

原 著

鋳造および機械加工法によるチタン材料の性状について

根岸 政明¹⁾, 竹部 茂¹⁾, 神田 俊昭¹⁾, 古沢 康仁¹⁾,
五十嵐 雅子²⁾, 佐野 裕子²⁾, 下河辺 宏功³⁾, 内田 安信²⁾

財団法人歯友会 歯友歯学会附属医療機材研究所¹⁾

明倫短期大学 歯科技工士学科²⁾

明倫短期大学 歯科衛生士学科³⁾

(指導: 下河辺宏功 教授)

Mechanical Properties and Dimensional Properties of Titanium in Casting and Machining

Masaaki Negishi¹⁾, Shigeru Takebe¹⁾, Toshiaki Kanda¹⁾,
Yasuhito Furusawa¹⁾, Masako Ikarashi²⁾, Yuko Sano²⁾,
Hirokata Shimokobe³⁾, Yasunobu Uchida²⁾

The Medical Machinery and Materials

Laboratory attached to Shiyuu Academic Dental Circles, The Siyuukai Foundation¹⁾

Department of Dental Technology, Meirin College²⁾

Department of Hygiene and Welfare, Meirin College³⁾

(Chief: Prof. Hirokata Shimokobe)

チタン材料はCAD/CAM システムを用いた機械加工法による補綴用材料の1つとして利用されている。しかし機械加工によるチタン材料の機械的性質に関する報告は少ない。そこで本研究では従来法である鋳造法と、CAD/CAM 技術による機械法で加工されたチタン材料の機械的性質と加工精度について考察をおこなった。機械的性質は、他の一般的な歯科用金属材料のJIS 規格値と比較するため、ビッカース硬さ試験と引張試験をおこなった。また加工精度に関する試験では、試験片の厚みを10 mm の狙い寸法で加工しその精度について評価した。さらに寸法精度に影響する表面あらさについても試験をおこなった。結果として、鋳造加工法は機械加工法に対してビッカース硬さについては4倍(554 HV:151 HV)、引張強さでは1.5倍(637 MPa:409 MPa)の数値を示した。加工精度は鋳造加工法では $\pm 80 \mu\text{m}$ 、機械加工法では $\pm 15 \mu\text{m}$ であった。また表面あらさは表面研磨仕上げ前後のいずれの状態においても機械加工法が鋳造加工法より小さい数値を示した。結論として、1) 機械的性質のJIS 規格値から、機械加工法によるチタン材料はインレー、クラウンの範疇に、また鋳造加工法ではバー、クラスプの範疇に属していた。2) 適合性に影響を及ぼす寸法精度は機械加工法が優れていた。3) 研磨作業性についても機械加工法に優位性が認められた。

キーワード: チタン, 機械加工法, 鋳造加工法, 機械的性質, 寸法精度

Titanium has been introduced as one of the restorative materials for machining technology using the CAD/CAM system. However, few papers have reported on the mechanical properties of machined titanium. The present study examined the mechanical properties and manufacturing dimensions of titanium fabricated by two methods, i. e., a conventional casting method and a machining method using CAD/CAM technology. Mechanical properties were evaluated by Vickers Hardness Number (VHN) and tensile strength compared with the standardized JIS specification of the dental metal alloys. The manufacturing dimensions were estimated by reproducibility of the target dimension of 10 mm. The dimensional accuracy was assessed by referring to the characteristics of the surface roughness. The results obtained were: VHN and tensile strength in the casting method (554HV, 637MPa) were 4 times

and 1.5 times as large as those in the machining method (151HV, 409MPa), respectively. The manufacturing dimensions of the casting method and the machining method were $\pm 80 \mu\text{m}$ and $\pm 15 \mu\text{m}$, respectively. The surface roughness in the machining method was significantly smaller both before and after polishing than that in the casting method. The results suggest that: 1) the properties of machining titanium belong to the inlay and crown category according to the classification of JIS specification, and the casting titanium belongs to bar and clasp; 2) from a viewpoint of cavity adaptation, the machining method is superior to the casting method; and 3) polishing technique is easier in machining method than in the casting method.

