

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04286

研究課題名（和文）レーザー共鳴周波数解析による医療インプラント設置強度の診断手法の開拓

研究課題名（英文）Development of laser resonance frequency analysis of pedicle screw stability

研究代表者

錦野 将元（Nishikino, Masaharu）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子ビーム科学部門・研究統括

研究者番号：70370450

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：整形外科領域で用いられる脊椎骨に設置するボルト状固定具に対して、手術中に骨への設置強度を定量的に診断するレーザー計測手法の開発に向け、レーザー照射により誘起される振動について骨とインプラントの摩擦の関係性を追究した。得られた成果を基に、有限要素法を用いた簡易モデルを検討した。しかし、土台の設定パラメータの変動は、固有振動解析の結果に及ぼす影響が、簡易モデル構築およびモデルによる設置強度推定に対してバラツキが大きいことがわかった。そこで機械学習を導入し、設置強度推定に向けた振動パラメータの抽出を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

整形外科インプラントの骨への設置強度は、術後早期の緩み、逸脱である骨癒合不全に直結するため重要なパラメータである。しかし、この設置強度は研究室レベルにおいて計測可能な埋入時のトルク計測などの機械強度で定義され、評価されている。我々は、レーザー光をインプラントに照射することで誘起される振動に着目すると同時に、インプラントの埋入トルクを摩擦と軸力に分離し、レーザー計測結果の学術的な解釈を試みた。また、術中活用可能な設置強度推定を検討し、骨癒合不全の症例抑制に向けた開発を推進した。

研究成果の概要（英文）：In order to develop a laser resonance frequency analysis (RFA) system involving a laser system to quantitatively diagnose the strength of placement in bone during surgery, the relationship between bone and implant friction was investigated for vibrations induced by laser irradiation. Based on the results obtained, a simplified model using the finite element method was examined. However, it was found that variations in the setting parameters of the foundation had a large impact on the results of the natural vibration analysis, and that there was a large variation in the construction of the simplified model and in the estimation of the installation strength by the model. Therefore, machine learning was used to extract the vibration parameters necessary to estimate the installation strength.

研究分野：レーザー工学

キーワード：レーザー 誘起振動数 整形外科 インプラント ネジ

1. 研究開始当初の背景

医学整形外科領域で用いられる脊椎スクリュー固定具（以下、単に「スクリュー」）を患者に設置する外科手術は、年間約 8.7 万件にのぼる。しかし、スクリューの骨への設置強度が低いと緩みや逸脱に繋がることから術後 10%以上の確率で再手術となるが、手術中のスクリューの設置とその診断は執刀医の手感覚に頼っている。近年、レーザーを用いた新しい計測技術を開発し、手術中にも使用可能なスクリューの設置強度診断手法の確立が目指されている。レーザーパルスで物質を照射することでアブレーション（蒸散）が生じ、その反作用により振動波が照射対象物に誘起される。物質に生じた振動は、レーザードップラー振動計測により非接触・遠隔で検出することが可能である。これまでに、スクリューを土台（模擬骨）に設置した時の埋入トルクで評価される機械強度がレーザーで誘起される振動周波数と相関関係を示すことが確認されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、レーザーで誘起されるスクリューの振動応答の中に、機械強度がどのように反映されるかを見出し、体系化することでレーザー共振周波数解析（Resonance Frequency Analysis : RFA）によるスクリューの設置強度の計測および評価に関する技術の確立することである。そして、有限要素法を用いた振動解析によりスクリューの形状・材質によらない設置強度予測に向けた簡易解析モデルを検討する。連続的に変化するスクリューの設置強度を評価するために、「スクリューと土台の摩擦係数で定義される設置強度」と「スクリューの材質や形状によって異なるレーザーで誘起される振動特性」の関係を明確にすることで、レーザーで誘起される振動周波数から設置強度を評価する原理を確立する。また、計測装置開発としてボルトの固有振動を計測するための小型計測手法の開発やレーザー誘起の際に発生するレーザー照射痕を発生させずに振動を誘起するための手法の評価を行う。

