

# 様式 C-19

## 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24年 5月15日現在

機関番号：24506 研究種目：若手研究（B）  
研究期間：2008～2011  
課題番号：20760496  
研究課題名（和文） 低入熱異材摩擦接合技術の展開とそのデータベース構築  
研究課題名（英文） Development and Its Database Assembling of Low Heat Input Friction Welding Method for Dissimilar Materials  
研究代表者  
木村 真晃（KIMURA MASAOKI）  
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：90285338

研究成果の概要（和文）：本研究では、異種材摩擦圧接の接合メカニズムを明らかにするため、Al系材料、Cu系材料、純Ti、鉄鋼材料、ステンレス鋼などといった種々の材料を用いて接合実験を行い、摩擦過程中の接合現象を詳細に観察した。また、得られる継手強度に及ぼす接合条件の影響を調べ、接合部で破断しない継手が得られる接合条件を見いだした。さらに、低入熱状態で接合可能な接合自己完了型摩擦圧接法を適用し、異材継手作製に適用できるかも試みた。

研究成果の概要（英文）：This research was carried out to the clarification of the joining mechanism for the dissimilar materials friction welding. In this study, various materials such as aluminum, copper, titanium, carbon steel and stainless steel were used. The joining phenomena during the friction process of those combinations were investigated. In addition, the effect of the friction welding condition on the joint strength was investigated, and the friction welding condition with the base metal fracture was found. Furthermore, the results of the joint properties of the various joints by the autocompleting friction welding method were demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：材料加工学・溶接工学

科研費の分科・細目：工学・材料工学・材料加工・処理

キーワード：摩擦圧接，低入熱，異材継手，接合現象，接合メカニズム，母材破断，圧接条件

### 1. 研究開始当初の背景

21世紀の我が国において、ものづくり産業の持続的な発展には基礎・基盤技術が必要不可欠である。その中には異材継手作製する接合技術が非常に強く求められている。しかし、異種材料の組み合わせでは物理的性質や機械的性質の異なる材料同士を組み合わせることになるために接合界面に脆弱な金属間化合物層が生成し、それが継手性能に大きく影

響することから、異材継手作製するためには技術的に越えなければならない課題が非常に多い。これらの問題を解決していく上では、溶融溶接法などの従来までの溶接・接合技術の延長では困難となる場合もあるため、新しい着想による技術開発が求められている。そこで、接合する材料を融点以下に抑えることのできる固相接合法の適用が考えられ、本研究課題で取り扱った摩擦圧接法の適用が考え

られる。

摩擦圧接法とは、固相状態で接合する溶接方法のひとつであり、素材の一方を回転させ他方の素材を押しつけて接合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あることもあり、古くから利用されてきた。しかし、実際に接合部から破断しない健全な継手を得るための接合条件である圧接条件は、その組み合わせた材料ごとに試行錯誤によって決定しているのが現状となっている。これは、摩擦過程中的の接合メカニズムが明らかにされていないことが原因であった。しかし、研究代表者は、これまでに同種材料の組み合わせを中心に摩擦圧接現象を詳細に観察することによって接合メカニズムを解明し、かつ従来までの常識とされてきた圧接条件を覆し、継手への入熱量が少なくできる低入熱摩擦圧接(LHI)法を提案している。また、CDFW(センタードライブ摩擦圧接)法を用い、これまで接合が難しかった角棒同士の接合を容易にし、さらに接合自己完了型摩擦圧接法という新しい接合方法を開発している。これらの接合方法は、いずれも低入熱状態で接合を完了することができるため、HAZ軟化が問題となる熱処理材や調質材の接合にも適用できるなどの利点を有している。特に、脆弱な金属間化合物の生成が低減できる可能性があるため、異材継手の作製に用いた場合、接合部から破断しない健全な継手を容易に作製できると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、上述した研究背景のもと、研究代表者が開発した低入熱摩擦圧接法および接合自己完了型摩擦圧接法を用い、異材継手を容易に作製するための圧接条件を体系化し、そしてそのデータベースを構築することを最終目的としている。その中で、研究期間内においては、以下の内容を明らかにすることを最重点課題として研究を実施した。

