和紙の衝撃強度*

黒部利次** 今中 治*** 佐藤 彰****

Impact Fracture Strength of Japanese Paper

by

Toshiji KUROBE, Osamu IMANAKA and Akira SATO

(Department of Engineering, Kanazawa University, Kanazawa)

A study has been conducted to calculate theoretically the impact fracture strength of Japanese paper on the basis of the orientation of its constituent fiber. The impact strength of paper is known to be defined as the energy which can be absorbed in the paper until its rupture during impact loading. The theoretical analyses have shown that the impact strength of Japanese paper is dependent upon the cut direction of specimen sheet; the magnitude of impact strength is the greatest in the cross direction of paper which is normal to the machine direction and decreases gradually with deviating from the cross direction of paper, while the minimum is seen in the range of the cut direction of 50 to 60 degrees. The theoretical predictions were supported by the results of experimental measurements of *Haku-Uchi Gami* (Japanese paper).

(Received June 16, 1980)

キー・ワード：和紙，箔打紙，力学的異方性，衝撃強度

1 緒 言

紙の強度を外力の作用状態により分類すると、破裂強度、引張強度、引き裂き強度、耐折強度の4種類が考えられるが、実際には、これらの静的強度よりも衝撃強度が問題となる場合も多い。

和紙は古来、伝統的に流し漉きによる手漉きによって製造されるため、繊維の配向が一樣でなく、力学的異方性を有している。すなわち、和紙の強度は方向によってその値が異なる。和紙の強度に関する紙力設計はこれまで、その多くは永年の経験（則）に基づいて行われている。しかし、箔打紙（和紙）の場合のように、紙質が直接箔の展延（生産）に影響を及ぼすような場合には、理論に基づいたより合理的な紙力設計を行うことが望ましく、また必要とされている。

本研究は、和紙としての箔打紙の強度を、繊維の配向性を考慮に入れて理論解析し、引張強さと衝撃強度が力を加える方向によってどのように変化するかを計算より求めた。また、理論値と実験結果を比較・検討

して、所期の結果が得られたので、それについて報告する。

2 和紙の強度に関する理論解析

紙力は繊維の物理・化学的作用により決まるが、一般に紙の強度は次の3要素によって構成されている。すなわち、(1)繊維自体の強度、(2)繊維相互間の接着強度、(3)繊維相互の絡み合いによる摩擦強度である。和紙としての箔打紙の場合には、(2)の結合強度が紙力に大きく影響すると思われるので、強度計算においては特に(2)を考慮して解析を行う。解析にあたって次の仮

Fig. 1. Visco-elastic model of constituent fiber.

* 原稿受理 昭和55年6月16日

** 正会員 金沢大学工学部 金沢市小立野

*** 金沢大学工学部 金沢市小立野

**** 金沢大学大学院 金沢市小立野

*1 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 MD 方向、Cross Direction を CD 方向とそれぞれ記すことにする。

定を設ける。(i)繊維は Fig. 1 に示されるような力学モデルで表される。(ii)繊維の集合状態は相互に絡み合った網目構造になっている。(iii)隣接する二つの結合点の間では繊維は直線である。(iv)繊維間の結合部分は強固で、紙の変形に際して、すべりや回転は全く起らない。紙の破壊はこの結合が切れたとき起るものとする。(v)紙に加えられる力は紙に均一に伝達され、変形も同様である。以下に、上記の仮定をもとに和紙の強度を計算する。

2・1 和紙の引張強さ

二つの結合点にはさまれた繊維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 Fig. 2 のように座標を定める。いま、セグメントの端PにX軸（シートのCD方向）と γ の角をなす方向（ X' 軸方向）に力 $F_i(t)$ が加わった場合を考える。この力 $F_i(t)$ をセグメントに平行な成分 $F_{i1}(t)$ と垂直な成分 $F_{i2}(t)$ に分解すると、

Fig. 2. Coordinate of segment.

$$F_{i1}(t) = F_i(t) \sin \theta \cos |\varphi - \gamma| \quad (1)$$

$$F_{i2}(t) = F_i(t) \sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma|} \quad (2)$$

これら二つの分力によるP点の変位をそれぞれ $\xi_{i1}(t)$ 、 $\xi_{i2}(t)$ とすると、P点の X' 軸方向の変位 $\xi_i(t)$ は、

$$\xi_i(t) = \xi_{i1}(t) \sin \theta \cos |\varphi - \gamma| + \xi_{i2}(t) \sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma|} \quad (3)$$

いま、セグメントに加わる力 $F_i(t)$ が $F_i(t) = P_i t$ （ P_i は単位時間あたりにセグメントに加わる力）で表されるものとする。その成分を $P_{i1} t$ 、 $P_{i2} t$ とし、セグメントの長さを l 、断面積を A 、断面二次モーメントを I としたとき、 $\xi_{i1}(t)$ 、 $\xi_{i2}(t)$ の値は、

$$\xi_{i1}(t) = \frac{P_{i1} l}{A} \left(\frac{1}{E_1} t + \frac{\eta_2}{E_2^2} e^{-(E_2/\eta_2)t} - \frac{\eta_2}{E_2^2} + \frac{1}{E_2} t + \frac{1}{2\eta_1} t^2 \right) \quad (4)$$

$$\xi_{i2}(t) = \frac{P_{i2} l^3}{12I} \left(\frac{1}{E_1} t + \frac{\eta_2}{E_2^2} e^{-(E_2/\eta_2)t} - \frac{\eta_2}{E_2^2} \right)$$

$$+ \frac{1}{E_2} t + \frac{1}{2\eta_1} t^2 \quad (5)$$

となる。いま、(1)、(2)、(4)、(5)式を(3)式にそれぞれ代入すると、

$$\begin{aligned} \xi_i(t) = & \left\{ \frac{l}{A} \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma| \right. \\ & + \frac{l^3}{12I} (1 - \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma|) \left. \right\} \\ & \times P_i \left(\frac{1}{E_1} t + \frac{\eta_2}{E_2^2} e^{-(E_2/\eta_2)t} - \frac{\eta_2}{E_2^2} \right. \\ & \left. + \frac{1}{E_2} t + \frac{1}{2\eta_1} t^2 \right) \quad (6) \end{aligned}$$

ここで、単位立方体シートを考え、 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し、 l 、 θ 、 φ 、 I 、 A の分布関数をそれぞれ $\lambda(l)$ 、 $\Theta(\theta)$ 、 $\Gamma(\varphi)$ 、 $\Phi(I)$ 、 $\Psi(A)$ とすると、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から、そのうちの任意の一本の鎖の伸び $\xi(t)$ は、

$$\begin{aligned} \xi(t) = & N_{x'} \int_0^\infty \lambda(l) \int_0^{\pi/2} \Theta(\theta) \int_0^{\pi/2} \Gamma(\varphi) \int_0^\infty \Phi(I) \\ & \int_0^\infty \Psi(A) \xi_i(t) dl d\theta d\varphi dI dA \quad (7) \end{aligned}$$

で与えられる。いま、単位立方体シートに $F(t) = Pt$ という力が加わって、 $\xi(t)$ という伸びが得られたとすると、1本の鎖に加わる力は $F(t)/N_{y'} N_z$ となる。このことは、各セグメントおよび繊維間の結合部分にも同様の力が加わっていることを意味している。(6)式を(7)式に代入すると、

$$\begin{aligned} \xi(t) = & \frac{N_{x'}}{N_{y'} N_z} P \left(\frac{1}{E_1} t + \frac{\eta_2}{E_2^2} e^{-(E_2/\eta_2)t} - \frac{\eta_2}{E_2^2} \right. \\ & + \frac{1}{E_2} t + \frac{1}{2\eta_1} t^2 \left. \right) \times \int_0^\infty \lambda(l) \int_0^{\pi/2} \Theta(\theta) \int_0^{\pi/2} \Gamma(\varphi) \\ & \int_0^\infty \Phi(I) \int_0^\infty \Psi(A) \left\{ \frac{l}{A} \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma| \right. \\ & \left. + \frac{l^3}{12I} (1 - \sin^2 \theta \cos^2 |\varphi - \gamma|) \right\} dl d\theta d\varphi dI dA \quad (8) \end{aligned}$$

つぎに、 $\xi(t)$ の値を求めるために、 $N_{x'}$ 、 $N_{y'}$ 、 N_z を計算する。いま、Fig. 3 に示すように繊維シートの

Fig. 3. Cross over model of fibers.

