることが可能となる。そのためには、材料を適材適所に配して使用することができる異材継手を利用することが必要不可欠である。異種材料を組み合わせた異材継手を作製するためには、その継手性能に大きな影響を及ぼすとされている金属間化合物層の生成をいかに抑えながら接合を行うかが肝要となっており、一般的には、材料を融点以下に抑えて固相状態で接合する手法が非常に有用な接手法として知られている。このうち、本研究課題で取り扱った摩擦熱を利用して接合を行う方法には、摩擦圧接法や摩擦攪拌接合法(FSW)などがあり、これらの方法は数秒から数十秒と極めて短い時間で接合が完了する、再現性が極めて高いなどの利点を有していることでも広く知られている。特に、回転式の摩擦圧接法は、素材の一方を回転させ他方の素材を押しつけて接合面である圧接面に摩擦熱を発生させて接合を行うという極めて単純な原理で接合を行う方式であることから、各種産業分野で用いられている。一方、この回転式の摩擦圧接は、主に回転摩擦運動を利用して部材同士の接合を行うことから、非円形断面形状部材の接合にはあまり適していないのが実状である。著者も、これまでにこの回転式の摩擦圧接により非円形断面形状部材の接合にチャレンジし、正方断面形状部材の接合は比較的容易であることを示しているが、矩形断面形状部材の接合を行う場合には様々な工夫が必要であることも指摘している。しかし、実際の「ものづくり」の現場において継手を量産するためには、接合装置の工夫などがさらに必要となるため、回転式の摩擦圧接では非円形断面形状部材の接合には簡便に用いにくいのが現状となっている。そこで、線形摩擦運動を利用した接合、すなわち、線形摩擦圧接(LFW)法の適用が考えられる。

この LFW は、一方の部材に所定の振幅と周期的な往復直線運動を与え、推力を負荷させることでもう一方の部材と接触させて摩擦熱を発生させ、それを利用して部材同士の接合を行う接合方式である。部材を回転させる必要がないことから、この方法は非円形断面形状を有する部材の継手を作製することに適している。このため、航空宇宙産業、自動車産業、電力産業、医療産業など、幅広い分野から注目されている摩擦圧接方法の一つとして知られており、次世代の「ものづくり」に必要な接手法の一つであるといえる。

2. 研究の目的

本研究の対象とした LFW は、これまでにいくつかの検討が行われている。しかし、いずれの報告を見ても、それぞれが独自の装置を作製して実験・検討を行っている上にその装置構造がほとんど明示されておらず、かつ接合部材形状や圧接条件も異なっていることからその結果の統計的な比較を行うことが非常に困難な状況となっている。特に、接合現象については具体的な検討がほとんど行われておらず、接合メカニズムもほとんど明らかにされていない状況である。また、健全な継手が得られる圧接条件もあまり明示されておらず、詳細のほとんどが明らかにされていない。さらに、多くの報告が製品の生産者側からの観点から検討した内容となっているため、実施にどのようなメカニズムで接合され、かつ健全な継手を得るにはどのような圧接条件で接合すればよいかなどの具体的な情報は示されていないのが実状となっている。すなわち、その詳細のほとんどがブラックボックスとなっているため、LFW は簡便には用いることが出来ない状況にあると言える。

そこで本研究では、著者がこれまでにやってきた回転式の摩擦圧接における低入熱摩擦圧接法や接合自己完了型摩擦圧接法などを提案するために製作してきた接合実験装置に組み込んできた様々な工夫やノウハウを生かし、非円形断面形状部材の接合も容易な往復直線運動を利用した低入熱 LFW 装置を開発し、これまであまり明らかにされていない LFW 現象の解明を行うとともに低入熱状態で接合できる異種異材継手が容易に作製できる接手法の提案することを最終目的とした。その中で、LFW 装置を開発するための一連の検討、ならびに LFW による接合を行う際の知見を得るために非常に有用な基礎データを収集するために異種材料の組み合わせに対して回転式の摩擦圧接も行った。

