原 著 論 文

臨床に用いられている I-bar クラスプの 形態に関する有限要素解析

佐藤 裕二 朝原 早苗 湯浅 良孝 久保 隆靖
足立 真悟 赤川 安正

Finite Element Analysis on Dimension of I-bar Clasps of Removable Partial Denture Patients

Yuuji Sato, Sanae Asahara, Yoshitaka Yuasa, Takayasu Kubo,
Shingo Adachi and Yasumasa Akagawa

Abstract : To establish science-based I-bar clasp design of removable partial denture (RPD), the dimension of I-bar clasps of RPD patients was measured, and the stiffness and stress distribution of these I-bar clasps were evaluated with the finite element method. The results were as follows :

1. The thicknesses and widths in cross-sections of I-bar clasps were 0.3~1.0.
2. The width of the taper of horizontal arms of I-bar clasps was the largest (0.09).
3. The stiffness of I-bar clasps was greater than that of mechanical ideal I-bar clasps.
4. The stress analysis suggests a possibility of fatigue fracture or permanent deformation of I-bar clasps.
5. It may be more preferable to fabricate I-bar clasp arms thinner than commonly used arms. An I-bar clasp with a taper of 0.02 in width is preferred.

Key words : I-bar clasp, FEM, flexibility, dental stress analysis

I. 緒 言

I-bar クラスプは、パーシャルデンチャーの優れた維持装置の1つと認識され¹⁻⁴⁾、パーシャルデンチャーの成功のために破折や変形を生じない I-bar クラスプは必須の要件である⁵⁾。しかし、I-bar クラスプを設計するにあたり、その寸法に関しての力学的根拠は必ずしも明確でなく、実際には歯科医師の臨床的経験に基づいて指示・作製されている場合が多く、I-bar クラスプの寸法に関する科学的指針が望まれている。

本研究では、力学的に合理性を持つ I-bar クラスプの設計を目指して、パーシャルデンチャー装着者の I-bar クラスプの実寸法を測定し、その形態を明らかにするとともに、個々のクラスプについて有限要素解析を行い、クラスプの維持力に影響を与える剛性^{5,6)}および破折・変形の指標となる応力^{5,6)}の両者を解析した。

II. 材料および方法

1. 被験クラスプ

広島大学歯学部附属病院第一補綴科に受診した Co-Cr 製の I-bar クラスプを直接維持装置に持つワンピースキャストパーシャルデンチャー装着者 17 名（男性 1 名、女性 16 名、平均年齢 58.7 歳）を被験者とし、それらの 23 個の I-bar クラスプを被験クラスプとした。被験クラ

広島大学歯学部歯科補綴学第一講座（主任：赤川安正教授）
Department of Removable Prosthodontics, Hiroshima University School of Dentistry (Chief: Prof. Yasumasa Akagawa)
平成 7 年 1 月 30 日受付

図 1 I-bar クラスプの寸法の測定項目

$W_1 \sim W_4$: クラスプの幅, $T_1 \sim T_4$: クラスプの厚さ

V : クラスプの垂直長さ, R : 湾曲部の曲率半径

H : クラスプの水平長さ, C : 接触部分の長さ

M : 接触部分と歯肉縁との距離

A : 歯肉縁と横走アームとの距離

Measured dimensions of I-bar clasp

$W_1 \sim W_4$: width, $T_1 \sim T_4$: thickness

V : length in vertical part

R : radius of curvature in curved part

H : length in horizontal part

C : contact length with the abutment tooth

M : distance between the lower margin in the contact area and gingival margin

A : distance between gingival margin and upper edge of horizontal arm

スプの支台歯は、下顎犬歯が 6 本、下顎小白歯が 5 本、上顎犬歯が 6 本、上顎小白歯が 7 本、上顎大臼歯が 1 本であった。

2. I-bar クラスプの寸法の測定

クラスプの寸法を測定した各項目は図 1 に示した。 $W_1 \sim W_4$ はクラスプの幅、 $T_1 \sim T_4$ はクラスプの厚さであり、それらの測定部位は W_1 および T_1 では、クラスプが歯面と接触する部分の根尖側境界部、 W_2 および T_2 では、クラスプの垂直部分と湾曲部との境界部、 W_3 および T_3 では、湾曲部と水平部分との境界部、 W_4 および T_4 では、水平部分の基部とした。また、各断面における厚さと幅の比 (T/W ratio⁵⁾) も求めた。さらに、クラスプの単位長さあたりの幅および厚さの変化量を Taper と規定した。クラスプの垂直長さ V はクラスプ先端から横走アームの中心線までの距離とし、水平長さを示す H はクラスプ基部から垂直部分の中心線までの距離として測定した。接触部分の長さ C は、クラスプ先端と歯面に対する接触部分の根尖

