

# 矯正力作用時の大臼歯の動態に関する実験的解析

Measurement of first molar displacement by experimentally  
applied orthodontic force

## 磁気センサーを応用した変位測定システム

The measurement system by magnetic sensor

○吉田教明、鈴木弘之、小林和英、山田好秋\*

Noriaki Yoshida, Hiroyuki Suzuki, Kazuhide Kobayashi, Yoshiaki Yamada

長崎大学歯学部 歯科矯正学講座・口腔生理学講座\*

Department of Orthodontics and Department of Oral Physiology

School of Dentistry, Nagasaki University

### 1. はじめに

矯正治療を必要とする患者の30%近くは、上顎前突を主訴としており、この治療には上顎顎外固定装置が頻繁に用いられている。この装置を用いることによって、上顎第一大臼歯の遠心移動が行われ、その結果として上顎歯列の遠心移動および上顎骨の成長抑制がなされる。

上顎顎外固定装置における荷重量、荷重方向、outer-bowの長さの相違などの荷重条件の変化により、大臼歯は近遠心的傾斜、頬舌的傾斜、圧下、挺出など歯槽骨内でさまざまな動きを生じる。特にouter-bowの長さや荷重方向の組合せの違いにより大臼歯が挺出あるいは圧下、さらに近心傾斜あるいは遠心傾斜といった全く相反する効果を生じることが臨床上知られている。このように大臼歯を圧下、または挺出させることにより開咬・過蓋咬合を改善することが可能であり、この装置は多方面にわたって使用されている。

このように、矯正治療では上顎顎外固定装置による第一大臼歯のコントロールが大切な課題となっている。そこで、この装置による上顎第一大臼歯の動態を正確に把握し、臨床に役立てていくことが要求されている。上顎顎外固定装置の作用機序を解明するために、上顎第一大臼歯の3次元動的動態解析が必要であるが、現在までほとんど行われていない。

従来の顎外固定装置による上顎第一大臼歯の動態についての研究には、乾燥頭蓋骨の上顎第一大臼歯の歯槽窩にストレインゲージを貼りつけ、歯槽骨の歪を測定することにより歯の移動様相を解析した研究、有限要素法を用い、シミ

ュレーションモデルによる歯の変位置解析を行った研究、数式・図式によりモデル解析を行った理論解析などがある。

一方、生体における歯の変位測定については、保存歯科・補綴歯科の分野などで、数多くの研究がなされている。Mühlemann (1951年)・石橋 (1953年)らが、ダイヤルゲージを使用した変位測定装置を開発して以来、歯の動揺度を定量化しようという試みがなされてきた。ダイヤルゲージは、1/100mm(10μm)の精度で変位測定することができたが、装置が大きく前歯部しか測定することができなかった。また、歯の変位量の時間的な変化を連続的に記録することが不可能であった。そこで、電気的な変位測定法が取り入れられるようになった。これによって、連続的な変位置測定が可能になり、歯周組織の力学的性状がさらに明らかとなった。また、歯の動揺度を時間的な要因を含めて解析することで、歯周組織が粘弾性体であることがわかった。ところが、ストレインゲージを使用した装置は、小型・軽量で臼歯部の測定には適していたが、接着性や温度・湿度特性に問題があり、口腔内での使用は困難である。また差動トランスを使用した装置は、精度は高いものの大型で前歯部の測定にしか応用できない。一方、磁気センサーと小型の磁石を変位計測に応用すると、1) 小型であるため、同時に複数個のセンサーを臼歯部に応用することができる。2) 温度・湿度特性がよく、口腔内に応用することができる。3) 臼歯部の変位測定を行うだけの分解能に優れ、微小変位が検出可能である、などこれまでの計測方法の欠点を解決できる。

本報告では、モデル解析の基礎的な値を得る目的でヒトの上顎第一大臼歯の動態を磁気センサーと小型の磁石を用いて2次元的に実測することを試みた。

2・測定 の原理

磁気センサーとして、磁気抵抗素子(ソニー DM-209)とサマリウム磁石(日立金属:直径3.0mm,長さ2.0mm,重さ0.17g)を組み合わせた。二次元の変位および回転を計測するため、4個の磁気センサーを長方形の各頂点に、その磁界方向が中心を向くように配置した。被測定歯の変位はこの磁石の変位を介して4個の磁気センサーによって電位変化に変換された。この4個のセンサーの出力を差動増幅器にて増幅し、同時にDC-offsetを補正した。そして100Hzのlow-pass filterにてノイズを除去したのち、12bit A/Dコンバータを介してパソコンに入力し必要な演算を行った。(図1)

