



Title	弾性砥石による表面仕上げに関する研究（第4報）：PVA発泡体の内部構造と機械的性質
Author(s)	五十嵐, 悟; Igarashi, Satoru; 斎藤, 勝政 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 70, 25-36
Issue Date	1974-02-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41197
Type	departmental bulletin paper
File Information	70_25-36.pdf



弾性砥石による表面仕上げに関する研究 (第4報)

—— PVA 発泡体の内部構造と機械的性質 ——

五十嵐 悟* 齋藤勝政**

(昭和48年7月31日受理)

Study on Surface-finishing with an Elastic Wheel (IV)

— The Structure and Mechanical Properties of PVA-foam —

Satoru IGARASHI Katsumasa SAITO

Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaidō University

(Received July 31, 1973)

Abstract

In order to determine the mechanism of surface-finishing of soft metals with a PVA-wheel (a kind of elastic wheel), the authors analyzed the behavior of one single active grain at the surface of the wheel in grinding of soft metals.

To extend this study, it is necessary to clarify the structure and mechanical properties of the PVA-foam which is a bond of the PVA-wheel.

The PVA-foam is quite different in the character from the usual vitrified bond and has quite different mechanical properties from the usual one.

The PVA-foams containing no grains were prepared in the same process as to make the PVA-wheel and studied as following.

(1) The size and shape of pores in the cross section of the PVA-foams were observed by an optical microscope.

(2) Young's modulus and creep characteristics of the foams were investigated by compression tests.

(3) The effects of compression in the foaming process for regulating the foam structure on the above mentioned structure and mechanical properties were discussed.

目 次

1. 緒 言	26
2. 試料について	26
3. PVA 発泡体の内部構造	27
4. PVA 発泡体の機械的性質	30
5. 結 言	35

* 精密工学科 精密機器学第二講座

** 精密加工学第一講座

1. 緒 言

弾性砥石による軟質金属材料の表面仕上機構を明らかにするために、PVA 砥石作業面における一つの砥粒切れ刃の挙動を、模型工具を用いて解析した。この場合、砥粒が、力学的に粘弾性体として挙動する高分子材料によって保持されている点を考慮して、模型工具を粘弾性体で支持し、この模型工具による軟質金属材料の引っかき現象を解析する方法を採用した。形成された引っかき痕の形状と、工具支持材料の機械的性質、被削材の組織および機械的性質との関係については第1報¹⁾で報告した。

しかし、PVA 砥石における砥粒切れ刃の切削力学模型を考える場合、PVA 砥石およびその結合剤である PVA 発泡体の内部構造と機械的性質を検討しておくことがまず必要である。特に PVA 砥石の結合剤 (PVA 発泡体) は、従来から広く用いられてきたビトリファイド砥石の結合剤とは、材質、機械的性質とも全く異ったものである。そこで、次に述べるようにして、PVA 砥石の結合剤である PVA 発泡体の内部構造の観察と、機械的性質 (圧縮特性) の測定を行なった。

一般に、発泡体は規則性のある構造を有すると考えられており、最も基本的な規則性は、次の泡沬に関する Plateau の法則²⁾である。

1. 泡沬の会合部 (Plateau's border) において、3 枚の泡沬の薄膜は立体角 120° を成して会合する。
2. 1 点に会合する Plateau's border の数は 4 以下である。

この泡沬の配列に関する法則が、発泡体の場合にも成立することが確かめられ、また、この規則性に基づく発泡体の構造の幾何学的模型も考えられている³⁾。

一方、発泡体の機械的性質についても幾つかの報告⁴⁾があり、模型を用いた圧縮強さに関する実験式の導出も試られている^{3),5)}。それらによれば、圧縮強さは密度の増加と共に増加すること、また、発泡成形時の圧縮による気孔の扁平化のために、発泡体は異方性を有し、圧縮強さは低下する³⁾ことなどが示されている。特に、PVA 発泡体と同じ原料から製造されるピニロンスポンジについては、その構造がピニロン繊維による立体網目構造であり、繊維中には微細な気孔が存在すること、また、圧縮特性として、ひずみが約 5% に達すると急激な圧縮変形が起ることが報告⁶⁾されている。

本研究では、以上の研究結果を参考にしながら、PVA 発泡体の内部構造と、機械的性質として圧縮特性を調べ、また、組織調整のための圧縮成形が、PVA 発泡体の気孔特性と圧縮特性に及ぼす影響について検討した。

2. 試料について

PVA 砥石は、成形時に厚さ方向 (以後成形方向と呼ぶ) に圧縮され、圧縮量の大小によって、砥石としての組織調整が行なわれる。また、成形後、気孔にフェノール系樹脂を処理剤として施し、結合度の調整が行なわれる。この処理は、砥石成形後に行なわれるので、砥石の内部構造には影響を与えない。したがって、PVA 砥石の内部構造は、砥粒の粒度と組織調整のための圧縮成形によって支配される。後者は、砥粒密度と、結合剤である PVA 発泡体の気孔の形状、大きさなどの気孔特性を支配する。

