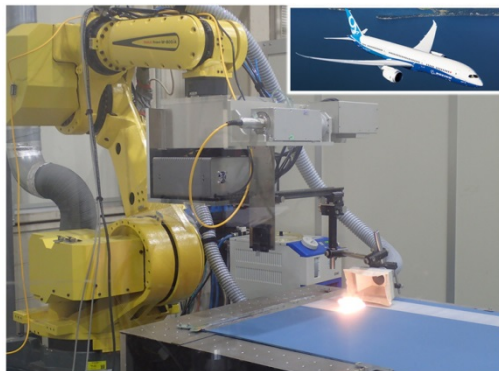


作業環境性に優れたレーザによる 複合材上高速塗装剥離技術の開発

Development of High Speed Selective Laser Paint Stripping Technology
on Composite Material with Friendly Environment for Operators



形部 聖*¹
Satoshi Gyobu

佐藤 匠*¹
Takumi Sato

野原 敏勝*¹
Toshikatsu Nohara

呉屋 真之*²
Saneyuki Goya

近年、塗料剥離手法として、SDGs (Sustainable Development Goals, 持続可能な開発目標) の観点から、廃棄物が少なく作業環境性に優れたレーザによる塗装剥離が注目されている。レーザ塗装剥離技術は、一般的に金属上の塗装剥離の適用が進む一方、レーザによる入熱リスクから複合材等の熱影響を受けやすい材料上の塗装剥離技術は実用化には至っていない。本報では、短パルスレーザによる、複合材母材への熱影響を抑制した塗装剥離技術開発及び複合材上の下塗り塗装と本塗装のうち本塗装のみを選択的に除去可能なレーザ剥離技術開発について報告する。

1. はじめに

複合材は三菱重工工業株式会社の製品においても、航空機、ヘリコプター、艦艇など軽量化が必要な多くの製品に適用されており、定期メンテナンス時に再塗装が必要である。現行の塗装剥離手法として主にサンディングやリムーバーによる剥離が盛んに行われているが、前者は作業者が粉塵を吸引しやすく作業環境性に難があり、後者は大量の有機溶剤を使用し多くの廃棄物が発生するため、SDGs に適さない他、適用部位が限られるといった課題がある。

これらの代替技術として、レーザによる塗装剥離技術が注目されている。本技術は、遠隔的にレーザ照射可能なため作業環境が良く、また、剥離時には粉塵以外の廃棄物が生じないことから、環境にやさしい塗装剥離が可能となる。また、レーザ塗装剥離技術の他のメリットとして、電気制御で施工するため施工再現性が良い点、ロボットにレーザヘッドを持たせて自動化することで作業員削減・夜間運転が可能な点等が挙げられる。

レーザによる塗装剥離の原理は図1のように、レーザが照射された対象にエネルギーが伝搬することで対象を気化させ除去することができる。レーザ塗装剥離に用いられるレーザの種類は、連続波からパルスレーザまで幅広く用いられている(図2)。ここでパルスレーザとは、マイクロ秒、ナノ秒等の極めて短い時間(パルス幅)を一定の繰返し周波数で発振するタイプであり、中でもパルス幅がナノ秒オーダーの短いものは短パルスレーザと呼ばれ、低入熱加工に適している。連続波は大出力による高速塗装剥離が可能一方、施工対象への熱影響が大きい。短パルスレーザはパルス幅をナノ秒オーダーに狭めることにより低入熱施工となり、高品質な除去加工が可能である。また近年、短パルスレーザの高出力化(kW 級)が進んでおり、施工効率化が進んでいる。

レーザ塗装剥離技術の対象として、金属基材上の塗装、付着物、錆等の除去が一般的であるが、基材が樹脂、有機化合物等の耐熱性が低い材料の場合、レーザ入熱により基材に熱影響が

