継続歯の根面に加わる咬合力および 咀嚼力に関する研究

天 野 秀 雄

Distribution of Biting and Masticatory Forces Applied to the Root Surface of an Upper Central Incisor with a Post Crown

Hideo Amano

緒 言

継続歯やコーアを施したジャケットクラウンは天然歯の形態や色調を再現することが容易であり、またその排列も比較的自由であるという特徴をもっている。だから、前歯部の無髄処置歯の補綴によく用いられている。しかし、臼歯部の代表的歯冠補綴物である鋳造冠に比べると、歯冠部に加わる咬合力や咀嚼力によつて継続歯は脱落したり、あるいはジャケットクラウンは破折したりする欠点がある。

ところが、このような欠点は、少なくとも継続歯ではその歯冠の長さおよび傾斜、合釘の長さや形態、歯冠部に加わる咬合力または咀嚼力の大きさや方向などに関係があると考えられるので、咬合、咀嚼時に継続歯の根面に加わる力の大きさ、方向および分布様式などを左右する諸要因を力学的に解明することは、継続歯を設計して作製するためにも、また装着後の脱落を防ぐためにもきわめて重要な課題である。

従来、補綴物および支台歯に加わる力を力学的に解明する方法としては、光弾性実験法¹⁻⁵⁸⁾、応力塗料法⁵⁹⁻⁶³⁾およびストレインゲージ法⁶⁴⁻⁸⁷⁾がよく用いられている。

しかし、この種の研究には模型実験が多く、生体で直接測定した報告はきわめて少ない(表1)。

ところが、生体においては歯根膜や顎骨などが存在し

ているから、咬合、咀嚼時の補綴物に対する加圧の状態も生体における観察と模型についての実験とは当然異なる。したがって、模型についてだけでなく生体についても観察する必要がある。

そこで、著者はストレインゲージを応用して、上顎中切歯継続歯の根面の各部(唇側部、舌側部、近心側部および遠心側部の四部位)に加わる咬合力や咀嚼力の大きさから、継続歯の根面に加わる力の方向および分布様式を直接測定できる受圧装置を考案し、この受圧装置を設置した継続歯(これを実験用継続歯と呼ぶ)を生体および模型に適用して、いろいろの実験条件において支台歯の根面に加わる力を測定しようと考えた。

しかし、口腔内の支台歯に実験用継続歯をセメント装着してしまうと実験後にそれを撤去することが困難となるので、セメント装着をしないで測定するほうが便利である。そこで、実験用継続歯をセメント装着をしないで測定したときとセメント装着をした場合とでその実験成績に差異があるかどうかを検討しておく必要がある。ので、まずこの点を確かめるために予備実験を行ない、ついで本実験に移った。

そして、継続歯支台歯の根面に加わる咬合力および咀嚼力の大きさ、方向および分布様式と継続歯の歯冠の長さや傾斜あるいは合釘の長さや形態などとの関係を検討し、さらに咬合、咀嚼時に偶発する継続歯の脱落の原因について考察したのでその結果を報告する。

実験材料と実験方法

1. 被検歯

1) 模型実験に用いた抜去歯歯根

Department of Prosthodontics, Osaka Dental University (Director: Prof. Tomio Komori)
大阪歯科大学大学院歯学研究科 歯科補綴学専攻
(指導: 大阪歯科大学補綴学教室小森富夫教授)
昭和45年4月30日受付

表 1

A. 光弾性実験法

被 検 材 料	実 験 者
歯	Zak, B. (1935) ¹⁾ 矢島ら (1953) ²⁾ , (1954) ³⁻⁵⁾ 宮内ら (1957) ⁶⁾ , (1959) ⁷⁾ 伊藤 (1959) ⁸⁾ 本間ら (1960) ^{9,10)}
補綴歯支台歯	出井 (1954) ¹¹⁾ 宮内 (1959) ¹²⁾
クラウン支台歯	Colin, L. et al. (1963) ¹³⁾ 中林 (1967) ¹⁴⁾
ブリッジ支台歯	Motsch, A. & Gauss, O. (1969) ¹⁵⁾
鉤 歯	大多和 (1955) ¹⁶⁻¹⁸⁾ 井上 (1959) ^{19,20)} 水川 (1965) ²¹⁾ , (1966) ²²⁾
窩洞形成歯	渡辺 (1955) ²³⁾ , (1956) ^{24,25)} Granath, L-E. (1963) ^{26,27)} , (1964) ²⁸⁻³⁰⁾ Davidson, G. B. (1964) ³¹⁾ Schreiber, S. & Motsch, A. (1968) ³²⁾ Johnson, E. W. et al. (1968) ³³⁾
義 歯 床	毛利ら (1961) ³⁴⁾ Klötzer, W. (1963) ³⁵⁾ , (1964) ³⁶⁾ , (1966) ³⁷⁾
義歯床と人工歯	久保田 (1959) ^{38,39)}
義歯床用陶歯	長田 (1956) ^{40,41)}
ク ラ ス プ	宮内ら (1959) ⁴²⁾ 河合ら (1961) ⁴³⁾ 村松と安達 (1962) ⁴⁴⁾ , (1963) ⁴⁵⁾ , (1964) ⁴⁶⁾ 奥野 (1968) ⁴⁷⁾
パ ー	久保田 (1957) ⁴⁸⁾
ジャケット クラウン	Walton, C. B. & Leven, M. M. (1955) ⁴⁹⁾ Pettrow, J. N. (1961) ⁵⁰⁾ Lehman, M. L. & Hampson, E. L. (1962) ⁵¹⁾ Rumetsch, W. et al. (1965) ⁵²⁾
ク ラ ウ ン	Craig, R. G. et al. (1967) ⁵³⁾
ブ リ ッ ジ	Jourdant, R. et al. (1968) ⁵⁴⁾
イ ン レ ー	Craig, R. G. et al. (1967) ⁵⁵⁾
二級窩洞修復物	Hanskins, R. C. et al. (1954) ⁵⁶⁾ Guard, W. F. et al. (1958) ⁵⁷⁾
アマルガム充填	Mahler, D. B. (1958) ⁵⁸⁾

B. 応力塗料法

被 検 材 料	実 験 者
補綴歯	村松ら (1954) ⁵⁹⁾ Matthews, E. & Wain, E. A. (1956) ⁶⁰⁾ 杉田 (1967) ⁶¹⁾
ク ラ ス プ	宝田 (1963) ⁶²⁾
ブ リ ッ ジ	Craig, R. G. & Peyton, F. A. (1965) ⁶³⁾

C. ストレインゲージ法

被 検 材 料	実 験 者
模 型	足立 (1964) ⁶⁴⁾
歯 天 然 歯	Kakudo, Y. et al. (1967) ⁶⁵⁾ 覚道ら (1969) ⁶⁶⁾
補綴歯支台歯	局部床義歯 Kydd, W. L. et al. (1964) ⁶⁷⁾ Henderson, D. & Seward, T. E. (1967) ⁶⁸⁾ Shohet, H. (1969) ⁶⁹⁾
義 歯 床	Regli, C. P. & Kydd, W. L. (1953) ⁷⁰⁾ Regli, C. P. & Gaskill, H. L. (1954) ⁷¹⁾ Frechette, A. R. (1955) ^{72,73)} Kydd, W. L. (1956) ⁷⁴⁾ , (1960) ⁷⁵⁾ Lambrecht, J. R. & Kydd, W. L. (1962) ⁷⁶⁾ Swoope, C. C. & Rydd, W. L. (1966) ⁷⁷⁾
ク ラ ス プ	関根ら (1963) ^{78,79)}
パ ー	関根ら (1961) ⁸⁰⁾ , (1962) ⁸¹⁻⁸⁴⁾
ジャケッ ット クラウン ブリッジ	Bates, J. F. (1966) ⁸⁵⁾ 石井 (1968) ⁸⁶⁾ Craig, R. G. & Peyton, F. A. (1967) ⁸⁷⁾

歯根の彎曲していない比較的大きな健全上顎中切歯の抜去歯根を用いた。

2) 模型実験に用いたレジン歯根

上顎中切歯歯根の2倍大の歯根模型をアクリリックレジンで作製して被検歯とした。

3) 生体での実験に用いた被検歯

歯列および咬合関係が正常で、上顎中切歯歯冠補綴を適応症とした有歯顎者4人(本学学生:年齢20歳から30歳の男子)の無髄処置を完了した上顎中切歯を被検歯とした。

2. 被検歯の根面形成

抜去歯冠部は歯冠唇面の歯頸弧線頂で、また被検者の被検歯冠部は歯冠乳頭部でそれぞれ歯軸に対して直角に切断し、根面の形成は平面形成とした。

なお、レジン歯根では、その根面は抜去歯歯根の根面形成に準ずるようにはあらかじめ作製しておいた。

3. 合釘孔の形成

1) 抜去歯歯根を用いた模型実験および生体での実験では、合釘孔の形成はつぎのようにして行なった。すなわち、合釘孔の長さおよび太さはそれぞれ歯根の長さの約 $\frac{2}{3}$ 、太さの約 $\frac{1}{3}$ に、またその横断面は歯根の横断面とほぼ相似形になるようにした。そして、加圧時に合釘が回転するのを防ぐために、根面の合釘孔舌側部に小さな箱形窩洞を形成した。

