

固相粒子成膜法を用いた先進多層耐雷撃コーティングの開発

東北大学 大学院工学研究科附属先端材料強度科学研究センター

齋藤 宏輝

1. はじめに

軽量かつ高強度である炭素繊維強化複合材料（CFRP）は、風力発電ブレードや航空機構造に広く用いられており、発電効率や燃費の向上を通じて、脱炭素社会の実現に不可欠な構造材料である。一方で、CFRPは樹脂をマトリクスとするため、特に厚さ方向や層間方向の導電性に乏しく、落雷に対する保護技術が重要な課題となっている¹⁾。現行では、風力発電ブレード先端への金属受雷部（レセプタ）の設置や、航空機表面への金属メッシュの適用などの対策がとられている。しかし、これらの保護材を用いても雷撃損傷を完全に防ぐことは難しく、損傷後の補修作業に伴う長期間のダウンタイムや維持管理コストの増大が大きな課題となっている。

CFRPの耐雷技術として、欧米を中心に、表面を金属被覆するメタライゼーション技術が研究されてきた。これまでに、物理蒸着（PVD）、化学蒸着（CVD）、めっき、プラズマ溶射などの成膜手法が検討されている。しかし、真空プロセスを必要とするPVD・CVDは大型構造物への適用が難しく、めっきは廃液処理などの環境負荷が大きい。また、溶射は高温プロセスであるため、樹脂マトリクスの熱劣化を引き起こす可能性がある。そのため、大型CFRP構造物に対して、低環境負荷かつ低熱影響で金属皮膜を形成できる新たな成膜技術の開発が求められている。

こうした中、近年、CFRPの新しいメタライゼーション手法として、コールドスプレー（Cold Spray: CS）法と呼ばれる固相微粒子積層法が注目されている。コールドスプレー法は、金属微粒子を高速で基材に衝突させ、材料を熔融させることなく金属皮膜を形成する成膜技術である。熔融・凝固過程を伴わないため、従来の高温成膜法に比べて基材への熱影響を抑制できる。さらに、真空プロセスや湿式プロセスを必要としないことから、大型構造物への適用性や環境負荷低減の観点からも有望である。

筆者らはこれまでに、コールドスプレー法を用いた熱可塑性CFRP（CFRTP）上への金属コーティングに成功し、同技術がCFRTPの耐雷保護に有効であることを示してきた²⁾。一方で、雷撃損傷のさらなる低減や、損傷後の補修性向上を実現するためには、金属皮膜の構造や機能を高度化する必要がある。そこで本研究では、コールドスプレー法を用いて多層構造を有する耐雷コーティングを形成し、雷撃損傷の低減効果および損傷補修の観点から、その有効性を検討することを目的とした。具体的には、電気-熱連成数値解析プログラムを開発し、CFRTPを雷撃から保護するために必要な導電性金属層の厚さ、ならびに損傷低減に有効な多層構造について検討した。さらに、解析結果に基づいてコーティングを施したCFRTP試験片を作製し、雷撃試験後の損傷を評価することで、多層コーティングの有効性を検討した。

2. 電気-熱連成数値解析を用いた耐雷コーティング設計の検討

金属成膜 CFRTP 試験片において、雷撃時の損傷の主要因は金属皮膜-CFRTP 界面に発生する発熱と考えられる。そこで本研究項目では、皮膜厚さを変更した場合について、金属皮膜背面に到達する熱負荷を評価するために、三次元有限要素法による電気-熱連成解析を実施した。当初は金属層、遮熱絶縁層、CFRTP 層の三層からなる構造について解析することを検討したが、異種材界面の熱抵抗や電気抵抗の扱いが複雑かつ適切なモデルが存在しないことから、金属層単層の解析にモデルを単純化した。

電場解析では準静的近似を用い、電位分布から電流密度およびジュール発熱量を算出した。得られたジュール発熱を熱伝導方程式の熱源として与えることで、雷撃中の温度履歴を求めた。また、金属の熔融に伴う潜熱の影響を考慮するため、エンタルピー法を導入した。解析領域は図 1 に示す 30 mm × 30 mm の Al 皮膜とし、皮膜厚さを 100~500 μm の範囲で変化させた。雷撃電流は、皮膜上面にガウス分布を有する電流密度境界条件として与えた。時間波形には二重指数関数を用いた。また、短時間の雷撃現象を対象とするため、外部への熱損失は小さいと仮定し、各表面は断熱境界とした。

