

原 著

チタンニオブ合金を用いたクラスプの疲労耐久性の評価

嶋 本 和 也 渡 邊 諒 榊 原 溪 足 立 こと の  
山 本 寛 明 岩 堀 正 俊 都 尾 元 宣

Evaluation of the fatigue durability of titanium niobium alloy denture clasps

SHIMAMOTO KAZUYA, WATANABE RYO, SAKAKIBARA KEI, ADACHI KOTONO,  
YAMAMOTO HIROAKI, IWAHORI MASATOSHI, MIYAO MOTONOBU

[目 的]

近年開発された金属材料のゴムメタルは体心立方構造を持つ $\beta$ 型チタン合金であり、一般的な金属材料よりも大きな弾性変形能を示す金属材料である。本研究はゴムメタルクラスプの部分床義歯への応用について検討した。

[材料および方法]

定変位疲労試験に用いる試料としてゴムメタルを鋳造し試作したクラスプアーム（以下 cast-GM）を 7 個作製した。定変位疲労比較試験と永久変形量の比較として冷間加工プレスによるゴムメタル（以下 GM）、12% 金パラジウム銀合金（以下 12%Pd）、コバルトクロム合金（以下 Co-Cr）の各クラスプアームを 6 個ずつ作製した。

定変位疲労試験は疲労試験機を用いて、鉤腕基部から鉤尖までの長さを 12mm となるようにし、鉤尖から 2mm の部分にアンダーカット量に相当する一定変位（0.5mm）を負荷した。繰り返し一定変位は、25000 回まで 100cycle/min で負荷した。クラスプアーム試料の亀裂等の発生は、cast-GM では 500 回毎に、GM、12%Pd、Co-Cr の比較試験では 20000 回までは 5000 回毎、負荷数 20000 回以降は 1000 回毎に光学顕微鏡を用いて試料表面を観察した。永久変形量の測定は万能試験機を用いて、疲労試験と同様に試料を固定し、鉤尖から 2mm の部分に一定変位（0.25mm）を負荷した。繰り返し一定変位は、300 回まで 10mm/min で負荷し 300 回負荷後の距離を永久変形量として測定した。永久変形量の各群の平均値を、一元配置分散分析により検討し、有意差が認められた場合には多重比較検定として Dunnett 法を行い、有意水準 5% で統計学的分析を行った。

[結 果]

cast-GM の定変位疲労試験では、試料 7 個のうち 2 個に亀裂や破断がみられ、これらの亀裂や破断は試料表面の気泡部分に沿ってみられた。GM、12%Pd、Co-Cr では 25000 回の繰り返し負荷で、固定部・負荷による圧痕とは別に 12%Pd と Co-Cr の 1 個ずつに亀裂がみられたが、GM では亀裂や破断はみられなかった。300 回繰り返し負荷における永久変形量の平均値は GM が 12%Pd、Co-Cr と比較して有意に小さかった。

キーワード：ゴムメタル、クラスプ、定変位疲労試験、チタンニオブ合金

[Purpose]

Rubber metal is a  $\beta$ -type titanium alloy with a body-centered cubic structure that exhibits greater elastic deformability than general metal materials. This study examined the application of rubber metal to removable partial denture clasps.

[Material and Method]

Seven clasp arms (hereinafter referred to as "cast-GM") made of cast rubber metal were fabricated as specimens for the constant displacement fatigue test. For the constant displacement fatigue test and the

comparison of permanent deformation, rubber metal (hereinafter GM) were fabricated using a cold working press. 12% gold-palladium-silver alloy (hereinafter 12%Pd), and cobalt-chromium alloy (hereinafter Co-Cr) as comparison material were made by casting. In the constant displacement fatigue test, the length from the base of the hook arm to the tip of the hook was set to 12 mm, and a constant displacement (0.5 mm) corresponding to the amount of undercut was applied at a point 2 mm from the apex of the clasp arm. Repeated constant displacement was applied up to 25,000 times at a rate of 100 cycles / min. The surface of the clasp arm specimens was observed for cracks every 500 cycles for the cast-GM test, every 5,000 cycles up to 20,000 cycles for the comparison test of GM, 12%Pd and Co-Cr, and every 1,000 cycles after 20,000 cycles using an optical microscope.

To measure the amount of permanent deformation, a universal tester was used to apply a constant displacement (0.25 mm) to the part 2 mm from the hook apex. The constant displacement was applied at 10 mm/min for up to 300 repetitions, and the distance after 300 repetitions was measured as the amount of permanent deformation. The mean values of the permanent deformation of each group were examined by one-way ANOVA, and the Dunnett test with a significance level of 5%.

#### [Result]

In the constant displacement fatigue test, cracks and fractures were found in 2 out of 7 cast-GM samples, and these cracks and fractures were found along the bubbles on the sample surface.

After repeated loading of 25,000 times, cracks were found in samples of both 12% Pd and Co-Cr, apart from indentations due to fixation and loading, but cracks and fractures were not observed in GM. The mean value of the amount of permanent deformation under a 300-time repeated load was significantly smaller in GM than 12% Pd and Co-Cr.