Key words : Titanium, Machining method, Casting method, Mechanical properties, Dimensional accuracy

緒 言

我々は歯科補綴物の製作手段として、近年注目されている CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) 技術¹⁻⁶⁾の導入を検討してきた⁷⁾。従来の一般法ではクラウンやブリッジなどの加工法として、金属材料では鑄造加工法が主流となっているが、特に生体親和性に優れたチタン材料については難鑄造材とされており、鑄巣、強度、表面研磨性等、諸々の問題を有している。これらを解決するための新しい技術として著者らは CAD/CAM による加工法の 1 つである NC (Numerical Control) 機械加工に取り組んでいる。本加工法ではボールエンドミルによる切削加工法を用いるが、臨床に応用するにあたり機械加工で製作した歯科補綴物はどのような物性や特徴を有するかを確認しておくことが必要である。

しかし JIS 規格では歯科用チタン材料に関する規格はなされていない。またチタン材料の鑄造法に関す

る物性の研究は多く発表されているが⁸⁻¹²⁾ 機械加工法についての報告は少ない。そこで本研究では機械加工法と鑄造加工法に関する機械的性質について他の一般的な歯科用金属の JIS 規格数値 (JIS T 6106, 6108, 6113, 6115, 6116) とともに比較した。また高精度の適合性を得るためには寸法管理が重要となるため、両加工法による寸法精度と表面あらさを調べ機械加工法による特性を考察した。

実験材料および実験方法

JIS 規格では一般歯科用金属材料をビッカースまたはブリネルによる表面硬さ、引張強さと伸びについて規定している。本実験ではこれら JIS 規格に準じ、機械加工法と鑄造加工法を比較する項目として機械的性質は、ビッカース表面硬さ、引張強さ、伸びについて、また適合性の比較のため寸法精度と表面あらさについて試験をおこなった。

1. ビッカース硬さ試験

試験片は純チタン JIS 2 種 (千葉金属製) を使用し、

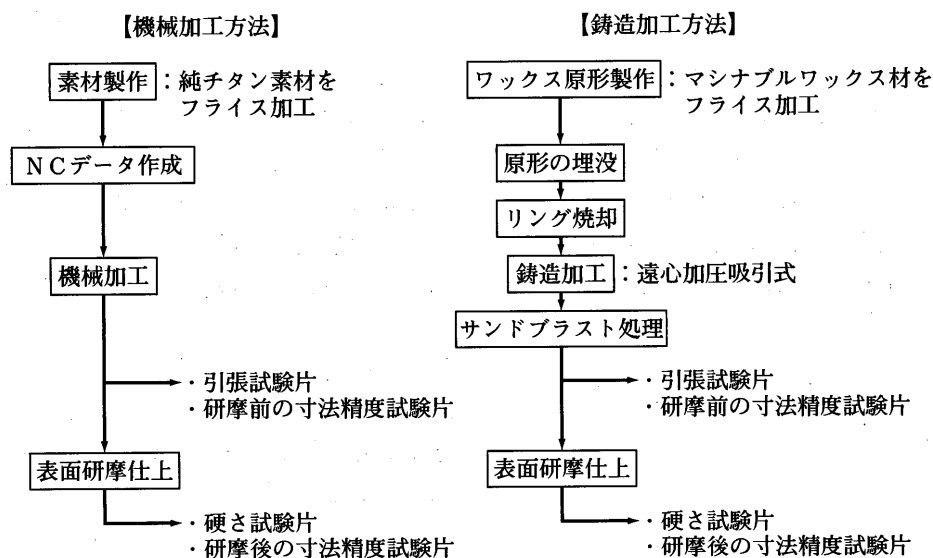


図1. 試験片の製作方法

図1に示す方法で機械加工法、鋳造加工法ともに5個の試験片を9×10×30 (mm)の直方体形状に製作した。

機械加工法では補綴物の製作を想定、3次元加工に必要なボールエンドミル(直径5 mm)を使用し送りピッチ0.2 mm, 送り速度150 mm/min, 回転数6400 rpmで平面加工をおこなった。また機械加工時にはチタン材の表面の加工硬化現象を防止するため、切削水溶液によるクーラント処理を施した。表面処理は補綴物の最終状態と同等にするため、研磨仕上までをおこなった。