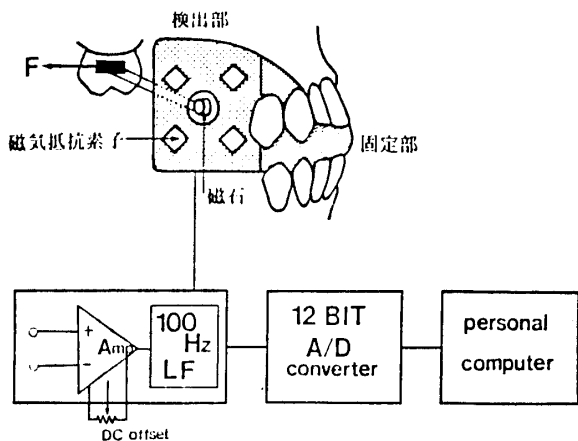


図1・変位測定システム

3・補正

磁石の変位置とセンサーの出力の関係は、非直線性を示し、センサー出力は、磁石との距離の2乗に反比例する。そこでパソコンにより、以下の式に示すような補正を行った。

$$V = k \frac{1}{L^2}$$

$$L = k \frac{1}{\sqrt{V}}$$

出力  $E = 1000 \frac{1}{\sqrt{V}}$

L: 距離(mm)  
V: センサー出力(mV)

さらにこの補正された4個のセンサーの出力(d1, d2, d3, d4)から、磁石の二次元の変位及び磁

石の回転を検出するため、図2のような演算を行った。

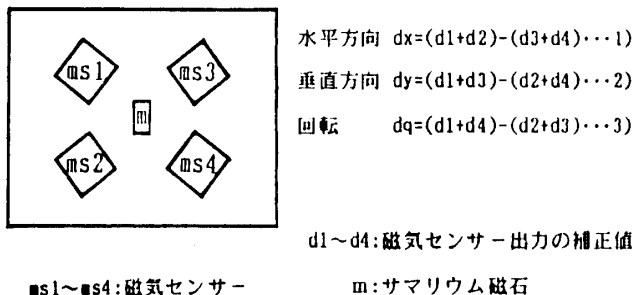


図2・磁石と磁気センサーの位置関係および変位の算出

- 1) 水平方向の変位の計算は、左側のセンサーのペアである、d1とd2の出力の和と、右側のセンサーのペアである、d3とd4の出力の和を、引き算することにより算出した。
- 2) 垂直方向の変位は、上下のセンサーの出力の差をとることにより算出した。
- 3) 回転は、対角線のセンサーの出力の差をとることにより算出した。

4・キャリブレーション

変位測定装置のキャリブレーションは口腔外で行った。このため磁気センサーを安定した台に固定し、磁石をマイクロマニピュレーターに取り付けた。このマイクロマニピュレーターを1μmの精度で直読可能なデジタルゲージ(ソニーマグネスケール:LF-20)に接続し、磁石を移動した時の磁気センサーの出力をデジタルゲージの値で校正した。(図3)

