原 著 論 文

ブリッジの保持力に関する実験的研究

宮本 諭

Retention of Fixed Partial Dentures

Satoshi Miyamoto

Abstract : Location of the intermediate abutment, length of span and number of abutments were changed in three-, four- and five-unit fixed partial dentures having two or three abutments and their influences on retentive forces of each abutment were measured after repeating load at one-point (the center) and three-points (two more external points) of occluding faces of fixed partial dentures.

The results were as follows :

1. When repeating load was applied at the center of five-unit fixed partial dentures having three abutments, the intermediate abutment indicated the lowest retentive forces of all abutments.
2. Location of the intermediate abutment between two external abutments was significant for the retention of each abutment.
3. Fixed partial dentures having two abutments became deflected in proportionally as the span between the abutments became longer. The amount of deflection was significant for the retention of each abutment.
4. Five-unit fixed partial dentures having two abutments indicated the lowest retentive forces of all fixed partial dentures examined.
5. Addition of one more abutment to four-unit fixed partial dentures having two abutments was not always effective in improvement of the retention of fixed partial dentures.
6. Number of loading points was significant for the retention of the fixed partial dentures.

Key words : fixed partial denture, retention, intermediate abutment, deflection, repeating load

I. 緒 言

固定性ブリッジの支台装置には、全部鑄造冠をはじめ部分被覆冠、ポストクラウン、インレー等があり、また

保持機構の違いはあるがアドヒージョンブリッジなどの支台装置もある。このうち全部鑄造冠は、単 独 冠 と し て、またブリッジ支台装置として最も広く用いられており、この全部鑄造冠の保持機構、あるいは保持力に関係する要素については、多くの先人達によってその大部分

鶴見大学大学院歯学研究科歯科補綴学専攻（指導：花村典之教授）

Department of Prosthetic Dentistry, Graduate School of

Dental Medicine, Tsurumi University (Director : Prof. Noriyuki Hanamura)

平成2年6月5日受付

図 1 各種ブリッジおよび単独冠の形態

が解明されてきたといっても過言ではない。しかしながら、ブリッジの保持力に関してはわずかに Hovijitra ら¹⁾と Jacobi ら²⁾の報告をみるに過ぎない。

単独冠に対して咬合力は、主に歯軸方向への垂直的な分力と頬舌方向への水平的な分力として作用するが、ブリッジにおいてはさらに近遠心的な力の存在が以前から考えられている³⁻⁹⁾。ブリッジの保持力を考えた場合、一面ではブリッジを単独冠の延長とみなすこともできるが、力学的要素が複雑に関与することが指摘されている以上、単純にその延長とすることは適切でないように思われる。

従来から、3 歯支台のブリッジにおいては中間支台の負担過重が問題視されており^{10,11)}、2 歯支台のブリッジも含めてブリッジ自体のたわみ¹²⁻¹⁵⁾、あるいはひずみ¹⁶⁻¹⁸⁾の影響が指摘されている。また、3 歯支台ブリッジの荷重の伝達様式は 2 歯支台ブリッジより複雑になることがいわれている^{19,20)}。しかし、これらの点がブリッジの保持力に及ぼす影響に関してはいまだ報告がみられない。

そこで本研究では、3 歯支台および 2 歯支台ブリッジの金型モデルを用いて、咬合力を想定したくり返し荷重を加え、ブリッジ各支台装置の保持力の変化を検討した。また同時に変位量を計測し、ブリッジのたわみや変位量の相違が保持力に及ぼす影響についても検討を行った。さらに著者は、これらの実験結果に対して理論解析による力学的考察を加えた。

II. 実験材料および方法

欠損歯数、支台歯数および欠損様式が異なる各種ブリッジにくり返し荷重を加え、各支台装置の保持力を測定した。くり返し荷重試験には、1 点および 3 点荷重を用いて保持力の変化を検討した。

1. 実験材料

1) 実験用金型

実験に使用した金属製のブリッジおよび支台歯は、すべてステンレス鋼製 (SUS303) で旋盤加工により製作されたものである。

(1) ブリッジの形態

本研究で用いた各種ブリッジおよび単独冠の形態を図 1 に示す。A タイプは中間に支台を有する 2 歯欠損 3 歯支台のブリッジ、B タイプは連続 2 歯欠損 3 歯支台のブリッジである。また、C タイプは 3 歯欠損 2 歯支台のロングスパンブリッジを想定しており、D タイプは 2 歯欠損 2 歯支台のブリッジ、E タイプは 1 歯欠損 2 歯支台のブリッジである。さらに、F タイプはこれら 5 種のブリッジ支台装置と同一形態の単独冠である。なお、各種ブリッジの支台を図 1 のごとく左から順に番号を付与し、本論文では各タイプの支台を以後略記する (例: B タイプ右端の支台→B3)。

ブリッジ支台装置には全部鑄造冠を想定し、形態はすべて同一とした。ブリッジの咬合面相当部にはくり返し荷重試験に際し、斜め 45° 方向から側方荷重が加えられるように近遠心方向に均一な溝を付与した。また、支台装置上部には保持力測定に際し、ブリッジ把持用のウイングを設けた (図 2)。

(2) 支台歯の形態

支台歯の歯冠形態は、青木ら²¹⁾の報告に基づき片側テーパーを 12° とし、歯頸部直径 10.0 mm、高さ 5.0 mm の円錐台型で辺縁形態はナイフエッジタイプとした (図 2)。支台歯の歯根相当部には、あらかじめ着脱が可能であるステンレス鋼製 (SUS 303) の植立用キャップを炭

図 2 本研究で使用了試料の断面形態

a : ブリッジ支台装置, b : 支台歯,
c : ネジ, d : キャップ, e : 石膏,
f : 溝, g : ウイング, h : 金属枠

素鋼製ネジ (S 45C) により装着して用いた。また、歯根部ならびに植立用キャップにテーパを付与することで後述するくり返し荷重試験後、合着した支台歯およびブリッジを一体として容易に撤去できるようにした。支台歯歯根部に付与した上部孔は、撤去の際、合着したブリッジに力が加わることを避けるための支台歯固定用のもので、下部孔は引張試験用のものである (図 3)。

(3) 金型の適合度および表面粗さ

保持力に最も影響を及ぼすと思われるブリッジ支台装置と支台歯軸面部の適合度は、青木²²⁾、山本²³⁾、野口²⁴⁾らが用いた適合試験法に準じて計測を行った結果、3.5~14.1 μm であった。咬合面部の適合度は、177.8~355.4 μm であった。また、支台歯表面ならびにブリッジ支台装置である冠内面の表面粗さを、サーフコーダ (Model SE-3 H, 小坂製作所, 東京) で計測した結果、支台歯が 4.3~6.3 μmRZ 、クラウン内面は 5.3~8.0 μmRZ であった。

2) 合着用金型

本研究では、保持力の測定をくり返し行うことから、合着時のブリッジと支台歯の三次元的な位置関係を可及的に均一に努める必要がある。このため山本²³⁾が考案した合着用金型を参考に、支台歯保持部およびガイドリング部から構成される合着用金型を製作し、これを用いて合着を行った。

3) 合着用セメント

支台歯とブリッジの合着には、リン酸亜鉛セメントである Elite cement 100 (Lot No. 粉: 280181, 液:

