様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２３年　４月２８日現在

機関番号：１３３０１
研究種目：若手研究（Ｂ）
研究期間：2009～2010
課題番号：21791847
研究課題名（和文）　レーザー光と酸化チタン粉末の併用による殺菌効果発現のメカニズム解明に関する研究
研究課題名（英文）　Study on bactericidal effect induced by laser beam irradiation by using a reaction mediator of TiO_2 powder
研究代表者
古本　達明（FURUMOTO TATSUAKI）
金沢大学・機械工学系・講師
研究者番号：60432134

研究成果の概要（和文）：Er:YAGレーザーを歯質表面に照射したときの温度について，ファイバー導光型赤外線輻射温度計を用いて測定し，歯質内部の温度分布について有限要素法を用いた伝熱解析を行った．また，酸化チタン乳液中にNd:YAGレーザーを照射した時に生じる衝撃応力を測定し，レーザー照射にともなう酸化チタン乳液中の生菌数減少との関係を調べた．その結果，歯質表面温度，レーザー誘起衝撃応力共にレーザー条件と相関が認められること，得られた温度はハイドロキシアパタイトの融点と比較して著しく低いこと，Er:YAGレーザー照射時の窩洞形成能は，注水の効果よりもむしろ歯質内部の結晶水の影響が大きいことがわかった．また，誘起衝撃応力の増加と共に，殺菌効果が増大することから，レーザー照射に起因して生じる殺菌作用は，生じる熱の影響に加えて衝撃応力による機械的作用も寄与していることが示唆された．

研究成果の概要（英文）：This study deals with temperature measurement of enamel surface of the human tooth during cavity preparation by the irradiation of Er:YAG laser beam. Surface temperature is measured using a three-color pyrometer and the influence of laser condition is investigated. Additionally, the dynamic stress induced in extracted human enamel by irradiation with Nd:YAG laser beam is measured. Moreover, the bactericidal effects of Nd:YAG laser by using a reaction mediator of TiO_2 are described. As a result, the surface temperature during Er:YAG laser irradiation ranges from 220 to 410 ^{o}C depending on the laser energy density and it is considerably lower than the melting point of human enamel. The induced dynamic stress was related to the volume of prepared cavity. The sterilization of bacteria might be caused by the mechanical effects induced by a laser beam irradiation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2009 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総　計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：生産工学・加工学
科研費の分科・細目：歯学・保存治療系歯学
キーワード：Nd:YAG レーザ，二酸化チタン粉末，レーザ誘起衝撃応力，Er:YAG レーザ，細菌，殺菌効果発現，

１．研究開始当初の背景

歯科の二大疾病の一つであるう蝕治療では，初期であれば切削による侵襲処置を行うのではなく，罹患部位の再石灰化を促進するための治療法が有効であると考えられ，う蝕を細菌による感染症として捉え，罹患歯質表面にレーザー照射を行って原因菌を殺菌し，歯質の除去を可及的に抑制する最小侵襲処置が注目されている．レーザー治療では，従来の回転切削器具と比較して不必要に健全歯質を除去する必要が無く，治療時に発生する振動や音が殆ど無いため，患者に恐怖感を与えないという特長がある．また，Nd:YAG レーザーは，健全歯質と罹患歯質でレーザー吸収率が異なる特性を有し，レーザー光を罹患歯質に選択的に吸収させ，健全歯質に及ぼす影響を抑えながら罹患歯質のみを除去する治療が可能となっている．さらに，レーザーは疼痛抑制効果があるため無麻酔による処置が可能など，数多くの利点を有する．

