総

説

咬合力による歯列の動態

長谷川 成 男

東京医科歯科大学歯学部歯科補綴学第二講座

(1999年5月7日 受付)

Teeth Displacements under Occlusal Force in View of Dental Arches

Shigeo Hasegawa

Department of Prosthodontics II, Faculty of Dentistry, Tokyo Medical and Dental University

I. はじめに

咀嚼に代表される口腔諸機能は、上下顎の歯が咬合接触し、咬合力が発現して営まれている。

この咬合力は、体の他の系で発現する力とは異なり、特に強い力でもあり、またすべてが体内、顎口腔系へ伝播するという特徴ある力でもある。咬合力が正常な大きさで、正常な方向へ作用していれば、伝播した力によって起こる顎口腔系各部の歪みも生理的、機能的な範囲内にあつて顎口腔系は健康に維持されるであろう。しかし、咬合力が異常に大きかったり、異常な方向へ作用すれば、各部に異常な歪みが起こり、顎口腔系に何らかの障害が生ずる可能性が考えられる。

こうした観点から、その緒として咬合力による上下顎の歯の変位あるいは歯槽骨の歪みに関する測定を行って、咬合力による歯列の動態の一端を明らかにすることができた。

II. 歯の変位の研究略史

歯の変位の研究は動揺度の研究に連なるものである(図1)。動揺度は、最も古くからの臨床実感ともよく一致する機能検査法であるが、定量的に測定されるようになったのは Mühlemann¹⁾、石橋²⁾以来である。これらの動揺度の測定法はある方向からの一定の荷重時にある方向への歯の移動量を測定するもので、非機能能力による歯の変位の一次元測定とみることができる。

1974年、Heners³⁾は非接触ピックアップを用いて4方向それぞれからの荷重時の歯の変位を測定している。これは完全な二次元測定ではないが、それに準ずる2方向からの測定であつて歯の投影した移動経路を求めている

ことから動揺度ではなく、歯の変位の測定と見なすことができる。その後、歯の変位経路の研究が盛んに行われるようになって、1978年に Behrend⁴⁾はストレンゲージをトランスデューサーとする変位計で、2方向からの機能時の変位経路の測定を行っている。

我が国では加藤^{5,6)}が1982年に前頭面から、三浦⁷⁾が1985年に水平面から咀嚼を含む機能時の臼歯の変位経

動揺度—	Mühlemann	1951	非機能能力	一次元
	以来			
変位経路—	Heners	1974	非機能能力	二次元的
	Körber	1974		
	五十嵐	1981		
	Behrend	1978	機能力	二次元(前頭面)
	加藤	1982		
	三浦	1985		二次元(水平面)
	正井	1993		三次元的
	三浦	1995		三次元

図1 歯の変位の研究略史

図2 三次元微小変位計 M-3 型

路の二次元測定を発表している。1995 年、三浦ら⁹⁾は歯に接着した測定子先端の三次元移動を精密ユニバーサル機構によって各検出方向の永久磁石の動きとして捉え、これをマグネセンサーで変換する三次元微小変位計 M-3 型を完成している(図 2)。この変位計は $\pm 200 \mu\text{m}$ の範囲内で $\pm 2\%$ 以下の精度でリニアな出力を示し、これによって機能時の歯の参照点での変位経路の三次元測定が可能になった。

1999 年、坂東ら⁹⁾は、歯の変位は歯列に対する相対的変位ではなく、絶対的変位こそ、そしてまた歯面上の特定の 1 点の変位ではなく、歯全体としての変位様相こそ重要と考え、歯を剛体と見なして交流磁気空間を利用した高分解能 6 自由度運動測定器を開発している。

