自家製スタッドアタッチメントに関する研究

第3報 金属の材質が疲労に及ぼす影響について

川畑 直嗣 濱野 徹 平井 直 長岡 英一

Study on Laboratory-Made Stud Attachment

Report III. Effect of kinds of metal alloys on Fatigue

Naotsugu Kawahata, Tohru Hamano, Sunao Hirai and Eiichi Nagaoka

Abstract : We investigate an adequate method for clinical application of a laboratory-made stud attachment reported formerly. This study was taken to know effects of kinds of metal alloys used for this attachment on its fatigue. 4 kinds of alloys and 14 kinds of assemblies were selected for the male casts (undercut of 0.25 mm) and the female wrought wires (diameter of 0.8 mm) of 5 mm and 7 mm length. 10,000 cycles of engaging and disengaging induced different fatigue in relation to respective characteristics of alloys.

The results :

1. Initial retentive force in Co-Cr female is approximately 1.6 times amounts of the one in Pt-Au and 14 K female which is approximately 1.1~1.2 times amounts of the one in Pd-Ag female. The initial retentive force in 7 mm length is approximately 1/2 amounts of the one in 5 mm length.
2. Abrasion of male, deformation of female and strain hardening of male and female affect on the consequent decrease in retentive force.
3. Strain hardening seems to induce decrease in abrasion of male and decrease in flexibility of female.
4. Decrease in retentive force is caused mainly by abrasion of male.

Key words : laboratory-made stud attachment, abrasion of male, deformation of female, decrease in retentive force, kind of metal alloy

緒 言

維持装置は義歯の維持, 安定と残存組織の保護の観点から選択, 適用されるべきである。したがって, 維持装置の負担性があらかじめ判っていることは大切である。そこで, これまでスナップ状のメールと鉤用線を屈曲し

て作製するフィメールとを組合せた自家製スタッドアタッチメントに関して, メールとフィメールとの条件を規定することによって, 維持力が規格化できることを明らかにした¹⁾。また, その結果, 長期臨床使用によるアタッチメントの疲労とそれに伴う維持力の減衰について検討する必要性を認めた。そこで, まず, これらの変化が少ないと考えられる鑄造用金合金タイプ IV と鉤用白金合金金線をメールとフィメールの材質として選び, 1万回の反復着脱試験を行った。その結果, アタッチメントにはかなりの疲労と維持力の減衰が生じることが判明した²⁾。

鹿児島大学歯学部歯科補綴学講座 2 (主任: 長岡英一教授)
The 2nd Department of Prosthetic Dentistry, Kagoshima
University Dental school (Chief: Prof. Eiichi Nagaoka)
昭和 62 年 6 月 4 日受付

Fig. 1 Form of male (mm) and measuring point for abrasion of male (W)

Fig. 2 Forms of females (mm) and measuring point for permanent deformation of female part

Diameter : 0.8 mm

D1 : distance between two tips of female ; evaluation of permanent deformation

D2 : Maximum width of curvature (contact point with male) ; evaluation of effective undercut

今回は、このアタッチメントの長期使用に耐えるメールとフィメールの材質を検討するために、種々の合金で作製したメールとフィメールを同種合金、異種合金種々に組合せて、1万回の反復着脱試験を行った。

実験材料および方法

メールとフィメールはこれまで^{1,2)}と同じ形態(図1, 2)に作製し、第2報²⁾と同じ方法で、引張り試験と反復着脱試験を行い、維持力、メールの摩耗ならびにフィメールの変形を計測した。

1. 実験材料

1) メールの材質

アンダーカットは 0.25 mm とした。鑄造用合金の材

Table 1 7 kinds of combination

Male	:	Female
Co-Cr	:	Co-Cr
Pd-Ag	:	Co-Cr
Pt-Au	:	Co-Cr
Pd-Ag	:	Pd-Ag
Pt-Au	:	Pt-Au
Pt-Au	:	14K
14K	:	14K

質として、コバルトクロム合金(松風スマロイコバルト, 以下 Co-Cr), 金合金タイプ IV (GC キャスティングゴールドタイプ IV, 以下 Pt-Au), 14 K 金合金 (GC K. 14 M.C. ゴールドアロイ, 以下 14 K) および金銀パラジウム合金 (GC キャストウエル M.C. : 金 12%, 以下 Pd-Ag) の 4 種類を選んだ。メーカーの指示通りに鑄造し熱処理を施した。

2) フィメールの材質

鉤用合金線の材質として、コバルトクロム合金(三金コバルトクロム鉤用線, 以下 Co-Cr), 白金加金 (GC 白金加金ワイヤー, 以下 Pt-Au), 14 K 金合金 (GC K. 14 M.C. ゴールドワイヤー, 以下 14 K) および金銀パラジウム合金 (GC アローワイヤー : 金 12%, 以下 Pd-Ag) の 4 種類を選んだ。直径 0.8 mm の鉤用線を屈曲し、長さを 5 mm と 7 mm に調整しメーカーの指示通りに熱処理を施した。

3) メールとフィメールの材質の組合せ

アタッチメントの金属材料として日常臨床に用いられると考えられる 4 種の合金と 7 種の適用法を選んだ(表 1)。5 mm と 7 mm を合わせると 14 種の組合せができる。

2. 実験方法

維持力測定のための引張り試験、反復着脱試験ならびにメールの摩耗量とフィメールの永久変形量の測定方法は第2報と同じ方法で行った(図1, 2)。今回第2報と異なったのはつぎの点である。

1) フィメールの計測値として永久変形としての先端間距離だけでなく相対的アンダーカット量計測のためのメールとの嵌合部における最大幅径(図2)の変化を検討した。

2) 引張り試験と反復着脱時におけるメールとフィメ

Fig. 3 Relation between male and female during test

1. male
2. female
3. resin block to keep definite relation of position between male and female

ールの嵌合位置を実験中一定に保つために、メールとフィメールとを嵌合させた状態で個々の組合せごとにレジブロックを作製した(図3)。

3) 維持力の計測装置は島津オートグラフ AG-A 型(図4)を用いた。

実験結果

初期維持力(初回着脱10回の6~10番目の5記録の平均)および1万回反復着脱に伴う規定回数着脱後における維持力(着脱10回の記録の平均)、メールの摩耗量、フィメールの永久変形量の測定結果ならびにアンダーカットの相対的減少量の算出結果を図5~12に示す。

