

- 総説 -

チタン歯科鑄造の現状
鑄造機の特徴と利用技術

渡辺孝一, 大川成剛, 金谷 貢, 宮川 修

新潟大学大学院 医歯学総合研究科 歯科生体材料学

Present Situation of Dental Titanium Casting
Feature and Utility of Casting Unit

Watanabe Kouichi, Okawa Seigo, Kanatani Mitsugu, Miyakawa Osamu

Dental Biomaterial Science
Graduate School of Medical and Dental Sciences
Niigata University

平成13年12月1日受付 12月1日受理

キーワード: チタン鑄造, 加圧鑄造機, 遠心鑄造機, 鑄造性, 内部欠陥

はじめに

歯科領域にチタン鑄造が取り入れられて, およそ20年が経過し¹⁾, その間に, 専用鑄造機のみならず, 埋没材, あるいは研磨材などチタンの歯科利用に係る周辺技術も着実に進歩してきた。チタン歯科利用のモチベーションとなってきた点は, 生体との親和性が実用的な金属のうち最良であるという特性による²⁾。これ以外にも, 軽くて変色しないことなどの長所をもち, また資源が豊富なことにより安定な供給が期待できることも有利な点であろう。金属自体の価格は貴金属合金に比べてはるかに安価であるが, 修復物として完成させるまでの費用が貴金属合金に比べて高く, 現在でも広く利用されているとは言い難い。利用に際して, 障害となっているいろいろな問題点については多くの報告があり, これからもさらに研究が進むものと予想される。

チタン歯科利用に関する課題としては, 日本歯科理工学会で発表されてきた報告を中心に以下のようにまとめられる。ただし, 文献は必ずしも網羅されているわけではない。

- ・鑄造機の特徴および鑄造体の欠陥についての研究^{3) 5)}
- ・鑄型との反応についての研究⁶⁾
- ・専用埋没材の開発⁷⁾
- ・研削法, 研磨法についての研究⁸⁾

- ・腐食, 特に電気化学的な研究⁹⁾
- ・生体親和性および表面改質についての研究¹⁰⁾
- ・陶材焼付用金属としての利用¹¹⁾
- ・合金についての研究¹²⁾
- ・ろう付け, レーザー溶接についての研究¹³⁾
- ・CAD・CAMなどの鑄造以外の加工法¹⁴⁾
- ・インプラントとしての利用, ハイドロキシアパタイトとの接着¹⁵⁾
- ・Ni-Ti合金を代表とする超弾性, 形状記憶効果の歯科応用¹⁶⁾

これだけ多岐に渡る周辺技術の確立が必要であり, 未だにゴールに到達したと実感できない課題が大部分である。

本稿では, 当講座が過去十数年に渡って研究してきた内容を中心に述べる。文部省(当時)科学研究費などでタイプの異なるチタン鑄造機が設置でき, また, 筆者の一人が在外研究員として行った研究が, 歯科チタン鑄造に関連していたという事情もある。その結果, 現在国内外で市販されている代表的4つのタイプ, 全てを使う機会に恵まれ, それぞれの特徴を検討できた。以上の経験もふまえて, 基礎的でしかも今でも改良途上にあるチタン鑄造技術について, 鑄造機の特徴, 鑄造欠陥などに関連させて概観してみたい。

・チタン鑄造の特殊性および各鑄造方式の特徴

伝統的な歯科鑄造用合金とは違い、チタンは多くの場合非合金金属として使われており、以後の内容は実用的に使われている純チタンを対象とするため、商業レベルの純チタンを単にチタンと記載する。表1は金属としてのチタンの性質を示し¹⁷⁾、参考として銀の値も示した。融点の高いこと、密度の小さいこと、熱伝導率の小さいこと、融解熱が大きいこと、および高温で他の化合物と激しく反応することなどが主な特徴である。融解熱が大きいことは凝固に際し、多くの熱を放出することを意味し、熱伝導率が小さいことは一旦凝固層ができればその内部を断熱材で囲むように作用する。

表1 チタンの特徴

チタン：金属としての特徴		
融点	1670	(Ag 961)
密度	4.50 g/cm ³	(Ag 10.5)
熱伝導率	21.9 W/mK	(Ag 427)
融解熱	18.8 kJ/mol	(Ag 11)
	0.39 kJ/g	(Ag 0.1)
粘性係数	2.4 cP	(Ag 3.7)
高温で激しい反応性		

このような特徴を持った金属を日常の技工操作の一環として使いこなすには特別な装置と技術が要求される。歯科利用の出発点ともいえる歯科鑄造機についてまず解説する。

表2に市販されているチタン鑄造機の一覧を示した。これらは圧力方式(加圧鑄造)と遠心力方式(遠心鑄造)に大きく分けられ、いずれもチタン溶湯に作用して鑄型

空洞内に導く駆動力に注目して付けられた名前であり、細い、あるいは薄い空間に溶けた金属(溶湯)を流し込むことの重要性を反映している。

圧力方式は、鑄型クルシブルに落下した溶湯の上下に作用する圧力差を駆動力としており、発生機構の違いにより2つのタイプがある。鑄造リングの上側と底面に予め圧力差を付けておき、溶湯落下により圧力差が生じるタイプは二室型加圧鑄造機、あるいは差圧鑄造機と呼ばれている。他の一つは一室型加圧鑄造機、あるいは全方向加圧鑄造機と呼ばれており、溶湯が落下した後、鑄造機室内の圧力をバルブ操作により変化させ、溶湯の上下に圧力差が生じるように工夫されている。バルカンTは鑄込み時にゆっくりと回転し遠心力が多少発生するが、鑄込みの駆動力は主に圧力差と考えられる。

遠心力方式は鑄型を回転させ、溶湯に作用した遠心力を駆動力としている。さらに2つに分類され、一つは予め鑄型を毎分3000回転で回転させておき、溶湯は回転中心に落下して鑄込むタイプで、他の一つはインゴットが溶解され鑄込みの際に回転運動がスタートするタイプある。

以下、各鑄造機の特徴を、鑄造機の鑄込み能力ともいふべき鑄造性に着目しながら概説する。

- 1 二室型加圧鑄造機

図1は二室型加圧鑄造機(サイクラーク)を模式的に表しており、鑄型クルシブルに溶湯が落下した瞬間である。アルゴン(Ar)ガスにより約2気圧に保たれたインゴット溶解室(上室)と、絶えず排気され減圧状態(約0.2気圧)の鑄込み室(下室)に分かれた構造をしており、その境に鑄型がセットされる。圧力は大気圧を基準として表す場合と、真空を基準とする場合があるが、本稿では後者を採用する。本鑄造機の鑄込み駆動力発生

