

# 有限要素法を用いた I-bar クラスプの力学的解析

朝 原 早 苗

## Finite Element Analysis of the Effect of Dimensions of I-bar clasp on Flexibility and Stress

Sanae Asahara

(平成 5 年 3 月 31 日 受付)

### 緒 言

I-bar クラスプは、部分床義歯補綴における優れた維持装置の一つである<sup>1-4)</sup>。義歯着脱時に、クラスプに生じる応力および離脱に対する抵抗力として発現する維持力は、I-bar クラスプの最適な形態を耐久性の点から検討するための主要な力学的因子である。したがって、I-bar クラスプが長期間にわたって適正な機能を維持するためには、応力と維持力を解析し、最適な形態を解明することが補綴臨床上、極めて重要である<sup>5)</sup>。

従来より、I-bar クラスプの形態と維持力について検討した研究は極めて少ない。西山<sup>6)</sup>は、I-bar クラスプについて、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、鉤腕の近接角度、鉤歯の形態等の因子が維持力に及ぼす影響について検討を行い、これらの因子の中で、鉤腕の太さが I-bar クラスプの維持力に最も大きい影響を及ぼすと報告した。しかし、断面形態やテーパ等を含めた I-bar クラスプの形態と維持力との定量的な関係は明確にされていない。しかも、I-bar クラスプの形態と応力との関係については全く不明であり、力学的根拠に基づいた I-bar クラスプに付与すべき適正な形態や寸法に関しては、明らかにされていない。そこで、本研究では三次元有限要素法を用いて、I-bar クラスプの形態と、維持力を検討するための重要なパラメータとして用いられている剛性<sup>5,7-12)</sup> および応力との定量的関係を明らかにするとともに、I-bar クラスプの最適な形態に関する基礎

的指標を得るために、剛性が一定の条件下で、応力が最小となる形態について検討を加えた。

### 材料ならびに方法

〔解析 1〕 I-bar クラスプの形態と剛性および応力との関係

#### I. 有限要素解析モデル

I-bar クラスプの鉤腕を曲げはりに近似させ、有限要素解析を行った。解析に用いた I-bar クラスプの概形を図 1 に示した。横走アームと垂直部分（以下、縦走アームとする）は直角をなすとともに、各々の中心線が 1/4 円弧をなす湾曲部で連絡している。I-bar クラスプの裏面は、凹凸やねじれなどのない平面形態とした。単位長さあたりの幅の変化量（テーパ）は、同一のクラスプにおいては一定とした。クラスプの断面

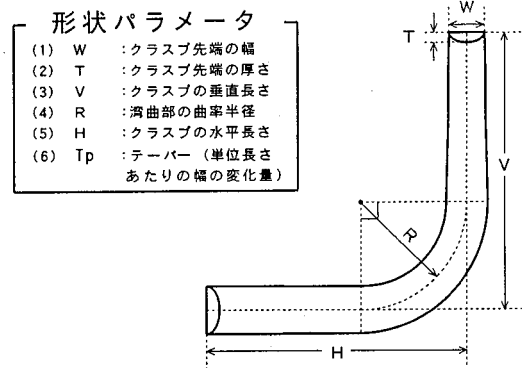


図 1 I-bar クラスプの概形および形状パラメータ。

横走アームと縦走アームは直角をなすとともに、各中心線が 1/4 円弧をなす湾曲部で連絡している。I-bar クラスプの形状に関し、6 種類のパラメータ (W, T, V, R, H, Tp) を設定した。

広島大学歯学部歯科補綴学第一講座 (主任: 津留宏道教授) 本論文の要旨は平成 4 年 2 月第 69 回広島大学歯学会例会, 平成 4 年 6 月第 87 回日本補綴学会学術大会において発表した。

形態は、基部から先端まで相似形で、半円形ないし半楕円形とした。

I-bar クラスプの形状に関して、以下の6種類のパラメータを設定した(以下、形状パラメータとする)。すなわち、クラスプ先端の幅を W, クラスプ先端の厚さを T, 先端から横走アームの中心線までの距離を垂直長さ V, 湾曲部の曲率半径を R, クラスプ基部から縦走アームの中心線までの距離を水平長さ H, 単位長さあたりの幅の変化量(テーパー)を Tp とした。

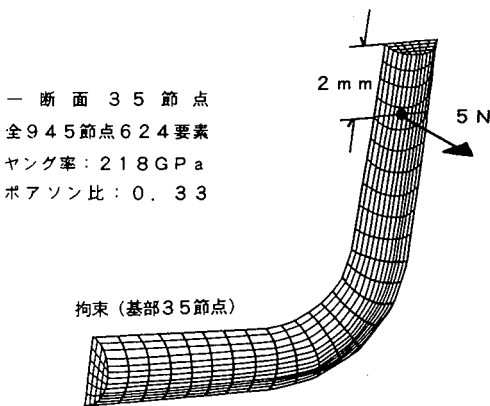


図2 解析モデルの一例。

一断面が35節点、I-bar クラスプ全体で945節点、624個の六面体要素により構成される三次元有限要素解析モデルを基本とした。材料定数は Co-Cr 合金を想定し、ヤング率 218 GPa, ポアソン比 0.33 とした。

図2に示したように、一断面が35節点、I-bar クラスプ全体で945節点、624個の六面体要素(以下、624要素と略す)により構成される三次元有限要素解析モデルを基本とした。表1に示した各形状パラメータの値を自作の解析モデル自動作成プログラムに入力し、13通りの解析モデルを作成した。すなわち、6種類の形状パラメータのすべてを基準値とした解析モデルが1通り、6種類のうち5種類の形状パラメータを基準

表1 解析1における各形状パラメータの設定値

		小	基準値	大	
W	(幅)	1	$\sqrt{2}$	2	(mm)
T	(厚さ)	0.5	$0.5\sqrt{2}$	1	(mm)
V	(垂直長さ)	7	9	12	(mm)
R	(曲率半径)	$3/\sqrt{2}$	3	$3\sqrt{2}$	(mm)
H	(水平長さ)	$8/\sqrt{2}$	8	$8\sqrt{2}$	(mm)
Tp	(テーパー)	0	0.033	0.066	

値とし、残りの1種類のみ基準値以外の2通りとした解析モデル(2通り×6)が12通りで、計13通りである。

## II. 三次元有限要素解析

I-bar クラスプの材料定数は、Co-Cr合金 (Vitallium, Austenal Products Laboratories, USA) を想定し、ヤング率 218 GPa<sup>13)</sup>, ポアソン比 0.33<sup>14)</sup> とした。I-bar クラスプの裏面において、鉤尖から 2mm 基部寄りで、かつ近遠心の中央部一点に対し、垂直方向でクラスプの表側へ向かう 5N の荷重を負荷した。また、クラスプ基部の35節点は完全に拘束した。以上の解析条件および解析モデルの各節点の位置を有限要素解析プログラム (COSMOS/M, 横河技術情報社) に入力し、三次元有限要素解析を行い、荷重点の変位および最大応力を示す部位と最大応力値 (MaxS) とを求めた。さらに、荷重 (5N) を荷重点の変位で除し、I-bar クラスプの剛性 (Fd)<sup>5,12)</sup> を算出した。なお、計算にはパーソナルコンピュータ (PC-9801 ES, 日本電気社) を用いた。

## III. 剛性 (Fd) および最大応力値 (MaxS) を示す近似式の導出

I-bar クラスプの Fd および MaxS に対する各形状パラメータごとの近似式を求めた。Fd および MaxS に対するテーパー (Tp) の影響は、指数関数で近似し、最小自乗法にて指数関数の底の値を決定した。Fd および MaxS に対する他の5種類の形状パラメータの影響は、形状パラメータの x 乗に比例する関数で近似し、乗数の値 x は、それぞれの形状パラメータについて最小自乗法を用いて決定した。さらに、有限要素解析の結果と近似式の結果との誤差が最小となるような比例定数を求め、6種類の形状パラメータから Fd を求める近似式(近似式①、「結果」の「解析1」IIIにおいて示す)、および6種類の形状パラメータから MaxS を求める近似式(近似式②、「結果」の「解析1」IIIにおいて示す)を導出した。

### 【解析2】最小応力を示す I-bar クラスプの形態

解析2においては、I-bar クラスプの断面形態を表す形状パラメータとして、クラスプ先端の厚さ (T) とクラスプ先端の幅 (W) との比である T/W ratio を用いた。以下の解析では、W, T/W ratio, 垂直長さ (V), 湾曲部の曲率半径 (R), 水平長さ (H), テーパー (Tp) の6種類のパラメータを用いた。

解析1で得た剛性 (Fd) の近似式(近似式①)を変形して、T/W ratio, V, R, H, Tp の5種類の形状パ

ラメータと  $F_d$  より  $W$  を算出する近似式 (近似式③, 「結果」の〔解析2〕において示す) とを求めた。また, 荷重点を 1 mm 変位させたときの最大応力値を  $S_d$  と定義し, 一定の  $F_d$  を有する各形態の応力を  $S_d$  により比較した。その手順は図3のフローチャートに示した。

