

義歯床用軟質裏装材の粘弾性特性

—負荷時および除荷時の挙動について—

守谷 直史, 操田 利之, 森本 進, 佐藤 裕二
大川 周治, 岡田 達夫*, 吉田 総仁*, 津留 宏道

Viscoelastic Properties of Soft Lining Materials for Denture base

— Behavior on Loading and Unloading —

Naofumi Moriya, Toshiyuki Gurita, Susumu Morimoto, Yuuji Sato,
Shuji Ohkawa, Tatsuo Okada, Fusahito Yoshida
and Hiromichi Tsuru

(平成5年1月27日受付)

緒 言

著しい顎堤吸収や粘膜の菲薄化を伴った総義歯難症例が、人口の高齢化に伴い、増加しつつある。このような総義歯難症例では顎堤粘膜における咬合圧負担能が低下しており、このため、顎堤粘膜に対する咬合圧緩和を目的とした、種々の軟質裏装材が開発¹⁾され、臨床に応用されている。

従って、軟質裏装材の粘弾性特性を明らかにすることは同材料を臨床応用するうえで極めて重要である。

従来より、機能印象材やティッシュコンディショナーの粘弾性特性に関する報告²⁻¹³⁾は多く見られる。しかし、長期間使用可能と考えられる軟質裏装材(以下、軟質裏装材と略す)の粘弾性特性に関する報告^{8,9,12,14)}は少なく、不明な点が多く残されている。

本研究では、軟質裏装材の粘弾性特性を明らかにすることを目的として、負荷時および除荷時における軟質裏装材の粘弾性挙動について検討した。

材料ならびに方法

1. 試料について

試料として、エヴァタッチソフト(ネオ製薬社製、以下 ES と略す)、エヴァタッチハード(ネオ製薬社

製、以下 EH と略す)、アストロン LC ソフト(アストロン社製、以下 AS と略す)、クレバートドゥ(呉羽化学社製、以下 KD と略す)、モルテノソフト(モルテン社製、以下 MS と略す)、モルテノレギュラー(モルテン社製、以下 MR と略す)、モルテノハード(モルテン社製、以下 MH と略す)、計7種類の軟質裏装材を選択した(表1)。

メーカーの指示に従って、ES, EH は練和、AS, KD は重合、MS, MR, MH は加熱により、内径 12.0 mm、高さ 20.0 mm のプラスチック製円筒を用いて、直径 12.0 mm、高さ 20.0 mm の形状に試料を成形した。

2. 負荷除荷試験について

変位速度は 0.1, 0.5, 1.0 mm/sec の3条件とした。変位が 3.0 mm となるまで負荷し、3.0 mm となった時点で、逆に変位が 0.0 mm となるまで負荷時と同じ速度にて除荷し、荷重—変位曲線を記録した。

変位はダイヤルゲージ(共和電業社製、DT-20D)により計測し、その出力を動歪計(日本電気三栄社製、6M-92)を介して、XY レコーダー(渡辺社製、WX 4422)上に記録した。荷重はロードセル(共和電業社製、LC-50KF)により計測し、その出力を動歪計(共和電業社製、CDA-210A)を介して、同じく XY レコーダー(渡辺社製、WX 4422)上に記録した。図1に試験装置の略図を示した。

記録した荷重—変位曲線は応力—歪曲線(負荷曲線と除荷曲線)に変換し、応力は σ 、歪は ϵ と表現し

広島大学歯学部歯科補綴学第一講座(主任:津留宏道教授)

* 広島大学工学部第一類機械系(主任:大森正信教授)

表1 試験に使用した軟質裏装材

軟質裏装材	製造番号	製造元(株)	略号
エヴァタッチソフト	GG02	ネオ製薬	ES
エヴァタッチハード	GG01	ネオ製薬	EH
アストロンLCソフト	#8044	アストロン社	AS
クレパードゥ	04703	呉 羽	KD
モルテノソフト	—	モルテン	MS
モルテノレギュラー	—	モルテン	MR
モルテノハード	—	モルテン	MH

