

平成 30 年 5 月 7 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13837

研究課題名(和文) 口腔インプラント手術の技術伝承を目的とした力覚体感型シミュレータの開発

研究課題名(英文) Development of Force Sensible Surgery Simulator Aiming at Technology Transfer for Oral Implant Surgery

研究代表者

高野 直樹 (Takano, Naoki)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：10206782

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：口腔インプラント手術における顎骨のドリリングや上顎骨のサイナスリフト術における洞底粘膜挙上には医療事故につながる要因が含まれる。この防止には医師が力覚を正しく認識することが重要である。そこで、海綿骨の微細構造に基づく骨質と個体差を考慮したドリリング荷重の数値解析手法を用いて予測したドリリング深さと荷重の関係を再現できる手術シミュレータ装置を開発した。また、洞底粘膜の特性試験装置を開発し、新鮮屍体に対する実験結果を理論的、数値的に解析し、荷重に対する感度が高い幾何的パラメータを明らかにした。上記の知見を記録する力覚カルテを提案し、ドリリング用の力覚カルテを具現化するソフトウェアを開発した。

研究成果の概要(英文)：Drilling of jaw bone and elevation of maxillary sinus membrane during oral implant surgery include a factor related to the accident. To prevent that, it is important for surgeon to recognize the force sense correctly. Hence, a force sensible surgery simulator apparatus has been developed in which the relation between the drilling depth and force predicted by a computational method considering the bone quality of the trabecular bone influenced by its microstructure and also considering the inter-individual differences was implemented. In addition, a mechanical testing apparatus was developed for maxillary sinus membrane, and the experimentally obtained results for fresh cadavers were analyzed both theoretically and numerically, which revealed the important geometrical parameters sensitive to the force. Finally, a force sensing chart was proposed to record the above findings aiming at the technology transfer. The force sensing chart for drilling was implemented in a practical software.

研究分野：生体力学

キーワード：口腔インプラント 力覚体感 粘膜 骨充填材 サイナスリフト von Karman板理論 海綿骨ドリリング 非線形FEM解析

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は工業材料とのアナロジーから、骨内部のスポンジ状で多孔質な海綿骨の力学的特性解明の医歯工連携研究を牽引してきた。歯科治療として急増している口腔インプラント手術において、歯科医師の未熟さに起因する偶発症、医療事故が多発している。2012年のアンケートでは、直上に上顎洞(鼻腔)がある上顎における上顎洞内インプラント迷入と上顎洞炎が偶発症の約30%を占めた。暗視野的に手術を行うため、誤って洞底粘膜を傷つけないよう、きわめて高度な技術を要求される。歯科学学生・医師向け教育システム確立が急務とされ、技術伝承の科学的・工学的的手法論が必要であるが、研究は世界的にも緒についたばかりである。

本研究を開始する前に、下顎骨ドリリングへの力学的アプローチにより、海綿骨の骨質を考慮し、個体差を考慮したドリリング荷重の数値解析の基盤技術を構築した。この技術を、新鮮屍体による計測結果を用いてキャリブレーションすることにより完成させる。別途開発を続けてきたドリリング荷重の体感装置に計算結果を搭載することにより、手術シミュレータを完成させ、教育プログラムを開発するとともに、熟練医の技術伝承に活用するための手法論を開発することが期待される。力覚体感装置のプロトタイプは、東京歯科医師会卒後研修セミナー(平均年齢54才)に試用し、好評を得た実績がある(図1)。

下顎ドリリングで培った技術とノウハウを完成させるにとどまらず、さらに発展させて、緊急性が高い上顎のサイナスリフト術(図2)を対象として、軟組織である洞底粘膜、充填材も考慮した力覚体感型シミュレータ開発の着想を得た。これを用いた技術伝承の具体的手法として、力覚カルテを新たに提案する着想も得た。

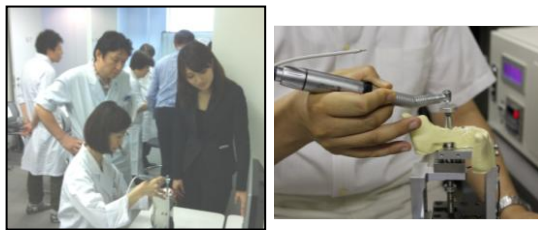


図1 東京歯科医師会卒後研修セミナーの様子

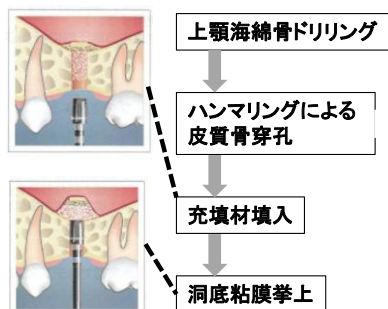


図2 上顎インプラントのサイナスリフト術

2. 研究の目的

医療事故(偶発症)が相次ぐ口腔インプラント手術の予防のため、歯科大学学生や開業歯科医を対象として熟練医の技術伝承に寄与する手法論を提案する。

下顎骨ドリリングにおいて下顎管にある下歯槽神経損傷に至らないよう、海綿骨の骨質を考慮し、個体差をも考慮できる確率的マルチスケール解析法を開発し、新鮮屍体実験を用いてキャリブレーションする。次に、計算結果を搭載した力覚体感型ドリリング手術シミュレータを完成させる。これまで擬音でしか表現できなかった力覚を定量化することにより、熟練医の技術伝承を可能とする力覚カルテを提唱し、歯科大学学生に対する教育システムとして実践的に使用する。

上顎骨においてはサイナスリフト術を対象とし、充填材とともに洞底粘膜という軟組織を挙上する手順を力学問題としてとらえ、数値解析、荷重・ひずみの計測を用いて力覚の定量化をはかる。術前のCT検査により知りうる情報に加えて、手術中でしか知りえない情報は力覚カルテとして記録することとし、力覚カルテの内容を確定する。サイナスリフトに関して開発する手法論を搭載した手術シミュレータの基本構想をかためる。

3. 研究の方法

(1) 下顎骨ドリリングに関する研究

個体差が大きい場合にも統一的に適用可能なモデリング法を確立する。そのため、新鮮屍体を用いたドリリング荷重の計測を実施する。マイクロCT画像に基づく確率的マルチスケール解析結果を搭載したドリリング時の力覚体感型シミュレータを完成させ、東京歯科大学第5学年登院実習において使用し、力覚カルテ、シミュレータの評価を行う。

(2) 上顎骨サイナスリフトに関する研究

新鮮屍体より採取した洞底粘膜を用い、サイナスリフト術を模擬した洞底粘膜挙上試験装置を開発する。得られた荷重-挙上量の関係を理論的、数値解析的に考察する。

数値解析では、実験的に計測不可能なひずみ分布を予測する。さらに、はく離面積の違いの影響を解析する。

理論としては、大変形を考慮した von Karman の板理論を用い、各パラメータに関する感度解析を行い、手術室内で容易に使用可能な支援システムの開発構想をかためる。

4. 研究成果

(1) 下顎骨ドリリングに関する研究

① 確率的マルチスケール解析

マイクロCT画像により海綿骨の3次元ネットワーク構造を直接的にモデル化し、物性値の不確かさは正規分布を仮定して理論的に扱うことができる確率的マルチスケール法 (First-order Perturbation based Stochastic Homogenization, FPSH) を開発し、皮質骨厚さが異なる場合にも統一的にキ

ヤリブレーションが可能な計算手順を提案した（論文②）。これを力覚体感型シミュレータのプロトタイプに搭載した（論文⑥）。解析結果の一例を図3に示す。

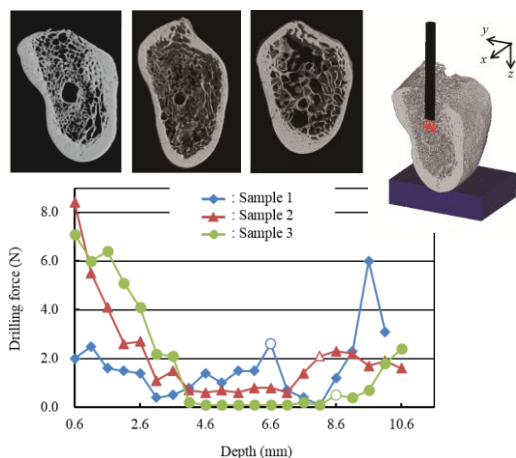


図3 ドリリング荷重の数値解析

② 現存の練習用模型との力覚の定量的比較
インプラント手術の練習に多用されるプラスチック製模型には多孔質な海綿骨と下顎管を模した構造が再現されている。①の成果を用い、練習用模型とのドリリング荷重の比較を行った。その結果、練習用模型は現実よりも相当にやわらかく、ごく低い荷重で短時間でドリリングできること、力覚の練習には不向きであることが明らかとなった（論文⑤）。一方、開発した力覚体感型シミュレータは、歯科医師による試用において、リアリティがあるとの高評価を得ることができた。
③ 力覚体感型シミュレータの開発と力覚カルテの提案

力覚を定量化するため、ドリリング深さと一定速度でドリリングするために必要な荷重の関係をグラフ化した。力覚体感型シミュレータは、ユーザの入力荷重と比較しながら、アクチュエータの速度を制御するものである。図4は本研究で完成させた装置である。東京歯科大学第5学年登院実習において、2例の献体に対するドリリング模擬体験において相対的差異を把握させた後に、未経験の献体に対する力覚をグラフとして描かせた。その結果は論文③にまとめた。

熟練医であれば手術中の感覚を事後でもよく記憶していることがわかったため、このグラフを力覚カルテの核とすることとし、タッチパネルディスプレイ型のラップトップを用いて簡単に描いてもらい、記録に残すソ



図4 下顎骨ドリリングの力覚体感型シミュレータ

フトウェアシステムの試作を行った。上記の実習において開発したソフトウェアを使用している様子を図5に示す（学会発表⑬）。

④ 情報発信

特筆すべき活動として、第46回日本口腔インプラント学会学術大会（2016年9月、名古屋国際会議場）において、研究成果のビデオと装置の展示を行った（図6参照）。

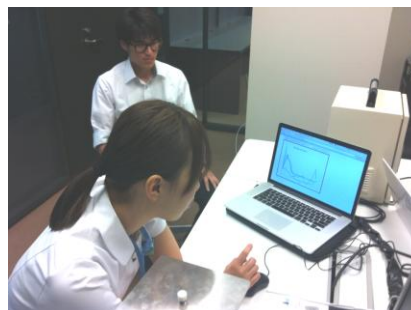


図5 登院実習における力覚カルテ作成の様子（インストラクタは慶應義塾大学学部学生）



図6 第46回日本口腔インプラント学会学術大会における機器展示の様子（説明しているのは慶應義塾大学学部学生）

(2) 上顎骨サイナスリフトに関する研究

① 洞底粘膜の挙上実験装置の開発と新鮮屍体を用いた計測

新鮮屍体より採取した洞底粘膜の寸法は約30mm四方である。これを用いて、挙上時の荷重を計測可能な図7の装置を開発した。赤破線枠のカセットは着脱可能であり、洞底粘膜の準備に適している上、試験後の消毒も容易である。図8にカセットと挙上棒を示す。詳細図面は図9の通りである。



図7 洞底粘膜の挙上試験装置

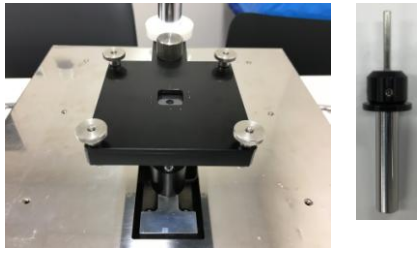


図8 洞底粘膜用カセットと挙上棒

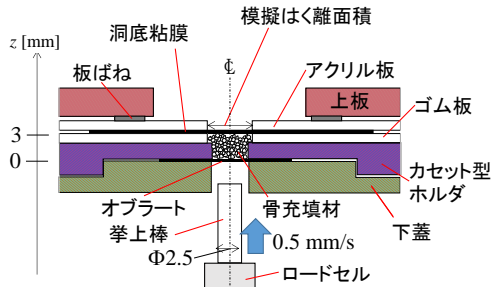


図9 洞底粘膜挙上装置の詳細図面

新鮮屍体3体より採取した10の試験片に対して行った試験結果を図10に示す。0mmから立ち上がっている結果は擬似的な骨充填材を使用した場合である。これを除き、挙上量0.8mmまでの範囲の拡大図を図11に示す。この範囲ではばらつきはある程度範囲におさまっており、本研究では挙上量0.8mmまでの範囲に集中して検討を行った。

まず骨充填材の影響について、直列ばねモデルによる説明を試みた。骨充填材のみの圧密試験を本装置を利用して行った結果、図11の範囲では直列ばねモデルで説明が可能であり、骨充填材の影響は些少であった。この

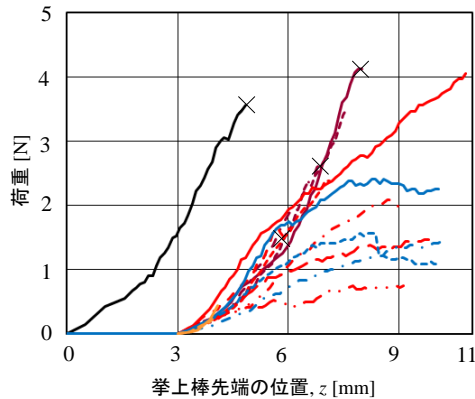


図10 洞底粘膜の挙上試験結果

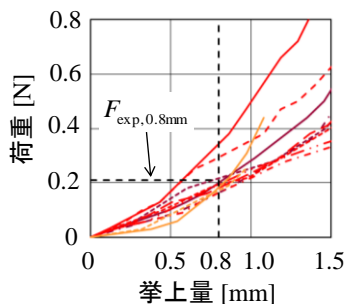


図11 洞底粘膜の挙上試験結果

内容は学会発表②にて公表した。

② FEMによる数値シミュレーション

実験では計測困難な粘膜に生じるひずみ分布を計算した結果を図12に示す。ここで、模擬はく離面積の影響を調査した結果、模擬はく離面積が図12の $\phi 5$ から $\phi 8$ に増加すると、ひずみ値は約40%~50%程度低くなることがわかった。また挙上に必要な荷重値は約85%もの低下が予測された。十分なはく離面積をとることにより、洞底粘膜の変形モードが変化し、挙上棒との接触点近傍でのひずみ集中が低減することが定量的に示された。本結果の一部は学会発表④にて公表した。

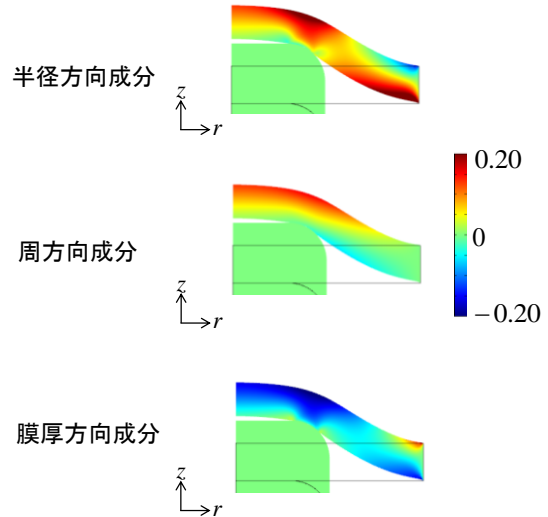


図12 ひずみ分布の数値シミュレーション結果

③ von Karmanの板理論による考察と手術中に使用可能な簡易力覚シミュレータの構築

上顎洞底の形状を半球と仮定し、その半径を R 、はく離後に骨充填材を圧密した状態で充填したとし、初期高さを h とする。洞底粘膜の膜厚を t で一様とし、ヤング率を E 、ポアソン比を ν とする。挙上量を w とし、挙上棒からの荷重は圧密された骨充填材を介して粘膜に一様に作用すると仮定した。大変形を考慮した von Karman 板理論により、挙上に必要な荷重 F は上記パラメータの関数としてあらわされる。ヤング率に比例し、事前のCT検査によりわかる上顎洞底半径と初期高さの関数 g 、およびそれ以外の手術時にしか知りえないパラメータに関する関数 f により記述されるとした。

上記を図13にまとめた。既知のパラメータを用い、未知のパラメータは不確かな値としてあらかじめ計算した結果から、術中に医師が得た力覚により、患者の洞底粘膜の挙上時の挙動を予測する装置開発が可能であることが示唆された。

次に、得られた理論式から、各パラメータに対する感度を計算した結果の一つを図14に示す。これは上顎洞底半径と膜の初期高さに対する挙上に必要な荷重の応答曲面である。洞底半径が小さいほど、また初期高さが小さいほど、荷重は急激に増加し、過大な荷

