チタンの砥粒反応性と研磨

宮川 修

Reactivity of Titanium with Abrasive Materials and Its Polishing

Osamu Miyakawa

Abstract : Titanium is a difficult-to-machine metal, due to its high reactivity with abrasives. The cutting rate of alumina is significantly low. In contrast, at higher rotational speed and greater grinding force, the cutting rate of carborundum is much greater, but accompanied by severe loss of the tool. Since titanium has low thermal conductivity, the grinding temperature influencing titanium-abrasive reactions should be kept from rising. Relatively low rotational speed and small force are recommended. In addition, the tool should not be depressed against the work during grinding but moved over the work, otherwise unfavorable results are yielded: abrasive attrition, chip loading and oxidation of the surface, or grinding burn. Since polishing is also a procedure of cutting by abrasives, inhibition of titanium-abrasive reaction is an important key to efficient polishing. Recently, two finishing techniques were successfully applied in dentistry, electrochemical buffing and mechanical buffing with colloidal silica as abrasive. When the reaction-inhibition mechanism is clarified in these techniques, a new development will be possible.

Key words : titanium, polishing, abrasive material, chemical wear

I. はじめに

耐食性にすぐれて金属味がなく、しかも金合金に類似の機械的性質をもつチタンは、その歯科応用が期待されてきた。ただ、チタンは高融点で、しかも高温での化学活性が非常に強く、たいていの物質と反応し、ほとんどの酸化物を還元する。歯科応用のためには、チタンと反応しにくい埋没材を開発し、鑄造欠陥を少なくする鑄造方案を確立する必要があった。われわれはここ十数年にわたる一連の研究において、埋没材との反応^{1,2)}および鑄造欠陥の発生機構³⁾に関して種々の問題を提起し、それぞれに解決策を提案してきた。今日では、チタンの歯科鑄造は研究面ではかなりの水準に達したが、残された課題の1つは鑄造体の表面仕上げ法の確立である。

表面仕上げ法には、サンドブラストや化学研磨もあるが、ここでは砥粒による研削・研磨を主に述べる。研削・

研磨とも、加工の本質は砥粒の鋭いかど（砥粒の切れ刃）が加工物を削り取るもので、いずれも広義の切削であることを理解しておく必要がある。加工目的が形態修正か、表面を滑沢に仕上げるかの違いであり、ただか数枚刃の作用か、多数刃の同時作用か、切屑の大きさがmmか、 μm あるいはそれ以下かの違いである。そして、チタンの研削・研磨に影響する最も重要な要因は砥粒-チタン反応である。ここでは、反応性の観点からチタンの研削・研磨を考察する。

II. 難削性金属

光顕組織観察用試料を作成するためにチタンの切断を分析室に依頼すると、大きさにもよるが、快くひきうけていただけない。容易に切れない上に、工具がすぐダメになるからである。チタンとその合金は304-, 309-, 310-ステンレス鋼、ハイスやバイタリウムなどのCo基合金、およびNi基合金とともに、難削性合金だからである。難削材とは、工具寿命が短く、目的の加工面品位を容易に得にくい材料をいう⁴⁾。

新潟大学歯学部歯科理工学講座
Department of Dental Materials and Technology, Niigata University School of Dentistry

表 1 Reaction between difficult-to-machine alloys and tool materials
(quoted partly from reference⁹⁾ and modified)
難加工材と工具材料の反応
(文献⁹⁾から部分的に引用し改変)

		Al ₂ O ₃			SiC		
		reaction	adhesion	wear	reaction	adhesion	wear
alloy	Ni-base alloy	—	—	+	+++	*	++++
	Ti alloy	++++	++++	++++	+++	++++	++++
	Stainless steel	—	—	+	++	*	++++
— : none, * : trace							

— : none, * : trace

歯科用の Co-Cr 合金は硬くて研削・研磨が容易でないといわれてきた。そうした Co 基の合金と比較しても、チタン合金はさらに難削性金属とされている。Si₃N₄, TiN, ZrO₂ といった硬いセラミックスはもちろん難削性であるが、硬くなくとも難削性の材料があり、アルミニウム合金がその典型である。たしかに、酸素を多く固溶するチタンは硬い。したがって、埋没材との反応によってできる鑄造体表面の反応層^{1,2)}は硬くて 1,000 Hv (ビッカース硬さ) 近くなることもまれでない。しかし、鑄造体は表面から 100~200 μm 深さまで硬さが急激に低下して内部はおよそ 180 Hv であり、歯科で一般に使われる純チタンはそれほど硬い金属ではない。チタン鑄造体の研削・研磨が容易でないのは表面が硬いためと考えるのは必ずしも正しくない。チタンとその合金は本質的に難削性金属である。