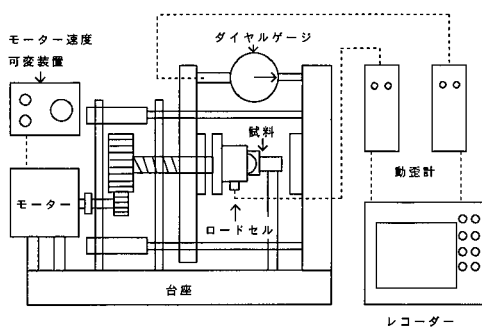


図1 試験装置の略図.

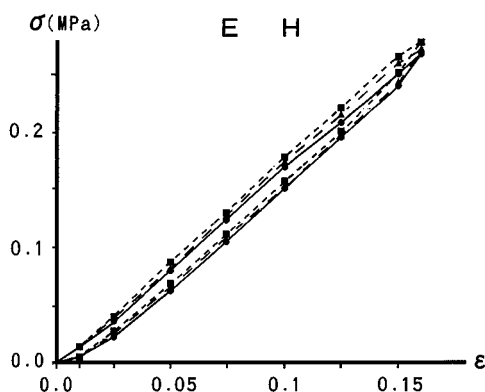


図3 EHの負荷曲線と除荷曲線.

た。歪速度を $\dot{\epsilon}$ と表現すると変位速度との関係は、歪速度 $\dot{\epsilon} \approx (\text{変位速度}/\text{試料の高さ})$ で表せる。なお、3種類の変位速度について5個ずつ、計15個の試料を7種類の軟質裏装材に対して作製し、試験を行った。

結 果

図2～8に各試料における負荷曲線と除荷曲線を示した。なお、黒三角、黒四角ないしは黒丸1個が測定値5回の平均値を表している。

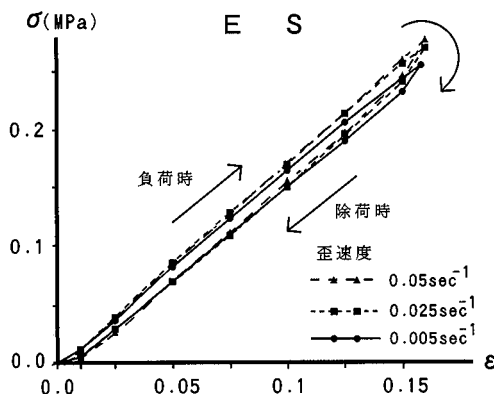


図2 ESの負荷曲線と除荷曲線.

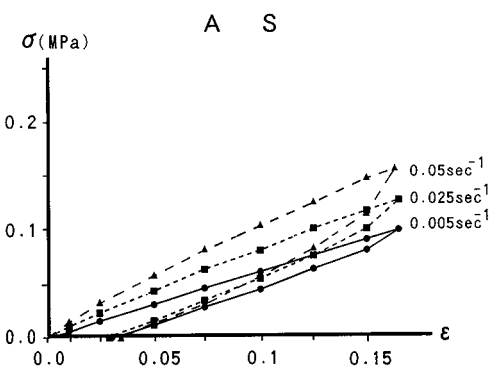


図4 ASの負荷曲線と除荷曲線.

ES, EH では負荷曲線、除荷曲線のいずれにおいても、ほぼ直線的な軌跡を示した。歪速度の相違が負荷曲線および除荷曲線に与える影響はほとんど認められなかったが、負荷曲線と除荷曲線とのズレはわずかながら認められた。完全に除荷した後の残留歪量はほとんど認められなかった。

ASの負荷曲線は、いずれの歪速度においても、応

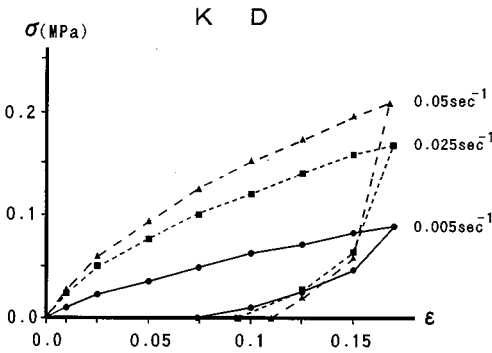


図5 KDの負荷曲線と除荷曲線.