2) ただし、合釘の長さや歯根歯頸部表面のひずみとの関係を求めた模型実験における抜去歯歯根では、根面から根尖まで均一の太さ（直径 2 mm）の合釘孔を形成した。

3) レジン歯根を用いた実験、すなわち合釘の形態と根面の各部に加わる力との関係について検討した実験では、2 倍大の歯根模型を作製したので、これにともない長径 5 mm、短径 2 mm の楕円形合釘孔を根尖まで均一の太さに形成した。

4. 模型実験に用いた被検歯の固定

模型実験に用いた抜去歯歯根およびレジン歯根は、歯根歯頸部を 2 mm～4 mm 露出させて、超硬石膏のブロックに植立固定した。

5. 継続歯支台歯の根面に加わる咬合・咀嚼力測定装置（受圧装置）の作製と被検歯の根面への装着

1) 受圧装置

受圧装置は、根面の唇側部、舌側部、近心側部および遠心側部の四か所に設置した四つの片持はりの板（大きさ：4 mm（縦）× 2 mm（横）、厚さ：1 mm、片持はり

図 1 継続歯の根面に加わる咬合・咀嚼力測定装置（受圧装置）

左：側面図，右：上面図，A：片持はりの板，B：ストレインゲージ

図 2 口腔内に根面に加わる咬合・咀嚼力測定装置および実験用継続歯を装着した図

の板上には実験用継続歯の根面板との接点となる突起部がある）とこの片持はりの板を支えるための一つの台座とからなる（図 1、図 2）。

2) 受圧装置の作製

片持はりの板と台座とは一塊としてパラジウム合金で鋳造し、熱処理して作製した。

片持はりの板にストレインゲージ（フォイルゲージ、型名：F 101，ゲージ長×幅：1 mm×1.5 mm，抵抗値：120.00Ω±0.3%，新興通信工業製）を、アロン・アルファ（シアノアクリレート系接着材，東亜合成化学工業製）で貼付し，その上をポリエステル系接着材（SP-3，新興通信工業製）でうすく被覆して，口腔内における湿気に対して防湿，絶縁した。

3) 受圧装置の装着

でき上った受圧装置はその台座を被検歯の根面に燐酸亜鉛セメントで装着した。

6. 実験用継続歯の作製

1) 抜去歯歯根についての模型実験および生体での実験に用いた実験用継続歯の作製

a) 合釘および根面板をパラジウム合金で別個に鋳造して作製する。

b) 根面板と受圧装置の四つの片持はりの板上の突起部とが均等に接触する状態で、合釘と根面板とをろう着する。

c) 合釘の歯冠部分を根面板の表面から 3 mm だけ残して切断する。この合釘の歯冠部分を維持部としてレジンで歯冠部を作り，実験用継続歯を作製する。

d) 実験用継続歯を合釘孔内に挿入，試適して，片持はりの板上の突起部にポリエステル系接着材を少量盛って根面板と各突起部がなおいつそう均等に接触するようにする。

2) レジン歯根についての模型実験では、1)と同じ方法で作った実物の2倍大の実験用継続歯を合釘と合釘孔との間隙を即時重合レジンで埋めてから、亜鉛華ユーজনールペーストで装着した。

3) ただし、合釘の長さとは歯根歯頸部表面のひずみとの関係を求めた抜去歯歯根における模型実験では、荷重を直接合釘に加えたので、受圧装置および実験用継続歯は不要である。その代わりに歯根歯頸部表面の唇側部および舌側部に、直接ストレインゲージ（フォイルゲージ、型名：F101、ゲージ長×幅：1mm×1.5mm、抵抗値：120.00Ω±0.3%、新興通信工業製）をアロン・アルファで貼付した。また、合釘を根面から5mm残して切断した。

7. 咬合力測定器の作製

Anderson, D. J. (1953)⁸⁸⁾の装置を応用して、厚さ10mmの咬合力測定器（図3）を作製した。

使用したストレインゲージはフォイルゲージ、型名：F102、ゲージ長×幅：2mm×2mm、抵抗値：120.00Ω±0.3%、新興通信工業製である。

図3 咬合力測定器

8. 実験用継続歯および合釘に加える荷重

1) 実験用継続歯にはつぎのような方法で荷重を加えた。すなわち、生体での実験では被検者に咬合力測定器を咬合させ、また模型における実験では舌側方向から歯軸に対して30°の角度で歯冠切縁に1kgの荷重をばね秤りで加えた。

2) 合釘の長さとは歯根歯頸部表面のひずみとの関係を求めた実験では、直接合釘の先端に舌側方向から歯軸に対して直角に1kgおよび2kgの荷重をばね秤りで加えた。

9. 継続歯の根面に加わる咬合力、咀嚼力および歯根歯頸部表面のひずみの測定法

受圧装置および歯根歯頸部表面にはつたストレインゲ

ージからの各 output はひずみ計用入力箱を介して、多用途監視記録装置（RM-150型、日本光電工業製）で記録した。

受圧装置の校正は、片持りの板ばねに種々の大きさの荷重（g）をばね秤りで加えて行なった。

実験用継続歯の歯冠部に加わる咬合力や咀嚼力は、根面に設置された受圧装置の四つの片持りの板ばねに作用する。

そして、板面に加わる力の大きさは片持りの板ばねのひずみ量から測定することができるし、歯冠に加わる力の方向は根面のどの部位の片持りの板ばねが働くかによって知ることができる。たとえば（図4）、実験用継続歯の歯冠切縁中央部に歯軸方向に荷重（F）を加えると、根面の唇側部、舌側部、近心側部および遠心側部に

図4 荷重方向と根面の各部（唇側部、舌側部、近心側部、遠心側部）に加わる力の記録波形
荷重方向：左；歯軸方向、中；舌側方向、右；唇側方向

設置された四つの片持りの板ばね全部が作用し、唇側方向から舌側方向に荷重を加えるときには根面舌側部の片持りの板ばねだけで働く。そして、舌側方向から唇側方向に荷重を加える場合には、根面唇側部の片持りの板ばねだけが働いて根面の唇側部に力が作用したことがわかる。

実験成績

A. 予備実験

実験用継続歯のセメント装着前、および装着後における荷重部位と根面の各部に加わる力の大きさ、および分布様式とを比較する目的で、抜去歯歯根を用いた模型について実験し、つぎのような結果を得た（図5、図6および表2）。すなわち、

1) 継続歯の根面に加わる力の大きさとその分布様式

図5 セメント装着前および装着後における荷重部位と根面の各部に加わる力の記録波形

荷重部位：左；切縁近心部，中；切縁中央部，右；切縁遠心部

図6 セメント装着前および装着後における根面の各部に加わる力の大きさの比較

□：根面唇側部に加わる力，■：根面近心側部に加わる力，▨：根面遠心側部に加わる力

荷重部位：上；切縁近心部，中；切縁中央部，右；切縁遠心部

とは，荷重を加える歯冠切縁の部位が違ふと異なる。

2) しかし，根面に加わる力の分布様式は，セメント

装着前と装着後とは差異は認められない。すなわち，セメント装着前でも装着後でも，

a) 切縁近心部に荷重を与えたときには，根面唇側部と根面近心側部とに力加わる。

b) 切縁中央部に荷重を加えた場合は，大部分の力は根面唇側部だけに作用し，ごく一部分の力は根面近心側部にも働いている。

c) 切縁遠心部に荷重を加えると，根面唇側部と根面遠心側部とに力加作用する。

d) 根面唇側部に加わる力は，切縁中央部に荷重を加えたときがもっとも大きい。

3) ところが，セメント装着してしまうと，切縁のどの部位に荷重を加えても，根面の各部に加わる力の大きさは小さくなる。

4) しかし，セメント装着後における根面の各部に加わる力の大きさの減少率は，根面のどの部位においてもほとんど一定である。

5) なお，切縁のどの部位に荷重を加えても，またセメント装着前でも装着後でも，根面舌側部には力は作用していない。

表2 セメント装着前および装着後における荷重部位と根面の各部に加わる力の大きさ

荷重(1kg)を加える 歯冠切縁の部位	根面唇側部に 加わる力(g)		根面舌側部に 加わる力(g)		根面近心側部に 加わる力(g)		根面遠心側部に 加わる力(g)	
	セメント 装着前	セメント 装着後	セメント 装着前	セメント 装着後	セメント 装着前	セメント 装着後	セメント 装着前	セメント 装着後
近 心 部	320	260	0	0	140	100	0	0
中 央 部	380	320	0	0	30	20	0	0
遠 心 部	340	260	0	0	0	0	100	50

