鑄造鉤における永久変形量の推移について

服 部 正 巳

The Permanent Deformation of Cast Clasp

Masami Hattori

I. 緒 言

部分床義歯の維持装置の1つとして鑄造鉤がある。この鑄造鉤は、適合性にすぐれ、自由な設計が可能で、維持、把握が適確に行われ、異物感も少ないなど、多くの利点があるとされている。

鑄造鉤が維持力を得るためには、鉤先端部は歯牙の添窩部に正しく適合し、かつ長期間にわたり変形、破損などなく使用出来ることが必要である。

この適確な鉤を得るために、今日までの鉤に関する研究を大別すると、形態に関して検討を加えたもの、適合度に関して検討を加えたもの、維持力に関して検討を加えたもの、鉤用金属の機械的性質に関して検討を加えたもの、鉤の添窩量に関して検討を加えたもの、鉤の変形と疲労に関して検討を加えたものなど、多方面にわたっている。

鉤の形態に関しては、関根ら^{1,2)}、村松ら^{3,4)}、Ney社⁵⁾、奥野⁶⁾らは、先細りの半円形態が最も応力分布が均一であり、強じんで、屈曲性に富むと報告している。また最近では、山賀ら⁷⁾による有限要素法での検討がある。鉤の適合度に関しては、野首⁸⁾は、鉤の製作過程における寸法変化について詳細に報告している。維持力に関しては、Warr⁹⁾は数式で表現し、杉山¹⁰⁾、Firtell¹¹⁾、河上¹²⁾、松田¹³⁾らは、引き抜き荷重を測定し報告している。鉤用金属の機械的性質に関しては、Elbertら¹⁴⁾、Asgarら¹⁵⁾により検討され、最近では、池田ら¹⁶⁾が引張り試験により弾性的性質について検討している。添窩量

に関しては、Kennedy¹⁷⁾、Ney社により検討され、また杉山、松田らは維持力との関係から、金属別に検討を加えている。また、鉤の変形と疲労に関しては、杉山、松田¹⁸⁾らは一定変位量に対しての変形について報告しているが、杉山は1,500回まで、松田は約600回までの着脱回数によるものであり、長期間にわたつての変形と疲労に関しての報告はないようである。

以上、鑄造鉤に関する研究の一部を示しても多くの事項が検討されて来たが、部分床義歯の使用状態と鑄造鉤の役割より考察すると、装着時、機能時に加わる変位に対しての永久変形量を知り、この永久変形を起こさない範囲の変位量を確認することが重要であると考ええる。また、この永久変形を起こさない範囲の変位与付回数についても検討する必要がある。

本実験は、先人の業績を参考とし、上記の観点から、片持ち梁による曲げ疲労試験により、鉤試料に規定した変位を各10,000回与え、永久変形量の推移について検討したものである。同時に破断を生じた鉤試料の破面を走査電子顕微鏡により観察し、破断様相についても検討を加えた。

II. 実験方法

1. 実験材料

鑄造鉤の試料用金属は、表1に示すもの5種で、白金加金合金 NG-3 および Ni-Co-Cr 系合金 P-100 以外は、一般に多用されていると思われるものより選定した。白金加金合金 NG-3 は外国製の鑄造鉤用金属として代表的なものとし、Ni-Co-Cr 系合金 P-100 は近年頻度の多い鑄造床用として加えたものである。以下、試料用金属名は表1の略号にて示す。

2. 試料の作製

試料は、各金属とも同形態のものを作製するため、鑄

愛知学院大学歯学部補綴学教室(指導: 平沼謙二教授, 川口豊造教授)

Dept. of Prosthetic Dentistry, School of Dentistry, Aichi-Gakuin University (Director: Prof. Kenji Hirayama, Prof. Toyozo Kawaguchi)

昭和51年10月25日受付

表 1 実験材料

種 類	品 名	略 称	製造番号	鑄込み温度
白金加合金	Ney oro G-3	NG-3	003135	1040°C
"	PGA-2	PG-2	008213	1080°C
14 K 金 合金	Clasp Gold	K-14	(710309 007202)	1000°C
金パラジウム 銀合金	Cast Well MC	MC-12	(NG-24 KC-25)	1030°C
Ni-Co-Cr 系 合金	Premium 100	P-100	40718	1380°C

造鈎形態に近似した金属原型を作製し、この原型を埋没、硬化後抜きとり、同一形態のものを鑄造して作製する。

金属原型は“平等強さのはり”をモデルとし¹⁹⁾、図1に示す先細りの半円形である。大略の寸法は、全長 36.0 mm、試料部全長 26.0 mm、先端部半径 0.29 mm、先端より 16.0 mm の体部半径 1.0 mm、テーパー 1/22.5、試料を固定する部分の半径 1.5 mm である。材質は 18 : 8 鋼である。この金属原型を 10 個使用するが、各原型は図1の A, B 間の長さ、幅を万能投影機（日本光学社製 V-16A 型、精度 1/1000 mm）により測定し、テーパーが 1/22~1/23 の間にあつて、原型と同形態であることを確認したものを使用する。

図 1 金属原型の寸法

図 2 使用したリングと金属原型の植立
左は NG-3, PG-2, K-14, MC-12 に。右は P-100 に用いる。

金属原型は、埋没材中より抜きとるため、約 5~6 mm を円錐台中に埋入し、埋没を行う。NG-3, PG-2, K-14, MC-12 の 4 種に関しては、図2に示す鑄造用リング（内径 40 mm、高さ 80 mm、厚さ 2 mm）を用いる。埋没材は、クリストパライトモデルインベスティメント（G 社製）を混水比 0.32 とし、減圧下で 1 分間練和、気泡を除去したのち埋没する。なお、アスベストリボンは、厚さ 0.8 mm のもの 1 枚を湿潤させて用いる。

埋没 24 時間後、金属原型を埋没材中より注意深く引き抜き、電気炉にて鑄型の加熱を行う。加熱速度は 650°C まで 3 時間と順次上昇させ、同温度で 30 分間保留したのち鑄造する。

鑄造は、金属の溶解時間、鑄込み温度、鑄造圧力などを一定条件とするため、自動遠心鑄造機（Jelenko 社製、Thermotorol D-II）を使用する。バネの巻数は 3 回である。各金属の鑄込み温度は表1に示す。鑄造後は徐冷し、24 時間後に取り出す。なお、金属はすべて新しいものを使用し、再鑄造は行わない。

熱処理は、NG-3, PG-2, K-14, MC-12 の 4 種については、メーカーの指示に従い、軟化熱処理後、硬化熱処理を行う。すなわち、軟化熱処理は、4 種とも 700°C の電気炉にて 5 分間加熱後、水中にて急冷する。硬化熱処理は、NG-3, PG-2 は 250°C の電気炉にて 20 分間加熱後、スイッチを切り徐冷し、K-14 は 400°C で 20 分間加熱した後、同じく徐冷し、MC-12 は 30 分間で 450°C まで上昇させ、その後 20 分間で 300°C に下降させ、つぎの 20 分間で 180°C まで下降させ、以後は徐冷する。