図 3 支台部の構成

左から: 支台歯, 植立用キャップ, ネジ,
組合せたところ
(a : 支台歯固定用孔, b : 引張試験用孔)

030281, 而至歯科工業, 東京) を使用し、粉液比はメーカー指定の 1.45 g/0.5 ml とした。

2. 実験方法

1) セメント合着および試料作製

本研究では、合着時の軸面部セメントの被膜厚さを規定することから、セメント合着は各支台ごとに個別に行う方法を採用した。合着に際し、軸面部のセメント層が 30 μm となるようにあらかじめ各金型の適合度からそれぞれの浮き上がり量を算出し、支台軸面部のセメントの被膜厚さを規定した^{22~24)}。

セメントの練和にはクールトロン (TA 740, Dentsonics, 東京) を使用し、練板温度 20°C, ADAS 6 分割法にてセメントを練和、合着した。合着に際しては合着用金型を装着し、定荷重圧縮試験機 (セイキ, 東京) にて 15 kgf で 10 分間定圧加重した。この際、デジタルマイクロメータ (IDC-112 M, ミットヨ, 東京) を用いて、軸面部のセメントの被膜厚さを 30 μm に規定した。合着終了後、ブリッジおよび支台歯を超硬質石膏 (ニューフロック, 而至歯科工業, 東京) にてアルミニウム製の枠中に基底面に対し垂直に植立した。植立後、温度 37°C 相対湿度 100% の恒温恒湿槽内に 18 時間保管し、これを試料とした (図 2, 4)。

2) くり返し荷重試験

(1) 疲労試験機および制御装置

くり返し荷重試験には、1~3 点までの荷重試験が可能である多点荷重式疲労試験機 (AYU-V, 三和エンタープライズ・長谷川製作所, 横浜) ならびに制御装置 (MO DEL-716, 関東電子, 千葉) を試作し、これを用いた (図 5)。疲労試験機は、動力源として圧縮空気を使用し、エ

図 4 合着および植立操作が終了した試料 (B タイプ)

図 5 疲労試験機および制御装置全景

左：多点荷重式疲労試験機，右上：調節計器盤
右下：内蔵型コントローラによる制御装置

アーシリンダーを駆動させることによりシリンダー先端の荷重子を介して荷重を加える機構になっている。制御装置は、調節計器盤上でシリンダーの選択、荷重量の調節、試験回数の記録が行える。また、本制御装置はプログラマブルコントローラ (SYSMAC S-6, OMRON, 大阪) の使用により、荷重回数が連続 1,000,000 回まで、サイクルタイムが最小 0.1 sec までシリンダー別に設定できる。

(2) 荷重条件

a. 荷重部位および荷重量

くり返し荷重試験の荷重部位は、1点集中荷重ならびに3点分散荷重の2条件で行った。1点荷重では荷重量を 9 kgf とし、A～E タイプの5種のブリッジおよび単独冠である F タイプ中央に荷重を加えた。このうち B タイプの1点荷重の場合だけは、荷重部位をポンティック中央にも設け、荷重部位を2条件 (B-M, B-N) とした (図 6)。3点分散荷重では荷重量を各々 3 kgf と、ブリッジ中央の1点のほかさらに両側の支台歯上に2点を設け、A～C タイプまでの3種のブリッジについて行った

図 6 1点集中荷重における荷重部位および変位量計測点
(↓：荷重部位，■：計測点)

図 7 3点分散荷重における荷重部位および変位量計測点
(↓：荷重部位，■：計測点)

(図 7)。なお、各シリンダーにおける荷重子先端の荷重量は試験時に咬合力計 (MPM-2401, 日本光電, 東京) を用いて確認した。

b. 荷重方向およびストローク

予備実験でブリッジに垂直荷重をくり返し加えた際、いずれのブリッジにおいても支台の保持力の変化は認められなかった。そこで、荷重方向は下顎側咬頭内斜面

図 8 くり返し荷重試験 (45° 側方荷重)

に咬合力が加わることを想定してすべてブリッジに対して 45° 方向からの側方荷重とした (図 8)。また、シリンダーのストロークは、THICKNESS GAUGE (No. 100 MX, 東京シクネス, 東京) を荷重子先端とブリッジ上の荷重点との間に介在させ 1.0 mm に規定した。

c. サイクルおよび荷重回数

荷重サイクルは、伊崎²⁵⁾の報告を参考に荷重時間 0.2 sec, 無荷重時間 0.4 sec を 1 サイクル (0.6 sec) とし、毎分 100 回の割合で行った。また荷重回数は、予備実験の結果から 4,000 回とした。

3) 変位量の計測

本研究で用いた支台歯支持方法では、45° 側方荷重時に単独冠 (F タイプ) が 3 kgf 荷重で $6\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$, 9 kgf 荷重で $19\mu\text{m} \pm 3\mu\text{m}$ の頬舌方向への変位が認められた。この水平的な変位は、ブリッジ各支台の保持力に少なからず影響を及ぼす可能性がある。そこで、側方荷重時におけるブリッジの頬舌方向の変位状態を知るために、各支台装置ならびに荷重部位について頬舌方向の変位量の計測を行った。

各ブリッジ上に設けた計測点を図 6, 7 に示す (計測点は■印)。計測点は、ブリッジ各支台装置上部の側面およびポンティック上の荷重部位側面でいずれも同一側とした。変位量の計測には、 $1\mu\text{m}$ の測定精度を有するダイヤルテストインジケータ (TI-01 H, ミットヨ, 東京) を用い、疲労試験機に設置した測定用のステンレス製スタンドに取りつけて使用した。テストインジケータの測定子先端が計測点に接した状態で、測定子と歯軸が平行になるようにインジケータ基部をスタンドに固定

図 9 変位量の計測

し、荷重時の変位量を計測、記録した (図 9)。計測は 5 回行い、その平均値をもって各計測点の変位量とした。

4) 保持力の測定

保持力の測定は、くり返し荷重を加えなかった試料とくり返し荷重を加えた試料の両方についていずれの場合も 5 回行い、その平均値をもって測定結果とした。試料に引張試験用の治具を装着し、ブリッジから各支台歯を個別に引張ることで保持力の測定を行い、ブリッジ支台装置から支台歯が離脱したときの荷重をもって各支台の保持力とした。測定にはユニترون (UST-F-1000 P, 上島製作所, 東京) を用い、Load Cell : 500 kgf. Cross Head Speed : 2 mm/min の条件で行った。なお、実験はすべて温度 $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, 湿度 $40\% \pm 10\%$ の環境下で行った。

III. 実験結果

1. くり返し荷重を加えないときのブリッジ各支台および単独冠の保持力

くり返し荷重を加えないときの各支台の保持力をコントロールとし、その測定結果を表 1 に示す。各支台の保持力は $30.2 \sim 32.8\text{ kgf}$ であった。一元配置分散分析の結果 (表 2), 各支台の保持力の間に統計的な有意差は認められなかった。

表 1 くり返し荷重を加えないときの各支台の保持力

タイプ	(コントロール)		
	支 台		
	1	2	3
A	32.5(1.4)	32.0(1.5)	31.9(1.5)
B	31.6(3.0)	32.0(2.0)	30.8(3.1)
C	32.8(1.6)	31.5(1.9)	
D	31.3(1.2)	30.8(1.0)	
E	30.9(1.8)	30.3(2.4)	
F	30.2(1.0)		

単位: kgf, () : S.D.