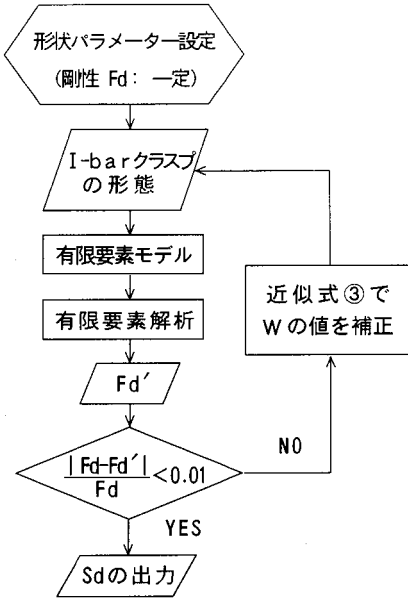


図3 一定の剛性 ( $F_d$ ) を有する I-bar クラスプの形態と応力 ( $S_d$ ) とを求めるためのフローチャート。

$F_d$  および  $T/W$  ratio,  $V$ ,  $R$ ,  $H$ ,  $T_p$  を設定することにより, 近似式③から  $W$  を求めることができる。そのち有限要素解析を行い, 設定した I-bar クラスプの形態における剛性 ( $F_d'$ ) を求めた。ここで,  $F_d$  が直接求められない理由は, 設定した最初の形態が近似式による誤差を含んでいるためである。

$F_d$  と  $F_d'$  との誤差を小さくするために,  $W$  の値を近似式③により補正して,  $F_d$  と  $F_d'$  との誤差の絶対値が 1%未満となるまで解析を繰り返した。これにより I-bar クラスプの形態を決定したのち, そのときの  $S_d$  の値を求めた。

#### I. 断面形態 (T/W ratio) およびテーパ (Tp) の影響

$T/W$  ratio および  $T_p$  が, 一定の剛性 ( $F_d$ ) を有する I-bar クラスプの応力 ( $S_d$ ) および先端の幅 ( $W$ ) に及ぼす影響について, 表2に示した解析条件にて検討した。

表2 I-bar クラスプの断面形態 (T/W ratio) およびテーパ ( $T_p$ ) が, 一定の剛性 ( $F_d$ ) を有する I-bar クラスプの応力 ( $S_d$ ) および先端の幅 ( $W$ ) に及ぼす影響を検討するための解析条件

$F_d$	: 15	30	60 (N/mm)		
$T/W$ ratio	: 0.30	0.50	0.70	1.00	
	(Fd=30 では 0.10 0.15 0.20 を追加)				
$V$	: 9 (mm)				
$R$	: 3 (mm)				
$H$	: 8 (mm)				
$T_p$	: 0.000	0.007	0.010	0.013	0.017
	0.020	0.023	0.027	0.033	0.047
	(Fd=30 では 0.067 を追加)				

#### II. 湾曲部の曲率半径 (R) の影響

$R$  が一定の  $F_d$  を有する I-bar クラスプの  $S_d$  および  $W$  に及ぼす影響について, 表3に示した解析条件にて検討した。

表3 I-bar クラスプの湾曲部の曲率半径 ( $R$ ) が, 一定の剛性 ( $F_d$ ) を有する I-bar クラスプの応力 ( $S_d$ ) および先端の幅 ( $W$ ) に及ぼす影響を検討するための解析条件

$F_d$	: 30 (N/mm)					
$T/W$ ratio	: 0.30	0.50				
$V$	: 9 (mm)					
$R$	: 2.00	2.50	2.75	3.00	3.50	4.00
	4.50 (mm)					
$H$	: 8 (mm)					
$T_p$	: 0.020					

#### III. 垂直長さ (V) および水平長さ (H) の影響

$V$  が一定の  $F_d$  を有する I-bar クラスプの  $S_d$  および  $W$  に及ぼす影響について, 表4に示した解析条件にて検討した。 $H$  が一定の  $F_d$  を有する I-bar クラスプの  $S_d$  および  $W$  に及ぼす影響について, 表5に示

表4 I-bar クラスプの垂直長さ ( $V$ ) が, 一定の剛性 ( $F_d$ ) を有する I-bar クラスプの応力 ( $S_d$ ) および先端の幅 ( $W$ ) に及ぼす影響を検討するための解析条件

$F_d$	: 30 (N/mm)		
$T/W$ ratio	: 0.30	0.50	
$V$	: 7	9	12 (mm)
$R$	: 3 (mm)		
$H$	: 8 (mm)		
$T_p$	: 0.020		

表5 I-bar クラスプの水平長さ (H) が、一定の剛性 (Fd) を有する I-bar クラスプの応力 (Sd) および先端の幅 (W) に及ぼす影響を検討するための解析条件

Fd	: 30 (N/mm)
T/W ratio	: 0.30 0.50
V	: 9 (mm)
R	: 3 (mm)
H	: $8/\sqrt{2}$ 8 $8\sqrt{2}$ (mm)
Tp	: 0.020

した解析条件にて検討した。

## 結 果

### 〔解析1〕 I-bar クラスプの形態と剛性および応力との関係

#### I. 応力分布に対する影響

各形状パラメータを変化させた場合の応力分布の変化を図4～図9に示した。

クラスプ先端の幅 (W) およびクラスプ先端の厚さ (T) が変化しても応力分布は変化せず、横走アーム外表面のやや先端寄りに応力集中が認められた (図4, 図5)。垂直長さ (V) およびテーパー (Tp) が増加すると、応力集中部位は横走アームにおいてクラスプの先端寄りに移動した (図6, 図9)。湾曲部の曲率半径 (R) が増加すると、応力集中部位は横走アームにおいてクラスプの基部寄りに移動した (図7)。水平長さ (H) が変化しても、クラスプ先端を基準とした応力集中部位はほとんど変化しなかった (図8)。

#### II. 形態と剛性 (Fd) および最大応力値 (MaxS) との関係

クラスプ先端の幅 (W), クラスプ先端の厚さ (T), 垂直長さ (V), 湾曲部の曲率半径 (R), 水平長さ (H) が変化した場合の Fd の変化を図10に, MaxS の変化を図11に示した。また, テーパー (Tp) が変化した場合の Fd の変化を図12に, MaxS の変化を図13に示した。

Fd は W, T, R, Tp が増加すると増加し, V および H が増加すると減少した。MaxS は V が増加すると増加し, W, T, R, H, Tp が増加すると減少した。T および Tp が Fd および MaxS に対し特に影響が大きかった。また, R は Fd および MaxS のいずれに対しても影響は小さかった。

### III. 剛性 (Fd) および最大応力値 (MaxS) を求める近似式

6種類の形状パラメータから Fd を求める近似式は以下の通りとなった。

$$Fd = 5964 \cdot W^{0.54} \cdot T^{2.50} \cdot V^{-1.61} \cdot R^{0.11} \cdot H^{-0.99} \cdot (9.38 \cdot 10^9)^{Tp} \quad (1)$$

また, 6種類の形状パラメータから MaxS を求める近似式は以下の通りとなった。

$$MaxS = 85.7 \cdot W^{-0.47} \cdot T^{-1.83} \cdot V^{0.62} \cdot R^{-0.09} \cdot H^{-0.02} \cdot (1.70 \cdot 10^{-9})^{Tp} \quad (2)$$

これらの近似式による I-bar クラスプの Fd および MaxS は, それぞれ最大誤差10%以内で有限要素法による計算結果と一致した。

### 〔解析2〕 最小応力を示す I-bar クラスプの形態

解析1で得た剛性 (Fd) を求める近似式 (近似式①) において, クラスプ先端の厚さ (T) の代わりに断面形態を表す形状パラメータとして T/W ratio を用い, クラスプ先端の幅 (W) について解くと, 以下の通りとなった。

$$W = 0.05729 \cdot Fd^{0.33} \cdot (T/W \text{ ratio})^{-0.82} \cdot V^{0.53} \cdot R^{-0.04} \cdot H^{0.33} \cdot (5.12 \cdot 10^{-4})^{Tp} \quad (3)$$

この式を用いて, 一定の Fd を有する I-bar クラスプの形態を近似的に求め, 以下の結果を得た。

#### I. 断面形態 (T/W ratio) およびテーパー (Tp) の影響

図14に示したように, Fd が 30 N/mm の場合, T/W ratio が減少するほどすなわちクラスプ断面の幅が広く, 厚さが薄いほど, 応力 (Sd) は減少した。その場合, 図15に示したようにクラスプ先端の幅 (W) の値は大きく増加した。一方, T/W ratio が 0.1 のとき, Tp が増加すると Sd は次第に減少したが, T/W ratio が 0.15 以上では, Tp が増加すると Sd は減少したのち極小値をとり, 再び増加した。すなわち, T/W ratio が 0.15 から 0.9 までの間では, 最小応力を示すような最適テーパーが存在し, 最適テーパーは, 0.01 から 0.023 の範囲となった (図14)。図16に示したように, Fd が 15 N/mm, 60 N/mm の場合も同様に, T/W ratio が減少するほど, すなわち, クラスプ断面の幅が広く厚さが薄いほど Sd は減少した。T/W ratio が 0.3 から 0.9 までの範囲において, 最適テーパーは, Fd が 15 N/mm の場合, 0.013 から 0.02, Fd が 30 N/mm の場合, 0.013 から 0.023, Fd

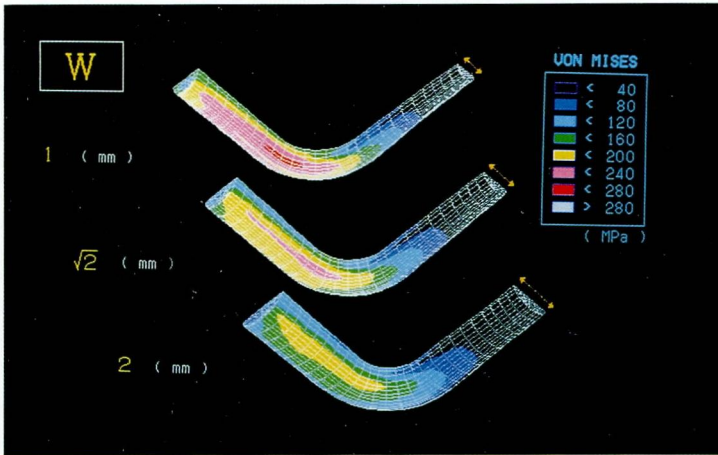


図4 クラspb先端の幅 (W) による応力分布の変化。  
横走アーム外表面のやや先端寄りに応力集中が認められた。

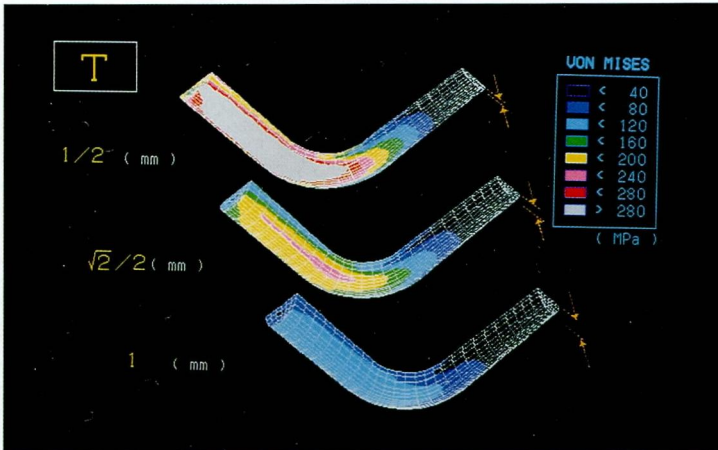


図5 クラspb先端の厚さ (T) による応力分布の変化。  
横走アーム外表面のやや先端寄りに応力集中が認められた。

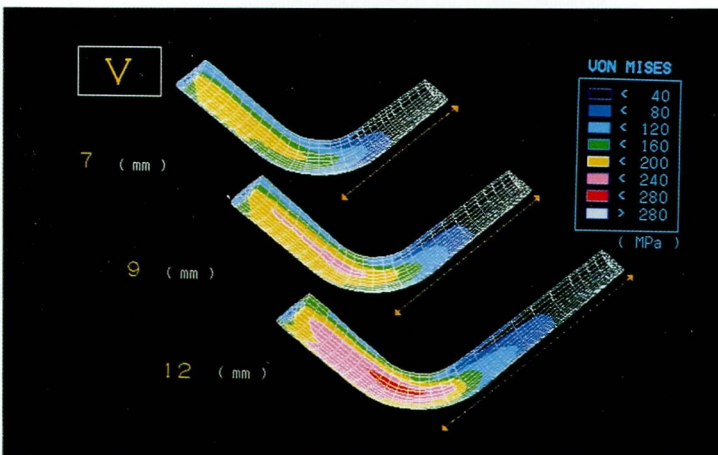


図6 垂直長さ (V) による応力分布の変化。  
 $V$  が増加すると応力集中部位は横走アームにおいてクラspbの先端寄りに移動した。

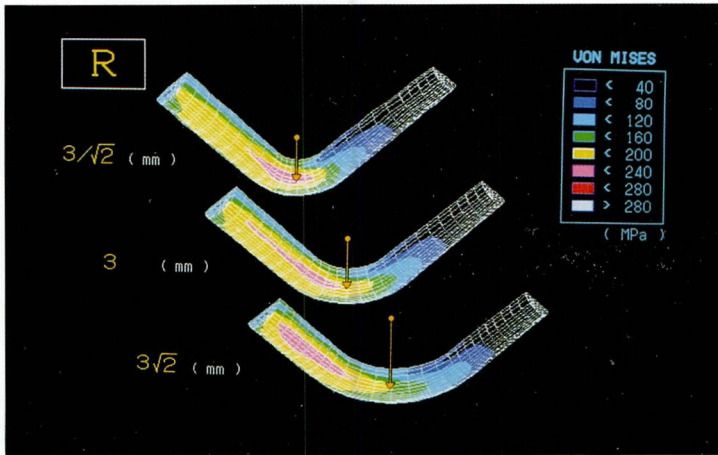


図7 湾曲部の曲率半径 (R) による応力分布の変化。  
Rが増加すると応力集中部位は横走アームにおいてクラップの基部寄りに移動した。

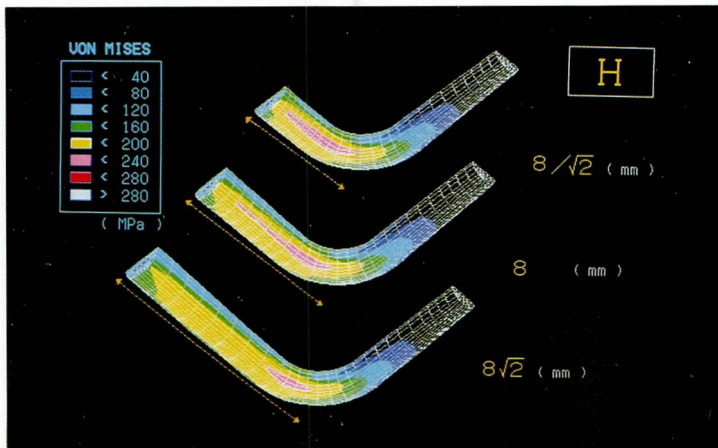


図8 水平長さ (H) による応力分布の変化。  
Hが変化してもクラップ先端を基準とした応力集中部位はほとんど変化しなかった。

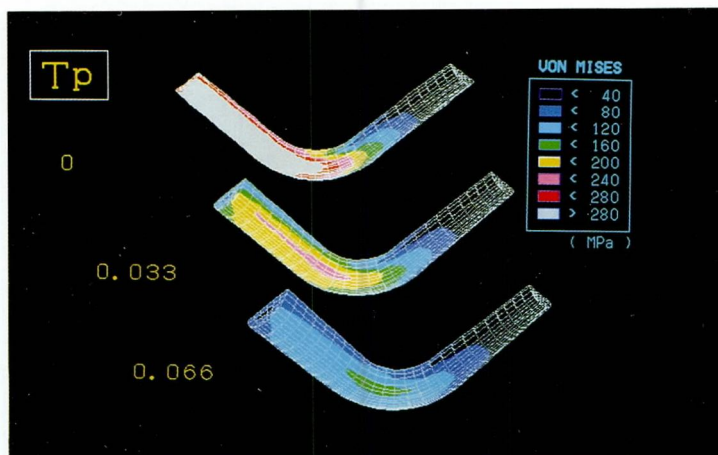


図9 テーパー (Tp) による応力分布の変化。  
Tpが増加すると応力集中部位は横走アームにおいてクラップの先端寄りに移動した。

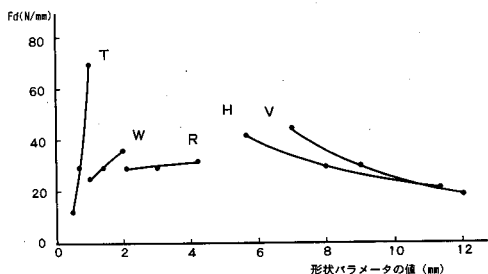


図10 クラasp先端の幅 (W), クラasp先端の厚さ (T), 垂直長さ (V), 湾曲部の曲率半径 (R), 水平長さ (H) が変化した場合の剛性 (Fd) の変化。

Fd は, W, T, R が増加すると増加し, V および H が増加すると減少した。

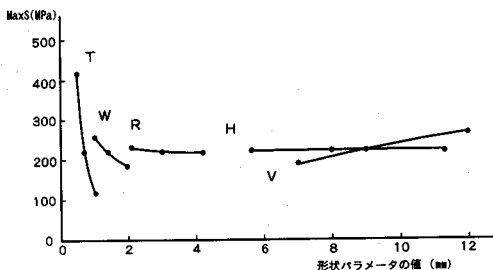


図11 クラasp先端の幅 (W), クラasp先端の厚さ (T), 垂直長さ (V), 湾曲部の曲率半径 (R), 水平長さ (H) が変化した場合の最大応力値 (MaxS) の変化。

MaxS は, V が増加すると増加し, W, T, R, H が増加すると減少した。

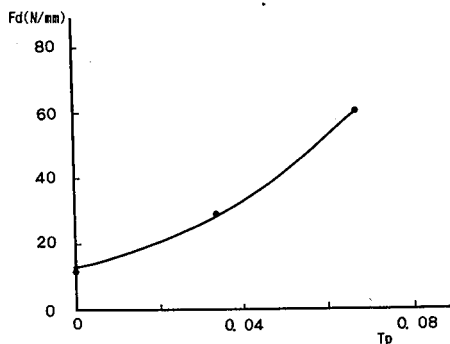


図12 テーパー (Tp) が変化した場合の剛性 (Fd) の変化。

Fd は Tp が増加すると増加した。

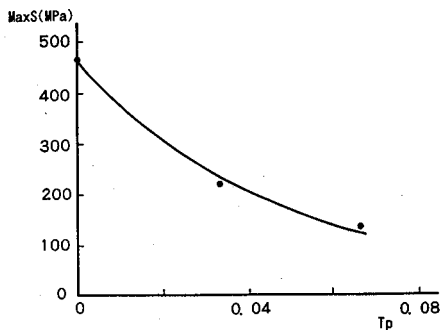


図13 テーパー (Tp) が変化した場合の最大応力値 (MaxS) の変化。

MaxS は Tp が増加すると減少した。

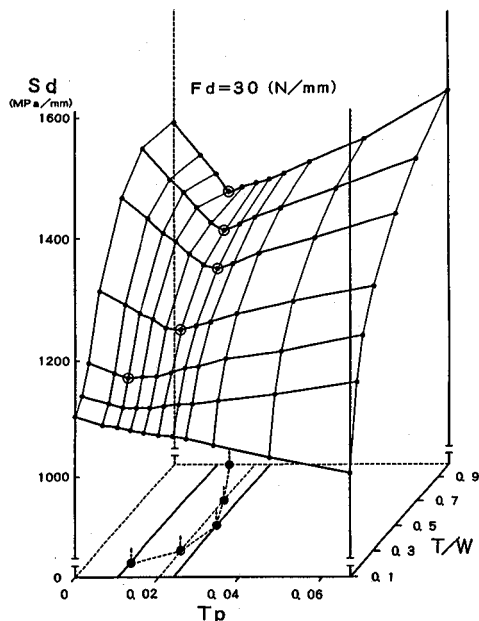


図14 剛性 (Fd) が 30 N/mm の場合の応力 (Sd) の変化。

最適テーパーを二重のドットで示し, グラフ底面にその投影図を示した。最適テーパーは 0.01 から 0.023 の範囲となった。T/W ratio が減少するほど Sd は減少した。

が 60 N/mm の場合, 0.017 から 0.023 であった。Fd が増加すると, 最適テーパーはやや増加する傾向を示したが, Fd が 15 N/mm から 60 N/mm の範囲において, 最適テーパーは 0.013 から 0.023 と, ほぼ一定の値を示した。

## II. 湾曲部の曲率半径 (R) の影響

図17に示したように, R の増加とともに応力 (Sd)

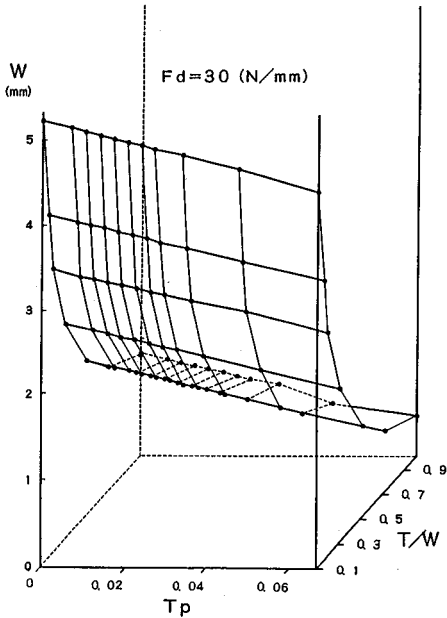


図15 剛性 (Fd) が 30 N/mm の場合のクラスプ先端の幅 (W) の変化。  
T/W ratio が減少すると W は大きく増加した。

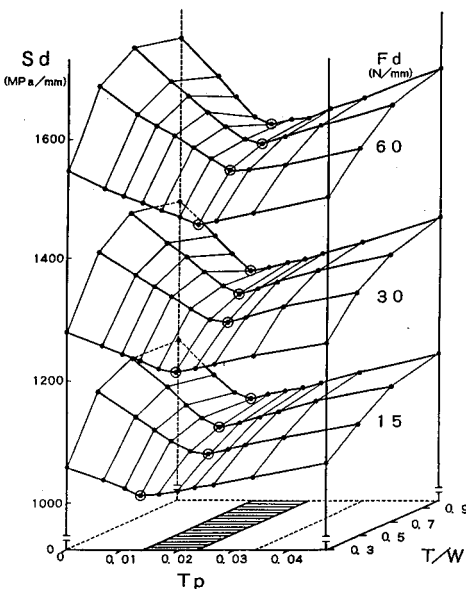


図16 剛性 (Fd) が 15, 30, 60 N/mm の場合の応力 (Sd) の変化。  
最適テーパーを二重のドットで示し、グラフ底面にその範囲を斜線で示した。最適テーパーは 15 N/mm から 60 N/mm の範囲において 0.013 から 0.023 の間に存在した。

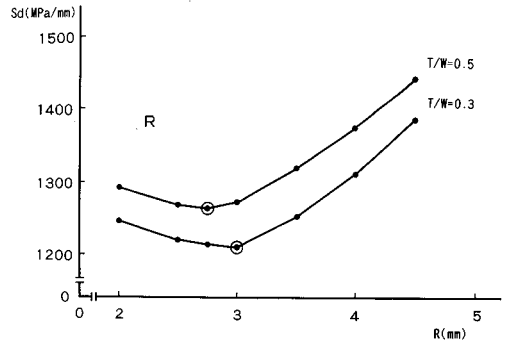


図17 湾曲部の曲率半径 (R) が応力 (Sd) に及ぼす影響。  
最適な R を二重のドットで示した。最適な R は約 3 mm となった。

は減少し、R が 3 mm 付近で極小値をとったのち 3 mm 以上では増加した。すなわち、Sd が最小となるような最適な R が存在し、その値は、断面形態 T/W ratio が 0.3 のとき 3 mm であり、T/W ratio が 0.5 のとき 2.75 mm であった。

一方、図18に示したように、R がクラスプ先端の幅 (W) に及ぼす影響は、ほとんど認められないことが判明した。

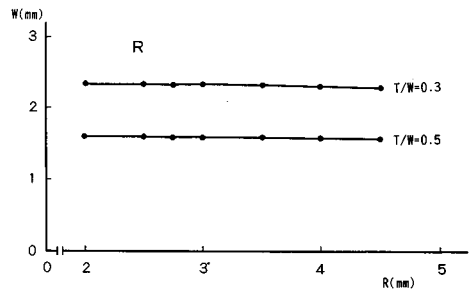


図18 湾曲部の曲率半径 (R) がクラスプ先端の幅 (W) に及ぼす影響。  
R が W に及ぼす影響はほとんど認められなかった。

Ⅲ. 垂直長さ (V) および水平長さ (H) の影響

図19に V および H が I-bar クラスプの応力 (Sd) に及ぼす影響を示した。V および H が増加すると Sd は減少し、V よりも H の方が Sd への影響は大きい傾向を示した。

図20に V および H がクラスプ先端の幅 (W) に及ぼす影響を示した。V および H が増加すると W は増加し、H よりも V の方が W への影響は大きい傾向を示した。



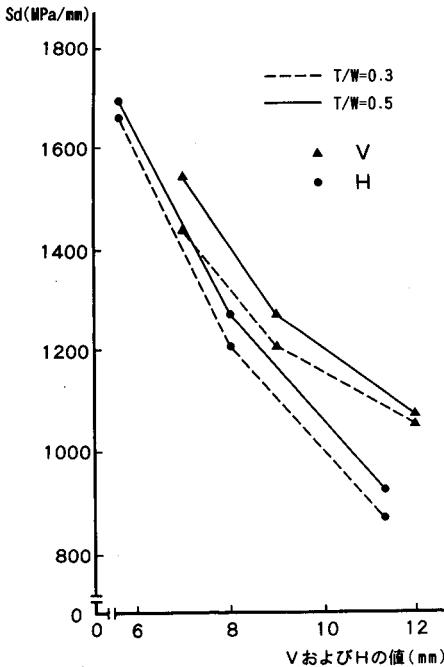


図19 垂直長さ (V) および水平長さ (H) が応力 (Sd) に及ぼす影響。

V および H が増加すると Sd は減少し、V よりも H の方が Sd への影響は大きい傾向を示した。

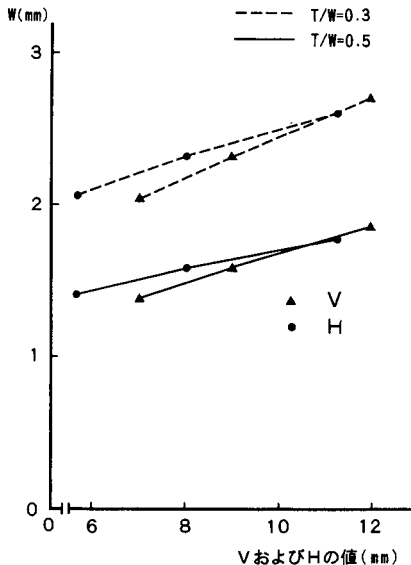


図20 垂直長さ (V) および水平長さ (H) がクラスプ先端の幅 (W) に及ぼす影響。

V および H が増加すると W は増加し、H よりも V の方が W への影響は大きい傾向を示した。

## 考 察

### 研究方法について

#### I. 有限要素法について

応力解析には、実験的解析、理論的解析、およびそれらの中間的手法としての有限要素法による解析がある<sup>15)</sup>。

応力の実験的解析としては、ストレインゲージ法、応力塗料法、光弾性法等がある。関根ら<sup>16)</sup>がストレインゲージ法を、宝田<sup>17)</sup>が応力塗料法を、村松ら<sup>18-20)</sup>、Ney<sup>21)</sup>、奥野<sup>22)</sup>、Morris ら<sup>23)</sup>が光弾性法を用いてエーカースクラスプの応力解析を行ってきた。しかし、ストレインゲージ法では、実際にクラスプのひずみを計測することが可能であるが、内部の応力は計測できない。また、ゲージを接着することから、測定点数に限界があり、連続的な測定が困難である<sup>24)</sup>。応力塗料法においても、表面応力あるいは表面ひずみのみ測定が可能であり、しかも応力塗料の厚さを一定にする必要があるなど、条件を厳密に規定することは困難<sup>17)</sup>である。光弾性法では、表面応力のみでなく、内部応力についても測定が可能であるが、材料定数の比を反映した複雑なモデルを製作することは極めて困難である。また、モデルの製作が可能なおいても、三次元解析の応力凍結時に、ヤング率およびポアソン比の低下が生じる<sup>24)</sup>など、実験精度に疑問が残る。

実験的解析により、実際に試料を作製して最小応力を示す形態を検索する場合、厳密な寸法設定が困難であるために、形態を少しずつ変化させて一定の剛性を有する I-bar クラスプを作製することは、ほとんど不可能と考えられる。すなわち、実験的研究により最小応力を示す形態を検索することは極めて難しい。

応力の理論的解析は、材料力学的、数学的検討となり、厳密解を得ることはできるが、問題の極端な単純化が必要であり、現実の複雑な問題に対しては、数学的処理が困難で適用が難しい場合が多い<sup>15,25)</sup>。

これらに対して有限要素法は、①変位と応力とを同時に解析できる<sup>26)</sup>。また、有限要素法は一種の数学的シミュレーション<sup>27)</sup>であることから、②クラスプの製造欠陥や材質の劣化、荷重や固定条件等の実験上の誤差の影響を取り除くことが可能である。③微細な寸法設定が容易で、極めて多数のモデルについて、材料定数、荷重条件等を変えて解析を繰り返すことが可能であるなど、I-bar クラスプの最適な形態を分析するうえで有利な特徴を多く有している。

有限要素法の原理は、以下の通りである。まず、連続体を有限個の要素と称する小部分に分割し、各要素

について、仮想仕事の原理、応力とひずみとの関係式、および変位とひずみとの関係式をたてる。これらに対して等価節点力と一つの要素内の応力およびひずみとは一定である（線形変位場）と仮定することにより得られる、要素に対する剛性方程式および全体の方程式から、連続体の変位および応力を求める<sup>28-31)</sup>。

この有限要素法によるエーカスクラスプの応力解析は、数多く試みられてきた<sup>5,12,23,32-36)</sup>が、湯浅ら<sup>5)</sup>は、有限要素法を用いて“逆問題的方法論”<sup>37)</sup>により、一定の剛性を有するエーカスクラスプの形態および応力を求めた。本研究においても湯浅らの方法に準じて、I-bar クラスプの剛性を決定したのち近似式にて形態を推定し、有限要素法を繰り返し用いて、剛性の誤差が1%未満となるようなI-bar クラスプの形態を決定し、最小応力を示す形態を検索した。

ただし、有限要素法には、解析モデルの作成が煩雑<sup>38)</sup>といった欠点が存在する。しかし、本研究では、解析モデル自動作成プログラムを自作し応用することにより、解析モデルの作成を容易とした。しかも、この解析モデル自動作成プログラムの応用により、解析モデルのデータを有限要素解析プログラムに入力する際のミスも防ぐことが可能となった。

以上より本研究では、応力解析に有限要素法を選択した。なお、本研究においては、I-bar クラスプの解析モデルの形態と荷重方向との関係から、二次元問題として有限要素解析することは不可能であるため、三次元有限要素法を解析に用いた。

## II. 解析モデルについて

### 1. I-bar クラスプの概形および形状パラメータについて

Krol<sup>1)</sup>は、I-bar の横走アームは歯肉縁の輪郭に沿った形に設計し、クラスプの“I”の字に相当する部分、すなわち縦走アームは垂直方向に走行し、歯に接近すると述べている。Kratochvil<sup>4)</sup>は、I-bar は歯肉縁を垂直方向に直角に横切り、可動粘膜部で水平に移行すると述べている。したがって、本研究の解析モデルはI-bar クラスプの縦走アームと横走アームが直角に交わり、縦走アームと横走アームを結ぶ湾曲部分の中心線が1/4円をなす形態とした。

奥野<sup>22)</sup>は、鑄造エーカスクラスプについて光弾性試験を行った結果、鉤腕の断面が半円形で、起始部から先端に向かって直線的に細くした形態が弾性的に優れていると報告し、西山<sup>6)</sup>は、I-bar クラスプも臨床上、この形態に準じて作製されていると考えられると述べている。したがって、本研究においても、基準断面形態は半円形とした。断面形態が同一クラスプ内

において相似形でない場合、幅の変化と厚さの変化との両方を検討する必要が生じ、解析条件と結果が複雑になり、明確な結論を引き出すことが困難となることが予想される。また、結果を臨床応用する場合においても、目的とする維持力を得るためには、断面形態が相似形のワックスパターンを一定の範囲で切断して使用する方法が最も合理的と考えられる。したがって、断面形態は同一クラスプ内で相似形と規定した。

従来より、I-bar クラスプの形態と剛性および応力との定量的関係は全く不明であり、本研究の解析1においては、ほぼすべてのI-bar クラスプに共通で、基本的かつ重要と考えられるクラスプ先端の幅(W)、クラスプ先端の厚さ(T)、垂直長さ(V)、湾曲部の曲率半径(R)、水平長さ(H)、テーパー(Tp)の6種類の形状パラメータを設定した。解析2においては、断面形態を表すパラメータとして、幅に対する厚さの比、すなわちT/W ratioを用いた。断面形態を設定する際、T/W ratioを応用すれば、WとTが同時に補正されることになり、一定の剛性を有するI-bar クラスプの寸法を求めることが容易となる。

### 2. 形状パラメータの基準値について

クラスプ先端の幅(W)およびテーパー(Tp)に関しては、市販のワックスパターンの寸法を計測したMorrisの報告<sup>39)</sup>を参考に基準値を設定した。また、基準断面形態を半円形として、クラスプ先端の厚さ(T)の基準値を設定した。広島大学歯学部附属病院第一補綴科において、I-bar クラスプを用いた下顎部分床義歯を製作、装着した9名、計12個のI-bar クラスプについて、クラスプ先端から横走アーム下縁までの距離を測定した結果、平均9.3mmであった。このことから、垂直長さ(V)の基準値は9mmとした。また、弾性を有する横走アームの長さは、平均7.9mmであったことから、横走アームの長さ(H)の基準値は8mmとした。I-bar クラスプは、歯冠部の近遠心的最大豊隆部のやや近心よりに設定する<sup>1)</sup>とされている。下顎第二小臼歯の近遠心幅径(藤田ら;7.4mm<sup>40)</sup>、白数ら;男性7.7mm、女性7.1mm<sup>41)</sup>)の約1/2の大きさを参考として、湾曲部の曲率半径(R)の基準値は3mmとした。