一方、砥石の機械的性質は、砥石の粒度、結合度、組織によって支配されるが、研削中の砥石の変形を考えると、成形方向に垂直な砥石半径方向の圧縮特性が重要である。

以上の点を考慮して、本研究では、フェノール系樹脂による硬化処理を施さない PVA 発泡

体について、その気孔特性と成形方向に垂直な方向の圧縮特性を調べ、また、組織調整のための圧縮成形の影響を検討した。

実験に使用した PVA 発泡体は、砥粒を混入していない点を除いては、PVA 砥石と同じ方法で製作された板状の試料^{注)}で、PVA 砥石と同様厚さ方向に圧縮され、組織調整が行なわれている。用いた試料の種類を表 2-1 に示す。表中記号 S は、硬化処理を施していないことを示し、添字の数字は組織を表わし、その数が大きい程、前述の圧縮量が大きく、組織が密であることを意味する。

表 2-1 実験に使用した PVA 発泡体の種類

試料記号	密度 g/cm ³	気孔率 %
S ₁	0.162	86.8
S ₂	0.177	85.6
S ₃	0.182	85.2

3. PVA 発泡体の内部構造

3-1. 観察と解析方法

PVA 発泡体の内部構造は、試料を薄片にして平面的に観察した。PVA 発泡体は変形し易く、したがって、薄片を作成する際に気孔が変形する恐れがある。そこで図 3-1 に示す試料切断用の試料保持器を試作した。この試料保持器と日本剃刀あるいは安全剃刀を用いて、100 μ 程度の厚さの薄片試料を得ることができた。内部構造の観察には、正立型金属顕微鏡 (Olympus MFT_r)、および、ズーム式双眼実体顕微鏡 (Olympus SZ) を用い、照明は透過光によった。また、上述の顕微鏡に写真撮影装置 (Olympus PM 6) を取り付け、顕微鏡写真による気孔の寸法、形状測定を行なった。

PVA 発泡体の構造は、図 3-2 に示すように、PVA 繊維による立体網目構造となっている。その気孔は、直径が約 100 μ 以上のものの外に、PVA 繊維内に直径が数 μ 程度の微細な気孔の存在が認められる。発泡構造として前者の気孔特性を解析した。すなわち、各試料について、薄片の顕微鏡写真から 500 ケ以上の気孔を無作為に抽出し、それらの気孔の長径、短径を測定して気孔の大きさを調べ、また、長短径比を算出して形状を調べた。さらに、上記の測定および計算値の相対頻度を求めて、発泡構造に対する成形の影響を調べた。

3-2. 結果と考察

PVA 発泡体は、すでに述べたように、PVA 繊維による立体網目構造をもち、繊維の網目によって構成された気孔は、楕円体に近い形状である。また、PVA 繊維によって形成された

