原 著 論 文

熱膨張抑制埋没材を用いたときの鑄造冠の 変形に関する研究

根住 正博

Deformation of Crowns Cast in Thermal Expansion Inhibited Investment

Masahiro Nezumi

Abstract : Experimentally thermal expansion inhibited investment was produced to discuss a problem, the compensation of metal casting shrinkage is to be dependent upon setting expansion. Using the various concentration of colloidal silica solution as mixing liquid, idealized full cast crowns were made, the each size were measured and the following results were obtained.

On this investment :

1. As the more concentration of silica, the more expansion appeared.
2. The shrinkage in cooling is slight.
3. The expansion in ringless method is greater than that of ring method.

On the deformation of crowns :

1. In the external width, both ring and ringless method in 10% and 20% showed shrinkage, the more concentration, expansive tendency appeared. The inhibition of expansion appeared in 40% by ring method. The expansion of cervical showed larger than occlusal.

2. Internal width in 10% appeared shrinkage by both methods, they showed more expansion, increasing of concentration. The internal tendency appeared that occlusal was greater than cervical. The expansion of internal showed greater than external.

3. Despite of methods the more expansion appeared, increasing concentration. The more expansion appeared in the internal height than in external.

The mention above following conclusion were obtained.

It was cleared that the various deformation of crowns appeared due to the setting expansion of investment alone. Accordingly it was considered that the deformation occur in the stage of setting expansion before thermal stage in the present dental casting procedure. It can be said that the setting expansion is the great factor of the deformation in cast crowns.

Key words : investment, setting expansion, cast crowns, deformation

I. 緒 言

インレー・クラウン・ブリッジ・鑄造床などに代表される歯科分野における鑄造修復物は、近年ますますその精密化が要求されるようになってきた。

歯科界における鑄造法は、Coleman¹⁾ 以来ロストワックス法による埋没材の硬化時の膨張や熱膨張を利用して金属の鑄造収縮を補う方法がとられてきた。その後、多くの研究者によって²⁻¹⁰⁾、鑄造技術や使用材料の改良・開発が行われた結果、鑄造精度も大きく向上し、臨床的に十分通用し得る鑄造体が得られるようになってきた。しかし一方では、鑄造体をさらに詳細に研究した結果¹¹⁻¹⁶⁾、厚さを含む鑄造体各部の変形が指摘されるようになり、作製した鑄造体が蠟型と同形・同大でないことも明らかにされてきた。これらの変形の原因について、最近では埋没材の硬化時膨張の異方性が注目されるようになり¹⁷⁻²⁵⁾、なかでも吸水膨張が鑄型をひずませ、変形を伴った鑄造体を作る原因となっていることが明らかにされた^{13,15,26-28)}。また、Junner ら²⁴⁾は埋没時に用いるリングの材料を変えて硬化時膨張を測定し、リングの有無にかかわらず縦方向と横方向の膨張量に有意の差がみられることを、Jørgensen ら¹⁰⁾は鑄造用合金の収縮を補償するために鑄型材の硬化時膨張を利用することは精度的観点から好ましくないことを報告している。一方、近年になって、鑄造収縮の大きな歯科用卑金属合金が応用されるようになり、その補償には熱膨張だけでなく硬化時膨張にも依拠して、埋没材のさらに大きな膨張が要求されていることも事実である。

著者の所属する講座においても、このような金属の鑄造収縮を補償するための埋没材の膨張について、硬化時膨張のみに依拠するべきか、熱膨張のみによるべきか、あるいは従来と同様にその両者を利用すべきかについて1980年以来検討を加えてきた。まず筆本¹³⁾は、硬化時にも加熱時にも膨張しない無膨張埋没材を試作し、これを用いて作製した鑄造冠は測定部位に関係なく、蠟型とほぼ相似形的な寸法変化をすることを明らかにした。次の

で小正¹⁵⁾は、硬化時膨張抑制埋没材を試作し、熱膨張のみで金属の鑄造収縮を補償すると、変形の少ない適合性の良い鑄造冠が得られることを報告した。

そこで今回著者は、硬化時の膨張のみで金属の鑄造収縮を補償することに着目し、次の2つの実験からその可否を検討することにした。まず実験1として、硬化時膨張のみで熱膨張を極力小さくし、しかもリングレス法でも鑄造操作に耐え得るリン酸塩系の熱膨張抑制埋没材を試作し、練和液として用いるコロイダルシリカ溶液の濃度を变化させたときの鑄型材としての諸性質を測定した。次に、実験2として、試作した熱膨張抑制埋没材を用い、各種濃度のコロイダルシリカ溶液で硬化膨張量を変化させて作製した鑄造冠各部の寸法変化を検討した。なお、これらの対照としては筆本¹³⁾の無膨張埋没材による鑄造冠を用いた。

II. 実験 1. 熱膨張抑制埋没材の試作

1. 実験材料および実験方法

1) 材料とその配合比

熱膨張抑制埋没材の材料は、熱膨張が非常に小さい無膨張埋没材の耐火材と結合材を主成分とし、その配合比も無膨張埋没材の配合比を基準とした。すなわち、耐火材として珪酸ジルコニウム ($ZrSiO_4$)、クリストバライト (SiO_2)、熔融石英 (SiO_2) を、結合材として第1リン酸アンモニウム ($NH_4H_2PO_4$) と酸化マグネシウム (MgO) を用いた。無膨張埋没材と熱膨張抑制埋没材の配合比を表1に示す。

2) 試料の練和

練和液には硬化時膨張が大きく現れるコロイダルシリカ溶液を用い、10, 20, 30, 40% の4種類の濃度について実験した。混液比はいずれも埋没材 100 g に対して 16 cc 一定とし、練和は、15 秒間の手練和ののち、定格回転数 120 rpm の真空練和機 (而至歯科工業社製、バキュームミキサー HM-I 型) を用いて 60 秒間の機械練和を行った。

表 1 使用埋没材の材料とその配合比

Raw Material	ZrSiO ₄	SiO ₂ (Cristobalite)	SiO ₂ (Fused Quartz)	NH ₄ H ₂ PO ₄	MgO
N.E.	30	35	15	10	10
T.E.	40	20	20	10	10

