

軟質裏装材の粘弾性特性に関する研究

守 谷 直 史

Study on Viscoelastic Properties of Soft Lining Materials

Naofumi Moriya

(平成5年1月26日受付)

緒 言

急速な人口の高齢化に伴い、日常の歯科臨床で著しい顎堤吸収や顎堤粘膜の菲薄化を伴った、いわゆる総義歯の難症例が増加しつつある。このような症例では、咬合圧負担能力が低下^{1,2)}し、通常使用される硬質の床用レジン単独では、咀嚼時に疼痛を生じることが多い。現在まで、咀嚼時の疼痛緩和を目的として、種々の軟質裏装材が開発^{3,4)}され、臨床に広く用いられてきた。したがって、このような素材の臨床的効果を評価する上で、これら軟質裏装材の材料学的性質、中でも特に咀嚼時の疼痛緩和に関連した粘弾性特性を明らかにすることは、同材料を臨床に応用する上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を圧縮試験もしくはクリープ試験を用いて分析した報告⁵⁻²³⁾は多く見られる。しかしながら、長期間使用可能な軟質裏装材（以下軟質裏装材と略す）の粘弾性特性^{13,14,18,21,22,24-29)}、特に応力緩和に関する報告は極めて少ない³⁰⁻³³⁾。

軟質裏装材はティッシュコンディショナーに比較して硬く、流体ではなく、固体³⁴⁾とみなすほうが適切であると考えられる。しかし、従来の報告では、主に軟質裏装材をティッシュコンディショナーと同様に流体とみなして分析を行っており、軟質裏装材の粘弾性特性を正確に把握しているとは言いがたい。しかも、軟質裏装材の粘弾性特性に関する臨床的評価方法を検

討した報告³⁵⁾は、ほとんど見当たらず、不明のままである。

そこで本研究では、リラクゼーション試験、すなわち応力緩和試験を行い、3要素固体モデル^{31,36,37)}を用いて分析し、軟質裏装材の粘弾性特性を明らかにするとともに、臨床において比較的簡便に、軟質裏装材の粘弾性特性を評価する方法を見いだすことを試みた。

材料ならびに方法

I. 試料について

試料としては、一般に多く用いられている7種類の軟質裏装材を選択した(表1)。試料は、内径12.0mm、高さ20.0mmのプラスチック製の円筒を用いて、メーカーの指示通りに作製した。すなわち、エヴァタッチソフト(以下、ESと略す)とエヴァタッチハード(以下、EHと略す)は練和、アストロンLCソフト(以下、ASと略す)とクレベートドゥ(以下、KDと略す)は重合、モルテノソフト(以下、MSと略す)、モルテノレギュラー(以下、MRと略す)、モルテノハード(以下、MHと略す)は加熱によって、それぞれ直径12.0mm、高さ20.0mmの形態に成形した。

II. 試験方法について

1. リラクゼーション試験

図1に試験装置の略図を示した。試験は1.0mm/secの変位速度にて2.0mmの初期変位を与え、その時のリラクゼーション(応力緩和)を記録した。変位はダイヤルゲージ(共和電業社製、DT-20D)により直読し、荷重はロードセル(共和電業社製、LC-50KF)により導出後、動歪計(共和電業社製、CDA-210A)で変換し、エレクトリックレコーダー(理化電工工業社製、R-002)上に記録した。測定時間はAS

広島大学歯学部歯科補綴学第一講座(主任:津留宏道教授)本論文の要旨は平成4年6月第25回広島大学歯学会総会、平成4年8月第18回日本補綴歯科学会中国四国支部学術大会において発表した。この研究は平成2年度文部省科学研究費奨励研究(A)課題番号(02771413)による。

表1 試験に使用した各種軟質裏装材

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

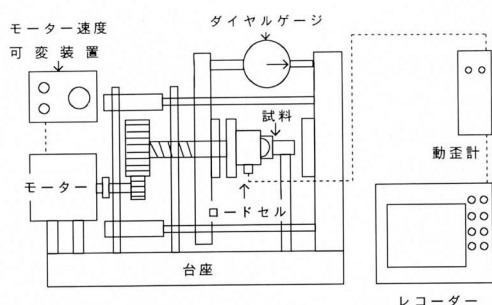


図1 リラクゼーション試験装置の略図。

のみ25分間とし、他の試料は15分間とした。なお、試料全体を均一に荷重するため平行に取り付けられたジュラルミン製ジグの間に試料を固定した。その際、試料基底面とジュラルミン製ジグとの接触が可及的に均等となるように留意した。ジュラルミン製ジグは、試料との接触面における摩擦の影響を排除する目的で応用した。

2. ゴム硬度計試験

図2に示すように、1 kgf の荷重部を有するゴム硬度計用定圧荷重器（島津製作社製，200形）にゴム硬度計（高分子計器株式会社製，ASKER，JAL 型）を取り付け、ゴム硬度計の押針部が試料に接した状態から、可及的に短時間で荷重し、数値の経時的な変化を荷重直後から5分間にわたり記録した。測定時間は荷重直後、3秒後、5秒後、8秒後、10秒後、および10秒後から30秒後までは5秒毎に、1分後から5分後までは1分毎とした。

リラクゼーション試験とゴム硬度計試験のいずれにおいても試験は試料作製1週間後に行い、試料は7種類の軟質裏装材に対して5個ずつ作製し、1試料につき計測は1回とした。

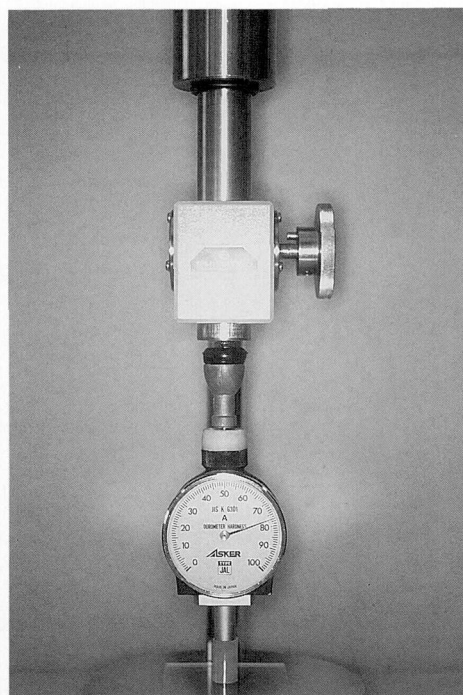


図2 ゴム硬度計試験装置。

Ⅲ. 分析方法について

1. リラクゼーション試験

(1) 粘弾性3要素固体モデル，および応力と歪に関する関係式

分析には図3に示した粘弾性3要素固体モデルを用いた。本モデルは弾性部分を表現できるバネ E_1 と E_2 ，粘性部分を表現できるダッシュポット η の3つの要素からなっている。全体の歪を ϵ ， E_1 における歪を ϵ_1 ， η における歪を ϵ_1' ，全体の応力を σ ， 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、応力と歪は、

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

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

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

の関係式で表すことができる。さらに、(1)式に(2)、(3)式を代入し、 σ_1 、 $\dot{\sigma}_1$ を消去することにより、応力と歪の一般式として、

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

と求めることができる。なお、 \cdot は微分を表している。

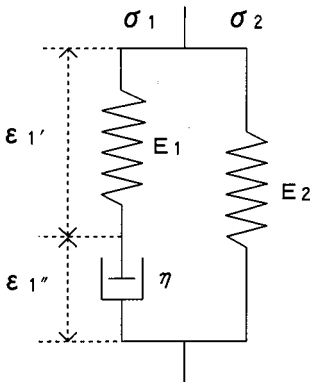


図3 粘弾性3要素固体モデル。
 E_1, E_2 : 弾性部分を表すバネ, η : 粘性部分を表すダッシュポット, ϵ_1' : E_1 における歪, ϵ_1'' : η における歪, σ_1 : E_1, η にかかる応力, σ_2 : E_2 にかかる応力