図 7 咬合部位と根面の各部に加わる力の記録波形
咬合部位：左；切縁近心部，中；切縁中央部，右；切縁遠心部

表 3 咬合部位と根面の各部に加わる力の大きさ

咬合力1350gでの咬合部位	根面唇側部に加わる力(g)	根面舌側部に加わる力(g)	根面近心側部に加わる力(g)	根面遠心側部に加わる力(g)
近心部	200	0	40	0
中央部	770	0	0	0
遠心部	400	0	0	350

以上の予備実験の結果から明らかなように，継続歯の根面に加わる力の分布様式には，セメント装着前と装着後とで差異がないので，以後の生体および抜去歯歯根を用いた模型実験はセメント装着をしないで行った。

B. 生体での実験

1. 咬合力測定器を咬合させたときの継続歯の根面の各部に加わる力

各被検者に継続歯の歯冠切縁の近心部，中央部および遠心部で同じ大きさの咬合力を用いて，また咬合力の大きさを変えて咬合力測定器をかませた。そして，継続歯の根面の各部に加わる力の大きさおよびその分布様式を測定し，つぎのような成績を得た。各成績についてその1例を図7，図8，表3，表4に示す。

1) 同じ大きさの咬合力で咬合させたときの継続歯の根面の各部に加わる力

a) 切縁近心部で咬合させるときには，根面唇側部お

図 8 咬合力の大きさと根面の各部に加わる力の記録波形

表 4 咬合力の大きさと根面の各部に加わる力の大きさ

咬合部位	咬合力(g)	根面唇側部に加わる力(g)	根面舌側部に加わる力(g)	根面近心側部に加わる力(g)	根面遠心側部に加わる力(g)
近心部	900	30	0	20	0
	1350	200	0	40	0
	1450	220	0	50	0
中央部	800	330	0	0	0
	1250	680	0	0	0
	1350	770	0	0	0
遠心部	300	80	0	0	60
	500	200	0	0	140
	1450	430	0	0	410

よび根面近心側部とに力が作用する。

b) 切縁中央部で咬合させると，根面唇側部だけに力が加わる。

c) 切縁遠心部で咬合させる場合は，根面唇側部と根面遠心側部とに力が加わる。

d) 根面唇側部に加わる力は切縁中央部で咬合したときもつとも大きい。

以上の実験結果は，予備実験において模型について行なった実験成績とまったく同様である。

2) 咬合力の大きさと継続歯の根面の各部に加わる力

図 9 ピーナッツおよびせんべい咬断時の根面の各部に加わる力の記録波形

との関係

a) 咬合力をしないで大きくしても、力が加わる根面の部位は1)の実験結果とまったく同じである。

b) しかし、切縁のどの部位で咬合させても、根面の各部位に加わる力の大きさは咬合力が大きくなるにつれて増加する。

2. ピーナッツおよびせんべい咬断時に継続歯の根面の各部に加わる力

各被検者にピーナッツおよびせんべいを任意に何度も咬断させると(図9)。

1) どの被検者でも、またどのようなかみ方しても、つねに根面唇側部には力が必ず加わっている。

2) ところが、被検者によっては、また同じ被検者でもそのかみ方によっては、根面の唇側部以外の部位にも力が加わるときがある。

したがって、ピーナッツでも、せんべいでもその咬断時には、a) 根面唇側部だけに力が加わる場合もあれば、b) 根面の唇側部と近心側部とに加わるときもある。また、c) まず根面の唇側部と近心側部とに、ついで少しおくらせて根面の唇側部と遠心側部とに力が加わるときも認められる。

3) しかし、どの場合でも根面唇側部に加わる力をもっとも大きい。

4) また、根面に加わる力の記録波形には、2～3個の連続した棘波が認められる。

C. 模型についての実験

生体での実験結果から、継続歯での咬合、咀嚼時には

つねに根面唇側部に咬合力および咀嚼力が集中していることが明らかになった。

そこで、根面唇側部に加わるこの力がどのような因子によって影響を受けるかを追究するために、生体での実験成績を参考にして、模型について同様に実験した。そして、つぎのような成績を得た。

1. 継続歯の歯冠切縁の唇舌的位置と継続歯の根面の各部に加わる力との関係

継続歯の歯冠切縁の唇舌的位置が歯軸延長線よりも3mm唇側寄り、歯軸延長線上および歯軸延長線よりも3mm舌側寄りにある継続歯の歯冠切縁に、舌側方向から歯軸に対して30°の角度で1kgの荷重をばね秤りで加えても、

1) 荷重を加える歯冠切縁の部位と、力の加わる継続歯の根面の部位との関係は、予備実験および生体での実験で得られた成績とまったく同様であつた。すなわち、

a) 歯冠切縁近心部に荷重を加えると、根面の唇側部と近心側部とに力が加わる(図10)。

b) 切縁中央部に荷重を与えた場合は、大部分の力は根面唇側部だけに、そして、一部分の力は根面近心側部に加わる(図11)。

c) 切縁遠心部に荷重を加えるときには、根面の唇側部と遠心側部とに力が加わる(図12)。

d) そして、根面唇側部に加わる力は、切縁中央部に荷重を加えたときがもっとも大きい(図13)。

しかし、

2) 歯冠切縁の唇舌的位置と継続歯の根面の各部に加

図 10 継続歯の歯冠切縁の唇舌的位置と根面の各部に加わる力の記録波形（荷重部位：切縁近心部）
歯冠切縁の唇舌的位置：左；唇側寄り，中；歯軸延長線上，右；舌側寄り

図 12 継続歯の歯冠切縁の唇舌的位置と根面の各部に加わる力の記録波形（荷重部位：切縁遠心部）

図 11 継続歯の歯冠切縁の唇舌的位置と根面の各部に加わる力の記録波形（荷重部位：切縁中央部）

図 13 継続歯の歯冠切縁の唇舌的位置および荷重部位と根面の各部に加わる力の大きさとの比較
歯冠切縁の唇舌的位置：左；唇側寄り，中；歯軸延長線上，右；舌側寄り

わる力の大きさとの間には、つぎのような関係が認められた(図13).