1. 維持力について

1) 初期維持力

維持力は5mm, 7mmともにその大きさによって2大別でき、これらの間には有意差が認められる。維持力が大きいのはすべてフィメールの合金がCo-Crである。維持力が小さい方には2種の金合金と1種の銀合金のフィメールが含まれるが、おおむね維持力の大きさは金合金ではほぼ同じで、銀合金はこれより若干小さい。維持力の大きさはCo-Crグループにおいては5mmで約680g, 7mmで約350gであり、金合金グループにおいては5mmで約430g, 7mmで約220g, 銀合金においては5mmでは364g, 7mmで196gである。3者とも維持力は7mmで5mmの約50%である。さらに、Co-Crグループの維持力は5mm, 7mmともに金合金グループ

Fig. 4 Universal testing machine (type AG-A, Shimadzu, Kyoto, Japan)

の約1.6倍である。また、金合金の維持力は5mm, 7mmともに銀合金の約1.1~1.2倍である。

2) 維持力の減衰()内の%は初期維持力に対する10,000回後の維持力の割合を示す)

10,000回後の維持力の大きさは減衰量が最も大きい5mmのPt-Au:Co-Cr(male:female, 以下これを組合せの表記法とする)を除くとCo-Crグループの方が金合金グループや銀合金よりも大きな維持力を保っている。また、Pt-Au:Pt-Auに比べPd-Ag:Pd-Agの維持力は、5mmでは大きい、7mmでは小さい。しかし、初期維持力では若干のバラツキはあるもののグループ内ではほぼ同じ大きさを示すCo-Crと金合金のフィメールのグループにおいて、メールあるいはフィメールの合金が異なると両グループにおいて維持力減衰の大きさに違いを生じている。5mmでは、両グループともにメールがPt-Auの場合に維持力減衰が大きく、10,000回後の維持力はPt-Au:Co-Crで約252g(37.7%), Pt-Au:Pt-Auで約189g(43.6%)である。逆に維持力減衰が少ないのはPd-Ag:Co-Cr, 14K:14Kであり、10,000回後の維持力はそれぞれ約501g(75.6%), 約292g(68.1%)である。また、Pd-Ag:Pd-Ag, Co-Cr:Co-Crでは10,000回後の維持力はそれぞれ約228g(62.6%), 約409g(57.9%)である。一方、7mmでは5mmに比べ減衰が小さく安定した維持力を示すが、やはりPt-Au:Co-Crの減衰(約59%)は大きく、Pd-Ag:Co-Crは5mmとは逆に最も維持力減衰(約58%)が大きい。これに対し減衰が小さいのは14K:14K(約80%)である。そこで、減衰量が5mmにおいて金合金グループで最も大きいPt-Au:Pt-AuとCo-Crグループで最も小さいPd-Ag:Co-Crならびに7mmにおいて最も小さいCo-Cr:Co-Cr(約72%)を除くと、Co-Cr

Fig. 5 Retentive force (5 mm)

Fig. 6 Retentive force (7 mm)

グループでは金合金グループに比べ維持力減衰が大きい傾向が見られる。また、14 K : 14 K の維持力は 5 mm では 5,000~10,000 回で増大し、7 mm では 1,000~3,000 回で増大した後減少するものの 10,000 回後でも 1,000 回後とほぼ同じ大きさである (図 5, 6)。

2. フィメールの永久変形量について

1) 初回着脱 (10 回)

永久変形量は、5 mm ではフィメールが Co-Cr グループよりも金合金グループにおいてやや小さい傾向を示

し、Pt-Au : Pt-Au の変形が最小 (約 14 μ) である。一方、7 mm では 5 mm よりも変形量が小さく、グループ間の差も 5 mm ほどではない。また、銀合金 Pd-Ag : Pd-Ag の変形量は 5 mm では金合金グループとほぼ同じであるが、7 mm では Co-Cr グループとほぼ同じである。

2) 10,000 回反復着脱

5 mm では両グループ内においてフィメールあるいはメールの合金の違いによりフィメールの変形量に差を生じ、10,000 回後の変形量ではグループ間の差が明確でな

Fig. 7 Permanent deformation (5 mm)

Fig. 8 Permanent deformation (7 mm)

い。しかし、最も変形が少ない Pd-Ag : Co-Cr の変形量 (約 71 μ) は、金合金の中で変形が小さい 14K : 14K と Pt-Au : Pt-Au の変形量 (順に約 71 μ , 72 μ) とほぼ同じである。この Pd-Ag : Co-Cr と金合金グループの中で変形が大きい Pt-Au : 14K を除くと、Co-Cr グループの方が金合金グループよりも変形が大きい傾向を示す。中でも Co-Cr : Co-Cr の変形量 (約 147 μ) は最大である。また、Pd-Ag : Pd-Ag の変形は金合金グループ

よりも若干大きい。一方、7 mm での 10,000 回後の変形量は 5 mm より小さい。また、Co-Cr グループでは 5 mm で最大の変形量を示す Co-Cr : Co-Cr は 7 mm では逆に変形量は小さく (約 46 μ)、量的には 5 mm 同様変形が大きい Pt-Au : 14K より小さいが、金合金グループの同種同志の変形よりも大きい。また、銀合金 Pd-Ag : Pd-Ag は最大の変形量を示し、Co-Cr 合金よりも大きい (図 7, 8)。

Fig. 9 Abrasion of male (5 mm)

Fig. 10 Abrasion of male (7 mm)

3. メールの最大豊隆部の摩耗量について

1) 初回着脱 (10回)

フィメールは、初回ですでに変形を生じているのに対しメールはいずれもほとんど摩耗していない。

2) 10,000 回反復着脱

5 mm, 7 mm とともに Pt-Au のメールの摩耗量は対 14 K 以外は大きく、組合せたフィメール別の 10,000 回後の摩耗量は対 Co-Cr>対 Pt-Au>対 14 K である。特

に対Co-Cr の摩耗は最も大きく、5 mm では約 170 μ, 7 mm では約 86 μ である。逆に対 14 K の摩耗量は最も小さく、5 mm では約 23 μ, 7 mm では約 8 μ であり、Co-Cr:Co-Cr での Co-Cr のメールの摩耗よりも小さい。これに対し銀合金のメールにおけるフィメール別の摩耗量は、5 mm では対 Pd-Ag>対 Co-Cr, 7 mm ではほぼ同じである。つぎに、14 K のメールの摩耗は、5 mm, 7 mm とともにフィメールが異種よりも同種の場合の方が