*1 総合研究所 製造研究部

*2 総合研究所 製造研究部 主席研究員

生じるリスクがあるため適用されていなかった。レーザー入熱低減の打ち手として、短パルスレーザーを用いることで基材への熱影響を最小限に抑えながら塗装剥離が可能と考えた。また本報では図3に示すように、本塗装のみを除去し下塗り塗装を残した状態でレーザー照射を停止するケースを想定し、これにより基材への直接レーザー照射を抑制する。

本報では、短パルスレーザーによる、複合材母材への熱影響を抑制した塗装剥離技術開発及び本塗装のみを選択的に除去する塗装剥離技術について報告する。

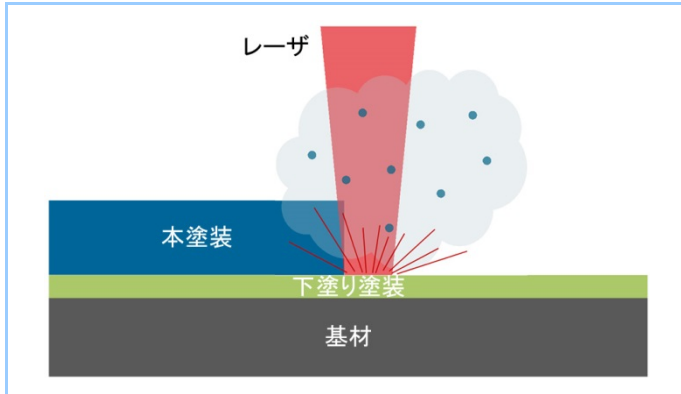


図1 レーザ塗装剥離イメージ

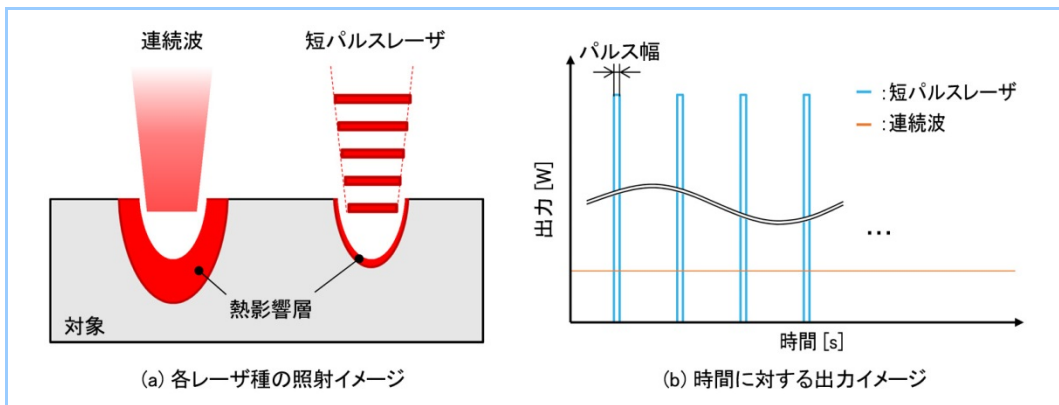


図2 各レーザーの照射イメージ

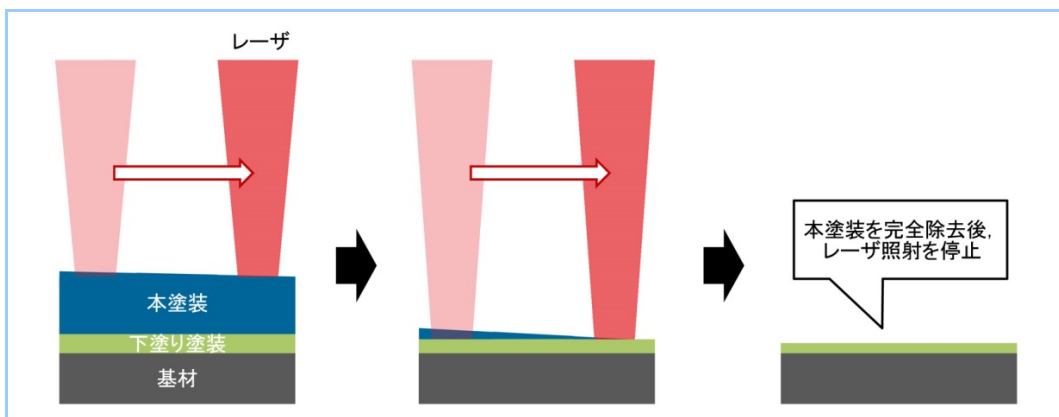


図3 本塗装の除去イメージ

2. 短パルスレーザーによる複合材上塗装剥離技術開発

短パルスレーザーを用いた塗装剥離技術の開発にあたり、レーザーによる基礎的な塗装剥離能力を評価するため、本塗装を対象としてワンショット、線走査及び面走査条件にて、照射時の除去能力について確認を行った。

図4にレーザー塗装剥離装置の構成イメージを示す。レーザーヘッドには、レーザーを走査するためのガルバノ光学系が搭載されている。これに短パルスレーザー発振器からレーザーを入光し、所定の

ビーム径に絞りながら高速走査して対象に照射することで一定面積の塗装を除去できる。これを大面積に拡大させる場合、**図5**のようにロボットにレーザーヘッドを保持させ、位置を固定させた状態で塗装剥離後、次の剥離箇所へ移動・固定して同様の施工プロセスを繰り返し実施する。