炭素-鉄合金 (鋼) は、炭素が多い硬鋼よりも、それが少ない軟鋼がダイヤモンド工具では研削しにくいことが知られている。その理由は、炭素が少ない鋼ほど多くの炭素が鋼へ拡散してダイヤモンド砥粒が摩耗するため、これを化学摩耗⁴⁾あるいは拡散摩耗⁵⁾という。これと同様に、チタン合金が難削性である最大の理由はチタンの高い反応性にある。切屑は砥粒に溶着または固着しやすく、両者の反応によって砥粒は摩耗しやすい。表 1 は、アルミナ (Al₂O₃) 砥粒とカーボランダム (SiC) 砥粒をそれぞれ各種の被削材に圧着し、1,500°C のアルゴンガス中に一定時間放置した後の砥粒の体積減少をもとに、反応、凝着、摩耗の程度を定性的に評価・比較したものである⁹⁾。Ni 基合金やステンレス鋼はいずれも難削合金であるが、それらに比してチタン合金の場合は反応、凝着、摩耗が激しい。チタンはこれら以外にも、炭素、コバルト、窒化物など、研削砥粒やその結合材と目されるいろいろな物質とも反応する⁶⁾。ダイヤモンド、カーバイドバーに結合剤として含まれるコバルト、ダイヤモンドに次いで硬い立方晶窒化ホー素 (cubic Boron Nitride, cBN) などチタンを苦手としている。

チタン合金の難削性のもう 1 つの理由は、熱伝導率が鉄の約 1/4、アルミニウムの約 1/10 と小さいことである。研削点の温度は上昇しやすく、研削点温度が高ければ砥粒の化学摩耗が加速される。また、切屑は砥粒にくっつき、

それが砥粒の切削作用を妨害するとともに、あたかも砥粒のごとくに研削面を擦過して、研削面の品質を低下させる。

このほか、純チタンは塑性変形が比較的大きいから、砥粒の切れ刃は切削作用のかわりに、表面を掘り起こす傾向が強いことも難削性の理由としてあげられる。このようにみても、チタンとその合金の研削・研磨はそれほど容易なことでないことがわかる。

III. チタンと砥粒の反応

チタンが砥粒と反応する？ たしかに、チタンの研削面は砥粒や結合剤の成分で汚染されている。しかし、それは乾式高速研削の場合であって、研削点の温度が 1,000°C 近くになれば、チタンの高い反応性からして当然のことと考えていた。ところが、水冷しながらゆっくり研磨しても砥粒成分が研磨面を汚染することがわかった。著者らは、いろいろの粒度のカーボランダム砥粒の耐水研磨紙や、9 μm のアルミナ砥粒のラッピングフィルムを用いて純チタンを流水下でゆっくり研磨し、研磨面の元素分布を EPMA によって分析した^{7,8)}。図 1 は、アルミナフィルムで研磨した面⁹⁾の SE 像と、SE 像の約 1/4 高さの水平線に沿っての Al と酸素の分布を示す。Al と酸素がほぼ対応してまだら状に分布しており、Al の由来は明白である。一方、酸素はすべてがすべて砥粒からのものでない。なぜなら、カーボランダム砥粒の耐水研磨紙で研磨した場合も、研磨面に Si と酸素の同様の分布がみられ⁷⁾、この場合の酸素はもちろん砥粒からのものでない。研磨時には、チタン表面の不動態被膜は砥粒によって破壊され、そのあと即座に再不動態化が起きる。それが酸素の不均一な分布になる。

研磨面の砥粒成分によるこの汚染は、一般に、研磨時に細かく砕かれた砥粒が研磨面へ機械的に埋め込まれた結果と説明されている⁹⁾。図 1 をみると、たしかに、Al と酸素の濃度が異常に高い 2 カ所は研磨面に埋め込まれた砥粒と思われるが、他の点はどうか。XPS によって元素の状態分析を行うと、Al の結合状態は最表面はもちろん内部でも、アルミナのそれとは明らかに異なっていた⁸⁾。一