3. 研究の方法

本研究では、以下に述べる 2 種類の検討を行った。

a) 低入熱 LFW 装置の開発に関する検討

LFW における接合メカニズムを明らかにするためには、実際に部材同士の接合を行ってその接合現象を詳細に観察する必要がある。そこで、後述する簡単な構造を有する機械的な機構を提案し、その機構を有する LFW 装置の作製を行った。そして、その装置を用いた場合の接合の可能性を検討し、装置の不具合の洗い出し等の改善を行った。それを踏まえて装置の改造を行い、最終的には金属材料の接合が出来る LFW 装置を作製した。また、著者はこれまでに回転式の摩擦圧接について圧接面の焼付きを考慮した圧接面温度のシミュレーションを FEM 解析を用いて行い、それを利用して LFW の圧接面温度変化の推定方法の検討も実施した。実際には、往復運動による摩擦発熱量を計算し、それを一方の部材の圧接面に接触圧力と擦れ速度

から求めた熱流束として分割して与え、圧接面が焼付きを生じる温度に達した場合には焼付きに応じた熱流束の値を算出するという一連のプロセスを、時間との荷重ステップでの繰り返し計算を実施することで圧接面の温度分布を求めた。

b) 基礎データ収集のための異種材料の回転式摩擦圧接に関する検討

LFW による接合の際に有益な基礎データ収集のため、各種異種材料の組み合わせに対して回転式の摩擦圧接を行った。そして、その接合現象の詳細な観察を行うとともに継手強度と摩擦時間の関係、および圧接面で破断しない良好な継手を得るための圧接条件の検討を行った。なお、接合方式には、著者が提案している設定した摩擦時間終了後に圧接面の相対速度を瞬時に零とする手法で行った。また、得られた継手に対して熱処理を施すことで、異種材継手の圧接面に生じる金属間化合物層の生成メカニズムの解明のための検討も加えた。

4. 研究成果

a) 低入熱 LFW 装置の開発に関する検討

低入熱 LFW 装置の開発に関する検討では、以下に記す2種類の検討を行った。なお、発表論文等については、後述する学会発表③、⑤、⑨に該当する。

I. 低入熱 LFW 装置の作製

回転式の摩擦圧接と同様に比較的大きな荷重下で安定した往復運動を得るためには、動力を確実に伝達できる機械的な運動を行う機構が望ましいと言える。そこで、図1に示すような向かい合わせにした二つの偏心軸によって接合試験片を挟むバイスを往復運動させる機構を提案した。そして、図2に示すように左右に配した偏心軸を同調させながら回転させ、カム構造によってバイスを水平方向のみに往復運動させる機構とし、最終的には図3に示す LFW 装置の作製を行った。その装置を用いて純 Al (A1070) や Al 合金 (A7075) の同種材の組み合わせの接合を行った結果を図4に示す。なお、純 Al は摩擦圧力 10MPa、Al 合金は 20MPa とし、振動数はどちらの場合でも 20.29Hz、振幅は 2mm として接合を行った。図4 (i) の純 Al の結果を見ると、圧接面に近い張出部分からバイスに挟んだ部分において変形が見られたが、試験片同士を一体化させる、すなわち、接合させることができた。一方、図4 (ii) の Al 合金の方を見ると、試験片同士は一体化されなかったが、圧接面を詳細に観察した結果、回転式の摩擦圧接と同じような焼付きを生じた箇所が認められた。これより、装置剛性の向上など更なる改造が必要ではあるものの、本接合実験装置で LFW 現象の観察が可能であると判断することができた。

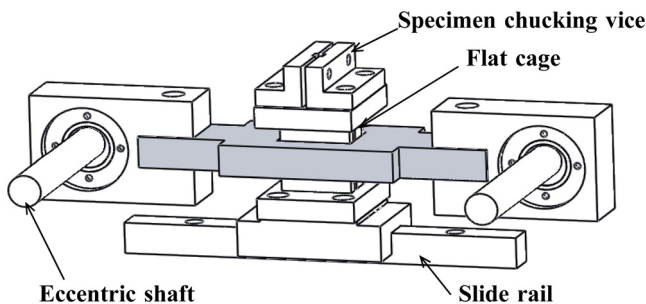


図1 提案した往復運動構造

II. 圧接面温度のシミュレーション

圧接条件の選定指針となりうる圧接面温度のシミュレーションについて、軟鋼同士の組み合わせを対象として計算を行った。その結果を図5に示す。なお、摩擦圧力 30MPa とした。時刻 0.8s では圧接面中央部での温度上昇が大きい、端部では小さく、時刻 1.6s から圧接面の接触圧力の変化にともなって端部での温度上昇が大きくなった。そして、時刻 2.4s ではほとんど一様な温度分布を示した。各時刻における圧接面の接触圧力状態を図6に示す。時刻 1.5s から時刻 1.6s にかけて接触圧力が圧接面の中央部に集中していた状態から端部へと広がっており、時刻 2.4s では圧接面の全体に接触圧力が負荷されている結果となった。これより、LFW でも圧接面の焼付きを考慮した解析を行うことでその全面の温度変化の解析を行うことができた。