一部を取り出して考えてみる。点 P, Q, R, S, T をセグメントどうしの結合部分とすると、線分 $\overline{PQ}$, $\overline{RS}$, $\overline{ST}$ はセグメントの長さということになる。ここで注意しなければならないことは、 $\overline{PQ} \rightarrow \overline{RS}$ というように二つのセグメントが別個の繊維の場合、セグメントの X' 成分を考えると、 $\overline{PQ}$, $\overline{RS}$ の X' 成分にセグメントの太さ $\overline{QR}$ の X' 成分を加えておかなければならないことである。つまり、セグメントの太さの影響がきいてくるわけである。

以上のことを定量的に計算するために、Fig. 4 のように (X', Y', Z) 座標に対する方向余弦が $(\sin \theta, 0, \cos \theta)$ と $(\sin \theta \cos |\varphi - \gamma|, \sin \theta \sin |\varphi - \gamma|, \cos \theta)$

Fig. 4. Direction cosine of segments.

の二つのセグメントを考える。この二つのセグメントの結合点を通して、両方のセグメントに垂直な直線の方角余弦を (l, m, n) とおき、その平均値を計算すると、

$$\bar{l} = \int_0^{\pi/2} \Theta(\theta) \int_0^{\pi/2} \Gamma(\varphi) \frac{-1}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta} + \frac{1 - \cos |\varphi - \gamma|}{1 + \cos |\varphi - \gamma|}}} d\theta d\varphi \quad (9)$$

$$\bar{m} = \int_0^{\pi/2} \Theta(\theta) \int_0^{\pi/2} \Gamma(\varphi) \frac{\cos |\varphi - \gamma| - 1}{\sin |\varphi - \gamma| \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta} + \frac{1 - \cos |\varphi - \gamma|}{1 + \cos |\varphi - \gamma|}}} d\theta d\varphi \quad (10)$$

$$\bar{n} = \int_0^{\pi/2} \Theta(\theta) \int_0^{\pi/2} \Gamma(\varphi) \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta} + \frac{1 - \cos |\varphi - \gamma|}{1 + \cos |\varphi - \gamma|}}} d\theta d\varphi \quad (11)$$

となる。したがって、セグメントが半径 r の円形断面を有し、 r の分布関数が $x(r)$ で表されるとすると、 X', Y', Z 方向に対する太さの影響は、

$$\bar{l} \int_0^\infty 2rx(r) dr, \bar{m} \int_0^\infty 2rx(r) dr, \bar{n} \int_0^\infty 2rx(r) dr \quad (12)$$

で表される。しかし、この太さの影響も Fig. 3 における $\overline{PQ}$, $\overline{RS}$ の二つのセグメントのように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、 $\overline{RS}$, $\overline{ST}$ 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り、(12)式に 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。

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、 $l \sin \theta \cos |\varphi - \gamma|$, $l \sin \theta \sin |\varphi - \gamma|$, $l \cos \theta$ と書き表される。上に記した繊維の太さの影響を考慮すると、単位立方体シートの各方向の長さが 1 であることから、次式が成り立つ。

$$1 = N_x \left[\int_0^\infty \lambda(l) \int_0^{\pi/2} \Theta(\theta) \int_0^{\pi/2} \Gamma(\varphi) l \sin \theta \cos |\varphi - \gamma| d\theta d\varphi + \beta \bar{l} \int_0^\infty 2rx(r) dr \right] \quad (13)$$

$$1 = N_{y'} \left[\int_0^\infty \lambda(l) \int_0^{\pi/2} \Theta(\theta) \int_0^{\pi/2} \Gamma(\varphi) l \sin \theta \sin |\varphi - \gamma| d\theta d\varphi + \beta \bar{m} \int_0^\infty 2rx(r) dr \right] \quad (14)$$

$$1 = N_z \left[\int_0^\infty \lambda(l) \int_0^{\pi/2} \Theta(\theta) l \cos \theta d\theta + \beta \bar{n} \int_0^\infty 2rx(r) dr \right] \quad (15)$$

