

川田宏之研究室

1) 分子動力学シミュレーションによる水溶性ポリマーを用いた高密度化CNT糸強度発現メカニズム

カーボンナノチューブ (CNT) とは並外れた比強度・比剛性を持つナノ材料であり、航空宇宙分野への応用が期待されている。マクロスケールでの応用例として、CNT単体を撚り集めたCNT糸 (径: 数 μm 程度) が存在するが、CNT間の界面強度が低くCNT単体の機械的特性を発揮するに至っていない。CNT間の界面強度を向上させる方法の一つとして、水溶性ポリマーや熱硬化性樹脂等の樹脂と複合化させる手法が存在する。高強度化原理は、CNT-樹脂間の水素結合を介した相互作用力の向上および溶媒蒸発時の毛細管現象による高密度化であり、破断荷重・破断応力共に向上することが判明している。本研究室における過去の研究から、水溶性ポリマーのポリアクリル酸 (PAA) と複合化させる方法で最も高い効果 (3.3 GPa) を得た一方で、現状報告されている最も強度の高い純粋なCNT糸 (4.2 GPa) より低く、樹脂と複合化させる方法を正しく理解できない。

そこで本研究では、水溶性ポリマーであるPAAを用いた高密度化処理の強度発現メカニズムの解明を目的として、分子動力学 (MD) シミュレーションにより高密度化CNT糸モデルの引き抜きシミュレーションを実施した。このときシミュレーションモデルは、高密度化CNT糸の内部構造の観察結果からCNTが六方配列しその間にPAAが充填したモデルとした。また、PAAの重量比を0~50 wt%で変化したモデルを作成し、引き抜きシミュレーションを実施した。その結果、PAAの重量比が増大すると引き抜き荷重も単調に増大した。一方で、モデルの断面積あたりの強度 (引き抜き強度) はPAA重量比10%で最大値を取り、以降は単調に減少した。最後に、実験で取得した破断強度とシミュレーションで取得した引き抜き強度を比較したところ、傾向が一致することが判明し、PAA重量比の最適値が存在することが示唆された。

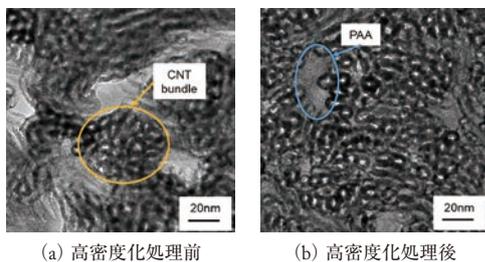


図 1-1. 高密度化処理前後のCNT糸断面形態観察図

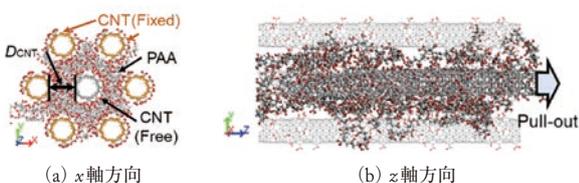


図 1-2. 引き抜き解析モデル

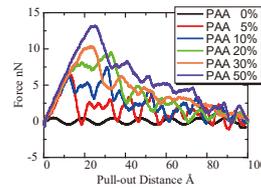


図 1-3. 引き抜き荷重と引き抜き距離の関係

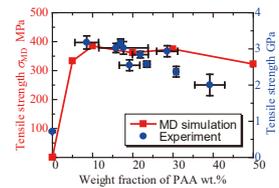


図 1-4. 実験値 (破断応力) と計算値 (引き抜き応力) の比較

2) 有限要素解析による蒸気タービン用スラスト軸受け摺動材としてのCF/PEEK複合材の熱伝導メカニズムの解明

近年、カーボンニュートラルに向けた世界の動きの中、太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーの導入が進んでいる。一方で、原子力発電や火力発電等の蒸気タービンを利用した発電は需要が続くと考えられており、蒸気タービンの効率改善は重要な課題として注目されている。その中でもスラスト軸受の改良は効率向上に大きく寄与する手法であり、スラスト軸受パッド材料としてPEEK (Poly Ether Ether Ketone) 樹脂が注目されている。PEEK樹脂は機械的強度、耐熱性、耐摩耗性等に優れる一方で、面外方向の熱伝導率の低さが温度監視の観点から課題となっている。