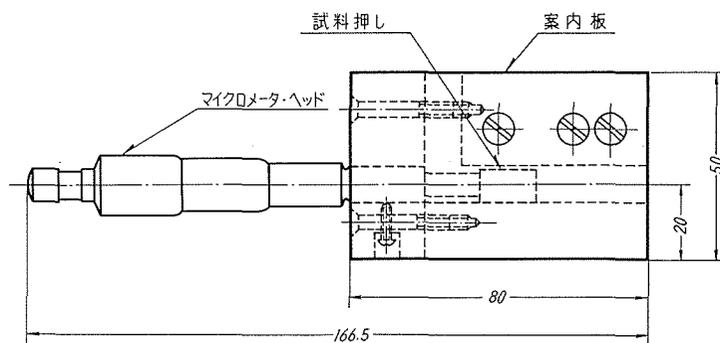


図 3-1 発泡体切断用試料保持器

注) 実験に使用した発泡体試料は、日本特殊研砥 KK 小原正氏、木村庸三氏の御厚意により製作して戴いた。

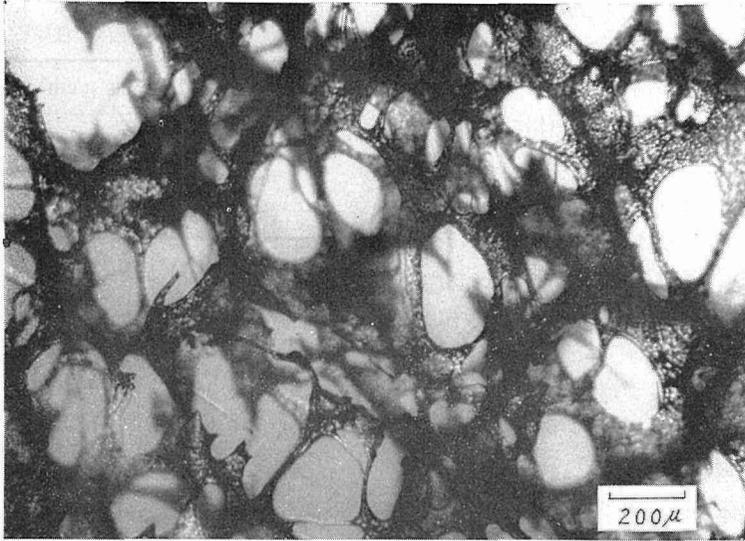


図 3-2 PVA 発泡体の内部構造

Plateau's border の数は 3 が多く、4 を越えるものはほとんどなく、PVA 発泡体は前述の Plateau の法則を満していることが分った。

PVA 発泡体の気孔の大きさと形状を調べるために、前項で述べた方法により、試料内部から切り出した薄片について、気孔の長、短径を測定した。図 3-3 と 図 3-4 は成形方向を考慮しないで、各試料について気孔の長、短径、および長短径比の相対頻度を求めた結果である。分布形状には大きな差は認められないが、長径、短径、および長短径比の平均値 (\bar{a} , \bar{b} , \bar{b}/\bar{a}) は、組織が密になる ($S_1 \rightarrow S_3$) と減少している。気孔の断面形状を楕円と考慮してその断面積を計算し、断面積の相対頻度を求めたのが 図 3-5 である。図で、組織の密な試料 S_3 の分布が面積の小さい方に片寄り、面積の平均値 (\bar{A}) も小さくなっている。以上のことから、PVA 発泡体の気孔は組織が密になると小さくなり、形は扁平化していることが分った。

しかし、気孔の形はその大きさによって異なり、扁平化の程度も気孔の大きさによって異なることが考えられる。また、成形の影響は、成形方向に平行に切り出した薄片の気孔の形状と大きさに現われるはずである。そこで、気孔をその断面積の大きさによって表 3-1 に示す 5 つの組に分類し、成形方向に平行、および垂直に切り出した試料 S_1 と S_3 の薄片について、気孔の長短径比の相対頻度を求めた。図 3-6 と 図 3-7 がその結果である。組織の粗い S_1 では、断面積が

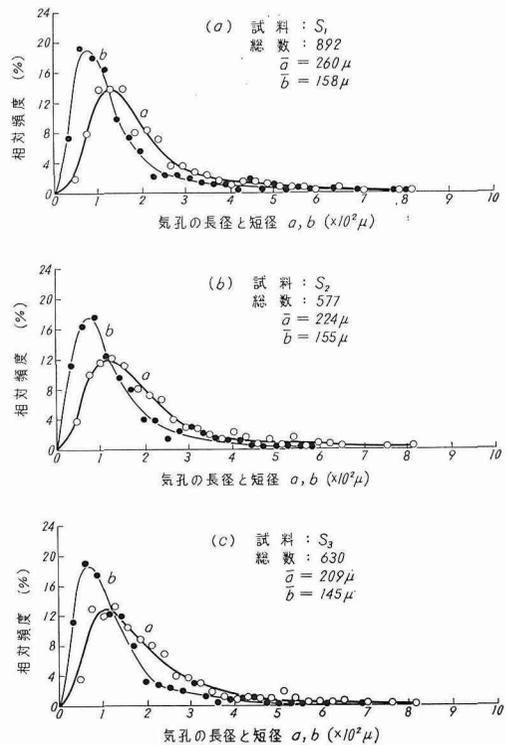


図 3-3 気孔断面の長径と短径の分布

しかし、気孔の形はその大きさによって異なり、扁平化の程度も気孔の大きさによって異なることが考えられる。また、成形の影響は、成形方向に平行に切り出した薄片の気孔の形状と大きさに現われるはずである。そこで、気孔をその断面積の大きさによって表 3-1 に示す 5 つの組に分類し、成形方向に平行、および垂直に切り出した試料 S_1 と S_3 の薄片について、気孔の長短径比の相対頻度を求めた。図 3-6 と 図 3-7 がその結果である。組織の粗い S_1 では、断面積が

