

平成22年 5月14日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19592223

研究課題名（和文） カスタムインプラントに適した歯科 CAD/CAM 用チタン合金の開発

研究課題名（英文） Development of dental CAD/CAM titanium alloys suitable for custom-made implants

研究代表者

菊地 聖史（KIKUCHI MASAFUMI）

東北大学・大学院歯学研究科・助教

研究者番号：50250791

研究成果の概要（和文）：本研究は、カスタムインプラントを歯科 CAD/CAM で純チタンより効率的に機械加工できるようにすることを目的とし、機械加工性に優れた歯科用チタン合金の開発を行った。銀の添加量が 20% から 25% の試作 Ti-Ag 合金は、純チタンより機械加工性や機械的性質に優れ、純チタンに匹敵する耐食性を有していたことから、カスタムインプラントに適していると結論された。

研究成果の概要（英文）：With the aim of facilitating fabrication of custom-made dental implants by dental CAD/CAM systems, experimental free-cutting titanium alloys were developed. The experimental Ti-Ag alloy with 20-25% silver had better machinability and mechanical properties than those of pure titanium, and corrosion resistance comparable to that of pure titanium. The Ti-Ag alloy is a good candidate for a dental machining alloy suitable for the custom-made implants.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：歯学・補綴理工系歯学

キーワード：チタン合金、歯科用合金、CAD/CAM、インプラント、切削性、耐食性

1. 研究開始当初の背景

歯科用インプラントの構造材には、強度的な信頼性や加工精度の点から、一般に純チタンやチタン合金、貴金属合金が用いられているが、次のような問題が残されている。

(1) 既製のアバットメントは、信頼性や精度が高いが、幅広い症例に対応できない。

(2) 鋳造によるカスタムアバットメントや上部構造の製作は、表面硬化層の形成や伸びの低下、鋳造欠陥の発生など、材質の劣化が不可避である。

(3) 鋳造精度は、術者の技量に左右され、また、一般に鋳造するものが大きくなればなるほど低下する。

- (4) CAD/CAM による機械加工において、精度や仕上げ面性状と加工時間は二律背反の関係にあり、チタンのような難削材は特に不利である。
- (5) CAD/CAM 装置や工具の改良によるチタンの切削効率の向上には限界がある。
- (6) チタンは、ロングスパンの症例のように大きな力が加わる用途には強さが十分ではない。
- (7) チタンや合金は、共に単独では口腔内で十分な耐食性を有すると考えられるが、組み合わせて使用すると、ガルバニ腐食によって溶出イオンが増加する恐れがある。

上記の問題を解決する方法として、機械加工性（切削性や研削性）と機械的性質に優れた新しい歯科用チタン合金を開発し、構造材に純チタンとチタン合金のみを使用したカスタムインプラント（患者個人仕様のアバットメントや上部構造）をCAD/CAMで高精度に加工することが考えられる。

2. 研究の目的

チタン製のカスタムインプラントを製作する上で、CAD/CAMの使用は理想的かつ必然的な組み合わせであると考えられるが、機械加工のさらなる効率化と高精度化が求められている。本研究は、機械加工に適した歯科用チタン合金を開発し、歯科CAD/CAMでアバットメントや上部構造をより効率的かつ高精度に機械加工できるようにすることを目的とした。

これまでの研究で、チタンを合金化して金属間化合物や ω 相を析出させるなど、合金中に少量の脆性相を微細に析出させ、合金相を適切に制御することで、カーボランダムホイールによる研削性を向上できることを見出した。歯科CAD/CAMによるチタンの加工は、エンドミルによる切削が一般的である。そこで、本研究では、研削性の向上が見られた合金について、切削性や機械的性質、耐食性などを詳しく調べ、カスタムインプラント用として最も諸性質のバランスが取れた組成を検討した。また、従来検討してこなかった組成についても合金を試作し、評価した。なお、本研究で検討したチタン合金のうち、Ti-Ag合金がカスタムインプラント用として最も有望と考えられたので、以下、同合金を中心に述べる。

