鑄造鉤の維持力に関する実験的研究

—Gingivally approaching clasp (I-bar type) について—

西 山 暉

Experimental Studies on Retention of Cast Clasp

—Gingivally approaching clasp (I-bar type)—

Akira Nishiyama

緒 言

局部床義歯の維持装置として広く利用されている鉤は、製作法によつて鑄造鉤と屈曲鉤に大別される。このうち、鑄造鉤は近年歯科精密鑄造法の発達と金属材料の改善にともない、鉤歯に対して良好な適合性を示し、かつ強靱な性質を有するようになった。

臨床において、局部床義歯に使用する維持装置は、義歯の維持安定をはかるとともに、残存歯や周囲組織を障害しないものでなくてはならないと言われており^{1,2)}、したがつて、これらのことを考慮して最も適した維持力を発揮するように設計される必要があると考えられる。この点において、鑄造鉤は臨床上使用目的に応じて鉤腕の断面形態や外形を種々変えて設計できることに大きな特徴を有している。

一般に鉤は、その形態から、鉤腕が咬合面側から鉤歯のアンダーカットに接近する Occlusally approaching clasp と、歯肉側から鉤歯のアンダーカットに接近する Gingivally approaching clasp に分類される。

従来、各種維持装置の維持力に関する研究はかなり見られるが³⁻¹⁵⁾、鑄造鉤に関するものでは、そのほとんどが Occlusally approaching clasp のうちの Akers type についての報告である³⁻¹¹⁾。

一方、Gingivally approaching clasp はローチ・ク

ラスプあるいはパークラスプともよばれ、これには種々の形態があるが、一般に鉤腕と鉤歯との接触面積が小さいため、う蝕罹患率が低く、歯肉に対する影響も少なく、審美性にもすぐれているなどの利点が挙げられ¹⁶⁾、近年多く利用されるようになった。しかし、この種の鉤の維持力に関する詳細な報告はほとんどみられず、適切な維持力を有する鑄造鉤を得るためには、維持力について基礎的に検討する必要がある。

そこで本研究は、Gingivally approaching clasp の中で、鉤歯と鉤尖部のみで接し、力学的に最も基本的な形態と考えられる鑄造鉤（以下これを I-bar type とする）に関し、維持力に比較的大きな影響をおよぼすと考えられる因子のうち、鉤腕の太さおよび長さ、鉤尖部のアンダーカットの大きさ、鉤歯に対する鉤腕の接近角度および鉤歯の形態が維持力におよぼす影響について検討したものである。

実験材料ならびに方法

実験 1 鉤腕の形態および曲げ強さ

まず、鉤腕を片持ち梁と考え、その形態と寸法を変化させた場合の曲げ強さについて測定した。

1. 試料の作製

試料の作製に際し、常に一定の寸法のろう原型を得るために、図 1 に示すような 4 種のステンレススチール製の陰型を作製した。ろう原型の形態は、その断面を半円形とし、先端の断面の半径が先端から 12 mm の位置の断面の半径の 1/2 となるように直線的に細くし、細い形態から順に a, b, c, d とした。各々の寸法は図 2 に示すとおりである。

大阪大学歯学部歯科補綴学第 2 講座（主任：河合庄治郎教授）

2nd Department of Prosthetic Dentistry, Osaka University Dental School (Chief: Prof. Shojiro Kawai)

昭和 51 年 1 月 14 日受付

図 1 ろう原型作製のための陰型

種 類	断面の半径	
	r1	r2
a	0.46	0.80
b	0.59	1.06
c	0.73	1.30
d	0.85	1.55

(mm)

図 2 ろう原型の寸法

まず、模型用埋没材（松風社製，Real Vest）で作った平板上に、測定時の荷重点を得るために、1/2のラウンドバーで深さ約0.5mmのくぼみを作り、これとろう原型の先端が一致するように先の陰型より作製したろう原型を接着した。形態は、直線型（以下「S」と表わす）と、先端から12mmの長さの部分が1/4円の円弧を描くように曲げた曲線型（以下「G」と表わす）の2種類とした（図3）。各形態について、先端から14mm、12mm、10mm、8mmの4種類の長さのろう原型を作製した。なお、それぞれの試料の固定部も同時に铸造するために、ろう原型の起始部に、厚さ2mm、幅5mm、長さ8mmのブロックを铸造原型用レジンで作製して接着した。さらに曲線型の試料については、図3に示す

図 3 曲げ試験用試料（金属固定）

図 4 曲げ試験用試料（レジン固定）

ような固定部が金属の試料（以下、金属固定の試料と記す）の他に、図4に示すような、4種類の規定した長さの位置において、即時重合レジン（而至社製，ユニファスト）で固定した試料（以下、レジン固定の試料と記す）を作るためのろう原型も作製した。なお、この場合のレジン固定部の寸法は、厚さ10mm、幅10mm、長さ15mmとした。これらをリングレス埋没法で埋没し、24時間後に自動温度調節電気炉（Jelenko社製，LFA型）を用いてワックスの焼却を行い、加熱速度を650℃まで1時間半とし、650℃で30分間係留したのち铸造を行つた。使用した金属は、弾性的性質において、現在铸造鉤に最も適していると言われている^{17,18)}、A.D.A.規格No.5¹⁹⁾の第4種金合金（而至社製，キャストインゴールド・タイプIV）を使用した。铸造は、自動遠心铸造機（Jelenko社製，サーモロールD-2型）を使用し、铸造温度を1000℃とした。铸造後室温まで放冷して铸造体を取り出し、熱処理を行つた。熱処理操作は、まず700℃で10分間加熱したのち、水中で急冷して軟化熱処理を行い、次いで450℃で10分間加熱したのち、そのまま炉冷して硬化熱処理を行つた。

図5 曲げ試験装置

直線型試料および曲線型試料を、それぞれ細い形態から順に Sa, Sb, Sc, Sd および Ga, Gb, Gc, Gd とし、以上 48 種類の試料について各々 3 個ずつ、合計 144 個の試料を作製した。

2. 測定方法

測定装置には、インストロン万能材料試験機 1113 型を使用した。すなわち、図 5 のように下部の固定具に試料の固定部を固定し、上部固定装置から降ろした荷重用治具の凹部を試料先端の荷重点に適合させ、片持ち梁による曲げ試験を行った。なお、レジン固定の試料については、すべて試料の先端から 14 mm の位置で固定部を固定し、同様に荷重を行った。引張速度を 0.5 mm/min., 記録紙速度を 50 mm/min. とし、フルスケールを試料の強度に応じて 2 kg, 5 kg, 10 kg とし、荷重—たわみ曲線を記録した。

実験 II 鉤の維持力

鉤の維持力に対しては、種々の因子が複雑に関係していると考えられる。そこで、まず鉤歯を想定した 3 種類の形態の金属原型を用いて鉤の維持力を測定し、鉤腕の太さおよび長さ、鉤尖部のアンダーカットの大きさ、鉤腕の鉤歯に対する接近角度および鉤歯の形態の維持力に対する影響について測定した。さらに、鉤歯として天然歯面の模型を用いて鉤の維持力を測定した。

1. 金属原型

天然歯歯冠部の縦断面における曲率半径は、およそ 5 mm から 10 mm の間に分布していると報告されている⁷⁾。そこで鉤歯を想定し、最高豊隆部における横断面の直径が 10 mm で、歯軸を含む縦断面における曲率半径（以下、曲率半径と記す）が 10 mm, 7.5 mm, 5 mm

図6 鉤歯を想定した3種類の金属原型

図7 天然歯を用いた鉤歯模型

の 3 種類のたる状の原型をステンレススティールで作製し（図 6）、これを基底面に垂直に固定した。

2. 天然歯面の模型

鉤歯として、金属原型とできるだけ同じ形態のものを得るために、咬耗、摩耗その他歯冠表面に異常を認めず、しかも曲率半径が約 10 mm の面を有する新鮮抜去歯牙を選び（下顎左側第 1 大臼歯）、これを頬側および舌側部に 2 分割し、最高豊隆部における幅径が 10 mm になるようにこの 2 面を合わせ、接着したものを使用した（図 7）。

3. 鉤の作製

鉤の作製には、実験 I と同じ陰型を使用して作った 4 種類の太さの異なる鉤腕のろう原型 a, b, c, d を用いた（図 2）。

まず、鉤尖部のアンダーカットの大きさを、臨床上最も広く用いられている 0.25 mm と 0.50 mm の 2 種類に規定し、それぞれ不必要なアンダーカット領域をブロックアウトするためのコアをレジンで作製した。なお、このブロックアウト用コアの側面の傾斜度は鉤腕の鉤歯に対する接近角度を規定するものであり、この鉤