表2 チタン鑄造機一覧

市販されているチタン鑄造機

機種名	メーカー	特徴
加圧鑄造機		
キャストマチック	ヨシダ	二室型, 1-3気圧
サイクラーク	モリタ	二室型, 1-3気圧, アークが回転
アルパトロン	朝日レントゲン	二室型, 1-3気圧, 溶解ルツボと鑄型が一体
マイキャスト	友和産業	二室型, 7気圧
ヴァルカンT	松風	低速回転, バルブにより加圧2-3気圧, 吸引
オートキャストHC-	ジーシー	一室型, 7気圧
遠心鑄造機		
チタニウマー	オハラ	鑄込み時に回転スタート
タイキャスト3000	トムヨシダ	鑄込み時に回転スタート, ヘリウムガス
タイキャストスーパーR	セレック	鑄込み時一定回転数(3000 rpm)

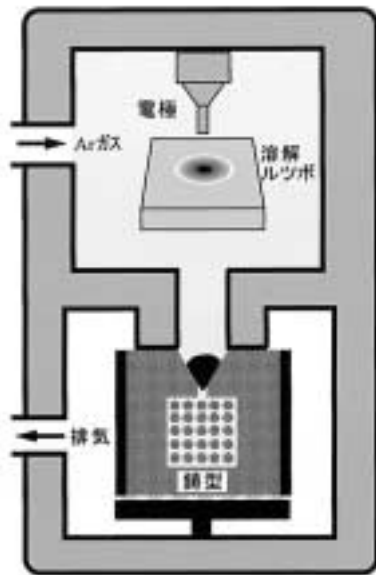


図1 サイクラーク模式図：溶湯落下の瞬間

機構，およびその過程をステップに分けて記述すると次のようになる。

- 1) 図1から分かるように鑄型空洞(メッシュ部分)は，溶湯が落下するまでの間は，スプルーにより上室とつながっているので，上室と同じ2気圧である。一方，下室は真空ポンプに排気されており，減圧状態である。上下室に圧力差があるため，鑄型を通して下室へ漏れてくるアルゴンガスがあり，連続的に排気して減圧を保っている。
- 2) インゴットが溶解され，溶湯落下によりスプルーが塞がれると(図1の状態)，上室と鑄型空洞が遮断される。一方，鑄型空洞内のアルゴンガスは下室へ排気され続け，しかも上室からの供給が絶たれているため，その圧力が急速に低下する。
- 3) この結果，溶湯のスプルー側は減圧され，一方溶湯の上面にはほぼ一定の高い圧力が作用しているため圧力差が生じ，溶湯はスプルーを通して鑄型空洞内に引かれ，鑄込みが成立する。

この圧力差発生機構から予想されるように，短時間で圧力差を得るためには，鑄型の通気性が良く(大きく)なければならない。ただし，通気性が良いほど望ましいかというと，そうではなく，良すぎると，インゴット溶解中の上室から下室への漏れるガス量が大きくなり，上下室の圧力差が小さくなり，その結果，落下した溶湯に急速に圧力差は生じるが到達圧力差は小さくなる。したがって，この鑄造機を使用する場合，適度な鑄型通気性が要求される。これは厳密に考えると実現は困難である。なぜならば，鑄型通気性は埋没材自体の通気性とワックスパターン埋没位置によって決まるため，リング壁からの距離やリング底からの距離を最適に設計する必要がある。

る。このように鑄型としての通気性は不確定部分が多く，最後は術者の経験や勘に頼らざるを得ない部分もある。

この不確定部分を解消し，ワックスパターン埋没位置に係わらず，安定した圧力差が得られるためには，溶湯落下の前に鑄型空洞を減圧状態にすることが考えられる。つまり，上室と下室の間に遮蔽箔を置き鑄型空洞と上室とを切り離し，溶湯落下時にこの遮蔽箔を溶かし去れば良いことになる。この考えは以前からあったが，遮蔽箔の形状に問題があり，効果が疑問であった。図2に示したように，コーン状に成形した遮蔽箔を鑄型の円錐状クルシブルに密着するように置き，溶湯落下時にこの遮蔽箔が破れ，大きな圧力差が発生するように改良した¹⁸⁾。図3はサイクラークCS-C1を用いて鑄造した例で，左は通常の使用，右は同じスプルー条件および埋没条件でコーン状遮蔽箔を使用した結果で，遮蔽箔による鑄造性の改善は明瞭である。ただし，この鑄造体のように細くて込み入ったパターンでは問題がないが，比較的流れやすい空洞に対しては，内部欠陥が通常条件より増加するという問題が生じ，ワックスパターン形態により，使用の可否を判断すべきと思われる。



図2 コーンタイプ遮蔽箔：左は分けて撮影，右は使用状態

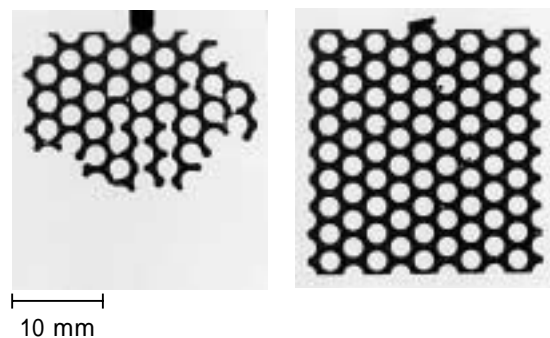


図3 鑄造体X線透過写真：左は通常法，右はコーンタイプ遮蔽箔使用

- 2 一室型加圧鑄造機

一室加圧型鑄造機(オートキャスト)の構造を模式的に図4に示した。図は溶湯が鑄型クルシブルに落下した状態を示しており，この瞬間鑄造室内の圧力を低圧から高圧へすばやく変化させ，溶湯上面と鑄型空洞に面する

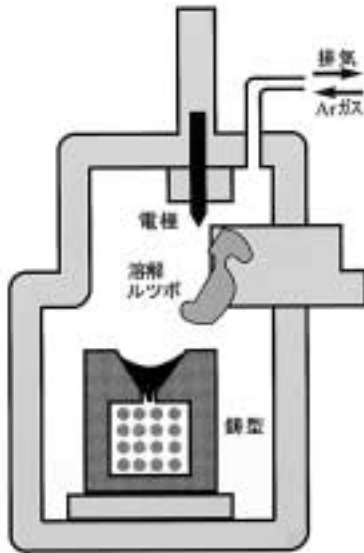


図4 オートキャスト模式図：溶湯落下の瞬間

側に圧力差を生じさせる機構であり、ステップに分けると以下ようになる。

- 1) インゴット溶解中，鑄造機室内はほぼ0.1気圧に減圧され，鑄型空洞もそれと同じ減圧状態であり，溶解後，溶湯が鑄型クルシブルに落下する。
- 2) 落下直後，バルブが開き高圧アルゴンが供給され圧力が急上昇する。圧力上昇を急速に行う目的で，アルゴンガスは，本体内部に備えられた高圧タンクから供給される。
- 3) 室内つまりチタン溶湯上面が高圧となり，一方鑄型空洞内は減圧（0.1気圧）が保たれているため溶湯上下面に圧力差が発生する。