3. 研究の方法

(1) 合金の試作

スポンジチタン(>99.8%)と銀(99.99%)または銅(>99.99%)をアルゴンアーク溶解炉で溶解し、合金インゴットを試作した。

(2) 試験片の製作

切削試験、硬さ試験、弾性率測定、腐食試

験の各試験片は、合金インゴットを板状またはブロック状に铸造し、铸造体の表面硬化層を除去したものをを用いた。また、引張試験の試験片は、合金インゴットを丸棒状に铸造したものをを用いた。

(3) 切削力からみた切削性の評価

切削力は、装置、工具、被削材の剛性とあわせて、加工精度や仕上げ面性状に影響を及ぼす。また、切削力は、工具刃先に発生する切削熱と関係があり、したがって、工具寿命とも関係があると言われている。そのため、切削力の値は小さいことが望ましい。そこで、試作合金の切削力からみた切削性を縦型ミリング装置で調べた。切削力の測定は、ミリング装置の加工テーブルに装着した3分力計により行った。また、工具には、超硬スクエアエンドミルを用いた。切削様式は、溝切削でドライ切削とした。切削条件は、切削速度、送り速度、切込み量がそれぞれ(A) 50 rev/s、1 mm/s、0.2 mm、(B) 50 rev/s、1 mm/s、0.4 mm、(C) 100 rev/s、2 mm/s、0.2 mm (D) 100 rev/s、2 mm/s、0.4 mmとした。

(4) 切削温度から見た切削性の評価

切削温度の上昇は、工具寿命や切削面性状に対して悪影響を及ぼすと言われているので、試作合金の切削温度の測定を試みた。切削温度の測定は、工具と被削材の接点を熱電対とみなす工具-被削材熱電対法により行った。なお、同法において、測定した熱起電力から温度を求めるためには、工具に対する各被削材金属の熱電能を知る必要がある。そこで、試作装置を用いてあらかじめ各金属と工具のコンスタンタンに対する熱電能を求め、金属の熱電能から工具の熱電能を引いた値を工具に対する金属の熱電能とした。なお、同試作装置による熱起電力の測定法は、歯科用合金の判別にも応用可能であることが分かった。

(5) 工具寿命から見た切削性の評価

工具寿命は、加工コストに直接関係するため、臨床的に非常に重要である。試作合金の工具寿命からみた切削性を調べるため、市販の歯科CAD/CAMでクーラントによる冷却をしながら切削し、使用した工具の刃先と試験片の加工面の状態を走査型電子顕微鏡で観察した。

(6) 機械的性質の評価

引張試験機、マイクロビッカース硬さ試験機、超音波パルス法による弾性率測定装置を行って、試作合金の引張強さ、耐力、伸び、硬さ、弾性率などの機械的性質を調べた。

(7) 耐食性の評価

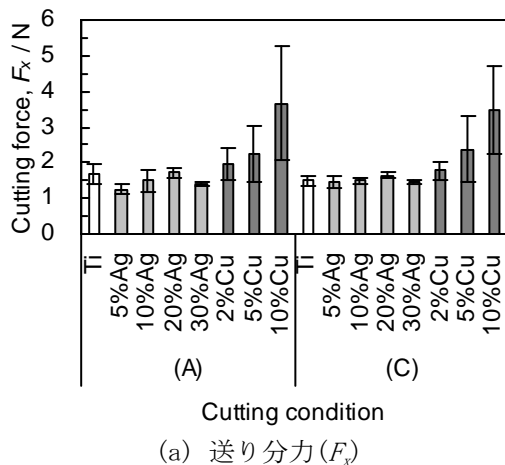
Ti-Ag合金の耐食性を0.9% NaCl水溶液中または1%乳酸水溶液中における自然電極電位の測定と7日間の溶出試験によって評価した。溶出イオンはICPを用いて定性および定量分析した。