つぎに、具体的な計算をするために、 $\lambda(l)$, $\Theta(\theta)$, $\Phi(I)$, $\Psi(A)$ の分布関数をそれぞれ $\lambda(l) = \delta(l - l_0)$, $\Theta(\theta) = \delta(\pi/2)$, $\Phi(I) = \delta(I - I_0)$, $\Phi(A) = \delta(A - A_0)$ と仮定する。右辺は Dirac のデルタ関数である。 $\Gamma(\varphi)$ は紙面内の繊維の方向の分布関数である。和紙は流し漉きによって製造されるため、繊維は MD 方向に配向する傾向を有するが、その分布はわからないので、 $\Gamma(\varphi) = \sin \varphi$ ($0 \leq \varphi \leq \pi/2$) と仮定する。さらに、 $x(r)$, β を、 $x(r) = \delta(r - r_0)$, $\beta = 1$ とおくと、(13)~(15)式より、

$$N_x = \frac{1}{l_0 \left(\frac{1}{2} \cos \gamma + \frac{\pi}{4} \sin \gamma \right)} \quad (16)$$

$$N_{y'} = \frac{4}{l_0 (\pi \cos \gamma + 2 \sin \gamma - 4 \gamma \cos \gamma)} \quad (17)$$

$$N_z = \frac{1}{2r_0} \quad (18)$$

単位立方体シートに加わる力を $F(t)$ としたとき、繊維間の結合部分に加わる力 $f(t)$ は次式のようになる。

$$f(t) = \frac{F(t)}{N_x N_z} = \frac{1}{2} F(t) l_0 r_0 (\pi \cos \gamma + 2 \sin \gamma - 4 \gamma \cos \gamma) \quad (19)$$

ここで、 $f(t)$ が臨界荷重 f_0 に達したとき接合が切れるものとすれば、そのときの単位立方体シートに加わる力 $\vec{F}_0$ は、

$$\vec{F}_0 = \frac{2f_0}{l_0 r_0 (\pi \cos \gamma + 2 \sin \gamma - 4 \gamma \cos \gamma)} \quad (20)$$

となる。Fig. 5 に r と $F_0 l_0 r_0 / f_0$ の関係を示す。

つぎに、繊維の断面をだ円形と考え、長軸径を $2a$,

Fig. 5. Tensile strength of Japanese paper.

短軸径を $2b$ とし, $r_0 = \sqrt{ab}$ (だ円と同じ面積を有する円の半径) とすると, 単位立方体シートの伸び $\xi(t)$ は, (8)式より次式のように求まる.

$$\begin{aligned} \xi(t) = & \frac{2\sqrt{ab}(\pi \cos \gamma + 2 \sin \gamma - 4\gamma \cos \gamma)}{2 \cos \gamma + \pi \sin \gamma} P \left(\frac{1}{E_1} t \right. \\ & + \frac{\eta_2}{E_2^2} e^{-(E_2/\eta_2)t} - \frac{\eta_2}{E_2^2} + \frac{1}{E_2} t \\ & + \left. \frac{1}{2\eta_1} t^2 \right) \frac{l_0}{6\pi ab} \left\{ \left(3 + \frac{l_0^2}{b^2} \right) + \left(1 - \frac{l_0^2}{3b^2} \right) \right. \\ & \times (2 \sin 2\gamma - \cos 2\gamma) \left. \right\} \quad (21) \end{aligned}$$

2・2 和紙の衝撃強度

紙の衝撃強度は, 紙が破壊(断)されるまでに吸収するエネルギーの大きさで定義される. ここでは, 単位立方体シートが衝撃力によって破壊するまでに吸収するエネルギー U を求める. いま, 衝撃力が Pt で表されるものとし, 破壊までに要した時間を t_f とすると, (21)式から U の値は次式のように求まる.