図 2 湾曲部の曲率半径 R を求めるための作図法

トレース図の I-bar クラスプ中心線上における、湾曲部の境界点 (2 点) と湾曲部の中心点とを結んだ線分の垂直二等分線の交点と、湾曲部の中心点との距離を R とした

A construction method for measuring radius of curvature (R) in curved part of I-bar clasp

At first, the points of border between curved part and straight parts on the neutral line of I-bar clasp were drawn in the tracing figure. Vertical bisectors between the central point and the border points were drawn. R is the distance between the point of intersection of the vertical bisectors and the central point.

側境界部との距離とし、接触部分と歯肉縁との距離 M はクラスプの接触部分の根尖側境界部と歯肉縁との距離とした。また、歯肉縁と横走アームとの距離 A は歯肉縁と横走アームの上縁との距離として測定した。

$W_1 \sim W_4$, $T_1 \sim T_4$, V , H , C , M , A の各寸法はノギス (YS 33 S, ミットヨ社製) を用いて 0.1 mm まで測定し、各々 3 回の測定値の平均を求めた。湾曲部の曲率半径 R は、グラフ用紙を背景に I-bar クラスプの写真撮影をした後、10 倍に拡大してトレースを行い、作図により求めた (図 2)。

3. 剛性および応力の解析

剛性および応力の解析は、著者らが開発した I-bar クラスプの有限要素モデル自動作成プログラム⁵⁾と有限要素解析プログラム (COSMOS/M, 横川技術情報社製) により行った。すなわち、前者のプログラムに各クラスプの各々の測定値を入力し、三次元モデルを作成、その後、後者のプログラムを用いて三次元有限要素解析を行った。なお、三次元モデルの断面形態は半円型ないし半楕円形とした。材料定数 (ヤング率とポアソン比) は Co-Cr 合金を想定し、それぞれ 218 GPa⁷⁾ および 0.33⁸⁾ とした。拘束はクラスプ基部 35 節点に対し行った。荷重点は歯面との接触部分の根尖側境界部中央とし、クラスプ裏面に垂直でクラスプ外表面方向に 5 N の静荷重を負荷して荷重点の変位量およびクラスプに生じた von Mises の相当応力の最

表 1 各測定項目の実測値

Measured values of each dimensions

単位(mm)

クラスプ	W ₁	T ₁	W ₂	T ₂	W ₃	T ₃	W ₄	T ₄	V	R	H	C	M	A
a	1.4	1.0	1.2	0.9	1.4	1.1	1.5	1.2	10.4	3.3	6.8	2.4	6.0	1.3
b	1.3	1.0	1.3	0.9	1.6	0.9	1.5	0.9	5.6	3.5	4.4	1.7	1.3	1.8
c	1.7	1.0	1.7	0.9	2.6	1.3	2.7	1.9	10.2	3.0	7.0	2.1	3.6	3.2
d	1.6	1.2	1.7	1.2	1.5	1.9	2.4	1.8	8.6	4.0	5.7	2.1	2.4	3.3
e	1.7	1.0	1.9	1.2	1.9	1.5	1.9	1.3	8.4	2.1	3.9	1.4	4.0	2.0
f	1.6	1.2	1.9	1.2	1.9	1.3	2.0	1.2	8.2	1.5	4.2	1.2	4.9	1.1
g	0.9	0.9	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	8.3	3.5	5.6	2.2	2.7	2.8
h	1.2	1.0	1.3	1.2	1.6	1.2	2.0	1.5	10.4	4.0	8.4	2.7	3.5	3.4
i	1.1	1.1	1.4	1.1	1.6	1.2	1.9	1.1	11.2	3.4	7.7	2.8	5.0	2.6
j	1.2	1.1	1.3	1.2	1.7	1.6	1.7	1.6	9.3	3.6	5.6	2.3	1.8	4.3
k	1.1	1.0	1.3	1.2	1.7	1.6	2.4	1.7	8.0	3.5	6.4	2.5	0.3	4.3
l	1.4	0.9	1.6	1.0	1.7	1.1	1.8	1.2	5.7	2.6	4.6	1.0	2.8	1.0
m	1.6	1.4	1.9	1.1	1.8	1.3	2.5	1.7	9.6	3.4	9.0	1.7	1.9	5.1
n	1.0	1.2	1.2	1.1	1.8	1.1	1.8	1.0	8.0	2.1	5.4	1.9	2.8	2.4
o	1.7	1.6	1.9	1.2	1.5	1.0	1.7	1.0	6.1	3.8	5.6	1.7	0.7	2.9
p	1.5	1.1	1.5	0.8	1.8	1.0	2.0	1.1	11.3	4.2	9.0	3.1	4.0	3.3
q	1.6	1.4	1.9	1.4	2.1	1.5	2.8	1.7	11.6	3.4	7.3	3.1	4.7	2.7
r	1.6	1.0	1.8	1.3	1.8	1.4	2.5	1.6	10.2	3.0	6.6	2.0	3.1	4.2
s	1.7	1.3	1.7	1.1	1.8	1.3	2.1	1.2	8.1	2.6	5.6	1.7	3.2	2.3
t	1.4	1.3	1.5	1.4	1.7	1.4	1.8	1.6	7.7	3.4	6.5	2.4	2.8	1.6
u	1.5	1.3	1.6	1.4	1.9	1.5	2.1	2.0	8.3	3.9	7.0	2.3	2.8	2.2
v	1.4	0.8	1.4	1.0	1.8	1.2	2.7	0.9	8.9	3.6	8.1	2.2	4.5	1.3
w	1.5	1.1	1.4	0.9	1.9	1.1	2.3	0.9	8.6	3.8	7.3	2.9	2.5	2.2
平均	1.4	1.1	1.5	1.1	1.7	1.3	2.1	1.4	8.8	3.3	6.4	2.1	3.1	2.7
標準偏差	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.4	0.3	1.7	0.7	1.5	0.6	1.4	1.1
最小値	0.9	0.8	1.1	0.8	1.1	0.9	1.2	0.9	5.6	1.5	3.9	1.0	0.3	1.0
最大値	1.7	1.6	1.9	1.4	2.6	1.9	2.8	2.0	11.6	4.2	9.0	3.1	6.0	5.1