こうした研究の流れのなかで、われわれは機能時の歯の変位に関する歯面上の 1 点三次元、3 自由度測定での結果から咬合力による歯列の動態の解析を進めている。

III. 咬頭嵌合位の基準

1975 年、咬頭嵌合位に関する垂直方向の距離を測定する装置、IP-Checker を開発、作製した¹⁰⁾。この装置は上下顎の歯に接着した標点間の垂直距離の変動を測定するためのもので、ある種歯の変位の上下方向での一次元測定装置ともいえる。IP-Checker のトランスデューサーは当初ストレインゲージ (G 型) であったが、のちにマグネセンサー (MS 型) に改良して(図 3)、測定可能範囲は $0.9 \sim 2.2 \text{ mm}$ 、分解能は $1 \mu\text{m}$ 以下である¹¹⁾。

IP-Checker では試適した、あるいは咬合調整を行ったクラウンの歯列の咬頭嵌合位に対する咬合の高さを知ることができるが、図 4 はその高さの測定基準を咬合力と関連して決めるために行った実験結果の一部である。上下顎の歯が接触した状態から軽く咬合すると歯周組織に変形が起こって、上下顎標点間に $20 \sim 25 \mu\text{m}$ 程度の距離の減少が生じ、強く咬合すると歯の傾斜、歪みなども加わって、さらに $20 \mu\text{m}$ 程度の減少がみられる¹¹⁾。なお、この軽く咬合した状態は $2 \sim 3 \text{ kgf}$ 、強く咬合した状態は 40 kgf 程度と推定している。このように咬合力の程度によって咬頭嵌合位での垂直距離に差異が現れるが、軽く咬合した状態で咬頭嵌合位の上下的変動は $3 \mu\text{m}$ 前後であって強く咬合した状態より変動が少なかったため、この時点では軽く咬合した状態を咬頭嵌合位の基準とした¹⁰⁾。しかし、のちにこの咬頭嵌合位の基準は見直されることになる(第 VI 章)。

IV. 機能時の歯の変位

歯の変位の測定は二次元測定から始まったが、1995 年には三次元測定が可能となり、三面投影図(図 5)あるいは鳥瞰図としてその経路を表現できるようになった。

その後は測定例数を重ね、現在では模式図が書けるほどにまで歯の変位経路は明らかになり、理解は深まっている(図 6, 7)。

上顎の臼歯は咬頭嵌合位での噛みしめ時に遠心口蓋側歯根方向への変位を示し、咬合力の増加に伴ってさらに口蓋側へと向かって $100 \mu\text{m}$ 程度の変位経路を示す^{12,13)}。咀嚼時には咬頭嵌合位での噛みしめ時よりなお口蓋側に傾斜した変位経路を示す⁶⁾。

一方、下顎の臼歯は咬頭嵌合位での噛みしめ時に回転成分の強い遠心舌側方向への変位を示し、咬合力の増加に伴ってさらに舌側へと向かい $50 \mu\text{m}$ 程度の変位経路を示す^{12,13)}。咀嚼時には舌側歯根方向に向かうばかりではなく、頬側歯根方向への変位も示す⁶⁾。

次に、このような歯の変位時の歯周組織の機能状態で

図 3 IP-Checker MS 型による咬合の高さの測定

図 4 咬合力による上下顎標点間距離の変化
A: 軽く咬合, B: 強く咬合

図5 上顎第二小臼歯の変位経路。IP：咬頭嵌合位での噛みしめ時， AP4：咬合紙4枚噛みしめ時

図6 上顎第一大臼歯の咬頭嵌合位での噛みしめ時の変位経路（模式図）

図7 下顎第一大臼歯の咬頭嵌合位での噛みしめ時の変位経路（模式図）

図8 上顎第一大臼歯（左）と下顎第一大臼歯（右）の荷重-変位（三次元変位量）曲線

の力学的性状を知るために、咬合力計噛みしめ時の咬合力と歯の三次元変位量とによる荷重-変位曲線を求めた¹²⁾ (図8)。これは1点荷重という非機能的な測定による結果であるが、同時測定をした歯の変位経路は咬合紙噛みしめ時と類似していたので、機能時の歯周組織の粘弾性的挙動を表現しているといえよう。

