

氏名 (本籍)	小川 大介 (岐阜県)
学位の種類	博士 (工学)
学位授与番号	甲第565号
学位授与日付	令和2年3月25日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	Al-Steel 異種金属摩擦攪拌接合継手の作製と機械的特性評価 (Fabrication of friction stir Al-Steel dissimilar welds and evaluation of mechanical properties)
学位論文審査委員	(主査) 教授 山下 実 (副査) 教授 植松 美彦 准教授 柿内 利文

論文内容の要旨

近年、機械構造物の省力化や省燃費化が求められており、そのための手法が様々な観点から提案されているが、中でも従来の構造材料をより軽量なものに置き換え、機器全体として軽量化を図る方法が簡便で、かつ非常に有効と考えられている。例えば従来鋼板が用いられていた部分をアルミウム (Al) 合金板のような軽量素材に置き換えることがそれに当たる。その設計思想は、高剛性が必要な部位には鋼板、軽量性が重要な部位には Al 合金板を利用することである。このように機械構造物に適材適所の材料を割り当てるのがマルチマテリアル化であり、特に今後の輸送機器の分野では必要不可欠な設計思想となっている。一方、マルチマテリアル化を押し進める場合、異種材料を効率よく接合・締結することが重要であり、様々な異材の組合せと接合手法が提案されている。しかし現状では、従来から用いられている鉄鋼材料と、軽量構造用材料として歴史の深い Al 合金の組合せが最重要と考えられている。鉄鋼と Al を接合する場合、TIG や MIG のような従来の溶融溶接では界面に脆い金属間化合物が形成されるため、高強度の異材継手が作製できない問題が指摘されていた。しかし近年、摩擦攪拌接合 (FSW : Friction Stir Welding) という接合手法が開発された。FSW とは、回転するツールで被接合材に摩擦熱を発生させ、軟化した状態で攪拌することで材料を塑性流動させて接合する手法であり、材料が溶融しない固相接合であるために異材接合にも適しているとされている。今後、FSW で接合された Al-Steel 異種金属継手を機械構造物に適用するためには、継手の最適接合条件、引張強さや疲労挙動などの機械的特性の理解が重要となる。そこで本研究では、Al-Steel 異種金属継手を FSW で作製するとともに、その各種機械的特性について検討した。

第1章の緒論では、はじめに異種金属接合の重要性と問題点について述べるとともに、FSW による異種金属の接合や強度評価に関する従来研究の成果をまとめた。さらに、本研究の目的および構成について述べた。

第2章では、Al-Steel 異種金属 FSW 継手の最適接合条件について検討した。その結果、Al-Steel の界面からツールをオフセットする量が、継手強度を支配する重要なパラメータであることを明らかにした。また、X線によるマイクロ CT スキャンを実施し、高強度の継手が得られる接合条件では、ツールによって鋼板側の界面に均一な新生面が形成され、Al 合金がその新生面に圧接されて異材接合が達成されるメカニズムを解明した。さらに、接合後に人工時効を施す後熱処理によって継手強度をさらに向上させることに成功し、実用上の有用性を示した。

第3章では、Al-Steel 異種金属 FSW 継手の残留応力について検討した。通常の溶接継手では、残留応力が継手強度に対する支配因子となることが知られているが、Al-Steel 異種金属 FSW 継手の残留応力を検討した例は無い。そこで、X線残留応力測定装置を利用した。その結果、Al-Steel の界面に対して垂直方向には、概ね圧縮の残留応力が分布することを明らかにした。また、Al-Al 同種金属の FSW 継手と比較した場合、Al-Steel 異種金属 FSW 継手の残留応力はほぼ同程度であった。また後熱処理は、残留応力分布に影響を及ぼさなかった。Al と Steel の線膨張係数が大きく異なるものの、FSW は固相接合であるために、大きな残留応力を誘引しないと推察した。大きな残留応力が発生しないという結果は、Al-Steel 異種金属 FSW 継手を実構造物に適用するためには重要な意味があり、工学的に貴重なデータが得られた。