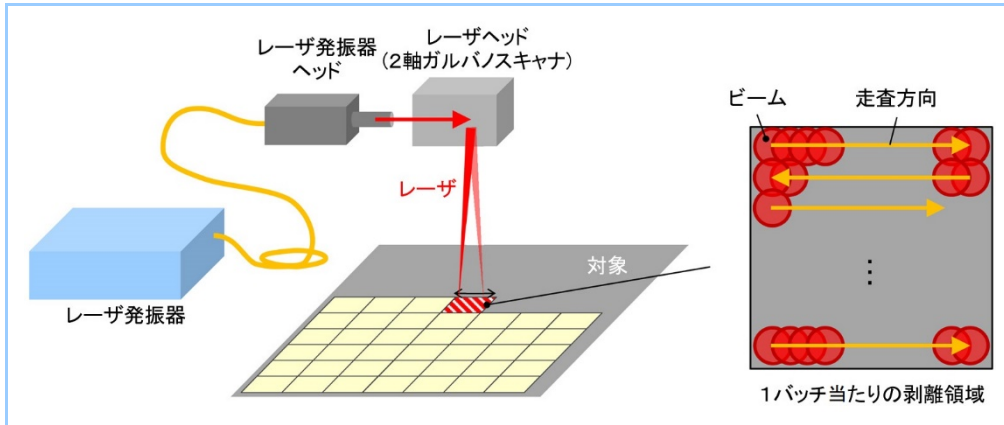


図4 レーザ塗装剥離装置構成

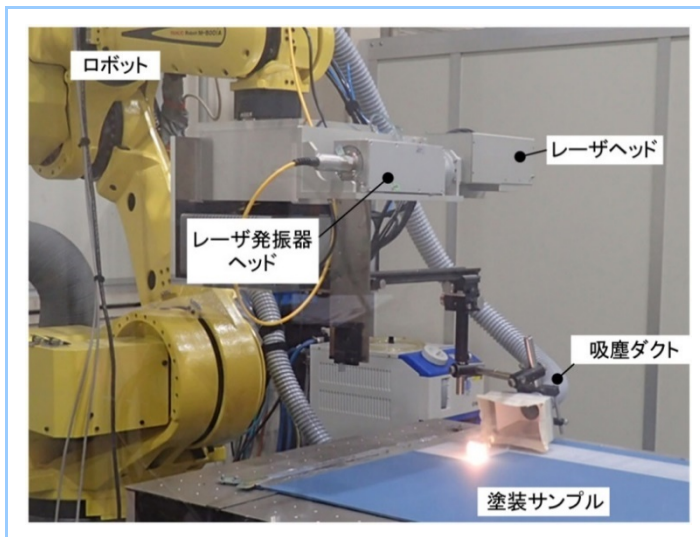


図5 ロボットを用いたレーザー塗装剥離

2.1 短パルスレーザーによるワンショット、線走査及び面走査時の除去深さ評価

短パルスレーザーによる除去の場合、レーザーによる蓄熱が少ないため、例えば線走査時の除去深さはワンショット時の除去深さの積算、面走査時の除去深さは、線走査時の除去深さの積算となることが想定される。本項では短パルスレーザーによる塗装剥離の基礎能力把握のため、線走査時の除去深さの実測値とワンショット時の除去深さの積算による推定値、また面走査時の除去深さの実測値と線走査時の除去深さの積算による推定値をそれぞれ比較した。

図6及び**表1**に各照射時の除去深さのイメージ図を示す。表1のようにワンショットでの除去深さとして、表1のようにビームのガウス分布の形状に塗装が除去され、線走査・面走査でビームを重ねて照射する場合、表中点Aの除去深さは各ビームプロファイルの該当箇所での除去深さの積算で計算した。線走査にて点Aに*n*回レーザーが照射される場合、*i*個目のビームにて除去される深さを d_i 、ワンショット時の1発当たりの除去深さを d とする。 d_1, d_2, \dots, d_n の値がガウス分布に従っているとすると、 $d_1 \sim d_n$ の積算値は、 $n \times d$ の約60%に相当する。以上より、線走査時の除去深さとワンショットでの除去深さの関係は以下のように表せる。