N.E.: Non-Expansion Investment

T.E.: Thermal Expansion Inhibited Investment

(Wt %)

図 1 硬化膨張測定用半円形トレー

3) 硬化時間の測定

測定は JIS 規格凝固時間試験に従い、内径 25 mm、高さ 30 mm のゴムリングを乾燥したガラス板上に置き、練和した試料をリング内へ注入したのち、重さ 300 g、直径 2 mm のヴァッカー針を用い、練和開始から試料中に 1 mm 入るまでの時間を硬化時間とした。

4) 硬化時膨張と熱膨張の測定

硬化時膨張は、筆本¹³⁾が考案した硬化膨張測定用半円形トレー（図 1）を用いて試料練和開始から 2 時間測定した。この測定装置は、試料の自由な膨張を測定・記録する目的で緩衝材が入るスペースを設けてあり、同時に同一試料による熱膨張測定が可能のように寸法を定めている。熱膨張は硬化時膨張を計測したのち、同一試料を直ちに熱膨張測定装置にセットし、昇温速度 5°C/min で 900°C まで昇温させて計測し、その後、電気炉を開放して 200°C まで冷却して収縮量を測定した。なお、硬化時膨張と熱膨張の総和をトータル膨張とした。また、緩衝材には、実験 2 の鑄造冠作製時に使用するのと同じ、厚さ 2 mm のシリコーンラバー（而至歯科工業社製）と厚さ 1 mm のカオウル（イソライト社製）の 2 種類を用いた。

5) 圧縮強さの測定

圧縮強さの測定は JIS 規格破砕抗力試験に従った。すなわち、内径 20 mm、高さ 30 mm の金属円筒割型に練和した試料を注入し、硬化後、割型から抜取って室温中に保存して測定試料とした。測定は練和開始 24 時間後の乾燥強度、および練和開始 1 時間後に電気炉に入れ、昇温速度 5°C/min で 900°C まで昇温し、30 分間係留したのち室温まで放冷した焼成強度について行った。測定にはオートグラフ（島津製作所社製 AG-5000 A）を用い、クロスヘッドスピード 10 mm/min で行った。

図 2 無膨張埋没材を各コロイダルシリカ溶液で練和したときの硬化膨張とトータル膨張

2. 実験結果ならびに考察

熱膨張抑制埋没材の試作には、加熱時に熱膨張がほとんど現れない無膨張埋没材の耐火材と結合材を主成分として使用した。しかし、無膨張埋没材は水で練和するため、硬化時膨張も現れない。一方、リン酸塩系埋没材をコロイダルシリカ溶液で練和すると、硬化時に大きく膨張することや、コロイダルシリカ溶液の濃度を変化させると埋没材の膨張量を調節できることはすでに知られている^{29,30)}。そこで今回の実験では、まずリン酸塩系埋没材である無膨張埋没材を濃度 10, 20, 30, 40% の 4 種類のコロイダルシリカ溶液で練和してみることにした。なお、混液比は 16 cc 一定とした。その結果を図 2 に示す。グラフの縦軸には膨張量の寸法変化率を、横軸には練和液のコロイダルシリカ溶液の濃度を表している。硬化時膨張・トータル膨張ともにコロイダルシリカ溶液濃度が増加するに従って大きくなる傾向が認められた。また、濃度 10% では硬化時膨張とトータル膨張がほぼ等しい値を示し、ほとんど熱膨張は示さなかった。しかし、濃度が 20% から 40% と増すに従ってトータル膨張が硬化時膨張より大きくなり、熱膨張が現れる結果となった。

水で練和すると硬化時膨張も熱膨張も現れなかった無膨張埋没材が、コロイダルシリカ溶液で練和すると膨張が現れた原因は、硬化時膨張についてはコロイダルシリカ溶液中のシリカ粒子の存在によって保水能を有するゲルが生成され、このゲルが $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の結晶生成に対し吸水膨張として働き、大きな柱状結晶を形成する結果であるといわれている³¹⁻³³⁾。さらにシリカ濃度が増加すると存在するシリカ粒子の充填密度が大きくなるため、より大きな膨張が得られることになる。

一方、熱膨張については、加熱によって耐火材の粒子が互いにぶつかりあいつつ膨張するとき、その粒子間にシリカ粒子が存在すると、シリカ粒子の介在によって水

表 2 試作熱膨張抑制埋没材の物理的性質

Liquid	L/P	Setting Time (min)	Compressive Strength (kg/cm ²)	
			24 hours	Heating
10	0.16	13.5	235	92
Colloidal 20	0.16	12.4	299	195
silica 30	0.16	11.6	389	227
(%) 40	0.16	10.7	506	365

Liquid	Expansion (%)			
	Silicone rubber		Kaowool liner	
	Setting (2 hours)	Total (900°C)	Setting (2 hours)	Total (900°C)
10	0.58	0.38	0.29	0.14
Colloidal 20	1.63	1.52	1.27	1.17
silica 30	2.64	2.64	2.13	2.13
(%) 40	3.07	3.11	2.64	2.74

で練和したときよりも大きな体積の増加がみられ、結果として熱膨張として現れたと思われる。

また、コロイダルシリカ溶液濃度が増すに従って熱膨張が大きく現れたのは、耐火材の粒子間に存在するシリカ粒子の密度が大きくなるため、および、筆本が無膨張埋没材の試作にあたって、230~350°C 付近の加熱時にみられるリン酸塩系埋没材特有の結晶水の脱水ならびにアンモニアガスの放出による大きな収縮を補うため、耐火材中のクリストパライトの添加量を35%と大きくすることによってその収縮を補償し、熱膨張を0にしているためと考えられる。そこで本実験では、クリストパライトの添加量を減らすことによって熱膨張を抑制することが必要であり、筆本の推定値からその量は20%が適当であると考えた(表1)。

次に、試作熱膨張抑制埋没材の諸性質について述べる(表2)。

硬化時間はコロイダルシリカ溶液の濃度に影響を受け、コロイダルシリカ溶液の濃度が増すほど短くなった。この硬化時間は鑄型がある程度の強さになるまでの時間であり、コロイダルシリカ溶液の濃度が増加するに従って早期に、強度が大きくなる結果、短くなったと考えられる。