第4章では、Al-Steel 異種金属 FSW 継手から CT 試験片を採取し、Al-Steel の界面を進展する疲労き

裂の速度を定量的に評価することを試みた。CT 試験片の予き裂を Al-Steel の界面と一致させた場合でも、き裂は弾性係数の低い Al 側に屈曲する傾向が見られた。そこで、溶体化処理と時効を組み合わせた後熱処理によって界面で発生する金属間化合物層の厚さをコントロールし、界面疲労き裂を進展させることに成功した。その結果、界面の疲労き裂進展速度を破壊力学パラメータである応力拡大係数範囲で整理した場合、Al 合金母材中を進展する場合に比べてき裂進展速度が遅い、すなわち疲労き裂進展抵抗が高いことを明らかにした。界面を疲労き裂が進展する場合、荷重負荷状態がモードIであっても、弾性係数の相違によってモードII成分が混入する。その結果、界面疲労き裂進展では破面粗さ誘起き裂閉口の影響が大きく現れ、開口点が上昇するために疲労き裂進展抵抗が向上するモデルを提案した。異材界面での疲労き裂進展抵抗が向上することも、Al-Steel 異種金属 FSW 継手を実構造物に適用するのに有利な結果であり、工学的に重要な知見である。

第5章の結論では、第2~4章の結果を総括するとともに、今後の課題および本研究で得られた成果の工学的有用性について述べた。

論文審査結果の要旨

本論文は、摩擦攪拌接合 (FSW) によって異材である Al 合金と鋼 (Steel) を接合するとともに、接合条件の最適化、残留応力測定、疲労き裂進展特性評価を実施することで、特に自動車車体構造をターゲットとしたマルチマテリアル設計確立に対する貢献が大きい。本論文の第2章は、異材接合の条件を最適化したものであるが、従来までは最適化は経験的に行われてきたのみである。しかし本論文では、X線 μ CT スキャンによる接合界面の非破壊検査を通し、鉄側の界面で均等に新生面が形成される場合にのみ、健全な接合が可能となることを示した。これにより、経験的ではなく、論理的に最適接合条件を明確化したことは高く評価できる。また、硬さの面分布特性や後熱処理が継手強度に与える影響も明らかにしており、特に適切な後熱処理によって継手強度が向上できるという結果は、継手実用化への道を拓くものである。第3章は、継手の Al 側の残留応力測定を行っている。そもそも Al 合金と鋼は線膨張係数が大きく異なるため、接合条件によっては高い残留応力が発生することが予想された。本論文では、 $\cos \alpha$ 法によって残留応力を測定し、通常の Al-Al 同種 FSW 継手と同程度の比較的低い残留応力しか発生しない事を明らかにした。これは、FSW が固相での接合手法であり、接合時の温度上昇が高くないため、残留応力が低くなるものである。溶融継手では、しばしば高い引張残留応力が継手強度に悪影響を与えることが報告されているが、本章の成果は例え線膨張係数が大きく異なっても、FSW では残留応力の発生を抑制できることを示しており、継手実用化のための重要な知見を得ている。第4章では、Al-Steel 界面での疲労き裂進展特性を破壊力学的に評価している。疲労き裂進展特性は、構造物の損傷許容設計になくってはならないものであるが、異材の界面を進展する疲労き裂の進展特性を評価した例は極めて少ない。本章の成果では、Al-Steel 界面近傍における疲労き裂進展速度が、Al 母材中を進展するき裂の速度よりも低速であることを示した。また、き裂開閉口挙動の計測によって、Al-Steel 界面のき裂進展ではモードII成分が混入するため、破面粗さ誘起き裂閉口によって開口点が上昇し、その結果 Al 母材中よりも疲労き裂進展速度が低速となるメカニズムを明らかにした。本成果も、Al-Steel 継手の疲労き裂進展抵抗が Al 母材よりも高いことを示しており、継手実用化を促進する結果となっている。

以上のように、本論文は新たに独創的な知見を見出すとともに、マルチマテリアル化を促進するような結果を示し、工業的に優れた有用性を持つ点でも評価できることから、学位審査委員会は、この論文を学位論文に値するものと判断した。

最終試験結果の要旨

審査委員会は、上記のように本論文が学位論文として十分な内容と価値ある知見を含むこと、申請者が専門の分野で学位授与にふさわしい専門知識と語学力を有することを確認し、最終試験に合格と判定した。

発表論文 (論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ)

1. 摩擦攪拌により作製した Al/Steel 異種金属テーラードブランクの強度特性と後熱処理の影響, 小川大介, 柿内利文, 橋場圭吾, 植松美彦, 溶接学会論文集, 第36巻, 第3号, pp.160-166 (2018).
2. Residual stress measurement of Al/steel dissimilar friction stir weld, Daisuke Ogawa, Toshifumi Kakiuchi, Keigo Hashiba, Yoshihiko Uematsu, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.24, No.8, pp.685-694 (2019)