

Mechanical Properties of "Haku-Uchi Gami" Used in Processing of Gold Leaves

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Kurobe, Toshiji, Imanaka, Osamu, Kobayashi, Shigehiko メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00029612

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



箔打紙の力学的性質

— 金箔展延機構に関する基礎研究 —

黒部利次* 今中 治* 小林茂彦**

Mechanical Properties of "Haku-Uchi Gami" Used in Processing of Gold Leaves

Toshiji KUROBE, Osamu IMANAKA and Shigehiko KOBAYASHI

Abstract

Gold leaf is manufactured by traditional processing in Kanazawa, Japan. Ultra-thin gold leaf of high quality has been yielded by the procedures which the multi layers of specially-treated paper (*Haku-Uchi Gami*) and foil (raw material for gold leaves) being bundled into a pack are impacted dynamically with a pneumatically-driven hammer of a beating machine. The deforming process of the gold foil between *Haku-Uchi Gami* by beating, however, has not yet been clarified by scientific insight.

Present study has aimed to investigate theoretically the mechanical properties and dynamical behaviors of the *Haku-Uchi Gami* in connection with beating characteristics. The equations relating to the mechanical strength of the *Haku-Uchi Gami* are derived on the basis of the orientation of its constituent fiber. The theoretical predictions are fairly consistent with the results of experimental measurements of *Haku-Uchi Gami*. The detailed observations of *Haku-Uchi Gami* by optical microscopy and X-ray micro-analyzer reveal the changes in its mechanical properties at each stage of specific treatments of the paper (so called "Aku-Shori").

1. 緒 言

金箔は、仏像や仏壇などの宗教関係、漆器の沈金、蒔絵、陶磁器の絵付などの美術工芸品等にひろく用いられているが、金箔の製造はその90%以上が金沢で生産されている。金沢箔が歴史に現われるのは、文禄時代にさかのぼるが、その製箔法は明治時代まで、人手による槌打ちであった。製

* 金沢大学工学部精密工学科, 日本海城研究所員

** 金沢大学工学研究科大学院生

箔の機械化は大正年間に行われているが、金箔は多くの過程を経てでき上るものであり、まだ永年の経験と勘に頼るところが多い¹⁾

製箔工程を大きく分類²⁾すると、図1のように3工程に分かれ、延金製造、上澄製造、箔打ち工

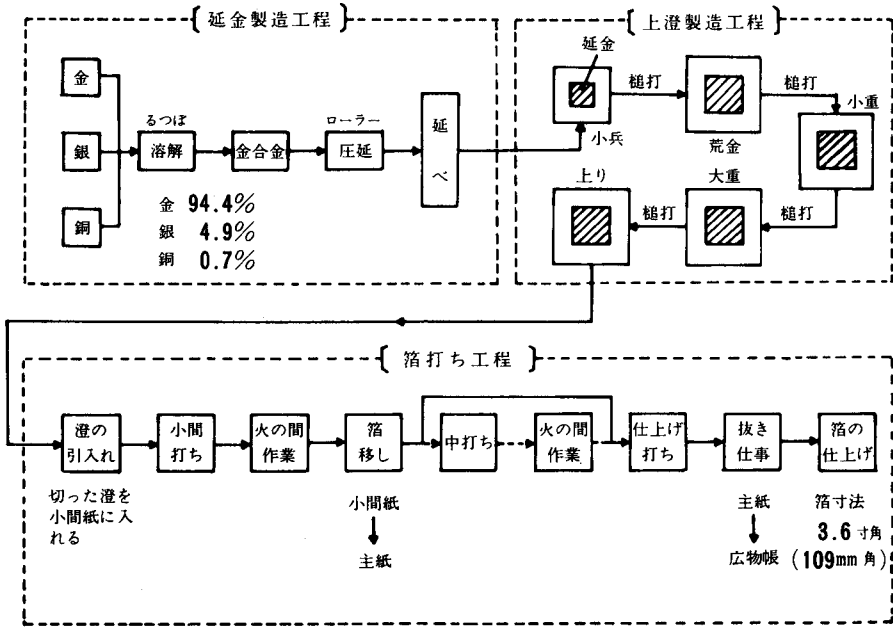


図1 金箔の製造工程

程となる。箔打ち工程中重要な因子としては、槌打ちの強さ、バックの構造と作業状態、箔打紙の品質などがあるが、製造者が一番気をつかうのは、箔打紙の良否である。これによって箔の良し悪しがほとんど決まるといってもよい。箔打紙は、原紙として西宮市名塩の和紙³⁾が使われるが、これは良質な雁皮を主に三椏、楮を配合して漉き込んだものであり、そのとき、当地方特有の粘土^(注1)を混入している。最近では、石川県能美郡の中島や金沢市の二俣でも良質な和紙を産するようになり、箔打紙の3割ぐらいはこれらを使用している。しかし、実際の箔打ちには、これをそのまま箔打紙として使用するのではなく、「延べ仕込み」、「灰汁漬け」のような特殊な処理¹⁾を施し、打紙としている。

近年、箔打機の騒音・振動が環境保全の面から問題となり、その防止対策が各種委員会^(注2)で検討されている。それと平行して、より効率のよい製箔機械の開発と、より高品位の金箔の製造法に関する研究も行われようとしている。本研究は、金箔の展延機構に関する基礎研究として、箔打紙を

注1): 特殊粘土とは、保土(白色)、天子土(卵色)、カブタ(青色)、蛇豆土(茶褐色)の4種の土を混合したもので、耐熱性があるとされている。

注2): ①製箔技術の改善に関する研究委員会: 金沢市・金沢大学工学部、②超薄箔(金箔)製造技術の利用に関する研究分科会: 精機学会

取り上げ、その力学的性質が箔の展延に如何なるかわりをもつのか、基礎的観点から調べたものである。

2. 箔打紙の弾性率に関する理論

箔打紙の弾性率が製箔工程でどのように変化するか考察するため、紙を繊維の集合体としてモデル化して理論解析する。

紙の弾性率に関しては、すでに、Hurley、二村および城戸らによって、シートが単繊維の二次元ランダム配向でできていると仮定して、理論的に求められている。また、小野木は繊維の太さの影響を考慮した三次元モデルを用いて、理論解析⁴⁾を行っている。本研究では、さらに、紙の異方性^{注3)}を考慮した式を求め、箔打紙の強度特性に関して理論的考察を行った。

2.1 模型と弾性率E

一般に、紙の弾性は、それを構成する繊維自身の性質と集合状態に直接関係したものである。繊維の構造としては、図2に示すような、相互にからみ合った立体的網目構造を考え、外部から与えられる力は均一に伝達され、変形も一様であるとする。さらに、次のような仮定、

- (1) 隣接する二つの結合点の間は、繊維は直線である。
- (2) 繊維間の結合部分は強固で、紙の変形に際してすべりは全く起らない。
- (3) 紙に均一な張力が加えられたとき、結合部での回転は起らない。すなわち、紙の変形は繊維の弾性的な伸びと曲げによってもたらされる。

を設け、さらに箔打紙の特性としての力学的異方性を考慮して、弾性率を求めることにする。

二つの結合点の間にはさまれた部分をセグメントと呼ぶが、数多くのセグメントの中から任意の1個を取り出し、その一端を原点として図3のように座標を定める。いま、セグメントの端Pに、X軸