- (1) 摩擦圧接現象を大別化することで力学的・冶金学的な観点から異材摩擦圧接の接合メカニズムを解明する。
- (2) 種々の先端材料を用いて接合実験を行うことで各種異材継手を作製し、圧接条件と継手強度との関係を定量的に評価する。
- (3) 実験結果に裏付けされた数値シミュレーション法の開発と低入熱異材摩擦接合技術を確立する。
- (4) 上記の結果を基に異材継手の場合における圧接条件のデータベース化を目指し、合理的な圧接条件の提案を行う。

これらの内容を明らかにすることによって、種々の先端材料の接合に対しても研究代表者が提案している低入熱摩擦圧接技術が継手作製に対して適用できることを示す。そして、今世紀のものづくり産業の持続的な発展

のために必要なブレイクスルー技術を提案するための一助とすることを目指している。

## 3. 研究の方法

前項において記述した4つの内容を実施するためには、摩擦過程中的の接合現象を詳細に観察することが非常に重要であり、不可欠でもある。しかし、一般的な摩擦圧接機ではそれを実施することが非常に難しい。そこで本研究課題では、以下のような方法で研究を推進してきた。

- (1) 研究代表者が所有している摩擦圧接装置を摩擦過程中的の接合現象が詳細に観察できるような接合実験装置へと改造・改良を実施した。
- (2) Al系材料、Cu系材料、Ti系材料、各種炭素鋼やステンレス鋼などといった各種材料を用い、これらを種々組み合わせて接合実験を行った。そして、摩擦時間の経過にともなう接合面の温度上昇、接合面の擦れ加工状況、焼付き・移着状況に及ぼす摩擦圧力、摩擦速度の影響などを定量的に明らかにした。
- (3) 摩擦圧力、摩擦速度などの圧接条件を種々変化させて継手を作製し、その継手の引張試験などを実施した。そして、継手強度に及ぼす圧接条件の影響を明らかにし、どの時点で母材部から破断するかを実験的に見いだした。
- (4) 上述した実験結果をもとに力学的・冶金学的な検討を加え、異材摩擦圧接の接合メカニズムについて論理的に解明することを試みた。

## 4. 研究の成果

本研究期間内においては、上述した内容についておおむね明らかにすることができた。このうち、「研究の目的」の欄で記述した(1)、(2)および(4)の一部の内容に関連し、限られた素材の組み合わせではあるが、前項(2)で述べた各種材料を用いて接合実験を行い、その摩擦過程中的の接合現象を詳細に観察し、得られる継手の引張強さなどを調べることでその継手性能の評価を実施した。限られた組み合わせではあるが、例えば、純Alと軟鋼(雑誌論文②, ⑪, 学会発表⑫), Al合金であるA5052と軟鋼(雑誌論文②, ⑤, 学会発表⑬), 純Cuと軟鋼(雑誌論文⑫, 学会発表⑭), Cu合金と軟鋼(雑誌論文⑥, ⑩), 純Tiと軟鋼(学会発表①), 純Cuと純Ti(雑誌論文①, ③, 学会発表⑤, ⑥, ⑨, ⑫)といった各継手に関し、いずれも接合部で破断しない、すなわち母材部から破断する良好な継手が得られる圧接条件を見いだすことができた。それら引張試験後の継手外観の写真の一例として、純Al/軟鋼継手の結果を(a)に、A5052/軟鋼継手のそれを(b)に、純Cu/軟鋼継手の場合を(c)に、Cu