(2) 応力緩和曲線

図4に示したリラクゼーション試験において、荷重により2.0mm変位させた直後の時間を $t=0$ とし、その時の初期応力を σ_0 、荷重15分後 (ASでは25分後) の応力を σ_{900} (ASでは σ_{1500})、初期歪を ϵ_0 とすると、荷重直後においては、粘性部分を表現するダッシュポット η は作動せず、初期応力は、

$$\sigma_0 = (E_1 + E_2)\epsilon_0 \quad \text{となる。} \quad \dots (5)$$

初期応力に関しては、各材料間において t 検定を行い、統計学的に検討した。15分後 (ASでは25分後) の応力は、

$$\sigma_{900}(\sigma_{1500}) = E_2\epsilon_0 \quad \text{となる。} \quad \dots (6)$$

リラクゼーション試験では、歪の微分は $\dot{\epsilon}=0$ となり、一般式(4)は、

$$\dot{\sigma} = -(E_1/\eta)(\sigma - E_2\epsilon_0) \quad \text{となる。} \quad \dots (7)$$

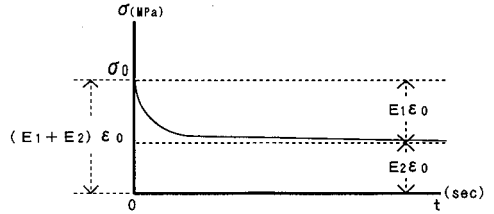


図4 応力緩和曲線。
 σ_0 : 初期応力, ϵ_0 : 初期歪
 $\sigma_0 = (E_1 + E_2)\epsilon_0$

式(7)を積分することにより、応力の式として、

$$\sigma = E_2\epsilon_0 + E_1\epsilon_0 \exp\{- (E_1/\eta)t\} \quad \dots (8)$$

と表すことができる。

リラクゼーション試験における分析パラメータは、以下の5つとした。

- 瞬間弾性率 : $E_1 + E_2$
- 遅延弾性率 : E_2
- 粘性率 : η
- 緩和時間 : τ
- 応力緩和の大きさ : $E_1/(E_1 + E_2)$

$E_1 + E_2$ は試料に荷重を負荷した直後、すなわち初期応力の弾性を表す瞬間弾性率である。 E_2 は初期応力が緩和され、一定応力値になった時の弾性を表す遅延弾性率である。 η は物質の流れやすさを表す粘性率である。初期応力が全緩和量の $(1 - 1/e)$ に減少した応力となるまでの時間を、リラクゼーション試験における緩和時間 τ とした。各軟質裏装材が有する応力緩和の大きさを表す分析パラメータを、初期応力に対する全緩和量の割合、すなわち $E_1/(E_1 + E_2)$ とした。

荷重により2.0mm変位させた直後の時間を0秒とし、0秒から5秒後までは0.5秒毎に、5秒後から10秒後までは1秒毎に、15秒後から30秒後までは5秒毎に、30秒後から1分後までは10秒毎に、1分後から計測終了までは1分毎に応力を測定した。

測定した $\sigma_0, \epsilon_0, \sigma_{900}, \sigma_{1500}$ を式(5)と(6)に代入することにより、 E_1 と E_2 を算出した。 η に関しては、時間を横軸に、応力を縦軸に対数としてプロットし、応力の経時的変化に関するグラフを求めた。このグラフから最小自乗法により求めた一次近似式の傾きとして η を算出した。緩和時間 τ は η を E_1 で除することで算出した。また、応力緩和の大きさを表す $E_1/(E_1 + E_2)$ はすでに得られた E_1 と E_2 から算出した。なお、7種類の軟質裏装材に対して各々の分析パラメータの平均値と標準偏差を求め、7種類の材料間において統計学的有意差が存在するか否かについて t 検定を行った。

応力緩和曲線から得られた応力の実測値と、3要素固体モデルによって得られた応力の理論値との適合度を明らかにするために、両者に関する重相関係数を求め、F検定を行った。

2. ゴム硬度計試験

図5にゴム硬度計試験曲線の1例を示した。

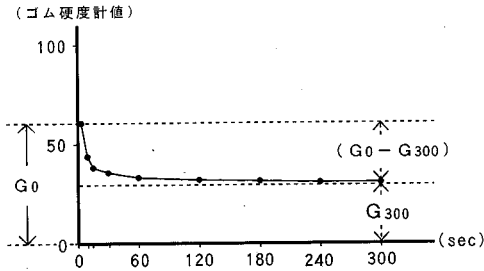


図5 ゴム硬度計試験曲線.

G_0 : 荷重した直後の値 (初期値)
 G_{300} : 荷重5分後の値 (最終値)

ゴム硬度計試験における分析パラメータは、以下の4つとした。

- 初期値 : G_0
- 最終値 : G_{300}
- 緩和時間 : $G\tau$

応力緩和の大きさ: $(G_0 - G_{300})/G_0$

荷重した直後の値を初期値 G_0 、荷重5分後の値を最終値 G_{300} とした。初期値 G_0 が減少量の $(1-1/e)$ に減少した値となるまでの時間をゴム硬度計試験における緩和時間 $G\tau$ とした。ゴム硬度計試験において、応力緩和の大きさを表す分析パラメータを、初期値 G_0 に対するゴム硬度計値の全減少量の割合、すなわち $(G_0 - G_{300})/G_0$ とした。

7種類の軟質裏装材に対して、各々の分析パラメータの平均値と標準偏差を求め、7種類の材料間に統計学的有意差が存在するかどうかについて t 検定を行った。

3. リラクゼーション試験の結果とゴム硬度計試験の結果との対応関係

リラクゼーション試験の結果とゴム硬度計試験の結果との間に対応すると考えられる分析パラメータ、すなわち $E_1 + E_2$ と G_0 、 E_2 と G_{300} 、 τ と $G\tau$ 、 $E_1/(E_1 + E_2)$ と $(G_0 - G_{300})/G_0$ について Spearman の順位相関係数と重相関係数を求め、統計学的に検討を加えた。

結 果

I. リラクゼーション試験について

1. 応力緩和曲線

図6と図7に各材料における15分後までの応力緩和

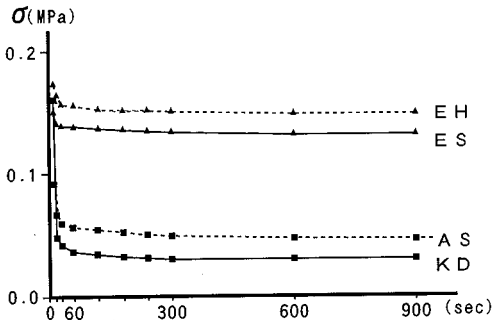


図6 応力緩和曲線.

ES, EH, KD はほぼ同程度の初期応力を示し、AS は ES, EH, KD に比較して有意に小さい初期応力 ($P < 0.01$) を示した。

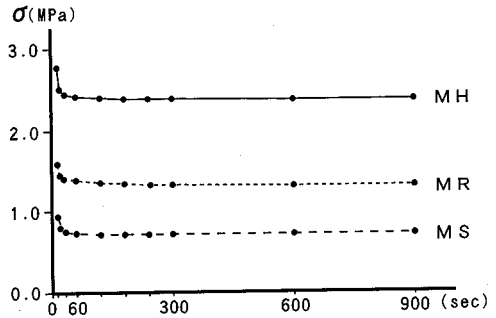


図7 応力緩和曲線.