3. 研究の方法

(1) レーザー誘起振動波診断による摩擦係数評価

締結トルクで定義される締結力は、その摩擦や軸力といった複合的な構成要素で Motosh の式で表現される。本研究では、ボルトの有効径やネジ山半角、ネジピッチは JIS 規格により規定されている M6 ボルトを用い、トルクレンチにより締結トルク、ロードセルより軸力を求め、Motosh の式から摩擦係数を求めた。M6 ボルト試料は計 10 種類とし、うち 5 種類はネジ面に液体シリコン樹脂を塗布することで皮膜を形成した。図 1 に実験配置図を示す。締結トルクの異なるボルト締結体に Nd : YAG レーザー（波長 1064 nm、パルス幅 10 ns）の照射を行い、得られた振動時系列波形から振動減衰係数を算出し、高速フーリエ変換（FFT）解析することで振動周波数スペクトルを得た。ロードセルはワッシャー型を利用した。

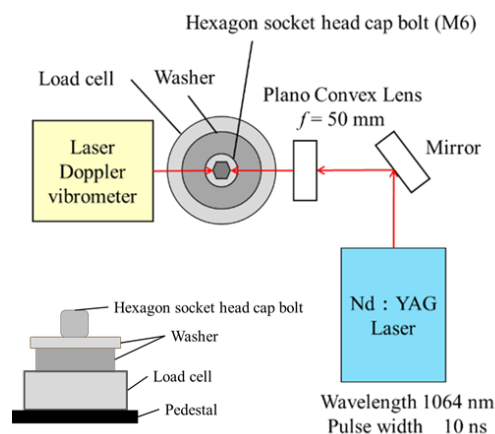


図 1 実験配置図

(2) 設置強度推定に向けた有限要素法による検討と機械学習の導入

有限要素法による簡易解析モデルでは、実使用環境に近いモデリングが望まれるため人体骨を想定したモデルを検討した。インプラントを設置する土台として皮質骨部分と海綿骨部分の 2 つの部分に分け、異なる各部分の厚さ、および密度やヤング率における固有振動解析を行うことで検証を実施した。得られた解析結果より、有限要素法を用いた簡易解析モデルから、設置強度推定を検討した。また、機械学習を導入することでインプラントの設置強度推定を検討した。レーザー照射によって得られる振動周波数スペクトルから、Lasso 回帰（正則化最小二乗法）を用いることで設置強度を説明する変数を抽出した。解析に用いる入力データ（説明変数）は後の物理モデルへの適応を見通すため、また解析時の負荷低減のため、メタデータ（各周波数におけるスペクトル強度の生データ）ではなく、ピーク周波数の他、その強度や歪度、尖度など複数の説明変数をデータ前処理により作成することとした。

(3) レーザープラズマ衝撃波を用いた効率的な振動励起方法の開発

パルスレーザーのレーザーアブレーションによるレーザー加振を行うレーザー打音に対して、計測対象を傷つけないレーザー誘起プラズマ衝撃波を使って効率的に計測対象を加振するレーザープラズマ衝撃波管法を開発した。

4. 研究成果

(1) レーザー誘起振動波診断による摩擦係数評価

図2に、締結トルクとレーザー誘起振動周波数スペクトルの重心周波数の相関を示す。また、図3に軸力とレーザー誘起振動周波数スペクトルの重心周波数の相関を示す。サンプル1,6を除いて、従来の評価通り、締結強度が高くなるに従い、振動周波数は高周波数へシフトする傾向が確認された。締結強度と軸力の相関評価においては比例関係であったため、レーザー誘起振動波診断では測定対象の軸力を測定していたものと考えられる。これは、軸力が変化すると弾性変