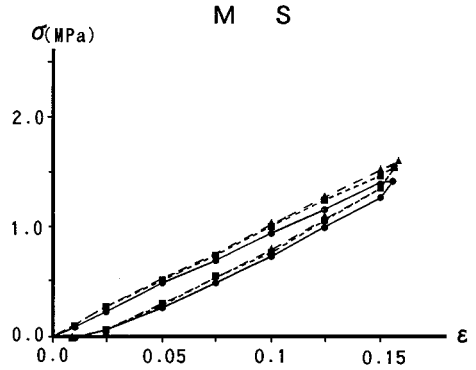


図6 MSの負荷曲線と除荷曲線.

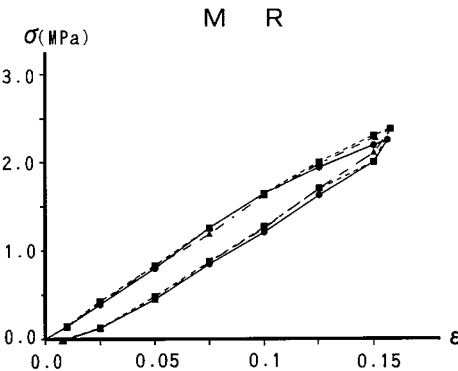


図7 MRの負荷曲線と除荷曲線.

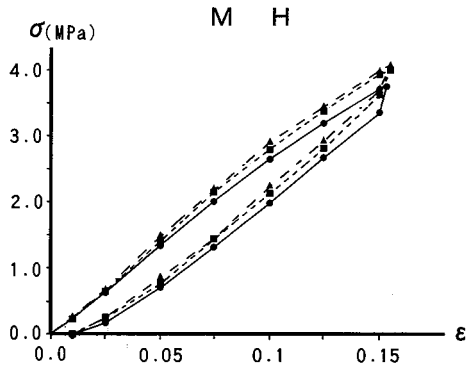


図8 MHの負荷曲線と除荷曲線.

力は歪量 0.025 まで直線的に増加し、歪量 0.025 以降最大歪量までは、歪量 0.025 までと比較して傾きが次第に小さくなり、全体として緩やかな上に凸の曲線を示した。換言すれば、応力を歪量で微分して得られる応力歪曲線の勾配、すなわち硬化率 ($d\sigma/d\varepsilon$) (以下硬化率と呼ぶ) が歪量の増加とともに次第に小さくなる傾向を示した。除荷時における AS の応力は最大値を示した後、完全除荷まで、負荷時と比較して小さい値を示した。同一歪量における負荷時と除荷時との応力差は、歪速度の増加に伴い、増大する傾向を示した。完全に除荷した後の残留歪量は、いずれの歪速度においても約 0.03 であった。

KD の負荷曲線は、いずれの歪速度においても、応力は歪量 0.025 まで直線的に増加し、歪量 0.025 以降最大歪量までは、歪量 0.025 までと比較して傾きが次第に小さくなり、全体として緩やかな上に凸の曲線を示した。すなわち、AS と同様に歪量の増加とともに硬化率は次第に小さくなる傾向を示した。除荷時における KD の応力も、AS と同様に最大値を示した後、完全除荷まで負荷時と比較して小さい値を示した。特に、歪速度 0.05 sec^{-1} 、 0.025 sec^{-1} では、最大応力

を示した後、わずかな歪量の減少に伴い、急激に応力が減少した。同一歪量における負荷時と除荷時との応力差は、歪速度の増加に伴い増加した。完全に除荷した後の残留歪量は、 $0.07 \sim 0.11$ で、歪速度の増加に伴い、増大する傾向を示した。