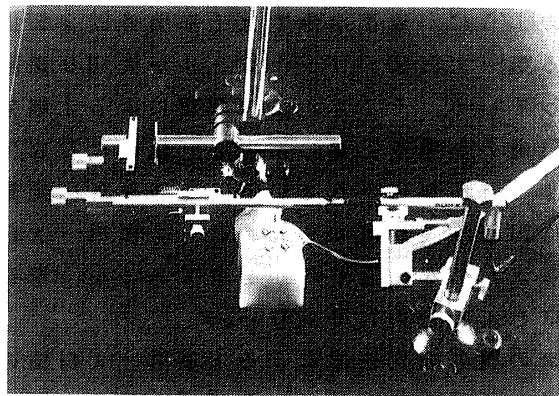


図3・キャリブレーションの全体観

キャリブレーションの結果、図4のような、良好な直線性が得られた。

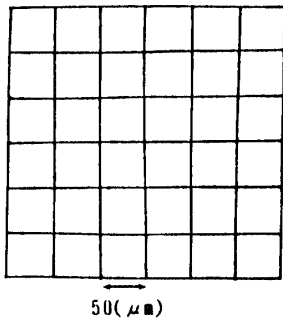


図4・変位と出力の関係

これは、磁石をマイクロマンニユレタにて、 $50\mu\text{m}$ の間隔で、 $\pm 150\mu\text{m}$ の範囲を、格子状に変位させたときのセンサーの出力をプロットしたものである。この計測結果より、直線性は8%の誤差におさまっていることがわかった。また、口腔外におけるこの測定システムの精度は高く、 $2\mu\text{m}$ から $3\mu\text{m}$ の精度で変位測定が可能だった。キャリブレーション時の磁石と磁気センサーの位置関係は口腔内で使用する時と同じ条件に保った。

5・温度特性

本システムは、口腔内で使用されるため温度変化による影響を考慮する必要がある。そこで室温と口腔内の温度に近い $32^{\circ}\text{C}$ における出力-変位曲線を求めた。(図5)

両者ともに、直線性を示しており、同一温度下では、常に一定の関係を保っていることがわかる。また、直線の傾きはほとんど変化がなかった。

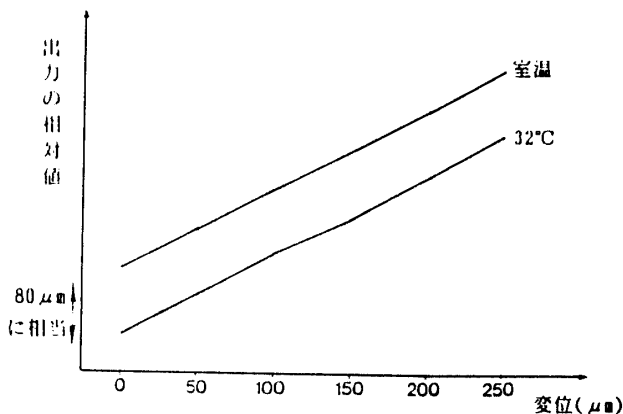


図5・変位-出力曲線の温度変化による影響

従って、口腔内温度が $32^{\circ}\text{C}$ に一定に保たれていると仮定すると、口腔外でのキャリブレーションの結果をそのまま口腔内にあてはめること

ができる。また、さきにセンサー出力の演算で述べたように、二つずつのセンサーのペアの出力の差をとっているため、温度による出力変化は補償されると考えられる。

ところが、口腔内で出力が安定しなかった例があった。一個のセンサーが、たまたま口蓋粘膜に接触していたことがあり、このときその他の3つのセンサー出力が安定していたにもかかわらず、粘膜に接したセンサーは大きく変動した。これは、センサーが温度変化による影響を受けたためと考えられる。

グラフより、室温から口腔内温度に変化する際、センサー出力のドリフトは $80\mu\text{m}$ に相当し、かなり大きいものであった。従って、4個のセンサーがすべて同一の温度環境にあつて、はじめて信頼性のあるデータが得られることがわかった。口腔内温度の変化による影響、特に舌の突出や、呼気による影響を考慮する必要がある。今後、この点について改善していきたい。

6・口腔内固定装置

上顎第一大臼歯の変位測定を行うにあたり、サマリウム磁石を可動部である上顎第一大臼歯に取り付け、磁気センサーを不動部として口腔内に固定する必要がある。このため磁石はアクリル棒で、磁気センサーはレジンシーネに固定することとした。(図6・7)

図6に示すように、4つのセンサーを配置したアクリル板は、レジンシーネに固定した。このとき、アクリル板は、矢状面内に位置するよう上顎第一大臼歯の近くに固定した。つぎに、上顎第一大臼歯の咬合面を覆うように、レジンでキャップを作製した。

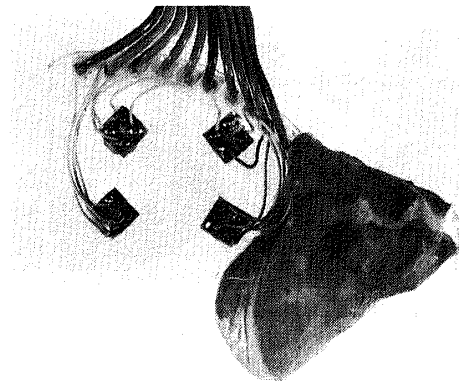


図6・口腔内固定装置(側面観)