Key words : rubber metal, denture clasp, constant displacement fatigue test, titanium niobium alloy, cold working press

## 緒 言

近年、生体材料や、歯科材料として幅広い分野において、低ヤング率でありながら強度の高い材料の開発が進められている<sup>1)</sup>。その中で開発された金属材料がチタンニオブ合金である。このチタンニオブ合金は一般にゴムメタルと呼ばれている。チタンニオブ合金(以下ゴムメタル)は体心立方構造を持つβ型チタン合金であり、基本的にはTi<sub>13</sub>(Nb, Ta, V) + (Zr, Hf) + Oと表示される組成である<sup>1)</sup>。低ヤング率の材料ほど強度も低くなるという一般的な金属材料のもつ特徴とは異なり、低ヤング率でありながら高強度を示し、一般的な金属材料よりも1桁大きい弾性変形能(約2.5%)を有する超弾性的性質を示す金属材料である<sup>1)</sup>。ゴムメタルはそのしなやかな性質、良好な加工性、そして人体に有害な元素を含有しない等の特徴を生かして眼鏡フレームに应用されたり、弾性変形能が大きく高強度をもつ特性から精密ねじにも実用化されている<sup>2)</sup>。さらに、超弾性を有することから歯科領域では矯正治療用ワイヤーとしても応用されている<sup>1-6)</sup>。

口腔内における部分床義歯の維持・安定は、義歯の予後において極めて重要である。部分床義歯の支台装置には、クラスプとアタッチメントがあるが、我が国では保険診療制度に含まれるクラスプが最も一般的に

用いられている<sup>7)</sup>。クラスプの維持力は、アンダーカット部におかれたクラスプの維持腕が、支台歯の最大豊隆部を越えるときに生じる鉤腕の変形によって発現する<sup>8-10)</sup>が、鑄造クラスプでは一般的に支台歯のアンダーカット量を大きく超える場合は部分床義歯の維持領域として利用することが困難である<sup>11-13)</sup>。その場合はワイヤークラスプを検討することになるが、鑄造クラスプと比べて適合性が劣ることやゆるみによる維持力の低下が起りやすい。しかし、超弾性をもつ材料をクラスプに応用することができれば、従来の金属材料では応用が困難である支台歯の大きなアンダーカット部も部分床義歯の維持領域として利用することが可能になり<sup>8)</sup>、部分床義歯における設計の自由度が向上すると考えられる。

本研究は、鑄造によって作製したゴムメタルを用いて試作したクラスプアームによる定変位疲労試験および冷間加工プレスによって作製したゴムメタルの定変位疲労試験、疲労耐久性と永久変形量を評価し、ゴムメタルの歯科的臨床応用の可能性について検討した。

## 材料および方法

### 1. 鑄造により作製したゴムメタルの定変位疲労試験 (1) 試料

鑄造により作製したゴムメタルの定変位疲労試験の試料は、瀧田ら<sup>14)</sup>の報告で用いた寸法・形状を参考

とし、クラスプ維持腕の形態を想定した。基部幅径1.85mm、厚み1.5mm、先端部幅径1.35mm、厚み1.1mm、長さ20.35mmとした(図1)。試料はジルコニア系埋没材にて埋没し、通法通りアルゴンアーク炉にて casting、研磨し作製した。試料数は7個とした。

## (2) 試験条件

定変位試験は疲労試験機(クラスプ疲労試験機A型, 伊藤エンジニアリング, 京都)を用いてクラスプ試料内面が負荷桿に対して直角となり、鉤腕基部から鉤尖までの長さを12mmとなるように試料を固定し、鉤尖から2mmの部分にクラスプの維持に用いるアンダーカット量に相当する0.5mmの変位になるよう負荷を与えた(図2)。繰り返し定変位は100cycle/minにて、義歯の着脱を1日5回と仮定し約5年間の使用に相当する20000回まで負荷を与えた。疲労試験中でのクラスプ試料の亀裂等の発生は、繰り返し負荷数500回毎に試験機を停止し、形状測定レーザーマイクロスコープ(VK-X100, キーエンス, 大阪)を用いて試料表面の亀裂、破断等を観察した。

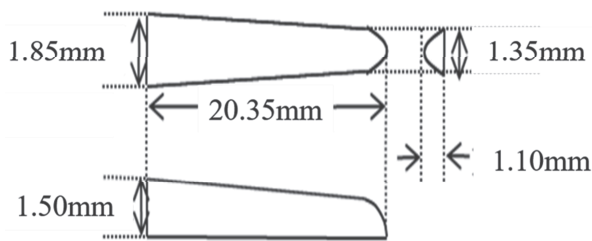


図1 铸造ゴムメタル試料

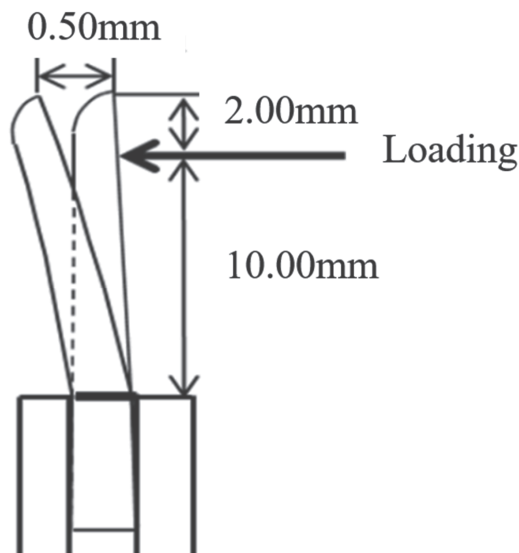


図2 定変位疲労試験(铸造ゴムメタル)

