

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03775

研究課題名(和文)異種難接合材料のインサート材による低入熱同時摩擦接合技術の確立

研究課題名(英文)Development of simultaneous friction welding technique with low heat input for difficult materials combination with insert metal

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：超々ジュラルミン(A7075-T6)と異種材料とを組み合わせた異材継手は産業界より求められるが、その接合は難しい。本研究では、難接合材料と異種材料との異材継手を摩擦圧接法により作製し、接合部から破断しない良好な継手が得られる低入熱同時摩擦接合技術を確立することを目的とした。その中で、直接接合が難しいA7075-T6と鉄鋼材料との組み合わせを取り上げ、両材料に対して比較的接合性が良い純Tiをインサート材とし、それを介して同時摩擦圧接を行った際の接合条件と接合端部形状についての検討を中心に行った。また、マルチマテリアル化に向けた低入熱摩擦接合技術拡大のための接合条件の選定指針についても検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

継手は、軟鋼母材の降伏強度を超える高い引張強度が得られたため、純Tiのインサート材を介したA7075-T6と軟鋼との低入熱同時摩擦接合技術を示すとともに、接合条件の選定指針の目安を得ることができた。現状では軟鋼母材と同等の引張強度を有して軟鋼側から破断する良好な継手が得られていないが、引き続き検討を行うことでそれが実現できると考えている。それにより、これまで実現できなかった異種材料との組み合わせでも接合できる可能性があり、マルチマテリアル化に大きく貢献する。それは、我が国の国際競争力に打ち勝つものづくり産業の発展に繋がり、自動車産業のみならず各種産業分野に大きく波及するため、社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：The dissimilar joint with the material to difficult welding such as A7075-T6 aluminum alloy fabricated by friction welding is strongly required in the industry field. The purpose of this study is the development of the simultaneous friction welding method with low heat input for making the joint without the weld interface fracture. In this study, the materials combination was A7075-T6 and low carbon steel (S15CK) that was difficult to welding of the direct joining, and those materials were simultaneous friction welded through using an insert metal of pure Ti. Then, the characteristics of those joints, which had the various insert metal shapes as well as various friction welding conditions, were evaluated. Additionally, the guideline of friction welding condition was investigated to expand of the friction welding method with low heat input for a multi-material structure.

研究分野：溶接工学

キーワード：摩擦圧接 A7075 軟鋼 純Ti インサート材 同時接合 マルチマテリアル

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、気候変動などの地球温暖化によると思われる現象が世界中で多発している。よって、地球環境を保全しながら“ものづくり”を行うことが急務である。そのような背景のもと、各種工業製品を考えた場合、例えば、自動車では車両重量を減少させることで燃費向上や走行・航続距離が増加することから、地球環境保全の観点から見ると、車体の軽量化は必須となる。他の輸送機器車両においても同様であることから、様々な材料を組み合わせることで適材適所に配して使用する、すなわち「マルチマテリアル化」が強く望まれている。

ところで、「マルチマテリアル化」の実現には異なる材料同士を組み合わせる使用することが不可欠であり、それを実現させるためには、接着剤による結合や、ネジやリベットによる締結によりそれらを一体化させることが考えられる。しかし、それらを構造物として利用するためにはある程度の強度確保も必須であるため、接合部を含めてより強固に一体化すること、すなわち溶接・接合技術により異材継手を容易に作製することが急務となっている。しかし、異材継手を溶融溶接法により作製する場合、接合面に脆弱な金属間化合物が生成し、それが継手性能に大きく影響することから、その接合は容易ではない。また、異材継手を高温状態のような環境下で使用した場合にも接合面に金属間化合物が生成・成長し、それが原因で継手強度が著しく低下する場合が指摘されていること、腐食環境下では異種金属接触腐食が生じるために継手の腐食形態が変化することなど、異材継手を実際構造物へと適用するためには様々なハードルを越えなければならず、これらを解決しなければ「マルチマテリアル化」の実現は難しい。