図 1 A 9 μm -alumina-abraded surface of titanium
SE image and line profiles of TiK β , OK α , and AlK α
along a horizontal line in the lower quarter of the SE
image. To estimate qualitatively the degree of surface
contamination, "Ratio" represents the value
obtained by dividing the AlK α intensity from the
abraded surface by that from alumina
9 μm -アルミナで研磨したチタン表面
SE 像と、SE 像の 1/4 高さの水平線に沿っての
TiK β , OK α , および AlK α の線分析。表面の汚染の
程度を定性的に評価するために、研磨面からの AlK α
強度をアルミナからのそれで割った値を "Ratio" で示
す

方、カーボランダムによる研磨面の Si は SiC の結合状態と似ていた。カーボランダムはともかく、アルミナ砥粒は研磨面に埋め込まれるだけでなく、研磨面を擦過するときにチタンとの間で何らかの反応が起きることがこれからも示唆される。

IV. 研 削

図 2 は、市販のカーボランダム (GC 砥粒) ホイールを用い、乾式で純チタン (KS-50) 铸造体を送り研削 (後述) した場合¹⁰⁾ について、ホイールの周速が削除量 (1 時間値) と研削比に及ぼす影響を、研削力をパラメーターとして示す。なお、直径 20 mm のホイールの回転数が 12,000 rpm のとき、ホイールの周速は約 700 m/min である。当然のことながら、研削力が大きいほど、ホイールの周速が大きいほど削除量は大きい。ここで注目すべきは研削比¹¹⁾ である。これは「被削材の削除された体積」を「ホイールの損耗した体積」で除した値で、砥石車の性能を評価するパラメーターの 1 つである。図 2 によれば、研削比はホイールの周速にほとんど影響されないが、研削力が大きいと 1 に近い値をとる。つまり、削除した被削材と同じ体積だけ砥石車が消耗することであって、カーボランダムポイントで研削するとその直径はみる間に小さくなるのがわかる。

図 3 の SE 像は脱落した砥粒と切屑の形態を示す。丸みをもった粒子が脱落砥粒で、不規則な形状のものが切屑である。理想的な研削では、鉋くずのようにカールした薄いリボン状の“せん断型切屑”が排出されるが、チタンの研削ではこの図にみられるように、むしり取られた“むしり型切屑”がほとんどである。周速が大きいと、研削条痕を

図 2 Grinding performance of a carborundum wheel
カーボランダムホイールの研削性能

図3 SE image of dislodged abrasive particles and chips (carborundum wheel)

Round and irregular particles are abrasive grains and chips or built-up chips between abrasive grains, respectively

脱落した砥粒と切屑のSE像（カーボランダムホイール）
丸みをおびたものは脱落した砥粒。不定形のそれは切屑か、砥粒間隙につまっていた切屑

図4 Grinding performance of an alumina wheel
アルミナホイールの研削性能

有する大きな切屑が多くなる。これは砥粒に溶着して砥粒間隙につまっていた切屑が砥粒とともに脱落したもので、研削条痕はその切屑が研削面を擦過したことを示している。

ポイントを損耗させないで研削することはできない。摩耗して切れ刃が鈍化した砥粒は破碎、劈開、または脱落して、鋭い切れ刃を有する砥粒と交代する。これが砥粒の切れ刃の自生作用¹²⁾であって、この作用が働いてこそ能率的な研削が実現する。普通の材料での研削比が数十以上であるから、このことからチタンは難削性金属であることがわかる。このようなポイントの激しい損耗は、加工コストを上昇させ、作業環境を悪化させる要因にもなる。

図4は、市販のアルミナ（A砥粒）ホイールを用い、乾式で純チタン鑄造体を送り研削した場合¹³⁾について、ホイールの周速が削除量におよぼす影響を、研削力をパラメーターとして示す。図2と比較するとアルミナの場合の削除量はとても少ない。これは表1に示すように、アルミナはカーボランダムに比較してチタンとの反応性がさらに高いことと関係がある。また、カーボランダムは硬く脆く

図5 SE image of an alumina wheel used under a severe grinding condition

Pores in wheel appear dark. Abrasive grains and vitrified binder were entirely worn out to form a flat plane

過酷な研削条件のもとで使用されたアルミナホイールのSE像

黒く見えるのはホイールの気孔。砥粒と結合剤は完全に摩滅して、平坦な面を形成している

て破碎しやすいが、アルミナは高靱性のために破碎よりも摩耗しやすいからである。実際、ホイールの周速が大きいと削除量は減少しているが、これは研削点温度が上昇して砥粒-チタン反応が加速され、図5に示すように、砥粒が激しく摩滅したためである。