すなわち、

a) 切縁のどの部位に荷重を加えても、根面唇側部に加わる力は歯冠切縁の唇舌的位置が唇側寄りにあるほど大きい。

b) ところが、根面の近心側部と遠心側部とに加わる力の間には、歯冠切縁の唇舌的位置とは関係なく差異は認められなかった。

2. 継続歯の歯冠の長さで継続歯の根面の各部に加わ

る力との関係

継続歯の歯冠の長さを、12mm、9mm および6mm に変えても、

1) 力の加わる継続歯の根面の部位は、歯冠切縁の唇舌的位置を変えた場合の実験結果とまったく同様である。すなわち、

a) 歯冠切縁近心部に荷重を加えるときには、根面の

図 14 継続歯の歯冠の長さで根面の各に加わる力の記録波形（荷重部位：切縁近心部）
歯冠の長さ：左；12mm，中；9mm，右；6mm

図 16 継続歯の歯冠の長さで根面の各に加わる力の記録波形（荷重部位：切縁遠心部）

唇側部と近心側部とに力に加わる（図14）。

b) 切縁中央部に荷重を加えると、根面唇側部にほとんどの力に加わるが、根面近心側部にも一部分の力が作用する（図15）。

c) 切縁遠心部に荷重を加える場合には、根面の唇側部と遠心側部とに力に加わる（図16）。

d) 根面唇側部に加わる力は、切縁中央部に荷重を加えたときが最も大きい（図17）。

しかし、

2) 歯冠の長さの変化と、継続歯の根面の各に加わる力の大きさとの関係（図17）は、

a) 根面唇側部に加わる力は、歯冠の長さが長いほど

図 15 継続歯の歯冠の長さで根面の各に加わる力の記録波形（荷重部位：切縁中央部）

図 17 継続歯の歯冠の長さおよび荷重部位と根面の各に加わる力の大きさとの比較
歯冠の長さ：左；12mm，中；9mm，右；6mm

大きい。

b) ところが、根面の近心側部および遠心側部に加わる力は、歯冠の長さが長くなるほど小さくなる。

3. 継続歯の歯冠切縁に加える荷重の角度と継続歯の根面唇側部に加わる力の大きさとの関係

舌側方向から歯冠切縁中央部に加える荷重の角度を、歯軸に対して0°から90°まで変化させて、根面唇側部に加わる力の大きさを比較すると（図18）、

1) 根面唇側部に加わる力は、歯軸方向に力を加えたときが最も小さい。

2) そして、荷重を加える角度が歯軸に対して大きく

図 18 継続歯の歯冠切縁に加える荷重の角度と根面唇側部に加わる力の大きさとの関係

だけに力が加わる(図20)。

c) そして、切縁遠心部に荷重を加えると、根面の唇側部と遠心側部とに力が加わる(図21)。

d) 根面唇側部に加わる力は、切縁中央部に荷重を加えたときもつとも大きい(図22)。

2) しかし、継続歯の根面唇側部に加わる力の大きさと楕円形合釘の長径の方向との関係を比較すると(図22)。

a) 合釘の長径が近遠心方向(横方向)のときには、切縁のどの部位に荷重を加えても根面唇側部に加わる力はもつとも大きい。

b) しかし、合釘の長径が唇舌方向(縦方向)および遠心唇側・近心舌側方向(斜め方向)にある場合とでは、根面唇側部に加わる力の大きさにはあまり差異が認めら

なるにつれて、根面唇側部に加わる力は大きくなる。

4. 継続歯の合釘の形態と継続歯の根面の各部に加わる力との関係

横断面が楕円形である継続歯の合釘の長径が、近遠心方向(横方向)、遠心唇側・近心舌側方向(斜め方向)および唇舌方向(縦方向)になるようにその位置を変えて、それぞれ歯冠切縁に荷重を加えたところ、

1) 歯冠切縁に対する荷重部位と、力の加わる継続歯の根面の部位との関係は、実験 C-1および C-2の結果とほぼ同様に、

a) 切縁近心部に荷重を加えるときには、根面の唇側部と近心側部とに力が加わる(図19)。

b) 切縁中央部に荷重を加える場合には、根面唇側部

図 20 合釘の形態と根面の各部に加わる力の記録波形(荷重部位: 切縁中央部)

図 19 合釘の形態と根面の各部に加わる力の記録波形(荷重部位: 切縁近心部)
合釘の形態: 左; 長径が近遠心方向にある楕円形, 中; 長径が遠心唇側方向から近心舌側方向に向かう楕円形, 右; 長径が唇舌的方向にある楕円形

図 21 合釘の形態と根面の各部に加わる力の記録波形(荷重部位: 切縁遠心部)

図 22 合釘の形態および荷重部位と根面の各部に加わる力の大きさとの比較
合釘の形態：左；長径が近遠心方向にある楕円形，中；長径が遠心唇側方向から近心舌側方向に向かう楕円形，右；長径が唇舌方向にある楕円形

れない。

5. 継続歯の合釘の長さで継続歯の根面唇側部に加わる力の大きさとの関係

歯冠切縁中央部に荷重を加えたときの継続歯の根面唇側部に加わる力を，合釘の長さが12mm，10mm，8mm，

図 23 合釘の長さで根面唇側部に加わる力の記録波形

図 24 合釘の長さで根面唇側部に加わる力の大きさとの比較

6mm および4mm の場合について比較すると，12mm のときがもっとも小さく，合釘の長さが短くなるほど根面唇側部に加わる力は大きくなることを認めた (図23，図24)。

6. 合釘の長さで歯根歯頸部表面のひずみとの関係 舌側方向から歯軸に対して直角に，合釘に1kg および2kg の荷重をばね秤りで加えると (図25，図26)，

1) 唇側歯根歯頸部表面には圧縮ひずみが，舌側歯根歯頸部表面には引張りひずみが生ずる。

2) 合釘の長さを短くするほど，唇側および舌側歯根歯頸部表面に生ずるひずみはともに大きくなる。

3) 加える荷重の大きさを1kg から2kg にすると，唇側および舌側歯根歯頸部表面のひずみともに等差級数的に増加する傾向を示す。

総括および考察

わが国では，前歯部の無髄処置歯の補綴には継続歯が

図 25 合釘の長さで唇側歯根歯頸部表面のひずみとの関係
—○—：1kg 荷重
---●---：2kg 荷重

図 26 合釘の長さで舌側歯根歯頸部表面のひずみとの関係
—○—：1kg 荷重
---●---：2kg 荷重

$$M_b = Fl$$

$$M_b = F(1-x)$$

図 27 片持りの曲げモーメント

a: 自由端, b: 固定端, M: 曲げモーメント, F: 荷重

$$1\text{kg} \times \sin 30^\circ = 500\text{g}$$

図 28 継続歯の歯冠に加える荷重の角度と水平分力との関係

$$J = \frac{\pi b d^3}{64}$$

$$J = \frac{\pi b^3 d}{64}$$

図 29 図心を通る軸と断面二次モーメントとの関係

X: 図心を通る軸, J: 断面二次モーメント

多く用いられているのが現状である⁸⁹⁻⁹²⁾。

ところが、継続歯は脱落することがあり⁸⁹⁾、その原因が根壁の破折によることもあるが、それよりも合釘が折れ曲がつて脱落する例のほうがやや多いといわれている⁹⁰⁾。そして、継続歯脱落の原因は歯冠部に加わる咬合力によつて根面周縁部を支点として歯冠部の回転が起こり、同時に歯冠部との接合部に近い部分で合釘が曲がつて合釘孔から離脱することによるという⁸⁹⁻⁹⁷⁾。

また、コアを施したジャケットクラウンでは、唇側の辺縁部で破折することがあるが、それは支点となる根面周縁部に咬合力が集中することに基因すると考えられる⁸⁸⁾。

しかし、このような継続歯あるいはコアを施したジ

ャケットクラウンの破折や脱落を起こさせる力について検討した報告は少ない。

そこで、著者は被検者に継続歯でもつとも作製頻度の高いといわれている上顎中切歯継続歯⁹¹⁻⁹³⁾で咬合、咀嚼させ、継続歯を介して、その支台歯の根面に加わる力の分布様式から、継続歯やコアの脱落の原因を力学的に考察しようと考えて、この実験に着手した。

ところが、補綴支台歯の応力分布を模型について検討した実験はきわめて多い。しかし、従来からこの種の実験では、光弾性による方法が多く用いられ、ストレインゲージ法によつて測定した実験には、Kydd, W. L. et al. (1964)⁸⁷⁾, Henderson, D. and Seward, T. E. (1967)⁸⁸⁾および Shohet, H. (1969)⁸⁹⁾らの局部床義歯支台歯についての報告があるだけである。

著者は、ストレインゲージを応用した受圧装置を考案し、これを駆使して実験を進め、所期の目的を達成することができた。

A. 実験装置

著者が考案した受圧装置は、ストレインゲージを応用したパラジウム合金の板ばね機構をとり入れたものである(図1, 図2)。

そして、2kg 以内の荷重であれば板ばねのひずみ量は荷重量に正比例するし、そのうえ面積のきわめて小さい支台歯の根面の唇側部、舌側部、近心側部および遠心側部の四か所にしかも口腔内で設置することができるほど微小なものであるので、根面のどの部位に力が集中しているかを、きわめて精細に測定できるという特徴をもっている。

したがって、この受圧装置は根面の各に加わる力の分布様式を明らかにするという、本実験の目的には十分に利用できるものである。

B. 予備実験

1. 継続歯の根面の各に加わる力の分布様式について

継続歯の歯冠切縁中央部にばね秤りで荷重を加えるときには、力は根面のほとんど唇側部だけにしか加わっていないが、切縁の近心部あるいは遠心部に荷重を与えると、根面唇側部のほかにそれぞれ根面の近心側部、あるいは遠心側部にも力が加わっていることが、予備実験から明らかになった(図5, 図6, 表2)。

したがって、荷重を切縁の中央部、近心部あるいは遠心部に加えると、継続歯の歯冠は合釘を軸としてそれぞれ唇側に、近心側にあるいは遠心側に傾斜することがわかる。

これと同じ現象は天然歯において、その歯冠切縁に荷重を加えたときにも認められている。すなわち、Kakudo, Y. et al. (1967)⁵⁵⁾および覚道ら (1969)⁵⁶⁾は上顎中切歯抜去歯の歯冠の唇面、舌面、近心面および遠心面に歯軸方向にストレインゲージをはり、歯冠切縁の近心部、中央部および遠心部の各部に荷重を加えたときに現われる歯冠の各歯面のひずみを記録して、歯は咬合力あるいは咀嚼力によつて力の加わる方向にひずむことを証明している。

このように、咬合力や咀嚼力が歯根によつて受容される天然歯歯冠でさえも、力を加える部位によつて近心側や遠心側にひずむのであるから、まして歯根よりも細い合釘によつて咬合力や咀嚼力が支持されている継続歯においては、その歯冠の傾斜する傾向が天然歯に比べて大きいのは当然のことである。