MS, MR, MH は ES, EH, AS, KD に比較して有意に大きい初期応力 ($P < 0.01$) を示した。

曲線を示した。各プロット点1個は測定値5回の平均値を表している。

ES, EH, KD はほぼ同程度の初期応力を示し、AS は ES, EH, KD に比較して有意に小さい初期応力 ($P < 0.01$) を示した。

ES, EH, AS は初期応力を示した後、30秒後まで、ほぼ同程度の割合で応力は減少した。KD は ES, EH, AS に比較して応力は急激に減少した。MS, MR, MH は、ES, EH, AS, KD に比較して有意に大きい初期応力 ($P < 0.01$) を示した。全ての試料において、全緩和量の大半が荷重30秒後までに生じ、それ以降荷重後15分まで、わずかに低減少傾向を示しながら一定値に収束し、いわゆる漸近弾性挙動を示した。

応力緩和曲線から得られた応力の実測値と、3要素固体モデルによって得られた応力の理論値との適合度を明らかにするために、両者に関する重相関係数を求め、F検定を行った。その結果、表2に示すように重相関係数 R の平均値は0.93~0.96であり、すべての試料において危険率0.1%以下で統計学的に有意で

表2 各試料毎の重相関係数 R の平均値と標準偏差

	R	S.D.
ES	0.942	0.024
EH	0.934	0.013
AS	0.935	0.006
KD	0.930	0.007
MS	0.956	0.003
MR	0.955	0.003
MH	0.958	0.003

あった。

2. 分析パラメータ

表3にリラクゼーション試験における各分析パラメータの平均値と標準偏差を示した。

瞬間弾性率 $E_1 + E_2$ については, ES, EH, AS, KD は小さい値を示し, MS, MR, MH は, ES, EH, AS, KD に比較して有意に大きい値 ($P < 0.01$) を示した。

遅延弾性率 E_2 については, AS と KD は極めて小さい値を示したが, ES と EH は AS, KD に比較して有意に大きく ($P < 0.01$), MS, MR, MH は, ES, EH に比較して有意に大きい値 ($P < 0.01$) を示した。

粘性率 η については, ES, EH, KD ともにほぼ同程度の値を示し, AS は ES, EH, KD に比較して有意に大きく ($P < 0.01$), MS, MR, MH は, AS に比較して有意に大きい値 ($P < 0.01$) を示した。

応力緩和時間 τ については, KD のみが他の試料に比較して有意に小さい値 ($P < 0.01$) を示した。

応力緩和の大きさを表す $E_1 / (E_1 + E_2)$ については, AS と KD は ES, EH, MS, MR, MH に比較して有意に大きい値 ($P < 0.01$) を示した。

II. ゴム硬度計試験について

1. ゴム硬度計試験曲線

図8と図9に各材料におけるゴム硬度計試験曲線を示した。測定開始から5分後までの結果であり、各

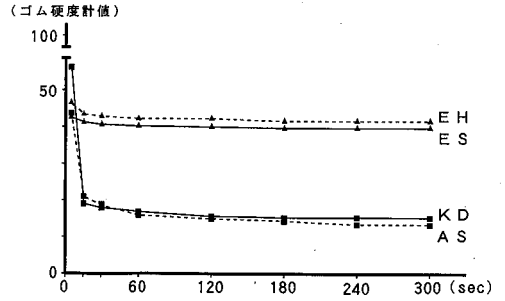


図8 ゴム硬度計試験曲線。

ES と EH は初期値を示した後、15秒後までわずかに値は減少し、その後、5分後までほぼ同じ値を示した。AS と KD は初期値を示した後、15秒後まで急激にその値は減少し、その後、5分後までほぼ一定の値を示した。

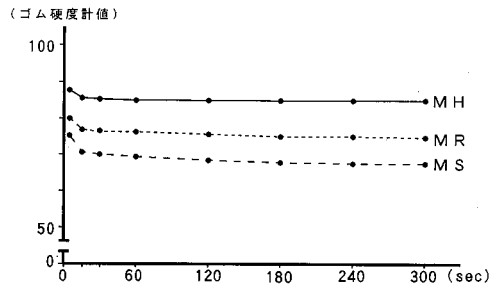


図9 ゴム硬度計試験曲線。

MS, MR, MH は ES, EH, AS, KD に比較して有意に大きい初期値 ($P < 0.01$) を示した後、15秒後までやや減少し、その後、5分後までほぼ同様の値を示した。

表3 リラクゼーション試験における各分析パラメータの平均値と標準偏差

	$E_1 + E_2$ (MPa)	E_2 (MPa)	η (MPa·sec)	τ (sec)	$E_1 / (E_1 + E_2)$
ES	1.50 ± 0.10	1.32 ± 0.08	3.09 ± 0.74	17.65 ± 5.73	0.12 ± 0.01
EH	1.70 ± 0.17	1.45 ± 0.15	3.22 ± 0.74	13.13 ± 4.13	0.15 ± 0.01
AS	0.87 ± 0.04	0.36 ± 0.03	6.78 ± 0.87	13.53 ± 1.98	0.58 ± 0.02
KD	1.40 ± 0.12	0.24 ± 0.04	3.51 ± 0.51	2.85 ± 0.21	0.84 ± 0.03
MS	9.33 ± 0.41	6.87 ± 0.33	51.83 ± 5.79	21.08 ± 2.00	0.26 ± 0.01
MR	15.81 ± 1.24	12.17 ± 0.85	69.49 ± 9.00	18.54 ± 0.44	0.24 ± 0.01
MH	27.94 ± 0.77	22.58 ± 0.70	75.29 ± 6.69	14.05 ± 1.09	0.19 ± 0.03

$E_1 + E_2$: 瞬間弾性率, E_2 : 遅延弾性率, η : 粘性率, τ : 緩和時間, $E_1 / (E_1 + E_2)$: 応力緩和の大きさ

ロット点1個は測定値5回の平均値を表している。

ES と EH は初期値を示した後、15秒後までわずかに値は減少し、その後、5分後まではほぼ同じ値を示した。ES と EH はほぼ同様な曲線を示した。AS と KD は初期値を示した後、15秒後まで急激にその値は減少し、その後、5分後まではほぼ一定の値を示した。MS, MR, MH は、ES, EH, AS, KD に比較して有意に大きい初期値 ($P < 0.01$) を示した後、15秒後までやや減少し、その後、5分後まではほぼ同様の値を示した。なお、全ての試料において、ゴム硬度計値の減少の大部分は、荷重15秒後までに生じた。

2. 分析パラメータ

表4にゴム硬度計試験における各分析パラメータの平均値と標準偏差を示した。

初期値 G_0 については、ES, EH, AS はほぼ同程度の値であったが、KD は ES, EH, AS に比較して有意に大きい値 ($P < 0.01$) を示した。一方 MS, MR, MH は、KD に比較して有意に大きい値 ($P < 0.01$) を示した。

最終値 G_{300} については、AS と KD は ES, EH に比較して有意に小さい値 ($P < 0.01$) であったが、一方 MS, MR, MH は、ES, EH に比較して有意に大きい値 ($P < 0.01$) を示した。

緩和時間 $G\tau$ については、KD のみが他の試料に比較して有意に小さい値 ($P < 0.01$) を示した。

応力緩和の大きさ $(G_0 - G_{300})/G_0$ については、AS と KD はほぼ同一の値を、また ES, EH, MS, MR, MH は、AS, KD に比較して有意に小さい値 ($P < 0.01$) を示した。

III. リラクゼーション試験の結果とゴム硬度計試験の結果との対応関係について

1. 瞬間弾性率 $E_1 + E_2$ と初期値 G_0

瞬間弾性率 $E_1 + E_2$ と初期値 G_0 との間には、Spear-

man の順位相関の検定の結果、1%以下の危険率で正の相関関係を認め、 $E_1 + E_2$ と G_0 との関係は、指数関数 $G_0 = 100 \{1 - 0.5654^{(E_1 + E_2)^{0.394}}\}$ で近似し得た (図10)。