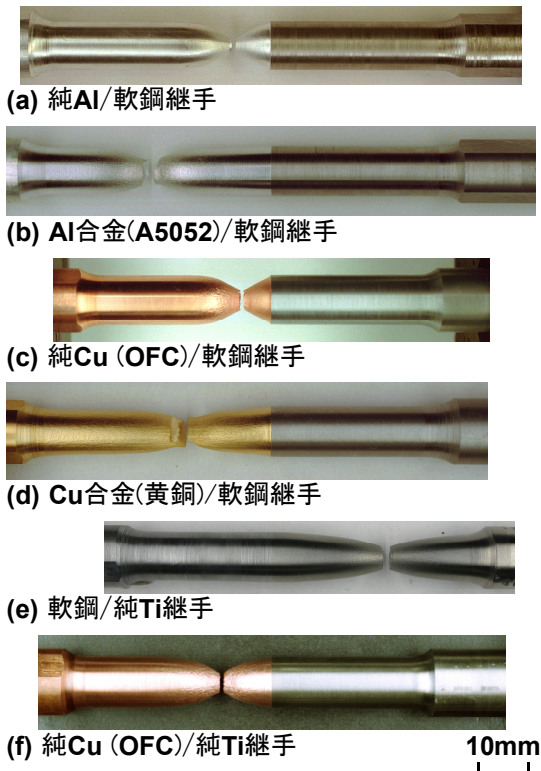


図1 各種異材継手の例

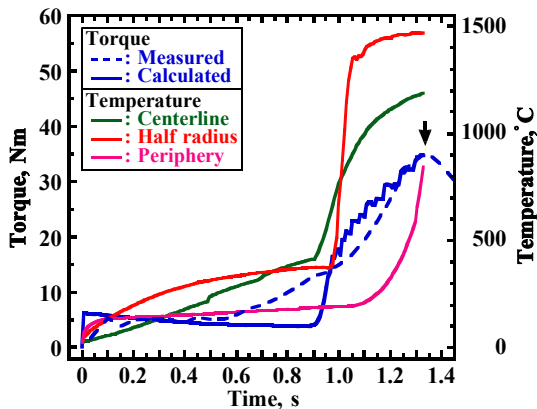


図2 軟鋼継手の摩擦トルクと圧接面温度のシミュレーション結果

合金(黄銅)/軟鋼継手のそれを(d)に、純Ti/軟鋼継手の結果を(e)に、純Cu/純Ti継手のそれを(f)にそれぞれ示す。このように、いずれも接合部で破断しない良好な継手が得られることが分かった。圧接条件はいずれの組み合わせでも異なっているが、組み合わせたときに硬質側の接合面前面に軟質側が移着を生じる以降の摩擦時間において良好な継手が得られやすい結果となっており、このような共通事象が圧接条件選定の指針になりうる可能性があることもわかり始めてきた。その一方で、純Alと軟鋼、純Cuと純Tiの組み合わせに関しては、高いアプセット圧力を付加した場合において、軟質側母材のパウシंगाー効果や強

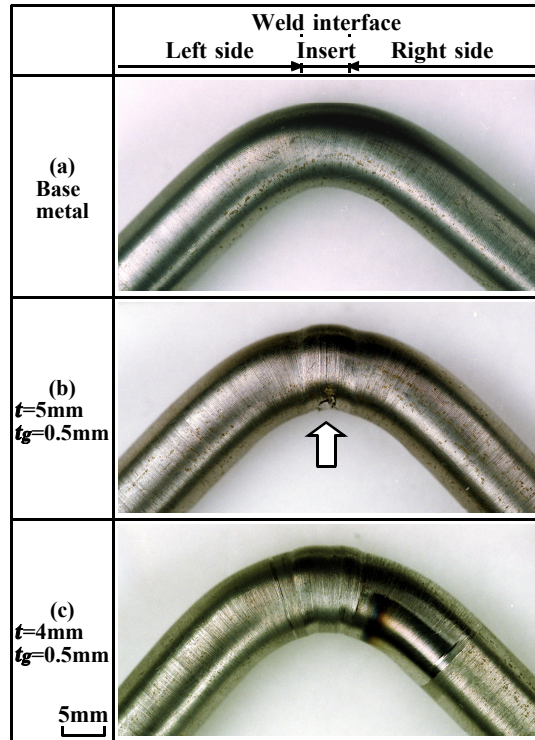


図3 接合自己完了型摩擦圧接法により作製した高張力鋼(HT780)継手の曲げ試験結果の例

度異方性に起因して得られる継手の引張強さが低下する可能性が示唆されたため、適切なアプセット圧力を付加して接合する必要があることも示した(雑誌論文①, ②, ⑪, 学会発表⑤, ⑩). さらに、純Cuと純Tiの組み合わせに関しては、純Ti側の接合端面の性状が継手性能に大きく影響を及ぼしており、最大粗さを小さくした方が良好な継手が得られやすいことも明らかにした(雑誌論文①, 学会発表⑤, ⑨, ⑫).

