

川田宏之研究室

1) 溶液紡糸法による高強度CNT系の創製

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には集合体のCNT系が用いられるが、従来の乾式紡糸法で作製されたCNT系は、作製方法の制約から結晶性の低いCNT単体を用いざるを得ず、かつ繊維内部に多数の空隙が残ってしまう点から、超高強度繊維を達成するには不向きである。近年、クロロスルホン酸 (CSA) を分散媒として用いた溶液紡糸法に注目が集められている。この方法では、結晶性の高いCNT単体を用いることが可能であり、かつ高配向・緻密構造を持つCNT系の作製が可能である。したがって、本研究ではCSAベースの溶液紡糸プロセスにおけるCNT系の高強度化に向けた最適化指針を明らかにすることを目指した。はじめに、合成条件およびアスペクト比が異なる複数種の原料CNTについてCSA中での分散挙動を調査した。高い結晶性を持つCNTではネマティック液晶相の形成が確認されたものの、炭素不純物の残留量が多数確認された原料では、安定した連続紡糸を実現できず、炭素不純物の影響であると示唆された。このことは液晶ドーブの形成に加えて原料純度の確保が紡糸プロセスの安定性を支配する因子であることを示唆する。続いて、吐出流量と延伸比を段階的に変化させたところ、流量が大きい条件ではCNTの配向度が低下し、逆に流量が小さい条件では凝固溶液が紡糸ノズル側へ逆流して成形が不安定化した。このことから、両パラメーターにはそれぞれ最適範囲が存在すると考えられる。ドーブ濃度についても検討を行い、1 vol%の条件において配向係数0.93、引張強度 1.9 ± 0.15 GPa、弾性率 199 ± 19 GPaという力学特性を持つCNT系が得られた。作製したCNT系の断面微細構造を評価したところ、CNTが高度に配向し緻密に充填された低空隙組織が確認された一方で、スルホン化に由来する残留物が繊維内部に点在しており、これが繊維の構造欠陥として作用している可能性が示唆された。そこで、CSA中での軽微な追延伸とN-メチル-2-ピロリドン (NMP) による洗浄を組み合わせた後処理を施した。その結果、残留スルホン化物が効果的に除去されるとともに断面形状が均質化し、引張強度 2.3 ± 0.2 GPa、弾性率 232 ± 38 GPaへと特性が向上した。今後は、液晶流動の理論モデルに基づく成形条件の最適化、高アスペクト比CNTへの展開、ならびにドーブ調製段階での複合化による界面制御を通じて、一層の高強度化を推進する。

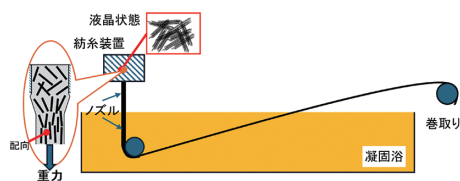
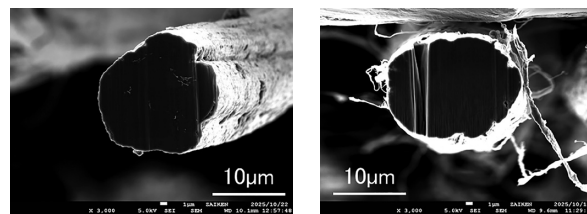


