

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K09651

研究課題名(和文) 生体内ウェアラブル測定装置による義歯床下荷重解析に基づく最適義歯設計の探索

研究課題名(英文) Study for optimal denture design based on the load beneath the denture base measured using an in-vivo wearable device

研究代表者

依田 信裕 (Yoda, Nobuhiro)

東北大学・大学病院・講師

研究者番号：20451601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：生体内で骨組織は、力的なストレスに応じた代謝を示し、その結果、吸収や添加あるいは骨梁構造の改変が生じるとされている。すなわち口腔組織への不適切な力的ストレスはインプラント周囲や義歯床下顎骨吸収の要因になり得ると考えられる。したがって、顎骨を長期に渡り健全に保全するためには、顎骨への荷重の適切配分が重要であり、日常生活における歯列上に加わる咬合力や義歯床下粘膜に加わる力を把握することが必要不可欠である。本研究では日常的な力を測定するための装置開発に必要な、センサの固定方法や出力解析、ならびにウェアラブル化するための基盤技術の開発を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発する技術を用いたデバイスにより、これまで不明であった日常的な機能時に発揮される歯列上咬合力等が初めて明らかになる可能性がある。歯科臨床においては、この力の詳細が不明であるが故に、補綴修復材料や補綴設計等においては、臨床・研究ともに仮想咬合力をベースに考えざるを得なかった。すなわち、本研究成果は、パラファンクションの制御や合併症予防、顎関節症治療等の歯科医療への多大な貢献のみならず、歯科補綴材料開発や補綴治療設計、あるいは力と骨反応に関するメカノバイオロジー研究に対してきわめて有用なデータを提供でき、これら関連研究を加速する波及効果も期待できる。

研究成果の概要(英文)：Bone tissue exhibits metabolic activity in response to the mechanical stress to the bone, resulting in bone resorption, bone addition, or alteration of trabecular structure. Therefore, inappropriate mechanical stress on the oral tissue may be a factor regarding the resorption of peri-implant bone and/or the mandibular bone beneath the denture base. In order to maintain the healthy mandible for a long time, it is necessary to understand the occlusal force applied to the dentition and the force beneath the denture base during daily function. This study attempted to develop some sensor system for measuring the load on the oral tissues during the daily function. For this purpose, the method for fixing the sensors to the oral devices, the method for output analysis, and basic technology for making the sensor systems wearable, which were essential for developing a new device for measuring the daily functional force in human mouth.

研究分野：補綴系歯学

キーワード：歯列上咬合力 電子通信工学 有床義歯

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

補綴歯科治療としての歯科インプラントの有効性が示される一方で、超高齢社会における有床義歯の役割は依然として大きい。一方、未だ解決を見ない有床義歯治療における重大な合併症の一つに、経年的な義歯床下の顎骨吸収がある。顎骨吸収は、粘膜負担が大きいとされるノンメタルクラスデンチャーにおいても、またインプラントを支台とするインプラントオーバーデンチャーにおいても取り組むべき重要な課題である。

生体内で骨組織は、力的なストレスに応じた代謝を示し、その結果、吸収や添加あるいは骨梁構造の改変が生じるとされている。すなわち義歯床下に加わる不適切な力的ストレスが義歯床下顎骨吸収の主要因になり得ると考えられる。したがって、義歯からの荷重により骨構造が適正に改変され、顎骨が健全に保全されるためには、顎骨への荷重の適切配分が重要であり、そのためには義歯に加わる咬合力、ならびに義歯設計と義歯床下荷重との関係を把握することが必要不可欠である。

申請者らはこれまで、既製のタクタイルセンサシートを用いて部分床義歯床下荷重の生体内測定を実施し、直接支台装置へのオクルーザルレストの設置条件が義歯床下の荷重分散に有意に影響することを示した。さらに、生体内荷重測定結果を基に、義歯床下荷重の均等分散の具現化を目的とした最適化シミュレーションによる義歯床製作プロセスの可能性を示した。これらは、「義歯床下に加わる荷重の生体内実測データ」が、義歯床下顎骨の健全な保全に資する義歯設計を考慮するために有効な力学的エビデンスを提供し得ることを示す重要な知見である。

