CFRP 層間剝離計測のための 中赤外レーザ超音波探傷システム開発*

Development of Mid-IR Laser Ultrasound Testing System for CFRP Delamination Measurement

小口かなえ** 榎 学** 畑野秀樹*** 草野正大†
山脇 寿† 渡邊 誠†

Kanae OGUCHI, Manabu ENOKI, Hideki HATANO, Masahiro KUSANO, Hisashi YAMAWAKI and Makoto WATANABE

Key words CFRP, delamination, mid-IR laser, laser ultrasonic testing, computer simulation

1. はじめに

CFRP（炭素繊維強化プラスチック）の層間に生じる剝離欠陥の非破壊検査試験として、レーザ超音波法（LUT）の活用が考えられている。LUTでは従来の超音波法の探触子の代わりに、パルスレーザを試験体表面の微小領域に照射することで超音波信号の送受信を行うため、完全非接触探傷が可能であり、複雑形状部材を多く含む航空機や自動車の機体などへの適用が期待されている。CFRPに対するLUTでは、従来用いられているYAGレーザやCO₂レーザの波長帯域がCFRPの超音波発生に最適化されておらず、超音波強度が低くSN比が劣るという問題点があった。また、これまでの研究でCFRPのマトリクスであるエポキシ樹脂の吸収帯域である3.2 μm 近傍の中赤外光が、CFRP内への超音波発生に適し、かつ非破壊的であることが分かっているが、LUT光源として十分な実用性を備えた3.2 μm 近傍の光源はこれまでに開発されていない。本グループでは、光パラメトリック発振法（OPO）で、周期分極反転 Mg:SLT を用いた波長変換素子により、LUTに適した中赤外レーザ光源の開発に成功している¹⁾。本稿では、中赤外レーザ超音波探傷システム、剝離計測時の影響要因、コンピュータ・シミュレーションによるCFRPでのレーザ超音波伝播解析等について述べる。

2. レーザ超音波探傷システム

図1にLUTシステム（プロトタイプ）を示す。レーザは基本波レーザ一体型のコンパクトな筐体で、可搬性を有している。OPO波長変換部では、50 mJの基本波レーザ（波長1.064 μm 、パルス幅10 ns）から、12 mJの中赤外レーザ（波長 $\sim$ 3.2 μm ）を取り出せる。システムは中赤外レ

ーザ光源、サンプル設置用XYステージ、レーザ干渉速度計で構成される。光学スイッチの切り替えにより、YAG基本波光、中赤外光を超音波光源として使用できる。光源からパルスレーザがサンプルに照射されると、照射領域では光エネルギー吸収にともなう熱ひずみにより超音波が発生する。サンプルを伝播した超音波の受信は、受信用レーザと干渉速度計により行う。XYステージの移動により検査領域全体に走査させることで、A-Scan、B-Scan、C-Scanデータを取得することができる¹⁾²⁾。

LUTシステムによる超音波透過法での剝離欠陥の計測例として図2に厚さ2 mm、直交配向CFRP（8層積層）に1, 2, 5, 10 mm角の正方形の疑似剝離欠陥を含むサンプルのC-scan画像を示す。図の中心付近の色の濃い部分が欠陥部分であり、超音波透過法の測定では、1 mm角程度の大きさの剝離欠陥まで検出可能である。

図1 LUTシステム（プロトタイプ）

*原稿受付 令和元年12月10日

**東京大学（東京都文京区本郷7-3-1）

***無所属

†物質・材料研究機構（茨城県つくば市千現1-2-1）

図2 正方形疑似欠陥剥離欠陥を含む2 mm厚さCFRP直交配向材(8層積層)での剥離計測C-scan画像, 中心付近の色の濃い部分が欠陥を表す

図3 エポキシ樹脂コーティングサンプルでのエポキシ樹脂厚さと, サンプル裏面での垂直方向超音波速度波形振幅の関係

3. 剥離計測時の影響要因

これまでの研究で, 試験体表面樹脂量の中赤外レーザ照射による超音波発生に大きな影響を与えることが明らかになっている¹⁾. そこでCFRP表面樹脂厚さの超音波への影響を調べるために, 厚さ1 mm CFRP疑似等方材(8層積層)およびエポキシ樹脂コーティング(樹脂厚さ0~130 μm)を施した同サンプルを準備した. さらに, レーザ特性による, 超音波発生への影響を明らかにするために, レーザエネルギー密度をおよそ 0.05 J/cm^2 とした条件で, 光源を中赤外レーザ, YAGレーザと切り替え, それぞれのサンプルに対し実験を行い, 発生した超音波の比較を行った³⁾. 図3に, サンプル裏面で検出した, 垂直方向超音波速度波形の振幅を, 樹脂厚さごとにプロットしたグラフを示す. いずれのサンプルでも中赤外レーザでは, YAGレーザと比較して, 超音波振幅が数倍程度大きくなり, コーティングサンプルでは, コーティングなしサンプルと比

図4 5 mm角疑似欠陥を含む2 mm厚さCFRP疑似等方材(8層積層), 70 μm 樹脂コーティングサンプル, での剥離計測C-scan画像, コーティングサンプルではSN比の向上を確認

図5 1 mm厚さCFRP一方向材, 直交配向材(8層積層), での超音波伝播シミュレーション結果, 中赤外レーザ照射後 $0.5 \mu\text{s}$ の超音波変位分布, 超音波探傷に有効な振幅の大きい縦波の励起を確認

較して, 振幅が最大で6倍ほどに増大することが分かった. また, 樹脂厚さおよそ $50 \mu\text{m}$ までは樹脂の厚さにともない超音波振幅の増大が見られ, $50 \mu\text{m}$ 以上では振幅値に大きな変化が見られなかった. これらの結果から, $50 \mu\text{m}$ 程度コーティング樹脂層により超音波振幅が最も効率的に増大することが明らかになった. 図4に5 mm角の疑似剥離欠陥を含む2 mm厚さCFRP疑似等方材(8層積層)および70 μm 樹脂コーティングサンプルでの欠陥部分のC-scan画像を示す. 70 μm 厚さコーティングサンプルでは明らかなSN比の向上が確認された.