### 3. 総要素数について

有限要素モデルの総要素数は、解析精度に影響を与えると考えられる。そこで、本研究の解析モデルの総要素数が、変位および最大応力値に及ぼす影響を888要素までについて検討した。504要素を越えると、総要素数が変位および最大応力値に及ぼす影響は極めて小さくなった。したがって、本研究において応用した624要素は、総要素数として妥当であると考えられる。

### III. 荷重点および荷重方向について

義歯の着脱方向を歯軸方向と仮定すれば、義歯の着脱時に歯面と接触を保ち続ける部分は、クラスプ内面が歯と接触する最下端部と考えられる。Krol<sup>1)</sup>は、I-bar クラスプの先端 2 mm が歯面と接触すると述べており、荷重点は、鉤尖部の近遠心的中央部で、鉤尖より 2 mm 基部寄りの中央一点とした。

義歯着脱時、I-bar クラスプに作用する力の方向は、鉤歯の形態および鉤尖の近遠心的設定位置等の影響により異なると推察されるが、その正確な方向は明らかでない。予備解析として、I-bar クラスプの裏面に垂直方向で表側向きの荷重（以下、水平方向への荷重と定義する）に対して、荷重方向が、水平面上において、水平方向への荷重より左右に45度傾いた荷重、およびクラスプ裏面と水平面のいずれとも直交する平面上で水平方向への荷重より上下に45度傾いた荷重について解析を行い、応力分布、剛性および、最大応力値を比較した。水平方向以外の荷重の大きさは、水平方向成分が 5 N となるように  $5\sqrt{2}$  N とした。その結果、最大応力を示す位置は、水平方向に対し、水平面上において、水平方向への荷重より右に45度傾いた荷重方向（すなわち基部方向と反対方向に45度傾いた荷重方向）の場合、基部方向へ約 1.3 mm、歯根方向へ約 0.9 mm とわずかに移動した。しかし、水平方向に対して、他の3方向では、最大応力を示す位置は変化せず、応力分布にも大きい変化はみられなかった。剛性および最大応力に関しても、水平方向に対し、剛性で約 6% 以内、最大応力で約 8% 以内の変化となり、荷重方向の影響は小さく、本解析の荷重条件で問題はないと考えられる。以上より、荷重方向は水平方向とした。

### IV. 剛性の評価について

Morris ら<sup>9)</sup>は、エーカークラスプの剛性を示すパラメータとして、一定のたわみ量付与に必要な荷重を用いた。Johnson ら<sup>11)</sup>は、半円断面を有するエーカークラスプの単一平面での剛性を表すパラメータとして、一定のクラスプ変位量付与に必要な荷重量を使用した。奥野<sup>10)</sup>は、エーカークラスプおよび I-bar クラスプの先端を 0.1 mm 変位させるために必要な荷重を  $P_{0.1}$  と定義し、剛性パラメータの一種として用いた。湯浅ら<sup>5)</sup>および Yuasa ら<sup>12)</sup>は、エーカークラスプの先端を 1 mm 変位させるのに必要な荷重を  $F_d$  と定義し、剛性を示すパラメータとして用いた。以上のように、一定の変位量付与に必要な荷重が、クラスプの剛性を表すパラメータとして用いられてきた。本研究では、湯浅らおよび Yuasa らの方法

に従い、I-bar クラスプの荷重点を 1 mm 変位させるのに必要な荷重を  $F_d$  と定義して用いた。

### V. 応力の評価について

材料が降伏現象を生じる部位では、応力状態に何らかの法則が存在するのではないかと考えられ、従来より、多くの仮説が示されてきた。降伏時の応力状態に関する多くの仮説の中で、一般に広く用いられているのが、八面体せん断応力説に基づく Mises の降伏条件である。Mises の降伏条件は、実験的事実ともよく合致するといわれている<sup>42)</sup>。

Mises の降伏条件とは、応力状態のいかんにかかわらず、材料内の任意の点における八面体せん断応力が材料固有の一定値に達すれば、その点に塑性変形が起こり始めるという説であり、せん断ひずみエネルギー説による降伏条件とも一致する。また、Mises の降伏条件に関しては、組み合わせ応力を一軸引っ張り応力に換算した von Mises の相当応力が、引っ張りの降伏応力に達すると降伏が起こるとも解釈される<sup>42,43)</sup>。この von Mises の相当応力による応力の評価は、一般に広く行われており<sup>42)</sup>、本研究においてもこれを用いた。von Mises の相当応力を用いることにより、有限要素解析によって得られた I-bar クラスプの応力の大きさと降伏応力の大きさとの比較検討を容易に行うことができる。

解析 2 においては、荷重点が 1 mm 変位した場合の最大応力値を  $S_d$  と定義して、応力の評価を行った。 $S_d$  を用いることにより、3種類の剛性 (15 N/mm, 30 N/mm, 60 N/mm) を有する I-bar クラスプについて、荷重点が一定量変位した場合を想定して、最小応力を示す I-bar クラスプの断面形態およびテーパー、すなわち最適断面形態および最適テーパーを検討することが可能である。

### 研究結果について

#### I. 基準形態の剛性 ( $F_d$ ) について

Co-Cr 合金製 I-bar クラスプに用いる適正なアンダーカット量について、Renner and Boucher<sup>44)</sup>は 0.01 インチ (0.25 mm)、矢沢<sup>2)</sup>は 0.25 mm、川島<sup>45)</sup>は 0.2 mm~0.3 mm と述べており、一般臨床においては、Co-Cr 合金製 I-bar クラスプに用いる適正なアンダーカット量の基準は 0.25 mm と考えられる。アンダーカット量を 0.25 mm とした場合、I-bar クラスプの離脱時において、クラスプ先端は、アンダーカット量に相当する距離、すなわち 0.25 mm 変位する。また、I-bar クラスプの維持力は、歯面との摩擦力が大部分と考えられる。歯面との摩擦力は、歯面の抗力と摩擦

係数との積であり、歯面の抗力は、I-bar クラスプの  $F_d$  と変位量 (0.25 mm) との積に等しいことから、I-bar クラスプの維持力は、 $F_d$ 、変位量 (0.25 mm)、および摩擦係数の 3 者の積で表わされる。

一方、RPI 装置においては I-bar クラスプに生じた維持力がレスト部分および隣接面板によって拮抗されることにより、鉤歯 1 歯あたりの維持力は、I-bar クラスプ部分のみの約 3 倍になるといえる。鉤歯 1 歯あたりの維持力は、Körber<sup>46)</sup> および長澤<sup>47)</sup> の報告を参考にすると 5 N になることから、I-bar クラスプ部分のみの維持力は  $5/3N$  であると推測される。予備実験にて唾液存在下の天然歯と Co-Cr 合金との摩擦係数を測定した結果、0.2 であった。以上より、 $5/3N = F_d \times 0.25 \text{ mm} \times 0.2$  の関係が得られ、標準的と考えられる I-bar クラスプの  $F_d$  は約 33 N/mm となる。解析 1 で設定した基準形態の  $F_d$  は約 29 N/mm であり、このことから本研究において設定した基準形態が基準として妥当であったと考えられる。

## II. 疲労と応力値について

川原ら<sup>48)</sup>によれば、歯科用 Co-Cr 合金の弾性限は 44.2~57.5 kg/mm<sup>2</sup> (433~564 MPa) である。応力値が弾性限を越えると、荷重を除荷したにもかかわらず、ひずみは 0 に回復しない。すなわち、1 回の荷重負荷であっても、応力値が弾性限を越えた場合には永久変形が生ずる。

Earnshaw<sup>49)</sup>は、歯科用 Co-Cr 合金の疲労試験を行い、疲労寿命が繰り返し応力の大きさに依存することを疲労曲線によって示したうえで、歯科用 Co-Cr 合金の疲労限度は、約 40000 lbs/in<sup>2</sup> (276 MPa) であると述べている。疲労限度は、それ以下の応力では疲労破断を生じないという繰り返し応力の上限值<sup>50)</sup>であり、疲労限度以下の応力では、I-bar クラスプの疲労破折は生じないと考えられる。本研究で設定した基準形態の I-bar クラスプにおける最大応力値 (MaxS) は、アンダーカット量 (0.25 mm) に換算すると約 320 MPa となり、疲労の影響が考えられる。Earnshaw の示した疲労曲線を参考にすると、本研究で設定した基準形態の I-bar クラスプでは、応力値のわずか 5% の低下により、疲労寿命は 30% 以上増加することになる。したがって、I-bar クラスプが破折する可能性を低下させ、義歯の予後を向上させるためには、剛性が一定の I-bar クラスプにおいて、応力値が可及的に小さくなる形態を検索することが極めて重要と考えられる。