しかしながら、これまで応用してきたセンサシートは、賦形性に乏しく複雑な形態を有する顎堤には適用が困難であり、またセンサ出力ケーブルが咀嚼等の機能時の正常な口腔運動を妨げるため、機能時の義歯床下荷重を正確に把握するには至っていないのが実情である。したがって、既存の測定装置の欠点を克服した新たな生体内荷重測定用センサシートの開発が必須であり、これを応用したより正確な生体内荷重解析による、義歯設計と荷重制御との関連の本質的な解明が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、近年高性能化が進む piezofilm、あるいは静電誘導型発電シートを応用し、咀嚼や咬みしめ等の日常の口腔機能時における、咬合接触や咬合力、あるいは有床義歯の義歯床下顎堤に加わる荷重測定が可能でケーブルレス・バッテリーレスのウェアラブル荷重測定装置の開発を試みる。開発した測定装置を、実際の被験者に応用し、口腔内において、装置に加わる荷重あるいは歯列上の咬合力を測定することで、義歯設計要件が義歯床下荷重に及ぼす影響を解析する。これにより、義歯床下荷重の適切配分を具現化し、義歯床下顎骨の健全な保全に資する、力学的なエビデンスに基づく義歯設計指針の確立に寄与することを目的とする。

本来の咬合接触、咬合力を把握するうえでは、何もかも上下顎歯列間に介在させずに記録することが理想ではある。しかしながら、これに関しては現状で実現するのは不可能である。可及的に上記の目的を達成するためのデバイスの要件は、機能運動を阻害しない薄さ・賦形性付与、リアルタイムセンシング、ウェアラブル、と考えた。

義歯床下粘膜に加わる荷重測定には、高精度の piezofilm の活用を試みる。また、静電誘導型発電シートは、咬合接触や咬合力のセンシングデバイスとして、加わる圧縮力に応じて発電量が変化する特性を有することから、本研究ではこのシートを改良し、歯の接触の有無、咬合接触部位、同部における咬合力を発電量変化から解析するシステムを構築する。さらに、分担者の伊藤らの超小型 IoT 技術を応用し、発電シートに対応した無線給電回路、無線通信回路を実装し、装置のウェアラブル化のためのモジュール実現を目指す。

すなわち本研究は、日常環境下における歯の接触状態や咬合力をリアルタイムで測定可能なウェアラブル測定装置の基盤技術の開発を試みる。これは、歯学、電子通信工学、機械工学を包括した学際的研究を推進し、独自の学術領域の開拓を目指す、世界初の試みである。

3. 研究の方法

(1) 装置ウェアラブル化のための無線給電回路、無線通信回路

piezofilm ,あるいは静電誘導型発電シートなどの口腔内荷重測定のセンサノード(図1 上側)は ,咬合などの力による圧力をデジタル信号に変換し ,無線通信で外部に送信する .安全性を考慮すると電池を実装できないため ,最終的には無線により電力を供給するシステムを構築する .

このバッテリーレス動作を実現するための第一の課題は ,無線通信部の低消費電力化であるため ,180nm Si CMOS プロセスで開発済の低電力インパルス無線送信機の利用可能性について検討した .プリント基板にチップとインピーダンスマッチング用素子 ,コネクタを実装し ,測定を行った .3kbps の場合の消費電力は $0.34\mu\text{W}$ であり ,これはコイル等での無線給電により十分供給可能であると考えられた .出力電力は -45.7dBm であり ,電力効率は 7.8% であった .また ,出力電力のピークは -66.4dBm/MHz であり微弱無線局の規定を満たしていることを確認した .したがって ,消費電力や送信電力の観点では口腔内センサノードに利用できる技術であると考えられる .