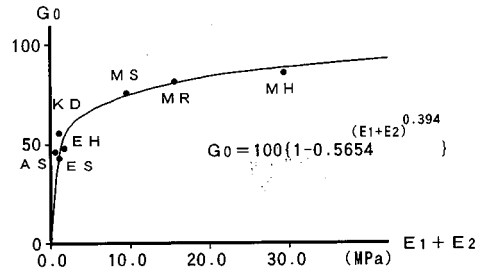


図10 瞬間弾性率 ($E_1 + E_2$) と初期値 G_0 との関係。

$E_1 + E_2$ と G_0 との間には、Spearman の順位相関の検定の結果、1%以下の危険率で正の相関関係を認めた。

2. 遅延弾性率 E_2 と最終値 G_{300}

遅延弾性率 E_2 と最終値 G_{300} との間には、Spearman の順位相関の検定の結果、1%以下の危険率で正の相関関係を認め、 E_2 と G_{300} との関係は、指数関数 $G_{300} = 100 \{1 - 0.6457E_2^{0.469}\}$ で近似し得た (図11)。

3. 緩和時間 τ と緩和時間 $G\tau$

緩和時間 τ と緩和時間 $G\tau$ との間には、Spearman の順位相関の検定の結果、1%以下の危険率で正の相関関係を認め、 τ と $G\tau$ との関係は、図12に示すように重相関係数 $R = 0.97$ 、1%以下の危険率で $Y = 0.66X$ の回帰直線で表せることが判明した。

4. 応力緩和の大きさ $E_1/(E_1 + E_2)$ と応力緩和の大きさ $(G_0 - G_{300})/G_0$

$E_1/(E_1 + E_2)$ と $(G_0 - G_{300})/G_0$ との間には、Spearman の順位相関の検定の結果、1%以下の危険率で正の相関関係を認め、 $E_1/(E_1 + E_2)$ と $(G_0 - G_{300})/G_0$

表4 ゴム硬度計試験における各分析パラメータの平均値と標準偏差

	G_0	G_{300}	$G\tau$ (sec)	$(G_0 - G_{300})/G_0$
ES	43.4 ± 1.2	40.1 ± 0.7	10.9 ± 0.8	0.07 ± 0.01
EH	46.8 ± 1.9	41.9 ± 1.8	8.3 ± 0.7	0.11 ± 0.01
AS	43.6 ± 0.9	12.3 ± 0.9	7.5 ± 0.6	0.72 ± 0.02
KD	56.2 ± 3.4	15.7 ± 2.2	2.6 ± 0.2	0.72 ± 0.03
MS	75.7 ± 1.2	67.6 ± 1.0	14.2 ± 1.8	0.11 ± 0.01
MR	80.7 ± 0.6	74.6 ± 0.3	13.8 ± 1.9	0.08 ± 0.01
MH	88.2 ± 1.9	85.0 ± 1.8	9.2 ± 1.6	0.04 ± 0.01

G_0 : 初期値, G_{300} : 最終値, $G\tau$: 緩和時間, $(G_0 - G_{300})/G_0$: 応力緩和の大きさ

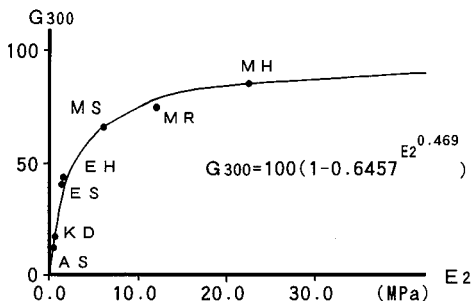


図11 遅延弾性率 E_2 と最終値 G_{300} との関係。
 E_2 と G_{300} との間には、Spearman の順位相関の検定の結果、1%以下の危険率で正の相関関係を認めた。

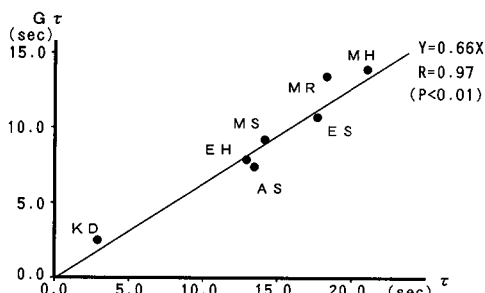


図12 緩和時間 τ と緩和時間 $G\tau$ との関係。
 τ と $G\tau$ との間には、Spearman の順位相関の検定の結果、1%以下の危険率で正の相関関係を認めた。

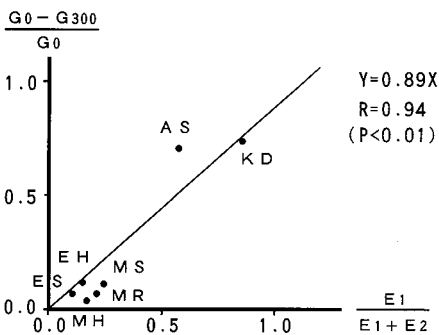


図13 応力緩和の大きさ $E_1/(E_1+E_2)$ と $(G_0-G_{300})/G_0$ との関係。
 $E_1/(E_1+E_2)$ と $(G_0-G_{300})/G_0$ との間には、Spearman の順位相関の検定の結果、1%以下の危険率で正の相関関係を認めた。

との関係は、図13に示すように重相関係数 $R=0.94$ 、1%以下の危険率で $Y=0.89X$ の回帰直線で表せることが判明した。

考 察

I. 試験材料について

1. 材料の選択

軟質裏装材の定義については、現在までのところ明確なものはない。ADA³⁸⁾は“Soft resilient liners are considered only as temporary expédients.”と記述しており、軟質裏装材は暫間的な材料であると述べているのみである。わが国においても、軟質裏装材は明確に定義づけられておらず、しかも用語に関しても軟質裏装材と同義的な意味を有するものとして軟性裏装材^{14,18,21,22,28)}、軟質レジン³⁹⁾、弾性裏装材⁴⁰⁻⁴²⁾、軟質裏装材^{3,20,33,43)}などが用いられており、統一されていない。

著者は早川と同様に「軟質裏装材とは、失われた粘膜を補って、咬合圧を緩和する役割を果たし、比較的長期間使用可能な義歯床用材料である」⁴³⁾と考える。したがって、ティッシュコンディショナーとは明確に区別されなければならない。現在、軟質裏装材としては、シリコン系^{3,4)}、フッ素樹脂系^{3,44-46)}、ポリオレフィン系^{3,47-50)}が挙げられる。本研究に用いた軟質裏装材からは、アクリル系^{3,4)}を除いたが、その理由は、アクリル系の大部分がティッシュコンディショナーと組成が同じであり、溶媒であるエタノール、可塑剤であるブチルフタリルブチルグリコレート、およびジ-n-ブチルフタレートが溶出し、2~3週間で表面が汚染され、細菌付着を生じ、長期間の使用に関しては問題があると報告^{3,40,51-55)}されていることによる。近年開発されたエチルメタクリレート系のASについては、現在までのところ組成、硬化機序などが明らかにされていないが、本研究では新しい系の軟質裏装材として選択した。

以上より、軟質裏装材としてシリコン系、エチルメタクリレート系、フッ素樹脂系、ポリオレフィン系の中から長期間使用可能と考えられる、ES, EH, AS, KD, MS, MR, MH を選択した。

2. 試料形態について

現在までのところ、ADA 規格、JIS 規格、ISO 規格において、軟質裏装材の特性を分析するための試料の大きさに関する規定は、定められていない。

篠原ら³¹⁾は長さ 50 mm、幅 5 mm、厚さ 1.0 mm の試料形態で、鱒身¹⁸⁾は直径 25.0 mm、厚み 2.0 mm の試料形態で、河野ら²⁰⁾は縦 40 mm、横 25 mm、厚み 1.0, 2.0, 3.0 mm の 3 種類の試料形態で、平沼ら^{21,22)}は大きさについては記載がないが、厚み 2.0 mm の平板状試料で試験を行っている。いずれの試験試料も厚みが 1.0 mm から 3.0 mm の平板状試料で