図 1-1 溶液紡糸の概要図



(a) 後処理前 (b) 後処理後

図 1-2 CNT系断面のSEM像

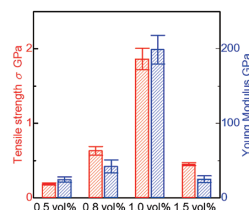


図 1-3 ドープ濃度とCNT系の力学特性の関係

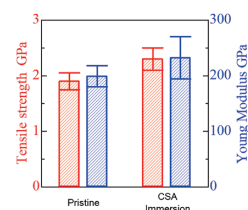


図 1-4 後処理の有無による力学特性の比較

2) 蒸気タービン用スラスト軸受摺動材としてのCF/PEEK 複合材料の熱伝導率向上に向けた研究

近年の世界での目覚ましい経済発展と人口増加に伴い、世界の電力需要は大きく拡大を続けている。カーボンニュートラルに向けた動きの中で、風力発電、太陽光発電等の再生可能エネルギーの導入が拡大している一方、火力発電や原子力発電等の主要機器である蒸気タービンの高効率化も依然として求められる。高効率化への取り組みとして、炭素繊維強化PEEKを用いた蒸気タービン用スラスト軸受が開発されている。これは従来のホワイトメタル製のものと比較し摩擦係数、比摩耗量、耐熱温度等に優れ、タービンの高効率化に寄与している一方で、熱伝導率が低く、温度監視の点で問題が生じている。温度監視を適切に行うためには、面外方向熱伝導率10 W/mK程度が求められる。従来の研究から、CFRPでは樹脂の熱伝導率がボトルネックとなっており、繊維を改善するだけでは目標値である10 W/mKに達しないことが明らかとなっている。そこで本研究では、特に樹脂の熱伝導率改善を通じて炭素繊維強化PEEKの面外方向熱伝導率を向上させることを目的として、実験および有限要素法による解析を行った。

実験ではエポキシ樹脂中にポリドーパミン (PDA) 修飾をしたグラフェンナノプレートレット (GNP) を混合した複合材料を作成し、GNPの樹脂熱伝導率向上への効果、PDA修飾の有無による差を調査した。結果として、PDA修飾をしていないGNP/Epoxyの場合、GNP 3 wt%で0.40 W/mK、5 wt%で0.60 W/mKであったのに対し、PDA修飾をしたGNP@PDA/Epoxyでは3 wt%で0.38 W/mK、5 wt%で0.36 W/mKと、PDA修飾による熱伝導率向上の効果は認められず、逆に低下させる要因となってしまった。これはエポキシ樹脂中に存在するヒドロキシ基の数が少なく、水素結合によるエポキシ-GNP間の接着の改善がなされず、逆に

PDA層が熱抵抗として働いたためと考えられる。

解析では、CFRP積層板の断面画像から繊維配置を正確にトレースしたモデルを作成し、実験結果と整合する形で繊維直交方向の熱伝導率を算出した。その結果PAN系炭素繊維では軸方向の1/3～1/4程度、Pitch系炭素繊維では軸方向の1/8～1/10程度であることが確認された。その結果を用いて、10 W/mK到達に要求される樹脂の熱伝導率の算出を行った。また、GNP/CF/PEEKモデルを作成し、GNP添加による熱伝導率の限定的な向上を確認した。

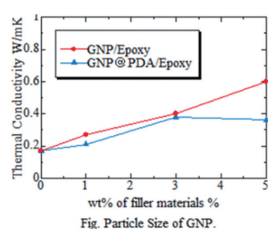
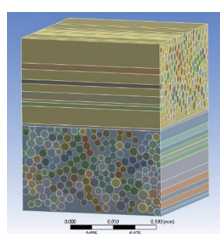
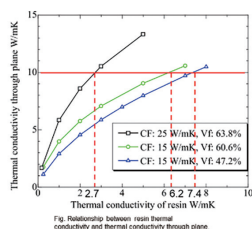


図 2-1 GNP@PDA/Epoxyの熱伝導率

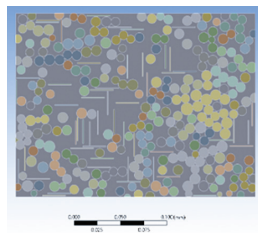


(a) CF/PEEKの解析モデル

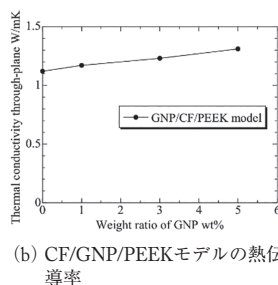


(b) CF/PEEKモデルの熱伝導率

図 2-2 CF/PEEKモデル



(a) CF/GNP/PEEKの解析モデル



(b) CF/GNP/PEEKモデルの熱伝導率

図 2-3 CF/GNP/PEEKモデル

3) アーク風洞試験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複合材料は軽量で耐熱性に優れ、航空宇宙・エネルギー分野などの高温環境下で利用拡大が期待されている。しかし、従来のマトリックス形成法は長時間処理を要し、製造コストが高くなっている。さらに、高温酸化環境下では界面層と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。これらの課題に対し、本研究では膜沸騰法（FB法）を用いたマトリックスの高速緻密形成と、多元素金属酸化物からなるコスモコートによる高温酸化耐性の向上を図った。本研究の目的は、FB法により作製したSiC/SiC複合材料に対しコスモコートを適用し、実使用環境（再使用型宇宙往還機の再突入）を模擬したアーク風洞試験における高温酸化挙動、及び機械的特性と微細構造の変化を明らか

