

補助事業番号 2023M-394

補助事業名 2023年度ナノ界面を有する金属とCFRTPの異種接合・成形技術の開発
補助事業

補助事業者名 早稲田大学 基幹理工学部 細井厚志

1 研究の概要

本研究では異種接合機構をマルチスケールで学際的に明らかにし、大変形を利用した異種接合・成形技術を開発する。具体的には、4つの研究項目（Ⅰ）金属表面の3Dナノ構造の創製、（Ⅱ）界面接合層の化学修飾材料の開発及び分子シミュレーションによる接合機構解明、（Ⅲ）接合界面の力学的特性評価及び界面ナノ構造の影響評価、（Ⅳ）塑性現象を利用した異種接合・成形技術の開発を推進した。

2 研究の目的と背景

本研究は、金属表面に高秩序・高密度の3D金属ナノ空間構造体を創製し、その形状及び空間位置を最適に設計することで接合界面層の応力場を制御し、トレードオフ関係ある接合強度と層間破壊靱性の両方を飛躍的に向上させる熱可塑性炭素繊維強化プラスチック(CFRTP)と金属の直接接合技術を確立することを目的とした。さらに、大変形を伴う複雑形状に対しても接合と成形を同時に行う異種接合・成形技術を新規に開発した。

3 研究内容

（Ⅰ）金属表面の3Dナノ構造の創製

陽極酸化処理・エッチング処理によって作製した表面ナノ構造の形状を確認するために、電界放出形走査電子顕微鏡を用いてアルミニウム合金の表面ナノ構造の観察を行った。以下に作製した表面ナノ構造を示す。

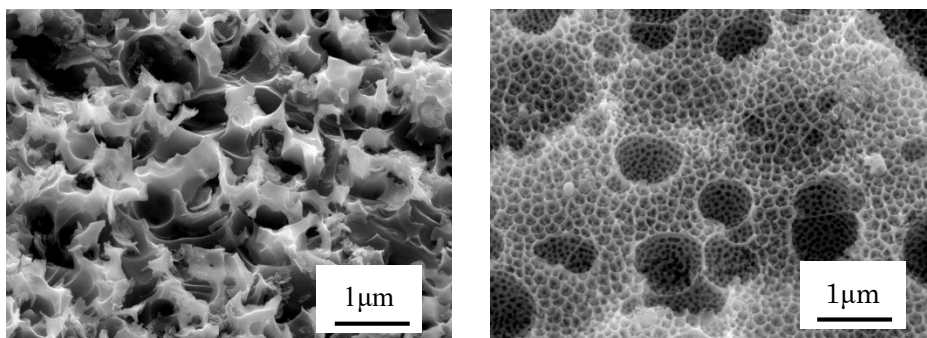


図1 作製したアルミニウム合金表面のナノ構造

（Ⅱ）界面接合層の化学修飾材料の開発及び分子シミュレーションによる接合機構解明

アルミニウム合金（A5052）表面にシランカップリング処理を施すことにより、化学的な安定性が高く、従来接着特性に乏しいPEEKを母材樹脂にもつCF/PEEKとA5052の接合を実現し

た。その接合部のTEM-EDSによる観察により、接合界面の酸化被膜は Al_2O_3 ではなく MgO が支配的であることと、CF/PEEKのPEEK樹脂とシランカップリング剤の分子鎖の絡み合いが形成されていることの2点が示唆された。また、Gaussian16を用いた量子化学計算の結果より、PEEKのケトン基とシランカップリング剤のアミンの反応しイミン結合を生成する反応が起こっている可能性が示唆された。

(Ⅲ) 接合界面の力学的特性評価及び界面ナノ構造の影響評価

層間破壊靱性試験における純モードI層間破壊靱性値取得のための新たな試験方法を解析的に評価した。CFRTP積層板とアルミニウム合金の接合試験片において実施し、試験の妥当性を評価した。実験の結果、解析的に算出した理論値と実験値は良い一致を示した。得られたモードの混合率においても一般的に行われているDCB試験の結果と比べて非常に小さい値を示し、提言された試験方法は純モードI層間破壊靱性値の取得に有効な実験方法であると示された。