この場合も，溶湯に作用する圧力差は鑄型の通気性に大きく左右される。なぜならば，アルゴンガスは室内を満たすだけでなく，鑄型の壁を通して空洞内へも浸入し，その侵入が早いと溶湯が充満する前に鑄型空洞内の圧力も急上昇するからである。そのガス侵入早さは通気性に依存する。一室型加圧鑄造機では，鑄型通気性が小さければ小さいほど大きな圧力差が発生し，鑄造性が増加する。図5はオートキャストHC- を用いて通気性の異なる2種類の埋没材を用いた鑄造結果¹⁹⁾で，同じワックスパターンで，同じ鑄型寸法で，しかも同じ位置に埋没しているため，埋没材の通気性の違いがすなわち鑄型通気性の違いと見なせる。この図の左は鑄造機メーカー推奨の埋没材で，右は通気性を考慮して選んだ埋没材で，左の約1/30の通気性しかなく，1秒程度の鑄込み期間ではほとんどガスを通させない。この現象は鑄型空洞内のガス圧を直接測定した実験結果からも確認されている²⁰⁾。

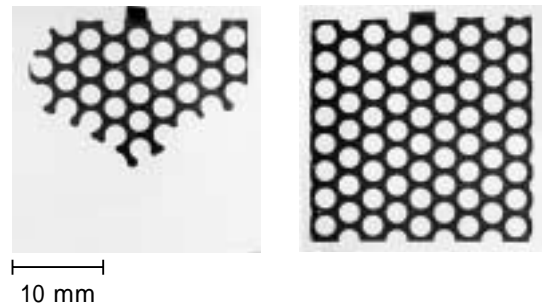


図5 鑄造体X線透過写真：左は通気性の良い埋没材使用，右は通気性の小さい埋没材使用（左の約1/30）

- 3 遠心鑄造機：定速回転型

具体的記述の前に，遠心鑄造に関連して現れる力を概説する。良く知られているように，回転している物体には遠心力が作用し，その大きさは質量，回転速度の2乗，および回転中心からの半径の積であり，作用方向は回転中心から外向きである。ただし，一般的はこれ以外にコリオリの力も作用する。この力は回転している物体の中で運動している場合，例えば鑄型内で溶湯が流れている時にのみ発生する。すなわち，鑄型と共に回転している座標系から見て，動いている場合にその速度と回転方向が関係するような力となって現れる。鑄込みが終了し，鑄型内で動きがなければ，鑄型全体として回転していてもコリオリの力は現れない。この力は速度ベクトルと回転速度ベクトルのベクトル積で表され，方向と大きさが複雑に変化する。従来の遠心鑄造では，溶湯速度，回転速度とも比較的小さいため，コリオリの力は流れにわずかな影響しか及ぼさず重要視されていなかった。しかしチタン鑄造では溶湯の流速が大きく，回転数も大きいため，無視できない影響を与える。

これらの合力 \vec{F} は次式で示され，ベクトルの場合には上に矢印を付けた²¹⁾。

$$\vec{F} = m\omega^2\vec{r} + 2m\vec{v} \times \vec{\omega} + m\vec{r} \times \dot{\vec{\omega}} \quad (1)$$

ただし， m は質量， $\vec{\omega}$ は回転速度ベクトル， \vec{r} は位置ベクトル， \vec{v} は回転座標系での速度ベクトルである。右辺第1項は遠心力，第2項はコリオリの力を表す。第3項は加速回転の時の慣性力に関係する。注意しなければならないことは，(1)の力はいずれも重力や電磁気力と同じ体積力のカテゴリーに属し，圧力のような面積力とは本質的に異なる点である。圧力の場合，何らかの媒体（気体や液体）を通してのみ作用するが，遠心力は媒体を必要とせず「場の力」として溶湯そのものに作用する。そのため溶湯がクルシブルにあるときも，スプルーや鑄型空洞内を流れるときも(1)式に従って作用し流れに影響し，また溶湯内に巻き込まれた気泡に対しても作用し，液体内の気泡の移動に大きく影響する。

図6は遠心鑄造機（タイキャストスーパーR）を模式

的に示した。この鑄造機はインゴット溶解中に鑄型は高速回転しており、溶湯は回転中心のグラファイト受け口に注がれる。落下した溶湯には最初小さな、その後中心から遠ざかるほど大きな遠心力が作用し、この受け口から専用鑄型クルシブルへ流れ、鑄型空洞に達する。回転数が一定で、その結果鑄型クルシブルの位置では遠心力が一定なため、常に一定の鑄造性が得られるようであるが、現実には思わぬ因子が鑄造性に影響する。

図7はこの鑄造機専用のクルシブル用ゴム型である。矩形の穴の部分にワックスを盛りスプルーを植立するのであるが、A、B、C、Dと記号を付けた植立部位によって鑄造性が異なる。図8にそれぞれの部位に同じ形状のメッシュパターンを植立し、AとBおよびCとDは同時に鑄込んだ場合の鑄造性の比較である。代表としてDに矢印で示したように、回転方向は時計回りで、その結果図の下方向に遠心力が作用している。いずれの鑄造体を見ても分かるように、遠心力の作用する側に優先的に溶湯が充満しており、図3や図5と比べると遠心力は体積力であるという特徴が明瞭に現れている。またBが分かり

やすい例であるが、鑄造体の左右が非対称で、右側に優先的に流れた様子が推定される。この理由は下向きに溶湯が流れると、右方向に向かうコリオリの力が発生するからである。AとBの違いはコリオリ力によりスプルーに向かう溶湯の流れ方向が、回転の半径方向から図7のB方向に偏るため、結果的にこれだけの差が生じている。CとDの違いは溶湯落下の受ける側の形状に関連している。図9は鑄込み後の残りの金属部分でA、B、CおよびDの記号は図7の記号と対応させた位置に付けてある。バケツのように見える左側部分が溶湯受けグラファイト内で凝固したチタンで、右側が鑄型クルシブルとスプルーの一部である。溶湯受けグラファイトが少し逆テーパで底の方が広く、溶湯が遠心力により最底部に集まる構造になっている。従って、底部に近いほど優先的に溶湯が供給され、CよりもDの位置がスプルー植立部

