

一室加圧型チタン鋳造機に関する研究

第2報 鋳型通気性が鋳造欠陥に及ぼす影響

渡辺 孝一 大川 成剛 金谷 貢
中野 周二 宮川 修 小林 正義*

Study on the One Chamber Pressure Casting Machine for Titanium Part 2 Influence of the Mold Permeability on Casting Defects

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

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

Casting defects and titanium flow using a one-chamber pressure casting machine were observed by the transparent X-ray method and molten tracer element method, respectively. To clarify the relation between casting defects and filling types, three types of wax patterns were invested at one time. To estimate the influence of mold permeability, three types of investment which significantly differed in permeability were used. As a result, investments with high permeability cause many internal defects in thick plate castings and external defects on thin plate castings and mesh castings. These defects were closely related to the flow in the cavity. Low permeable investment caused few casting defects despite the cavity type.

キーワード：チタン, 加圧鋳造, 鋳造欠陥, 湯流れ, 通気性

一室加圧型チタン鋳造機について、欠陥の発生と鋳型内湯流れをX線透過法と標識元素溶解法とを用いて観察した。また湯流れと欠陥との関係を明らかにするため、形状の異なる3種のワックスパターンを同時に埋没して鋳込んだ。通気性の影響を調べるために、通気度が非常に異なる3種の埋没材を用いた。その結果、鋳型通気度が大きいと、厚いパターンでは内部に、薄いパターンやメッシュパターンでは外部に欠陥が発生しており、それぞれキャビティ内湯流れに関係していた。また、通気度の小さい埋没材を使用した場合、ほとんど欠陥が認められなかった。

緒 言

チタン溶湯にアルゴン圧力を作用させ鋳込むタイプの鋳造機は2方式に分けられ、従来から市販されている二室型と近年発売された一室型がある¹⁾。前者は鋳

型上面を加圧しながら同時に鋳型底面から吸引することで鋳型上下面に圧力差をつけており、差圧鋳造あるいは吸引加圧鋳造とも呼ばれている。後者は鋳型クリップルへ溶湯落下直後にリングレス鋳型全体に圧力が作用する機構であり、全方向加圧型とも呼ばれて

原稿受付 1995年8月4日、受理 1995年9月8日

*新潟大学歯学部歯科理工学講座（主任：宮川 修教授）（〒951 新潟市学校町通2-5274）

*新潟大学X線マイクロアナライザ室（室長：渡辺孝一助教授）（〒951 新潟市学校町通2-5274）

Dental Materials and Technology, School of Dentistry, Niigata University (Chief : Prof. Osamu MIYAKAWA) (5274, Gakkoucho-dori 2, Niigata 951)

*EMX Laboratory, Niigata University (Chief : Ass. Prof. Kouichi WATANABE) (5274, Gakkoucho-dori 2, Niigata 951)

る。いずれにおいても溶湯が铸造空洞（以下キャビティと記す）に铸造される真の驱动力は溶湯自体に作用する「正味の圧力差」にあり、これはつまり溶湯上面に作用する圧力とキャビティ内圧力の差である。この正味の圧力差は様々な因子により時間的に変化し、しかも一室型と二室型とで違いのあることが予想され、前報においてメーカー指定の埋没材を用い、一室型铸造機の铸造特性を二室型のそれと比較検討した²⁾。その結論の一つとして、铸造通気性が湯流れや各種铸造欠陥に対し非常に大きく影響していることが得られた。

加圧铸造機における铸造通気性の問題はチタン铸造の初期から検討の対象となっていた。二室型のチタン铸造においては、铸造の通気性が低い場合に内部欠陥が少なくなるという指摘があり、これは単に加圧だけを作用させただけの場合に近い状態で铸造されているためと推察されている³⁾。一室型の铸造機においては、メーカー指定の埋没材を用いて铸造の直径などを変化させメッシュパターンに铸造した場合、高い通気性の埋没材では直径増加とともに铸造率が向上し、低い通気性の埋没材では直径には影響されず、高く安定した铸造率の得られたことが報告されている⁴⁾。また同機種で1.0 mm や1.5 mm 厚さの板状キャビティに铸造した場合、外観は完全であるが、X線欠陥検査で大きな内部欠陥が認められている⁵⁾。いずれの報告においても、铸造通気性と欠陥との関係については現象を述べているだけであり、特に湯流れと生成欠陥の種類については言及しておらず、それらと铸造通気性の関係についても不明のままである。

この研究においては、通気性の違いがチタン溶湯の流れにどのように影響し、その結果各種铸造体にどのような種類の铸造欠陥が発生しやすいかを、湯流れのパターンが異なると推定される3つのキャビティに同時に铸造し、総合的に検討した。その際通気性の影響を明確にするため、すでに報告⁶⁾されている各種埋没材通気度のデータを参考にし、通気度の非常に異なる埋没材を採用して比較検討した。

実験材料および方法

1. ワックスパターン

ワックスパターンは、20×23 mm で厚さ1.4 mm の板状、20×23 mm で厚さ0.45 mm の板状、および既製の丸穴メッシュ(Grids round RN III; DENTAURUM) を25×25 mm に切ったものの3種を使用した。3種のパターンそれぞれに直径2.5 mm で長さ約6 mm のワックススプルーを取り付け、铸造機メーカー指定のクルシブルフォーマーに植立した(Fig. 1)。それぞれのスプルーのほぼ中間に直径0.3 mm の白金線、および0.2×0.2 mm の断面をもつパ

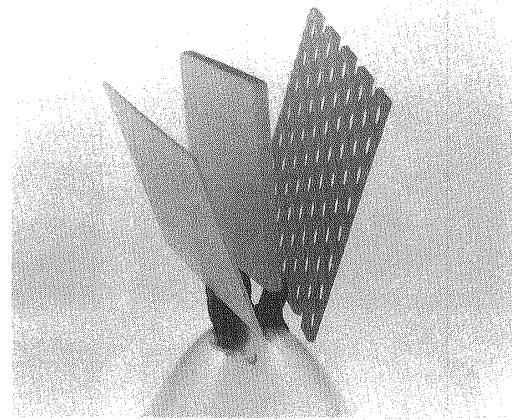


Fig. 1 Three types of wax pattern

ラジウム線を1 mm 程度離して挿入し、チタン溶湯の流れ観察用標識金属線とした⁷⁾。なお、スプルー線の太さは、前報²⁾と予備実験とを参考にし、メーカー指定の埋没材で常に欠陥が生じるような条件として選んだ。

2. 埋没・铸造

使用埋没材は、铸造機メーカー指定埋没材(Tイントベスト; ジーシー)、および2種類の他社埋没材(チタニウムベストII; オハラ)、(セレベストCB; セレック)である。前2者は内径50 mm、高さ70 mm の塩化ビニル製のリングに埋没し、硬化した後リングをはずした。またセレベストCBは、リングレスでは加熱処理でクラックが生じたため、内径58 mm 高さ70 mm の鉄製リングにセラミックリボンを一枚内張りして(実質的内径54 mm)埋没した。通気度を指定埋没材と比べると、チタニウムベストIIは約5倍、セレベストCBは約1/10である⁶⁾。各ワックスパターンは最も薄い铸造壁部分でも約7 mm 以上となるよう注意し、可及的に幾何学的条件が同じになるようにして埋没した。铸造の加熱処理は各埋没材メーカーの指示に従ったが、铸造時の铸造温度は各埋没材メーカーの指示に従ったが、铸造時の铸造温度は各埋没材メーカーの指示に従わらず、いずれも室温とした。铸造には一室型加圧铸造機(オートキャストHC-III; ジーシー)を用い、铸造機の操作はメーカー指示に従った。各条件とも繰り返し数は5回とした。取り出した铸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た。

3. X線欠陥検査

酸洗いの後、X線欠陥検査装置(MBR-1505 TV; 日立)により铸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 の条件で铸造体の厚さに応じて30、50または80秒間露出した。

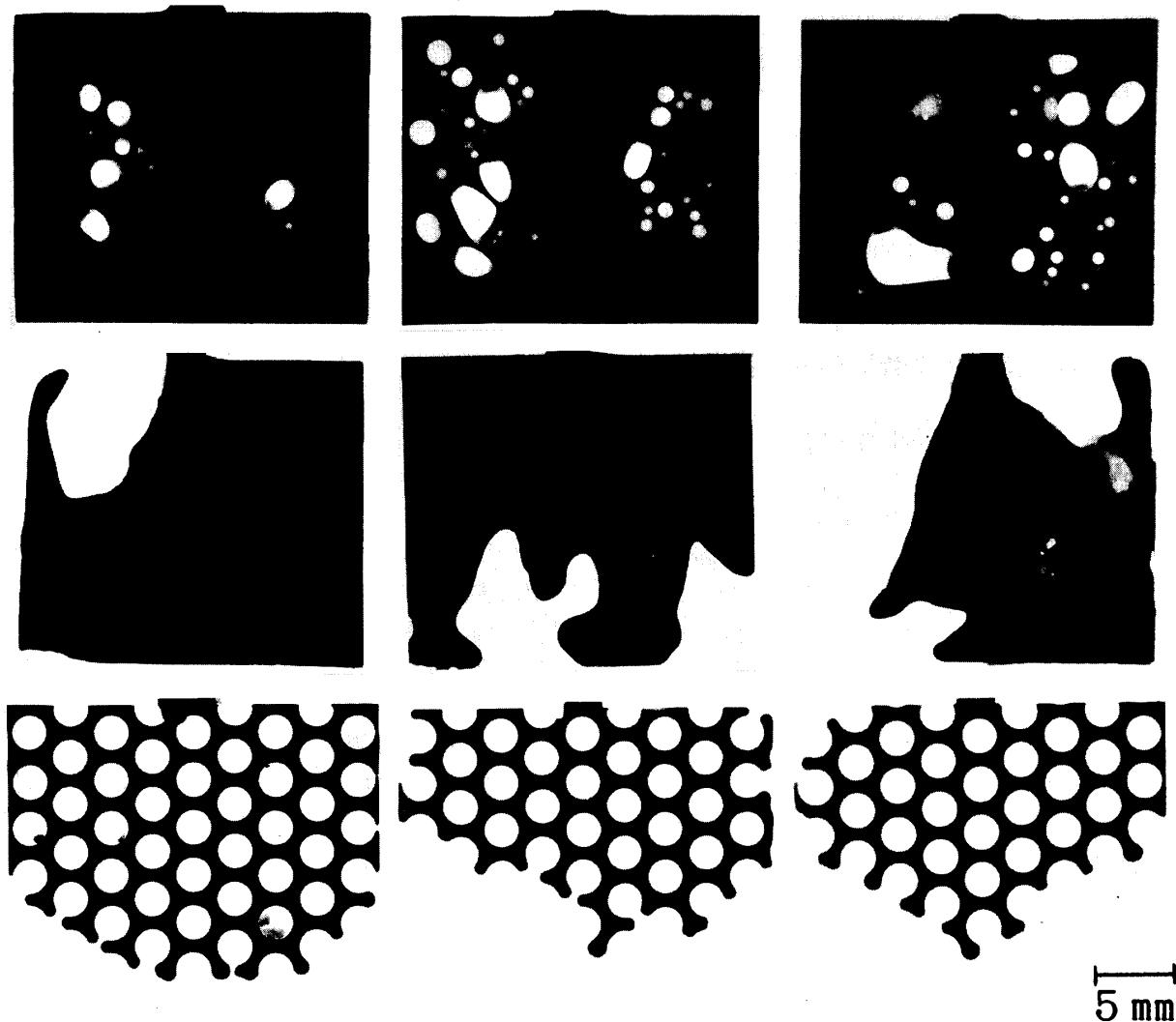


Fig. 2 X-ray radiographs of three type castings in the case of the investment with higher permeability; thick plate castings (up), thin plate castings (middle) and grids castings (bottom)

4. 標識元素の検出

元素分析はX線マイクロアナライザ(EMPA-8705;島津)のH IIシステムを用い, 20 kV, 0.5 μ Aの条件で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、明るい部分が高濃度部位である。板状鋳造体の元素分布像で辺縁部が低濃度の場合、形状が見分けにくくなるため、切り抜いて示している。

結 果

1. X線透過写真による検査

Fig. 2にT-インベストを用いた場合について、5回の鋳込みによって得られた鋳造体のうち、それぞれ代表的な3個について、X線透過写真を示した。この埋没材は通気度の大きい部類に属している⁶⁾。

上段は1.4 mm厚の鋳造体の場合を示し、内部にはチタン鋳造体特有の丸みを帶びた大小の欠陥が多数認

められ、これはF型⁹⁾で充満する場合の典型的な内部欠陥である。ただし二室型では大きな内部欠陥が渦の中心部分に局在していた¹⁰⁾のに対し、この鋳造機の場合、大きな欠陥でも鋳造体に広く分布しているのが特徴である。中段は0.45 mm厚さの鋳造体を示し、ほとんど内部欠陥は確認できないが、湯回り不良(外部欠陥)が必ず認められた。そしてその湯回り不良の部位は鋳造体によってさまざまであり、W型¹⁰⁾充満の特徴を示している。つまりこの型の充満では抵抗が大きいため湯流れの道筋がわずかなきっかけで変化し、湯回り不良個所はその偶然の流れパターンを敏感に反映している。下段にはメッシュ鋳造体の結果を示した。それぞれスプルーレと反対側に外部欠陥が発生しており、これは流入溶湯が常にスプルーレから遠ざかる方向に進む結果であり、B型⁹⁾充満の特徴である。

Fig. 3にチタニウムベストIIを用いた場合について、5回の鋳込みによって得られた鋳造体のうち、そ

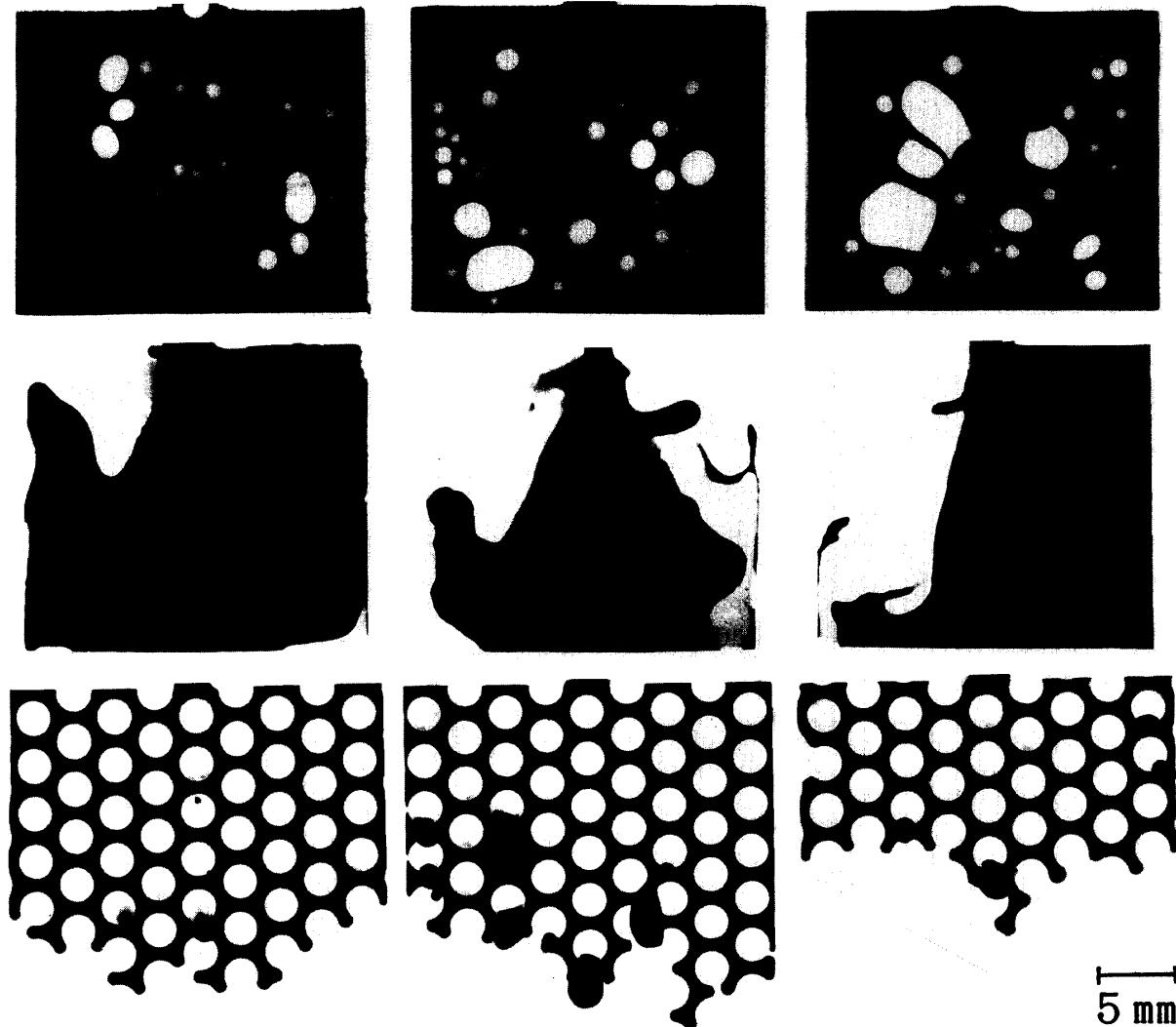


Fig. 3 X-ray radiographs of three type castings in the case of the investment with higher permeability; thick plate castings (up), thin plate castings (middle) and grids castings (bottom)

それぞれ代表的な3個について、X線透過写真を示した。この埋没材の通気度は報告のあった中で一番大きく、T-インベストの約5倍である⁶⁾。

欠陥発生の様子は全体として、T-インベストの場合とほとんど同じで、1.4 mm厚の鋳造体では、内部にチタン鋳造体特有の丸みを帯びた欠陥が非常に多数認められ、鋳造体全体に存在する点も酷似している。0.45 mm厚さの鋳造体では内部欠陥がほとんどなく、一方外部欠陥が必ず認められた。メッシュ鋳造体ではスプレーから離れた部位に湯回り不良が認められた。またメッシュ鋳造体の黒い丸はX線不透過な部分で、埋没時に付着した気泡にも溶湯が充満した結果である。この埋没材はFig. 2の埋没材と通気度が5倍も異なるにもかかわらず、欠陥の程度がほぼ同じであることから、通気性以外の因子、例えばチタン溶湯と鋳型壁との反応性および、ぬれ性など、定量的に評価しにくい因子も欠陥発生量に影響することが考えられ

る。

Fig. 4にセレベストCBを用いた場合について、5回の鋳込みによって得られた鋳造体のうち、それぞれ代表的な3個について、X線透過写真を示した。この埋没材はチタン鋳造用の中で通気度の最も小さい部類に属している⁶⁾。

これらの結果を見て分かるように、1.4 mm厚さの鋳造体では渦の中心付近と見られる部位で、非常に微細な丸い欠陥が認められるが、大きな欠陥は皆無である。0.45 mm厚さの鋳造体では外部欠陥は全くなく、わずかに小さく丸い内部欠陥が少数あるだけである。丸穴メッシュの鋳造体は外部的にも内部的にも全く欠陥が観察されなかった。つまりキャビティ充満型がF型、W型あるいはB型いずれであろうとも、通気度の小さい鋳型では非常に欠陥の少ない鋳造体が得られた。

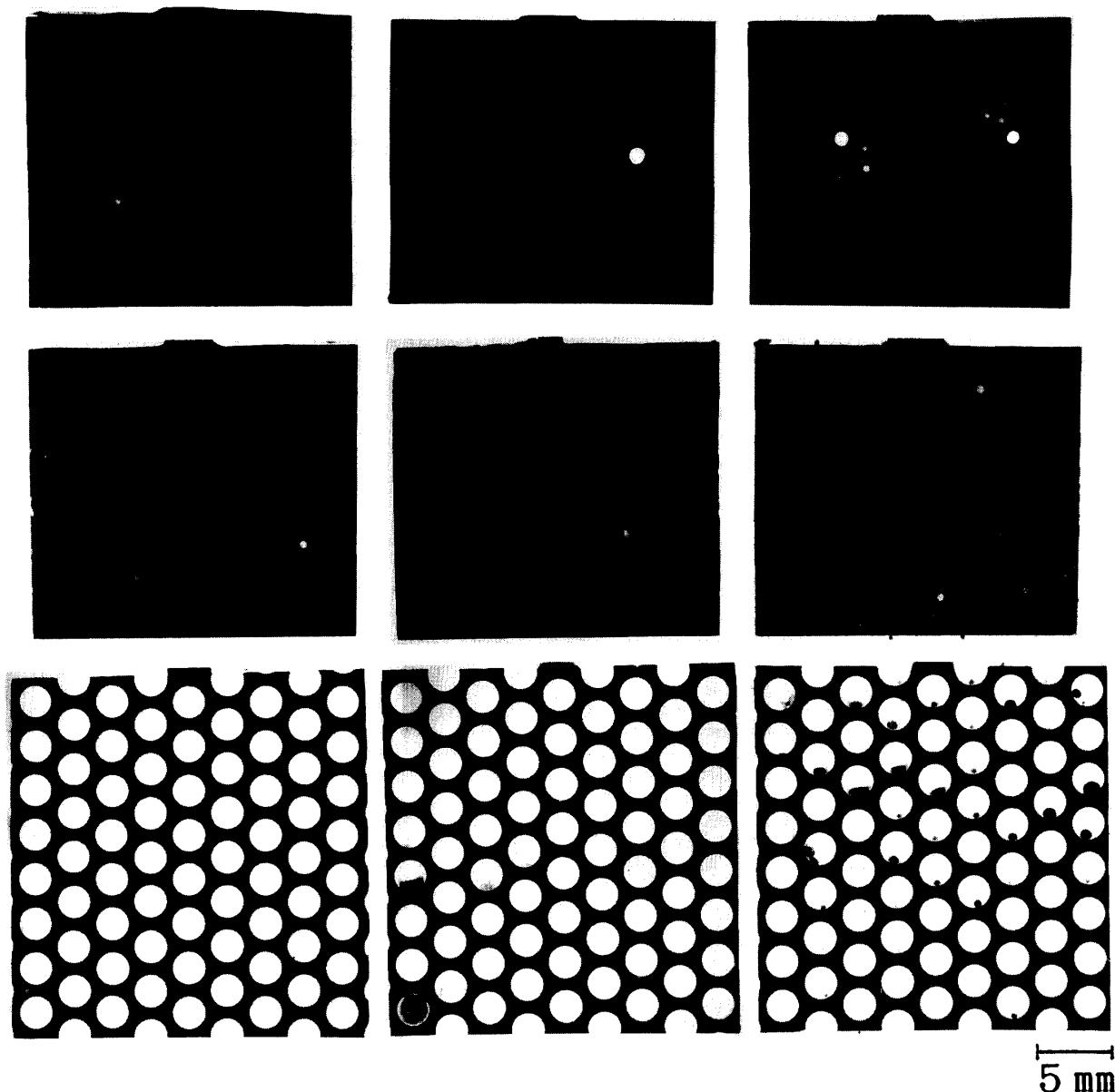


Fig. 4 X-ray radiographs of three type castings in the case of the investment with low permeability; thick plate castings (up), thin plate castings (middle) and grids castings (bottom)

2. 各種鋳造体の湯流れ観察

Fig. 5 に 1.4 mm 厚さで非常に多くの内部欠陥が発生した鋳造体 (Fig. 2 上段中央) 表面の Pd 分布を上に、ほとんど内部欠陥が認められなかった鋳造体の場合 (Fig. 4 上段左) を下に示した。両者とも Pd 高濃度の大きな梢円形の流れが認められ、層流で流れていることが推定される。欠陥の少ない鋳造体では渦の中心まで流れの道筋が確認でき、これは流れが乱されることなく凝固層が形成されたことを意味している。一方欠陥の多い鋳造体では、最も外側にある高濃度 Pd の流れだけが明瞭であるが、それ以後の道筋が不明で、これは速やかに凝固層が形成されなかつたことを意味している。つまり比較的初期に流入した溶湯が左右で一周した時点で、外部からのガスの侵入があり、

流れの乱されたことが推定される。

Fig. 6 に 0.45 mm 厚さの鋳造体湯流れの例として、Fig. 3 中段中央の鋳造体表面および 0.1 mm 研磨した面の Pd 分析結果を示した。この鋳造体の流れは典型的な W 型充満であり、溶湯の流入順序を図中に数字で表した。X 線透過写真と Pd 分析結果を比べると、鋳造体の外形が少し異なって見えるが、これは極端に薄い部分の存在するためである。表面分析の矢印で示した箇所は、表面凝固層だけが存在している非常に薄い部分で、X 線透過写真では白く見える部分である。0.1 mm 研磨後の分析結果から、研磨によって取り去られた部分 (右上) とまだ残っている部分 (右下) が存在し、凝固層の厚さの違いが分かる。

Fig. 7 はメッシュ鋳造体の元素分析結果で、鋳込み

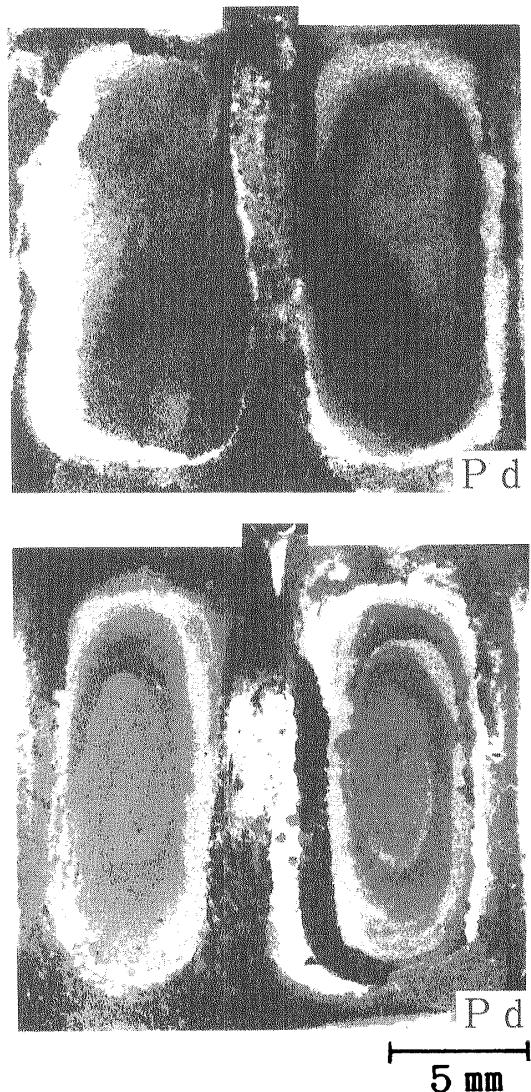


Fig. 5 Typical elemental maps of thick castings; the upper plate corresponding to the center one in Fig. 2, and the lower plate, the left one in Fig. 4

不足の大きい鋳造体 (Fig. 2 左下) を上に、まったく欠陥を発生しなかった鋳造体 (Fig. 4 左下) を下に、それぞれ 0.4 mm 厚さ、つまり厚さが約半分になるまで研磨した断面の Pd 分布を示した。いずれの場合でも標識元素が鋳造体の先の部分、つまりスプルーから遠い部分で比較的高濃度であり、しかも流入部位の近くでは丸穴の周囲に Pd 高濃度凝固層のあることから、比較的初期流入溶湯に標識元素がとけ込んでいることが分かり、流速の小さいことが推定される。またこの分布から、流入した溶湯が水面の波紋のようにスプルーを中心に同心円状に拡がって進むことが分かり、B 型充満の特徴をよく表している。つまり、温回りの良否は別とし、溶湯は同じような流れ方をしている。

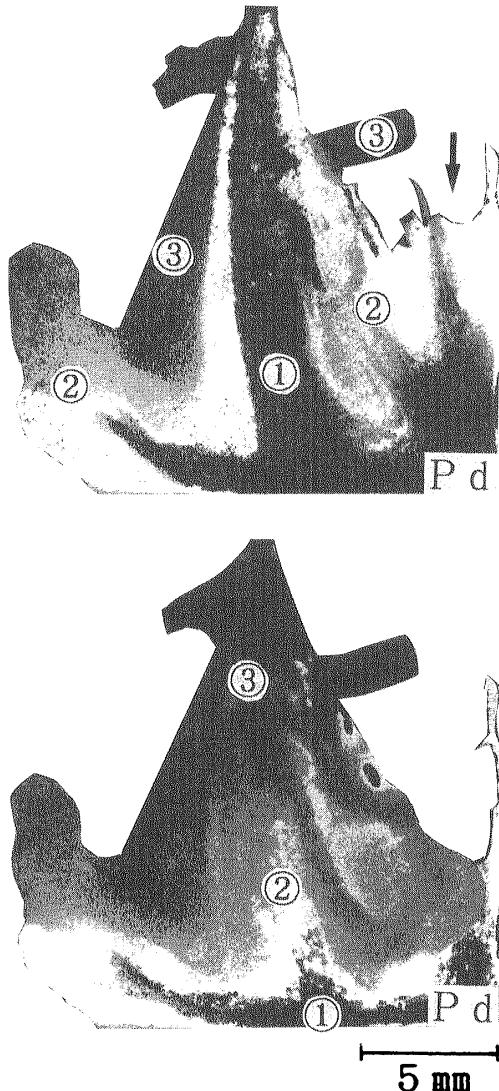


Fig. 6 Typical elemental maps of the thin plate of the center one in Fig. 3; outermost surface (up), the surface after grinding of 0.1 mm (bottom)

考 察

1. 一室型圧力鋳造機の鋳込み原理

通気度の大きい埋没材の時の欠陥検査 (Fig. 2, 3) と、通気度の小さい埋没材の時の欠陥検査 (Fig. 4) を比べて明らかのように、鋳型通気性が各種欠陥発生に及ぼす影響は非常に大きい。その理由を考察する際、鋳込み圧力の時間変化が重要と思われ、前報でも述べたがこの鋳造機の圧力変化を手順に従って簡単にまとめる。鋳型を鋳造機内にセットし、スタートさせると、いったんロータリー真空ポンプで鋳造機室内が減圧される。その後少しアルゴンが流入し、鋳造室は約 0.1 気圧に保たれ、同時にアークが点火しインゴットが加熱溶解される。この時点でのキャビティの圧力

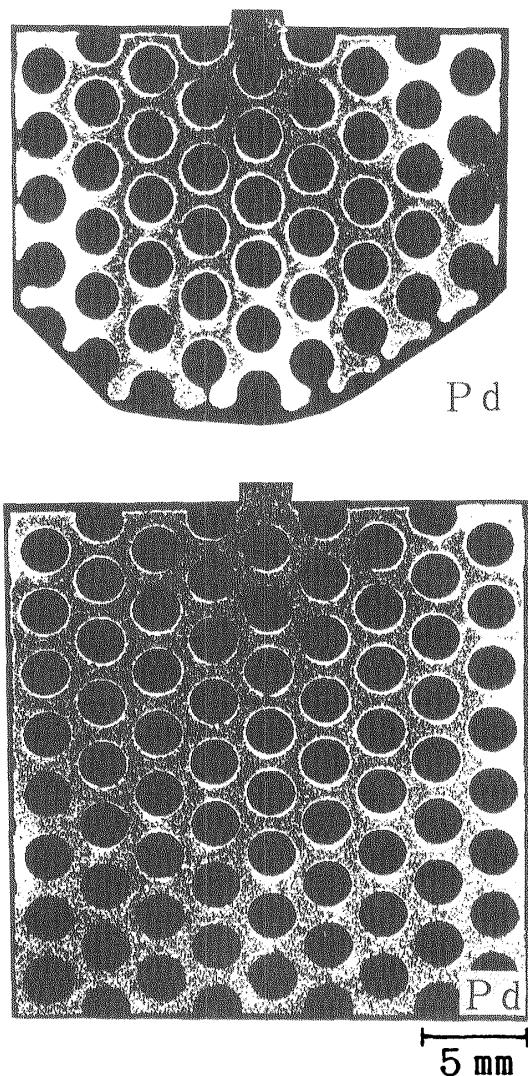


Fig. 7 Typical elemental maps of grids castings after grinding of 0.4 mm; the upper plate corresponding to the left one in Fig. 2, and the lower plate, the left one in Fig. 4

は0.1気圧である。キャストボタンを押すと銅ルツボが傾き、チタン溶湯が鋳型クルシブルに落下する。その後タンクからの高圧が鋳造室に作用する。つまり溶湯上面には直接高圧が作用し、キャビティ側からは0.1気圧しか作用していないため、この高圧が直接溶湯に作用する圧力差と考えてよい。鋳込み中の真の圧力は不明であるが、設定圧力に達する前に鋳込みが終了しているという報告もある¹¹⁾。

2. メッシュ鋳造体および薄い鋳造体の外部欠陥と鋳型通気性の関係

加圧鋳造を用いると、今回用いたようなメッシュキャビティ内では、B型の流れで溶湯が充満する。この場合の流れの特徴はスプレーから拡がるように進み、鋳込みが途中でストップすると、鋳造体にはスプレー

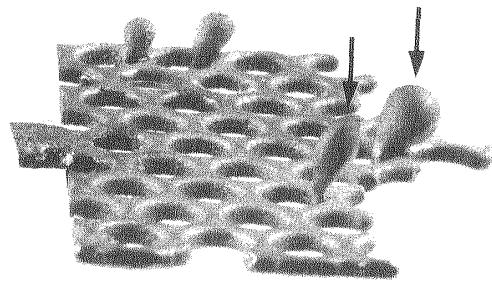


Fig. 8 Macroscopic view of the grid casting of the right one in Fig. 3

から離れた部位の鋳込み不足となって現れる。このため、鋳込み終了の瞬間まで一部鋳壁が露出している。

薄いキャビティの場合はW型充満し、初期の湯流れの凝固層によっても後の流れの進路が変わるために、最後に溶湯が満たす部位は偶然に支配される。つまり最後に湯が達する部位は不確定であり、どこに鋳込み不足が生じるかB型の充満ほどはっきりはしていない。

このようにメッシュキャビティと薄いキャビティは、場所は異なるが鋳込み不足が生じやすいという共通点があり、欠陥の発生原因を考える際メッシュキャビティを例にとる。鋳込み途中において、鋳型壁がガスを通しやすいと、鋳型外のガスは殻の生成されていないところ、つまりまだ溶湯が達していない鋳壁からキャビティ内に激しく侵入する。このためキャビティの溶湯未充満空間の圧力が上昇する。この空間の圧力上昇は外部から鋳壁を通してアルゴンが侵入してくるほかに、溶湯の充満に伴って空間体積が減少すること、およびチタン高温溶湯によるキャビティ内ガスの温度上昇などの原因が考えられる。しかしながら、後の2つの原因是通気度とは直接関係しないはずであり、Fig. 2とFig. 4から明らかなように、通気度の違いによってはっきりと湯回りに差が出たことは、鋳込み不足の第一の原因が鋳壁を通じて拡散してきたガス量によると結論される。

これを裏付ける鋳造体の接写写真をFig. 8に示す。これはFig. 3の右下の鋳造体を斜め上から見た写真であって、埋没時に付着したいくつかの気泡にも溶湯が充満している。すなわち、メッシュキャビティ空間の拡がりとは直角方向に流れ、しかもくびれた細い部分を通っており、非常に流れにくい部位に湯が充満していることが分かる。特に矢印で示した部分は、鋳造体の先端近傍に存在していることが注目される。これはメッシュキャビティの未充満の空間が、外部からのガスの侵入で圧力が高くなつたため、溶湯が先へ進めなくなり、その時点では唯一圧力の低い付着気泡部分に

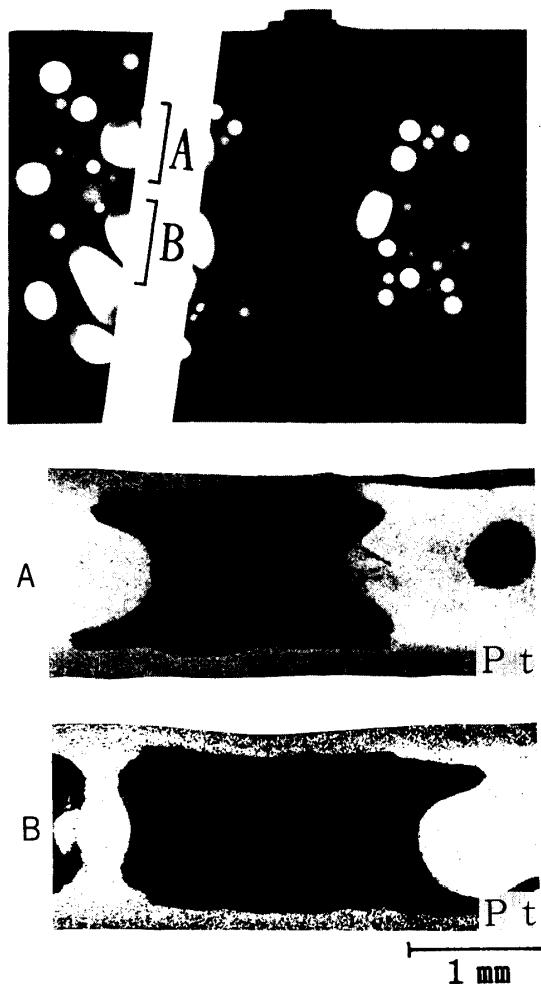


Fig. 9 Sectional analyses of the casting of the center one in Fig. 2

流入した結果と推定される。いいかえると、Fig. 2, Fig. 3 のメッシュパターン鋳込み不足の原因是、チタン溶湯が流れ途中で凝固したからではなく、溶湯に作用する正味の圧力差が無くなつたため、そこで停止した結果であると結論される。

薄いキャビティも、鋳込み不足となる原因是メッシュキャビティの場合と同じであるが、溶湯充满部位の順序は必ずしも定まつているとは限らず、鋳壁の露出している箇所も偶然に支配される。その結果キャビティ内圧力が高くなる場所も特定できず、鋳造体によって異なつた鋳込み不足の形態となる。そして Fig. 6 で示したように、キャビティ内での溶湯の流れ順序と侵入してきたガスの時間的な差で、凝固層しか形成されない部位が生じる場合もある。

3. 厚い鋳造体の内部欠陥と鋳型通気性の関係

溶湯が厚いキャビティ内に流れ込んで F 型の充满をすると、比較的早い時点では凝固層の殻が生成される。もし鋳型壁を通して外部のアルゴンがキャビティに拡散してくる前に殻が完成してしまうと、アルゴンはキャビティ内に入ることはできず、当然内部欠陥もほとんどできない。しかしながら、F 型充满でも殻が完成

する前にアルゴンが内側に拡散してくると、凝固層の形成されていない箇所からキャビティ内へ流入し、内部欠陥の原因となる。凝固層の殻を完成する時期が埋没材の種類によらず一定なら、鋳型通気度の大きいものほどキャビティに多くのガスが流入してしまう。これが通気度の大きい鋳型の場合、内部欠陥が多発する理由である。ただしキャビティに流入したガスによって、内部欠陥の発生する過程が大きく分けて 2 通りあると思われ、断面での欠陥形態を参考に考察する。

Fig. 9 に Fig. 5 の断面の分析結果を示した。上段写真は X 線透過写真を利用し、鋳造体切断箇所、および分析範囲を示している。下段の 2 枚に示したように、それぞれの表面に見られる約 0.1 mm の凝固層には Pt がほとんど含まれておらず、比較的初期に殻の形成されたことを示している。それより内側は全体に白く、ほとんど等濃度の Pt が含まれていることがわかる。そして黒い部分は欠陥部分である。A, B とも大きな欠陥は厚さ方向は凝固層により囲まれ、横方向は Pt 高濃度溶湯で囲まれている。しかもこの欠陥に向かって溶湯が凸になっていることから、ガスの侵入した空間部は移動せず、そこに後からの湯が空間を縮小する向きに流れた結果であると推定される。この種の内部欠損は X 線透過写真において、中間黒化度の境界を伴っているのが特徴である。一方 A の右側に見える丸い欠陥は、周囲が Pt 高濃度領域に囲まれているため、溶湯とともに移動している途中で凝固した結果と推定できる。X 線透過写真を見ると、成因の異なる内部欠陥が混ざって存在していることが分かる。

比較的通気度の大きい埋没材でも、溶湯の流入速度あるいは流入量が増加して凝固層の殻をすばやく完成すると、鋳型壁を拡散してきたアルゴンも殻の内部に進入できず内部欠陥が生じない。この 1 例として、直径が 3.2 mm と今回より太いスプールを用いた前報²⁾では、通気度大の埋没材を使用しても、内部欠陥がほとんど発生しない例が 5 個中 2 個あった。

以前報告¹⁰⁾した二室型の圧力鋳造機で F 型充满する場合、凝固層の殻はなるべく最後まで完成しないほうが望ましく、完成時期の遅い方が内部欠陥が少ないという結論であった。その理由としては、溶湯が流入し始める時点ではキャビティ内にはガスが多く残留しており、溶湯が充满しながらそのガスをキャビティ外へ排出する必要があったからである。一室型の加圧鋳造機では状況が全く逆であり、外部からのガスの侵入による欠陥を防ぐためには、できるだけ早く凝固層の殻を完成させたほうが欠陥が少なくなる。

なお、通気度の小さい鋳型では、キャビティ内にもともと存在していたガスによって欠陥を発生することも考えられるが、ガスの量自体が非常に少ないため、鋳込み時の圧力で実質的には非常に小さな体積とな

り、非常に小さな内部欠陥を生じるだけである (Fig. 4)。その意味で周囲からのガスの拡散量ができるだけ抑えるような埋没材、言い換えると通気度の小さい埋没材は内部欠陥と外部欠陥の双方を抑制する効果があり、非常に細いスプレーでさえ健全な鋳造体が得られる可能性がある。

結論

一室加圧型鋳造機において、通気性の違いがチタン溶湯の流れにどのように影響し、その結果どんな種類の鋳造欠陥が発生しやすいかを総合的に検討するため、通気度の非常に異なる埋没材を使用して鋳型を作製し、しかも充満タイプの異なると推定される3つのキャビティに同時に鋳込んで実験考察した。得られた主な結果は以下のようにまとめられる。

1. 通気度の大きな埋没材で鋳型を作製すると、鋳込み不足や内部欠陥が発生しやすい。欠陥の種類はキャビティの形態すなわち湯流れに密接に関係している。比較的厚いキャビティでは、大きな内部欠陥が発生しやすい。薄いキャビティの場合は鋳込み不足となりやすく、欠陥部位は湯流れによって変わり、定まっていない。メッシュキャビティの場合はスプレーから遠い部位に鋳込み不足が生じやすい。

2. それぞれのキャビティでの欠陥は、鋳込み室のアルゴンが鋳壁を通って拡散してくるという原因と考えられる。逆の見方をすれば、アルゴンが拡散しにくいようない埋没材を用いれば、大部分の欠陥を阻止することができる。

謝辞

本研究は平成6年度文部省科学研究費（一般研究B；20018766）の補助を受けて行われたことを付記

し、謝意を表します。

この論文の要旨は第25回日本歯科理工学会学術講演会（1995年4月 坂戸）において発表した。

文献

- 1) 小田 豊：鋳造システムの特徴とその評価, *DE*, 111, 11-20, 1994
- 2) 渡辺孝一, 大川成剛, 宮川 修, 中野周二, 小林正義：一室加圧型チタン鋳造機に関する研究 (1) 圧力の作用原理と鋳込み特性の関係, *歯材器*, 14(4), 378-386, 1995
- 3) 都賀谷紀宏, 堤 定美, 蔡上雅彦：チタンの鋳造欠陥, 三浦維四, 井田一夫編, チタンの歯科利用, 第一版, クインテッセンス, 1988, 84-93
- 4) 井上義久：通気性がチタン鋳造に及ぼす影響, *歯材器*, 14(3), 302-312, 1995
- 5) Takahashi J, Zhang JZ, Okazaki M : Effect of casting method on castability of pure Titanium, *Dent Mater J*, 12(2), 245-252, 1993
- 6) 都賀谷紀宏, 堤 定美, 谷 嘉明, 蔡上雅彦, 広島 開, 岩城重次, 大八木薰博, 島川周三：市販チタン用鋳型材の通気性, 第7回歯科チタン研究会講演抄録集, 11-12, 1994
- 7) 渡辺孝一, 大川成剛, 宮川 修, 中野周二, 塩川延洋, 小林正義：歯科精密鋳造法における「標識元素溶解法」を用いたチタン湯流れの研究 1. 流れの可視化の原理と単純な鋳造体への適用, *歯材器*, 9(4), 623-632, 1990
- 8) 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：メッシュ空洞内のチタン湯流れに及ぼすアルゴン置換の効果, *歯材器*, 11(5), 808-816, 1992
- 9) 渡辺誠司：高速カメラによる歯科精密鋳造の湯流れに関する研究 第1報, *歯理工誌*, 6(10), 37-50, 1965
- 10) 渡辺孝一, 大川成剛, 宮川 修, 中野周二, 塩川延洋, 小林正義：歯科精密鋳造法における「標識元素溶解法」を用いたチタン湯流れの研究 2. 板状鋳型における湯流れと欠陥の関係, *歯材器*, 10(1), 77-96, 1991
- 11) 大川成剛, 渡辺孝一, 中野周二, 宮川 修, 小林正義：チタン鋳込み時間の測定, 一室加圧型鋳造機の場合, *歯材器*, 14(特25), 136-137, 1995