

氏名	きん けんしん JIN JIANCHEN
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学位記番号	博 1 1 3 8 号
学位授与の日付	令和 6 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	同種および異種材料テーラードブランクの接合強度, 成形性 および耐食性に関する基礎的な研究
審査委員	(主査)教授 飯塚 高志 教授 森田 辰郎 教授 射場 大輔

論文内容の要旨

軽金属や複合材料の使用は輸送機器の軽量化を実現する有効な手段である。しかしながら、自動車の安全性や生産コストから考えると、軽金属や複合材料で鉄鋼材料を完全に代替することは困難である。したがって、素材のマルチマテリアル化が現実的で有効な方法であり、鋼/アルミニウムテーラードブランクの実用化が求められている現状にある。鋼/アルミニウムテーラードブランクを実現するには、三つの重要な課題を解決しなければならない。すなわち、接合強度の向上、成形性の確保および電界腐食の抑制である。また、金属板材は本質的に異方性であるため、同種金属のテーラードブランクであっても異方向の接合材であれば、素材とは異なる変形挙動や成形性を示すと考えられる。このような観点から、本研究は同種および異種金属テーラードブランクの接合強度、成形性および耐食性に関する基礎的な課題について現状を確認し、解決策を検討することを目的とする。

本論文は 9 章で構成され、まず第 1 章において異種金属接合における現状についてまとめた。次に第 2 章では、鋼とアルミニウムを供試材料として、本研究室が開発した突合せレーザ接合法を用いて、鋼/アルミニウムテーラードブランク作製し、異種金属テーラードブランクの接合強度の課題について取り扱った。突合せレーザ接合の各加工パラメータを変化させて作製した接合材に対して、一軸引張試験およびエネルギー分散型分光 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) 分析を行い、接合材の接合強度に及ぼす各加工パラメータの影響および接合強度と金属間化合物層の形態の関連を明らかにした。十分なレーザ出力で接合を行うと、低加圧力と高加圧力の条件で母材アルミニウムと同程度 (70 MPa 以上) の高接合強度が実現できる。金属間化合物については、鋼側に幅広い鉄リッチな金属間化合物層が形成され、オフセット位置によって鉄リッチな金属間化合物層の形態が変化することわかった。一方、アルミニウムリッチな金属間化合物層の厚さは均一であるが、複雑な界面構造となることが確認できた。

次にテーラードブランクの成形性を理解するために、第 3 章および第 4 章で同種異方向材料を、第 5 章で異種金属テーラードブランクを作製し、前者には一軸引張試験および深絞り試験を、後者にはエリクセン試験、張出試験、穴広げ試験などの成形性試験を行い、同種異

方向テーラードブランクの変形挙動と深絞り性, 異種金属テーラードブランクの成形性を明らかにした. 異方向テーラードブランクでは, 変形抵抗の差が小さいほど全伸びが大きくなり, 破断は変形抵抗が低い側で発生する. 破断の形態についてはおおむねランクフォード値によって決定されることがわかった. また, 同種異方向アルミニウム接合材の耳の個数および発生位置は, 基本的に材料の方向に依存しており, 接合ビード部で耳の増幅と吸収が観察された. 異種金属テーラードブランクの破断形態については, 基本的に接合強度不足および接合ビードの延性不足に起因する二つの様式が存在すると考えられる.

第6章から第8章において複合サイクル試験を行い, 異種金属テーラードブランクの耐食性および腐食メカニズムを調査した. 第6章では, 鋼/アルミニウム合金の摩擦圧接材の耐食性を明らかにした. 試験開始後, 初期の接合強度を約30サイクルまで維持するが, その後, 接合強度が急激に低下し, 50サイクルで0MPaになった. 第7章では鋼/アルミニウム合金摩擦攪拌接合材の複合サイクル試験を行った. やはり初期段階では強度変化は生じず, 20サイクルを越えた辺りから緩やかに低下し始めた. 30サイクルを越えると急激な強度低下がみられ, 最終的に40~50サイクルで実質的に0MPaとなった. 腐食メカニズムについては, 鋼を覆ったアルミニウム被覆部が先に腐食され, その後に界面近傍のアルミニウム側が三角形状に浸食される. 第8章では, 接合界面近傍に金属間化合物がある異種金属レーザ接合材について耐食性と腐食のメカニズムを検討した. レーザ接合材では, 接合強度が低くなるほどその接合強度が長く維持し, 逆に接合強度が高くなるほど腐食により受ける減少が大きい. 接合強度が低い接合材については, 鉄リッチな金属間化合物層のアルミニウム元素割合が高いため, 腐食の速度が遅くなると考えられる.

