

令和 6 年 4 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K09969

研究課題名（和文）静電誘導型発電シートを用いたウェアラブル型リアルタイム咬合力測定方法の開発

研究課題名（英文）Development of wearable real-time occlusal force measurement method using electrostatic induction power generation sheet

研究代表者

依田 信裕（Yoda, Nobuhiro）

東北大学・歯学研究科・教授

研究者番号：20451601

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究で開発を試みた咬合力測定装置における力のセンシングデバイスは「静電誘導型発電シート」を用いた。シートを埋め込んだPET樹脂上に一定の周波数で定荷重を負荷し、荷重力とセンサ出力の関係を調査した結果、両者の間には良好な相関が認められた。また、口腔内における装置の装着感を担保するために、薄型のPET樹脂での出力を検証したところ、厚さ0.5mmのPET樹脂でも十分な出力が得られた。また、口腔内温度環境においても適切な出力が確認された。実際にマウスガード型に成型した測定装置を口腔内に適用したところ、タッピング運動や噛みしめ運動において安定した出力が得られ、咬合力測定装置としての妥当性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「咬合力」は口腔の健康を示す重要な生体情報の一つである。たとえば、最大咬合力の低下が将来的なフレイルのリスクを高めることが指摘されており、本装置により日常的に発揮される咬合力をモニタリングすることは、フレイル予防の観点においても重要な情報を提供する。また、過大な咬合力負荷により歯列や顎骨へのダメージを与えるブラキシズムに対してもモニタリング可能であり、マウスガードによる歯列へのダメージを減らすなどの対症療法効果のみならず、効率的な認知行動療法の実践に大きく貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：The force sensing device used in the occlusal force measuring device developed in this research uses an electrostatic induction type power generation sheet. When a constant load was applied at a certain frequency to the PET resin in which the sheet was embedded, a good correlation between the load force and the sensor output was found. Furthermore, we verified the output using thin PET resin to ensure the comfort of wearing the device in the oral cavity. We found that sufficient output was obtained even with PET resin 0.5 mm thick. Appropriate output was also confirmed in the oral cavity temperature environment. When a measuring device molded into a mouthguard shape was applied in the oral cavity, stable output was obtained during tapping and clenching movements, demonstrating its validity as an occlusal force measuring device.

研究分野：歯科補綴学

キーワード：咬合力 ブラキシズム 静電誘導 発電シート

1. 研究開始当初の背景

咀嚼をはじめとした機能的な下顎運動時やブラキシズム等のパラファンクショナル時に歯列上に発現する咬合力は、補綴歯科治療において歯根膜や顎骨等の支持組織、顎関節を含めた顎口腔系器官を保全し、さらに破損等を引き起こさない歯科補綴装置設計を行ううえで考慮すべき重要な因子である。特に、睡眠時あるいは覚醒時ブラキシズムは、不随意的な筋活動によるパラファンクショナルな運動であり、歯列上に発現する力は咀嚼をはじめとした機能的筋活動時よりも強大となる場合がある。また、覚醒時ブラキシズムは持続した筋収縮を伴うクレンチングが多く、軽度の筋活動による上下顎歯列の接触癖はTCH (Tooth Contacting Habit) と呼ばれ、顎関節症患者の52.4%に認められるとの報告もあり、長時間のTCHは咀嚼筋の疲労や筋痛の原因になることも示されており、これらへの対応は現在の重要な臨床課題となっている。

これらから、補綴歯科治療や顎関節症への対応において機能運動時やパラファンクショナル時の上下顎歯列上に発現する咬合接触の有無やその部位、同部位における咬合力の大きさ、すなわち歯列上咬合力分布を把握することが必要であることが導き出される。しかしながら現状では、これらを客観的に把握しうる技術はない。唯一、日常環境下においてパラファンクショナルな筋活動を把握する有効な手法は、ウェアラブル型表面筋電計による筋電図解析である。しかし、本法は筋活動記録によりパラファンクショナルの制御には有効であるものの、歯列上に発現する咬合接触や咬合力に関しては解析不可能である。