## 2. 冷間加工プレスにより作製したゴムメタル(以下GM)の定変位疲労試験

### (1) 試料

GM試料は、ゴムメタル(直径2.0mm×2000mmの円柱状セントレスCG材)(GUMMETAL®, ニッセイ, 福井)を冷間ロール圧延機(冷間ロール圧延機, ニッセイ, 福井)にて平ロール圧延し、成形装置(タックスヘッド中間・仕上げ製品用機械, ニッセイ, 福井)にて圧延、直線矯正し成形した。加工の制限上、厚さ1.50mm、幅1.80mm、長さ20.35mmの平板状(図3)とした。比較対象として12%金パラジウム銀合金(以下12%Pd), コバルトクロム合金(以下Co-Cr)を使用した。12%Pd試料は铸造用微結晶質金パラジウム銀合金(キャストウエル®, GC, 東京)を通法に従いワックスパターンをワックスアップし、クリストバライト系埋没材(クリスト15m, 松風, 京都)にて埋没、铸造機(Cascom S, デンケン・ハイデンタル, 京都)を用いて铸造を行い、電気炉(1500-plus, デンケン・ハイデンタル, 京都)にて熱処理して作製、通法通り研磨した。Co-Cr試料は歯科铸造用コバルトクロム合金(ヘラニウムEH®, クルツァー・ジャパン, 東京)を通法に従いワックスパターンをワックスアップし、リン酸塩系埋没材(スノーホワイト, 松風, 京都)にて埋没、铸造、研磨し作製した(図4)。各試料は6個ずつ製作した。

### (2) 試験条件

疲労試験機を用いて、GMは負荷桿に対して直角になり基部から先端までの長さを12mmとなるように試料を固定し、先端から2mmの部分にクラスプの維持

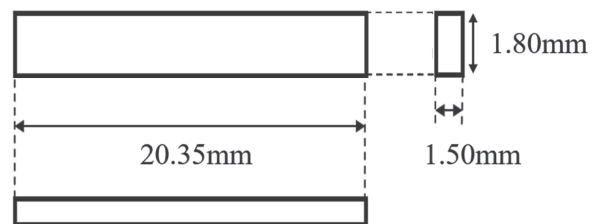


図3 GM試料

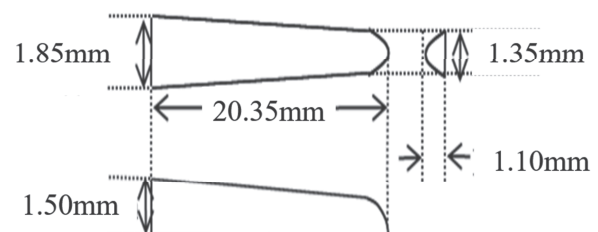


図4 12% Pd, Co-Cr 試料

に用いるアンダーカット量に相当する0.5mmの変位になるよう負荷を与えた(図5)。12% PdならびにCo-Crは鉤腕基部から鉤尖までの長さを12mmとなるように試料を固定し、鉤尖から2mmの部分にアンダーカット量に相当する一定変位(0.5mm)の負荷を与えた(図6)。繰り返し定変位は100 cycle/minにて、義歯の着脱を1日5回と仮定し、約5年間以上の使用に相当する25000回まで負荷を与えた。疲労試験中のクラスプ試料の亀裂等の発生は、負荷数20000回までは5000回毎、負荷数20000回以降は1000回毎に試験機を停止し、形状測定レーザーマイクロスコープを用いて試料表面の亀裂、破断等を観察した。

### 3. 定変位疲労試験による永久変形量の比較

#### (1) 試料

GMは図4と同様の形態、12%Pd、Co-Crは図5と同様の形態とし、各試料6個ずつを用いた。

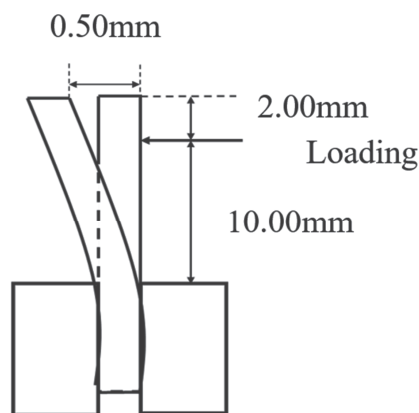


図5 定変位疲労試験 (GM)

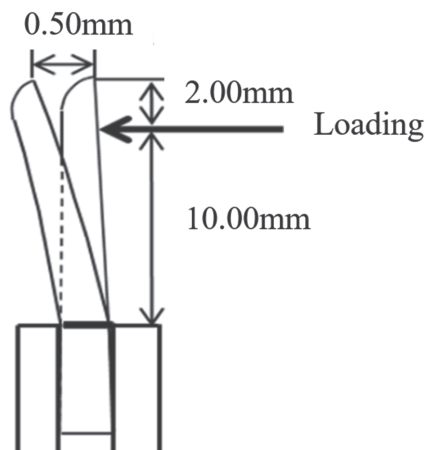


図6 定変位疲労試験 (12% Pd, Co-Cr)

#### (2) 試験条件

繰り返し負荷には万能試験機(EZGraph, 島津製作所, 京都)を用いて、GM試料は負荷桿に対して直角となるように、12% PdおよびCo-Crはクラスプ形態の内面が負荷桿に対して直角となるように試料を即時重合レジン(ユニファーストII®, GC, 東京)にて固定し、鉤尖から2mmの部分にクラスプの維持に用いるアンダーカット量に相当する0.5mmの変位になるよう負荷を与えた。繰り返し一定変位は、10mm/minにて約1か月の使用に相当する300回まで負荷を与えた。鉤尖より2mmの負荷点における負荷前と300回負荷後の距離を永久変形量として測定した(図7)。