ついで、図7に示すようにキャップの口蓋側にアクリル棒を固定し、先端に磁石を接着した。この時、磁石はあらかじめ口腔外でキャリブレーションを行った上で最適な位置を決定し、歯列模型上でアクリル棒に固定した。

レジンシーネの固定源は、第一小臼歯より前方の上下歯列とし、約5mm開口位で下顎が安定するよう咬合させた。

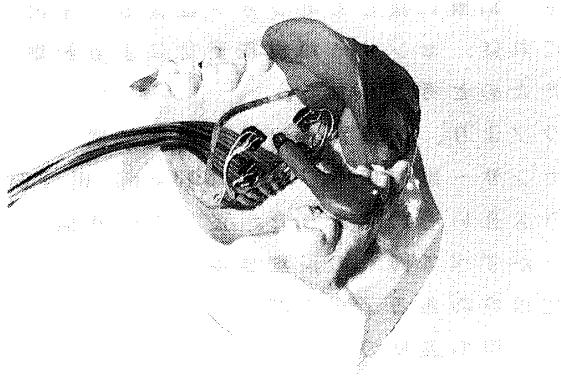


図7・口腔内固定装置（模型装着時）

### 7・測定

図8は、被験者を使い実際に測定している様子を示している。

荷重はface-bowを介して両側大臼歯に均等に加えられ、牽引方向は咬合平面に平行とした。歯周組織の性状に日内変動があるという報告より、再現性を確かめる意味も含めて、測定する時間を夕方7時より30分と規定した。測定は1分間隔で、0g、50g、100g、150g、200g、250g、300gについて行った。300gまで荷重を行った後は、0gに戻し出力の回復状態を測定した。

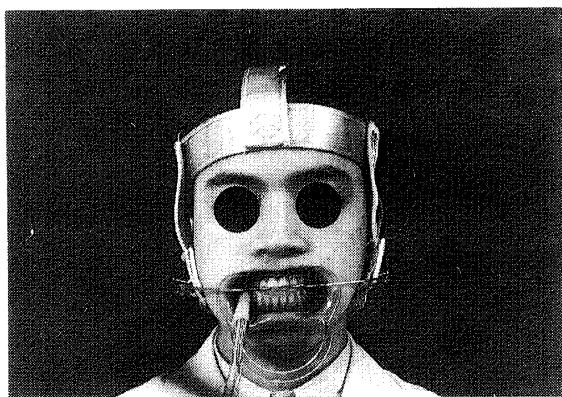


図8・口腔内における測定

ところが、実測中いくつかの問題点が判明した。それは、100g荷重時および200g荷重時でか

なり安定した値がとれたにもかかわらず、無荷重時の計測値が安定しなかったことである。無荷重時の計測値が安定しなかった理由は固定部が不安定だったためではなく、freeな状態におかれたface-bowが頬により不規則な圧を受け、大臼歯にふれが生じたことであった。そこで、頬圧を排除するためにアングルワイダーを装着した。これにより無荷重時でも安定した計測値を得ることができた。