試料の表面処理は、各金合金は希塩酸にて処理後、流水にて水洗し、MC-12 はバラクリン（G 社製）を使用して行い、研磨などは行わない。

P-100 に関しては、図2に示すように、まず、ワックスにて円錐台とリングを作製し、埋没材はタイベスト（タイコニウム社製）を混水比 0.28 で減圧下で 1 分間練和、気泡を除去したのち、一次埋没を行い、ついで、二次埋没する。埋没 24 時間後、先と同様に原型を注意深く引き抜き、タイコニウムシステムに従つて鑄型の加熱を行い、鑄造する。表面処理は、P-100 については酸化膜を除去する目的でサンドブラスターを使用する。

以上の操作にて出来上つた鑄造体を、先端から 26 mm の位置で、ファインカット（平和工業社製）を用い切断し、万能投影機にて、寸法、形態の確認を行う。この際、A~B 間のテーパーが 1/22~1/23 のものを選定し、図3に示す試料とする。

図 3 金属原型（上）と試料（下）

図 4 実験装置, A: 記録装置, B: 変位量表示装置, C: 変位量測定装置, D: 疲労試験機, E: 変位量読み取り顕微鏡

図 5 疲労試験機

3. 測定装置

図 4 に示すように、本装置は疲労試験機、変位量測定装置、変位量表示装置、記録装置、変形量読み取り顕微鏡よりなる。

疲労試験機を図 5 に示すが、この装置は本実験のため新たに考案したもので、試料固定部と変位付与部とからなる。図 6 にその部分を示す。変位量は 0~3.00 mm まで与えられる。図 7 に同装置を模式図で示す。試料固定部は A の試料装着部と固定ネジ、さらに、B の変位量を規定する垂直的に可動させる上部ネジ、試料の任意の位

図 6 疲労試験機に試料を固定した所

図 7 疲労試験機の模式図

置に変位を加える水平的に可動させる下部ネジがある。また、変位付与時に試料固定部の移動を防ぐため、上部側面に固定ネジを設置してある。ダイヤルゲージは移動の有無を検出するためと、試料に与える変位量を規定するものである。

変位付与部は、モーターを介して作動する偏心カムにより、C が垂直的に上下する機構で、頂点は毎常同一の位置をとる。C は試料に接触し、規定した変位量をこの部で与えるものである。このモーターの回転速度を調整することにより、任意のストロークで変位を与えることが出来る。以上の構造により、試料の任意の部位に、任意のストロークで、任意の変位量を連続して与えることが出来る。

変位量測定装置は、変位トランスジューサー（三栄測器製 45071 形）と変位用ブリッジボックス（三栄測器製 5354 形）よりなる。このトランスジューサーを試料に接触させ、試料の上下動の量を、ブリッジボックスにて電

気量に変換し、試料に与える変位量の測定を行う。このトランスジューサーの接触荷は数グラム以下であり、試料に対しての影響は無視出来るものである。

変位量表示装置は、本実験のため新たに考案したもので、変位量測定装置により得られた電気量の最高値を、つぎのデーターが入るまで保持し、デジタル化して表示するものである。これにより、連続して変位量を読み取ることが出来る。また、同時に変位付与回数も表示出来るものである。

記録装置は、ペンレコーダー（三栄測器製 W 809 形）を使用し、与えた変位量を記録し、確認するものである。

変形量読み取り顕微鏡（島津製）は、変位量に伴う試料の永久変形量を、一定位置より読み取るもので、読み取り精度は 1/100 mm である。

4. 測定方法

1) 疲労試験

今回の実験において、試料に変位を与える部位は、試料先端より 6 mm と規定し、試料を図 6 のように試料固定部に設置したのち、図 7 の B 部分を水平移動させ、読み取り顕微鏡によりその位置を決定する。ついで、疲労試験機の変位付与部 C を最高位置にセットしたのち、可動ネジにより試料を C に接触させ、トランスジューサーを同上部に接触させる。変位付与部を試料より離し、試料に与える一定変位量をダイヤルゲージで読み取りながら、A 部分を下方に移動させる。つぎに、試料を 0.10 mm 間隔で上方に移動し、同時に変位量表示装置に示される変位量を読み、校正を 10 回行う。以上の操作後に試料を固定する。この位置で、試料最先端部 (a)、先端より 6 mm の部位 (b)、先端より 15 mm の固定部に近い部位 (c) の 3 点を、垂直的に読み取り顕微鏡にて測定する。この値は、永久変形量を測定する際の原点となる。同時に、この位置でダイヤルゲージの値を読み取る。この値は測定中における試料固定部のゆりみを監視することになる。

測定条件のうち、変位量 2.00 mm、1.50 mm、1.00 mm、0.50 mm の 4 段階は NG-3、PG-2、K-14、MC-12 の 4 種に用いる。また、1.00 mm、0.50 mm、0.25 mm、0.15 mm の変位量は P-100 に用いる。試料は各変位量につき各 5 個、計 100 個である。変位付与回数は 10,000 回である。

試料に加わる変位量の測定は、1~10 回までは各回、ついで 50 回、100 回~999 回までは 100 回ごと、1,000 回~10,000 回までは 500 回ごとに行う。50 回以後の測

定は 50 回~59 回、100 回~109 回……と各 10 回測定の平均値を用いて表示する。

永久変形量の測定は 1~10 回までは各回について、ついで 50 回、100 回~999 回までは 100 回ごと、1,000 回~10,000 回までは 500 回ごとに行う。

2) 破断試料の観察

測定中に破断した試料については、破断部位の位置について先端よりの距離を、ノギス（精度 1/20 mm）にて測定する。つぎに、破断面について、試料の平面部、すなわち、臨時的には歯牙に接触する部分を内面とし、円弧部を外面として観察する。まず、20 倍の実体顕微鏡にて、大きな鑄巣や介在物などの鑄造欠陥の存在について、ついで、走査電子顕微鏡にて破面の様相を観察する。倍率は 100 倍、3,000 倍、10,000 倍である。

3) 測定値の取り扱い

前記の方法にて測定を行うが、試料に与える一定変位量は、試料が次第に永久変形を生じてくるため、これに伴ない減少することになる。この変位量と試料の永久変形量の関係について、NG-3（白金加金合金）、MC-12（金パラジウム銀合金）を取り上げ、変位量 2.00 mm とした場合について観察すると、以下のようである。

(i) NG-3

図 8 に示すように、1 回目の変位を与えることにより (a) では 0.50 mm、(b) では 0.30 mm の永久変形を生じる。2 回目の変位量は、初回の変位量 2.00 mm から (b) の永久変形量を引いた量となるから、1.70 mm である。10

図 8 2.00 mm 変位量における NG-3 の永久変形量と有効変位量 a : 試料先端部 b : 試料先端より 6 mm の部位

回目は、(a)では 0.51 mm, (b)では 0.31 mm となり、100 回目は、(a)では、0.51 mm, (b)では 0.31 mm と同一値を示している。以後、1,000 回目は、(a)では 0.52 mm, (b)では、0.32 mm, 3,000 回目は変化なく、5,000 回目は、(a)では 0.54 mm, (b)では 0.33 mm, 7000 回目は、(a)では 0.55 mm, (b)では 0.34 mm, 10,000 回目は (a)では 0.59 mm, (b)では 0.37 mm となる。以上のように (a), (b) の両計測部位の永久変形量は、ほぼ平行な値を示している。また、試料の永久変形量の増加に伴ない、与える変位量は減少することが示され、これが有効変位量であり、(b)の永久変形量との和は、最初に規定した変位量 2.00 mm になる。