あった。これは義歯裏装時を想定したものと考えられる。

しかし、厚みの薄い平板状試料では、荷重時にガラス板や金属の台座など、測定装置との接触部において面の拘束、すなわち摩擦の影響を受け、本来各材料が有する粘弾性特性を分析することは不可能と考えられる。換言すれば、厚みの薄い平板状試料を分析して得られた粘弾性特性は、面の拘束を受けたみかけ上の粘弾性特性であって、本来軟質裏装材が有する粘弾性特性ではない。

著者は、この面の拘束による影響を予備実験で確認した。予備実験1として直径18.0 mm、厚さ3.0 mmのレジン板上にES, EH, AS, KD, MS, MR, MHを1.0 mmおよび2.0 mmの厚みに裏装後、直径10.0 mmの圧迫桿ジグで荷重し、リラクゼーション試験を行った。表5にその結果を示した。この結果から明らかかなように、厚さ1.0 mm、2.0 mmの試料のいずれにおいても瞬間弾性率および遅延弾性率は、20 mmの試料と比較して、有意に大きい値($P < 0.01$)を示した。このことは、軟質裏装材を薄く、しかもレジン上に裏装することによって、レジン面からの拘束を受け、本来の特性より硬い材料として評価されることを示している。臨床において比較的簡便に、軟質裏装材の粘弾性特性を評価する方法を開発することが本研究の目的である。したがって、その目的を達成するためには、同一材料であるにもかかわらず、試験方法の相

違により異なった粘弾性特性を有する材料として分析される試料形態ではなく、本来の粘弾性特性を分析し得る試料形態を採用する必要がある。すなわち、厚みの薄い平板状の試料形態では、みかけ上の粘弾性特性を分析することになり、新しい粘弾性特性評価法を確立するための試料形態としては不適切である。

軟質裏装材が本来有する粘弾性特性を分析するための試料形態は、理論的には面の拘束を受けない無限大の厚みを有する円柱形であるが、現実としてそのような形態の試料を作製することは不可能である。McCarthyら¹²⁾およびDuranら¹³⁾は、ADA規格の弾性印象材の評価法のADA Specification No. 19を用いて、ティッシュコンディショナーやResilient Linerの粘弾性特性を評価している。この規格では、直径12.7 mm、厚さ19.0 mmであった。

Willsonら⁶⁾およびRobinsonら³⁰⁾は、British Standard 4284の規格の試料形態でクリープ試験や圧縮試験を行っている。この規格では、直径12.5 mm、厚さ20.0 mmであった。日高¹⁴⁾は、予備実験としてアクリル系とシリコン系の軟性裏装材の粘弾性特性を分析するために直径13.0 mm、厚さ20.0 mmの試料を用いている。これらの報告を参考にするとともに、面の拘束を可及的に排除し、しかも荷重時にバックリング(座屈)⁵⁶⁾を起こさない試料形態として、本研究では直径12.0 mm、厚さ20.0 mmの円柱形を採用した。

表5 予備実験1での各分析パラメータの平均値と標準偏差

	$E_1 + E_2$ (MPa)	E_2 (MPa)	η (MPa·sec)
ES (1.0 mm)	6.03 ± 1.16	3.57 ± 0.81	7.23 ± 1.65
	4.52 ± 0.66	3.41 ± 0.44	7.18 ± 0.67
EH (1.0 mm)	5.07 ± 1.52	3.15 ± 1.01	5.39 ± 1.01
	4.16 ± 0.49	2.88 ± 0.53	7.79 ± 2.29
AS (1.0 mm)	4.14 ± 0.33	0.65 ± 0.24	8.40 ± 0.36
	4.34 ± 0.42	0.89 ± 0.16	9.64 ± 2.07
KD (1.0 mm)	5.65 ± 1.19	1.11 ± 0.39	11.18 ± 1.85
	7.10 ± 1.32	1.26 ± 0.29	15.35 ± 2.75
MS (1.0 mm)	9.24 ± 1.33	7.45 ± 1.08	24.89 ± 6.37
	11.24 ± 0.81	8.54 ± 0.75	41.96 ± 2.61
MR (1.0 mm)	18.35 ± 2.02	15.89 ± 1.83	31.05 ± 6.72
	19.72 ± 1.87	16.23 ± 1.65	50.32 ± 5.17
MH (1.0 mm)	32.85 ± 2.24	29.70 ± 2.19	33.49 ± 4.18
	39.13 ± 0.92	34.06 ± 0.69	72.60 ± 4.56

直径18.0 mm、厚み3.0 mmのレジン板に軟質裏装材を1.0 mmと2.0 mmの厚みに裏装

II. 試験方法について

1. リラクゼーション試験

軟質裏装材の粘弾性特性を分析する試験法としては、従来よりクリープ試験とリラクゼーション試験が用いられている^{34,36,37}。クリープ試験は、一定荷重下における歪の挙動を測定する試験法であり、リラクゼーション試験は、一定歪下における応力の挙動を測定する試験法である。ティッシュコンディショナーを含め、軟質裏装材の粘弾性特性を分析する試験法として、従来より、一定荷重下におけるクリープ試験が多く用いられており^{5,7,10,12-16,18-23,26,28,30}、リラクゼーション試験を用いた報告は、わずかに見られるのみである^{17,30-32,57}。

軟質裏装材の臨床応用の目的は、咀嚼時の床下粘膜の疼痛緩和である。したがって、本材料を評価するためには、応力緩和の大きさを分析することが最も重要であり、本研究のように一定歪下におけるリラクゼーション試験を行うことが、応力緩和を評価する上で適切であると考えられる。

以上より、本研究では試験法としてリラクゼーション試験を採用した。

2. 変位速度と歪量について

著者は本研究に先立ち、リラクゼーション試験における変位速度の大きさが、軟質裏装材の粘弾性特性に与える影響を明らかにする目的で、本研究で用いた7種類全ての軟質裏装材に対して3種類の変位速度(0.1 mm/sec, 0.5 mm/sec, 1.0 mm/sec)で負荷除荷試験を行い、硬化率について検討した⁵⁸。この結果からESとEHの硬化率は、変位速度の相違による統計学的有意差を認めなかったが、他の試料の硬化率については、変位速度の相違により統計学的有意差を認めた。さらに、負荷時と除荷時の応力の軌跡は一致しなかった。このことは、全ての軟質裏装材が粘性を有していることを示している。リラクゼーション試験では、初期変位を与えた後に、各分析パラメータを測定することになる。したがって、初期変位を与える段階では、可及的に粘性の影響を排除する必要がある。遅い速度で初期変位を与えた場合、粘性を有する物質では、測定前に粘弾性挙動が生じた状態になるため測定不可能となる。そこで本研究では、設定した初期変位の付与が完了した直後において、荷重ジグの制止が可能な最高速度として、1.0 mm/secを変位速度とした。

歪量は10% (初期変位が2.0 mm) とした。歪量を10%未満とした場合には、荷重時に試料とジュラルミン製ジグとの接触不均一が生じやすく、ばらつきが大きくなる。逆に歪量が大きすぎる場合には、初期変位

の付与に時間を要する。すなわち、粘弾性挙動が進行した状態になるため、粘弾性パラメータの正確な測定が不可能となる。以上の理由から本研究では歪量として10%を採用した。

3. ゴム硬度計試験

臨床では、軟質裏装材は厚さ1.0 mmないし2.0 mmに裏装されるため、レジンによって拘束された状態における粘弾性特性を評価する方法を考えなければならない。

Holtら³⁵は、義歯に裏装した軟質裏装材を評価する方法について報告している。この報告では、直径3.0 mmのジグを義歯床粘膜面に接触させ、クロスヘッドスピード0.02 in/min (約 8.5×10^{-3} mm/sec)で荷重し、リラクゼーション試験を行っている。この結果からRebound Index (RI)を求め、パラメータRIを用いることが、軟質裏装材の評価をする上で有用であると述べている。しかし、この方法では、変位速度が極めて遅いため、RIは粘弾性挙動を表すパラメータとは考えられない。しかも、臨床的に変位速度約 8.5×10^{-3} mm/secを用いて分析することは極めて困難であり、臨床的評価法としては不適切である。

