感圧導電ゴムを用いた圧力センサの改良

－ 咬合面形態への適合性に対して －

篠崎直樹, 長谷 誠, 石田哲也, 相馬邦道

東京医科歯科大学歯学部歯科矯正学第一講座 (主任: 相馬 邦道教授)

[受付: 平成 7 年 4 月 3 日]

Improvement of a flexible sensor with pressure sensitive rubber

-In respect of the conformation to the occlusal surface of the teeth-

Naoki Shinozaki, Makoto Hase, Tetuya Ishida, Kunimichi Soma

The first Department of Orthodontics, Faculty of Dentistry, Tokyo Medical and Dental University

(Director: Prof. Kunimichi Soma)

[Received: April 3, 1995.]

Key Words: bite force sensor, pressure sensitive rubber, conformation

Abstract: We have improved the bite force sensor so that it can be conformed to the occlusal surface of the teeth and measure the occlusal force distribution. The pressure sensitive rubber, which is the core of the sensor, is soft enough to fit the complicated shape of the surface; and in order not to spoil this merit, we therefore introduced newly devised electrode into this sensor. The electrode is particularly processed to be coil shaped, hence the sensor flexibility is not limited.

In the practical use of this sensor we have blended our basic experience and its clinical application. In our prior experiment, we pushed a metal ball onto the sensor, compared its transformation to the surface of the ball, and found that the conformity of the sensor to the metal ball was satisfactory. As a result, we were encouraged to use the sensor clinically and have been able to measure the occlusal force distribution.

These findings suggested that this sensor could be clinically useful as a new bite force sensor.

抄録 咬合面に形態的に適合し, 咬合力を分布として測定可能な咬合圧センサを作製した. 感圧素子としての感圧導電ゴムは物性として柔軟であり, 複雑な形態に適合可能であるという利点を有する. そこで, この利点を活かすためにセンサを構成する電極に改良を加えた. すなわち, コイル状の伸縮可能な導線を電極として用い, 感圧導電ゴムのもつ形態的な自由度を規制しないようにした.

ついで, 本センサを用い基礎的検討及び臨床応用を行った. 基礎的検討としては, 剛体である金属球をセンサ表面に押し込んだ際のセンサの変形表面形状と金属球の既知表面形状との比較試験を行った. また, 各測定点から出力される値が隣接する測定点における圧力の影響を受けないかどうか, すなわち, 出力値の独立性について調べた. その結果, センサの表面は金属球の表面形状にほぼ近似した変形を示し, 形態適合性は良好であった. また, 各測定点からの出力値の独立性も良好であった. また, 臨床応用として大白歯部の咬合力を測定したところ, 時間の経過に伴う咬合力の推移を分布荷重をして捉えることができた.

I. 緒 言

従来より、咬合圧を精確に測定することは、歯科医学の基本的な課題であり、種々の咬合圧センサが作製されてきている^{1)~5)}。これらを測定対象からみると、大臼歯部に測定範囲を限局し咬合力の大きさを対象としたものの、咬合面部全体を対象とし咬合力を分布として捉えるものの2つに大別することができる。このうち、咬合面部全体を対象とする圧力センサとしては、その感圧素子に種々のものが用いられており、代表的なものとして、マイクロカプセル、圧電塗料、感圧導電ゴムを挙げることができる。マイクロカプセルを用いるものの一つとしてプレスケール¹⁾が、また、圧電塗料を用いるものとしてT-scan システム^{2)~4)}が知られているが、これらは厚みが薄いため、測定が可能なのは咀嚼の終末状態である噛みしめ時、すなわち一時点の点接触状態のみであった。

これに対し、感圧導電ゴムを用いたもの^{5), 6)}は厚みがあることから、咬合終末期の咬合高径の差異に対して適用でき、上下顎歯の咬合面間距離の経時的変化に対応した咬合圧を測定することが可能と考えられる。しかしながら、従来のものは、その被膜が硬く伸縮性を持たないため、感圧素子自体が持つ柔軟性を生かしきれず、結果として咬合面に対する形態適合性を欠くものであった。

そこで、我々は咀嚼時の咬合圧の変化を経時的に測定することを目的として、感圧導電ゴムのもつ柔軟性を生かすよう、電極および被膜に工夫を加えることにより、複雑な曲面形態に適合可能である咬合圧センサを開発してきている⁷⁾。

