

令和 3 年 8 月 4 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01342

研究課題名（和文）金属表面のナノ空間構造体の創製と異種材料直接接着技術への展開

研究課題名（英文）Creation of nano spatial structure on metal surface and development of direct bonding technology for dissimilar materials

研究代表者

細井 厚志（Hosoi, Atsushi）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60424800

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：酸化・エッチングプロセス制御によって金属表面にナノ構造を創製し、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック（CFRTP）積層板と金属の異種材料接合技術を確立することを目的とした。界面ナノ構造を有することで接合界面近傍の母材樹脂が脆性破壊から延性破壊に変化して破壊靱性が大幅に上昇することを明らかにした。き裂進展シミュレーションを実施した結果、ナノ構造を有するき裂進展は平面応力状態の破壊形態と類似していることが示され、これはナノ構造によってき裂先端近傍の応力三軸度が低下していることが要因であると示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来接着特性が悪いとされていたCFRTPと金属の新しい異種接合技術を提案した。接合界面にナノ構造を創製し、化学的表面処理を施すことによって、世界トップレベルの接合特性を発現することに成功した。従来トレードオフ関係にあった接合強度と破壊靱性の両方を向上させることができ、且つホットプレスで容易に接合可能であることから、プレス成形への展開も可能であり、今後の実用化に期待できる成果である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to establish a dissimilar bonding technology for carbon fiber reinforced thermoplastic (CFRTP) laminates and metallic materials with nanostructures. The fracture toughness of the interface was significantly increased in specimens with interfacial nanostructure. The fracture surface observation revealed that the fracture mode changes from brittle fracture to ductile fracture. The results of crack propagation simulation showed that the crack propagation of the specimen with nanostructure was similar to the fracture mode in the plane stress state, which was suggested to be due to the decrease of stress triaxiality near the crack tip by the nanostructure.

研究分野：材料力学、破壊力学

キーワード：異種接合 CFRP ナノ構造

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、環境問題により輸送機器の重量削減による燃費向上が求められている。構造部材として用いられている金属材料を比強度、比剛性に優れ、プレス成型が可能で大量生産に適する炭素繊維強化熱可塑性プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRTP)への置き換えが期待されて、適材適所に異種材料を配置するマルチマテリアル化が進められている。現状の異種材料接合では、信頼性確保を優先する観点から、ボルトなどを用いた機械的締結と接着剤による接合が行われている。しかし、重量増加や低い生産レートなどの課題があり、高い接合特性を有する CFRTP と金属の直接接合技術が求められている。

2. 研究の目的

研究代表者らは、シランカップリング処理及びアルミニウム合金表面に界面ナノ構造を作製することで CFRTP と直接接合させる新たな手法を開発した。引張せん断試験の結果、界面ナノ構造により、CFRTP の母材樹脂の延性的な破面の形成と共に、き裂進展抵抗の向上が示唆されたが、界面ナノ構造を有する接合界面と層間破壊靱性との関係性は未解決である。そこで、本研究ではアルミニウム合金と CFRTP 積層板の直接接合における界面ナノ構造が層間破壊靱性に及ぼす影響を定量的に評価した。

3. 研究の方法

3. 1 供試体

本研究では、アルミニウム合金 A5052 を使用した。CFRTP 積層板は、母材樹脂にナイロン6(PA6)、炭素繊維に Toray T300B-3K を用いた平織 CFRTP($V_f = 50\%$)を使用した。

3. 2 試験片作製

3. 2. 1 ナノ構造作製

陽極酸化処理、及びエッチング処理条件を表 1 に示す。陽極酸化処理は 400 V の電圧下で行い、各処理を 2 回繰返すことで、均一に配列されたポーラス構造を作製した。A5052 表面に作製したナノ構造を図 1 に示す。

Table 1 Anodizing and Etching Conditions

Step	Solution	Temperature °C	Time min
1 st Anodizing	2 wt% C ₆ H ₈ O ₇ +2 wt% C ₂ H ₆ O ₂ (2:1)	10	540
1 st Etching	6 wt% H ₃ PO ₄ +1.8 wt% H ₂ CrO ₄	63	60
2 nd Anodizing	2 wt% C ₆ H ₈ O ₇ +2 wt% C ₂ H ₆ O ₂ (2:1)	10	540
2 nd Etching	6 wt% H ₃ PO ₄ +1.8 wt% H ₂ CrO ₄	63	20