2. 継続歯の根面の各部に加わる力の大きさについて
根面唇側部に加わる力は切縁の近心部、あるいは遠心部に荷重を加えるときよりも、切縁中央部に加えるときのほうが大きい(図5, 図6, 表2)。

このことは、切縁中央部に加えた荷重は、その全部が合釘を直接唇側方向に曲げようとする力として働くのに対して、切縁の近心部あるいは遠心部に荷重を加える場合には、荷重の一部は根面のそれぞれ近心側部あるいは遠心側部で分担されて、合釘をねじめるような力として作用するので、根面唇側部に加わる力が減少することに基因している。

3. 継続歯の合釘と合釘孔とのセメント装着の影響について

継続歯の合釘を合釘孔にセメント装着したときには、セメント装置前に比べて根面の各部に加わる力はやや減少している。

しかし、セメント装置前後における根面に加わる力の減少率は、歯冠切縁のどの部位に荷重を加えても、また根面のどの部位に力が加わつてもつねにほぼ一定であるし、根面に加わる力の分布様式にもセメント装着の前後においてまったく変化が認められない。

したがつて、セメント装着の有無は実験結果に対しては、それほど大きな影響を与えるものではないことは明白である(図5, 図6, 表2)。

C. 生体での実験

1. 咬合力測定器を咬合させたときの継続歯の根面に加わる力について

1) 継続歯の根面の各部に加わる力の分布について
咬合力測定器を継続歯歯冠の切縁近心部で咬合させる

と根面の唇側部と近心側部とに、また切縁中央部で咬合させるときには根面唇側部だけに、そして切縁遠心部における咬合では、根面の唇側部と遠心側部とにそれぞれ力が加わる。すなわち、根面唇側部には切縁のどの部位で咬合させても力が加わっている(図7, 表3)。

2) 継続歯の根面の各部に加わる力の大きさについて
咬合力をしないで大きくしても根面に加わる力の部位は、1)の場合とまったく同様であるが、根面の各部に加わる力の大きさは、切縁のどの部位で咬合させても咬合力が大きくなるにつれて増加する(図8, 表4)。

また、根面唇側部に加わる力は同じ大きさの咬合力でも切縁中央部で咬合させたときがもつとも大きい(図7, 表3)。

2. 食品を咀嚼させたときの継続歯の根面に加わる力について

1) 継続歯の根面に加わる力の記録波形の分析

ピーナッツまたはせんべいを継続歯で咬断させるときには、根面唇側部だけに咀嚼力が加わる場合もあれば、根面の唇側部と近心側部とに力が作用するときもあり、また初めに根面の唇側部と近心側部とに、ついで少しくれて根面の唇側部と遠心側部とに咀嚼力が加わる場合などもみられた(図9)。

そして、根面唇側部だけに力が加わる場合は、歯冠切縁中央部で咀嚼したときであり、また根面の唇側部と近心側部とに力が作用するときには、切縁近心部で咬合したことを示し、最初根面の唇側部と近心側部とに、ついで少しくれて根面の唇側部と遠心側部とに力が加わる場合は初めに切縁近心部で、つづいて切縁遠心部で咬断したことを現わしている。食品咀嚼時にこのような現象が認められるのは、食品の咬断時に下顎が左右に動く⁵⁵⁾ことが原因であろう。

なお、Kakudo, Y. et al. (1967)⁵⁵⁾および覚道ら (1969)⁵⁶⁾によると、ピーナッツ、クラッカーあるいは岩おこしのような咬断時に破砕される食品を咀嚼するときには、上顎中切歯唇面における歯軸方向のひずみ波形も clear cut であるという。だから食品の咀嚼時に継続歯の根面に加わる力の記録波形に2~3個の連続した棘波が認められたという著者の実験結果は、食品破砕時や歯と歯が直接接触したときに起こる咀嚼力の瞬間的な変化に基因するものであると考えられる。

2) 継続歯の根面に加わる力の方向について

継続歯で咬合力測定器を咬合させたときでも、また食品を咀嚼させたときでも、根面の唇側部、近心側部あるいは遠心側部、とくに根面唇側部にはつねに大きな力が

加わっているが、根面舌側部にはどのようなときもまったく力が働いていない。このことは合釘が合釘孔内で沈むことなく、つねに歯冠が合釘を軸として唇側、近心側あるいは遠心側の方向、とくに唇側方向に強く傾斜していることを示している。

このように、咬合や咀嚼時には唇側方向への大きな水平分力が継続歯歯冠部に働いていることは、上下顎の中切歯がどちらも唇側方向に傾斜しているという形態学的特性⁹⁹⁻¹⁰³⁾や Parfitt, G. J. (1961)¹⁰⁴⁾ の歯の機能時の動きについての報告、あるいは Kakudo, Y. et al. (1967)⁶⁵⁾ および覚道ら (1969)⁶⁶⁾ の咬合、咀嚼時の天然歯の歯冠部のひずみに関する実験結果からも推測されることであるが、著者の実験において実証されたわけである。

だから、従来からいわれている上顎中切歯の補綴物の設計や作製にあたっては、舌側方向から唇側方向へ加わる水平分力を十分に考慮しなければならないということを、なおいつそう強調できる根拠が著者の実験によつて与えられたといえる。

しかし、継続歯の根面唇側部に加わる力がどのような因子によつて影響を受けるか検討しなければならない。したがって、この点を詳細に究明するために、さらに模型実験を行なう必要性と意義が十分に認められる。

D. 模型についての実験

1. 継続歯の歯冠切縁の唇舌的位置および歯冠の長さ と継続歯の根面の各部に加わる力との関係について

継続歯の歯冠切縁の唇舌的位置が唇側寄りにあるほど、継続歯の根面唇側部に加わる力は大きく、舌側寄りにあるほど小さい。しかし、根面の近心側部および遠心側部に加わる力は、歯冠切縁の唇舌的位置によつてあまり影響を受けない(図13)。

また、歯冠の長さが短いほど根面唇側部に加わる力は小さいが、根面の近心側部および遠心側部に加わる力は、これとは逆に歯冠の長さが短くなるほど大きくなる傾向を示している(図17)。

以上の事実から、継続歯に咬合力あるいは咀嚼力が加わる時には、合釘孔内にある合釘部分を固定端とし、歯冠切縁を自由端とした片持りの曲げモーメントが継続歯に生じていることが想像できる。

図27に示すように、一端を固定したはりの自由端 a に集中荷重 F を加えたときの、はりの断面における曲げモーメントは、固定端 b において最大 (Fl) であるが、自由端 a' に集中荷重 F を加えると、固定端 b に

おける曲げモーメントは $F(l-x)$ に減少する。したがって、曲げモーメントが最大の固定端すなわち合釘部分、が曲がつて根面唇側部に力が加わり、歯冠の長さが短くなるほど根面唇側部に加わる力は小さくなり、根面の近心側部および遠心側部に加わる力は逆に大きくなるのであると考えられる。

また、片持りにおいては、曲げモーメントははりの固定端において最大値を示すので、はりの断面が一様である場合には固定端がいちばん弱い。まして、継続歯では歯冠断面よりも合釘断面のほうが細く、はりの固定端だけがとくに細い片持りであるので、固定端はよりいつそう弱くなる。したがって、日常の臨床において継続歯の合釘が折れ曲がつて脱落することがあるのは、固定端に相当する合釘部分に曲げモーメントや、せん断力が働くことがその原動力であるといえる。

石井(1968)⁸⁶⁾はジャケットクラウンの歯冠部模型を用いて、その破折機構を検討した実験結果から、コアを施したジャケットクラウンの破折の原因を推測しているが、コアを施したジャケットクラウンは合釘を有するという点においては、咬合力や咀嚼力による歯冠部の曲がり方が、継続歯の場合と同じと考えてよい。だからコアを施したジャケットクラウンの唇側辺縁部に生ずる破折は継続歯について解明した著者の実験結果と、まったく同様の機序によつて起こるといえる。

2. 継続歯の歯冠切縁に加える荷重の角度と、継続歯の根面唇側部に加わる力との関係について

継続歯の歯冠切縁中央部に荷重を舌側方向から唇側方向へ加えるときには、その荷重の方向が歯軸方向に近づくほど、継続歯の根面唇側部に加わる力は小さくなり、逆に遠ざかるほど大きくなる(図18)。

