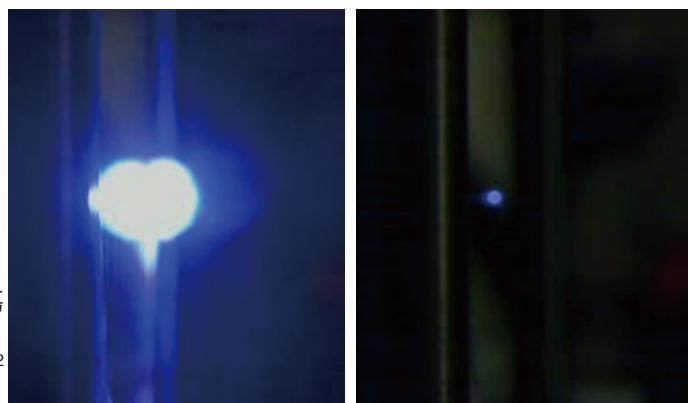


【表紙図】HfO₂薄膜のレーザー損傷時のプラズマ発光の様子
左(a) 照射フルエンス：135 J/cm²
右(b) 照射フルエンス：45 J/cm²



プラズマ発光計測を用いた レーザー損傷の検出

レーザー装置には、ミラーやレンズなど多くの光学素子が使用されている。これら光学素子は高出力レーザー光にさらされると、しばしば損傷（レーザー損傷）を引き起こし、装置の性能を制限する要因になっている。レーザー技術総合研究所では、光学素子の高耐久化研究を進めるとともに、多くの光学メーカーと協力して光学素子のレーザー損傷耐性試験を行い、データを蓄積してきた。

レーザー損傷耐性試験では、照射フルエンスを調整したレーザー光を光学素子に照射して損傷の有無を観察し、損傷確率が0%の最大フルエンスをレーザー損傷しきい値として決定するものである。その方法は国際規格ISO-21254-1～4でも規格化されている。損傷の検出にはノマルスキー型微分干渉顕微鏡を用い、照射前後の表面を観察して損傷の有無を認識しているが、観察者による個人差があることや顕微鏡観察に時間を要するなどの課題がある。評価試験の自動化、省力化、しきい値決定の高精度化に向けて、顕微鏡観察以外の損傷検出方法を検討している。

レーザー技術開発室 本越伸二

●プラズマ発光計測

パルスレーザー光による光学素子の損傷は、レーザー光の持つ強電場による光学材料の絶縁破壊として説明される。絶縁破壊時に生成された電子はイオンと再結合するとき、雰囲気と衝突することにより発光する。これをプラズマ発光として検出することにより、損傷の有無を確認することが可能である。表紙図は、HfO₂薄膜に対してフルエンス(a) 135 J/cm²、(b) 45 J/cm²でレーザー照射した時のプラズマ発光の様子である。プラズマ発光の明るさは、損傷の大きさとほぼ比例関係にある。

損傷発生用レーザーパルス（波長1064 nm、パルス幅10 ns）を焦点距離3000 mmのレンズで試料表面に集光し、損傷時に発生するプラズマ発光を、試料後方よりシリコンフォトディテクターで検出した。プラズマ発光計測と同時に顕微鏡による表面観察を行い、プラズマ発光計測による損傷検出の可能性を検討した。

●損傷しきい値評価結果

損傷評価試料には、波長1064 nm用反射防止コート



プラズマ発光計測を用いたレーザー損傷の検出

15個を用意した。損傷しきい値評価方法は1-on-1試験を採用した。図1にレーザー損傷しきい値評価結果を示す。青棒は顕微鏡観察により決定されたしきい値、赤棒はプラズマ発光計測により決定されたしきい値である。同一仕様の反射防止コートであっても損傷しきい値に大きな違いがある。しかし、15個中9個の試料については、顕微鏡観察とプラズマ発光計測ではほぼ同じしきい値として評価された。このことからプラズマ発光計測による損傷検出および損傷しきい値の評価は可

能であるといえる。しかし、顕微鏡観察と一致しなかった6個の試料は、いずれもプラズマ発光計測の値が高いことが分かる。現状では、照射フルエンス20 J/cm²未満で発生する損傷のプラズマ発光は計測できない。