(Ⅳ) 塑性現象を利用した異種接合・成形技術の開発

実験では、CFRTPと接着可能となるようSPCC表面にシランカップリング処理を施した後、ホットプレスによる一体成型を行った(図2)。材料の板厚比を変化させて成形すると、条件によって割れの有無やその形態は異なった。また有限要素解析の結果と合わせると今回割れが発生したファイバメタルラミネート(Fiber Metal Laminate: FML)成形品においては、成形初期段階にブランクの中心から発生していると考えられる。またSPCC単体での成形と比較して、FMLではCFRTPとの摩擦によってSPCCが引き込まれるために、成形条件によってはより優れた成形性を有する可能性が示唆された。

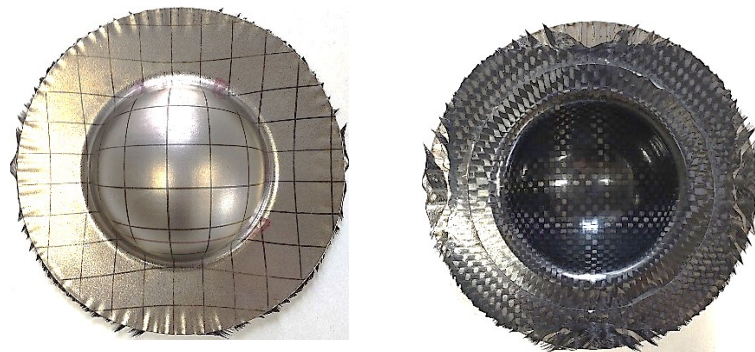


図2 成形したCFRTPとSPCCの一体半球プレス体

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究によって異種材料の接合技術を確立出来れば、製品性能を高めるマルチマテリアル化を多分野へ適用することが可能となり、高強度接合、耐久性、信頼性向上が可能となる。研究で提案するホットプレスを用いた3Dナノ界面を有する直接接合技術は、従来の他の接合技術と比較し大面積で接合でき、曲面に対しても均一に接合できるなど、接合形状を選ばな

い利点がある。また、成形性の自由度向上に伴うデザイン性の多様化も期待され、製造工程数、製造コストの低減が可能となる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

研究代表者は、複合材料の超高サイクル疲労特性評価に関する研究で博士学位を取得した後、一貫して複合材料の強度特性評価に関する研究を行ってきた。また、金属表面に3次元ナノ空間構造及び化学修飾を施し、熱可塑性CFRPと直接異種接合する技術の開発に携わっている。近年、航空機や自動車等の輸送機器を軽量化して省燃費化を図り、CO₂排出を削減する環境保全対策が進められている。リサイクル性及び成形性、生産性の観点からこれらの構造部材にCFRTPを採用したマルチマテリアル化が検討されている。しかし、CFRTP母材の熱可塑性樹脂は化学的に不活性で金属材料との接着性が悪いことが課題であった。一般に接合強度と伸び（層間破壊靱性）はトレードオフの関係にあり、その両方の特性を向上させることは困難である。また超塑性合金を用いてプレス成形やブロー成形によって、金属板を複雑形状に賦形する技術が開発されているが、超塑性現象を発現させるため強度特性を犠牲にしており、適用部材が限定されている。そこで、研究代表者がこれまで開発してきた3Dナノ界面による異種接合技術を応用してCFRTPと金属の異種接合・成形技術が可能となれば、強度向上のみならず機能性も付与することが可能で、次世代モビリティーをはじめとする幅広い分野へ用途拡大が見込まれ、本研究を実施するに至った。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- (1) 細井厚志, 熱可塑性CFRPと金属の高強度・高靱性な異種接合および成形技術とその可能性, マテリアルステージ, 2024, 23(12), 18-21.
- (2) 細井厚志, 熱可塑性CFRPと金属の高強度・靱性な異種接合および成形技術, コンバーテック, 2023, 608, 51, 49-51.
- (3) 細井厚志他, 「シランカップリング表面処理によるCFRTP/ALの異種材料接合」, "ぬれ性"の制御と表面処理・改質技術－自動車、5G/6G、粘・接着剤、IJインクー, 技術情報協会, 第5章, 第2節, pp. 470-476, 2023年8月.
- (4) Atsushi Hosoi, Yuki Goto, Effect of interface treatment on bonding strength of carbon fiber reinforced PEEK and aluminum alloys, Proceedings of 10th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Paper No. 38, pp 62-63, Nagoya, Japan, 1-5/9/2024.
- (5) Atsushi Hosoi, Kaori Kometani, Hiroyuki Kawada, Effect of interface microstructure on interlaminar fracture toughness in dissimilar joints of CFRTP and aluminum alloys, Proceedings of 13th Asian-Australian conference on Composites Materials, Paper no. 2I02, Kyoto, Japan, 27-29/8/2024.
- (6) Atsushi Hosoi, Hiroyuki Kawada, Enhancement of interlaminar fracture toughness by micro-bridging at crack tip in bonded dissimilar materials, Proceedings of 21st European