今回は、この咬合圧センサに対し、基礎的検討および臨床応用を行ったので報告する。

II. 咬合圧測定システムの概要

本システムは、センサ部、電子制御部、演算部より構成される。

センサ部は図1に示すように、中心に感圧導電ゴムを配した5層構造を有している。感圧導電ゴム（厚み：0.46mm）はほぼ歯列弓全体を覆う大きさとし、その上下面を被膜としてシリコンゴムシート（厚さ：0.5mm）で被覆した。シリコンゴムシートには溝（深さ：0.25mm）を加工し、それぞれ導出電極として67本のワイヤーを間隔1.0mmにて配置し、上下面で互いに直交するように配置した。測定点は、この感圧導電ゴムを介して直交している各電極の交点からなるものである。このワイヤーは、伸縮性を有するよう、線径0.05mmのステンレス線を外径0.22mmとなるようにコイル状に加工したものである。圧力センサの構成部材である、感圧導電ゴム、コイル状電極、シリコン被膜はそれぞれ伸縮性を有し、圧力センサ全体としても伸縮可能であるという特色を有する。実際の測定に際しては、センサ全体を弾性に富むビニール製マスキングシートで覆い使用することとした。

本センサの測定原理は、以下の通りである。すなわち、圧力変換素子としての感圧導電ゴムは、不導体であるシリコンゴムの中に、三次元的な連鎖構造を形成している導体のカーボン粒子が散在しているものである。圧力が加わらない状態では、カーボン粒子の連鎖構造は互い

図1 咬合圧センサの構造

Fig. 1 The structure of the bite force sensor

図2 特性曲線

Fig. 2 The calibration curve

に接触しておらず、厚み方向の抵抗は非常に大きくなり、ほぼ絶縁状態にある。これに対し、感圧導電ゴム表面に圧力が加わると、この連鎖構造は互いに接触し始め、圧力の増加とともに連鎖構造の接触比率が増加し、厚み方向の抵抗値が作用圧力に反比例して減少していく。この特性を利用すれば圧力を電気量に変換することが可能となる。

さらに、この測定点から出力された値は、電子制御部において増幅され、演算部に導かれる。

演算部においては、専用のソフトウェアにより、デー

タ処理が行われる。主な機能としては、連続測定、採得された咬合力の色づけや等圧線による二次元表示、圧力値を高さとした三次元グラフィックス表示が挙げられる。また、測定データは、テキストデータとしてハードディスクや光ディスクに保存可能であり、種々の数値処理に供することが可能である（イナバゴム社製、イナストマーシステム PXH-128）。

III. 方法および結果

1. 基礎的検討

1) 本センサの特性について

感圧導電ゴムは素材の持つ特性として、加圧量に応じて電気抵抗値が変化するという性質を示す。図2に本センサの特性曲線を示す。図は一定荷重を50回繰り返しセンサに加えたときの平均値である。結果は咬合力を想定した0.2～0.5Kg/mm²でほぼ直線上に乗っていた。

また、複数回の測定においてもほぼ同一直線上に値が集約されることが確認され、再現性は良好であった。

2) 形態適合性について

センサの持つ形態適合性の検討として、測定対象物に対する接触状態の試験を行うこととした。すなわち、剛体である金属球を、センサ表面に押し込んだ際の、センサ表面の変形形状と金属球の表面形状の比較検討を行った。

まず、センサ表面に、シリコーン印象材（フィットチェッカー；GC社製）を塗布し、印象材が硬化するまで、その上から直径4mmの金属球を、圧方向の変位が0.5mmになるように押しつづけた。ついで、印象材をセンサ表面から可及的に永久変形を起こさないように剥離し、さらに、測定対象物である金属球の上に乗せ、この印象材