本送信機の出カインパルスの中心周波数は約 700MHz ,帯域は約 200MHz であり ,アンテナを設計したところ数十 cm 角となった .したがって ,口腔内で利用できるようにするためにはアンテナの小型化が必須であり ,小型コイルによる磁界結合を利用する ,あるいは高周波化するという検討が必要であることが明らかになった .しかしながら ,piezofilm ,あるいは静電誘導型発電シート自体の小型化は困難であり ,バッテリーレス・ケーブルレス化には課題が多い .そこで本研究はまずは静電誘導型発電シートの臨床応用の可能性を中心に考慮した .

(2) 静電誘導型発電シートのセッティング

静電誘導型発電シートは ,加わる圧縮力に応じて発電量が変化する特性を有する .発電シートを圧縮することでエレクトレット側の極板に誘導されていた電荷の一部が誘電エラストマー側の極板へ移動し ,圧縮力が除荷されると逆方向への電荷の移動が生じる .この電荷の移動が発電シートの発電メカニズムである (右図) .

本研究では ,発電シートの発電量を最大化するため ,誘電エラストマーへの添加剤付加 ,あるいは空気層の調整により比誘電率の向上を試みた .またこれらに加え ,金属箔上にエレクトレットおよび誘電エラストマーを成型することで ,発電量の制御と共に発電シートのフレキシブル化・薄型化を実施した .

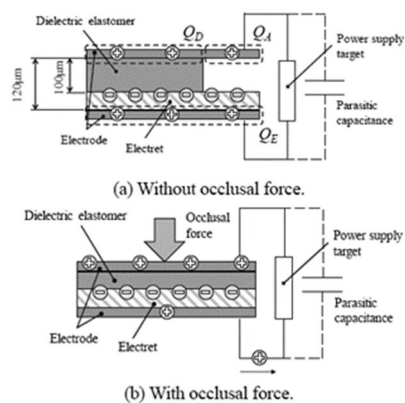


図2 静電誘導型発電シート

(3) 口腔内疑似環境でのシートの出力特性の検証

(2)にて開発した静電誘導型発電シートを歯科にて一般的に用いられるオクルーザルスプリント用の材料に包埋し ,被験者 (研究代表者) の歯列模型を用いて ,臼歯の咬合面に加わる荷重測定が可能なるよう実験用オクルーザルスプリントを製作する .この試作品を用いて出力特性検証を行った .

出力特性検査には ,オシロスコープ (PicoScope 5000 series, Pico technology) とノート PC (CF-SV, Panasonic) を用いた .

出力分析結果をフィードバックし ,発電シートの各要素について改良を試みた .

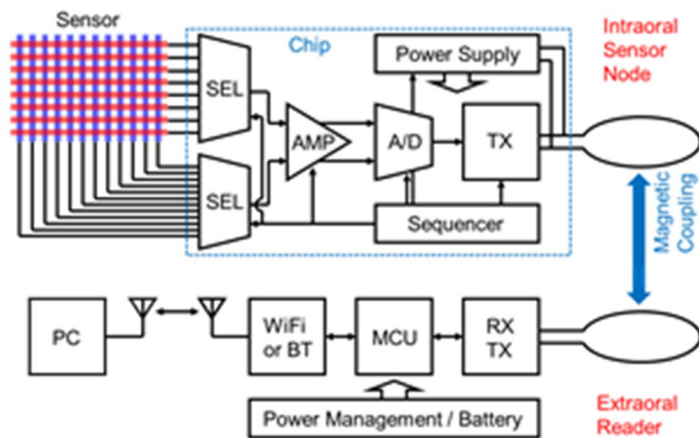


図1 ブロックダイアグラム

4. 研究成果

(1) 装置ウェアラブル化のための無線給電回路，無線通信回路の予備実験

上記センサにおけるバッテリーレス・ケーブルレス化を実現するための第一段階として，より消費電力の小さい加速度センサを使用した下顎運動測定装置を開発し，無線給電回路，無線通信回路構築を試みた．

下顎運動測定装置の構成は，加速度センサ9軸センサモジュール(3軸加速度+3軸ジャイロ+3軸コンパス)：MPU-9250 (InvenSense Inc., CA, USA) を簡易型ヘッドギアに実装し，さらに被験者(研究代表者)の下顎オクルーザルスプリント前方部に装着した金属製フレームに，咬合平面と同一面上となるよう実装した(図3)．