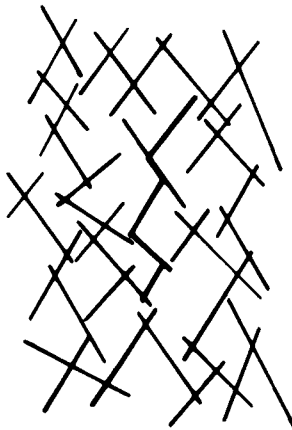


図2 繊維シートモデル

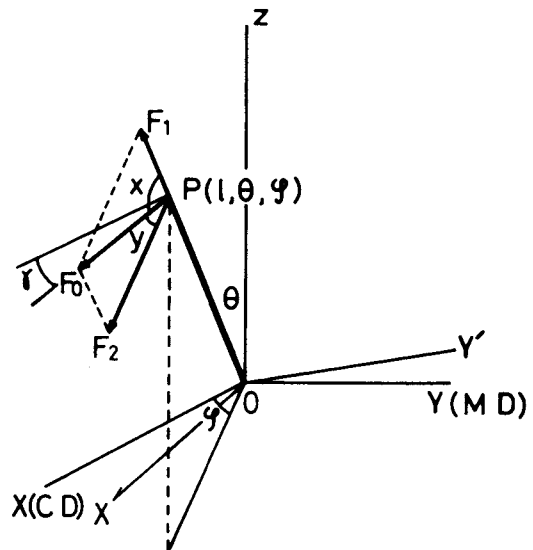


図3 セグメントの座標

注3)：紙の異方性とは、例えば、紙の Machine Direction の弾性率と Cross Direction の弾性率が異なる現象をいう。本論文では、Machine Direction に相当する方向を縦方向、あるいは MD 方向、Cross Direction を横方向あるいは CD 方向とそれぞれ記すことにする。

(シートのCD方向とする)と γ の角をなす方向(X' 軸方向)に力 F_0 が加わった場合を考える。この力を、セグメントに平行な成分 F_1 と垂直な成分 F_2 に分解すると、

$$F_1 = F_0 \sin \theta \cos |\varphi - \gamma| \quad (1)$$

$$F_2 = F_0 \sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma|} \quad (2)$$

これら二つの分力によるP点の変位をそれぞれ ξ_1 、 ξ_2 とすると、P点の X' 軸方向の変位 ξ_0 は、

$$\xi_0 = \xi_1 \sin \theta \cos |\varphi - \gamma| + \xi_2 \sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma|} \quad (3)$$

となる。ところで、 ξ_1 は図4に示すように、セグメントの両端を F_1 という力で引張ったときの伸びであるから、

$$\xi_1 = \frac{F_1 l}{AE_0} \quad (4)$$

ただし、 A はセグメントの断面積、 l はセグメントの長さ、 E_0 は繊維の弾性率である。一方、 ξ_2 は、P点に垂直な力 F_2 が加わったときのたわみであるから、前述の仮定、すなわち、両端は回転しないという仮定から、図5に示すモデルを用いてたわみが求まる。したがって、 ξ_2 は、

$$\xi_2 = \frac{F_2 l^3}{12 E_0 I} \quad (5)$$

ここで、 I は繊維の断面二次モーメントである。いま、(1)、(2)、(4)、(5)の各式を(3)式に代入し、整理すると、

$$\xi_0 = \frac{F_0 l}{E_0} \left\{ \frac{1}{A} \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma| + \frac{l^2}{12 I} (1 - \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma|) \right\} \quad (6)$$

となる。

ここで、単位立方体のシートを考え、 X' 、 Y' 、 Z の3方向にそれぞれ N_x 、 N_y 、 N_z 個のセグメントが存在するものとする。あるセグメントの X' 軸方向、 Y' 軸方向、 Z 軸方向の各成分は、 $l \sin \theta \cos |\varphi - \gamma|$ 、 $l \sin \theta \sin |\varphi - \gamma|$ 、 $l \cos \theta$ となる。いま、 l 、 θ 、 φ の分布関数を $\lambda(l)$ 、 $\Theta(\theta)$ 、 $\Gamma(\varphi)$ とおき、単位立方体シートの各方向の長さが1であることを考慮すると、

$$1 = N_x \int_0^\infty \lambda(l) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Gamma(\varphi) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Theta(\theta) l \cos |\varphi - \gamma| \sin \theta d\theta d\varphi dl \quad (7)$$

$$1 = N_y \int_0^\infty \lambda(l) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Gamma(\varphi) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Theta(\theta) l \sin |\varphi - \gamma| \sin \theta d\theta d\varphi dl \quad (8)$$

$$1 = N_z \int_0^\infty \lambda(l) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Theta(\theta) l \cos \theta d\theta dl \quad (9)$$

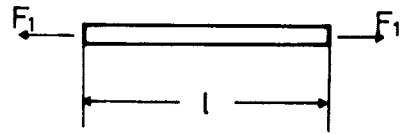


図4 セグメントの伸び

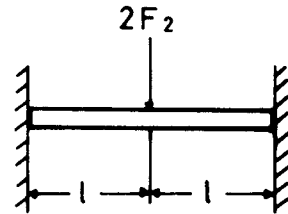


図5 セグメントのたわみ

さて、単位立方体中には、直列につながった N_x 個のセグメントから成る鎖が、 $N_y N_z$ 本並列に並んでいると考えられるが、そのうちの任意の1本の鎖の伸び ξ は、

$$\xi = N_x \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Theta(\theta) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Gamma(\varphi) \int_0^{\infty} \lambda(l) \int_0^{\infty} \Phi(I) \int_0^{\infty} \Psi(A) \xi_0 dA dl d\varphi d\theta \quad (10)$$

で与えられる。ここで、 $\Phi(I)$ は断面二次モーメントの分布関数、 $\Psi(A)$ は断面積 A の分布関数である。

いま、単位立方体シートに、 F という張力が加わって、 ξ という伸びが得られたとすると、1本の鎖に加わる張力は $F/N_y N_z$ となる。このことは同様に、各セグメントにも同じ力が加わっていることを意味するから、(6)式を(10)式に代入すると、

$$\xi = \frac{N_x}{N_y N_z} \frac{F}{E_0} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Theta(\theta) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Gamma(\varphi) \int_0^{\infty} \lambda(l) \int_0^{\infty} \Phi(I) \int_0^{\infty} \Psi(A) l \left\{ \frac{1}{A} \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma| + \frac{l^2}{12 I} (1 - \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma|) \right\} dA dl d\varphi d\theta$$

ゆえに、シートの弾性率 $E(\gamma)$ は、

$$E(\gamma) = \frac{F}{\xi} = \frac{N_y N_z E_0}{N_x \iiint \int \int \int \theta(\theta) \Gamma(\varphi) \lambda(l) \Phi(I) \Psi(A) l \left\{ \frac{1}{A} \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma| + \frac{l^2}{12 I} (1 - \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma|) \right\}} \quad (11)$$

となる。

2.2 N_x , N_y , N_z の計算

繊維シートの弾性率 $E(\gamma)$ は(11)式から求まるが、具体的な数値を得るためには N_x , N_y , N_z の計算をする必要がある。しかし、これらの値はセグメントの長さおよび方向だけでは決定できず、セグメントの太さの影響をも考慮しなければならない。そこで図6に示すように、繊維シートの一部を取り出して、それを考えてみる。いま、点 P , Q , R , S , T をそれぞれ各セグメントの結合部分の中心点とする。すると、線分 PQ , RS , ST はセグメントの長さということになる。先に、 N_x を求めるために(7)式を導いたが、その際、単位立方体中に X 軸方向に存在するセグメントの数が N_x 個であると仮定している。したがって、 N_x 個のセグメントからなる鎖が単位立方体を貫いていることになり、各セグメントの X 成分を全部加えたものが単位長さ1になる。つまり、図6からいえば、 PQ , RS ,