また、摩擦圧接法は、中実丸棒同士の組み合わせはもちろんのこと、パイプ同士の接合にも適用できることから、肉厚が非常に薄いステンレス鋼同士の組み合わせに関しても適用した結果、低い摩擦圧力で適切な摩擦時間およびアプセット圧力で接合することで良好な継手が得られることも明らかにした(学会発表⑬, ⑭). さらに、(3)の項目に関連して、基本的な炭素鋼材同士の組み合わせに関してはあるが、素材物性値と圧接条件をパラメーターとした実験結果に裏付けされたシミュレーション手法を開発し、図2に示すように摩擦過程に生じる摩擦トルクと圧接面温度をシミュレートすることができた(雑誌論文⑦, 学会発表⑮).

さらに、3種類の素材を低入熱状態で同時接合することが可能な接合自己完了型摩擦圧接法に関して、高炭素鋼や高張力鋼(HT780)を用いた場合において良好な継手が容易に作

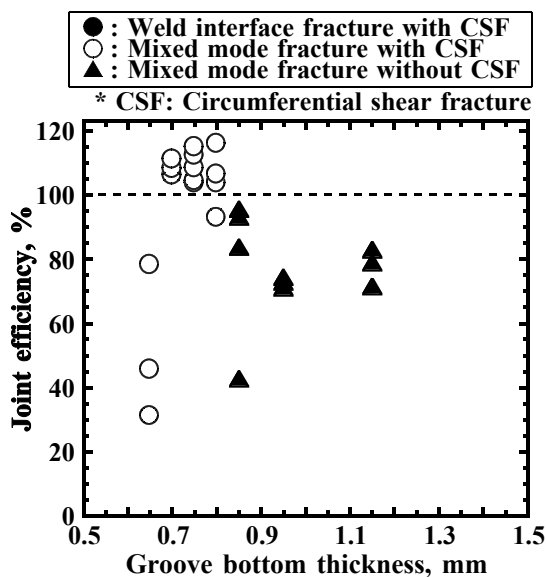


図4 接合自己完了型摩擦圧接法により作製した軟鋼/Cu合金(黄銅)/軟鋼継手の引張強さとCu合金挿入材溝部肉厚との関係

製できることを示した(雑誌論文④, ⑤, ⑨, 学会発表⑫, ⑭). その一例として, 高張力鋼(HT780)継手に対し曲げ試験を行った後の継手外観写真を図3に示す. このように, 母材と同様に90°曲げを有する継手を得ることができた. さらに, 同法を異材継手作製に適用できるかを試みた場合として, 中央で回転させる挿入材にCu合金(黄銅)とし, 両側に軟鋼を用いた場合の検討も実施しており, 適切な挿入材形状と圧接条件とすることで, 同法が異材継手作製に対しても適用できることを示した(学会発表②, ⑩, ⑱).

このように, 限られた組み合わせではあるものの, 各種材料を用いて接合を実施し, どのような条件となったときに接合部で破断しない継手を得られるかを明らかにすることができた. なお, これら研究成果の一部について, 学会発表⑫に関連して溶接学会溶接構造シンポジウム2009シンポジウム賞(平成21年11月)を, 学会発表⑩に関連してThe 8th International Welding Symposium of Japan Welding Society the Best Poster JRI Solutions Award(平成20年11月)をそれぞれ受賞している. すなわち, これらの結果を踏まえると, 本研究で取り扱っている課題は国内外において高い評価を得ていると考えている.

一方, 現段階において, これまでにその詳細が明らかになっていない組み合わせもいくつかある. 例えば, 前述したA5052 Al合金と比較すると溶接性が非常に悪いA7075と軟鋼とを組み合わせした場合, 図5にその結果の一例を示すが, どの時点から母材と同等という高い継手強度が得られるかなどの詳細は十分には明らかにできていない(学会発表③, ⑧).

