原 著 論 文

エーカースクラスプアームの湾曲が剛性および 応力に及ぼす影響に関する三次元有限要素解析

湯浅 良孝 佐藤 裕二 赤川 安正

Three-dimensional Finite Element Analysis of the Effect on the Clasp Stiffness and Stress with Various Curvatures of the Cast Circumferential Clasp Arm

Yoshitaka Yuasa, Yuuji Sato and Yasumasa Akagawa

Abstract : The effect of the variation of the curvature of the cast circumferential clasp arm on clasp stiffness and stress was evaluated using three-dimensional finite element analysis.

The results were as follows :

1. The curvature of the clasp arm under the condition of different lengths affected stiffness and stress.
 - 1) The clasp arm using a non-tapered pattern with a small curvature showed less stiffness and lower stress than the arm with a large curvature.
 - 2) The clasp arms using the original patterns, which were established from our previous study (taper : 0.8, T/W ratio : 1/2 or 1/3), showed constant stiffness and low stress instead of change of curvature.
 - 3) The clasp arm using Rapid flex pattern[®] with large curvature showed lower stress than the arm with a small curvature.
2. The clasp arm with an adequate curvature in the condition of the same length showed low stress. This seemed to be the effect of torsion elasticity which was regarded to distribute the stress in the clasp arm.

Key words : finite element analysis, cast circumferential clasp, dental stress analysis

I. 緒 言

エーカースクラスプ（環状鑄造鉤，以下クラスプと略す）は，部分床義歯の維持装置として臨床上最も頻用されている。クラスプアームは三次元的構造のため，基部と先端の位置が同一でもしばしば異なった湾曲を有する。このようなアームの湾曲が異なる場合，クラスプのたわみにくさを表す剛性に変化が生じる結果，剛性に比例する^{1,2)}維持力が影響を受けると考えられる。また，アームの歯軸方向への湾曲は応力の分散効果を生じるねじり弾性にも影響するといわれている³⁾。クラスプの維持力や応力は，クラ

スプ機能を長期にわたって確保するうえで重要な力学的因子であることから，クラスプの湾曲が剛性や応力に及ぼす影響を明らかにすることは重要であると思われる。

従来，クラスプの剛性あるいは応力の研究は主に二次元的な方法で行われ^{4~10)}，クラスプの着脱操作による維持力の検討も，もっぱらサベイレインを直線的に横切るタイプの最も単純なアーム形態で行われてきた^{11,12)}。したがって，クラスプの湾曲の違いがその剛性や応力に及ぼす影響に関しては全く不明である。

本研究では，変位と応力を同時に検討できる点で有利である三次元有限要素法を用いて，異なるクラスプアームの湾曲と剛性および応力との関係について構造力学的立場から検討を行った。

広島大学歯学部歯科補綴学第一講座
Department of Removable Prosthodontics, Hiroshima University School of Dentistry
平成6年8月10日受付

図 1 クラスプアームの解析モデル

R : 曲率半径, θ_1 : 曲率角度
 uz : クラスプアームの支台歯に沿った中心軸の基部から先端までの歯軸方向 (z 方向) の距離
 Analyzing model of clasp arm
 R : Curvature radius of clasp arm
 θ_1 : The angle subtended by the clasp arm
 uz : Tooth-axis-directional (z-directional) distance between the base of the clasp arm and the tip of the arm

図 2 有限要素モデル

モデル先端の内側の中心軸上の節点に、支台歯の外側に向かって垂直に 5 N の荷重を負荷し、基部の節点を完全に拘束した
 Finite element model
 A concentrated load of 5 N was applied to the inner tip node on the neutral axis of the clasp arm in a radial direction. All nodes at the bases of the clasp arms were restrained in all directions

II. 材料と方法

解析モデルとしては、円柱形の支台歯周囲をエーカースクラスプのアームが取り巻いているものを設定し (図 1) (R : クラスプアームの曲率半径, uz : クラスプアーム中心軸の基部から先端までの歯軸方向の距離, θ_1 : クラスプアームが支台歯を取り囲む角度 (曲率角度)), これを基に三次元有限要素モデル (図 2) を作成した。有限要素モデルの要素には 8 節点 6 面体固体要素を用い、要素数は 528 から 912, 節点数は 805 から 1,365 で、それぞれをクラス