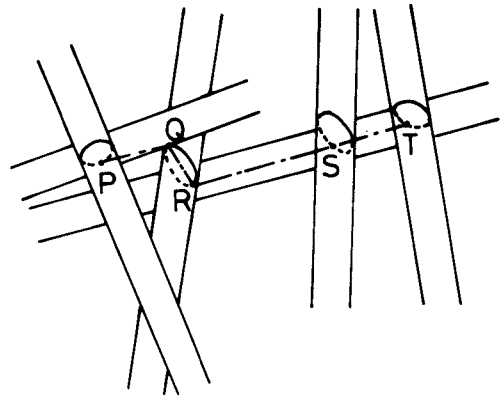


図6 繊維交差モデル

STなどのセグメントの成分をすべて加えたものになる。ここで注意しなければならないのは、PQ, RS というように、二つのセグメントが別個の繊維の場合には、PQ, RS のX'成分にセグメントの太さ、QR のX'成分を加えておかなければならない。つまり、セグメントの太さが影響してくる。このことは(8), (9)式においても同様に考慮しなければならない。

次に、(7)~(9)式に繊維の太さの影響を組込むために、図7に示すように、方向余弦が $(\sin\theta, 0, \cos\theta)$ と $(\sin\theta\cos|\varphi-\gamma|, \sin\theta\sin|\varphi-\gamma|, \cos\theta)$ を有する二つのセグメントを考える。いま、二つのセグメントの結合点を通り、両セグメントに垂直な直線の方角余弦を (l, m, n) とおくと、

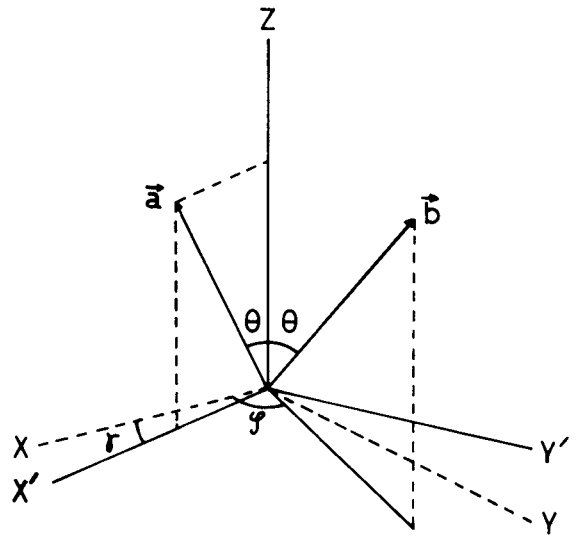


図7 セグメントの方角

$$l \sin\theta + n \cos\theta = 0$$

$$l \sin\theta \cos|\varphi-\gamma| + m \sin\theta \sin|\varphi-\gamma| + n \cos\theta = 0$$

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1$$

となる。これらから、

$$n = \frac{\tan\theta}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta} + \frac{1 - \cos|\varphi-\gamma|}{1 + \cos|\varphi-\gamma|}}}$$

$$l = \frac{-1}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta} + \frac{1 - \cos|\varphi-\gamma|}{1 + \cos|\varphi-\gamma|}}}$$

$$m = \frac{\cos\varphi - 1}{\sin|\varphi-\gamma| \sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta} + \frac{1 - \cos|\varphi-\gamma|}{1 + \cos|\varphi-\gamma|}}}$$

ここで、 l, m, n の平均値は、

$$\bar{l} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Theta(\theta) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Gamma(\varphi) l d\varphi d\theta$$

$$\bar{m} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Theta(\theta) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Gamma(\varphi) m d\varphi d\theta$$

$$\bar{n} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Theta(\theta) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Gamma(\varphi) n d\varphi d\theta$$

で与えられる。

いま、セグメントが半径 r の円形断面を有し、 r の分布関数が $\chi(r)$ で表わされるとすれば、 X 、 Y 、 Z 軸方向に対する繊維の太さの影響は、

$$\bar{l} \int_0^\infty 2r\chi(r) d\gamma, \quad \bar{m} \int_0^\infty 2r\chi(r) d\gamma, \quad \bar{n} \int_0^\infty 2r\chi(r) d\gamma$$

で表わされる。図6のPQ、RSのような二つのセグメントが別個の繊維の場合には、太さの影響は当然計算に考慮しなければならないが、RS、STのように同一の繊維の場合には影響してこない。つまり、太さの影響を受けるか受けないかは確率的なものであるから、1より小さい因子 β をかけたものが真の太さの影響となる。したがって、この繊維の太さの影響を考慮にいれて、(7)~(9)式を書きかえると、

$$1 = N_x \left[\int_0^\infty \lambda(l) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Gamma(\varphi) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Theta(\theta) l \cos|\varphi - \gamma| \sin\theta d\theta d\varphi dl \right. \\ \left. + \beta \bar{l} \int_0^\infty 2r\chi(r) d\gamma \right] \quad (12)$$

$$1 = N_y \left[\int_0^\infty \lambda(l) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Gamma(\varphi) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Theta(\theta) l \sin|\varphi - \gamma| \sin\theta d\theta d\varphi dl \right. \\ \left. + \beta \bar{m} \int_0^\infty 2r\chi(r) d\gamma \right] \quad (13)$$

$$1 = N_z \left[\int_0^\infty \lambda(l) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Theta(\theta) l \cos\theta d\theta dl + \beta \bar{n} \int_0^\infty 2r\chi(r) d\gamma \right] \quad (14)$$

2.3 計算例

CDから γ の角をなす方向の弾性率は(11)式で表わされるが、具体的計算をするために、 $\lambda(l)$ 、 $\Phi(I)$ 、 $\Psi(A)$ の分布関数を $\lambda(l) = \delta(l_0)$ 、 $\Phi(I) = \delta(I_0)$ 、 $\Psi(A) = \delta(A_0)$ と仮定する。ただし、 $\delta(l_0)$ 、 $\delta(I_0)$ 、 $\delta(A_0)$ はDiracのデルタ関数である。さらに、繊維はすべて完全に紙面に平行に横たわっているとす。すなわち、 $\Theta(\theta) = \delta(\pi/2)$ 、と仮定すると、(11)式は、

$$E(\gamma) = \frac{N_y N_z E_0}{N_x \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Gamma(\varphi) l_0 \left\{ \frac{1}{A} \cos^2|\varphi - \gamma| + \frac{l_0^2}{12I_0} \sin^2|\varphi - \gamma| \right\} d\varphi} \quad (15)$$

となる。 $\Gamma(\varphi)$ は紙面内における繊維の方向の分布関数であるが、その分布はわからないので、 $\Gamma(\varphi) = \sin\varphi$ 、($0 < \varphi < \pi/2$)と仮定し、さらに、 $\chi(r) = \delta(r_0)$ 、 $\beta = 1$ 、とおくと、

$$E(\gamma) = \frac{N_y N_z E_0}{N_x \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\varphi l_0 \left\{ \frac{1}{A_0} \cos^2|\varphi - \gamma| + \frac{l_0^2}{12I_0} \sin^2|\varphi - \gamma| \right\} d\varphi} \quad (16)$$

$$N_x = \frac{1}{l_0 \left(\frac{1}{2} \cos\gamma + \frac{\pi}{4} \sin\gamma \right)}$$

$$N_y = \frac{1}{l_0 \left\{ \left(\frac{\pi}{4} - \gamma + \frac{1}{2} \sin 2\gamma \right) \cos \gamma - \frac{1}{4} \sin \gamma \cos 2\gamma \right\}}$$

$$N_z = \frac{1}{2r_0}$$

となる。

箔打紙を考えた場合、繊維の断面が楕円形状をしていると考えるほうが自然と思われる。いま、その長軸径を $2a$ 、短軸径を $2b$ とすると、 $A = \pi ab$ 、 $I_0 = \frac{\pi}{4} ab^3$ となる。ただし、 N_z を計算する際は、計算が複雑になるため、繊維を円形断面を有するものとして近似している。その半径として $r_0 = \sqrt{ab}$ を使用した。そうすると、シートの CD 方向の弾性率 $E(0)$ は、

$$E(0) = \frac{E_0}{\frac{l_0}{3\sqrt{ab}} + \frac{2\sqrt{ab} l_0^3}{9ab}} \quad (17)$$

したがって、 $E(0)$ の値は、(17) 式より、単繊維の弾性率 E_0 、セグメントの長さ l_0 、繊維断面の長軸半径 a 、短軸半径 b の四つの値が決まれば求められる。そこで、それらの値が弾性率 $E(0)$ に対して、それぞれどのように影響するか具体的に計算してみることにする。

(I) $E(0)$ と l_0 の関係

E_0 の値を 3×10^{11} [dyne/cm²] とし、 a を 20, 10, 5 μm 、 b を 4, 2, 1 μm とそれぞれ変えて計算した結果が図 8 である。

図から、セグメントの長さ l_0 が、ある値よりも小さくなると、急激に弾性率が増加するのがわかる。また、繊維断面形状を一定 ($a/b = \text{一定}$) とした場合には、断面積が大きいほど弾性率は大きくなる。

(II) $E(0)$ と K の関係

軸比 $K (= a/b)$ の値により、弾性率がどう変わるか知るために、 a を 10 μm 一定とし、 l_0 を 20, 40, 60 μm に変えて調べてみた。計

算した結果を図 9 に示す。これによれば、 K が 1 に近づくにつれて、弾性率は急激に増加し、また、 l_0 が小さいほどその値は大きい。すなわち、断面が円形に近くなるにつれて、弾性率は大きな値となる。

箔打紙の処理工程で、灰汁漬けした後、槌打ちをするわけであるが、以上の結果をもとに槌打ちの意味を考えてみる。灰汁漬けした紙を打つことは、繊維を叩解することを意味し、槌打ちにとも

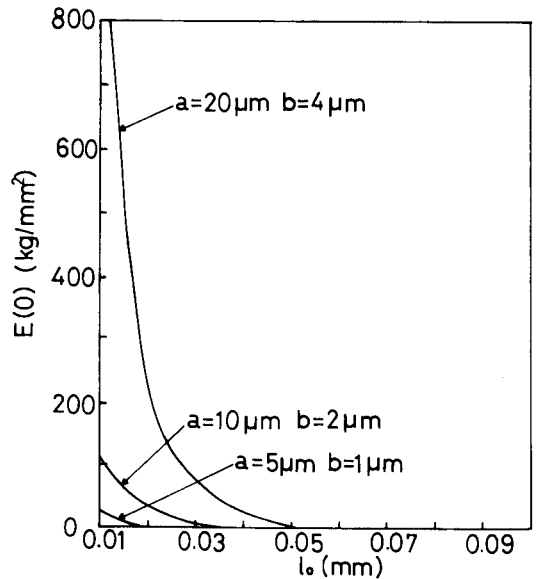


図 8 $E(0) - l_0$ の関係

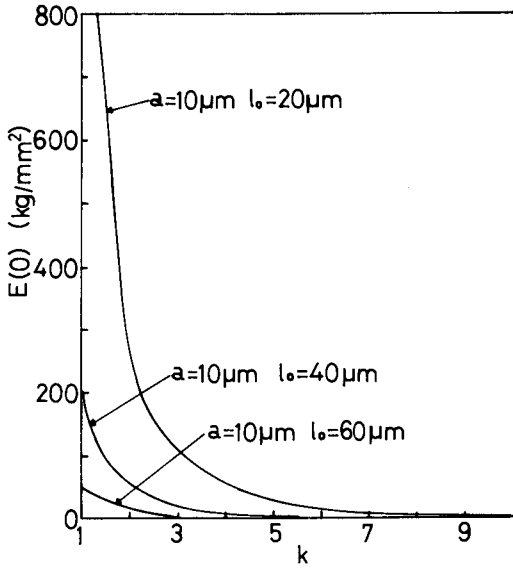


図9 E(0)-Kの関係

なって、繊維結合数は増加することになる。換言すれば、 l_0 が減少するわけで、したがって、それにより弾性率は上昇する。一方、槌打ちにともなって、繊維断面は円から楕円に次第に変形していく。このことは、軸比Kが大きくなることを意味し、結果として、弾性率は減少する。結局、その相殺により弾性率はあまり変化しないものと思われる。実際、振動リード法で求めた谷村の箔打紙の測定結果²⁾(表1)をみると、灰汁処理の回数が増えても、弾性率の値にはあまり変化がみられない。すなわち、槌打回数が増えても、箔打紙の弾性率は変わらないことを物語っており、上記の解析結果と定性的に一致する。

次に、紙の弾性率の異方性を知るために、CDの弾性率 $E(0)$ と、それから γ の角をなす方向の弾性率 $E(\gamma)$ の比をとって調べることにする。

(16)式から、

$$\frac{E(\gamma)}{E(0)} = \frac{\pi(\cos \gamma + \frac{\pi}{2} \sin \gamma) \left(\frac{l_0}{3A_0} + \frac{l_0^3}{18I_0} \right)}{\left\{ \pi \cos \gamma - \sin \gamma \cos 2\gamma - \left(\gamma - \frac{1}{2} \sin 2\gamma \right) \times \cos \gamma \right\} \left\{ \left(\frac{l_0}{3A_0} - \frac{l_0^3}{36I_0} \right) \cos^2 \gamma + \frac{l_0^3}{12I_0} \right\}} \quad (18)$$

表1 箔打紙の弾性率(谷村)

測定値 紙の種類	厚さ (mm)	弾性率 E ($\times 10^4$ kg/cm ²)	
		縦方向(MD)	横方向(CD)
原紙	0.035	11.55	4.01
灰汁3回	0.025	10.80	2.95
灰汁5回	0.023	12.12	4.90
灰汁8回	0.023	8.82	2.78
灰汁10回	0.023	8.13	3.62
灰汁13回	0.023	8.05	4.30
灰汁16回	0.020	7.65	6.34
灰汁20回	0.020	7.13	4.20

計算結果を図10と図11に示す。図10は、弾性率の値が l_0 によりどう変わるかを調べたものである。ここで、 l_0 の値を50 μ m間隔で、50 μ mから450 μ mまで変化させ計算してみた。図から明らかなように、弾性率の l_0 依存性はあまりみられない。図には50 μ mの場合と450 μ mの計算結果のみを記した。次に、軸比Kの影響を知るために、Kを1から9まで変化(間隔を2とし

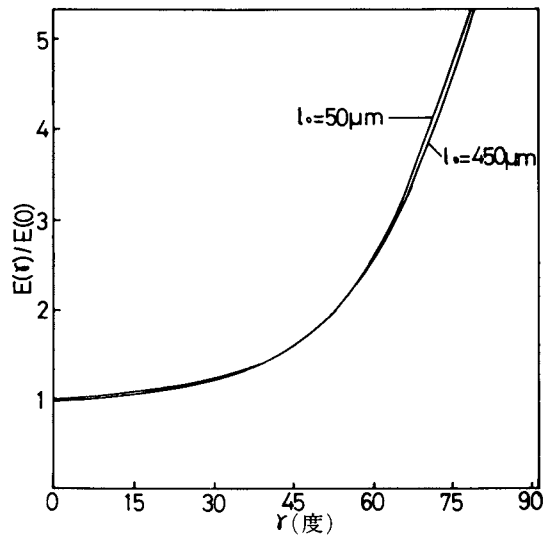


図10 l_0 の影響

た)させ計算してみた。図11にはその代表例として、 $K=1, 3, 9$ の場合について示した。この計算結果をみると、 K が大きくなるにつれて、すなわち、繊維断面が扁平な楕円形になるにしたがい、横方向の弾性率 $E(0)$ と、縦方向の弾性率 $E(90^\circ)$ の値

は接近してくるのがわかる。一方、表1の谷村の測定値からCD方向の弾性率とMD方向の弾性率の比を計算すると、表2のようになり、灰汁処理回数が増えるにつれて、両者の値が次第に接近してくるのがわかる。後に