大きい。また、同種での摩耗は、5 mm では $\text{Pt-Au} > \text{Pd-Ag}$ であるのに対し 7 mm では $\text{Pt-Au} < \text{Pd-Ag}$ であるが、14 K の摩耗量は 5 mm, 7 mm 共にこれらよりも小さい。

一方、フィメールが Co-Cr の場合における合金別のメールの摩耗量は、5 mm, 7 mm とともに $\text{Co-Cr} < \text{Pd-Ag} < \text{Pt-Au}$ である (図 9, 10)。

考 察

維持装置の選択にあたっては、維持力の大きさなどの負担性をあらかじめ知っておくことが大切である。すなわち、維持装置としては義歯の維持、安定の要件を具備した上で残存組織に為害性を及ぼさず、維持歯の歯周組織の状態など口腔内の条件にかなったものを選択する必要がある。維持装置の3要素のうち、支持や把持に比べ、維持は比較的規定し易いものと考えられる。しかしながら、既製のアタッチメントの維持力は同一種でも製品差が大きく³⁾、その維持力を調節することは困難である。また維持力は概して大きい。そこで、長岡はスナップ状のメールと鉤用線を屈曲して作製するフィメールとを組合せた自家製スタッドアタッチメントに関して、メールのアンダーカット量、フィメールの太さおよび長さを規定することによって、維持力が規格化できることを明らかにした¹⁾。また、その結果、長期臨床使用によるアタッチメントの疲労すなわちメールとフィメールの性状変化、メールの摩耗、フィメールの変形ならびにそれに伴う維持力の減衰について検討する必要性があることを認めた。そこで、まず、これらの変化が少ないと考えられる鑄造用金合金タイプ IV と鉤用白金合金線（メールとフィメールの材質として選び、アンダーカットが 0.25 mm のメールと 0.8 mm の鉤用線を 3, 5, 7, 10 mm の長さに調整して作製したフィメールの組合せについて、1万回の反復着脱試験を行った。その結果、いわゆる白金合金で作製されたアタッチメントでもかなりの疲労と維持力の減衰が生じることが判った²⁾。また、この条件では長さ 5 mm と 7 mm のフィメールが臨床応用可能であると判断した。今回は、このアタッチメントのメールとフィメールに使用し得る合金を市販合金の中から4種選び、長期使用に耐えるメールとフィメールの材質を検討するために、臨床応用可能と思われる同種ならびに異種合金の組合せを7種 (表1) 選定した。ただし、Pt-Au: Pt-Au については第2報の実験結果である。

1. 維持力について

今回の実験条件ではアンダーカットの大きさは 0.25 mm に規定してあるので、維持力についてはフィメールの弾性すなわちヤング率ならびにメールとフィメールに使用する金属間の摩擦力に依存すると考えられる。今回の実験結果はこの考えと一致する。

1) 初期維持力

維持力の大きさは 5 mm, 7 mm とともにフィメールに使用した合金の種類により3つに大別できる。すなわちフィメールの合金が Co-Cr グループ、金合金グループ、銀合金で維持力の大きさが異なる。これは合金のヤング率の違いによるものと考えられる。当然のことながら今回の Co-Cr グループではフィメールのヤング率がすべて同じで、他の合金の約2倍⁴⁾である。14 K と Pd-Ag のヤング率は Pt-Au よりやや高い⁴⁾がほぼ同じ大きさである。これが Co-Cr グループの維持力が他に比べ有意に大きい理由である。しかし、5 mm, 7 mm とともに Co-Cr グループの維持力は金合金グループの約1.6倍であり、金合金グループの維持力は銀合金の約1.1~1.2倍の大きさを示している。この Co-Cr の金合金に対する維持力の大きさはこれらのヤング率の大きさの比率から考えると若干小さい。これは本実験では初期維持力については10回の記録のうち漸減後安定する6~10番目の5記録の平均値としたことによるものと考えられる。すなわち、5回の着脱によりフィメールには永久変形が認められ、着脱により記録した維持力は着脱の影響を受ける前の規定通りに作製した当初の維持力よりも小さくなる。したがって、この維持力の減衰量は金合金よりも変形が大きい Co-Cr において大きくなる。これが 5 mm, 7 mm とともに維持力の大きさの比率がヤング率の大きさの比率よりやや小さい理由と考えられる。

以上の結果は松田⁵⁾の実験結果とほぼ一致する。松田は、鑄造鉤用金属材料として本実験と同様に4種の合金を選択し、抜去上顎第1大臼歯を鉤歯として鑄造レスト付き2腕鉤の引き抜き試験を行い、維持と弾性的性質の比較、検討を行っている。その結果によると、アンダーカットが 0.25 mm の場合の維持力は、Co-Cr で 2,430 g, 14 K で 1,040 g, 白金合金で 1,060 g, 金銀パラジウムで 960 g である。この結果は、われわれの結果と比べ、各維持力の数値は大きい。各合金間の維持力の大きさの違いの傾向にきわめて類似している。しかし、金合金に対する Co-Cr の維持力の大きさ (約2.4倍) はわれわれの結果 (約1.6倍) に比べ大きい。この原因としてつぎのような点が考えられる。すなわち、加工用合金 (フ

Fig. 11 Amount of effective undercut (5 mm)

Fig. 12 Amount of effective undercut (7 mm)

ィメール)と鑄造用合金(クラスプ), 支台歯(金属メー
ル)と鉤歯(天然歯)の形態と材質, 維持装置の形態お
よびアンダーカットの把持の仕方などにおける相違のほ
かに, さらに, 着脱 10 回の記録から初期維持力算出に
際しわれわれは 1~5 番目の記録を含まないのに対し松
田はこれを含むことである。
一方, グループ内での維持力のバラツキはフィメー
ルの合金のわずかなヤング率の違いと組合せるフィメー
ルおよびメールの合金の違いにより生じる金属間の摩擦力