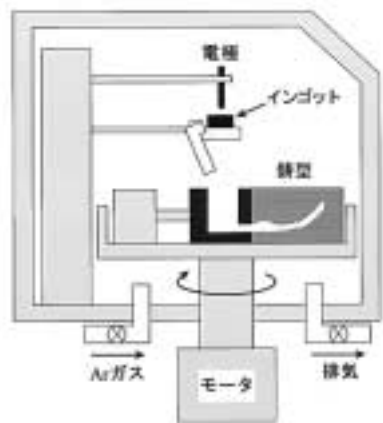


図6 タイキャストスーパーR模式図：溶湯落下の前に一定速度で回転

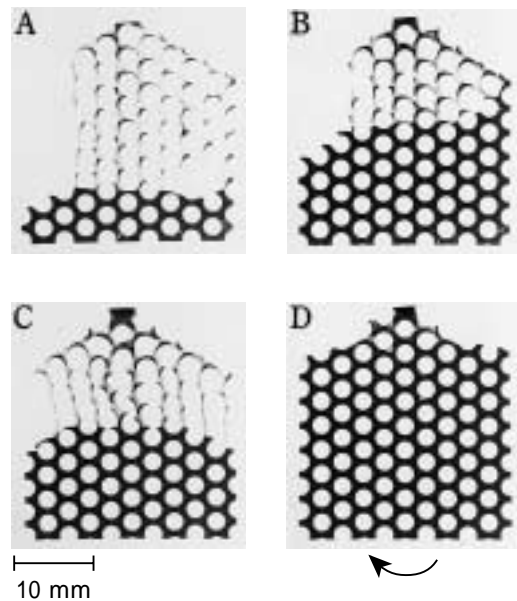


図8 鑄造体X線透過写真：A、B、C、Dは図7の対応する部位にスプルー植立、矢印は回転方向、AとBはコリオリの力による違い、CとDは専用グラファイト湯口形状の影響



図7 専用クルシブルゴム型

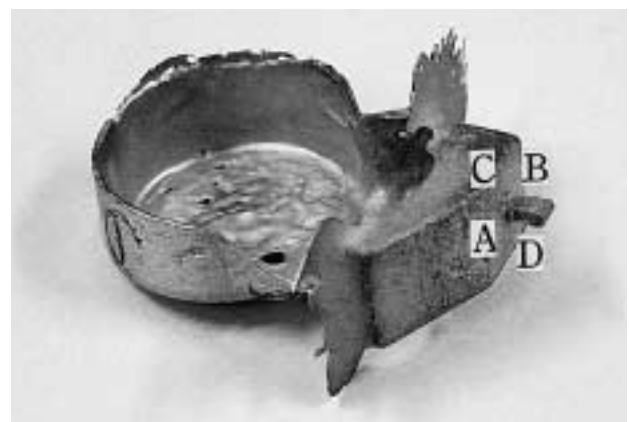


図9 タイキャストスーパーR残り湯凝固部分

位として望ましい。この因子は理解しづらいが、コーン状の通常の円錐台を例にとるとDは頂点、Cはコーン斜面途中にスプルーを植立したことに相当する。図9に少しスプルーの残りが見えるように、日常的には図7のABCDの中心にスプルーを植立すると思われ、図8に示したそれぞれの中間的な鑄造性の状態で使用されているものと推定される。鑄造性を考えた場合、その部位は最適な条件とはいえないことは明らかである。

- 4 遠心力鑄造機：鑄込み時回転型

図10にこのタイプの鑄造機（チタンウマー-VF）の中心部分を写真で示した。回転方向は写真に付けた矢印のように反時計方向である。このタイプの遠心鑄造機はインゴット溶解後にバネの力で、回転させる方式で、従来歯科で用いられてきた遠心鑄造機と似ている。ただし、短時間で高速にする必要があるため、強いバネをモーターの力で巻き、鑄込みの瞬間ストッパーを外して急加速回転させている。

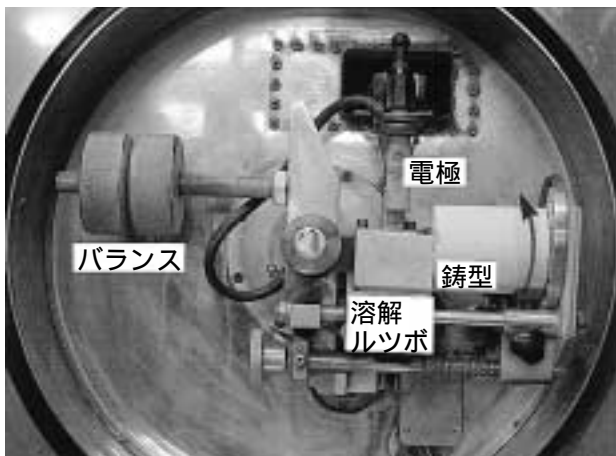
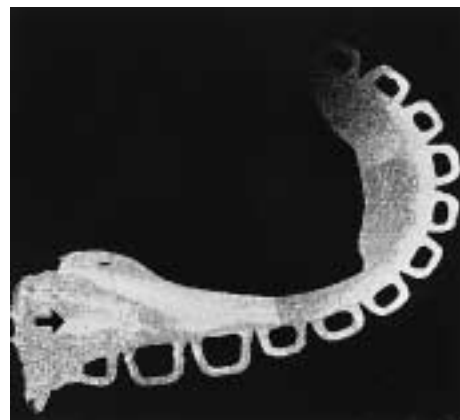
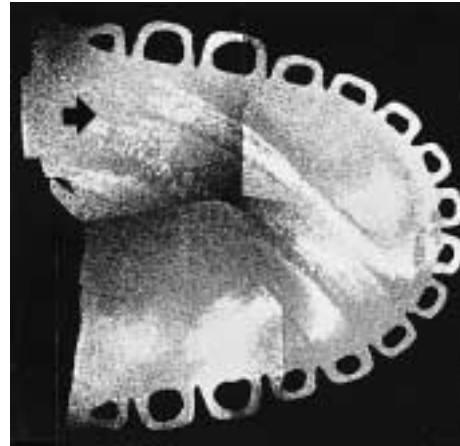


図10 チタンウマー-VF中心部写真

この方式も -3で述べたと同様、遠心力とコリオリの力が作用する。しかも、溶湯を鑄込む瞬間に回転運動を始めるため、さらにもう一つの力、加速運動体で生じる力が加わる。これは(1)式の第3項(ベクトルの上の点は時間微分を意味する)で表される力で、乗り物が動き出す時に、動く方向と反対方向に感じる力である。チタン鑄造機は短時間で高速回転させたいため、初期の回転加速度が大きく、影響が無視できない。

図11は金属床を単純化したワックスパターンを用いて、スプルーの取り付け位置だけを変えた場合の結果である²²⁾。回転方向は右端に矢印で示したように反時計回りであり、湯の流れが白い線となって見えるよう工夫して表している。溶湯は太い矢印で示したように左から流入し、右へ進むと同時に下側に力を受け、その結果、右下へ流れている。この場合、コリオリの力と加速回転で

生じた力は両者とも下向きに働くため、スプルー取り付け位置の影響が増幅されて現れたと解釈される。つまり、回転運動で同じ駆動力が溶湯に作用しても、鑄型空洞内の流れ抵抗の大小によってこれだけの差が生じる。