圧縮強度は、乾燥強度 235~506 kg/cm²、焼成強度 92~365 kg/cm² と、シリカ濃度が増加するに従って大きくなる傾向がみうけられたが、いずれも市販埋没材の2倍以上の強度を有していた。これらの強度はリングレス法による鑄造操作に十分耐え得るものである。

次に、試作熱膨張抑制埋没材の硬化時膨張と熱膨張を

測定した。なお、緩衝材は実験2の鑄造冠作製時に使用するのと同じ2mm厚さのシリコンラバーと、1mm厚さのカオウールを用いた。図3は緩衝材としてシリコンラバーを用いた時の、図4はカオウールを使用した時の膨張曲線で、図5、6にはそれぞれの硬化時膨張とトータル膨張の実験結果を示した。図から明らかなように硬化時膨張・トータル膨張ともにコロイダルシリカ濃度が増加するに従って、緩衝材の種類に関係なく大きく膨張する傾向が認められた。また、図3、4の膨張曲線から明らかなように、この埋没材の900°C加熱後の冷却収縮はこれまでの市販埋没材よりも小さい。これは従来の市販埋没材では加熱時に膨張する耐火材の量が多く、冷却時にはその膨張分だけ収縮するのに対し、硬化時に大きく膨張する本埋没材では冷却時の収縮は小さく、大きな膨張が残るのが特徴である。特にシリカ濃度30、40%の場合は著明である。そして、図5、6の結果からも明らかなように、いずれの緩衝材を用いても硬化時膨張とトータル膨張がほぼ等しい値を示し、熱膨張がよく抑制されていた。しかし、コロイダルシリカ濃度が10%と20%のものでは、硬化時膨張がトータル膨張よりもわずかに大きく現れた。これは練和液中の分散媒としてのコロイダルシリカの濃度が少なすぎるために、加熱時に結合材の収縮が現れたためである。

一方、膨張の程度はいずれのシリカ濃度においても、シリコンラバーを用いた方がカオウールを使用したものよりも大きい値を示した。これは、埋没材の硬化時膨張発現直後からの膨張に対する緩衝材のクッション効果の差が影響しているのではないかと考えられる。

図 3 熱膨張抑制埋没材を各コロイダルシリカ溶液で練和したときの膨張曲線 (緩衝材にシリコンラバーを用いた場合)

図 4 熱膨張抑制埋没材を各コロイダルシリカ溶液で練和したときの膨張曲線 (緩衝材にカウールを用いた場合)

そこで、シリコンラバーとカウールの圧縮ひずみ量を知る目的で、両者の圧縮試験を行った。すなわち、厚さ 2 mm のシリコンラバーと同じ厚さのカウール、および本実験に使用した厚さ 1 mm のカウールを、おのおの 5 cm 平方の試験片とし、圧縮試験機 (島津製作所製オートグラフ AG-5000 A) を用いてクロスヘッドスピード 1.0 mm/min で連続的に加重し、その歪量

図 5 熱膨張抑制埋没材の硬化膨張とトータル膨張 (緩衝材にシリコンラバーを用いた場合)

図 6 熱膨張抑制埋没材の硬化膨張とトータル膨張 (緩衝材にカウールを用いた場合)

を求めた。図 7 は各試料の 10 mm 平方あたりの加重と歪量の関係を示している。厚さ 2 mm のシリコンラバーでは、0.5 kg 加重時に 0.83 mm、1 kg で 1.13 mm、1.5 kg で 1.28 mm と加重量が増加するに従って歪量も増加する傾向が認められた。厚さ 2 mm のカウールでは歪量はシリコンラバーと同じように加重量が増加するに従って増す傾向はみられるがその程度は小さく、シリコンラバーの方がカウールよりも緩衝能力のあることが明らかとなった。また、本実験に用いた 1 mm 厚さのカウールでは、さらに歪量が少なく、緩衝能力が劣ることが推察される。このことから前述の実験の結果が、緩衝材の緩衝能力の差によって生じたことが明らかとなった。

以上の結果から、試作した熱膨張抑制埋没材は練和液のコロイダルシリカ溶液の濃度を変化させれば硬化膨張量を任意に調節が可能で、最高 3% 程度の硬化時膨張を得ることができる。また、強度も大きいためリングレス鑄造にも適しており、鑄造収縮の大きな金属でも十分に補償することが可能と思われる。そこで次に、この熱膨張抑制埋没材を用いて作製した鑄造冠の変形の様相につ

図 7 緩衝材の圧縮歪量

図 8 金属原型

いて検討することにした。

III. 実験 2. 鑄造冠の変形について

1. 実験材料および実験方法

1) 金属原型

本実験に使用した金属原型は、全部鑄造冠の支台歯形態をモデル化したものである(図8)。支台歯軸面部は臨床的支台歯形態に近い1/10テーパとし、歯頸部形態は測定のため都合上、幅約1.0mmのショルダータイプとした。また、金属原型と蠟型の位置決め、ならびに後述の鑄造冠寸法測定に必要な基準線を円周90°ごとに4カ所設けた。なお、同一規格の蠟型を採得する目的で外枠も同時に作製し、金属原型を外枠内にはめ込んで蠟型を採得した。

2) 蠟型の作製

蠟型の作製は、鑄造用ワックス(而至歯科工業社製グリーンインレーワックス, Batch No. 221141)を用いて軟化圧接法で行い、油圧プレス15 kg/cm²の加重下で24時間保持したのち、金属原型から撤去して埋没操作に移

図 9 蠟型の埋没位置

った。なお、金属原型に印記してある基準線に沿って、鑄造冠の寸法測定のための基準線を蠟型に印記した。また、蠟型咬合面中央部には、蠟型の撤去時に生じる陰圧を防ぐ目的で約0.8mmの孔をあけ、同部は蠟型を撤去した後にはスプルーを植立して閉鎖した。

3) 埋没

蠟型は図9に示すように、咬合面中央部に直径2.0mmの中空スプルー線(大栄歯科産業社製)を植立し、蠟型がリング中央に位置するように埋没した。

実験に用いた埋没材は、実験1で試作した熱膨張抑制埋没材で、対照として筆本が試作した無膨張埋没材を使用した。埋没時の諸条件は表3に示す通りで、熱膨張抑制埋没材では、内径36mm、高さ50mm、厚さ2mmのシリコンラバーリングを補強紙で加强したリングレス法と、内径40mm、高さ50mmの鉄リングに厚さ1mmのカオウールを1枚ライニングしたリング法の2種類とした。また、熱膨張抑制埋没材の練和液にはコロイダルシリカ溶液を用い、10, 20, 30, 40%の4種類の濃度について実験を行った。一方、対照とした無膨張埋没材はリングレス法とし、練和液は水を使用した。なお、練和は実験1と同じ15秒間の手練和ののち、60秒間の真空機械練和で行い、埋没操作に移った。

4) 鑄造

鑄型は、埋没完了から2時間室温中に放置したのち、自動昇温係留装置付電気炉(NEY社製、NEY-MATIC 202-AT型)を使用し、約100分で700°Cまで昇温させ、30分係留したのち、鑄造操作に移った。

鑄造は、Kメタル(而至歯科工業社製)10gを1回量として用い、遠心鑄造機(モリタ社製、CM-1)を使用して、約25秒間で鑄込みまでを完了した。鑄造冠は、鑄型を室温まで放冷したのち取り出し、超音波洗浄器で15分間洗浄して測定に供した。なお、鑄造冠は各実験条件

表 3 使用埋没材とその埋没条件

Material		L/P (W/P)	Mixing Time (sec)	Method
Powder	Liquid		Hand + Mecha.	
T.E.	Colloidal silica (%)	10	15+60	Ringless (Silicone rubber)
		20		
		30		Ring (Kaowool liner)
		40		
N.E.	Water	0.16	15+60	Ringless (Silicone rubber)

図 10 鑄造冠の測定部位

について 5 個ずつ作製した。

5) 測定方法

鑄造冠の寸法測定には、1/1,000 mm 精度を有する万能工具顕微鏡（東京光学社製、トプコン TUM 200 型）を用い、測定台に軟性ワックスをおいて鑄造冠を固定し、水準器で平行出しをしたのち倍率 30 倍で観察し、デジタルリニアスケールカウンター（三豊社製）で読み取った。図 10 に鑄造冠の測定部位を示す。測定部位は、横方向として咬合面部の外側幅径 Oo-Oo'、歯頸部の外側幅径 Co-Co' と、咬合面部内側幅径 Oi-Oi'、歯頸部内側幅径 Ci-Ci' の 4 か所について、縦方向として外側高径 Oo-Co と、内側高径 Oi-Ci' の 2 か所についてそれぞれ測定した。また、測定点は蠟型上に印記した基準線に沿って、横方向では X 軸とそれに直交する Y 軸の 2 か所について、縦方向ではそれぞれ 4 か所について実測し、その平均値を測定値とした。なお、実験成績は、まず蠟型を鑄造冠の測定部位に準じて実測し、その平均値を原寸とし、鑄造冠との寸法変化率として求めた。

2. 実験結果

1) 熱膨張抑制埋没材を用いて作製した鑄造冠の横方向の寸法変化について

(1) 咬合面部外側幅径 (図 11)

図の縦軸は寸法変化率で、+は原寸に対する鑄造冠の膨張、-は収縮を表している。横軸は各シリカ濃度で作

図 11 熱膨張抑制埋没材を用いたときの咬合面部外側幅径での寸法変化率

製した鑄造冠外側幅径の、図の左側はリングレス法、右側はリング法の実験結果である。

リングレス法での咬合面部外側幅径の寸法変化率は、シリカ濃度 10% では -0.89%、20% では -0.68% といずれも収縮を、シリカ濃度 30% では 0.55% の、40% では 1.22% の膨張を示し、シリカ濃度が増すに従って咬合面部外側幅径は大きくなった。

一方、リング法での咬合面部外側幅径の寸法変化率は、シリカ濃度 10% では -0.86%、20% では -0.67% と収縮を示し、30% と 40% では、いずれも膨張を示したが、その差は小さく、30% で 0.41%、40% では 0.55% であった。

埋没法による寸法変化率の差は、シリカ濃度 10、20、30% ではそれほどみられないが、シリカ濃度 40% ではリング法がリングレス法の約半分の値であった。これはリング壁によって埋没材の膨張が抑制されたためと考えられる。

(2) 歯頸部外側幅径 (図 12)

リングレス法での歯頸部外側幅径の寸法変化率は、練和液のシリカ濃度 10% では -0.79%、20% では -0.29% の収縮を、また、シリカ濃度 30% では 1.18%、40% では 1.53% の膨張を示し、咬合面部と同様にシリカ濃

図 12 熱膨張抑制埋没材を用いたときの歯頸部外側幅径での寸法変化率

図 14 熱膨張抑制埋没材を用いたときの歯頸部内側幅径での寸法変化率

図 13 熱膨張抑制埋没材を用いたときの咬合面内側幅径での寸法変化率

度が増すほど膨張が大きくなる傾向がみられた。

リング法での歯頸部外側幅径の寸法変化率は、シリカ濃度 10% では -0.65% の収縮を示したが、20% ではほぼ原寸に近い -0.09% の値であった。また、シリカ濃度 30% と 40% ではいずれも膨張を示したが、咬合面部的結果と同様にその差は小さかった。

埋没方法による差は、咬合面外側幅径と同様に、リング法のシリカ濃度 40% において膨張の抑制が認められ、リングレス法よりも膨張が小さかった。

一方、外側部の咬合面と歯頸部の寸法変化率を比較した場合、いずれの埋没方法でもシリカ濃度に関係なく鑄造冠の軸面外側は、咬合面よりも歯頸部での膨張が大きく現れる結果となった。

(3) 咬合面内側幅径 (図 13)

リングレス法での咬合面内側幅径の寸法変化率は、練和液のシリカ濃度 10% では -0.89% の収縮を示し、咬合面外側幅径と同じ値となった。しかし、シリカ濃度 20% では 0.37% の膨張を示し、咬合面外側幅径が収縮を示したのとは異なった結果となった。さらに、シリ

カ濃度が 30, 40% と増すに従って 2.20, 3.08% と非常に大きく膨張した。

リング法での咬合面内側幅径も、リングレス法と同様の傾向を示し、シリカ濃度 10% では収縮しているものの、20% で膨張を示し、シリカ濃度の増加に従って膨張の程度は大きくなった。これらの値はリングレス法と同様に咬合面外側幅径よりも大きかった。また、シリカ濃度 40% での外側幅径にみられた膨張の抑制は内側部では生じていなかった。

一方、埋没方法による差はシリカ濃度 10% でわずかに認められたものの、その他のシリカ濃度ではほとんど認められず、ほぼ均等な膨張の傾向を示していた。

(4) 歯頸部内側幅径 (図 14)

リングレス法での歯頸部内側幅径の寸法変化率は、練和液のシリカ濃度 10% では歯頸部外側幅径とほぼ同様の -0.81% の値を示した。20% では歯頸部外側幅径が収縮を示したのに対し、原寸に近い 0.08% の値を示し、咬合面内側幅径と同様の傾向であった。さらに、30, 40% での膨張は、歯頸部外側幅径よりも大きかったが、咬合面内側幅径よりは少なく、その差も小さかった。

リング法でも、いずれのシリカ濃度においてもリングレス法とほぼ同様の傾向を示した。

また、埋没方法による差は咬合面内側幅径と同様に、いずれのシリカ濃度においてもほぼ均等な膨張を示した。

一方、内側部の咬合面と歯頸部の寸法変化率を比較すると、シリカ濃度 10, 20% ではほとんどその差はみられないが、シリカ濃度 30, 40% では咬合面が歯頸部より大きく膨張し、外側部とは逆の結果を示した。

2) 熱膨張抑制埋没材を用いて作製した鑄造冠の縦方向の寸法変化について

図 15 熱膨張抑制埋没材を用いたときの外側高径での寸法変化率

a) 外側高径 (図 15)

リングレス法での外側高径の寸法変化率は、練和液のシリカ濃度 10% では -0.75%, 20% ではほぼ原寸を示し、30% 以上では膨張が大きく現れ、40% では 2.05% の膨張を示した。

リング法の場合には、シリカ濃度 10% では -0.62%, 20% では 0.20% であったが、シリカ濃度が 30% と 40% ではリングレス法と同様に膨張が大きくなった。

埋没方法による差は、横方向の外側部とは異なり、リング法がリングレス法よりもわずかに膨張が大きくなる傾向を示した。

b) 内側高径 (図 16)

リングレス法での内側高径の寸法変化率は、練和液のシリカ濃度 10% では -0.84%, 20% では 0.71% であったが、シリカ濃度が 30, 40% と増すと膨張は大きく現れ、40% では 4% もの値を示した。

リング法での内側高径の寸法変化率は、シリカ濃度 10, 20% ではリングレス法と同様の傾向を示したが、30, 40% とシリカ濃度が増すに従って大きく膨張し、その値はリングレス法よりも大きかった。

埋没方法による差は、外側高径と同様にリング法がリングレス法よりもわずかに大きな膨張を示したが、リング・リングレス法ともにシリカ濃度に関係なく、横方向の内側部と同様に、ほぼ等しい膨縮変化を示した。

また、内・外側部の寸法変化を比較すると、シリカ濃度 10% 以外は外側部に比べ内側部が埋没方法に関係なく大きな膨張を示した。

3) 無膨張埋没材を用いて作製した鑄造冠の縦・横方向の寸法変化について

対照として用いた無膨張埋没材の実験結果を図 17 に示す。横方向の内・外側幅径および縦方向の内・外側高径のいずれも、埋没材が膨張しないため 1.08~1.30%

図 16 熱膨張抑制埋没材を用いたときの内側高径での寸法変化率

図 17 無膨張埋没材を用いたときの各測定部位での寸法変化率

の収縮を示した。しかし、各測定部位間での寸法変化率の差は小さく、ほぼ均等な寸法変化を示し、蠟型に対し相似形的に寸法変化をしていることが明らかである。

3. 考 察

本来、変形のない鑄造冠とは蠟型と同形・同大でなければならない。ところが、多くの先人によるこれまでの研究結果は、作製された鑄造冠はすべて変形を伴っており、その変形の原因は吸水膨張を含む硬化時膨張であるとされている^{10,13,15,24,26-28}。しかし、これらの研究に用いられた埋没材はすべて硬化時膨張と熱膨張の両者を利用したものであり、硬化時膨張のみを用いて鑄造冠の寸法変化を観察した報告はみあたらない。

そこで、著者は実験 1 で試作した熱膨張抑制埋没材を用い、硬化時膨張のみで金属の鑄造収縮を補償すると、鑄造冠各部の寸法にどのような影響を与えるかを検討した。この埋没材は練和液のコロイダルシリカ溶液の濃度を変化させると任意の硬化膨張量が得られるので、本実

図 18 熱膨張抑制埋没材を用いたときの軸面部外側の変形表示図

図 19 無膨張埋没材を用いたときの軸面部内・外側の変形表示図

験ではコロイダルシリカ溶液の濃度を硬化時膨張の小さいものから大きいものまで4種類に変化させて実験を行った。さらに、埋没条件は臨床的に高い精度が得られるといわれているシリコンラバーリングを用いたリングレス法^{5,24,34)}と、カオウールを1枚ライニングしたリング法の2種類について行った。それらの結果を横方向と縦方向の変形に総括し、考察を加える。

1) 横方向

熱膨張抑制埋没材を用いて作製した鑄造冠軸面部外側の咬合面部(図11)と歯頸部(図12)では、シリカ濃度10, 20%とともに収縮を示したが、シリカ濃度30, 40%ではいずれも膨張し、濃度の増加に従って大きくなる傾向がみられた。そして、これらの値はリングレス法がリング法よりわずかに大きく現れた。これは使用した緩衝材の緩衝効果の差と考えられ、カオウール1枚ライニングのリング法ではリング壁による埋没材の膨張の抑制が生じたためと考えられる。

図 20 熱膨張抑制埋没材を用いたときの軸面部内側の変形表示図

注目すべきことは、歯頸部外側幅径の膨張がシリカ濃度に関係なく、すべて咬合面部外側幅径よりも大きな値を示したことである。この関係を表したのが図18の軸面部外側の変形表示図で、縦軸は寸法変化率を、横軸は各測定部位を表している。この変形表示図では、咬合面部と歯頸部の2カ所の測定部位を結んだ直線が水平でしかも0に近いほど鑄造冠軸面部外側の変形が小さいといえる。変形表示図からも明らかなように、本実験での鑄造冠軸面部外側は、練和液のシリカ濃度、リング・リングレス法の埋没条件に関係なく咬合面部から歯頸部に向かって膨張が大きくなる傾向、いわゆる「すそ開き」の変形が生じていることが認められ、吉田²⁾や小正¹⁵⁾の結果と一致していた。一方、図19は無膨張埋没材を用いた場合の軸面部の変形表示図で、図の左側は軸面部外側を、右側は軸面部内側を示している。外側ではわずかに「すそ開き」が認められるものの、本実験で最も変形が少なかったシリカ濃度10%の結果より少ないことがうかがえる。これらの結果から勘案すると軸面部外側の「すそ開き」の変形は、硬化時膨張が関与していることが考えられる。

横方向軸面部内側の咬合面部(図13)、歯頸部(図14)はともに、いずれの埋没条件でもシリカ濃度10%では収縮を示しているが、20%ではほぼ原寸に近い値を示した。30, 40%のシリカ濃度では膨張が著しく大きくなる傾向がみられ、その膨張量はリング・リングレス法ともほぼ同程度であった。これは鑄型空間に囲まれた中子部が、硬化時にリング壁やシリコンラバーの影響をほとんど受けることなく、独立した自由な膨張を示し、しかも、鑄型の強度が大きく、冷却後の収縮も小さいため、金属の鑄造収縮を抑制した結果であると考えられる。これに対して、シリカ濃度10, 20%で収縮、あるいは膨張が小さく現れたのは30, 40%に比べて鑄型の強度が弱く、

表 4 使用埋没材の硬化時の温度 (最高温度)

Material		L/P (W/P)	Ringless (Silicone rubber) (°C)	Ring (Kaowool liner) (°C)
Powder	Liquid			
T.E.	Colloidal 10	0.16	85	85
	silica 20		83	84
	(%) 30		83	85
	40		83	85
N.E.	Water	0.16	82	—

冷却後の残留膨張も非常に小さいために金属の鑄造収縮の影響を大きく受けた結果と思われる。

次に、軸面部内側の咬合面部と歯頸部の関係を知るために図 20 に変形表示図を示した。硬化時膨張の小さいシリカ濃度 10, 20% では、両者の関係は、リングの有無にかかわらずその直線はほぼ水平で変形が少ないことを示している。ところが膨張が大きく現れるシリカ濃度 30% では、両者の関係を示す直線は明瞭に右さがりとなった。このことは、軸面部内側では咬合面部から歯頸部に向かって膨張が小さくなる「先細り」の変形が生じていることを示している。さらに、シリカ濃度 40% ではその傾向がいっそう著明に現れていることから、硬化時膨張が増大するに従って変形も大きくなることが明らかである。この「先細り」の変形の原因について小西ら¹⁴⁾は、クリストバライト埋没材を使用したときの中子部の膨張は、硬化時の蠟型の制約とともに、熱膨張時の変形膨張が影響していると考えしている。しかし、本実験の埋没材は熱膨張を起こさないことから考えると、この考察とは矛盾する。

ところで本実験に使用した埋没材はリン酸塩系埋没材であり、その硬化時膨張は発熱を伴った硬化機序であることは知られている。そこで、本実験に用いた 2 種類の埋没材の硬化熱を測定することにした。測定は円錐台に植立した冠形態の蠟型の咬合面部に、直径 0.2 mm の熱電対を付着させ、埋没材のリングへの注入直後から 2 時間経過後までの硬化熱を計測した。その最高温度を表 4 に示す。硬化熱は、熱膨張抑制埋没材ではいずれの埋没条件でも、練和開始 8 分ごろに約 85°C 前後の最高温度となった。一方、使用したグリーンインレーワックスの軟化温度はメーカー表示で 52°C であり、埋没材の硬化熱と考え合せると、蠟型は埋没材の硬化過程において軟化、一部溶融しているものと思われる。したがって、軟化した蠟型に取り囲まれた中子部の埋没材は、比較的制約を受けることなく自由に膨張することができる。しかしながら、外側部の埋没材と連なる歯頸部側の中子部の

膨張は外側部の埋没材の影響を受けると考えられ、咬合面部に近くなるほど中子部の埋没材は自由な膨張ができると考えれば、咬合面部が歯頸部より大きくなったことについても理解できる。一方、無膨張埋没材で作製した鑄造冠軸面部内側の変形表示図 (図 9 の右図) はほぼ水平で変形のない様相を呈しているが、これは埋没材自体が膨張しないためと考えられる。これらの結果から考察すれば、硬化時膨張が鑄造冠内側部の変形にも関与していることは明らかである。

さらに、横方向の内・外側部を比較すると、シリカ濃度、埋没条件に関係なく軸面部外側の膨張は軸面部内側より小さく、この差は、特にリング法で作製したシリカ濃度 40% の場合に著明であった。これは、軸面部内側では冷却収縮が小さく、しかも強度も大きな中子の存在が金属の鑄造収縮を抑制するのに対し、軸面部外側では金属の鑄造収縮量分だけ収縮するために内側部の膨張が大きく現れたと考えられる。したがって、肉の厚い咬合面部で内側部と外側部の差が大きく現れたのであろう。また、埋没材の膨張が大きすぎると、リング内の緩衝材の緩衝効果が発揮されず、横方向への膨張がリング壁で抑制されて逆に鑄型空間方向へ向かうため、外側部の膨張が抑制されたとも考えられる。その結果、鑄造冠軸面部の厚さの減少がうかがえる。しかも、シリカ濃度が増加するに従ってその差が大きくなり、咬合面部に近いコンタクトポイント付近で特に厚さの大幅な減少が生じていると考えられる。

2) 縦方向

縦方向の外側高径にみられる変形 (図 15) は、いずれの埋没条件でもシリカ濃度 10% では収縮を示したが、シリカ濃度 20% ではほぼ原寸に近くなっていた。また、30, 40% とシリカ濃度が増すに従って膨張は大きくなり、しかも、その値はリング法がリングレス法よりも大きく現れた。これは、前述したように横方向への膨張がシリコーンラバーやリング壁の存在によって抑制され、その一部が変形膨張となって縦方向に現れたためと考え

図 21 各測定部位からみた鑄造冠の変形（リングレス法）

られる。そして、リング壁による抑制がシリコンラバーより大きいのであろう。

縦方向の内側高径にみられる変形（図 16）はシリカ濃度 10% で収縮を示しているものの、シリカ濃度が増すほど非常に大きな膨張が観察され、シリカ濃度 40% では実験 1 で測定した埋没材自身の膨張量 3.11% を超える 4% もの大きな膨張を示した。これは、いかに中子部が自由に膨張し、冷却収縮も小さく、また、強度が大きいたとしても内側高径が 4% も膨張するとは考えられない。何か鑄型に異常な膨張を生じさせる原因があるのではないだろうか。あえて考えるならば、内側部は鑄型空間に取り囲まれている上に、歯頸部側は開放側と連なっているため、一部横方向の変形膨張の影響を受けたとしか考えられない。

一方、内・外側高径を比較してみると、いずれのシリカ濃度でも内側部の膨張が外側部よりも大きく、鑄造冠軸面部と同様に咬合面部でも厚さの減少が考えられ、しかも、硬化膨張量が増すほど大幅な厚さの減少が生じていることがうかがえる。

最後に、鑄造冠全体の変形を知る目的で、各測定部位での変化率を練和溶液のシリカ濃度別に棒グラフに表した。図 21 はリングレス法、図 22 はリング法である。このグラフを先に述べた変形表示図と同様に、おのおの濃度の棒グラフの頂点を仮想線で結んだとすると、その仮想線が水平でしかも 0 に近いほど鑄造冠の変形は小さいといえる。グラフから明らかなように、硬化時膨張の小さい 10% シリカ濃度ではすべて収縮しているもののほぼ直線状を示し、変形が小さいといえる。また対照として用いた無膨張埋没材ではさらに変形は小さい。シリカ濃度が 20, 30, 40% と増加するに従って膨張も大きくなり、埋没方法に関係なく仮想線は内側部の測定部位での変化率が突出する曲線形態を示している。しかも、シ

図 22 各測定部位からみた鑄造冠の変形（リング法）

リカ濃度の増加とともに、いいかえると膨張が大きくなるに従って、変形も大きくなる。すなわち、硬化時膨張が小さければ測定部位間の変化率の差も小さく、比較的変形の少ない鑄造冠が得られるが、硬化時膨張を大きくすればそれに伴う変形も大きくなることが明白となった。

IV. 総 括

金属の鑄造収縮の補償を硬化時膨張のみに依拠して良いかどうかを検討する目的で、まず、硬化時膨張のみで熱膨張がないリン酸塩系埋没材を試作した。次に、この試作埋没材を 4 種類のコロイダルシリカ溶液で練和して鑄造冠を作製し、鑄造冠各部の寸法がどのような影響を受けるかを比較検討した。

試作した熱膨張抑制埋没材について

1. コロイダルシリカ溶液の濃度を 10, 20, 30, 40% とした場合、シリカ濃度が増すに従って、硬化時間は短くなり、圧縮強さは大きくなる傾向を示した。
2. 熱膨張抑制埋没材の硬化時膨張量は、練和液のシリカ濃度が増すに従って大きく現れた。冷却収縮量は、市販埋没材と比較して非常に小さかった。
3. 緩衝材による硬化時膨張量への影響は、シリコンラバーを用いたものが、いずれのシリカ濃度でも、カオウルよりも膨張が大きかった。

鑄造冠の変形について

1. 咬合面部ならびに歯頸部の外側幅径は、シリカ濃度 10% と 20% ではリング・リングレスの埋没法ともに収縮がみられたが、濃度が増加するに従って膨張する傾向を示した。しかし、リング法でのシリカ濃度 40% では、膨張の抑制が認められた。また、歯頸部外側幅径の膨張は、シリカ濃度に関係なくすべて咬合面部よりも大きな値を示した。

2. 咬合面部ならびに歯頸部の内側幅径は、シリカ濃度 10% ではリング・リングレスの埋没法ともに収縮を示したが、シリカ濃度が増加するに従って外側幅径と同様に膨張が大きく現れた。しかし外側幅径とは逆に、咬合面部の値が歯頸部よりも大きくなる傾向を示した。また、内側幅径の膨張はいずれも外側幅径より大きな値を示した。

3. 外側高径と内側高径は、埋没法に関係なくシリカ濃度 10% でともに収縮を示したが、濃度が増すに従って膨張が大きくなった。また、内側高径はシリカ濃度 10% 以外ですべて外側高径より大きな膨張を示した。

V. 結 論

硬化時膨張のみに依拠して鑄造冠を作製すると様々な変形が生じることが明らかとなった。したがって、現在、歯科界で使用されている硬化時膨張と熱膨張の両者を利用した鑄造法では、熱膨張が関与する以前の硬化時膨張の段階で、すでに変形が起きていると考えられ、硬化時膨張が鑄造冠の変形の主要因をなしているといえる。

稿を終えるにあたり、終始ご懇篤なるご指導とご校閲を賜った故西浦 恂教授、権田悦通教授に深甚の感謝を捧げます。また、貴重なお助言を賜りました神奈川歯科大学歯科理工学教室上新和彦教授に深謝いたします。本研究に対し直接ご指導とご校閲を賜った小正 裕講師ならびに筆本秀和非常勤講師に心からの謝意を表しますとともに、ご援助いただいた各位に感謝いたします。最後に、試料の提供にご協力くださいました大成歯科工業（株）研究室の皆様にお礼申し上げます。