$$\begin{aligned} U = & P^2 \frac{2\sqrt{ab}(\pi \cos \gamma + 2 \sin \gamma - 4\gamma \cos \gamma)}{2 \cos \gamma + \pi \sin \gamma} \cdot \\ & \frac{l_0}{6\pi ab} \left\{ \left(3 + \frac{l_0^2}{b^2} \right) \right. \\ & + \left. \left(1 - \frac{l_0^2}{3b^2} \right) (2 \sin 2\gamma - \cos 2\gamma) \right\} \left\{ \left(\frac{1}{2E_1} \right. \right. \\ & + \frac{1}{2E_2} + \frac{1}{3\eta_1} t_f \right) t_f^2 + \frac{\eta_2}{E_2^2} t_f e^{-(E_2/\eta_2)t_f} \\ & + \left. \frac{\eta_2^2}{E_2^3} (e^{-(E_2/\eta_2)t_f} - 1) \right\} \quad (22) \end{aligned}$$

簡単化のため, 繊維をヤング率 E のフック弾性体とすると,

$$\begin{aligned} U = & \frac{4f_0^2}{l_0 \sqrt{ab}(\pi \cos \gamma + 2 \sin \gamma - 4\gamma \cos \gamma)(2 \cos \gamma + \pi \sin \gamma)} \\ & \times \frac{1}{6\pi ab} \left\{ \left(3 + \frac{l_0^2}{b^2} \right) \right. \\ & + \left. \left(1 - \frac{l_0^2}{3b^2} \right) (2 \sin 2\gamma - \cos 2\gamma) \right\} \frac{1}{E} \quad (23) \end{aligned}$$

となる. したがって, $U/U_{\tau=0}$ は次式で与えられる.

$$\frac{U}{U_{\tau=0}} = \frac{3\pi}{3 + 2\left(\frac{l_0^2}{b^2}\right)}.$$

$$\frac{\left(3 + \frac{l_0^2}{b^2}\right) + \left(1 - \frac{l_0^2}{3b^2}\right)(2 \sin 2\gamma - \cos 2\gamma)}{(\pi \cos \gamma + 2 \sin \gamma - 4\gamma \cos \gamma)(2 \cos \gamma + \pi \sin \gamma)} \quad (24)$$

Fig. 6, 7 に γ と $U/U_{\tau=0}$ の関係を示す. Fig. 6 から, $b=2\mu\text{m}$ の場合, シートの切り出し角 γ の値が 0 より増えるにしたがって, $U/U_{\tau=0}$ の値は次第に減少し, 50~60度のあたりで極小となり, 以後, 再び増加することがわかる. また, Fig. 7 から, $l_0=50\mu\text{m}$ 一定とした場合, b の値によって極値の表れ方が変化することがわかる.

Fig. 6. Impact strength of Japanese paper (effect of l_0). Fig. 7. Impact strength of Japanese paper (effect of b).

3 実験方法

和紙として箔打紙を用い, それが衝撃破壊(断)する際の衝撃エネルギーを実測し, 理論値との比較・検討を行った. 試片の大きさは $60 \times 15 \text{ mm}$ の短冊形で, 中央両端部に半円形状 ($\phi 5$) のノッチを入れたものを実験に使用した. Fig. 8 に衝撃試験装置の概略図を示す. 衝撃試験は, まず始めに振子を $\theta_0 = \pi/2$ の位置に置き, 静かにはなして自由落下させ紙を破壊させる.

*2 箔打紙の繊維の形状を光学顕微鏡により観察を行った(文献3)). その結果, 箔打紙は Fig. 6, 7 に示すような寸法の繊維から構成されていることが観察された.

Fig. 8. Schematic illustration of impact machine.

その際、その振子が θ_4 の位置まで上昇したとすれば、破壊に要したエネルギーは $mgl \cos \theta_4$ となる。ただし、 m は振子の質量であり、 l は軸受から重心までの長さである。式では軸受の摩擦や試料を貼付しているプラスチック台の影響を無視している。これらの影響を考慮し、補正するために次の実験を行った。(1) $\theta_0 = \pi/2$ の位置に振子をおき、静かにはなし自由落下させた。そのとき、振子は θ_1 の位置まで上昇した。(2) $\theta_0 = \pi/2$ の位置に振子をおき、静かにはなしプラスチック台に位突させた。そのとき、振子は θ_2 の位置まで上昇した。(3) θ_2 の位置に振子をおき、静かにはなし自由落下させた。そのとき、振子は θ_3 の位置まで上昇した。(4) θ_4 の位置に振子をおき、静かにはなし自由落下させた。そのとき、振子は θ_5 の位置まで上昇した。以上の実験結果をもとに、 θ 、 θ' を次式で定義する。

$$\theta = \theta_2 + \frac{\theta_0 - \theta_1}{2} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{2} \quad (i)$$

$$\theta' = \theta_4 + \frac{\theta_0 - \theta_1}{2} + \frac{\theta_4 - \theta_5}{2} \quad (ii)$$