そのような背景のもと、融点以下の温度で接合でき、かつ金属間化合物も生成しにくいという特徴を有している固相接合法が注目されており、その中に、本研究の主題として扱った回転式の摩擦圧接法がある。この方法は、数秒から数十秒と極めて短い時間で接合が完了すること、再現性が極めて高く自動化が容易であるなど様々な利点を有している方法である。特に、一方の素材を回転させて他方に押しつけて接合面に摩擦熱を発生させて溶接するという極めて単純な原理で接合する方法と接手法は極めて単純であり、接合条件が一義的、かつ容易に高い信頼性を有する継手が作製できることから、自動車の安全保安部品の製作など各種産業分野において用いられていることでも知られている。このように摩擦圧接法は、同種材料の組み合わせに関しては既に輸送機器車体やその各種部品の製造などに幅広く利用されているものの、接合条件の選定指針が確立されておらず、材料の組み合わせが異なると接合現象も異なるために試行錯誤により接合条件を決定しなければならない。そのため、一部の組み合わせ(JIS Z 3175)<sup>1)</sup>を除いては、異材継手の作製にはあまり適用されていないのが問題点となっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、固相状態での接合が可能な摩擦圧接法に注目し、超々ジュラルミン(A7075-T6)のようにAl合金の中でも自身の変形能の悪さや軟化を生じやすいことから溶接が難しい難接合材料を取り上げ、この材料と異種材料とを組み合わせた異材継手を作製するために低入熱同時摩擦圧接を行い、接合部から破断しないような良好な継手を得ることができる諸要件を見いだすことを最終目的として検討を行った。

### 3. 研究の方法

供試材料には、市販されている直径 $\phi 16\text{mm}$ のA7075-T6(以下、A7075)のAl合金とS15CKの機械構造用炭素鋼の各丸棒と、A7075との接合<sup>2)</sup>、S15CKとの接合<sup>3)</sup>に対してそれぞれ良い結果が示されている工業用純Ti(以下、Ti)の直径 $\phi 50\text{mm}$ の丸棒を用いた。各母材の引張強さはそれぞれ639MPa、439MPa、420MPaである。A7075とS15CKは接合端部の直径を $\phi 10\text{mm}$ とした円柱形状へと加工してそれぞれの固定側試験片とした。一方、インサート材としたTiは、図1に示すように直径 $\phi 50\text{mm}$ 、厚さ5mmである平板形状の円盤型とした。そして、すべての接合端面を平面研削盤により研磨して各試験片とした。

接合実験には、短片のインサート材を介した接合できる中央回転式摩擦圧接機<sup>4)</sup>を用い、固定したA7075とS15CKとの間にTiを挿入し、これを回転させて接合実験を行った。接合条件である圧接条件は、摩擦速度 $27.5\text{s}^{-1}$ (1650rpm)と摩擦圧力90MPaの一定とし、摩擦時間やアプセット圧力を種々変化させて接合実験を行った。接合後、継手外観の観察を行うとともに平行部長さ50mm、直径10mmの引張試験片へと機械加工し、A7075側の自然時効硬化による影響<sup>5)</sup>を考慮して接合から28日後に引張試験を行って継手強度を調べた。また、圧接面近傍の断面マクロ観察を行った。

### 4. 研究成果

#### 4. 1 継手強度に及ぼす摩擦時間の影響

アプセット圧力を摩擦圧力と同じ90MPaとしたときの継手外観の写真の一例を図2に示す。本組み合わせでも、先行研究<sup>6)</sup>で実施した純Alをインサート材とした場合と

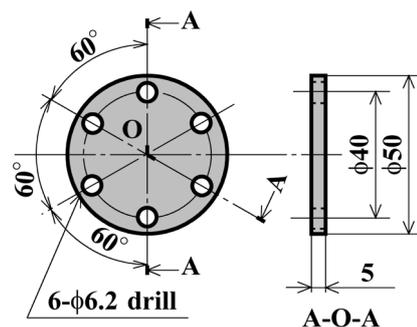


図1 Ti インサート材形状(平板形状)

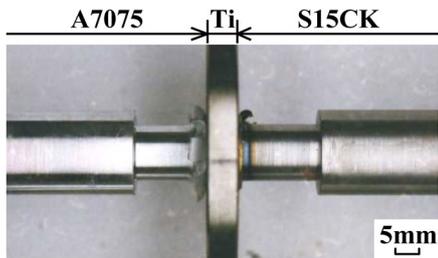


図2 継手外観例(平板形状, 摩擦時間 0.7s)

同じように, これらの材料の同時摩擦圧接ができた. しかし, A7075 側を見ると, ばり割れが発生しているのことも分かった. なお, このばり割れは摩擦時間 0.3s の時は認められなかったが, 0.5s では A7075 のばり割れを生じた継手がいくつか得られ, 0.7s 以降ではすべての継手で生じた結果となった.