4. 研究成果

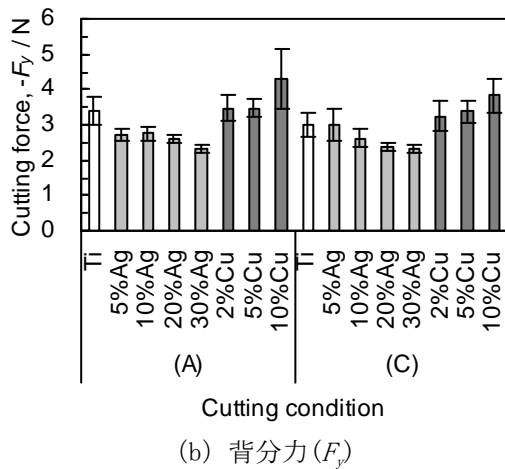
(1) 切削力からみた切削性

試作 Ti-Ag 合金の切削力のうち、工具の送り方向成分 (F_x) は、Ti-5%Ag が有意に低かった他は、純チタンと Ti-Ag 合金の間に有意差は見られなかった (図 1)。一方、水平面で F_x に直交する成分 (F_y) の絶対値は、銀の添加量が多くなるほど減少する傾向が見られ、条件 (A) では全ての Ti-Ag 合金が、条件 (C) では Ti-20%Ag と Ti-30%Ag が純チタンより有意に低かった。また、銀の添加量が多くなるほど切りくずの厚さが薄くなる傾向が見られた。Ti-Ag 合金は、強さや硬さが純チタンより大きいにも拘らず、切削力が純チタンと同程度か、逆に小さかった。その理由として、合金化によって純チタンより延性が低下し、塑性領域が小さい状態で切りくずが生成され、切りくずの厚みが薄くなり、切削力が小さくなったと推測された。

一方、試作 Ti-Cu 合金の切削力は、銅の添加量が多くなるほど増加する傾向が見られた。チタンに銀または銅を添加すると、どちらも強さや硬さは大きくなり、伸びは小さくなり、研削性は向上したが、切削性に対する効果は異なり、Ti-Cu 合金の切削力はチタン



(a) 送り分力 (F_x)



(b) 背分力 (F_y)

図 1 試作合金の切削力

と同程度か、大きかった。その原因として、Ti-Cu 合金中の金属間化合物 Ti_2Cu が Ti-Ag 合金中の金属間化合物 Ti_2Ag より硬かったか、量が多かったため、伸びの低下による切削力低下の効果が表れなかったものと思われた。したがって、切削でカスタムインプラントを製作する場合には、Ti-Ag 合金の方が Ti-Cu 合金より適していると考えられた。

(2) 切削温度からみた切削性

初めに純チタンと市販合金について調べたところ、Ti-6Al-4V と Ti-6Al-7Nb の切削温度は、純チタンより著しく高かった (図 2)。その原因として、Ti-6Al-4V と Ti-6Al-7Nb は、切削力が純チタンより大きく、熱伝導率が純チタンより小さいことが考えられた。単位時間当たりの切削量が同じである条件 (B) と (C) を比較すると、(B) の方が低く、切込みを大きくした方が回転速度と送り速度を大きくするより切削温度を低くできることが分かった。これらのことから、切削温度の測定は、新しい歯科 CAD/CAM 用チタン合金の開発や切削条件の最適化に有用であると考えられた。