荷重-変位曲線は上顎第一大臼歯では2相性を、下顎第

図9 支台築造後の上顎第一大臼歯

一大臼歯では1相性を示した。上顎第一大臼歯での第1相は主に歯根方向への変位で、しかもわずかな咬合力によって大きな変位を示したことから歯根膜の歪みに由来

し、第 2 相は咬合力の増加に対してゆるやかな変位量の増加を示すことから、歯槽骨を含む歯周組織の歪みに由来するものと考えられる。

これに対して下顎第一大臼歯は 1 相性の変位を示したが、これは歯の植立状態が舌側に傾斜しているために歯根膜の歪みがわずかとなる反面、歯槽骨あるいは下顎骨に起因する歪みが比較的小さい咬合力によって生じたことによるものであろう。

このように歯周組織の性状には上下顎臼歯間で力学的に差異がみられるが、そのいずれにも歯槽骨の歪みが考えられるので、歯槽骨を主とする歯周組織の咬合力による歪みの測定を試みた。

そこで、上顎第一大臼歯を支台歯形成して、築造した状態(図 9)、歯列としての咬頭嵌合位での噛みしめを行わせ、各臼歯の変位を測定した¹⁴⁾。ここで、上顎第二小臼歯、第二大臼歯が変位を示すのは対合歯間に咬合力が作用するので当然であるが、第一大臼歯もまた遠心口蓋側方向へ約 40 μm の変位を示した(図 10)。この対合歯との咬合接触も隣在歯との隣接接触もない第一大臼歯の変位は、隣在歯をはじめとする歯列に作用した咬合力による歯槽骨を主とする歯周組織の歪みの現れとして考えるのが妥当であろう。換言すれば、歯に加わる咬合力によって歯根膜に加えて歯槽骨もまた歪むことが明らかになったのである。

この歯槽骨の歪みの方向は、図 10 の水平面投影図に前頭面投影図を加えて三次元的に検討すると、天然歯の機能能力による生理的変位経路の方向(図 5, 6)と類似していることがわかる。したがって、咬合機能によって上顎臼歯の基底部分は歯とともに一塊としての固有の動態を示すものと考えられる。このことは、上顎臼歯の 2 ~ 3 歯の連結固定時に、歯の変位経路が連結前と比べて大きくは変化しないという古木らの報告^{16,17)}とも一致する。こうしたことから歯冠補綴を行うに際しては、機能能力に

よる歯周組織の歪みの現れである変位経路を乱さないような咬合接触関係の構成が、歯周組織の正常な動態を維持していくうえには必要となろう。

なお、図 10 で第二小臼歯と第二大臼歯の変位経路は生理的と考えられる変位経路に比べて往路と復路での差が大きく、乱れたとも思える経路を示しているが、これは第一大臼歯の支台歯形成によって隣接接触点が失われたためと考えられる。このことは、隣接接触点を修復処置によって正しく回復すると歯が生理的変位経路を再び示すようになる⁸⁾ので、逆説的ではあるが隣接接触点が歯列において果たす一つの役割を示しているといえよう。

V. 咬合接触点と歯の変位

歯の変位、ことに変位の方向は咬合接触点の影響を受ける。加藤は天然歯で咬合接触点と変位方向との関係を⁸⁾、さらに種々な咬合接触点をもつクラウンでの変位の測定を行って¹⁸⁾、咬合接触点の位置がもつ歯の変位に関する意義を示している。

咬合接触点の位置と歯の変位との関係を明確にするために、上顎第一大臼歯の各部で受圧用テーブルを介して咬合力が垂直方向になるように咬合力計の噛みしめを行わせた結果が図 11 である。これは歯の変位の等力線の前頭面投影図でもあって、加わる咬合力の位置、強さによって変位の方向、量に差異が生ずることがわかる。なお図中、D'は咬合力が加わる方向を変えたときの結果である。