MS の負荷曲線は、ES、EH に比較して傾きは小さいが、ES、EH と同様に直線的な軌跡を描いた。除荷時における MS の応力は最大値を示した後、わずかなではあるがやや急激に減少し、その後、負荷時とほぼ同様な傾きで完全除荷まで減少した。除荷曲線はいずれの歪速度においてもほぼ同様な軌跡を描いた。同一歪量における負荷時と除荷時との応力差はいずれの歪速度においてもほぼ同じで約 0.2 MPa であった。完全に除荷した後の残留歪量は、いずれの歪速度においても同様で約 0.01 であった。

MR の負荷曲線は、いずれの歪速度においても、応力は歪量 0.1 まで直線的に増加し、歪量 0.1 以降最大歪量までは、歪量 0.1 までと比較してやや傾きが小さくなる曲線を示した。MR における歪量 0.1 までの負荷曲線の傾きは、MS に比較して有意に大きかった。除荷時における MR の応力は MS と同様に、最大値

を示した後わずかではあるがやや急激に減少し、その後完全除荷まで負荷時とほぼ同様な傾きで減少した。除荷曲線は、いずれの歪速度においてもほぼ同様な軌跡を描いた。同一歪量における負荷時と除荷時との応力差は、いずれの歪速度においてもほぼ同じで、約 0.2~0.3 MPa であった。完全に除荷した後の残留歪量は、MS と同様にいずれの歪速度においても約 0.01 であった。

MH の負荷曲線は、いずれの歪速度においても、MR と同様、応力は歪量 0.1 まで直線的に増加し、歪量 0.1 以降最大歪量までは、歪量 0.1 までと比較してやや傾きが小さくなる曲線を示した。MH における歪量 0.1 までの負荷曲線の傾きは、MR に比較して有意に大きかった。除荷時における MH の応力は、MS, MR と同様に最大値を示した後、わずかではあるがやや急激に減少し、その後完全除荷まで負荷時とほぼ同様な傾きで減少した。除荷曲線は、いずれの歪速度においてもほぼ同様な軌跡を描いた。同一歪量における負荷時と除荷時との応力差は、いずれの歪速度においてもほぼ同じで、約 0.5~0.7 MPa であった。完全に除荷した後の残留歪量は、MS, MR と同様、いずれの歪速度においてもほぼ同じで約 0.01 であった。

以上の結果をまとめると、今回選択した 7 種類全ての軟質裏装材は、①負荷時と除荷時の応力—歪曲線は一致しなかった。②応力—歪曲線の勾配（硬化率）は、歪速度によって変化し、歪速度が速いほど硬化率が大きくなる傾向を示した。③負荷曲線がほぼ直線とみなせる材料（ES, EH, MS, MR, MH）と、直線からずれる材料（AS, KD）とに分けられた。これら 3 つの現象は互いに関連しており、負荷時と除荷時における応力—歪曲線のズレが著しく大きい材料（AS, KD）は、硬化率の歪速度依存性が強く、応力—歪曲線の非直線性も強いことが示された。

考 察

近年、ティッシュコンディショナーを含め、多くの軟質裏装材が開発¹⁾され、臨床に用いられている。本研究では現在市販され、比較的長期間使用可能と報告されている材料を選択し、軟質裏装材とした。軟質裏装材が本来有する粘弾性特性を明らかにするため、および荷重時に測定装置との接触面における摩擦の影響の可及的な排除と座屈を防止¹⁵⁾するため、試料形態は、直径 12.0 mm、厚さ 20.0 mm の円柱状とした。

1.0 mm/sec が負荷除荷試験機における設定可能な最高速度であり、かつ、負荷除荷の切り換えを可及的に正確に行い得る最高速度である。また、歪速度の相違による軟質裏装材の挙動を分析するため、1/10 の