大値およびその位置を求めた⁹⁾。

剛性 (Fd^{5,6,9)}, 単位: N/mm) は荷重値 (5 N) を有限要素解析により得られた荷重点の変位量で除して求めた。

応力の検討には, Co-Cr 合金製 I-bar クラスプに用いられるアンダーカット量は 0.25 mm であることから^{2,3,10,11)}, 義歯の着脱時を想定して荷重点が 0.25 mm 変位した場合に換算した von Mises の相当応力の最大値 (σ , 単位: MPa) を用いた。

III. 結 果

表 1 に各測定項目の実測値を示した。T, W, V は最大値が最小値の 2 倍前後であり, その他の R, H, C, M, A は 2 倍以上の差を認めた。T/W ratio の平均値は T₁/W₁ が 0.81±0.16, T₂/W₂ が 0.74±0.14, T₃/W₃ が 0.75±0.18, T₄/W₄ が 0.68±0.17 となり, 全体に半円形である 0.5 より大きい値を示した。表 2 に示したように, W の Taper および T の Taper はクラスプ内において一定でなく, I-bar クラスプの水平アームにおいて (W₃→W₄, T₃→T₄) は, 他の部位に比較して W の増加量が大きく, T の増加量は小さかった。また, T の Taper は T₁ から T₂ に至る間で負の値を示した。

表 2 幅および厚さにおける Taper の平均値

The mean value of Taper in thickness and width

W ₁ →W ₂	0.040±0.057	T ₁ →T ₂	-0.021±0.110
W ₂ →W ₃	0.041±0.058	T ₂ →T ₃	0.033±0.035
W ₃ →W ₄	0.087±0.090	T ₃ →T ₄	0.009±0.075
W ₁ →W ₄	0.054±0.031	T ₁ →T ₄	0.019±0.032

有限要素法で求めた応力集中は, 朝原の報告⁹⁾と同様にすべてのクラスプにおいてほぼ横走アームに認められた。すべてのクラスプの剛性および最大応力は図 3 に示した。剛性 Fd の平均値は 117 N/mm, 最大応力 σ の平均値は 638 MPa であり, 剛性が大きいほど応力も大きい傾向を示した (相関係数 R=0.74, p<0.01)。

IV. 考 察

1. I-bar クラスプの寸法について

本研究の結果, 歯肉縁と横走アームとの距離 A の平均値は 2.7 mm であることが判明した。Krol¹⁾ は, I-bar クラスプの横走アームは歯肉縁から 3 mm 以上離すべきであると主張しているが, 計測した 23 個のクラスプ中, 15 個がこの基準より小さかった。A の値を, より大きくするこ

図3 全 I-bar クラスプの剛性 Fd および応力 σ
すべてのクラスプの値を a~w で表示した
Relation between stiffness (Fd) and stress (σ) of all
I-bar clasps
The value of all clasps were shown with symbol a~w