鋳造加工法ではワックス原形製作時に、素材としてマシナブルワックスを用い、高精度の平面を得るためフラットエンドミル(直径8 mm)による機械加工で製作した。埋没材にはリン酸塩系(バイエルリボサーモ)を使用、鋳造は遠心加圧吸引式(松風ヴァルカン-T)を採用した。仕上は機械加工法と同様に研磨仕上までをおこなった。

硬さはビッカース硬さ試験機(アカシMVK-H2)により機械および鋳造加工法の試験片各5個について長手方向の側面から約5 mmの位置2か所で10 mm高さの上面を測定した。

2. 引張試験

試験片はJIS 2201の7号試験片に準じた形状とし、材料は純チタンJIS 2種を使用して図1の手順で機械加工法、鋳造加工法それぞれ各5個の試験片を製作した。表面研磨仕上をおこなった場合、機械加工法と鋳造加工法で研磨量が異なることが予想され、断面積数値に差が生じないようにサンドブラスト処理までとし、研磨仕上はおこなわなかった。また機械加工法の機械加工時と鋳造加工法のワックス原形製作時に正確な幾何形状の試験片を得るためフラットエンドミル(直径6 mm)を使用し加工した。

引張試験は万能試験機(島津RS-2T)により機械および鋳造加工法の試験片各5個についておこなった。試験片の破断状態を確認するため破断するまで荷重を加え、最大引張荷重および破断面を突き合わせた時の標点間の伸び量を測定し、次の式(JIS Z 2241)により引張強さと破断伸び率(推定値)を求めた。

$$\text{引張強さ} = \frac{\text{最大引張荷重 (kgf)}}{\text{断面積 (12 mm}^2\text{)}} \times 9.806 \text{ MPa}$$

$$\text{破断伸び率 (推定値)} = \frac{\text{破断時伸び量 (mm)}}{\text{標点距離 (14 mm)}} \times 100 \%$$

3. 寸法精度試験

試験片は純チタンJIS 2種を使用し、9×10×30 (mm)の直方体として機械加工法、鋳造加工法ともに各5個を図1に示す方法で製作した。寸法精度の比較対象の部位は10 mmとなる上下面で構成される高さ寸法とした。機械加工法では素材製作時にチタン素材を高さ10.4 mmでフライス加工し、機械加工時に高さ部上下面を各0.2 mmずつの仕上代として、高さ寸法目標値を10 mmで設定してボールエンドミル(直径5 mm)にて直接切削加工した。また鋳造加工法ではワックス原形製作時にマシナブルワックスをフラットエンドミル(直径8 mm)による機械加工で高さ部を10±0.01 mmで仕上げており、原形時点での寸法誤差が出ないように配慮した。加工条件は硬さ試験片製作時と同じにした。

寸法精度の比較評価のため、10 mmの高さ部寸法をデジタルノギス(最小目盛0.01 mm)で各5個の試験片の左側、中央、右側の3か所を表面研磨仕上の工程の前後で2回測定した。

4. 表面あらさ試験

試験片は寸法精度試験で製作した試験片を使用した。表面あらさ測定はフォームタリサーフ(テーラーホブソン)で各加工法試験片の10 mm高さ部上面の中央付近を表面研磨仕上工程の前後で測定した。また測定条件は最終仕上状態で最大高さRyが10 μm以下であると想定しJIS B 0601によりカットオフ値0.8 mm, 評価長さ4 mmで設定した。