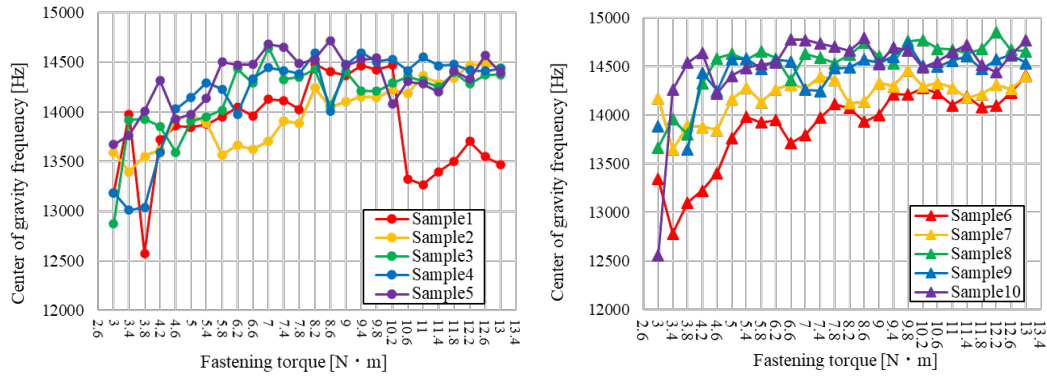


図2 締結トルクと重心周波数の相関

(右) サンプル1~5 (無垢) (左) サンプル6~10 (シリコーン樹脂皮膜付き)

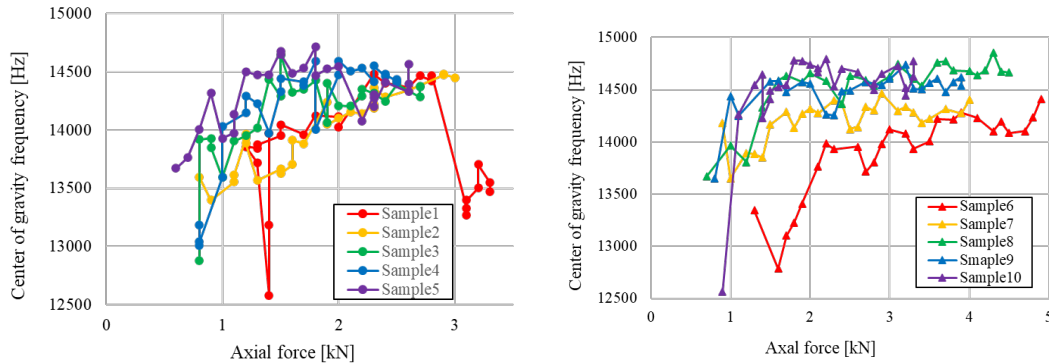


図3 軸力と重心周波数の相関

(右) サンプル1~5 (無垢) (左) サンプル6~10 (シリコーン樹脂皮膜付き)

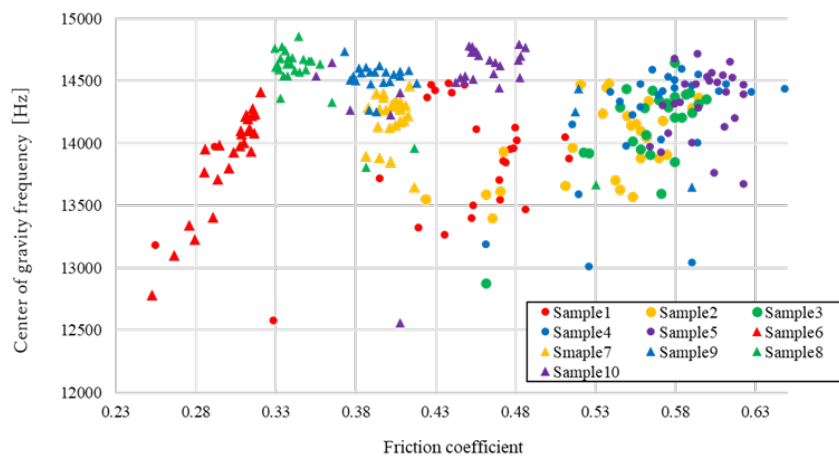


図4 摩擦係数と重心周波数の相関

形、塑性変形に依らず、対象試料の機械物性および形状に影響するため、理論的にも裏付けられる。次に、図4に摩擦係数と重心周波数の相関評価結果を示す。サンプル1,6を除いて、摩擦係数と重心周波数は一定もしくは無相関であり、締結強度が変化しても摩擦係数の変化はわずかであった。したがって、土台とネジ面の界面状態は締結トルクに依らず一定であると推察される。また、サンプル1,6は重心周波数と摩擦係数に正の相関が確認された。これらのサンプルの場合には、他のサンプルと異なり、締結トルクや軸力の相関において他のサンプルと違う傾向を示して

