

2024 年度年次報告書

分解・劣化・安定化の精密材料科学

2023 年度採択研究代表者

所 千晴

早稲田大学 理工学術院
教授

ナノ粒子凝集分散制御による電気パルス刺激での易分解接着の開拓

主たる共同研究者：

犬束 学（早稲田大学 カーボンニュートラル社会研究教育センター 准教授）

岡田 洋平（東京農工大学 大学院グローバルイノベーション研究院 教授）

久保 正樹（東北大学 大学院工学研究科 教授）

研究成果の概要

本研究の目的は、エポキシ樹脂などの高強度接着材料に分散性を制御した導電性ナノ粒子を添加することで、強力な接着力と電気パルスによる易分解性を両立させる学理と技術の確立である。

市販高強度接着剤は、複雑な組成の複合材料で、本研究での基礎研究に適さないため、主剤にビスフェノール A ジグリシジルエーテル、硬化剤に 4,4'-メチレンビス(2-メチルシクロヘキシルアミン)を用いる二液混合型エポキシ系接着剤をモデルエポキシ樹脂として選定した。また、高分散性ナノ粒子として、オレイルアミンにより表面修飾した銀ナノ粒子の合成法を確立し、これをモデルエポキシ樹脂に添加した接着体試料の作製、電気パルス印加実験、および放電・破壊メカニズムの解析まで一貫して行うチーム内連携体制を構築した。並行して、銀ナノ粒子の表面修飾分子に関する分子動力学(MD)解析、 χ パラメータ等から求めた粒子間相互作用によるナノ粒子凝集挙動の解析、導電性ナノ粒子の凝集分散状態が接着体内の高電場印加時の電界強度分布に与える影響の解析を進め、分子スケールの相互作用からマクロスケールの電界特性まで階層的な解析法を確立した。

合成したオレイルアミン修飾銀ナノ粒子は、溶媒洗浄法によって表面修飾量が変化し、その変化が凝集分散挙動に大きく影響することを明らかにした。動的光散乱法では評価が困難な高粘度の硬化剤中におけるナノ粒子の分散性評価については、紫外可視分光光度測定により評価した。また、硬化したエポキシ樹脂内でのナノ粒子の凝集状態評価法には、小角・超小角X線散乱法や電子顕微鏡観察を実施した。電子顕微鏡像の画像解析から得られた平均凝集径と凝集体間平均表面間距離を用い、銀ナノ粒子が凝集した状態での硬化体内の電界強度分布を計算し、接着体内で内部放電が起こる銀ナノ粒子濃度の下限値を推定した。電気パルス実験の結果では、剥離をもたらす内部放電が高確率で起こるナノ粒子濃度の下限値が、計算結果とほぼ一致することを示した。さらに、銀ナノ粒子以外の系として、カーボンブラックをエポキシ樹脂内に局所的に存在させた接着体や、それをリチウムイオン電池のような金属箔との接着プライマーとして用いた材料、さらに炭素繊維複合材料へも展開し、銀ナノ粒子含有接着体に対して得られた知見を活用して、それらの電気パルスによる破壊・分離特性を改善した。

【代表的な原著論文情報】

- 1) Tatsuya Sudo, Masahiko Sagawa, Sota Adachi, Yusuke Kato, Yuki Nakanishi, Tatsuya Nakamura, Shohei Yamashita, Hidehiro Kamiya, Yohei Okada, “Understanding Flexdispersion: Structure-Function Relationship Studies of Organic Amphiphilic Ligands”, *Chemistry A European Journal*, 30, e202304324. Highlighted as a Front Cover (2024).
DOI: 10.1002/chem.202304324
- 2) Keita Sato, Taketoshi Koita, Manabu Inutsuka, Koji Yamaguchi, Masao Kimura, Chiharu Tokoro, “Disassembly of Laminated CFRP using Direct Pulsed Discharge”, *Composites Part B: Engineering*, 297, 1123011 (2025).
DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112301
- 3) Chiharu Tokoro, Keita Sato, Manabu Inutsuka, Taketoshi Koita, “Efficient Recovery of Carbon Fibers from Carbon Fiber-Reinforced Polymers using Direct Discharge Electrical Pulses”,

Scientific Reports, 14, 29762 (2024).

DOI: 10.1038/s41598-024-76955-0

- 4) Moe Nakahara, Taketoshi Koita, Shinichi Higuchi, Kaito Teruya, Kazuyuki Shishino, Katsuya Teshima, Takao Namihira, Chiharu Tokoro, “Active Material Layer Separation From Positive Electrodes in Lithium-Ion Batteries by Joule Heating During Pulsed Discharge in Air and Water” IEEE Transactions on Plasma Science, in press (2025)

DOI: 10.1109/TPS.2025.3546480

- 5) Taketoshi Koita, Yuto Imaizumi, Asako Narita, Yutaro Takaya, Yosuke Kita, Hiroyuki Akashi, Takao Namihira, Chiharu Tokoro, “Separation and Recovery of the Active Material from Cu Foils in Lithium-ion Battery Anodes by Electrohydraulic Fragmentation using Pulsed Discharge”, Waste Management, 198, 46 (2025)

DOI: 10.1016/j.wasman.2025.02.039