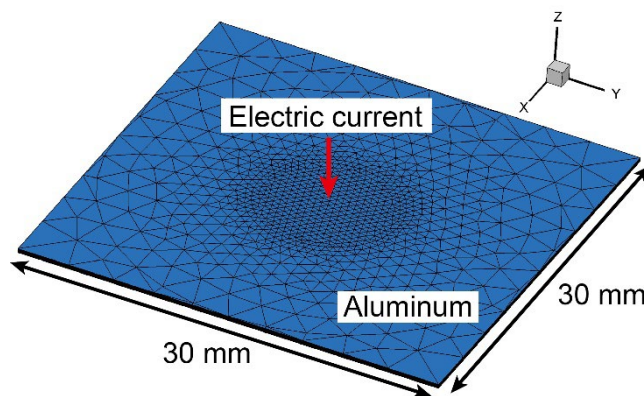


図 1 電気-熱連成数値解析の解析領域

図 2 に電気-熱連成数値解析による金属皮膜表面および背面の温度履歴を示す。皮膜厚さ 100 μm の薄い皮膜では、雷撃開始後約 20 μs で Al の融点 (図中の T_m) に到達し、皮膜上面と下面の温度差も小さかった。このことから、薄い Al 皮膜では皮膜全体が急速に加熱され、皮膜-

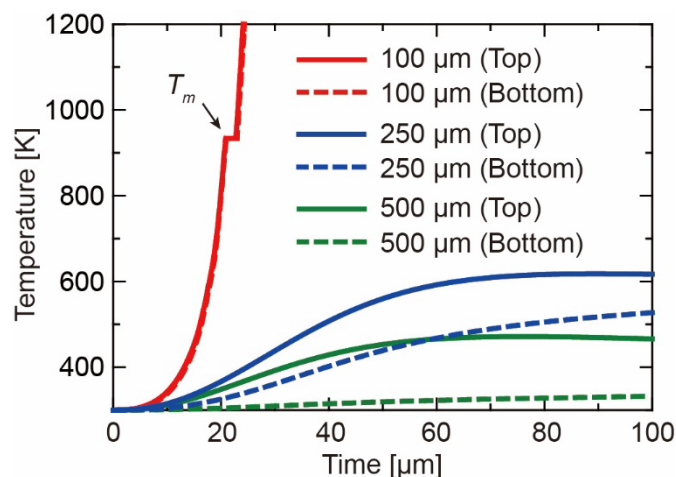


図 2 電気-熱連成数値解析による金属皮膜表面および背面の温度履歴

CFRTP 界面においても樹脂の熱劣化やアブレーションを引き起こし得る高温状態になると考えられる。一方、 $250\text{ }\mu\text{m}$ および $500\text{ }\mu\text{m}$ の厚い皮膜では、解析上の最高温度は Al の融点を下回り、皮膜上面から下面にかけて明確な温度勾配が形成された。これは、皮膜が厚くなることで電流集中が緩和され、皮膜-CFRTP 界面に到達する熱的影響が低減されることを示している。したがって、Al 皮膜の厚膜化は、雷撃時の局所的なジュール発熱および界面温度上昇を抑制し、CFRTP 基材の熱損傷や皮膜はく離を低減する上で有効であると考えられる。

3. 雷撃試験による耐雷性および損傷評価

前節の数値シミュレーションの結果から、金属皮膜厚さが薄くなるほど皮膜-CFRTP 界面で発生するジュール熱が大きくなることが示唆された。界面での発熱は CFRTP のマトリクス樹脂のアブレーションや炭素繊維の破断を引き起こす要因となる。そのため、CFRTP を保護するための基本的な方針としては、界面への熱影響を低減することが有効と考えられる。

そこで本項目では、従来コールドスプレーに使用していた金属粉末に断熱性に優れるセラミクス材料として知られるアルミナを混合し、金属/セラミクス複合皮膜の耐雷性を評価した。具体的には、①アルミ/アルミナ混合粉末を用いて成膜した試験片と②アルミ/アルミナ混合粉末を用いて初期層を成膜した後、アルミ粉末を成膜した多層成膜試験片の二種類の試験片を作製し、雷撃試験を行った。ここでアルミ/アルミナ混合層とアルミ層の各厚さは約 $100\text{ }\mu\text{m}$ とした。①および②の試験片の皮膜厚さはいずれも約 $200\text{ }\mu\text{m}$ になるように成膜を行った。