う蝕患部表面にレーザー照射するとき，口腔内部の洗浄，歯質表面の冷却，レーザー光の反応材としてなど，一般的に酸化チタン粉末を含む乳液が用いられる．歯質表面にレーザー照射すると，罹患部位に存在する原因菌が殺菌され，う蝕進行の抑制にともなって再石灰化を促進することが知られているが，チタン乳液を介することで殺菌作用が増強することが報告されている．これまで，レーザー照射に起因した殺菌作用発現の因子は，レーザーが歯質に吸収されたときに生じる熱で細菌が破壊されるとする考察，乳液内の酸化チタン粉末にレーザー光が吸収されたときに生じる熱で細胞が破壊されるとする考察，レーザーが酸化チタン粉末に吸収され，加熱・蒸散時に生じる衝撃波により細胞が破壊されるとする考察，酸化チタン粉末による光触媒効果により細胞が破壊されるとする考察などがあるが，レーザー照射によって罹患歯質表面が殺菌されるに至るメカニズムや，酸化チタン乳液にレーザー照射して生じる物理現象と殺菌作用についての考察は述べられていない．

２．研究の目的

本研究では，レーザー光の発振波長による殺菌作用発現の影響を調べるため，歯科臨床に一般的に用いられている Nd:YAG レーザーの他，比較対象として Er:YAG レーザーを用いる．各種レーザー光の酸化チタン粉末への吸収特性を考慮しながら，レーザー照射時に歯質表面で生じる現象を調べ，酸化チタン粉末とレーザー光照射の併用によって発現する殺菌メカニズムを解明することを目的とする．

３．研究の方法

（１） Er:YAG レーザーを歯質表面に照射したときの表面温度について，ファイバー導光型赤外線輻射温度計を用いて計測した．温度計概要を図１に示す．測定試料から輻射された赤外線は，カルコゲナイドファイバーを介して検出素子に導かれる．検出素子は，感度波長域が異なる InAs 素子，InSb 素子，MCT 素子を用いる．いずれの素子も周波数特性が 400kHz までフラットな特性を有しており，パルス幅の短いレーザー光を試料表面に照射したときの温度変化を計測するための十分な性能を有している．各素子で得られた出力は，回路を介して増幅された後，オシロスコープに記録される．なお，検出素子がレーザー光を受光しないように光学フィルターを用いて Er:YAG レーザーを遮光した．

歯質表面の温度測定部拡大図を図2に示す．試料は，抜去後に生理食塩水中で保存されたヒトの臼歯であり，ヘルシンキ宣言を遵守し，その主旨にしたがって倫理的に実験が行われた．レーザーは，エナメル質表面に対して垂直方向に照射し，そのときの表面温度を3色温度計で測定した．測定用のファイバーは，レーザー照射位置に対して斜め45度の位置に固

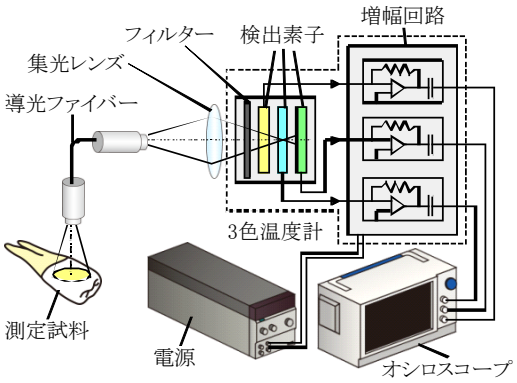


図１　赤外線輻射温度計の概要

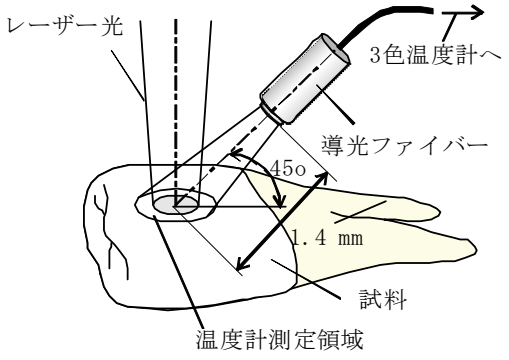


図２　温度測定部の拡大図

定し，測定位置とファイバー先端との距離を1.4mmで固定した．実験では，レーザー光の焦点距離を変えることでエネルギー密度を変化させた．レーザー照射後のエナメル質表面は，電子顕微鏡を用いて観察すると共に，3次元表面粗さ計で窩洞体積や深さを測定した．