5. 統計処理法

統計処理は各測定値から平均値と分散値を求めt分布(Student分布)¹³⁾より有意水準1%で検定確認した。

結果および考察

1. ビッカース硬さ試験

図2の左図に各加工法による試験片のビッカース硬さ試験の結果を示す。鋳造加工試験片のビッカース硬さ平均554 HVが機械加工の151 HVより4倍程の高い値を示したが、数値のばらつきは鋳造加工法の標準偏差45.0 HVが機械加工法の10.6 HVより顕著であった。このばらつきについて考察するため、追加試験として表面研磨仕上前の鋳造加工試験片の表面からの深度による硬さの変化を調べた。機械加工面では表面硬さが低く比較的安定していたため機械加工による影響は少ないと判断し、0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mmの順でフラットエンドミルによる機械加工で鋳造加工試験片の鋳肌表面を追い込んだ。それぞれの深度での表面を2回ずつ硬さ測定した結果、0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mmの追い

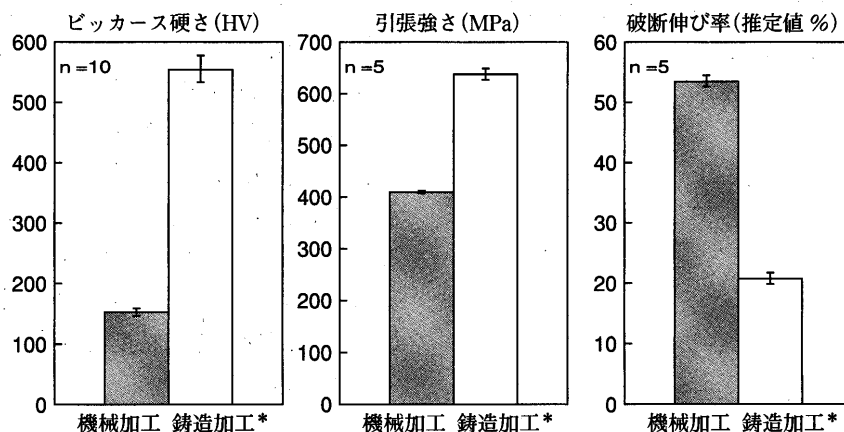


図2. 機械加工と鋳造加工による純チタン試験片の機械的性質
*機械加工に比較し $P < 0.01$

込み面はそれぞれ約 700 HV, 350 HV, 280 HV と変化しており、表面付近ではわずかな範囲で内部へ行くに従い急激な硬さの低下を示すことが判明し、仕上時の研磨量の多少の違いが硬さのばらつきに参与していると考えられた。

2. 引張試験

写真1, 2に引張試験後の破断した各加工法の試験片を、また図2の中央図と右図に引張強さと破断伸び率(推定値)の結果を示す。写真1の機械加工試験片



写真1：引張試験後の機械加工試験片

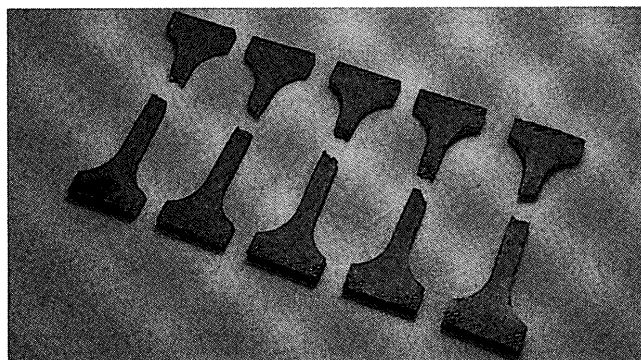


写真2：引張試験後の鋳造加工試験片

は標点間の範囲の素材が餅状に伸びており、すべての試験片が中央付近で破断し金属組織が均一であると推測された。一方、鋳造加工試験片は引張強さ平均が 637 MPa で機械加工試験片 409 MPa の約 1.5 倍であるが、破断伸び率は半分以下の数値であった。鋳造加工試験片は写真2から破断位置に規則性はなく、また破断後の試験片は表面に多数のヒビ状を呈しているが、表面硬さが高い割りに破断伸び率(推定値) 20.8% が比較的高い数値を示しており、表面は脆弱であるが内部は粘りを有していると考えられ、硬さ試験結果と同様に、表面と内部の金属組織の不均一性が示唆された。