図3 センサ部の形態適合性

Fig. 3 The conformation of the sensor

図4 測定物（金属球）に対する出力例

Fig. 4 Out-put of the sensor

図5 有限要素モデル

Fig. 5 FEM model

の表面形状（センサ側）を、非接触型表面形状測定装置（小野測器社製：XA-100）を用いて測定した。

その結果、金属球の中心からセンサ表面に投影した点から半径1.25mmの範囲で、金属球とセンサ表面とは接触状態を呈していた。（図3）

3) 測定データの分解能について

(1) 本センサを構成する感圧導電ゴムは、咬合圧測定システムの概要の項でも述べたように、シリコンゴムの中にカーボン粒子が均一に散在しており、特異的な方向

性が存在しないことから、三次元的にどの方向にも形成可能であり、測定対象物が近接している場合には、隣接した測定点の電気抵抗値の変化を測定してしまう危険性がある。そこで、隣接した測定点間の距離と付与した変形量とが電気抵抗値に与える影響を検討するため、直径4mmの金属球を、5mm、8mm間隔に配列した圧子を作製し、センサに対して、圧方向の変位が0.5mmになるように押しつけてみた。

その結果、出力の幅が一定な圧力勾配が規則的に出現していた。（図4）

(2) 上記の出力値が、いかなる応力状態から生じたものであるか検討するため、有限要素法を用いて以下の解析を行ってみた。まず、図5に示すように、有限要素モデル（節点数191、要素数124）を作製した。このモデルは、測定用の圧子である直径4mmの金属球および感圧導電ゴムから構成されるものであり、同一のものの繰り返しおよび前後左右方向の対称性を考慮した、1/4の部分的なモデルである。このモデルに対し、金属球の圧方向への変位が、0.5mmとなるように荷重を加え、感圧導電ゴムに生じる応力を解析した。

その結果、圧縮応力については、金属球の中心からセンサ表面に投影した点付近に応力集中が認められた。一方、剪断応力は、中心付近はなだらかに分布しているのに対し、周辺に至っても比較的高い応力値を示していた（図6）。

2. 臨床応用

本センサを実際に咬合圧測定に応用してみた。センサ

図6 有限要素解析
Fig. 6 FEM analysis

図7 咬合力の表示例
Fig. 7 The display of the bite force distribution

部が咬合面全体を覆うように口腔内に挿入し、被験者（成人男子34歳）に最大かみしめ状態まで徐々に加圧させた。測定時間は約5秒間であり、その間の記録は0.5秒ごとの10時点からなるデータとして記録した。

図7にはその中で第5画面と第10画面を示す。咬合力の分布状態を二次元の色づけ表示している。

IV. 考 察

1. センサの特性に対して

本センサは、今回用いた荷重内において、直線性、再

現性ともに良好であった。しかしながら、本センサの圧力変換素子である感圧導電ゴムは、シリコンゴムをその主な素材としており、一定荷重の下で時間経過とともにひずみが増加すること、すなわちヒステリシス現象が生じることが予想される。実際、同一素材を用いて前回作製したセンサ⁷⁾では、その現象が観察された。

しかしながら、本実験においては主に咬合力を加える過程、すなわち、荷重時を対象としていることから、基礎的検討により求められた特性曲線（図2）を用いることに問題ないものと思われる。ただし、今後、咬合力を減じる過程、すなわち除圧過程を対象として測定を行う

図8 咬合面に対応したセンサの変形

Fig. 8 The transformation of the sensor to the occlusal surface of the tooth

際には、ヒステリシス現象を考慮する必要があるものと思われる。

2. 形態適合性に対して

従来より用いられてきた咬合圧センサは、その目的を力の大きさや分布の測定に主眼を置いており、歯の形態に適合した状態での圧力測定は考慮されていなかった。形態的な適合性を重視するためには、圧力センサ自体に厚みと柔軟性が必要であり、その目的のためには感圧素子として、感圧導電ゴムが有効であると考えられる。

しかしながら、従来、感圧導電ゴムを用いたセンサは、センサを構成する電極が伸縮性を持たないことより、感圧導電ゴムの持つ柔軟であるという利点を生かすことが難しく、面積の大きな測定対象物に対してはある程度接触圧力分布を測定することが可能であったが、面積の小さな対象物に対しては、適用困難とされてきた。

形態適合性についての検討結果において、接触域は金属球の中心からセンサ表面に投影した点から半径1.25mmであった。これに対し、単純な幾何学的な近似計算から、接触域は1.32mmであるので、本センサの曲面形態に対する接触状態は良好であると思われる。

また、センサ表面の咬合面に対する形態適合性を調べる目的で、上下顎歯列模型咬合面部をセンサに対して押しつけてみた。その第一大臼歯部の表面形状を図8に示す。咬頭頂を中心に広い範囲にわたり良好な接触状態を示していた。