10 mm

図11 単純化した金属床鑄造体：流れ模様観察のためパラジウムで標識

・鑄造に際しての問題点、主に内部欠陥

歯科鑄造の本を開くと、たいいてい初めの部分に、望ましい鑄造体とはとして、外部に欠陥が無いこと、内部に欠陥が無いこと、適合性の良いこと、と述べられている。もちろんチタン鑄造体も例外ではなく、これがそのまま当てはまる。

外部の欠陥とは、ワックスパターンを再現していないこと、突起が存在すること、ひびが存在することなどの他に、表面の反応層も加えることができる。この最後の欠陥は、これまでの歯科用合金では着色、および表面の粗造などとして扱われてきており、無視されているわけではないが、重要視されていなかった。しかしチタンの

場合高温で他の物質と激しく反応するため、単に表面変色や粗造に止まらず、比較的内部まで反応層の影響が及び、強さなどに関係してくる。この欠陥については埋没材との関係が重要であり²³⁾、市販されている各埋没材と対応して解説したいが、紙面の都合上割愛する。

また、鑄込み不足、あるいは鑄造性については、鑄造機の特徴と共に述べた部分が多く、この章では、主に内部欠陥について解説したい。

- 1 内部欠陥の分類

これまでの歯科鑄造用合金では、内部欠陥は鑄巣、あるいは単に巣とも呼ばれている凝固収縮による内部の空洞が重要視されてきた。これは、従来の鑄造では多くの場合、溶湯が完全に鑄型空洞に満たされた後に凝固が開始したためである。湯だまりを付けたり凝固の方向をコントロールする、という工夫は凝固収縮による欠陥を避けるためである。従来の鑄造でも、ガス巻き込みによる欠陥も生じたであろうが、次のような理由で影響が少なかったと推定される。一つは流れ速度が小さいため巻き込みの頻度も小さかったこと、もう一つは、凝固まで多少時間の余裕があるため、巻き込まれたガスは溶湯内を

重力方向と反対に移動することができ、排出されたことである。合金の密度が大きいことも気泡の排出に役立っている。

これに対し、チタン鑄造では研究段階の初期から、球状の欠陥に悩まされてきた。チタンは密度が小さく、透過X線写真による欠陥検査が比較的容易であるため、鑄造体はまずX線検査を受けることが多い。その際、従来の鑄造体では予想できなかったような形状の内部欠陥が多数確認され、鑄造機の進歩は、鑄造性の改良と共にこの丸い内部欠陥の減少にも多大の努力が払われてきた。

図12は約4 mmという厚い鑄造体を約半分の厚さになるまで研磨し、現れた典型的な3種の内部欠陥である²⁴⁾。左上(A)に全体像を示しており、鑄造体上部2カ所にスプルー線を付け、サイクラークを用い、標準的使用法で鑄込んでいる。B, C, Dと記号を付けた内部欠陥はX線マイクロアナライザーで矢印の方向から観察しており、2次電子像を同記号の写真に示した。写真Bはほとんど水平に観察したもので、下方が底面(現れていない)で、欠陥の内壁をほぼ垂直に見ていることになる。この写真より側面に積み重なった跡が見られ、これは溶湯がほぼ同じ部位を何回も流れ、凝固層が重なった跡と推定

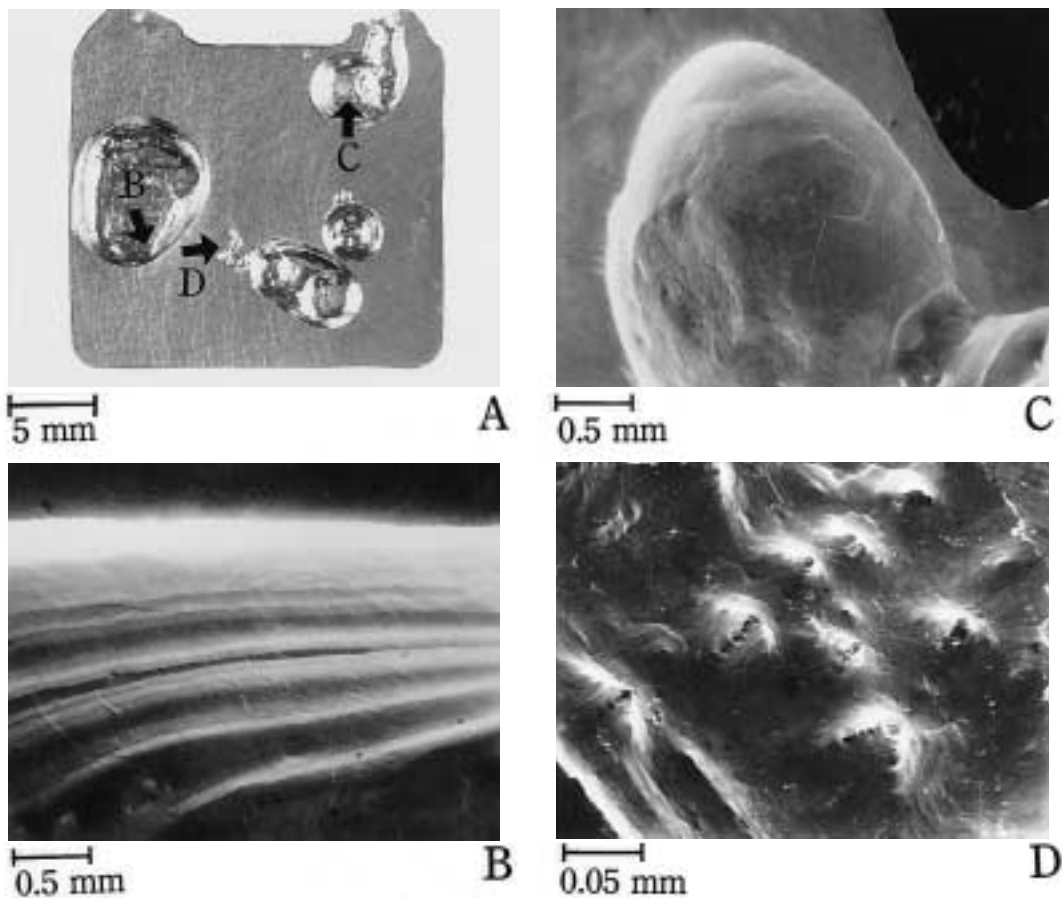


図12 典型的欠陥形態：サイクラークによる4 mm厚さ鑄造体断面

される。一方写真Cは球状の欠陥でその内面が滑らかで光沢のあることが特徴である。さらに、鑄造体厚さ方向につながった結晶粒界が認められ、この方向で同時に凝固したことを示しBとは異なっている。欠陥Cの位置は溶湯の流入する位置であるため、流入初期には気泡が存在しないはずで、鑄込中にこの位置まで移動した気泡の周囲が凝固した結果と推定される。写真Dは他の2つの欠陥より拡大率が大きく、写真Aからも分かるように欠陥そのものは小さく形状は複雑である。しかも欠陥内部の表面に細かい樹枝状突起が観察され、歯科チタン鑄造体では稀な凝固収縮による欠陥、つまり鑄巣と推定される。チタン鑄造では溶湯と鑄壁との温度差が大きい流れながら凝固する割合が多く凝固収縮はその都度保証され、しかも鑄造体は薄い部分や細い部分が多いため、ほとんど凝固収縮による欠陥は現れない。