## III. I-bar クラスプの形態が剛性 ( $F_d$ ) および最大応力値 (MaxS) に及ぼす影響について

I-bar クラスプの形態に関する基本的な 6 種類の形状パラメータを設定し、I-bar クラスプの形態が  $F_d$  および MaxS に及ぼす影響を解析した。その結果、 $F_d$  および MaxS のいずれに対しても、クラスプ先端の厚さ (T) およびテーパー (Tp) の影響が大きく、湾曲部の曲率半径 (R) の影響が小さいことが判明した。 $F_d$  は T の 2.50 乗に比例したが、真直型片持ちりの剛性は厚さの 3 乗に比例する<sup>10)</sup> と言われており、I-bar クラスプの厚さが剛性に及ぼす影響は、真直はりの厚さが剛性に及ぼす影響に近いものと考えられる。

厚さの影響が大きいことより、装着した義歯において、I-bar クラスプの維持力が大きすぎるような場合、厚さを減じることが最も現実的、かつ維持力の低下に対し効果的であろう。また、鋳造体の研磨時には、維持力の損失が大きくなる厚さ方向への研磨は、注意深く行う必要があると考えられる。

応力集中部位は、各形状パラメータにおける値の変化に伴い、I-bar クラスプの基部方向あるいは先端方向にわずかに移動したが、ほぼ I-bar クラスプの横走アーム部の外表面であることが判明した。したがって、ワックスアップや鋳造体の研磨時には、応力集中が一層顕著となる切り欠き<sup>50)</sup>を横走アームに生じないように、とくに慎重に操作を行う必要があると考えられる。同部に鑄巣が存在する場合にも応力集中が著明となり、I-bar クラスプの変形あるいは破折が生じ易くなるため、横走アーム部における鑄巣などの鑄造欠陥のチェックは入念に行う必要がある。

## IV. 最小応力を示す I-bar クラスプの断面形態 (T/W ratio) およびテーパー (Tp) について

エーカースクラスプの断面形態について、Bates<sup>7)</sup>は、半円形を推奨し、Spiekermann<sup>51)</sup>は、幅と厚さの比が 10:8 の半楕円形の既製パターンを用いた。テーパーについて、Wills は、鉤尖から鉤腕の長さ 1/10 に相当する部分の幅が基部の幅の 1/2 になるように形成するのがよいと述べた<sup>52)</sup>。しかし、いずれの形態も力学的根拠に基づいたものではない。奥野<sup>22)</sup>は、光弾性試験により、断面が半円形で、起始部から先端に向かって直線的に細くした形態が弾性的に優れていると報告した。また、湯浅ら<sup>5)</sup>は、剛性が一定のエーカースクラスプについて有限要素解析を行い、断面形態に関しては、幅が広く厚さが薄いほど応力が小さく、先端と基部の幅ないし厚さの寸法比が 0.8 のとき応力は最小となると報告した。湯浅らの報告は、

エーカークラスプの断面形態およびテーパーについて、初めて剛性と応力の双方から力学的根拠を与えたものであった。

一方、西山<sup>6)</sup>は、I-bar クラスプの形態についても、エーカークラスプと同様に、断面形態が半円形で、鉤腕起始部から鉤尖部に向かっ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ろうと述べてはいるが、I-bar クラスプの最適断面形態およびテーパーに関する系統的な研究はみられない。

本研究により、剛性が一定の I-bar クラスプにおいて、断面形態は幅が広く、厚さが薄いほど応力が減少することが判明した。しかし、鉤歯の大きさに限度がある<sup>53)</sup>ことや、鉤歯の齧蝕および歯周疾患、審美性に対する影響が考えられることから、鉤腕の幅を大きくすることには限界があると考えられる。

最適テーパーは、剛性が変化してもあまり変化せず、ほぼ一定の値 (0.013~0.023) となった。したがって、最適テーパーのもとで、臨床上に可能な限り鉤腕の厚さと幅の比を小さくすることが、I-bar クラスプの変形や破折を防止するうえで有効であると考えられる。

#### V. 湾曲部の曲率半径 (R) について

I-bar クラスプの応力 (Sd) が最小となる R の大きさは、約 3 mm であることが判明した。従来より、I-bar クラスプの横走アームから先端へ向かう湾曲の大きさに関する基準は存在しなかったが、本研究は、I-bar クラスプの湾曲部の曲率半径の大きさに初めて基準を与えた。また、R は 3 mm より小さくした場合よりも大きくした場合の方が、疲労寿命に与える影響は大きいと考えられる。例えば、図17に示したように、断面形態 (T/W ratio) が 0.3 および 0.5 の両方において、R が 4.5 mm となった場合、3.0 mm の場合に比較し、Sd は約14%増加し、Earnshaw<sup>49)</sup>の示した疲労曲線によれば、疲労寿命は50%程度低下すると考えられる。一方、R が 2.0 mm となった場合、Sd は約2%増加し、疲労寿命は6%程度低下することになる。

#### VI. 垂直長さ (V) および水平長さ (H) について

図19および図20に示したように、I-bar クラスプの剛性 (Fd) が一定の場合、V あるいは H が増加すると応力 (Sd) は大きく減少し、クラスプ先端の幅 (W) は増加した。例えば、断面形態 (T/W ratio) が 0.5 の場合、V が基準値 (9 mm) から 2 mm 増加すると Sd は約10%減少し、W は約 0.18 mm 増加した。H が基準値 (8 mm) から 2 mm 増加すると Sd は約16%減少

し、W は約 0.12 mm 増加した。すなわち、V よりも H の方が Sd の減少への影響は大きく、W の増加に対する影響は小さい傾向を示した。したがって、V よりも H を長く設計する方が、応力を軽減するうえで、より有利であることが示唆された。

#### VII. I-bar クラスプの最適形態について

剛性が 30 N/mm の場合の I-bar クラスプの最適形態の一例を図21に示した。断面形態を半円形とし、最適テーパーとして 0.02 を、最適湾曲部の曲率半径 (R) として 3 mm を採用した結果、クラスプ先端の幅 (W) の大きさは約 1.6 mm となった。垂直長さ (V) および水平長さ (H) は、解析1で規定した基準値を用いている。

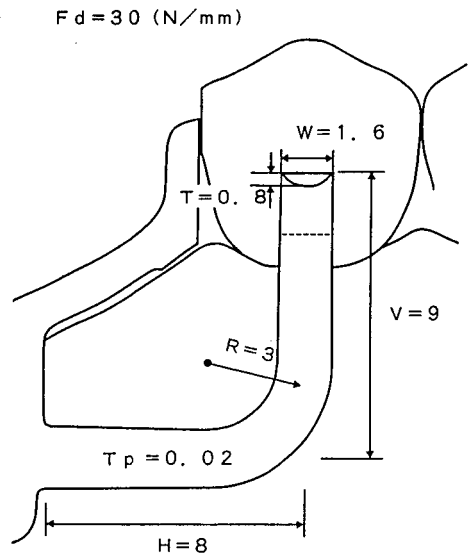


図21 I-bar クラスプの最適形態の一例。

### 総 括

三次元有限要素法を用いて、I-bar クラスプの形態が剛性および応力に及ぼす影響を検討した。さらに、一定の剛性を有する I-bar クラスプの最適形態について検討を加え、以下の結果を得た。

- 1) I-bar クラスプの応力集中は、横走アームに生じた。
- 2) 6種類の形状パラメータ (クラスプ先端の幅、クラスプ先端の厚さ、垂直長さ、湾曲部の曲率半径、水平長さ、テーパー) から、I-bar クラスプの剛性および最大応力値を求める近似式を得た。先端の厚さおよびテーパーは剛性および最大応力値に対して大きい影響を及ぼした。

3) テーパーが0.013~0.023の範囲において、応力は最小となった。

4) 断面の幅が広く、厚さが薄いほど、応力は減少した。

5) 湾曲部の曲率半径が約3mmのとき、応力は最小となった。

6) 垂直長さおよび水平長さが長いほど、応力は減少した。

以上より、I-bar クラスプの形態と剛性および応力との定量的関係が明らかとなった。さらに、一定の剛性を有するクラスプ形態の中で最大応力値が最小となる形態が判明し、I-bar クラスプの最適な形態に関する基礎的指標を得ることができた。

## 謝 辞

稿を終えるに臨み、終始御懇篤なる御指導と御校閲を賜りました本学歯科補綴学第一講座津留宏道教授に衷心より感謝の意を表します。また、御教示、御校閲を賜りました本学歯科補綴学第二講座濱田泰三教授、ならびに本学歯科理工学講座山木昌雄教授に深謝いたします。さらに、研究遂行上および本論文作成上、御助言と御鞭撻を頂きました朝日大学歯学部歯科補綴学第一講座長澤 亨教授ならびに本学歯科補綴学第一講座赤川安正助教授に厚く御礼申し上げます。