$$\sum_{i=1}^n d_i = 0.6nd \quad (1)$$

上記関係式は、面走査時と線走査時の除去深さでも同様に成り立つ。

除去深さの実測値と推定値を比較した結果、図6(c)の通り、線走査、面走査結果について、実測値が概ね推定値通りに本塗装が除去される傾向を確認できた。面走査時に実測値がわずかに大きくなった要因として、連続レーザー照射による蓄熱効果に由来するものと思われる。

以上より、線走査の除去深さはワンショットの除去深さ、面走査の除去深さは、線走査の除去深さの積算で決まることが分かり、レーザー蓄熱による除去深さへの影響は小さいと考えられる。

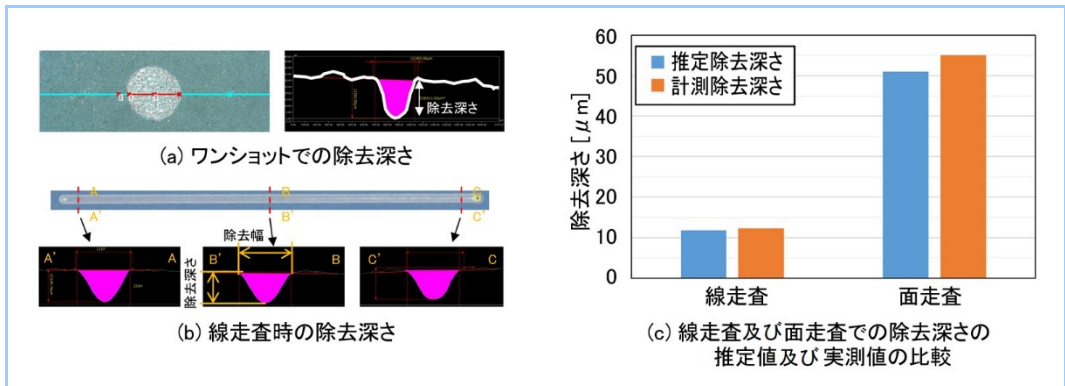


図6 ワンショット、線走査及び面走査による本塗装の除去深さ評価結果

表1 ワンショット及び線走査・面走査の除去深さイメージ

	ワンショット	線走査、面走査
ビームプロファイルイメージ		
点Aでの除去深さイメージ		

2.2 短パルスレーザー照射時の昇温状況評価

2.1 と同様の装置にて、塗装剥離時の複合材基材表面の温度計測を実施した。温度評価には図7に示すように基材/下塗り塗装間に熱電対を埋め込んだ試料を用い、下塗り塗装が露出した状態で、レーザーを下塗り塗装に1回照射した間の温度を計測した。計測した結果、レーザーが熱電対直上を通過時に温度が上昇し、最高温度が 85°C程度であることを確認できた。複合材の変質温度は 200°C近傍であり、レーザー照射による昇温は十分低いと考えられる。