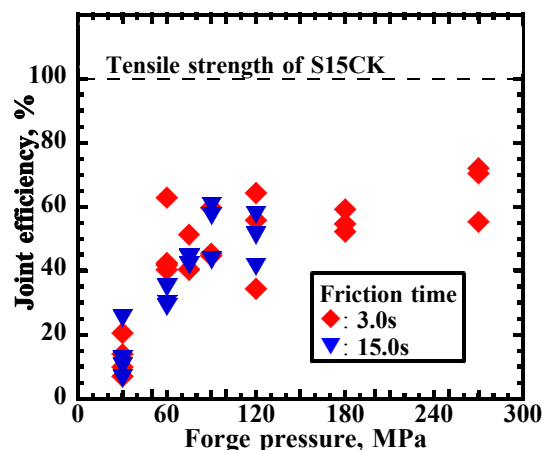


図5 A7075/軟鋼継手の引張強さとアプレット圧力との関係

さらに, 純Tiと軟鋼との組み合わせに関しても, 詳細な継手性能を明らかにするまでには至っていない(学会発表①). また, 前述した各異材継手の摩擦圧接現象を明らかにしている過程において, 研究計画当初に予測していた接合現象とは異なる現象を示す材料の組み合わせがあることも明らかになりつつある. 例えば, 前述した純Cuと純Ti, 上述した純Tiと軟鋼との組み合わせなどがそれに該当する. すなわち, 研究計画当初の目論見とは異なる摩擦圧接現象があることがわかり, 摩擦圧接現象を大別化するためには, 前述した異材継手の組み合わせ以外にも検討を行う必要があることが分かった. また, 接合自己完了型摩擦圧接法においても, ステンレス鋼などを用いた場合にはこの素材特有の接合現象があるために, 母材部から破断する条件を見いだすまでには至っていない(学会発表④, ⑦). そのため, 圧接条件のデータベース化を実施するためのデータとしては不十分であり, 更なるデータを蓄積することが求められる. したがって, 本研究課題終了後も引き続き明らかにしていくことを考えている.

## 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 12 件)

① M.Kimura, Y.Saitoh, M.Kusaka, K.Kaizu, A.Fuji, Effect of Friction Welding Condition and Weld Faying Surface Properties on Tensile Strength of Friction Welded Joint between Pure Titanium and Pure Copper, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, Vol.5, No.12, 2011, pp.849-865.