以上より、種々の凹凸を有する義歯床粘膜面に対しても応用が可能な点接触による試験法で、かつ比較的簡便に臨床応用可能な試験法を見いだすことが、軟質裏装材の粘弾性特性を評価する上で重要であると考えた。

ゴム硬度計試験法は、点接触による試験法であり、臨床においても、比較的簡便に応用可能である。しかも、裏装面全域を細分化して分析することにより、厚み1.0 mmないし2.0 mmに裏装した軟質裏装材の粘弾性特性を総合的に把握することも可能と考えられる。

以上の理由から本研究では、ゴム硬度計試験法を採用した。

III. 分析方法について

1. 3要素固体モデル

従来より、ティッシュコンディショナーおよび軟質裏装材の粘弾性特性を分析する目的で、4要素流体モデルが用いられてきた^{14,18,20-22,26,30,33,59}。

しかし、本研究において選択した軟質裏装材の粘弾性特性を分析する上で、従来の4要素流体モデルを用いることは不適切と考えられる。すなわち、ある一定歪を与えた場合に、初期応力を示した後、時間の経過とともに応力が緩和し、しかも応力がある一定値に収束する材料、すなわち、漸近弾性挙動を示す材料が、材料力学的に固体であると定義されている³⁴。図6と図7は本研究において使用した軟質裏装材の応力緩和

曲線である。この応力緩和曲線から明らかのように、本研究において使用した7種類の軟質裏装材は、全て材料力学的には固体とみなされる。以上より、本研究では、軟質裏装材の粘弾性特性を分析するモデルとして、固体モデルを選択した。

固体モデルの要素は3つとした。3要素であることから、試験によって得られた実測値と3要素固体モデルから得られた理論値との適合度は、4要素以上のモデルに比較して信頼性の劣る可能性がある。そこで本研究で用いた7種類計35試料全ての試験のデータについて、実測値と理論値との適合度を明らかにするために、両者に関する重相関係数を求め、F検定を行った。その結果、表2に示すように全ての試料について、リラクゼーション試験から得られた実測値と、応力と歪の式から得られる理論値とは、0.1%以下の危険率で統計学的に有意に適合していることが判明した。以上のことから、3要素であっても、本研究における実測値と理論値とは、極めて高い適合性を有することが示された。

さらに、平沼ら²²⁾は、4要素流体モデルで軟質裏装材の粘弾性特性を分析しているが、シリコン系のMolloplast-B, Mollosil, Neo-Snuggerでは η_3 を測定することができなかったと報告している。多田ら³³⁾も同様に、モルテノにも η が存在しないと報告している。このことは4要素流体モデルを用いて分析した場合、4要素目のダッシュポットがほとんど作用していないことを意味している。このダッシュポットを取り除けば、3要素固体モデル⁶⁰⁾となる。

以上より、軟質裏装材をリラクゼーション試験により分析する上で、3要素固体モデルを用いることの有用性が明らかとなり、本研究では、3要素固体モデルを用いた。

2. 分析パラメータ

(1) リラクゼーション試験

5つの分析パラメータ、瞬間弾性率 E_1+E_2 、遅延弾性率 E_2 、粘性率 η 、緩和時間 τ 、応力緩和の大きさ $E_1/(E_1+E_2)$ について分析を行った。

瞬間弾性率 E_1+E_2 は、瞬間の弾性変形の大きさに関係するパラメータと考えられる。この値が大きい場合は、荷重直後における弾性変形を起こしにくいことを表している。

遅延弾性率 E_2 は、経時的な弾性変形の大きさに関係するパラメータであり、粘性率 η は流れやすさを表すパラメータと考えられる。遅延弾性と粘性は、応力緩和という現象の中で関連性を有するパラメータである。 E_2 と η が大きい場合には、経時的に弾性変形を起こしにくく、流れにくいことを表している。

一般にMaxwellモデルにおいて、応力が初期応力の $1/e$ となるまでの時間を緩和時間 τ として定義づけられている^{36,37)}。そこで初期応力が全緩和量の $(1-1/e)$ に減少した応力となるまでの時間を、リラクゼーション試験における緩和時間 τ とした。緩和時間 τ は、 η を E_1 で除することで求めることができるが、このパラメータは、応力緩和がいかに早く生じるかを知る指標と考えられている^{36,37)}。

応力緩和の大きさを表すパラメータについては、現在までのところ明確に定義されていない。しかし、軟質裏装材が有する応力緩和の大きさは、初期応力に対する応力の全緩和量の割合とすることで応力緩和能を表す一つの指標になると考え、 $E_1/(E_1+E_2)$ を分析パラメータとした。この値が大きければ、応力緩和が大きいことを表している。緩和時間と応力緩和の大きさは、軟質裏装材が有する応力緩和の早さと大きさを客観的に判断するパラメータであると考えられる。

(2) ゴム硬度計試験

4つの分析パラメータ、初期値 G_0 、最終値 G_{300} 、緩和時間 $G\tau$ 、応力緩和の大きさ $(G_0-G_{300})/G_0$ について分析を行った。

初期値 G_0 は荷重直後の値を表すものであり、最終値 G_{300} は5分後の値を表すものである。

ゴム硬度計の値の減少は、スプリングに負荷される荷重量の減少により生じており、応力の緩和現象を捉えている。したがって緩和時間 $G\tau$ は、応力緩和の早さを表すパラメータであり、この値が小さいほど応力緩和は早く生じると考えられる。また、応力緩和の大きさは、初期値 G_0 に対するゴム硬度計値の全減少量 (G_0-G_{300}) の割合、すなわち $(G_0-G_{300})/G_0$ とした。この値が大きければ、応力緩和が大きいことを表すものと考えられる。

IV. 結果について

1. リラクゼーション試験

(1) 応力緩和曲線

ES, EH, KDは、ほぼ同程度の初期応力を示し、ASはさらに小さい初期応力であった。また、MS, MR, MHは、ES, EH, AS, KDに比較して、初期応力は約7倍以上であった。このことは、同じ変位を与えるためには、MS, MR, MHではかなり大きい荷重が必要なことを示している。換言すれば、同一荷重において、荷重直後ではASが最も歪みやすく、次いでES, EH, KDが同程度であり、MS, MR, MHは、極めて歪みにくいと考えられる。

- (2) 瞬間弾性率 $E_1 + E_2$, 遅延弾性率 E_2 , 粘性率 η , 緩和時間 τ , 応力緩和の大きさ $E_1/(E_1 + E_2)$

瞬間弾性率 $E_1 + E_2$ の結果から、荷重初期の段階において、AS と KD が最も弾性変形を起こしやすく、次いで ES と EH であり、MS, MR, MH は、AS に比較して極めて弾性変形を起こしにくい弾性特性を有すると考えられる。

遅延弾性率 E_2 の結果から、AS と KD の値は極めて小さく、他の試料に比較して、経時的に最も弾性変形を起こしやすい弾性特性を有すると考えられる。

粘性率 η の結果から、ES, EH, KD の値はほぼ同程度に小さく、同程度の粘性特性を有すると考えられる。

緩和時間 τ に関しては、KD の値のみが有意に小さく、他の試料に比較して、より短時間で応力緩和が生じると考えられる。応力緩和の大きさにおいても KD の値が有意に大きく、応力緩和能が7種類の軟質裏装材の中で最も大きいと考えられる。以上より、軟質裏装材が本来有する粘弾性特性が明らかとなった。

2. リラクゼーション試験の結果とゴム硬度計試験の結果との対応関係について

リラクゼーション試験の結果とゴム硬度計試験の結果において、4つの分析パラメータ間、すなわち瞬間弾性率 $E_1 + E_2$ と初期値 G_0 , 遅延弾性率 E_2 と最終値 G_{300} , 緩和時間 τ と緩和時間 $G\tau$, 応力緩和の大きさ $E_1/(E_1 + E_2)$ と $(G_0 - G_{300})/G_0$ において統計学的に有意な対応関係が認められた。ゴム硬度計試験法における分析パラメータは、初期値 G_0 , 最終値 G_{300} , 緩和時間 $G\tau$, 応力緩和の大きさ $(G_0 - G_{300})/G_0$ の4つである。