(ii) MC-12

図 9 に示すように、1 回目の変位を与えることにより、(a)では、0.54 mm, (b)では 0.33 mm の永久変形を生じる。10 回目は、(a)では 0.76 mm, (b)では 0.45 mm となり、100 回目は、(a)では 0.83 mm, (b)では 0.50 mm となる。以後、1,000 回目は、(a)では 0.94 mm, (b)では 0.55 mm, 3,000 回目は、(a)では 0.96 mm, (b)では 0.57 mm, 5,000 回目は、(a)では 1.20 mm, (b)では 0.72 mm となる。その後、破断している。この場合も NG-3 と同様、(a), (b) 両計測部位の永久変形量は、ほぼ平行な値を示している。また、与える変位量との関係も同様である。

以上のように、この (a), (b) 部位の測定値と、与える変形量の関係は、各試料、各条件とも同様な傾向を示すため、各測定結果については (a) 部位の測定値について

図 9 2.00 mm 変位量における MC-12 の永久変形量と有効変位量 a : 試料先端部 b : 試料先端より 6 mm の部位

のみ述べて行くことにする。

III. 結 果

1. 各変位量における永久変形量

1) NG-3 (白金加金合金)

図 10 に、変位量 2.00 mm, 1.50 mm, 1.00 mm, 0.50 mm を各 5 個の試料に与えた場合の永久変形量を示す。

変位量 2.00 mm の場合：1 回目の変位により生じる永久変形量(以下変形量と略称する)は、0.49 mm~0.67 mm である。10 回目には、0.49 mm~0.69 mm とほとんど変形量の増加が認められず、さらに、50 回目、100 回目にも、0.49 mm~0.69 mm と変化しない。1,000 回目には、0.51 mm~0.70 mm となり、5,000 回目には、0.51 mm~0.72 mm ときわめてわずかに変形量が増加する、10,000 回経過後には、3 例で 0.52 mm~0.63 mm となる。1 例は 9,000 回以降に破断した。他の 1 例は、9,500 回~10,000 回の間で 0.80 mm から 0.93 mm へと急激に変形量の増加がみられる。1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、前記 3 例においては、0.03 mm~0.09 mm である。

変位量 1.50 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は、0.10 mm~0.15 mm である。10 回目には、0.11 mm~0.15 mm と、ほとんど変形量の増加が認められず、50 回目、100 回目、1,000 回目、さらに 5,000 回目と、ほとんど変化はない。10,000 回経過後には、0.11 mm~0.18 mm となる。1 回目の変形量と 10,000

NG-3

図 10 NG-3 の各変位量における永久変形量

回経過後の変形量の差は、0.01 mm～0.04 mm ときわめてわずかな増加がみられるのみである。

変位量 1.00 mm の場合：1回目の変位により生じる変形量は、5例とも 0.01 mm である。そのうち、3例は 10,000 回経過後においても変形量の増加はみられない。他の 1 例では 10 回目に 0.02 mm、4,000 回目に 0.04 mm となり、以後 10,000 回までは変形量の増加がみられない。別の 1 例では、500 回目に 0.02 mm、2,000 回目に 0.03 mm、4,000 回目に 0.04 mm、5,000 回目に 0.05 mm となり、以後 10,000 回までは変形量の増加がみられない。この 2 例について、1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は 0.03 mm と 0.04 mm である。

変位量 0.50 mm の場合：1回目の変位により生じる変形量は、5 例中 1 例では、0.01 mm、他の 4 例では、変形が認められない。この 4 例中 1 例は、10,000 回経過後でも全く変形が認められない。他は、100 回目に 0.01 mm、3,500 回目に 0.02 mm の変形を生じたもの、7,000 回目に 0.01 mm の変形を生じたものとなるが、以後、各試料とも 10,000 回経過後までは、変形量の増加はみられない。10,000 回経過後でも全く変形が認められない 1 例をのぞいた 4 例において、1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量との差は 0.01 mm～0.02 mm と、きわめてわずかな増加がみられる。

2) PG-2 (白金加金合金)

図 11 に変位量 2.00 mm より 0.50 mm までを各 5 個の試料に与えた場合の変形量を示す。

変位量 2.00 mm の場合：1回目の変位により生じる変形量は、0.42 mm～0.59 mm である。10 回目には、0.47 mm～0.62 mm ときわめてわずかに変形量が増加するが、50 回目、100 回目には変化しない。1,000 回目には、0.47 mm～0.69 mm となり、5,000 回目には、4 例で 0.48 mm～0.65 mm となる。10,000 回経過後では 3 例で 0.48 mm～0.63 mm となる。他の 2 例のうち、1 例は 500 回以降に急激な変形量の増加がみられ、3,000 回以降に破断した。他の 1 例は 7,500 回～8,500 回の間に急激な変形量の増加がみられ、8,500 回以降に破断した。1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、破断しなかった 3 例においては 0.04 mm～0.06 mm である。

変位量 1.50 mm の場合：1回目の変位により生じる変形量は、0.13 mm～0.21 mm である。10 回目には、0.14 mm～0.21 mm とほとんど変形量の増加がみられ

図 11 PG-2 の各変位量における永久変形量

ず、50 回目、100 回目、1,000 回目と変化はない。5,000 回目には、0.15 mm～0.26 mm ときわめてわずかに変形量が増加する。10,000 回経過後には、4 例で 0.15 mm～0.29 mm となる。1 例は 7,000 回以降に破断した。1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、破断しなかった 4 例においては、0.02 mm～0.08 mm である。

変位量 1.00 mm の場合：1回目の変位により生じる変形量は、0.03 mm～0.05 mm である。10 回目、100 回目、1,000 回目と変化なく、5,000 回目には、0.03 mm～0.06 mm、10,000 回経過後には、0.03 mm～0.07 mm とほとんど変形量の増加がみられない。1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、5 例中 2 例で 0.02 mm～0.03 mm となり、他の 3 例では差がみられない。

変位量 0.50 mm の場合：1回目の変位により生じる変形量は、5 例とも 0.01 mm である。そのうち、2 例は、10,000 回経過後においても変形量の増加はみられない。他は、9,000 回目に 0.02 mm、9,500 回目に 0.03 mm の変形を生じたもの、1,000 回目に 0.02 mm、7,000 回目に 0.03 mm の変形を生じたもの、1,000 回目に 0.02 mm、1,500 回目に 0.03 mm、2,500 回目に 0.04 mm、4,000 回目に 0.05 mm、5,000 回目に 0.07 mm、6,500 回目に 0.08 mm、9,000 回目に 0.09 mm、10,000 回目に 0.10 mm の変形を生じたものとなる。1 回目の変形量と

K-14

図 12 K-14 の各変位量における永久変形量

10,000 回経過後の変形量との差は、5 例中 3 例で 0.02 mm~0.09 mm であり、他の 2 例では差がみられない。

3) K-14 (14K 金合金)