図 3 解析 1 のクラスプアームの中心軸の走行の展開図
 Development figure of the neutral axis of clasp arm in Analysis 1

プアームの支台歯上の中心軸の長さに比例させて変化させた。クラスプモデル先端の内側の中心軸上の節点に、支台歯の外側に向かって垂直に 5 N の荷重を負荷し、クラスプの基部の 35 個の節点を完全に拘束した。また、材料定数は Co-Cr 合金 Vitallium (Austenal Products Laboratories, USA) を想定し、ヤング率 218 GPa¹³⁾, ポアソン比 0.33 とした。

上記の条件で、以下に示すモデルについてクラスプアーム先端の変位量と応力を算出した。なお、クラスプアーム先端の変位量は支台歯の歯軸と垂直な平面 (x-y 平面) 内の変位量を用い、応力には von Mises の相当応力を用いその最大値を算出した。また、有限要素プログラムは COSMOS/M (横川技術情報社製) を用い、計算はパーソナルコンピュータ (PC-9801 ES 5, 日本電気社製) により行った。

1. 解析 1 クラスプアームの基部と先端の位置が同じで湾曲が異なる場合 (長さが異なる場合)

図 3 に、クラスプアームの支台歯に接する中心軸の走行を展開図で示した。図の縦軸はアームの基部からの歯軸方向への距離 (z) を、横軸は歯軸と垂直な平面内での支台歯周囲の角度 (θ) である。中心軸は以下の数式で表すことができる曲線とした。

$$\begin{cases} x = R \cdot \cos \theta \\ y = R \cdot \sin \theta \\ z = A \cdot \sin \theta + uz \cdot \theta / \theta_1 \end{cases}$$

ここに、A はクラスプアームの走行曲線の z 座標のサインカーブの係数である。図 3 で係数 A が 0 の場合が直線 $z = uz \cdot \theta / \theta_1$ である。

本解析では、小臼歯のクラスプアームを想定し、曲率半径 (R) を 4 mm¹⁴⁾ とした。また中心軸の基部から先端までの歯軸方向の距離 (uz) と曲率角度 (θ_1) は、臨床的に標準的と考えられる 3 mm, 120° とした。

本解析では、クラスプアームの湾曲は走行曲線の z 座標のサインカーブの係数 A を 0, 1, 2, 3 とし、4 通りに変

表 1 解析 1 のクラスプアームの寸法

Dimension of clasp arms in Analysis 1

Clasp pattern	中心軸の長さ	t_1	t_2	w_1	w_2
Non-tapered	8.9	0.71	0.71	1.42	1.42
	10.4	0.71	0.71	1.42	1.42
	12.5	0.71	0.71	1.42	1.42
	15.0	0.71	0.71	1.42	1.42
Original 1	8.9	0.76	0.61	1.53	1.22
	10.4	0.78	0.61	1.56	1.22
	12.5	0.82	0.61	1.65	1.22
	15.0	0.87	0.61	1.73	1.22
Original 2	8.9	0.67	0.54	2.02	1.61
	10.4	0.69	0.54	2.08	1.61
	12.5	0.73	0.54	2.18	1.61
	15.0	0.76	0.54	2.29	1.61
Rapid	8.9	0.92	0.64	1.16	0.80
	10.4	0.97	0.64	1.22	0.80
	12.5	1.04	0.64	1.30	0.80
	15.0	1.12	0.64	1.40	0.80

unit : mm

 t_1 : クラスプアームの基部の厚さ, t_2 : クラスプアームの先端の厚さ w_1 : クラスプアームの基部の幅, w_2 : クラスプアームの先端の幅 t_1 : Thickness of the base, t_2 : Thickness of the tip w_1 : Width of the base, w_2 : Width of the tip

化させた。係数Aが0の場合、アームの走行は直線的で最短となり、係数Aが3の場合ではアームの湾曲が最も大きくなり最長となる。クラスプアームの中心軸の長さは、それぞれ、8.9 (最短)、10.4、12.5、15.0 mm (最長) とした。これら4通りの湾曲の場合における以下の4種類の寸法のクラスプパターンを設定して、解析を行った。