にすることである。さらに、付加コート材の影響を比較してコーティング作製条件と高温酸化耐性の関係を整理し、最適なコーティング条件の設計指針を得ることを目的とする。アーク風洞試験前後の4点曲げ試験結果について、曝露前のS/FBと比較して、コスモコートを施したC-A2、およびDurazaneを付加したCD-A1は僅かに強度低下し、ZrO₂を付加したCZ-A2は有意な強度低下が得られた。一方、コスモコート処理を行っていないN-A2の強度は低下しなかった（図3-1a）。参考として、昨年度実施された1300℃・10時間曝露では、コスモコート処理を行っていない供試体の機械的特性が著しく低下することが報告されている（図3-1b）。TEM・EDSの結果、N-A2の表面にはSiO₂などの酸化物の形成が確認されたが、断面部においては酸化されていなかった。これは、表面に形成された酸化物が保護膜となり内部への酸素侵入を防ぎ、界面層の酸化が抑えられたことを示している（図3-2a、図3-2b）。一方、C-A2は表面から約300 μmまでの酸化が確認され、コスモコート中の金属酸化物が酸化反応を促進した可能性や、焼成によって炭素界面層が消失して酸化パスが形成したことが示唆された（図3-3a、図3-3b）。CD-A1は酸化があまり進行しておらず、Durazaneがガスバリアした可能性を示している。CZ-A2は表面の凹凸が抑制できたが、内部の界面が酸化劣化していた。以上の結果から、アーク風洞試験条件下ではコスモコート無しでも熱衝撃に耐えることが明らかとなった。一方コスモコートありでは、酸化進行が促進される傾向にあり、コスモコートについて、処理プロセスの見直しおよび最適な付加コート材の種類・量を検討する必要があることが示唆された。