本結果より、複合材の変質を抑制してレーザー塗装剥離が可能なことを確認できた。

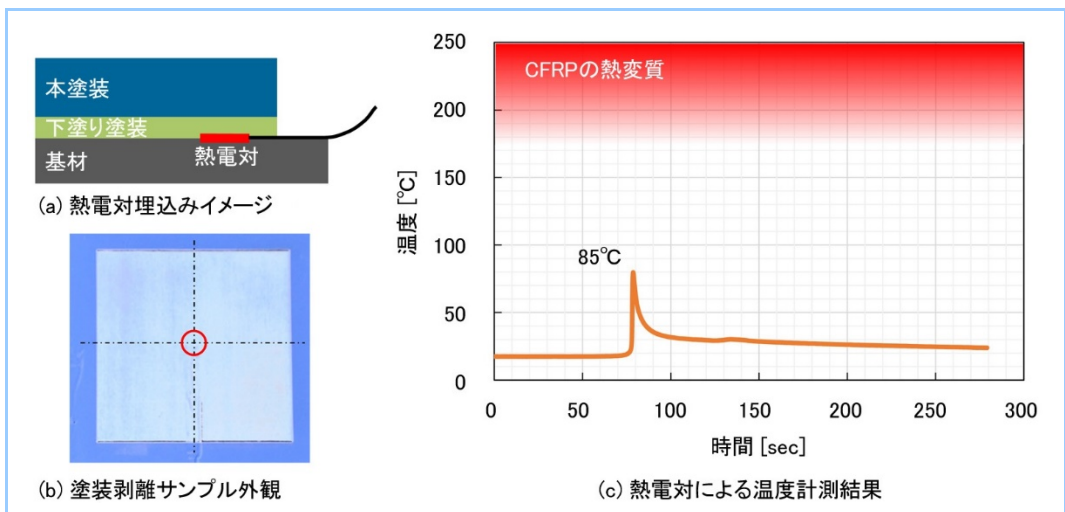


図7 熱電対付きサンプルによるレーザー照射中の基材温度計測結果

3. 塗装の選択的剥離技術開発

短パルスレーザーによる塗装剥離の特徴として、材料の選択的施工性が挙げられる。各材料について沸点や吸収率等の材料特性に起因して、固有のアブレーション閾値(昇華が生じるエネルギー密度)が存在し、フルーエンス(エネルギー密度=パルスエネルギー/ビーム面積)が閾値未満では対象が除去されず、閾値以上にすることで除去が発生する。一般的にアブレーション閾値は、金属材料等の高沸点材料は高く、樹脂、有機材料等の低沸点材料は低くなる。本報の対象である本塗装は下塗り塗装と比べ有機物の含有量が多く、アブレーションが促進されやすいと考えられる。

本塗装、及び下塗り塗装の除去閾値を把握するため、各材料に対しフルーエンスを変化させてレーザーをワンショットで照射した場合の除去量を評価し、除去能率のフルーエンス依存性を調査した。図8に本塗装、及び下塗り塗装のフルーエンスに対する除去速度比の相関をまとめたグラフを示す。なお図中の d_{max} は本塗装・下塗り塗装の各材料について、本報にて検証した最大フルーエンス条件時の除去深さである。グラフより、フルーエンスが $300 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ 程度で本塗装、 $500 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ 程度で下塗り塗装のアブレーション閾値が確認された。本結果より、フルーエンスを $300 \sim 500 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ で選定することにより本塗装のみを選択的に除去可能であることが分かる。