本論文の要旨は、第 80 回日本補綴歯科学会学術大会（1988 年 10 月 23 日、岐阜）ならびに第 379 回大阪歯科学会例会（1989 年 3 月 18 日、大阪）において発表した。

文 献

- 1) Coleman, R.L.: Physical properties of dental materials (Ⅲ) progress report of research on the dental casting process, *Dent Cosmos*, 68: 743~764, 1926.
- 2) 吉田恵夫: 歯科鑄造法の実用的精度について, 補綴誌, 2: 159~186, 1958.
- 3) 総山孝雄: 精密鑄造に関する研究, 歯材器誌, 7: 36~55, 1962.
- 4) 上新和彦, 齒 淳三: りん酸塩を結合材とした埋没材の諸性質とその適合性について, 歯理工誌, 11: 124~133, 1970.
- 5) 真坂信夫: ワンピースキャストブリッジの鑄造精度に関する研究, 歯科学報, 70: 725~758, 1970.
- 6) 上条智生: 鑄造体の変形に関する研究, 歯理工誌, 13: 56~88, 1972.
- 7) 大村国明, 片桐保昭, 松野 晃ほか: 各種技法による全部鑄造冠の適合度の比較, 歯材器誌, 26: 30~36, 1972.
- 8) 西岡二二夫: 鑄造時収縮変化の異方性に関する基礎的研究, 九州歯会誌, 28: 355~378, 1974.
- 9) 上新和彦: より良い鑄造体をつくるために, 鹿 歯 紀, 9: 21~29, 1989.
- 10) Jørgensen, K.D.: 和久本貞雄, 久光 久訳: インレーとクラウン 歯科精密鑄造の理論と実際, 154~167, 書林, 東京, 1989.
- 11) 上新和彦, 黒田拓治: 鑄造体の厚さに関する研究, 歯理工誌, 12: 72~78, 1971.
- 12) 中西哲生: 鑄造冠における再現性とセメント合着後の適合性に関する研究, 歯科学報, 75: 1797~1817, 1975.
- 13) 筆本秀和: 試作無膨張埋没材を用いての鑄造体の変形について, 補綴誌, 24: 301~321, 1980.
- 14) 小西正裕, 渡辺嘉一, 横塚繁雄: せっこう系埋没材を用いた鑄造冠内面の形状変化, 補綴誌, 29: 102~120, 1985.
- 15) 小正 裕: 鑄造冠の変形に関する研究—とくに厚さを中心とした変形について—, 歯材器, 5: 529~554, 1986.
- 16) 羽田皓明, 新谷明喜, 横塚繁雄ほか: 高温埋没材を用いた鑄造冠内面の形状変化, 補綴誌, 32: 358~373, 1988.
- 17) Mahler, D.B. and Bruce, A.A.: The influence of various factors on the effective setting expansion of casting investments, *J Prosthet Dent*, 13: 365~373, 1963.
- 18) 東口茂治: 歯科精密鑄造法に関する研究—とくに埋没材の凝固膨張を抑制した鑄造法について—, 歯科医学, 31: 1~16, 1968.
- 19) 永沢 栄, 伊藤充雄, 高橋重雄ほか: 鑄造精度に関する研究 その 3 埋没材の硬化時における膨張圧, 膨張量および発熱温度に対する緩衝材の影響について, 歯科学報, 75: 286~292, 1975.
- 20) 永沢 栄, 伊藤充雄, 中西哲生ほか: 精密鑄造に関する研究 (その 9) ワックスパターンに対する埋没材の硬化膨張の影響について, 松本歯学, 5: 27~34, 1979.
- 21) 上新和彦, 藤井孝一, 有川裕之ほか: 埋没材の膨張と鑄造体の寸法との関連性 第 1 報 埋没材の膨張の測定方法, 歯材器, 4: 334~338, 1985.
- 22) 上新和彦, 藤井孝一, 有川裕之ほか: 埋没材の膨張と鑄造体の寸法との関連性 第 2 報 石こう系埋没材を用いた場合, 歯材器, 4: 339~343, 1985.
- 23) Meiser, E.T., Rijk, W.G. Tesk, J.A. et al: Internal setting expansion of a dental casting investment measured with strain gauges, *J Prosthet Dent*, 53: 870~873, 1985.
- 24) Junner, R.E. and Stevens, L.: Anisotropic setting ex-

- pansion of phosphate bonded investment, Aust Dent J, 31 : 434~439, 1986.
- 25) 上新和彦, 藤井孝一, 有川裕之ほか: 荷重下における埋没材の硬化時膨張, 歯材器, 7 : 366~370, 1988.
- 26) Skinner, E.W. : The role of investment setting expansion in gold compensation casting techniques, Dent Cosmos, 75 : 1009~1019, 1933.
- 27) Steven, L., Okamoto, A. and Jørgensen, K.D. : Dimensional change in mold space on setting of phosphate bonded investment, Aust Dent J, 30 : 281~284, 1985.
- 28) Watanabe, A. and Jørgensen, K.D. : Thermal expansion of dental casting alloys and phosphate bonded investment, Dent Mater J, 5 : 21~25, 1986.
- 29) 澤田武仁: コロイダルシリカ溶液で練和したリン酸塩系埋没材の硬化機序ならびに水和膨張について, 歯材器誌, 32 : 6~16, 1975.
- 30) 金竹哲也: 歯科理工学通論, 永末書店, 京都: 191~195, 1980.
- 31) 浦部素直, 岩本 修, 内山照夫ほか: リン酸塩系鑄型材の硬化膨張機構, 日本歯科理工学会北海道・東北, 関東, 中部3支部共催学術講演会講演集: 31~32, 1982.
- 32) 高橋純造, 岡崎正之, 木村 博ほか: リン酸塩系埋没材の硬化膨張 第1報 コロイダルシリカ液の影響, 歯材器, 4 : 496~503, 1985.
- 33) 高橋純造, 岡崎正之, 木村 博ほか: リン酸塩系埋没材の硬化膨張 第2報 結合材量および基材粒度の影響, 歯材器, 4 : 666~671, 1985.
- 34) 吉成正雄, 鈴木義博, 住井俊夫: リングレス鑄造法による鑄造精度, 歯科学報, 75 : 986~993, 1975.