いることがわかる。

(2) 設置強度推定に向けた有限要素法による検討と機械学習の導入

先の実験結果より、摩擦係数は一定もしくは無相関であることから、締結状態によらずネジ面と土台の界面は一定と推察できた。そこで、この知見を基に、界面状態の設定は統一と簡略化した有限要素法の検証を行った。しかし、検証した結果、その皮質骨厚さおよびその密度によってインプラントを模擬した M6 ボルトの固有振動の分散は大きく、有限要素法による簡易解析モデル、およびそのモデルを用いた簡易な設置強度推定は困難であり、より詳細な骨構造およびそのパラメータの統計的情報と結びつけた詳細な解析が求められるものと結論付けられた。一方、そのような複雑な構造体に設置しているにもかかわらず、これまでインプラントの設置強度指標として用いている埋入トルクと、レーザー照射により誘起される最も強く振動する周波数（ピーク周波数）には明確な相関関係が確認されている。すなわち、レーザーが誘起する振動には、潜在的に設置強度を示すパラメータが内包されていると示唆している。

レーザー誘起振動に潜在的に含まれる設置強度のパラメータを見出すため、機械学習による解析を導入した。解析に用いる入力データ（説明変数）は後の物理モデルへの適応を見通すため、また解析時の負荷低減のため、メタデータ（各周波数におけるスペクトル強度の生データ）ではなく、ピーク周波数の他、その強度や周波数重心、強度重心、平均強度、分散、歪度、尖度の 8 種類の特徴量を、8 種類の周波数範囲で抽出することにより、64 種類の説明変数を準備した。この説明変数を用いた Lasso 回帰（正則化最小二乗法）において、20 変数を Bootstrap 法（復元抽出法）により抽出し、2000 回の試行を行った。その全試行における使用回数順により、目的変数となる設置強度としての締結（埋入）トルクを説明するために重要なものとして、優先順位付けを行った。整形外科インプラント（椎弓根スクリュー）の評価結果に適応した例を図 5 に示す。全試行の半数（1000 回）以上、抽出された変数は、ピーク周波数（1000-5000 Hz）、分散（500-1000 Hz）、歪度（500-1000 Hz）、周波数重心（150-500 Hz）、平均強度（5000-10000 Hz）であった。つまり、設置強度を説明するために主要な説明変数は 5 種類であることがわかる。この評価結果より優先順位の高い説明変数を活用した多次元非線形回帰を行うことで設置強度の推定が可能であると期待される。一方、有限要素法におけるモデル化においては、周波数スペクトルとしての理解が必要であるため、過渡周波数応答解析が必要となるものと考えられる。現実の設置強度診断を物理現象として表す解析モデルを得るためには、優先度の高い特徴量を表現可能なモデルを確立することが重要である。