DOI:10.1299/jmmp.5.849

② 木村真晃, 石井宏樹, 日下正広, 海津浩一, 富士明良, Al系材料と軟鋼との摩擦圧接に

- おける接合現象と継手強度, 査読無, Vol.49, No.11, 2011, pp.420-428.  
DOI番号, URLアドレス無し
- ③ M.Kimura, Y.Saitoh, M.Kusaka, K.Kaizu, A.Fuji, Effect of friction pressure on joining phenomena of friction welds between pure titanium and pure copper, Science and Technology of Welding and Joining, 査読有, Vol.16, No.5, 2011, pp.392-398.  
<http://dx.doi.org/10.1179/1362171811Y.000000009>
- ④ M.Kimura, D.Utsumi, M.Kusaka, K.Kaizu, Strength enhancement of autocompleting medium and high carbon steels friction welded joints, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.211, No.2, 2011, pp.256-262.  
<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09240136>
- ⑤ 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 接合自己完了型摩擦圧接した高張力鋼継手の特性とその改善, 溶接学会論文集, 査読有, Vol.28, No.3, 2010, pp.319-327.  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/qjws/28/3/28\\_319/\\_article/-char/ja/](http://www.jstage.jst.go.jp/article/qjws/28/3/28_319/_article/-char/ja/)
- ⑥ M.Kimura, M.Kusaka, K.Kaizu and A.Fuji, Effect of post-weld heat treatment on joint properties of friction welded joint between brass and low carbon steel, Science and Technology of Welding and Joining, 査読有, Vol.15, No.7, 2010, pp.590-596.  
<http://www.ingentaconnect.com/content/maney/stwj/2010/00000015/00000007/art00006>
- ⑦ M.Kimura, H.Inoue, M.Kusaka, K.Kaizu, A.Fuji, Analysis Method of Friction Torque and Weld Interface Temperature during Friction Process of Steel Friction Welding, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, Vol.4, No.3, 2010, pp.401-413.  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/jmmp/4/3/4\\_401/\\_article/-char/ja/](http://www.jstage.jst.go.jp/article/jmmp/4/3/4_401/_article/-char/ja/)
- ⑧ M.Kimura, H.Ishii, M.Kusaka, K.Kaizu, A.Fuji, Joining phenomena and joint strength of friction welded joint between aluminium-magnesium alloy (AA5052) and low carbon steel, Science and Technology of Welding and Joining, 査読有, Vol.14, No.7, 2009, pp.655-661.  
<http://www.ingentaconnect.com/content/maney/stwj/2009/00000014/00000007/art00009>
- ⑨ M.Kimura, D.Utsumi, M.Kusaka, K.Kaizu, Selection guide of insert piece shape for steel joint by autocompleting friction welding method, Science and Technology of Welding and Joining, 査読有, Vol.14, No.6, 2009, pp.570-576.  
<http://www.ingentaconnect.com/content/maney/stwj/2009/00000014/00000006/art00013>
- ⑩ M.Kimura, K.Kasuya, M.Kusaka, K.Kaizu, A.Fuji, Effect of friction welding condition on joining phenomena and joint strength of friction welded joint between brass and low carbon steel, Science and Technology of Welding and Joining, 査読有, Vol.14, No.5, 2009, pp.404-412.  
<http://www.ingentaconnect.com/content/maney/stwj/2009/00000014/00000005/art00003>
- ⑪ M.Kimura, H.Ishii, M.Kusaka, K.Kaizu, A.Fuji, Joining phenomena and joint strength of friction welded joint between pure aluminium and low carbon steel, Science and Technology of Welding and Joining, 査読有, Vol.14, No.5, 2009, pp.388-395.  
<http://www.ingentaconnect.com/content/maney/stwj/2009/00000014/00000005/art00001>
- ⑫ M.Kimura, M.Kusaka, K.Kaizu, A.Fuji, Effect of Friction Welding Condition on Joining Phenomena and Tensile Strength of Friction Welded Joint between Pure Copper and Low Carbon Steel, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, Vol.3, No.2, 2009, pp.187-198.  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/jmmp/3/2/3\\_187/\\_article/-char/ja/](http://www.jstage.jst.go.jp/article/jmmp/3/2/3_187/_article/-char/ja/)
- [学会発表] (計 23 件)  
主要なものとして, 以下の20件を挙げる.
- ① 飯島司, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 純Ti/S15CK摩擦圧接の接合現象と継手強度に及ぼす摩擦時間およびアブセット圧力の影響, 溶接構造シンポジウム2011, 2011, pp.245-248, 大阪大学.
- ② 木村真晃, 石野陽祐, 日下正広, 海津浩一, 黄銅挿入材を用いた軟鋼の接合自己完了型摩擦圧接, 溶接構造シンポジウム2011, 2011, pp.237-244, 大阪大学.
- ③ 由川大記, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 富士明良, A7075/軟鋼摩擦圧接の継手強度に及ぼす摩擦圧力の影響, 溶接学会平成23年度秋期全国大会講演会, Vol.89, 2011, pp.290-291, 皇學館大学.
- ④ 前田友寛, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 接合自己完了型摩擦圧接法を用いたSUS304継手作製のための挿入材形状の改善, 溶接学会平成23年度秋期全国大会講演会, Vol.89, 2011, pp.288-289, 皇學館大学.
- ⑤ M.Kimura, Y.Saitoh, M.Kusaka, K.Kaizu, A.Fuji, Effect of friction welding condition and weld faying surface properties on tensile strength of friction welded joint between pure titanium and pure copper, 2011 ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference, 39th Annual SME North

American Manufacturing Research Conference, and 2011 JSME/ASME International Conference on Material and Processing, 2011, ICMP2011-51019, Oregon State University, Corvallis, USA.

