前ろう着法による陶材焼付金属冠ブリッジの 技工操作過程における変位

富田 豊

Distortion of Ceramometal Fixed Partial Prosthodontics during the Laboratory Procedure

Yutaka Tomita

第1章 緒 言

陶材焼付金属は、審美性が良好で、耐摩耗性があり、変色しないなどの多くの長所を有している。近年の補綴臨床では単独冠はもとより、ブリッジの支台装置として広く応用されている。しかし、多数歯にわたるブリッジでは、その適合性の低下が臨床上で大きな問題となっている¹⁻³⁾。この原因には、支台歯形成が適正でないとか、印象採得が精確でなかったなどの診療操作中に起因するものと、ブリッジのフレームの鋳造時、ろう着時あるいは陶材焼成過程などの技工操作中に生ずる、どうしても避けられないブリッジの変位に起因するものも考えられる。診療操作中に起因するものは、術者が十分注意すればある程度防止することが可能であるが、技工操作過程で起こるブリッジ自体の変位を最小にすることは適合性を向上させる上では非常に重要である。

すでに単独冠については、数回にわたる陶材焼成過程時の熱処理によるコーピング自体の変形に関して多くの報告⁴⁻¹³⁾があり、ブリッジではその影響がより大きく出ることが予想され、特に前ろう着法を用いて製作した場合、ろうの熔融温度と陶材の焼成温度との差が約 50~100°C と小さいため、陶材焼成過程の加熱操作によって変形しやすい傾向にあるといわれている^{2,14,15)}。しかし、彎曲部を含むフレームのろう着は、直線部のろう着以上

に複雑な変位が予想される。

一般に、ユニット数が多い場合や前歯、臼歯にわたり大歯を含む彎曲部があるブリッジを製作する場合には、ワンピースキャスト法では十分な精度を得ることは困難であることより、ブリッジを数ユニットごとのいくつかの部分に分けて鋳造した後、各部分をろう着する方法で適合精度を向上させている。

しかし、このような彎曲部を含んだブリッジのろう着精度や、ブリッジの陶材焼成過程における変位についての報告^{14,16-19)}は散見するにすぎず、一連の技工操作過程のどの段階で、どの程度の変位が起こっているかについては不明な点が多い。そこで著者は、上顎両側中切歯、側切歯の4歯欠損に対して、前ろう着法を応用して陶材焼付金属冠によりブリッジを製作した場合の不適合の原因を解明するため、4334 を支台とする彎曲部を含む8ユニットのブリッジを製作し、鋳造後ろう着のための位置の確定後から、ろう着、ディギャッシング、そしてオペーク、ボディー・インサイザル陶材築盛、グレージング等の陶材焼成時の数回の加熱処理の各過程と、焼成後46% フッ化水素酸中で陶材を溶解除去した後で、ブリッジのフレーム自体がどのように変位・変形するかを三次元的に計測し、変位の発現時期、量、方向およびその原因について検討したので報告する。

第2章 材料および方法

1. 金属原型

本実験では、上顎両側中切歯、側切歯をボンティックとし、両側犬歯、第1小臼歯を支台装置とする8ユニットの陶材焼付金属冠ブリッジを想定し、第5報²⁰⁾と同様

日本大学大学院歯学研究科歯科臨床系専攻（指導：五十嵐孝義教授）

Nihon University Graduate School of Dentistry (Department of Prosthodontics) Director: Prof. Takayoshi Igarashi

昭和59年12月19日受付

図 1 原型 (43/34 支台)

に治具を欠損形態に合わせて調整し、金属原型とした (図 1)。

2. 試験体

試験体製作のためのワックスパターン製作、埋没、鋳造はすべて第 5 報²⁰⁾に従った。すなわち、ワックスパターンは MAVES 社製インレー・ワックスを用い、シリコン割型にて溶融圧接法で製作した。完成したワックスパターンは前ろう着を行うため、左側中切歯部を歯軸に対して 30° の角度で切断し、2つの部分に分割した後、長谷川²¹⁾の推奨する方法に従いスプルー植立を行った。埋没は、 $53\phi \times 55\text{ mm}$ のプラスチックリングを用いたリングレス埋没法とし、埋没材は松風社製ユニベスト (粉: Bach No. 088314, 液: Bach No. 018244) を用い、混液比はメーカー指示 (0.20) に従って真空攪拌後埋没した。鋳型はメーカー指示に従い、1時間室温に放置後 120 分で室温から 700°C まで加熱し、 700°C で 30 分間保留後、松風社製アルゴンキャスター DX で鋳造を行った。金属は、松風社製陶材焼付用合金ユニゴールド (Bach No. 018449) を用い、各試験体ごとに新しい金属 50 g を使用した。鋳造後は室温放冷し、冷却後取り出した。なお、試験体は、肉眼的にみて鋳造欠陥、気泡のない 5 試験体を用いた。

3. ろう着

ろう着間隙の設定、試験体の位置の確定、計測点の形成、埋没、予備加熱、ろう着操作はすべて第 5 報²⁰⁾に従った。すなわち、分割されている 2つの試験体を治具上の支台歯に適合させ、ろう着間隙を 0.3 mm に調整した後、直径 1.5 mm の Co-Cr 線と RELIANCE DENTAL 社製 Duralay Inlay Pattern Resin を用い仮着して、試験体の位置の確定を行った。その後、計測点の形成およ

注 P0~P6: 計測点 ||: ろう着部

図 2 位置の確定、計測点の形成が終了した試験体

図 3 埋没ブロックの形態および大きさ

び計測を行った。計測点は図 2 に示すように、各支台装置およびポンティックの舌側に設けられたレジに、ブッシュ社製 No. 010 のラウンドバーを用いてそれぞれ 1 点ずつ形成した。なお計測点は図 2 に示すごとく、それぞれ右側第 1 小臼歯を P0, 右側犬歯を P1, 右側側切歯を P2, 右側中切歯を P3, 左側側切歯を P4, 左側犬歯を P5, 左側第 1 小臼歯を P6 と略す。

ろう着時の試験体の固定は埋没材固定法とし、CENDRES & METAUX 社製 CM ソルダリング・インベストメント (Bach No. 20601) を用い、混液比はメーカー指示 (0.20) に従って埋没した。今回の実験で用いた埋没ブロックの大きさや形態は図 3 に示す。埋没ブロックは 1 時間室温に放置後、毎分 10°C の上昇率で 700°C まで加熱し、 700°C で 10 分間保留後、アスベストブロック上で酸素-都市ガスによる火炎ろう着を行った。ろうは、松風社製ユニゴールドプレソルダー (Bach No. 058311) 0.1 g を用い、フラックスは Degussa 社製 Veriflux を用いた。なお、ろう着後は室温まで放冷後取り出した。

4. 試験体の表面研削

ろう着された試験体 (以後フレームと略す) は第 5

図 4 焼成スケジュール

報²⁰⁾に従い、計測点を含む舌側を除き、スプルー部の形態をカーバイドバーで整え、陶材焼成面を松風社製セラモメタルポイント (# 20, # 29) で約 0.1 mm 研削し、支台装置では金属の厚さが 0.3 mm になるよう調整した。

5. 陶材の焼成

使用陶材および築盛、焼成方法は、すべて第 5 報²⁰⁾に従った。すなわち、陶材は松風社製ユニボンドを使用し、焼成は図 4 に示すメーカー指示の焼成スケジュールに従って、ディギャッシングからグレージングまで計 7 回行った。陶材の厚みは、2 回の築盛、焼成により、オパーク陶材は 0.3 mm の均一な厚さとし、ボディーおよびインサイザル陶材は、唇面コアにより規定し、唇面中央部で 1.5 mm の厚さとした。なお築盛時は、コンデンスを均一にするため、松風社製セラモソニックコンデンサーを用い、同一術者が行った。

また焼成時は、京都セラミック社製 CERAMIC FURNACE SOLDERING STAND を焼成トレーとして用い、ディギャッシング時は、各支台装置と左右中切歯ポンティック連結部の 5 カ所に、以後のオパーク、ボディー・インサイザル陶材焼成時、グレージング時には各支台装置の 4 カ所のみにポストを設置し保持した状態で焼成した。

6. 陶材の除去

陶材焼成時に起こるフレームの変位が、陶材の影響によるものかどうかを計測するため、グレージング後のブリッジを計測した後、ポリエチレン容器中の 46% フッ

注 A, B, C: 基準点 P 0 ~ P 6: 計測点 ||: ろう着部

図 5 計測方法

化水素酸中に浸漬したままシャープ社製超音波洗浄器ウルトラソニック UT-51 N を用いて陶材を完全に溶解除去した。

第 3 章 計測方法

1. 計測方法

計測方法は第 5 報²⁰⁾に従った。すなわち、図 5 に示すように三次元位置再現用治具を用い、治具上の基準点 A, B, C にて XY 平面を A, B にて X 軸方向を決定し、C を原点とする直交座標を設定する。つぎにフレームの支台装置の 1 つ (今回は右側第 1 小臼歯) に鑄接されているネジ型のアタッチメントを治具上のクランプで固定した後、右側小臼歯上の計測点 P 0 に原点を移動し、ここを基準として他の支台装置およびポンティックの舌側に設定されている計測点 P 1 ~ P 6 の三次元座標値の計測を行

った。これにより、各技工操作過程ごとに同様に計測を行うことによって、技工操作過程で起こる右側小臼歯に対する他の支台装置およびポンティックの三次元的変位が計測可能である。

計測機器は東京精密社製三次元デジタル座標測定機 XYZAX-M 400 B とデータゼネラル社製 NOVA 4C 型ミニコンピュータを組合せた計測システムを用い、直径 1.0 mm のボールプローブ（測定子）を、治具およびフレームに設定された基準点および計測点に適合させて計測を行った。