の差ならびに 10 回の着脱によるフィメー
ルの変形の影響が考えられる。しかし, これらは, 1 秒間に 1 回の割
合の着脱速度による 10 回以内の着脱では, 同じヤ
ング率を持つグループ内における維持力に大きく影響するほ
どのアンダーカットの相対的な減少やメールとフィメー
ルの性状の変化を生じないものと考えられる。
2) 維持力の減衰
反復着脱後の維持力の大きさはその時の相対的なアン
ダーカットの大きさとフィメーの弾性およびメールと

Table 2 Correlation coefficient between decrease in retentive force and abrasion of male or deformation of female

Male : Female	R↔D		R↔A		D↔A	
	5 mm	7 mm	5 mm	7 mm	5 mm	7 mm
Co-Cr : Co-Cr	-0.74	-0.81	-0.80	-0.67	0.44	0.55
Pd-Ag : Co-Cr	-0.40	-0.67	-0.53	-0.80	0.38	0.34
Pt-Au : Co-Cr	-0.33	-0.64	-0.89	-0.77	0.37	0.51
Pd-Ag : Pd-Ag	-0.63	-0.82	-0.88	-0.78	0.56	0.67
Pt-Au : Pt-Au	-0.65	-0.20	-0.87	-0.77	0.46	0.33
Pt-Au : 14K	-0.39	-0.50	-0.35	-0.50	0.76	0.59
14K : 14K	-0.29	-0.31	-0.78	-0.03	0.25	0.49

R : retentive force

A : abrasion

D : deformation

フィメールの摩擦力の大きさによって決まるが、維持力の減衰の割合はフィメールが Co-Cr と金合金の各グループ内で異なり、さらに、10,000 回後の維持力と初期維持力のグループ間の比率が異なる。これは 1 秒間に 1 回の割合の着脱速度による多数回 (1,000, 2,000, 5,000) の連続反復着脱においては、10 回の単発着脱時には維持力に影響を及ぼさずに潜在していた各合金の性状の違いが、合金間の摩擦力や接触圧などメールとフィメールの接触関係に及ぼす影響の差を顕在化させ、摩擦による摩耗や加工硬化、変位による加工硬化などのメールやフィメールの質的、量的変化をもたらす。その結果、メールとフィメールの摩耗、フィメールの変形によるアンダーカットの相対的減少 (図 11, 12)、メールとフィメールの性状変化による金属間の摩擦力や弾性的変化などを生じる。これらの総和として維持力の減衰をもたらす、この大きさが各合金およびこれらの組合せにより異なるものと考えられる。

そこで、メールの摩耗およびフィメールの変形と維持力の減衰との個々の相関係数を求めると、維持力減衰はメールの摩耗とは高い相関を認めるが、フィメールの変形との相関は低い (表 2)。後者の原因としては、加工硬化の影響が大きいものと考えられる。すなわち、フィメールの変形そのものは維持力が減衰する原因ではあるが、加工硬化による弾性の減少がこれを相殺する因子として働くものと考えられる。もう一つの原因としてフィメールの変形の計測位置がメールと接触しない先端部であることが考えられる。

そこで、アンダーカット量の相対的減少量 (嵌合部におけるメールとフィメールの摩耗量およびフィメールの変形量の総和) と維持力の減衰との相関係数を求めた (表 3)。その結果、維持力の減衰はアンダーカット量の

Table 3 Correlation coefficient between decrease in retentive force and amount of effective undercut

Male : Female	R ↔ U.C.	
	5 mm	7 mm
Co-Cr : Co-Cr	0.91	0.74
Pd-Ag : Co-Cr	0.65	0.80
Pt-Au : Co-Cr	0.90	0.75
Pd-Ag : Pd-Ag	0.89	0.88
Pt-Au : Pt-Au	—	—
Pt-Au : 14K	0.48	0.41
14K : 14K	0.76	0.19

R : retentive force

U.C. : effective undercut

相対的減少量と高い相関がみられる。また、この相関関係はメールの摩耗と維持力減衰との関係ときわめて類似している。ただし、Pt-Au については第 2 報の結果の引用のため、アンダーカットの相対的減少量を算出評価していない。一方、14 K をフィメールとするものにおいて相関が低いのは、フィメールにも明らかに摩耗が認められる (図 13) ことから、その分メールの摩耗が小さくなっていることが考えられる。実際に 14 K のフィメールに対する 14 K と Pt-Au のメールの摩耗量は小さく、特に Pt-Au の摩耗量は Co-Cr のメールの摩耗量よりも小さい。しかし、フィメールが摩耗しても相対的なアンダーカット量は減少するはずであり、その意味からはアンダーカット量の相対的減少量と維持力減衰との相関が高くてよいはずであるが、メールの摩耗が比較的大きい 5 mm での 14 K : 14 K を除くと実際には低い。この原因としてはアンダーカットの相対的減少量と維持力の減

Fig. 13 Abrasion of female at concave site

衰量がともに小さいこともあるが、フィメールの加工硬化^{5,6)}の影響が大きいと考えられる。すなわち、フィメールの加工硬化がフィメールの弾性の低下をもたらす維持力の減衰を相殺する因子として働くものと推察される。実際、14 K : 14 K の維持力は、5 mm では 5,000~10,000 回で増大し、7 mm では 1,000~3,000 回で増大し、以後、維持力は再び減少するものの量的には少なく、10,000 回後も 1,000 回後とほぼ同じ大きさである。これはフィメールの加工硬化の影響と考えられる。松田⁵⁾の鋳造鈎についての研究でも 14 K は加工硬化を生じ易い合金である。

以上のことからこのアタッチメントの維持力減衰は主にメールの摩耗に起因するものと考えられる。また、メールとフィメールの合金が異種よりも同種の場合に、フィメールが 7 mm よりも 5 mm の場合に維持力の減衰とメールの摩耗との相関が高い傾向がある。このことからメールの摩耗は摩擦力と接触圧により影響されることが推察される。これは後述の摩耗の様相と一致する。さらに、Pt-Au のメールではフィメールが異種、同種あるいは長さ 5 mm、7 mm のいずれであってもメールの摩耗が大きく、維持力の減衰も大きい。特に 5 mm の Pt-Au : Co-Cr の変化は大きい。逆に Pd-Ag のメールに対し 5 mm の Co-Cr のフィメールを用いたときに最も安定した維持力を示す。これはこの場合メールの摩耗が小さく、アンダーカット量の相対的減少量が少ないためと考えられる。これは 5 mm で維持力減衰とメールの

摩耗量ならびにアンダーカット量の相対的減少量との相関が低い原因でもある。これをメールが Pt-Au および Co-Cr の場合と比較すると、Pd-Ag ではフィメールが同じ Co-Cr であっても、5 mm と 7 mm では全く逆の結果を示している。これは初期維持力（接触圧）に対するこの合金の特異な点であり、メールの摩耗の機構の複雑さを示しているものと考えられ注意を要する。

以上のことから、10,000 回後の維持力の大きさに関しては、反復着脱の結果到達したその時のフィメールの弾性と相対的アンダーカットの大きさおよび摩擦力の大きさの作用が総合されたものであり、維持力減衰に関しては初期のアンダーカットの大きさに対するフィメールのしなやかさならびに反復着脱に伴うアンダーカットの相対的減少量とフィメールのしなやかさの喪失度の反映と考えられる。このことは金合金グループの中で 14 K : 14 K と Pt-Au : Pt-Au を比較するとよくわかる。すなわち、14 K ではメールの摩耗が少なく、フィメールが加工硬化を生じ易く弾力が低下し、維持力減衰は少なく 10,000 回後の維持力は大きい。フィメールが折れ易い。これに対し Pt-Au ではメールの摩耗が大きく、フィメールがしなやかで加工硬化を生じにくく、維持力減衰が大きく 10,000 回後の維持力は小さい。フィメールは折れにくい。また、Pd-Ag : Co-Cr においては初期維持力（接触圧）がその後のメールの性状変化すなわちメールの摩耗を決定付ける大きな因子として作用し、ひいては維持力減衰に影響していることが推察される。

以上の結果の中には当初のわれわれの予測に反した興味深い知見も含まれており、長期にわたり安定した維持力を保持する観点からは、このアタッチメントのメールとフィメールの材質として同種金属の使用は避けるべきであり、特に Pt-Au は鋳造性、鋳造精度、耐腐食性、硬さ（硬化熱処理により向上）、弾性などの点で歯科用金属としては最も優れていると考えられているが、安定した維持力の観点からはメールの材質として適していないといえる。逆に、メールの材質としての Pd-Ag は、歯科用金属としては前述した点で Pt-Au に劣るものの、接触圧の大きさに特異な性質を示し、メールとしては、特に 5 mm の Co-Cr に限れば最適であるが、同じ Co-Cr でも 7 mm では全く逆で最も適さないといえる。

以上のことはつぎに考察するフィメールやメールの金属材料の性状の変化、フィメールの変形ならびにフィメールやメールの摩耗の機構の複雑さに起因するものと考えられる。

2. メールの摩耗量について

メールは初回の着脱ではほとんど摩耗しないが、反復着脱により摩耗し、着脱回数増加とともに摩耗量は増加する。そして、前述したようにメールの摩耗はアンダーカットの相対的減少とともに維持力減衰との相関係数が高く、このアタッチメントの長期使用による維持力減衰の最大の原因と考えられる。この維持力の減衰とメールの摩耗量およびアンダーカットの相対的減少量との相関係数が7mmよりも5mmにおいて大きい。また、メールの摩耗の様相はメールに使用する合金さらに組合せるフィメールとの関係が同種か異種かによって特徴づけられる。これらのことからメールの摩耗には接触圧と金属間の摩擦力が影響していると考えられる。一方、摩耗現象は凝着摩耗、ひっかき(アブレシブ)摩耗、腐食摩耗、まだら摩耗の4つでほとんどすべて包含されると考えられている⁸⁾。今回のアタッチメントの着脱による摩耗は凝着摩耗とひっかき摩耗と考えられる。凝着摩耗は、相接するふたつの金属が合金または固溶体を作りやすいかどうかが根本問題であり、金属の化学成分、摩擦面温度による拡散係数の増加、金属の表面エネルギーなどの物性論的な諸性質に大きく影響されるが、それ自身の摩耗はきわめて小さい。一方、ひっかき摩耗は、主として材料の機械的性質によってその摩耗量が支配され、最も激しい摩耗であるといわれている⁷⁾。これらの摩耗対策として佐藤⁷⁾はつぎのような点をあげている。1. ひっかき摩耗に対しては防塵、摩耗粉末の除去、接触面の仕上げ面荒さの向上ならびに H/E または H^2/E (H : かたさ, E : ヤング率) の大きい材料の選択。2. 凝着摩耗に対しては材料のかたさの $1/3$ の荷重設計、摩擦温度が金属の再結晶以下となる運転条件、異種金属の組合せで特に合金または固溶体を作らない金属の組合せならびに表面エネルギーとかたさとの比が小さい金属の選択。ただし、異種金属間の凝着の仕事の低下が摩耗の軽減に役立つが、異種金属であっても凝着の仕事が組合せられた材質間の弱い方の材料同志の凝着の仕事よりも大きいときは摩耗が大きいと考えられている⁷⁾。また、佐藤は、ひっかき摩耗にとっては加工変質層は多少のかたさの増加は認められるが耐摩耗性の向上に関しては有害無益なものであり、ひっかき摩耗以外の摩耗現象の場合には加工硬化によるかたさの増大が摩耗を減少せしめる場合もあるのは当然であると考えている。

このような点を踏まえて以下にメールの材質について考察する。

1) 対同種合金

本実験では特に Pt-Au のメールの摩耗は7mmのPd-Agを除くと4種の中で最も大きいのに対し、14Kのメールの摩耗量は5mm, 7mmともに少ない。これは前者に比べ後者のメールが加工硬化を生じ易く、これが摩擦力を低下させ凝着の仕事小さくすることが考えられる。さらに14Kでは相手のフィメール(14K)に著明な摩耗(図13)を生じたことも考えられる。この14Kのフィメールの摩耗の原因としては、繰返し変位により加工硬化を生じた14Kのフィメールはさらにメールとの摩擦により加工変質層を生じ、これがメールにより削り取られる結果すなわちひっかき摩耗の影響を強く受けるものと考えられる。今回、反復着脱試験中に摩耗粉末を除去しなかったこともひっかき摩耗を大きくしたものと考えられる。また、Co-Crのメールは摩耗が小さい。これは他の同種合金同志に比べCo-Cr同志では凝着の仕事が小さいことを示している。すなわち、合金自体がかたいことのほかにフィメールの変形が最も大きいことによる接触圧の低下と加工硬化による摩擦力の低下が凝着の仕事小さくしているものと考えられる。一方、Pd-Agのメールに関してはPt-Auと類似の傾向を示し、Pt-Auに比べその摩耗量は5mmでは小さく、7mmではわずかに大きい。これは接触圧に対する両合金の耐摩耗性の違いを示すものと考えられる。すなわち、Pd-Agは長さ5mmの接触圧のもとでは加工硬化を生じ易く、これが摩擦力を低下させ耐摩耗性を向上させるものと考えられ、その結果加工硬化しにくいPt-Auよりも摩耗が小さくなるものと推察される。

