原 著 論 文

加熱重合型床用アクリルレジンの重合ひずみ

I. 平板ダンベル型試験体の室温徐冷

川良美佐雄 木本 統 小見山 道 三浦 延亜
小林 紀彦 村上 洋 加藤 吉昭 小松 光一*
根本 君也*

Distortion of Heat-Activated Acrylic Denture Base Resin

I. Flat Dumbbell Specimens on Bench-Cooled

Misao Kawara, Suguru Kimoto, Osamu Komiyama, Nobutsugu Miura,
Norihiro Kobayashi, Hiroshi Murakami, Yoshiaki Kato, Koichi Komatsu*
and Kimiya Nemoto*

Abstract : This study was done to clarify the distortional behavior of heat-activated acrylic resin through processing. The temperature and distortion of flat 2 mm dumbbell specimens were measured with the lapse of time by using thermocouples and Rosette strain gauges.

The results obtained were as follows :

1. After heating at 70°C over a period of 90 minutes during processing, the strain in the specimen produced the tensile strain and the specimen showed a tendency to expand in this stage.
2. During processing, polymerization shrinkage was not observed. It appears, therefore, that reaction shrinkage minimally influences this slender and long specimen.
3. During bench-cooling, the specimen contracted coincidentally with the decrease of temperature. The amount of distortion in the middle of the specimen was 3/5 against that of both sides, as both sides were restricted by stones.
4. Immediately after removing from the flask, the contraction in the middle was increased because of elastic recovery, as a result, the differences between the middle and both sides decreased.

Key words : distortion, shrinkage, acrylic denture resin, thermocouple, strain gauge

日本大学松戸歯学部補綴学教室第 I 講座

*日本大学松戸歯学部理工学教室

Department of Complete Denture Prosthodontics, Nihon University School of Dentistry at Matsudo

*Department of Dental Materials, Nihon University School of Dentistry at Matsudo

平成 5 年 1 月 12 日受付

I. 緒 言

義歯床用材料としての加熱重合型アクリルレジンは、半世紀以上にわたって臨床で使用され^{1,2)}審美性、操作性、機械的性質などが適しているために、高分子

材料の発達した現在においても広く用いられている。

しかし、methymethacrylate は重合反応によって 21% の収縮をし、ポリマーを 35% 加えた粉液重合時に 7% の体積収縮を生じ、線収縮では約 2.5% になり、また熱膨張係数が $81 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ といわれているので³⁾、重合終了から取り出し時の室温に低下するときにおよそ 0.5% の線収縮が生じることになる。石こう型中における重合では、これらの要因と収縮を拘束する形態や摩擦などとの関連によって、義歯が収縮したり、変形あるいは残留ひずみが生じているものと考えられ、さらに収縮については粘膜面の形態に対する収縮と垂直方向の収縮で臨床的な意味が異なる。

重合による変形は、重合した後、原型に戻した場合の浮き上がり量、あるいは寸法変化として測定されている⁴⁻¹⁶⁾が、重合収縮と熱収縮の原因を区別し、相互の関係について検討した報告はみられず、レジン硬化物と石こうの熱膨張係数の差によるひずみが推測される^{17,18)}にとどまっている。

著者らは、義歯床の変形について、温成後の熱収縮に着目して検討を試みてきたが¹⁹⁾、義歯形態を模した実験床の形態では収縮の大きさを定量的に論ずることが困難であるために、より単純な形態の試験体を用いて、加熱重合型床用アクリルレジンの温成中ならびに温成後の一連の基礎的挙動を検討することができれば、収縮変形の実態を解明する端緒となると考え、一連の研究を開始した。これにより、義歯床のより良好な寸法安定性ならびに適合性を得るための温成法を検索することを目的としている。

本実験では、平板ダンベル型試験体について、熱電対およびひずみゲージを用い、通常の湿熱温成法と室温徐冷での温度変化とひずみ挙動について検討したので、その結果について報告する。

II. 材料および方法

1. 使用ひずみゲージの検定

本実験で使用したひずみゲージ（3軸ロゼットゲージ、KFG-1-120-D 17-11 N 30 C 2、共和電業社）は自己温度補償型であるが、実験にさきだち、熱膨張係数 $0.07 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の熔融石英にゲージおよび熱電対をシアノアクリレート系接着剤にて固定し、乾熱条件下で室温から約 110°C 上昇させ、ゲージ特性について検定した。