（2）細い棒中では，棒端面から加えられた応力波はその形を変えることなく一定速度で伝ぱする性質を有している．本研究では，一次元弾性応力波理論と呼ばれるこの性質を用いて，レーザー照射時に懸濁液内部で生じる誘起衝撃応力の測定を行った．実験装置を図3に示す．実験装置は，レーザー歯科治療器，ひずみ測定装置および衝撃応力測定用棒材で構成されている．本実験では，磁歪による測定誤差を除くためアルミ丸棒材を使用した．端面から200 mmと400 mmの位置にひずみゲージを貼付した．ひずみゲージは，各貼付位置で測定中に棒内で生じる曲げ応力の影響を無くすため，円周方向に対して両極に貼付し，それらを直列で結線した．ブリッジボックスを介してひずみゲージから検出された出力は，シグナルコンディショナで増幅された後，オシロスコープで波形を記録して評価した．試験棒の端面に内部を懸濁液で満たした容器を設置し，容器内部に挿入したファイバー先端からNd:YAGレーザー照射したときの誘起衝撃応力を測定した．レーザー照射条件や懸濁液濃度が誘起衝撃応力に与える影響を調べた．

（3）乳液と菌浮遊液の混合液に各種条件でNd:YAGレーザー照射を行い，培地に接種・培養した後に細菌の集落数を調べ，レーザー照射で生じるいずれの物理現象が歯質表面の殺菌作用に支配的に関与しているかを考察した．

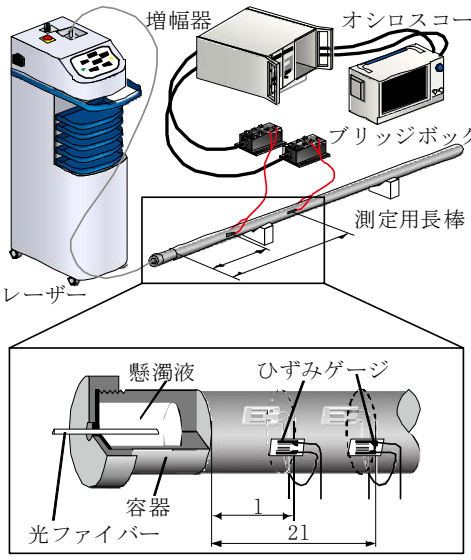


図3　懸濁液内部の誘起衝撃応力測定装置

実験では平均粒径が1μmの酸化チタン粉末を用いた．粉末表面は不活性なアルミナでコーティングされ，光触媒作用を含め化学反応性が僅かに抑えられている．蒸留水中に重量%濃度を変えながら酸化チタン粉末を混合し，この懸濁液1mlに菌浮遊液5mlを加え，全量6mlの反応混合液を作成した．その後，反応液をウオーターバス中で加温した条件とレーザー照射によって加温した条件で比較した．レーザー照射は，反応液内部にファイバーを挿入し，先端から試験管底までの距離を5mmで一定として行った．

4．研究成果

（1）エネルギー密度がエナメル質表面温度に与える影響を調べた結果を図4に示す．図から分かるように，表面温度は 220℃から410℃の範囲となり，エネルギー密度が大きくなるにつれて表面温度も上昇した．得られた温度は，エナメル質の主成分であるハイドロキシアパタイトの融点と比較して著しく低かった．有限要素法を用いてエナメル質内部の温度分布を解析したところ，レーザー照射時でも表面から僅か0.1mmの深さで常温に戻ることから，Er:YAGレーザーが神経組織に与える影響は少ないことがわかった．