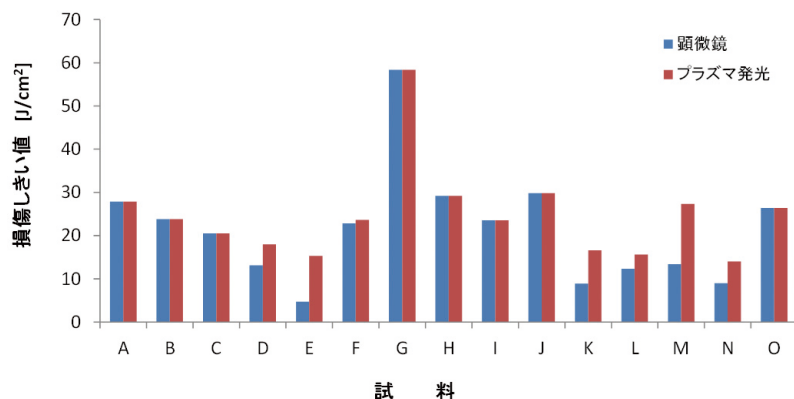
●まとめ

レーザー損傷しきい値評価試験の自動化を目的に、損傷時に発生するプラズマ発光計測による損傷検出について、顕微鏡観察による損傷しきい値と比較を行った。波長1064 nm照射試験では、20 J/cm²以上の損傷

しきい値では良い一致を示し、顕微鏡観察と置き換えが可能であることが分かった。しかし、低いフルエンスでの損傷はプラズマ発光が小さく(例えば、表紙図(b))、ノイズ信号との分離ができていない。今後、プラズマ発光計測感度の向上やS/Nを改善することにより、自動化へ向けた検討を進めていく。

謝辞

本研究の一部は、大阪大学レーザー科学研究所、近畿大学大学院総合理工学専攻との共同研究として行われた。謝意を表します。



【図1】1064nm用反射防止コートのレーザー損傷しきい値の測定結果



TOPICS

低出力レーザーを用いた医療診断技術 (L-RFA) の開発

共同研究員(近畿大学生物理工学部 講師) 三上勝大

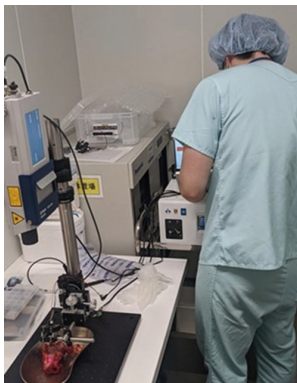
■レーザー誘起振動による医療診断技術

医療領域ではバイブレーターや磁気パルスを加振源とする共鳴周波数解析と呼ばれる診断手法が研究されている。われわれは、加振源にレーザー光を用いたレーザー共鳴周波数解析 (Laser Resonance Frequency Analysis、以下、L-RFA) の研究を行っている。レーザー光を物体に照射すると、吸収された光エネルギーは熱エネルギーに変換され、熱膨張やアブレーションなどを通して振動が誘起される。レーザー照射による加振を利用した計測技術は、レーザー技術総合研究所を中心に「レーザー打音法」としてコンクリートの劣化診断などで研究されている(本誌No.407、No.413参照)。図1に共同研究機関である慶應義塾大学病院で、悪性腫瘍を有する摘出臓器へL-RFA技術を適応する非臨床試験の様子を示す。本稿では、L-RFAを活用した医療診断

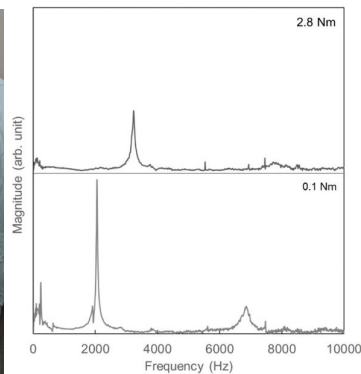
技術について紹介する。

■整形外科インプラントの設置強度診断

骨に埋設する固定具や人工関節は、整形外科インプラントと総称される。骨への設置強度が低いと、緩みや逸脱につながり骨癒合不全に至る。インプラントの設置強度は執刀医の経験や手感覚に委ねられており、定量的な計測技術が求められている。われわれは、生体内で打音検査を行うことをコンセプトに、L-RFAの適応を検討した。脊椎骨に設置されるボルト状の椎弓根スクリューをポリウレタン製模擬骨に設置し、パルスレーザー(波長1053 nm、パルス幅10 ns)を照射し、得られた振動をレーザードップラー振動計で計測した。図2に、異なる設置強度における振動波形の違いを示す。設置強度は模擬骨埋入時のピークトルク値を用いて定義した。設置強度を0.1 Nmから2.8 Nmに増加すると、発