このように、低入熱 LFW 装置の開発に関する検討では、今後検討しなければならない内容がいくつかあるも

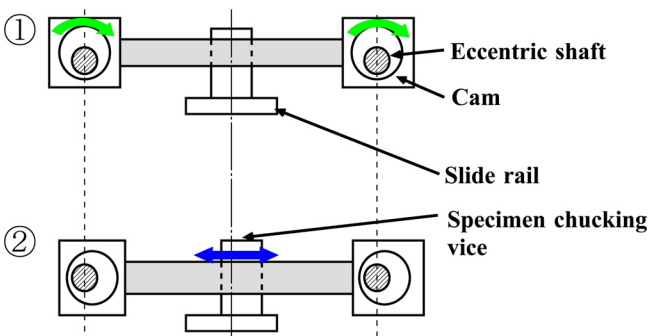


図2 往復運動構造の動き

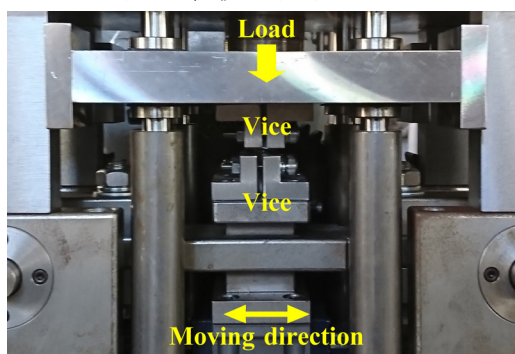
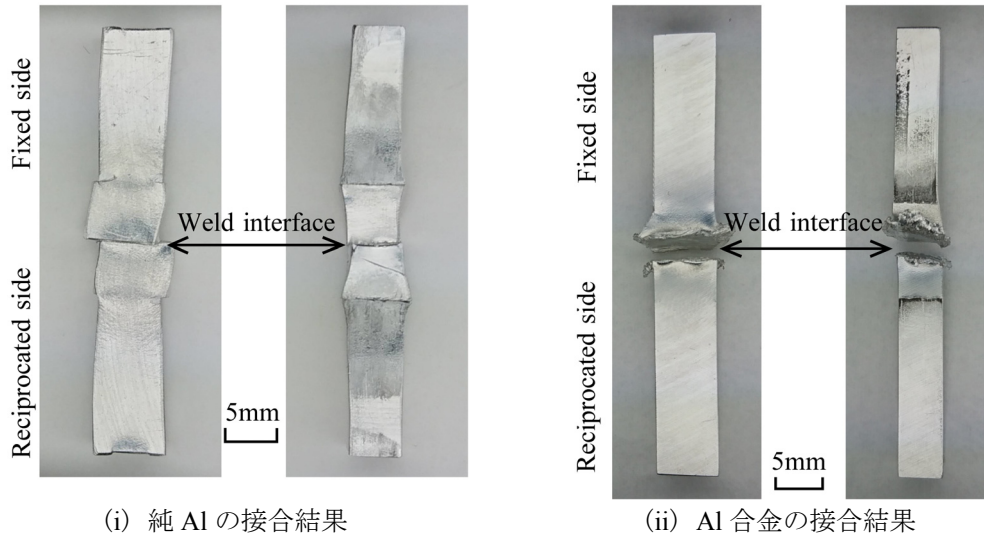