切削力が純チタンより低かった Ti-20%Ag と Ti-30%Ag について、より詳しく切削性を調べるために、切削温度の測定を試みた。そ

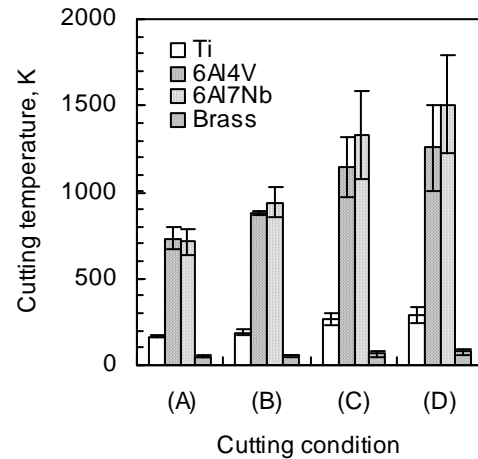


図 2 市販合金の切削温度

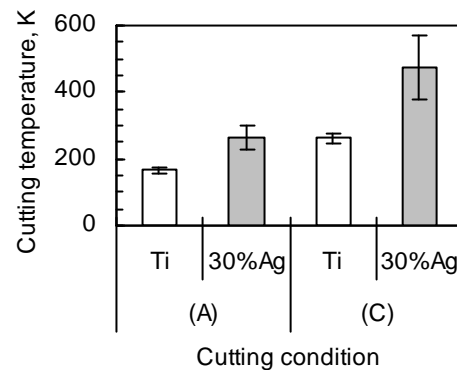


図 3 試作 Ti-Ag 合金の切削温度

の結果、Ti-20%Ag は、使用した工具に対する熱電能の値が小さく、また、切削時の熱起電力も小さかったため、切削温度を求めるのが困難であった。一方、Ti-30%Ag は、切削温度が純チタンと比べて高かったものの、Ti-6Al-4V や Ti-6Al-7Nb 合金より低いことが分かった(図3)。純チタンより切削力から見た切削性に優れているにも拘らず、Ti-30%Ag 合金の切削温度が高かった理由として、チタンを合金化したことによって熱伝導率が低下し、切削熱の被削材への放熱効果が低下した可能性が考えられた。

(3) 工具寿命からみた切削性

Ti-20%Ag をコーピング形状に切削し、工具の使用回数と刃先の状態の関係を調べたところ、Ti-20%Ag は純チタンより刃先のダメージが少ないことが分り、工具寿命からみた切削性に優れていることが分かった。また、加工面の性状も純チタンより良好であった。

(4) 機械的性質

Ti-Ag 合金の引張強さと耐力は、銀の添加量とともに増加し、25%で最大となり、以降減少した。Ti-25% Ag の引張強さは約 690 MPa、耐力は約 490 MPa だった。伸びは銀の添加量が 20%を超えると大きく低下したが、22.5%~27.5% Ag の機械的性質は、ISO の歯科用金属材料のタイプ 4 に相当した。銀の添加量が多くなると脆化した理由は、結晶粒界部に金属間化合物が多く析出したためと考えられた。

Ti-Ag 合金のビッカース硬さは、銀の添加量の多いものほど大きかった。Ti-Ag 合金の弾性率は、銀の添加量の増加とともに減少したが、20% Ag を越えると増加に転じた。

(5) 耐食性

0.9% NaCl 水溶液中の場合、銀の含有量が 20%以下の Ti-Ag 合金の耐食性は、チタンに匹敵することが分かった。一方、銀の含有量が 27.5%以上の Ti-Ag 合金は、金属間化合物の優先溶解によって耐食性が低下する可能性があることが分かった。1%乳酸水溶液中の場合、銀の添加により α 相からのチタンイオンの溶出が抑制された。

銀の添加量が 25%以下の Ti-Ag 合金は、溶出イオン量が検出限界以下、もしくはごく僅かであり、金属間化合物が優先溶解したとしても、その後には再不動化するもので、カスタムインプラント用として使用可能と考えられた。