3. 2. 2 シランカップリング処理

CFRTP の母材樹脂である PA6 表面と A5052 表面の間に化学結合を持たせることによる接合強度の改善を目的として、シランカップリング処理を施した。1 wt% のシランカップリング溶液を 15 分含浸させた後、オープンで 100 °C に加熱乾燥させ、シランカップリング処理を行った。

3. 2. 3 DCB 試験片作製

図 2 に示すように試験片寸法は 140 mm×25 mm で、板厚は A5052, CFRTP それぞれ 2 mm とした。予き裂のためのポリイミドフィルムを 45 mm 挿入し、プレス機で 400 kPa, 300 °C で 3 分間加圧し、圧力を加えたまま 50 °C まで急冷した。ナノ構造を有する A5052 にシランカップリング処理を施して CFRTP と接合させた試験片、A5052 にシランカップリング処理のみを施して CFRTP と接合させた試験片をそれぞれ、Si-NS, Si-AR と呼称する。

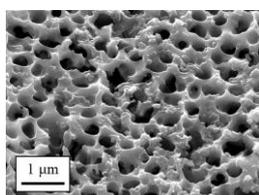


Fig. 1 Surface of nanostructure of A5052

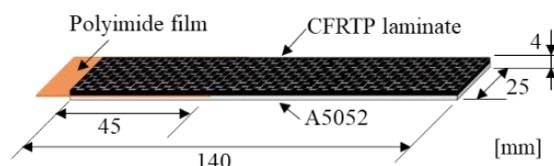


Fig. 2 Dimensions of the DCB specimen

3. 3 静的 DCB 試験

層間破壊靱性へ及ぼす界面ナノ構造の影響を評価するために、JIS K 7086 に基づき静的 DCB 試験を行った。試験は精密万能試験機を用いた。試験前に予め一度引張荷重を負荷することにより、き裂を進展させて鋭い予き裂を導入した。試験速度は毎分 0.5 mm とし、き裂が進展するまで荷重を負荷した。き裂長さは荷重線からき裂先端までの長さとし、CCD カメラで試験片側面を撮影し、画像相関(Digital Image Correlation: DIC)法によってき裂進展長さを測定した。また、算出するために、同じ試験片を用いて DCB 試験を 3 回行った。試験後に、き裂進展部の A5052 及び CFRTP の破面を走査電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)によって表面を観察した。

3. 4 層間破壊靱性値の算出

3. 4. 1 熱残留応力を考慮した層間破壊靱性値の算出

アルミニウム合金と CFRTP 積層板の接合試験片において、線膨張係数の差異によって熱残留応力が生じる。したがって、機械的及び熱的層間破壊靱性値を算出する必要がある。Nairn¹⁾はエネルギーバランスを考慮して、異種材の熱残留応力を考察したエネルギー解放率を式(1)のように算出した。

$$G = \frac{d}{dA} \left(\frac{1}{2} \int_S T^0 \cdot u^m dS + \int_S T^0 \cdot u^r dS - \frac{1}{2} \int_V \sigma^r \cdot \alpha \Delta T dV \right) \quad (1)$$

ここで、DCB 試験の境界条件を適用することによって、層間破壊靱性値は式(2)のように表せる。

$$G_{\text{total}} = G_{\text{mechanical}} + G_{\text{thermal}} = \frac{P_c^2 a^2}{2B} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right) + \frac{H(\Delta\alpha\Delta T)^2}{4} \frac{E_1 E_2 (E_1 + E_2)}{(E_1 - E_2)^2 + 16E_1 E_2} \quad (2)$$

3. 4. 2 モード混合を考慮した層間破壊靱性値の算出

熱残留応力によって DCB 試験によって得られる層間破壊靱性値は混合モードとなる。各モードのエネルギー解放率は Crack Tip Element (CTE) 法²⁾を用いて以下の式(3)-(5)を用いて算出した。

$$G_I = \frac{1}{2B} \left(\frac{1}{\kappa C_1} + \frac{1}{\kappa C_2} \right) Q_{\text{crack}}^2 \quad (3)$$