表 2 コントロールについての分散分析表

要 因	平方和	自由度	分 散	P
支 台	38.46	12	0.88	N.S.
誤 差	189.78	52		
総変動	228.24	64		

N.S.: not significant

2. くり返し荷重試験後のブリッジ各支台および単独冠の保持力

1) 1点集中荷重

ブリッジおよび単独冠に1点集中荷重を加えたとき(図6)の各支台の保持力の全測定結果を表3に示す。3歯支台ブリッジに1点集中荷重を加えると、中間支台であるA2およびB2が両端の支台に比べ明らかな低下を示した。A2では保持力が19.5kgfとコントロール値の約60%まで、B2では16.0、15.6kgfと約50%にまで低下した。両端の支台であるB1とB3の保持力は、A1およびA3のいずれよりも低下が大きくなる傾向が認められた。また、B-Nにおける各支台の保持力はB-Mと類似した傾向を示したが、B-Mに比べ平均値は若干小さくなった。

2歯支台ブリッジでは、C~Eタイプを通じて1および2の両支台の保持力に若干の相違はあるものの、ほぼ同様な低下傾向を示した。しかし、タイプ間の保持力の低下傾向は明らかに異なっており、ポンティックのスパンが長いほど保持力の低下は大きくなった。特に、これらブリッジの中でスパンが最長となるCタイプでは保持力の低下は著しく、コントロール値の30%にも満たない値、約8kgfにまで低下した。

単独冠の保持力は、10.0kgfとコントロール値の約32%に至るまでの低下を示したが、Cタイプよりは若干大きい値を示した。

表 3 1点集中荷重における各支台の保持力

タイプ	支 台		
	1	2	3
A	23.9(2.7)	19.5(3.1)	24.7(1.5)
B-M	21.9(1.0)	16.0(2.5)	19.9(1.9)
B-N	20.8(1.5)	15.6(1.5)	19.0(1.7)
C	8.6(3.4)	7.8(2.3)	
D	19.1(2.3)	18.9(3.1)	
E	24.3(1.7)	23.4(1.9)	
F	10.0(1.3)		

単位: kgf, () : S.D.

表 4 3点分散荷重における各支台の保持力

タイプ	支 台		
	1	2	3
A	17.6(2.5)	17.9(3.1)	18.2(2.6)
B	10.1(2.9)	13.1(3.0)	16.0(2.5)
C	—	—	—

単位: kgf, () : S.D.

2) 3点分散荷重

3点分散荷重(図7)における各支台の保持力測定結果を表4に示す。3歯支台ブリッジに3点荷重を加えると、Aタイプの各支台の保持力は共に約18kgfとコントロール値の約56%にまで同様な低下を示した。Bタイプの保持力はB3>B2>B1と順に小さくなる傾向を示した。このうちB1の保持力は、単独冠とほぼ同程度の10.1kgfとコントロール値の約32%にまで低下した。これに対し、中間支台をもたないCタイプでは、くり返し荷重試験中(試験回数が3,500回までに至らぬうち)にC1、C2がすべて脱落をきたし、測定不能であった。

表5、6にくり返し荷重試験後の保持力について分散分析を行った結果を示す。3歯支台ブリッジの各支台の保持力に対するブリッジのタイプ2水準(A, B)、支台の3水準(1, 2, 3)、荷重条件2水準(1点, 3点)について三元配置分散分析を行った。その結果、ブリッジのタイプ、支台、荷重条件、タイプと支台の交互作用、3因子の交互作用はいずれも有意となり、このうち寄与率はブリッジのタイプが34.9%と最も大きかった。また、2歯支台ブリッジの各支台の保持力に対するブリッジのタイプ3水準(C, D, E)、支台の2水準(1, 2)について二元配置分散分析を行った結果、支台、タイプと支台の交互作用には有意差は認められず、ブリッジのタイプのみが有意となった。

3. ブリッジの頬舌方向への変位量

1点集中荷重および3点分散荷重における各計測点の頬舌方向の変位量を図10, 11に示す。各支台上および荷重部位の計測点をそれぞれ■印, □印で表示し, 荷重部位の計測点が支台上の計測点と重なる場合には両者を併せて表記した。なお, 論文の中では荷重部位をPとする。

1) 1点集中荷重

各タイプを通じ, いずれも荷重部位での変位量は最大値を示した。3歯支台ブリッジでは, Aタイプに比べBタイプ(B-M, B-N)の方が全体的に変位は大きくなる傾向が認められた。Aタイプでは, 各点の変位量が $A2 > A1 = A3$ と荷重部位に相当するA2は, A1および

表5 3歯支台ブリッジの保持力についての分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	分散	P	寄与率(%)
T:タイプ	453.20	1	453.20	71.24	$P < 0.001$	34.9
A:支台	95.45	2	47.73	7.50	$P < 0.001$	6.5
L:荷重	257.51	1	257.51	40.48	$P < 0.001$	19.6
(T×A)	116.31	2	58.15	9.14	$P < 0.001$	8.1
(T×L)	7.14	1	7.14	1.12	N.S.	
(A×L)	4.13	2	2.06	0.32	N.S.	
(T×A×L)	42.45	2	21.22	3.34	$P < 0.05$	2.3
誤差(1)	305.35	48	6.36			
誤差(2)	316.62	51	6.21			
総変動	1281.54	59				

N.S.: not significant

図10 1点集中荷重における各計測点の変位量

■: 支台上の計測点, □: 荷重部位の計測点,
 ■: 支台上の計測点と荷重部位が重なる場合

びA3より大きな変位を示した。これに対し, Bタイプ(B-M, B-N)上の各点の変位量は $P > B3 > B2 > B1$ と, ブリッジ全体が傾斜移動する傾向にあった。2歯支台ブリッジであるC~Eタイプでは, Bタイプが示したような変位状態は認められず, 各支台の変位量はすべて $11 \mu\text{m}$ となった。しかし, ポンテック中央の荷重部位となるPでの変位は, スパンが長くなるに従って明らかに増大する傾向が認められた。

2) 3点分散荷重

3歯支台ブリッジでは, 各点の変位量が $A1 = A2 = A3, B3 > P > B2 > B1$ となった。1点荷重に比べると3点荷重では, ブリッジが直線的な変位状態を示した。Bタイプでの変位量は, Aタイプに比べ全体的に大きく, しかも明らかな傾斜が認められた。Cタイプにおいては, $P > C1 = C2$ と1点荷重に類似した傾向を示したが, C1およびC2の変位量は1点荷重より増加しており, その

表6 2歯支台ブリッジの保持力についての分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	分散	P	寄与率(%)
T:タイプ	1281.50	2	640.73	101.63	$P < 0.001$	88.3
A:支台	3.20	1	3.20	0.51	N.S.	
(T×A)	0.69	2	0.35	0.05	N.S.	
誤差(1)	151.31	24	6.30			
誤差(2)	155.20	27	5.75			
総変動	1436.70	29				

N.S.: not significant

図11 3点分散荷重における各計測点の変位量

分荷重部位での変位量は1点荷重よりも小さくなった。

IV. 考 察

Shillingburg ら¹⁰⁾, 保母ら¹¹⁾, Caputo ら¹⁵⁾は, 中間支台歯の両側に欠損をもつような3歯支台ブリッジでは, 中間に存在する支台歯がテコの支点として作用することを指摘しており, このような欠損様式では半固定性連結装置を設けることを提唱した。その理由として, 中間支台歯歯周組織の負担過重が問題視されており, さらに両端の支台装置が脱離する恐れがあることを述べている。しかし, これらの意見は臨床的観点から述べられたものであって実験的裏づけに乏しいため, Landry ら²⁶⁾, Moulding ら²⁷⁾, Standlee ら²⁰⁾は, 光弾性実験により支台歯歯周組織に及ぼす影響について検討を行っている。その結果, いずれも半固定性ブリッジの有効性を認めるまでには至っておらず, むしろ固定性ブリッジの方が応力が均等に分散されるといった報告^{26, 27)}や固定性ブリッジのテコとしての作用は認められなかったという報告²⁰⁾もみられる。さらに, 臨床的見地からは固定性ブリッジの方が経過が良好であるという見解²⁸⁾もあり, 3歯支台ブリッジの設計に関しては見解の一致が得られていない。このように研究者間で見解の相違が認められる理由として, 3歯支台ブリッジにおける荷重の伝達様式が2歯支台ブリッジとは異なり複雑となることがあげられる^{19, 20)}。したがって, 支台歯歯周組織の負担状態に関しては勿論のこと, ブリッジ各支台の保持力にも少なからず影響を及ぼすことが考えられる。また, 2歯支台ブリッジに関して, Tylman⁹⁾, 保母ら¹¹⁾, Smyd^{12, 13)}, Horn¹⁴⁾, Caputo ら¹⁵⁾は理工学的見地に立ち, スパンが長くなるとブリッジのたわみが増大することを指摘しており, このたわみはブリッジの支台装置を離脱させる原因となると考えている。しかし, これらの報告はブリッジを想定した簡素化モデルによる説明, あるいは力学的考察にとどまっており, 実際にブリッジの保持力を定量的に測定したのではない。

以上のような観点に立ち著者は, われわれが日常の臨床で遭遇する頻度が高い3歯支台および2歯支台の固定性ブリッジに関して, 中間支台歯の位置や欠損部のスパンの長さならびに支台歯数がブリッジ各支台の保持力に影響を及ぼすか否かについてくり返し荷重試験法により検討した。

1. 実験方法について

1) 実験用金型

クラウンの保持力に支台歯の形態, セメントの被膜厚さ, 適合, ならびに表面粗さが影響を及ぼすことについては, 種々の角度から研究が行われているが, 青木²²⁾, 山本²³⁾らはこれらの点を究明するにあたって, ステンレス製の金型を使用することにより条件設定をはかっている。また, Hovijitra ら¹⁾もステンレス製金型を用いてブリッジの保持力について検討を行っている。本研究においても一定条件で反復使用が可能であるステンレス製の金型を使用した。実験に用いたブリッジ支台装置と支台歯との適合状態は, 保持力に重要な役割を果たすことが考えられる軸面部において4~14 μm と良好な範囲内であった。また, 支台歯表面ならびにブリッジ支台装置内面の表面粗さは, 支台歯で4~6 μmRZ , 支台装置内面では5~8 μmRZ とほぼ一定の範囲内であった。これらの適合状態や表面性状は, 厳密には支台間で若干異なるが, 合着時のセメントの被膜厚さを30 μm に規定することによりコントロール値の間に統計的な有意差が認められなかったことから, 各支台において条件が一定であるものとして実験を行った。

2) くり返し荷重試験

動的な荷重試験法を用いてブリッジの保持力を検討した報告はきわめて少なく, 唯一 Jacobi ら²⁾が支台歯の揺動度を変えて, 荷重の位置および方向がブリッジの保持力に及ぼす影響について報告しているに過ぎない。Jacobi らは, ブリッジの脱落に関する模型実験に際して従来の静的な荷重試験法では口腔内で生ずる以上の荷重が必要であることを述べており, くり返しの衝撃力を用いてブリッジが脱落に至るまでの試験回数について検討を行っている。本研究においても3歯支台ブリッジの保持力を検討するにあたり, 予備実験で衝撃的要素をもたないくり返しの圧縮荷重を用いたところ, 保持力の変化を認めるまでには多大な試験回数が必要となった。そこで本研究では, 比較的短時間で各支台の保持力の変化が検討できるくり返し衝撃圧縮荷重を採用した。また, くり返し荷重試験の荷重方向について, Jacobi らは45°側方荷重と垂直荷重の間では脱離傾向に有意差が認められなかったと報告している。しかし, 著者の予備実験の結果によると垂直荷重では保持力に変化は認められず, むしろ側方荷重で保持力の低下が顕著に現れた。このため, くり返し荷重試験はすべて45°方向からの側方荷重とした。

口腔内で生じる咬合力, あるいは咀嚼力を模型実験で

図 12 3 歯支台ブリッジにおける各支台の保持力の変化 (中央 1 点集中荷重)

図 13 2 歯支台ブリッジにおける各支台の保持力の変化 (中央 1 点集中荷重)

再現することは必ずしも容易なことではない。このため、過去のブリッジに関する模型実験では、咬合力を想定した荷重を 1 点集中荷重で代用した報告がほとんどであった。岡田²⁹⁾、長久保³⁰⁾らは、1 点集中荷重における負担状態のみを基本に固定性ブリッジの設計の適否を論ずることは不適当であるとしており、口腔内の苛酷な条件下を想定した多点同時荷重による検討を行っている。また、Moulding ら²⁷⁾、四条³¹⁾、久保木³²⁾、小野³³⁾らもブリッジ支台歯周組織の応力分布を検討するにあたり、多点同時荷重を用いて光弾性実験を行っており、これらの研究は多点荷重による検討を行った数少ない模型実験として注目される。ブリッジの保持力を検討するに際しても、1 点集中荷重だけで各支台の保持力の比較を行うことは、荷重の影響を過小に評価する恐れがあり適切ではないと考える。このような理由から、本研究では 1 点荷重および多点同時荷重が保持力に及ぼす影響を比較検討するため、1~3 点までのくり返し荷重試験が可能となる疲労試験機を考案、試作した。

3) 保持力の測定方法

現在までにブリッジの保持力に関しての報告がほとんどみられない理由として、その測定方法の困難さが考えられる。Hovijitra ら¹⁾は、支台歯のテーパーを変えてブリッジの保持力を検討しており、2 本の支台歯からブリッジを垂直的に引張ることにより保持力を測定している。この Hovijitra らの報告は、ブリッジにおける 2 歯支台ならびに単独支台の場合の保持力を初めて定量的に比較検討した研究として注目すべきであろう。しかしながら、2 歯支台のブリッジではこのような測定方法が可能と思われるが、3 歯支台以上のブリッジで支台歯の位置が異なる場合、均等に引張試験を行い保持力を測定することはかなり難しいことが考えられる。たとえブリッジ全体の保持力を定量的に評価できたととしても、ブリ

図 14 3 歯支台ブリッジにおける各支台の保持力の変化 (3 点分散荷重)