### 8・結果

荷重を50gずつ階段状に加えた時の上顎第一大臼歯の動態を折れ線グラフで図9に示す。

変位置はface-bowをセットする前の値を基準値（ゼロ点）とした。face-bowをセットしただけでも水平・垂直的にかんがりの変位が観察された。

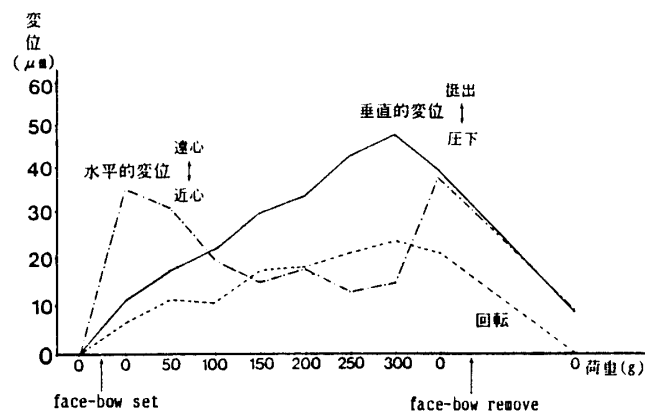


図9・荷重-変位曲線

垂直方向の磁石の変位（図中実線）は、0g～300gまでの範囲では常に挺出の方向でほぼ直線的に変位した。300gで変位置は挺出方向に48 $\mu$ mであった。荷重量をゼロに戻すと、face-bowをセットしたままでも急速に基準値の方向に約10 $\mu$ m回復し、さらにface-bowを除去後ゆっくりと基準値の方向に回復した。しかし、回転方向のように完全な回復は観察されなかった。つまり、垂直方向で8 $\mu$ mの残留変位が生じており、歯の挺出した状態が長く保たれたことを示した。これは、実験後被験者がういた感じを訴え、しばらくその感じが残ったままだったことから裏付けられた。

水平方向の磁石の変位（図中一点鎖線）は、無荷重時にface-bowをセットしただけで遠心方向に35 $\mu$ m変位し、かなりのモーメントが加わっ

たことを示した。その後、150g以下の小荷重時では近心方向に変位した。150gから200gの間は逆に遠心方向に、200gから250gまでは近心方向に、250gから300gの間は再び遠心方向に変位した。face-bowをセットしたままで除重すると、遠心方向に $37\mu\text{m}$ の変位を示し最初にface-bowをセットした時の変位に近い状態に戻った。face-bow除去後は、基準値の方向に回復したが垂直方向と同様、完全には戻らなかった。遠心方向に $8\mu\text{m}$ の残留変位が生じた。

回転(図中破線)については、回転の出力を表すDq値は一定方向に、ほぼコンスタントに変化した。そして、除重後は完全に基準値に回復した。

口腔内固定装置の安定性を知るため、長時間無荷重に保ってその変化を計測した。その結果、出力は $2\mu\text{m}$ から $3\mu\text{m}$ の変動におさまっていた。また、荷重を加えたあと再び無荷重の状態を保つと出力は時間とともに、ほぼもとの状態にもどった。これらのことから、口腔内固定装置は十分な安定性があると思われる。

## 9・考察

サマリウム磁石と磁気センサーによる変位測定装置は、平行移動の計測に関するかぎり口腔内で十分な精度で使用できることがわかった。しかし歯の動態を知る上で最も興味深い回転に関しては、キャリブレーションの方法が確立せず、予測の域にとどまった。今後、ステッピングモータを用いてキャリブレーションを行っていききたい。

実測された荷重-変位曲線には、いくつかの興味深い変化が観察される。しかし、システムの性格上その変化を直接解析することはできない。

ここで、上顎第一大臼歯に取り付けられたアクリル棒の動きについて考えてみる。歯が歯体移動をすると仮定すると、アクリル棒は並進運動する。つまり、アクリル棒の先端に付けられた磁石は歯の動きを忠実に再現することになる。しかし、歯が回転運動するとアクリル棒もある点を中心として回転し、磁石の動きは回転の成分を含んだ複雑な様相を呈することが考えられる。これらのことをふまえた上で、歯の動きをとらえていかなければならない。

水平方向の変位について0gから150gの間、磁石の位置が近心方向に動いたということは、歯自体の動きとしては咬合平面内での回転運動が主体となっていることが、考えられる。つまり、歯が、近心移動したわけではなく、遠心移動量よりも、回転の成分が多かったということである。そして150gを超えると、歯根膜の動きが拘束され、複雑な変位状況を呈することが考えられる。さらに、250gを超えると回転運動から並進運動主体の動きに変わってくるということが考えられる。今回、300gまでしか荷重を加えておらず300gを超えて荷重を増加した時の変位様相に変化がみられないかどうかを確認する必要がある。また、150gから250gまでの複雑な変位様相を呈した荷重域においては、さらに詳しく連続的な変化を見ていく必要がある。