図5に，表面温度と窩洞体積の関係を示す．窩洞体積は表面温度が 320℃までは小さいが，

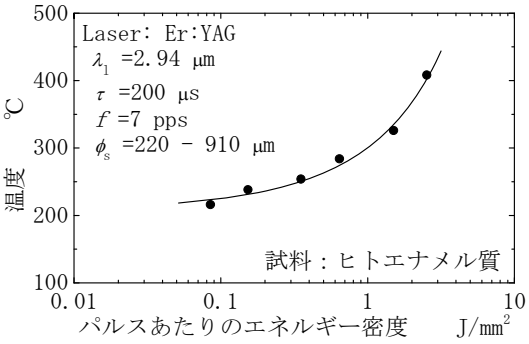


図4　エネルギー密度がエナメル質の表面温度に与える影響

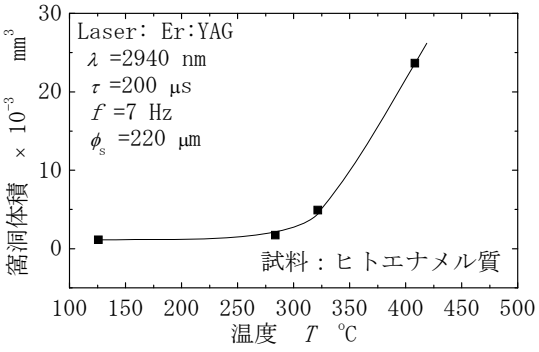
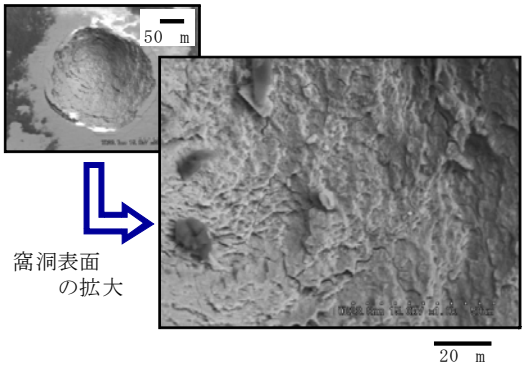


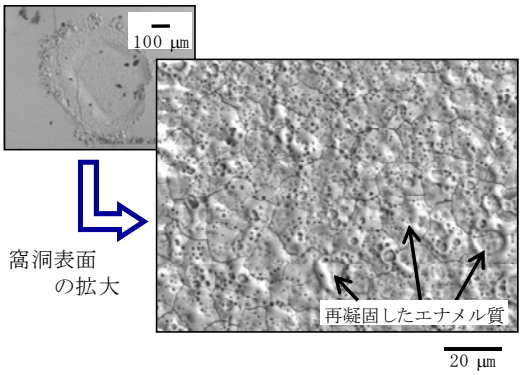
図5　表面温度と窩洞体積の関係

320℃を超えると急激に大きくなることがわかった．窩洞体積と表面温度に相関が認められることから，レーザー照射時の表面温度を監視することで窩洞体積が制御できる可能性が示唆された．

Nd:YAG レーザーおよび Er:YAG レーザーをエナメル質表面に照射したときに得られた窩洞を SEM 観察した結果を図 6 に示す．照射したエネルギー密度は同一条件とし，Er:YAG レーザー照射時の表面温度は 410℃であった．また，Nd:YAG レーザー照射時は，エナメル質表面に吸収剤として薬用墨を塗布した．これらの比較から，レーザー種類によって得られる窩洞が異なることがわかる．Nd:YAG レーザー照射によって得られた窩洞表面は，エナメル質が溶融・再凝固している．すなわち，エナメル質の主成分であるハイドロキシアパタイトの融点を超える温度まで上昇していることを示唆する．一方，Er:YAG レーザー照射によって得られた窩洞は，表面がむしり取られた形態となっており，また，再凝固層は存在していない．Er:YAG レーザーは水やハイドロキシアパタイトに対する吸収率が高く，照射されたレーザーが極表面のみで作用していることを示唆する．そのため，410℃という低い温度にもかかわらず窩洞が形成されたと考えられる．