1) Non-tapered clasp pattern (Non-tapered と略す) : クラスプアームの基部から先端までが同じ寸法 (パターンの先端と基部の寸法比 (これをテーパ比とよぶ) は1)で、断面形態は半円形 (断面の厚さと幅の寸法比 (T/W ratio) は0.5)。

2) Original clasp pattern 1 (Original 1 と略す) : 直線的に走行する場合 (最短の場合) のクラスプアームでテーパ比が0.8、断面形態が半円形 (T/W ratio が0.5) のもの。すなわち、Original clasp pattern (以下 Original と略す) として最短の8.9 mm の場合にはパターンの先端と基部の寸法比が8:10 (テーパ比が0.8) で、パターンが長くなる場合には先端の寸法は同じで基部の寸法がこの単位長さあたりの比率で大きくなり、長いパターンほどテーパ比が小さくなる独自のパターンを設定した。

3) Original clasp pattern 2 (Original 2 と略す) : Original 1 と同じテーパ比をもち、断面形態の厚さが薄く幅が広い (T/W ratio は1/3) のもの。

4) Rapid flex pattern (Rapid と略す) : 既製のワックスパターン (Rapid flex pattern®, デグサ社製¹⁵⁾) の先端をカットせず、そのままアーム先端からパターンを耐火模

図 4 解析 2 のクラスプアームの中心軸の走行の展開図

Development figure of the neutral axis of clasp arm in Analysis 2

表 2 解析 2 のクラスプアームの寸法

Dimension of clasp arms in Analysis 2

Clasp pattern	中心軸の長さ	t_1	t_2	w_1	w_2
Non-tapered	12.5	0.71	0.71	1.42	1.42
Original 1	12.5	0.82	0.61	1.65	1.22
Original 2	12.5	0.73	0.54	2.18	1.61
Rapid	12.5	1.04	0.64	1.30	0.80

unit : mm

 t_1 : クラスプアームの基部の厚さ, t_2 : クラスプアームの先端の厚さ w_1 : クラスプアームの基部の幅, w_2 : クラスプアームの先端の幅 t_1 : Thickness of the base, t_2 : Thickness of the tip w_1 : Width of the base, w_2 : Width of the tip

型に接着して埋没・鋳造してアームを製作した場合を想定したもの。Rapid では直線的に走行する場合 (長さが最短の場合) のクラスプアームのテーパ比は約0.7で、T/W ratio はすべて0.8であり、アーム先端の厚さは0.64 mm で幅は0.80 mm である。

Rapid 以外のクラスプパターンの寸法は、直線的に走行するクラスプアームの先端に5 Nの荷重を負荷した場合の先端の変位量が Rapid を用いた場合と同一となるように設定した。クラスプアームのたわみにくさを表す剛性は維持力に比例する^{1,2)}ので、直線的なクラスプアームでは各クラスプパターンの維持力は同一である。表1にこれらの16通りのモデルの寸法を示した。

2. 解析 2 クラスプアームの基部の位置および長さが同一で湾曲が異なる場合 (先端の位置が異なる場合)

解析1で設定した4種類のクラスプパターンについて湾曲が異なる場合の解析を行った。アームの寸法は、長さが中程度のものを用いた。アームの先端は解析1の係数Aが0の場合の直線上にあり、曲率角度は100°, 120°, 140°, 160°とした。これらの場合、クラスプアームの中心軸の基部から先端までの歯軸方向の距離 (uz) は曲率角度の変化に応じてそれぞれ2.5, 3, 3.5, 4 mmに、また、サインカーブの係数Aは3.01, 2.00, 1.17, 0.386となる。

荷重条件、拘束条件および曲率半径Rは解析1の場合と同様である。解析2のクラスプアームの支台歯に接する中心軸の走行は図4に、各モデルの寸法は表2にそれぞれ示した。

III. 結 果

1. 解析1

図5にクラスプアーム先端の変位量を、図6にアームに生じる相当応力の最大値を示した。これらの図では横軸はクラスプアームの中心軸の長さであり、歯軸方向の湾曲はアームの長さが長くなると大きくなることになる。