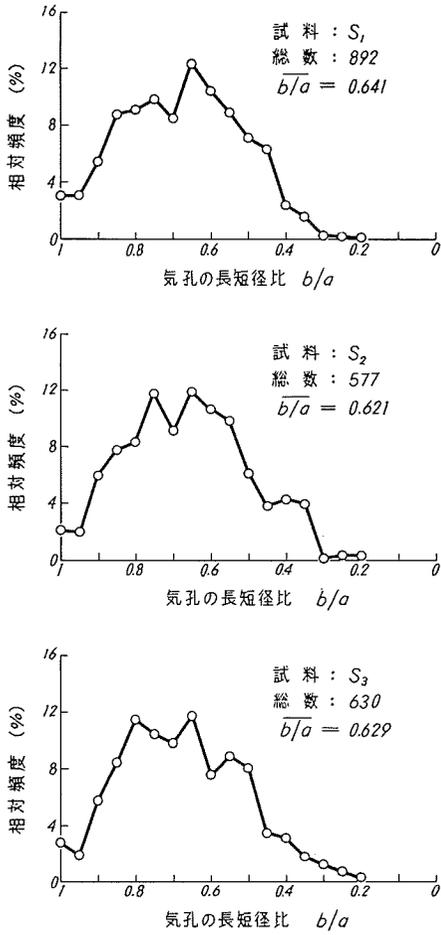


図 3-4 気孔断面の長短径比の分布

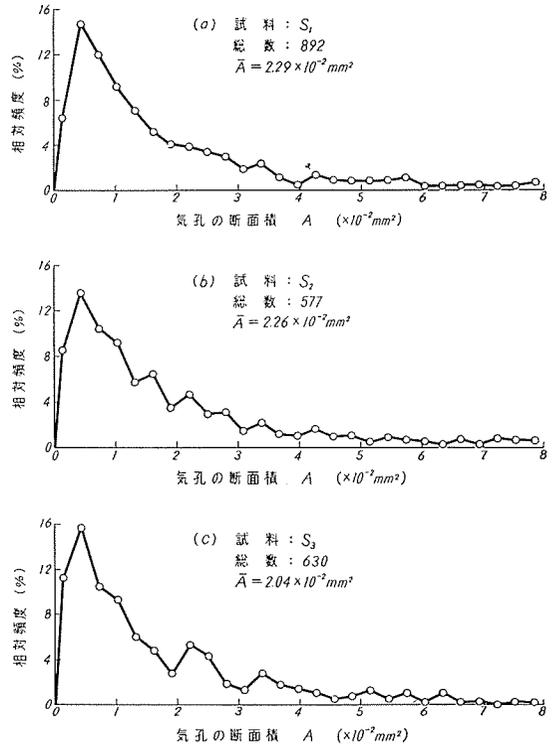


図 3-5 気孔の断面積の分布

表 3-1 PVA 発泡体の気孔の断面積による分類

記号	気孔の断面積 (A) $\times 10^{-2} \text{mm}^2$
A_1	$A < 0.75$
A_2	$0.75 \leq A < 1.5$
A_3	$1.5 \leq A < 3.0$
A_4	$3.0 \leq A < 7.5$
A_5	$7.5 \leq A$

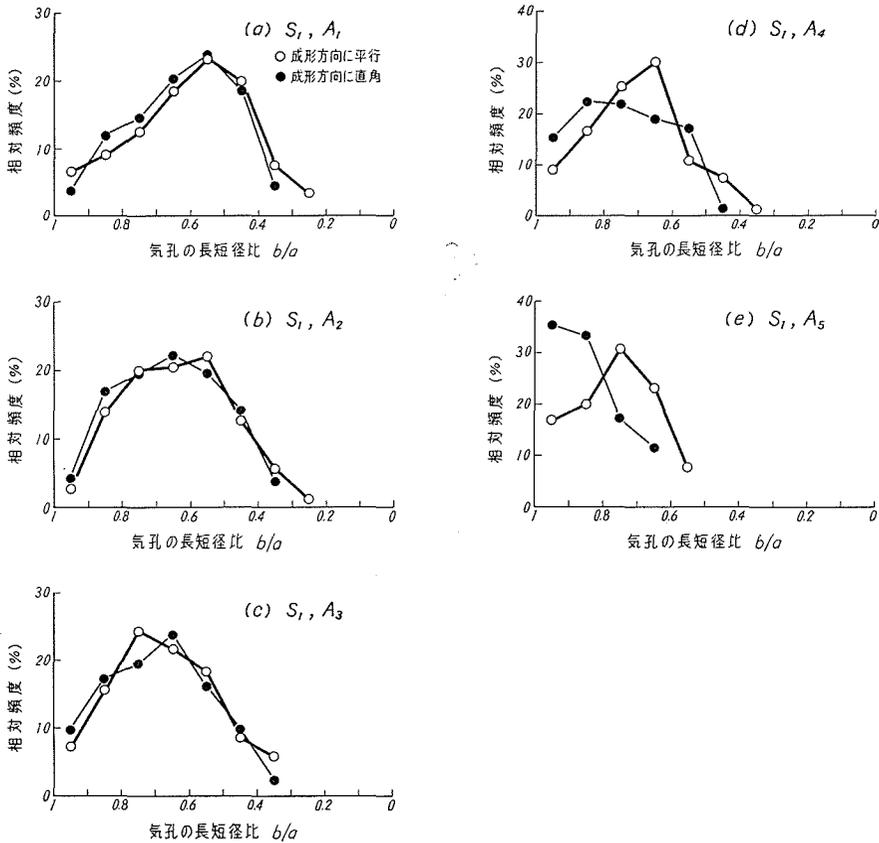


図 3-6 成形方向と気孔の大きさを考慮した長短径比の分布

$3 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ 以上の気孔について、成形方向に平行な断面の気孔の長短径比が、垂直な方向のそれと比較して小さく、気孔が成形の影響で偏平化していることが分る。一方、組織の密な S_3 の場合には、 $1.5 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ 以上の気孔に上述の成形の影響が認められ、また、この影響は気孔の断面積が大きい程著しい。さらに、いずれの試料でも気孔の断面積が大きくなる ($A_1 \rightarrow A_5$) と、分布は長短径比が 1 に近い方へ移行し、断面積の大きい気孔ほど形状は円に近いことが分る。すなわち、組織調整のための成形時の圧縮によって、気孔は小さくなり、偏平化するが、組織が密になるほど、また、気孔断面積が大きいほどこの傾向は顕著となる。

4. PVA 発泡体の機械的性質

PVA 発泡体は一般に粘弾性体として挙動し、応力とひずみが十分小さい範囲では線型粘弾性体と考えることができる。線型粘弾性理論に基づく粘弾性測定については、数多くの報告がある⁷⁾。本研究では、これらの測定方法の中から静荷重による圧縮試験法を採用し、PVA 発泡体の機械的性質として、圧縮弾性率とクリープ特性を検討した。

4-1. 実験と解析方法

4-1-1 圧縮弾性率の測定

発泡体の機械的性質としては、通常 25% 変形点における圧縮応力によって圧縮強さ（硬さ）が定義されている。しかし、PVA 発泡体の場合、ひずみが 5% に達すると気孔の変形が急激に