(a)　Er:YAG レーザー



(b)　Nd:YAG レーザー

図 6　異なるレーザーで得られた窩洞の比較

（2）図 7 は，懸濁液濃度が 30wt%のとき，照射エネルギーが誘起衝撃応力に与える影響を調べた結果である．図より，照射エネルギーの上昇にともなって誘起衝撃応力が増加していることがわかる．これは，照射エネルギーの上昇と共にエネルギー密度が大きくなったためであり，前述した表面温度の関係と同じである．また，ピークパワーが大きい方が誘起衝撃応力も大きくなった．そこで，ピークパワーと誘起衝撃応力の関係を調べた結果が図 8 である．ピークパワーの上昇と共に誘起衝撃応力が大きくなった．本研究では，パルス幅が 200 μs，ピークパワーが 4kW のとき誘起衝撃応力が最大となり，その値は 1100Pa であった．同一レーザー条件で，歯質表面にレーザー照射したときの誘起衝撃応力が 160Pa であることから，懸濁液中に生じる誘起衝撃応力が 7 倍程度大きかった．

（3）図 9 に菌浮遊液の加温条件の違いが細菌数の減少に及ぼす影響を調べた結果を示す．実験前，懸濁液中の生菌数は約 10^9CFU であったのに対して，温度が上昇するにつれて生菌数が減少していき，温度が 60℃になったとき，ウオーターバスによる加温が 10^3CFU，レーザーによる加温が 10^2CFU となった．いずれの条件でもレーザーによる加温の方が生菌数の減少が著明であった．

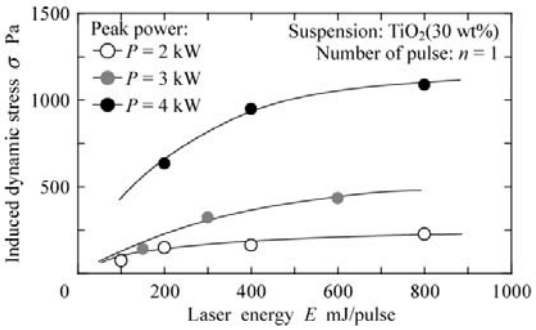


図 7　レーザー照射エネルギーが誘起衝撃応力に及ぼす影響

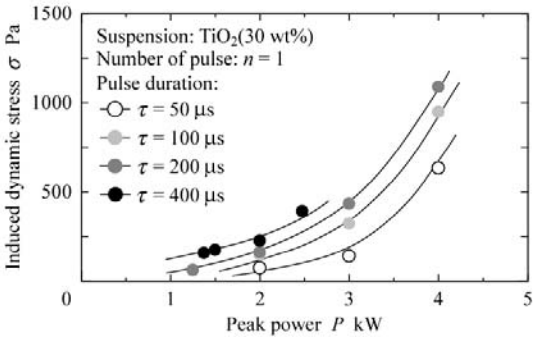


図 8　レーザーピーク出力が誘起衝撃応力に与える影響

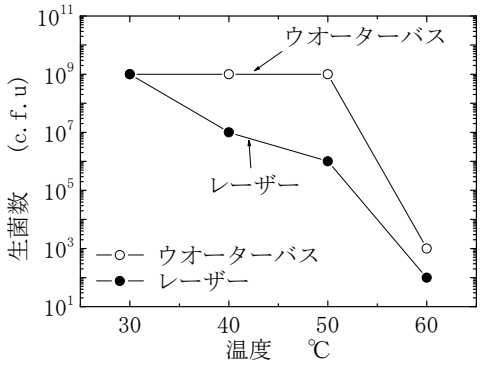


図９　菌浮遊液の加温条件の違いが細菌数の減少に及ぼす影響

レーザー照射時は，歯質表面の温度が高温になっていること，また，レーザー照射に起因して誘起衝撃応力が生じていることなどを考慮し，レーザー照射に起因して生じる殺菌作用は，生じる熱の影響に加えて衝撃応力による機械的作用も寄与していることが示唆された．今後は，レーザー照射時に生じる機械的作用，化学的作用，熱的作用が殺菌効果に与える影響について，さらに実験を重ね，レーザー照射と酸化チタン粉末の併用で生じる殺菌メカニズムについて追究したいと考えている．そして，う蝕治療のみならず根管処置や軟組織の切開処置など各種臨床応用に拡がりを見せ，安全かつ効果的なレーザー歯科治療の確立に寄与していきたい．