ッジ全体を引張るような測定方法では各支台の保持力を個別に評価できないと考える。本研究ではブリッジ各支台の保持力を比較検討するため、各支台を個別に引張試験に供することにより保持力の測定を行った。

2. 保持力の変化について

図 12~14 は、コントロールの保持力を 100 としたときのくり返し荷重試験 4,000 回後の各支台の保持力の変化を百分率で表示したものである。3 歯支台および 2 歯支台ブリッジの各支台の保持力は、グラフからも明らかのように各荷重条件下で種々の低下を示しており、中には単独冠の保持力を下回るような低下を示したものも認められた。このような保持力の変化を示す背景には、力学的要素が複雑に関与していることが考えられる。そこで、本項ではこれらの実験結果に対して力学的考察を加えることにした。

1) 3 歯支台ブリッジ

中央 1 点集中荷重では、A, B タイプともに中間支台の保持力は、両端の支台に比較して低下が大きくなった。また、ブリッジ各支台における保持力の低下は、A タイ

図 15 理論解析における 3 歯支台および 2 歯支台ブリッジの解析条件

ブに比べ B タイプの方が全体的に大きくなる傾向が認められた (図 12). この場合, 力学的要素が理論上どのようになっているかを知るために, 理論解析により各支台上的負担荷重や曲げモーメントを求めることにする. 解析方法としては, ブリッジを弾性体として扱い, 3 歯支台以上のブリッジがセメントを介して支台歯に固定された状態とみなすことができる不静定梁理論³⁴⁾を適用した. 宮入¹⁹⁾は, ブリッジ各部の断面二次モーメントを考慮に入れた上で不静定梁理論による力学解析を行っているが, 本稿では計算式の簡略化をはかるため, ブリッジ断面の形態を一樣なものとして扱い, あえて変断面における断面 2 次モーメントの変化を考慮しないことにした.

3 歯支台ブリッジは, Clapeyron の 3 モーメントの定理³⁴⁾より, 支台 n における曲げモーメント M_n を次に示す 3 モーメントの式から求めることができる.

M_{n-1}, M_n, M_{n+1} : 各支台の曲げモーメント

l_{n-1}, l_n : 支台間のスパン

E : 弾性係数

I_z : 断面二次モーメント

$-\theta_n, \theta_{n+1}$: 支台 n のたわみ角

$$M_{n-1}l_{n-1} + 2M_n(l_{n-1} + l_n) + M_{n+1}l_n = -6EI_z(\theta_n + \theta_{n+1}) \dots \dots \dots (1)$$

図 15 に示すごとく各支台間距離を l_1, l_2 (mm) とし, 支台 2 から a (mm) の距離に集中荷重 W (kgf) が作用するとき, 各支台上に生ずる曲げモーメントを M_1, M_2, M_3 (kgf・mm) とすると, 各支台が負担する曲げモーメントは (1) 式より次のように得られる.

$$M_1 = \frac{Wa(a-l_2)^2}{2l_2(l_1+l_2)}$$

図 16 3 歯支台および 2 歯支台ブリッジにおける各支台の負担荷重と曲げモーメント

$$M_2 = -\frac{Wa(a-l_2)^2}{l_2(l_1+l_2)}$$
$$M_3 = \frac{Wa(2a^2l_2+a^2l_1-2al_2^2-l_1l_2^2)}{2l_2^2(l_1+l_2)}$$

また, 支台 n の負担荷重 R_n は

$$R_n = R_n' + R_n'' + R_n'''$$
$$= R_n' + (M_{n-1} - M_n)/l_{n-1} + (M_{n+1} - M_n)/l_n \dots (2)$$

で与えられるから, 各支台の曲げモーメントを (2) 式に代入すると, 各支台が負担する荷重 R_1, R_2, R_3 (kgf) は以下の式から得られる.

$$R_1 = -\frac{3Wa(a-l_2)^2}{2l_1l_2(l_1+l_2)}$$
$$R_2 = \frac{W(2l_1l_2^4+3al_2^4+2l_1^2l_2^3-6a^2)}{2l_1l_2^3(l_1+l_2)}$$
$$R_3 = \frac{Wa(3l_1l_2^2+6al_2^2-4a^2l_2-a^2l_1)}{2l_2^3(l_1+l_2)}$$

これらの式に中央 1 点集中荷重における本実験条件の値を代入すると, 各支台の曲げモーメントおよび負担荷重の理論値が得られる. ここでは途中の計算過程を省略し, その結果を図 16 に示す. A, B タイプともに中間支台の負担荷重は両端の支台より大きな値を示しており, この結果は先に述べた保持力の低下傾向と一致することがわかる. これらの支台のうち負担荷重が最大となる B2 での保持力の低下は最大であったことから, 1 点荷重における各支台の負担荷重と保持力の低下とはある程度相関性があるように思われる. 中間支台を有するブリッジでは, 臨床的な経験から中間支台歯のダメージが大きいことが指摘されている^{10,11)}が, 保持力にも影響を及ぼす可能性が示唆された.

Aタイプに限ってみると、荷重が中間支台であるA2に作用しているにもかかわらずA1およびA3にも保持力の低下が認められたことは見逃せない。また、中間支台の変位量は両端の支台より大きな値を示しており(図10)、この変位量の差からも明らかなようにブリッジにはたわみの存在が認められた。この点に関して、Standleeら²⁰⁾は、中間支台が荷重を負担した場合、3歯支台ブリッジにたわみが認められたことを報告しており、たわみが両端の支台装置を離脱させるように働くことを述べている。本研究においてもブリッジ自体がたわむことにより、両端の支台にも少なからず荷重の負担が生じ保持力の低下をきたしたものと推察される。実際に臨床で用いられる金合金は、本実験で使用したステンレス鋼に比較して弾性係数が小さいためにこのたわみ量はより増大する恐れがあり、支台装置の保持力への影響も大きくなる可能性がある。しかしながら、先述したように両端の支台の保持力の低下は中間支台に比べ少なかった点を踏まえると、Shillingburgら¹⁰⁾、保母ら¹¹⁾、Caputoら¹⁵⁾、Standleeら²⁰⁾が指摘した両端の支台装置からの脱離よりも中間の支台装置における保持力の喪失の方が問題となることが考えられる。したがって、臨床で中間支台に荷重の負担が生ずるような咬合状態は避けるべきであり、咬合調整には特に注意を払う必要があると思われる。

次にBタイプの各支台の保持力が、Aタイプに比べ全体的に低下した原因について考えてみたい。Aタイプでは、中間支台上に荷重が加わるため理論上荷重はすべて中間支台が負担することになり、各支台上には曲げモーメントの存在は認められない。これに対し、Bタイプではポンティック上に荷重が加わるため両端の支台上にも荷重の負担をきたし、さらには各支台上に曲げモーメントを生じることになる。Tylman⁹⁾は、ブリッジ支台装置と支台歯間におけるセメント層の破砕には曲げモーメントが関与することを述べている。本研究においてもこのような傾向を示した理由として、中間支台の位置の違いに起因する各支台の負担荷重の相違のみならず、曲げモーメントの差異などの力学的諸因子が関与するものと考えられる。

3点分散荷重では、A、Bタイプともに保持力の低下は1点荷重より大きく、しかも1点荷重時とは異なった傾向が認められた(図14)。また、このときの各支台の負担荷重および曲げモーメントは、1点荷重より全体的に小さな値を示しており、特に負担荷重の大きさは保持力の低下とは逆の傾向を示していることがわかる(図16)。