図3 作製した低入熱 LFW 装置外観



(i) 純 Al の接合結果

(ii) Al 合金の接合結果

図 4 接合実験結果の一例

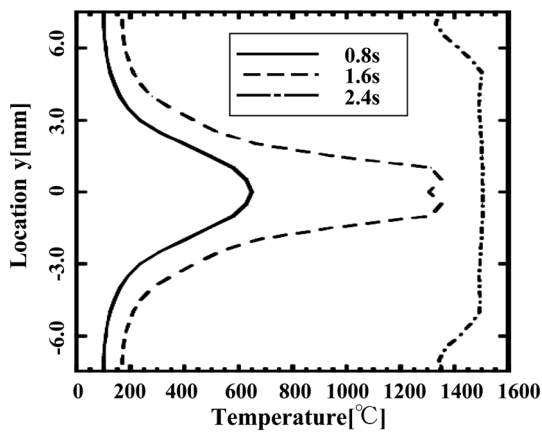


図 5 各時刻における圧接面の温度分布

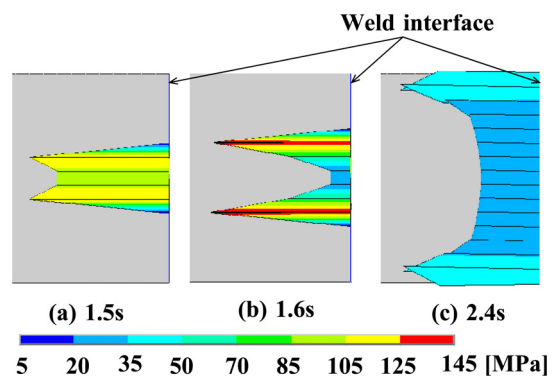


図 6 各時刻における圧接面の接触圧力

のの、作製した装置を用いて接合現象をある程度把握することが可能であることがわかった。また、圧接条件の選定指針となりうる圧接面温度のシミュレーションを行うことができた。なお、本研究課題終了後も引き続き同様な検討を実施することを予定している。

b) 基礎データ収集のための異種材料の回転式摩擦圧接に関する検討

LFW による接合の際に役立つ基礎データ収集のため、各種異種材料の組み合わせに対して回転式の摩擦圧接を行った。異種材料の組み合わせとしては種々考えられるが、本研究では、いずれも熔融溶接が困難な組み合わせとなる Al 系材料と鉄鋼材料、Al 系材料と Cu 系材料、Cu 系材料と鉄鋼材料を取り上げた。なお、発表論文等については、後述する雑誌論文①、学会発表①、②、④、⑥、⑦、⑧、⑩、⑪に該当する。

Al 合金 (A5052) と 鋳鉄 (FCD400) との組み合わせでは、FCD400 に含まれている球状黒鉛の存在により組み合わせたときに軟質側となる A5052 側から破断する良好な継手を得ることが難しかったが、図 7 に示すように継手圧接面の横断面を見ると、FCD400 側では穴が空いており、それに該当する A5052 では圧接面から張出して凸状に変形していることがわかった。接合前、FCD400 側の接合端面には球状黒鉛が露出していたことから、接合中においてお互いの摩擦により A5052 が入り込む状態を形成しながら黒鉛が排出されて接合されるものの、黒鉛は完全には排出されずに残存している箇所も多く認められた。すなわち、圧接面には黒鉛が残留しておりこの部分の接合性が悪いことから、良好な継手を作製するためにはこのような黒鉛を圧接面から完全に除去するような手法で接合することが必要であることを指摘した。

非鉄金属同士である Al 合金 (A5052) と 純 Cu (OFC) の組み合わせでは、接合中のお互いの摩擦により圧接面には機械的な混合層が形成し、それが継手強度に影響を及ぼすことを指摘したが、その層の生成状態は摩擦圧力により変化することも示した。そして、その層の生

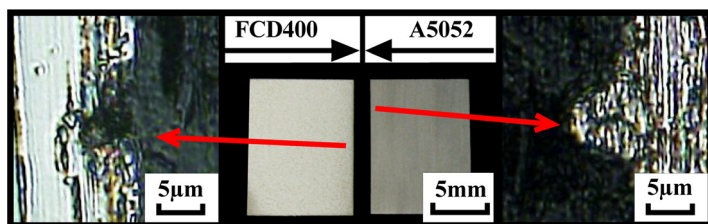
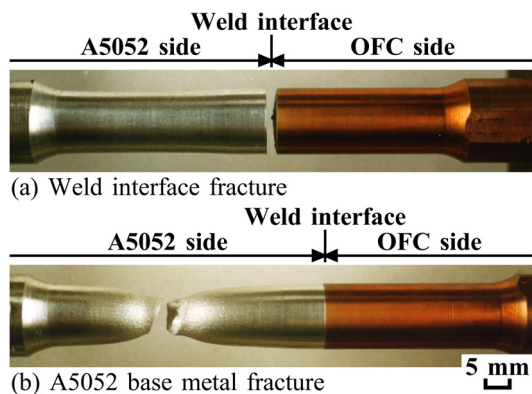
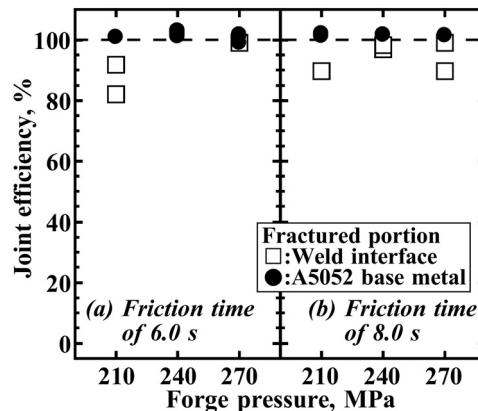