継手の引張試験結果を図3に, 引張試験後の継手外観の一例を図4にそれぞれ示す. なお, 継手効率とは, 得られた継手の引張強さと S15CK 母材の引張強さとの比である. 図3をみると, ばらつきが多いものの摩擦時間 0.3s の時において継手効率が低く, 0.5~0.8s の範囲となると継手効率が高くなった. そして, 摩擦時間 1.0s 以降では継手効率が再び低くなる傾向を示した. また, 摩擦時間 0.8s より短い条件では, 図4のように

印で示した A7075 と Ti との圧接面から破断した継手が多く得られたが, それよりも長い摩擦時間では印で示した Ti と S15CK との圧接面から破断する継手が多く得られた.

圧接面近傍の断面マクロ観察結果の一例を図5に示す. A7075 側が Ti に対して大きく反るように変形しており, Ti はほとんど変形していなかった. この変形量の差により, A7075 側ではばり割れを生じたと考えられる.

以上より, A7075 側のばり割れを防止することが必要であるが, 本組み合わせでの適切な摩擦時間は 0.5~0.8s の範囲にあることが推測できた.

#### 4. 2 継手強度に及ぼすアプセット圧力の影響

前述のように, A7075 側ではばり割れを生じるために, 良好な継手を得ることが難しいことが明らかとなった. このばり割れを防止することを目的としてインサート材や A7075 側の試験片形状について様々な検討を行った結果, 図6に示すように A7075 側と接触する Ti インサート材の接合端

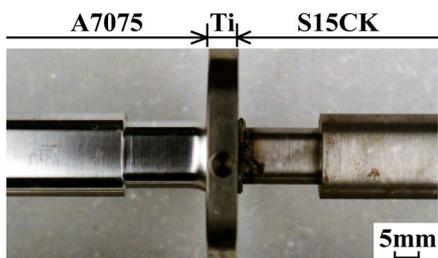


図7 継手外観例(A7075 側突出形状 + A7075 接合端部直径 12mm, 摩擦時間 0.7s)

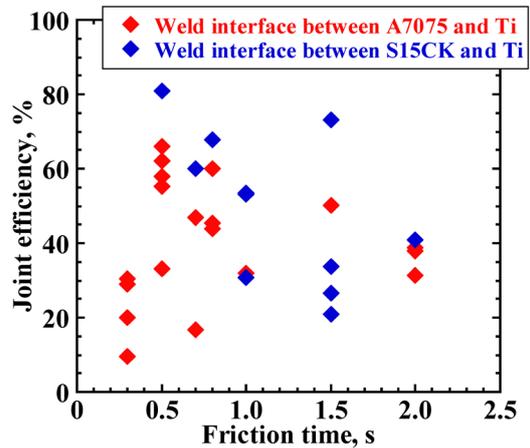


図3 継手効率と摩擦時間との関係(平板形状)

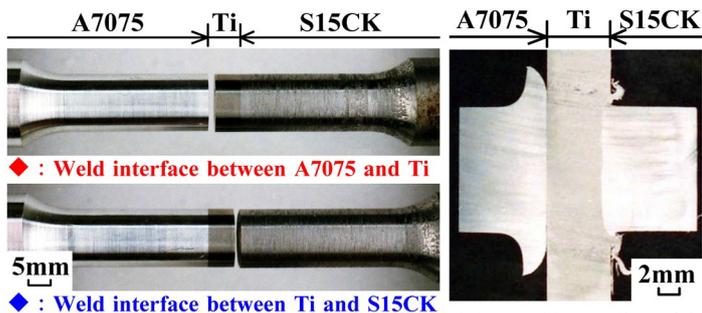


図4 引張試験後の継手外観例(平板形状)