図 12 に変位量 2.00 mm より 0.50 mm までを各 5 個の試料に与えた場合の変形量を示す。

変位量 2.00 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は、0.28 mm~0.62 mm である。10 回目 0.30 mm~0.64 mm ときわめてわずかに変形量が増加している。50 回目には変化しない。100 回目には 4 例で 0.31 mm~0.65 mm となる。50 回以降に 1 例、100 回以降に 1 例、300 回以降に 1 例、600 回以降に 1 例が破断した。残る 1 例は、1,000 回目に 0.61 mm となり、1,500 回以降に破断した。

変位量 1.50 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は 0.07 mm~0.13 mm である。10 回目に 0.09 mm~0.14 mm ときわめてわずかに変形量が増加している。100 回目には 0.09 mm~0.15 mm、1,000 回目には 0.10 mm~0.19 mm となる。5,000 回目には 1 例のみで、0.17 mm 変形している。他の 4 例は、1,000 回以降に 1 例、1,500 回以降に 1 例、2,000 回以降に 1 例、2,500 回以降に 1 例が破断した。残り 1 例も 6,000 回以降に破断した。

変位量 1.00 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は、5 例中 4 例では、0.01 mm~0.03 mm となり、他の 1 例は 0.06 mm と約 2 倍の変形を示している。10 回目には、前記の 4 例では、0.01 mm~0.04 mm とほとんど変形量の増加はみられないが、他の 1 例では

0.20 mm と急激な変形量の増加がみられ、100 回以降に破断した。4 例では、1000 回目には変化なく、5,000 回目には、0.03 mm~0.06 mm、10,000 回経過後には 0.04 mm~0.08 mm ときわめてわずかな変形量の増加がみられる。4 例について、1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、0.03 mm~0.05 mm である。

変位量 0.50 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は、5 例中 4 例では 0.01 mm で、そのうち 1 例は 10,000 回経過後においても変形量の増加はみられない。他の 1 例には変形が認められない。10 回目には 5 例とも 0.01 mm となつていて、50 回目、100 回目、1,000 回目と変化しない。5,000 回目には、0.01 mm~0.03 mm、10,000 回経過後には 0.01 mm~0.07 mm となる。1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、4 例において 0.01 mm~0.06 mm で、他の 1 例には差がみられない。

4) MC-12 (金パラジウム銀合金)

図 13 に変位量 2.00 mm より 0.50 mm までを各 5 個の試料に与えた場合の変形量を示す。

変位量 2.00 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は 0.41 mm~0.73 mm である。10 回目には 0.58 mm~0.97 mm と増加している。50 回目には 0.64 mm~1.04 mm、100 回目には 0.68 mm~1.06 mm、1,000

図 13 MC-12 の各変位量における永久変形量

回目には 0.74 mm~1.10 mm, 5,000 回目には 0.80 mm~1.20 mm となる。10,000 回経過したものも 1 例のみで 1.18 mm となる。他の 4 例は、5,000 回以降に 1 例、5,500 回以降に 1 例、7,000 回以降に 1 例、8,500 回以降に 1 例破断した。1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、1 例のみであるが、0.45 mm である。

変位量 1.50 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は 0.15 mm~0.41 mm である。10 回目には 0.21 mm~0.56 mm と増加している。50 回目には 0.24 mm~0.62 mm, 100 回目には 0.25 mm~0.63 mm, 1,000 回目には 0.28 mm~0.65 mm, 5,000 回目には 0.29 mm~0.67 mm, 10,000 回経過後には 0.32 mm~0.69 mm となる。1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、0.14 mm~0.34 mm となる。

変位量 1.00 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は、0.02 mm~0.06 mm である。10 回目には 0.03 mm~0.08 mm ときわめてわずかに増加している。50 回目には 0.04 mm~0.10 mm, 100 回目には変化なく、1,000 回目には 0.04 mm~0.11 mm, 5,000 回目には 0.04 mm~0.12 mm, 10,000 回経過後には 0.04 mm~0.13 mm となる。1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、0.02 mm~0.09 mm である。

変位量 0.50 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は、3 例で 0.01 mm, 他の 2 例では変形は認められない。10 回目、50 回目にも変化はない。100 回目には、3 例で 0.01 mm~0.02 mm, 他の 2 例は 1 回目より変形がみられない。1,000 回目には、4 例では 0.01 mm~0.04 mm, 他の 1 例は同じく変形がみられない。5,000 回目には 0.01 mm~0.05 mm となり、10,000 回経過後の変形量の差は、0.01 mm~0.04 mm である。

5) P-100 (Ni-Co-Cr 系合金)

図 14 に変位量 1.00 mm, 0.50 mm, 0.25 mm, 0.15 mm を各 5 個の試料に与えた場合の変形量を示す。

変位量 1.00 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は 0.26 mm~0.30 mm である。10 回目には 0.27 mm~0.33 mm ときわめてわずかに増加している。50 回目、100 回目には変化はない。1,000 回目には 0.27 mm~0.34 mm, 5,000 回目には 0.29 mm~0.34 mm, 10,000 回経過後には 0.31 mm~0.35 mm となる。1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、0.02 mm~0.06 mm である。

変位量 0.50 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は 0.02 mm~0.05 mm である。以後、2 例は 10,000 回経過後まで変化はない。他の 2 例は、100 回目

図 14 P-100 の各変位量における永久変形量

には 0.03 mm~0.05 mm, 1,000 回目には 0.03 mm~0.06 mm, 5,000 回目には 0.08 mm~0.13 mm, 10,000 回経過後には 0.12 mm~0.15 mm となる。1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、2 例では変化なく、他の 1 例では 0.01 mm, 別の 2 例では 0.10 mm, 0.12 mm となる。

変位量 0.25 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は 5 例とも 0.01 mm である。そのうち、2 例は 10,000 回経過後においても変形量の増加はみられない。他の 3 例では、10 回目、50 回目、100 回目、1,000 回目と変化はない。5,000 回目には 3 例とも 0.02 mm で、10,000 回経過後には 0.02~0.06 mm となる。この 3 例について、1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、0.01 mm~0.05 mm となる。

変位量 0.15 mm の場合：1 回目の変位により生じる変形量は、5 例中 1 例では 0.01 mm, 他の 4 例では変形が認められない。10 回目、50 回目、100 回目、1,000 回目と変化なく、5,000 回目には 3 例が 0.01 mm, 10,000 回経過後では、2 例が 0.01 mm, 1 例が 0.02 mm となる。1 回目に 0.01 mm 変形した 1 例は、10,000 回経過後においても変形量の増加はみられない。1 回目の変形量と 10,000 回経過後の変形量の差は、0.01 mm~0.02 mm となる。

2. 破断試料の観察

変位量の増加に伴ない各試料の変形量は増大し、同時に一部試料は破断した。この破断は表 2 に示すように、変位量 2.00 mm では NG-3, PG-2, K-14, MC-12 にみられ、1.50 mm では PG-2, K-14 に、1.00 mm で

表 2 破断試料数

種類	変位量 (mm)	2.00	1.50	1.00	0.50	0.25	0.15
NG-3	1	0	0	0	—	—	—
PG-2	2	1	0	0	—	—	—
K-14	5	5	1	0	—	—	—
MC-12	4	0	0	0	—	—	—
P-100	—	—	0	0	0	0	0