このように、電極および被膜に改良を加えることによりセンサ全体に柔軟性を与えることができ、比較的小さな測定対象物に対しても形態的に適合可能となり、接触

圧力の測定範囲を拡大できたものと思われる。

3. 分解能に対して

形態適合性の検討結果から、直径4mmの金属球をセンサに対して、圧方向の変位が0.5mmとなるように押しつけたときには、金属球の中心からセンサ表面に投影した点から1.25mm付近まで、センサと金属球表面とは接触していた。

一方、金属球を、5mm、8mmと離れたときにみられる出力値は約1.5mmでほとんど原点に戻ることから、本センサの出力は測定対象物の接触端から外側に出力されるものの、その値は少なくとも0.5mm以下と考えることができる。すなわち、今回作製したセンサの電極間距離は1mmであることから、各測定点から出力される値は、各々独立していると考えられる。

また、^{1),2)}の結果を考えあわせると、測定物の接触部位から少し離れたところでは、ほとんど出力がみられないことから、出力は主に圧縮応力の影響を受けていると考えられる。

4. 今後の展望

今回作製した咬合圧センサにおいては、圧電素子である感圧導電ゴムはシリコンゴムからなるものであるため、その厚みを増減することが可能である。また、センサを覆う被膜に対しても、様々な形状や物性の変化を与えることが可能である。このような利点を生かすことにより、種々の咬合高径や、様々な食塊に対する咬合状態を模した咬合圧の測定が可能となるとと思われる。これらを目標として、現在センサを改良中であるとともに、被験者からの測定を行いつつあるところである。

V. 結 論

咀嚼時の咬合圧の変化を経時的に測定することを目的として、感圧導電ゴムのもつ柔軟性を生かすことより、複雑な曲面形態に適合可能である咬合圧センサを開発した。すなわち、導出電極にはステンレス線をコイル状に加工したものを、被膜にはシリコンゴムを用いた。

この咬合圧センサに対し、基礎的検討および臨床応用を行った。その結果は以下の通りである。

1. 基礎的検討

- 1) 咬合圧を想定した荷重範囲内で、直線性および再現性ともに良好であった。
- 2) 金属球をセンサ表面に押しつけた際の表面形状の測定結果から、形状適合性は良好であると思われた。
- 3) 金属球をセンサ表面に押しつけた際の圧力測定結果から、センサの分解能は良好と思われた。また、その有限要素解析の結果から、出力は主に圧縮応力から生じているものと考察された。

2. 臨床応用

実際に被験者の咬合力測定に応用してみたところ、咬合圧を分布として、かつ経時変化として、数値的、視覚的に捉えることができた。

以上より、本センサは、臨床の場において新たな咬合圧センサとして有用であることが示唆された。

文 献

- 1) 木下四郎, 福田光男, 田口章太ほか: プレスケールを用いた咬合接触面積および咬合圧の新しい測定法について, 日歯周誌, 21: 475-484, 1979.
- 2) 金田隆, 富山文信, 鈴木宏巳ほか: 新しく開発されたコンピュータ咬合診査装置「T-Scanシステム」について, 日本歯科評論, 556: 66-77, 1989.
- 3) 徳村和明, 山下敦: 咬合分析装置 T-Scan system に関する研究. その1. 精度について, 補綴誌, 33: 1037-1043, 1989.
- 4) 徳村和明, 山下敦: T-Scan system に関する基礎的研究. その2. ホットセンサの圧感受特性について, 補綴誌, 35: 1214-1219, 1991.
- 5) 中島昭彦, 一ノ瀬元史, 高濱靖英ほか: 咬合面積と咬合面圧分布の電氣的測定システムの開発に関する研究, 日矯歯誌, 49: 37-46, 1990.
- 6) 原利明, 中部昇, 古賀良生ほか: 感圧導電ゴムを用いた関節内接触圧力分布測定システム, 日本機械学会論文集, 58: 152-157, 1992.
- 7) 篠崎直樹, 高久田和夫, 宮入裕夫, 相馬邦道: 感圧導電ゴムを用いた圧力センサの顎関節模型への適用, 歯科材料・器械, 11: 1019-1022, 1992.