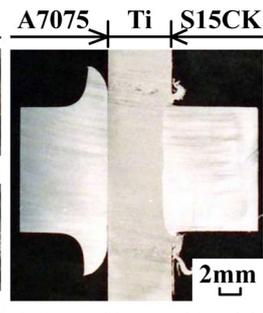


図5 継手横断面例(平板形状, 摩擦時間 0.7s)

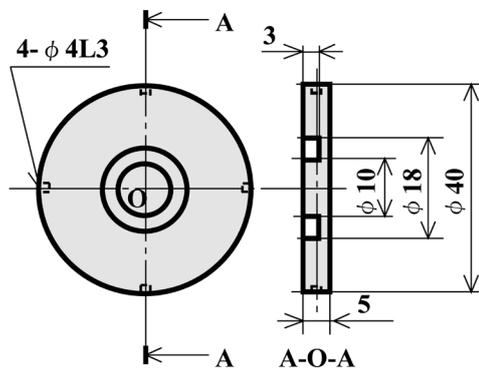


図6 Ti インサート材形状(A7075 側突出形状)

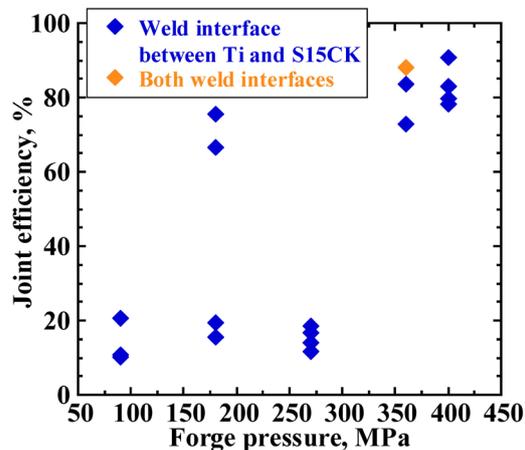


図8 継手効率とアプセット圧力との関係(A7075 側突出形状 + A7075 接合端部直径 12mm, 摩擦時間 0.7s)

部に張出部を設け、かつ A7075 側の接合端部直径を前節の実験で用いた $\phi 10\text{mm}$  から $\phi 12\text{mm}$  へと太くすることで、図 7 のように A7075 側にばり割れを生じない継手を得ることができた。しかし、この場合でも得られる継手強度は低かったことから、圧接条件の一つであるアプセット圧力を増加させる必要があることも明らかとなった。

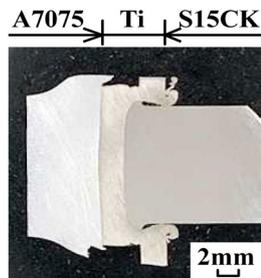


図 9 継手横断面例 (A7075 側突出形状+ A7075 接合端部直径 12mm, 摩擦時間 0.7s, アプセット圧力 360MPa)

そのような結果を踏まえ、アプセット圧力を増加させて継手強度を調べた結果を図 8 に示す。なお、摩擦時間は、前節の結果を受けて 0.7s とした。図 8 を見ると、アプセット圧力 360MPa 以降では継手効率が 80% を超えており、S15CK 母材の降伏強さを超えるような高い引張強さを有する継手を得ることができた。しかし、継手は Ti と S15CK との間の圧接面から破断したており、S15CK 母材から破断するような良好な継手を得ることができなかった。その要因として、図 9 に示すように S15CK が Ti 側へと大きくめり込んでおり、この間からのばりの排出が少なく、結果的に接合が不十分であったと考えられる。よって、Ti インサート材の S15CK と接触する箇所にも張出部を設ける必要があることが分かった。