各群の平均値の差を一元配置分散分析により検討し、有意差が認められた場合、多重比較検定としてDunnnett法を用いて、有意水準5%で統計学的分析を行った。

#### 4. ゴムメタル表面性状の観察

ゴムメタル表面性状の観察として、定変位疲労試験に用いた鋳造により作製したゴムメタルおよび冷間加工プレスにより作製したゴムメタルを用いた。比較対象として超弾性クラスプワイヤー歯科非鋳造用チタン合金(ネオチタンワイヤー®, 山八歯材工業, 愛知), 歯科鋳造用純チタンインゴット(チタン100®, 松風, 京都)の4種類の試料を用いた。それぞれ耐水研磨紙#2000まで各試料表面を研磨し、走査型電子顕微鏡(S-4500, 日立製作所, 東京)を用いて表面性状を観察した。

### 結 果

#### 1. 鋳造により作製したゴムメタルの定変位疲労試験

鋳造によるゴムメタルを用いて作製したクラスプアームの定変位疲労試験の結果、14500回までの繰り返し負荷では、すべての試料において亀裂や破断は認めなかった。15000回以降には7個の試料のうち1個の試料に亀裂、1個の試料に破断を認めた。亀裂のみられた試料(図8)では15000回の負荷後に鉤腕基部に亀裂が認められたが、その後20000回まで0.5mmの変位を負荷しても亀裂の伸展は認めなかった。破断がみられた試料(図9)では15500回の負荷後に鉤腕基部に亀裂を認め、16500回の負荷後に破断を認めた。

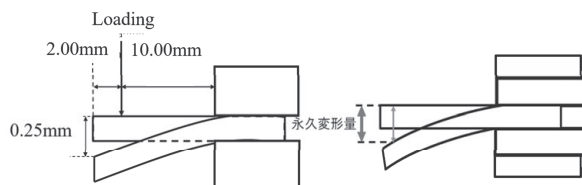


図7 繰り返し負荷試験

2. GM と 12%pd, Co-Cr の定変位疲労試験による比較

GM における 25000 回の繰り返し負荷では、6 個すべてにおいて亀裂や破断は認めなかった。GM 試料代表例の表面顕微鏡像（図 10）を示す。12%Pd 試料は、21000 回の負荷中に試料の 1 個に、負荷側鉤腕基部表面に亀裂を認め、その後 25000 回負荷後まで亀裂の進展を認めた。亀裂のみられた 12%Pd 試料表面顕微鏡像（図 11）を示す。Co-Cr 試料は、23000 回負荷中に 1 個の試料に、非負荷側鉤腕基部表面に亀裂を認めたが、その後 25000 回負荷後まで亀裂の伸展を認めなかった。亀裂のみられた Co-Cr 合金試料表面顕微鏡像（図 12）を示す。

3. 定変位疲労試験による永久変形量の比較

300 回繰り返し負荷試験における GM, 12%Pd,

Co-Cr 各試料の代表的な荷重 - 変位曲線を示す（図 13~15）。GM が最も傾きが小さく、変位に対する荷重が小さい傾向を示し、次いで 12%Pd, Co-Cr の順に傾きが大きくなる傾向を認めた。また、各材料とも 300 回の繰り返し負荷によって荷重の低下とともに変位が