砥粒に含まれる不純物の種類や量によって、カーボランダムにはCとGCの砥粒が、またアルミナにはA、RA、WAなどの砥粒があり、それぞれに硬さや脆性/靱性が異なる¹⁴⁾。また、砥粒を把持する結合剤は一般にビトリファイドであるが、焼成条件によって砥粒の把持力を変えられ、硬い砥石、軟らかい砥石として提供されている¹⁴⁾。また、マグネシウムオキシクロライドを結合剤とするC砥粒のホイールはヒートレスホイール¹⁰⁾の名で市販されている。チタンについてこれらの研削性能を比較すると、A砥粒よりもWA砥粒が、また、硬めに焼成されたものが若干有利であるけれども、いずれも研削能率が画期的に向上するものではない^{10,13)}。

図6は、ダイヤモンドとcBNの電着ホール、および技工用カーバイドバーを用いて純チタンを乾式切削した場合の1時間削除量を比較した¹⁵⁾もので、比較のためにカーボランダムホイールによる研削の場合も示した。ダイヤモンドを使っても工具のコストにみあう大きな削除量は得られず、窒化物のcBNはさらに良くなかった。これらには炭素-チタン、窒化物-チタンの高い反応性が現れている。ここで試験したなかでは、カーバイドバーが削除量および耐久性ともに優れていた。加工面の粗さはともかく、大まかな形態修正には使える。

図7は、アルミナホイールを用い、純チタンを乾式研削

図 6 Cutting performance of diamond- and cBN-electrodeposited wheels and carbide bur
ダイヤモンドとcBNの電着ホイール、およびカーバイドバーの切削性能

した場合の時間-累積削除法曲線で、ホイールを一点に押しつけて研削する場合と移動させながら研削する（ここでは、送り研削という）場合とを比較した¹³⁾。カーボランダムの場合も定性的にこれと同様で¹⁰⁾、送りの効果が顕著である。押しつける研削では、被削材と研削工具の接触面積が大きくて個々の砥粒にかかる力が小さいため、砥粒が食い込みにくく、砥粒と研削面の摩擦が優勢になる。したがって、チタンの熱伝導の低さもこれに大いに関係がある。被削材と工具、どちらか一方でも熱伝導がよければ、図7のような顕著な違いは現れない¹⁵⁾。図2～6はいずれも送り研削の結果であるが、ポイントを移動させながら研削することがとても重要である。そうしないと、砥粒がたちまち摩滅して削れなくなる。

図2～7はいずれも乾式研削の結果である。確認のための実験は行っていないが、水冷しながら研削すれば、研削点の温度上昇が抑えられて砥粒-チタン反応も抑制されるはずで、研削能率の向上にとって有効な方策と考える。

いずれにしても、チタンの高反応性と低熱伝導性に十分に配慮して、回転数と力を低めにおさえ、送り研削に徹することが肝要である。乱暴な研削は研削面を酸化させ、ついには研削焼けに至らしめる。砥粒や結合剤の成分が研削面を汚染する^{10,13)}。

V. 研 磨

チタンの研磨は鏡面が得にくいとよくいわれる。すでに述べたように、研磨も砥粒の研削作用を利用するものであるから、研磨能率を阻害する要因は砥粒-チタン反応である。砥粒の摩耗、表面のむしり取り、および砥粒に固着した切屑（ごく小さなものだから、それはチタン酸化物かも）による研磨面の擦過などが、砥粒の切れ刃の均一な擦過除去作用を阻害する。したがって、むしろ砥粒の摩耗の原因となる砥粒-チタン反応を抑制することが研磨能率

図 7 A proposal for efficient grinding
能率的な研削方法の提案

を向上させる鍵である。

砥粒-チタン反応を抑制する方法はいくつか考えられようが、釜田ら¹⁶⁾は、チタンの反応性を逆手に取ってこれを利用する。つまり研磨面上にそうした反応を阻害する安定な化合物のごく薄い膜を形成することを提案し、電解複合研磨と、コロイダルシリカを研磨材とする研磨法を紹介した。そして、これらの歯科応用が最近検討されている¹⁸⁻²⁴⁾。

1. 電解複合研磨

電解複合研磨は、化学塔槽内面のステンレス鋼を鏡面仕上げするため、前畑ら¹⁷⁾によって開発された技術で、イオン単位の除去作用をもつ電解作用に、砥粒による機械的除去作用を組み合わせた表面仕上げ加工技術である。その後、同グループによって、これがチタン合金の研磨にも応用され¹⁶⁾、真空容器の内壁の研磨など、摘要分野が拡大されている。