Aタイプにおいては3支台が均等な位置にあるため、荷重が各支台に均等に伝達された結果と考えられるが、Bタイプに関しては各支台の負担荷重および曲げモーメントの相違からだけではこの傾向を論じることができない。そこで変位量についてみると、3点荷重においてはA、Bタイプともに1点集中荷重で認められたブリッジのたわみはみられなかったが、Bタイプでは負担荷重の大きい支台側にブリッジが水平的に変位するような様相を呈した(図11)。このBタイプの変位状態は、各支台の負担荷重の大きさ($B3 > B2 > B1$)と一致しており、B1を支点としてブリッジ全体がB3側に傾斜移動する傾向が認められた。つまり、ここではB1を回転中心としてブリッジを水平的に傾斜させるような回転モーメントが生じていることが考えられる。このことから明らかなように、3点荷重においてBタイプが示した保持力の著しい低下には、回転モーメントが多量に関与したものと推察される。このようなブリッジの水平的な回転挙動が支台装置の保持力に影響を及ぼすことは、臨床的な経験から西川ら³⁵⁾、若林ら³⁶⁾、山崎ら³⁷⁾によって指摘されており、この見解は本研究結果と一致するものと考えられる。支台歯間の動揺度の違いが大きい場合には、特にこの影響が一層顕著になることが予想されるため、対策としては支台歯数の増加や保持形態に配慮することが必要である。またJacobiら²⁾は、ブリッジの歯軸方向への垂直的な回転運動が支台装置を脱離させるように働くことを報告しているので、今後どのような回転挙動がより保持力に影響を及ぼすのかについて検討する余地が残されていると思われる。

以上のことから、3歯支台ブリッジでは咀嚼力がブリッジ中央にくり返し加わるならば、中間支台が苛酷な負担過重下におかれることはいうまでもないが、中間支台の保持に関しても危険性をはらんでいることは明らかである。河野ら³⁸⁾はブリッジの脱落例を臨床的に観察した結果、ブリッジの支台装置に保持能力に大きな差のあるものを相互に連結すると、一方の支台装置の離脱によって、他の支台装置をも脱落に導いてしまう可能性があることを述べている。したがって3歯支台のブリッジの設計においても、Tylman⁹⁾、Caputoら¹⁵⁾が指摘しているように中間支台には全部被覆冠タイプの支台装置を用いるべきであり、両端の支台に比べ保持力が劣るような部分被覆冠やインレーなどの支台装置の選択は適切でないと思われる。また、中間支台が両端の支台のどちらか一方に寄っている場合には、力学的な不均衡を招来することになり、さらに水平方向への回転モーメントも加わるこ

とが予想される。この場合、従来から支台歯歯周組織への影響が問題視されてきたが、ブリッジ各支台の保持力にも影響を及ぼすことが明らかとなった。

2) 2 歯支台ブリッジ

中央 1 点集中荷重における 2 歯支台ブリッジ (C~E タイプ) の保持力は、各タイプを通じ両支台 (1, 2) はほぼ同じ値を示した。しかし、タイプ間における保持力の低下傾向は著しく異なっており、スパンが長くなるに従い保持力は大きく低下する傾向が認められた (図 13)。そこで 2 歯支台ブリッジの場合においても、不静定梁理論³⁴⁾により各支台上の負担荷重ならびに曲げモーメントを求めることにする。支台間の距離を l (mm) とし、支台 1 から a (mm) の距離に集中荷重 W (kgf) が作用するとき (図 15)、支台 1 から x (mm) の距離にある断面の曲げモーメント M_x (kgf・mm) は次のように得られる。

$$0 \leq x \leq a, M_x = W(1-a)^2 \{x(1+2a) - a\} / l^3$$

$$a \leq x \leq l, M_x = Wa^2 \{l(2l-a) - x(3l-2a)\} / l^3$$

支台 1 および 2 に生ずる曲げモーメントを M_1 ($x=0$), M_2 ($x=l$) とすると、各支台が負担する曲げモーメントは次のようになる。

$$M_1 = -Wa(1-a)^2 / l^2$$

$$M_2 = -Wa^2(1-a) / l^2$$

$$a = l/2, M_1 = M_2 = -W / 8$$

また、各支台の負担荷重 R_1, R_2 (kgf) は次式より得られる。

$$R_1 = W(1-a)^2(1+2a) / l^3$$

$$R_2 = Wa^2(3l-2a) / l^3$$

$$a = l/2, R_1 = R_2 = W/2$$

これらの式に中央 1 点集中荷重の各条件値を代入し、得られた理論値を前項と同様に図 16 に示す。2 歯支台ブリッジのポンティック中央に荷重 W が加わると、両方の支台が負担する荷重はスパンの長さにかかわらず常に $W/2$ ($R_1=R_2$) となり、また各タイプにおける両支台上の曲げモーメントは $M_1=M_2$ となることがわかる。しかしながら、スパンの長さの変化にともない、支台上に生ずる曲げモーメントの大きさは異なってくる。したがって、タイプ間の保持力の相違には、曲げモーメントの差が関与していることが考えられる。また、各支台の変位量はすべて同じ値を示したにもかかわらず、スパンが長くなるとポンティック中央部の変位量は明らかに増大する傾向を示した (図 10)。すなわち、前項でも述べたようにこの変位量の増大は、ブリッジのたわみ量の増加を意味する。これらのタイプ間で認められた保持力の低下傾向

とたわみ量の変化を考え合わせると、Tylman⁹⁾、保母ら¹¹⁾、Smyd^{12,13)}、Horn¹⁴⁾、Caputo ら¹⁵⁾が指摘したように、たわみはブリッジの保持力に影響を及ぼす一因子となることは明らかである。

たわみはブリッジ自体の剛性に左右されるものであるから、剛性が小さくなるロングスパンケースではブリッジに厚みや幅をもたせたり、あるいは弾性係数の大きい金属を用いることでたわみの減少がはかられ、支台装置への負担は軽減できるものと思われる。しかしながら、支台上に生ずる曲げモーメントはブリッジの剛性に影響を受けないため、スパンが長くなるに従い増大する曲げモーメントの影響は避けられないことになる。したがって、欠損部のスパンが長い場合には、支台装置の保持力への影響を可及的に少なくするために、ポンティック部での負担荷重の軽減や支台歯の増員をはかることが必要と思われる。

C タイプの保持力についてみると、1 点集中荷重では単独冠の保持力を下回る値にまで低下したことは特筆すべき点である。なぜなら単独冠では、理論上 9 kgf の荷重をすべて負担することになるが、C タイプでは各支台が 4.5 kgf と 1/2 の荷重しか負担していない (図 16) にもかかわらずその保持力は著しい低下を示したからである (表 3, 4)。このことから、2 歯支台ブリッジの保持力には、負担荷重の大きさよりもたわみや曲げモーメントなどがより大きな影響を及ぼすことが推察される。