は K-14 のみにみられる。0.50 mm の変位量においては、前述のように各試料の変形量は少なく、破断したものはない。破断を生じたものの変位付与回数は前述の通りである。破断した部位をみると、NG-3 は先端より約 16.6 mm、PG-2 は約 13.8 mm~14.3 mm、MC-12 は約 16.4 mm~16.8 mm、K-14 は約 12.3 mm~17.2 mm の位置である。以下、この各破断面について観察するが、P-100 は変位量 1.00 mm までに破断した試料がないので、表 2 に示す 4 種試料について述べる。

1) NG-3 (白金加金合金)

変位量 2.00 mm の場合に 1 例破断している。実体顕微鏡観察では、破断面に鑄巣、介在物などの鑄造欠陥と

図 15 NG-3 破面の走査電子顕微鏡写真
上：×100，a は試料面，b は破面
下：×3,000，上図矢印部

思われるものはみられない。図 15 の走査電子顕微鏡観察では、試料内面中央部付近に、き裂の発生部らしきものがみられ、き裂はその部位から進展していると思われる。き裂発生部付近の内方約 0.15 mm にはストライエーションが明らかに観察される。特に、3,000 倍像よりみるとストライエーションはほぼ等間隔にみられ、疲労破壊を起した様相が示されている。最終破断はディンプル型の破断である。

2) PG-2 (白金加金合金)

変位量 2.00 mm の場合に 2 例、1.50 mm の場合に 1

図 16 PG-2 破面の走査電子顕微鏡写真
上：×100，a は試料面，b は破面
中：×3,000，上図矢印部
下：×10,000，中図矢印部でストライエーションが明確にみられる

例破断している。実体顕微鏡観察では、破面に鑄巣、介在物などの鑄造欠陥と思われるものはみられない。図16の走査電子顕微鏡観察では、NG-3と同様に試料内面中央部付近にき裂の発生部らしきものがみられ、き裂はその部位から進展していると思われる。き裂発生部付近の内方約0.10 mmにはストライエーションが明らかに観察され、疲労破壊をおこした様相が示されている。最終破断もNG-3と同様にディンプル型の破断である。

3) K-14 (14K 金合金)

変位量 2.00 mm の場合に5例、1.50 mm の場合に5

例、1.00 mm の場合に1例破断している。実体顕微鏡観察では、各試料内面中央部付近に鑄造欠陥と思われる鑄巣などが比較的多くみられる。走査電子顕微鏡観察においても、鑄造欠陥と思われる鑄巣、介在物などがみられ、その付近よりき裂が発生したと思われる。破断面には、粒界が多くみられ、ディンプルも観察される。また、図17に示す試料は、内面中央部付近に大きな鑄造欠陥がみられ、その付近よりき裂が発生し、進展したと思われる。図17のようにき裂発生部付近の内面より内方約0.1 mmにはへき開状破面が観察され、図17のように試料外面付近では、粒界で破断したと思われる破面がみられる。

4) MC-12 (金パラジウム銀合金)

変位量 2.00 mm の場合に4例が破断している。実体顕微鏡観察ではほとんど欠陥がみられないが、図18のように走査電子顕微鏡観察では、小さな鑄造欠陥が散在している。き裂は内面中央部付近より発生し、進展している。また、き裂発生部付近の内面より内方約0.2 mmにストライエーションが観察されている。最終破断はディンプル型の破断である。

図17 K-14 破面の走査電子顕微鏡写真
上: $\times 100$, aは試料面, bは破面, cは鑄巣
中: $\times 3,000$, 上図矢印部でへき開
下: $\times 3,000$, 試料外面部付近で粒界

図18 MC-12 破面の走査電子顕微鏡写真
上: $\times 100$, aは試料面, bは破面, 散在する
黒い点は鑄巣
下: $\times 3,000$, 上図矢印部

IV. 考 察

鑄造鉤の維持を適確に計るためには、鉤先端部は維持歯の添窩部に正しく適合して装着されることが必要となる。このため、鑄造鉤用金属材料の機械的性質、形態などについて理工学的、補綴学的方面より検討され、適切な維持を得るための鉤材料、鉤形態と維持力、適合性などについて多くの研究者により論じられて来た。この中で鑄造鉤の変形については杉山、松田による一定変位を与え、変形量を検討したものがあるが、頻回にわたる曲げ疲労試験において長期間にわたり検討したものは、杉山の1,500回までのものがみられるにすぎない。

義歯の装着、清掃などの着脱時、時には咬合時などには鉤の変位が生じることは言うまでもないが、これに伴ない経時的に起こる変形、疲労は見逃すことの出来ない問題である。

本研究はこの点に着目し、臨床的見地より鉤の変形は、まず規定した一定変位量が鉤先端部付近に加えられ、永久変形が生じた時点からは、与えられる変位量はこの変形量を差し引いた変位量となり、この変位が加わって行くものと想定し、実験を行った。すなわち、0.50 mm 量の間隔で増加する変位量を鉤先端部付近に 10,000 回にわたり連続して与え、鉤先端部の永久変形量の様相を順次変化する変位量と共にとらえ、正しい適合を得、適確な維持を計るために各金属材料に与えうる添窩量を知る目的で行ったものである。また、一部破断した試料の破面観察も行い、永久変形量と共にその様相を追求したものである。

1. 試料について

鑄造鉤の実験において、多くは同一形態の試料を得るため、石膏などの陰型にワックスを注入し、同一原型を作製し、これを鑄造し用いることが行われている^{8,10,12,13)}。しかしワックス原型による形態、寸法の再現は難事であり、一定条件下においてもワックスの物理点性質より問題があろう。そのため、本実験においては金属原型を直接埋没し、埋没材硬化後に引き抜き、鑄造、同一試料を正確に得るよう配慮した。金属原型の形態は Farrell²⁰⁾、Bates²¹⁾、Ney 社⁵⁾、奥野⁶⁾らの鑄造鉤形態、寸法を参考とし、力学的見地より、自由端に荷重を加えた場合、どの断面でも最大曲げ応力が均一になるという“平等強さのはり”をモデルとし、18:8鋼にて作製した。寸法は全長 26 mm で、先端より 16 mm を鉤腕とし、その部位より 2 mm はそのままのテーパで延長し、つ

づく 2 mm の間は 10 R の円弧となつている。これは変位を加えた時の応力をその部分で逃し固定部の影響が出ないように考慮したものである。また、先端より 16 mm の体部半径 1 mm の部位付近は、応力が最もかかる所と想定される。

試料として用いる鑄造鉤用金属のうち、NG-3、PG-2（白金加金合金）、K-14（14K 金合金）、MC-12（金パラジウム銀合金）の鑄造は遠心鑄造機（Jelenko 社製、Thermotolor D-II）を使用し、金属溶解時間、鑄込み温度、鑄造圧力などを各金属別に一定条件下で行い、鑄造による誤差を最小限にとどめることにした。また、P-100（Ni-Co-Cr 系合金）は高周波遠心鑄造機（タイコニウム社製）を用い、そのシステムに従って行った。各鑄造体は鑄造後、熱処理を行い、ついで酸化膜を除去するため、金合金は酸処理、金パラジウム銀合金はパラクリン処理後、水洗した。Ni-Co-Cr 系合金はサンドブラスト処理を行った。この各鑄造体を規定の長さに切断し試料を作製するが、形態、寸法は万能投影機にて測定し、先端より 16 mm までのテーパが 1/22~1/23 間にあるもののみを実験に用いた。また、鑄造体の表面に、肌荒れ、鑄巣、気泡などが実体顕微鏡および万能投影機により観察されるものは除外した。