大川ら¹⁸⁻²¹⁾は、この電解複合研磨法を歯科に応用することを試み、電解液の種類、砥粒の種類、電解電圧、パフホイールの周速の影響などを検討し、歯科技工におけるチタンの電解複合研磨法の有効性を検討した。それによると、5%の硝酸カリウム水溶液に5μmのアルミナを懸濁させた研磨液を用いた場合、電解電圧5Vから鏡面が得られ、10Vでは面の表面粗さが0.038μmRaに到達した。5V以上では、電解電圧とともに研磨面は黄金色が濃くなっていった。研磨前に平均185Hvであった硬さは、6V以上の電圧で研磨すると、200～210Hvと大きくなった。また、ブラシ研磨や電解電圧0Vの場合では、研磨面はAlで汚染されていたが、電解複合研磨面ではそれはほとんど検出されず、かなり清浄面が得られた。パフホイールに電気伝導性を付与する必要がある、より安全な電解液の選択などの課題はあるが、有効な方法になることが期待される。

2. コロイダルシリカ研磨材

平田ら²²⁻²⁴⁾は、チェアーサイドにおけるチタンの研磨

法の確立をめざして一連の研究を行っている。第一報²²⁾では、金銀パラジウム合金を既存の歯科用研削・研磨材で研磨すると表面粗さを $0.05 \mu\text{mRa}$ 以下に容易にできるが、耐水研磨紙および従来の歯科用研削・研磨材ではチタンを十分に研磨できないことを示した。第二報²³⁾では、チタン専用研磨材を用いて1分30秒で $0.18 \mu\text{mRa}$ 以下の平滑な面が得られたこと、第三報²⁴⁾では、研磨材としてコロイダルシリカ溶液を用いてバフ研磨すると1分間で $0.08 \mu\text{mRa}$ の面が得られ、これは市販チタンインプラントのアバットメントの最も滑沢なものの値に匹敵することを、それぞれ報告している。

コロイダルシリカを研磨材として使う方法は、工業の分野では熊谷ら²⁵⁾が報告している。これを紹介した釜田ら¹⁶⁾によると、研磨表面に被膜ができてそれが砥粒-チタン反応を抑制すると説明されている。ただ、被膜の存在が確認されたか否か、被膜の性状がどのようなものか、いずれも定かでない。また、砥粒の大きさの違いはあるが、シリカでうまくいってアルミナでうまくいかないのはなぜか、電解複合研磨の場合でも、研磨効率に主に寄与するのは電解作用か、あるいは生成する酸化皮膜か、などわからないことが多い。「砥粒-チタン反応を抑制する被膜」という概念は単純明解であるが、現象はサブミクロンあるいは nm の世界のことで、それほど単純でないと考える。それぞれの場合の研磨機構が基礎的に解明されれば、そこから新しい展開、方法が生まれてこよう。

VI. 結 論

チタンは高い反応性のために本質的に難削性の金属である。アルミナは、カーボランダムよりもチタンとの反応性が高く、靱性もあって劈開しにくいので、砥粒の摩耗や目づまりを起こしやすく、切れ味がよくない。形態修正には不向きである。一方、カーボランダムは削除量をかせぐことはできるが、ポイントの損耗が激しい。カーバイドパーはおおまかな形態修正には有効であろう。

チタンは熱伝導がよくないので、研削点温度が上昇して砥粒-チタン反応を加速しやすい。そうならないように、回転数と研削力を低くおさえ、ポイントは一点に押しつけるのではなく、移動させることが肝要である。そうでないと、アルミナの場合は砥粒の摩滅や目づまりを、カーボランダムの場合はポイントの激しい損耗につながる。いずれの場合も、加工面は酸化しやすく、時に研削焼けを起こす。砥粒や結合剤の成分による研磨面の汚染を激しくする。

研磨も基本的には砥粒の切削作用であるから、能率的な研磨にとって砥粒-チタン反応をいかに抑制するかが鍵である。最近、電解複合研磨法と、コロイダルシリカを研磨材として用いる方法とが検討され、それぞれに成果をあげ