スプリント前方に装着された加速度センサにより下顎運動の3軸方向の加速度に応じた電圧信号を解析した(図4)．開閉口運動時の結果の一部を示すが，本装置により下顎運動時の下顎の加速度を計測可能であった．本研究では，これらの微弱信号の無線通信化について図1のブロックダイアグラムをベースに検討している．

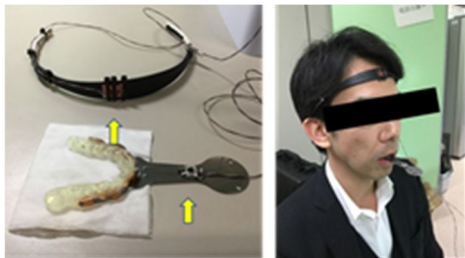


図3 下顎運動測定装置

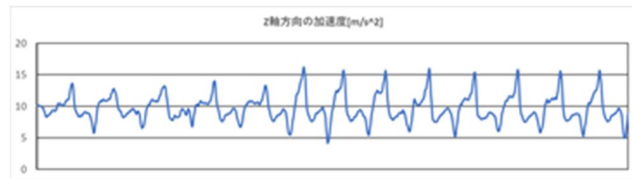


図4 下顎運動(単純な開閉口)時の加速度測定結果の一例

(2) 発電シートのスプリント臼歯部咬合面内部への埋入

発電シートは厚さ0.22 mmに成型し，その発電シートを歯列模型の臼歯部において2重構造となるように成型式オクルーザルスプリント材料を用いて包埋した．

発電シート内のエラストマー層(t0.1)が咬合力によって変形することにより電圧・電流が出力されるため，発電シートの極板に配線された計測用ケーブルは，臼歯外側部から導出するよう設計した．この導出方法についてもケーブルレス化するためにアンテナの大きさは受信方法についてさらなる検討を行う予定である．