変位速度として 0.1 mm/sec を、0.1 mm/sec と 1.0 mm/sec の中間の変位速度として 0.5 mm/sec を設定した。

本研究で用いた 7 種類の軟質裏装材においては、負荷時と除荷時との応力—歪曲線は一致しなかった。さらに、応力—歪曲線は歪速度によって変化した。このような挙動を示すのは、7 種類全ての軟質裏装材が粘性を有しているためと考えられる。そこで、応力—歪曲線（負荷曲線と除荷曲線）の挙動を分析する上で、図 9 に示した 3 要素固体モデルを考えた。

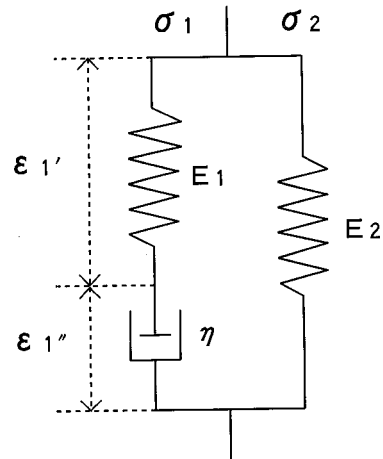


図 9 粘弾性 3 要素固体モデル。

本モデルは弾性部分を表現できるバネ E_1 , E_2 と粘性部分を表現できるダッシュポット η の 3 つの要素から構成されている。 E_1 における歪 ϵ_1' , η における歪を ϵ_1'' , E_1 , η にかかる応力を σ_1 , E_2 にかかる応力を σ_2 とすると、応力と歪の関係は以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}_1' + \dot{\epsilon}_1'' \\ &= \dot{\sigma}_1/E_1 + \dot{\sigma}_1/\eta \end{aligned} \quad \dots(1)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_1 + \sigma_2 \\ &= \sigma_1 + E_2 \epsilon \end{aligned} \quad \dots(2)$$

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma}_1 + E_2 \dot{\epsilon} \quad \dots(3)$$

さらに、(1)式に(2)、(3)式を代入し、 σ_1 , $\dot{\sigma}_1$ を消去することで応力と歪の一般式として、

$$\dot{\sigma} = (E_1 + E_2) \dot{\epsilon} - (E_1/\eta) (\sigma - E_2 \epsilon) \quad \dots(4)$$

が得られる。なお、 $\dot{\cdot}$ は時間微分を表している。

負荷除荷試験を図 10 の時間と歪の関係で示した。負荷時において、最大歪を ϵ_* 、その時の時間を t_* 、歪速度 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_\ell (>0) = \text{一定}$, $\epsilon = \dot{\epsilon}_\ell t$ とすると、式(4)は

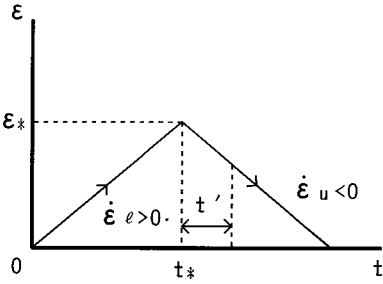


図10 負荷除荷試験時の時間と歪の関係.

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon}_l \{1 - \exp(-E_1 t / \eta)\} + E_2 \dot{\epsilon}_l t \quad \dots (5)$$

と解くことができる。

除荷時において、 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_u (< 0) = \text{一定}$ 、 $\epsilon = \epsilon_* + \dot{\epsilon}_u t'$ 、 $t' = t - t_*$ 、 ϵ_* における応力 σ_* 、 $\dot{\sigma} = d\sigma/dt = d\sigma/dt'$ とすると、式(4)は

$$\sigma = \{(\sigma_* - E_2 \epsilon_*) - \eta \dot{\epsilon}_u \exp(-E_1 t' / \eta) + E_2 \epsilon_* + \eta \dot{\epsilon}_u + E_2 \dot{\epsilon}_u t'\} \quad \dots (6)$$