図 1 試験体寸法

2. 試験体

本実験で用いたダンベル型試験体寸法を図 1 に示す。試験体作製に用いたシリコン原型は、付加型シリコン印象材（エクザフレックス、ジーシー）で作製し、中央部の長さ 50 mm、幅 10 mm、厚さ 2 mm の寸法とした。この原型をガラス練板上に置き、硬質石こうを用いて石こう陰型を作製し、上顎義歯用フラスコ（ハノウ社）の下盆中央に普通石こうでガラス圧接面がフラスコ辺縁と同じ高さとなるよう埋没した。上盆はシリコン原型上に硬質石こうを注入し、その後普通石こうを注入する 2 次埋没法で行った。石こう硬化後、シリコン原型を取り除き、ひずみゲージのリード線および熱電対の通路をフラスコ辺縁まで形成し、アルギン酸系レジン分離剤（アクロセップ、ジーシー）を塗布した。レジン填入は、埋没操作完了後約 24 時間で行った。

材料は加熱重合型床用レジン（アーバン、松風）を、メーカー指示に従って、 0.45 ml/g の粉液比で使用した。温度およびひずみの計測準備は、餅状期レジンを填入して試圧成形後、図 2、および図 3 に示すように、ひずみゲージを試験体中央部ならびに両端部の 3 カ所、および銅コンスタンタン熱電対を中央部ゲージ右に、試験体厚さ約半分の深さに埋入した。ひずみゲージおよび熱電対を埋入装置後クランピングしたフラスコは、室温にて 15 分間放置したのち、温成を開始した。以後、試験体両端部ゲージを第 1 および第 3 ゲージ、中央部ゲージを第 2 ゲージとする（図 2）。

3. 温成方法および温水保管

温成はキュアリングユニット（ハノウ社）を用い、 70°C 90 分間、その後約 60 分間かけて 100°C へ温度を上昇させ、 100°C 到達後 30 分間繋留した。温成完了後、キュアリングユニットから取り出し、室温に達するまで徐冷した。室温到達後、ただちに試験体を石こ

図2 熱電対およびゲージ埋入位置

図3 取り出し直前の試験体

う型から取り出し、15分後に37°C温水中へ浸漬保管した。

4. 計測方法

試験体の温度変化ならびに各部位におけるひずみ量変化の計測は静ひずみ測定器(UCAM 70 A, 共和電業社)およびその内蔵スキャナーを用い、温成開始から、温水保管後1週間まで経時的に行った。測定の間隔は温成開始から、温水保管15分までは5分間隔、その後の温水保管中は3時間間隔とした。

温成開始から温水保管1週間の温度ならびにひずみ量の経時的測定を5個の試験体について行い、また、試験体の熱膨張の補正値は、温水保管24時間までの経時変化を計測後、室温水中から100°Cまでの上昇変化から求め、3個の試験体について行った。したがって、実験に供した試験体の数は8試験体である。

得られたデータはパーソナルコンピュータに取り込み、ゲージの熱膨張係数による温度補正を行ってひずみ量とした。補正後のひずみ量から、温成開始時を原点とした各実験過程での最大主ひずみ、最小主ひずみ、および角度を算出し、測定値の平均値と標準偏差を求め、各部位間における有意差検定を行った。

図4 ひずみゲージ検定曲線

図5 試験体温度の経時変化例

III. 結 果

1. ひずみゲージの検定

溶融石英に貼ったひずみゲージの、温度変化に対するひずみ量の関係を図4に示す。溶融石英および熱電対を用いてゲージを検定した結果、本実験で使用したロゼットゲージは、各軸ともに100°Cまで直線関係であることが確認された。本ゲージの使用範囲である100°C以上においてはやや不安定となり、104°C以上では計測不可であった。

2. 試験体温度の経時変化

試験体温度の経時変化の1例を図5に示す。70°C温水中へフラスコ投入後、試験体温度は徐々に上昇し、約30分で70°Cに達し、その後一定温度を保った。70°C温水中で90分加熱後、温度設定を100°Cへ変更し徐々に水温を上昇させ、設定変更から約1時間経過した。