使用した金属は先に示した 5 種で通常臨床で使用しているものより PG-2（白金加金合金）、K-14（14K 金合金）、MC-12（金パラジウム銀合金）、P-100（Ni-Co-Cr 系合金）、さらに NG-3（白金加金合金）である。この NG-3 はネイ社システムによる鑄造鉤形態とこれに与える添窩量に適應してつくられた鉤用金属であり、本実験の基準試料として取り上げたものである。

2. 測定装置ならびに測定法

鑄造鉤に関する研究については、モデルによる光弾性実験、弾性的性質の工学的測定、また、力学的解析などが行われている。ついで臨床的には鉤の引き抜き荷重について検討したもの、着脱回数による維持力の変化について検討したものなどがある。これらの実験の多くは試料に一定荷重を加えて検討したものであり、鉤の役割、装着時の状況よりみると荷重を用いるより、一定変位量を与えた場合の永久変形量を測定することが、より目的に沿ったものであり、また、臨床的にみても適切な方法と考える。

本実験装置のうち、疲労試験機は上記の考えに基づき新たに考案したもので、固定部と変位付与部からなる。固定部は試料を正確に保持し、この試料固定部分は水平、垂直方向に移動固定が可能で、水平方向の移動によ

り試料の任意な部位に変位を加えることができる。また、垂直方向の移動により変位量を規定出来るものである。変位付与部は固定されており、モーターを介した偏心カムにより一定間隔で連続して変位を付与する。また、モーター速度により変位付与間隔を調節して与えられる機構である。今回の実験においては毎秒1回と規定し、変位付与を10,000回とした。この回数は1日3回義歯を着脱し、約5年間使用する設定である。このため、装置は約3時間～4時間連続して可動出来るものである。同時に、測定中に試料のずれや移動を監視するため、固定部ネジ上にダイヤルゲージを設置し、測定中ならびに規定回数ごとに読み取りを行った。水平的には固定部の試料下縁を読み取り顕微鏡にて測定し、両者より確認したが、本実験中に試料の移動を認めるものはなかった。

変位を付与する部位は試料先端より6 mmで、本試料鉤腕長の約1/3の位置とした。この位置は義歯を装着する際、さらに口腔内で生じるわずかな義歯の移動時に、鉤腕維持部の把握部に近接する部分で、鉤先端部と共に変位を受けやすい部分である。また、同位置は使用頻度の高い小白歯の鉤形態を考慮した場合、鉤先端部に相当することになる。

測定装置の性質上与えた変位量のすべてが毎回試料に加わるのではなく、与えた変位量より変形した量を減じた量が次回に試料を変位させる量である。これを有効変位量と呼ぶ。したがって有効変位量は常に変位量と変形量との差で求めることになる。

3. 各鑄造鉤試料の永久変形量

結果の項で示したように、各変位量に対して各試料は永久変形を起こし、その推移を観察することが出来た。しかし、同一変位量において個々の変形量に幅があるので、平均値による、各変位量における金属間の比較検討を試みた。図19, 20, 21, 22, 23は5種試料の各変位量における平均永久変形量を示したものである。

1) 変位量 2.00 mm の場合

各金属とも1回目の変位付与により大略0.5 mm変形する。NG-3は平均0.58 mm, PG-2は平均0.53 mm, K-14は平均0.45 mm, MC-12は平均0.60 mmである。以後の各測定回数についてみると、白金加金合金は大きな変形を示さず、5,000回目にNG-3は平均0.62 mm, PG-2は平均0.57 mmと、両者とも変形量の増加は1回目に対して0.04 mmにすぎない。9,500回以後には結果で示したようにNG-3は5個試料中1個は破断し、他の1個は破断を生じるような大きな変形を示し

た。K-14は1回目の変形量が最も少ないものであるが、50回目に平均0.51 mmとなり、それ以後順次5個の試料すべてが破断している。MC-12は5,000回目に平均

図19 NG-3の各変位量における平均永久変形量

図20 PG-2の各変位量における平均永久変形量

図21 K-14の各変位量における平均永久変形量

MC-12

図 22 MC-12 の各変位量における平均永久変形量

P-100

図 23 P-100 の各変位量における平均永久変形量

0.99 mm と 1 回目より約 0.4 mm 変形量が増加し、それ以後 4 個の試料が破断している。

以上、2.00 mm の大きな変位量においては、白金加金合金を除く K-14, MC-12 の 2 種は頻回の変位に対して破断した。とくに、K-14 はぜい弱な性質を示した。また、各金属とも 1 回目の変位による変形量が最も多い。

2) 変位量 1.50 mm の場合

1 回目の変位付与により、NG-3 は平均 0.12 mm, PG-2 は平均 0.16 mm, K-14 は平均 0.10 mm と各々変形はわずかである。MC-12 は 0.26 mm と前 3 種よりやや大きな変形を示す。以後の各測定回数についてみると白金加金合金 2 種は大きな変形を示さず、10,000 回において NG-3 は平均 0.15 mm, PG-2 は平均 0.20 mm

となり、両者とも変形量の増加は 1 回目に対して 0.03 mm, 0.04 mm ときわめてわずかである。しかし、PG-2 は 7,000 回以後に 5 個試料中 1 個が破断している。K-14 は 1,000 回目に平均 0.14 mm と NG-3 と同様な変形量を示すが、それ以後 5 個の試料すべてが破断している。MC-12 はこの変位量で 10,000 回まで破断するものではなく、平均 0.48 mm 変形し、1 回目の変形に対し 0.22 mm 変形量が増加している。

以上、1.50 mm の変位量においても、NG-3, PG-2 の変形はわずかである。MC-12 はこれに比して 2 倍強の変形を示し、K-14 は変形量は少ないが、1,000 回を経過したのちに破断し、ぜい弱な性質を示した。変位量 1.50 mm においても各金属とも 1 回目の変位による変形量が最も多い。

3) 変位量 1.00 mm の場合

1 回目の変位付与により、NG-3 は平均 0.01 mm, PG-2 は平均 0.04 mm, K-14 は平均 0.02 mm, MC-12 は平均 0.04 mm ときわめてわずかな変形を示す。P-100 は平均 0.28 mm と前 4 種に比べ大きな変形を示している。以後の各測定回数についてみると各々大きな変形を示さず、10,000 回において NG-3 は平均 0.02 mm, PG-2, K-14 は各平均 0.05 mm, MC-12 は平均 0.10 mm と変形量の増加はきわめてわずかである。P-100 は平均 0.33 mm と前 4 種より大きな変形量を示す。なお、K-14 はこの 1.00 mm 変位量においても 1 個の試料が破断している。

以上、1.00 mm 変位量において NG-3 は 10,000 回まで 0.01 mm~0.02 mm とほとんど変形が認められず、PG-2, K-14, MC-12 の変形もきわめてわずかである。P-100 は 1.50 mm 変位量における MC-12 の変形量に近い値を示し、前 4 種に比し大きな変形を示している。また、この変位量においても 1 回目の変位による変形量が多い。