Bのような大きくしかも流れパターンに直接影響される欠陥は鑄造性を良くすれば消滅すると考えられる。なぜならば、鑄造体内部であっても渦の中心のように、溶湯が最後に到達する部位の欠陥は一種の鑄込み不足と見なせるからである。事実発生頻度は少ない。

これに対し、Cのような球状の欠陥は大きさは様々であるが、たいていのチタン鑄造体に見られる。内部欠陥を少なくするためには、この種の欠陥発生を抑制する必要がある。この原因は、ガスの巻き込みであるが、それがいつの時点でどこで起こるか、そして、防ぐための工夫はないかと言うことが実際の鑄造方案の中心である。

鑄型の小片を巻き込んだ場合も溶湯との反応によりガスが発生し球状の欠陥ができるが²⁵⁾、どちらかと言えば、埋没材の側に原因があり、流れ途中のガスの巻き込みとは別の観点からの注意が必要であるため、詳しくは取り上げない。

- 2 球状内部欠陥の発生原因

球状内部欠陥の原因としては、上で検討したようにガスの巻き込みが中心である。このガスの巻き込みの原因を検討することは、内部欠陥を減少するために非常に重要であり、2つの点に分けて述べる。

第一はスプルーを通過して、溶湯と共にガスが巻き込まれ、鑄造体内部で比較的大きな球状欠陥となる場合で、図13で模式的に示したように、スプルー部での吸い込み渦発生の結果である²⁶⁾。断面積の大きい容器から、断面積の小さい管などに流体が流れ込むとき、程度に差はあるが必ずこの種の渦が発生する。おそらくこれに起因する内部欠陥はチタン鑄造独特のものと思われる。なぜならば、漏斗状の鑄型クルーシブルに発生する吸い込み渦は、圧力差が大きく、急激に溶湯がスプルーに流入する際に成長しやすいからである。しかも、落下した溶湯が鑄型クルーシブル内で静止する前に圧力がかかったり遠

心力が作用したりするため、スプルー直上の湯の深さが十分でなく、図13左側のように比較的弱い渦でもガス巻き込みの危険性がある。吸い込み渦は加圧鑄造あるいは遠心鑄造いずれでも発生し、ガス巻き込みの危険性が存在する。ただし、遠心鑄造の場合は大きな遠心力により巻き込まれたガスがスプルーなどにより脱出することができる。加圧鑄造の場合はいったん溶湯内に巻き込まれた気泡はほとんど脱出できず欠陥となるため、以下、加圧鑄造を想定して検討する。

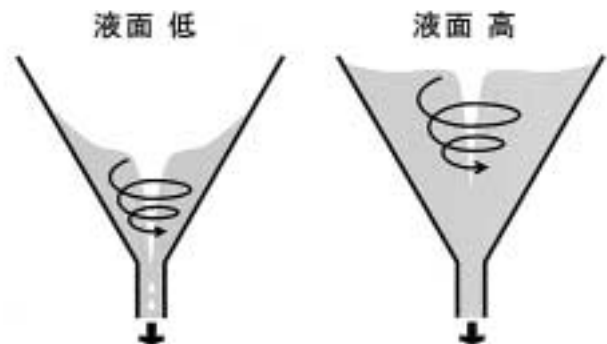


図13 鑄型クルシブルで発生する吸い込み渦模式図

この原因による欠陥を減少するためには、渦の発達を抑えることと、鑄型クルシブルの液面を高くすることである。渦の発達を抑えるためには、細いスプルーを用いたり、扁平、つまり断面が円形でない鑄型クルシブルやスプルーを使用すれば避けられる。ただし、これらは鑄造性が低下する方向に影響するため極端にはできない。2番目の工夫は非常に単純であり、大きめのインゴットを使用することである。このようにすれば図13右のように、渦が多少発達してもガスを巻き込むまでには至らず、結果として、球状の内部欠陥は避けられる。

図14は辺縁の全周をショルダータイプとする単純化した全部鑄造冠の形態にワックスパターンを作り、その隅角部に咬合面に対して45°の方向に長さ5mmのスプルーを付け、オートキャスト(左と中)²⁶⁾およびチタニウム(右)で作製した咬合面部のX線透過写真である。スプ

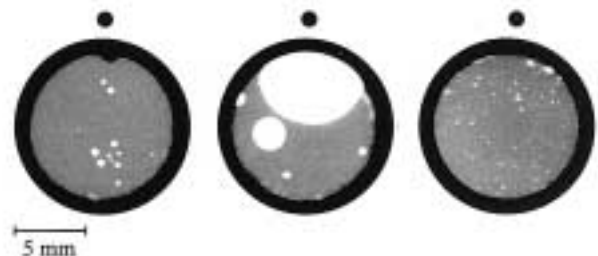


図14 単純化クラウンの咬合面部のX線透過写真：左と中はオートキャスト使用、左はスプルー直径2.0mm、中はスプルー直径3.2で溶解時間基準の半分、右はチタニウムVFを使用

ブルー直径は、左は直径2mm、中は直径3.2mmで、しかも後者では作想的に図13の左側の条件となるよう30gインゴットの溶解時間を基準の半分としている。この場合においても、クラウン必要金属量の約5倍が鑄型クルシブルに落下しているのであるが、液面が低いと、吸い込み渦で大きな内部欠陥が発生したと推定された。右側X線透過写真から分かるように、遠心鑄造の場合は、小さな内部欠陥は比較的多く認められるが、大きな欠陥は現れない。

第二の内部欠陥発生原因は、スプルーおよび鑄型空洞を流れる途中で巻き込まれたガスであり、ある意味ではチタン鑄造の宿命とも考えられる。この原因を理解するためには、管や板状空間を流れる流れの性質²⁷⁾を知る必要がある。管や板状空間を流れる際、進行方向と直角、つまり周囲の壁と接しながら流れる場合は管内流と呼ばれる。図15の左に示したように、鑄造学ではB型の流れとして知られており²⁴⁾、スプルー内ではこの流れである。板状の空間では、板に垂直にスプルーを付けると比較的この流れに近くなる。この流れの場合空洞内のガスを押し出しながら進むため、流れ途中でガスを巻き込む危険性は小さく、望ましい流れである。もう一つは、開水路の流れとして知られており、流れ側面の一部が常に自由表面としてガスに接しながら流れる場合である。この流れは図14の右に示したようにF型の流れとして知られている。この流れは小さな流れ断面の管から、広い断面の空間に流入した際に生じる流れである。この流れの場合は壁に衝突した時や流れが分かれる場所などでガスの巻き込みを避けることが難しい。その気泡が鑄造体に欠陥となって残ったものが、大小さまざまな球状の内部欠陥である。