そこで、舌側方向から歯軸に対して 30° の角度で 1 kg の荷重を加えた場合の水平分力を計算すると、 $1\text{ kg} \times \sin 30^\circ = 1\text{ kg} \times \frac{1}{2} = 500\text{ g}$ となる(図28)。また、角度が 45° の場合は約 707 g ($1\text{ kg} \times \sin 45^\circ$)、 60° のときには約 866 g ($1\text{ kg} \times \sin 60^\circ$)、である。だから、荷重方向が水平方向に近づくほど、すなわち歯軸に対する荷重の水平分力が大きくなるほど、合釘における唇側方向への曲げモーメントが大きくなる結果、根面唇側部に加わる力が増加するのであろう。

3. 継続歯の合釘の形態と、継続歯の根面の各部に加わる力との関係について

一般に、合釘の形態は歯根の横断面にほぼ相似形であるか、あるいは唇舌的に楕円形または卵円形であることが合理的である^{94, 97)}といわれている。また、楕円形の図

心を通る軸に対する断面二次モーメント $J (\pi b d^3/64, \pi b^3 d/64)$ (図29)¹⁰⁵⁾と、材料の縦弾性係数 E との積、すなわち“曲げこわさ” JE の値が大きいほど曲がりにくい¹⁰⁶⁾。このことを合釘に当てはめて考えると、横断面が楕円形である合釘では、曲げこわさは長径方向 (d^3) から加圧する場合のほうが短径方向 (b^3) から加圧するときよりも大きい。したがって、咬合力や咀嚼力の加わるおもな方向が唇舌方向であることを考慮すると、合釘の横断面は唇舌径の大きい形態にすべきである⁸⁷⁾といえる。

ところが、その長径の方向がそれぞれ近遠心方向、遠心唇側方向から近心舌側方向および唇舌方向にある楕円形合釘について、継続歯の根面の各部に加わる力を比較検討した著者の実験では、歯冠切縁のどの部位に荷重を加えても、根面唇側部に加わる力は合釘の長径が近遠心方向にあるときがもつとも大きくなり、合釘の長径を唇舌方向におくのがよいという先人の意見に一致した知見を得た。しかし、合釘の長径を斜め(遠心唇側・近心舌側方向)においたときも、唇舌方向にしたときと根面唇側部に加わる力にはあまり差は認められない(図22)。

4. 継続歯の合釘の長さ、継続歯の根面唇側部に加わる力の大きさとの関係について

継続歯の合釘の長さを短くするほど、根面唇側部に加わる力は増加する(図24)。このことはつぎのような機序によると考えられる。

合釘の長さの変化と合釘を支えている合釘孔壁の単位面積あたりに働く力との関係、すなわち合釘の長さ、歯根歯頸部表面のひずみの変化との関係を調べると、同じ大きさの力を合釘に加えても合釘孔内にある合釘の長さが短くなるほど、歯根歯頸部表面のひずみは増加する(図25、図26)。このことは歯根歯頸部に加わる応力が大きくなることを示すものであり、継続歯の歯冠に力を加えた Koller, K. C. (1954)¹⁰⁷⁾ の成績も一致している。したがって、合釘孔内の合釘の長さを短くすると合釘を支えている合釘孔壁の単位面積あたりに働く力が増加し、根面唇側部に加わる力が増大するのである。

予備実験においても、継続歯をセメント装着したときのほうが、セメント装着しないときよりも根面に加わる力がやや減少するという結果(図6)を得ているが、このことも合釘と合釘孔壁との間隙にセメントが満たされたために、合釘を支えている合釘孔壁の単位面積あたりに作用する力が減少したことによるものであるといえる。

また、セメント装着した合釘の引き抜き試験を行なった花村(1964)¹⁰⁸⁾および Colley, I. T. et al. (1968)¹⁰⁹⁾

の報告によると、合釘を引き抜くときの荷重の大きさ、すなわち合釘の保持力は合釘が長いほど大きいといっているが、この実験結果も合釘は長いほど脱着しにくいという点では応力分布の立場から検討した著者の実験成績に一致している。

なお、出井(1954)¹¹⁾および宮内(1959)¹²⁾は光弾性実験により、継続歯の歯冠に舌側から荷重を加えると、唇側には圧縮応力が、舌側には引張り応力がみられ、根の唇側歯頸部および舌側歯根尖 $1/3$ 部、すなわち合釘の先端部に応力が集中し、継続歯は歯頸部を支点として槓杆運動をしていることがうかがえると述べているが、この所見も抜去歯歯根についてストレインゲージ法によって行なった著者の実験による知見と同じである。

結 論

継続歯の根面に加わる咬合力および咀嚼力の大きさ、方向および分布様式と継続歯の歯冠の長さや傾斜、あるいは合釘の長さや形態などが、継続歯の根面に加わる力にどのような影響を与えるかを、生体ならびに模型について検討し、つぎのような結論を得た。

1. ストレインゲージを応用し、上顎中切歯継続歯支台歯の根面の唇側部、舌側部、近心側部および遠心側部に加わる咬合力や咀嚼力の大きさから、継続歯の根面に加わる力の方向および分布様式を、直接測定できる受圧装置を考案した。

2. この装置を被検者の継続歯支台歯に装着して、咬合力測定器を継続歯の歯冠切縁で咬合させたときと、食品を咬断させた場合とについて測定した結果、

- 1) 咬合力測定器を歯冠切縁近心部で咬合させると、根面の唇側部と近心側部とに、切縁中央部で咬合するときには根面唇側部だけに、切縁遠心部での咬合では根面の唇側部と遠心側部とに力が加わる。

- 2) 根面唇側部に加わる力は、切縁中央部で咬合したときがもつとも大きい。

- 3) 咬合力を大きくすると、それに伴って根面のどの部位に加わる力も増加する。

- 4) ピーナッツあるいはせんべいを咬断させても、根面唇側部にはつねに大きな力が加わる。また、根面に加わる力の記録波形には、2～3個の連続した棘波が認められる。

- 5) 以上のことから、継続歯での咬合、咀嚼時にはつねに根面唇側部に力が集中することが明らかとなった。

3. そして、根面唇側部に加わる力の大きさが継続歯のどのような因子によつて影響を受けるかを追究するた

めに、さらに、模型について実験した結果、継続歯の根面唇側部に加わる力は、

- 1) 継続歯の歯冠切縁の唇舌的位置が唇側寄りにあるほど大きくなる。
- 2) 継続歯の歯冠の長さが長いほど大きい。
- 3) 継続歯の歯冠切縁に舌側方向から加わる荷重の方向が、歯軸に近づくほど小さくなる。
- 4) 継続歯の楕円形合釘横断面の長径方向が、唇舌方向にあるときが小さい。
- 5) 継続歯の合釘の長さが長いほど小さい。