4) 変位量 0.50 mm の場合

1 回目の変位付与により、NG-3, PG-2, K-14, MC-12 はほとんど変形しない。P-100 においても平均 0.03 mm ときわめてわずかな変形である。以後、10,000 回まで大きな変化はなく、NG-3 は平均 0.01 mm, PG-2 は平均 0.04 mm, K-14, MC-12 は各平均 0.03 mm, P-100 は平均 0.08 mm と変形量の増加はきわめてわずかである。

以上、0.50 mm 変位量においては各金属とも変形量は微少で、ほとんど変形が認められないが、P-100 は他金属よりわずかに大きい変形を示している。

5) P-100 の変位量 0.25 mm, 0.15 mm 付与の場合 0.50 mm 変位量における NG-3 と P-100 を比較すると, P-100 の変形量は大きく, 1.00 mm 変位量の MC-12 にやや近い値を示している。標準的な鉤用金属として用いた NG-3 の 0.50 mm 変位量における変形量はほとんど認められないので, P-100 についてほぼこの値と同一変形量を示す変位量について検討することが必要となろう。このため, 0.25 mm, 0.15 mm と変位量を減少し測定を行った。

変位量 0.25 mm においては 1 回目の変位付与により平均 0.01 mm, 10,000 回では平均 0.03 mm の変形を示している。この値は変位量 0.50 mm における PG-2, K-14 に近い値をとる。

変位量 0.15 mm においては 1 回目の変位付与により平均 0.002 mm, 10,000 回では平均 0.01 mm の変形を示し, 変位量 0.50 mm における NG-3 と同一の値を示し, この変位量においてほとんど変形を示さないことがわかる。

以上より, 10,000 回経過後の変形量の許容範囲を 0.05 mm と仮定した場合, 各試料とも 2.00 mm, 1.50 mm の変位を与えることは出来ない。1.00 mm 量までの変位を与えられる鉤用金属は NG-3 のみである。0.50 mm 量までの変位量を与えられるものは PG-2, K-14, MC-12 であるが, このうち K-14 は曲げ疲労に対して弱い性質があり, 試料内部に鑄造欠陥が存在する可能性が高いと考えられ, MC-12 はこれと対称的に変形を起こしやすい性質があるので与える変位量については常に 0.50 mm 以下となるよう十分注意すべきであろう。

0.25 mm 量までしか変位を与えられないものは P-100 である。P-100 の 2.00 mm, 1.50 mm 変位量については示さなかつたが, 1.00 mm 量以下の結果で明らかに大きな変形を示し, ここに取り上げる意味はないと考えたことによる。しかし, ここに 2.00 mm 変位量での変形量についてみると, 1 回目に 1.71 mm, 100 回目に 1.74 mm, 1.50 mm 変位量では 1 回目に 0.97 mm, 5,000 回目に 1.06 mm となり, 1 回目の変位付与によりきわめて大きな変形を示している。これに伴ない有効変位量はわずかな量となり, 試料は大きな変形を示すため破断は生じない。P-100 は曲げに対して変形しやすい性質を持つため, 変形を防ぐには与える変位量は当然少ないものとなる。

4. 各変位量と永久変形量との関係

前述のように各変位量において, 1 回目の変位により最も大きな変形量があらわれ, 以後は緩かに変形する傾

向がある。そこで, 各試料について, 各変位量と 1 回目の変形量との関係を観察し, 両者に一定の関係が得られるか否かを検討することにした。

図 24 のように, x 軸に変位量, y 軸に対数を用い変形量をとると, 両者間には直線性がみられ, 下式の指数関数に適合することになる²²⁾。

$$y = Ae^{bx}$$

(y: 変形量 x: 変位量 A, b は常数 e: 自然対数)

この式より

NG-3 は, $(2.64 \times 10^{-4}) e^{3.89x}$ (信頼区間 $0.50 \leq x \leq 2.00$)

PG-2 は, $(2.76 \times 10^{-3}) e^{2.66x}$ (信頼区間 $0.50 \leq x \leq 2.00$)

K-14 は, $(1.70 \times 10^{-3}) e^{2.74x}$ (信頼区間 $0.50 \leq x \leq 2.00$)

MC-12 は, $(2.89 \times 10^{-3}) e^{2.78x}$ (信頼区間 $0.50 \leq x \leq 2.00$)

P-100 は, $(1.61 \times 10^{-3}) e^{5.33x}$ (信頼区間 $0.15 \leq x \leq 1.00$)

となる。この A 値より, NG-3 は 10^{-4} の単位, 他 4 種は 10^{-3} の単位が示され, 少ない変位量, 例えば 0.50 mm, 1.00 mm では NG-3 の変形量が少ないことが想定される。他の 4 種については 10^{-3} の単位でほぼ同様な傾向がみられる。

b 値については, P-100 は 5.33 と最も大きく, ついで NG-3 の 3.89, 他の 3 種は 2.7 前後であり, この直線の傾斜を示す値よりみて, 変位量の増加に伴ない変形量は急激に増加する様相が示されている。この A, b 値は鉤用金属の 1 回変位に対する変形量を表示したものであるが, 大略各鑄造鉤の変形に対する性状を示すものと思われる。しかし, この表示法の連続変位との関連性, 鉤用金属としての良否判定, また基準としての利用などについてはさらに検討を加えたいと考える。

5. 破断面について

前述のように, P-100 を除く各試料は大きな変位を与えた場合に破断がみられる。この破断面を観察し, 破断の原因を解析することは鉤材料の物理的性質, 機械的性質, 製作条件などを検討する上に重要なことである²³⁾。

破面を観察するには巨視的解析, ついで微視的解析を行うことになる^{24,25,26)}。本実験においては, 巨視的には実体顕微鏡 (×20) により, 微視的には走査電子顕微鏡を用い観察した。

巨視的観察においては, 大略の破面様相を知ることが出来るが, 各試料破面性状を区分することは出来ない。

図 24 各変位量と永久変形量との関係 (1 回目の永久変形量)
 なお, 上下の細線は, b 値の推定値の標準偏差を示す (95% 信頼限界)

この観察においては K-14 の破面と NG-3, PG-2, MC-12 の破面の様相には差異がみられ, K-14 は荒く鋭い破面が観察された。

微視的観察においては, 破面の分類は多彩にわたるが, その一つに粒内破壊と粒界破壊に大別して考えることができる。粒内破壊はさらに疲労破壊, 延性破壊, ぜい性破壊に分けられる。

疲労破壊の破面には繰返し応力に対応するストライエーションと呼ばれる縞模様がその特徴としてあげられる。

この破面は図 15, 16, 18 に示すように NG-3, PG-2, MC-12 にみられ, 連続的な一定変位量により一定間隔の規則的な縞模様として観察される。この縞模様の直角方向にき裂は進展し, 破断していくことになる。

延性破壊の破面にはディンプルがみられる。これは材料中の介在物, 折出物が核となつて多数の空洞を形成し, これが成長, 合体して破壊するためであるといわれている。ディンプルには円型の等軸ディンプルと, ある方向に伸びた伸長形ディンプルとがある。