上記の4つの分析パラメータにおいて、 $E_1 + E_2$ と G_0 , および E_2 と G_{300} は、特定の指数関数で近似でき、 τ と $G\tau$, および $E_1/(E_1 + E_2)$ と $(G_0 - G_{300})/G_0$ は、特定の一次式で近似できた。これにより、初期値 G_0 から瞬間弾性率 $E_1 + E_2$, 最終値 G_{300} から遅延弾性率 E_2 が、さらに、 E_1 が推定可能である。また、緩和時間 $G\tau$ からは、緩和時間 τ を推定することができる。緩和時間 τ は、 $\tau = \eta/E_1$ の関係式より算出したことから、粘性率 η は、 $\eta = \tau \times E_1$ として求めることができる。すなわち、ゴム硬度計試験により求められた初期値 G_0 , 最終値 G_{300} , 緩和時間 $G\tau$ から粘性率 η を推定することが可能である。以上から、ゴム硬度計試験法を用いた場合も、リラクゼーション試験を用いた場合と同様に、軟質裏装材の粘弾性特性を分析し得ることが明らかとなった。

しかも、リラクゼーション試験は、面接触による試

験法であり、実際の臨床では、この方法を用いて軟質裏装材を裏装した義歯の粘弾性特性を分析することは困難であり、かつ不適切である。

これに対し、ゴム硬度計試験では、測定用圧迫棒が点接触であることから、種々の凹凸を有する義歯床粘膜面に対しても応用が比較的容易であり、かつ、裏装面全域を細分化して分析することにより、厚み 1.0 mm ないし 2.0 mm に裏装した軟質裏装材の粘弾性特性を総合的に把握することが可能であると考えられる。

以上より、臨床においては比較的簡便に軟質裏装材の粘弾性特性を評価し得る方法として、点接触であり、しかも裏装面全域を細分化することにより、裏装した軟質裏装材の粘弾性特性を分析し得るゴム硬度計試験法が有用であることが強く示唆された。

総 括

長期間使用可能と考えられる7種類の軟質裏装材について、リラクゼーション試験を行い、3要素固体モデルを用いて本来材料が有する粘弾性特性を評価した。さらに、ゴム硬度計試験法を用いて軟質裏装材の粘弾性特性を評価することを試み、以下の結果を得た。

1) 軟質裏装材をリラクゼーション試験により分析する上で、3要素固体モデルを用いることの有用性が明らかとなった。

2) 荷重直後では、AS と KD は最も弾性変形を起こしやすく、次いで ES と EH であり、MS, MR, MH は、極めて弾性変形を起こしにくい弾性特性を有する結果を得た。

3) AS と KD は、経時的にも最も弾性変形を起こしやすい弾性特性を有する結果を得た。

4) ES, EH, KD はほぼ同程度の粘性特性を有することが判明した。

5) KD は他の6種類の軟質裏装材に比較して、より短時間で応力緩和が生じた。さらに、KD は他の6種類の軟質裏装材に比較して、大きい応力緩和能を有することが示された。

6) 瞬間弾性率 $E_1 + E_2$ と初期値 G_0 , および遅延弾性率 E_2 と最終値 G_{300} との間には、1%以下の危険率で正の相関関係が認められ、両者の対応関係は各々指数関数による近似式で表すことができた。

7) 緩和時間 τ と $G\tau$, および応力緩和の大きさを表す、 $E_1/(E_1 + E_2)$ と $(G_0 - G_{300})/G_0$ との間には、1%以下の危険率で直線相関が認められた。

8) 粘性率 η は、ゴム硬度計試験法によって求められる初期値 G_0 , 最終値 G_{300} , 緩和時間 $G\tau$ から推定することが可能である。

以上より、長期間使用可能な軟質裏装材の粘弾性特

性が明らかとなった。さらに、臨床応用上、ゴム硬度計試験法を用いて軟質裏装材の粘弾性特性を評価することの有用性が強く示唆された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、終始御懇篤なる御指導ならびに御校閲を賜りました本学歯科補綴学第一講座津留宏道教授に衷心より感謝の意を表しますとともに御教示、御校閲を賜りました本学歯科理工学講座山木昌雄教授、ならびに本学歯科補綴学第二講座濱田泰三教授に深謝いたします。また、材料力学的な立場から大変親切な御指導と、研究遂行上多大な御支援を賜りました広島大学工学部第一類機械系弾塑性学教室吉田総仁助教授、ならびに岡田達夫工学博士に心から御礼申し上げます。さらに、研究遂行上および本論文作成上、御助言と御鞭撻を賜りました本学歯科補綴学第一講座大川周治講師、佐藤裕二講師に厚く御礼申し上げますとともに、研究遂行上、多大の御支援をいただきました朝日大学歯学部歯科補綴学第一講座長澤 亨教授、本学歯科補綴学第一講座赤川安正助教授、ならびに御協力をいただいた操田利之歯学士をはじめ教員各位に感謝いたします。最後に陰ながら私の研究を支えてくれた妻に心から感謝します。

文 献

- 1) 岡根秀明, 橋田博文, 津島隆司, 佐々木元, 長澤 亨, 津留宏道: 総義歯の床面積が咬合力の発現に及ぼす影響に関する実験的研究. 補綴誌 23, 428-436, 1979.
- 2) 大川周治, 岡根秀明, 赤川安正, 谷 信吾, 石嶋誠司, 津島隆司, 津留宏道: フレンジ・テクニクを応用した後に軟質裏装材「クレペート」を使用して咀嚼機能を回復した総義歯の1症例. 補綴誌 26, 55-62, 1982.
- 3) 平澤 忠, 平林 茂: 市販各種リベース材の現状とその材料学的な整理として. QDT 12, 53-66, 1987.
- 4) Qudah, S., Harrison, A. and Huggett, R.: Soft lining materials in prosthetic dentistry: a review. *Int. J. Prosthodont.* 3, 477-483, 1990.
- 5) 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.
- 6) Wilson, H.J. and Tomlin, H.R.: Soft lining materials: Some relevant properties and their determinations. *J. Prosthet. Dent.* 21, 244-250, 1969.
- 7) Braden, M.: Tissue conditioners. II. Rheologic properties. *J. Dent. Res.* 49, 496-501, 1970.
- 8) 佐藤鎮城: 機能印象材の粘弾性特性に関する基礎的研究. 九州歯会誌 25, 334-348, 1971.
- 9) Starcke, E.N. Jr., Marcroft, K.R., Fischer, T.E. and Sweeney, W.T.: Physical properties of tissue-conditioning materials as used in functional impressions. *J. Prosthet. Dent.* 27, 111-119, 1972.
- 10) 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.
- 11) McCarthy, J.A. and Moser, J.B.: Mechanical properties of tissue conditioners. Part I. Theoretical considerations, behavioral characteristics, and tensile properties. *J. Prosthet. Dent.* 40, 89-97, 1978.
- 12) McCarthy, J.A. and Moser, J.B.: Mechanical properties of tissue conditioners. Part II. Creep characteristics. *J. Prosthet. Dent.* 40, 334-340, 1978.
- 13) Duran, R.L., Powers, J.M. and Craig, R.G.: Viscoelastic and dynamic properties of soft liners and tissue conditioners. *J. Dent. Res.* 58, 1801-1807, 1979.
- 14) 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.
- 15) 藤井一郎, 川上謙治, 岡崎光正, 福田紳一, 山口親彦, 松村芳明, 一山茂樹, 三木敬一: Tissue Conditioner に関する基礎的研究 (第1報) 圧縮特性とクリープ特性について. 北海道歯科医師会誌 33, 53-62, 1983.
- 16) 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.
- 17) DeMot, B., DeClercq, M. and Rousseeuw, P.: Viscoelastic properties of four currently used tissue conditioners. *J. Oral. Rehabil.* 11, 419-427, 1984.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 河野文昭, 多田 望, 中畑哲也, 佐藤修斎, 羽田 勝, 松本直之: 軟質裏装材の緩圧効果に関する研究. 第1報 平行板実験. 補綴誌 32, 1241-1252, 1988.
- 21) 器材薬劑室: 粘膜調整材ならびに軟性床用裏装材の臨床的評価に関する検討. 日歯師会誌 41, 607-616, 1988.
- 22) 平沼謙二, 佐野恭之, 太田 功, 菅田明美: 粘膜調整材ならびに軟性床用裏装材の物理的性質よりみた臨床的評価. DE 88, 27-34, 1989.
- 23) 平沼謙二, 太田 功, 佐野恭之: ティッシュコンディショナーの粘弾性特性と経時的变化について. 歯科ジャーナル 32, 5-11, 1990.
- 24) Braden, M. and Clarke, R.L.: Viscoelastic properties soft lining materials. *J. Dent. Res.* 51, 1525-1528, 1972.
- 25) Ellis, B., Lamb, D.J. and Al-Nakash, S.: The