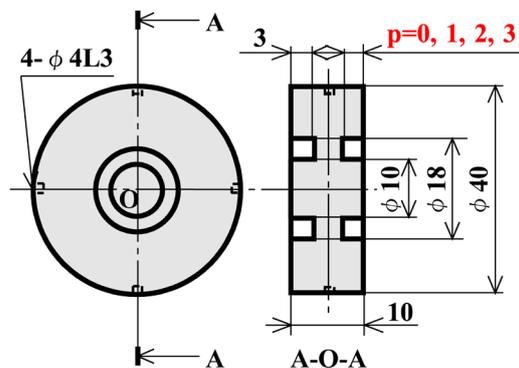


図 10 Ti インサート材形状 (両面側突出形状)

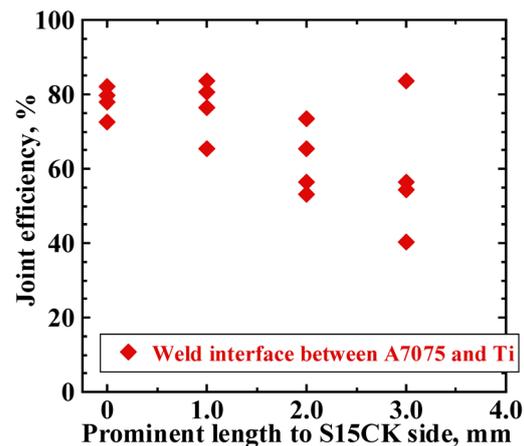


図 11 継手効率と S15CK 側突出量との関係 (S15CK 側突出形状, 摩擦時間 0.7s, アプセット圧力 400MPa)

#### 4. 3 Ti インサート材形状の再検討

前述のように、Ti と S15CK との間からのばりの排出を促すためには、S15CK と接触する Ti インサート材の接合端部にも張出部を設ける必要があることがわかった。しかし、図 6 に示した形状では、その肉厚が薄いため張出部を設けると薄肉部がさらに薄くなってしまい、接合中においてそこが周方向のせん断破壊を生じてしまうために接合自体ができなくなる、すなわち張出部を設けることができない。そこで、図 10 に示すようにインサート材の肉厚を 10mm と厚くし、S15CK 側と接触する接合端部にも張出部を設け、その突出量  $p$  を種々変化させたインサート材を準備して接合実験を行った。その結果を図 11 に示す。なお、アプセット圧力は、前節の結果を受けて 400MPa とした。多少のばらつきがあるものの、突出量  $p=0\text{mm}$  の時に継手効率が最も高く、突出量が長くなるほど継手効率が低下する傾向となった。しかし、全ての継手が A7075 と Ti との圧接面から破断した。これより、継手の破断位置を変えることができたが、S15CK の母材部から破断するような良好な継手を得ることはできなかった。また、この図のようにインサート材の肉厚にも継手強度が影響することから、その肉厚もパラメータとして検討する必要があることが分かった。

#### 4. 4 最適圧接条件選定に関する検討

摩擦圧接では、素材を回転させて接合を行うため、接合端部の直径が異なる場合、圧接面内における周速度の範囲が変わることになる。このような接合端部の直径が変わると単位時間あたりの発熱量が変わるため、良好な継手が得られる圧接条件を、その接合端部直径とは異なる組み合わせについて検討した場合、良好な継手が得られないこともある。しかし、どのように圧接条件を選定して良いかの指針は示されていない。そこで、先行研究<sup>8)</sup>において圧接条件が確立されている A6061-T6 (以下、A6061) と AC8A-T6 (以下、AC8A) との中空材同士の組み合わせについて、接合端部直径が異なる場合の圧接面における周速度に注目し、それを変えると継手強度がどのように変わるかを調べた。接合端部直径を外径 $\phi 30\text{mm}$ 、内径 $\phi 24\text{mm}$ の中空材へと加工した形状 (以下、 $\phi 30\text{-}\phi 24$ ) と、外径 $\phi 18\text{mm}$ 、内径 $\phi 12\text{mm}$ に加工した形状 (以下、 $\phi 18\text{-}\phi 12$ ) をそれぞれ準備し、同じ大きさ同士を組み合わせ、A6061 と AC8A との摩擦圧接を行った。また、実験では、ブレーキ式摩擦圧接機を用い、電磁クラッチを用いて摩擦時間が終了すると同時に固定側と回

