

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26462927

研究課題名(和文)インプラント補綴の個別最適設計を可能にするMEMSを用いた生体内モニタリング

研究課題名(英文) In-vivo monitoring using MEMS for the individual optimal design of implant prostheses

研究代表者

松下 恭之 (MATSUSHITA, Yasuyuki)

九州大学・大学病院・准教授

研究者番号：60159150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、応力の時間領域における解析を行うため、極小な回路を設計したMEMSセンサを組み込み、生体内でのリアルタイムセンシングを行うことを目的とした。その結果、義歯に添付可能なサイズのインプラントセンサー用2.4GHzモノポールフィルムアンテナを作製し、頬粘膜の存在でも、1.5cm程度の距離であれば、口腔外での送受信が可能であることが示された。次に、アタッチメントの違いがインプラントへの応力分布と義歯の変位に与える影響についての評価を行い、ロケーターでは、インプラント部のひずみは他のアタッチメントよりも小さく、また義歯の変位も最も小さいものであった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to analyze stress in the time domain using MEMS sensor designed with a small circuit. As a result, 2.4 GHz Monopole Film Antenna for Implant Sensor that can be attached to the dental prosthesis was prepared, even in the presence of the buccal mucosa, if it is about 1.5 cm distance, it can transmit and receive outside the mouth. Next, the influence of the difference in attachment on the stress distribution on the implant and the displacement of the denture was evaluated. In the locator, the strain of the implant part was smaller than that of the other attachment and the displacement of the denture was the smallest.

研究分野：インプラント

キーワード：インプラント MEMS

1. 研究開始当初の背景

近年、歯科インプラント治療の普及がめざましいが、咀嚼の際の過大な応力が発生することによる上部構造の破損、インプラントの脱落などの機械的偶発症が発生する可能性がある。またインプラント周囲炎などの生物学的反応を主とした生物学的偶発症も報告されており、応力の時間領域における解析や炎症の予知物質である各種酸化物や酸性度などの生物学的マーカーを生体内でモニタリングすることができれば、これらの二大偶発症を減らすことにつながると考えられる。また応力の解明により治療期間の短縮につながるメリットなどもあると予想される。ひずみをはじめとする生体内での各種マーカーを同時にセンシングするため、極小な回路を設計したMEMSセンサーを組み込み、生体内でのリアルタイムセンシングを行う方法を開発している。しかしながらMEMS技術の進展により極小なMEMSセンサーを開発できたとしても、そこからの出力が有線であれば、口腔内から口腔外へワイヤーが垂れ下がることになり、咀嚼運動は大きな障害を受け、生理的な状況とは全く異なってしまう。そこで、医療分野での応用が注目されているボディアリアネットワーク(BAN)の応用を試みた。これは体の表面、中およびそのごく近辺に配置されている小型端末を無線通信で結ぶことによって構築される無線ネットワークのことであり、体温、心電図、脈拍、3軸加速度計などの各種センサーを取り入れることによって、体の健康状態と活動状況をリアルタイムに同時にモニタすることを目的としたもので有る。

2. 研究の目的

本研究では、応力の時間領域における解析を行うため、極小な回路を設計したMEMSセンサーを組み込み、生体内でのリアルタイムセンシングを行うことを目的とした。

3. 研究の方法

実験1：インプラントセンサー用 2.4GHz モノポールフィルムアンテナの開発

【アンテナ構造】

口腔内という限定された空間内で使用するサイズとして、まずはインプラントオーバーデンチャーに貼付できるサイズである、高さ8mm、長さ35mmとした。義歯上に貼付して使用が可能であるようにフィルム状とした。そのため、厚さ0.254mm、比誘電率3.5のフレキシブル基板上にアンテナを設計し、給電方法として、片側接地導体のみを残したコプレーナ線路を、またコネクタにはU.FL-R-SMT(ヒロセ製)を使用した。アンテナはモノポールで2.4GHz帯で動作するものとした。

【アンテナ特性の検証】

モノポールフィルムアンテナの通信特性をSAW温度センサーからのデータとして計測するとともに、以下の影響を調査した。

(1)アンテナを円筒形に湾曲した場合の通信状況

(2)インプラント義歯に貼付した場合の通信状況

(3)送信アンテナと受信アンテナの距離を変化させた場合の通信状況

【肉片を用いた通信試験】

送受信機には利得8.5dBiのパッチアンテナを用い、ブタロース薄切り肉で空隙5mm、距離5cmでアンテナ周囲を被覆し、通信時のSN比を計測した。なお、この試験でもSAW温度センサーを用いて、温度データの信号を受信する感触試験とした。