図 6 試験体最大主ひずみ量の経時変化例

後に試験体温度は 100°C となり、温成完了まで温度変化はみられなかった。

温成完了後、温浴槽からフラスコを出し、室温で徐冷した場合、試験体の温度は放冷開始後約 90 分までは速やかに下降し、3 時間～3 時間半で室温 (24±1°C) 近くに達した。

試験体温度の放熱速度が 0.2°C/5 分以下となった時点で室温到達とみなし、フラスコをあけ、石こうモールドから試験体を取り出したが、試験体取り出し直前から直後にかけては 1～2°C 温度が低下した。その後、温水中へ浸漬するまでの 15 分間は温度変化が認められなかった。試験体は温水浸漬後ただちに 37°C へ上昇し、以後一定温度で経過した。

3. 試験体のひずみ量の経時変化

第 1, 第 2, および第 3 ゲージ各部位における最大主ひずみの経時変化の 1 例を図 6 に示す。また、各部位での、温成開始から温水保管 7 日間にわたる、各実験過程における最大主ひずみ量および最小主ひずみ量の平均値と標準偏差をそれぞれ表 1 および表 2 に、またそれをグラフ化したものを図 7 および図 8 に示す。図 9 に温成中、図 10 に取り出し時の、最大および最小主ひずみを測定部位ごとにベクトルで示したものを示した。

1) 温成開始から温成完了まで

最大、最小主ひずみは第 1 から第 3 の各部位ともに温成開始後、温度上昇に伴って引張りひずみを示した (図 9)。すなわち、70°C 温浴槽へフラスコを投入して温成を開始した直後から、試験体温度が 70°C に達するまでの約 30 分間は温度上昇に伴う膨張ひずみがみられ、その後の約 60 分間にわたる繫留時では、ひ

表 1 各過程における最大主ひずみ量

	第 1 ゲージ	第 2 ゲージ	第 3 ゲージ
70°C 90 分繫留後	1675(223)	1723(254)	1685(236)
100°C 到達時	1965(162)	2028(176)	1962(217)
温成完了時	1994(192)	2031(168)	2120(185)
取り出し直前	-3141(302)	-1229(248)	-3020(335)
取り出し直後	-3786(226)	-2801(229)	-3633(244)
温水保管直後	-3009(315)	-2334(221)	-2951(310)
温水保管 1 日	-2990(355)	-2423(263)	-2816(308)
温水保管 2 日	-2898(546)	-2318(339)	-2668(692)
温水保管 3 日	-2752(501)	-2231(315)	-2581(682)
温水保管 4 日	-2701(553)	-2110(392)	-2452(689)
温水保管 5 日	-2649(573)	-2036(445)	-2388(693)
温水保管 6 日	-2554(553)	-1974(419)	-2293(688)
温水保管 7 日	-2502(576)	-1922(452)	-2246(711)

()SD 単位: μst

表 2 各過程における最小主ひずみ量

	第 1 ゲージ	第 2 ゲージ	第 3 ゲージ
70°C 90 分繫留後	1283(271)	1323(280)	1289(327)
100°C 到達時	1552(298)	1571(324)	1585(381)
温成完了時	1578(327)	1574(369)	1519(415)
取り出し直前	-4443(431)	-5011(501)	-4097(444)
取り出し直後	-4287(289)	-4723(445)	-4383(280)
温水保管直後	-3585(354)	-4051(499)	-3779(464)
温水保管 1 日	-3416(296)	-3684(633)	-3532(545)
温水保管 2 日	-3420(697)	-3563(885)	-3358(637)
温水保管 3 日	-3322(708)	-3472(875)	-3270(632)
温水保管 4 日	-3195(754)	-3356(905)	-3139(632)
温水保管 5 日	-3117(818)	-3302(929)	-3064(643)
温水保管 6 日	-3007(833)	-3222(920)	-2957(646)
温水保管 7 日	-2933(884)	-3191(950)	-2893(691)

()SD 単位: μst

ずみ量がわずかな増加にとどまって、大きな変化がみられなかった。70°C から 100°C へ至る温度上昇区間では膨張ひずみ量は若干増加する傾向を示した。100°C 到達から温成完了に至る 30 分間においては変化がみられず、ほぼ一定の傾向を示した (図 6, 7)。

