

フジシール財団 研究助成事業
成果報告書

公益財団法人フジシール財団
理事長 岡 崎 裕 夫 殿

報告日 2026 年 5 月 31 日

研究課題	大気圧プラズマを用いた非熱処理表面実装パッケージ技術の開発	助成金額
		300 万円
助成名	特別長期研究助成・研究助成・若手研究助成	
ふりがな	ささき とおる	研究助成申請年度
研究者氏名	佐々木 徹	2025 年度
所属機関	長岡技術科学大学 技学研究院 技術科学イノベーション系	研究期間
		2025 年 4 月 1 日-2026 年 3 月 31 日
役 職	教授	

下記の通り、研究成果を報告いたします。

記

1. 研究成果の概要

本研究は、大気圧プラズマを用いた非熱処理のパワー半導体や有機材料への電気接点技術の開発を念頭に、カーボンナノチューブ (CNT) 分散体を包含する導電性接着剤に大気圧プラズマを照射することで、導電性接着剤が硬化するとともに、高電界に対する絶縁性などの機能を発現させるパッケージ技術の開発を目指して研究を行った。

本手法における導電性接着剤の試料作製は、以下の手順で行った。試料となる導電性接着剤には、エポキシ系銀フィラー導電性接着剤と 1 wt.%単層 CNT 含有エポキシ樹脂分散体を 0 - 10 wt.%添加したものを自転公転ミキサーで混合して調製し、塗布した。基板には、分析用及び抵抗率計測用にシリコン基板およびガラス基板を準備した。基板の上に、上記で混合した試料を寸法（幅 5 mm×長さ 26 mm×厚さ 58 μm）で塗布し、大気圧プラズマを照射した。大気圧プラズマの照射には、アルミニウム電極を誘電体であるアルミナで被覆した誘電体バリア放電 (DBD) 方式を用いた。また、プラズマを発生させる電源には、印加電圧 11 kVp-p、周波数 35 kHz を用いて印加電圧及び電流、投入電力量を算出した。誘電体バリア放電のリアクタ内部は、誘電体バリア放電を発生させやすくするため、ヘリウム流量 5 L/min で供給した。導電性接着剤の特性や膜の状態を評価するために、電界放出形走査電子顕微鏡 (FE-SEM、JEOL JSM-IT800) による断面観察、エネルギー分散型 X 線分光法 (EDS) による元素マッピング、四探針法による体積抵抗率測定（日東精エアナリテック ロレスターGX）、ラマン分光（JASCO NRS-7200、532 nm）、フーリエ変換赤外分光法 (FT-IR、島津 IRTracer-100) を用いた。大気圧プラズマの照射の有無による違いを観測するために、比較対象として推奨硬化条件（200 ℃・1 時間）での電気炉処理を行った試料を作製した。

まず、断面 FE-SEM 観察により、導電性接着剤に大気圧プラズマ照射をした試料の膜厚を観測した。その結果、導電性接着剤の表面に厚さ数 μm の薄膜が形成されることを確認した。一方、200 ℃・1 時間の電気炉処理を行った試料では、銀フィラーが断面全域に均一分布し、表面への薄膜形成は観測されなかった。また、1 wt.%単層 CNT 含有エポキシ樹脂分散体の分散量を変化させると、添加量の増加に伴って膜厚が厚くなることを明らかにし

た。この領域の元素を分析するために EDS による元素マッピングから、導電性接着剤表面に形成された膜は炭素 (C) が支配的で銀フィラーを一切含まないことが確認された。すなわち、CNT は単なる放熱性フィラーとして受動的に存在するのではなく、プラズマ反応場においてフィラー排除型の絶縁膜成長を能動的に駆動する役割を果たしていることを示した。

次に、この導電性接着剤の表面及び内部の体積抵抗率を計測した。その結果、大気圧プラズマ処理試料の内部体積抵抗率は、CNT 0 wt.%で $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 、10 wt.%添加でも $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーとなり、元々のエポキシ系銀フィラー導電性接着剤を標準処理した場合と同程度の電気伝導性であった。一方、表面から計測した体積抵抗率は CNT 5 wt.%および 10 wt.%において $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上に達し、絶縁性能が極めて高くなることを明らかにした。材料を同条件として電気炉処理をした場合、表面抵抗率は $10^1 \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーとなることがわかり、大気圧プラズマから発生するラジカルや紫外線などの影響が導電性接着剤の表面での反応に寄与していることが示唆された。

導電性接着剤表面に形成された膜の特性を明らかにするためにラマン分光測定により解析を行った。主な解析対象として、CNT の結晶性指標である D/G バンド強度比 (I_D/I_G) の変化について調査を行った。その結果、電気炉処理をした試料の D/G バンド強度比は 0.28 に対し、大気圧プラズマ処理を行った試料では 0.36 へと増加した。これは、プラズマ中のラジカルや紫外線が CNT にエッチング作用を及ぼし、CNT 骨格に欠陥を導入していることを示している。さらに FT-IR 測定をした結果、大気圧プラズマ処理をした試料は水酸基 ($-\text{OH}$, 3300 cm^{-1} 付近) およびカルボニル基 ($\text{C}=\text{O}$, 1700 cm^{-1} 付近) の生成が確認され、CNT 端部あるいは構造中に酸化が進行していることが示された。これらの知見から、CNT 表面に大気圧プラズマが欠陥を誘起し、エポキシ樹脂中の活性化化学種と反応することで絶縁性を有する炭素質薄膜の成長を促進することが示された。