2) 対異種合金

a) Pt-Au

Pt-Auのメールの摩耗量が大きく、その摩耗量は組合せたフィメールの合金別に比べると、対Co-Cr>対Pt-Au>対14Kである。特に対Co-Crに対する摩耗は5mm, 7mmともに最大で当初の予測に反した。これはPt-Auの凝着の仕事が異種合金である対Co-Crでは同種合金に対する凝着の仕事よりも大きいためと考えられる。また、同種合金同志の摩耗量も他に比べ大きい。これは先に考察したように加工硬化しにくいことが推察される。一方、対14Kの摩耗は5mm, 7mm共に最少であるが、これは前述したように14Kのフィメールに著明な摩耗を生じたためである。さらに、Pt-Auは硬化熱処理により飛躍的に硬さが向上し、Co-Crにつぐ硬さになれる⁴⁾といわれていることも関係していると考えられる。実際対14Kでは最少の摩耗量を示し、フィメールを

Table 4 Relation between elastic energy and permanent deformation after 10 cycles of engaging and disengaging

	Pt-Au	14K	Co-Cr
elastic energy Male=Pt-Au	7	> 5	> 3
deformation 5 mm	14	< 30	< 55
7 mm	10	< 15	< 25
same alloy			
deformation 5 mm	14	< 29	< 51
7 mm	10 (>)	8	< 19

。 unit elastic energy (approximate value after Ikeda) :
10⁻² mm·kg/mm²
permanent deformation : μ

大きく摩耗させる。しかし、逆に対 Co-Cr と対 Pt-Au の摩耗量は大きい。これらのことと他の加工硬化しやすい合金の摩耗量が小さいことを考え合わせると、時効硬化よりも加工硬化のほうが耐摩耗性の向上に役立つことを示していると考えられる。したがって、Pt-Au は歯科用の金属材料としては最も優れたものの一つであるが、本実験結果の摩耗の点からはこのアタッチメントのメールの材質としては適していないといえる。

b) Pd-Ag

対 Co-Cr の Pd-Ag のメールの摩耗に関して、同種合金同志では比較的類似の摩耗傾向を示す Pt-Au と比較する。対 Co-Cr の摩耗量は、5 mm, 7 mm とともに Pd-Ag は Pt-Au よりも小さく、Pd-Ag では 5 mm, 7 mm でほぼ同じ大きさであるのに対し、Pt-Au においては 5 mm では 7 mm の約 3 倍である。このことは通常接触圧が大きくなると摩擦力が増大することを考えると、Pd-Ag の接触圧に対する特異性を示しているものと推察される。そこで、摩耗に影響を与える一因子としての接触圧との関係で Pd-Ag の性状を考える。ここで仮に 7 mm を小接触圧, 5 mm を大接触圧と考え、大接触圧においては摩擦力が大きく摩耗量も大きいと考えられるが、実際には Pd-Ag の摩耗量は小さい。これは大接触圧下では凝着の仕事が小さいことを示しているものと考えられる。その原因として、大接触圧下では Pd-Ag は加工硬化を生じ易く、これが摩擦力を低下させて凝着の仕事小さくすることが推察される。ここで Pd-Ag : Pd-Ag と Pd-Ag : Co-Cr の現象を比較すると、反復着脱中の維持力の大きさは、前者の 5 mm (364~228 g) と後者の 7 mm (371~215 g) はほぼ同じである。このことは反復着脱時の接触圧はほぼ同じであると考えられる。この条件下において、対 Pd-Ag のフィメールの変形は Pd-Ag>Co-Cr であり、Pd-Ag のメールの摩耗は

対 Pd-Ag では対 Co-Cr の 2 倍である。このことは、Pd-Ag のメールに対してはフィメールとしては 5 mm の Pd-Ag よりも 7 mm の Co-Cr を組合せるべきであることを示している。このことは、通常同種合金同志の摩耗が大きいことのほかに対 Co-Cr における Pd-Ag は小接触圧でも加工硬化しやすいことを示していると推察される。ここで Co-Cr : Co-Cr と Pd-Ag : Co-Cr との比較において、メールの摩耗が Pd-Ag よりも Co-Cr の方が小さい理由を考えると、Co-Cr のフィメールは同種よりも異種合金との凝着の仕事が大きいことを示していると考えられる。

3. フィメールの永久変形量について

フィメールの変形と維持力の減衰との相関係数は低い。維持力減衰の項で考察したように、これはフィメールの変形の計測部位の問題とフィメールの加工硬化が維持力の減衰を相殺することが考えられる。しかし、フィメールの変形とそれに伴う性状変化は、メールに対する接触圧の変化すなわち摩擦力の変化を生じてメールの摩耗ひいては維持力の大きさにも影響するものと考えられる。今回の実験結果から、フィメールの変形はそれに使用する合金が Co-Cr, 金合金および銀合金別にある程度特徴づけられる。これは各合金の弾性エネルギーの違いによる影響と考えられる。通常、金属の外力に対する変形は、使用した金属の弾性エネルギーが大きい程小さい⁴⁾といわれている。今回の実験結果を Pd-Ag を除く 3 種の合金の弾性エネルギー(表 4)の点から考えると、初回の変形と弾性エネルギーとの関係はほぼ一致する。また、松田⁶⁾はクラスプ用金属材料の機械的特性を調べるためには一定変位量を与えた片振り曲げと両振り曲げ試験が必要であると指摘し、これらについての繰返し曲げ試験を行っている。この両振り曲げ試験結果によると、疲れ被害の要因となる塑性ひずみ幅の大きさは Co-Cr>14 K>Pd-Ag>Pt-Au であり、この順に破断しやすいと報告している。今回の実験において Pt-Au : 14 K で 3 個, 14 K : 14 K で 2 個, Pd-Ag : Pd-Ag で 1 個フィメールが破断した(ただしすべて 5 mm)。これらの結果を踏まえて以下にフィメールの材質の検討を行う。