雷撃試験は、音羽電機工業雷テクノロジーセンターの実験施設（図 3）にて行い、インパルス電流による模擬雷撃試験（アークエントリー試験）を行った。本試験では、米国 Society of Automotive Engineers (SAE) が規定する規格 SAE ARP 5412B および SAE ARP 5416A に基づき、最もピーク電流値が高く、雷撃による材料損傷が激しいと想定される Component A 波形を採用した^{3,4)}。ただし、本研究では、SAE 規格で想定される 300 mm 角試験片に比べて、小さい 100 mm 角試験片を用いたため、Component A の規定ピーク電流値である 200 kA に対して小さい 70 kA を目標ピーク電流値として設定した。雷撃試験では図に示すように、試験片の片側端部をクランプで固定し、試験片表面上部数 mm の位置に放電用の金属ワイヤを配置して試験を行った。

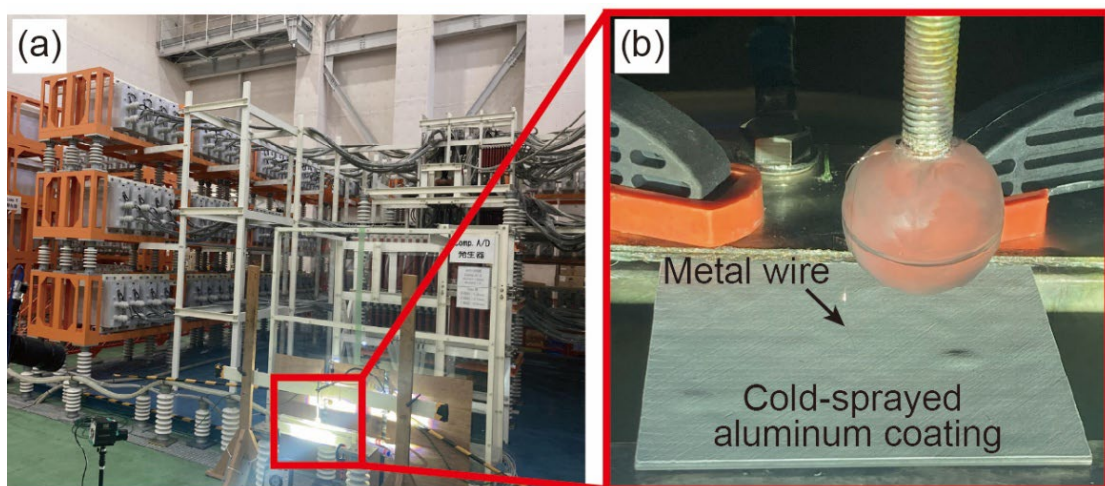


図 3 雷撃試験外観：(a) 直撃雷インパルス電流試験装置，(b) 試験片のセットアップ

図 4 に雷撃試験後の表面外観を示す。アルミ/アルミナ混合粉末成膜試験片では、雷撃部近傍で皮膜が脱落し、CFRTP 表面の暴露が生じた。また、試験片全体にき裂が生じており、広範囲にわたって損傷が確認された。一方で多層成膜試験片では、相対的に CFRTP の暴露領域が狭く、皮膜の脱落も少ないことがわかる。雷撃部近傍ではき裂が確認できるが、その周囲には顕著な損傷は確認されなかった。同じ材料粉末を用いて成膜したにもかかわらず、このような差が生じた要因は、皮膜構造の差によるジュール発熱分布が異なったためと考えられる。

アルミ/アルミナ混合粉末成膜試験片では、アルミナが皮膜全体に分布するため、マクロな断熱性は向上する一方で、雷電流からすると絶縁物が皮膜内に分散することになり、局所的な電流経路の制約とジュール発熱の増加を招いたと考えられる。皮膜のき裂は、写真中の上部にあたる電極をクランプした側に集中しており、各き裂の起点は雷撃部に接続していない。コールドスプレー法では、ピーニング効果による皮膜のち密化を狙いとして金属粒子にセラミクス粒子を混合して成膜する手法が知られているが、耐雷コーティング用途では、混合粉末による単層成膜は損傷を拡大させる可能性が示唆された。

一方、アルミ/アルミナ層およびアルミ層の多層成膜試験片では、表層のアルミ層が雷電流を効果的に分散させ、損傷領域が雷撃部近傍に局在化したと考えられる。CFRTP 暴露部の表面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した画像を図 5 に示す。表面には、表層の炭素繊維の配向方向である 45°方向に沿ってコールドスプレー粉末が一部残存している様子が確認された。炭素繊維が破断・損傷した領域は確認されず、多層皮膜が CFRTP の雷撃損傷低減に有効である可能性が示された。