これらの結果から、カーボンナノチューブ (CNT) 分散体を包含する導電性接着剤に大気圧プラズマを照射することで絶縁機能の発現機構を明らかにし、CNT 添加量による膜厚制御性を示した。本手法を用いることで導電性と絶縁性を一度の処理で同時実現する従来工程を簡略化した電気特性を持つ膜形成が実現できた。

2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性

本研究で見出された大気圧プラズマ照射+CNT 添加導電性接着剤による、導電性と絶縁性のワンステップ同時実現という現象は、申請当初に主たる応用先として想定していたパワー半導体パッケージングに留まらず、より広範なパッケージ産業全体に対して、新たな機能付加と製造プロセス革新の可能性を提供する。本技術の特徴は、(i) 処理温度が常温～低温域であること、(ii) 大気圧下で実施可能で真空・高温設備を必要としないこと、(iii) CNT 添加量という 1 つのパラメータで絶縁膜厚を約 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ の範囲で連続制御できること、(iv) 接合・硬化と絶縁膜形成という従来別工程であった機能を 1 工程に統合できることである。このため、耐熱性の低い基材への電子部品搭載：食品・医薬品・日用品包装で広く用いられる PET、PE、PP、紙等の基材は耐熱温度が低く、はんだリフローや高温硬化プロセスは適用が困難である。本技術は常温・大気圧で接合と絶縁を完了できるため、薄型 IC チップ、RFID/NFC タグ、温度センサ、有機 EL インジケータ等を、ラベル、シュリンクフィルム、紙パッケージといった汎用包装基材へ直接実装するための要素技術となりうると思われる。また、接合と絶縁の単一工程化によるロール生産対応：従来は「導電性接着剤の硬化」「絶縁コートの塗布・乾燥」「保護層形成」と複数の独立工程を要したパッケージ電子化プロセスを、プラズマ照射 1 工程へ統合できる。これは、印刷・ラミネート・打ち抜きと連続して行われるロール・トゥ・ロール型のパッケージ生産ラインへの組み込みに親和性が高く、設備投資・タクトタイム・エネルギー消費の大幅な削減につながる可能性がある。さらに、CNT 添加量による絶縁膜の設計をすることで、パッケージ毎・用途毎に異なる絶縁要求（駆動電圧、層間ピッチ、機械的応力）に対し、配合段階で最適化可能な設計自由度を与える。表面抵抗率 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上は、パッケージ内蔵電子回路で想定される低電圧（数 V～数十 V）駆動に対し十分な絶縁性能であり、高密度配線・多層化を必要とするスマートパッケージ用途に直接適用可能である。

近年の環境負荷の低減と循環型パッケージへの貢献として、本プロセスは無溶媒・低温・低消費エネルギー

であり、有機溶剤系絶縁コート工程の置換による揮発性有機化合物（VOC）排出削減、鉛フリー化の徹底、加熱炉廃止による電力削減が見込まれる。さらに、はんだや熱接合に比べ低応力で実装できるため、解体・分別が容易になり、パッケージ材のリサイクル性向上にも寄与しうる。これらは、循環型・脱炭素型パッケージ製造への重要な技術基盤となる可能性もある。

以上の成果を踏まえ、今後は（i）実パッケージ基材（PET、PE、PP、紙）への直接実装試験、（ii）大面積・連続処理に対応するリモートプラズマ源およびロール対応電極の開発、（iii）高温高湿環境および繰り返し屈曲下での長期信頼性評価、（iv）当初計画した熱伝導測定との統合による接合界面の熱・電気特性の総合評価、（v）パッケージ業界の印刷企業・電子部品メーカーとの実装プロセス共同検証を進めることで、パッケージング技術に対し、新しい大気圧プラズマの応用方法の可能性を見出すことができた。

3. 学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績（現時点で未発表・未掲載・未出願のため、上記「1. 研究成果の概要」、「2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性」の当財団ホームページ上の公開の延期を希望される場合、その旨 記載してください。）

【論文掲載】

[1] Van-Phuoc Thai, Toru Sasaki, “Inner-filter-induced bias in fluorescence-based hydroxyl radical dosimetry using terephthalic acid”, *Talanta*, 305, 129621 (2026)

[2] Van-Phuoc Thai, Dam Ngoc Tran, Khanh Dung Pham, Thanh An Nguyen-Thi, Bao Tram Ngo-Le, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi. Broad-spectrum light-responsive N-doped graphene quantum dots for efficient photocatalytic generation of hydroxyl radicals and antibacterial applications. *Nanoscale*, 17, 28112-28122 (2025).

【学会発表】

[1] 前川朔輝, 花見優太郎, 佐々木徹, 菊池崇志, 高橋一匡、「大気圧プラズマを用いた絶縁性薄膜の形成技術の開発」、電気学会 放電・プラズマ・パルスパワー研究会

[2] T. Sasaki, K. Igarashi, M. Maegawa, P. V. Thai, R. Ono, K. Takahashi, and T. Kikuchi, “Curing Reaction and Surface Film Formation Process of Electrically Conductive Adhesives using Atmospheric Pressure Plasma”, IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference - PPPS 2025

[3] Toru Sasaki, Kodai Igarashi, Motoki Maegawa, Van-Phuoc Thai, Kazumasa Takahashi, Takashi Kikuchi, “Curing Process of Electrically Conductive Adhesives and Formation of Resistant Coatings using Atmospheric Pressure Plasma”, The 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2025) (招待講演) (国際学会)

[4] Motoki Maegawa, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Kazumasa Takahashi, “Investigation on insulation thin film growth using atmospheric pressure plasma”, The 14th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-14)

[5] 佐々木徹, Thai Van Phuoc, 前川朔輝, 高橋一匡, 菊池崇志、「大気圧プラズマ反応場を利用した表面反応解析とその応用」日本物理学会 2026 年春季大会