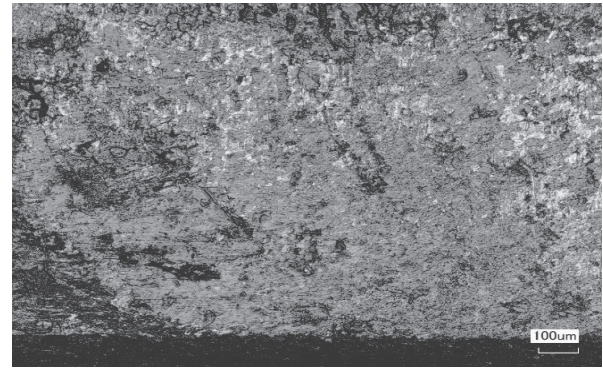


図 10 疲労試験後の GM 試料表面顕微鏡像（代表例）

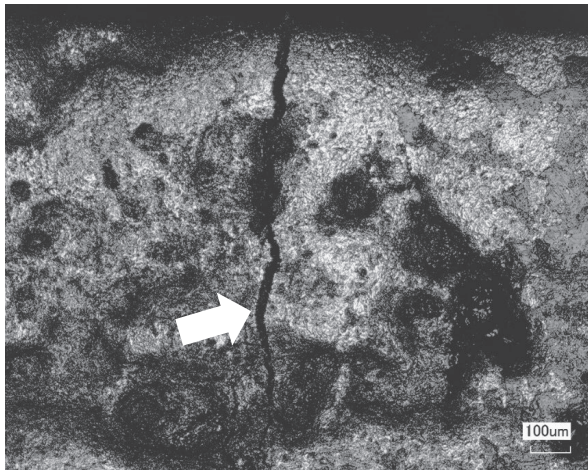


図 8 亀裂のみられた試料表面顕微鏡像（铸造ゴムメタル）

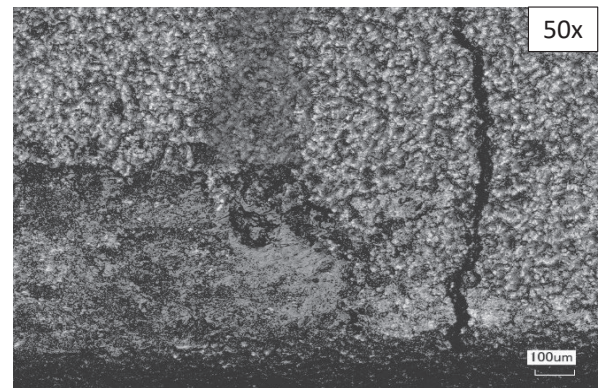


図 11 亀裂のみられた 12%Pd 試料表面顕微鏡像

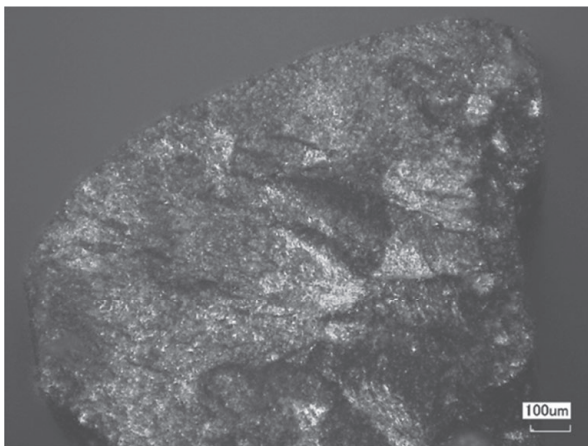


図 9 破断のみられた試料破断面顕微鏡像（铸造ゴムメタル）

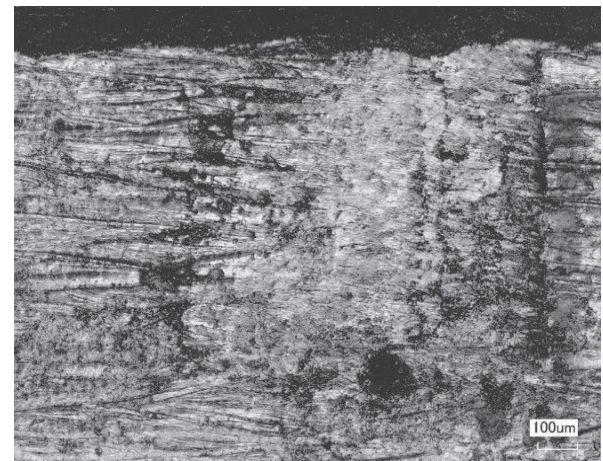


図 12 亀裂のみられた Co-Cr 試料表面顕微鏡像

戻らず永久変形が生じていることが観察された。300回繰り返し負荷における永久変形量の平均値はGM試料で0.081mm, 12%Pd試料で0.170mm, Co-Cr試料で0.149mmであり, GMは12%Pd, Co-Crと比較して有意に小さい結果となった(図16)。

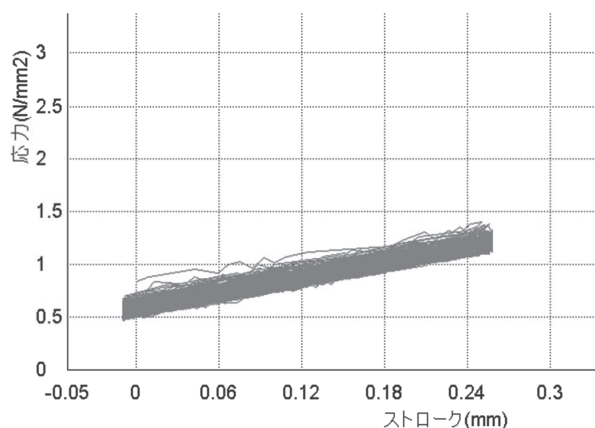


図13 GMの荷重-変位曲線

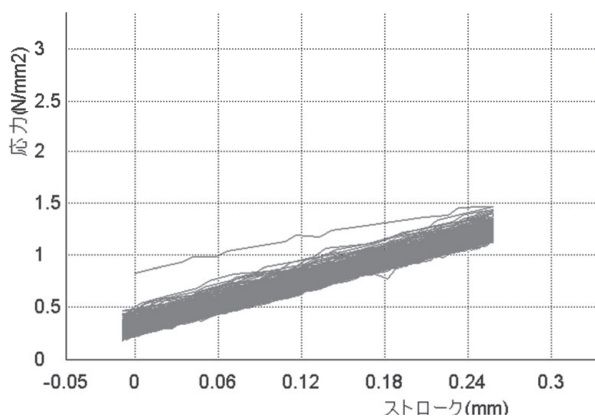


図14 12%Pdの荷重-変位曲線

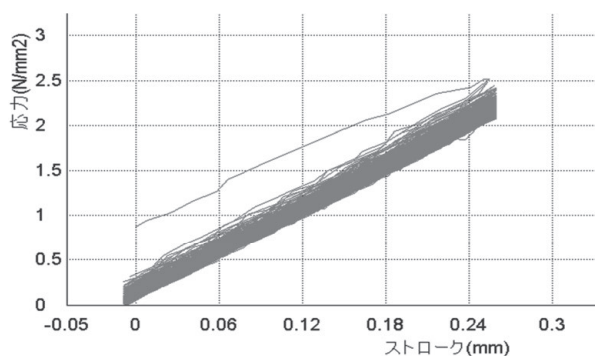


図15 Co-Crの荷重-変位曲線

#### 4. ゴムメタル表面性状の観察

ゴムメタル表面性状の観察を行った各試料表面の走査型電子顕微鏡像を示す(図17)。 castingによるゴムメタルでは表面性状の著しく不均一な粒径分布がみられた。GMでも表面性状の不均一化がみられたが, castingによるゴムメタルと比較すると不均一化の程度は小さかった。ネオチタンワイヤー®, チタン100®では, ゴムメタルと比較すると表面性状は均一であった。