3. 他の歯科用金属材料との機械的性質の比較

図3, 4に現在 JIS 規格により規定されている歯科用金属材料の表面硬さと引張強さを示す(JIS T 6106, 6108, 6113, 6115, 6116)。併せて今回おこなったチタン材料の機械加工法と鋳造加工法による試験結果を重ねた。

チタン材料の機械加工法では金銀パラジウム合金1種、銀合金, 14カラット金合金1種、金合金タイプ3, 4軟化の範囲に、また鋳造加工法では銀合金, 14カラット金合金2種、金合金タイプ4軟化、および硬化の範囲内に入っている。また工業用のチタン JIS 2種の規格ではチタン材料の機械加工が範囲内であるが、鋳造加工では引張強さが上限を大きく超えており、機械加工では素材(インゴット)の機械的性質が変化せず維持されていることと、鋳造加工で特性が大きく変化することが判明した。

それぞれの歯科用金属材料の JIS 規格(JIS T 6106, 6108, 6113, 6115, 6116)で指示された主な用途を突き合わせるとチタン材の機械加工による製品はクラウ

ン、インレーに適しており、チタン鑄造加工ではバー、クラスプに適していると考えられる。

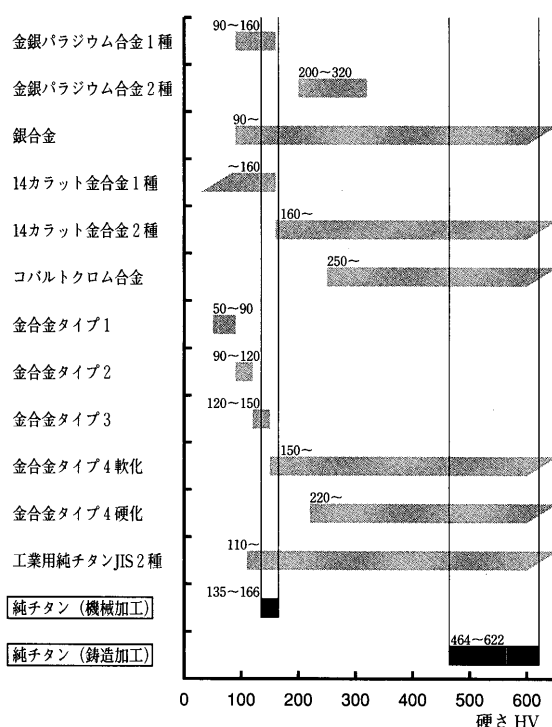


図 3. 純チタンと一般歯科金属との表面硬さ比較

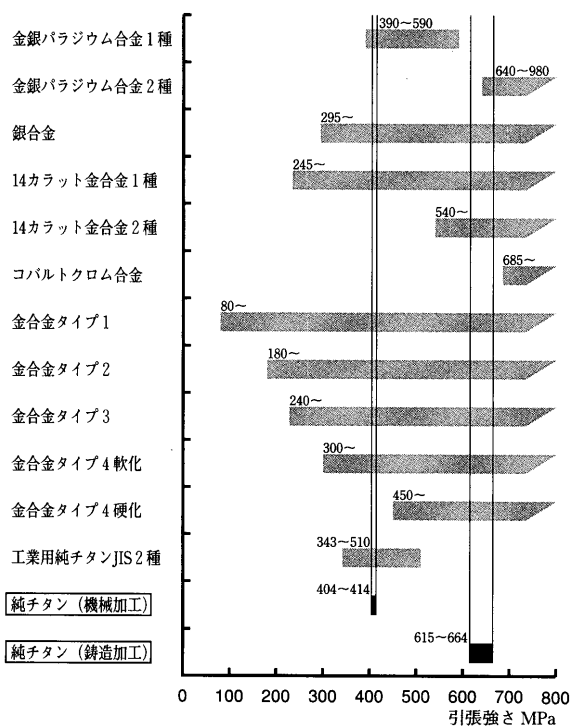


図 4. 純チタンと一般歯科金属との引張強さ比較

4. 寸法精度試験

図 5 に機械加工法と鑄造加工法による試験片の表面

研磨仕上工程の前後で高さ寸法測定した結果を示す。機械加工法では研磨前の平均値は 10.015 mm で目標値に非常に近い数値を示しており、研磨後の平均値は 9.977 mm で研磨量は 38 μm であり少ない研磨量で表面仕上が可能であった。寸法値の最大最小差は 30 μm であることから研磨量 38 μm を事前に見込んで加工することにより目標寸法に対して $\pm 15 \mu\text{m}$ の寸法精度を得ることが可能である。また研磨仕上工程の前後とも、ばらつきが少なく高精度を安定して確保できる加工法であると言える。