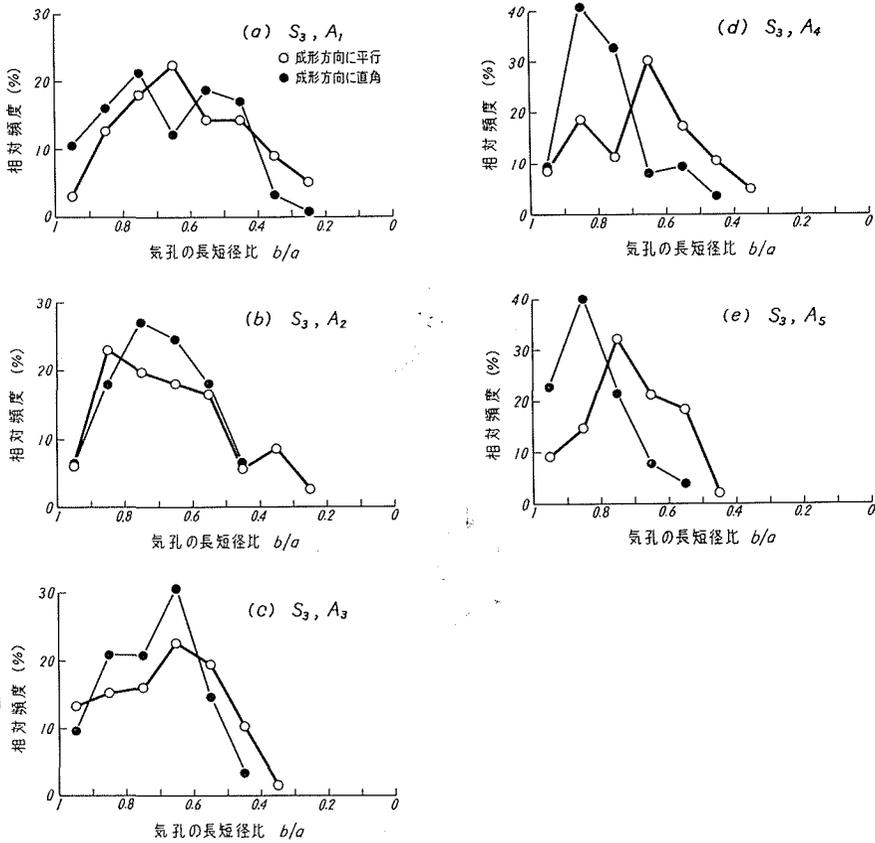


図 3-7 成形方向と気孔の大きさを考慮した長短径比の分布

起り、応力ひずみ曲線に変曲点の生じることが報告⁶⁾されている。本研究では、低ひずみ領域での特性を吟味すれば十分であるから、圧縮試験は5%以下のひずみ領域に限って行なった。

実験装置は、ダイヤルゲージの測定圧調整用のばねを取り除き、スピンドル上端に荷重受皿としてアルミ合金製の平板をねじ止めした簡単な構造のものである。スピンドルの下端は、測定台上に置かれた試料の上面全体を、アルミ合金製の平板を介して圧縮するようになっている。測定は、荷重受け皿に順次荷重を載せ、その時の試料の圧縮変形量をダイヤルゲージの目盛から読み取ることによって行なった。この場合、PVA発泡体はクリープ現象を起すため、荷重を加えてから約20秒後の変形量を測定した。測定値から圧縮応力ひずみ曲線(圧縮特性曲線)を描き、その直線部の勾配を圧縮弾性率として求めた。

4-1-2 クリープ測定

クリープ測定に用いた装置の概要を図4-1に示す。図で、挺子の一端には荷重を加えるためのフックが取り付けられており、他端には初期荷重を調整するための平衡重錘が取り付けられている。挺子の支点から試料位置までの距離は、試料の変形量に比較して十分大きく、試料位置の挺子の動きは直線運動によって近似できる。この位置に電気マイクロメーター(東京精密製 MINICOM EMD-MA 20 D)の測定端子が取り付けられており、検出された試料の変形量はメーターを通して自動平衡型ペンレコーダ(東亜電波製 Poly Recorder)に接続され記録される。