本研究の開始から終了に至るまで常に暖かく見守り、かつ、お励まし下さいました中電病院高森 晃歯科部長、本学歯科補綴学第一講座大川周治講師、佐藤裕二講師、湯浅良孝博士に感謝いたします。ご協力頂きました教室員各位に感謝いたします。最後に、陰ながら私の研究を支えてくれた妻 真弓に感謝します。

## 文 献

- 1) Krol, A.J.: クロール パーシャルデンチャーデザイン—アイ・バー・クラスプ教本— (関根弘, 岸 正孝, 小宮山彌太郎, 佐藤健司, 原健一, 巢山寛慈, 田口俊博, 澤 潤 訳). 2版, 医歯薬出版, 東京, 59-74, 1978.
- 2) 矢沢一浩: (2) I-bar パーシャルの原則とその考え方について. 歯科技工 6, 49-58, 1978.
- 3) 津留宏道, 小林義典, 長澤 亨, 西浦 恂, 羽田 勝, 松本直之: 床義歯学. クインテッセンス出版, 東京, 168-169, 1987.
- 4) Kratochvil, F.J.: クラトビル パーシャルデンチャー (平沼謙二, 松元 誠 訳). 医歯薬出版, 東京, 39-42, 1989.
- 5) 湯浅良孝, 朝原早苗, 佐藤裕二, 大川周治, 長澤 亨, 津留宏道: 有限要素法による環状鑄造鉤の応力解析. —最小応力を示す鉤の形態について—. 補綴誌 35・85回特別号, 94, 1991.
- 6) 西山 暉: 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—. 補綴誌 20, 43-62, 1976.
- 7) Bates, J.F.: The mechanical properties of the cobalt-chromium alloys and their relation to partial denture design. *Br. Dent. J.* 119, 389-396, 1965.
- 8) 山賀 保: 鑄造鉤に関する力学的研究. —鉤腕の力学的性質ならびに維持力に影響する因子について—. 補綴誌 23, 271-287, 1979.
- 9) Morris, H.F., Asgar, K. and Tillitson, E.: Stress-relaxation testing. Part I: A new approach to the testing of removable partial denture alloys, wrought wires and clasp behavior. *J. Prosthet. Dent.* 46, 133-141, 1981.
- 10) 奥野善彦: キャストクラスプの形態と維持力. 阪大歯学誌 28, 155-166, 1983.
- 11) Johnson, D.L., Stratton, R.J. and Duncanson, Jr, M.G.: The effect of single plane curvature on half-round cast clasps. *J. Dent. Res.* 62, 833-836, 1983.
- 12) Yuasa, Y., Sato, Y., Ohkawa, S., Nagasawa, T. and Tsuru, H.: Finite element analysis of the relationship between clasp dimensions and flexibility. *J. Dent. Res.* 69, 1664-1668, 1990.
- 13) Morris, H.F. and Asgar, K.: Physical properties and microstructure of four new commercial partial denture alloys. *J. Prosthet. Dent.* 33, 36-46, 1975.
- 14) Craig, R.G. and Farah, J.W.: Stresses from loading distal-extension removable partial dentures. *J. Prosthet. Dent.* 39, 274-277, 1978.
- 15) 戸川隼人: BASIC による有限要素法の基礎. サイエンス社, 東京, 1-20, 1985.
- 16) 関根 弘, 田島篤治, 柳川 浩, 高梨恒一, 竹井正章, 山田洋文, 溝上隆夫: 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 4, 169-175, 1963.
- 17) 宝田 勇: 応力塗料のクラスプに対する応用. 歯科学報 63, 629-633, 1963.
- 18) 村松篤良, 安達和子: 切り口を有する変断面円環の曲げ. 歯理工誌 3, 51-55, 1962.
- 19) 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.
- 20) 村松篤良, 安達和子: Cast Clasp の光弾性的応力解析Ⅱ. 歯理工誌 5, 152-158, 1964.
- 21) Ney, J.M.: Planned partials. The J.M. Ney Co., Bloomfield, 84, 1959.
- 22) 奥野善彦: 鑄造鉤の形態に関する力学的研究. 阪大歯学誌 13, 341-352, 1968.
- 23) Morris, H.F., Farah, R.G., Craig, R.G. and Hood, A.A.: Stress distribution within circumferential clasp arms. *J. Oral. Rehabil.* 3, 387-394, 1976.
- 24) 山田 亨: 有限要素法によるコーヌスクローネ

- の基礎的研究. 第1報. 解析方法とその検討. 補綴誌 30, 1158-1171, 1986.
- 25) 村上敬宜: 弾性力学. 養賢堂, 東京, 105-123, 1985.
- 26) 戸川隼人: マイコンによる有限要素解析. 培風館, 東京, 59-88, 1982.
- 27) 堤 定美, 野首孝祠, 山賀 保, 奥野善彦: コンピューターによるクラスプの力学的解析. 日歯評論 403, 75-83, 1976.
- 28) 三好俊郎: 有限要素法入門. 培風館, 東京, 1-5, 1978.
- 29) Zienkiewicz, O.C.: マトリックス有限要素法 (吉識雅夫, 山田嘉昭 監訳). 三訂版. 培風館, 東京, 1-42, 1984.
- 30) Segerlind, L.J.: Applied finite element analysis. ed. 2, John Wiley and Sons Inc., New York, 3-16, 1984.
- 31) Baran, N.M.: Finite element analysis on micro-computers. McGraw-Hill Book Co., New York, 1-26, 1987.
- 32) 堤 定美, 野首孝祠, 山賀 保, 山田隆司, 西山 暉, 奥野善彦: 有限要素法による鋳造鉤の二次元弾塑性応力解析. 歯材器誌 32, 121-128, 1975.
- 33) 野首孝祠, 堤 定美, 山賀 保, 奥野善彦: クラスプの力学的研究. 第一報. 有限要素法の適応性. 補綴誌 19, 611-617, 1976.
- 34) 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. 鉤腕の概形・寸法について. 補綴誌 19, 618-626, 1976.
- 35) Lemmens, Ph., Poort, H.W. and van den Brande, W.: Stress analysis in a clasp arm of a removable partial denture. *J. Dent. Res.* 64, 714, 1985.
- 36) Lemmens, Ph. and Poort, H.W.: Spanningsverdeling in de Ankerarm van een Partiele Frameprothese. *Tandheelk Tydingen* 37, 147-157, 1985.
- 37) 瀬口靖幸: コンピュータショナル バイオメカニクス. 医用電子と生体工学 27 (秋期特別号), 25, 1989.
- 38) 川井忠彦, 岸 正彦: 機械のための有限要素法入門. オーム社, 東京, 37-66, 1983.
- 39) Morris, H.F., Asgar, K., Brudvik, J.S., Winkler, S. and Roberts, E.P.: Stress-relaxation testing. Part IV. Clasp pattern dimensions and their influence on clasp behavior. *J. Prosthet. Dent.* 80, 319-326, 1983.
- 40) 藤田恒太郎, 桐野忠大: 歯の解剖学. 21版. 金原出版, 東京, 60, 1976.
- 41) 白数美輝雄, 中村正雄, 古橋九平: 歯の形態学. 医歯薬出版, 東京, 41, 1970.
- 42) 益田森治, 室田忠雄: 改訂 工業塑性力学. 養賢堂, 東京, 77-105, 1988.
- 43) 川井忠彦, 岸 正彦: 機械のための有限要素法入門. オーム社, 東京, 126-128, 1983.
- 44) Renner, R.P. and Boucher, L.J.: Removable partial dentures. Quintessence Publishing Co., Inc., Chicago, 99, 1987.
- 45) 川島 哲: 一週間でマスターするキャストパーシャル (上). 医歯薬出版, 東京, 102-104, 1990.
- 46) Körber, K.H.: Konuskronen-Teleskope. A. Huthing, Heidelberg, 38-70, 1969.
- 47) 長澤 亨, 久保雅彦, 前野信夫, 山科 透, 津留宏道: 各種アタッチメントにおける維持力の減衰に関する実験的研究. 広大歯誌 10, 63-69, 1978.
- 48) 川原春幸, 権田悦通, 中村正明, 生内良男, 石崎順啓, 武田昭二: カラーアトラス 歯科用コバルト・クロム合金鋳造法. 医歯薬出版, 東京, 5, 1979.
- 49) Earnshaw, R.: Fatigue tests on a dental cobalt-chromium alloy. *Br. Dent. J.* 110, 341-346, 1961.
- 50) 中沢 一, 本間寛臣: 金属の疲労強度. 養賢堂, 東京, 19-41, 1982.
- 51) Spiekermann, H. and Gründler, H.: ワンピースキャストパーシャル—その臨床と技工—. クインテッセンス出版, 東京, 87-89, 1978.
- 52) 松尾悦郎: 鋳造鉤の設計 (理論編). 歯界展望 18, 456-464, 1961.
- 53) 小野高裕: キャストクラスプの維持力に及ぼす鉤歯形態の影響. 阪大歯学誌 32, 229-250, 1987.