

細井厚志研究室

異種シングルラップジョイントの接合強度特性評価

1. 緒言

輸送機器構造を軽量化し燃費向上させる目的で、異種接合技術の開発が行われている。異種接合材の界面特性を評価する技術はこれまで数多く検討されてきた。特に異材界面のき裂先端における線形弾性論に基づく厳密解は応力場、変位場が振動することや、特別なケースを除きモードI及びモードII応力拡大係数が分離できないことが指摘されている。そこで、異材界面のき裂進展特性を評価する場合にはモードIとモードIIの比（Phase Angle）がき裂進展特性を特徴づけるパラメータとして広く用いられている。

一方、異材界面の接合強度を評価する手法として、シングルラップジョイント試験がしばしば用いられる。破断荷重を接合面積で除した見かけのせん断強度を接合強度として評価しているが、実際には接合端の応力特異性や試験片の非対称性から生じる曲げの影響を受けるため、適切な接合強度を評価しているとは言い難い。そこで、本研究ではCrack Tip Element法を拡張し、シングルラップジョイント特有の曲げ変形、及び接合時に生じる熱残留応力の影響を考慮し、接合界面のき裂進展に伴うエネルギー解放率をモード分離して閉形式で導出し、接合強度特性を評価することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試験材料 本研究では、ルミニウム合金板A5052及びポリアミド6を母材とした平織炭素繊維強化プラスチック(CF/PA6)積層板を用いた。用いた炭素繊維はT300B-3K、繊維体積含有率は $V_f=50\%$ であり、積層構成は $[(0/90)_9]_T$ である。

2.2 表面処理方法 接合強度特性を向上させる目的で陽極酸化処理及びエッチング処理によりA5052表面にナノ構造を作製した。作製したナノ構造を図1に示す。単層でスパイク状の表面ナノ構造であるOne-Tiered (OT) 構造(図1(a))、及び多層的多孔質状のMulti-Tiered (MT) 構造(図1(b))を作製した。さらに、化学的な接合を導入するために、純水を用いて1w%に希釈したイソシアネート基を有するシランカップリング処理を行った。

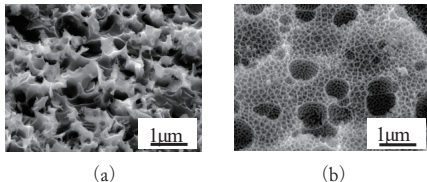


Fig. 1 Nanostructure fabricated on A5052 surface: (a) OT Structure; (b) MT structure.

2.3 シングルラップジョイント試験片及び試験条件 長さ100 mm、幅25 mm、厚さ2.0 mmのA5052板及び、平織CF/PA6積層板を300℃に加熱したホットプレスにて接合

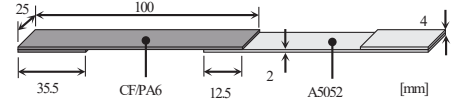


Fig. 2 Schematic of specimen geometry.

し、図2に示すシングルラップジョイント試験片を作製した。試験は、引張速度1.0 mm/minの変位制御で行い、接合強度は接合面積あたりの最大引張荷重 ($\tau_b = P/A$) として評価した。

3. 力学モデル

3.1 接合端の面外せん断荷重及び曲げモーメント シングルラップジョイントによるせん断試験は試験片の非対称性から図3に示すように曲げ変形が生じ、接合端部でせん断荷重だけでなく、面外せん断荷重や曲げモーメントが作用し、界面き裂進展に伴うエネルギー解放率もこの影響を考慮しなければならない。本研究では両端からき裂の生じたシングルラップジョイントを図4のようにモデル化し、接合端に作用する力とモーメントを定式化した。

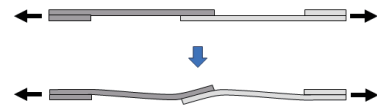


Fig. 3 Deformation of the specimen due to tensile load.

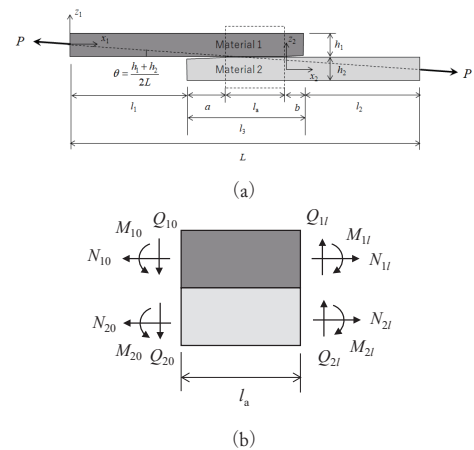


Fig. 4 Mechanical model of single lap joint specimen: (a) dimensions; (b) Forces and moments acting on ends of joints.