図 8 ブロックアウト用コアー適合固定した金属原型

表 1 鉤の種類

	曲率半径 (mm)	アンダーカット (mm)	接近角度 (傾斜)	ろう 原 型			
				a	b	c	d
金 属 原 型	10	0.25	1/10	○	○	○	○
	10	0.50	1/10	○	○	○	○
	10	0.50	3/10	—	—	○	—
	10	0.50	5/10	—	—	○	—
	7.5	0.50	1/10	—	—	○	—
	5	0.50	1/10	—	—	○	—
天 然 歯	10	0.25	1/10	—	—	○	—
	10	0.50	1/10	—	—	○	—

腕の接近角度が維持力に及ぼす影響を観察するために、コアーの側面の歯軸に対する傾斜度を 1/10, 3/10, 5/10 の 3 種類とした。

このコアーを適合固定した鉤歯模型（図 8）を、チオコールラバー印象材（而至社製、シュールフレックス F、レギュラータイプ）で印象採得し、模型用埋没材（松風社製、Real Vest, L/P=0.24）を注入して埋没材模型を作製した。次にこの模型上に、それぞれ規定したアンダーカットの位置に鉤尖を設定し、先端から 12 mm の部分が 1/4 円の円弧を描くように鉤の外形線を描き、その上にろう原型を注意深く接着した。

鉤の種類は表 1 に示すとおりである。曲率半径 10 mm の金属原型については、傾斜度が 1/10 のブロックアウト用コアーを使用し、前記のようにアンダーカットの大きさを 0.25 mm と 0.50 mm の 2 種類とし、4 種類のろう原型 a, b, c, d を用い、合計 8 種類の鑄造鉤を作製した。

次に、鉤腕の接近角度と維持力に関する実験において、さらに側面の傾斜度が 3/10, 5/10 のブロックアウト用コアーを用い、アンダーカットの大きさを 0.50 mm,

図 9 リングレス埋没

図 10 鑄 造 鉤

ろう原型を c として 2 種類の鑄造鉤を作製した。以下、鉤腕の接近角度を 1/10, 3/10, 5/10 と歯軸に対する傾斜度で表わすこととする。

一方、曲率半径が 7.5 mm と 5 mm の金属原型における鉤の維持力の測定においては、アンダーカットの大きさを 0.50 mm、鉤腕の接近角度を 1/10 に規定し、ろう原型 c を用いて 2 種類の鑄造鉤を作製した。

さらに天然歯面の模型における鉤の維持力の測定においては、アンダーカットの大きさを 0.25 mm と 0.50 mm の 2 種類とし、鉤腕の接近角度を 1/10、ろう原型を c として 2 種類の鑄造鉤を作製した。

以下、a, b, c, d のろう原型を用いて作製した鑄造鉤をそれぞれ A, B, C, D とする。

埋没方法は、鑄造鉤の鉤歯に対する適合性を良くするために有効といわれる²⁰⁾ リングレス埋没法（図 9）とし、第 4 種合金を使用して、実験 I と同様の方法で鑄造および熱処理操作を行って鑄造鉤を完成した（図 10）。

鑄造鉤の適合性に関しては、予備実験において、熱処理操作後、図 11 に示すように、両鉤尖部につけた標点の間隔 l_1 の金属原型への適合前後における差、および金属原型における両側アンダーカット部の距離 l_2 と両

図 11 鉤の適合試験における測定部位

図 12 垂直誘導装置

a ロードセル	e 鉤歯模型
b 負荷棒ガイド	f 鉤
c 負荷棒	g 鉤歯模型取付け具
d 鉤取付け具	h クロスヘッド

側鉤尖内面の距離 l_2 の差を $1/1000$ mm 精度の万能投影機（日本光学社製、ニコン 6 CT 型）で測定し、これらによつて適合性を判定した。その結果、模型用埋没材（松風社製、Real Vest）の専用原液（ SiO_2 : 20% 濃度）を水で希釈し、埋没材模型の最高豊隆部における硬化膨張率を $1.05 \pm 0.05\%$ に調整し、リングレス埋没法を用いることによつて、鉤の鉤尖部における適合性をほぼ $\pm 15 \mu$ 以内にすることが可能であることを確認した。

試料として、前記の 14 種類の鋳造鉤を各々 10 個ずつ作製し、合計 140 個の試料について維持力を測定し、比較検討した。

4. 測定装置

本実験の測定装置として、島津オートグラフ S-500 形を使用した。

図 13 金属原型に適合させた鉤

図 14 3種類の鉤腕の接近角度の鋳造鉤

鉤の維持力として、垂直方向の離脱に対する抵抗を測定するために、図 12 のような垂直誘導装置をオートグラフに設置して用いた。この装置には、4 本の支柱に固定された外枠を貫き、負荷棒が底面に垂直にとりつけられている。この負荷棒は上下 3 個ずつの誘導ベアリングにより、最小限の抵抗で垂直方向にのみ誘導されるように作製されている。負荷棒下部には鉤取付け具があり、上部はユニバーサルジョイントを通じてロードセルに連結されている。一方、外枠はクロスヘッドに取り付けられており、外枠の底面には鉤歯模型の取付け具が設置されている。

5. 測定方法

まず、鉤固定具に鉤を固定し、これを鉤歯模型に適合させ（図 13）、この模型を垂直誘導装置の底部に固定し、さらに鉤固定具を負荷棒下部の取付け具に固定する。このようにしてクロスヘッドを下降させると、鉤には垂直方向の離脱力が働くことになる。引抜き速度を 50 mm/min. 、記録紙速度を 100 mm/min. 、フルスケールを 5 kg として、鉤が鉤歯から離脱し終わるまでの抵抗の動態を記録紙上に同時記録した。

図 15 荷重—たわみ曲線の記録例 (O-P: 弾性曲げの範囲), 試料の長さ: 14 mm, 太さ: c

維持力の測定は次のようにした。まず鉤固定具に鉤を鉤腕長 14 mm の位置で固定し、5 回の測定値の平均値を鉤腕長 14 mm の鉤の維持力とした。続いて鉤腕周囲に即時重合レジンを追加して、鉤腕を先端から 12 mm, 10 mm, 8 mm の位置で順次固定し、それぞれ 5 回の測定値の平均値を各鉤腕長の鉤の維持力とした。

なお、天然歯面の模型における鉤の維持力の測定時には、歯面に唾液を塗布し、歯面が常に唾液でぬれた状態にした。

実験結果

実験 I 鉤腕の形態および曲げ強さ

図 15 は、太さ c、長さ 14 mm の曲線型試料の曲げ試験における、荷重—たわみ曲線の記録例である。直線部分 O-P が弾性曲げの範囲であり、これから最大弾性曲げ P における荷重量およびたわみ量を求めた。

測定の結果、固定部を金属とした (金属固定) 直線型 Sa, Sb, Sc, Sd および曲線型 Ga, Gb, Gc, Gd の各長さの試料について、先端を 0.1 mm たわませるのに必要な荷重量を算出した結果は表 2, 3, 図 16, 17 に示すとおりである。また最大弾性曲げにおけるたわみ量は表 4, 5, 図 18 に示すようになった。また、レジンで規定の長さに固定した曲線型試料 (レジン固定) について、0.1 mm たわませるのに要する荷重量は表 6, 図 19 の一点鎖線に示すとおりであり、最大弾性曲げにおけるたわみ量は表 7 に示す。

1. 一定量たわませるのに必要な荷重量

金属固定の各試料について、先端を 0.1 mm たわま

表 2 0.1 mm たわませるのに必要な荷重量—直線型 (金属固定)—

試料の長さ		14 mm	12 mm	10 mm	8 mm
太さ					
Sa	MEAN	33	39	50	69
	S. D.	3	2	5	1
Sb	MEAN	94	116	147	217
	S. D.	3	14	8	31
Sc	MEAN	204	246	331	469
	S. D.	8	8	12	40
Sd	MEAN	407	491	656	872
	S. D.	20	25	19	57

(g)

表 3 0.1 mm たわませるのに必要な荷重量—曲線型 (金属固定)—

試料の長さ		14 mm	12 mm	10 mm	8 mm
太さ					
Ga	MEAN	37	43	57	77
	S. D.	3	5	5	5
Gb	MEAN	107	129	156	229
	S. D.	3	11	10	8
Gc	MEAN	226	277	373	473
	S. D.	8	21	19	47
Gd	MEAN	460	522	692	922
	S. D.	24	22	38	58

(g)

せるのに必要な荷重量を算出すると、まず試料の太さと荷重の関係については図 16 に示すようになり、試料を太くするにしたがつて荷重量は大きな増加を示した。この増加の比率は、直線型および曲線型、また 4 種の長さの試料の間でわずかの差であり、b は a の約 2.7 倍から 3.0 倍、c は b の約 2.1 倍から 2.4 倍、d は c の約 1.9 倍から 2.0 倍の荷重量となった。

次に、試料の長さとは荷重の関係については、図 17 に示すように、試料を短くするにしたがつて荷重量は増加した。この試料を短くすることによる荷重量の増加の比率は、試料の太さを変えてもほぼ一定であり、長さ 8 mm の試料は 14 mm の試料と比較すると、一定量のたわみに対して直線型では約 2.1 倍から 2.3 倍、曲線型では約 2.0 倍から 2.1 倍の荷重量となった。

次に、直線型と曲線型の試料の間で比較すると、各寸法の試料において、曲線型の方が直線型よりも少し大きな荷重量を示す傾向にあつたが、その差はわずかであつた (図 16, 17)。

2. 永久変形の生じないたわみ量

金属固定の各試料について、最大弾性曲げにおけるた

図 16 0.1 mm たわませるのに必要な荷重量—金属固定—
(試料の太さ—荷重)

図 17 0.1 mm たわませるのに必要な荷重量—金属固定—
(試料の長さ—荷重)

わみ量は図 18 に示すとおりであり、試料を太くするほど、また短くするほど、たわみ量は小さくなった。

また、最大弾性曲げにおけるたわみ量について、直線型と曲線型を比較すると、両者はほぼ同じ傾向を示し、有意差検定を行った結果、それぞれの太さおよび長さの試料において、両者の間に有意の差はほとんど認められなかった。

3. 試料の固定方法の影響

表 4 最大弾性曲げにおけるたわみ量—直線型 (金属固定)—

試料の長さ 太さ		14 mm	12 mm	10 mm	8 mm
Sa	MEAN	1.72	1.25	1.01	0.76
	S. D.	0.22	0.01	0.10	0.11
Sb	MEAN	1.24	0.99	0.81	0.57
	S. D.	0.06	0.14	0.07	0.06
Sc	MEAN	1.11	0.95	0.68	0.54
	S. D.	0.02	0.06	0.05	0.05
Sd	MEAN	0.98	0.86	0.67	0.50
	S. D.	0.11	0.04	0.04	0.03

(mm)

表 5 最大弾性曲げにおけるたわみ量—曲線型 (金属固定)—

試料の長さ 太さ		14 mm	12 mm	10 mm	8 mm
Ga	MEAN	1.58	1.38	1.08	0.77
	S. D.	0.16	0.05	0.03	0.11
Gb	MEAN	1.27	0.99	0.86	0.57
	S. D.	0.03	0.03	0.10	0.01
Gc	MEAN	1.04	0.89	0.64	0.50
	S. D.	0.04	0.04	0.02	0.04
Gd	MEAN	0.94	0.81	0.61	0.47
	S. D.	0.06	0.05	0.03	0.02

(mm)

図 18 最大弾性曲げにおけるたわみ量—金属固定—

曲線型試料について、レジン固定の試料は、金属固定の試料と比較すると、一定量のたわみに要する荷重量は小さくなる傾向を示した (図 19)。また、試料を a, b, c, d と太くした場合の荷重量の増加の比率について比較すると、両者にほとんど差はみられなかったが、試料

表 6 0.1 mm たわませるのに必要な荷重量—曲線型
(レジ固定)—

試料の長さ		14 mm	12 mm	10 mm	8 mm
太さ	MEAN	32	38	44	57
	S. D.	1	1	4	3
Ga	MEAN	92	105	127	158
	S. D.	3	4	5	3
Gb	MEAN	212	242	279	351
	S. D.	8	15	12	16
Gc	MEAN	412	487	560	683
	S. D.	15	10	13	35
Gd	MEAN				
	S. D.				

(g)

図 19 0.1 mm たわませるのに必要な荷重量に対する
試料の固定法の影響表 7 最大弾性曲げにおけるたわみ量—曲線型
(レジ固定)—

試料の長さ		14 mm	12 mm	10 mm	8 mm
太さ	MEAN	1.72	1.66	1.23	0.96
	S. D.	0.08	0.19	0.14	0.18
Ga	MEAN	1.24	1.01	0.90	0.87
	S. D.	0.09	0.03	0.07	0.03
Gb	MEAN	1.03	0.87	0.83	0.60
	S. D.	0.08	0.13	0.03	0.08
Gc	MEAN	0.94	0.85	0.73	0.58
	S. D.	0.16	0.01	0.03	0.07
Gd	MEAN				
	S. D.				

(mm)

を短くした場合の荷重量の増加の比率については、金属

図 20 鉤の維持力の記録例

金属原型の曲率半径: 10 mm
 鉤腕の長さ: 12 mm
 アンダーカット: 0.25 mm
 鉤腕の接近角度: 1/10

図 21 鉤の維持力の記録例

金属原型の曲率半径: 10 mm
 鉤腕の長さ: 12 mm
 アンダーカット: 0.50 mm
 鉤腕の接近角度: 1/10

固定の試料の場合、8 mm の試料は 14 mm の試料の約 2.0 倍から 2.1 倍の荷重量となつたのに対し、レジ固定の試料の場合には約 1.7 倍から 1.8 倍となり、両者にわずかの差が見られた (表 3, 6, 図 19)。

次に、最大弾性曲げにおけるたわみ量について比較すると、各寸法の試料について、レジ固定の試料の方が金属固定の試料よりもわずかに大きくなる傾向を示した (表 5, 7)。

実験 II 鉤の維持力

図 20, 21 は金属原型の曲率半径 10 mm, 鉤腕の太さ a, b, c, d, 鉤腕長 12 mm, アンダーカット 0.25 mm および 0.50 mm, 鉤腕の接近角度 1/10 とした場合の、鉤の離脱時にもなる維持力の変化の測定記録の 1 例である。鉤の離脱時には、装置の自重と負荷棒を誘導するべ

表 8 鉤腕の太さと維持力(アンダーカット 0.25 mm)

太さ	鉤腕長	14 mm	12 mm	10 mm	8 mm
		MEAN	S. D.	MEAN	S. D.
A	MEAN	38	5	44	3
	S. D.	5	4	3	6
B	MEAN	112	8	127	10
	S. D.	8	10	10	16
C	MEAN	249	22	281	24
	S. D.	22	24	23	30
D	MEAN	491	24	555	20
	S. D.	24	20	33	44

金属原型の曲率半径: 10 mm

(g)

鉤腕の接近角度: 1/10

表 9 鉤腕の太さと維持力(アンダーカット 0.50 mm)

太さ	鉤腕長	14 mm	12 mm	10 mm	8 mm
		MEAN	S. D.	MEAN	S. D.
A	MEAN	101	8	118	10
	S. D.	8	10	11	21
B	MEAN	296	25	336	28
	S. D.	25	28	37	37
C	MEAN	632	27	725	30
	S. D.	27	30	42	52
D	MEAN	1221	36	1415	34
	S. D.	36	34	42	61

金属原型の曲率半径: 10 mm

(g)

鉤腕の接近角度: 1/10

アリングの抵抗およびその時点における鉤の維持力の和が記録紙上に描記されるが、鉤の離脱後には装置の自重と抵抗の和が描かれ、その値の差を鉤の維持力とすることができる。

なお、鉤腕の太さを c, 長さを 12 mm, アンダーカットを 0.50 mm と規定し、鉤腕の接近角度および鉤歯の曲率半径を変えた場合、鉤の離脱にともなう維持力の変化の記録を、図 33, 34 の破線で示す。

このようにして、各試料について測定した結果得た維持力の最大値を表 8, 9, 10, 11, 12 に示す。また、これらの値をグラフにしたものを図 22, 23, 24, 25, 26 に示す。

1. 鉤の形態と維持力の関係

1) 鉤腕の太さ

鉤の維持力は、鉤腕を太くするにしたがって大きな増加を示した(図 22)。まず、鉤腕長が 12 mm の鉤について見ると、アンダーカットが 0.25 mm の場合 A, B, C, D と鉤腕を太くすると、鉤の維持力はそれぞれ 44 g, 127 g, 281 g, 555 g の値を示し、B は A の約 2.9 倍, C

図 22 鉤の維持力(鉤腕の太さ-維持力)

図 23 鉤の維持力(鉤腕の長さ-維持力)

は B の約 2.2 倍, D は C の約 2.0 倍となつた(表 8)。またアンダーカットの大きさが 2 倍の 0.50 mm の鉤の場合、A, B, C, D の維持力はそれぞれ 118 g, 336 g, 725 g, 1415 g の値を示し、B は A の約 2.8 倍, C は B の約 2.2 倍, D は C の約 2.0 倍となつた。このように、鉤腕を太くすることによる維持力の増加の比率は、両アンダーカットの鉤においてわずかの差であり、鉤腕長 14 mm, 12 mm, 10 mm, 8 mm の鉤の間で比較してもわずかの差であつた(表 8, 9)。

表 10 鉤腕の接近角度と維持力

接近 角度	鉤腕長	14 mm	12 mm	10 mm	8 mm
		MEAN S. D.	MEAN S. D.	MEAN S. D.	MEAN S. D.
1/10	MEAN	632	725	855	1086
	S. D.	27	30	42	52
3/10	MEAN	771	894	1087	1431
	S. D.	34	38	40	62
5/10	MEAN	884	1030	1233	1614
	S. D.	22	33	43	62

金属原型の曲率半径：10 mm

(g)

鉤腕の太さ：C

アンダーカット：0.50 mm

図 24 鉤腕の接近角度と維持力

2) 鉤腕長

それぞれの鉤について、鉤腕長を 14 mm から 12 mm, 10 mm, 8 mm と短くするにしたがつて維持力は増加し、鉤腕長を 14 mm から 8 mm にすると維持力は約 1.7 倍から 1.9 倍となった。この鉤腕を短くすることによる維持力の増加の比率は、他の因子、すなわち鉤腕の太さ、アンダーカットの大きさ、鉤腕の接近角度、鉤歯の形態を変えても、ほぼ一定であつた（表 8, 9, 10, 11, 図 23, 24, 25）。

3) アンダーカットの大きさ

まず、鉤腕長が 12 mm の鉤についてみると、アンダーカット 0.25 mm の鉤の維持力は、アンダーカット 0.50 mm の鉤の維持力と比較すると、4 種の太さの鉤 A, B, C, D において、それぞれ約 37%, 38%, 39%, 39% となった。またこの割合は、鉤腕長 14 mm, 10 mm, 8 mm の鉤の場合においてもほぼ同様であり、アンダーカット 0.25 mm の鉤の維持力はアンダーカット 0.50 mm

表 11 金属原型の曲率半径と維持力

曲率 半径	鉤腕長	14 mm	12 mm	10 mm	8 mm
		MEAN S. D.	MEAN S. D.	MEAN S. D.	MEAN S. D.
10 mm	MEAN	632	725	855	1086
	S. D.	27	30	42	52
7.5 mm	MEAN	638	740	883	1148
	S. D.	27	27	25	42
5 mm	MEAN	660	762	918	1181
	S. D.	27	25	30	42

鉤腕の太さ：C

(g)

アンダーカット：0.50 mm

鉤腕の接近角度：1/10

図 25 金属原型の曲率半径と維持力

の鉤の維持力のおよそ40%の値を示した（表 8, 9, 図 22）。このように、アンダーカットと維持力は比例関係を示さなかつた。

4) 鉤腕の接近角度

曲率半径 10 mm の金属原型において、鉤尖部のアンダーカットを 0.50 mm, 鉤腕の太さを c に規定し、鉤腕の歯軸に対する接近角度を 1/10, 3/10, 5/10 と変えて（図 13）鉤の維持力を比較すると、図 24 に示すように、鉤腕の接近角度が大きくなるにしたがつて維持力は増加した。すなわち、鉤腕の接近角度が 3/10 の鉤の維持力は接近角度が 1/10 の鉤の維持力より約 22% から 32% 大きくなり、接近角度を 5/10 にすると接近角度が 1/10 の鉤の維持力より約 40% から 49% 大きくなった（表10）。

2. 鉤歯の形態と維持力の関係

鉤尖部のアンダーカットの大きさを 0.50 mm, 鉤腕の接近角度を 1/10, 鉤腕の太さを c に規定して、金属原型の曲率半径を 10 mm, 7.5 mm, 5 mm と変えて維持力を測定した結果、曲率半径を小さくするほど鉤の維持力は少しずつ増加する傾向にあつた。すなわち、曲率半

表 12 天然歯における維持力

アンダー カット	鉤腕長	鉤腕長			
		14 mm	12 mm	10 mm	8 mm
0.25 mm	MEAN	268	303	345	444
	S. D.	18	16	15	13
0.50 mm	MEAN	661	751	888	1110
	S. D.	18	25	26	26

鉤歯の曲率半径: 10 mm

(g)

鉤腕の太さ: C

鉤腕の接近角度: 1/10

径 7.5 mm の金属原型における鉤の維持力は、曲率半径 10 mm における鉤の維持力より約 1% から 6% 大きな値を示し、曲率半径 5 mm の金属原型では、曲率半径 10 mm の場合より約 5% から 9% 大きな値を示した (表 11, 図 25)。

3. 天然歯面における維持力

天然歯面の模型における鉤の維持力の測定結果は表 12 に示すとおりであり、これを曲率半径 10 mm の金属原型における結果とあわせてグラフにしたものを図 26 に示す。

両者の値を比較すると、天然歯面における鉤の維持力の方が金属原型における結果よりわずかに大きな値を示すのみであった。また、鉤腕を短くすることによる維持力の増加の比率については、両者の間にほとんど差がみられず、アンダーカットと維持力の関係についても、天然歯面における場合、アンダーカット 0.25 mm の鉤は、アンダーカット 0.50 mm の鉤の維持力の約 40% の値を示し、金属原型における結果との間にほとんど差はみられなかった。

考 察

局部床義歯の維持装置として、現在鑄造鉤が多く使用されている。一般に鉤は、垂直荷重に対する支持 (Support)、側方荷重に対する把持 (Bracing)、離脱力に対する維持 (Retention) の3つの機能を有していなくてはならないと言われているが^{16,21,22)}、中でも維持は特に重要な機能と考えられる。しかし、鑄造鉤の形態とその維持力との関係についてはまだ十分に解明されるに至っていない。

従来、鉤に関する力学的な研究として、鉤用金属の弾性的性質について検討したもの¹⁸⁾、鉤の応力について光弾性実験で研究したもの²³⁻²⁵⁾、鉤の変形と強度を理論的に研究したもの²⁶⁻³²⁾、および鉤の維持力を理論的あるい

図 26 天然歯と金属原型における維持力の比較

は実験的に研究したもの³⁻¹²⁾などがあげられる。

鉤のうち、線鉤の維持力に関する研究として、三浦³⁾、福井⁶⁾、宝田⁷⁾は、線鉤に作用する外力とそれによる鉤腕の変形および線鉤の維持力の関係を理論的に検討している。また Warr^{4,5)}は、線鉤および鑄造鉤について力学的に解析して維持力の理論式を導き出し、計算図表により一定の維持力を得るためのアンダーカットの大きさと鉤腕の断面形態を算定する方法を報告しているが、いずれも理論的検討にとどまっている。

次に、鑄造鉤の維持力に関する実験的研究として、杉山⁸⁾は、Akers type の鑄造鉤について、維持力の低下の原因となる、鉤腕の永久変形、疲労、摩耗等を測定し、利用し得る最大のアンダーカットの大きさを検討した結果、白金加金および 14K 合金を使用した場合は 0.50 mm、Co-Cr 合金では 0.25 mm であると報告している。また Firtell⁹⁾は、鉤歯として直径 3/8 インチの金属球を用い、Co-Cr 合金で 9 種の異なる形態の鉤を作製し、鉤の引抜き荷重を比較した結果、Akers type の鑄造鉤よりもローチ・クラスプの U-type の維持力の方が大きいという結果を得ている。また河上¹⁰⁾は、天然歯を用いて Akers type の鑄造鉤の引抜き試験を行つた結果、鉤歯の隅角部が維持力に重要な役割をはたしており、また鉤尖部のアンダーカットの大きさを一定にしても、鉤の維持力はアンダーカット部にある鉤腕の長さによつて影響されると報告している。また松田¹¹⁾は、市販の 4 種の合金を用い、河上¹⁰⁾と同じ方法で Akers type の鑄造鉤の引抜き試験を行つた結果、維持力は金属の弾性的性質、すなわちヤング率、弾性エネルギー等と密接な関係にあると報告している。

以上のように、鉤の維持力に関して解明がなされつつあるが、これらの研究のほとんどが Occlusally approaching clasp の Akers type についてのものである。

一方、Gingivally approaching clasp の維持力を詳細に検討したものはほとんどみられず、わずかに Stone¹²⁾が、この種の鉤の維持力は鉤腕の接近角度によつて影響されると指摘しているのみである。

Gingivally approaching clasp には種々の形態があるが、中でも歯面と鉤尖のみで接する I-bar type は力学的にみると Gingivally approaching clasp の基本的な形態と考えられる。また I-bar type の鑄造鉤は、う蝕罹患率が低く、歯肉に対する影響が少なく、審美的にもすぐれている等の Gingivally approaching clasp の利点を持つとともに、近心レストおよびガイドプレーンと併用することによつて、特に遊離端義歯の症例において鉤歯に対する為害作用を少なくすることができると言われ^{22,33,34)}、近年広く応用されるようになった。したがつて、I-bar type の鑄造鉤の維持力について基礎的に検討することは臨床重要であると考え、まず鉤腕の曲げ強さについて検討し、つづいてこの鉤の維持力におよぼす種々の因子の影響について実験を行った。

鉤腕の形態および曲げ強さについて

鉤腕の形態に関し、奥野²⁵⁾は Akers type の鑄造鉤について光弾性実験を行った結果、鉤腕の断面が半円形で、起始部から先端に向かつて直線的に細くした形態が弾性的にすぐれていると報告している。

一方、Gingivally approaching clasp の I-bar type の鉤腕の形態については、基礎的な研究は見られない。しかし、上記のような断面が半円形であり、先端に向かつて細くなる形態は他の鑄造鉤にも適用される基準であると言われており^{21,35)}、I-bar type の鑄造鉤についても臨床でこの形態に準じて作製されている。そこで、維持力の測定に先立ち、I-bar type の鑄造鉤に Akers type の鉤腕の形態基準を適用した場合の鉤腕の曲げ強さについて実験した。その結果、鉤腕の最大弾性曲げにおけるたわみ量、すなわち、永久変形の生じることのない鉤腕のたわみ量について、I-bar type の鉤腕を想定した曲線型の試料は、Akers type の鉤腕の基本形態である直線型の試料の場合とほぼ同じ傾向を示し（図 18）、また各寸法の試料において、両者の間に有意の差はほとんど認められなかった。したがつて、この両者はほぼ同様の性状を持つものと考えられる。この直線型試料の形態は、先端に荷重を加えた場合、応力の分布が比較的均等であり、弾性的にすぐれていると報告されており^{25,36)}、このことから、曲線型試料についても弾性的にほぼ良好な形態であると推定される。

以上のように、I-bar type の鉤腕を、その断面が半円

形であり、鉤腕起始部から鉤尖部に向かつて直線的に細くした形態にすることは、弾性的にほぼ良好であると考えられる。またこの形態の鉤腕について、最大弾性曲げにおけるたわみ量の値（表 5）から類推すると、鉤腕を太く、また短くした場合には永久変形の生じることのないたわみ量が小さくなり、鉤尖部のアンダーカットの大きさを 0.50 mm にとどめる必要があると考えられる。

次に、鉤の維持力を測定する場合の鉤腕の固定法を考慮し、レジンで鉤腕を固定した場合の鉤腕の曲げ強さを測定した。

曲線型試料について、レジンで試料を固定した場合（レジン固定）、固定部を金属とした場合（金属固定）と比較すると、各寸法の試料について、一定量のたわみに要する荷重量は小さくなり、また試料を短くすることによる荷重量の増加の比率も小さくなった（表 3、6、図 19）。また、最大弾性曲げにおけるたわみ量については、レジン固定の試料の方が金属固定の試料よりもわずかに大きくなる傾向を示した（表 5、7）。

試料の固定法の違いによつてこのような差が生じた理由として、試料先端に荷重を加えた場合、レジン固定の試料は、金属固定の試料と異なり、固定部自身のたわみが加わることが考えられる。したがつて、これらの結果から、鉤腕の曲げ強さについては、その固定法の影響も考慮に入れる必要があると考えられる。

鉤の維持力の測定方法について

義歯に離脱力が働いた場合、鉤に対しては垂直方向の離脱力のみでなく、回転力等の力が加わり、鉤の維持力についてはこれらの力に対する抵抗も考慮する必要がある。しかし鉤を設計する際、サーベイングによつて着脱方向および鉤尖部のアンダーカットの大きさを決定し、義歯の離脱を着脱方向に誘導し、回転力等をできるだけ防止することを原則としている。したがつて、サーベイングの基本となる歯軸方向の離脱に対する鉤の維持力を知ることが基本であり、重要であると考えられる。そこで本実験において、鉤の歯軸方向の維持力について測定した。

一般に、鉤の歯軸方向の維持力に影響する因子には次のようなものが挙げられている¹⁹⁾。

- i) 鉤作製に用いた合金の弾性係数
- ii) 鉤腕の太さ
- iii) 鉤腕の長さ
- iv) 鉤尖部のアンダーカットの大きさ
- v) 鉤腕が鉤歯に対して接近する角度

本研究において、使用金属は現在鑄造鉤に最も適して

図 27 鉤の引抜き過程における維持力の変化

いると言われている第4種合金とし、その他の4項目に加え、鉤歯の形態による影響についても測定した。

維持力の測定は島津オートグラフ S-500 形を使用した。引抜き速度の影響について検討したところ、引抜き速度が 5 mm/min. から 200 mm/min. においては測定値に変化は見られなかった。しかし、200 mm/min. を越えると測定値は低下した。これは力の急速な変化に対する実験装置のペン書記録計の追従性が低いために、その測定値が低下したものと考えられたので、この点を考慮し、本実験では引抜き速度を 50 mm/min. とした。咀嚼サイクルを考慮すると、もう少し速い動きが考えられるが、5 mm/min. から 200 mm/min. の間の引抜き速度では測定値に差はなく、また動摩擦係数は速さに影響されない³⁷⁾ことから、鉤の維持力について、引抜き速度による影響は少ないものと考えられる。

鉤の維持力の理論的検討について

図 20, 21 に示すような維持力の測定記録から、I-bar type の鑄造鉤が鉤歯から離脱するまでの維持力の変化の動態を、鉤尖の位置と関連させて図解すると図 27 のようになる。まず鉤尖が上方へ移動するにしたがつて維持力が増加し、鉤尖が規定されたアンダーカットの位置と鉤歯の最高豊隆部とのほぼ中間まで上昇したときに維持力が最大となった。さらに鉤尖が上方へ移動すると維持力は低下しはじめ、鉤尖が最高豊隆部を越え、やがて負の維持力、すなわち逆に鉤が離脱しようとする力となって離脱が完了する。

I-bar type の鉤は、鉤歯に対して鉤尖のみで接しており、鉤を上方へ引き上げる場合、鉤に作用する力の関係を模式的に示すと図 28 のようになる。すなわち、鉤歯を球面体とし、曲率中心 O と鉤尖を結ぶ線と x 軸のなす角が、初期位置 θ_0 、すなわち規定したアンダーカットの位置から θ となる位置まで鉤尖を移動させたとき、鉤に働く外力は次のとおりである。

図 28 鉤に作用する力とモーメント

鉤尖が歯面から受ける抗力: N_1

歯面上の摩擦力: R

垂直(y)方向の引抜き力(維持力): F

鉤固定具による水平(x)方向の抗力: N_2

鉤を一定速度で引抜く場合、これらの力は平衡条件を満足しなければならない。したがって、

x 方向:

$$N_1 \cos \theta = N_2 + R \sin \theta \quad (1)$$

y 方向:

$$N_1 \sin \theta + R \cos \theta = F \quad (2)$$

また、鉤腕起始部に関する曲げモーメントのつりあいを考えると次のようになる。

$$M_1 = (N_1 \cos \theta - R \sin \theta)h - (N_1 \sin \theta + R \cos \theta)l \quad (3)$$

$$M_2 = -f \sin(90^\circ - \alpha)h - f \cos(90^\circ - \alpha)l \quad (4)$$

$$M_1 = -M_2 \quad (5)$$

ただし、 M_1 : R および N_1 による曲げモーメント

M_2 : 鉤腕が閉じようとする力による曲げモーメント

f : 鉤腕が閉じようとする力

h : 鉤腕の y 方向の長さ

l : 鉤腕の x 方向の長さ

α : 鉤腕と y 軸のなす角

摩擦力 R は歯面の抗力 N_1 と摩擦係数 μ の積であらわされるから

$$R = \mu N_1 \quad (6)$$

また鉤腕の接近角度を $\tan \alpha$ で表わすと

$$\tan \alpha = l/h \quad (7)$$

式(2), (3), (4), (5), (6), (7)より N_1, R, h, l を消去して整理すると, 垂直方向の引抜き荷重(維持力) F は

$$F = f \cdot \frac{\sin \theta + \mu \cos \theta}{\cos(\theta + \alpha) - \mu \sin(\theta + \alpha)} \quad (8)$$

で表わされる。ここで鉤腕が閉じようとする力 f は, 鉤尖を単位量たわませるのに要する荷重と鉤尖のたわみ量の積で与えられ, 次のように表わすることができる。

$$f = K \cdot \delta(\theta, \alpha) \quad (9)$$

ただし, K : 鉤尖を単位量たわませるのに要する荷重量

$\delta(\theta, \alpha)$: 鉤尖のたわみ量

今, 鉤腕がたわんでも, 鉤腕の接近角度 α が変化しないものとして, 近似的に鉤腕のたわみ量を表わすと次のようになる。

$$\delta(\theta, \alpha) = \rho(\cos \theta - \cos \theta_0) \sqrt{1 + \tan^2 \alpha}$$

$$\text{また } \delta(\theta, \alpha) = \{U_0 - \rho(1 - \cos \theta)\} \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} \quad (10)$$

ただし, ρ : 鉤歯の曲率半径

U_0 : 規定したアンダーカットの大きさ

鉤尖の任意の位置 θ における鉤の維持力 F は, 式(8), (9), (10)に $K, \mu, U_0, \rho, \alpha$ の数値を代入することによって求めることができる。本実験で用いた鉤は2本の鉤腕を有しているのので, その維持力を $2F$ と表わすことができる。

式(8), (9), (10)を用いて計算した維持力の値を実験で得た値と比較するために, 具体例として, 鉤歯の曲率半径を 10 mm, 鉤腕の太さを c , 鉤腕長を 12 mm, アンダーカットを 0.50 mm, 鉤腕の接近角度を $1/10$ とした場合について, 鉤尖の任意の位置における維持力の値を算出した。式(9)における K の値には, 実験 I において求めた曲線型試料の単位量のたわみに要する荷重量を適用した(表6)。 $K=242 \text{ g/mm}$, $U_0=0.50 \text{ mm}$, $\rho=10 \text{ mm}$, $\tan \alpha=1/10$ を, 式(8), (9), (10)に代入し, 摩擦係数 μ を種々変えて鉤の維持力 $2F$ を計算すると図29の実線で示すようになった。また, 図21に示すような維持力の測定記録(鉤Cに相当する)から得た実験値を破線で示す。縦軸は鉤尖の歯軸方向の位置 y , 横軸は維持力 $2F$ を示している。

このように, 計算値は摩擦係数 μ の値によつてかなり大きな変化を示す。金属原型の摩擦係数は不明であるが, 例えば $\mu=0.20$ とすると維持力の最大値が実験値とよく一致する。しかし, 最高豊隆部付近から上方では, 計算値の方が実験値より少し大きくなる傾向を示す。また, $\mu=0.18$ とした場合の計算値は, 維持力の最大値については実験値よりもわずかに小さくなるが, 鉤尖の移

図 29 鉤の維持力 F の実験値と計算値(摩擦係数 μ の影響)

動にともなう維持力の変化に関しては, 実験値とよく一致した傾向を示している。

維持力の実験において, 鉤腕はその先端部約 0.5 mm が歯面に垂直に接するようにわん曲してあるために, 計算式(9)の K の値の決定に用いた実験 I の曲げ試料の場合より少したわみにくい形態であると考えられる。このことを考慮に入れると, 式(9)における K の値がもう少し大きくなり, 維持力の計算値における最大値がもう少し大きくなって, $\mu=0.18$ とした場合, 実験値にさらに近づくと考えられる。また, 計算値について, 厳密には鉤腕が大きいたわんだ場合の鉤腕の接近角度の変化について修正する必要があると考えられる。実験値と計算値の間にわずかの誤差が生じたのは, これらの理由も考えられるが, 図29に示すごとく, $\mu=0.18$ とした場合, 鉤尖の移動にともなう維持力の変化について, 実験値と計算値がよく一致した傾向を示しており, 式(8)は I-bar type の鉤について, 鉤尖の任意の位置における維持力をよく表現していると考えられる。

また, 式(8)から

$$\frac{F}{f} = \frac{\sin \theta + \mu \cos \theta}{\cos(\theta + \alpha) - \mu \sin(\theta + \alpha)} \quad (11)$$

は, 鉤腕のたわみ力 f が維持力 F として働く割合を示している。今, 先の例の $\mu=0.18$, $\tan \alpha=1/10$ の場合について, 鉤尖の位置 θ の変化に伴う F/f の値を計算すると図30のようになる。アンダーカット部において, θ が大きくなるほど, すなわち鉤尖が最高豊隆部から遠ざかるほど F/f が大きくなり, 小さな鉤腕のたわみ力 f で大

図 30 鉤尖の位置 θ における鉤腕のたわみ力 f によって発揮される鉤の維持力 F の割合

きな維持力 F が発揮される。一方、 θ が 0 に近づくほど、すなわち鉤尖が最高豊隆部に近づくほど鉤腕のたわみ量は大きくなり、 f が大きくなる。このように、鉤尖が最高豊隆部に近づく、鉤腕のたわみ量が大きくなつて f が増加するが、 F/f が小さくなり、このような関係が総合されて、維持力の最大値は図 29 に示すように規定したアンダーカットの位置と最高豊隆部の中間付近で発揮されたものと考えられる。

金属原型における維持力の測定結果について

1. 鉤腕の太さおよび長さ

図 22 に示すように、鉤腕を太くすると維持力は大きな増加を示し、この増加の比率は、鉤腕の長さおよびアンダーカットの大きさを変えた条件においても、ほぼ一定であつた。

この鉤腕の太さを変えることによる鉤の維持力の変化は、他の因子、すなわち鉤腕の長さ、アンダーカットの大きさ、鉤腕の接近角度、鉤歯の形態、を変えることによる維持力の変化と比較しても、かなり大きかつた（表 8, 9, 10, 11, 図 22, 23, 24, 25）。このように、鉤腕の太さは維持力に対して最も大きな影響をおよぼす因子であると考えられる。

次に、鉤腕長と維持力の関係については、図 23 に示すように、鉤腕を短くすると維持力は増加し、鉤腕長 8 mm の鉤の維持力は、鉤腕長 14 mm の鉤の維持力の約 1.7 倍から 1.9 倍となつた。この鉤腕を短くすることによる維持力の増加の比率は、他の因子、すなわち鉤腕の太さ、アンダーカットの大きさ、鉤腕の接近角度、鉤

図 31 鉤腕の寸法の違いによる維持力および一定量のたわみに要する曲げ荷重の変化

(太さ: a, 長さ: 14 mm の鉤腕の場合を標準値 1 とする)

歯の曲率半径、を変えた条件においてもほぼ一定であつた（表 8, 9, 10, 11, 図 23, 24, 25）。

鉤腕の太さおよび長さを変えた場合の維持力の変化（表 8, 9）を実験 I における I-bar type の鋳造鉤の鉤腕を想定した曲線型試料の曲げ試験の結果（表 3, 6）と比較すると図 31 に示すようになる。すなわち、鉤腕および曲線型試料の太さを a, 長さを 14 mm とした場合、鉤の維持力および試料の一定量のたわみに要する荷重量を標準値 1 として、太さおよび長さを変えた場合の維持力および荷重量の変化を比較している。この図に示すように、鉤の維持力の変化の比率は、金属固定の曲線型試料の曲げ荷重の変化の比率とは少し差が見られたが、レジ固定の試料の曲げ荷重の変化の比率とはよく近似した傾向にあつた。この理由として、鉤の維持力の測定においては、鉤腕をレジで規定の長さ固定していること、また I-bar type の鉤は鉤歯に対して鉤尖のみで接しており、鉤腕がたわむ場合、鉤尖に荷重が加わり、実験 I の曲げ試験の場合と荷重条件が類似していることが考えられる。

これらのことから、試料の固定条件の影響も含めて考慮すると、鉤腕の太さおよび長さを変えた場合の維持力の変化は、鉤腕を想定した曲線型試料の曲げ荷重の変化とよく一致した傾向にある。したがって、I-bar type の場合、鉤の維持力の最大値は鉤腕の曲げ荷重と密接な関係にあり、この両者はほぼ比例関係にあるものと考えられる。このことは、前記の維持力の計算式(8), (9)からも

図 32 鉤の維持力 F の実験値と計算値 (アンダーカットの大きさ U_0 の影響)

図 33 鉤の維持力 F の実験値と計算値 (鉤腕の接近角度 α の影響)

裏づけられている。

2. アンダーカットの大きさ

曲率半径が 10 mm の金属原型において、鉤尖部のアンダーカットを 0.25 mm とした鉤の維持力は、アンダーカット 0.50 mm の鉤の維持力の約 40% の値を示し、この割合は、鉤腕の太さおよび長さを変えた条件においても、ほぼ一定であった。