【図1】L-RFA装置を活用した非臨床試験の様子

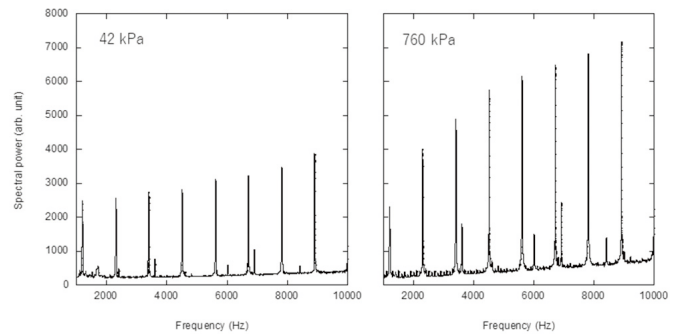


【図2】設置強度の異なる椎弓根スクリューのL-RFA結果

生ずる振動周波数（固有振動数）ピークが2100 Hzから3100 Hzにシフトしている。この基礎原理実証をもとに、実験室レベルで椎弓根スクリュー^[1]および人工股関節カップ^[2]の設置強度評価実証を達成（特許第7281770号、慶應義塾、量子科学技術研究開発機構、レーザー技術総合研究所共同出願）し、機械学習による振動データ解析^[3]や臨床データ導入による高精度化^[4]研究を行った。その後、生体非侵襲な数mWの平均出力のレーザー加振手法^[5]とその最適化^[6]を経て手術室における臨床試験に至った。2024年3月時点で65症例のデータ取得を行っており、患者の予後経過も含めた前向き研究により、L-RFA診断技術の臨床上の意義を検証している。

■軟部腫瘍の硬度診断

近年、軟部腫瘍（悪性の場合、いわゆる癌）の硬さに着目した、腫瘍物理学^[7]という領域が提唱されている。癌はシコリが生じ、周辺の正常組織と比較して硬くなる。この癌細胞は周辺組織と相対的な硬度の違いにより、硬く押しのけるように、もしくは一部軟化することですり抜けるように転移する。腫瘍物理学では、腫瘍の硬さが癌の浸潤戦略に密接に関係していることに着目している。上述した生体非侵襲な平均出力レーザーを用いたL-RFAは、生体組織に対して打音検査（触診検査）が可能である。L-RFAでは、レーザー光の集光性能による高空間分解計測と、生体の窓波長による生体深部計測を兼ね備え、臓器形状を維持した3次元硬度計測技術が期待できる。硬度（ヤング率）が異なるアガロースゲル試料に対して基礎実証試験を行った結果の一例を図3に示す。レーザーの繰り返し周波数を1 kHzから10 kHzまで等間隔に変調したときのL-RFAの結果であり、試料硬度が高くなると、レーザー繰り返し周波数と同じ周波数の振動強度が高くなることが分かる。機械学習による多変量解析により振動周波数スペクトルから硬度推定ができることを実証した^[8]。こ



【図3】ヤング率の異なるアガロースゲル試料のL-RFA結果

の成果をもとに、2024年3月時点で、5症例の摘出臓器の腫瘍に対してL-RFA評価を行っている。今後、病理検査の結果を基準とすることでL-RFA硬度計測技術の臨床における診断性能を評価していく。

■最後に

本稿では、L-RFAを用いた医療診断技術について紹介した。L-RFAは、共鳴周波数解析（打音検査）や触診検査といった医療において成熟した診断手法を、定量化できる技術である。近年、ロボット医療の進展は目覚ましく、人間の感覚を数値化する計測技術・センサーの重要性は高まるものと推測される。L-RFAは、既存手技の支援技術、基礎医学研究ツールだけでなく、先端医療にも貢献できるものと期待する。そのためにも、より多くの症例を通じて実用化に向けた検討を推進していく。