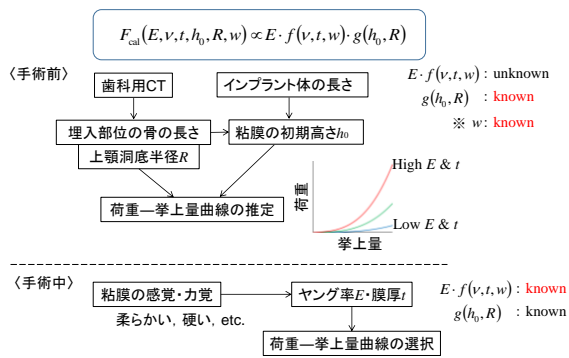


図 13 洞底粘膜の挙上時の力学的特性の予測方法ならびに予測システムの構想

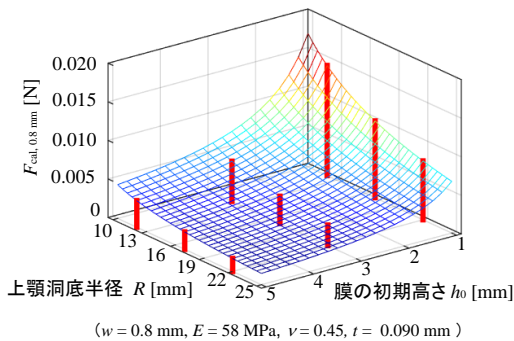


図 14 上顎洞底半径と膜の初期高さに対する挙上荷重の応答曲面

重を与えることにより膜を破断させる危険性があることがわかる。洞底半径は CT 検査により計測可能であり、これを力覚カルテの一項目として記録することの重要性を指摘することができた。また、初期高さが小さい状況は、はく離面積が小さい場合に起こる。この場合、前述の FEM シミュレーションからもわかる通り、リスクが増すことがわかった。したがって、理論的に予測される挙上量と荷重の関係に加え、洞底半径を加えた力覚カルテを用い、図 12 の構想に基づく簡易予測システムを開発すれば、術者の一助となると考察された。本成果の一部は学会発表②において公表した。

(3) 研究成果のまとめ

下顎骨ドリリングに関しては、力覚体感型シミュレータおよび力覚カルテを開発し、歯科大学学生に対する実習において実践的に使用し、高い評価を得ることができた。

上顎インプラントのサイナスリフト術に関しては、von Karman 板理論に骨充填材の影響を直列ばねモデルとして加味した挙上荷重の予測手法を提案し、力覚カルテに上顎洞底半径を加えることを提案した。洞底粘膜に関するバイオメカニクス研究の報告は過去にほとんど無く、本研究の成果は貴重な道標となると考える。成果は学術論文として投稿準備中である。今後は、実験の継続によるデータ数の確保、大きな挙上量に対する深い検討とともに、提案した力覚予測システムと力覚カルテの具現化が期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 田原大輔, 高野直樹, バイオメカニクス分野における不確かさを考慮したマルチスケールシミュレーション, 査読無, 計算工学, 22-1, 2017, pp.20-23.
<http://www.jsces.org/activity/journal/2017.html>
 - ② D. Tawara, N. Takano, H. Kinoshita, S. Matsunaga and S. Abe, Stochastic Multi-scale Finite Element Analysis of the Drilling Force of Trabecular Bone during Oral Implant Surgery, International Journal of Applied Mechanics, 査読有, 8-6, 2016, pp.1-24.
DOI: 10.1142/S1758825116500757
 - ③ M. A. A. bin Kamisan, H. Kinoshita, F. Nakamura, S. Homma, Y. Yajima, S. Matsunaga, S. Abe and N. Takano, Quantitative Study of Force Sensing While Drilling Trabecular Bone in Oral Implant Surgery, Journal of Biomechanical Science and Engineering, 査読有, 11-3, 2016, pp.1-9.
DOI:10.1299/jbse.15-00550
 - ④ G. Legrain, M. Chevreuil and N. Takano, Prediction of Apparent Properties with Uncertain Material Parameters Using High-order Fictitious Domain Methods and PGD Model Reduction, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 査読有, 109-3, 2016, pp. 345-367.
DOI: 10.1002/nme.5289
 - ⑤ M. A. A. bin Kamisan, K. Yokota, T. Ueno, H. Kinoshita, S. Homma, Y. Yajima, S. Abe and N. Takano, Drilling Force and Speed for Mandibular Trabecular Bone in Oral Implant Surgery, Biomaterials and Biomechanics in Bioengineering, 査読有, 3-1, 2016, pp.15-26.
DOI:10.12989/bme.2016.3.1.015
 - ⑥ H. Kinoshita, M. Nagahata, N. Takano, S. Takemoto, S. Matsunaga, S. Abe, M. Yoshinari and E. Kawada, Development of a Drilling Simulator for Dental Implant Surgery, Journal of Dental Education, 査読有, 80-1, 2016, pp.83-90.
<http://www.jdentaled.org/content/80/1/83>
- ほか 1 件 (査読有)

[学会発表] (計 20 件)