#### 考 察

部分床義歯の構成要素の一つであるクラスプは, 現在臨床で最も普及している支台装置である。クラスプの維持力, 疲労耐久性はこれまで多くの研究にてクラスプの挙動を片持ち梁として考え, それに加わる外力と変形を解析することで評価されてきた<sup>15-23)</sup>。

ゴムメタルは室温における冷間加工性が優れるため加工方法として推奨され<sup>1)</sup> castingによる製作は一般的ではないとされるが, 本研究においては, 現在クラスプ製作に一般的方法としての「casting」によって作製した

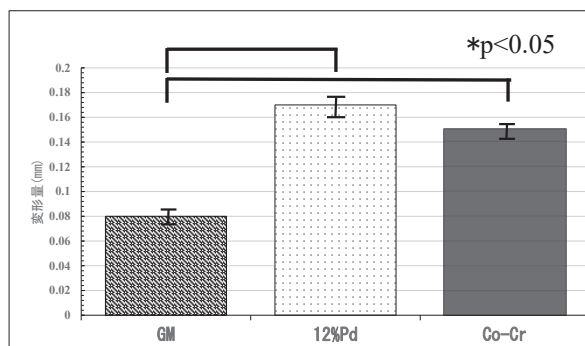


図16 各材料の永久変形量

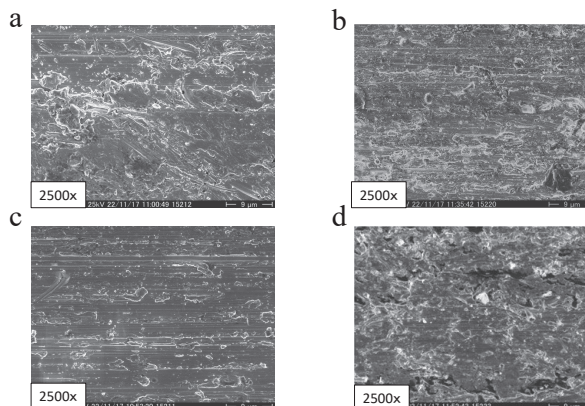


図17 走査型電子顕微鏡像

(a: castingによるゴムメタル b: GM c: ネオチタンワイヤー® d: チタン100®)

ゴムメタルを用い、クラスプの疲労耐久性を片持ち梁状での定変位疲労試験から評価した。義歯の着脱を1日5回と仮定し、一定変位をおよそ5年間の使用に相当する20000回繰り返し負荷の結果、試料7個のうち2個に亀裂や破断を認め、これらは試料表面の鑄巣部分に沿って発生していた。高融点の非貴金属合金は鑄造性が劣り、凝固収縮が大きいと鑄巣が発生しやすいなどの欠点があることから、機械的性質を著しく低下させる原因となる<sup>24, 25)</sup>。渡邊ら<sup>26)</sup>は、クラスプ鉤肩部付近の鑄巣は直径約1.2mm以上になるとクラスプの疲労破壊の可能性があり、支台装置として使用困難であると報告している。このことから、クラスプへの応用については、鑄造によるゴムメタルを用いたクラスプ表面の鑄巣を無くし滑沢に作製する必要があると考えられる。鑄巣の発生率を小さくするには、鑄造温度を低くする必要があるが、鑄造操作的には鑄造温度、鑄込温度、鑄造圧のいずれも高い方が有利であり、どちらを優先させるかが問題である<sup>24)</sup>。さらに、良好な鑄造体を得るためには鑄造時の冷却方法の考慮も重要であり<sup>27)</sup>、今後さらなる鑄造方法の検討が必要であると考えられる。本研究で用いたクラスプの断面形状や厚さであればおよそ3年間の使用は可能であり、鑄造による鑄巣の発生を防ぐことが可能となれば、さらなる長期間の使用にも耐えると考えられる。また、試料表面性状の観察・比較より、鑄造によるゴムメタルではGMと比較して鑄造によるゴムメタルは、鑄造温度と流動性が低く、微細な鑄造欠陥が多くなることから、表面性状における大きな不均一化を認めたと考えられる。これより鑄造操作によってゴムメタルの表面性状とともに、機械的性質にも変化が生じていると考えられる。

GMを用いたクラスプの疲労耐久性は5年以上の義歯使用に相当する負荷を与えても亀裂や破断は認めなかったが、12%Pd試料とCo-Cr試料には亀裂を認めた。これは冷間加工を行ったゴムメタルには鑄造で発生しうる鑄巣が発生しないためと考えられる。

これよりGMを用いたクラスプは5年間以上の使用は十分に可能であり、12%PdやCo-Crと比較しても同等以上に長期間の使用に耐えると考えられる。また、疲労試験による永久変形量の比較から、GM試料の繰り返し負荷による永久変形量は、現在クラスプの金属材料として広く用いられている12%PdやCo-Crと比べ小さかったため、繰り返しの義歯着脱による維持力の変化が小さくなる可能性が示唆された。これはGMには一般金属より10倍以上の高い弾性変形能を有しているためと考えられる。しかし、実用化に向けては、クラスプの形状への成形方法が問題点に挙げら