【ヒト口腔内での通信検証】

30歳男性の歯列模型をもとに作製したレジン製スプリントにSAW温度センサーとモノポールフィルムアンテナを貼付し、送受信試験を行い、SN比を計測した。

実験2：アタッチメントの違いがインプラントへの応力分布と義歯の変位に与える影響の測定

下顎無歯顎模型(G1-402B,ニッシン社,京都)の両側の切歯-犬歯間部にインプラント(GC社製,Setio 4.4mm 10mm)を埋入し、これらを維持・支持としたIODを作製した。粘膜はシリコーン印象材(GC社製,東京)を用いて2mm厚で作成した。実験に用いたアタッチメントはバーアタッチメント(CMバー,Swiss),ボールアタッチメント(GC社製,東京),ロケーター(GC社製,東京)の3種である。これらを同一模型上で交換し、インプラントに締結して使用した。またオーバーデンチャーも共通のものとして、フィメールを交換して実測に用いた。下顎義歯の6相当部に50Nの静的垂直荷重を、オートグラフ(島津社製,AG-IS,京都)を用いてクロスヘッドスピード10N/minで負荷し、当該部の義歯の変位とアバットメントに発生するひずみの測定を行った。ひずみの測定に関しては、ストレンゲージ(KFR-02N-120-C1-16,共和電業社製,東京)をアバットメントの遠心,頬側,近心,舌側に軸方向と平行に貼付し、それぞれ右側インプラントでのひずみゲージの位置をそれぞれR1,R2,R3,R4とした。同様に左側のインプラントではアバットメントの遠心,頬側,近心,舌側に軸方向と平行に貼付し、それぞれL1,L2,L3,L4とした。

義歯の変位は、非接触式レーザープローブ(SMARTSENSOR,OMRON,京都)を用いて、両側の大臼歯部,前歯部正中の3点の変位をx,y,zの3軸方向の動きとして光学的に測定した。

4. 研究成果

実験1結果：

【アンテナ特性の検証】

1.8 μ secと2.0 μ secとでピークを示しており、このピーク強度が強いほど受信感度が高

いことを示している。外からこのアンテナに電波を出すと、アンテナで直接反射された電波によるピークが1.8 μ secで、アンテナからセンサーを通った後に帰ってきた電波は2.0 μ secの遅延を示しており、センサー通った後帰ってきた電波であることが示された。アンテナ入力部における反射係数を計測した結果、2.4GHz帯でS11 -16dBを実現し、2.45GHzでは-22dBを実現できた。円筒上に添付したアンテナの2.4GHzにおける放射パターンは、アンテナの前方と後方とに、対称に電波を放射していることが示された。アンテナを円筒上に貼付した場合と義歯に取り付けた場合の受信感度と通信距離の関係評価した結果、いずれもピークは1.8 μ secと2.0 μ secに見られるが、通信距離が10cmでのノイズのレベルが前者では-60dBで有るのに対し、後者では-50dBと上昇しているのが認められた。義歯は完全な円筒形場をしていないために反射の違いが影響していると考えられる。義歯に貼付した場合と円筒に貼付した場合とのSN比を比較した結果、どちらの場合も通信距離が遠くなる程、受信感度の劣化が認められた。特に通信距離が20,30cmでは義歯に貼付したほうが、SN比が1~2dB高い値を示しているのが認められた。

【肉片を用いた通信試験】

アンテナの上から肉片で被覆した場合と被覆しない場合でのSN比を比較した結果、肉片(厚さ1mm)があることで、SN比は20dBの減少を示している。つまり肉片があると、信号は通りにくくなる。肉片とセンサーとの間に5mmの間隙を設けた場合と0mmとした場合のSN比を肉片の厚みごとに計測したもので有る。肉片が厚くなる程SN比の減少を認める。また肉片とセンサー間に5mmの空隙があるほうがSN比は高く保たれていた。

【ヒト口腔内での通信検証】

ヒト口腔内に置いたアンテナ上の口唇(厚み11.2mm)からの距離を変化させたときの受信感度を計測した結果、距離が15mmの場合のほうが2mmの場合よりも受信感度は減少していた。この時のSN比を通信距離ごとに求めると、15mmではおよそ半分のSN比となっており、口腔内のアンテナと受信アンテナとの距離は近いほど良いことが示唆された。

実験1考察および結論：

欠損補綴に対して、従来は可撤性粘膜支持型の義歯が用いられてきた。1960年代より臨床の現場に投入されたオッセオインテグレーションタイプのインプラントはその予知性も、また患者の満足度も高いことが多くのエビデンスにより証明されている。しかしながら、臨床での応用が始まってからほぼ50年が経過し、多くの偶発症の発生も報告されている。Goodacresらによれば、スクリューのルーズニング、破損、インプラントの破折(1%)、など補綴に絡んだ偶発症の発声が報