Non-taperedではアームが長くなると先端の変位量(維持力を得るのに必要なアンダーカット量)が大きくなり、それに対応してアームに生じる応力も大きくなった。すなわち、クラスプアームの長さが1.7倍(最長のアームと最短のアームの長さの比)になると変位量は約2倍に、この時アームに生じる応力の最大値は1.5倍になった。一方, taperを有する3種類のクラスプアームでは、長さが長くなるのに伴い変位量はわずかに大きくなった。また、これらのクラスプアームのうち、2種類のOriginalでは応力はほとんど変化しなかったが、Original 2 (T/W

ratioが1/3)のほうがOriginal 1 (T/W ratioが1/2)よりも応力の最大値は常に小さかった。Rapidではクラスプアームの長さが長くなるのに伴い応力の最大値は小さくなった。また、クラスプアームの走行が直線的な場合にはRapidでは2種類のOriginalよりも応力が大きかったが、湾曲が大きくなるとOriginal 1と応力はほぼ同じになった。

2. 解析2

図7にクラスプアーム先端の変位量を、図8にアームに生じる相当応力の最大値を示した。これらの図では曲率角度が小さくなると湾曲は大きくなる。

クラスプアーム先端の変位量はNon-taperedでは他の3つのパターンの1.2倍から約1.5倍の値を示したが、他のクラスプパターンの間ではほとんど差はなかった。各クラスプパターンとも曲率角度が大きくなるとアーム先端の変位量は大きくなったが、曲率角度が160°の場合(湾曲が一番小さくなり直線に近くなった場合)に変位量は急激に大きくなった。応力の最大値は、曲率角度が大きくなるといったん小さくなって曲率角度が120°あるいは140°で最小となり、曲率角度が160°では再び大きくなった。taperを有するクラスプパターンでは曲率角度が120°と

図5 解析1: クラスプアーム先端の変位量
Analysis 1: Displacement of the tip of clasp arm

図7 解析2: クラスプアーム先端の変位量
Analysis 2: Displacement of the tip of clasp arm

図6 解析1: クラスプアームに生じる相当応力の最大値
Analysis 1: Maximum value of equivalent stress in clasp arm

図8 解析2: クラスプアームに生じる相当応力の最大値
Analysis 2: Maximum value of equivalent stress in clasp arm

140° の場合とで応力の差はほとんどなかった。応力の最大値は、Non-tapered が taper を有するクラスプパターンよりも大きかった。Original (特に、Original 2) では応力は常に小さかったが、Rapid では曲率角度が 160° になると応力の最大値は急激に大きくなった。

IV. 考 察

1. 研究方法について

1) クラスプアームの応力の均一化について

クラスプアームの応力は弾性限を越えないように設定することが必要である。また、疲労の影響も考慮する必要がある¹⁶⁾。朝原¹⁷⁾は、クラスプアームの応力はほとんどの場合、弾性限と疲労限度(弾性限の約 1/2¹⁸⁾)との間に設定せざるを得ないため、アームの破折の危険性を低下させ義歯の予後を向上させるためには、応力分布を均一化し応力値が可及的に小さくなるようにアームの寸法を設定することが必要であると述べている。また、奥野¹⁾も応力集中がみられない均等な応力分布状態がキャストクラスプとして望ましい形態であると述べている。以上より、クラスプアームの設計にあたっては、応力分布の均一化により応力を可及的に小さくすることがきわめて重要であると考えられる。

2) クラスプアームの三次元的走行について

Watt ら³⁾は鑄造クラスプのアームがサベイラインを直線的に横切るのは誤りで、アームの形は L 字型になるほど応力集中によるアームの破折を防止するうえで効果的であって、その理由は、アームの上方の堅固な部分の金属のねじり弾性により先端の水平アームに大きな弾性が与えられ、アーム全体にわたって応力が分散されることによると説明している。さらに、垂直的あるいは水平的にアンダーカットに入る直線的なアームは好ましくなく、またできるだけ長く製作すべきであることを強調している。Renner ら¹⁹⁾は、直線的に走行させたクラスプアームは弾性に欠けるので、アームを湾曲させて弾性を向上させるべきだと述べている。しかし、クラスプに関する従来の研究は、アームがサベイラインを直線的に横切ったモデルを使用したものが大部分であり、これらの考えの根拠を証明できるものとはいえない。また、現在発表されているクラスプアームの設定システムもアームの歯軸方向の湾曲については考慮されていない。