この様相は NG-3, PG-2, K-14, MC-12 の各破面外

図 25 臨床より得られた白金加金合金鑄造鉤の破面(症例1)

図 26 同(症例2)

面にみられる。このことは松田も同様な観察結果を示している。

ぜい性破壊の破面の典型的なものに、へき開破壊がある。これはほとんど塑性変形をおこさずに、へき開面を破壊するためであるといわれている。

この破面は図 17 に示すように、K-14 の内面に観察され、同時に図 17 に示す粒界破壊が外面に観察される。粒界破壊とは、粒界に沿ってほとんど塑性変形なしに破壊したもので、この破面は NG-3, PG-2, MC-12 にはみられず、本実験に用いた K-14 のみにこのぜい性的な

破壊が生じた。

また、各試料の破面には、鑄造欠陥と思われる所見がみられ、とくに、K-14 は大きな鑄巣、介在物が存在している。ついで MC-12, PG-2 となり、NG-3 にはみられない。このことは試料の破断面数と一致し、材質と共に鑄造に際して細心の注意を払って行うことが要求されることになろう。

さて、図 25, 26 は白金加金合金 PG-2 を用いた鑄造鉤の破面で臨床より得たものである。走査電子顕微鏡像によれば、図 25 に示す例では伸長型のディンプルがみられ、せん断、あるいはひき裂きがおこつたと思われる。また、図に示す例ではストライエーションが明確に現われており、疲労破壊をおこしたと考える。ストライエーションの間隔は均一でなく、時として大きな変位が加えられた様相を示している。この像は、変位量が常に一定のものではないことを示唆しており、臨床においては、義歯着脱時に方向性を持たせ、咀嚼時などに移動、回転などを生じない適度な添窩量利用による維持を計らなければならないことを示しているものと言えよう。

V. 結 論

新たに考案した疲労試験機により、鑄造鉤に 10,000 回まで連続して変位を与え、永久変形量の推移と、変形を生じない有効な変位量について検討した。

使用金属は白金加金合金 (NG-3, PG-2), 14K 金合金 (K-14), 金パラジウム銀合金 (MC-12), Ni-Co-Cr 系合金 (P-100) の 5 種で、金属原型を用い一定の形態、寸法の試料を作製した。この試料を片持ち梁とし、与えた変位量は 2.00 mm, 1.50 mm, 1.00 mm, 0.50 mm (P-100 は 1.00 mm, 0.50 mm, 0.25 mm, 0.15 mm) とし、測定した。さらに、測定中に破断した試料について、走査電子顕微鏡により破面解析を行った。

その結果、

1. 各試料はいずれも 1 回目の変位により永久変形量の大部分があらわれ、以後の増加は少ない。
2. 変位付与 10,000 回後における永久変形量の許容範囲を 0.50 mm と仮定した場合、NG-3 は 1.00 mm, PG-2, K-14, MC-12 は 0.50 mm, P-100 は 0.25 mm までの変位量を付与できる。
3. 各試料とも 1 回目の永久変形量と 0.50 mm より 2.00 mm (P-100 は 0.15 mm~1.00 mm) までの変位量間には指数関数により直線性が得られる。
4. 試料の破断は 2.00 mm 変位量において NG-3,

PG-2, K-14, MC-12 に, 1.50 mm 変位量において PG-2, K-14 に, 1.00 mm 変位量において K-14 にみられた。なお, P-100 は与えた変位量が 1.00 mm 以下であるので破断はみられない。

5. 破面観察による内部鑄造欠陥は K-14 が最も多く, ついで MC-12 となる。NG-3, PG-2 には鑄造欠陥はみられないが, PG-2 には時としてきわめて小さい鑄巣がみられる。

6. 走査電子顕微鏡による各破面解析では, NG-3, PG-2, MC-12 の 3 種にはストライエーションとディンプルが観察され延性疲労破壊の様相を示す。K-14 はこれに加え, 粒界, へき開破面が一部に観察される。

7. 永久変形量, 破面観察よりみて, 規定した変位量に $\pm\alpha$ の変位量を考慮すると, 鉤用金属として優れているものは NG-3 である。ついで, PG-2 となり, 以下, MC-12, K-14, P-100 の順に劣る。

稿を終るにあたり, 本論文の御指導, 御校閲をいただきました平沼謙二教授, 川口豊造教授に深甚なる謝意を表します。また種々御教示をいただきました名古屋大学工学部鉄鋼工学科大塚昭夫教授に深く感謝します。さらに, 御協力いただきました補綴学教室, 理工学教室諸先生に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 関根 弘, 田島篤治, 柳川 浩, 高梨恒一, 宮下恒太, 竹井正章: 義歯の力学的研究 (第 7 報) クラスプの力学的考察 (その 1), 補綴誌, 7: 83~87, 1963.
- 2) 関根 弘, 田島篤治, 柳川 浩, 高梨恒一, 竹井正章, 山田洋文, 溝上隆男: 義歯の力学的研究 (その 2) 補綴誌, 7: 169~175, 1963.
- 3) 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, 1962.
- 4) 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, 1964.
- 5) Ney, J.M.: Planned Partial. Conn., 1959, The J.M. Ney Co.
- 6) 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, 1968.
- 7) 山賀 保, 堤 定美, 野首孝詞, 奥野善彦: 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: 618~625, 1976.
- 8) 野首孝詞: 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, 1975.
- 9) Warr, J.A.: Numerical system of clasp design, J. Prosthet. Dent., 11: 1105~1111, 1961.
- 10) 杉山伸顕: 鑄造鉤の維持力に関する研究, 歯学, 52: 97~114, 1964.
- 11) Firtell, D.N.: Effect of clasp design upon retention of removable partial denture, J. Prosthet. Dent., 20: 43~52, 1968.
- 12) 河上正人: クラスプの維持について, 口病誌, 36: 165~182, 1969.
- 13) 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, 1975.
- 14) Elbert, C.A. and Ryge, G.: The effect of heat treatment on hardness of a Chromium-Cobalt alloy, J. Prosthet. Dent., 15: 873~878, 1965.
- 15) Asgar, K., Techow, B.O. and Jacobson, J.M.: A new alloy for partial denture, J. Prosthet. Dent., 23: 36~43, 1970.
- 16) 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, 1974.
- 17) Kennedy, E.: Partial Denture Construction, Henry Kimpton, London, 282~298, 1942.
- 18) 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) 鑄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.
- 19) 竹内洋一郎: わかる材料力学, 東京, 1969, 日新出版, 196~198.
- 20) Farrell, J.H.: Partial denture designing, Henry Kimpton, London: 55~70, 1962.
- 21) Bates, J.F.: Retention of cobalt-chromium partial dentures, Dent. Practic., 14: 168~171, 1963.
- 22) 林 周二: ウィルクス・初等統計解析, 東京, 1956, 財団法人・東京大学出版会, 322~323.
- 23) 中沢 一, 小林英男: P.J.E. Forsyth. 金属疲労の基礎, 東京, 1975, 養賢堂.
- 24) 小寺沢良一: フラクトグラフィー (1), 材料, 23: 412~421, 1974.
- 25) 小寺沢良一: フラクトグラフィー (2), 材料, 23: 479~489, 1974.
- 26) 小寺沢良一: フラクトグラフィー (3), 材料, 23: 593~601, 1974.