告されている。これらはSEM観察によれば、金属疲労によるもので、咀嚼といった咬合力の繰り返し負荷が直接の原因と考えられている。これらの偶発症の発生を回避するには、まず加わりうる咬合力の特徴を知ることであり、スタティックではなく、生理的な咀嚼といった動的な咬合力のデータの入手が必要である。Mericske-Sternはその先駆者で、固定性インプラントや義歯のひずみを生体内で計測しており、その論文は現在でも貴重な情報となっている。しかし、口腔内で発生した電気信号を口腔外に取り出すために、直接絶縁したケーブルをひずみゲージにつなぎ、口腔外へ出す方法がとられてきた。最大咬合力のような静的な咬合力の計測には問題は無いが、実際の食物を咀嚼するには、自然な状況とはとても考えられない状況であった。口唇を完全に閉じた状態での咀嚼を行うには、信号を無線で送受診する方法が望まれる本研究では歯科インプラントセンサー用2.4GHzモノポールフィルムアンテナを作製した。口腔内に挿入でき、義歯には添付ができるサイズである。頬粘膜の存在でも、1.5cm程度の距離であれば、口腔外での送受信が可能であることが示された。

口腔内のひずみ、温度などの状態をセンシングしたデータをワイヤレスで通信できるモノポールフィルムアンテナを開発した。インプラント義歯を用いた患者では、使用可能であることが示唆された。

実験2結果：

50N荷重時の各アタッチメントでの同部のひずみを計測した結果、Barでは、荷重側の頬側に大きな圧縮ひずみが発生しているのが認められた。非荷重側では、逆に近心と頬側に大きな引張ひずみの発生が認められた。Ballでは、荷重側で圧縮ひずみが、非荷重側でもより大きな圧縮ひずみの発生を認めた。一方、ロケーターでは、荷重側の頬側のみに圧縮ひずみが、それ以外では引張ひずみが認められ、右側のインプラントに曲げが生じている様子が認められた。非荷重側では、頬側に圧縮ひずみが、それ以外では引張ひずみの発生が認められた。

50N荷重時の各アタッチメントを用いた場合の義歯の変位を計測した結果、Barアタッチメントにおける荷重側(右側)臼歯部の変位は3軸ともに、小さいものであった。正中部でも同様に動きは小さく、垂直的な動きよりも、やや側方に変位足したことが示された。しかし非荷重側(左側)大臼歯部はやや大きな浮き上りを示した。Ballでは荷重側大臼歯部での変位はBarに比べ小さくなっているのが認められた。正中部でも水平面内での変位量が大きくなった。ことに非荷重側での最大の浮き上がりを示した。ロケーターでは、荷重側の大臼歯部の変位はBarと同程度で、小さいものであった。また正中部の動きもBarと同程度に小さいもの

で有った.非荷重側での変位量は浮き上りを示し,これもBarと同様の傾向であるが,Barに比べ,浮き上がり量は小さいものであった.

実験2 考察および結論:

(1)IODの評価方法

インプラントの上部構造としてオーバーデンチャーを選択する利点として,以下のような点があげられる5).

治療計画ならびに製作方法がシンプルである

インプラントの本数が少なくて済む
リップサポートを含めた前歯部ならびに顔貌の審美性の回復が容易である

可撤性であるため清掃が容易である

インプラント周囲からの発音障害(息漏れ)が少ない

患者,術者ともに省時間,省コストである
しかしながら,ボーンアンカーブリッジに比べ,支台数が少ないことから,長期的成績が懸念される.

Jemtらによれば,オーバーデンチャーの支台となったインプラントの生存率は固定性の上部構造に比べて低い値となっている.その原因として,

欠損の大きさに対してインプラントの数が少ないこと,ならびに床下粘膜とインプラントとの被圧変位量の差のためにimplantには過剰な負荷が発生している

床の存在がインプラント並びにアバットメントの自浄性を阻害している

などが考えられる.そこで,IODを長期的に成功させるには,上述の点から,1)インプラントに加わる荷重を過剰にならないようにし,清掃のしやすいアタッチメントを選択することが重要となる

また,部分床義歯の装着中断の原因を探ったBurnsら,Davidらの報告によれば,義歯の不安定性をその原因に挙げている.したがって,インプラント支台への負担過重の最小化と同時に義歯の動揺の最小化という相反する原因を同時に考慮する必要がある.本研究では,バーアタッチメント,ボールアタッチメント,ロケーターアタッチメントの3種類において,インプラントへの負荷量と義歯の動揺を同時に捉え,各アタッチメントの力学特性の検討及び比較を行った.

(2)アタッチメントの違いがインプラント義歯の安定に及ぼす影響について

バーアタッチメントでは荷重部位および正中部ともに変位は小さく,義歯が動きにくい状態となっていることが示唆された.しかしながら,クリップの荷重側の端点を支点として,非荷重側の臼歯部で義歯が浮き上っている状況が認められた.ボールアタッチメントでは,バーアタッチメントに比べ,荷重部の沈下量は大きく,また正中部,非荷重側の大臼歯部ともに動きが大きくなっているのが認められた.ことに非荷重側の大臼歯部では,

大きな浮き上りが認められた.また側方への動きは3つの中で大きい.ロケーターアタッチメントでは,1次固定を行ったバーアタッチメントとほぼ同等の少ない変位量を示し,単独アタッチメントでもボールアタッチメントと異なり,義歯の動きを拘束していることが示された.側方への動きも少なく,使用している患者の高い満足度を裏付けるものであった.義歯をクリップでコントロールしているバーアタッチメントでは,非荷重側大臼歯部の浮き上がりが認められたが,ロケーターでも同部で同様の浮き上りを示しているが,バーアタッチメントとほぼ同程度に浮き上がりであった.Tokuhisaらは,同様の実験を行い,バーアタッチメント,ボールアタッチメント,マグネットアタッチメントの動特性を比較し,バーアタッチメントがもっとも義歯の安定が得られたことを報告している.今回の実験では,正中部の沈下量(z軸)はロケーターでやや大きくなったが,それを除くと,バーアタッチメントと同様の義歯の安定が得られた.ロケーターはインプラントに取り付けられるフィメールと維持支持を發揮するナイロンキャップが緩衝することで,荷重側のアタッチメント自体が支点となりながらも,非荷重側の義歯の動きを抑制させていると考えられる.Tokuhisaramoナイロン製のフィメールが同様の緩衝作用により,義歯の動きが少なかったことを

(3)アタッチメントの違いがインプラント義歯の荷重負担に及ぼす影響について

バーアタッチメントでは,荷重側,非荷重側の双方のインプラントに大きなひずみの発生が認められた.特に,荷重側では圧縮ひずみで,非荷重側では大きな引張ひずみの発生が認められた.それに比較すると,ボールアタッチメントでは,荷重側のインプラントの圧縮ひずみは小さく,非荷重側のインプラントで中等度の圧縮ひずみが認められた.インプラントに対しては,荷重側非荷重側ともにボールアタッチメントを押し込むような荷重が働いているものと推測された.ロケーターでは荷重側,非荷重側ともにインプラントに発生するひずみは3種のアタッチメントの中では最小であった.

(4)患者の満足できるデザインとは

両宮らは,使用中断となった部分床義歯の分析から,義歯床の動揺・破損,支台の動揺・脱落が回避できると,義歯への満足度は高いと結論づけている.つまり,インプラントへの荷重負担は小さく,義歯の動きは小さいことが望まれる.しかしながら,この2つは相反するもので有り,義歯の動きを拘束すると,インプラントへの荷重負担は逆に増加する.バーアタッチメントでは,このような現象が明白である.しかしながら,ロケーターでは義歯の動きも小さく,インプラントの荷重負担も小さいといった理想的な状況となっている.これはナイロン製のプロセッシングキャップが緩衝作用を發揮し,曲げモーメントの

発生を抑制しているためと推測される。

3 種類のアタッチメントでは、ロケータの耐久性が最も悪いと予測できるため、実際の臨床での使用に当たっては、耐摩耗性などの広範な評価項目が必要であろう。

以上のことから以下の結論を得た。

3 種のアタッチメントの力学特性には相違が見られた。

バーアタッチメントを介してインプラントに生じるひずみは他のアタッチメントに比較して大きく、荷重側よりも非荷重側のインプラントのひずみが大きくなった。しかし義歯の変位は小さく抑制されていた。

ボールアタッチメントではインプラントに生じるひずみはバーアタッチメントよりも小さいものであったが、やはり荷重側よりも非荷重側でのひずみが大きくなった。義歯の変位については、非荷重側の浮き上がりが他のアタッチメントよりも大きくなった。

ロケータでは、インプラント部のひずみは他のアタッチメントよりも小さく、また義歯の変位も最も小さいものであった。

義歯の動揺、インプラントへの荷重負担から患者の満足度を評価すると、ロケータが3種の中ではもっとも高いものであった。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

山口恭平, 吉富邦明, 松下 恭之, 金谷 晴一, インプラントセンサー用 2.4GHz モノポールフィルムアンテナの開発, 2016 年 電子情報通信学会総合大会, 2016.03.15.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松下 恭之 (MATSUSHITA Yasuyuki)

九州大学・大学病院・准教授

研究者番号：60159150

(2) 研究分担者

江崎 大輔 (ESAKI Daisuke)

九州大学・歯学研究院・助教

研究者番号：10608970

(3) 研究分担者

澤江 義則 (SAWAE Yoshinori)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：10284530

(4) 研究分担者

古谷野 潔 (KOYANO Kiyoshi)

九州大学・歯学研究院・教授

研究者番号：50195872