2. 計測時期

計測時期は、以下に示すごとく各技工操作過程終了時、計 8 回とした。

- 1) 位置の確定後（仮着後）
- 2) ろう着後
- 3) フレームの表面研削後
- 4) ディギャッシング後
- 5) オペーク陶材焼成後
- 6) ボディ・インサイザル陶材焼成後
- 7) グレージング後
- 8) 陶材除去後

3. 計測項目

フレームの変位は、フレームを構成する支台装置およびポンティックの三次元的変位としてあらわされるが、座標値の変化だけでは理解にくい。そこで、図 6 に示すようにワンピースで製作した試験体（以後部分と略す）自体の変形として、それぞれ 2 点間距離 P0-P3 間（以後 D (0-3) と略す）と、P0, P1 の 2 点を通る直線と P2, P3 を通る直線の三次元空間におけるなす角（以後 α (XYZ) と略す）、および P4-P6 間の 2 点間距離 {D (4-6)} と三次元空間における $\angle$ P4 P5 P6 { β (XYZ)} を求めた。またろう着後のフレームの変位として、P0-P6 間の 2 点間距離 {D (0-6)}、P1-P5 間 {D (1-5)}、P2-P4 間 {D (2-4)}、P3-P4 間 {D (3-4)}、および P0, P3 を通る直線と P4, P6 を通る直線の三次元空間におけるなす角 { γ (XYZ)}、2 直線を XY, YZ, ZX 各平面へ正投影した場合のなす角 { γ (X-Y), γ (Y-Z), γ (Z-X)} を求めた。

そして、各技工操作過程間における各計測点の座標値の差 {P1 (dx, dy, dz) …… P6 (dx, dy, dz)} とともに、各 2 点間距離の差 (Δd)、各角度の差 ($\Delta \theta$) を算出した。

注 P0~P6: 計測点 ||: ろう着部

図 6 計測項目

なお、2 点間距離および 2 直線のなす角は、各座標値から以下の式により算出した。

1) 2 点間距離の算出

A (x_1, y_1, z_1), B (x_2, y_2, z_2) を 2 点とすると AB 間の距離は

$$AB = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

により求められる。

2) 2 直線のなす角の算出

A (x_1, y_1, z_1), B (x_2, y_2, z_2) の 2 点を通る直線と C (x_3, y_3, z_3), D (x_4, y_4, z_4) の 2 点を通る直線の三次元空間におけるなす角 θ (XYZ) は、

$$\cos \theta (XYZ) = \frac{\{(x_2 - x_1)(x_4 - x_3) + (y_2 - y_1)(y_4 - y_3) + (z_2 - z_1)(z_4 - z_3)\}}{\{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2}\}}$$

より求められる。また、各平面へ投影した場合のなす各 θ (XY), θ (YZ), θ (ZX) は

$$\begin{aligned} \cos \theta (XY) &= \frac{\{(x_2 - x_1)(x_4 - x_3) + (y_2 - y_1)(y_4 - y_3)\}}{\{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}\}} \\ \cos \theta (YZ) &= \frac{\{(y_2 - y_1)(y_4 - y_3) + (z_2 - z_1)(z_4 - z_3)\}}{\{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \sqrt{(y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2}\}} \\ \cos \theta (ZX) &= \frac{\{(z_2 - z_1)(z_4 - z_3) + (x_2 - x_1)(x_4 - x_3)\}}{\{\sqrt{(z_2 - z_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} \sqrt{(z_4 - z_3)^2 + (x_4 - x_3)^2}\}} \end{aligned}$$

より求められる。

各技工操作過程での計測は、一試験体につき治具上の基準取り、計測点の 5 回のくり返し計測と平均値の算出、およびその平均値からの 2 点間距離、2 直線のなす角の算出の計測操作を 3 回行い、それぞれ 3 回の平均値を計測値とした。

計測にあたっては、環境を一定にするため温度 $23 \pm 1^\circ \text{C}$ 、相対湿度 $50 \pm 1\%$ の恒温恒湿室内で行った。

表 1 計測誤差

三次元座標値			
Point	X	Y	Z
P1	0.012	0.008	0.004
P2	0.018	0.010	0.008
P3	0.012	0.012	0.008
P4	0.014	0.016	0.014
P5	0.010	0.020	0.012
P6	0.010	0.016	0.014
unit : mm			
二点間距離		角 度	
Distance		Angle	
D (0 - 3)	0.012	α (X Y Z)	0.136
D (4 - 6)	0.010	β (X Y Z)	0.151
D (0 - 6)	0.010	γ (X - Y)	0.050
D (1 - 5)	0.012	γ (Y - Z)	0.052
D (2 - 4)	0.016	γ (Z - X)	0.186
D (3 - 4)	0.012	γ (X Y Z)	0.048
unit : mm		unit : degree	

4. 計測精度

各計測点, 各計測項目の計測誤差は, 第 5 報²⁰⁾で示したようにくり返し計測における管理限界の幅として求めた。表 1 に各計測点の座標値, 2 点間距離, 2 直線のなす角の計測誤差を示す。

第 4 章 成 績

各技工操作過程における変位として, 操作過程後の値から操作前の値をひいた座標値の差 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$), 2 点間距離の差 (Δd) 2 直線のなす角の差 ($\Delta \theta$) の平均値および標準偏差を表 2~8 に示した。

計測値の正負の符合は, 各座標値および測定項目毎に以下のように定めた。すなわち, 右側第 1 小臼歯の計測点 P0 を原点として, X 座標値では左側第 1 小臼歯 方向へ向かう変位を正, Y 座標値では前方へ向かう変位を正, Z 座標値では咬合面切端側方向へ向かう変位を正として表した。

また, 2 点間距離および α (XYZ), β (XYZ), γ (X-Y), γ (XYZ) では, 距離および角度が増大した場合を正, γ (Z-X) では両端の支台装置が咬合面側方向へ閉じるような変位をした場合を正, γ (Y-Z) では右側方向からみて, 2 直線の交点を中心として P0 に対し P6 が反時計

表 2 ろう着による変位

三次元座標値			
Point	Δx	Δy	Δz
P1	0.002 (0.004)	-0.002 (0.001)	0.000 (0.005)
P2	0.002 (0.003)	-0.010** (0.002)	-0.005 (0.009)
P3	0.008 (0.008)	-0.027** (0.005)	-0.011 (0.017)
P4	-0.091** (0.019)	-0.017 (0.012)	-0.062** (0.030)
P5	-0.085** (0.016)	-0.008 (0.012)	-0.099** (0.028)
P6	-0.082** (0.019)	-0.002 (0.013)	-0.095** (0.014)
unit : mm () : S.D.			
二点間距離		角度	
Distance	Δd	Angle	$\Delta \theta$
D(0-3)	-0.017** (0.006)	α (XYZ)	-0.127** (0.026)
D(4-6)	-0.011** (0.004)	β (XYZ)	-0.066** (0.021)
D(0-6)	-0.082** (0.019)	γ (X-Y)	0.128* (0.065)
D(1-5)	-0.086** (0.018)	γ (Y-Z)	-0.204** (0.045)
D(2-4)	-0.093** (0.021)	γ (Z-X)	-0.407* (0.310)
D(3-4)	-0.099** (0.024)	γ (XYZ)	0.129** (0.065)

unit : mm () : S.D. unit : degree () : S.D.
注 * : 有意差あり ($\alpha=0.05$)
** : 有意差あり ($\alpha=0.01$)
アンダーライン : 有意差があり, 計測誤差を上まわる変位の見られた部位

まわりの方向へ変位した場合を正として表した。
なお, 技工操作過程前後の有意差の有無を t 検定により判定し, その結果を平均値の右肩に*印をもって記した。また有意差がみられた部位でその変位量が計測誤差を上まわる場合には, その平均値にアンダーラインを記した。

第 5 章 考察・検討

従来, ブリッジなど多数歯にわたる鑄造修復物を調製する場合は, ワンピース法とろう着法とにより行われているが, 概してワンピース法よりろう着法の方が, 適合が得られるといわれている。
しかしろう着法の場合もユニット数が多い場合はろう

表 3 フレームの表面研削操作による変位

三次元座標値			
Point	Δx	Δy	Δz
P1	0.004 (0.008)	0.000 (0.004)	0.000 (0.003)
P2	0.001 (0.004)	0.000 (0.004)	0.002 (0.003)
P3	0.003 (0.003)	-0.002 (0.005)	0.001 (0.004)
P4	0.002 (0.003)	-0.005 (0.009)	0.003 (0.006)
P5	-0.003 (0.004)	-0.006 (0.008)	0.007 (0.006)
P6	-0.004 (0.007)	-0.005 (0.010)	0.010 (0.009)

unit : mm () : S.D.

二点間距離		角度	
Distance	Δd	Angle	$\Delta \theta$
D(0-3)	0.000 (0.004)	α (XYZ)	0.008 (0.052)
D(4-6)	-0.002 (0.002)	β (XYZ)	0.022 (0.037)
D(0-6)	-0.004 (0.007)	r (X-Y)	-0.013 (0.018)
D(1-5)	-0.007 (0.006)	r (Y-Z)	0.036 (0.024)
D(2-4)	0.001 (0.003)	r (Z-X)	0.086 (0.052)
D(3-4)	-0.001 (0.002)	r (XYZ)	-0.013 (0.018)

unit : mm () : S.D.

注 表 2 下注参照

unit : degree () : S.D.