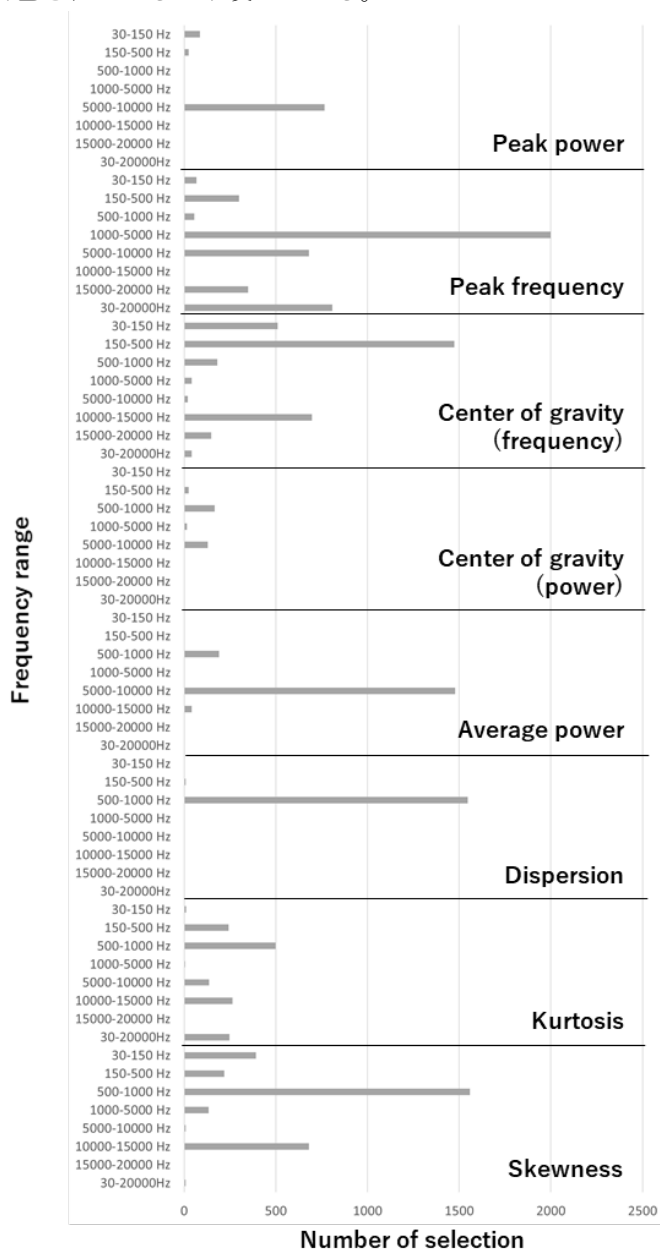


図 5 Lasso 回帰による特徴量選択回数による説明変数の優先順位探索の解析結果例

(3) レーザープラズマ衝撃波管手法の開発

レーザー光をサンプルに照射し、サンプルの表面においてレーザーアブレーションを生じさせ加振する。このレーザーアブレーションによる加振法では、対象の表面にアブレーションの痕

がわずかであるが傷として残る。今回、レーザーを用いつつ対象に傷を付けない加振方法としてレーザー誘起プラズマ衝撃波を衝撃波管で導波することで図 6 のようにレーザーアブレーション時よりも効率的なサンプルの加振が可能となった。この手法を用いることにより、計測対象を傷つけないレーザー打音検査が実現可能となった。