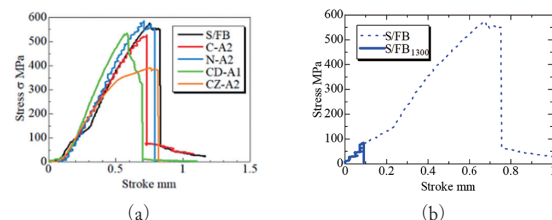


図 3-1 応力変位線図（曝露試験前後の4点曲げ試験結果）

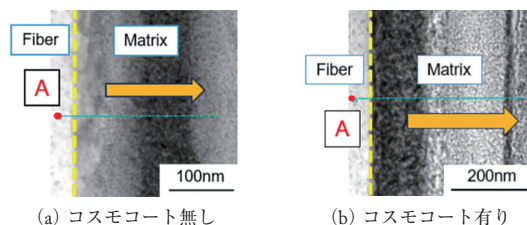


図 3-2 繊維/マトリクス界面近傍TEM像

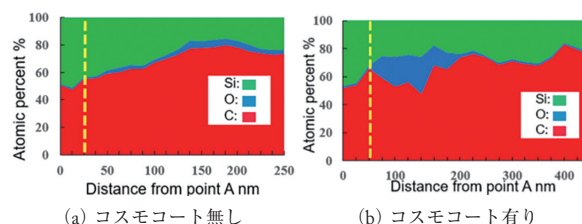


図 3-3 EDS線分析

著書・論文

S. Takashiro, Y. Sugeno, A. Hosoi, H. Kawada “Influence of electropulsing on fatigue crack growth retardation in hot-work die steel” Mechanical Engineering Journal, 2026, accepted.
T. Isogai, H. Saitoh, A. Hosoi, D. Tsunoda, H. Koshita, H. Kawada “Effects of material composition on fatigue properties of short aramid fiber reinforced plastics using hybrid non-destructive testing methods” Mechanical Engineering Journal, 2026, accepted.
M. Otsubo, R. Tajiri, A. Hosoi, T. Sakurai, T. Yamatogi, K. Kimoto, H. Kawada “Experimental evaluation of fatigue properties and failure mechanisms of thick carbon fiber-reinforced plastic laminates under three-point bending load” Advanced Composite Materials, 2026, accepted.
T. Matsuo, Y. Nishi, H. Saito, A. Hosoi, H. Kawada “Effects of self-heating on fatigue behavior of quasi-isotropic CFRP laminates under ultrasonic loading, Advanced Composite Materials” 2026, 1-18. (https://doi.org/10.1080/09243046.2026.2641271).
R. Sano, Y. Koga, I. Sumi, A. Hosoi, K. Kawahara, H. Matsutani, H. Kawada “Evaluation of fatigue fracture mechanism of carbon fiber-reinforced foams using nondestructive testing and fatigue life prediction using damage mechanics” Composites Science and Technology, 2025, 111502 (https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2025.111502).
K. Kometani, A. Hosoi, H. Kawada “Interfacial microstructure effects on the bonding strength and interlaminar fracture toughness of aluminum alloys thermally bonded to carbon fiber-reinforced polyetheretherketone” Surface Science and Technology, 2025, 3, 18 (https://doi.org/10.1007/s44251-025-00082-9).
細井厚志, 川田宏之 「炭素繊維強化プラスチック積層板の超高サイクル疲労 後編 擬似等方炭素繊維強化プラスチック積層板の超高サイクル疲労特性の評価」 機械の研究, 2025, 77, 12, 874-879.

講演・発表

Y. Shimamura, J. Shirasaka, T. Fujii, H. Kawada, A. Hosoi, Y. Inoue “Evaluation of tensile strength of multi-walled carbon nanotube by ultrasonication and in-situ tensile test in SEM” Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials & Structures 2025 (JSMAMS2025), Kyoto, Japan, 28/11-1/12/2025. 一般
K. Nishi, T. Omori, T. Komori, A. Hosoi, N. Sugiura, H. Kawada “Role of matrix resin in delaying transverse crack growth in cross-ply CFRP laminates” The 3rd China-Korea-Japan Joint Symposium on Composite Materials 2025 (the 3rd CKJ-CM), 15294, Guangzhou, China, 22-24/11/2025. 一般
S. Takashiro, Y. Sugeno, A. Hosoi, H. Kawada “Influence of electropulsing on fatigue crack growth retardation in hot-work die steel” 2nd JSME International Conference on Materials & Processing (ICM&P 2025), 3J06, Guam, USA, 3-6/11/2025. 一般
T. Isogai, H. Saitoh, A. Hosoi, D. Tsunoda, H. Koshita, H. Kawada “Effects of material composition on fatigue properties of short aramid fiber reinforced plastics using hybrid non-destructive testing methods” 2nd JSME International Conference on Materials & Processing (ICM&P 2025), 1B12, Guam, USA, 3-6/11/2025. 一般
A. Hosoi, T. Saito, M. Sakanobe, H. Kawada “Crack-tip micro-bridging for enhancing interlaminar fracture toughness at the CF/PA6-aluminum alloy bonding interface” The 10th International Conference on Fatigue of Composites (ICFC10), Abstract p.46, Sapporo, Japan, 1-4/7/2025. 一般
R. Sano, I. Sumi, A. Hosoi, K. Kawahara, H. Matsutani, H. Kawada “Evaluation of resin design and fatigue life scatter of carbon fiber reinforced foam using non-destructive testing method” The 10th International Conference on Fatigue of Composites (ICFC10), Abstract p.10, Sapporo, Japan, 1-4/7/2025. 一般
松尾俊輝, 後藤蒼志郎, 今井康太, 細井厚志, 阿部 暉, 川田宏之 「超音波疲労試験における擬似等方CFRP積層板の疲労損傷に及ぼす自己発熱の影響」 日本機械学会 関東支部 第32期総会・講演会, GS0402, 日本大学駿河台キャンパス, 東京, 2026年3月9-10日. 一般
齋藤達明, 小澤朋生, 細井厚志, 川田宏之 「Al合金とCF/PEEK積層板の接合強度に及ぼす接合界面のレーザー加工構造の影響」 日本機械学会 関東支部 第32期総会・講演会, GS0409, 日本大学駿河台キャンパス, 東京, 2026年3月9-10日. 一般