そこで本研究では、炭素繊維強化PEEK樹脂の面外方向の熱伝導率向上を目的とし、実験、解析を行った。実験では、樹脂の種類、炭素繊維の種類、積層構造、繊維体積含有率等が異なる材料の評価を行った。また、エポキシ樹脂にグラフェンを粒径、含有率を変化させて加えることで、フィラーが樹脂の熱伝導率に与える影響を調査した。解析では、有限要素解析を用いて炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) の内部を再現したモデルを作製し、樹脂や炭素繊維の熱伝導率の値やCFRPの層数が全体の熱伝導率に与える影響を調査した。

実験においては、従来使用されていたPAN系炭素繊維に代わり、熱伝導率の高いPitch系炭素繊維を用いることでCFRPの熱伝導率の向上が確認された。ただし、Pitch系では空隙の増加が確認されており、樹脂との接着性の低下が示唆された。CFRP中の繊維体積含有率がCFRPの熱伝導率に大きく影響を与えていることが確認された。また、エポキシ樹脂にグラフェンを導入した結果、粒径が大きく、重量比が大きいほど熱伝導率が向上することが確認された。これは粒径が大きいほどフィラーによる熱伝導が行われるだけでなく、フィラー同士の接触が増加し熱伝導経路が形成されるためであると示唆された。

解析においては、SEMにより撮影された断面画像を用いて材料を再現したモデルの作製をAnsys Spaceclaim上で行った。得られたモデルに条件を設定し伝熱解析を行った結果、熱伝導率1.01 W/mKという値が得られた。実験値は1.1 W/mKであるため、実験値に近い結果を提供するこ

とが確認された。作製したモデルによる解析の結果、炭素繊維と樹脂の熱伝導率の差が大きくなるにつれ熱伝導経路が固定化されることが確認された。この結果から、炭素繊維、樹脂それぞれの熱伝導率の向上がCFRPの熱伝導率の向上には必要となることが示唆された。

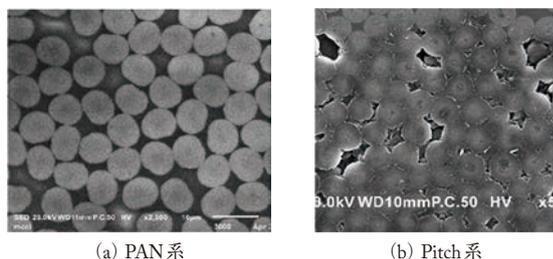


図 2-1. SEM 観察結果

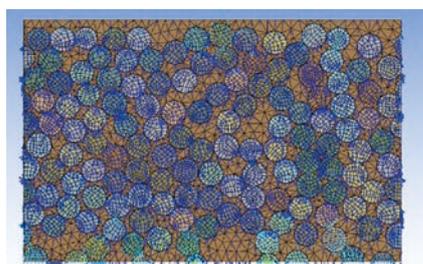


図 2-2. CFRP モデル伝熱解析結果（一方向材）

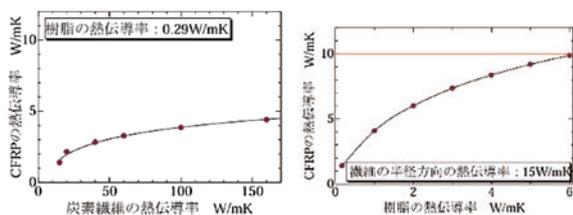


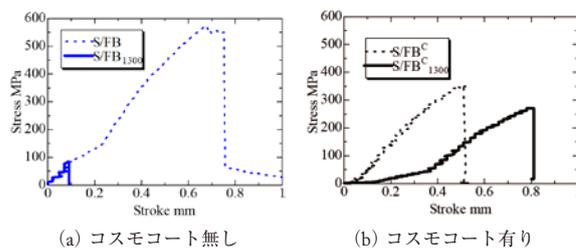
図 2-3. 炭素繊維の熱伝導率と CFRP の熱伝導率の関係

図 2-4. 樹脂の熱伝導率と CFRP の熱伝導率の関係

3) 1300℃酸化雰囲気曝露によるコスモコートFB-SiC/SiC 複合材料の耐熱性・耐酸化性評価

SiC/SiC 複合材料は、高温環境下での使用を想定した軽量かつ耐熱性に優れた材料である。しかし、従来のマトリックス形成法は長時間の処理が必要であり、製造コストが高いため、広範な実用化の障害となっている。さらに、高温酸化環境下では、界面層およびマトリックスの酸化劣化により、機械的特性が大幅に低下することが報告されている。これらの課題を克服するため、本研究では新しいマトリックス形成技術として膜沸騰法 (FB 法) を採用し、加えて、多元金属酸化物からなるコスモコートをコーティングすることで、SiC/SiC 複合材料の耐熱性および耐酸化性の向上を図った。本研究では、FB 法を用いて作製した FB-SiC/SiC 複合材料をベースとし、コスモコートを施した試料および、1300℃の高温酸化環境に10時間曝露した試料を準備し、それぞれの機械的特性と微細構造の変化を評価した。4点曲げ試験の結果曝露前の S/FB と比