2. 研究の目的

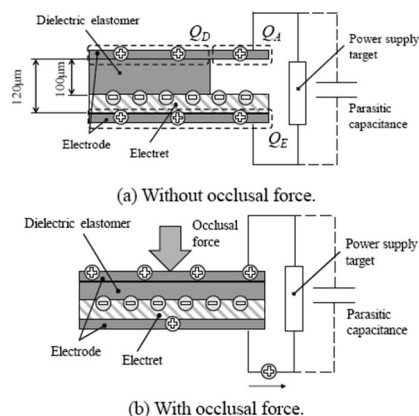
本研究の目的は、咀嚼をはじめとした機能的な下顎運動時、またはブラキシズム等のパラファンクショナル時に歯列上に発現する咬合接触の有無、その部位、咬合力を日常環境下にてリアルタイムで測定しうる技術、ならびにそれを実装したデバイスを開発することである。

3. 研究の方法

1) 静電誘導型口腔内発電シートの開発と発電量制御

本研究で開発する咬合力測定装置における力のセンシングデバイスとして、エレクトレットを活用した静電誘導型発電シートを用いる。発電シートに圧縮力が加わることで誘電エラストマーが変形し、極板に誘導されていた電荷の一部が反対側極板へ移動し、圧縮力が除荷されるとこれ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る。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・薄型化を実施する。



2) PET樹脂密閉時の出力検証(ベンチテスト)

咬合力測定装置は歯科臨床で広く用いられている口腔内装置(マウスガード)の形態とする。発電シートを歯列に適合するサイズに調製後、マウスガード材料のPET樹脂に密閉し、圧縮装置を用いて軽度の歯の接触から強い咬合力を想定した荷重の脱付加を繰り返し、その際の発電量との関連を基にシートの感度調整を行う。

また、発電量の波形解析により、荷重量に対応した電圧出力から力の大きさを算出できる解析システムを構築する。

3) 口腔内疑似環境でのシートの出力特性の検証

開発した発電シートを2枚のPET樹脂間に密閉し、歯の咬合面形態に賦形した状態にて、下顎歯列模型(E1-500AL, ニッシン社製)上に設置し、上記同様に出力特性検証を行う。

また、口腔内適用を想定し、環境温度を室温から口腔内を想定した約37℃まで変化させ、センサ出力特性を把握する。その際に、室温環境との差異についても解析する。

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行う。

4) 測定装置の生体内応用・データ解析

被験者: 健常有歯顎者5名において、試作した測定装置を応用する。

データ解析: 測定装置を口腔内に装着し、各種機能運動時における歯列上に発現する咬合接触の有無、その部位、咬合力を測定する。また、咬筋の筋電図解析を同時に行い、発電シート出力値の妥当性を検証する。

噛み締め時において、デンタルプレスケールとの同時測定を行い、発電シートの出力安定性を検証する。

得られたデータを検証し、発電シートの感度、PET樹脂への密閉方法やマウスガードへの埋入方法等、必要な改善を実施する。

5) 測定装置のウェアラブル化と無線化

ウェアラブル化の実現のため、発電シートの発電力の向上を行う。

データロガー型への改良：PET樹脂に密閉した発電シートからの配線を口腔外に排出し、小型のデータロガー装置へ電流の測定データを記録する。

測定装置の無線化：さらなる発電シートの発電力の向上を行い、無線化に必要な発電力を実現する。無線回路の小型化により、発電シートとともに無線回路をPET樹脂内に封入する。

4. 研究成果

1) 測定装置の設計と出力の妥当性の検証

咬合力測定装置はマウスガード（オクルーザルプリント）様の形態とし、歯科臨床において実際にプリント製作のために使用されるPolyethylene terephthalate (PET)樹脂を材料とし、2層のPET樹脂の間に発電シートに埋め込む方式とした。

ベンチテストにより、装置を埋め込んだPET樹脂上に一定の周波数で定荷重を負荷し、負荷荷重量とセンサ出力の関係を調査した結果、負荷荷重量とセンサ出力の間には良好な相関が認められた（図1）。

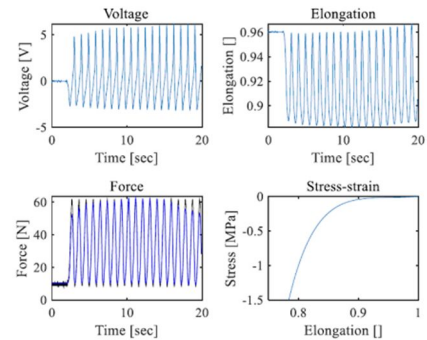


図1. 既知の荷重量とセンサ出力

2) PET樹脂の厚みが出力に及ぼす影響

実際の口腔内応用を考慮すれば、測定装置の厚みは薄くし、装着時の違和感を可及的に小さくする必要があります。そのため、装置の薄型化を実現する目的で、PET樹脂の厚みがセンサ出力に与える影響を調査した。