最後に第9章で結論をまとめるとともに展望を簡単に述べている. 本論文で扱った鋼/アルミニウムの突合せレーザ接合は国際的にほとんど研究例のないもので, 特にここで得られた成形性や耐食性については全く新しい知見であり価値が高い. レーザ接合材の界面近傍の微細構造とその接合強度との関連について明らかにしたが, これらは大変意義のある結果であると考えられる. 成形性試験では, 接合材の基本的な変形挙動を解明したことに加えて, 破断のメカニズムについての貴重な情報を提供できた. 複合サイクル試験を用いた評価では, 特にレーザ接合材との耐食性や腐食メカニズムの差異を確認できたことは非常に価値あるものである. このように本論文で展開された研究により, 鋼/アルミニウムテーラードブランクの実用化に対する課題を解決できたとは言えないものの, 実用化のための重要な知見を体系的に整理できた. 今後, 得られた結果を基にして, さらなる接合強度向上, 成形性の確保および腐食の抑制を行うことによって, 輸送機器の軽量化による二酸化炭素排出量を低減し, 持続可能な社会の構築に役立てることができる.

論文審査の結果の要旨

鋼/アルミニウムの異種金属接合については, 輸送機器の軽量化やマルチマテリアル化の観点から求められているが, 強度および電界腐食の問題から中々実用化できない課題である. さらに板材についてはテーラードブランクにすることによって, より効率的な利用が可能と

なるが、この場合は成形性という課題が追加される。これら異種金属接合材の課題については、実はあまり研究されていないのが現状である。この研究は、そのような異種金属接合材に関する課題について総合的に取り扱ったものであり、実際に非常に貴重な実験結果が得られている点で評価が高い。

特にこの論文で主として扱っている鋼/アルミニウムの突合せレーザ接合に関しては、国際的にほとんど研究された例がなく、その成形や腐食などに関しては全く研究されていないといって過言ではない。接合強度と界面構造の関係については、金属間化合物層の状態が大きく変化することは大変興味深く、全く新しい知見である。さらに、それら界面構造と成形時の破断や腐食メカニズムの関係など、これまでにない多くの知見が得られている。摩擦攪拌接合材の腐食メカニズムについては、界面の腐食より被覆アルミニウムの腐食が先行することやレーザ接合によって生じる金属間化合物層の存在が腐食の進行を遅らせるなどは、大変興味深い内容であり、電界腐食の抑止に関する新しいアイデアの基になる可能性がある知見である。残念ながら最終的に問題解決というところまでは行っていないものの、得られた知見は非常に有用であり、今後の発展も期待できるものである。

このように、この研究は新規性やオリジナリティが高く、また研究から得られた成果は工学的・工業的に非常に有用なものである。将来的に新たな異材接合材の強度－成形性－耐食性の理論の構築に繋がるものであると考えられ、博士の学位を授与するに値する内容であると判定できる。

以下に学位論文の内容に関連している4編の公表論文を示す。

公表論文（査読付き国際会議プロシードィングを含む）

- [1] J. Jin, H. Sakamoto, T. Iizuka: “Deformation of dissimilarly oriented aluminum sheets welded by friction stir welding under uniaxial tension perpendicular to the weld bead”, Journal of Materials Processing Technology, Vol.319 (2023), 118065. (第3章)
- [2] J. Jin, H. Sakamoto, T. Iizuka: “Correlation between sheet formability and joint strength of A1050-O/SPCC butt laser welded tailored blanks”, Materials Research Proceeding, Vol 41(2024), pp.1343-1352. (第5章)
- [3] J. Jin, T. Iizuka: “Combined-cycle corrosion testing of steel/6000 series aluminum alloys joined by friction welding”, Proceedings of 24th International Conference on Material Forming (ESAFORM2021), (2021), pp. 3665/1-3665/9. (第6章)
- [4] 金建晨, 飯塚高志: “SPCC/A6061-T6 摩擦攪拌接合材の複合サイクル試験におけるガルバニック腐食挙動”, 塑性と加工, 64巻 753号(2023), pp. 188-193. (第7章)