とにより、審美性および支台歯の衛生状態の向上が期待できると考えられ、より好ましいデザインといえる。

湾曲部の曲率半径 R の平均値は 3.3 mm であった。朝原⁵⁾は有限要素法を用い I-bar クラスプについて剛性一定の条件下で応力を検討し、応力の最小となる R の値は約 3 mm であると報告している。本研究にみられた R の平均値はこの結果とよく一致し、応力の点からはほぼ良好な値であると考えられる。しかし、一部のクラスプにおける R は 1.5 mm と小さすぎたり、4.2 mm と大きすぎるものもあり、応力の点で不利であると思われる。

T/W ratio の平均値は 0.7 から 0.8 となり、I-bar クラスプの基本的断面形態と考えられる半円型¹²⁾ (T/W ratio=0.5) よりも大きく、最も大きい T/W ratio は 1.2 であった。有限要素解析により、I-bar クラスプの断面形態に関して、幅が広く厚さが薄いほど（すなわち、T/W ratio が小さいほど）、応力が小さくなることが示されていることから⁵⁾、臨床的に可能であれば、T/W ratio がより小さい I-bar クラスプの設計が力学的にかなっていると思われる。

T の Taper は $T_1 \rightarrow T_2$ 間で負の値を示したが、これは、 T_1 の存在するクラスプの断面において、義歯の着脱方向に対するアンダーカットの存在および通常シートワックスで行われる鉤腕裏面のリリースの存在に起因して T_1 が大きく作製される傾向があることを示している。一方、W の Taper の平均値は、先端から湾曲部までの値および湾曲部における値が 0.04、湾曲部から基部までの値が 0.09 と、基部付近において幅が大きく増加する傾向を示し、最大値は 0.23 であった。剛性が一定の条件下で応力が最小となるような W の Taper は 0.02（ただし、Taper はクラスプの先端から基部まで一定）である⁵⁾ことを考え

併せると、I-bar クラスプのアームはこの基準に従うことが望ましいと考えられる。

2. I-bar クラスプの剛性および応力について

I-bar クラスプの望ましい剛性は、維持力の主体が歯面とクラスプとの摩擦力によるものとしたうえで、鉤歯一歯あたりの維持力を 5 N とすると約 30 N/mm であるとの報告⁵⁾があり、今回の剛性 Fd の平均値 117 N/mm、最大値 276 N/mm（図 3）は、かなり大きい値であり、力学的には好ましくないことが示された。

一方、応力についてみると、 σ の平均値は Co-Cr 合金の弾性限とされる約 500 MPa¹⁴⁾ よりも大きかったことから（図 3）、クラスプ作製後、作業模型に試適して支台歯のアンダーカット 0.25 mm 部に装着するとき、すでにクラスプに変形が生じている可能性がある。I-bar クラスプの維持力は剛性に比例するといわれている⁵⁾が、今回の被験者では義歯の維持力が大きすぎるとの訴えは全く認められなかった。これは、作業模型試適時に生じた可能性のある I-bar クラスプの永久変形により、実際には 0.25 mm のアンダーカットを使用していないことが原因かもしれない。さらに弾性限以下の応力に対しても、Co-Cr 合金の疲労限度すなわちそれ以下の応力では疲労破断を生じない繰り返し応力の上限値は約 280 MPa であり¹³⁾、本研究におけるクラスプのほとんどはこれ以上であった。そこで、I-bar クラスプを長期間使用することにより、疲労破折が生じる可能性が示唆された。それゆえ、少しでも疲労破折の危険性を減少させるためには、応力を可及的に小さくすることが必要である。

剛性と応力の両者を併せ考え、力学的に好ましいクラスプを検討したところ、図 3 の左下に楕円で囲んだ 6 個のクラスプにおいてのみ、剛性が I-bar クラスプにおける理想値（約 30 N/mm）の近傍、かつ応力が Co-Cr 合金の弾性限（約 500 MPa）より小さかった。すなわち、70% を超える実際の I-bar クラスプは力学的に不適切に設計されているといえ、効果的に剛性および応力を減少させる配慮の必要性が示された。

3. 最適形態について

I-bar クラスプの力学的検討を行った朝原⁵⁾の、適切な剛性（30 N/mm）を有する I-bar クラスプの最適形態（すなわち、応力の最も小さくなる形態）の 1 例を示した（図 4）。この形態の I-bar クラスプは、適切な維持力（5 N）を有し、かつ義歯の着脱に伴う変位（0.25 mm）が生じて永久変形は生じない（すなわち応力値が弾性限を超えない）と考えられる。この力学的に理想的な I-bar クラスプ（図 4）と実際のクラスプの値（表 1）とを比較すると、V および R の測定値はほぼ最適形態に近く、H の値は最適形態より小さかった。また、力学的に好ましい幅の