れる。支台歯に合わせた形状に作製するためには既存の形状からベンディングしていくか、削り出しによって作製する必要がある。既存の形状からのベンディングでは、高い弾性変形能を持つため、支台歯への適合性を得ることが困難であると考えられる。また、屈曲操作による応力の残留が生じ、破折等の原因となることも考えられる<sup>28)</sup>。削り出しによって作製する場合にはコスト面に問題があり、今後の課題と考えられる。

試料表面性状の比較より、GMでは表面性状の不均一な粒径分布がみられたが、これは倉本ら<sup>29)</sup>が報告しているゴムメタルの加工時における微細化挙動であり、ゴムメタルの変形挙動に影響していると考えられる。これまで部分床義歯のクラスプの材質や適用形態と発揮される維持力との関係性について理論的解析や模型実験などによって検討され<sup>7, 30-35)</sup>。部分床義歯の設計に関する一般的な基準が示されている。ゴムメタルの主の組成はチタンであり、これまでのクラスプが支台歯に与える荷重に関する報告<sup>36-41)</sup>や宮嶋<sup>42)</sup>のチタン合金の支台歯に対する側方荷重の報告から、ゴムメタルにおいても支台歯に与える荷重を軽減でき、比較的大きなアンダーカットを有する支台歯にも応用可能であると考えられる。

以上のことから鑄造によるゴムメタルでは鑄造欠陥を防ぐための鑄造方法の検討が必要ではあるが、十分にクラスプとして長期間の使用に耐えうると考えられる。GMは、クラスプの形状への成形方法の検討が必要ではあるが、12%Pd、Co-Crと比較して義歯着脱による変形が小さくできることから、クラスプの維持力の低下を予防でき、既存使用クラスプ材料以上の長期間使用に耐えうると考えられる。

## 結 論

鑄造によって作製したゴムメタルのクラスプ応用は、鑄造操作による気泡が表面に発生しやすいため、現状クラスプへの応用は難しいことが示唆された。

冷間加工プレスによって作製したゴムメタルは、クラスプの形状への成形操作が可能であれば、クラスプへの応用が可能であることが示唆された。

## 利益相反

本研究に際し開示すべき利益相反はない。

## 引用文献

- 1) 古田忠彦, 倉本繁, 黄晟換, 伊東一彦, 斎藤卓. 多機能新チタン合金‘ゴムメタル’の開発. までりあ. 2004; 43: 154-156.
- 2) 倉本繁, 西野和彰, 斎藤卓. 多機能チタン合金. 軽金