実験は、初期荷重を調整して水平に保たれた挺子の一端に適当な荷重を加え、その時の試料

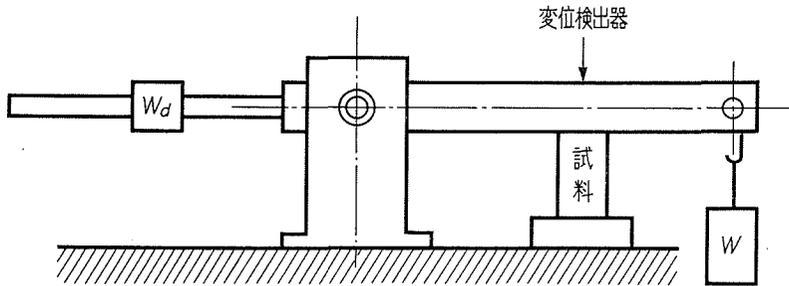


図 4-1 クリープ測定装置の概要

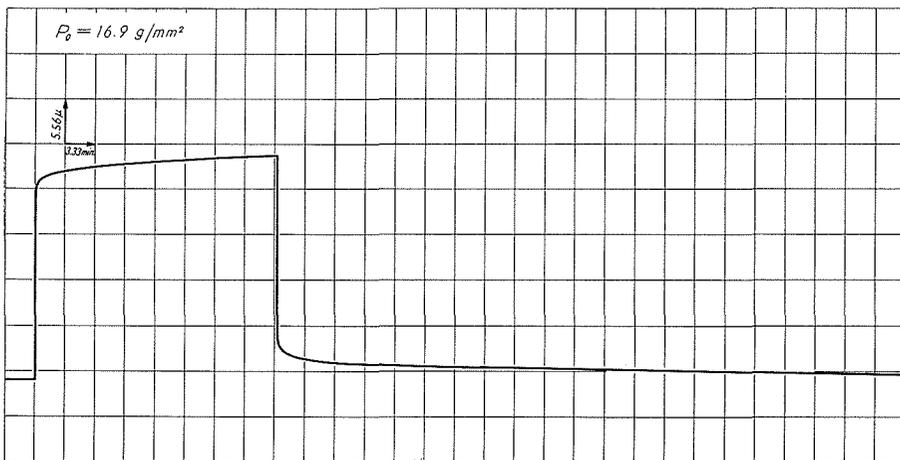


図 4-2 PVA 発泡体のクリープ曲線

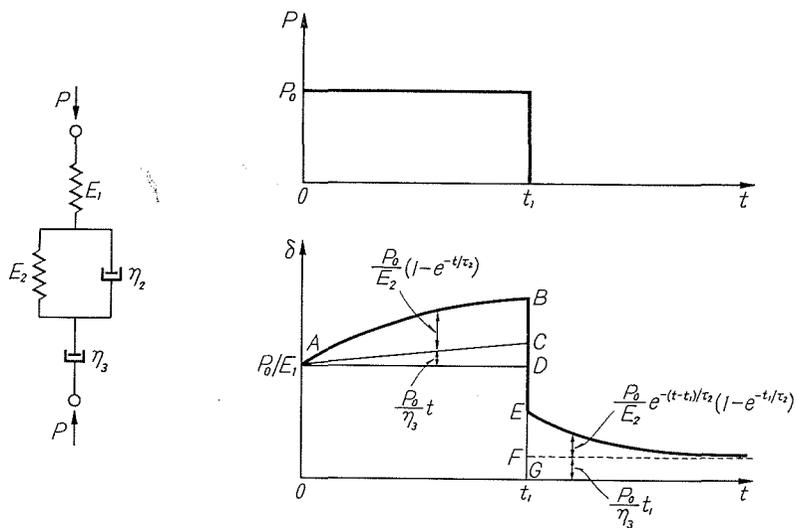


図 4-3 粘弾性 4 要素模型とクリープ曲線

の変形量を前述の測定系によって記録することによって行なった。測定時間は、荷重を加えてから2~3時間、さらに、荷重を取り除いてから2~3時間とし、この間の変形量を記録した。

記録したクリープ曲線は、その一例を図4-2に示すように、粘弾性4要素模型に対するクリープ曲線(図4-3参照)に良く対応している。そこで、PVA発泡体に対して図4-3に示す4要素模型を仮定し、クリープ曲線を解析して各要素の模型定数を決定した。解析は次のようにして行なった。

まず、4要素模型に時刻 $t=0$ で一定応力(P_0)を加え、次に時刻 $t=t_1$ でこれを取り除いた場合、ひずみ(δ)は次式にしたがって変化する。

$$\delta = \frac{P_0}{E_1} + \frac{P_0}{E_2} (1 - e^{-t/\tau_2}) + \frac{P_0}{\eta_3} t \quad (0 \leq t \leq t_1) \quad (4-1)$$

$$\delta = \frac{P_0}{E_2} e^{-(t-t_1)/\tau_2} (1 - e^{-t_1/\tau_2}) + \frac{P_0}{\eta_3} t_1 \quad (t_1 < t) \quad (4-2)$$

ここで、 $\tau_2 = \eta_2/E_2$ は中央の要素の遅延時間である。上式の間係を図示したのが、図4-3右の曲線である。この曲線を解析して、以下のように模型定数を求めることができる。

$$E_1 = \frac{P_0}{OA} = \frac{P_0}{BE} \quad (4-3)$$

$$\eta_3 = \frac{P_0}{GF} t_1 \quad (4-4)$$

時刻 $t=t_1+\tau_2$ において、ひずみは $(P_0/E_2)\{1-\exp(-t_1/\tau_2)\}/e = \overline{EF}/e$ となる。したがって、ひずみが \overline{EF}/e となる時刻($t=t_2=t_1+\tau_2$)を求めれば、次式から τ_2 が求まる。

$$\tau_2 = t_2 - t_1 = \frac{\eta_2}{E_2} \quad (4-5)$$

E_2 , η_2 は、それぞれ次式を計算して求めることができる。

$$E_2 = \frac{P_0}{\overline{EF}} (1 - e^{-t_1/\tau_2}) \quad (4-6)$$

$$\eta_2 = E_2 \tau_2 \quad (4-7)$$

また、動的粘性率(η')、動的弾性率(E')は、それぞれ次式で表わされる。

$$\eta' = \frac{(1 - A\omega^2) + \tau_2 B\omega^2}{(1 - A\omega^2)^2 + B^2\omega^2} \eta_3 \quad (4-8)$$

$$E' = \frac{\tau_{13}B - A(1 - A\omega^2)}{(1 - A\omega^2)^2 + B^2\omega^2} \omega^2 E_1 \quad (4-9)$$

ただし、 ω は角振動数であり、

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \tau_2 \tau_{13} \\ B = \tau_2 + \tau_{13} + \tau_{23} \\ \tau_{13} = \eta_3/E_1 \\ \tau_{23} = \eta_3/E_2 \end{array} \right. \quad (4-10)$$

とおいた。

以上から、クリープ曲線を解析して模型定数を決定することができ、さらに、式(4-8)、式(4-9)に模型定数を用いれば、問題とする周波数範囲での動的粘性率、動的弾性率を求めることができる。

4-2. 結果と考察

前項 (4-1-1) で述べた方法によって求めた PVA 発泡体の圧縮特性曲線を 図 4-4 に示す。図から明らかなように、5% 以下の低ひずみ領域では、特性曲線は直線とみなすことができる。特性曲線の勾配として求めた PVA 発泡体の圧縮弾性率 (E_0) の値を、表 4-1 の最後の行に示した。図 4-4 および表 4-1 から、弾性率 E_0 は組織が密になる ($S_1 \rightarrow S_3$) と小さくなることが分った。この理由は次のように考えられる。発泡体の一般的性質として、密度が増加すると E_0 は増加し、一方、気孔が微細化し偏平化すると E_0 は減少することが知られている^{3,4)}。PVA 発泡体の場合、組織が密になると密度は増加している (表 2-1 参照)。しかし、3-2 で述べたように、組織が密になると気孔は小さくなり、偏平化していた。したがって、PVA 発泡体の場合には、 E_0 に及ぼす成形の影響は、密度の増加より気孔の微細化と偏平化の効果の方が大きく、その結果、組織の密な試料ほど E_0 が小さくなっていると判断される。

次に、4-1-2 で述べた方法でクリープ曲線を解析し、粘弾性 4 要素模型の模型定数を求めた結果を表 4-1 に示す。表の最後の 2 行は、模型定数を用いて計算で求めた圧縮弾性率 (E_0') と、前

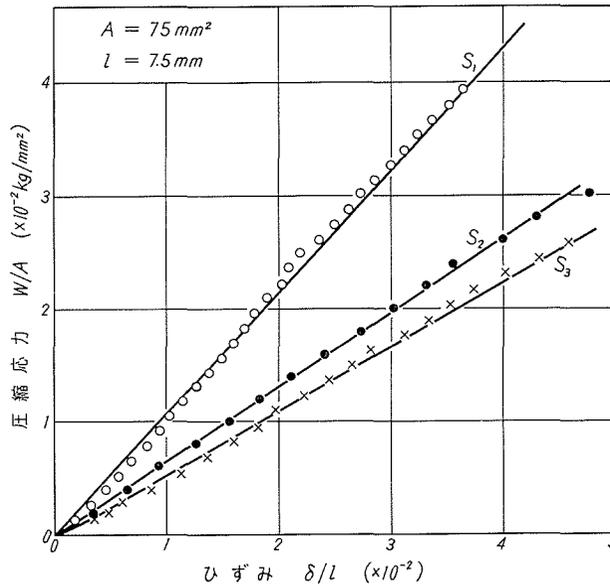


図 4-4 PVA 発泡体の圧縮特性曲線

表 4-1 クリープ曲線から求めた粘弾性 4 要素模型の模型定数と静的圧縮弾性率

		S_1	S_2	S_3
E_1	kg/mm ²	3.72	2.60	1.99
E_2	kg/mm ²	2.08	1.90	1.73
η_2	kg-s/mm ²	2.01×10	4.62	6.32×10^{-1}
η_3	kg-s/mm ²	5.05×10^4	5.20×10^3	1.32×10^{-3}
τ_2	s	9.64	2.43	3.65×10^{-1}
E_0'	kg/mm ²	1.45	1.09	9.13×10^{-1}
E_0	kg/mm ²	1.2	9.5×10^{-1}	8.0×10^{-1}

述の圧縮特性曲線から求めた弾性率 (E_0) とを比較したものである。 E'_0 は、式 (4-1) に模型定数を用いて、荷重 (P_0) を加えてから 20 秒後のひずみ (δ_{20}) を求め、 $E'_0 = P_0/\delta_{20}$ として求めた。いずれの試料についても、 E'_0 が E_0 より大きい値を示しているが、組織に対する定性的な傾向は良く一致している。

4 要素模型の動的粘性率 (η')、動的弾性率 (E') は、式 (4-8) および式 (4-9) から明らかなように、周波数 (ω) の増加 ($0 \rightarrow \infty$) に対して、 η' は η_3 から 0 に減少、 E' は 0 から E_1 に増加することが分る。表 4-1 の模型定数を用いれば、PVA 発泡体の場合、 $\omega > 1$ に対して、 $A\omega^2 \gg 1$ が成り立つから、 η' 、 E' について次の近似式を得る。

$$\eta' = \frac{\tau_2 B - A}{A^2 \omega^2 + B^2} \eta_3 \quad (4-11)$$

$$E' = \left\{ 1 - \frac{B(B - \tau_{13})}{A^2 \omega^2 + B^2} \right\} E_1 \quad (4-12)$$