図 7 A5052/FCD400 継手の圧接面近傍断面写真の例



(i) 継手破断外観の一例



(ii) 継手引張試験結果

図8 A5052/OFC 継手の引張試験結果

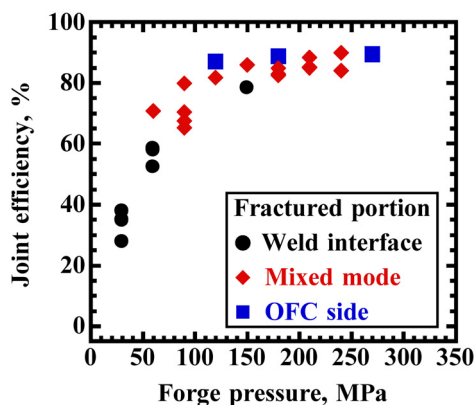


図9 OFC/SUS304 継手の引張試験結果

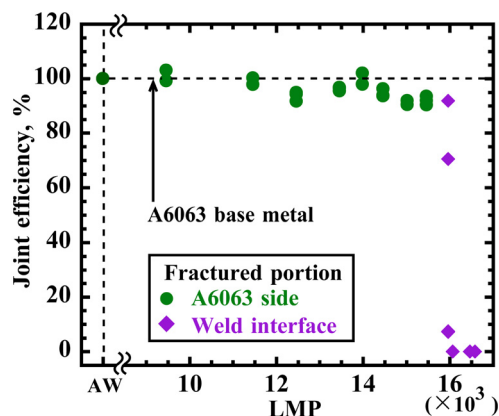


図10 A6063/SUS304 継手に熱処理を施した場合の引張試験結果

成が極めて少なくなる摩擦圧力 20MPa, お互いの金属間化合物層が生成しない摩擦時間 6.0s とし, 圧接面を密着させることが出来る 240MPa のアプセット圧力で接合すれば, 図8 (i)-(b) に示すように組み合わせたときに軟質材にあたる A5052 側から破断する良好な継手の作製が可能であることを示した. また, 図8 (ii) に示したようにアプセット圧力がそれよりも高いもしくは低い条件では, 圧接面の変形状態が異なることに起因して A5052 側から破断する継手が得られにくくなるため, アプセット圧力も適切に設定する必要があることも指摘した.

さらに, 純 Cu(OFC) とステンレス鋼(SUS304) の組み合わせにおいても, 図9 に示すように適切な圧接条件で接合すれば, この場合の組み合わせたときに軟質材にあたる OFC 側から破断する良好な継手が得られることも示した. なお, 継手は OFC 側から破断した結果が得られたにもかかわらず図9 のように OFC 母材と同等の引張強さ, すなわち 100% の継手効率を有してなく, これは, 接合中に生じた摩擦熱により OFC 側が軟化したためであることも示した.

ところで, 異材継手を利用する場合, その継手の使用環境によっては使用中に継手が破壊してしまう可能性がある. このような事例は回転式の摩擦圧接で作製された異材継手のみならず LFW により作製された異材継手においても同様であると考えられる. そこで, 関連する基礎データを得るために回転式の摩擦圧接で作製した Al 合金(A6063) とステンレス鋼(SUS304) との異材継手に対して熱処理を施すことで, 高温環境下で継手を使用した場合においてどのような影響が現れるかを調べた. その結果を図10 に示す. なお, 図10 は熱処理時の温度と時間のパラメータを熱効果として示すことができる LMP(Larson-Miller parameter) で整理した結果である. LMP の値が小さい条件の場合, すべての継手は A6063 側から破断しており継手強度は 90% 以上を示していたが, LMP=15960 (525°C-1H) 以上の条件では継手はすべて圧接面から破断しており, この条件以上では継手強度が急激に減少することがわかった. よって, 異材継手は使用環境に影響されることが分かった.