また、3 点荷重における C タイプのたわみ量や曲げモーメントの大きさは、1 点荷重時に比べてかなり減少しているにもかかわらず、すべて脱落をきたしたことを踏まえると、3 歯支台ブリッジと同様に荷重様式の違いが保持力の低下に著しい影響を及ぼしたのと思われる。この場合、荷重部位が支台上にも設けられたことにより、支台装置に頬舌的な回転モーメントが大きく生じた結果、保持力が失われたと考えられる。つまり、ブリッジに加わる側方荷重は、歯軸方向への垂直的な分力と頬舌方向への水平的な分力として、両方の力が近遠心的に働くことが考えられる。また、そのうち水平的に作用する荷重は単独冠でも考えられているように支台装置を脱離させるような頬舌的な回転挙動に関与していると思われる。有限要素法による末瀬³⁹⁾、甘利ら⁴⁰⁾の報告によると、45° 側方荷重においては、荷重側歯頸部では圧縮方向の応力が、非荷重側では引張方向の応力が著明に認められたと述べられており、特に非荷重側のセメント層内における引張、剪断応力によってセメントが破壊し、冠の脱離が起これと考えられている。本研究において、脱

図 17 ブリッジが脱落した支台歯のセメント付着状態
C: 荷重側(圧縮側) T: 非荷重側(引張側)

落をきたしたCタイプにおける支台歯のセメントの付着状態を観察すると(図17), 引張側となる非荷重側にはセメントが一貫して残っていたのに対し, 圧縮側である荷重側のセメントは形跡もない状態にまで粉碎されていた。支台歯上のセメントの付着状態だけでは断言することはできないが, 45°側方荷重時にはまず最初に非荷重側で引張, あるいは剪断応力によってセメント層に亀裂が生ずることが考えられる。この亀裂が非荷重側軸面部のセメント層に広がると, セメント層は非荷重側で最初の破壊を生じ, これにより引張方向への応力が解放され, すべての荷重が荷重側に集中することになる。その結果, くり返し荷重により荷重側では圧縮, 剪断力が大きく作用し, セメント層が粉碎されて支台装置が脱離したものと推察される。このため, 引張側となる非荷重側のセメント層は粉碎されるまでには至らず, 支台歯上に形跡をとどめたのであろう。すなわち, セメント層の破壊はまず最初に非荷重側で生じ, これに誘発されて荷重側で第二の破壊を生じるが, 後者は荷重側であるがゆえにセメントの粉碎にまで至ることが考えられる。この点を臨床的に考えるならば, 辺縁漏洩は非荷重側から起こり, セメント層の主な破碎は荷重側から始まっている可能性がある。この点に関しては, 歯冠修復物における保持力と辺縁漏洩との間に相関があるか否かといった事柄に関係すると思われるので, 今後の研究課題の1つではないかと考える。

3. 支台歯数と保持力との関係について

2歯以上の中間欠損症例では, 欠損部の長さ, あるいは個々の支台歯の負担能力を考慮した上で支台歯の増員がはかれることが多い。しかしながら, 特に連続して2歯が欠損しているようなケースでは, 支台歯数を増加するか否かといった点について苦慮することがある。通

図 18 3歯支台および2歯支台ブリッジにおける各支台の保持力の変化
(1点集中荷重: B-N, D)

常, 支台歯数を増加する場合は, 主に支台歯の負担を軽減する目的からである。支台歯数の増加により, ブリッジ各支台歯の負担荷重ならびに変位量が減少することは, 岡田²⁹⁾, 長久保³⁰⁾, 黒崎ら⁴¹⁾によって実験的に検証されているが, 支台歯数と保持力との関係については明確にされていない。以上の理由から, 連続性の2歯中間欠損について, 2歯支台ブリッジと3歯支台ブリッジとの比較を行った。

本研究においてこの比較の対象となるブリッジは, 1点集中荷重で荷重部位が同一となるDタイプとBタイプ(B-N)であるので(図6), これら各支台の保持力の変化を図18に示す。各支台の保持力を相対的にみると, D2, B1およびB3の保持力はほぼ同じ値にまで低下を示したのに対し, D1とB2の間ではB2に10%以上の低下が認められた。このB2の保持力の低下が大きくなるという結果は着目すべき点であろう。ここで負担荷重および曲げモーメントの解析結果を参考にすると(図16), B2における理論値の絶対値はいずれも最大となることがわかる。つまり, 2歯支台ブリッジにおけるD1側への支台歯の増加, すなわちB1の設定は, D2(B3)の負担荷重および曲げモーメントの軽減をはかることにはなるが, 逆にD1(B2)を過度な負担にさらす可能性がある。2歯支台ブリッジに比較して3歯支台ブリッジでは, 咬合力あるいは咀嚼力を受ける面積が大きくなることが考えられるため, 中間支台への負担は一層増大することが推察される。したがって, 支台歯の増員は必ずしもブリッジ各支台の保持力の向上につながらないと思われる。

臨床的な見地からは, 単独冠に比較してブリッジの脱落例が多くみられたという報告³⁸⁾や多数の支台を用いたブリッジや中間支台のあるブリッジには2歯支台のブリッジに比べ, 経過の不良なものが多いことが指摘されて

いる⁴²⁾。本研究結果は、これらの意見と一致するところが多く、ブリッジを設計する場合、各支台歯の負担状態だけでなく、支台装置の保持力への影響をも考慮に入れる必要があることを示唆しているものとする。

V. 結 論

3 歯支台および 2 歯支台ブリッジについて、中間支台の位置の違いや欠損部のスパンの長さ、および支台歯数がブリッジ各支台装置の保持力に及ぼす影響を知る目的で、これら各種ブリッジに 1 点および 3 点の 2 条件でくり返し荷重を加え保持力の変化を検討し、以下の結論を得た。

1. 3 歯支台のブリッジ中央に 1 点集中荷重を加えた場合、中間支台の保持力の低下は最も大きくなった。
2. 3 歯支台ブリッジにおける中間支台の位置の違いは、各支台の保持力に影響を及ぼすことが示唆された。
3. 2 歯支台のブリッジでは、欠損部のスパンが長くなるに従いたわみは増大し、このたわみは保持力に影響を及ぼす一因子となることが判明した。
4. 各種ブリッジおよび単独冠のうち、3 歯欠損 2 歯支台ブリッジの保持力の低下は最大であった。
5. 2 歯欠損 2 歯支台ブリッジに対しての支台歯数の増加は、必ずしも保持力の向上につながらないことが明らかになった。
6. ブリッジの保持力は、荷重様式の影響を受けることが示唆された。

稿を終えるに臨み、終始懇篤なるご指導とご校閲を賜りました本学歯学部歯科補綴学第二講座花村典之教授に心より拝謝いたします。また、懇篤なるご校閲を賜りました本学歯学部歯科理工学教室平澤 忠教授ならびに本学歯学部歯科補綴学第三講座細井紀雄教授に深謝いたします。さらに本研究の遂行にあたり、終始ご教示とご協力をいただいた福島俊士助教授、野口幸彦講師ならびに第二講座教室員、大学院生各位に厚くお礼申し上げます。特に理論解析について有益な助言をいただいた横浜国立大学工学部生産工学科川井謙一助教授に謝意を表します。