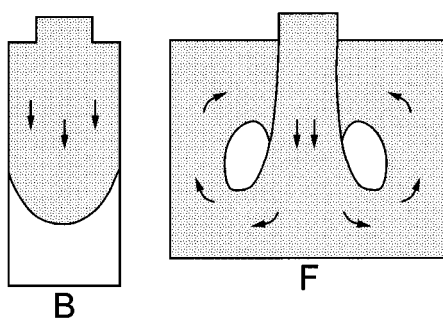


図15 鑄型内の流れの代表パターン

この原因でのガスの巻き込みを減少するためには、まず、なるべく管内流、つまりB型の流れとなるようスプルーを付ける位置、および流れの方向を工夫することである。具体的には急激な断面増加とならないよう工夫することと、流れ速度を多少犠牲にしても、周囲の鑄壁と接するように流れるようにすることである。図16は左に

ワックスパターン植立状態、右はサイクラークによる鑄造体のX線透過写真であり、植立パターンのAとBに対応している。この際、図2で示したコーン型遮蔽箔を適用している²⁸⁾。1.4mmと比較的厚い板状ワックスに直径2.5mmのスプルーを、Aは辺中央に平行に、Bは板面と垂直になるように右上コーナーに付け、しかも、後者では湯の進行方向は重力に逆らって進むよう埋没している。この結果は、内部欠陥発生状況から明らかであり、B型の流れで鑄込むことの重要性が再認識される。現実のチタン鑄造では全体にこのような理想的なスプルー配置は難しいため、小さな欠陥でも許容できない部位を中心に、B型の流れとなるよう鑄造方案を立てるべきであろう。

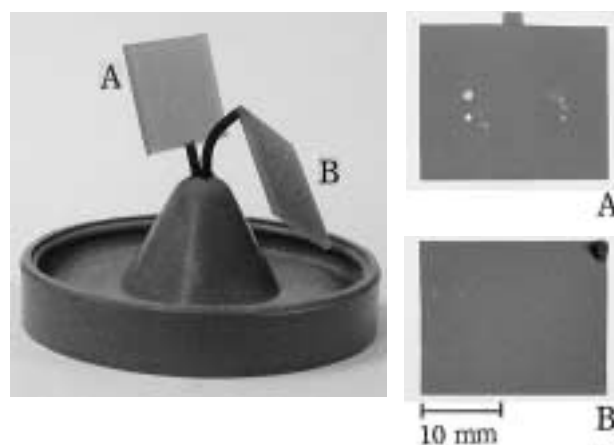


図16 スプルー植立写真と鑄造体透過X線写真

・現状での対処

これまで、検討してきたように、加圧鑄造と遠心鑄造では鑄造性を良くするための注意点が異なり、しかも内部欠陥軽減に対する考え方もまた異なる。現状での対処をそれぞれの鑄造機で分けて検討する。

加圧鑄造の場合、埋没材の選択がまず重要であり、通気性を常に念頭に置いて選択しなければならない。また、圧力による鑄込み駆動力が重力の作用より大きいため、重力は溶湯の流れにあまり影響を与えない。このことを活用すると、スプルーをワックスパターンに付ける位置は遠心鑄造よりも選択の幅は広く、工夫することで湯の流れ方をある程度制御することができる。このようにして、鑄造性、およびガスの巻き込みを少なくすることで、質の高い鑄造体が得られる。

遠心鑄造の場合は、溶湯が遠心力やコリオリの力などで進む方向が決まるため、鑄造リングに埋没する時のスプルーの位置、および遠心鑄造機に取り付けた時の遠心力などの合力の作用方向を十分考慮して、決めなければ

ならない。遠心鑄造の良いところは、スプルーを適切に取り付け、ワックスパターンの埋没位置も適切ならば、たとえ内部にガスが巻き込まれても遠心力で不必要な部位に排出できる点である。

これまでの説明においては、欠陥の著しい例が多かったが、実際にはいろいろ工夫をしながらチタン鑄造を行っている。図17はそれぞれ工夫して鑄造した例で、上はオートキャスト、下はチタニウム-VFを使用。有床義歯メタルフレーム作製は最も困難な鑄造とされているが、非常に微細な球状欠陥は散見されるが臨床上是問題ない程度に作られている。

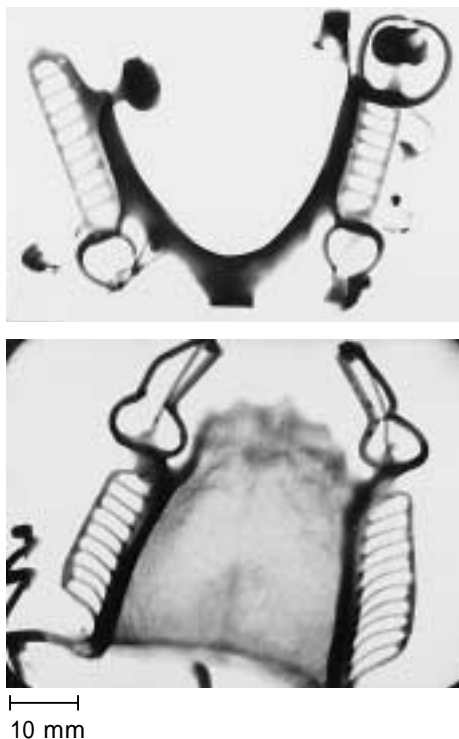


図17 臨床的形態のX線透過写真：上はオートキャスト，下はチタニウム-VFを使用

おわりに

チタン鑄造機は技工器具として、決して安くはなく、一般の技工所でいろいろ種類をそろえることは難しい。そのため、市販されている鑄造機の中でどれがよいか、または加圧鑄造機と遠心鑄造とではどちらがチタン鑄造に適しているか、これまでたびたび提起された質問である。

その解答としては、本稿で一貫して述べたように、加圧鑄造、遠心鑄造それぞれ長所短所があり、一つを取り出すことは難しいという点である。そのような選択よりも、各鑄造機が潜在的に持っている能力を理解し、十分その性能を発揮させることが重要と思われる。

本年6月にIADRに引き続いて開かれた第1回国際歯科チタン技工シンポジウムで、チタン鑄造セッションがあり、そこで、日常的にチタン鑄造に取り組んでいる技工士からの報告があった。決して容易とはいえないチタン鑄造技術をマスターして、臨床的な基準を満足する鑄造体が作製されている。

2001年秋期日本歯科理工学会学術講演会で、理工21世紀研究チームにより報告された宿題報告「チタンおよびチタン合金の応用と発展」においても、1番目のテーマとして、チタン鑄造と加工方法が挙げられ、その中で「適合性改良のために安定した膨張性鑄型材の開発、鑄巣の発生コントロール」などが重要課題として挙げられている。適合に関しては未知の部分が多い²⁹⁾。