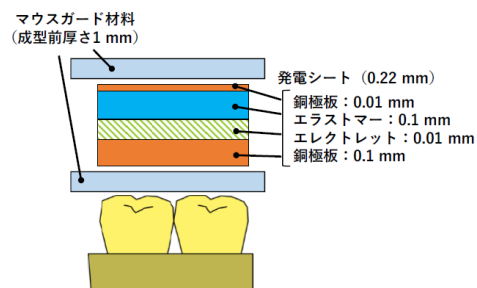


図5 発電シートの内部構造とマウスガード包埋

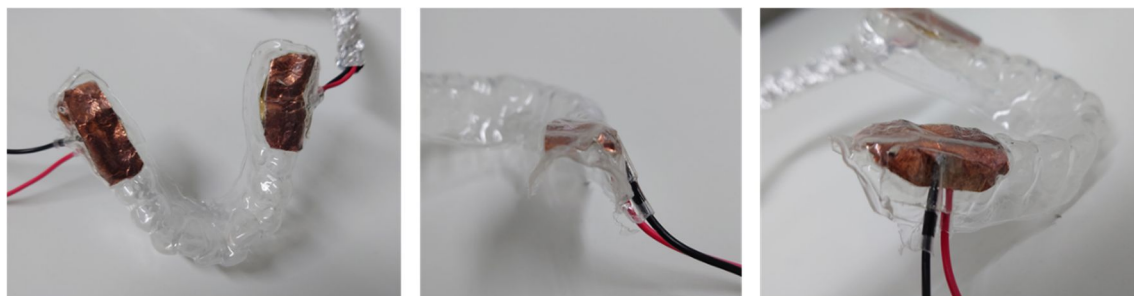


図6 発電シートを包埋したマウスガード

(3) マウスガード動作例

(2)にてプリント材料に包埋した発電シートからの出力例を示す。

接続する負荷抵抗のオーダーが大きく電源ノイズの影響を受けやすいことが判明したが、負荷抵抗モジュールをシールドすることによりノイズの低減が確認された(図7)。

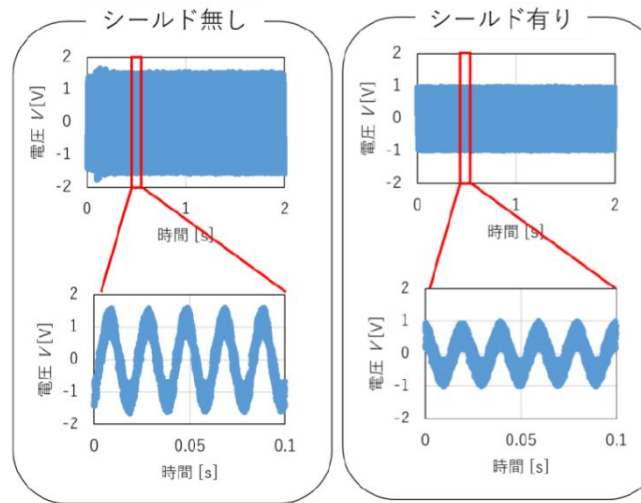


図7 ノイズ電圧(負荷抵抗 300MΩ 全圧)

(4) 圧縮力に対する発電シートの応答

発電シート包埋部において、圧縮力を負荷した際の電圧応答例を図8に示す。

出力電圧は接続する負荷抵抗に依存し、高付加抵抗接続時に SN 比も高くなる傾向であった。

負荷抵抗 300 MΩ 接続 (100 MΩ 分圧) 時

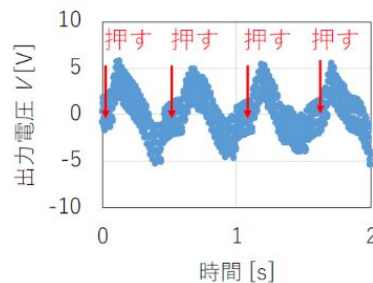


図7 出力電圧 (300 MΩ 全圧)

負荷抵抗 3 GΩ 接続 (1 GΩ 分圧) 時

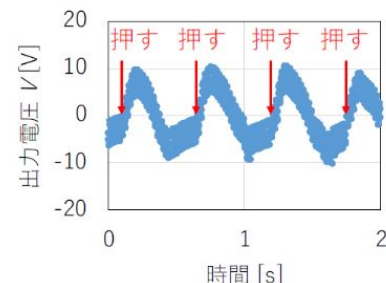


図8 出力電圧 (3 GΩ 全圧)

幅広い測定域にお

いて咬合力を感知するためにはさらなる発電

量の向上が必要となる。今後は、エレクトレット帯電方法の最適化によるエレクトレット表面電位の向上や、誘電エラストマーの構造の最適化によって発電量の向上を図る。さらに、咀嚼等の繰り返し負荷や、歯ぎしりなどのせん断方向の荷重が付加された時のエレクトレットおよび誘電エラストマーの耐久性の評価も行う。さらに、装置自体のウェアラブル化のために、上記ブロックダイヤグラムに示す無線給電・無線通信化について、最新のIoT技術を駆使し使い発電シートからの出力の無線化を実現する。

図8 圧縮力に対する出力電圧(負荷抵抗 300MΩ 全圧)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 依田 信裕, 佐々木 啓一	4. 巻 34
2. 論文標題 歯科補綴装置が骨リモデリングに及ぼす影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 BIO Clinica	6. 最初と最後の頁 53-59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 依田信裕, 川田哲男, 末永華子, 佐々木啓一	4. 巻 2
2. 論文標題 生体内実測荷重に基づく顎骨リモデリング解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Precision Medicine	6. 最初と最後の頁 51-57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Zheng K, Liao Z, Yoda N, Fang J, Chen J, Zhang Z, Zhong J, Peck C, Sasaki K, Swain MV, Li Q	4. 巻 90
2. 論文標題 Investigation on masticatory muscular functionality following oral reconstruction ? An inverse identification approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbiomech.2019.04.007	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 該当する