今、維持力の計算式(8), (9), (10)を用い、実験条件を想定し、 $K=242 \text{ g/mm}$, $\mu=0.18$, $\rho=10 \text{ mm}$, $\tan \alpha=1/10$ として、アンダーカット 0.25 mm と 0.50 mm の鉤について計算した結果を、実験より得た値(図 23, 24 の鉤 C に相当する)と比較すると図 32 のようになる。

計算値において、アンダーカット 0.25 mm の鉤の維持力の最大値は、アンダーカットが 2 倍である 0.50 mm の鉤の場合の約 43% の値となり、実験値とほぼ一致した傾向を示した。また計算値において、鉤腕の太さおよび長さを変えた条件について考えると、式(9)における K の値が変わるのみであり、アンダーカットの大きさを変えることによる維持力の変化の割合は一定であり、この点についても実験結果とよく一致している。

以上のように、アンダーカットと維持力は比例関係を示さず、アンダーカットの大きさを 1/2 にすると維持力は 1/2 より小さい値を示したが、その理由として次のことが考えられる。図 32 に示すように、維持力の最大値はアンダーカット 0.25 mm の鉤の方が、アンダーカット 0.50 mm の鉤よりも最高豊隆部に近い位置、すなわち θ が小さい位置で発揮される。図 30 に示すように、 θ

が小さくなるほど F/f が小さくなり、鉤腕のたわみ力 f により発揮される維持力 F は小さくなる。このことから、アンダーカットの大きさを 1/2 にすると維持力は 1/2 よりさらに減少したものと考えられる。

3. 鉤腕の接近角度

歯軸に対する鉤腕の接近角度を大きくするにしたがつて、鉤の維持力は増加した(図 24)。

今、維持力の計算式(8), (9), (10)を用い、実験条件を想定し、 $K=242 \text{ g/mm}$, $U_0=0.50 \text{ mm}$, $\mu=0.18$, $\rho=10 \text{ mm}$ として、鉤腕の接近角度 $\tan \alpha$ を 1/10, 3/10, 5/10 と変えた場合の計算値と実験値を比較すると図 33 のようになる。このように、3 種の鉤腕の接近角度の鉤において、維持力の最大値は計算値の方が実験値よりもわずかに小さくなったが、鉤腕の接近角度の維持力に対する影響について、実験値と計算値はよく一致した傾向を示している。

鉤腕の接近角度を大きくすると維持力が増加した理由として、次のことが考えられる。鉤腕の接近角度、すなわち図 28 における α が大きくなると、歯面が鉤尖に作用する抗力 N_1 による鉤腕の曲げモーメントが小さくなり、さらに式(10)に示すように、鉤尖を x 方向に単位変位させたときの鉤腕のたわみ量 δ が大きくなり、これらが維持力 F を大きくする効果を示す。

このように、鉤尖部のアンダーカットの大きさを一定にしても、鉤腕の接近角度が変わることによつて、維持力にかなりの影響がおよぼされることがわかった。

Stone¹²⁾ は、円柱とスプリング用金属を利用し、鉤腕

図 34 鉤の維持力Fの実験値と計算値（鉤歯の曲率半径 ρ の影響）

図 35 鉤の維持力Fの実験値と計算値（鉤歯の曲率半径 $\rho = 5$ mm, 摩擦係数 $\mu = 0.15$ ）

の歯面に対する接近角度を大きくすると維持力が増加することを実験的にはじめて指摘したが、本実験においてもこれを支持する結果を得た。Stone¹²⁾は、この鉤腕の接近角度と維持力の関係を、いわゆる“つまずき作用”(tripping action)で説明しているが、式(8)に示すような、力のつりあい条件によって十分説明し得るものであると考えられる。

4. 鉤歯の形態

図 25 に示すように、鉤尖部のアンダーカットの大きさを一定にしても、金属原型の曲率半径を小さくするにしたがつて維持力は大きくなる傾向を示した。

今、維持力の試算式(8)、(9)、(10)を用い、実験条件を想定し、 $K=242$ g/mm, $U_0=0.50$ mm, $\mu=0.18$, $\tan \alpha=1/10$ として、鉤歯の曲率半径 ρ を 10 mm, 7.5 mm, 5 mm と変えた場合の計算値を、実験記録から得た値と比較すると、図 34 のようになる。この図に示すように、計算値においても鉤歯の曲率半径を小さくすると維持力の最大値は増加するが、その増加の割合は実験値の場合より少し大きくなっている。

ここで、曲率半径 $\rho=5$ mm の場合について、摩擦係数 $\mu=0.15$ と変えて同様に計算した結果を実験値と比較すると、図 35 のようになり、 $\mu=0.18$ とした場合より両者はさらによく一致した傾向を示した。したがって、3種の金属原型について、面の研摩仕上げの状態が異なっており、摩擦係数 μ にわずかの差があったという可能性も考慮すべきであろう。

このように、アンダーカットの大きさを等しくして

図 36 アンダーカットの大きさUと鉤尖の位置 θ （鉤歯の曲率半径 ρ の影響）

も、鉤歯の曲率半径を小さくするにしたがつて維持力が増加した理由として、次のことが考えられる。鉤尖が等しいアンダーカットの大きさの位置にあつても、図 36 に示すように、鉤歯の曲率半径が小さければ、曲率半径が大きい場合に比較して θ が大きい。図 30 に示すように、 θ が大きくなるほど、 F/f すなわち鉤腕のたわみ力 f により発揮される維持力 F は大きくなることから、鉤歯の曲率半径が小さくなると維持力が大きくなったものと考えられる。

福井⁶⁾、宝田⁷⁾、Avant³⁸⁾は、アンダーカットについて、その大きさだけでなく、歯面の傾斜角も維持力に影

響することを指摘しており、本実験からも、維持力に関して鉤歯のアンダーカット部の曲率半径について考慮をばらう必要があることがわかった。

天然歯面における維持力の測定結果について

前記のように、歯面と鋳造体との間の摩擦力も維持力として働いていると考えられるが、この摩擦力は歯面に対して垂直に作用する力とその面の摩擦係数との積によって表わされる。

Warr³⁹⁾ は、歯面の静止摩擦係数を測定し、唾液の存在下で金属とエナメル質の間の摩擦係数は約0.2であり、歯の種類や個体による差はほとんど認められなかったと報告している。

金属原型を用いた実験では、面の性状が天然歯と異なっていると考えられるので、この点を考慮して、金属原型とほぼ同じ曲率半径を有する天然歯の面を利用して維持力を測定した。その結果、鉤腕の長さおよびアンダーカットの大きさを変えることによる維持力の変化の比率について、金属原型および天然歯における鉤の間で比較すると、両者にほとんど差がみられず、維持力の値についても、天然歯面における方が金属原型におけるよりもわずかに大きくなる傾向を示したのみであった(図26)。したがって、天然歯面と金属原型面の摩擦係数に大差はないものと考えられる。このことから、金属原型から得られた結果は、天然歯における維持力を考えるうえで非常に参考になるものと考えられる。

以上、鉤歯を想定した模型を用い、I-bar type の鋳造鉤について、鉤腕の太さおよび長さ、アンダーカットの大きさ、鉤腕の接近角度、鉤歯の形態等の各因子が維持力にもたらす影響について、実験、検討した。これらの実験結果は、鉤に作用する力のつりあい条件から求めた維持力の計算式(8)、(9)、(10)による結果とよく一致した傾向を示しており、この計算式により、各因子が鉤の維持力にもたらす影響の様相について、よく説明することができた。このことから、本実験結果が、I-bar type の鋳造鉤の維持力に関する基礎的な資料として妥当性を持つものであると考えられる。

また、以上の実験結果から I-bar type の鋳造鉤を設計するうえに、次のようなことが考えられる。まず、通法にしたがつてサーベイングを行う場合、アンダーカットの大きさのみを測定するだけでなく、そのアンダーカット部の曲率半径も考慮し、さらに鉤の使用部位の歯肉の豊隆形態によって影響される鉤腕の接近角度についても、維持力に相当な影響をおよぼすものであることに留意する必要がある。

鉤腕の寸法に関しては、その太さは維持力に対して大きく影響をおよぼすものであるので、Osborne ら¹⁶⁾も指摘しているように、例えば規定されたパターンを利用するなど、断面の寸法を正確に調整する工夫を講じるべきであろう。また、鉤腕の長さについては、短くすると維持力は大きくなるが、鉤腕の太さおよびアンダーカットの大きさとともに総合的に考慮し、永久変形を生じさせないように設計する必要があると考えられる。