着カ所を増すことによりそれが変位・変形の原因になると考えられるため^{22,23)}、数ユニットに分けてワンピースキャスト法で製作した後、各部分をろう着する方法²⁴⁻²⁶⁾がとられている。

この場合ブリッジ全体の適合性低下の原因となる変位には、ろう着、陶材焼成過程などの加熱操作と陶材の焼成収縮、陶材と金属の熱膨張係数の差などによるブリッジを構成する支台装置自体の変形やワンピースキャスト法で製作した各部分自体の変形、およびろう着部で起こる相対的変位によるブリッジ全体の変位などが考えられる。

従来これらの変位に関しては、支台歯に対する支台装置自体の浮き上がりやブリッジ両端の間の距離の変化によって評価されてきた^{14,16,18,27)}。

しかしこれらの方法は、前述したような変位のすべてが浮き上がりや距離の変化に集約されてしまい、適合性

表 4 ディギタッシングによる変位

三次元座標値			
Point	Δx	Δy	Δz
P1	-0.004 (0.006)	0.011* (0.003)	0.000 (0.011)
P2	-0.015* (0.009)	0.034** (0.008)	-0.025** (0.019)
P3	-0.005 (0.025)	0.107** (0.016)	-0.089* (0.045)
P4	0.057* (0.032)	0.335** (0.038)	-0.305* (0.117)
P5	0.182* (0.042)	0.406** (0.043)	-0.348* (0.164)
P6	0.403** (0.084)	0.407** (0.040)	-0.339* (0.230)

unit : mm () : S.D.

二点間距離		角度	
Distance	Δd	Angle	$\Delta \theta$
D(0-3)	0.084** (0.010)	α (XYZ)	0.483** (0.089)
D(4-6)	0.047* (0.023)	β (XYZ)	0.441** (0.188)
D(0-6)	0.408** (0.086)	r (X-Y)	1.374** (0.323)
D(1-5)	0.193** (0.041)	r (Y-Z)	0.519 (0.713)
D(2-4)	0.077** (0.028)	r (Z-X)	-0.168 (2.060)
D(3-4)	0.023* (0.012)	r (XYZ)	1.376** (0.326)

unit : mm () : S.D.

注 表 2 下参照

unit : degree () : S.D.

の低下がどの部位の変位によるものなのか、またその変位がなぜ起こるのかについての詳細な分析は困難であった。

そこで著者は、ブリッジを構成する支台装置およびポンティックの個々の変位を三次元的に計測し、変位の発現時期、部位、量、方向を知ることによってその原因の分析を試みた。なお今回の実験では、各支台装置個々の変形に関しては、単独冠について多くの研究⁴⁻¹³⁾がなされているため除外することとし、支台装置およびポンティック相互の位置関係の変位について分析することにした。

1. ろう着による変位

図 7 は、XY、XZ 各平面からみた、ろう着によるフレームの変位の状態を模式図にしたものである。図からもわかるように、ろう着後にはフレームの彎曲が閉じるよ

表 5 オペーク陶材焼成による変位

三次元座標値			
Point	Δx	Δy	Δz
P1	-0.002 (0.005)	0.003* (0.002)	-0.006 (0.006)
P2	0.000 (0.007)	0.003 (0.004)	-0.004 (0.006)
P3	0.000 (0.008)	0.001 (0.004)	-0.002 (0.007)
P4	-0.001 (0.008)	-0.004 (0.014)	0.005 (0.011)
P5	-0.000 (0.011)	-0.004 (0.018)	0.011 (0.011)
P6	-0.009 (0.018)	-0.006 (0.020)	0.011 (0.016)

unit: mm (): S.D.

二点間距離		角度	
Distance	Δd	Angle	$\Delta \theta$
D(0-3)	0.001 (0.006)	α (XYZ)	-0.028 (0.055)
D(4-6)	-0.001 (0.003)	β (XYZ)	-0.070* (0.036)
D(0-6)	-0.009 (0.018)	r (X-Y)	-0.038 (0.068)
D(1-5)	0.000 (0.012)	r (Y-Z)	0.025 (0.059)
D(2-4)	-0.002 (0.005)	r (Z-X)	0.087 (0.196)
D(3-4)	-0.001 (0.003)	r (XYZ)	-0.038 (0.068)

unit: mm (): S.D.

注 表 2 下参照

unit: degree (): S.D.

表 6 ボディー・インサイザル陶材焼成による変位

三次元座標値			
Point	Δx	Δy	Δz
P1	0.000 (0.003)	0.001 (0.003)	-0.005 (0.006)
P2	0.000 (0.003)	0.001 (0.002)	-0.005 (0.009)
P3	0.001 (0.005)	-0.002 (0.003)	-0.022** (0.005)
P4	-0.006 (0.007)	-0.016 (0.014)	-0.034** (0.013)
P5	-0.016* (0.010)	-0.022 (0.019)	-0.038** (0.006)
P6	-0.025* (0.016)	-0.022 (0.018)	-0.032** (0.014)

unit: mm (): S.D.

二点間距離		角度	
Distance	Δd	Angle	$\Delta \theta$
D(0-3)	-0.001 (0.002)	α (XYZ)	-0.022 (0.029)
D(4-6)	-0.001 (0.002)	β (XYZ)	0.019 (0.023)
D(0-6)	-0.025* (0.017)	r (X-Y)	-0.082* (0.051)
D(1-5)	-0.015* (0.010)	r (Y-Z)	-0.078 (0.086)
D(2-4)	-0.006 (0.006)	r (Z-X)	0.136 (0.208)
D(3-4)	-0.005* (0.003)	r (XYZ)	-0.081* (0.051)

unit: mm (): S.D.

注 表 2 下参照

unit: degree (): S.D.

注 P0~P6: 計測点 ▲: ろう着部

図 7 ろう着による変位

うな変位が起こっていた。このような変位が起こるのは各部分の相対的な変位によって閉じる場合のほか、西村²⁸⁾や井手ら²⁹⁾が指摘しているように、被試験体すなわち各部分自体が変形し彎曲が閉じる場合も考えられる。特に今回のような場合には、変形がより大きくなることが予想される。

そこでまず、左右の部分の変位をみると(表2)、4-1間の距離 D(0-3)と2-4間の距離 D(4-6)はそれぞれわずかではあるが減少しており、計測誤差の範囲内ではあるが、 α (XYZ), β (XYZ)の角度も減少する傾向にあることから、左右の部分はそれぞれの彎曲が閉じる傾向にあることがわかる。また、その閉じる方向を右側の部分について座標値からみると、P1, P2, P3ともに主に Y 座標値が負の方向に変化しており、水平的な彎曲が閉じていることがわかる。

ろう着時の被ろう着体の変形の原因として西村²⁸⁾は、

表 7 グレージングによる変位

三次元座標値			
Point	Δx	Δy	Δz
P1	0.003 (0.004)	0.001 (0.002)	0.000 (0.002)
P2	0.001 (0.003)	0.002 (0.002)	0.000 (0.005)
P3	-0.002 (0.005)	0.003 (0.003)	0.000 (0.004)
P4	0.001 (0.004)	0.013** (0.004)	-0.003 (0.012)
P5	0.009* (0.005)	0.017** (0.003)	-0.002 (0.012)
P6	0.014* (0.007)	0.017** (0.005)	0.000 (0.013)

unit: mm (): S.D.

二点間距離

角度

Distance	Δd	Angle	$\Delta \theta$
D(0-3)	0.001 (0.004)	α (XYZ)	0.044 (0.042)
D(4-6)	0.000 (0.001)	β (XYZ)	-0.029 (0.034)
D(0-6)	0.014* (0.007)	r (X-Y)	0.051** (0.024)
D(1-5)	0.005 (0.004)	r (Y-Z)	0.013 (0.044)
D(2-4)	0.001 (0.002)	r (Z-X)	0.043 (0.105)
D(3-4)	0.001 (0.003)	r (XYZ)	0.050* (0.025)

unit: mm (): S.D.

unit: degree (): S.D.

注 表 2 下参照

表 8 陶材除去による変位

三次元座標値			
Point	Δx	Δy	Δz
P1	-0.001 (0.007)	0.002 (0.004)	0.000 (0.006)
P2	-0.002 (0.013)	0.003 (0.004)	0.003 (0.007)
P3	-0.003 (0.016)	0.008 (0.009)	0.004 (0.009)
P4	0.000 (0.014)	0.019 (0.017)	0.013 (0.015)
P5	0.006 (0.017)	0.024* (0.019)	0.013 (0.016)
P6	0.020** (0.011)	0.026* (0.018)	0.008 (0.019)

unit: mm (): S.D.

二点間距離

角度

Distance	Δd	Angle	$\Delta \theta$
D(0-3)	0.005* (0.003)	α (XYZ)	0.033 (0.021)
D(4-6)	0.002 (0.002)	β (XYZ)	0.048 (0.011)
D(0-6)	0.021* (0.011)	r (X-Y)	0.076* (0.043)
D(1-5)	0.007 (0.011)	r (Y-Z)	-0.004 (0.073)
D(2-4)	0.001 (0.003)	r (Z-X)	-0.063 (0.162)
D(3-4)	0.000 (0.002)	r (XYZ)	0.076* (0.042)

unit: mm (): S.D.

unit: degree (): S.D.