1. 著者名 Minati L, Tokgoz KK, Frasca M, Koike Y, Ricci L, Yoshimura N, Masu K, Ito H	4. 巻 8
2. 論文標題 Distributed Sensing Via Inductively Coupled Single-Transistor Chaotic Oscillators: A New Approach and Its Experimental Proof-of-Concept	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 36536-36555
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.2976139	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 該当する

1. 著者名 Bing L, Mito T, Yoda N, Sato E, Shigemitsu R, Han JM, Sasaki K	4. 巻 47
2. 論文標題 Effect of peri-implant bone resorption on mechanical stress in the implant body: in vivo measured load-based finite element analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Oral Rehabilitation	6. 最初と最後の頁 1566-1573
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/joor.13097	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 該当する

1. 著者名 Putra RH, Yoda N, Iikubo M, Kataoka Y, Yamauchi K, Koyama S, Cooray U, Astuti ER, Takahashi T, Sasaki K	4. 巻 6
2. 論文標題 Influence of bone condition on implant placement accuracy with computer-guided surgery	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Int J Implant Dent	6. 最初と最後の頁 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40729-020-00249-z	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 該当する

1. 著者名 Sato E, Shigemitsu R, Mito T, Yoda N, Rasmussen J, Sasaki K	4. 巻 129
2. 論文標題 The effects of Bone Remodeling on Biomechanical Behavior in a Patient with an Implant-Supported Overdenture	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Comput Biol Med	6. 最初と最後の頁 104173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compbiomed.2020.104173	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 該当する

1. 著者名 Putra RH, Yoda N, Astuti ER, Sasaki K	4. 巻 26
2. 論文標題 The accuracy of implant placement with computer-guided surgery in partially edentulous patients and possible influencing factors: A systematic review and meta-analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J Prosthodont Res	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2186/jpr.JPR_D_20_00184	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 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 依田信裕, 小山重人, 川田哲男, 松館芳樹, 佐々木啓一
2. 発表標題 上顎前歯部に埋入されたインプラントの唇側骨の経時的リモデリングにおける唇側骨厚の影響
3. 学会等名 第49回公益社団法人日本口腔インプラント学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤浩之, 古賀達也, 市川崇志, 山根大輔, 石原昇, 三宅美博, 町田克之, 益一哉
2. 発表標題 兆し計測のための高感度MEMS加速度センサ技術
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoda N, Sugano T, Suenaga H, Ogawa T, Sasaki K
2. 発表標題 Effect of mechanical stimuli on peri-implant bone remodeling - In vivo and In silico study -
3. 学会等名 2018 Sydney-Tohoku Research Forum Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sugano T, Yoda N, Ogawa T, Suenaga H, Sasaki K
2. 発表標題 Functional Compartmentalization of Masseter Muscle: in vivo and in silico study
3. 学会等名 2018 Sydney-Tohoku Research Forum Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 依田 信裕, 小山 重人, 山内 健介, 新部 邦透, 佐藤 智哉, 森島 浩允, 高橋 哲, 佐々木 啓一
2. 発表標題 東北大学病院歯科インプラントセンターにおける臨床研究
3. 学会等名 公益社団法人日本口腔インプラント学会第50回記念学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 依田 信裕, Ramadhan Hardani Putra, 飯久保正弘, 片岡良浩, 山内健介, 小山重人, Upul Cooray, Eha Renwi Astuti, 高橋 哲, 佐々木啓一
2. 発表標題 ガイドッドサージェリーにおけるインプラント埋入精度に対する骨状態の影響
3. 学会等名 2020年 ITI SC 東北支部会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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	伊藤 浩之 (Ito Hiroyuki) (40451992)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授 (12608)	
研究分担者	末永 華子 (Suenaga Hanako) (00508939)	東北大学・歯学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	川田 哲男 (Kawata Tetsuo) (80292225)	東北大学・歯学研究科・大学院非常勤講師 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	佐々木 啓一 (Sasaki Keiichi) (30178644)	東北大学・歯学研究科・教授 (11301)	

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