５．主な発表論文等
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計７件）

(1) T. Furumoto, T. Ueda A. Kasai and A. Hosokawa: Surface Temperature during Cavity Preparation on Human Tooth by Er:YAG Laser Irradiation, CIRP Annals - Manufacturing Technology (in press)，査読有

(2) T. Furumoto, A. Kasai, H. Tachiya, A. Hosokawa and T. Ueda: Study on Elucidation of Bactericidal Effects Induced by Laser Beam Irradiation, Measurement of Dynamic Stress on Laser Irradiated Surface, Optics and Lasers in Engineering, 48, 9 (2010) 827-833, 査読有

(3) T. Furumoto, T. Ueda, S. Aoki, A. Kasai, A. Hosokawa, R. Tanaka and H. Tachiya: Study on Measurement of Dynamic Force Induced by Nd:YAG Laser Beam, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 5, 1 (2010) 59-63, 査読有

(4) K. Yamada, T. Ueda, A. Hosokawa, T. Furumoto and R. Tanaka: Dental Treatment with Laser Beam, Monitoring Methods to Realize Safety Removal of Hard Tooth Tissue, International Journal of Automation Technology, 3, 5 (2009) 494-501, 査読有

(5) T. Furumoto, S. Aoki, T. Ueda and A. Hosokawa: Fabrication of the Quartz Optical Fiber for Dental Treatment with Nd:YAG Laser , Proposal of the New Process with TiO_2 powder, Optics and Lasers in Engineering, 47, 9 (2009) 941-947, 査読有

〔学会発表〕（計８件）

(1) A. Kasai, T. Furumoto, T. Ueda, M. Waga, A. Hosokawa, R. Tanaka and H. Tachiya: Measurement of Dynamic Stress Generated in TiO2 Solution, Induced by Nd:YAG Laser Beam Irradiation, ICMT2010 (14th International Conference on Mechatronics Technology), 2010.11.25, 大阪大学（大阪府）

(2) 中谷　肇, 古本達明, 上田隆司, 細川晃, 田中隆太郎： Er:YAG レーザ照射時の歯質表面温度測定(第二報)，歯色が照射部温度に及ぼす影響, 2010 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会，2010 年 11 月 6 日，長岡技術科学大学（新潟県）

(3) T. Furumoto, T. Ueda, S. Aoki, A. Kasai, A. Hosokawa, R. Tanaka and H. Tachiya: Study on Measurement of Impulse Force Induced by Nd:YAG Laser Beam, 2010.07.02, LAMP2009 (5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing)，神戸コンベンションセンター（兵庫県）

(4) 葛西惇士, 古本達明, 上田隆司, 細川晃, 田中隆太郎，和賀正明，杉原成良，今野明：Er:YAG レーザ照射時の歯質表面温度の測定，第 21 回日本レーザー歯学会総会･学術大会，2009 年 11 月 22 日，福岡県歯科医師会館（福岡県）

(5) T. Furumoto, T. Ueda, M. Waga, A. Kasai, A. Hosokawa, R. Tanaka and H. Tachiya: Study on Mechanism of Bactericidal Effect Induced by Nd:YAG Laser Irradiation, Variation of Impulse Stress with Absorbent, ICMT2009(13th International Conference on

Mechatronics Technology), 2009.10.21, Waterfront Cebu City Hotel and Casino (Philippine)

６．研究組織

(1)研究代表者

古本　達明（FURUMOTO TATSUAKI）

金沢大学・機械工学系・講師

研究者番号：60432134

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし