

U字型キャビティ内のチタン湯流れ

渡 辺 孝 一 大 川 成 剛 金 谷 貢
 中 野 周 二 宮 川 修 小 林 正 義*

Molten Titanium Flow in U-type Cavity

Kouichi WATANABE, Seigo OKAWA, Mitsugu KANATANI,
 Syuji NAKANO, Osamu MIYAKAWA and Masayoshi KOBAYASHI*

Keyword : Titanium, Flow of molten metal, Casting defect, Pressure casting, Centrifugal casting

By combining information from X-ray transparency and from molten titanium flow, the casting process in a U-type cavity simulating crown section was investigated under several conditions, such as type of casting machine or sprue diameter. Despite the machine type, centrifugal (CT) or two-chamber pressure (PR) machine, jet flow and F type filling were observed in the occlusal area. The flow pattern in the axial area, however, was controlled by the main body force of each casting machine ; it was the B type for PR and the F type for CT. Major factors related to internal defects were sprue diameter for PR and sprue-attachment position and angle for CT.

キーワード : チタン, 湯流れ, 鑄造欠陥, 加圧鑄造, 遠心鑄造

U字型キャビティにチタンを鑄込み, 標識元素による湯流れ観察と, X線透過像による欠陥検査を行った。これらの結果を基に, 差圧鑄造と遠心鑄造の違い, スプルー直径やその植立条件が充満過程へ及ぼす影響を検討した。ほとんどの場合, スプルーから噴流として流入し, 咬合面部はF型で充満することが確認された。脚の部分では, 差圧鑄造ではB型, 遠心鑄造ではF型の充満であった。内部欠陥に関しては差圧鑄造の場合はスプルー線の太さ, 遠心鑄造の場合はスプルー線の植立位置および角度が重要な因子であることが推定された。

緒 言

臨床の場において用いられているチタン鑄造体は, これまで全部床や部分床が多くを占めてきたが, これからはブリッジやクラウンなど, さらに広い利用が予想される¹⁾。これら形状の複雑な補綴物に対し, それぞれ鑄造機の特長も考慮した最適鑄造方案が望まれるのであるが, 鑄造体の形態と欠陥発生との関係を系統

的に取り扱った基礎的研究は非常に少ない²⁾。これまでの研究は, ほとんどが板状やメッシュ状パターンを用いて実験しており³⁻⁵⁾, 二次元的に広がっていると近似できる全部床に対しては, 重要な知見がいくつか得られている。しかしながらクラウン・ブリッジ, あるいは単独のクラウンでさえ, 従来の研究で使用されてきたパターンでは類似性が少なく, 咬合面部と軸面部でどちらが優先的に溶湯が充満するのか, あるいは

原稿受付 1996年8月19日, 受理 1996年9月9日

新潟大学歯学部歯科理工学講座 (〒951 新潟市学校町通2-5274)

*新潟大学分析センター EMX室 (〒951 新潟市学校町通2-5274)

Dental Materials and Technology, School of Dentistry, Niigata University (5274, Gakkoucho-dori 2, Niigata 951)

*EMX Laboratory, Niigata University (5274, Gakkoucho-dori 2, Niigata 951)

隅角部の流れのよどむ箇所は後の流れにどのように影響するのかなど、さらに検討が必要である。最近、クラウンを単純化したパターンを用い、咬合面部だけではなく、軸面部のX線透過像も撮影し、クラウン全体の内部欠陥を観察することにより、一室加圧型鋳造機あるいは二室加圧型鋳造機（差圧鋳造機）の圧力特性と欠陥との関係、さらにスプルー直径が欠陥の発生に及ぼす影響などを考察した研究が報告されている⁶⁾。ただし、この報告においても、湯流れについてのデータは含まれていないため、欠陥発生メカニズムは十分に解明されているわけではない。なぜならば、欠陥発生は設定した鋳込み条件そのものよりも、むしろその条件における湯流れや充満過程が直接的に関連しているからである。

本研究においてはクラウンの断面を想定したU字型の鋳型空洞（以下キャビティと記す）に純チタンを鋳込み、X線透過像により欠陥の性状を観察すると共に、標識元素溶解法によりチタン湯流れおよび凝固過程を観察した。そしてキャビティの形態、重力や遠心力などの体積力の作用方向、あるいは溶湯の流入角度や速度などが、キャビティ充満過程に及ぼす影響を検討した。さらに、欠陥が生じた場合、その発生メカニズムを湯流れを基に考察した。

材料および方法

1. ワックスパターンの作製

ワックスパターンはパラフィンワックス板を張り合わせた厚さ2.8 mmの板から、Fig. 1に示したような寸法でU字形に切り出して作っており、脚部の幅など寸法が若干異なっている。このパターン作成法は、EPMAで分析する際、凹凸のなるべく小さな面が望

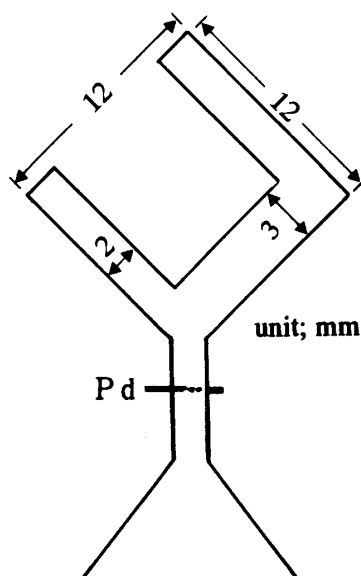


Fig. 1 Schematic drawing of a wax pattern ; unit mm

ましいため採用した。パターン咬合面の中央に垂直、または咬合面と135度の角度で隅角部に、直径1.5、2.0または3.2 mm、長さ6 mmのスプルーを付け、鋳造機メーカー指定のクルシブルフォーマーに植立した。なお、スプルー途中に標識元素とし直径0.4 mmのパラジウム線を挿入した。Fig. 1は隅角部にスプルーを付けた場合を模式的に表しており、図中の数字はmm単位で大きさを表している。

2. 埋没・鋳造

上記パターンを、差圧鋳造機で鋳造する場合、指定埋没材（チタベストMZ, モリタ）を用いて、直径60 mm、高さ50 mmの鉄製リングにライナー（セラミックライナー, モリタ）を1枚内張りして通報に従い埋没した。その際、ワックスパターンとライナーの距離、あるいはリング底面との距離が7 mm以下にならないように注意した。遠心鋳造機を用いる場合は指定埋没材（チタニウムベストII, オハラ）を用いて、ほぼ同型のプラスチックリングに埋没した。鋳型の加熱・冷却は両者ともメーカーの指示に従って処理したが、鋳込み時の鋳型温度はいずれも室温とした。鋳造には差圧鋳造機（サイクラークCS-C1, モリタ）を用い、メーカー指定10 gの純チタンインゴットを180 Aの電流により20秒間溶解した後鋳込んだ。遠心鋳造機（チタニウムVF, オハラ）の場合、パネ巻き数38回、メーカー指定14 g純チタンインゴットを130 Aの電流で約28秒間溶解した後鋳込んだ。流れの再現性を確認するため、同条件で3回繰り返して鋳造した。取り出した鋳造体はサンドブラストの後、約22°Cの酸洗い液（チタクリーン, モリタ）で60秒間処理をして得られた面を最表面として、流れ観察するため元素分析した。また内部の流れを観察するため、1.4 mm研磨した面、つまり厚さ方向の中心断面も元素分析した。

3. X線透過像による欠陥検査

酸洗いの後、X線欠陥検査装置（MBR-1505 TV, 日立）により鋳造体の欠陥検査を行った。撮影条件は工業用X線フィルム（#80, 富士フィルム）を用い、70 kV, 1 mAの条件で150秒間露出した。

4. 標識元素の検出による湯流れ観察

元素分析はX線マイクロアナライザ（EPMA-8705, 島津）のH IIシステムを用い、20 kV, 0.5 μ Aの電子線条件で、ステップ幅0.028 mm、各要素での検出時間0.06秒の試料移動モードで行った。得られた元素濃度を明暗として表しており、明るい部分がPd高濃度部位である。分析結果と背景との境界が不明瞭となる場合もあったので、以下の図においては試料部分を切り取って示している。今回はパラジウムの検出のみを行ったので、各分析結果には元素記号を付けていない。

結果および考察

1. 差圧鑄造機を用いたときの湯流れ

1) 隅角部に直径 2.0 mm のスプルー

直径 2.0 mm のスプルーを隅角部に付け、差圧鑄造で鑄込んだ鑄造体の表面(A)と、それを 1.4 mm 研磨した面(B)の Pd 分布を Fig. 2 に示した。重力は太い矢印で示した方向に作用している。

表面の Pd 分布から分かるように、黒く見える初期の溶湯は右上から流入し、支台側壁(矢頭)に衝突した後、左側の隅角部で拡がっている。スプルーから出た直後の流れはスプルー直径よりも細く、これは流れの一部しか壁に接していないことを示しており、噴流⁷⁾と思われる。その場合、鑄込みの鑄造圧は解放され、キャビティ内の溶湯に働く力は重力のみである。支台壁に沿った黒い流れの幅は約 0.5 mm であり、これはキャビティ厚さ 2.8 mm いっぱいに拡がって流れているためである。左側隅角部では、流れがほとんど、せき止められたことが分かる。

少し遅れて流入した溶湯はパラジウムを含んでおり、左側隅角部の黒い領域から先の部分で、徐々に濃度が高くなり、脚の先端ではまた少し濃度が下がっている。つまり Pd 線が溶け初めて徐々に濃度が高くなり、再び下がるという時間変化が、場所による変化として現れている。これは脚の断面いっぱいに広がり、壁に凝固層を作りながら進む流れを意味しており、B 型で充満するときの特徴である⁸⁾。高濃度の Pd を含んだ溶湯の一部は、細い矢印で示したように、咬合面側にも流れ、渦を巻くように逆流となっており、F 型の充満であることが分かる⁸⁾。右側の脚では初期凝固部分が存在しないこと、および高濃度部分が存在せず、Pd 低濃度となっていることなどから、パラジウム線が溶け尽くす直前の溶湯と推定され、最後の充満部位である。

中心断面の Pd 分布(B)より、左側脚の先端近傍を除いて、ほとんど流れ模様が認められない。これは溶湯が充満してから凝固するまでに、少し時間的に遅れがあり、小さな濃度分布が平均化された結果と解釈される。Pd 濃度全体から考え、左側脚、咬合面部それから右側脚の順序で充満したことが分かる。

スプルー植立近傍に、H と示した丸い内部欠陥が認められ、これは溶湯に巻き込まれた気泡が、重力と反対方向に移動する途中で、周囲の溶湯が凝固した結果と推定される。

図には示していないが、直径 3.2 mm のスプルーを隅角部に付けた場合、まったく欠陥が認められず、巻き込まれた気泡が排出されたと解釈される。また咬合面に垂直にスプルーをつけた場合も、直径 2.0 mm では若干の内部欠陥があったが、直径 3.2 mm では欠陥

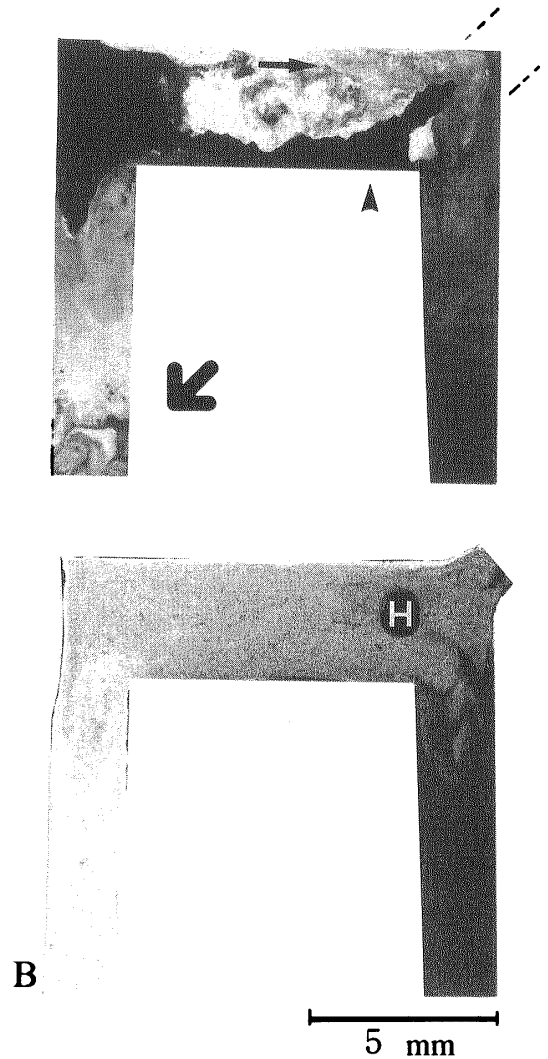


Fig. 2 Palladium maps of the surface (A) and the section (B) of the casting by the pressure machine; the sprue was 2.0 mm in diameter and was attached to the corner

が認められなかった。

2) 隅角部に直径 1.5 mm のスプルー

Fig. 3 は直径 1.5 mm のスプルー線を隅角部に付け、差圧鑄造で鑄込んだ結果である。左は極端な鑄込み不足となった鑄造体の X 線透過像(A)であり、キャビティ形態を点線で示した。この最表面は平らな部分が少ないため EPMA 分析は行っていない。右は中程度の鑄込み不足となった鑄造体の X 線透過像(B)と表面の Pd 分布像(C)で、キャビティ形態の表示は省略している。

左の X 線透過像は脚の部分だけでなく、咬合面部にも鑄込み不足が認められる。しかも黒矢印で示した部分は凝固層が存在せず、噴流であることが分かる。従来、鑄込み不足は、キャビティ内流れの急速凝固が原因と考えられ、この図においても脚部で見られる。た

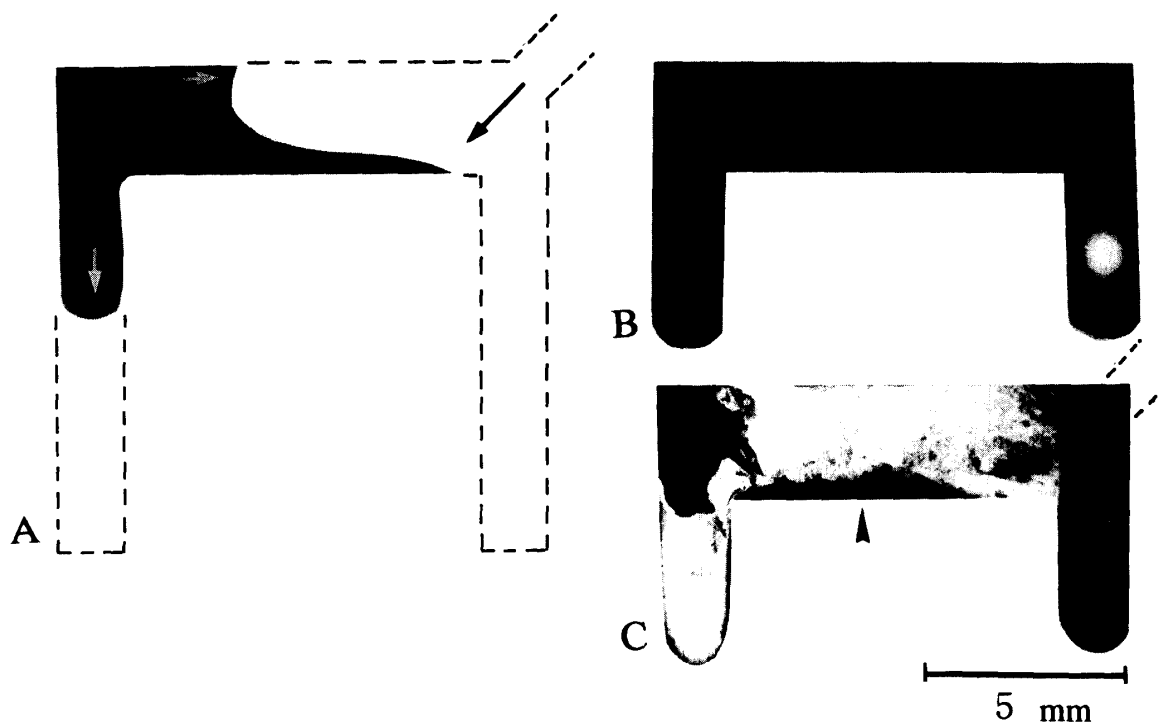


Fig. 3 Two X-ray transparencies (A, B) of the incomplete castings by the pressure machine and the palladium map (C) of the upper casting (B); the sprue was 1.5 mm in diameter and was attached to the corner

だし、鑄込み不足という点は同じでも、咬合面部の場合はキャビティ内の凝固に原因があるのではなく、細いスプルーの途中で凝固した結果、溶湯が供給されなくなったことが原因である。このようにチタン鑄造では、細いスプルーで鑄込んだ場合、スプルー途中での凝固も重要な欠陥原因の一つと考えられる。キャビティ内の流れはこのX線透過像からも推定でき、白矢印で示したように、咬合面部ではF型、脚部分ではB型と考えられる。

右X線透過像(B)より分かるように、両脚部とも典型的なB型の充満での鑄込み不足となっている。ただし、その理由としては、溶湯先端部の急速な凝固によるものと、スプルー途中の凝固による鑄込み圧力の消失とが考えられ、ここで得られた結果だけでは決められない。右側脚部分に内部欠陥が認められ、B型充満では内部欠陥が生じにくい、というこれまでの報告⁹⁾と矛盾するようであるが、これは咬合面部の充満途中で巻き込まれた気泡がスプルー付け根に移動し、最後に充満する溶湯と一緒に移動した結果と推定される。

Pd分布(C)から分かるように、初期溶湯の凝固部分は主に左側の脚の上方に認められ、スプルーからの道筋が支台側壁(矢頭)に接したわずかな部分しか現れていない。これはAからも分かるように、スプルー直径が小さいことにより、流入直後はまったく鑄壁に接触せず、支台側壁に衝突しても、極薄い凝固層しか形成しないためである。またPdの高濃度部位が左側

に偏っており、右側脚部分のPd濃度は低いことから、これは最終流入溶湯であることが分かる。

以上の結果、鑄込み不足の原因を改めて検討すると、従来は溶湯と鑄型の温度差が大きいため、溶湯先端部が速やかに凝固するためと考えられてきた⁴⁾。しかしながらAのような鑄造体では、明らかに溶湯の流入が途絶えたためであり、Bの鑄造体にもこの原因を当てはめると、時期は若干異なるが、スプルー途中の凝固によって、溶湯の進行駆動力が失われ、鑄込み不足が発生したと解釈される。この原因は圧力鑄造における、大きな球状内部欠陥の発生とも関連すると思われる。これまでは原因不明と処理されてきた鑄造体のいくらかの割合に、これが原因となっている可能性がある。

2. 遠心鑄造機を用いたときの湯流れ

1) 隅角部に直径2.0mmまたは3.2mmのスプルー

Fig. 4は直径2.0mm(A)または3.2mm(B)のスプルーを隅角部に付け、遠心鑄造により鑄込んだ場合の鑄造体表面のPd分布である。回転方向はこの図の配置で反時計回りであり、遠心力は太い矢印で示す方向に作用している。

Aから分かるように、スプルーから流入直後の流れの道筋は見え、噴流である。咬合面部の左側ほとんどは初期流入溶湯となっており、勢いよく支台側壁に衝突し、広がっていることが推定される。遠心鑄造の場合は噴流となって流入し、いったん壁に当たって流

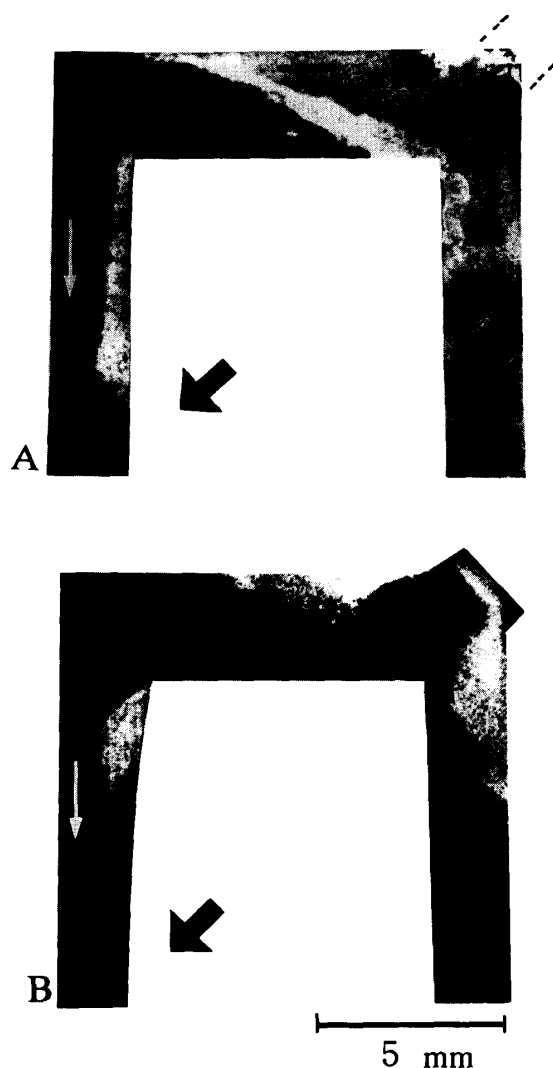


Fig. 4 Palladium maps of the surface of the castings by the centrifugal machine ; the sprue was 2.0 mm (A) or 3.2 mm (B) in diameter and attached to the corner. The rotation axis was perpendicular to this figure plane and the mold was rotated counterclockwise

れが遅くなっても、遠心力が大きいため、その作用方向の壁に押しつけられながら流れ（白矢印）、脚部分でもキャビティの奥の方からF型で充満している⁹⁾。この結果、左側脚の一部に、初期溶湯の凝固層の形成されなかった部分が存在し、その部分だけ後から充満した溶湯が観察でき、Pdが高濃度となっている。図には示していないが、この casting 体ではスプルー根本に細長い内部欠陥が認められ、溶湯内の気泡が遠心力と反対側に移動する途中で周囲が凝固した欠陥と推定される。

Bから分かるように、スプルーが太いと、壁に接しながら流れるため、流入直後の流れも明瞭に認められる。また流速もAの場合より大きいことから、Pd線が溶ける前の溶湯の凝固層が大部分を占めている。つ

まりこのキャビティ全体としても管内流つまりB型の充満に近くなる。図では示していないが、この casting 体では全く欠陥が認められなかった。これはB型充満に近い場合、キャビティ内部のガスを排出しながら進むことと、充満終了してから凝固するまで、かなり間隔があり、たとえ溶湯に気泡が巻き込まれたとしても、遠心力の反対側に移動し、スプルーより排出されるためである。

図には示していないが、直径1.5 mmの場合、湯流れは2.0 mmの場合と類似していた。また外部に欠陥は無く、内部の欠陥もスプルー線近傍でわずかに認められるだけで、差圧 casting の場合 (Fig. 2 と Fig. 3) のような大きな差は無かった。

2) 咬合面に垂直にスプルー植立

Fig. 5は直径1.5 mm (左) または3.2 mm (右) のスプルーを咬合面に垂直に付け、遠心 casting により casting 込んだ場合の結果である。それぞれ上はX線透過像 (A, C) で、下は casting 体表面のPd分布 (B, D) で、スプルー太さを点線で示した。回転方向はこの図の反時計方向であり、遠心力は太い矢印のように下側に作用している。

X線透過像 A, C から、スプルー線直径が2倍以上も違っているのに、それにはほとんど関係なく、咬合面の薄い凝固層のすぐ内側に内部欠陥が認められる。両者ともこの位置で発生した欠陥ではなく、溶湯に巻き込まれた気泡が、遠心力と反対側に移動した結果と推定される。ただし、スプルーから排出されるような力は働いておらず、たとえ凝固まで時間的余裕があっても、これら欠陥は減少しない。スプルーをはさんで、右側に欠陥の多いのも偶然ではなく、回転初期には左側方向にも体積力が働いていた結果と推定される。つまり、遠心 casting ではワックスパターンの形態、および遠心力の作用方向を考慮し、巻き込まれた気泡が排出されやすいようにスプルーをつけるべきで、スプルー線の太さは2次的な影響しか及ぼさないことが分かる。

それぞれ表面Pd分布から分かるように、左側脚の部分に先に溶湯が充満している。しかも脚の部分はF型で充満していることが推定される。これは回転初期には回転数の増加途中であるため、加速運動に由来した力が左方向に作用しており、脚の左側壁に押しつけられるように流れた結果と推定される。またスプルー直径が大きいとPdを含まない溶湯の凝固層が広がっており、短時間で casting 込みが終了したことを意味している。ただし、上で述べたように、溶湯の充満時間の短縮は、内部欠陥の軽減には直接つながらない。

3) キャビティに対し回転方向を90度変えた場合

Fig. 6は直径2.0 mmのスプルーを、隅角部(A)または咬合部に垂直(B)に付けた場合の表面Pd分布を

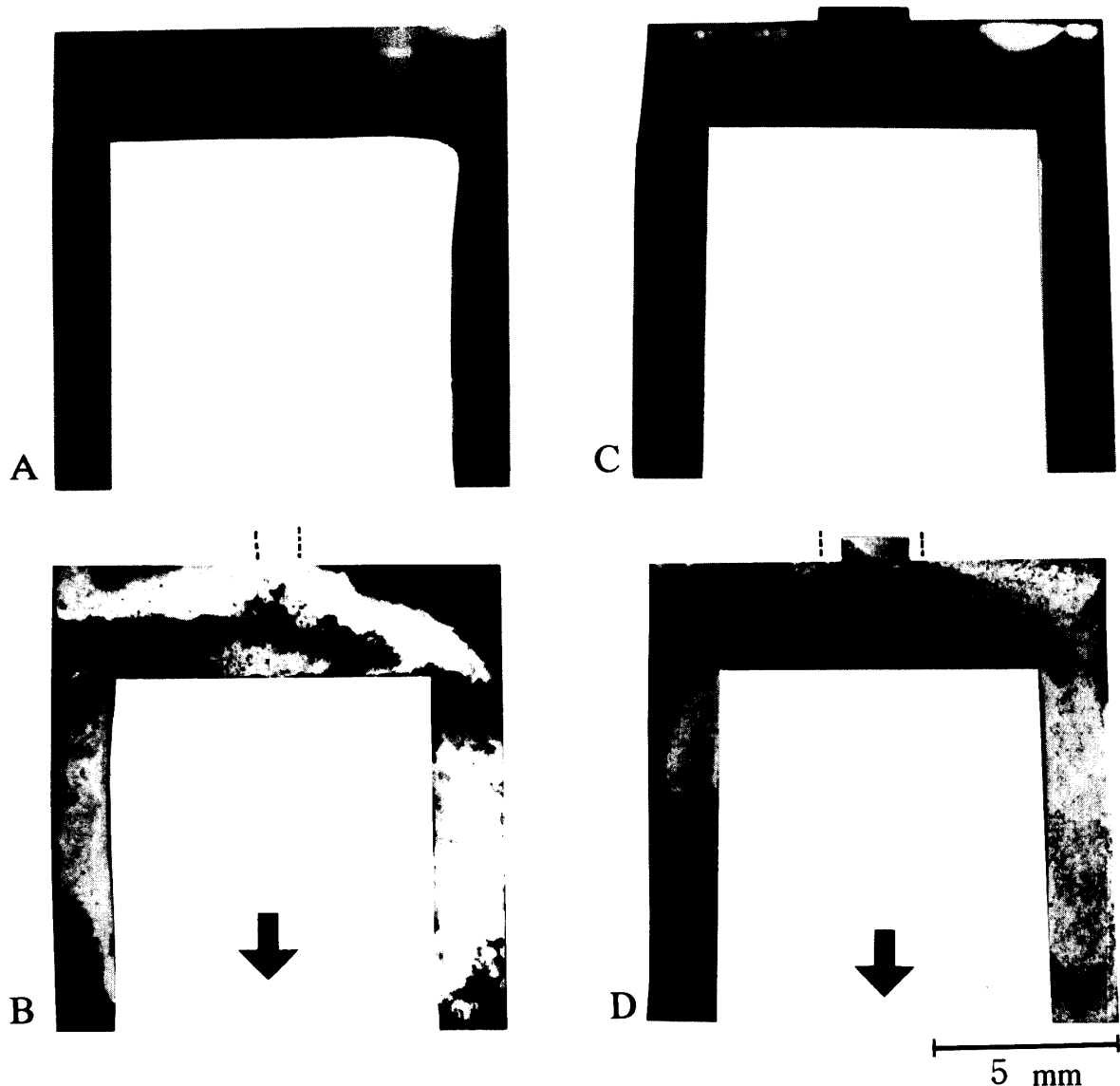


Fig. 5 X-ray transparencies (upper) and Palladium maps (lower) of the castings by the centrifugal machine; the sprue was 1.5 mm (left) or 3.2 mm (right) in diameter and was attached at the center of the occlusal face. The rotation axis was perpendicular to this figure plane and the mold was rotated counter-clockwise

示している。太い矢印で示したように、遠心力の作用方向はそれぞれ、AはFig. 4と、BはFig. 5と同じである。ただし回転方向はFig. 4やFig. 5と90度異なり、回転軸はこの紙面と平行でスプルーと直角の位置関係で、鑄造体が手前から奥の方向へ進む面外回転である。

Aから分かるように、斜めから流入した初期溶湯は、支台側壁にあたり、その面に沿って進み、脚部の壁にあたって一部は咬合面方向に流れ、一部は脚部の先端に達している。後者において、先端部だけに離れて存在しているのは脚の壁に押しつけられながら薄い層となって流れており、この分析面では観察困難なためと思われる。咬合面部の流れは細い矢印のように逆流もあり、Fig. 4の場合と類似している。

咬合面に垂直にスプルーを立てた場合、溶湯はスプルーから出て、支台側壁に当たり、両側脚にほぼ左右対称に流れている。つまり脚の両方ともFig. 5 Dの左側脚部の流れと類似している。

以上の結果、遠心力だけを考えれば、AはFig. 4、BはFig. 5とそれぞれ同じであるが、回転の方向が変わると、初期の加速回転の影響により流れパターンの大きく異なることが分かる。このことからクラウン、あるいはクラウン・ブリッジの鑄造の場合、埋没時点のパターンとスプルーの関係だけでなく、リングを鑄造機にセットする際も十分回転方向に注意すべきことが分かる。