解析 1 では臨床的な状況を想定し、クラスプアームの基部と先端の位置を同一として、アームの走行を変え長さを変化させた場合を解析した。しかし、クラスプアームの歯軸方向の湾曲により長さが違うため、アームの湾曲によるねじり弾性の影響は不明である。そこで、解析 2 では必ずしも臨床的ではないが、ねじり弾性の影響を検討するためのシミュレーションとして、同じ長さのクラスプパターン

について、クラスプアームの基部の位置が同じで先端の位置が異なる 4 通りの走行のアーム(曲率角度が異なる)の同一荷重時のアーム先端の変位および応力を解析した。

3) クラスプパターンについて

クラスプアームの形態について McCracken の教科書²⁰⁾では、断面形態が半円形でテーパ比はアームの長さの先端 1/10 の点の幅が基部の 1/2 となるものが良いと述べている。多くの研究者^{5,21)}はアームに taper を付与すべきであると述べているが、望ましいテーパ比の値に関しては湯浅ら²²⁾が二次元有限要素解析によりテーパ比が約 0.8 のアームが最も均一な応力を示したと報告しているのみである。また、現実に市販されている既製のクラスプパターンのテーパ比にも様々なものが含まれている²³⁾。それに対して、Morris ら²⁴⁾および Lemmens ら²⁵⁾は基部から先端まで同じ寸法のアームの方が taper を有するアームより均一な応力を示したと報告している。一方、断面形態に関しては、半円形が望ましいとされている⁵⁾が、応力の面からの検討は少なく、市販されている既製クラスプパターンの断面形態にも様々なものがある²³⁾。

そこで今回は、解析条件として以上の形態を含んだ 4 種類のクラスプパターンを設定した。解析 1 では、クラスプアームの中心軸を規定する曲線の 2 座標のサインカーブの係数 A が 0 の場合(クラスプの走行曲線が最短)にアームに 5 N の荷重を负荷した場合の先端の変位量が各パターンで同一となるように寸法を設定した。したがって、最短距離のクラスプアーム(係数 A が 0 の場合)は 4 種類のクラスプパターンで剛性が同一であり、剛性に比例する^{1,2)}クラスプの維持力も同一である。Non-tapered の T/W ratio は一般に標準とされている半円形^{5,20)}とした。また、Original のテーパ比は係数 A が 0 の場合に同一の剛性のもとで応力が最小となるテーパ比である 0.8²²⁾とした。また、断面に関しては、剛性が同一のクラスプでは厚さが薄く幅が広いほど応力が小さくなる²²⁾ことから、標準の半円(T/W ratio=1/2)(Original 1)とそれより厚さが薄く幅が広い断面(T/W ratio=1/3)(Original 2)の 2 種を設定した。さらに、既製クラスプパターンとして、直線的な走行のアームのテーパ比が約 0.7、T/W ratio が 0.8 の臨床で頻用されている Rapid flex pattern[®]を選択した。

解析 2 では、同じ長さのクラスプパターンの湾曲の相違による影響を検討したが、この際アームの長さは、12.5 mm(解析 1 の係数 A が 2 の場合)とした。アームの走行を変えるためのパラメータとしては曲率角度を用い、クラスプアーム先端の位置を解析 1 の最短距離で走行する場合の直線上にくるように設定した。したがって、曲率角度が変わるとクラスプアーム先端の位置も異なる。臨床的には、クラスプアームの先端の位置が異なるとアンダーカット量も異なり維持力に影響が出るが、本解析では円柱形の

支台歯を想定していることから、この影響は無視してさしつかえないと考えている。

4) 支台歯の形態について

本解析では支台歯の形態を円柱形とし、歯軸方向の曲率は設定しなかった。実際の支台歯には豊隆がありクラスプアーム先端はアンダーカットに入ることから、支台歯の歯軸方向の曲率は重要であることは疑いない。しかし、この曲率は、支台歯の周囲の位置によって異なることおよび本解析はクラスプアームの歯軸方向への湾曲に主眼をおいた検討であることなどから、パラメータの数を増やして解析を複雑化することを避けた。また、同様の理由で今回は支台歯としてアームの基部と先端とを結んだ線がほぼ円弧を描く小白歯を想定し、形態が複雑である大白歯については検討していない。解析1ではクラスプアームの中心軸の基部から先端までの歯軸方向の距離 uz およびクラスプアームの曲率角度 θ_1 は臨床的な値を設定した。

2. 研究結果について

1) 解析1

基部から先端まで同じ寸法のクラスプアーム (Non-tapered) ではアームの湾曲が大きくなると先端の変位量が急激に増加した。これは、アームの長さが長くなる一方で基部の断面の寸法が変わらなかったため、結果としてアームの剛性が小さくなったと考えられる。

一方、taper を有する3種類のクラスプアームではアームの歯軸方向への湾曲を変えても先端の変位量に影響は小さく、それぞれのパターン間でもアームの先端の変位量の違いはほとんど認められなかった。走行が直線的な場合 (係数 A が0の場合) のテーパ比は Original で0.8, Rapid で約0.7であり、この差が小さいため taper を有する各パターン間で剛性に大きな差が生じなかったものと考えられる。今回の解析条件では、taper を有するクラスプアームでは先端の寸法は同じで基部の寸法がこの単位長さあたりの比率で大きくなるようにアームの長さを長くした。こうした設定により、クラスプアームの湾曲を大きくした場合、アームが長くなり基部の断面が大きくなるため、アームの剛性がほとんど変化しなかったものと思われる。

基部から先端まで同じ寸法のクラスプアーム (Non-tapered) ではアームの歯軸方向の湾曲が大きくなるとアーム先端の変位量が大きくなり応力も大きくなった。すなわち、このアームでは他のタイプと同じ剛性を得るためにより大きなアンダーカットが必要であり、生じる応力も大きくなる。したがって、Non-tapered ではクラスプアームを直線的に使用した方が応力を小さくするうえで有利であり、前歯部に用いられるクラスプの場合の歯頸部に沿わせるような使い方は応力の点では好ましくないものと考えられる。

Original ではクラスプアームの歯軸方向の湾曲を変えてもアーム先端の変位量にあまり変化はなく、応力も常に小さかった。断面形態に関しては、どちらの形態の場合もほぼ同一の剛性を示したが、応力は断面の幅が広く厚さが薄い方 (Original 2: T/W ratio が1/3) が小さく、湯浅ら²²⁾および Morris ら²³⁾の報告とよく一致した。断面形態が応力に及ぼす影響は、歯軸方向への湾曲を変え長さを長くしても同様であった。以上より、クラスプアームの歯軸方向の湾曲や長さにかかわらず、T/W ratio が小さい方が応力が小さいことが判明した。

Rapid ではクラスプアームの湾曲が大きくなりテーパ比の値がさらに小さくなると、応力は小さくなり Original 1 とほぼ同じとなった。これは、Rapid では先端と基部の寸法の差が大きいためクラスプアームの長さが増すと、基部の寸法がより大きくなることによると考えられる。したがって、Rapid ではクラスプアームの歯軸方向の湾曲が応力を小さくするうえに有利であると考えられた。

以上より、今回の解析で用いたクラスプパターンの中では、Original 1 が歯軸方向への湾曲を考えずに設計できる点で臨床上有利であると思われる。

2) 解析2

クラスプアームの長さを一定とした場合には、応力はアームが中程度の湾曲の場合 (曲率角度が120°あるいは140°) に最小となった。さらに、湾曲が大きくなるほどアーム先端の変位が大きくなったことから、同一剛性のもとでもこの傾向は認められた。これはアームに適度の湾曲を与えることにより、応力を均一化するといわれるねじり弾性の効果が生じたことによるものと思われる。