- elastic modulus of soft denture liners. *J. Biomed. Mater. Res.* **14**, 731, 1980.
- 26) 器材薬劑室：軟性床用裏装材の性状に関する検討. 日歯師会誌 **43**, 1173-1185, 1990.
- 27) Graham, B.S., Jones, D.W. and Sutow, E.J.: Clinical implications of resilient denture lining material research. Part I: flexibility and elasticity. *J. Prosthet. Dent.* **62**, 421-428, 1989.
- 28) 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.
- 29) Dootz, E.R., Koran, A. and Craig, R.G.: Comparison of the physical properties of 11 soft denture liners. *J. Prosthet. Dent.* **67**, 707-712, 1992.
- 30) Robinson, J.G. and McCabe, J.F.: Creep and stresses relaxation of soft denture liners. *J. Prosthet. Dent.* **48**, 135-140, 1982.
- 31) 篠原直幸, 嶺崎良人, 鬼塚 雅, 藤井孝一, 井上勝一郎：軟口蓋実質欠損の補綴に応用したシリコーン系材料の力学的性質. 第1報. 臨床例と応力緩和. 補綴誌 **27**, 774-779, 1983.
- 32) 篠原直幸, 嶺崎良人, 自見 忠, 藤井孝一, 井上勝一郎：軟性裏装材の力学的性質に関する研究—応力緩和挙動の経時的変化—. 補綴誌 **27**, 1242-1246, 1983.
- 33) 多田 望, 河野文昭, 永尾 寛, 川村 厚, 萬好哲也, 羽田 勝, 松本直之：軟質裏装材の緩圧効果に関する基礎的研究. 補綴誌 **35**, 85回特別号：176, 1991.
- 34) W. フリュージェ原著 堀 幸夫訳：固体の力学シリーズ1. 粘弾性学. 培風館, 東京, 1-23, 1973.
- 35) Holt, R.A., Zylinski, C.G. and Ducanson, M.G.: Force versus time profiles of selected heat-processed dentures liners. *Int. J. Prosthodont.* **4**, 164-168, 1991.
- 36) 村上謙吉：レオロジー基礎論. 産業図書, 東京, 75-92, 1991.
- 37) 小野木重治：化学者のためのレオロジー. 化学同人, 京都, 53-72, 1990.
- 38) American Dental Association: Guide to Dental Materials and Devices, ed 8. Chicago, 1976-1978, The American Dental Association, p. 168.
- 39) 川上道夫：軟質レジンの材料科学. 歯科技工 **15**, 513-518, 1987.
- 40) 濱田泰三, 重頭直文, 村田比呂司：義歯の裏装. 日本医療文化センター, 東京, 1991.
- 41) 津留宏道, 長澤 亨, 佐藤隆志, 高木道弘, 浜田重光, 岡田周造：弾性裏装材の特性およびその臨床応用について. 日本歯科評論 **417**, 59-67, 1977.
- 42) 川崎文孝, 滝新典生, 柳箸明朗, 吉川建美, 五十嵐千恵, 細井紀雄, 尾花甚一：常温重合による弾性裏装材の臨床成績について. 補綴誌 **21**, 368-376, 1977.
- 43) 早川 巖：軟質裏装材の応用. 歯科ジャーナル **20**, 702-706, 1984.
- 44) 早川 巖, 打田年実, 河江 信, 辻 喜之, 木村恵子, 増原英一, 永岡勝久：新しい軟質裏装材 (軟質フルオロポリマー) の臨床への応用. 歯界展望 **54**, 1019-1033, 1979.
- 45) 早川 巖, 長尾正憲, 坂内信男, 増原英一：新開発の餅状フッ素系軟質裏装材の性質と使用法. 歯界展望 **68**, 383-392, 1986.
- 46) 早川 巖, 野村知子, 松井一則, 鈴木勝美, 長尾正憲, 増原英一：餅状フッ素系軟質裏装材の開発研究. 補綴誌 **30**, 321-325, 1986.
- 47) 津留宏道, 平井浩二, 妹尾輝明, 植野正人：軟質裏装材「モルテノ」の有用性と多目的利用. 歯科技工 **15**, 506-512, 1987.
- 48) 津留宏道, 長澤 亨, 大川周治, 吉田耕一郎, 平井浩二：新しい義歯床用軟質裏装材「モルテノ」による義歯の製作. 歯科技工 **15**, 431-438, 1987.
- 49) 津留宏道, 長澤 亨, 大川周治, 吉田耕一郎, 平井浩二：新しい義歯床用軟質裏装材「モルテノ」の臨床評価. 歯科技工 **15**, 519-525, 1987.
- 50) Ohkawa, S., Matsukawa, T., Nagasawa, T. and Tsuru, H.: Clinical evaluation of a new resilient denture liner in long-term use. *Dent. Mater. J.* **8**, 129-134, 1989.
- 51) 森居研治, 三輪条二, 奥野善彦, 杉中秀寿：アクリル系軟性レジン裏装材の粘膜面に発生した汚れの細菌学的検査. 補綴誌 **22**, 679-683, 1978.
- 52) 佐藤博信, 竹内敏洋, 鱈身進一, 篠原 功, 豊田静夫, 井上勝一郎, 柿川 宏, 服部信一, 上原秀樹, 鬼塚 雅：義歯裏装材および機能的印象材に対する義歯清掃材の影響. 第1報. 補綴誌 **26**, 840-848, 1982.
- 53) Kazanji, M.N.M. and Watkinson, A.C.: Soft lining materials: their absorption of, and solubility in, artificial saliva. *Br. Dent. J.* **165**, 91-94, 1988.
- 54) 平林 茂, 野本理恵, 大久保勝久, 平澤 忠：義歯床用軟質裏装材の流動性と吸水性について. 鶴見歯学 **16**, 305-311, 1990.
- 55) 蟹江隆人, 寺尾隆治, 有川裕之, 門川明彦, 濱野徹, 藤井孝一, 井上勝一郎：義歯洗浄材による軟性裏装材の劣化. 補綴誌 **36**, 488-495, 1992.
- 56) 竹内洋一郎：材料力学. 日新出版, 東京, 251-260, 1983.
- 57) Murata, H., Shigeto, N. and Hamada, T.: Viscoelastic properties of tissue conditioners-stress relaxation test using Maxwell model analogy. *J. Oral. Rehabil.* **17**, 365-375, 1990.
- 58) 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：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—. 広大歯誌 **25**, (印刷中), 1993.

- 59) 川上道夫：歯科材料とレオロジー．愛院大歯誌
2, 1-14, 1964.
- 60) 川上道夫：レオロジー．一力学模型によって粘弾
性体の変形を考える一．DE 51, 24-34, 1979.