一方、鑄造加工法では研磨前の平均値 10.096 mm から研磨後は 9.888 mm となり研磨量は 208 μm と大きな数値を示した。ばらつきも機械加工法と比較すると大きい。研磨作業工程の前後での標準偏差 0.076 mm から 0.043 mm に改善されており今回の研磨作業が比較的良好に実施されたと判断できる。また研磨後の最大最小差は 0.16 mm であり、寸法精度は $\pm 80 \mu\text{m}$ と考えられ補綴物製作時の目標寸法を狙った研磨作業の難易度が高いことを示している。

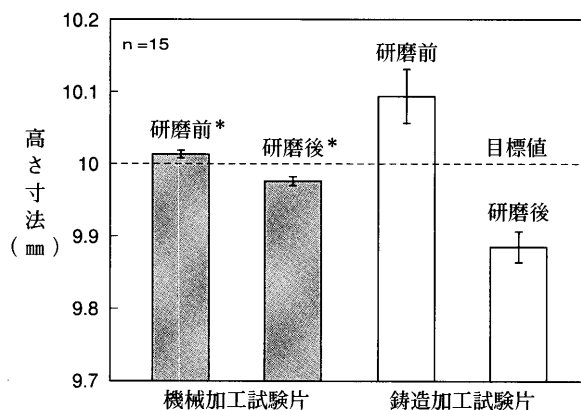


図 5. 機械加工および鑄造加工による純チタン試験片の表面仕上時の寸法精度

* 対応する鑄造加工と比較し $P < 0.01$

5. 表面あらさ試験

図 6 に各加工法による試験片の表面あらさ試験結果として最大高さ R_y を示す。機械加工法による研磨前の平均値は 5.382 μm と小さい数値であり、ばらつきも少ない。機械加工時に使用したボールエンドミルの刃先半径 2.5 mm と送りピッチ 0.2 mm で加工した場合の理論上の波形高さをスカラプトハイトと呼び今回は 2 μm と計算される。最大高さ平均値 5.382 μm は理論値より大きな数値であるが機械加工時に発生するバリを考慮すると良好な加工状態であったと判断できる。鑄造加工での研磨前の平均値は 32.136 μm であり、ばらつき

も大きく表面は規則性のない波形を呈していた。

研磨工程後の表面あらさは、いずれの加工法でも研磨前より非常に良い結果が得られた。鋳造加工法ではばらつきも解消され、この結果からも研磨作業が良好に実施されたと思われる。平均値をみると機械加工法の $0.517\ \mu\text{m}$ は鋳造加工法 $1.326\ \mu\text{m}$ の半分以下であり、研磨前の表面が規則的で波形高さが小さく、研磨に適した状態であったと考えられる。また硬さ試験結果からも機械加工法は鋳造加工の $1/4$ 程度の硬度であり研磨作業の優位性が認められた。