転側の相対速度を零とする方法<sup>9)</sup>により接合実験を行った。圧接条件は、先行研究<sup>8)</sup>を参考に摩擦圧力 25MPa、アプセット圧力 75MPa の一定とし、各試験片の平均直径における周速度が誤差 10% 以内ではほぼ同じ値となる摩擦速度を種々設定して接合実験を行った。そして、接合中の摩擦トルクを計測するとともに、摩擦時間を種々変化させて継手を作製した。また、接合後、平行部直径  $\phi 30\text{mm}$ 、もしくは  $\phi 18\text{mm}$  の引張試験片へとそれぞれ旋盤加工し、自然時効の影響<sup>9)</sup>を考慮して接合から 35 日後に室温にて継手の引張試験を行った。

得られた結果の一例として、周速度が 0.7m/s となる摩擦速度の条件、すなわち  $\phi 30\text{-}\phi 24$  では  $8.83\text{s}^{-1}$  (530rpm)、 $\phi 18\text{-}\phi 12$  では  $15.0\text{s}^{-1}$  (900rpm) となる時の得られた継手効率と摩擦時間との関係を、各継手の摩擦トルク曲線とあわせて図 12 に示す。なお、継手効率とは引張試験により

得られた引張強さを AC8A の引張強さで除した値である。図 12 より、 $\phi 30\text{-}\phi 24$  継手と  $\phi 18\text{-}\phi 12$  継手の初期トルクほぼ同じタイミングでそのピークに達しており、かつ継手強度はほぼ同じ摩擦時間の時にほぼ同じ値を示し、また、それらの継手破断位置もほぼ同じとなった。これより、接合端部直径が異なる大きさの継手を作製する場合、周速度がほぼ同じ条件となるように摩擦速度を設定することで、ほぼ同じ様な継手強度が得られる可能性があることが分かった。

以上より、Ti を介した A7075 と S15CK との同時摩擦圧接について、適切な圧接条件を選定することで、S15CK 母材の降伏強度を超えるような高い引張強さを有する継手の作製が可能であることが分かった。また、接合端部直径が異なる場合の圧接条件の選定指針になり得る要因を見い出すことができた。今後、Ti インサート材形状を見直すことで S15CK 母材部から破断するような継手を作製すること、接合端部直径が異なる場合の圧接条件の選定指針の確立を目指す。

#### <引用文献>

- 1) JIS Z 3175: 摩擦圧接による異種金属継手の試験方法及び継手品質評価の分類, 日本規格協会, (2016).
- 2) A. Fuji, K. Ameyama, H. Kokawa, Y. Satoh, T. H. North : Properties of as welded and heat treated pure titanium-7075 Al-Zn-Mg alloy friction weld joints, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 6, Issue 1, pp. 23-30 (2001).
- 3) M. Kimura, T. Iijima, M. Kusaka, K. Kaizu, A. Fuji : Joining phenomena and tensile strength of friction welded joint between pure titanium and low carbon steel, Materials & Design, Vol. 55, pp. 152-164 (2014).
- 4) 木村真晃, 藤井利充, 日下正広, 瀬尾健二 : インサートドライブ摩擦圧接法により接合した角棒継手の機械的性質, 溶接学会論文集, Vol. 25, No. 2, pp. 343-352 (2007).
- 5) M. Kimura, M. Choji, M. Kusaka, K. Seo, A. Fuji : Effect of friction welding conditions and aging treatment on mechanical properties of A7075-T6 aluminium alloy friction joints, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 10, Issue 4, pp. 406-412 (2005).
- 6) M. Kimura, M. Kusaka, K. Kaizu, K. Hayashida : Simultaneous Friction Welding and Characterization of Joints Between 7075-T6 Al Alloy and Low Carbon Steel Using Pure Al as an Insert Metal, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 28, Issue 12, pp. 7726-7736 (2019).
- 7) 木村真晃, 藤井利充, 内海大輔, 日下正広, 瀬尾健二 : 接合自己完了型摩擦圧接法の開発, 溶接学会論文集, Vol. 25, No. 2, pp. 353-361 (2007).
- 8) M. Kimura, H. Sakaguchi, M. Kusaka, K. Kaizu, T. Takahashi : Effects of natural aging and heat treatments conditions on mechanical properties of dissimilar composite between 6061 Al alloy and Al-Si12CuNi (AC8A) Al cast alloy fabricated by friction welding, International Journal of Mechanics and Materials in Design, Vol. 14, Issue 4, pp. 577-589 (2018).
- 9) 木村真晃, 日下正広, 瀬尾健二, 富士明良 : 低入熱摩擦圧接における摩擦時間, 摩擦トルクと継手特性の関係 - 摩擦圧接の接合メカニズムに関する研究 (第 3 報) -, 溶接学会論文集, Vol. 20, No. 4, pp. 559-565 (2002).