稿を終わるにあたり、絶えずご指導をたまわり、本文のご校閲をいただいた小森富夫教授ならびに本学生理学教室覚達幸男教授に深甚の謝意を表わします。

また、終始一貫してご鞭撻をいただいた釜谷博之助教授および種々ご協力くださった教室員各位や大学院学生諸氏に感謝いたします。

この論文の要旨は、第56回日本補綴歯科学会（昭和44年10月13日、大阪）ならびに第170回大阪歯科学会例会（昭和44年11月8日、大阪）で発表した。

文 献

- 1) Zak, B.: Photoelastische Analyse in der orthodontischen Mechanik, Z. Stomatol., 22-37, 87-103, 1935.
- 2) 矢島忠夫, 三宅直晴, 原学郎ほか: 歯牙の光弾性実験(第1報), 歯科学報, 53: 537-540, 1953.
- 3) 矢島忠夫: 歯牙の光弾性実験(第2報), 前歯部断面について, 歯科学報, 54: 121-130, 1954.
- 4) 矢島忠夫: 歯牙の光弾性実験(第3報), 臼歯部断面について, 歯科学報, 54: 323-332, 1954.
- 5) 矢島忠夫: 歯牙の光弾性実験(第4報), 歯槽骨上縁の下降による歯牙の応力変化について, 歯科学報, 54: 365-368, 1954.
- 6) 宮内孝雄, 久保田英雄: 歯牙の三次元光弾性実験方法について, 歯科学報, 57: 55-59, 1957.
- 7) 宮内孝雄: 歯牙の三次元光弾性実験(第1報), 前歯の静力学的考察, 歯科学報, 59: 81-94, 1959.
- 8) 伊藤広: 歯牙移動に関する光弾力学的検索, 米子医誌, 10: 80-98, 1959.
- 9) 本間富平, 本間正己, 重内宏敏ほか: 上顎中切歯の形態に関する力学的考察, (1) 舌面形態と咬合の関係についての力学的考察, 慶応医学, 37: 33-40, 1960.
- 10) 本間富平, 本間正己, 田村寛之ほか: 上顎中切歯の形態に関する力学的考察(2) 増齡の変形について, 歯科学報, 60: 42-49, 1960.
- 11) 出井義教: 歯冠補綴物支台歯の力学的考察(第1報), 歯冠補綴物支台歯の光弾性実験, 歯科学報, 54: 411-420, 1954.
- 12) 宮内孝雄: 歯牙の三次元光弾性実験(第2報), 歯冠補綴物支台歯の静力学的考察, 歯科学報, 59: 306-313, 1959.
- 13) Colin, L., Kaufman, E. G. and Papirno, R.: Stress concentrations in full crown restorations, N. Y. State Dent. J., 29: 370-373, 1963.
- 14) 中林靖夫: 全部鋳造冠支台歯の各形態の力学的研究(第1報), 補綴誌, 11: 88-93, 1967.
- 15) Motsch, A. und Gauss, O.: Spannungsoptische Untersuchungen über Frontzahnbrückenanker, Dtsch. zahnärztl. Z., 24: 797-802, 1969.
- 16) 大多和彦一: 鉤(Clasp Rest)の歯牙に及ぼす影響について, 第一報, 主応力線について(Lines of principal stress)(その1), 歯科学報, 55: 329-334, 1955.
- 17) 大多和彦一: 鉤(Clasp Rest)の歯牙に及ぼす影響について, 第一報, 主応力線について(Lines of principal stress)(完), 歯科学報, 55: 395-402, 1955.
- 18) 大多和彦一: 鉤(Clasp Rest)の歯牙に及ぼす影響について, 第2報, 周辺応力の分布について, 歯科学報, 55: 413-419, 1955.
- 19) 井上好夫: Clasp Occlusal-Restの歯牙並びに歯槽骨に及ぼす力学的検索, 第I報, 基礎実験について, 米子医誌, 10: 318-332, 1959.
- 20) 井上好夫: Clasp Occlusal-Restの歯牙並びに歯槽骨に及ぼす力学的検索, 第II報, 臨床応用面の力学的考察について, 米子医誌, 10: 333-338, 1959.
- 21) 水川一広: 鉤歯, その歯槽窩骨および床支持歯槽堤骨にあらわれる咬合荷重の三次元的弾性研究(その1), 補綴誌, 9: 183-202, 1915.
- 22) 水川一広: 鉤歯, その歯槽窩骨および床支持歯槽堤骨にあらわれる咬合荷重の三次元的弾性研究(その2), 補綴誌, 10: 26-38, 1966.
- 23) 渡辺孝雄: 金属インレー窩洞の光弾性実験による静力学的考察(その1), 歯科学報, 55: 376-381, 1955.
- 24) 渡辺孝雄: 金属インレー窩洞の光弾性実験による静力学的考察(その2), 歯科学報, 56: 65-70, 1956.
- 25) 渡辺孝雄: 金属インレー窩洞の光弾性実験による静力学的考察(その3), 歯科学報, 56: 107-116, 1956.
- 26) Granath, L.-E.: A technique of photoelasticity employed in comparative dental investigations, Odont. Rev., 14: 136-144, 1963.
- 27) Granath, L.-E.: Photoelastic studies on certain factors influencing the relation between cavity and restoration, Odont. Rev., 14: 278-293, 1963.
- 28) Granath, L.-E.: Photoelastic studies on occlusal-proximal sections of Class II restora-

- tions, *Odont. Rev.*, 15 : 169-185, 1964.
- 29) Granath, L-E. : Further photoelastic studies on the relation between the cavity and the occlusal portion of Class II restorations, *Odont. Rev.*, 15 : 290-298, 1964.
 - 30) Granath, L-E. : The photoelastic determination of internal stress in Class II restorations, *Odont. Rev.*, 15 : 349-365, 1964.
 - 31) Davidson, G. B. : A method for three-dimensional photoelastic stress analysis of the remaining tooth structure associated with various cavity preparations, *J. dent. Res.*, 43 : 43 : 912, 1964.
 - 32) Schreiber, S. und Motsch, A. : Kritische Untersuchungen der klassischen Kavitätenpräparationsregeln mit Hilfe spannungsoptischer Verfahren, *Dtsch. zahnärztl. Z.*, 23 : 171-178, 1968.
 - 33) Johnson, E. W., Castaldi, C. R. and Wysocki, G. P. : Stress pattern variations in operatively prepared human teeth, studied by three-dimensional photoelasticity, *J. dent. Res.*, 47 : 548-558, 1968.
 - 34) 毛利邦雄, 細川貞雄, 松浦智二 : 義歯床に加わる咬合圧の研究, 補綴誌, 5 : 230, 1961.
 - 35) Klötzer, W. : Zur Prothesenwiederherstellung : Wege zur Minderung der Bruchanfälligkeit der Kunststoffprothesen, *Dtsch. zahnärztl. Z.*, 18 : 961-967, 1963.
 - 36) Klötzer, W. : Spannungsoptische Festigkeitsuntersuchungen einiger Prothesentypen, *Dtsch. zahnärztl. Z.*, 19 : 375-384, 1964.
 - 37) Klötzer, W. : Über polarisationsoptische Untersuchungen an Prothesenmodellkörpern : *Dtsch. zahnärztl. Z.*, 21 : 894-901, 1966.
 - 38) 久保田英雄 : 有床義歯における人工歯と歯槽頂との位置的關係について(その1), 歯科学報, 59 : 377-384, 1959.
 - 39) 久保田英雄 : 有床義歯における人工歯と歯槽頂との位置的關係について(完), 歯科学報, 59 : 490-496, 1959.
 - 40) 長田昇 : 歯科補綴学的考察に基づく義歯床用陶歯の光弾性実験(その1), 歯科学報, 56 : 415-423, 1956.
 - 41) 長田昇 : 歯科補綴学的考察に基づく義歯床用陶歯の光弾性実験(完), 歯科学報, 56 : 475-484, 1956.
 - 42) 宮内孝雄, 久保田英雄, 関根弘ほか : クラスプの光弾性実験(第1報), 歯科学報, 59 : 1243-1244, 1959.
 - 43) 河合庄治郎, 小室史郎, 奥野善彦ほか : 鉤の光弾性による研究, 補綴誌, 5 : 234, 1961.
 - 44) 村松篤良, 安達和子 : 切り口を有する変断面円環の曲げ(cast clasp 設計への一寄与), 歯科理工誌, 3 : 51-55, 1962.
 - 45) 村松篤良, 安達和子 : Cast Clasp の光弾性的応力解析, 歯材研報, 2 : 484-490, 1963.
 - 46) 村松篤良, 安達和子 : Cast Clasp の光弾性的応力解析 II, 歯科理工誌, 5 : 152-158, 1964.
 - 47) 奥野善彦 : 鑄造鉤の形態に関する力学的研究, 大阪大学歯学誌, 13 : 341-352, 1968.
 - 48) 久保田英雄, 宮内孝雄 : バラタルバーの静力学的考察, 歯科学報, 57 : 125-129, 1957.
 - 49) Walton, C. B. and Leven, M. M. : A preliminary report of photoelastic tests of strain patterns within jacket crowns : *J. Amer. dent. Ass.*, 50 : 44-48, 1955.
 - 50) Pettrow, J. N. : Practical factors in building and firing characteristic of dental porcelain, *J. pros. Dent.*, 11 : 334-344, 1961.
 - 51) Lehman, M. L. and Hampson, E. L. : A study of strain patterns in jacket crowns on anterior teeth resulting from different tooth preparation, *Brit. dent. J.*, 113 : 337-345, 1962.
 - 52) Rumetsch, W., Schreiber, S. und Motsch, A. : Zur Statik der Jacketkrone : Spannungsoptische Modellversuche, *Schweiz. Mschr. Zahnheilk.*, 75 : 953-975, 1965.
 - 53) Craig, R. G., El-Ebrashi, M. K. and Peyton, F.A. : Experimental stress analysis of dental restorations, Part II. Two-dimensional photoelastic stress analysis of crowns, *J. pros. Dent.*, 17 : 292-302, 1967.
 - 54) Jourdan, R., Jung, T. und Primus, I. F. : Spannungsoptische Untersuchungen an Brückenmodellen, *Dtsch. zahnärztl. Z.*, 23 : 1482-1487, 1968.
 - 55) Craig, R. G., El-Ebrashi, M. K., LePeak, P. J. and Peyton, F. A. : Experimental stress analysis of dental restorations, Part I. Two-dimensional photoelastic stress analysis of inlays, *J. pros. Dent.*, 17 : 277-291, 1967.
 - 56) Hanskins, R. C., Haack, D. C. and Ireland, R. L. : A study of stress pattern variations in class II cavity restorations as a result of different cavity designs, *J. dent. Res.*, 33 : 757-766, 1954.
 - 57) Guard, W. F., Haack, D. C. and Ireland, R. L. : Photoelastic stress analysis of buccolingual sections of Class II cavity restorations, *J. Amer. dent. Ass.*, 57 : 631-635, 1959.
 - 58) Mahler, D. B. : An analysis of stresses in a dental amalgam restoration, *J. dent. Res.*, 37 : 516-526, 1958.
 - 59) 村松篤良, 塩川延洋, 中原一郎 : 全部床義歯の応力分布について, 歯材研報, 1(2) : 33-41, 1954.
 - 60) Matthews, E. and Wain, E. A. : Stresses in denture bases, *Brit. dent. J.*, 100 : 167-171,