謝辞

本研究は慶應義塾大学医学部 整形外科学教室 名倉武雄先生、中島大輔先生、畠山拓人先生、筋野朝陽先生、同 外科学教室 松田諭先生、古部快先生のご協力のもと実施されました。本研究は、慶應義塾大学医学部倫理委員会（20211093および20211094）、近畿大学生物理工学部 生命倫理委員会（R4-1-001およびR4-1-002）の承認を受け実施されました。本研究の一部は、AMED医療分野研究成果展開事業（JP20hm0102077）、AMED橋渡し研究プログラム（JP201m0203012）の支援により実施されました。

参考文献

- [1] D. Nakashima, et al., J. Ortho. Res., 39 (2021) 2474.
- [2] S. Kikuchi, et al., Sensors, 19 (2019) 4876.
- [3] K. Mikami, et al., Sensors, 21 (2021) 7326.
- [4] K. Mikami, et al., Appl. Sci. 13 (2023) 9037.
- [5] K. Mikami, et al., J. NDE 40 (2021) 12.
- [6] K. Mikami et al., Sensors, 22 (2022) 5025.
- [7] E. Jonietz, Nature 491 (2012) S56.
- [8] K. Mikami, et al., Appl. Sci. 13 (2023) 3639.

レーザー総研オープンセミナー 「レーザー加工からインフラ診断まで」 ～ILT2024 令和5年度研究成果報告会開催案内～

令和5年度の研究成果報告会 ILT2024は、光・レーザー・画像計測関連機器の技術展示会「第6回光・レーザー関西2024」の併催イベントとして開催いたします。本報告会では、レーザー加工からインフラ診断まで、多岐にわたる研究テーマについて、昨年度の研究成果をわかりやすく報告します。ポスター発表では、研究員との直接対話により技術的なご相談にも対応いたします。泰山賞贈呈式や受賞者による特別講演もごございますので、ぜひご参加ください。

◆プログラム

- | | | |
|-------------|--------------------------------------|------------|
| 10:40～10:55 | ご挨拶 レーザー技術総合研究所概要 | 所長 井澤靖和 |
| 10:55～11:20 | 月面で3Dプリンティング！ そこに求められるものは | 主席研究員 藤田雅之 |
| 11:20～11:45 | 青色レーザーでも光学素子が課題に！ 光学素子の耐光性試験 | 主任研究員 本越伸二 |
| 11:45～13:00 | 休憩 | |
| 13:00～13:20 | 【泰山賞贈呈式】超高強度レーザーによる高エネルギーイオン加速の研究 | |
| | 量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所 上席研究員 西内満美子氏 | |
| 13:20～14:00 | 【特別講演】レーザー加速による高エネルギーイオンの発生とその応用 | |
| | 量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所 上席研究員 西内満美子氏 | |
| 14:00～14:25 | 波面制御でレーザー加工を効率化！ 高速動作・高光耐性可変形鏡の応用技術 | |
| | 主任研究員 谷口誠治 | |
| 14:25～14:50 | 遠隔光計測を高感度化！ SBSによるナノ秒レーザーパルス圧縮法 | |
| | 副主任研究員 ハイク コスロービアン | |
| 14:50～15:05 | 休憩 | |
| 15:05～15:30 | 見えないを視る！ 光学的手法による気体可視化技術の開発 | 研究員 倉橋慎理 |
| 15:30～15:55 | レーザーで海洋プラスチックごみ対策を！ | |
| | ラマンライダーによるプラスチックの遠隔識別手法の開発 | 主任研究員 染川智弘 |
| 15:55～16:00 | 閉会 | 常務理事 梅林 徹 |
| 16:00～17:00 | ポスター発表 | |

◆開催概要

- <日時> 2024年7月17日(水)10:40～17:00
- <場所> マイドームおおさか 8F第3会議室
大阪市中央区本町橋2番5号
アクセス：Osaka Metro 堺筋本町駅から徒歩6分ほか
<https://www.mydome.jp/mydomeosaka/access/>
- <受講料> 無料
- <申し込み方法> 光・レーザー関西
ILT2023開催案内よりお申込み下さい。
<https://www.opt-seminar.jp/ilt2024/>
- <申し込み締切> 定員(50名)になり次第、締め切らせていただきます。
- <お問い合わせ> 公益財団法人レーザー技術総合研究所 (E-mail:seika@ilt.or.jp)