結 論

著者は、Gingivally approaching clasp の I-bar type の鋳造鉤について、鉤腕の太さおよび長さ、鉤尖部のアンダーカットの大きさ、鉤腕の接近角度、鉤歯の形態などの因子が維持力におよぼす影響について、検討を行った。

結果を要約すると次のとおりである。

1) 鉤腕を太くすると維持力は大きな増加を示し、鉤腕の太さは維持力に対して最も大きな影響をおよぼす因子であった。鉤腕を太くすることによる維持力の増加の比率は、鉤腕の長さおよびアンダーカットの大きさを変えた条件においても、ほぼ一定であった。

2) 鉤腕を短くするにしたがつて維持力は増加した。この維持力の増加の比率は、他の因子、すなわち鉤腕の太さ、アンダーカットの大きさ、鉤腕の接近角度、鉤歯の曲率半径、を変えた条件においても、ほぼ一定であった。

3) アンダーカットの大きさと鉤の維持力は比例関係を示さず、アンダーカットの大きさを半分にすると、鉤の維持力は半分よりさらに減少した。

4) 鉤腕の歯軸に対する接近角度を大きくするにしたがつて、鉤の維持力は増加した。

5) 鉤歯の曲率半径を小さくするにしたがつて、鉤の維持力は増加する傾向を示した。

6) 金属原型における実験結果を考慮し、天然歯面において鉤の維持力を測定した結果、その値は金属原型における値と近似していた。

これらの実験結果は、鉤に作用する力のつりあい条件から求めた維持力の計算式による結果とよく一致した傾向を示した。このことは、I-bar type の鋳造鉤において、鉤腕の太さおよび長さ、アンダーカットの大きさ、鉤腕の接近角度、鉤歯の形態などの各因子の、維持力に影響をもたらす様相に関する本実験結果が、基礎的な資料として妥当性を持つことを示唆するものと考えられる。

本研究の要旨は、昭和49年11月第21回大阪大学歯学会総会において発表した。

稿を終えるに臨み、終始ご懇篤なるご指導とご鞭撻を賜った大阪大学歯学部歯科補綴学第二講座河合庄治郎教授、奥野善彦助教授に深厚なる謝意を表しますとともに、懇切なるご教示ならびにご校閲を頂いた大阪大学歯学部歯科理工学講座山賀禮一教授に深く感謝します。また本研究に際し、有益なるご助言とご教示を賜った大阪大学歯学部歯科理工学講座堤定美先生に感謝するとともに、ご便宜とご協力を頂いた大阪大学歯学部歯科補綴学第二講座の諸兄に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 中沢 勇：部分床義歯学，東京，昭44，永末，37～56。
- 2) 小室史郎，田守悦男，河合庄次郎：クラスプの問題点，歯界展望，20：1284～1295，昭37(1962)。
- 3) 三浦維四：クラスプの力学的理論，口病誌，23：179～180，昭31(1956)。
- 4) Warr, J.A.: An analysis of clasp design in partial dentures. Phys. in Med. Biol., 3: 212～232, 1959.
- 5) Warr, J.A.: Numerical system of clasp design. J. Pros. Dent., 11: 1105～1111, 1961.
- 6) 福井彰一：クラスプの力学的解析，歯材研報，2：161～173，昭35(1960)。
- 7) 宝田 勇：クラスプの維持力に関する研究，歯科学報，64：148～172，昭39(1964)。
- 8) 杉山伸顕：鑄造鉤の維持力に関する研究，歯学，52：97～114，昭39(1964)。
- 9) Firtell, D.N.: Effect of clasp design upon retention of removable partial dentures. J. Pros. Dent., 20: 43～52, 1968.
- 10) 河上正人：クラスプの維持について，口病誌，36：165～182，昭44(1969)。
- 11) 松田浩一：クラスプ用金属材料の機械的性質に関する研究(第2報)鑄造クラスプの維持と弾性的性質について，口病誌，42：22～41，昭50(1975)。
- 12) Stone, E.R.: Tripping action of bar clasps. J. Amer. Dent. Ass., 23: 596～617, 1936.
- 13) 河野修巳：局部床義歯の維持装置に関する実験的研究，維持歯ならびに床支持組織に与える影響，歯学，59：578～629，昭47(1972)。
- 14) 内藤 昭：局部床義歯の維持装置に関する実験的研究，歯根応用スタッドアタッチメントによる維持歯の負担性について，歯学，62：106～129，昭49(1974)。
- 15) 長岡英一：自家製スタッドアタッチメントに関する研究(第1報)維持力について，阪大歯誌，20：45～52，昭50(1975)。
- 16) Osborne, J. and Lammie, G.A.: Partial Dentures. ed. 4th, Oxford and Edinburgh, 1974, Blackwell Scientific Publications Ltd., 168～172, 194～195, 218～219.
- 17) 金竹哲也，野口八九重：補綴における金属の性質とその使い方，1クラスプ用，補綴臨床，1：90～97，昭43(1968)。
- 18) 池田弘一，中沢 勇，松田浩一，浜中人士：クラスプ用金属材料の機械的性質に関する研究(第1報)鑄造クラスプ用市販合金の弾性的性質について，口病誌，41：233～246，昭49(1974)。
- 19) Amer. Dent. Ass.; Specification No. 5 for Dental Casting Gold Alloy.: Guide to dental materials. ed. 5th, Chicago, 1971, Amer. Dent. Ass., 136～139.
- 20) 野首孝嗣：鑄造鉤の製作過程における寸法変化とその適合性について，補綴誌，18：363～381，昭50(1975)。
- 21) Ney, J.M.: Planned Partial. The J.M. Ney Co., Conn., 1959, 26～28, 84～88.
- 22) Krol, A.J.: RPI (Rest, Proximal Plate, I-bar) clasp retainer and its modifications., Dental Clinics of North America, 17: 631～649, 1973.
- 23) 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)，理工誌，3：51～55，昭37(1962)。
- 24) 村松篤良，安達和子：Cast Clasp の光弾性的応力解析Ⅱ，理工誌，5：152～158，昭39(1964)。
- 25) 奥野善彦：鑄造鉤の形態に関する力学的研究，阪大歯誌13：341～352，昭43(1968)。
- 26) 宮入裕夫，村松篤良：クラスプの変形と強度(第1報)鉤尖に水平荷重をうける立体状クラスプ，理工誌，9：15～23，昭43(1968)。
- 27) 宮入裕夫，村松篤良：クラスプの変形と強度(第2報)鉤尖に垂直荷重をうける立体状クラスプ，理工誌，9：153～161，昭43(1968)。
- 28) 宮入裕夫，村松篤良：クラスプの変形と強度(第3報)クラスプの自由形に関する一考察，理工誌，9：162～166，昭43(1968)。
- 29) 宮入裕夫，村松篤良：クラスプの変形と強度(第4報)水平荷重をうける鉤尖間距離をもたない変断面クラスプ，理工誌，10：1～6，昭44(1969)。
- 30) 宮入裕夫，村松篤良：クラスプの変形と強度(第5報)水平荷重をうける変断面クラスプの鉤尖間距離の影響，理工誌，10：7～13，昭44(1969)。
- 31) 宮入裕夫，村松篤良：クラスプの変形と強度(第6報)水平荷重をうける線クラスプとキャストクラスプに及ぼ

- す鉤尖間距離の影響,理工誌, 10: 14~19, 昭44 (1969).
- 32) 宮入裕夫, 村松篤良: クラスプの変形と強度 (第7報) キャストクラスプの自由形, 理工誌, 10: 127~132, 昭44 (1969).
- 33) Kratochvil, F.J.: Influence of occlusal rest position and clasp design on movement of abutment teeth. J. Pros. Dent., 13: 114~124, 1963.
- 34) 関根 弘: アイ・バー・アタッチメントによる遊離端義歯, 補綴臨床, 4: 187~194, 昭46 (1971).
- 35) McCracken, W.L.: Partial denture construction. ed. 3rd. St. Louis, 1969, Mosby, 132.
- 36) 山賀 保, 堤 定美, 野首孝祠, 奥野善彦: クラスプの力学的研究 (第二報) 鉤腕の外形・寸法について, 補綴誌 19: 618~626, 昭51 (1976).
- 37) 杉山隆二: 基礎力学演習, 東京, 昭48, 培風館, 229.
- 38) Avant, W.E.: Factors that influence retention of removable partial dentures. J. Pros. Dent., 25: 265~270, 1971.
- 39) Warr, J.A.: Friction and partial denture retention. J. Dent. Res., 38: 1066~1074, 1959.