2) 温成完了から試験体取り出し直前まで

温成完了後、室温で徐冷した場合、フラスコをとり出した直後から、温度の低下に伴って各部位で最大、最小主ひずみともに圧縮ひずみを示し、試験体は収縮する傾向を示した (図 10)。

最大主ひずみをみると、徐冷開始直後 5 分間では各部位とも同様な収縮をみるが、その後は、第 1, 第 3 ゲージと第 2 ゲージでは異なる挙動を示した。すなわち、第 1, 第 3 ゲージでは温度低下に伴う収縮ひずみがみられるのに対し、第 2 ゲージでは第 1, 第 3 ゲー

図 7 最大主ひずみ量変化

図 8 最小主ひずみ量変化

図 9 温成中の最大主ひずみおよび最小主ひずみ

ジと比較して有意に低い収縮ひずみ量しか示さなかった(図 6, 7)。第 2 ゲージの温成完了から取り出し直前に至る収縮ひずみ量は第 1, 第 3 ゲージの 3/5 であった。

最小主ひずみでは、第 2 ゲージが第 1, 第 3 ゲージと比較して有意にひずみ量が大なる結果であった(図 8)。

3) 試験体取り出し直前から直後にかけて
室温到達後フラスコをあげ、石こう型から試験体を取り出した前後を比較すると、最大主ひずみにおいては、第 1, 第 3 ゲージの収縮ひずみ量はわずかな増加であったが、第 2 ゲージ部においては大きく増加し、その増加量は第 1, 第 3 ゲージのひずみ量の約 2.5 倍の値を示した(表 1, 図 7)。第 2 ゲージの収縮ひず

図 10 取り出し時の最大主ひずみおよび最小主ひずみ

み量は取り出しによって大きく増加するが、まだ第1, 第3ゲージのひずみ量と比較すると有意に小さかった。

最小主ひずみ量をみると第1, 第2ゲージでは収縮の減少傾向がみられるが、第3ゲージ部ではやや増加した(表2, 図8)。

4) 試験体とり出し直後から温水保管7日間について

とり出し直後から温水保管直後では、最大主ひずみ、ならびに最小主ひずみともに第1, 第3, および第2ゲージにおいて温度上昇に伴う収縮ひずみ量の減少がみられる(図7, 8)。

温水保管直後から保管1日にかけては、最大主ひずみの第1, 第3ゲージと第2ゲージで異なる挙動を示した。すなわち、第1, 第3ゲージでは、わずかではあるが、収縮ひずみ量の減少がみられるのに対し、第2ゲージではわずかに収縮ひずみ量の増加を示し、この時点でもまだ収縮傾向が続く結果をみた。この間の最小主ひずみ量は、各部とも収縮ひずみが減少する傾向を示し、また各部位間のひずみ量の差はみられなかった。

保管2日では、最大、最小主ひずみともにほぼすべての部位において収縮ひずみ量が減少する傾向であり、以後7日目までゆるやかにひずみが減少し、長軸方向の最大主ひずみで約2,200 μst に、直交方向の最小主ひずみで約3,000 μst に達した。

図 11 温水保管24時間後試験体における温度最大主ひずみ曲線

4. 試験体温度ひずみ曲線

温水保管24時間経過後の試験体を室温水中に浸漬し、100 $^{\circ}\text{C}$ まで温度を上昇させた場合の最大主ひずみにおける温度・ひずみ曲線を図11に示す。

温度上昇に伴い、膨張ひずみが約95 $^{\circ}\text{C}$ までほぼ直線的に増加した。95 $^{\circ}\text{C}$ 以上においてはその増加量は緩慢となる結果を示した。また、得られたデータから、ロゼットゲージ3軸のうち試験体長軸と平行な軸の測定値から、試験体の熱膨張率を求め、84.4 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を得た。

IV. 考 察

1. 試験体の温度変化について

本実験方法においては70 $^{\circ}\text{C}$ 温水中へプラスコ投入後、約30分で試験体温度が70 $^{\circ}\text{C}$ へ達したが、これは試験体サイズの異なる Harman²⁰⁾の60 $\times$ 65 $\times$ 3 mmにおける約20分、より厚い試験体を用いた Faraj²¹⁾の直径50 $\times$ 8 mmでの約30分、および木村²²⁾の圧力センサーを含んだ直径20 $\times$ 9 mmにおける約20分とほぼ同様の傾向であった。また、温成中にラジカル重合による発熱ピークが8試験体すべてに認められなかったが、これは Harman²⁰⁾、丸子²³⁾の報告でも示されているように試験体の厚さが薄く、レジン容量が小さいため、発熱はただちに放散されたものと思われる。また、測定インターバルが5分間隔であるため、計測できなかったことも考えられるが、いずれにしても大きな発熱はなかったものと思われる。