ている。ただ、どちらも、砥粒-チタン反応の抑制機構は解明されていないように思われる。研磨については基礎と応用の両面から、さらなる研究が望まれる。

文 献

- 1) 宮川 修, 塩川延洋. チタン鑄造体の表層に形成される多層構造の組織. *Quintessence Dent Technol* 16: 95-103, 1991.
- 2) Miyakawa O, Watanabe K, Okawa S et al. Layered structure of cast titanium surface. *Dent Mater J* 8: 175-185, 1989.
- 3) 渡辺孝一. チタン湯流れ観察による一方向加圧鑄造と全方向加圧鑄造の鑄込み特性の比較検討. 平成6・7年度 (一般研究(B) 06454553) 研究成果報告書, 1996.
- 4) 精密工学会編. 精密工作シリーズ 研削工学 148-162, 東京: オーム社, 1987.
- 5) 鈴木節男. 難加工材の切削・研削・ドリル加工一現場に活かす実践技術一 30-32, 東京: 海文堂出版, 1990.
- 6) 吉岡嘉太郎, 西 良正, 山本重男. 難削性材料の加工技術 49, 58, 東京: 先端加工機械技術振興会, 1985.
- 7) Miyakawa O, Watanabe K, Okawa S et al. Surface contamination of titanium by abrading treatment, *Dent Mater J* 15: 11-21, 1996.
- 8) Miyakawa O, Okawa S, Kobayashi M et al. Surface contamination of titanium by abrading treatment. *Dentistry in Japan* 34: 90-96, 1998.
- 9) 佐々木恒孝, 玉井康勝, 久松敬弘ほか編. 表面工学講座1 表面の構造 75-79, 東京: 朝倉書店, 1971.
- 10) 宮川 修, 渡辺孝一, 大川成剛ほか: チタンの研削に関する研究 (第1報) 炭化珪素系の市販および試作ホイール. 歯材器 9: 30-41, 1990.
- 11) 田中義信, 津和秀夫, 井川直哉. 精密工作法 上 (第2版) 158, 193, 東京: 共立出版, 1985.
- 12) 田中義信, 津和秀夫, 井川直哉. 精密工作法 上 (第2版) 194-197, 東京: 共立出版, 1985.
- 13) 宮川 修, 渡辺孝一, 大川成剛, ほか. チタンの研削に関する研究 (第2報) アルミナ系の市販ビトリファイドホイール. 歯材器 9: 42-52, 1990.
- 14) 河村末久, 矢野章成, 樋口誠宏ほか. 加工学基礎2 研削加工と砥粒加工 4-9, 東京: 共立出版, 1987.
- 15) 宮川 修, 渡辺孝一, 大川成剛ほか. チタンの研削 (第3報) 電着ホイール. 歯材器 9 (Special Issue 16): 186-187, 1990.
- 16) 釜田 浩, 前畑英彦. 電解複合研磨法でチタン素材を鏡面仕上げ. *応用機械工学* 8: 161-166, 1987.
- 17) 前畑英彦, 大工博之, 馬場吉康. 電解複合研磨技術による金属表面のクリーン化. *表面技術* 40: 40-45, 1989.
- 18) 大川成剛, 金谷 貢, 渡辺孝一ほか. 電解複合研磨 (ECB) によるチタン鑄造体の鏡面仕上げについて. 第9回歯科チタン研究会講演抄録集: 35-36, 1996.
- 19) 大川成剛, 金谷 貢, 渡辺孝一ほか. チタンの電解複合研磨 (ECB) について一研磨条件の違いによる仕上げ面粗さ一. 歯材器 15 (Special Issue 27): 226-227, 1996.
- 20) 大川成剛, 金谷 貢, 渡辺孝一ほか. 電解複合研磨したチタン

表面の XPS による分析. 歯材器 16 : (Special Issue 29) : 55, 1997.

- 21) 大川成剛, 金谷 貢, 渡辺孝一ほか. 導電性ポイントによるチタンの電解複合研磨. 第 11 回歯科チタン研究会議抄録集 : 48-49, 1998.
- 22) 平田哲也, 中村隆志, 高島史男ほか. チェアーサイドにおける歯科補綴物の研削・研磨に関する研究 第 1 報 チタンの研磨について. 歯材器 15 (Special Issue 29) : 118-119, 1996.
- 23) 平田哲也, 中村隆志, 高島史男ほか. チェアーサイドにおける

歯科補綴物の研削・研磨に関する研究 第二報 チタンの短時間研削・研磨について. 歯材器 16 (Special Issue 30) : 121, 1997.

- 24) 平田哲也, 中村隆志, 高島史男ほか. チェアーサイドにおける歯科補綴物の研削・研磨に関する研究 第三報 チタンの鏡面研磨について. 歯材器 17 (Special Issue 31) : 149, 1998.
- 25) 熊谷ほか: チタンのメカノケミカルポリッシング, 昭和 54 年度精機学会秋期学術講演会論文集 : 241, 1979. 文献 16) における引用.