さらに、可聴周波数領域では、 $A^2 \omega^2 \gg B^2$ が成り立ち、 η' 、 E' は次式で近似できる。

$$\eta' = \frac{\tau_2 B - A}{A^2 \omega^2} \eta_3 \quad (4-13)$$

$$E' = E_1 \quad (4-14)$$

各試料について、幾つかの周波数に対して計算で求めた動的粘性率、動的弾性率の値を表 4-2 に示す。動的弾性率は、静的弾性率 (E_0) と同じく、組織が密になると低下している。特に 1 Hz 以上の周波数領域では、上に示したように E' はほとんど E_1 に等しく、 η' は ω^2 に逆比例していることが分った。また、同じ周波数領域において、組織が密になると粘性率 η' は E' とは逆に増加することが分った。

表 4-2 PVA 発泡体の動的粘性率、動的弾性率

f Hz	E' kg/mm ²			η' kg-s/mm ²		
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3
10^{-4}	1.31	1.00	0.423	8.39×10	5.19×10^2	7.23×10^2
10^{-3}	1.32	1.11	0.925	8.68	7.24×10	1.60×10
10^{-2}	1.43	1.12	0.936	7.57	1.56	3.37×10^{-1}
10^{-1}	3.29	1.56	0.948	1.41	1.06	1.76×10^{-1}
1	3.72	2.57	1.50	1.28×10^{-2}	3.46×10^{-2}	8.34×10^{-2}
10	3.72	2.60	1.98	1.72×10^{-4}	3.54×10^{-4}	1.51×10^{-3}
10^2	3.72	2.60	1.99	1.72×10^{-6}	3.54×10^{-6}	1.52×10^{-5}
10^3	3.72	2.60	1.99	1.72×10^{-8}	3.54×10^{-8}	1.52×10^{-7}
10^4	3.72	2.60	1.99	1.72×10^{-10}	3.54×10^{-10}	1.52×10^{-9}

5. 結 言

PVA 砥石の結合剤として用いられる PVA 発泡体の内部構造と機械的性質を調べ、特に砥石の組織に関連して、組織調整のための成形時の圧縮の影響について検討を行ない、次のような結論を得た。

1) PVA 発泡体は、直径数 μ の微細な気孔を有する PVA 繊維による立体網目構造をもち、泡沫についての Plateau の法則を満している。

2) 網目構造によって形成される気孔の断面形状は、円に近い楕円であり、その長径と短径の比は約0.2~1にわたって分布する。この比は、断面積の大きい気孔ほど1に近く、したがって形状は円に近い。

3) PVA 発泡体の気孔の大きさは、断面積で (10^{-3} ~ 10^{-1}) mm^2 にわたって分布し、 2×10^{-2} mm^2 前後の断面積をもつ気孔が最も多い。

4) 組織調整のための圧縮成形によって、圧縮量の大きい組織の密な試料ほど気孔の大きさが小さくなり、形状は偏平化する。また、この傾向は、断面積が大きく、したがって形状が円に近い気孔に強く現われる。

5) PVA 発泡体の圧縮特性曲線は、5%以下のひずみ領域では直線とみなすことができ、この直線の勾配として求めた圧縮弾性率の値は 1 kg/mm^2 の程度であり、組織が密になると弾性率は低下する。この理由は、気孔の微細化と偏平化によるものと考えられる。

6) PVA 発泡体のクリープ特性は、粘弾性4要素模型によって説明することができた。また、クリープ曲線を解析して模型定数を定め、この模型定数を用いて動的粘性率、動的弾性率を求め、PVA 発泡体の一般的な力学的性質を論じることができた。

7) 上述の方法で求めた PVA 発泡体の動的弾性率は、可聴周波数領域において、 1 kg/mm^2 程度(静的弾性率の約2~3倍)の一定値をもち、動的粘性率は周波数の2乗に逆比例する。

8) 同じ周波数領域において、動的弾性率は静的弾性率と同様に組織が密になると低下し、一方、動的粘性率は逆に増加する。

謝 辞

本実験の一部は、辻幹男氏(当時北大工学部学生、現在東京精密 K. K. 勤務)の御協力によるものである。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 齋藤勝政, 五十嵐悟: 北大工学部研究報告, **41** (1966), 37.
- 2) J. J. Bikermann: Surface Chemistry, Academic Press (1957), 100.
- 3) 角倉敏彦, 黒江秀男, 青木信明: 応用物理, **33** (1964), 9, 662.
- 4) 例えば, J. A. Talalay: Ind. Eng. Chem., **46** (1954), 1530.
- 5) A. N. Gent, A. J. Thomas: J. appl. Polymer Sci., **1** (1959), 107.
- 6) 山田已知夫, 松崎勝司: 高分子, **10** (1961), 227.
- 7) 例えば, 祖父江寛監訳: フェリー高分子の粘弾性, 東京化学同人 (1964).