以上の結果から、銀の添加量が 20%から 25%の試作 Ti-Ag 合金は、純チタンより切削力や工具寿命から見た切削性と研削性に優れ、硬さや引張強さが大きく、純チタンに匹敵する耐食性を有していることが分り、カスタムインプラント用合金として適していると結論された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Kikuchi M. Dental alloy sorting by the thermoelectric method, European Journal of Dentistry, 査読有, 4, 2010, 66-70.
- ② Takahashi M., Kikuchi M., Okuno O. Grindability of dental cast Ti-Zr alloys. Materials Transactions, 査読有, 50, 2009, 859-863.
- ③ Kikuchi M. The use of cutting temperature to evaluate the machinability of titanium alloys. Acta Biomaterialia, 査読有, 5, 2009, 770-775.
- ④ Kikuchi M., Takahashi M., Okuno O. Machinability of experimental Ti-Cu alloys. Materials Transactions, 査読有, 49, 2008, 800-804.
- ⑤ Kikuchi M., Takahashi M., Okuno O. Machinability of experimental Ti-Ag alloys. Dental Materials Journal, 査読有, 27, 2008, 216-220.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 高橋正敏, 他, Ti-Ag合金のISO規格によるアノード分極挙動, 第23回歯科チタン学会学術講演会, 2010年2月14日, 東京都.
- ② Kikuchi M., 他, Development of dental free-cutting titanium alloys, Processing and Fabrication of Advanced Materials 18, 2009年12月12日, 仙台市.
- ③ 菊地聖史, 他, 試作Ti-Ag合金の切削温度からみた切削性, 第54回日本歯科理工学会学術講演会, 2009年10月2日, 鹿児島市.
- ④ 高橋正敏, 他, 歯科用Ti-Ag合金の機械的性質, 第22回歯科チタン学会学術大会, 2009年2月15日, 東京都.
- ⑤ Inagaki R., 他, Strength of porcelain fused to Ti-20% Ag alloy frame made by CAD/CAM, 第3回インターフェイス口腔健康科学国際シンポジウム, 2009年1月16日, 仙台市.
- ⑥ 高橋正敏, 他, 歯科CAD/CAM用Ti-Ag合金の機械的性質, 第52回日本歯科理工学会学術講演会, 2008年9月20日, 豊中市.
- ⑦ 菊地聖史, 歯科用快削性チタン合金の開発, 日本バイオマテリアル学会東北地域講演会, 2008年9月5日, 仙台市.
- ⑧ Kikuchi M., 他, Elastic properties

of commercial and experimental titanium alloys, The 3rd international symposium on nano-bio and amorphous materials, 2008年8月7日, 蔵王町.

- ⑨ Inagaki R, 他, Machinability evaluation of a Ti-Ag alloy using a dental CAD/CAM, IADR 86th General Session & Exhibition, 2008年7月4日, Toronto, Canada.
- ⑩ 菊地聖史, 他, チタン合金の切削温度による切削性評価, 第51回日本歯科理工学会学術講演会, 2008年4月27日, 横浜市.
- ⑪ 高橋正敏, 他, Ti-Ag合金の乳酸水溶液中における自然電極電位とイオン溶出, 第51回日本歯科理工学会学術講演会, 2008年4月27日, 横浜市.
- ⑫ 高橋正敏, 他, Ti-Ag合金の自然電極電位とイオン溶出, 第21回歯科チタン学会, 2008年2月15日, 鳴門市.
- ⑬ 稲垣亮一, 他, CAD/CAMによる陶材焼付チタンクラウンの破折強さ, 第21回歯科チタン学会, 2008年2月15日, 鳴門市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊地 聖史 (KIKUCHI MASAFUMI)
東北大学・大学院歯学研究科・助教
研究者番号: 50250791

(2) 研究分担者

高田 雄京 (TAKADA YUKYO)
東北大学・大学院歯学研究科・准教授
研究者番号: 10206766

高橋 正敏 (TAKAHASHI MASATOSHI)
東北大学・大学院歯学研究科・助教
研究者番号: 50400255

稲垣 亮一 (INAGAKI RYOICHI)
東北大学・大学院歯学研究科・講師
研究者番号: 60260444