Conference on Composite Materials, Vol.3, pp.506–511, Nantes, France, 2–5/7/2024.

- (7) Kaori Kometani, Kazuki Yokota, Atsushi Hosoi, Hiroyuki Kawada, Effect of surface pretreatment on Interlaminar fracture toughness of dissimilar bonding of CF/PEEK laminates and aluminum alloys, The 2nd Japan–China–Korea Joint Symposium on Composite Materials, 1B05, Kanazawa, Japan, 6–8/10/2023.
- (8) Yuki Goto, Rina Soraoka, Atsushi Hosoi, Nilson Kunioshi, Hiroyuki Kawada, Evaluation of the effect of silane coupling treatment on the bond strength of aluminum alloy and CF/PEEK laminates, pp. 5, Leading Edge Manufacturing/Materials&Processing LEM&P 2023 Rutgers University–New Brunswick NJ, USA, 12–16/6/2023.
- (9) 細井厚志, 川田宏之, 「エネルギー解放率破壊基準による異種シングルラップジョイントの接合強度特性評価」, 1D–07, 東京農工大学, 東京, 2025年2月27日–3月1日.
- (10) 齋藤達明, 細井厚志, 川田宏之, 「レーザー加工を施したAl合金とCF/PEEK積層板の異種接合強度に及ぼす環境温度の影響」, 日本機械学会第31回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2024), A1–14, 富山大学, 富山, 2024年11月1–3日.
- (11) 後藤勇樹, 米谷華織, 今井文哉, 細井厚志, 国吉ニルソン, 川田宏之, 「アルミニウム合金とCF/PEEK積層板の接合強度に及ぼすシランカップリング処理の影響評価」, 日本機械学会関東支部第30期総会・講演会, 14B01, 早稲田大学, 東京, 2024年3月13–14日.
- (12) 米谷華織, 小野涼真, 細井厚志, 川田宏之, 「アルミニウム合金とCFRTPの異種接合材の層間破壊靱性における接合界面形状の影響」, 自動車技術会2023年春季大会 第5回学生ポスターセッション, パシフィコ横浜, 神奈川, 2023年5月24–26日.

7 補助事業に係る成果物

特になし。

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 早稲田大学 基幹理工学部(ワセダダイガク キカンリコウガクブ)

住 所: 〒169-8555

東京都新宿区大久保3-4-1

担 当 者: 細井厚志(ホソイアツシ)

担 当 部 署:

E - m a i l: hosoi@waseda.jp

U R L: <https://www.hosoi.amech.waseda.ac.jp/>