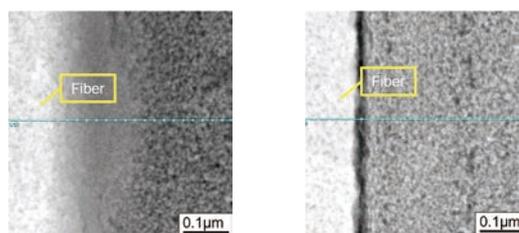
較して1300℃曝露後は大幅に強度が低下し、高温酸化環境下でFB-SiC/SiC複合材料の機械的特性が著しく悪化することが明らかとなった (図 1a)。一方、コスモコートを施した試料はコーティング前と比べてわずかに強度が低下したものの、曝露前後で比較して強度の低下が抑制されており、コスモコートの効果により高温酸化環境下での機械的特性の劣化が防がれることが示された (図 1b)。さらに、試験片の破面観察および微細構造評価を行った。TEM および EDS 分析の結果、高温酸化環境では界面層の C 層がほぼ消失し、繊維/マトリックス界面において SiO₂ のアモルファス化が進行していた (図 2 a, 図 3 a)。この結果は、1300℃の曝露により C 層が CO や CO₂ として酸化・消失し、繊維とマトリックスが SiO₂ を形成して強固に接着することで、界面剥離機能が喪失し、引き抜け性が著しく低下したことを示している。一方、コーティング後は、界面層が保持され、SiO₂ の生成が抑制されており、コスモコートが内部への酸素の侵入を抑え、酸化による材料劣化を防ぐ役割を果たしていることが明らかとなった (図 2 b, 図 3 b)。以上の結果から、FB 法を用いた SiC/SiC 複合材料は高温酸化環境下で内部まで酸化が進行し、機械的特性が劣化するが、コスモコートを施すことで、界面層の保持が可能となり、耐熱性・耐酸化性が向上することが示唆された。



(a) コスモコート無し

(b) コスモコート有り

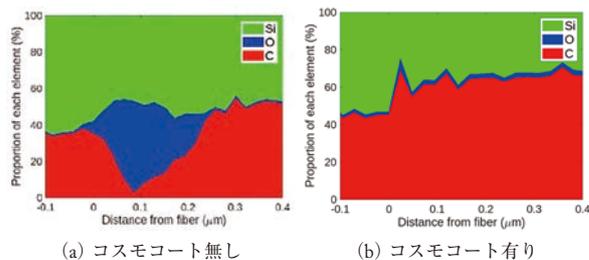
図 3-1. 応力-変位線図



(a) コスモコート無し

(b) コスモコート有り

図 3-2. 界面近傍 TEM 像



(a) コスモコート無し

(b) コスモコート有り

図 3-3. EDS 分析

受賞

賞名	授賞機関及び受賞理由
早稲田大学 2023年度ティーチングアワード総長賞	「材料の力学1」

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).
國友 晃, 後藤康夫, 川田宏之 「強化プラスチック用強化繊維としてのCNT繊維」 強化プラスチック, 2024, 7, 1-5
G. Yamamoto, S. Nakano, H. Oyamada, R. A. Ramadhan, S. Okamoto, A. Takeuchi, M. Uesugi, A. Kunitomo, N. Shigemitsu, T. Abe, Y. Shimamura, H. Kurono, S. Goto, Y. Inoue, Y. Hayashi, H. Kawada Unravelling the role of inter CNT yarn-yarn interactions in governing the failure behavior in a unidirectional CNT yarn-reinforced plastic composite Composites Science and Technology, 265, (2025), 111137

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, 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

<p>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</p>
<p>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</p>
<p>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, pp. 109-112, Lisbon, Portugal, 26-28/6/2024. 一般</p>
<p>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</p>
<p>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</p>
<p>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</p>
<p>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</p>
<p>隅 意丸, 佐野隆人, 細井厚志, 河原康太, 松谷浩明, 川田宏之 「CFRF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</p>
<p>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 「CFRF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</p>
<p>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</p>
<p>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</p>
<p>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</p>
<p>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</p>
<p>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</p>
<p>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</p>
<p>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</p>
<p>大森智也, 田附将史, 細井厚志, 杉浦直樹, 川田宏之 「疲労荷重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</p>