と解くことができる。すなわち、負荷時の応力 σ は式(5)、除荷時の応力 σ は式(6)で表せる。 $\dot{\epsilon}_l$ 、 $\dot{\epsilon}_u$ 、 ϵ_* 、 σ_* は一定であり、 E_1 、 E_2 、 η は各軟質裏装材の定数であるから応力 σ は時間 t の関数として表すことができる。ここで、結果で述べたように、①負荷時と除荷時における応力-歪曲線のズレが著しく大きい材料 (AS, KD) は、②硬化率の歪速度依存性が強く、③応力-歪曲線の非直線性も強く、他の材料 (ES, EH, MS, MR, MH) はこれらの傾向が著明ではない。そこで、前者の挙動を示す材料の代表として KD、後者の材料の代表として MS の2種類の材料をとりあげ、本粘弾性モデルを用いて歪速度一定の負荷除荷時のシュミレーションを行い、結果について考察を行った。図11および図12に、それぞれ KD および MS に対するシュミレーションを行った結果を示した。

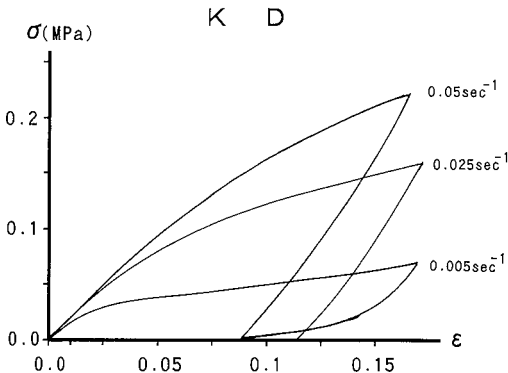


図11 粘弾性3要素固体モデルを用いて描いた KD のシュミレーション.

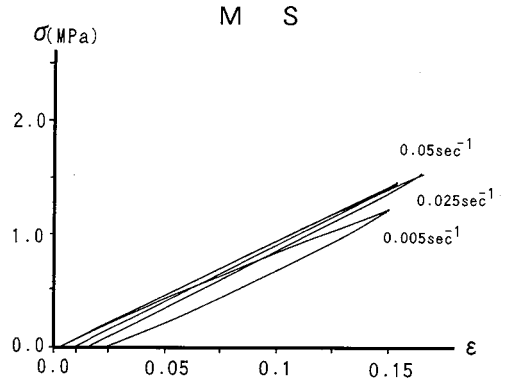


図12 粘弾性3要素固体モデルを用いて描いた MS のシュミレーション.

材料定数は試験結果を比較的良く表すものを試行錯誤的に決定し、KD については、 $E_1 = 2.0 \text{ MPa}$ 、 $E_2 = 0.28 \text{ MPa}$ 、 $\eta = 4.5 \text{ MPa}\cdot\text{sec}$ とし、MS については、 $E_1 = 2.7 \text{ MPa}$ 、 $E_2 = 7.0 \text{ MPa}$ 、 $\eta = 50 \text{ MPa}\cdot\text{sec}$ とした。これらのシュミレーションの結果は試験結果と完全に一致しているとは言えないが、注目すべき点は、全く同じ粘弾性モデルを用いていながら、材料定数が異なるだけで、KD のシュミレーションの結果では上記①、②、③の傾向が顕著であり、MS のシュミレーションの結果では、これらの傾向が著明ではないという、試験結果と全く同じ傾向が再現できることである。特に、KD と MS の材料定数の顕著な相違は粘性定数 η であり、この値の小さい KD は、より粘性変形を生じやすく、その結果として上記①、②、③に述べた挙動を示すものと考えられる。

以上より、本研究で選択した軟質裏装材の数値モデルとして粘弾性3要素固体モデルの有用性が示された。

本来 E_1 、 E_2 、 η の各定数は、リラクゼーション試験等を行い求めなければならない。ただし、一定歪を付与した後の応力緩和を分析するリラクゼーション試験では、粘性が分析結果に大きい影響を与える。すなわち、粘性を有する材料を用いてリラクゼーション試験を行う場合、遅い変位速度では一定歪を付与している時点で粘性が発現し、応力緩和の正確な分析が不可能となる。リラクゼーション試験を用いて本研究において用いた軟質裏装材の粘弾性特性を分析する場合には、設定可能な最高速度により一定歪を試料に付与すべきである。「方法」の項目で述べたように、1.0 mm/sec は現在設定可能な最高変位速度であり、リラクゼーション試験を行う場合には、1.0 mm/sec の変位速度を採用すべきであろう。