口蓋側咬頭の咬頭頂あるいは内斜面に咬合力が加わると、歯の変位方向は口蓋側歯根方向となり、天然歯での機能時の生理的変位経路(図 5, 6)と類似した本来の変位方向となる。したがって、クラウンなどで咬合を回復する際にはここでの咬合接触点が重要な意味を持つことになる。このことは、天然歯での咬合接触点も上下顎の歯の機能咬頭あるいは機能咬頭寄りに多く、さらに機

図 10 上顎第一大臼歯支台歯形成後の上顎各臼歯の咬頭嵌合位での噛みしめ時の変位経路(水平面投影)

図 11 上顎第一大臼歯の咬合面各部位での咬合力計噛みしめ時の等力線図 (前頭面投影)

図 13 咬頭嵌合位での下顎第一大臼歯の咬合接触状態
○: 30 μm 以下の咬合近接域, ●: 咬合接触部

能咬頭内斜面同士の緊密な咬合が硬い食品の破碎時に有効に作用する、主機能部位¹⁹⁾となることから強調されよう。また、機能咬頭での咬合接触は、前章に記した咬合機能時の臼歯部基底部の動態を乱さない変位方向を導くことにもなるので、ここでの咬合接触は臼歯部の咬合にとって重要な要素といえる。

VI. 歯の変位と咬頭嵌合位

咬頭嵌合位における咬合接触と歯の変位に力点を置いて論を進め、咬頭嵌合位での噛みしめ時に上顎の臼歯は口蓋側歯根方向、やや遠心寄りに約 100 μm、下顎の臼歯はやや遠心、舌側方向へ約 50 μm の変位を示すことが明らかになった(図 12)。また同時に、上下顎の臼歯間で変位方向、変位量に差異があることも明らかになった。その結果、噛みしめ強度によって咬頭嵌合位での咬合接触

図 12 上下顎第一大臼歯の咬頭嵌合位での噛みしめ時の変位経路 (前頭面投影)

関係に変化が生ずると考えられるようになった。

岡田¹³⁾は、従来から咬合接触の指標とされてきた咬合近接域に加えて真の咬合接触点を記録する方法を考案、開発して、咬頭嵌合位での軽度噛みしめ時 (2 ~ 3 kgf) と強度噛みしめ時 (40 kgf) における咬合接触の差異を下顎第一大臼歯について検討した。その結果、咬頭嵌合位での咬合接触点数は軽度噛みしめ時には 0 ~ 1 点で、強度噛みしめ時には 2 ~ 6 点となり、咬合接触面積も増加することが明らかとなった (図 13)。

このように噛みしめ強度に応じて咬頭嵌合の状態では歯は変位し、咬合接触関係も変化するので、下顎の基準位としての咬頭嵌合位の定義には咬合力に関する条件づけが必要となろう。そしてこうした観点からは、軽度噛みしめ時は歯列全体を考えても咬合接触点数が少なく、咬合状態としての不安定さが憂慮され、加えて咀嚼をはじめとする口腔諸機能は相当程度の咬合力が加わった状態で営まれるので、強度噛みしめ時の咬頭嵌合位を顎口腔系としての基準とすることになろう。第 III 章においては軽く咬合した状態を咬頭嵌合位の基準としたが、機能面に対する考慮を払えば、強度噛みしめ時こそ基準位としての咬頭嵌合位と見なすべきであろう。

VII. 歯の変位と隣接接触点

咬合力によって歯が変位すれば、隣在歯間の隣接接触関係にも何らかの変化が起こる。

三浦⁷⁾は上下顎の各臼歯の水平面に投影した変位経路を測定して、咀嚼時を含む各機能時に上顎の臼歯は遠心口蓋側方向へ、下顎の臼歯は舌側、やや遠心方向へ変位することを明らかにしている。このことは機能時、咬合力の作用時に上下顎の歯列弓が全体としてその幅径を狭める方向へ変位することを示している。したがって、機能時には隣在歯間で安静時より歯間距離が減少することが考えられる。