4. 超音波探傷シミュレーション

CFRPでの中赤外レーザ超音波伝搬シミュレーションの結果を示す. 汎用コードABAQUSを用いた有限要素法により超音波伝播解析モデルを開発した. 図5に厚さ1 mm CFRP平板に対するLUTのシミュレーションモデルを示す. レーザ超音波伝播を解析するために, 板表面から深さ方向にレーザ光を照射した際の光吸収による加熱領域を設定し, 加熱領域では, Bouguer-Lambert-Beer則による, 入射光の板表面からの光侵透深さと光の強度の関係式による温度分布を仮定した. CFRP積層材は直交配向CFRP(8層積層)とした. 各層の物性値として, 配向方向に応じて回転の座標変換をしたCFRP一方向材の物性値を用いている. 入射レーザ光は正弦波半波のパルスとし, レーザ時間幅, スポット径, パルスエネルギー密度はそれぞ

れ, 10 ns, 1 mm, 10 mJ とした. 図 5 にレーザ照射後 0.5 μ s の, CFRP 一方向材, 積層材での超音波変位分布を示す. エポキシ樹脂や CFRP の表面に中赤外レーザを照射すると, 照射面から深さ 400 μ m 程度の領域が光エネルギーの吸収により加熱される. シミュレーションでは加熱領域での垂直方向の熱ひずみにより振幅の大きい縦波が発生し, 裏面に到達する様子が明らかになった. CFRP 一方向材は, 繊維方向 (水平方向) の音速が繊維と垂直な方向と比べて 3 倍ほどであるため, 水平方向と垂直方向での波面の到達位置に大きな違いが見られる. また, 積層材では, 層間での超音波の反射や音響異方性の影響などにより変位分布は複雑なものとなることが分かった.

5. ま と め

中赤外レーザ光源は, 従来光源と比較して, CFRP に SN 比の高い縦波超音波を発生させることが可能であり, この光源を超音波発生源とした LUT システムでは, CFRP 積層板に含まれるサイズ 1 mm 角までの層間剝離の計測に成功している. また, 表面にエポキシ樹脂コーティングを施したサンプルでの計測では, 明らかな SN 比の向上が見られ, 本システムの FRP 製機器・構造物の表面トップコートおよびウレタンコーティングへの活用の可能性が示された. さらに本システムでは, CFRP-合金との不完全接合部等の検出も可能となっており¹⁾, CFRP 製製品全般の非破壊検査への活用が期待される.

謝 辞

本稿は内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) による研究成果に基づく. 関係者各位に深くお礼申し上げる.

参 考 文 献

- 1) H. Hatano, M. Watanabe, K. Kitamura, M. Naito, H. Yamawaki and R. Slater: Mid IR pulsed light source for laser ultrasonic testing of carbon-fiber-reinforced plastic, J. Opt., **17** (2015) 094011.
- 2) H. Hatano, R. Slater, S. Takekawa, M. Kusano and M. Watanabe: Optimization of mid-IR generation from a periodically poled MgO doped stoichiometric lithium tantalate optical parametric oscillator with intracavity difference frequency mixing, Jpn. J. Appl. Phys., **56** (2017) 072701.
- 3) M. Kusano, H. Hatano, M. Watanabe, S. Takekawa, H. Yamawaki, K. Oguchi and M. Enoki: Mid-infrared pulsed laser ultrasonic

testing for carbon fiber reinforced plastics, Ultrasonics, **84** (2018) 310.

小口かなえ

東京大学工学系研究科技術職員. 1999 年に東京大学に着任以降, 金属製造プロセス, 非破壊検査等に関するシミュレーション研究に携わる. 現在は, レーザ超音波伝播シミュレーションの研究に従事.

榎 学

東京大学教授. 東京大学大学院博士課程修了 (工学博士). AE などの非破壊評価手法を用いた研究に従事. 材料に生じる損傷のモニタリング, 構造ヘルスマニタリング, マテリアルズインテグレーションによる性能予測などの研究を進めている.

畑野秀樹

東北大学大学院工学研究科修了, 工学博士. 物質・材料研究機構において, 非線形光学および PP-Mg:SLT を用いた光波長変換とそのレーザ応用に関する研究等に従事. 2017 年退職. SIP プロジェクトでは, レーザ超音波探傷のための中赤外レーザシステム開発を担当.

草野正大

物質・材料研究機構 構造材料研究拠点積層スマート材料グループ研究員. 2016 年 3 月に東京工業大学大学院理工学研究科化学工学専攻博士課程を修了後, 物質・材料研究機構に着任. レーザ超音波の研究開発に携わることから, 積層造形の研究にも従事.

山脇 寿

物質・材料研究機構 構造材料研究拠点接合・造型分野積層スマート材料グループ任期制研究員. 1980 年, 科学技術庁金属材料技術研究所 (現在の物質・材料研究機構) に入所. 以来, 超音波探傷, レーザ超音波, 超音波の計算機シミュレーション等の研究に従事.

渡邊 誠

物質・材料研究機構 構造材料研究拠点接合・造型分野分野長. 2004 年に物質・材料研究機構に着任以降, コーティング材料を中心に非破壊評価技術の研究に従事しており, 近年はさらにマテリアルズインテグレーション技術開発に取り組んでいる.