垂直方向の変位が挺出方向に変位したことについて、face-bow装着時には $12\mu\text{m}$ 変位した。これは、face-bowの自重(7.2g)により歯が挺出したとは考えにくく、face-bowをbuccal tubeに挿入する際に生じたface-bowの変形が弾性回復するに従い、歯が少なからず変位したものと思われる。さらに0g~300gの範囲で挺出方向に直線的に変位したのは、face-bowの牽引方向が咬合平面より下向きになり、挺出方向への荷重成分が加わったことが考えられる。また、磁気センサーの配置が咬合平面に平行にならず少しずれたことも考えられる。

Mühlemannは、100g以下の小荷重では歯は比較的動きやすいが、100g以上の荷重を加えると動きにくくなる、いわゆる二相性の動揺があると報告している。すなわち歯は歯根膜の粘弾性と歯槽骨の弾性の両方の成分を含んだ二相性の変位様相を示す。つまり、第一相は比較的小さな荷重で急激な変位が生じる部分のことを言い、歯槽骨がそれほど変形することがなく、歯根膜の粘弾性による変形が主体となっている。一方、第二相は第一相の急激な変位に続いて生じる緩徐な変化部分で、大きな荷重により歯根膜の変形量の限界を超え、歯槽骨の弾性変形が主体となる。このうち矯正学的な見地からは、第二相の歯槽骨の弾性成分に着目する必要がある。つまり、矯正力を加えた時の歯の移動を解明するためには、歯根膜を介して歯槽骨にどのような力が加わり、その結果としてどれくらい変位す

るのかを知らなければならない。

歯槽骨の変位量を解析するためには、荷重-変位曲線における第一相と第二相を分離する変極点を見つける必要がある。今回50gづつ300gまで荷重を加えた時の変位測定を行ったが、今後もっと大きな荷重域で、50g区切りではなく連続的に荷重を増加させる方式で変位測定を行う必要性が示唆された。

また、今回荷重方法については300gまで荷重量を増加した後、一気に0gに戻した。矯正力により階段状に負荷を加えており、除荷後完全に原点に復帰することは短時間のうちにはみとめられないものと思われる。今後、除荷後の変化をさらに長期的に観察し変位量がもとの位置に完全に復帰するか、あるいは収束しようとするのか確かめたい。

#### 10・まとめ

1・口腔内では、 $10\mu\text{m}$ 以上の精度で2次元の変位測定が可能であった。

2・上顎第一大臼歯にface-bowを介して水平力を加えた結果150g付近で変極点が観察された。これは、歯の水平面内での回転による近心方向の変位から、本来の歯の遠心への移動による遠心方向の変位へと逆転した。

3・今回は、予想の域に留まった回転をキャリブレーションすることにより、より精度の高い計測を試みたい

#### 参考文献

- 1) Muhlemann, H.R.: A Method for measuring tooth mobility, Oral Surg, Oral Med, Oral Path, 4:120, 1951
- 2) 石橋真澄: 歯牙の動揺に関する実験的研究 (第1報) 荷重と動揺との関係について 口病誌 20:187, 1953
- 3) 倉島晃一: 歯周組織の力学的性状に関する研究(とくに歯根膜および歯槽骨について) 口病誌 30:361, 1963
- 4) 梶井 徹: 新しい装置による歯の生理的動揺の大きさとその性質について 補綴誌 11:129, 1967

- 5) 福井隆彦: KloeHN Headgear による上顎第一大臼歯の動態に関する実験的研究(II) 日矯誌 33:49, 1974
- 6) 小林和英: 顎外固定法による大臼歯の動態に関する理論解析(I) 日矯誌 38:153, 1979
- 7) Koyama, I: Effect of application of the kloeHN type headgear on the upper first molar 日矯誌 38:293, 1979
- 8) 五十嵐順正: 非接触微小変位センサーによる歯の動態観察 第一報 装置の概要と測定方法 補綴誌 24(3):457, 1980
- 9) 加藤均: 歯周組織の機能状態に関する研究 第1報 2次元微小変位計 補綴誌 25(4):733, 1981
- 10) 幸坂保雄: 磁気抵抗素子を応用した無接触変位計測装置の開発 補綴誌 29(1):182, 1985
- 11) 三浦宏之: 機能下にある歯牙の水平面内における変位に関する研究 補綴誌 29(3):209, 1985
- 12) 幸坂保雄: 歯の動態に関する研究-下顎歯の水平的変位- 口病誌 54(1):156, 1987