図 4 I-bar クラスプの最適形態の一例⁵⁾
An example of optimum design of I-bar clasp

Taper は 0.02 であり、断面形態が半円形 (T/W ratio = 0.5) であることから、厚さの Taper は 0.01 (0.02×0.5) と計算される。これを実際のクラスプと比較すると、幅の Taper は最適な値の 2 倍以上と大きかった。さらに厚さの Taper は同一クラスプ内においても大きく変化した。

I-bar クラスプの剛性 F_d はクラスプ先端の厚さの 2.50 乗に比例し、 $9.38 \cdot 10^9$ の幅の Taper 乗に比例するとされる⁵⁾。クラスプ先端の幅、湾曲部の曲率半径、水平長さおよび垂直長さよりも、クラスプ先端の厚さ、および幅の Taper が剛性 F_d に及ぼす影響が大きいとされる⁵⁾。したがって、クラスプの厚さを小さくし、さらにクラスプの幅の Taper を減少させることによって、剛性を効果的に低下させることができ、適切な維持力を得ることが十分に可能であると考えられる。さらに、応力を小さくするためにもクラスプの厚さを減少させる必要があり、幅の最適 Taper (0.02) を用いることは力学的に合理性を持つ。

V. 結 論

臨床で用いられている I-bar クラスプの実寸法を測定し、さらに有限要素法を用いて各クラスプの剛性および応力を検討した結果、以下の結果を得た。

1. I-bar クラスプの断面における厚さと幅の比は約 0.3~1.0 であった。
2. 横走アームにおいて、幅の Taper の平均値は 0.09 となり、その他の部位と比較して大きい値を示した。
3. I-bar クラスプの剛性は、力学的に算出される適

切と考えられる値よりも大きい傾向を示した。

4. 応力解析により、I-bar クラスプの疲労破折や変形の可能性が示唆された。

これらのことから I-bar クラスプに力学的に好ましい形態を付与する場合、その厚さを大きくしすぎない配慮が必要であること、さらに幅の最適 Taper (0.02) を用いることが望ましいことが示され、パーシャルデンチャーの臨床を考える上で有用な知見を得ることができた。

本論文の要旨は第 90 回日本補綴歯科学会学術大会 (平成 5 年 10 月 28, 29 日, 北九州) において発表した。

文 献

- 1) Krol, A.J. (関根 弘, 岸 正孝, 小宮山彌太郎ほか): Removable partial denture design, outline syllabus (クロールパーシャルデンチャーデザインーアイ・バー・クラスプ教本一, 2 版, 59~74, 医歯薬出版, 東京, 1978), 1976.
- 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 亨ほか: 床義歯学, 168~169, クインテッセンス出版, 東京, 1987.
- 4) Kratochvil, F.J. (平沼謙二, 松元 誠): Partial removable prosthodontics (クラトビル パーシャルデンチャー, 39~42, 医歯薬出版, 東京, 1989), 1988.
- 5) 朝原早苗: 有限要素法を用いた I-bar クラスプの力学的解析, 広大歯誌, 25: 101~115, 1993.
- 6) Yuasa, Y., Sato, Y., Ohkawa, S. et al: Finite element analysis of the relationship between clasp dimensions and flexibility, J Dent Res, 69: 1664~1668, 1990.
- 7) Morris, H.F. and Asgar, K.: Physical properties and microstructure of four new commercial partial denture alloys, J Prosthet Dent, 33: 36~46, 1975.
- 8) Craig, R.G. and Farah, J.W.: Stresses from loading distal-extension removable partial dentures, J Prosthet Dent, 39: 274~277, 1978.
- 9) 湯浅良孝, 朝原早苗, 佐藤裕二ほか: 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.
- 10) Renner, R.P. and Boucher, L.J.: Removable partial dentures, 99, Quintessence Publishing Co., Inc., Chicago, 1987.
- 11) 川島 哲: 一週間でマスターするキャストパーシャル〈上〉, 102~104, 医歯薬出版, 東京, 1990.
- 12) 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.
- 13) Earnshaw, R.: Fatigue tests on a dental cobalt-chromium alloy, Br Dent J, 110: 341~346, 1961.
- 14) 川原春幸, 権田悦通, 中村正明ほか: カラーアトラス 歯科用コバルト・クロム合金鑄造法, 5, 医歯薬出版, 東京, 1979.