上の式で、 θ_2 、 θ_4 は軸受けの摩擦がある場合の角度であり、 θ 、 θ' はそれを補正した値（角度）である。いま、プラスチック台を飛散させるに必要なエネルギーは、 $mgl \cos \theta$ と計算されるから、紙を破壊させるのに必要な真のエネルギー U は次式となる。

$$U = mgl (\cos \theta' - \cos \theta) \quad (25)$$

つぎに、紙の破壊機構を調べるために、衝撃試験で破断した箔打紙の破断部のプロファイルを光学顕微鏡（50倍）で観察した。切り出し角 γ は30度である。観察に供した紙は箔打ち前の打紙原紙である。

4 実験結果および考察

横軸に試片切り出し角 γ をとり、縦軸に(25)式から求めたエネルギーをとって、その値をプロットしたのが Fig. 9, 10 である。衝撃試験に供した箔打紙は、未使用紙 (Virgin) と使用済紙 (Used) の2種を用いた。試料の箔打紙は小重、大重である。図から、衝撃エネ

Fig. 9. Impact strength of Haku-Uchi Gami (Koku).

Fig. 10. Impact strength of Haku-Uchi Gami (Ohju).

ルギの値は紙の切り出し角 γ の値によって変化し、下に凸形の曲線を描くことが観察される。この現象は理論の予測結果と定性的に合うことを示している。しかし、実験結果をみれば MD の U の値が CD の U の値より若干大きくなっている。一方、理論結果は $U_{MD} < U_{CD}$ となっている。この違いは繊維の分布関数 $\Gamma(\varphi)$ を $\sin \varphi$ と仮定したこと主に原因しているのではないかと考えられる。

つぎに、破断部の光学顕微鏡写真を Fig. 11 に示す。図を見ると、破断部は繊維が抜けたようになっており、縁が一定していない。このことは紙が破断されるとき、

(a) Koku 0.5mm (b) Ohju

Fig. 11. Optical micrograph of impact ruptured paper.

*3 金箔の打ち立ては大別して、延べ金製造工程、上澄製造工程、箔打工程の3工程を経て行われるが、各工程はそれぞれ幾段もの工程から成っており、小重、大重は澄工程中の箔打ち段階を表す。

主として繊維自体が切れるのではなく、繊維相互間の結合部分が切れるということを示唆しているように思われる。

5 結 論

和紙の衝撃強度に関する研究として、箔打紙の衝撃強度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) 和紙を繊維の3次元網目構造と仮定し、力学的異方性と粘弾性を考慮して、和紙の引張強さと衝撃強度を理論的に求めた。

(2) 衝撃強度に関する理論式から、 $b=2\mu\text{m}$ の場合、シートの切り出し角 γ の値が零度より増えるにしたがって、衝撃エネルギーの比 $U/U_{\gamma=0}$ の値は次第に減少し、50~60度のあたりで極小となり、以後、再び増加することがわかった。また、 $l_0=50\mu\text{m}$ に一定とした場合、 b の値によって極値の表れ方が変化する。

(3) 小重、大重の衝撃試験の結果、衝撃エネルギーの値は紙の切り出し角 γ の値によって変化し、下に凸形の曲線を描くことが観察された。そして、理論の予測結果と実験結果が定性的に合うことが明らかとなった。

(4) 小重、大重の破断部を光学顕微鏡で観察した結果、破断部は繊維が引き抜かれたようになっていることが観察された。このことは紙が破断するとき、繊維相互間の接合部分が切れることを意味するものと思われる。

(昭和55年5月21日 日本材料学会第29期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 上野柱助, “紙の強度”, p. 197 (1972) 丸善
- 2) 小野木重治, 笹栗騏一郎, 紙と技協誌, **11**, 233 (1957).
- 3) 黒部利次, 今中 治, 小林茂彦, 日本海城研究所報告, **11**, 25 (1979).