表2 E_{MD}/E_{CD} の変化

紙の種類	比 $\frac{E_{MD}}{E_{CD}}$
原紙	2.88
灰汁3回	3.66
灰汁5回	2.47
灰汁8回	3.17
灰汁10回	2.25
灰汁13回	1.87
灰汁16回	1.21
灰汁20回	1.70

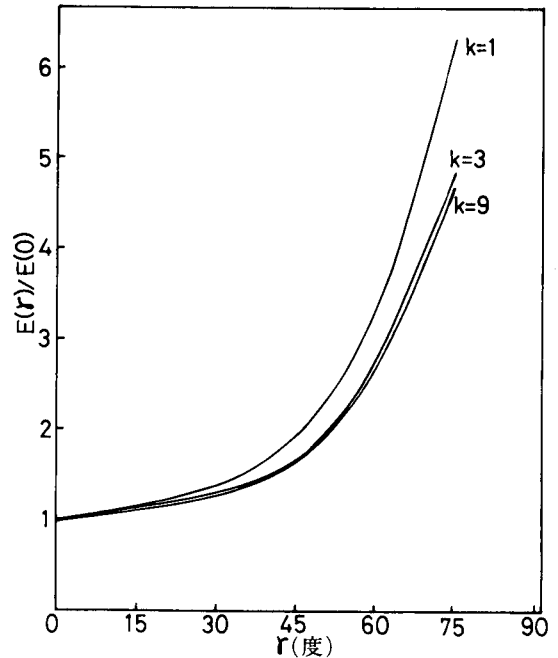


図11 K の影響

記すように、これらの解析結果は、紙の表面状態と紙厚断面の変化状態を観察することにより、実験的に明らかにし得るものと考えられる。

3. 引張試験による箔打紙の弾性率の測定

3.1 弾性率の方向依存性

3.1.1 実験方法

試料として箔打紙の女紙を使用した。試片形状は幅15mm、長さ90mm（両端20mmはつかみしろ）の短冊形であり、切出し方向をCD方向から順次角度を変えて切り出した。角度としては、0度（CD）、15度、30度、45度、60度、75度、90度（MD）の7水準を選んだ。実験に際し、紙中の含有水分を一定にするため、調温、調湿した。その方法として、試片を $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ の乾燥器内に保ち、その中に無機塩類の飽和水溶液をいれて調湿（67%と32%）し、ボックス内で24時間放置した。実験は、試片の含有水分が変化しないよう、乾燥器から取り出して後すばやく行った。引張試験は、毎秒1mmの引張り速度の条件で行い、張力—伸び曲線をX—Yレコーダで記録した。

3.1.2 実験結果

図12に、箔打紙（女紙）の荷重—伸び曲線の一例を示す。図から、試片に引張を与えると次第に伸び、AB間ではそれはほぼ直線となり、BC間において急激に紙内の流動がおりカーブし、さらにCD間で直線となってD点で破断する。この線図の直線ABの傾斜から、紙の弾性率 E が、また、破断点より破断ひずみ ϵ_{max} と破断応力 σ_{max} がそれぞれ求められる。いま、横軸に試片切り出

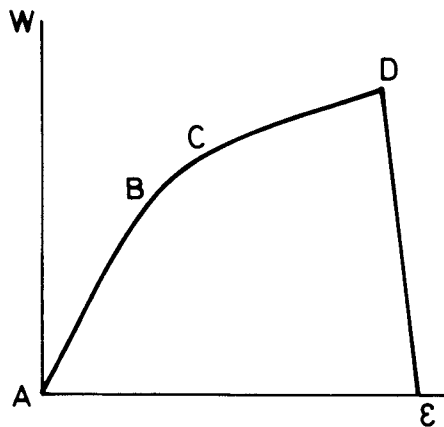


図12 引張り—伸び線図

し角 φ をとり、縦軸に図12から求められた E , σ_{max} , ϵ_{max} の各値をプロットして示したのが、図13, 図14, 図15である。

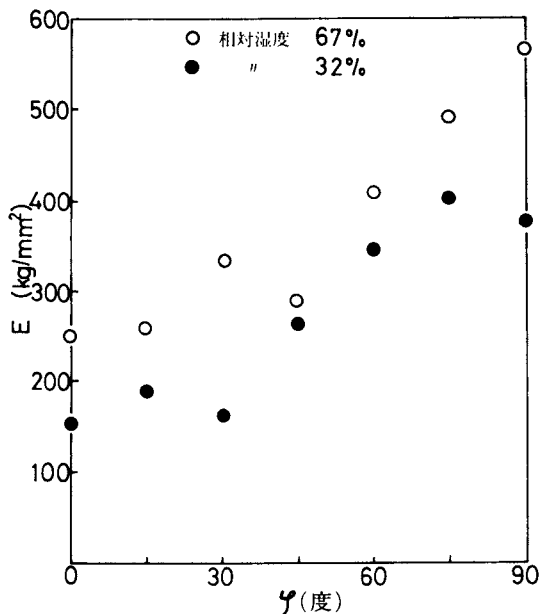


図13 弾性率の方向依存性

図13をみると、弾性率は $\varphi = 0$ (CD方向) のところで最小の値となり、 φ が増すにつれて徐々に大きくなり、90度 (MD方向) で最大となる。いま、これらの実験結果を極座標表示しなおすと、図16のようになる。図16では、 φ を0から90度までの範囲について示しているが、これを角度 φ を0から360度に拡張したとすると、ほぼ楕円に

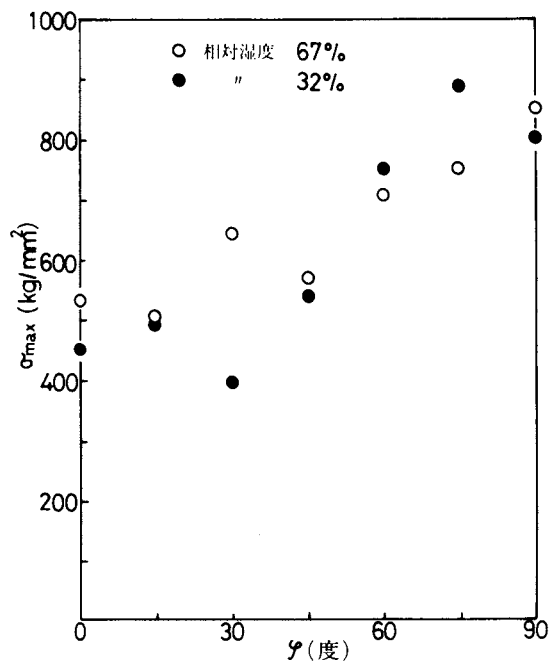


図14 破断強さの方向依存性

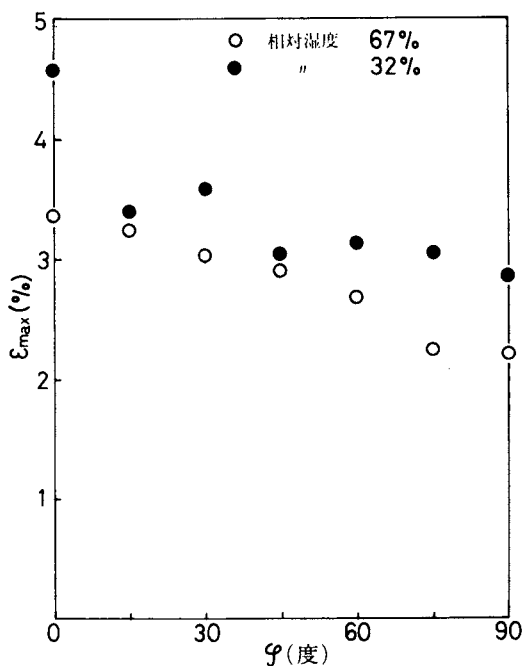


図15 破断ひずみの方向依存性

なると思われる。これは、円形の紙の周囲に、均一な引張応力が加わると、CD方向が長軸となる楕円形に変形することを意味する。このことは、いいかえれば、紙を円形の槌で打った場合、紙は楕円形にひずむことを意味すると考えられる。