このように, 各種異種材料の組み合わせに対して回転式の摩擦圧接を行った検討では, 限られた組み合わせではあるものの LFW による接合の際に役立つ基礎データの収集を行うことができた. なお, 本研究課題終了後も引き続き同様な検討を実施する予定である.

以上のように, 本研究課題では, LFW 現象解明に繋がる知見と, 異種材料への適用に対する基礎データを得ることができた.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① Masaaki Kimura, Yuusuke Inui, Masahiro Kusaka, Koichi Kaizu, Effects of Friction Welding Conditions on Tensile Strength of Friction Welded Joint between 5052 Al Alloy and Pure Copper, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol.5, No.2, 2018 年, Paper No. 17-00398 (17 pages).

[学会発表] (計 11 件)

- ① 小原広暉, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, OFC/SUS304 摩擦圧接継手の継手強度に及ぼす摩擦時間とアプセット圧力の影響, 溶接学会平成 28 年度秋期全国大会, 2016 年, pp.178-179.
- ② Koki Ohara, Masaaki Kimura, Masahiro Kusaka, Koichi Kaizu, Effect of friction welding conditions on joining phenomena and tensile strength of friction welded joint between OFC and 304 stainless steel, 10th International Conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society (9WS), 2016 年, pp.974-977.
- ③ 佐藤佑樹, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 線形摩擦圧接の圧接面における温度分布の有限要素解析手法の検討, 日本機械学会関西学生会平成 28 年度卒業研究発表講演会, 2017 年, pp.5-9.
- ④ Masaaki Kimura, Yusuke Inui, Masahiro Kusaka, Koichi Kaizu, Effects of friction welding conditions on tensile strength of friction welded joint between 5052 Al alloy and pure copper, NAMRI/SME North American Manufacturing Research Conference (NAMRC-45), ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2017), and JSME International Conference on Material and Processing (ICM&P2017), 2017 年, Doc.No. ICMP2017-4346.
- ⑤ 佐藤佑樹, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 線形摩擦圧接における圧接面温度変化の FEM 解析による推定方法の検討, 溶接学会平成 29 年度秋季全国大会, 2017 年, pp.286-287.
- ⑥ 崎野翔太, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 後熱処理を施した A6063/SUS304 摩擦圧接継手の引張強さ, 日本機械学会関西学生会平成 29 年度卒業研究発表講演会, 2018 年, pp.18-15.
- ⑦ 崎野翔太, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 林田和宏, 橋本晴美, 後熱処理を施した A6063/SUS304 摩擦圧接継手の特性, 溶接学会平成 30 年度秋期全国大会, 2018 年, pp.90-91.
- ⑧ 米田晃, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 林田和宏, 橋本晴美, FCD400 と A5052 との摩擦圧接による異材継手作製のための圧接条件の検討, 溶接学会平成 30 年度秋期全国大会, 2018 年, pp.92-93.
- ⑨ 佐藤佑樹, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 簡易線形摩擦圧接装置の作製および接合実験, 日本機械学会第 12 回生産加工・工作機械部門講演会(MMTC12), 2018 年, Doc.No. D21.
- ⑩ Akira Yoneda, Masaaki Kimura, Masahiro Kusaka, Koichi Kaizu, Kazuhiro Hayashida, Harumi Hashimoto, Joint Characteristics of Friction Welded Joint between Ductile Cast Iron and 5052 Al Alloy, International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2018 (JAAA2018), 2018 年, pp.87-88.
- ⑪ Shota Sakino, Masaaki Kimura, Masahiro Kusaka, Koichi Kaizu, Kazuhiro Hayashida, Harumi Hashimoto, Joint Characteristics of Friction Welded Joint between 6063 Al Alloy and 304 Stainless Steel through PWHT, International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2018 (JAAA2018), 2018 年, pp.89-90.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：日下 正広, 海津 浩一, 林田 和宏, 橋本 晴美

ローマ字氏名：Masahiro Kusaka, Koichi Kaizu, Kazuhiro Hayashida, Harumi Hashimoto

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。