本研究の要旨の一部は、平成元年度日本補綴歯科学会関東支部学術大会(平成 2 年 2 月 24 日)において発表した。

文 献

- 1) Hovijitra, S.T., Robinson, F.B. and Brehm, T.W.: The relationship between retention and convergence of full crowns when used as fixed partial denture retainers, J
- 2) Jacobi, R., Shillingburg, H.T. and Duncanson, M.G.: Effect of abutment mobility, site, and angle of impact on retention of fixed partial dentures, J Prosthet Dent, 54: 178~183, 1985.
- 3) 細野来馬: 歯冠補綴及架工義歯学, 491~494, 吐鳳堂, 東京, 1938.
- 4) Koller, K.C.: Zahnersatz durch Kronen/Brücken und partielle Prothesen, 20~22, Verlag Wilhelm Maudrich, Wien-Bonn, 1954.
- 5) Ledley, R.S.: A new method of determining the functional forces applied to prosthetic appliances and their supporting tissues, J Prosthet Dent, 5: 546~562, 1955.
- 6) Vest, G.: Lehrbuch der Zahnärztlichen Kronen und Brückenprothetik Band II Brückenprothetik, 101~109, Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart, 1960.
- 7) 五十嵐孝義: 橋義歯の橋脚歯および橋体の咬合負担力に関する橋梁学的力学考察, 補綴誌, 10: 18~25, 1966.
- 8) Körber, K.: Zahnärztliche Prothetik Band I: Funktionslehre, Gnathologie, Traumatologie, 223~227, George Thieme Verlag, Stuttgart, 1975.
- 9) Tylman, S.D.: Theory and practice of crown and fixed partial prosthodontics (bridge) 6th ed., 160~180, The C.V. Mosby Co, St. Louis, 1970.
- 10) Shillingburg, H.T. and Fisher, D.W.: Nonrigid connectors for fixed partial dentures, J Am Dent Assoc, 87: 1195~1196, 1973.
- 11) 保母須弥也, Shillingburg, H.T., Whitsett, L.D. (伊藤正俊, 高野 晃): Fundamentals of fixed prosthodontics (歯冠補綴学, 25~30, クインテッセンス出版, 東京, 1978) 1976.
- 12) Smyd, E.S.: Mechanics of dental structures: guide to teaching dental engineering at undergraduate level, J Prosthet Dent, 2: 668~692, 1952.
- 13) Smyd, E.S.: The role of torque, torsion, and bending in prosthodontic failures, J Prosthet Dent, 11: 95~111, 1961.
- 14) Horn, H.R. (花村典之): Practical considerations for successful crown and bridge therapy (ホーンのクラウン・ブリッジー臨床への指針一, 166~168, クインテッセンス出版, 東京, 1980) 1976.
- 15) Caputo, A.A. and Standlee, J.P.: Biomechanics in clinical dentistry, 134~141, Quintessence Publ Co, Chicago, 1987.
- 16) 松島 諒: 咬合時における固定性ブリッジのひずみについて, 歯科医学, 34: 371~389, 1971.
- 17) Finger, W. und Reimers, P.: Untersuchungen zur De-

- formation des Brückenkörpers, ZWR, 83 : 782~785, 1974.
- 18) Glantz, P.-O., Strandman, E. and Svensson, S.A. et al : On functional strain in fixed mandibular reconstructions I. an in vitro study, Acta Odontol Scand, 42 : 241~249, 1984.
- 19) 宮入裕夫, 村松篤良 : 橋義歯に関する力学的研究 第1報 橋脚歯の支持負担力, 歯理工誌, 11 : 109~115, 1970.
- 20) Standlee, J.P. and Caputo, A.A. : Load transfer by fixed partial dentures with three abutment, Quintessence Int, 19 : 403~410, 1988.
- 21) 青木潤一, 富金原則子, 清浦祝子ほか : 全部鑄造冠の軸面傾斜角について (第1報), 補綴誌, 24 : 1~7, 1980.
- 22) 青木潤一 : 全部鑄造冠の支台歯形態と保持力に関する実験的研究, 補綴誌, 25 : 695~714, 1981.
- 23) 山本鉄雄 : 全部鑄造冠支台歯軸面の表面あらさと保持力に関する実験的研究, 鶴見歯学, 9 : 29~47, 1983.
- 24) 野口幸彦 : 鑄造支台築造の保持力に関する研究, 補綴誌, 29 : 771~788, 1985.
- 25) 伊崎克弥 : ヒトの咀嚼運動経路の分析—正常有歯顎者および総義歯装着者について—, 補綴誌, 29 : 657~674, 1985.
- 26) Landry, K.E. Johnson, P.F. and Parks, V.J. et al : A photoelastic study to determine the location of the nonrigid connector in a five-unit intermediate abutment prosthesis, J Prosthet Dent, 57 : 454~457, 1987.
- 27) Moulding, M.B., Holland, G.A. and Sulik, W.D. : Photoelastic stress analysis of supporting alveolar bone as modified by nonrigid connectors, J Prosthet Dent, 59 : 263~274, 1988.
- 28) 續 肇彦 : 中間支台歯を持つブリッジの経過から, 日本歯科評論, 477 : 54~64, 1982.
- 29) 岡田京子 : 局部義歯の設計と支台歯歯周組織の咬合圧負担状態との関係についての実験的研究, 歯科学報, 71 : 1712~1775, 1971.
- 30) 長久保文夫 : 局部義歯の設計が支台歯歯周組織の咬合圧負担状態におよぼす影響に関する三次元的 Simulator による実験的研究, 歯科学報, 72 : 1690~1723, 1972.
- 31) 四条 進 : 中間歯欠損型架工義歯装着による歯槽骨変化の二次元光弾性実験, 歯学, 64 : 640~649, 1976.
- 32) 久保木弘 : 遊離端架工義歯装着による歯槽骨変化の二次元光弾性実験, 歯学, 64 : 650~660, 1976.
- 33) 小野喜一 : 中間2歯欠損型架工義歯装着による歯槽骨変化の二次元光弾性実験, 歯学, 64 : 630~641, 1980.
- 34) 大橋義夫 : 材料力学, 167~180, 培風館, 東京, 1976.
- 35) 西川義昌, 西村安夫 : 私のプロヴィジヨナル・レストレーションの活用—上顎全体に処置を行った例—, 補綴臨床別冊/歯周疾患を伴う欠損歯列の補綴 : 140~150, 1986.
- 36) 若林勝夫, 佐瀬聡良 : プロヴィジヨナル・スプリントの応用, デンタルダイヤモンド, 13 : 132~147, 1988.
- 37) 山崎長郎, 本田正明 : 臨床歯周補綴, 106, 第一歯科出版, 東京, 1990.
- 38) 河野正司, 加藤 均 : 脱落鑄造冠の観察例, 補綴誌, 24 : 451~456, 1980.
- 39) 末瀬一彦 : 全部鑄造冠の維持力に関する合着セメント層の力学的研究, 歯材器誌, 37 : 53~84, 1980.
- 40) 甘利光治, 坂本義典, 高橋典章ほか : 荷重方向の差異による鑄造冠合着セメント層の力学的挙動について, 補綴誌, 25 : 15~23, 1981.
- 41) 黒崎公絵, 右近晋一, 伊藤俊光ほか : 荷重下における支台歯およびその支持組織の応力分布について (2次元光弾性実験) 第2報 ブリッジ, 補綴誌, 17 : 394~400, 1974.
- 42) 金子一芳 : 大きな中間欠損をもつ症例について, 日本歯科評論, 467 : 105~108, 1981.