図 14 機能時の上下顎各臼歯の変位経路(水平面投影)。a: 咬頭嵌合位での噛みしめ時, b: 咬合紙 4 枚噛みしめ時, c: 咬合紙 8 枚噛みしめ時

図 15 歯間距離測定装置

図 16 噛みしめ時の上下顎第二小臼歯, 第一大臼歯間の歯間距離の変化と上顎第二小臼歯の水平面投影変位経路。a: 咬頭嵌合位, b: 咬合紙 4 枚, c: 咬合紙 8 枚

図 17 上顎第一大臼歯機能後の変位の復路上に認められた脈動

図 18 隣接歯間関係の観察用装置

図 19 上顎第一小臼歯, 第二小臼歯間の隣接歯間関係
左: 安静時, 右: 咬頭嵌合位での噛みしめ時

図 20 S字形を呈する上顎第一大臼歯, 第二大臼歯間の隣接接触関係

図 21 厚さ 10 μ m のチタン箔の隣接歯間部への挿入

そこで、三浦²⁰⁾は隣接する一方の歯に測定子を、他方の歯に隣青銅板を付け、ストレンゲージをトランスデューサーとする歯間距離測定装置を作製して、咬合機能時の近遠心方向での歯間距離の変化を測定した(図 15)。図 16 はその結果の一部で、咬頭嵌合位での噛みしめ時には第二小臼歯と第一大臼歯との間で上下顎ともに 75 μ m 前

後の距離の減少がみられた。

このように咬合機能時に臼歯の隣在歯間距離は減少を示したが、それならば逆に開口時、すなわち咬合力が作用していない歯の安静時に各臼歯は隣在歯とゆるやかな接触関係にあると考えることができる。また、図 17 は二次元微小変位計 K 型^{5,6)}で測定した咬合力解放後の歯の安静位に戻る変位の復路で、その経路上には振動がみられる。この振動は心電図との同期などから歯根膜に由来する歯の脈動であると同定されていて、三次元的には咬合力による歯の変位の方角と対向する方角をもっていることから、機能後の歯の安静位への復位に関与していると考えられている。波高は 0.6~0.8 μ m である。

咬合力が作用する機能時に歯は隣在歯との歯間距離を狭め、安静時には歯が脈動を示していることから、安静時には歯と歯の間、隣在歯間に間隙がある、換言すれば歯の安静時に隣接接触点は接触していないことになる。

笠原ら²¹⁾は舌側にハロゲン光源を固定し、頬側に CCD マイクロスコープに接続したピンズコープを設定して、咬頭嵌合位での噛みしめ時に隣接歯間部での観察を行った(図 18)。コンタクトゲージなどの診査で正常と見なせ

る上顎第一小白歯、第二小白歯間の隣接歯間部について観察した結果が図 19 で、歯の安静時には光が通過していて間隙があることを示し、噛みしめ時には光が通過しなくなって間隙が閉鎖したことを示している。

こうした数例の実験結果からは、安静時に隣接歯間部には間隙があるものと考えられるが、歯の隣接面形態あるいは隣接接触関係によっては光が間隙を通過できないことがある。たとえば、図 20 の上顎第一大臼歯と第二大臼歯間のように隣接歯間部が S 字形となっていれば、光は通過できない。しかし、こうした形態を示していても歯の安静時には隣接歯間部に厚さ 10 μ m のチタン箔を容易に挿入できる(図 21)。そして、噛みしめ時に箔は引き抜けずにちぎれることから、通常、歯の安静時には隣接歯間部に間隙があって、機能時にはその間隙が閉鎖すると考えている。

VIII. ま と め

正常な状態にあっては、歯は歯根膜によって歯槽骨内に支えられ、機能時には歯槽骨のなかへ押し込まれて上顎の臼歯はやや遠心、口蓋側歯根方向へ、下顎の臼歯は回転成分の強い、やや遠心舌側方向への変位を示す。そして、咬合力が作用していない安静時には、歯は隣在歯との間にわずかな間隙をもって機能時の変位方向とは対向する方向、すなわち機能時に変位した歯を復位させる方向への歯根膜の血管に由来する脈動をしている。