総 括

長期間使用可能と考えられる軟質裏装材を7種類選択し、3種類の変位速度 (0.1 mm/sec, 0.5 mm/sec, 1.0 mm/sec) にて、負荷除荷試験を行い、以下の結果を得た。

1) 7種類全ての軟質裏装材は、①負荷時と除荷時の応力—歪曲線は一致しなかった。②応力—歪曲線の勾配 (硬化率) は、歪速度によって変化し、歪速度が速いほど硬化率が大きくなる傾向を示した。③負荷曲線がほぼ直線とみなせる材料 (ES, EH, MS, MR, MH) と、直線からずれる材料 (AS, KD) とに分けられた。

これら3つの現象は互いに関連しており、すなわち、負荷時と除荷時における応力—歪曲線のズレが著しく大きい材料 (AS, KD) は、硬化率の歪速度依存性が強く、応力—歪曲線の非直線性も強いことが示された。

2) 各材料における応力—歪応答の相違は、材料が有する粘性変形の生じやすさと関係があることが、本論文で示した粘弾性3要素固体モデルによるシミュレーションの結果より明かとなった。

文 献

- 1) 平澤 忠, 平林 茂: 市販各種リベース材の現況とその材料学的な整理として. *QDT* 12, 53-66, 1987.
- 2) Wilson, H.J. and Tomlin, H.R.: Soft lining materials: Some relevant properties and their determinations. *J. Prosthet. Dent.* 21, 244-250, 1969.
- 3) Ellis, B., Lamb, D.J. and Al-Nakash, S.: The elastic modulus of soft denture liners. *J. Biomed. Mater. Res.* 14, 731, 1980.
- 4) 川上道夫, 竹花庄治: Dynamic impression material のクリープとその回復. *歯理工誌* 6, 7-11, 1965.
- 5) Braden, M.: Tissue conditioners. II. Rheologic properties. *J. Dent. Res.* 49, 496-501, 1970.
- 6) 三輪英則, 服部正巳, 佐藤志貴, 金沢俊文, 栗本清勝, 太田 功, 田中資郎, 大石司郎: 動的ならびに合成ゴム印象材のクリープに関する研究. *補綴誌* 20, 393-398, 1976.
- 7) McCarthy, J.A. and Moser, J.B.: Mechanical properties of tissue conditioners. Part II. Creep characteristics. *J. Prosthet. Dent.* 40, 334-340, 1978.
- 8) 日高里史: 軟性裏装材の物性に関する基礎的研究. *九州歯会誌* 34, 678-695, 1981.
- 9) Robinson, J.G. and McCabe, J.F.: Creep and stresses relaxation of soft denture liners. *J. Prosthet. Dent.* 48, 135-140, 1982.
- 10) 竹内敏洋: 機能印象材のレオロジカルな性質に関する研究. *九州歯会誌* 37, 283-303, 1983.
- 11) DeMot, B., DeClercq, M. and Rousseeuw, P.: Viscoelastic properties of four currently used tissue conditioners. *J. Oral. Rehabil.* 11, 419-427, 1984.
- 12) 鱒見進一: 軟性裏装材のレオロジカルな性質と咀嚼能力に及ぼす影響. *九州歯会誌* 38, 864-879, 1984.
- 13) 賛川勝吉: 暫間裏装材の組成と粘弾性的性質の関係に関する研究. *口病誌* 53, 157-183, 1986.
- 14) 矢野健三郎: 義歯用軟性裏装材の弾性ならびにクリープ特性の変化. *九州歯会誌* 44, 874-889, 1990.
- 15) 竹内洋一郎: 材料力学. 日新出版, 東京, 251-260, 1983.