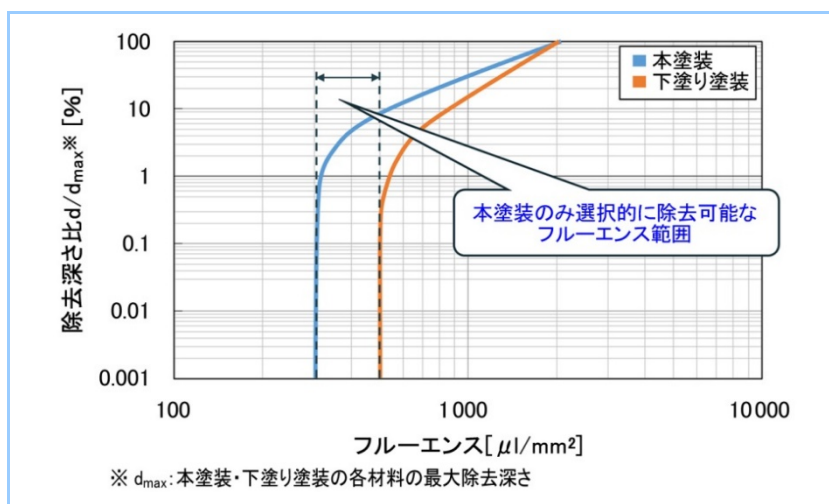


図8 各塗装のフルーエンスに対する除去深さの相関

上記のワンショットによる除去量評価結果を踏まえ、レーザーを面走査させて連続照射した場合の本塗装及び下塗り塗装の除去速度比を同様に評価した。図9に本塗装及び下塗り塗装のレーザー出力に対する除去速度比の相関をまとめたグラフを示す。なお横軸の平均出力はレーザー発振器にて設定するレーザー出力のパーセントを示す。平均出力が $50 \sim 60\%$ の範囲では下塗り塗装の除去がほとんど生じず本塗装が除去されており、下塗り塗装に対する本塗装除去速度比が40倍以上であるため、本塗装を選択的に除去することが可能となる。また出力が 100% の条件では、本塗装の除去速度比が現行法(サンディング)の約4倍で除去できるため、本塗装の高速除去条件に適していると考えられる。

以上の結果を踏まえ、複合材上の塗装剥離プロセスとして図10に示すように、高速除去条件と選択的除去条件の複合プロセスを考案した。高速除去条件にて下塗り塗装が露出する手前まで除去し、下塗り塗装が露出したところで選択的除去条件に切り替えて施工することにより、本塗装を高速、かつ下塗り塗装・基材の熱影響を抑えて選択的に除去可能となる。本プロセスを用いて実際に本塗装を剥離した結果を図11に示す。レーザーを照射した箇所は下塗り塗装が残存した状態で本塗装が除去されている様子を確認できた。また図12に示すように、下塗り塗装や基材に熱影響、層間剥離や変質等の損傷が見られないことが確認できた。

以上より、フルーエンスを適切に選定することで本塗装のみを選択的に除去可能であり、また

平均出力を調整することにより対象となる本塗装の選択的除去、及び高速除去が可能な見込みが得られた。施工品質についても、上記高速除去条件と選択的除去条件を組み合わせた条件にて、複合材に熱影響や層間剥離等の損傷なく、本塗装を選択的に除去可能なことが確認できた。