湿度を67%から32%に変化すると、楕円の大きさが縮小することがわかる。さらに、図14をみると、 ϕ が増加するにつれて、破断強さは増加するが、一方、図15より、破断ひずみは逆に減少しているのがわかる。これは、紙平面内における、繊維の配向状態が原因しているものと思われる。すなわち、繊維が紙のCD方向に比べて、MD方向に数多く配向しているため、各方向で、単位断面積あたりに存在する繊維本数

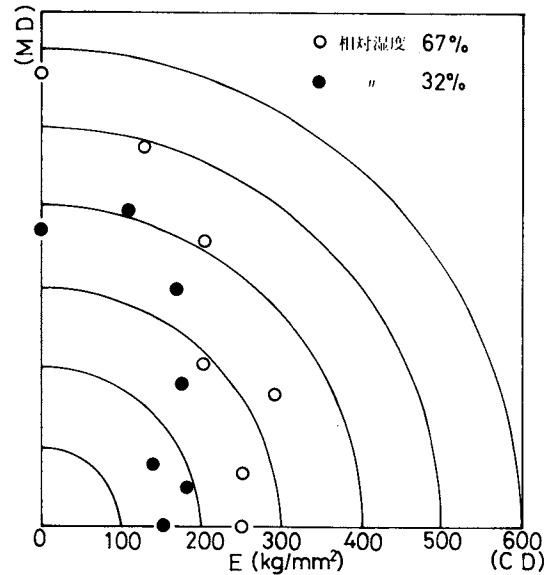


図16 E- ϕ の関係

に違いが生じ、MD方向の破断強さを大きくしている。また、MD方向に引張る場合は、繊維間の摩擦がきいてくることも一因として考えられる。つまり、紙力強度の3要素⁵⁾のうち、単繊維強度と繊維間の摩擦による影響によって強度に違いが生じたものと思われる。

紙の破断ひずみに関しては、下記のように考えられる。引張りによる紙の伸びのうち、繊維のたわみと伸長によるものが、全伸びの何割かは占めるものと思われるが、CD方向に引張る場合は、繊維のたわみによる伸びが大きくなる。それに比較して、MD方向に引張る場合には、たわみによる紙の伸びの割合が減り、単繊維の伸長が占める割合が大きくなると考えられる。繊維のたわみと伸長では、明らかに、たわみの方が変形大となり、したがって、CD方向の紙の場合が、MD方向の紙よりも破断ひずみが大きくなるものと推考される。

3.2 灰汁処理による弾性率の変化

灰汁処理により箔打紙の弾性率、引張強さなどの力学的性質がどのように変化するかを、引張試験を通じて観察し、考察した結果について述べる。

3.2.1 実験方法

試料としては、名塩原紙、延べ仕込みの紙、2、3、5、14灰汁の各箔打紙を使用した。試料は、幅10mm、長さ65mmの短冊形(前後15mmはつかみしろ)に切り、それを、3.1の実験と同様に、25°C、67%に調温、調湿した乾燥器内に24時間放置したものを使用した。実験は引張速度毎秒1mmで行った。

3.2.2 実験結果および考察

引張試験の結果を表3にまとめて示す。本表に示す実験結果から、次のことがわかる。

表3 箔打紙の力学的性質の変化

種類	厚さ (μm)	方向	弾性率 $E(\text{kg}/\text{mm}^2)$	破断強さ $\sigma_{\text{max}}(\text{kg}/\text{mm}^2)$	比例限度 $\epsilon_t(\%)$	破断ひずみ $\epsilon_{\text{max}}(\%)$	$E_{\text{MD}}/E_{\text{CD}}$
原紙	22	MD	582	9.15	1.04	2.64	1.47
		CD	397	6.89	1.11	2.50	
のべ紙	21	MD	270	9.09	1.39	6.53	3.08
		CD	87.7	3.42	2.27	8.71	
2 灰汁	19	MD	446	11.2	1.11	4.10	2.37
		CD	188	4.15	1.30	5.60	
3 灰汁	20	MD	431	10.8	1.39	5.28	1.42
		CD	304	5.95	1.39	3.43	
5 灰汁	18	MD	552	10.4	1.16	2.36	2.12
		CD	385	3.76	0.84	1.04	
14 灰汁	16	MD	560	7.78	1.11	1.53	1.45
		CD	385	3.76	0.84	1.04	

(1) 灰汁処理の回数が増すにつれて、紙の厚さは薄くなる。(2) 原紙を延べ仕込みすることにより弾性率が低下し、その後、灰汁処理回数が増えるにつれて、MD方向ならびにCD方向の弾性率はいずれも上昇する。(3) 延べ仕込みにより、CD方向に切り出した試料の破断強さは著しく低下する。名塩原紙の破断強さの約半分となる。しかし、2灰汁、3灰汁と灰汁処理が増すにつれて、破断強さが次第に増加する傾向がみられる。一方、MD方向の試料の破断強さは、5灰汁の主紙ぐらいまでは、あまり変化しない。しかし、さらに灰汁処理回数が増えると、MD、CD方向の試料とも、その破断強さは低下する。(4) 破断ひずみに関しては、延べ仕込みにより著しく破断ひずみが増大するのがわかる。しかし、その後、灰汁処理回数が増えるにつれて減小する傾向がみられる。(5) $E_{\text{MD}}/E_{\text{CD}}$ の値に関しては、延べ仕込みの時点で最大となり、灰汁処理回数が増えるにつれて、その比が1に近い値となってくる。換言すれば、 E_{MD} と E_{CD} が次第に同じ値になっていくといえる。

以上の事柄を考察してみると、延べ仕込みにより、原紙の力学的性質が一変していることがわかる。この原因として、灰汁処理により繊維間結合が弱くなったことが一因ではないかと考えられる。図17に示す写真は、各過程における箔打紙の破断プロファイルを光学顕微鏡で撮影したものである。これら一連の写真から、延べ仕込みの紙と他の紙では、破断に際しての繊維の引き抜かれる状態が明らかに違っているのがわかる。したがって、繊維間結合が弱くなること、すなわち、結合数の減少の生来は、結果として、セグメントの長さ l_0 をみかけ上大きくさせ、弾性率の低下をまねいたものと推測される。これらの観察結果は、図9に示した理論値の予測結果とほぼ一致している。

さらに、表3に示す試験結果から、延べ仕込みによって、破断強さも著しく低下することが見られる。しかし、一般に、灰汁処理の回数が増えるにつれて、粘着物質の付着による結合力の強化、さらに機械打ちによる結合数の増加がもたらされ、弾性率、破断強さとも増大するものと思われる。また、灰汁処理回数が増えるにつれて、MD方向の弾性率とCD方向の弾性率が接近してくるが、