仮想き裂閉口法の考え方を応用し、き裂進展に伴うエネルギー解放率は式(1)のように表される。

$$G_I = -\frac{1}{2B} Q_c \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{x=0^+} = \frac{1}{2B} \left(\frac{1}{\kappa C_1} + \frac{1}{\kappa C_2} \right) Q_c^2$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2B} N_c \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0^+} = \frac{1}{2B} \left(a_1 + a_2 + \frac{h_1^2}{4} d_1 + \frac{h_2^2}{4} d_2 \right) N_c^2 \quad (1)$$

ここで、 Q_c 、 N_c は接合部両端の境界条件及び力とモーメントのつり合いから導出される。この Q_c 、 N_c の項に熱残留応力が含まれる。また B 、 h_i 、 W 、 U はそれぞれ試験片幅、板厚、き裂の開口及びせん断変形によるき裂先端開口変位を表している。 a_i 、 C_i 、 d_i は材料物性を表しており、 κ はせん断係数でここでは $5/6$ とした。さらに破壊特性を評価するために式(2)に示す破壊条件式を用いて、接合強度特性を評価した。

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^2 + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

4. 実験結果

引張せん断試験結果を図5に示す。A5052表面にナノ構造の無い未処理の圧延まま材をARと表記し、ナノ構造を作製したものにOTまたはMTと表記した。また、A5052表面にシランカップリング処理を施した試験片はSiと表記した。図5に示す結果より、未処理の試験片では接合強度が発現しなかった。MT構造またはシランカップリング処理をA5052表面に施すことで見かけの接合強度は、それぞれ15.3 MPa、17.3 MPaとなり、OT構造またはMT構造にシランカップリング処理を施したSi-OT、Si-MTの接合強度は、それぞれ22.8 MPa、24.4 MPaに向上した。

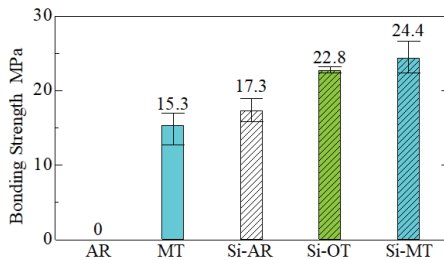


Fig. 5 Effect of bonding strength on surface nanostructures.

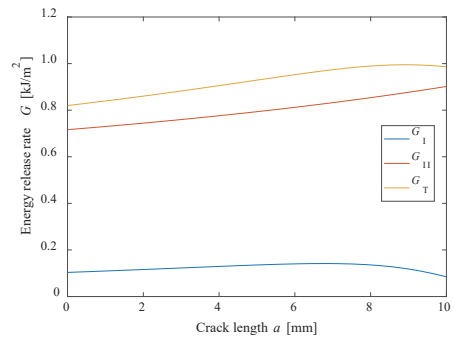
5. 解析結果

図6はA5052板の端からき裂が進展する際のき裂進展に伴うエネルギー解放率を求めた。引張荷重は $P=5$ kNを付与し、図6(a)は熱残留応力を考慮し、応力フリー温度と試験温度差 $\Delta T=-186$ Kを付与した場合、図6(b)は $\Delta T=0$ Kとした場合の結果を示している。熱残留応力はモードIIエネルギー解放率に大きな影響を及ぼしていることが見て取れる。またき裂長さの増大とともにモードI及びモードIIエネルギー解放率もやや増加傾向にあった。

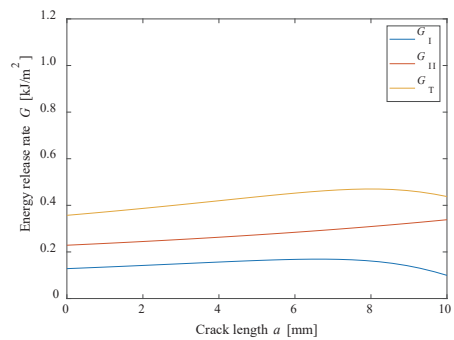
同様にモデル右端から界面き裂が進展する場合を評価すると、 $\Delta T=-186$ Kの場合では左端よりもエネルギー解放率が小さく、A5052端から界面き裂が進展すると推察され、これは実験結果とも一致する。一方、 $\Delta T=0$ Kの場合、つまり常温でそれぞれの材料を接合した場合を仮定すると、右側のCF/PA6端のエネルギー解放率が大きくなり、熱残留応力の影響によって破壊位置が異なる可能性が示唆された。

式(2)に示す破壊基準則を用いて試験片が不安定破壊する臨界荷重を求めた。図7はA5052の端からの界面き裂

長さとの関係を示している。ここで、臨界エネルギー解放率 G_{Ic} 及び G_{IIc} はシランカップリング処理のみを施したSi-ARのDCB試験より求め、それぞれ $G_{Ic}=0.2$ kJ/m²、 $G_{IIc}=1.0$ kJ/m²の値を用いた。ただし、 $G_{IIc}=5G_{Ic}$ と仮定した。評価した結果き裂長さが短いほど臨界荷重は大きくなったが、概ねき裂長さに依らずほぼ一定の値と言える。最大の臨界荷重は $P_c=5.47$ kNであり、見かけのせん断強度は $\tau_b=17.5$ MPaであり、図5に示す実験結果と良い一致を示した。



(a)



(b)

Fig. 6 Relationship between energy release rate associated with interfacial crack propagation and crack length: (a) $\Delta T=-186$ K; (b) $\Delta T=0$ K.

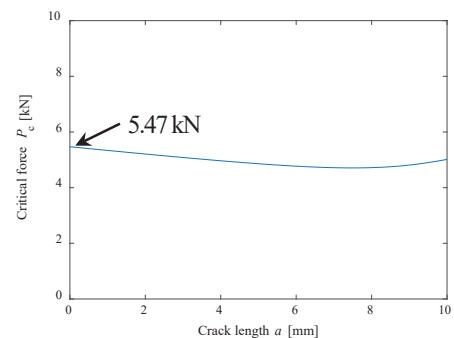


Fig. 7 Relationship between critical force and crack length.

6. 結 言

本研究では異種シングルラップジョイント試験片を対象に接合界面のき裂進展に伴うエネルギー解放率をモード分離して閉形式で導出し、接合強度特性を評価した。実験結果と解析結果は良い一致を示した。また接合強度を向上させるために、接合界面の臨界エネルギー解放率 G_{Ic} 及び G_{IIc} の両方を向上させると効果的であることを示した。

著書・論文

S. Nakayama, Y. Sugeno, T. Kambayashi, A. Hosoi, Y. Furukawa, T. Tomita, H. Kawada Mechanism of fatigue crack-closure in steel under high-density pulsed current Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2024, 48, 1879-1892 (https://doi.org/10.1111/ffe.14579).
R. Sano, Y. Koga, Y. Sato, T. Kikuchi, A. Hosoi, K. Kawahara, Y. Takebe, H. Kawada Fatigue properties of carbon fiber-reinforced foams and experimental observation of the damage growth mechanism Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2024, 48, 967-975 (doi.org/10.1111/ffe.14518).
Y. Mizuno, A. Hosoi, H. Koshita, D. Tsunoda, H. Kawada Fatigue life prediction of composite materials using strain distribution images and a deep convolution neural network Scientific Reports, 2024, 14: 25418 (doi.org/10.1038/s41598-024-75884-2).
Y. Nishi, A. Hosoi and H. Kawada Evaluation of matrix crack growth in interlaminar toughened quasi-isotropic carbon-fiber reinforced plastic laminates up to the very-high cycle regime by ultrasonic fatigue testing Composites Science and Technology, 2024, 26, 110623 (doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110623).
Y. Nishi, S. Itoh, A. Hosoi and H. Kawada Stress and energy release rate analysis of cross-ply carbon fiber reinforced plastic laminate with transverse cracks subjected to ultrasonic vibration using a variational approach Advanced Composites Materials, 2024, 33, 1224-1238 (doi.org/10.1080/09243046.2024.2334089).
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.

講演・発表

S. Takamura, T. Ito, Y. Kuzuno, A. Kunitomo, A. Hosoi, H. Kawada Investigation of Densification treatment method for CNT yarn The 7th Asian Symposium on Materials and Processing 2024, Paper No. 18, Chennai, India, 5-7/12/2024. 一般
S. Inoue, T. Kondo, S. Tanaka, Y. Kubota, K. Abe, A. Hosoi, H. Kawada Evaluation of Heat Resistance of SiC/SiC Composites Fabricated by Film Boiling Method International Mechanical Engineering & Exposition 2024, Submission No. IMECE-150418, Oregon, America, 17-21/11/2024. 一般
T. Ito, A. Kunitomo, A. Hosoi, H. Kawada Evaluation of Mechanical Properties of Carbon Nanotube Bundles with Functionalized Polymers by Molecular Dynamics Simulations IMECE2024, Submission No. IMECE2024-150420, Oregon, America, 17-21/11/2024. 一般
M. Kikuchi, A. Enomoto, T. Komukai, M. Onizuka, A. Hosoi, H. Kawada Compressive Strength Properties of Cfrp Using Cnt/cf Composite Fibers Fabricated by New Coating Method International Mechanical Engineering & Exposition 2024, Submission No. IMECE2024-150339, Oregon, America, 17-21/11/2024. 一般
T. Miura, H. Kobori, T. Shimizu, A. Hosoi, H. Kawada Development of highly conductive untwisted CNT yarn by bridging and analytical evaluation of electrical properties using first principles calculation 27th International Conference on Composite Structures, Paper No. 1181, Bologna, Italy, 3-6/9/2024. 一般
A. Hosoi, Y. 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. 一般
A. Hosoi, K. Kometani, H. 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. 一般
R. Sano, Y. Koga, A. Hosoi, K. Kawahara, H. Matsutani, Y. Takebe, K. Kimoto, H. Kawada Fatigue damage growth of carbon fiber reinforced foam observed by X-ray CT and hybrid NDT methods Proceedings of 21st European Conference on Composite Materials, Vol.8, pp.23-30, Nantes, France, 2-5/7/2024. 一般
A. Hosoi, H. 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. 一般

T. Matsuo, Y. Nishi, H. Saito, A. Hosoi, H. Kawada Influence of Self-Heating on Fatigue Life and Matrix Crack Growth of Quasi-Isotropic Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates in Ultrasonic Fatigue Tests Proceedings of 9th International Conference on Very High Cycle Fatigue, pp109-112, Lisbon, Portugal, 26-28/6/2024. 一般
三浦天風, 小松勇樹, 脇 勇一朗, 吉峰千尋, 杉浦直樹, 細井厚志, 川田宏之 「CF/PEEKを用いたスラスト軸受用摺 動材の熱伝導率特性」 3D-09, 2025年2月27日－3月1日. 一般
伊藤拓海, 國友 晃, 細井厚志, 川田宏之 「分子動力学シミュレーションによるCNT/PAA複合糸の強度発現機構」 2B-11, 2025年2月27日－3月1日. 一般
手島星尚, 井上 祥, 久保田勇希, 阿部圭佑, 宇田道正, 細井厚志, 川田宏之 「作製条件が異なる乾式紡糸SiC繊維の機械的特性及び耐熱性に関する評価」 2C-05, 2025年2月27日－3月1日. 一般
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, 2025年2月27日－3月1日. 一般
隅 意丸, 佐野隆人, 細井厚志, 河原康太, 松谷浩明, 川田宏之 「CFRPの疲労寿命特性に及ぼす母材樹脂構造の影響における実験的評価」 第16回日本複合材料会議 (JCCM-16), 2A-08, 2025年2月27日－3月1日. 一般
磯貝拓海, 齋藤 暉, 細井厚志, 角田 大, 越田博之 「短繊維アラミド繊維強化プラスチックの疲労寿命特性及び疲労損傷進展挙動の実験的評価」 第16回日本複合材料会議 (JCCM-16), 2C-11, 2025年2月27日－3月1日. 一般
佐野隆人, 古賀雄太, 細井厚志, 河原康太, 武部佳樹, 松谷浩明, 川田宏之 「CFRPの疲労破壊メカニズムの実験的評価および損傷力学を用いた疲労寿命予測」 日本機械学会 第31回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2024), A1-13, 2024年11月1－3日. 一般
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, 2024年11月1－3日. 一般
高橋悠一郎, 水谷健人, 菊池 舞, 鬼塚麻季, 小向拓治, 細井厚志, 川田宏之 「新たなコーティング法で作製されたCNT/CF複合繊維を用いたCFRPの疲労特性評価」 69th FRP CON-EX2024, P-15, 2024年10月17－18日. 一般
千葉有紗, 榎本淳史, 菊池 舞, 鬼塚麻季, 小向拓治, 細井厚志, 川田宏之 「新たなコーティング法で作製したCNT/CFRPの圧縮強度特性および破壊メカニズム」 69th FRP CON-EX 2024, P-14, 2024年10月17－18日. 一般
齋藤 暉, 細井厚志, 川田宏之 「非破壊検査によるAFRPの疲労破壊メカニズムの解明」 2024年度 第11回ZAIKENフェスタ, P30, 2024年10月3日. 一般
菅野雄太郎, 細井厚志, 川田宏之 「高密度パルス電流印加による熱間金型用合金鋼の疲労き裂閉口挙動における電流条件の検討」 2024年度 第11回ZAIKENフェスタ, P31, 2024年10月3日. 一般
陳 昶宇, 細井厚志, 川田宏之 「極低温用途における樹脂基複合材料の機械的性質の評価」 2024年度 第11回ZAIKENフェスタ, P15, 2024年10月3日. 一般
井上 祥, 細井厚志, 川田宏之, 久保田勇希, 阿部圭佑, 宇田道正 「昇降温サイクル処理を付与したFB法により作製したSiC/SiC複合材料の機械的特性と微細構造の評価」 2024年度 第11回ZAIKENフェスタ, P14, 2024年10月3日. 一般
大森智也, 田附将史, 細井厚志, 杉浦直樹, 川田宏之 「疲労負荷を受けるエポキシ樹脂の微視的損傷発達の評価」 第49回複合材料シンポジウム, A115, 2024年9月20－21日. 一般