従来の遠心鑄造でも多少この傾向は認められている¹⁰⁾が、チタン用の鑄造機と比べ、回転初期の加速度

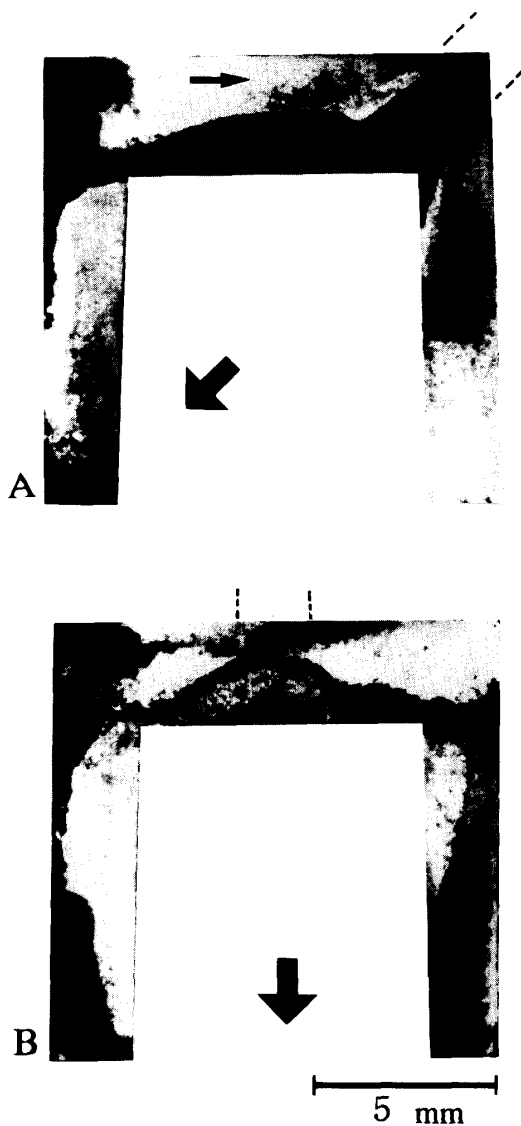


Fig. 6 Palladium maps of the castings by the centrifugal machine; the sprue of 2.0 mm in diameter was attached at the corner (A) or at the center of the occlusal face (B); the rotation axis was in this figure plane and was perpendicular to each sprue. The mold was rotated from this side to the opposite side

が桁違いに小さいと思われ、この種のキャビティでは回転方向による明瞭な差は出にくいことが推定される。

結 論

複雑なキャビティの中を溶湯が充填する場合、どのような流れ方をして全体を満たすのかは、各種欠陥と密接に関係し、それらの発生を防止する上でも非常に重要である。ここではU字型パターンを用いて、スプルー線の太さや、植立条件を変えたとき、差圧铸造ま

たは遠心铸造で、どのように流れ方が変わるのか、標識元素溶解法を用いて解析した。これらの充填過程の解析とX線透過像を基に欠陥発生を考察した結果、以下のような結論が得られた。

1. 両铸造方法の場合とも、直径1.5 mmあるいは2.0 mmと細いスプルーでは、キャビティに流入する際噴流となり、途中側壁に凝固層を作らないで、反対側壁まで達する場合がある。圧力铸造の場合、これは铸込み時に加えたアルゴン圧力が、この時期、キャビティ内部には全く作用しないことを意味する。

2. 隅角部にスプルーを付けた場合、両铸造方式とも咬合面部はF型で充填するが、脚部分は差圧铸造ではB型、遠心铸造ではF型で充填する。ただし、後者の場合でも、スプルーが太くなるとB型充填に近づいてくる。

3. 差圧铸造で確認されたように、1.5 mmのスプルーでは、キャビティ内の流れ途中で凝固する場合の他に、スプルー途中で凝固することによる、溶湯供給不十分という欠陥原因が推定された。これは従来ほとんど注目されてこなかった原因であり、結果として、铸込み不足、もしくは大きな球状内部欠陥が生じやすい。

4. 遠心铸造ではスプルー線の太さは2次的な因子で、U字形のように複雑なキャビティを充填するとき、遠心力および加速回転による力の作用方向とキャビティ形態を考慮して、適切な位置に適切な角度でスプルーを植立しないと、内部欠陥の軽減につながらないことが分かった。

5. 遠心铸造で回転軸が90度変わると、遠心力が同じ方向でも、湯流れに大きな影響があり、クラウンの場合のような立体的形状のキャビティ内の流れを検討するときは、留意すべきことが示唆された。この影響は回転数の増加率が非常に大きいときにのみ顕著となり、従来の遠心铸造では影響が小さい。

この論文の要旨は第27回日本歯科理工学会学術講演会(平成8年4月 横須賀)において発表した。

文 献

- 1) 末瀬一彦, 川添堯彬: チタン周辺技術と歯冠修復物への臨床応用, QDT別冊, クインテッセンス出版, 1993, 35-41
- 2) Herø H., Syverud M., Waarli M.: Mold filling and porosity in castings of titanium, *Dent Mater*, 9, 15-18, 1993
- 3) Low D., Best H., Mori T.: An experimental model for the assessment of titanium denture casting techniques, *Dent Mater J*, 13(1), 103-109, 1994
- 4) 井上義久: 鑄型の通気性がチタン鑄造に及ぼす影響, 歯材器 14(3), 302-312, 1995
- 5) 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
- 6) 尾崎康子, 草刈 玄, 宮川 修: チタン鑄造冠の内部欠陥について, 補綴誌, **40**(4), 738-748, 1996
- 7) 日野幹雄: 流体力学, 理工学基礎講座 16, 朝倉書店, 1979, 181-183
- 8) 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 2. 板状鑄型における湯流れと欠陥の関係, 歯材器 **10**(1), 77-96, 1991
- 9) 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
- 10) 岡村弘行: 横型遠心鑄造における床の湯流れ, 第2報 多数スプルー, 模型床鑄型における湯流れ, 流入量および鑄込時間について, 歯理工誌, **19**(48), 254-270, 1978