- 1956.
- 61) 杉田英雄：応力塗料による義歯床の応力分布，*齒科理工誌*，8：126-137，1967.
- 62) 宝田勇：応力塗料のクラスプに対する応用，*齒科学報*，63：629-633，1963.
- 63) Craig, R. G. and Peyton, F. A.: Measurement of stresses in fixed-bridge restorations using a brittle coating technique, *J. dent. Res.*, 44: 756-762, 1965.
- 64) 足立学：抵抗線歪計による歯牙応力分布の三次元的研究，*米子医誌*，15：300-318，1964.
- 65) Kakudo, Y., Amano, N. and Izumi, K.: Strain on the hard tissue of human teeth biting during and mastication, *J. Osaka, dent. Univ.*, 1: 167-180, 1967.
- 66) 覚道幸男，天野仁一郎，和泉功一：咬合時および咀嚼時の歯のひずみ，*歯界展望*，33：199-206，1969.
- 67) Kydd, W. L., Dutton, D. A. and Smith, D. W.: Lateral forces exerted on abutment teeth by partial dentures, *J. Amer. dent. Ass.*, 68: 859-863, 1964.
- 68) Henderson, D. and Seward, T. E.: Design and force distribution with removable partial dentures: A progress report, *J. pros. Dent.*, 17: 350-364, 1967.
- 69) Shohet, H.: Relative magnitudes of stress on abutment teeth with different retainers, *J. pros. Dent.*, 21: 267-282, 1969.
- 70) Regli, C. P. and Kydd, W. L.: A preliminary study of the lateral deformation of metal base dentures in relation to plastic base dentures, *J. pros. Dent.*, 3: 326-330, 1953.
- 71) Regli, C. P. and Gaskill, H. L.: Denture base deformation during function, *J. pros. Dent.*, 4: 548-554, 1954.
- 72) Frechette, A. R.: Masticatory forces associated with the use of various types of artificial teeth, *J. pros. Dent.*, 5: 252-267, 1955.
- 73) Frechette, A. R.: Comparison of balanced and nonbalanced occlusion of artificial dentures based upon distribution of masticatory force, *J. pros. Dent.*, 5: 801-810, 1955.
- 74) Kydd, W. L.: Complete denture base deformation with varied occlusal tooth form, *J. pros. Dent.*, 6: 714-718, 1956.
- 75) Kydd, W. L.: The comminuting efficiency of varied occlusal tooth form and the associated deformation of the complete denture base, *J. Amer. dent. Ass.*, 61: 465-471, 1960.
- 76) Lambrecht, J. R. and Kydd, W. L.: A functional stress analysis of the maxillary complete denture base, *J. pros. Dent.*, 12: 865-872, 1962.
- 77) Swoope, C. C. and Kydd, W. L.: The effect of cusp form and occlusal surface area on denture base deformation, *J. pros. Dent.*, 16: 34-43, 1966.
- 78) 関根弘，田島篤治，柳川浩ほか：義歯の力学的研究(第7報)，クラスプの力学的考察(その1)，*補綴誌*，7：83-88，1963.
- 79) 関根弘，田島篤治，柳川浩ほか：義歯の力学的研究(第8報)，クラスプの力学的考察(その2)，*補綴誌*，7：169-175，1963.
- 80) 関根弘，田島篤治，柳川浩ほか：義歯の力学的研究(第1報)，口蓋杆の静力学的考察(その1)，*齒科学報*，61：402-408，1961.
- 81) 関根弘，田島篤治，柳川浩ほか：義歯の力学的研究(第2報)，口蓋杆の静力学的考察(その2)，*齒科学報*，62：234-237，1962.
- 82) 関根弘，田島篤治，柳川浩ほか：義歯の力学的研究(第3報)，口蓋杆の静力学的考察(その3)，*齒科学報*，62：316-320，1962.
- 83) 関根弘，田島篤治，柳川浩ほか：義歯の力学的研究(第4報)，口蓋杆の動力学的考察，*補綴誌*，6：57-65，1962.
- 84) 関根弘，田島篤治，柳川浩ほか：義歯の力学的研究(第5報)，舌側杆の動力学的考察，*補綴誌*，6：121-127，1962.
- 85) Bates, J. F.: Studies related to the fracture of partial dentures, the functional strain in cobalt-chromium dentures—a preliminary report, *Brit. dent. J.*, 120: 79-83, 1966.
- 86) 石井恒：ジャケット・クラウンの変形および破折の機構に関する実験的研究，*齒科学報*，68：1571-1604，1968.
- 87) Craig, R. G. and Peyton, F. A.: Measurement of strains in fixed bridges with electronic strain gauges: *J. dent. Res.*, 46: 615-619, 1967.
- 88) Anderson, D. J.: A method of recording masticatory loads, *J. dent. Res.*, 32: 785-789, 1953.
- 89) 宮内孝雄，久保田英雄，田中誠一：最近の補綴臨床の統計的観察，*齒科学報*，56：322-328，1956.
- 90) 中沢勇，平沼謙二，小沢至：諸種補綴物の比較統計的観察(4)，*口病誌*，26：360-365，1959.
- 91) 角田篤美，間島道夫，小倉正彦ほか：最近2年間に作製された諸種補綴物の実態に関する統計的観察，*補綴誌*，7：243-248，1963.
- 92) 平沼謙二，藤田直輝，磯貝貴彦ほか：補綴物の統計的観察，*補綴誌*，11：109-115，1967.
- 93) 吉田恵夫，鹿沼昌夫，花村典之ほか：継続歯の予後に関する調査(第1報)，*補綴誌*，7：254-260，1963.
- 94) 石原寿郎，藍稔，花村典之：継続歯(その1)，その問題点，ことに保持力について，*歯界展望*，19：54-64，1962.
- 95) Ackermann, H.: Grundsätzliche Überlegung

- gen in bezug auf die mechanischen Belange der Stabilität der Stiftzähne, Schweiz. Mschr. Zahnheilk., 63 : 799-805, 1953.
- 96) 関根弘 : 合釘継続歯の支台歯形成について, 歯界展望, 23 : 29-38, 1964.
 - 97) 関根弘 : 合釘継続歯の支台歯形成, 日本歯科医師会誌, 17 : 817-824, 1965.
 - 98) Jankelson, B., Hoffman, G. M. and Hendron, J. A. : The physiology of the stomatognathic system, J. Amer. dent. Ass., 46 : 375-386, 1953.
 - 99) 岸本正, 木下善之介, 宮地和夫 : 前歯の傾斜角度に関する研究, 歯科医学, 15 : 190-191, 1952.
 - 100) 本目欣一, 大坪淳造, 海内敏子 : 上下顎前歯殊に中切歯の軸傾斜に就いて, 日本歯科医師会誌, 6 : 104-105, 1953.
 - 101) 富士川善彦 : 天然歯列における歯冠傾斜角度および捻転角度の研究, 口病誌, 25 : 475-494, 1958.
 - 102) Dempster, W. T., Adams, W. J. and Duddles, R. A. : Arrangement in the jaws of the roots of the teeth, J. Amer. dent. Ass., 67 : 779-797, 1963.
 - 103) 小笠原稔 : 日本人成人顎骨歯軸部の解剖学的研究, 1 歯槽窩軸の傾斜角度, 歯科学報, 69 : 639-664, 1969.
 - 104) Parfitt, G. J. : The dynamics of a tooth in function, J. Periodont., 32 : 102-107, 1961.
 - 105) 谷口忠 : 建造力学, 東京, 1968, 裳華房, 143-151頁.
 - 106) 奥田克己 : 最新材料力学, 東京, 1967, 日刊工業新聞社, 35-49頁.
 - 107) Koller, K. C. : Zahnersatz durch Kronen, Brücken und partielle Prothesen, Wien, 1954 Wilhelm Maudrich, S. 332-333.
 - 108) 花村典之 : 継続歯合釘に関する研究, 第2報, 合釘のテーパー, 長さの保持力に及ぼす影響について, 袖綴誌, 8 : 162-172, 1964.
 - 109) Colley, I. T., Hampson, E. L. and Lehman, M. L. : Retention of post crowns, An assessment of the relative efficiency of posts of different shapes and sizes, Brit. dent. J., 124 : 63-69, 1968.