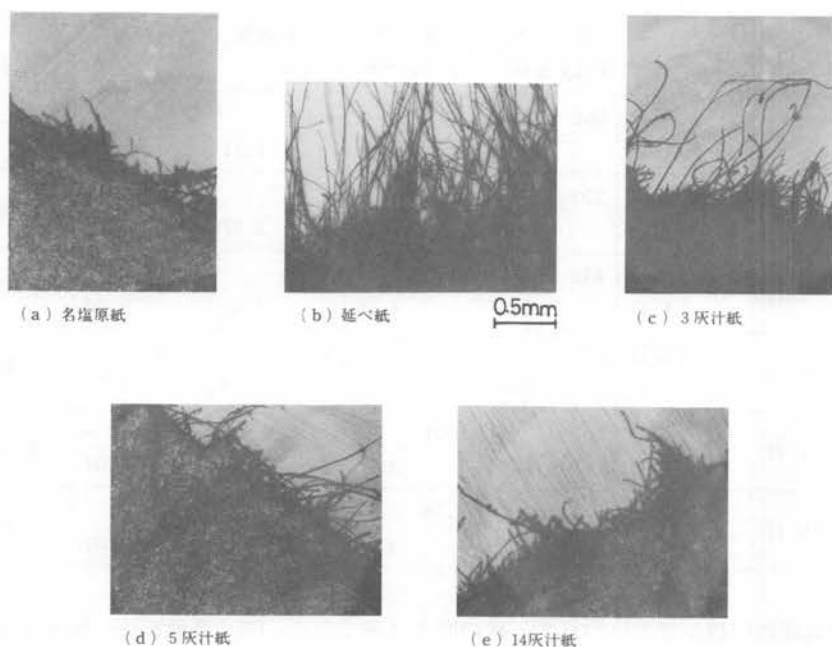


図17 箔打紙の破断プロフィール

これは、機械打ちによる l_0 の減少が紙面内の l_0 の配向性を減少させ、一様分布状態に次第に近づいていくからではないかと思われる。

一方、破断ひずみについては、延べ仕込みの紙は繊維間結合が弱いため、引張ったときに繊維が引き抜かれていく。そのため、繊維が完全に引き抜かれるまでが、紙のひずみとして記録され、破断ひずみが見かけ上大きくなったものと思われる。しかし、灰汁処理の回数を重ねた箔打紙は繊維間結合が強固であり、破断時のひずみは繊維自身の破断ひずみとほぼ等しくなるため、破断ひずみが小さくなったものと推論される。

4. 箔打紙の観察

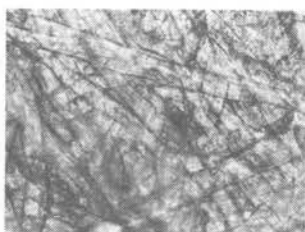
箔は、図1に示したような数多くの工程を経て完成するのであるが、各工程で使用される紙はその都度かえており、その工程に適した紙を用いている。したがって、その紙の変遷を観察し、各工程に要求される紙の力学的性質を考察することから、箔展延に関する知見が得られるものと思われる。

4.1 箔打紙表面の光学顕微鏡観察

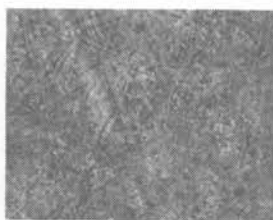
試料としては、小兵、荒金、小重、大重、名塩原紙、3灰汁、14灰汁の各箔打紙を用い、その表面を光学顕微鏡（200倍）で観察した。その結果を図18に示す。いま、小兵から順に14灰汁の箔打紙まで通して観察すると、次のようなことが指摘される。



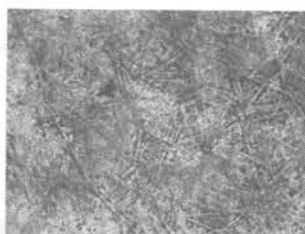
(a) 小 兵



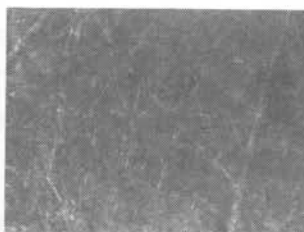
(b) 荒 金



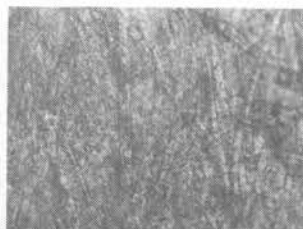
(c) 小 重



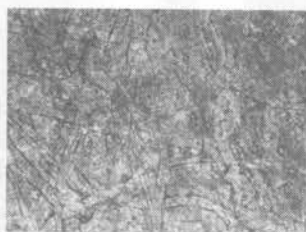
(d) 大 重



(e) 名塩原紙



(f) 3灰汁紙



(g) 14灰汁紙

100μm

図18 箔打紙表面の光学顕微鏡像

- (1) 繊維の太さは、小兵、荒金までは太いが、小重以降は突然細くなっている。
- (2) 繊維の密度については、小兵、荒金までは繊維が太いせいもあり小さいが、小重以降は著しく繊維密度が増し、原紙→3灰汁→14灰汁と灰汁処理が進むにつれて、表面が次第に平滑になってくる。

以下、これらの観察結果から、打紙の力学的強度、弾性率の変化について考察してみよう。先に記した、理論解析の結果は、 l_0 （セグメントの長さ）が減少すると弾性率が増加し、一方、 a （繊維断面の半径）が減少すると弾性率が減少することを示していた。ここに観察された実験結果、すなわち、荒金から小重への繊維の太さの変化は、槌打ちにより繊維の叩解が行われたことを示しており、結果として、 l_0 の減少をもたらすことになる。また、3灰汁、14灰汁と灰汁処理が進むにつれて、繊維が次第に扁平になっていくことは、 a の値が減少することを意味しており、したがって、 l_0 と a の値の変化の状態によって箔打紙の強度も決まるものと思われる。次に、箔展延に関して少しく考察してみる。上澄工程に使用される小兵や荒金の箔打紙は、図18に示すように、一般に繊維

が太く、強度も大きい。しかも紙表面の凹凸が激しく、摩擦係数が大きいことが推察される。これは、この箔打紙が使われる工程での金の厚みが大きいため、摩擦係数が大きいほうが展延効率の点から都合がよい。一方、小重、大重の段階になると上澄工程の仕上げになり、箔も薄くなるため、摩擦係数があまり大きすぎると破損する恐れがある。そのため、繊維が細くなり紙表面の凹凸も減少し平滑になるほうが、箔展延にとって都合がよい。さらに、箔打工程に使われる箔打紙になると、繊維自身も扁平になり、紙面全体がますます平たくなっていく。これは、箔がさらに薄くなって、一層破れ易くなっており、それにともなって摩擦係数がさらに減少する必要があるためと考えられる。

4.2 箔打紙断面の光学顕微鏡観察

観察に供した箔打紙は、表面観察に用いたものと同種のものを使用した。観察方法の概略を記すと、まずはじめに、定尺の箔打紙から幅10mm、長さ30mmの短冊形の試片を切り出し、ポリエステル樹脂で包埋した。凝固後、観察部を精密切断機で切断し、断面をエメリペーパーでみがき、バフ