厚みが0.5 mm、0.6 mm、0.8 mmのPET樹脂を対象とし、発電シートを埋め込み、PET上に定荷重（10 N、20 N）の加圧および脱圧を行った。この際、加圧と脱圧との間に十分な時間間隔を確保した。結果として、どの厚みのPET樹脂においても安定した出力波形が確認された。しかし、荷重量が同一でもPET樹脂の厚みにより出力値が異なり、0.5 mm厚のPET樹脂にて出力値が大きくなった（図2）。今後、最も薄い0.5 mmのシートについて負荷荷重量とセンサ出力との関連をさらに調査し、咬合力測定装置の開発を進捗させる予定である。

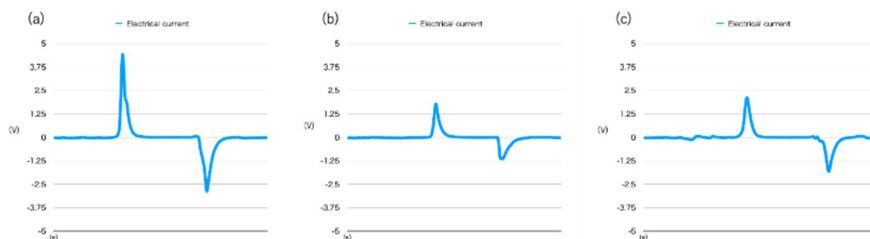


図2. 荷重-脱荷重時の出力波形の例

(a) 0.5 mm, (b) 0.6 mm (c) 0.8 mm (PET sheet thickness).

3) 咬合力シミュレータを用いた咬合力測定法の構築

本研究ではプロトタイプとして下顎左側第一大臼歯のみに発電シートを設置した。マウスガード材料は厚さ0.5 mmのPET (Polyethylene terephthalate) 製のシートを2枚使い、発電シートを包埋する構造とした。咬合力シミュレータ（図3）を用いてデンタル模型全体に荷重を負荷した際に、下顎第一大臼歯のみに荷重が加わるよう、上顎第一大臼歯部の咬合面をカバーする形態のコバルトクロム合金製のフレームを製作し、レジンセメントでデンタル模型に合着した（図4左）。

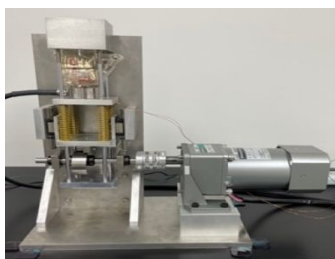


図3. 咬合力シミュレータ

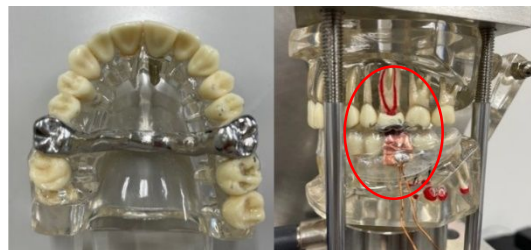


図4. 上顎メタルフレームと咬合力測定装置との接触

4) 温度環境変化が咬合力測定装置の出力に及ぼす影響の調査

デンタル模型を装着した咬合力シミュレータ全体をインキュベートカバー (I-COVER 1-7605-01 別注) で覆い、カバー内の温度を26, 30, 34, 38 に変化させ、それぞれの温度環境において荷重測定試験を実施した。各温度にて最大12N, 37N, 165 Nの3パターンの荷重を行った。それぞれの条件にて、速度300 rpm (5 Hz), 5秒間の測定を10試行ずつ測定し、その平均発電量を算出した。結果として、口腔内温度環境でも安定した出力が得られた。

一方で、温度環境の変化により、負荷荷重量に対するシートからの発電量が異なり、また温度が高いほど発電量が増加する傾向が認められた。

今回の結果から、発電シートからの出力は温度環境に影響を受けることが明らかになったため、本装置を口腔内にて使用する前のキャリブレーションは、口腔内環境温度で行う必要があることが判明した。