温成完了後ただちに室温空气中で徐冷した場合、放冷開始直後から試験体中央部の温度は直線的に下降し、石こう型内も環境温度に速やかに応答しているこ

とがわかる。

室温到達後、試験体を石こう型から取り出し 37°C 温水中へ保管したが、Braden²⁴⁾ はアクリルレジン の吸水に関する研究において、温度の異なる水中 (22.5 および 37.4°C) で保管した場合、24 時間後では差がみられるが、1 週間後はどちらもほぼ平衡に達し、飽和吸水量には浸漬保管温度の影響がないと報告している。本実験では、1 ゲージ法で測定するために温度変化を少なくする目的で 37°C 水中保管とした。

2. ひずみ量変化について

1) 温成中の挙動

餅状レジン を填入したフラスコを 70°C 温浴槽に投入すると、最大主ひずみ、最小主ひずみともに引張りひずみが発生し、試験体温度がほぼ 70°C に到達したと思われる 30 分後には、最大主ひずみで約 1,200 μst のひずみを生じ、その後定常的な増加を示して、70°C 90 分後では約 1,700 μst 、100°C 到達時には 2,000 μst に達した (表 1, 図 6)。

温成開始直後の引張りひずみは、餅状レジン の膨張傾向を示すひずみとみることできるが、硬化前の餅状レジン とゲージの結合はそれほど強いものとは考えられず、むしろゲージのベース材の熱膨張など、他の要素によってひずみが生じているとも考えられる。

しかし、試験体は 70°C 90 分後では硬化していると考えられ、温水保管 24 時間後の試験体から得られた熱膨張係数 $84 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と温成中の試験体全体の等方的な膨張 (図 9) を合せみると、70°C 90 分から 100°C 到達時までの最大主ひずみ変化量約 300 μst はあまりに小さく、自由膨張が規制されたものと思われる。立野²⁵⁾ は超硬質石こうの熱膨張係数が $14.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であったことを報告しているが、このことから、本実験の試験体の 70°C から 100°C に至る最大主ひずみ変化量は、石こう型の熱膨張量に近い値であり、温成中においては、石こう型内のレジン は石こう型の膨張に同調した膨張を生じることが示唆された。また、重合収縮による圧縮方向のひずみは観察されなかった。

以上のことから、本試験体ではレジン の重合収縮は温成中の熱膨張に補償されており、寸法変化に影響しないと考えられる。

2) 室温徐冷開始から取り出し直前まで

この過程における第 1 ならびに第 3 ゲージと第 2 ゲージでの、試験体長軸方向における収縮挙動の相違は、試験体の形状によるものであり、明らかに第 2

ゲージの中央部は石こう型によってレジン の熱収縮が拘束を受けている。試験体両端部の第 1, 第 3 ゲージの最大主ひずみは放冷開始から取り出し直前までに約 5,100 μst の変化を示している (表 1)。このときの温度差は 73°C であるから、試験体レジン の熱膨張率を乗じた収縮ひずみは約 6,100 μst になり、試験体両端部のひずみ量はこれに近い値を示し、ほぼ自由に熱収縮しているものと思われる。

しかし、第 2 ゲージの収縮ひずみ量は放冷開始直後では第 1, 第 3 ゲージとほぼ同じであるが約 5 分後から収縮割合が少なくなり、温成完了から取り出し直前にかけての最大主ひずみ収縮ひずみ量は 3,300 μst であった。すなわち、試験体中央部の収縮は、両端が石こうによって抑制されているために自由な収縮ができず、そのため両端部のレジン を引張り、さらに取り出し直前から直後にかけて収縮する約 1,600 μst に相当するひずみは、応力として内部に蓄えられていると思われる。

また、取り出し直前の試験体各部の最大主ひずみおよび直交する最小主ひずみ (図 10) をみると、両端部では最小ひずみがわずかに大きい値であるが、中央部の第 2 ゲージでは長軸方向の最大主ひずみ 1,229 μst に対して、直交方向の最小主ひずみは 5,011 μst と 4 倍の差を生じており (表 1, 2)、両端の最小主ひずみの平均値 4,270 μst より、12% 大きく、直交方向の値がポアソン比に応じて加算されていると考ええると、試験体の長軸方向に引張りの応力が残留していることが裏付けられる。

3) 取り出し直前から温水保管 7 日まで

試験体を石こう型から取り出すと各部位でのひずみは急激に増加し、温成完了時から取り出し直前までのひずみ量に対して第 1, 第 3 ゲージで 12%、第 2 ゲージで 48% の増加を示した。

これは、放冷中の試験体各部位に生じた内部応力の、石こう型からの取り出しによって解放された弾性回復量であり、また、第 1, 第 3 ゲージの弾性回復量は石こうの摩擦がなくなったために生じた大きさであるが、第 2 ゲージでは両端の形態によって支えられていた弾性回復が加わったものと思われ、試験体中央部に大きな応力が発生していたことをさらに裏付けた。いずれにしても寸法変化あるいはひずみの大部分は離型時に生じるとした Woelfel ら¹⁸⁾ の報告と合致する。

しかし、取り出し直後の第 1, 第 3 ゲージと第 2 ゲージとの最大主ひずみは約 900 μst の差があり、残

留ひずみがプラスコ取り出し後にも存在するのではないかと思われる。

温水中へ浸漬保管すると温度の上昇に伴って収縮ひずみ量は減少するが、保管 1 日では、両端の拘束を受けた試験体中央部の最大主ひずみはわずかに収縮傾向を示し、遅延弾性によるいわゆる履歴現象を示したものである。1 日以降は吸水による影響で両端部ひずみと同様にわずかな収縮ひずみ量の減少を続けたものである。

以上のことをまとめると、温成中においては、石こう型内のレジンが石こう型の膨張に同調した膨張を生じることが推察された。

100°C 温成後室温まで冷却すると、試験体中央部は 3,300 μst 、両端部は 5,100 μst の収縮をし、取り出すと前者は 1,600 μst 、後者は 600 μst の弾性回復をし、石こう型中で拘束されていたひずみは取り出し後に回復して、両者の差は 15% となった。

すなわち、冷却によって 5,800 μst (0.58%) の熱収縮を生じたこととなり、温度差 73°C、熱膨張率 84×10^{-6} から求めた熱収縮の 6,100 μst とほぼ一致した。

したがって、レジンの重合収縮は試験体寸法に大きな影響を与えることはなく、寸法変化のほとんどが熱収縮によることが明らかになった。

V. 結 論

加熱重合型床用アクリルレジンについて、熱電対およびひずみゲージを用い、平板ダンベル型試験体の温成開始から温成後室温徐冷、取り出し、そして温水保管 7 日間にわたる温度ならびにひずみ量変化について経時的に検討した結果、以下の結論を得た。

1. 70°C 温水中へ投入した試験体の温度はただちに上昇し、70°C 到達後は一定を保ち、反応による発熱ピークはみられなかった。

2. 温成中、70°C 90 分以降では、試験体のひずみは引張りひずみを示し、試験体は膨張する傾向を示した。

3. 室温徐冷開始後は、温度の下降に伴って収縮ひずみ量が増加し、温成完了から室温到達までの試験体中央部の収縮ひずみ量は、両端部の拘束を受け、両端部の 3/5 であった。

4. 試験体を取り出した直後、中央部は両端部の 2.5 倍の弾性回復による収縮ひずみの増加がみられ、

温成開始から取り出し後のひずみにおける、部位間の差は少なくなった。

5. 温水保管後、両端部ではただちに、中央部では 1 日で収縮傾向はとまり、以降 7 日までゆるやかに収縮ひずみ量は減少した。

本論文の要旨の一部は平成 4 年度第 87 回 (徳島, 1992 年 6 月) および第 88 回 (東京, 1992 年 10 月) 日本補綴歯科学会学術大会において発表した。