坂本麗衣, 佐野隆人, 細井厚志, 足立健太郎, 松谷浩明, <u>川田宏之</u> 「曲げ疲労負荷下におけるCFRP/CFRFハイブリッドパネルの損傷進展挙動の評価」 関東学生会 第65回学生会卒業研究発表講演会, 531, 日本大学駿河台キャンパス, 東京, 2026年3月9日. 一般
佐野隆人, 坂本麗衣, 細井厚志, 河原康太, 松谷浩明, <u>川田宏之</u> 「複合的非破壊計測を活用したCFRFの疲労損傷進展過程に基づく疲労寿命予測」 第17回日本複合材料会議 (JCCM-17), 1B-07, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
大森智也, 小森達也, 西 耕平, 細井厚志, 杉浦直樹, <u>川田宏之</u> 「疲労負荷下における高弾性繊維CFRPクロスプライ積層板のトランスバースクラック進展に及ぼす母材樹脂の影響」 第17回日本複合材料会議 (JCCM-17), 2C-04, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
伊藤拓海, 郡司遼太郎, 熊谷駿介, 後藤康夫, 國友 晃, 細井厚志, <u>川田宏之</u> 「溶液紡糸CNT糸の強度発現機構: 実験と粗視化分子動力学法による解析」 第17回日本複合材料会議 (JCCM-17), 1B-08, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
高村 駿, 脇 勇一朗, 角 侑樹, 杉浦直樹, 細井厚志, <u>川田宏之</u> 「蒸気タービン用スラスト軸受摺動材としてのCF/PEEK複合材料の熱伝導率向上に向けた研究」 第17回日本複合材料会議 (JCCM-17), 1D-03, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
高橋悠一郎, 上半宙輝, 菊池 舞, 鬼塚麻季, 小向拓治, 細井厚志, <u>川田宏之</u> 「NOLリング試験によるCFRPの疲労特性評価手法の検討」 第17回日本複合材料会議 (JCCM-17), 1D-04, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
近藤 匠, 野口航希, 久保田勇希, 阿部圭佑, 宇田道正, 岸本克己, 細井厚志, <u>川田宏之</u> 「コスモコート処理を施したFB-SiC/SiC複合材料の高温酸化耐性評価」 第17回日本複合材料会議 (JCCM-17), 3C-04, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
田辺和輝, 手嶋星尚, 久保田勇希, 阿部圭佑, 宇田道正, 細井厚志, <u>川田宏之</u> 「作製条件の異なる乾式紡糸SiC繊維における機械的特性と微細構造評価」 第17回日本複合材料会議 (JCCM-17), 3C-05, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
坂邇邊 萌, 米谷華織, 齋藤達明, 細井厚志, <u>川田宏之</u> 「表面ナノ構造を有するアルミニウム合金とCF/PA6積層板の異種接合における層間破壊靱性向上機構の解明」 70th FRP CON-EX 2025, P-2, 秋葉原UDX, 東京, 2025年10月29-30日. 一般
佐野隆人, 坂本麗衣, 細井厚志, <u>川田宏之</u> 「損傷発達モニタリングによるCFRFの疲労寿命特性のばらつきの実験的評価」 2025年度 第12回ZAIKENフェスタ, p.31, 早稲田大学各務記念材料技術研究所, 東京, 2025年10月23日. 一般
磯貝拓海, 細井厚志, <u>川田宏之</u> 「AFRPの疲労損傷発達挙動に及ぼす材料組成の影響」 2025年度 第12回ZAIKENフェスタ, p.30, 早稲田大学各務記念材料技術研究所, 東京, 2025年10月23日. 一般
<u>川田宏之</u> 「FRP70年の歩み～直近10年間の進展と今後および用途事例集～」 カーボンナノチューブとその複合材料 – 総説 –, pp.41, 10月, 2025
國友 晃, 後藤康夫, <u>川田宏之</u> 「FRP70年の歩み～直近10年間の進展と今後および用途事例集～」 カーボンナノチューブとその複合材料 – 強化プラスチック用強化繊維としてのCNT繊維 –, pp.42, 10月, 2025
<u>川田宏之</u> 「加速する世界のエネルギー転換と日本洋上風力発電の照らす」未来を聞いて 強化プラスチック協会誌, pp.495, 12月, 2025