また機械加工法では熱処理時にみられるように高温を受けることがないため、不動態皮膜は安定しており耐腐食特性も良好に維持されると思われる。¹⁴⁾

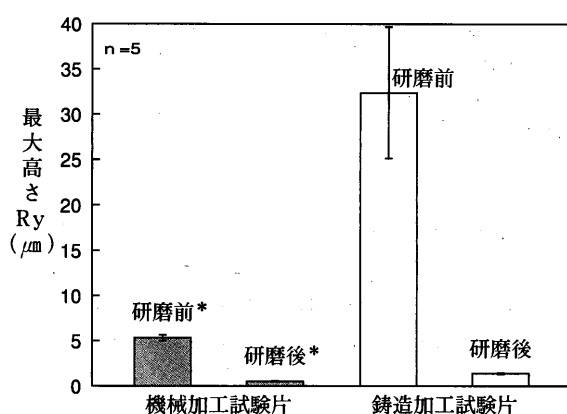


図6. 機械加工および鋳造加工による純チタン試験片の表面仕上時の表面あらさ

*対応する鋳造加工に比較し $P < 0.01$

結 論

今回の試験でチタン材料は機械加工および鋳造加工により機械的性質が全く異なることが明らかになった。現在、チタン材で製作する歯科補綴物の主な用途としてはインレー、クラウン、ブリッジ等であるが、他の歯科用金属材料のJIS規格値との比較ではこれらの用途に機械加工法が、より適していると思われる。さらにマージンライン、コンタクトポイント、支台歯への適合を考えたときに寸法精度の管理の面においても明らかに機械加工法が鋳造加工法より優れていることが示唆された。また一般的に技工作業上チタン材料(鋳造加工品)は非常に硬く研磨作業性は悪いとされているが、機械加工法により表面硬度は約 $1/4$ となり表面あらさの規則的で R_y の低い特性により大きく改善されると思われる。

今後の歯科用CAD/CAM装置の普及と共に、機械加工法による歯科補綴物の製作が可能となり、チタン材を使用する場合は前記の特性を生かし用途に合わせた加工法の選択が重要になると考える。

本稿の要旨は第19回日本歯科技工学会(平成9年大阪)で口演発表、第20回日本歯科技工学会(平成10年横浜)でポスター発表した。

文 献

- 1) Rekow, E. D. : Computer-aided design and manufacturing in dentistry. *J Prosthet Dent*, **58**, 512-516, 1987
- 2) Duret, F., Blouin, J., and Duret, B. : CAD/CAM in dentistry. *J Am Dent Assoc*, **117**, 715-720, 1988
- 3) 川中正雄 : CAD/CAMによるクラウンの作製. 歯材器, **10** (5), 660-664, 1991
- 4) 宮崎 隆, 堀田康弘, 李 元植, 小林幸隆, 藤原稔久, 小泉英治朗, 福永秀樹, 川和忠治 : CAD/CAMを利用した歯冠修復物の自動製作へのアプローチ. QDT, **20** (11), 15-28, 1995
- 5) 内山洋一 : CAD/CAM応用の現状, 歯科技工. **23** (7), 816-822, 1995
- 6) 莊村泰治, 高橋純造 : CAD/CAM法による歯科補綴物の製作—クラウンの製作について—. QDT, **21** (1), 17-26, 1996
- 7) 根岸政明, 神田俊昭, 古沢康仁, 佐野裕子, 下河辺宏功, 内田安信 : 3次元システムによるクラウンの測定法ならびに設計法. 明倫歯誌, **1** (1), 14-22, 1998
- 8) 三宅宗次, 仲宗根幸男, 鈴木 實, 西嶋耕治, 西田彰宏, 玉置敏夫 : 市販チタン鋳造用埋没材による中, 小型チタン鋳造体の鋳造精度. 日歯技, **13** (1), 129-133, 1992
- 9) 和田賢一 : チタン鋳造体の曲げ特性に関する研究. 歯材器, **12** (2), 225-241, 1993
- 10) 張 建中, 岡崎正之, 高橋純造 : 純チタン鋳造体表面性状におよぼす鋳造方法の影響. 歯材器, **13** (3), 221-227, 1994
- 11) 新谷明喜, 大嶋元彦, 吉野友貴, 岡田智雄, 大竹博明 : チタン用埋没材の材料評価. QDT, **20** (5), 92-101, 1995
- 12) 黒岩昭弘, 五十嵐順正 : ここまできたチタン鋳造. QDT, **21** (11), 40-55, 1996
- 13) 松下嘉米男 : 統計入門. 243-247頁, 岩波書店, 東京, 1981
- 14) 社)チタニウム協会 : チタンの加工技術. 199-206頁, 日刊工業新聞社, 東京, 1992