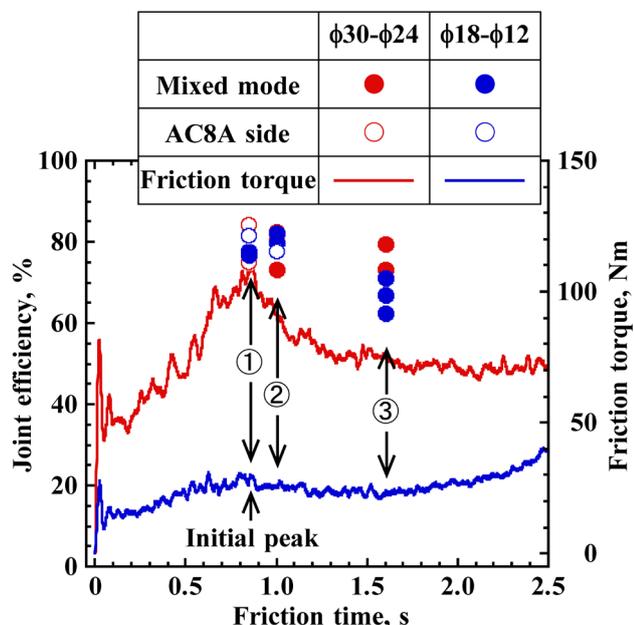


図 12 AC8A/A6061 継手の継手効率と摩擦時間, 摩擦トルクの関係 ( $\phi 30\text{-}\phi 24$  継手と  $\phi 18\text{-}\phi 12$  継手)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 亀井 凜大朗, 木村 真晃, 日下 正広, 海津 浩一
2. 発表標題 純Tiを介したA7075とS15CKの摩擦圧接継手の引張強さ改善に関する検討
3. 学会等名 軽金属溶接協会 2023年度研究成果発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井田 紀帆佳, 木村 真晃, 日下 正広, 海津 浩一
2. 発表標題 同一圧接条件でのAC8A/A6061摩擦圧接継手の引張強さと接合端部直径との関係
3. 学会等名 軽金属溶接協会 2023年度研究成果発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀井 凜大朗, 木村 真晃, 日下 正広, 海津 浩一
2. 発表標題 純Tiを挿入材としたA7075とS15CKとの摩擦圧接でのアプセット圧力の検討
3. 学会等名 溶接学会 2023年度秋期全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井田 紀帆佳, 木村 真晃, 日下 正広, 海津 浩一
2. 発表標題 AC8A/A6061摩擦圧接継手の引張強さと接合端部直径との関係
3. 学会等名 溶接学会 2023年度秋期全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井田 紀帆佳, 木村 真晃, 日下 正広, 海津 浩一
2. 発表標題 中空材の摩擦圧接において周速度を一定にした場合の接合端部直径と圧接条件との関係
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会 2022年度卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 玉越悠暉, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一
2. 発表標題 純Tiを挿入材としたA7075と軟鋼との摩擦圧接継手における挿入材形状の検討
3. 学会等名 溶接学会 2021年度秋期全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 玉越悠暉, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一
2. 発表標題 純Tiを挿入材としたA7075と軟鋼との摩擦圧接継手の作製方法の検討
3. 学会等名 「先進自動車製造技術における接合技術2021(JAAA2021)」シンポジウム
4. 発表年 2021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
研究協力者	日下 正広  (Kusaka Masahiro)  (40244686)	兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授    (24506)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	海津 浩一  (Kaizu Koichi)  (50177317)	兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授    (24506)	

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