1) Co-Cr

組合せたメールの合金別における Co-Cr のフィメールの変形量は、5 mm では対 Co-Cr>対 Pt-Au>対 Pd-Ag で、7 mm では対 Pt-Au>対 Pd-Ag>対 Co-Cr である。この 3 種間においては対 Co-Cr の変形量は 5 mm では最大(約 147 μ)でありながら 7 mm では最小(約

46 μ) である。これは 5 mm の Co-Cr にとっては 0.25 mm の変位は大きすぎることと同種金属のため摩擦力による抵抗が大きいことが考えられる。このことは Co-Cr の変形量が大きいにもかかわらず比較的大きな維持力を保っていることの原因でもあると考えられる。しかし、組合せたメールの摩耗量が同種合金である Co-Cr の方が異種合金の金合金よりも小さい。これは Co-Cr のフィメールの凝着の仕事は同種よりも異種合金に対する方が大きいことを示している。一方、この3種間においては対 Pd-Ag の変形は、5 mm では最小でありながら 7 mm では中間値を示すことについて考える。*メールの摩耗のところで考察したように、対 Co-Cr の大接触圧下では Pd-Ag のメールでの凝着の仕事は小さいことが推察される。これはこの条件下において Pd-Ag は加工硬化を生じ易く摩擦力による抵抗が小さくなるためと考えられる。また、そのためにフィメールがメールに対しすべりやすくなり、フィメールの変形が小さくなるものと考えられる。一方、14 K に比べ塑性ひずみ幅が大きく加工硬化を生じて破断しやすいといわれている Co-Cr⁶⁾ が、本実験では全く破断していない。これは 14 K に比べ Co-Cr ではフィメールの変形量が大きく、その結果、アンダーカットの相対的な大きさが小さくなり、加工硬化を生じ易くとも破断しなかったものと考えられる。この点に関しては、Co-Cr : Co-Cr において維持力減衰量とアンダーカットの相対的減少量との相関係数が最も大きく、フィメールの変形と維持力減衰量との相関係数も他に比べかなり大きいことの原因でもあると推察される。

2) Pt-Au

フィメールとしての Pt-Au は本実験では同種合金 1 種類のみである。そこで、他の同種合金の組合せと比較する。Pt-Au の変形は 14 K とともに 5 mm, 7 mm とともに最小である。ところが、14 K は加工硬化を生じ易く、変形が少なくても折れ易い。これは松田⁶⁾ の繰返し両振り曲げ試験の結果における塑性ひずみ幅が、Pt-Au は最も小さく、14 K は Co-Cr について大きいことと一致している。これは Pt-Au の材質がしなやかであることを示しており、しなやかさが最も要求されるフィメールに使用する材質としては Pt-Au が優れていることを意味している。このことはメールの材質としては、摩耗の点で最も好ましくないことと考えるわせると興味深い点であり、適材適所すなわち金属材料の特性にあう利用を図るべきことを示している。したがって、Pt-Au の特性であるしなやかさを最も活用できるのはフィメールとしての

利用と考えられる。

3) 14 K

組合せたメールの合金別に 14 K のフィメールの変形を比較すると、5 mm, 7 mm とともに Pt-Au > 対 14 K である。この原因の一つとして、通常異種よりも同種合金で摩擦量が大きいことにより、5 mm, 7 mm とともにメールの摩耗が Pt-Au < 14 K であることが考えられる。さらに、松田⁶⁾によると 14 K は Co-Cr について塑性ひずみ幅が大きく加工硬化を生じ易いが、本実験においても 5 mm では Co-Cr につぐ変形量を示し、フィメール破断例 6 個中 5 個を占めた。したがって、5 mm の 14 K にとっては 0.25 mm のアンダーカットは大きすぎる。さらに、14 K のフィメールは著明な摩耗を生じている。これは先に考察したように繰返し変位により加工硬化したうに、メールと摩擦により加工変質層を生じ、これがメールにより削り取られた結果である。すなわち、ひっかけ摩耗を生じたものと考えられる。したがって、14 K における加工硬化はしなやかさを失い折れ易くなることと加工変質層を形成して摩耗しやすくなることの原因となる。さらに、反復着脱による維持力の減衰を相殺する働きがあると考えられる。実際に 14 K では維持力の減衰が小さく、これが維持力減衰量とアンダーカットの相対的減少量との相関係数が小さい原因であると推察される。このことは維持力の大ききの保持の点からは優れているが、しなやかさが要求されるフィメールとしては最大の欠点でありフィメールの材質として不適当であると考えられる。

4) Pd-Ag

これもフィメールとしては 1 種類しか行っていないので他の同種合金との比較をする。5 mm の Co-Cr を除くと Pd-Ag は他の合金に比べ変形が大きい。これは他の合金に比べ弾性エネルギーが小さいため⁷⁾と考えられる。しかしながら、今回の実験での破断例は 1 個で 14 K より少ない。これは塑性ひずみ幅が Pd-Ag が 14 K より小さく、Pt-Au につぐしなやかさを有する⁶⁾ためと考えられる。また、変形量は 5 mm でも 7 mm とほぼ同じ大きさであり、しかも 5 mm では他の金合金のフィメールのものとほとんど差はない。一方、7 mm ではフィメールの変形は Pt-Au < Pd-Ag で維持力(接触圧)が Pt-Au > Pd-Ag であるのにメールの摩耗が Pt-Au = Pd-Ag であり、5 mm ではフィメールの変形は Pt-Au = Pd-Ag で維持力(接触圧)が Pt-Au < Pd-Ag であるのにメールの摩耗が Pt-Au > Pd-Ag である。これらの点はしなやかさでは Pd-Ag が Pt-Au に劣ると考えられ

ることと 7 mm では一致する。一方、5 mm では Pd-Ag のメーラは加工硬化していることが考えられ、先に対 Co-Cr のところで考察したように、Pd-Ag のメーラは 5 mm の接触圧下では加工硬化により、摩擦力を低下させメーラの摩耗を小さくするとともに、接触部を滑り易くし、フィメーラの変形も小さくすることが、対 Pd-Ag においても考えられる。また、逆に、Pt-Au に比べ Pd-Ag では滑り易いにもかかわらず維持力が大きいのはフィメーラの加工硬化のためと考えられる。