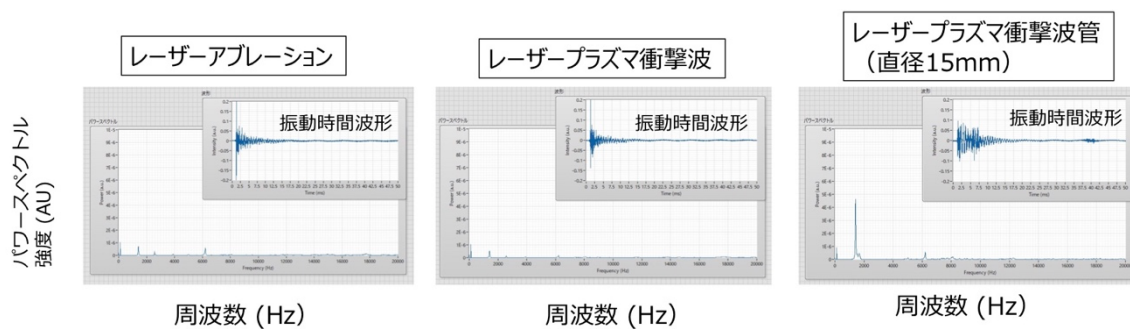


図 6 レーザー衝撃波管を用いた振動誘起スペクトルの違い

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 K. Mikami, Y. Zhao, M. Morita, T. Sakamoto, H. Nishikawa	4. 巻 40
2. 論文標題 Highly Sensitive Low-Energy Laser Sensing Based on Sweep Pulse Excitation for Bolt Loosening Diagnosis,	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nondestructive Evaluation	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10921-020-00746-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Daisuke Nakashima, Katsuhiro Mikami, Shunsuke Kikuchi, Masaharu Nishikino, Toshiyuki Kitamura, Noboru Hasegawa, Morio Matsumoto, Masaya Nakamura, Takeo Nagura	4. 巻 2021
2. 論文標題 Laser resonance frequency analysis of pedicle screw stability: A cadaveric model bone study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Orthopaedic Research	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jor.24983	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Katsuhiro Mikami, Noboru Hasegawa, Toshiyuki Kitamura, Hajime Okada, Shuji Kondo, Masaharu Nishikino	4. 巻 59
2. 論文標題 Characterization of laser-induced vibration on concrete surface toward highly efficient laser remote sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9849	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Mikami Katsuhiro, Nakashima Daisuke, Kikuchi Shunsuke, Kitamura Toshiyuki, Hasegawa Noboru, Nagura Takeo, Nishikino Masaharu	4. 巻 11233
2. 論文標題 Stability diagnosis of orthopedic implants based on resonance frequency analysis with fiber transmission of nanosecond laser pulse and acceleration sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PROCEEDINGS OF SPIE	6. 最初と最後の頁 1123300-1, 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2544793	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Mikami, M. Nemoto, T. Nagura, M. Nakamura, M. Matsumoto, and D. Nakashima	4. 巻 21
2. 論文標題 Machine Learning-Based Diagnosis in Laser Resonance Frequency Analysis for Implant Stability of Orthopedic Pedicle Screws	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 7553-1,15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21227553	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 三上勝大, 西川博昭
2. 発表標題 超低エネルギーレーザーによるインプラント設置強度診断
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 数藤菜摘, 三上勝大
2. 発表標題 掃引加振法によるレーザー誘起振動波診断の低エネルギー化実証
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本佑夏, 三上勝大
2. 発表標題 レーザー照射による振動工学パラメータ計測手法の検討
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 数藤菜摘, 三上勝大, 岡本佑夏
2. 発表標題 低エネルギー化を目指したレーザー誘起振動波診断の最適化
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本佑夏, 三上勝大
2. 発表標題 レーザー共鳴周波数解析による摩擦計測手法の検討
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Noboru Hasegawa, Masaharu Nishikino, Hajime Okada, Shuji Kondo, Toshiyuki Kitamura, Shigeru Kogure, Masamichi Abe, Kazuhisa Masuzoe
2. 発表標題 Demonstration of High-Speed Laser Hammering System for the Lining Concrete Inspection
3. 学会等名 World Tunnel Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mikami Katsuhiko, Nakashima Daisuke, Kikuchi Shunsuke, Kitamura Toshiyuki, Hasegawa Noboru, Nagura Takeo, Nishikino Masaharu
2. 発表標題 Stability diagnosis of orthopedic implants based on resonance frequency analysis with fiber transmission of nanosecond laser pulse and acceleration sensor
3. 学会等名 SPIE Photonics West - BIOS (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Mikami, D. Nakashima, N. Hasegawa, T. Kitamura, M. Nishikino and T. Nagura
2. 発表標題 Laser Hammering Method for Initial Stability Diagnosis of Pedicle Screw in Human Body
3. 学会等名 Laser Solution for Space and the Earth 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Okamoto, K. Mikami, N. Sudo, N. Hasegawa, M. Nishikino
2. 発表標題 Influence of friction in bolt loosening inspection based on laser hammering method
3. 学会等名 Laser Solution for Space and the Earth 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三上勝大、根本充貴、石野田明弘、名倉武雄、中島大輔
2. 発表標題 レーザー誘起振動波診断における機械学習を用いた高精度化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三上勝大、根本充貴、石野田明弘、名倉武雄、中島大輔
2. 発表標題 整形外科インプラント設置強度の機械学習によるレーザー診断の高度化
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 加振装置、検査システム、及び加振方法	発明者 錦野将元、北村俊幸	権利者 量子科学技術研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-163076	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長谷川 登 (Hasegawa Noboru) (50360409)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光子科学研究部・主幹研究員 (82502)	
研究分担者	三上 勝大 (Mikami Katsuhiro) (20722763)	近畿大学・生物理工学部・講師 (34419)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------