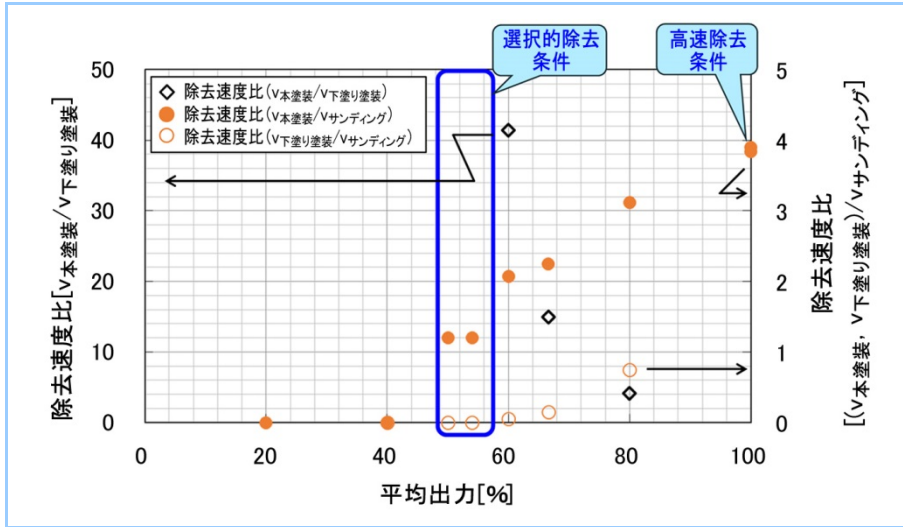


図9 各塗装の平均出力設定値に対する除去速度比の相関

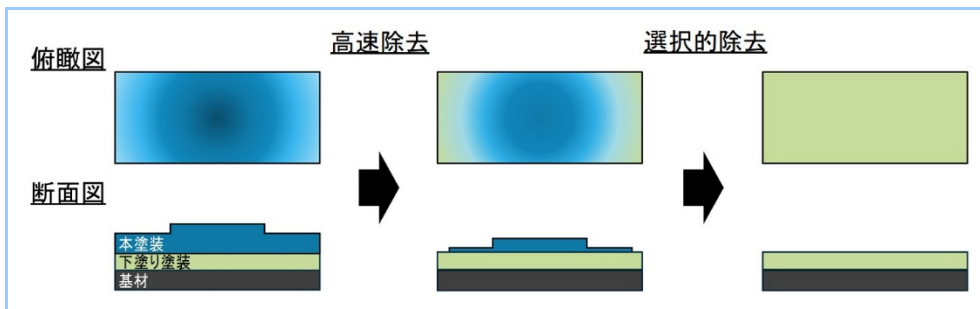


図10 高速除去条件と選択的除去条件の組合せによる施工プロセスイメージ

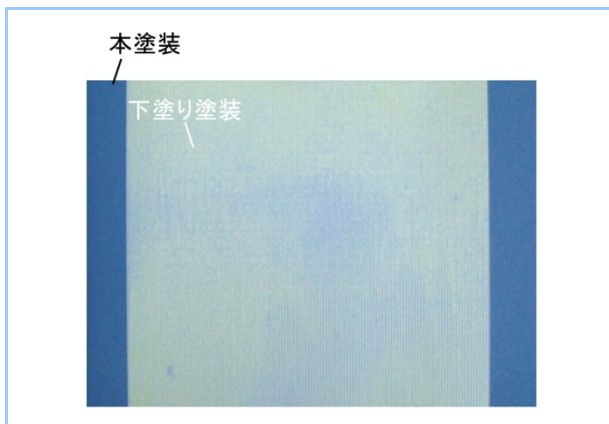


図11 高速除去条件と選択的除去条件の組合せによる塗装剥離後のサンプル外観

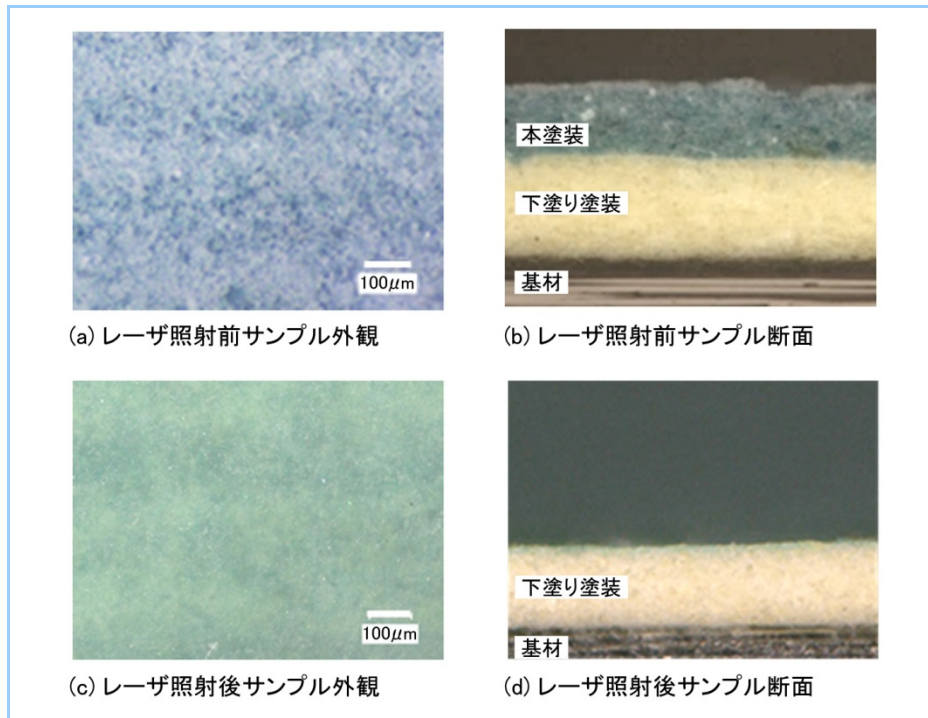


図 12 高速除去条件と選択的除去条件の組合せによる塗装剥離後のサンプル表面・断面

4. まとめ

本報では、短パルスレーザーを用いた複合材上の塗装剥離技術の開発状況について報告した。レーザーによる塗装剥離能力評価として、ワンショット、線走査及び面走査条件での本塗装の除去深さの傾向を確認し、線走査・面走査での除去深さがワンショットでの除去深さの積算で表せることを確認できた。またレーザー照射による複合材基材への入熱を評価するため、基材/下塗り塗装界面に埋め込んだ熱電対により、レーザー照射中の昇温を評価した結果、最高温度が 85°C程度と、複合材の変質温度よりも十分低く、低入熱での塗装剥離が可能なることを実証した。

基材への損傷を最低限に抑えるため、本塗装のみを選択的に除去できるようなフルーエンス(エネルギー密度)条件を検討し、本塗装の除去速度が大きかつ下塗り塗装の除去速度が低いフルーエンスに調整することで、本塗装のみを選択的に除去でき下塗り塗装の層で除去を抑えることができる見込みが得られた。本技術の適用により、作業環境性の改善及び有機溶剤等の廃棄物の大幅な削減ができ、また、属人作業の排除が可能となることで作業時間短縮が見込める。

今後、膜厚ムラによってレーザー塗装剥離時に発生し得る残塗装部の検出のため、本技術と画像識別技術を組み合わせて、残塗装部の自動除去技術を開発し、実機適用を進める計画であり、また、本技術の適用拡大に向け、引き続きレーザー塗装剥離技術の開発を推進する。

参考文献

- (1) Zheng Kuang. et al., Nanosecond fibre laser paint stripping with suppression of flames and sparks, Journal of Materials Processing Technology, Volume 266, Pages 474-483, (2019)
- (2) Selen Ünalı. et al., Towards selective laser paint stripping using shock waves produced by laser-plasma interaction for aeronautical applications on AA 2024 based substrates, Optics & Laser Technology, Volume 141, (2021)
- (3) Junyi Gu, et al., Towards low-temperature laser paint stripping by photochemical mechanism on CFRP substrates, Journal of Manufacturing Processes, Volume 85, Pages 272-280, (2023)
- (4) P. Golewski, et al., The effect of thermal aging degradation of CFRP composite on its mechanical properties using destructive and non-destructive methods and the DIC system”, Polymer Testing, 118 (2023), 107902