- ⑥木村真晃, 齊藤嘉孝, 日下正広, 海津浩一, 富士明良, 純Ti/OFC摩擦圧接の接合現象, 日本機械学会第18回機械材料・材料加工技術講演会, No.10-29, 2010, 430, 東京大学.
- ⑦前田友寛, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 富士明良, 接合自己完了型摩擦圧接したSUS304継手の性能に及ぼす挿入材形状の影響, 溶接学会平成22年度秋期全国大会講演会, Vol.87, 2010, pp.6-7, 日本大学.
- ⑧由川大記, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 富士明良, A7075/軟鋼摩擦圧接の継手強度に及ぼす圧接条件の影響, 溶接学会平成22年度秋期全国大会講演会, Vol.87, 2010, pp.4-5, 日本大学.
- ⑨齊藤嘉孝, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 純Ti/OFC摩擦圧接の継手強度に及ぼすTi側接合端面性状の影響, 日本機械学会関西支部第85期定時総会講演会, No.104-1, 2010, 3-25, 神戸大学.
- ⑩石野陽祐, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 接合自己完了型摩擦圧接した黄銅/軟鋼継手の引張強度に及ぼす黄銅挿入材形状の影響, 日本機械学会関西支部第85期定時総会講演会, No.104-1, 2010, 3-24, 神戸大学.
- ⑪一原彰宏, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, SUS310S鋼薄肉円管摩擦圧接の継手性能とその改善, 日本機械学会関西支部第85期定時総会講演会, No.104-1, 2010, 3-17, 神戸大学.
- ⑫木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 接合自己完了摩擦圧接法により接合した高張力鋼継手の引張強度, 溶接構造シンポジウム2009, 2009, pp.225-232, 大阪大学.
- ⑬一原彰宏, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, SUS310S鋼薄肉円管摩擦圧接における継手性能の改善, 溶接学会平成21年度秋期全国大会講演会, Vol.85, 2009, pp.202-203, 徳島大学.
- ⑭木村真晃, 内海大輔, 日下正広, 海津浩一, 接合自己完了型摩擦圧接法により接合した高炭素鋼継手の引張強度, 溶接学会平成21年度秋期全国大会講演会, Vol.85, 2009, pp.200-201, 徳島大学.
- ⑮木村真晃, 井上晴雄, 日下正広, 海津浩一, 富士明良, 摩擦過程中的摩擦トルクと圧接面温度のFEM解析手法の検討, 日本機械学会M&M2009材料力学カンファレンス, No.09-3, 2009, pp.313-314, 札幌コンベンションセンター.
- ⑯M.Kimura, H.Ishii, M.Kusaka, K.Kaizu, A.Fuji, Effect of friction welding condition

on joining phenomena and joint strength of pure aluminum and low carbon steel friction welded joints, The 8th International Welding Symposium of Japan Welding Society, 2008, PT1-26, pp.242, 京都国際会館.

- ⑰M.Kimura, M.Kusaka, K.Kaizu, A.Fuji, Effect of Friction Welding Condition on Joining Phenomena and Tensile Strength of Friction Welded Joint between Pure Copper and Low Carbon Steel, 2008 ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering and 3rd JSME/ASME International Conference on Material and Processing 2008, 2008, MSEC\_ICM&P2008-72025, Northwestern University, Evanston, USA.
- ⑱石野陽祐, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 黄銅を挿入材に用いた軟鋼の接合自己完了摩擦圧接, 溶接学会平成20年度秋期全国大会講演会, Vol.83, 2008, pp.102-103, 北九州国際会議場.
- ⑲木村真晃, 石井宏樹, 日下正広, 海津浩一, 富士明良, A5052/S15CK摩擦圧接の接合現象と継手強度, 溶接学会平成20年度秋期全国大会講演会, Vol.83, 2008, pp.98-99, 北九州国際会議場.
- ⑳齊藤嘉孝, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 富士明良, 純Ti/OFC摩擦圧接継手の継手性能向上に関する検討, 溶接学会平成20年度秋期全国大会講演会, Vol.83, 2008, pp.96-97, 北九州国際会議場.

〔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〕

○受賞(学会関連)

- ・溶接学会 溶接構造シンポジウム2009 シンポジウム(優秀論文)賞(平成21年11月)
- ・The 8th International Welding Symposium of Japan Welding Society the Best Poster JRI Solutions Award(平成20年11月)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 真晃 (KIMURA MASA AKI)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 90285338

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし