



Title	Idealized Experiments and Data-driven Analysis for Hot-Press Joining Mechanism and Strength of Aluminum/CFRTP Joints
Author(s)	Li, Weihao
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/103234
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名 (LI WEIAO)	
論文題名	Idealized Experiments and Data-driven Analysis for Hot-Press Joining Mechanism and Strength of Aluminum/CFRTP Joints (理想化実験とデータ駆動型解析を用いた Aluminum /CFRTP熱圧接メカニズムと継手強度の研究)
論文内容の要旨	
<p>Chapter 1 outlines the background and motivation for studying mechanism of hot-press joining between aluminum alloys and carbon-fiber-reinforced thermoplastics (CFRTPs), driven by the demands of lightweight, multifunctional structural applications. The limitations of traditional joining technologies are reviewed, and the potential of thermally assisted processes, particularly hot-press joining, as an ideal platform for mechanistic analysis is highlighted. The chapter also introduces the rationale for incorporating interpretable, data-driven approaches to model process–structure–property relationships.</p> <p>Chapter 2 summarizes materials characteristics and experimental methods. A customized stable hot-press joining platform was constructed to precisely control thermal–mechanical conditions. Various Al alloys and CF/PA6 composites were prepared with silane-treated interfaces. Mechanical testing, along with microstructural and chemical analyses using SEM, TEM, XPS, and Raman spectroscopy, were conducted to characterize joint quality. A finite element model was also built to simulate interfacial temperature history. The data from these experiments formed the foundation for subsequent quantitative modeling.</p> <p>Chapter 3 describes different thermal conditions and results of hot-pressed joints. The influence of temperature and holding time on joint morphology, interfacial chemistry, and mechanical strength has detailly been investigated. A systematic parameter matrix revealed the evolution of bonding mechanisms and defect formation. Experimental results clarified the correlation between interfacial reaction layer development and joint strength, with Raman and XPS data confirming epoxy–amide reactions at optimal thermal exposure levels.</p> <p>Chapter 4 proposes controlled pressure via thinning-control strategy to decouple the role of pressure from other thermal factors, and then a controlled-thickness joining approach is introduced. By limiting vertical displacement, pressure-dependent behaviors such as matrix flow, interface thinning, and fiber deformation are studied in detail. This approach enables a clearer understanding of the interfacial bonding state under realistic load-bearing constraints.</p> <p>Chapter 5 conducts interpretable data-driven analysis of process–structure–strength relationships. A comprehensive dataset comprising process parameters, microstructural features, and mechanical properties is used to train gradient-boosted decision tree (GBDT) models. Dimensionless parameters were constructed to improve generalizability, and model distillation techniques are also applied to extract human-readable equations. These interpretable functions accurately predicted joint strength and revealed dominant physical factors governing interfacial bonding.</p> <p>Chapter 6 uses the results obtained in previous Chapter and predicts the strength of friction spot joining (FSpJ) via tool geometry design and thermal simulation. The knowledge acquired from hot-press studies was applied to analyze FSpJ, a more dynamic and complex joining process. Experiments and ALE-based thermal–mechanical simulations evaluated how tool shoulder concavity affects heat input distribution, melting behavior, and final joint integrity. The interpretable models are shown to retain predictive power under FSpJ conditions, demonstrating the transferability of the framework.</p> <p>Chapter 7 summarizes the main findings across all phases of the study, highlighting how idealized experiments combined with interpretable machine learning contribute to both scientific understanding and practical optimization of hybrid joining processes. Future research directions include broader application of the proposed methodology to other dissimilar material systems and more advanced real-time process monitoring techniques.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 (LI WEIAO)	
	(職)
論文審査担当者	主査 教授 麻寧緒
	副査 教授 大沢直樹
	副査 教授 飯島一博
	副査 准教授 辰巳晃

論文審査の結果の要旨

本論文は、軽量材料であるアルミニウム合金と炭素繊維強化プラスチック (CFRTP) の接合メカニズムおよび圧力や温度などの接合条件と接合強度の定量関係を明らかにするためのものであり、7章から構成されている。

第1章では、圧力と温度を均一化した熱圧接を実現する実験プラットフォームを開発する重要性、接合条件と接合強度の関係を定量化するためのデータ駆動型解析の必要性を示し、本研究の目的を設定している。

第2章では、まず被接合材の材料特性を整理し、実験手法を提案すると共に、熱圧接条件を精度良く制御する接合装置を開発している。次にシランカップリング剤を用いて表面処理したアルミニウム合金 (A5052-0, A6061-T6) と PA6 系樹脂をベースにした炭素繊維強化 (CF) プラスチック複合材料 (20%CF/PA6, 40%CF/PA6) の接合実験と有限要素解析を行い、界面温度が一様に分布していることを確認している。強度試験のほか、SEM、TEM、XPS、ラマン分光法を用いて接合界面の組織構造および化学成分を明らかにしている。

第3章では、space-filling sampling strategy を用いて多くの熱圧接試験を行い、接合温度と加熱時間が接合界面のマイクロ組織、界面化学反応、接合強度に及ぼす影響を詳細に解析している。さらに接合メカニズムや接合界面の欠陥形成メカニズムを解明し、特にエポキシ-アミド反応が接合強度に直接貢献することをラマン分光法およびXPS 分析で明らかにしている。

第4章では、CFRTP 材の過度な減肉現象を防ぐため、圧力制御から変位制御に切り替える接合方法を開発している。具体的には、過度な減肉が発生する場合、圧接変位を制御することにより樹脂材の過度な流動を抑制している。さらに接合された状態で、界面の厚さ変化や炭素繊維分布などの挙動を詳細に観察している。

第5章では、接合条件・界面組織・強度の関係を、データ駆動型機械学習法により推定する手法を開発している。接合プロセスの条件パラメータ、接合界面の組織特性、接合強度などを含むデータセット（合計 262 組）を用いて、勾配ブースティング決定木 (GBDT) モデルを構築している。さらに接合強度の支配因子を無次元パラメータとして導入し、接合強度と接合条件の応答関係式を導出し、この応答関係式が接合強度を定量的に予測できることを確認している。

第6章では、第5章で得られた接合強度と接合条件の定量関係を、圧力分布や温度分布が不均一な摩擦点接合による接手強度の予測に適用している。具体的には、まず摩擦点接合プロセスの熱力学シミュレーションにより得られた接合領域内の圧力分布と温度分布を用いて接合領域の強度分布を推定し、次に強度分布の積分値として接手強度を予測している。予測した接手強度は、摩擦点接合接手の試験による強度と良く一致しており、開発手法の有用性が実証されている。

第7章では、構築した理想化熱圧接実験手法とデータ駆動型解析手法ならびに研究成果を総括し、本研究で提案した手法を他の異種材料系に適用する展望を示している。

以上のように、本論文は、理想化熱圧接試験法を開発し、データ駆動型解析を用いた Aluminum/CFRTP 熱圧接条件と接合強度の関係を定量化することにより、異材接合接手の全体強度を予測する有効性を示しており、接合構造の軽量化と安全性の評価に貢献するところが大きい。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。