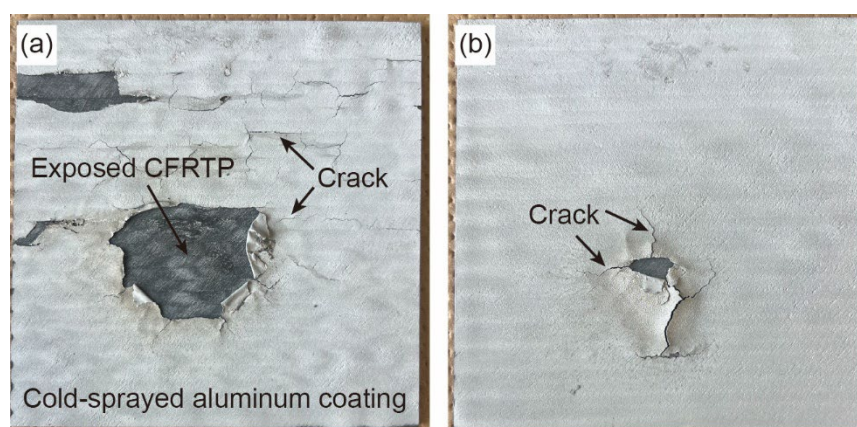


図 4 雷撃試験後の表面外観：(a) アルミ/アルミナ混合粉末による単層皮膜，
(b) アルミ/アルミナ初期層とアルミ表層からなる多層皮膜

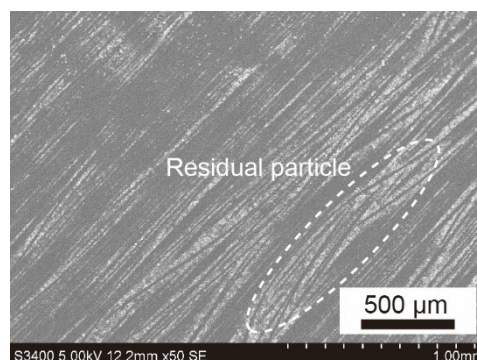


図 5 CFRTP 暴露部における SEM 観察像（雷撃後）

4. まとめ

本研究では、コールドスプレー法を用いた CF RTP 用多層耐雷コーティングの開発を目的として、電気-熱連成数値解析による皮膜設計と、模擬雷撃試験による耐雷性評価を行った。三次元有限要素解析の結果、Al 皮膜が薄い場合には雷撃初期に皮膜全体が急速に加熱され、皮膜-CF RTP 界面に高い熱負荷が生じる可能性が示された。一方、皮膜を厚くすることで電流集中および界面温度上昇が緩和され、CF RTP 基材の熱損傷や皮膜はく離の抑制に有効であることが示唆された。

雷撃試験では、アルミ/アルミナ混合粉末による単層皮膜と、アルミ/アルミナ初期層の上にアルミ表層を形成した多層皮膜を比較した。その結果、アルミ/アルミナ混合粉末単層では、雷撃部以外にも広範囲にき裂および CF RTP 露出が生じ、耐雷保護性能は十分ではなかった。これは、絶縁性を有するアルミナが皮膜全体に分散したことで、雷電流の流路が制限され、局所的なジュール発熱が増加したためと考えられる。一方、多層皮膜では、表層 Al が雷電流を分散する導電層として機能し、損傷は雷撃部近傍に局在化した。SEM 観察においても炭素繊維の明瞭な破断は認められず、多層構造化が CF RTP の耐雷保護に有効である可能性が示された。

以上より、耐雷コーティングでは単に断熱性材料を混合するだけでは不十分であり、雷電流を面内方向に分散する導電層と、CF RTP 界面への熱影響を緩和する機能層を適切に配置することが重要であると考えられる。今後は、皮膜/CF RTP 界面の電気抵抗・熱抵抗を考慮した解析モデルの高度化、ならびに皮膜厚さ・層構成・粉末混合比等の最適化を進めることで、補修性にも優れる実用的な耐雷コーティング設計指針の確立を目指す。

謝辞

本研究は公益財団法人天野工業技術研究所の 2025 年研究助成を受けて実施されました。ここに記して深く謝意を示します。

参考文献

- 1) M. Gagné and D. Therriault, "Lightning strike protection of composites," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 64, pp. 1–16, 2014.
- 2) H. Saito, A. Izumi, Y. Meng, Y. Ichikawa, K. Ogawa, S. Ishida, Y. Naruse, and A. Nishizaki, "Direct copper metallization of carbon fiber-reinforced thermoplastic polymers for lightning strike protection using low-pressure cold spray," Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 34, No. 1, pp. 231–249, 2025.
- 3) SAE International, SAE ARP5412B: Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms, 2013.
- 4) SAE International, SAE ARP5416A: Aircraft Lightning Test Methods, 2013.