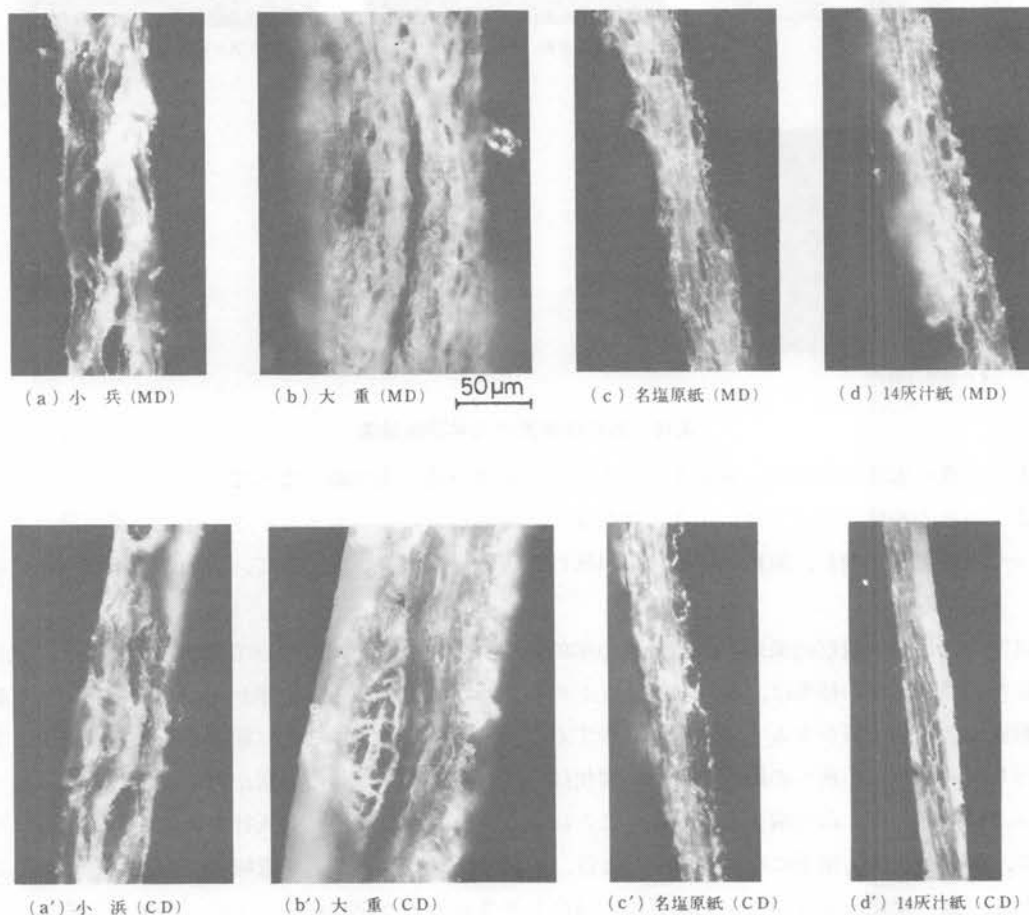


図19 箔打紙断面の光学顕微鏡像

仕上げをして、アセトン洗浄後検鏡した。観察は試料と包埋樹脂のコントラストをよくするため偏光顕微鏡を用いて行った。

観察結果の一部を図19に示すが、小兵から14灰汁までの箔打紙の断面写真を通観して、次のことが指摘される。

- (1) 小兵から大重までは、紙の厚さが順次増大していくが、箔打紙原紙になると急にそれが減少し、その後、灰汁処理回数が増えてもあまり変化しない。
- (2) 縦断面像に関しては、小兵から大重へ移るにつれて空隙が変化し、次第に減少していつているのが認められる。箔打紙に関しては灰汁処理回数が進んでも、めだつた変化はみられない。
- (3) それぞれの工程に使われている打紙の横断面像と、縦断面像を比較してみると、縦断面像に空隙の数が多いの気付く。このことは、繊維が紙の縦方向に数多く並んでいることを示していると思われる。

図19(a)、図19(b)より、小重と大重との間で紙の厚さにはかなりの違いがみられるが、これは繊維が細くなったためと思われる、強度的には、それは紙の強度を増す方向に作用していると解せられる。また、空隙の比率も変化しているが、これらも紙の強度に深くかかわっているものと思われる。箔打工程の紙に関しては、灰汁処理回数が増えても、紙厚にあまりめだつた変化はみられない。これは、この工程では箔打紙の表面性状、なかんずく表面構造と箔打紙の物理・化学的状態が、箔の展延にかなり重要な影響を及ぼしていることを示唆していると解せられる。

図19で観察された断面プロフィールは、箔打紙に弾性異方性があることを直接的に証明しているものともいえる。

4.3 箔打紙のX線マイクロアナライザによる元素分析

打紙表面に如何なる元素が存在するのか、X線マイクロアナライザを用いて分析した。分析用試料として、荒金、大重、名塩原紙、14灰汁箔打紙を用い、EDAXによるエネルギー分散法で定性分析した。分析にあたって、まず、試料を7mm角に切り、それを黄銅製の試料台にカーボンダイトで貼り付け、表面にカーボン蒸着して分析を行った。印加電圧は10KVで、試料電流0.2nA、X線カウント時間200秒、試料表面を200倍に拡大し、電子線を走査させて分析を行った。

分析結果の一例を図20に示す。図20

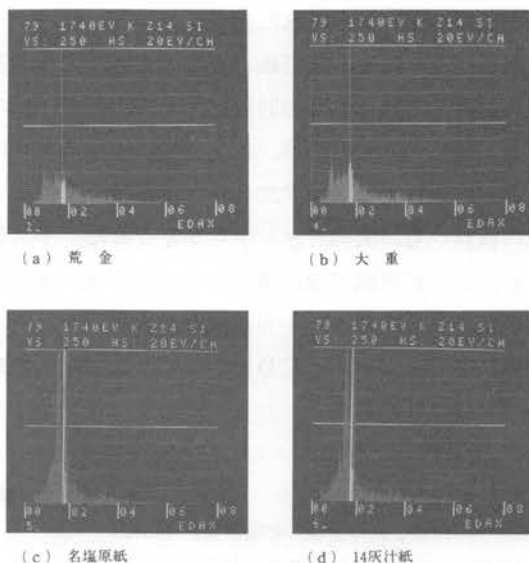


図20 X線マイクロアナライザによる元素分析

(a)は荒金、(b)は大重、(c)は名塩原紙、(d)は14灰汁箔打紙の結果を示す。分析はケイ素について行った。図より、荒金と大重のスペクトル波形と名塩原紙と14灰汁箔打紙のそれとでは著しい差のあることが見られる。この現象が、箔の展延に如何なる影響を及ぼすのか現在のところ明らかではないが、箔展延の微視機構に深くかかわっていることは疑いのないことと思われる。さらに、他の元素の分析も進めば、箔展延の機構が明らかになってくるものと期待される。

5. 結 論

金箔の展延機構に関する基礎研究として、箔打紙の力学的性質について、理論と実験の両面から検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

- (1) 紙を、繊維の3次元網目構造と仮定し、異方性を考慮に入れた箔打紙の弾性率を理論的に求めた。
- (2) 弾性率の式から、セグメント l_0 の長さが減少すると、弾性率が增大すること、また、繊維断面の軸比 $K (= a/b)$ が減少すると、弾性率が増加すること、さらに、断面積が大きくなると、弾性率が増加することが明らかとなった。
- (3) 繊維配向の異方性が弾性率に及ぼす影響を $E(\gamma)/E(0)$ の比によって検討した。その結果、 l_0 の増減はあまり影響しないが、軸比 K の増大は $E(\gamma)/E(0)$ の値を減少させることがわかった。また、 K の値が大きくなるにつれて、つまり、繊維断面が扁平な楕円形になるにしたがい、 CD 方向の弾性率 $E(0)$ と MD 方向の弾性率 $E(90^\circ)$ の値は接近してくる。
- (4) 女紙の引張試験の結果、弾性率、破断強さとも、 CD 方向に切り出した試片で最低の値となり、切出し角度がそれよりも増すにつれて、それらの値も増大する。しかし、破断ひずみに関しては逆の傾向がみられた。
- (5) 延べ仕込みにより箔打紙の力学的性質は大きく変化する。破断プロフィールにも顕著な変化が認められる。灰汁処理の回数が増すにつれて、紙の厚さは薄くなり、弾性率は上昇する。
- (6) 表面観察の結果、小兵、荒金までは繊維の太さは大きい、小重以降は極端に細くなっていること、灰汁処理が増すにつれて紙面は平滑になっていくことがわかった。一方、紙の断面写真の観察から、次のことが明らかとなった。小兵から大重までは、紙の厚さが順次増大していくが、箔打紙原紙で急に薄くなり、その後、灰汁処理回数が増えてもあまり変化しない。断面に観察される空隙は、小兵、荒金で大きい、灰汁処理を重ねると次第に小さくなり、扁平な楕円形となっていく。 CD 方向に切り出した紙の断面と MD 方向のそれとでは、明らかに断面のプロフィールが異なる。

参 考 文 献

- 1) 下出積与：加賀金沢の金箔、北国出版社（1972）
- 2) 谷村喜代志：金属箔の展延機構に関する研究〔未刊〕
- 3) 久米康生：私の和紙地図手帳、木耳社（1975）
- 4) 小野木重治・笹栗駿一郎：紙パ技協誌、11、233（1957）
- 5) 武祐一郎・太田隆之・八十島治雄：紙パ技協誌、18、73（1964）