チタン鑄造技術は今後も絶え間なく改良されていくであろう。

文 献

- 1) 井田一夫, 竹内正敏, 都賀谷紀宏, 堤 定美: チタン合金の歯科鑄造に関する研究 第1報 純チタンの鑄造, 歯材器誌, 37(1), 45-52, 1980
- 2) 三浦維四, 井田一夫: チタンの歯科利用, 第一版, クインテッセンス, 1988
- 3) Kouichi Watanabe, Seigo Okawa, Osamu Miyakawa, Syuji Nakano, Nobuhiro Shiokawa, Masayoshi Kobayashi: Molten Titanium Flow in a Mesh Cavity by the Flow Visualization Technique, Dental Materials J, 10(2), 128-137, 1991
- 4) 渡辺孝一, 大川成剛, 宮川 修, 中野周二, 本間ヒロ, 塩川延洋, 小林正義: チタン湯流れに関する遠心鑄造と圧力鑄造の比較検討, 歯材器, 12(4), 496-505, 1993
- 5) 尾崎康子, 草刈 玄, 宮川 修: チタン鑄造冠の内部欠陥に関する研究, 補綴誌, 40(4), 738-748, 1996
- 6) Osamu Miyakawa, Kouichi Watanabe, Seigo Okawa, Syuji Nakano, Masayoshi Kobayashi, Nobuhiro Shiokawa: Layered Structure of Cast Titanium Surface, Dental Materials J, 8(2), 175-185, 1989
- 7) 大川成剛: チタン鑄造用スピネル埋没材に関する研究 第1報 MgO-Al₂O₃-ZrO₂系の組成およびチタンとの反応について, 歯材器, 13(3), 253-259, 1994
- 8) 宮川 修, 渡辺孝一, 大川成剛, 中野周二, 塩川延洋, 小林正義, 田村久司: 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水

- イール, 歯材器, 9 (1), 30 - 41, 1990
- 9) 三村博史, 宮川行男: チタン鑄造体の電気化学的腐食挙動, 第1報 表面研磨の程度および溶液の種類の影響, 歯材器, 15 (4), 283 - 295, 1996
- 10) Takao Hanawa, Mamoru Ohta: Calcium phosphate naturally formed on titanium in electrolyte solution, *Biomaterials*, 12, 767 - 774, 1991
- 11) 渡辺孝一, 大川成剛, 宮川 修, 中野周二, 本間ヒロ, 塩川延洋, 小林正義: チタンと陶材の焼成時界面反応, 歯材器, 12 (5), 620 - 629, 1993
- 12) 渡辺孝一, 大川成剛, 金谷 貢, 中野周二, 宮川修, 小林正義: 純チタンとTi-6Al-4V合金の湯流れの相違点, 歯材器, 15 (2), 137 - 145, 1996
- 13) 坂野智三: 16カラット金ろうによるチタンの歯科ろう付け, 補綴誌, 40 (1), 185 - 194, 1996
- 14) 白井将樹, 新谷明喜, 横塚繁雄: CAD/CAMによるチタンクラウン内面の加工精度, 補綴誌, 43 (1), 160 - 170, 1999
- 15) Ioana Baltag, Kouichi Watanabe, Haruka Kusakari, Naoyuki Taguti, Osamu Miyakawa, Masayoshi Kobayashi, Naoko Ito: Long-term Changes of Hydroxyapatite - Coated Dental Implants, *J Biomed Mater Res. (Appl Biomater)*, 53, 76 - 85, 2000
- 16) 米山隆之: 超弾性Ni-Ti合金の新しい歯科応用, 生体材料, 15 (1), 18 - 23, 1997
- 17) 大木道則, 大沢利昭, 田中元治, 千原秀昭 編: 化学事典, 東京化学同人, 第1版, 847, 1994
- 18) Kouichi Watanabe, Seigo Okawa, Mitsugu Kanatani, Syuji Nakano, Osamu Miyakawa, Masayoshi Kobayashi: New Partition Technique for Two-chamber Pressure Casting Unit for Titanium, *Dental Materials J*, 19 (3), 307 - 316, 2000
- 19) 渡辺孝一, 大川成剛, 金谷 貢, 中野周二, 宮川修, 小林正義: 一室加圧型チタン鑄造機に関する研究 第2報 鑄型通気性が鑄造欠陥に及ぼす影響, 歯材器, 14 (6), 669 - 677, 1995
- 20) 大川成剛, 渡辺孝一, 金谷 貢, 中野周二, 宮川修: 鑄造時の鑄型空洞の圧力挙動 - 一室加圧型鑄造機の場合 -, 歯材器, 19 (1), 108 - 114, 2000
- 21) 渡辺孝一: 遠心鑄造において現れる見かけの力, *日本金属学会誌*, 61 (7), 662, 1997
- 22) Kouichi Watanabe, Seigo Okawa, Osamu Miyakawa, Syuji Nakano, Nobuhiro Shiokawa, Masayoshi Kobayashi: The Flow Observation in Titanium Denture Base Casting, *proceedings, 2nd, International Symposium on Titanium in Dentistry*, 109, 1992
- 23) 大川成剛, 渡辺孝一, 宮川 修, 中野周二, 本間ヒロ, 塩川延洋, 小林正義: チタン鑄造において新しくわかったこと - 特に市販埋没材とチタン鑄造体表面の反応層について, 歯科技工, 21 (7), 673 - 686, 1993
- 24) 渡辺孝一, 大川成剛, 宮川 修, 中野周二, 塩川延洋, 小林正義: 歯科精密鑄造における「標識元素溶解法」を用いたチタン湯流れの研究 第2報 板状鑄型における湯流れと欠陥との関係, 歯材器, 10 (1), 77 - 96, 1991
- 25) Osamu Miyakawa, Kouichi Watanabe, Seigo Okawa, Syuji Nakano, Hiro Honma, Masayoshi Kobayashi, Nobuhiro Shiokawa: Skin Holes of Titanium Casting, *Dental Materials J*, 12 (2), 171 - 181, 1993
- 26) 渡辺孝一, 大川成剛, 金谷 貢, 中野周二, 宮川修, 小林正義: 加圧鑄造による規格クラウン空洞内のチタン湯流れと内部欠陥, 第10回歯科チタン研究会講演予稿集, 110 - 111, 1997
- 27) 森川敬信, 鮎川恭三, 辻 裕: 流れ学, 朝倉書店, 初版, 46 - 75, 1989
- 28) 渡辺孝一, 大川成剛, 金谷 貢, 中野周二, 宮川修, 小林正義: 圧力遮蔽箔を用いたチタン用二室型加圧鑄造機の特性, - スプルー設計と内部欠陥との関係 - 歯材器, 20 (特別号), 107, 2001
- 29) 星野浩之, 草刈 玄, 宮川 修: チタン鑄造冠の適合に関する研究, 補綴誌, 40 (4), 796 - 805, 1996