注 表 2 下参照

加熱による鋳造応力の開放をあげている。鋳造応力は、合金の物理的性質、鋳造物の形態、スプルーの植立条件、埋没条件、鋳造温度、冷却条件など多くの因子により影響を受けるため一概にはいえないが、今回の試験体である弧状の左右の部分も凝固時、内部の埋没材をしめつけるようにして凝固したと考えられ、ろう着時の加熱操作により鋳造応力が開放され彎曲が閉じたのではないかと考えられる。

また井手ら²⁹⁾は、被ろう着体の変形の原因として、鋳造体の埋没再加熱による影響を上げており、鋳造体と埋没材の熱膨張率の不均衡によるためであると報告している。図 8 は、第 2 報³⁰⁾、第 3 報³¹⁾から得られた今回使用したろう着用埋没材と合金の熱膨張曲線である。ろう着時の埋没ブロックの温度分布状態は不明であるが、埋没材の熱膨張率は最高で約 0.7% であるのに対し、合金の熱膨張率は 1,030°C で約 1.8% であり、また 1,040°C

注 Metal: ユニゴールド

Investment: CM ソルダリング インベストメント

図 8 熱膨張曲線

からは著しい軟化が起きていることから、今回使用した松風社製ユニゴールドプレソルダー（融点 1,050°C）を用いる高いろう着温度では、これらの影響により彎曲

注 P0~P6: 計測点 SP: ろう着部中央 (回転中心)
 図 9 左右の部分間の距離が減少する場合の変位の可能性

が閉じることも十分考えられる。その他、各部分の変位の原因として、加熱による合金の金属相、金属組織の変化も考えられるが、変位の方から推察すると前述の2つの要因が主として影響しているのではないと思われる。

つぎにろう着部で起こる左右の部分の相対的な変位についてみてみると(表2) 4|-4間の距離 D(0-6), 3|-13間の距離 D(1-5), 2|-12間の距離 D(2-4), 1|-12間の距離 D(3-4)のいずれの部分間の距離も減少していることがわかる。左右の部分間の距離が減少するのは、右側の部分(P0, P1, P2, P3)を基準とすれば、左側の部分(P4, P5, P6)が図9の矢印で示すように、右側の部分に向かってX方向へ平行移動し減少する場合と、ろう着部中央(以下 SP と略す)を中心としてY軸まわりもしくはZ軸まわりに回転することによって減少する場合とが考えられる。そこで左側の部分の座標値の変化をみてみると、P4, P5, P6ともにY座標値の変化はほとんどなく、X座標値、Z座標値が負の方向に変化しており、またX座標値の変化量は $r(X-Y)$, $r(XYZ)$ が増大していることからわかるように、ろう着部に近づくに従って大きくなる傾向にある。これはZ軸まわりの回転による減少の可能性が少なく、左側の部分のX方向への平行移動とY軸まわりの回転による減少の可能性を示している。そこでまずX座標値の変化が、平行移動によるものかY軸まわりの回転によるものかを推察する目的で、Z座標値の変化がろう着部を中心とするY軸まわりの回転によって起こったと仮定し、X座標値の変化量を近似的に計算してみることにした。

ろう着部中央を回転中心(SP)とすれば、SPから各計測点までの距離はおおよそ図10で示すようになる。たと

注 P4~P6: 計測点 SP: ろう着部中央 (回転中心)
 図 10 P4, 5, 6の SP からの距離

注 P4: 計測点 SP: ろう着部中央 (回転中心)
 L: Y軸までの距離 ΔX: X座標値の変化量
 ΔZ: Z座標値の変化量

図 11 P4 がY軸まわりに回転した場合の位置関係

えば P4 が SP を中心として Y 軸まわりに回転し、Z 座標値が表2で示すように -0.062 mm 変化したとすれば、この回転による X 座標値の変化量 (Δx) は図11で示すようになり、以下の方程式に代入して求めることができる。

$$L^2 = \Delta z^2 + (L - \Delta x)^2 \quad (L: P4 \text{ から } Y \text{ 軸までの距離})$$
すなわち、

$$6.5^2 = (-0.062)^2 + (6.5 - \Delta x)^2$$

で表され $\Delta x \approx 0.0003\text{ mm}$ となる。同様に P5, P6 はそ

れぞれ 0.0005 mm, 0.0004 mm となり、回転による X 座標値の変化はわずかであることがわかる。したがって X 座標値の減少は主に平行移動によるものであり、P4, P5, P6 の X 座標値の変化量 ($4x$) と 2 点間距離 $D(2-4)$, $D(1-5)$, $D(0-6)$ の変化量 ($4d$) がそれぞれほぼ等しいことからわかるように、左右の部分間の距離の減少は、主に左右の部分が水平的に接近したために起こったと考えられる。

また、先に Z 座標値の変化を Y 軸まわりの回転によるためであると仮定したが、Z 座標値が負の方向、すなわち歯頸側方向へ変化するのは図 12 の矢印で示すように、P4, P5, P6 の左側の部分が歯頸側方向へ向かって Z 方向へ平行移動する場合とろう着部を中心として X 軸まわりもしくは Y 軸まわりに回転する場合が考えられる。

そこでまず、P4, P5, P6 の左側の部分がろう着部を中心として Y 軸まわりに回転したとすると、P4, P5, P6 の Y 軸まわりの回転角度は、左側の部分自体の変形がわずかであることから、ほぼ等しいことになり、各点の座標値の変化量は、各点から Y 軸までの距離と比例関係にあることになる。すなわち、Y 軸まわりの回転角度を ω 、各点の Y 軸までの距離を L 、各点の Z 座標値の変化量を $4z$ とすれば、三角関数により各点において $\sin \omega = 4z/L$ の関係が成立することになる。そこで今回の計測結果をそれぞれ代入してみると P4, P5, P6 は表 2 と図 10 により、

$$-0.062/6.5 \div -0.099/10.0 \div -0.095/10.5$$

($\div$: ほとんど等しい)

となり、Y 軸まわりの回転を想定すると計測結果と非常によく一致することがわかる。同様の手法を用いて X 軸まわりの回転を想定すると、P4, P5, P6 は、

$$-0.062/5.0 \neq -0.099/10.0 \neq -0.095/17.0$$

($\neq$: 等しくない)

となり、計測結果と一致しない。したがって、 $r(Z-X)$ で有意な変化がみられることからわかるように、Z 座標値の変化は主に Y 軸まわりの回転により起こったと考えられ、ブリッジの両端が歯頸側方向に向かって下がりろう着部が咬合面切端側方向に盛り上がった状態になっていることがわかる。

このように、ろう着部で起こる左右の部分の相対的な変位は、水平的な左右の部分間の距離の減少のほか、ろう着部を中心とする Y 軸まわりの回転が起こっており、この変位は左右の部分間の距離の減少に比べ、一見影響が少ないようにみえるが、支台歯と支台装置の関係を考えればわずかな回転であっても支台装置のマーゲン部で

注 図 9 下参照

図 12 左側の部分の Z 座標値が負の方向へ変化する
場合の変位の可能性

は大きな浮き上がりとなって現れる恐れがある。

Jelenko³²⁾ は、埋没ブロックの一面を加熱すると温度分布の差から膨張量に違いがでてブロックがそるように変形することを報告しており、今回の場合も埋没ブロックは比較的厚いため、下面に比べ温度の高い上面の膨張量が多くなりこのような変位が起こったのではないかと考えられる。また、左右の部分は上部である咬合面切端側が露出しており、下部の歯頸部側は埋没材で固定されているため、加熱されると上部は自由に膨張するのに対し下部は膨張が抑制されることになり、今回のような変位が起こったとも考えられる。

ろう着による被ろう着体間の距離の減少は、直線型の臼歯部ブリッジの近遠心長さの変化について多くの研究報告^{22,33-42)}があり、被ろう着体の熱膨張とろうの凝固収縮のためであるとしている。今回の結果はこの両者の影響と思われるが、特にろう着部に近づくに従って減少量が大きくなったのは、ろうの凝固収縮が主として影響しているのではないと思われる。今回使用したろう着用埋没材と合金の熱膨張率の関係は図 8 に示すとおりであり、いずれの原因にしる今回起こった左右の部分間の距離の減少は、埋没材の膨張がろうの凝固収縮や各部分の熱膨張によるろう着間隙の減少を十分補償出来なかったためではないかと考えられる。

野本ら⁴³⁾は、石膏系埋没材を使用した場合、埋没ブロックの温度が 700°C を越すと結合材である石膏が分解し、被ろう着体間の距離に大きな減少がみられたと報告している。今回使用した埋没材 CENDRES & METAUX 社製 CM ソルダリング・インベストメントは石膏を結合材としており、図 8 からわかるように 900°C 以上では

石膏の分解により収縮を起こしている。ろう着温度が $1,000^{\circ}\text{C}$ 以上である前ろう着では、埋没ブロックが 900°C 以上になることも予想され、埋没ブロック全体の分解収縮は考えられなくとも、左右の部分付近の埋没材の分解により、ろうの凝固収縮や各部分の熱膨張の影響がより大きく出たとも考えられる。

以上の結果より、ろう着後の変位は左右の部分自体の変形と左右の部分の相対的変位の両方によって起こっていることがわかった。しかしその量をみてみると、左右の部分自体の変位は D(0-3)、D(4-6) において原寸法に対し約 0.1% の距離の減少率であったのに比べ、左右の部分間の相対的変位はろう着部に最も近接した D(3-4) において原寸法に対し約 0.7% の距離の減少率を示し、ろう着後の変形は主に被ろう着体間の相対的変位によって起こっていることがわかる。

この変位に最も影響を及ぼすのは、被ろう着体の固定材と考えられ⁴⁴⁾、後ろう着では種々の解決方法が考案⁴⁵⁻⁴⁷⁾されているが、前ろう着ではろう着温度が高いため有効な材料の開発はみられず、やはり埋没材を使用せざるをえないのが現状である。したがって、埋没材の膨張率、強度、耐熱性、埋没ブロックの形態などについてより詳細に検討する必要があると思われる。

2. フレームの表面研削による変位

一般に表面研削の目的は、① 表面に付着した埋没材の除去、② 陶材と金属の接合部をシャープにすることによって、オーバーケル陶材の表面への露出の防止、③ 陶材との機械的結合や表面積の増加による結合力の増加、④ 鑄造体表面の微少な亀裂や気泡の除去、⑤ 表面研削前に生成した不安定な酸化被膜の除去、などが述べられ

ている⁴⁸⁾。理工学的な立場からみると、埋没材などはフッ化水素酸中に長時間浸漬すれば除去が可能であり、研削による機械的結合力が溶着強度におよぼす影響は少ないことが報告されている^{49,50)}。しかし前ろう着を行った場合はろうと陶材の溶着強度が弱いことが指摘¹⁵⁾されているため、焼成面に余分に流れたろうを除去するという点からも表面研削は必要不可欠な技工操作である。

西村²⁸⁾は、表面研削によってもわずかではあるが変形の起こることを指摘している。今回の結果では、表 3 に示すようにいずれの座標値、計測項目においても有意な変化はみられず、変位は認められなかった。これは、ろう着操作によってすでに鑄造応力などが開放されたため、著明な変位が現れなかったのではないかと考えられる。しかし、表面研削時の削除量や、研削材の違いによる加工ひずみが、ディギャッシングによる変位に大きく影響するという報告^{51,52)}もあり、山本⁵²⁾が指摘しているように、ワックスパターン製作時に正確な形態、厚さに形成して研削時の削除量を少なくし、よく切れる研削材を用いることも大切であろうと考えられる。

3. ディギャッシングによる変位

ディギャッシングの目的は、① 鑄造体に吸蔵されているガスの除去、② 鑄造体表面の汚染物の焼却、③ 合金表面に陶材との結合に重要な役割をはたす Sn, In, Fe, などの微量添加元素を拡散析出させ、質、色ともに良好な酸化被膜を生成させること⁵³⁾であり、陶材の溶着にはある種の合金を除けば必要不可欠な操作である。しかし適合性の面からみれば、変形はディギャッシング時に最も多く現れるといわれている⁵⁴⁾。

図 13 は、XY, XZ 各平面からみたディギャッシングによるフレームの変位の状態を模式図にしたものである。ディギャッシング時の変位は、すべての 2 点間距離および $\alpha(XYZ)$, $\beta(XYZ)$, $\gamma(X-Y)$, $\gamma(XYZ)$ に距離と角度の増大がみられ、ろう着時とは逆にフレーム自体の彎曲が開く変位が起こっていた (表 4)。

ディギャッシングによる変形の原因として宮田^{55,56)}は、鑄造組織の溶体化、樹枝状晶の拡散による熱膨張ヒステリシスの影響を上げ、Au-Pt-Pd 三元合金において白金量の多いものは熱膨張ヒステリシスが大きく、鑄造体の変形も大きかったと報告しており、安藤⁵⁴⁾は各種市販焼付用合金の熱膨張ヒステリシスの測定を行い、すべての合金は加熱、冷却するとヒステリシス曲線を描き、最大約 0.2% 原寸法より膨張したと報告している。今回使用した合金の組成 (表 9) も、安藤らが測定した

注 図 7 下参照

図 13 ディギャッシングによる変位

表 9 合金ユニゴールドの組成

成 分	分 量 (%)
Au	84.3
Pt	6.0
Pd	6.0
Ag	0.8
その他	2.9

注 メーカー表示組成

合金に類似しており、一般に鑄造体が膨張すれば彎曲も広がるため、本実験の結果は熱膨張ヒステリシスが影響しているのではないかとと思われる。しかし、熱膨張ヒステリシスは第1回目の加熱、冷却時に大きく起こるといわれており、今回はすでにろう着時に加熱、冷却が行われているため、それぞれのステップでどの程度であるかは不明である。

また山田ら⁵⁷⁾は、陶材焼成面の表面研削の影響を上げ、山本⁵⁸⁾は、合金板の一面を研削し加熱すると研削側にそると述べている。

今回の実験結果を左右の部分についてみると(表4)、D(0-3)、 α (XYZ)、D(4-6)、 β (XYZ)ともに距離と角度が増大しており、その開く方向を右側の部分の座標値の変化からみてみると、P1、P2、P3ともにY座標値の変化が最も大きく正の方向に変化しており、研削方向への彎曲の開きがみられ、研削による影響も考えられる。また、山本⁵⁸⁾のいう相乗効果によって起こったのではないかと考えられる。特に今回は、ディギャッシング前に初めて形態修正、表面研削を行ったため削除量が多かったこと、研削を陶材焼成面のみにとどめたため研削が片側のみであったこと、メーカー指示に従ったため加工ひずみが大きく出るといわれている⁵²⁾セラモメタルポイントを用いて研削したことなどがディギャッシング後の大きな変位の原因となったとも考えられる。

また Tuccillo ら⁵⁹⁾は、鑄造体の高温における自重によるたわみ、いわゆるサグの影響をあげており、小島⁶⁰⁾もたわみ量は約 800°C 付近から急激に増加したと報告している。今回使用した合金も約 1,040°C から著しく軟化しており(図8)、ディギャッシング時にもある程度の軟化が予想され、ブリッジのスパンも長くポンティック部の自重も重いことから、サグによる変位も考えられる。今回の実験では、フレームは各支台装置と正中部にポストを設置し保持した状態でディギャッシングを行ったためか、中央部が沈下するような典型的なたわみはみられなかったが、Z座標値が負の方向に変化しており、

また X 座標値、Y 座標値に比べ Z 座標値の標準偏差が大きく変化量がばらついていた。これは既製の焼成スタンドを用いたため保持が確実ではなく、たわみが複雑に起こったためではないかと考えられる。

田端²⁾、山本¹⁵⁾、加賀谷ら¹⁴⁾は、前ろう着法により製作したフレームは、ディギャッシングや陶材焼成サイクルの加熱操作によって、ろう着部が変形しやすい傾向にあると述べている。

また、Bryant ら¹⁷⁾は、ワンピース法で製作した試験体と、ろう着法を用いて製作した試験体のディギャッシング時の変形について実験を行っており、いずれの製作法においてもその変位量に差はみられず、むしろディギャッシング時の保持法が大きく影響したと報告している。

今回の実験結果をみてみると、ろう着部に最も近接した D(3-4) では 0.023 mm の距離の増大がみられたが、これは原寸法に対して約 0.2% の距離の増大率であり、左右の部分 D(0-3)、D(4-6) での距離の増大率がそれぞれ約 0.5%、0.4% であることから、ワンピースキャスト法で製作された部分に比べ、特にろう着部で大きな変位が起こったとは思われなかった。しかし、ろう着はフレームの中央部で行われているため、わずかな変位であっても両端部では大きな変位となつてあらわれると考えられる。

この他、ディギャッシング時の変位の原因としては Fe_3Pt 、 FePt_3 のような規則格子の生成、鑄造応力の開放などがあげられるが^{61,62)}、実際の技工操作上で関係してくるのは、フレームの削除量と研削方法、ディギャッシング時の温度と時間、ディギャッシング時の保持方法などであり、これらの点についてより詳細に検討する必要があると思われる。また山本⁵⁸⁾、小池⁴⁸⁾、山田ら⁵¹⁾は、研削前に前加熱処理を施しておくと、ディギャッシング時の変形が減少したと報告しており、この点についてもさらに検討する必要があると思われる。

4. オペーク陶材焼成による変位

オペーク陶材焼成による変位は、表5に示すようにいずれの座標値、計測項目においても有意な変化はみられなかった。これは、ろう着およびディギャッシングにより、鑄造応力や熱膨張ヒステリシスなどフレームに内在する変位の要因がすでに減少したことと、オペーク陶材は築盛量が少ないため、フレームを変位させるほど影響しなかったためではないかと考えられる。また陶材の焼成時は、各支台装置のみにポストを設置し保持した状態で焼成を行ったが、加熱温度が低いいためサグによるた

わみは認められなかった。

5. ボディー・インサイザル陶材焼成による変位

ボディー・インサイザル陶材焼成による変位は、表 6 に示すように D (0-6), D (1-5), r (X-Y), r (XYZ) でわずかに距離と角度の減少がみられ、彎曲が閉じるような変位が起こっていた。

陶材焼成による変位の原因には、陶材の焼成収縮および陶材と合金の熱膨張係数の差によって生ずる応力が考えられ、山田⁶³⁾は陶材が合金に対して相対的に厚い場合は陶材の焼成収縮が、薄い場合は陶材と合金の熱膨張係数の差によって生ずる応力が変形の原因であると述べている。また浅岡⁶⁴⁾は、陶材内の残留応力と変形を非静定梁の理論と有限要素法によって理論的に計算し、残留応力と変形は陶材と合金の熱膨張係数の差に直接比例すると報告している。宮内⁶⁾は、歪ゲージにより陶材内の残留応力を測定したところ、陶材の界面には陶材と合金の熱膨張係数の差によると思われる残留応力がみられ、これが陶材焼成による変形の大きな原因であろうと述べている。今回のブリッジについてみると、ボンティックや連結部を考えればフレームの合金は陶材に比べて十分に厚く、変位は熱膨張係数の差によって生ずる応力が大きく影響していると考えられる。

また、その変位の方向についてみると彎曲が閉じるように変位していた。一般に応力と変位の方向の関係は、熱膨張係数の異なる金属を組合せたパイメタルを考えると、加熱時は熱膨張係数の大きい（膨張率の大きい）側の界面に圧縮応力が、小さい側の界面に引張応力が発生し、熱膨張係数の小さい側に彎曲させようとする曲げモーメントが働く。また逆に冷却時には、熱膨張係数の大きい（収縮率の大きい）側の界面に引張応力が、小さい側の界面に圧縮応力が発生し、熱膨張係数の大きい側に彎曲させようとする曲げモーメントが働くことになる。

陶材焼成過程での陶材と合金は、このパイメタルと同じように加熱、冷却されるが、山本⁶⁵⁾は陶材が溶融している状態では陶材と合金は液体と固体のような関係にあることから相互の応力関係を考慮する必要はなく、冷却によって陶材が溶着し固体と固体の関係となつてからの応力関係が重要であると述べており、加熱時の応力がその温度での合金の弾性限度以内であるとすれば、陶材の溶融により加熱時の応力と変位は消失し溶着後冷却によって新たな応力と変位が生ずることになる。したがって焼成後の変位には冷却時の応力関係が大きく影響してくるのではないかと考えられる。

一般に合金の熱膨張係数は各温度区間においてほぼ一定であるが、陶材は温度区間によって熱膨張係数が大きく変化することが知られており、Tuccillo ら⁶⁶⁾は、冷却時初期には陶材の熱膨張係数が合金よりも大きく、陶材側に彎曲し、その後温度の下降とともに熱膨張係数の関係が逆転し逆に合金側に彎曲したと報告している。また栗原⁹⁾もスプリットリング状の試験体を用いた実験から同様の傾向のあることを報告しており、この現象を応力の面からみれば、冷却初期には陶材側の界面に引張応力、合金側の界面に圧縮応力が発生し、熱膨張係数の関係が逆転した後では陶材側の界面に圧縮応力、合金側の界面に引張応力が発生していることになる。しかし最終的な残留応力は陶材と合金の相対的な厚さの比率によって変化し、Tuccillo⁶⁶⁾は陶材と合金の複合体の厚さ(Hc)と陶材の厚さ(Hp)の比(Hp/Hc)が0.55以下もしくは0.70以上では陶材の界面には圧縮応力が残留し、0.55~0.65の間では引張応力が残留すると報告している。そしてこれは、冷却初期に生ずる応力が、陶材の薄いHp/Hcが0.55以下の場合は陶材の粘性流動(Viscous flow)によって緩和され、合金の薄いHp/Hcが0.70以上の場合は合金の圧縮流動(Compression flow)によって緩和されたためであろうと述べている。

この考えに従えば、今回のブリッジの陶材と合金の厚さの比(Hp/Hc)は、ボンティックや連結部において約0.3であることから陶材側の界面に圧縮応力が合金側の界面に引張応力が生じている状態にある。この応力は、合金側に彎曲させる曲げモーメントが働くことになり、その結果今回のようにフレームの彎曲が閉じるように変位したのではないかと考えられる。

陶材焼成時の変位の防止方法は、理工学的な立場から考えると、① 陶材と合金の熱膨張係数を一致させる、② 陶材の固化温度から常温までの冷却温度差のできるだけ小さい陶材を用いる、③ ブリッジのフレームのように合金が厚い場合は、サグレジスタンスの面からも弾性係数の高い合金を用いる、④ 陶材と合金の厚さを厚くする、などである⁵⁰⁾。

しかし実際には、① 陶材と合金のわずかな熱膨張係数の差による陶材内の残留圧縮応力は、強化ガラスと同様の原理で陶材の破折防止になるとも考えられている⁶⁷⁾こと、② 軟化温度の低い陶材が開発されている³⁶⁸⁾、長期にわたる臨床応用結果がいまだ不明であること、③ 一般に弾性係数の高い合金は非貴金属系の合金であるが、多数歯にわたるブリッジでは適合の良いフレームの鋳造やろう着が困難であること⁶⁹⁾、④ 審美的、生物学

表 10 陶材除去後の計測値とディギャッシング後の計測値差

三次元座標値			
Point	Δx	Δy	Δz
P1	0.001 (0.010)	0.007** (0.003)	-0.011 (0.008)
P2	0.000 (0.014)	0.009 (0.006)	-0.006 (0.011)
P3	-0.003 (0.016)	0.011 (0.012)	-0.020** (0.007)
P4	-0.006 (0.019)	0.012 (0.027)	-0.019 (0.027)
P5	-0.002 (0.021)	0.015 (0.032)	-0.016 (0.023)
P6	0.001 (0.027)	0.015 (0.031)	-0.012 (0.028)

unit: mm (): S.D.

二点間距離		角度	
Distance		Angle	$\Delta \theta$
D(0-3)	0.007 (0.007)	α (XYZ)	0.027 (0.063)
D(4-6)	-0.001 (0.004)	β (XYZ)	-0.032 (0.060)
D(0-6)	0.001 (0.027)	r (X-Y)	0.006 (0.101)
D(1-5)	-0.003 (0.016)	r (Y-Z)	-0.043 (0.141)
D(2-4)	-0.006 (0.008)	r (Z-X)	0.203 (0.405)
D(3-4)	-0.004 (0.005)	r (XYZ)	0.007 (0.101)

unit: mm (): S.D.

注 表2下参照

unit: degree (): S.D.

的に陶材と合金の厚さには制限があることなど未解決な点が多く、現段階では陶材の厚さが不均一にならないようにフレームを設計することが重要ではないかと考えられる。

6. グレージングによる変位

グレージングによる変位は、表7に示すようにわずかではあるがD(0-6), r (X-Y), r (XYZ)で距離および角度が増大しており、再び彎曲が開くような変位が起こっていた。しかしこの変位は、陶材焼成前すなわちディギャッシング後の状態まで回復しているわけではなく、ディギャッシング後と比較すれば今だ彎曲が閉じた状態にある。山本は⁷⁰⁾、陶材をくり返し焼成すると熱膨張係数が大きくなることを報告しており、今回の実験結果は数回の焼成により陶材の熱膨張係数が大きくなり金属との差が小さくなったため、前述したような応力が減少し

注 F: 位置の確定後(仮着後) S: ろう着後 P: 表面研削後 D: ディギャッシング後 O: オペーク陶材焼成後 B: ボディー・インサイザル陶材焼成後 G: グレージング後 R: 陶材除去後

図 14 一連の技工操作過程における変位・変形

て金属側への彎曲の程度が少なくなったのではないかと考えられる。

7. 陶材除去による変位

陶材除去による変位は、表8に示すようにわずかではあるがD(0-6), r (X-Y), r (XYZ)で距離および角度が増大しており、さらに彎曲が開くような変位が起こっていた。これは陶材の溶解除去により、フレームに残留していた応力が開放されたためではないかと思われる。

ここでフレームの変位における陶材の影響を推察するため、陶材除去後の計測値からディギャッシング後の計測値をひいた差を算出し、その結果を表10に示した。表でわかるように、P3のZ座標値以外すべての計測項目において有意な変化はみられず、陶材焼成によって起こった変位は陶材の除去によりほとんど回復していることがわかる。したがって陶材焼成によって起こるフレーム自体の変位は、合金のクリープなどの塑性的な変位ではなく、ボディー・インサイザル陶材焼成の項で推察したように、主に陶材と金属の熱膨張係数の差によって生ずる応力による弾性変形であると考えられる。

以上、各技工操作過程ごとにブリッジの変位・変形について考察してきたが、一連の技工操作過程における変位・変形の程度の推移を、各2点間距離の変化を代表としてみてみると図14のようになる。なお、その変化の度合は位置の確定後の2点間距離に対するそれぞれの過程における変化率で表した。図からわかるように、ブリッジの変位・変形が大きく起こったのはろう着時とディギャッシング時であり、ろう着時は左右の部分自体の変形{D(0-3), D(4-6)}はわずかで、主にろう着部での左右

の部分の相対的な変位によって左右のユニット間の距離 {D (3-4), D (2-4), D (1-5), D (0-6)} が減少しブリッジの彎曲が閉じるような変位が起こっていたが、ディギッシング時では、左右の部分自体の変形 {D (0-3), D (4-6)} とろう着部での変位 {D (3-4)} が重なり合い、左右のユニット間の距離が増大しブリッジの彎曲が開くような変位が起こっていた。また、ろう着時とディギッシング時の変位・変形は以後の陶材焼成過程における変位に比べて非常に大きく、技工操作過程終了時のグレージング後においても、その変位状態は変わらなかった。

実際には、陶材焼付金属冠ブリッジの製作は作業が複雑で、高度なテクニックを必要とする技工操作であるため、製作者の練度、製作方法によって適合性も大きく影響され、常に今回のように大きな変位・変形が起こるとは限らない。しかし、今回の実験でこのような変位・変形が起こったということは、程度の差こそあれ実際の技工操作時にも起こっており、適合が良く生体に調和した補綴物を製作する上では重大な問題になると考えられる。一般に、今回のように前ろう着法を用いてフレームを製作すると、以後のディギッシング時や陶材焼成時にろう着部が変位しやすい^{2,14,15)}といわれている。しかし今回の実験結果をみると、図 14 でわかるように特にろう着部が変位しやすいというわけではなく、フレームをろう着し連結した後にディギッシングや陶材焼成を行うために、小さい部分では変位の量も小さかったものが、連結したことによって変位が重なり合い大きな変位となって現れたためであると考えられる。そしてこのように各技工操作過程で変位が起こることを容認するとすれば、山本¹⁵⁾が推奨するように、ブリッジをいくつかの部分に分けてディギッシング、陶材焼成を完了した後、後ろう着法を用いて連結する方法が最良なのかもしれない。しかし Mclean⁷¹⁾ は、後ろう着法は熱衝撃によるクラックの発生、フラックスや埋没材の付着、陶材表面へのろうそのものの食い込みなどきわめて多くの問題がでくるので、陶材焼付金属冠に通常の金合金冠をろう着するような場合以外は推奨できないと述べている。また、後ろう着用のろうは融点が低いので、ろう着後ではシェード、形態の修正のための陶材の追加焼成ができないことや、陶材焼成後のポンティックを有するブリッジでは、一般にポンティックは粘膜をわずかに圧迫するような状態にあるため、口腔内試適や位置の確定、コアの採得が困難であることなど難点もあり、仮にこれらの問題が解決されたとしても、今回の実験結果と同様

にワンピースキャスト法で製作した部分にはかならず変位が起こるであろうし、これを避けるためにろう着カ所を増せばろう着による変位の問題が起こることになり、後ろう着法を用いたからといって適合性向上の根本的な解決とはならないと考えられる。

以上本研究の結果から、前ろう着法による陶材焼付金属冠ブリッジの一連の技工操作過程における変位・変形を最少とするには、まずろう着とディギッシングの過程に十分注意を払う必要があることが解った。

真に適合が良く一定の精度で補綴物を製作するためには、各技工操作過程で起こる変位・変形をそれぞれ最小にする方法について、今後さらに詳細に検討する必要があることが示唆された。

第 6 章 結 論

前ろう着法を応用して陶材焼付金属冠によりブリッジを製作する場合、一連の技工操作過程で生じる変位・変形の原因を解明するために、上顎両側中切歯、側切歯の 4 歯欠損に対して、4334 を支台とする彎曲部を含む 8 ユニットのブリッジを製作し、鋳造後ろう着のための位置の確定後から、前ろう着、ディギッシング、そしてオパーク、ボディー・インサイザル陶材築盛、グレージング等の陶材焼成時の数回の加熱処理の各過程と、陶材焼成後 46% フッ化水素酸中で陶材を溶解除去した後で、ブリッジのフレーム自体がどのように変位・変形するかを三次元的に計測し、変位の発現時期、量、方向について検討し以下の結論を得た。

1. 一連の技工操作過程を通して、ブリッジの変位が大きく起こったのはろう着時、ディギッシング時であった。また、わずかではあるがボディー・インサイザル陶材焼成時、グレージング時にも変位が起こっていた。しかしフレームの表面研削時、オパーク陶材焼成時には有意な変位は認められなかった。

2. ろう着時の変位は、被ろう着体（ワンピースキャスト法で製作された部分）自体の変形はわずかで、主に被ろう着体どうしが接近することによってブリッジの彎曲が閉じるような変位が起こっていた。

3. ディギッシング時の変位は、ワンピースキャスト法で製作された部分の変形と、ろう着部での変位によって、ブリッジの彎曲が大きく開くような変位が起こっていた。

また、ワンピースキャスト法で製作された部分に比べ、特にろう着部が変位しやすいという結果は得られな

かった。

4. 以上の結果より、多数ユニットによる前歯部の陶材焼付金属冠を支台とするブリッジを前ろう着で製作する場合には、その変位・変形を最少とし適合性を向上するためには、ろう着時、ディギャッシング時に十分注意して技工操作を行うことの重要性が示唆された。

稿を終るにあたり、本研究に終始ご懇篤なるご指導およびご高閣を賜りました日本大学歯学部 五十嵐孝義教授、佐藤友彦助教授、またご専攻の立場からご指導を賜りました日本大学歯学部 大橋正敬教授、大木一三教授、森谷良彦教授に深く感謝の意を表します。

あわせて、日頃ご助言ご鞭撻を頂きました補綴クラウン・ブリッジ学講座医局員各位、大学院生各位に対し、感謝の意を表するとともに、本研究に多大なるご協力を頂いた日本大学歯科病院第三技工室 長光靖夫、斉藤勝吉両技工士、(有)小貫 大橋規貴氏、(株)松風 羽毛田信氏、(株)デンテック 角田富夫氏、(株)東京技研 渡辺正幸氏、田中敬一氏、川路 仁氏に厚くお礼申し上げます。

また、本研究の一部は日本大学歯学部佐藤研究費によった。

Summary

The author, conducted the following studies in order to clarify the causes of displacements and distortions in the ceramometal fixed partial prosthodontics (bridge) using the pre-solderd joint that occur during the laboratory procedure. In conducting these studies, the author assembled a ceramometal fixed bridge consisting of 8 units with a canine and a first premolar on either side in the maxilla serving as the abutment, for the portion in which four teeth-the central incisors and lateral incisors on both sides-were missing. Then, in order to find out when the framework of the fixed bridge was displaced or distorted and what the extent and direction of such displacements or distortions were, three-dimensional deviations of the framework were measured. As a result of these studies, the following conclusions were reached;

1. Throughout the laboratory procedure, it was at the time of pre-soldering and degassing that a substantial displacement of the fixed bridge was noted. Some displacement, although a minor one, was found at the time of the firing of body-incisor porcelain and that of glazing, too. However, no significant displacement was noted at the time of surface-grinding and that of the firing of opaque porcelain.

2. As to the displacement at the time of pre-soldering, the distortion of the soldered body (the portion made with one-piece cast method) itself was minimal; a kind of displacement was seen where the curve of the fixed bridge closed mainly as a result of two soldered bodies coming close to each other.

3. At the time of degassing, the curve of the fixed bridge opened wide as a result of the distortion in the portion made with one-piece cast method and the displacement at the soldered portion.

文 献

- 1) 丸山剛郎, 橋本 収, 陳 次忠, 吉田 皓, 川島好仁, 佐々木睦, 中川喜晴, 尾島裕夫, 宮内修平, 下総高次: 金属焼付ポーセレンの予後に関する臨床的研究 [Ⅲ] 患者リコールによる審査結果について, 補綴誌, 16: 387~401, 1973.
- 2) 田端恒雄: 金属焼きつけ陶材の臨床結果と問題点, 歯材器誌, 32: 140, 1975, (パネルディスカッション抄録).
- 3) 名原行徳, 林 優美, 三好良一, 前谷照男, 中尾勝彦, 浜田泰三: 単独冠および架工義歯の陶材溶着鑄造冠の臨床的適合度について, 補綴誌, 25: 786~792, 1981.
- 4) 林詔一郎: 陶材焼付け貴金属鑄造冠の寸法精度に関する研究, 歯学, 60: 536~557, 1972.
- 5) 山田剛人: 陶材溶着鑄造冠の適合精度について一製作過程における問題点一, 歯科技工, 3 (2): 11~19, 1975.
- 6) 宮内修平: 金属焼付ポーセレン冠の適合性に関する研究一歯頸部辺縁形態ならびに陶材被覆形態について一, 補綴誌, 20: 63~86, 1976.
- 7) 中島利行: 陶材焼付鑄造冠の陶材焼成時における鑄造体の変形について, 歯医学, 39: 541~560, 1976.
- 8) 小森富夫, 北上徹也, 坂口邦彦, 澤村直明, 福住峯行: 貴金属系合金を用いた陶材溶着鑄造冠の鑄造時および陶材焼成過程における変形について一とくに Facial veneer type と Full veneer type との比較一, 補綴誌, 22: 1~5, 1978.
- 9) 栗原靖之: 陶材焼成時における焼付用合金の変形に関する実験的研究, 広島歯誌, 11: 243~262, 1979.
- 10) 金子行夫: 金属焼付陶材冠の適合性に関する研究一白歯部 (6) フルベークタイプの歯頸部辺縁形態の相違による影響一, 補綴誌, 24: 246~268, 1980.
- 11) Faucher, R.R. and Nicholls, J.I.: Distortion related to margin design in porcelain-fused-to-metal restorations, J. Prosth. Dent., 43: 149~155, 1980.
- 12) 松崎正誠: 金属焼付陶材冠の適合性に関する研究一非貴金属合金を用いた白歯部フルベークタイプについて一, 補綴

- 誌, 25: 329~347, 1981.
- 13) 石黒 直: 陶材溶着用貴金属合金の陶材溶着過程における組織変化と変形との関連性について, 愛院大歯誌, 19: 251~269, 1981.
- 14) 加賀谷忠樹, 矢作光昭, 志茂野博芳: 大型ブリッジの精度向上のための技工上の要点—特にメタルボンド・ポーセレン法使用の場合—, 歯科技工, 2 (6): 21~28, 1974.
- 15) 山本 眞: カラーアトラス ザ・メタルセラミックス: 初版, 65~66, クインテッセンス出版, 東京, 1982.
- 16) 山田剛人: Paper Core Technic による陶材のコンデンセーションについて—ブリッジにおけるワンベイク法を中心として—, 歯科技工, 4 (3): 23~32, 1976.
- 17) Bryant, R.A. and Nicholls, J.I.: Measurement of distortions in fixed partial dentures resulting from degassing, J. Prosth. Dent., 42: 515~520, 1979.
- 18) 加賀谷忠樹, 沢田満穂: 陶材焼付金属冠の鑲付け, (今田喬士編: 補綴臨床・別冊 金属焼付ポーセレン, 第1版, 医歯薬出版, 東京), 107~119, 1981.
- 19) Bridger, D.V. and Nicholls, J.I.: Distortion of ceramometal fixed partial dentures during the firing cycle, J. Prosth. Dent., 45: 507~514, 1981.
- 20) 富田 豊, 津江明伸, 守屋義雄, 大島修一, 小川力久, 佐田二三夫, 佐藤友彦, 五十嵐孝義: 歯科ろう着に関する研究 (第5報), 陶材焼付金属冠ブリッジ製作時のろう着および陶材焼成過程における変位の計測方法について, 補綴誌, 28: 1147~1160, 1984.
- 21) 長谷川二郎: 陶材焼付合金の鑄造に関する注意 (今田喬士編: 補綴臨床・別冊 金属焼付ポーセレン, 第1版, 医歯薬出版, 東京), 57, 1981.
- 22) 西村文夫, 山口重雄, 和久本貞雄: 各種鑲付法および一塊鑄造による橋義歯の精度について, 歯材器誌, 6: 41~46, 1961.
- 23) 水島 淋: 鑲着法でブリッジを製作する際, その適合精度に影響する因子について, 歯科技工, 3(1): 39~43, 1975.
- 24) Johnston, J.F., Mumford, G., Dykema, R.W.; 山田早苗訳: 最新ポーセレンテクニック, 第1版, 医歯薬出版, 東京, 206, 1970: Modern Practice in Dental Ceramics, First ed., W.B. Saunders Co., 1967.
- 25) 保母須弥也: オーラルリハビリテーション: 1版, 516, 医歯薬出版, 東京, 1974.
- 26) 田村勝美: アトラス 歯科技工大系: 初版, 391, クインテッセンス出版, 東京, 1980.
- 27) 大谷吉広, 田嶋英明, 妹尾輝明: セラミック製ソルダリング・スタンド固定法による陶材焼付ブリッジの炉内鑲着, Quintessence Dent. Technol., 9: 495~502, 1984.
- 28) 西村文夫: 歯科鑄造体の仕上げと熱処理による寸法変化について, 口病誌, 33: 5~29, 1966.
- 29) 井手喜美子, 総山孝雄: 鑄造体の埋没再加熱による変形について, 日歯材料器械会誌, 10: 21~27, 1964.
- 30) 富田 豊, 羽田京太郎, 石塚 享, 小泉政幸, 長島信也, 棧 淑行, 庄司喜則, 横倉正典, 中沢 清, 牟田 成, 五十嵐孝義: 歯科ろう着に関する研究 (第2報) ろう着専用埋没材の理工学的性質, 補綴誌, 27: 823~832, 1983.
- 31) 津江明伸, 富田 豊, 羽田京太郎, 行田克則, 守屋義雄, 小泉政幸, 中沢 清, 東風 巧, 大島修一, 五十嵐孝義: 歯科ろう着に関する研究 (第3報) リン酸塩系埋没材の理工学的性質, 補綴誌, 27: 1254~1261, 1983.
- 32) Jelenko, J.F. and Co.; 山田早苗訳: 最新版クラウン・ブリッジの製作法, 第2版, 94~95, 医歯薬出版, 東京, 1976: Crown and Bridge Construction A Handbook of Dental Laboratory Technology, 6th ed., Jelenko Dental Health Products, New York, 1968.
- 33) Steinman, R.R.: Warpage Produced by Soldering with Dental Solders and Gold Alloy, J. Prosth. Dent., 4: 384~395, 1954.
- 34) Rege, G.: Dental Soldering Procedures, Dent. Clin. N. Amer., Nov., 747~757, 1958.
- 35) 松葉 久: 鑲着用埋没材の研究, 歯材器誌, 3: 47~59, 1959.
- 36) Hollenback, G.M. and Shell, J.S.: The Accuracy of Dental Appliances Assembled by Soldering, J. Calif. Dent. Assoc., 41: 207~210, 1965.
- 37) Hollenback, G.M., Smith, D.D. and Shell, J.S.: The Accuracy of Dental Appliances Assembled by Soldering [II], J. Calif. Dent. Assoc., 42: 124~128, 1966.
- 38) 細田裕康, 三上憲一郎, 鶴貝隆男, 神田正一: 橋義歯の適合精度判定のための新しい評価法, 歯材器誌, 34: 233~241, 1977.
- 39) Pazzini, N.A., Pazzini, L.I., Araujo, P.A. and Lopes, E.S.: The accuracy of soldering investment, J. Prosth. Dent., 42: 530~533, 1979.
- 40) Willis, L.M. and Nicholls, J.I.: Distortion in dental soldering as affected by gap distance, J. Prosth. Dent., 43: 272~278, 1980.
- 41) 羽田京太郎, 富田 豊, 小泉政幸, 石塚 享, 長島信也, 棧 淑行, 牟田 成, 八木庸行, 浅野澄明, 五十嵐孝義: 歯科ろう着に関する研究 (第1報) 埋没材の種類による影響, 補綴誌, 26: 900~909, 1982.
- 42) 羽田京太郎: 歯科ろう着に関する研究—埋没材と予備加熱法との相違が適合精度に及ぼす三次元的検討—, 補綴誌, 28: 444~459, 1984.
- 43) 野本 直, 西村文夫, 山口重雄: ろう付け用埋没材とその使用条件, 歯材器誌, 6: 82~90, 1961.
- 44) 西村文夫: 陶材焼付用合金について, 歯材器誌, 31: 13~20, 1974.
- 45) 小柳津純男: 大型補綴物の鑲着法について—アルゴン雰囲気

- 気炉内鑲着および被鑲着体金属固定装置について一, 歯科 工, 6: 219~229, 1978.
- 46) 妹尾輝明, 植野正人: 考案したセラミック製被鑲着体固定装置を用いた陶材焼付ブリッジの 炉内 鑲 着, 歯科技工, 9: 233~238, 1981.
- 47) 太田晶次, 三宅宗次, 篠崎照泰, 木下浩志, 西田彰宏, 玉置敏夫: 陶材焼付冠の後ろう着時における被ろう着体固定装置の一考察, 歯科技工士学会会誌, 4: 32~35, 1983.
- 48) 小池君司: 適合性のよい金属焼付ポーセレン冠の製作—鑄造体の変形とその対策—歯科技工, 5 (6): 31~41, 1977.
- 49) Shell, J.S. and Nielsen, J.P.: Study the Bond between Gold Alloys and Porcelain, J. dent. Res., 41: 1424~1437, 1962.
- 50) 西山嘉重: 金属焼付ポーセレンの焼付強度に及ぼす因子について, 歯科学報, 70: 759~777, 1970.
- 51) 山田剛人, 尾崎双太郎: 陶材溶着鑄造冠の適合精度について—第5報 メタル・コーピングの適合精度—, 歯科技工, 7: 349~366, 1979.
- 52) 山本 眞: カラーアトラス ザ・メタルセラミックス; 初版, 215~216, クインテッセンス出版, 東京, 1982.
- 53) 山本 眞: カラーアトラス ザ・メタルセラミックス; 初版, 132~146, クインテッセンス出版, 東京, 1982.
- 54) 安藤進夫, 中村健吾, 並木 暢, 菅田忠昭, 鈴木利夫, 森山京介: 市販ポーセレン焼付用合金の 焼 成 時における変形, 歯理工誌, 13: 237~248, 1972.
- 55) 宮田 修: 陶材焼付用貴金属合金に関する基礎的研究 (第1報) Au-Pt-Pd 三元合金の熱膨張, 歯理工誌, 16: 38~46, 1975.
- 56) 宮田 修: 陶材焼付用貴金属合金に関する基礎的研究 (第2報) Au-Pt-Pd 三元合金の焼成時における変形, 歯理工誌, 17: 222~230, 1976.
- 57) 山田剛人, 横井次郎, 武田みどり: 陶材溶着鑄造冠の適合精度について—第2報 加熱処理による鑄造体の変形—, 歯科技工, 4 (5): 69~79, 1976.
- 58) 山本 眞: カラーアトラス ザ・メタルセラミックス; 初版, 211~215, クインテッセンス出版, 東京, 1982.
- 59) Tuccillo, J.J. and Nielsen, J.P.: Creep and Sag Properties of a Porcelain-Gold Alloy, J. dent. Res., 46: 579~583, 1967.
- 60) 小島静二: 陶材焼付用合金のサグレジスタンスに関する研究 (第1報) 測定法と解析, 歯理工誌, 22: 21~28, 1981.
- 61) 中村健吾: 陶材焼付時の変形, DE, 30: 1~5, 1974.
- 62) 野口八九重: ディギヤッシングの理論, 歯科技工, 4 (1): 39~48, 1976.
- 63) 山田剛人, 大池洋治: 陶材溶着鑄造冠の適合精度について—第4報 陶材の焼成による鑄造体の変形—, 歯科技工, 6: 344~357, 1978.
- 64) 浅岡憲三, 桑山則彦: 金属焼付陶材の機械的性質に関する検討 (第2報) 焼成後の残留応力と変形について, 歯科材料・器械, 1: 10~16, 1982.
- 65) 山本 眞: カラーアトラス ザ・メタルセラミックス; 初版, 180~181, クインテッセンス出版, 東京, 1982.
- 66) Tuccillo, J.J. and Nielsen, J.P.: Shear Stress Measurements at a Dental Porcelain-Gold Bond Interface, J. dent. Res., 51: 627~633, 1972.
- 67) 山本 眞: カラーアトラス ザ・メタルセラミックス; 初版, 161~162, クインテッセンス出版, 東京, 1982.
- 68) 荻野征一: 低溶陶材をポーセレンワークにどう生かすか; (佐々木一高編: 別冊 ザ・クインテッセンス メタルセラミックスを考える, 初版, クインテッセンス出版, 東京), 13~21, 1983.
- 69) 仁科匡生, 木下文雄: 非貴金属合金使用陶材焼付冠の鑲付について—粉末鑲を用いた前鑲付, イオン・スパッタリング法応用の後鑲付—, 歯科技工, 9: 507~521, 1981.
- 70) 山本 眞: カラーアトラス ザ・メタルセラミックス; 初版, 175~179, クインテッセンス出版, 東京, 1982.
- 71) Mclean, J.W.: 保母須弥也, 野口八九重 共訳: マクリーンの 歯科陶材学, 第2巻, 初版, 357, クインテッセンス出版, 東京, 1983: The Science and Art of Dental Ceramics, 2, First ed., Quintessence Publishing CO., Chicago, 1980.