$$G_{II} = \frac{1}{2B} (a_1 + a_2 + d_1 + d_2) N_{\text{crack}}^2 \quad (4)$$

$$G_{\text{total}} = G_I + G_{II} \quad (5)$$

ここで、図 3 に示されるように Q_{crack} 及び N_{crack} はき裂先端におけるせん断力、及び軸力である。

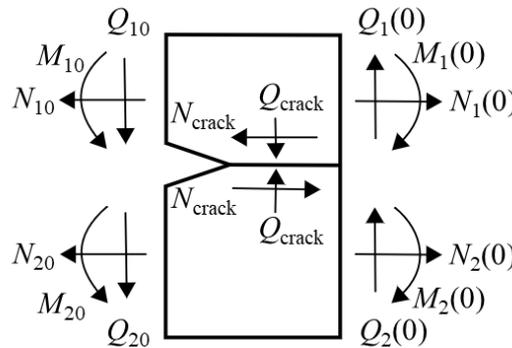


Fig. 3 Forces at the crack tip

4. 研究成果

4. 1 静的 DCB 試験

DCB 試験によって測定した層間破壊靱性値の算出結果を図 4 に示す。図 4 に示す層間破壊靱性値は、式(2)と式(5)によって算出した値を示す。Si-NS の層間破壊靱性値は Si-AR と比べて、ナノ構造による層間破壊靱性の向上が確認された。また、熱残留応力による層間破壊靱性値とモードII層間破壊靱性値は Si-AR, Si-NS とともにほぼ同様の値であり、Si-NS においてモードIにおける層間破壊靱性値の向上が確認された。

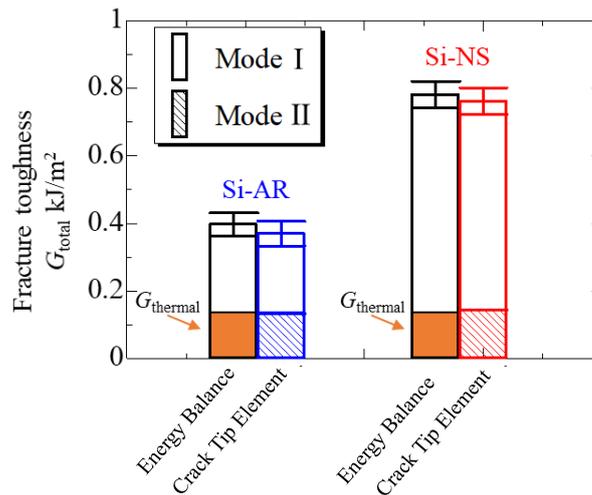


Fig. 4 Fracture toughness (Si-NS vs Si-AR)

4. 2 SEMによる破面観察

図5にA5052側のSi-NS, Si-ARそれぞれのき裂進展部の破面を示す. 本研究で用いたCFRTP積層板は平織であるため, 縦糸と横糸が交わる樹脂で厚く覆われているResin-rich部が存在する. また, Resin-rich部ではない部分をFiber-bundle部と呼称する. 図5に示されるように, Resin-rich部とFiber-bundle部では異なる破面を示した. Resin-rich部ではA5052, CFRTPともに, Si-NS及びSi-ARで同様の樹脂の凝集破壊が確認された. Si-NSとSi-ARとの破面の違いは, Fiber-bundle部で見られた. Fiber-bundle部におけるCFRTP側の破面を図6に示す. 図6より, Si-NSにおいては樹脂の延性的な破面が確認され, 対してSi-ARにおいては樹脂の脆性的な破面が確認された.

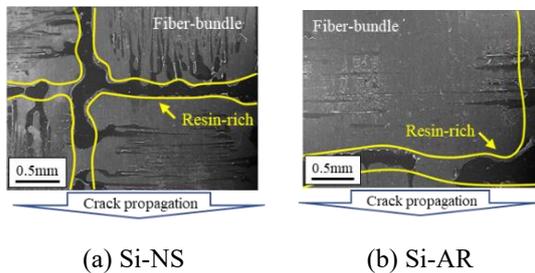


Fig. 5 Fracture surface on A5052

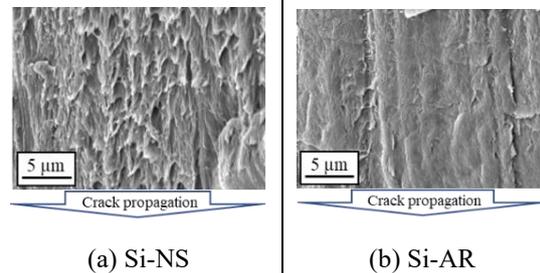


Fig. 6 Fracture surface on CFRTP

4. 3 数値解析計算

モードI層間破壊靱性値について界面ナノ構造によって向上した. よって, モードI変形についてき裂先端の応力場影響を評価するため, アルミニウム合金とCFRTP積層板の直接接合界面の2次元モデルにおいて計算を行った. 破面観察の結果より, Fiber-bundle部において, 界面ナノ構造による影響が顕著に観察されたため, Fiber-bundle部においてモデリングを行った. モデルは界面ナノ構造をモデリングしたモデルと, モデリングしない2種類のモデルを作製した. モデルは界面ナノ構造をモデリングしたモデルをNS-model, モデリングしないモデルをAR-modelとそれぞれ呼称する. 作製したモデル及び境界条件を図7に示す. A5052, CFは弾性体, PA6は等方弾塑性体として計算を行った. また, PA6の降伏関数はミーゼスの降伏関数を用いて計算を行った. モデルは2次元平面ひずみ状態とし, 炭素繊維(Carbon Fiber: CF)の直径は6µmとした. また, 界面ナノ構造のモデルは図1を参考にし, 一辺0.5µmの正方形とし, 界面ナノ構造を形成する酸化被膜層の厚さは1µmとした. 破面観察の結果より, A5052表面全体に樹脂が付着していたことから, PA6にき裂を挿入した. 界面特性については, 簡単のため, A5052-PA6(Alumina-PA6), 及びCF-PA6は完全拘束とした. また, 今回のモデルにおいては熱残留応力を考慮していない. 2次元モデルの結果として, それぞれのモデルにおいてPA6が降伏域に達した要素を赤で表し, その結果を図8に示す. 図8より, 界面ナノ構造を持つモデルにおいては, 赤で示されたPA6の塑性域の領域が, 界面ナノ構造を持たないモデルに比べて大きいことが確認された. また, 界面ナノ構造周辺から塑性域が広がっていく様子が確認された.

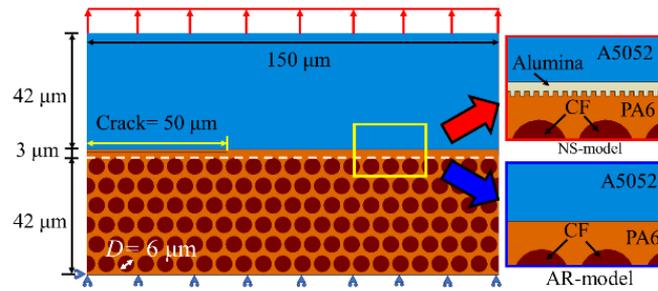


Fig. 7 Model of direct bonded specimen

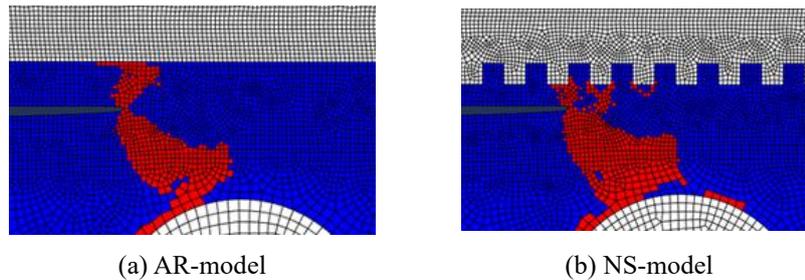


Fig. 8 Effect of the nanostructure for PA6 plasticity around crack tip

静的 DCB 試験の結果，界面ナノ構造によって層間破壊靱性値が向上したことが確認された．また，熱残留応力による層間破壊靱性値とモードII層間破壊靱性値が同様の値であったことから，モードI層間破壊靱性値について界面ナノ構造によって向上したと示唆された．破面観察の結果より，ナノ構造を持つ試験片においては，樹脂は延性的な破面を示した．よって，ナノ構造により樹脂の塑性変形が促され，母材の塑性変形にエネルギーを消費したことによって層間破壊靱性値が向上したと考えられた．また，数値解析の結果より，界面ナノ構造をもつモデルにおいては，CFRTP 積層板の母材樹脂である PA6 の塑性域領域が大きいことが示された．したがって，破面観察によって得られた樹脂の延性的な破壊は，き裂先端の PA6 の塑性変形が界面ナノ構造によって促進されたためであると示唆された．

参考文献

- 1) J.A. Nairn, Int. J. Fract., Vol. 139, (2006), pp.276–293.
- 2) T. Yokozeki, Eng. Fract. Mech., vol. 77, no. 1, pp. 84–93, 2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroki Ota, Kristine Munk Jespersen, Kei Saito, Keita Wada, Atsushi Hosoi, Hiroyuki Kawada	4. 巻 15
2. 論文標題 Effect of interfacial nanostructure on mode mixity in directly bonded carbon fiber reinforced thermoplastic laminates and aluminum alloy considering thermal residual stress	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 20-00507-1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jamdsm.2021jamdsm0051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Saito Kei, Jespersen Kristine M, Ota Hiroki, Wada Keita, Hosoi Atsushi, Kawada Hiroyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Fatigue delamination growth characterization of a directly bonded carbon-fiber-reinforced thermoplastic laminates and aluminum alloys with surface nanostructure using DCB test	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Composite Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/00219983211009282	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ota Hiroki, Jespersen Kristine Munk, Saito Kei, Wada Keita, Okamoto Kazuki, Hosoi Atsushi, Kawada Hiroyuki	4. 巻 139
2. 論文標題 Effect of the interfacial nanostructure on the interlaminar fracture toughness and damage mechanisms of directly bonded carbon fiber reinforced thermoplastics and aluminum	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 106101-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2020.106101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jespersen Kristine M., Ota Hiroki, Harada Kazuki, Hosoi Atsushi, Kawada Hiroyuki	4. 巻 238
2. 論文標題 Experimental measurement of mode-I fracture toughness of dissimilar material joints with thermal residual stresses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 107249-1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2020.107249	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 和田啓汰, 大田宙起, 齋藤慧, クリスティーン ムンク イエスパーセン, 細井厚志, 川田宏之	4. 巻 46
2. 論文標題 アルミニウム合金とCFRTP積層板の異種接合の強度と破壊形態に及ぼす表面ナノ構造の影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本複合材料学会誌	6. 最初と最後の頁 162-169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 細井厚志	4. 巻 69
2. 論文標題 CFRTPとAIの異種接合	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 563-567
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Abe, J.C. Chung, T. Mori, A. Hosoi, K.M. Jespersen, H. Kawada	4. 巻 172
2. 論文標題 The effect of nanospike structures on direct bonding strength properties between aluminum and carbon fiber reinforced thermoplastics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Composites Part B: Engineering	6. 最初と最後の頁 26-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesb.2019.05.025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. M. Jespersen, J. C. Chung, K. Okamoto, H. Abe, A. Hosoi, H. Kawada	4. 巻 388
2. 論文標題 Damage mechanisms of directly bonded carbon fibre reinforced thermoplastics and aluminium with nanostructured surface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 012011-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1757-899X/388/1/012011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 細井厚志	4. 巻 10
2. 論文標題 3Dナノ構造を有するアルミニウムと熱可塑性炭素繊維強化プラスチックの直接接合技術	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 プラスチック	6. 最初と最後の頁 23-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Hiroki Ota, Kristine Munk Jespersen, Kei Saito, Keita Wada, Kazuki Okamoto, Atsushi Hosoi, Hiroyuki Kawada
2. 発表標題 Effect of interfacial nanostructure on mode mixity in directly bonded carbon fiber reinforced thermoplastic laminates and aluminum alloy with thermal stresses
3. 学会等名 JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大田宙起, Kristine Munk Jespersen, 齊藤慧, 和田啓汰, 細井厚志, 川田宏之
2. 発表標題 界面ナノ構造を有するアルミニウム合金とCFRTP積層板の異種直接接合材の層間破壊特性評価
3. 学会等名 第12回日本複合材料会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田啓汰, 會澤諒, 細井厚志, 荒井広明, 川田宏之
2. 発表標題 直接接合アルミニウム/CFRTP FMLのホットプレス成形性に及ぼす接合界面処理条件の影響
3. 学会等名 日本材料学会2020年度JCOM若手ウェビナー
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細井厚志
2. 発表標題 繊維強化複合材料の疲労における長期信頼性評価
3. 学会等名 第45回複合材料シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 空岡利奈，會澤諒，岡本和起，細井厚志，吉村健佑，川田宏之
2. 発表標題 アルミニウム合金とCF/PEEK積層板の接合強度に及ぼすナノ構造の影響
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kei Saito, Kristine Munk Jespersen, Hiroki Ota, Keita Wada, Kazuki Okamoto, Atsushi Hosoi, Hiroyuki Kawada
2. 発表標題 The effect of nano-structured surface of aluminum alloy directly bonded to CFRTP on fatigue delamination growth properties
3. 学会等名 1st Russia-Japan Joint Workshop on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kristine Munk Jespersen, Hikaru Abe, Hiroki Ota, Kei Saito, Keita Wada, Atsushi Hosoi, Hiroyuki Kawada
2. 発表標題 Damage mechanisms and mechanical properties of directly bonded CFRTP and aluminium with nano-structured surface
3. 学会等名 36th Conference & 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本和起, 曾澤諒, 空岡利奈, 細井厚志, 国吉ニルソン, リコウ, Kristine Munk Jespersen, 川田宏之
2. 発表標題 熱溶着によるCF/PA6積層板とAl合金板の接合強度に及ぼす表面処理の影響及び量子化学シミュレーションによる評価
3. 学会等名 第11回日本複合材料会議
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田和樹, Jespersen Kristine Munk, 大田宙起, 齊藤慧, 和田啓汰, 細井厚志, 川田宏之
2. 発表標題 CFRTP 積層板とアルミニウム合金の直接接合における層間破壊靱性の評価
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第26期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jespersen Kristine Munk, 阿部暉, 齊藤慧, 大田宙起, 和田啓汰, 細井厚志, 川田宏之
2. 発表標題 直接接合されたナノ構造を有するアルミニウム合金とCF/PA積層板の強度発現及び損傷メカニズム
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大田宙起, Kristine Munk Jespersen, 齊藤慧, 和田啓汰, 岡本和起, 細井厚志, 川田宏之
2. 発表標題 CFRTP積層板とアルミニウム合金の直接接着における層間破壊靱性へ及ぼす界面ナノ構造の影響
3. 学会等名 第61回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田啓汰, Kristine Munk Jespersen, 大田宙起, 齊藤慧, 細井厚志, 川田宏之
2. 発表標題 アルミニウム合金とCFRTP積層板の接着強度と破壊形態に及ぼす表面ナノ構造の影響
3. 学会等名 日本繊維機械学会第72回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Okamoto, Joon Cheol Chung, Hikaru Abe, Atsushi Hosoi, Naoki Ishida, Shingo Matsukawa, Kristine Munk Jespersen, Hiroyuki Kawada
2. 発表標題 Direct bonding between carbon fiber reinforced thermoplastics and aluminum alloys and its soundness evaluation by non-contact ultrasonic testing
3. 学会等名 26th International Conference on Composites/Nano Engineering (ICCE-26) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kristine Munk Jespersen, Jooncheol Chung, Kazuki Okamoto, Hikaru Abe, Atsushi Hosoi, Hiroyuki Kawada
2. 発表標題 Damage mechanisms of directly bonded carbon fibre reinforced thermoplastics and aluminium with nanostructured surface
3. 学会等名 39th Riso International Symposium on Materials Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田啓汰, 阿部暉, Kristine Munk Jespersen, 細井厚志, 川田宏之
2. 発表標題 アルミニウム合金とCFRTPの接着強度に及ぼす表面ナノ構造の影響
3. 学会等名 日本材料学会2018年度JCOM若手シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部暉, 大田宙起, 齊藤慧, 和田啓汰, Kristine Munk Jespersen, 細井厚志, 川田宏之
2. 発表標題 アルミニウム合金とCFRTP積層板の直接接着継手における破壊靱性の評価
3. 学会等名 第26回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齊藤慧, Kristine Munk Jespersen, 阿部暉, 大田宙起, 和田啓汰, 細井厚志, 川田宏之
2. 発表標題 アルミニウム合金および CFRTP 積層板の直接接着部における 疲労はく離成長特性の評価
3. 学会等名 第10回日本複合材料会議(JCCM-10)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 細井厚志他	4. 発行年 2021年
2. 出版社 S&T出版	5. 総ページ数 252-256
3. 書名 接着・接合の支配要因と最適化技術「ナノ界面接合技術によるAl/樹脂、CFRPの接合メカニズムと強度評価」	

1. 著者名 細井厚志, Kristine Munk Jespersen他	4. 発行年 2019年
2. 出版社 サイエンス&テクノロジー	5. 総ページ数 360ページ(273-279担当)
3. 書名 シランカップリング剤の使い方と応用事例	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 破壊靱性試験装置及び破壊靱性試験方法	発明者 細井厚志, 川田宏之, 原田和樹, イエスパーセンクリス	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-205932	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<http://www.hosoi.amech.waseda.ac.jp/index.html>

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 分担 者	荒尾 与史彦 (Arao Yoshihiko) (40449335)	早稲田大学・理工学術院・准教授 (32689)	

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
---------	---------