5) 測定装置の口腔内応用

口腔内にて荷重測定を試行したところ、タッピングやクレンチングなど上下の歯をかみ合わせる動作時には比較的安定した出力が得られた。一方、歯を左右にすり合わせるグラインディング (歯ぎしり) 時には安定した出力を得ることが困難であった。歯に加わる側方力を測定するために、センサ設置方法の更なる検討が必要であることが見出された。

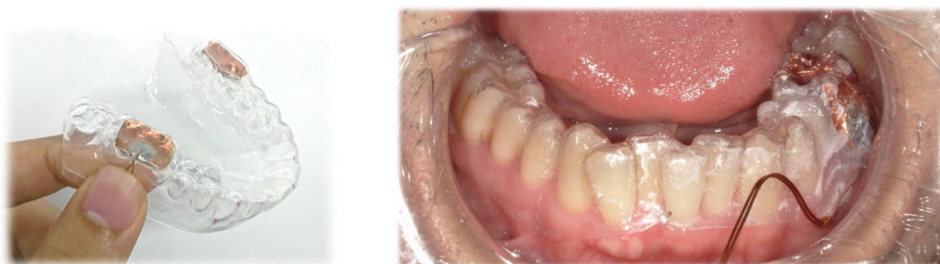


図5 口腔内装置の概要と口腔内装着状態 (センシング部は左下第一大臼歯)

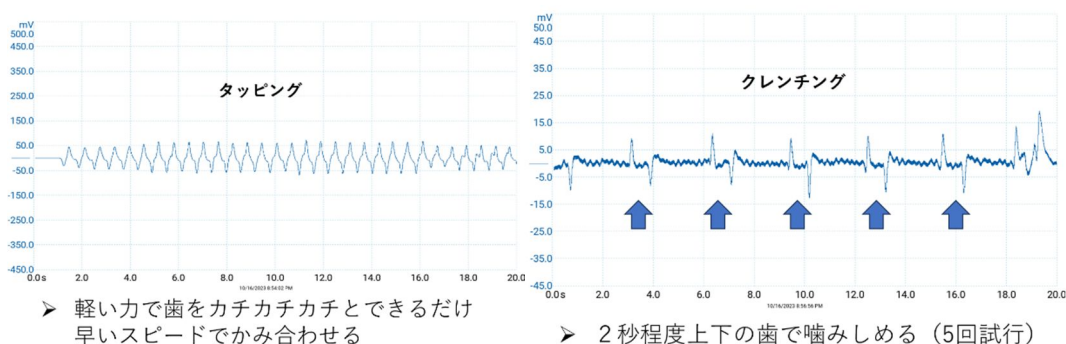


図6 口腔内測定時の出力 (タッピング運動とクレンチング5回繰り返し時)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Assoratgoon Itt, Yoda Nobuhiro, Iwamoto Maya, Sato Tomoya, Kawata Tetsuo, Egusa Hiroshi, Sasaki Keiichi	4. 巻 8
2. 論文標題 In vivo measurement of three-dimensional load exerted on dental implants: a literature review	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Implant Dentistry	6. 最初と最後の頁 52
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40729-022-00454-y	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 該当する

1. 著者名 土方亘, 松本爽, 市川健太	4. 巻 0
2. 論文標題 エレクトレットを用いた外部電源不要な触覚機能を有する人工皮膚に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集	6. 最初と最後の頁 1P1-M12
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 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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 成原大智, 依田信裕, 江草宏, 市川健太, 土方亘, 伊藤浩之.
2. 発表標題 静電誘導型発電シートを用いた咬合力測定装置の開発
3. 学会等名 令和4年度生体医歯工学共同研究拠点成果報告会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Taichi Narihara, Kenta Ichikawa, Nobuhiro Yoda, Wataru Hijikata, Hiroshi Egusa
2. 発表標題 Development of a method to measure occlusal force based on electret and dielectric elastomer
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Biomedical Engineering (ISBE2022)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Nobuhiro Yoda
2. 発表標題 Future possibility of digital denture production based on computer-aided engineering
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Digital Solutions for Education and Clinical Dentistry (ICDSECD) 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022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	佐々木 啓一 (Keiichi Sasaki) (30178644)	東北大学・歯学研究科・非常勤講師 (11301)	
研究分担者	土方 亘 (Wataru Hijikata) (30618947)	東京工業大学・工学院・准教授 (12608)	
研究分担者	伊藤 浩之 (Hiroyuki Ito) (40451992)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授 (12608)	

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
---------	---------