- 属. 2005 ; 55 : 618-623.
- 3) Saito T, Furuta T, Hwang JH, Kuramoto S, Nishino K, Suzuki N, Chen R, Yamada A, Ito K, Seno Y, Nonaka T, Ikehata H, Nagasako N, Iwamoto C, Ikuhara Y and Sakuma T. Multifunctional alloys obtained via a dislocation-free plastic deformation mechanism. *Science*. 2003; 300: 464-467.
  - 4) 倉本繁, 古田忠彦, 黄晟換, 陳榮, 西野和彰, 斎藤卓. ゴムメタルの塑性変形. までりあ. 2004 ; 43 : 840-844.
  - 5) 倉本繁, 古田忠彦, 陳榮, 黄晟換, 西野和彰, 斎藤卓, 池田勝彦. ゴムメタルの相安定性と弾性変形挙動に及ぼす酸素の影響. 日本金属学会誌. 2006 ; 70 : 579-585.
  - 6) 倉本繁, 古田忠彦, 黄晟換, 西野和彰, 斎藤卓. EBSPによるゴムメタルの変形組織解析. 日本金属学会誌. 2005 ; 69 : 953-961.
  - 7) 小竹雅人. 超弾性 Ti-Ni 合金キャストクラスピの維持力の検討. 歯材器. 1994 ; 13 : 459-466.
  - 8) 中沢勇. 部分床義歯学 第1版. 京都: 永末書店; 1962 : 84-175.
  - 9) Company N. Planned Partials. USA: *Hartford*; 1970: 9-15.
  - 10) 松尾悦郎. 鑄造鉤の設計 (理論編). 歯界展望. 1961 ; 18 : 456-464.
  - 11) 藍稔, 五十嵐順正. スタンダード部分床義歯学 第1版. 東京: 学建書院; 1997 : 42-46, 78-80.
  - 12) 大橋喬史. パーシャルデンチャーアトラス. デザイン理論と臨床/遊離端義歯を中心に 第1版. 東京: 医歯薬出版; 2005 : 33.
  - 13) 奥野善彦. キャストクラスピの形態と維持力. 阪大歯学誌. 1983 ; 28 : 155-166.
  - 14) 瀧田史子, 岩堀正俊, 若松宣一, 土井豊, 都尾元宣. ハイブリッドレジンを積層したGFRCクラスピの疲労耐久性. 補綴誌. 2009 ; 1 : 46-54.
  - 15) 小野高裕, 野首孝嗣, 奥野善彦, 高橋純造, 古田安宏. 超弾性型 Ni-Ti 合金によるキャストクラスピの力学的研究 第1報 曲げ特性. 補綴誌. 1985 ; 29 : 717-725.
  - 16) 小野高裕, 角南利彦, 野首孝嗣, 奥野善彦, 高橋純造. 超弾性型 Ni-Ti 合金によるキャストクラスピの力学的研究 第2報 繰り返し曲げ荷重に対する変形挙動. 補綴誌. 1987 ; 31 : 830-836.
  - 17) 角南利彦, 小野高裕, 杉山幸三郎, 野首孝嗣, 奥野善彦. 超弾性型 Ni-Ti 合金によるキャストクラスピの力学的研究 第3報 キャストクラスピの適合性. 補綴誌. 1988 ; 32 : 1317-1322.
  - 18) 池辺一典. ワイヤークラスピの力学的研究 鉤腕形態と加熱操作が鉤腕の力学的性質ならびに維持力に及ぼす影響. 阪大歯学誌. 1991 ; 36 : 257-281.
  - 19) 小竹雅人. 超弾性チタンニッケル合金のキャストクラスピとしての力学的検討. 補綴誌. 1995 ; 39 : 189-195.
  - 20) 西山暲. 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. 1976 ; 20 : 43-62.
  - 21) Morris HF, Asgar K, Roberts EP and Brudvik JS. Stress-relaxation testing. Part II: comparison of bending profiles, microstructures, microhardnesses, and surface characteristics of several wrought wires. *J Prosthet Dent*. 1981; 46: 256-262.
  - 22) 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. 1975 ; 42 : 22-41.
  - 23) 瀧田史子, 岩堀正俊, 若松宣一, 土井豊, 都尾元宣. レジンコーティングした円弧型GFRC製クラスプの疲労耐久性. 補綴誌. 2013 ; 5 : 291-299.
  - 24) 那須稔雄, 引地弘子, 野口八九重. 歯科鑄造用 Co-Cr-Ni 系合金の鑄造欠陥に関する研究. 歯理工誌. 1977 ; 19 : 39-47.
  - 25) 谷茂樹. 歯科用高溶合金鑄造冠の鑄巣発生に関するX線非破壊テスト法について. 歯理工誌. 1977 ; 18 : 193-208.
  - 26) 渡邊誠, 黒岩昭弘. 欠陥を内包したチタン製鑄造クラスプの機械的性質に関する研究. 松本歯学. 2009 ; 35 : 150-164.
  - 27) 森下久美子, 榎本貢三, 倉田茂昭. 曲げ試験によるコバルトクロム合金の鑄造性の評価. 神奈川歯学. 2001 ; 36 : 120-125.
  - 28) 白須健一郎. ワイヤークラスピの屈曲操作により生じる残留応力と曲げ特性の検討. 口病誌. 2008 ; 75 : 6-12.
  - 29) 倉本繁, 古田忠彦, 長廻尚之. ゴムメタルの変形機構と結晶粒微細化挙動. 軽金属. 2012 ; 62 : 406-411.
  - 30) 高橋龍彦, 佐野恭之, 平岡道郎, 門井聡, 中井雅人, 田中茂生, 齊藤実, 金澤毅. 鉤の維持力に関する研究その1. 材質と製作者の影響について. 補綴誌. 1989 ; 33 : 589-595.
  - 31) 五十嵐順正, 河田守弘, 朝見光宏, 芝燁彦. 部分床義歯の動揺解析 第2報 義歯の動揺に及ぼす維持装置の影響. 補綴誌. 1990 ; 34 : 128-135.
  - 32) 大島晃. チタン製キャップクラスピの維持力に関する研究. 鶴見歯学. 2004 ; 30 : 41-51.
  - 33) 飛田滋, 河野正司, 渡邊清志, 岡田直. 金銀パラジウム合金を用いたレスト付二腕鉤における鉤腕形態と維持力の検討. 新潟歯学会誌. 2003 ; 33 : 45-51.
  - 34) Marei MK. Measurement (in vitro) of the amount of force required to dislodge specific clasps from different depths of undercut. *J Prosthet Dent*. 1995; 74: 258-263.
  - 35) Park I, Eto M, Wakabayashi N, Hideshima M and Ohyama T. Dynamic retentive force of a mandibular unilateral removable partial denture framework with a back-action clasp. *J Med Dent Sci*. 2001; 48: 105-111.
  - 36) 篠原直幸, 長阪博司, 糸永昭仁, 奥家信宏, 嶺崎良人,



- 自見忠. 維持装置の鉤腕が鉤歯歯根膜に与える影響. 補綴誌. 1993 ; 37 : 1180-1191.
- 37) 八川昌人. 部分床義歯離脱時における維持歯の負荷に関する研究. 補綴誌. 1990 ; 34 : 427-437.
- 38) 篠原直幸, 石田修, 門川明彦, 中原淳, 松下容子, 奥家信宏, 梶原浩忠, 嶺崎良人. 有限要素法による維持装置鉤腕の鉤歯歯根膜への影響についての力学的研究 第1報 3次元有限要素解析の導入. 補綴誌. 1996 ; 40 : 972-979.
- 39) 篠原直幸, 石田修, 門川明彦, 中原淳, 松下容子, 奥家信宏, 梶原浩忠, 嶺崎良人. 有限要素法による維持装置鉤腕の鉤歯歯根膜への影響についての力学的研究 第2報 維持力および拮抗力について. 補綴誌. 1996 ; 40 : 1155-1163.
- 40) 八川昌人, 五十嵐順正, 芝燁彦. 部分床義歯の着脱時に維持歯が受ける負荷 第1報 種々の維持装置における維持歯の負荷. 昭歯誌. 1987 ; 7 : 104-114.
- 41) 八川昌人, 五十嵐順正, 芝燁彦. 部分床義歯の着脱時に維持歯が受ける負荷 第2報 義歯装着による維持歯の経時的な変化について. 昭歯誌. 1988 ; 8 : 105-113.
- 42) 宮嶋一樹. 可撤性部分床義歯における支台装置の維持力・把持力に関する研究. 東北大歯誌. 2010 ; 29 : 21-31.
-