以上のことは、このアタッチメントによる適切な維持力すなわちメーラとフィメーラの組合せを考えるとき、単に初期維持力の大きさだけでなく、その組合せおよびその維持力がメーラの摩耗に与える影響、さらにメーラのアンダーカットの大きさがフィメーラの変形に与える影響についてもよく検討して、最も適した組合せを選択する必要があることを示している。ただし、以上の結果は 1 秒間に 1 回の着脱速度による多数回連続反復着脱の結果であり、1 日数回しかも装着と離脱を同時的に行わない臨床と比べ、摩擦熱や応力緩和などの点で実験条件として過酷な条件であることが考えられる。すなわち、高速ならびに高温は摩耗を大きくすると考えられており、今回の着脱速度ならびに摩擦熱が摩耗や変形に影響していることも考えられる。この点に関しては今回確認していないため今後の検討課題として残された。したがって、これらの影響が少ない初回の結果を考え合わせて臨床応用すべきであると考えられる。

維持装置はその負担性があらかじめ判っているものを口腔内の条件に合わせて使用すべきであるとの観点から、われわれは自家製スタッドアタッチメントの初期維持力を規格化して、適切な維持力を選択できる方法を考案した。しかし、維持装置の具備条件としてはこれだけでは不十分であり、反復使用による構成要素の摩耗、変形、性状変化ならびに破損やそれに伴う維持力の減衰あるいは喪失が少ないことが必要である。

そこでこれらの変化と関係が深いと考えられる金属材料について、実際の臨床応用が可能な合金として、市販合金から Pt-Au、14 K、Pd-Ag、Co-Cr の 4 種を選択し、さらに、このアタッチメントについて考えられる組合せとして 7 種類設定し、反復着脱試験を行った。その結果、歯科用材料としては最も優れていると考えられるものが、どのような場合でも優れているのではなく、金属材料の持つ優れた性質を活用するためには、適材適所すなわちメーラとフィメーラのそれぞれの材質として適切なものを適切な条件下で適切に組合せることが重要である

ことが判った。

結 論

自家製スタッドアタッチメントのメーラのアンダーカットを 0.25 mm、フィメーラの長さを 5 mm と 7 mm に設定し、これらに使用する合金として Co-Cr、Pt-Au、14 K、Pd-Ag を選択した。これらの合金を用いて 7 種類の組合せを選定して、合計 14 種類のアタッチメントについて 10,000 回の反復着脱試験を行い、初期維持力、メーラの摩耗量、フィメーラの変形量ならびに維持力の減衰量の観点からメーラとフィメーラに使用する合金について比較、検討した。

1) 初期維持力は主にフィメーラのヤング率により決定され、金属間の摩擦力の違いによる影響は少ない。

2) 初期維持力の大きさは、5 mm、7 mm 共に Co-Cr グループでは金合金グループの約 1.6 倍、金合金は銀合金の約 1.2 倍であり、いずれの合金でも 5 mm では 7 mm の約 2 倍である。

3) Co-Cr グループは金合金グループに比べ、維持力減衰が大きい、10,000 回後の維持力も大きい傾向を示す。

4) 維持力の減衰はアンダーカットの相対的な減少によるものである。

5) 維持力の減衰は主にメーラの摩耗が原因である。

6) メーラの摩耗には接触圧と金属間の摩擦力が複雑に影響している。

7) メーラは加工硬化し、これが金属間の摩擦力を低下させ、メーラの摩耗とフィメーラの変形を小さくすることが推察される。

8) フィメーラは加工硬化し、これは維持力減衰を相殺する働きがあるが、フィメーラ破断の原因ともなることが推察される。

9) Pt-Au は加工硬化しにくいことが推察され、メーラの材質としては対 14 K 以外では自身が大きく摩耗し不適當であるが、フィメーラの材質としてはしなやかで変形が少なく最適である。

10) Pd-Ag は加工硬化することが推察され、メーラとしては特に Co-Cr のフィメーラに対する摩擦力が低下して、自身の摩耗とフィメーラの変形を小さくするが、この影響は 7 mm よりも 5 mm の接触圧下において大きい。フィメーラとしては 5 mm では 14 K よりも Pt-Au に近い性状を示すが、7 mm では Co-Cr より変形が大きい。

11) 14 K は加工硬化の影響が大きいと推察され、メールの材質としては対同種合金でも摩擦力が低下し摩耗が小さくなる点で優れているが、フィメールの材質としては 5 mm では折れ易い点で最も不適当である。

12) Co-Cr は、凝着の仕事が同種よりも異種合金との間で大きいと推察され、メールの材質としては摩耗が小さい点で優れている。フィメールの材質としては 5 mm では弾力に欠け変形が大きいうえに、特に Pt-Au のメールを大きく摩耗させる点で不適当であるが、5 mm の Pd-Ag との組合せおよび 7 mm の Co-Cr との組合せは維持力の減衰、フィメールの変形、およびメールの摩耗が少ない。

本論文の要旨は昭和 59 年度日本補綴歯科学会九州支部会学術大会および昭和 60 年度日本補綴歯科学会学術大会において発表した。

文 献

- 1) 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，20：45～52，1975.
- 2) 川畑直嗣，浜野 徹，綾部夏樹，長岡英一，奥野善彦，神宮司康生：自家製スタッドアタッチメントに関する研究 第2報 反復着脱の影響について，補綴誌，31：1157～1164，1987.
- 3) 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，62：106～129，1974.
- 4) 池田浩一，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 鋳造クラスプ用市販合金の弾性的性質について，口病誌，41：233～246，1974.
- 5) 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 鋳造クラスプの維持と弾性的性質について，口病誌，42：22～41，1975.
- 6) 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3報 鋳造クラスプ用合金の繰返し曲げによる応力特性と変形挙動について，口病誌，42：263～287，1975.
- 7) 佐藤健児編著：金属の摩耗とその対策，養賢堂，東京，1～18，1971.
- 8) C. Lipson, L.V. Colwell : Handbook of Mechanical Wear. The University of Michigan Press, 445, 1961 (佐藤⁷⁾より引用).