また、歯列全体としては安静時にはそれぞれの歯が隣在歯とは間隙を保った状態で歯槽骨内で脈動していて、機能力を受け入れうる状態にある。そして、機能時にはすべての歯が歯槽骨内へと押し込まれながら歯列弓の幅径を狭める方向へ変位して、隣接歯間部は間隙をなくし隣在歯同志は緊密に接触して、食片圧入に備えとともに歯列としての連携を組んで強い咬合力に対処していると考えている。

謝 辞

本稿に著した研究成果は、歯科補綴学第二講座の全員によって成し遂げられた業績である。ここに深く感謝の意を表します。

この総説の要旨は、平成 10 年 12 月 4 日に開催された第 63 回口腔病学会学術大会において講演した。

文 献

- 1) Mühlemann, H. R. : Periodontometry, A method for measuring tooth mobility. Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. 4 : 1220-1233, 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 : 187-191, 1953.
- 3) Heners, M. : Syndesmotic limiting movement of the periodontal ligament. Int. Dent. J. 24 : 319-327, 1974.
- 4) Behrend, D. A. : Patterns of tooth displacement in simulated chewing cycles in man. Archs. Oral Biol. 23 : 1089-1093, 1978.
- 5) 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 : 733-745, 1981.
- 6) 加藤 均 : 歯周組織の機能状態に関する研究 第 2 報 臼歯の機能時の変位と安静時の脈動. 補綴誌 26 : 133-147, 1982.
- 7) 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 : 735-754, 1985.
- 8) 三浦宏之, 長谷川成男, 加藤 均, 古木 譲, 益田高行 : 歯牙の変位経路の三次元測定法について. 顎機能誌 2 : 1-10, 1995.
- 9) 坂東永一, 薩摩登誉子, 重本修伺 : 高分解能 6 自由度運動測定器の開発. 補綴誌 43 : 149-159, 1999.
- 10) 坂東永一, 田中伐平, 長谷川成男 : 半導体ストレン・ゲージを用いた咬頭嵌合位測定装置. 補綴誌 18 : 329-336, 1975.
- 11) 田中伐平 : 咬頭嵌合位における補綴物の高さが顎口腔系に及ぼす影響. 補綴誌 19 : 666-692, 1976.
- 12) 岡田大蔵, 三浦宏之, 長谷川成男 : 上下顎臼歯の機能状態に関する研究一歯の三次元変位一. 補綴誌 42 : 279-286, 1998.
- 13) 岡田大蔵 : 噛みしめ強さの違いによる歯の変位と咬合接触一咬頭嵌合位一. 補綴誌 42 : 1013-1023, 1998.
- 14) 三浦宏之, 古木 譲, 長谷川成男, 加藤 均 : 咬合力による歯周組織の歪み一上顎臼歯部について一. 補綴誌 37 : 1305-1311, 1993.
- 15) 益田高行, 三浦宏之, 加藤 均, 古木 譲, 長谷川成男 : 咬合力による上顎臼歯部歯周組織の歪みの三次元的測定. 補綴誌 40 : 154-159, 1996.
- 16) 古木 譲 : 連結固定が歯牙の変位様相に及ぼす影響. 補綴誌 37 : 26-40, 1993.
- 17) 古木 譲, 長谷川成男, 三浦宏之, 益田高行 : ブリッジを想定した連結固定が歯牙の変位経路に及ぼす影響. 顎機能誌 1 : 1-10, 1994.
- 18) 長谷川成男 : 咬合学序説. 東京, 1988, 医歯薬出版, 21-50.
- 19) 加藤 均, 古木 譲, 長谷川成男 : 咀嚼時, 主機能部位の観察. 顎機能誌 2 : 119-127, 1996.
- 20) 三浦宏之 : 隣接歯間関係の動態に関する研究. 補綴誌 29 : 1134-1142, 1985.
- 21) 笠原健一, 栗山 實, 三浦宏之, 加藤 均, 長谷川成男 : 機能時, 隣接歯間関係の観察. 補綴誌 42(99 回特別号) : 21, 1998.