V. 結 論

三次元有限要素法を用いて、クラスプアームの三次元的走行がクラスプアームの剛性および応力に及ぼす影響について検討し、以下の結論を得た。

1. クラスプアームの長さを長くすることによる歯軸方向への湾曲は、クラスプの剛性および応力に次のような影響を与えた。

1) 基部から先端まで同一の寸法のクラスプアームではアームの湾曲が大きくなると剛性がかなり小さくなった。また、アームの歯軸方向への湾曲を小さくして直線的にした方が応力を小さくするうえで有利であった。

2) テーパー比が直線的な走行では0.8となるように設定した Original clasp pattern は、湾曲による剛性への影響が小さく、応力も常に小さかった。

3) テーパー比の値が小さいクラスプ (Rapid flex pattern[®]) は湾曲による剛性への影響は小さかった。また、湾曲を大きくした方が応力を小さくするうえで有利であった。

2. クラスプアームの長さを一定とした場合には、アームに適度の湾曲を与えることにより応力が小さくなった。これは応力を均一化するといわれるねじり弾性の効果によるものと思われる。

以上より、クラスプアームの長さおよびアームの湾曲が応力に及ぼす影響が明らかとなった。

文 献

- 1) 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.
- 2) Nokubi, T., Ono, T., Morimitsu, R. et al : Development of a rational fabricating system for cast clasps, J Osaka Univ Dent Soc, 27 : 175～187, 1987.
- 3) Watt, D.M. and MacGregor, A.R. (小林義典，鳥居建吾) : Designing partial denture (パーシャルデンチャーの設計，85～86，医歯薬出版，東京，1986)，1984.
- 4) Bates, J.F. : The mechanical properties of the cobalt-chromium alloy and their relation to partial denture design, Br Dent J, 119 : 389～396, 1965.
- 5) 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.
- 6) Morris, H.F., Farah, J.W., Craig, R.G. et al : Stress distribution within circumferential clasp arms, J Oral Rehabil, 3 : 387～394, 1976.
- 7) 野首孝祠，堤 定美，山賀 保ほか：クラスプの力学的研究 第1報 有限要素法の適応性，補綴誌，19 : 611～617, 1976.
- 8) 山賀 保，堤 定美，野首孝祠ほか：クラスプの力学的研究 第2報 鉤腕の外形・寸法について，補綴誌，19 : 618～626, 1976.
- 9) Johnson, D.L., Stratton, R.J. and Duncanson, Jr., M.G. : The effect of single plane curvature on half-round cast clasp, J Dent Res, 62 : 833～836, 1983.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 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) Wheeler, R.C. : Textbook of dental anatomy and physiology, 193～200, 3rd ed., W.B. Saunders, Phila., 1958.
- 15) O'doherty, M. : Predictable retention for removable partial dentures, Dent Tech, 40 : 4 suppl. 4～9, 1987.
- 16) Earnshaw, R. : Fatigue tests on a dental cobalt-chromium alloy, Br Dent J, 110 : 341～346, 1961.
- 17) 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.
- 18) 中沢 一，本間寛臣：金属の疲労強度，23～32，養賢堂，東京，1982.
- 19) Renner, R.P. and Boucher, J. : Removable partial denture, 90～91, Quintessence Publishing, Chicago, 1987.
- 20) Henderson, D. and Steffel, V.L. : McCracken's removable partial prosthodontics, 65～66, 5th ed., C.V. Mosby, St Louis, 1977.
- 21) J.M. Ney Company : Ney surveyor manual, 64～67, J.M. Ney Company, Bloomfield, 1964.
- 22) 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—最小応力を示す鉤腕の形態について—，補綴誌，35・85 回特別号 : 94, 1991.
- 23) Morris, H.F., Asgar, K., Brudvik, J.S. et al : Stress-relaxation testing Part IV : Clasp pattern dimensions and their influence on clasp behavior, J Prosthet Dent, 50 : 319～326, 1983.
- 24) Morris, H., Farah, J.M., Craig, R.G. et al : Stress distribution with in circumferential clasp arm, J Oral Rehabil, 3 : 387～394, 1976.
- 25) Lemmens, P.H., 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.