文 献

- 1) Gieler, C.W. and Skinner, E.W.: Physical properties of some of the newer denture plastics, *J Dent Res*, 18: 381~387, 1939.
- 2) 永井一夫: 合成樹脂の歯科的応用に関する総説, *歯科月報*, 20: 286~291, 1940.
- 3) Phillips, R.W.: *Science of dental materials* 9th ed., 187~199, W.B. Saunders, Phila., 1991.
- 4) Sweeney, W.T., Paffenbarger, G.C. and Beall, J.R.: Acrylic resin for dentures, *J Am Dent Assoc*, 29: 7~33, 1942.
- 5) Pryor, W.J.: Internal strains in denture base materials, *J Am Dent Assoc*, 30: 1382~1389, 1943.
- 6) Skinner, E.W. and Cooper, E.N.: Physical properties of denture resins, Part I. Curing shrinkage and water sorption, *J Am Dent Assoc*, 30: 1845~1852, 1943.
- 7) Mowery, W.E., Burns, C.L., Dickson, G. et al: Dimensional stability of denture base resins, *J Am Dent Assoc*, 57: 345~353, 1958.
- 8) Anthony, D.H. and Peyton, F.A.: Dimensional accuracy of various denture base materials, *J Prosthet Dent*, 12: 67~81, 1962.
- 9) Woelfel, J.B., Paffenbarger, G.C. and Sweeney, W.T.: Dimensional changes in complete dentures on drying, wetting and heating in water, *J Am Dent Assoc*, 65: 465~505, 1962.
- 10) 三宅茂樹: 歯科用レジンの重合時に発生する内部応力に関する研究, *九州歯会誌*, 31: 471~485, 1978.
- 11) McCabe, J.F. and Wilson, H.J.: The use of differential scanning calorimetry for the evaluation of dental materials, *J Oral Rehabil*, 7: 235~243, 1980.
- 12) 川良美佐雄: 床用レジンの填塞・温成法に関する補綴学的検討—上顎総義歯について—, *日大口腔科学*, 7: 375~388, 1981.
- 13) 古谷 容: 加熱重合レジンの各種填塞・温成法に関する研究—下顎総義歯について—, *日大口腔科学*, 9: 366~379,

- 1983.
- 14) 羽生哲也, 稲永昭彦, 武内哲二ほか: 床用レジンの重合変形について 第1報 上顎総義歯粘膜面部の三次元的検討, 補綴誌, 29: 310~318, 1985.
- 15) 潤米宏仁, 久保田幸生, 山田博明ほか: 調製過程における総義歯の三次元的寸法変化 第1報 人工歯の変位量および義歯床の形状変化について, 補綴誌, 30: 155~168, 1986.
- 16) 高橋 裕: 上下顎レジン床総義歯粘膜面部の重合に伴う経時的形態変化について, 補綴誌, 34: 136~148, 1990.
- 17) Osborne, J.: Internal strains in acrylic denture base materials, Br Dent J, 30: 204~212, 1947.
- 18) Woelfel, J.B., Paffenbarger, G.C. and Sweeney, W.T.: Dimensional changes occurring in dentures during processing, J Am Dent Assoc, 61: 413~430, 1960.
- 19) Kawara, M., Kimoto, S., Inoue, M. et al: Distortional behavior of upper complete acrylic denture base, Advanced prosthodontics worldwide, 466, WCP publications committee, Hiroshima, 1991.
- 20) Harman, I.M.: Effects of time and temperature on polymerization of a methacrylate resin denture base, J Am Dent Assoc, 38: 188~203, 1949.
- 21) Faraj, S.A.A. and Ellis, B.: The effect of processing temperatures on the exotherm, porosity and properties of acrylic denture base, Br Dent J, 147: 209~212, 1979.
- 22) 木村 博, 寺岡文雄: 床用レジンの重合過程の圧力に関する研究 (その2) フラスコ内でのレジンの内部応力, 歯材器, 4: 580~583, 1985.
- 23) 丸子健二: 各種重合法による義歯床用レジンの寸法変化について, 九州歯会誌, 42: 903~917, 1998.
- 24) Braden, M.: The absorption of water by acrylic resins and other materials, J Prosth Dent, 14: 307~316, 1964.
- 25) 立野治雄: 義歯床用加熱重合レジンの寸法精度に関する基礎的研究, 鶴見歯学, 11: 89~107, 1985.