- ① 林洗弥, 田原大輔, 高野直樹, 本間慎也, 松永智, 矢島安朝, 口腔インプラント手術シミュレーターにおける力覚学習の評価—歯科学知識の有無と継続的な使用が学習に与える影響—, 日本機械学会第 30 回バイオエンジニアリング講演会, 京都大学, 2017 年 12 月.
- ② 西川航矢, 高野直樹, 松永智, 本間慎也, 矢島安朝, 歯科インプラントのサイナスリフトを模擬した洞底粘膜の力学的試験,

- 日本機械学会第 28 回バイオフロンティア講演会, 徳島大学, 2017 年 10 月.
- ③ 高野直樹, 口腔インプラント手術におけるドリリング時の力覚体感装置の開発と応用, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, 北海道大学, 2017 年 10 月.
- ④ 西川航矢, 高野直樹, 松永智, 本間慎也, 矢島安朝, 上顎インプラント手術において洞底粘膜に生じるひずみ分布の予測, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, 北海道大学, 2017 年 10 月.
- ⑤ 高野直樹, 歯科インプラント手術における下顎海綿骨ドリリングと上顎洞底粘膜挙上に関するバイオメカニクス研究, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 埼玉大学, 2017 年 9 月.
- ⑥ 高野直樹, 確率均質化法による海綿骨の力学的特性にみられる個体差の予測, 第 37 回日本骨形態計測学会, 大阪国際会議場, 2017 年 6 月.
- ⑦ 高野直樹, 井元健二, 松永智, 本間慎也, 矢島安朝, 歯科インプラント手術における海綿骨ドリリング荷重の確率的予測と力覚体感装置の開発, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月.
- ⑧ N. Takano, Applications of Stochastic Multiscale Modeling of Inter- and Intra-individual Differences, The 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII), Seoul, Korea, 2016 年 7 月. (招待講演)
- ⑨ N. Takano, M. A. A. bin Kamisan, F. Nakamura, H. Kinoshita, S. Matsunaga, S. Abe, S. Homma and Y. Yajima, Stochastic Multiscale Analysis of Drilling Force of Mandibular Trabecular Bone with Application to Surgery Training Simulator, The 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII), Seoul, Korea, 2016 年 7 月.
- ⑩ D. Tawara, A. Kawashima and T. Tsujikami, Multiscale Analysis for Assessment of Potential Change in Mechanical Properties of Osteoporotic Bone by Remodeling, The 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII), Seoul, Korea, 2016 年 7 月.
- ⑪ 高野直樹, 木下英明, 本間慎也, 矢島安朝, 松永智, 阿部伸一, 歯科インプラント手術における海綿骨ドリリング時の力覚の定量的評価, 第 36 回日本骨形態計測学会, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター, 2016 年 6 月.
- ⑫ 林洸弥, 田原大輔, 高野直樹, 木下英明, 口腔インプラント手術における個体差・ドリル埋入角度を考慮した下顎骨のドリリング荷重解析, 日本計算工学会第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター, 2016 年 6 月.

- ⑬ 中村文哉, M. A. A. bin Kamisan, 高野直樹, 木下英明, 口腔インプラント科登院実習における骨質と力覚の教育, 日本機械学会第 28 回バイオエンジニアリング講演会, 東京工業大学, 2016 年 1 月.
- ⑭ M. A. A. bin Kamisan, N. Takano and S. Abe, Experimental Study on Drilling Force for Jawbone in Oral Implant Surgery Using Polymeric Model, The 8th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (AP Biomech 2015), Sapporo, 2015 年 9 月.
- ⑮ M. A. A. bin Kamisan, N. Takano, Y. Yajima and S. Abe, Development of Oral Implant Surgery Training Simulator with Drilling Force Sensing Capability, 21st Congress of the European Society of Biomechanics (ESB2015), Prague, Czech Republic, 2015 年 7 月.

ほか 5 件

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.keio.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高野 直樹 (TAKANO, Naoki)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号: 10206782

(2) 研究分担者

本間 慎也 (HONMA, Shinya)
東京歯科大学・歯学部・講師
研究者番号: 70408334

田原 大輔 (TAWARA, Daisuke)
龍谷大学・理工学部・准教授
研究者番号: 20447907

(3) 連携研究者

松永 智 (MATSUNAGA, Satoru)
東京歯科大学・歯学部・准教授
研究者番号: 70453751

矢島 安朝 (Yajima, Yasutomo)
東京歯科大学・歯学部・教授
研究者番号: 10183667