

氏名(本籍)	かど 門	や 屋	たかし 卓	(東京都)
学位の種類	工	学	博	士
学位記番号	工	第	165	号
学位授与年月日	昭和47年7月5日			
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当			
最終学歴	昭和24年3月 東北大学理学部物理学教室卒業			
学位論文題目	天然紙質の力学的挙動に関する研究			

(主査)

論文審査委員	教授	横堀	武夫	教授	萱場	孝雄
	教授	梅屋	薫	教授	山口	格
	教授	大谷	茂盛	教授	清野	節男

論文内容要旨

概 要

最近の紙パルプ工業はその製造原理面では発明の初期にくらべ大きな変革はないが製造の機能、生産速度面では格段の進歩が見うけられまたその用途は過去の記録材料として以外に生活と産業のすべての分野に密接した材料として鉄、アルミニウム、木材あるいはプラスチック材料などともに極めて多角的に使用され資材面では大きな役割を果している。このように重要な位置を占めている紙パルプ工業の研究としては従来主として木材化学的観点から行なわれたものが多く、紙の力学的性質に関する研究も紙は繊維の集合体からなる巨視的構造としてよりも、繊維自身の性質ないし繊維間の結合の力といったいわば微視的な面を中心とした研究が多い。しかし、繊維集

合体としての紙の力学的性質，挙動は単純な分子集合体の性質として考えるよりさらに複雑である。

そこで本研究では，紙を1つの材料として，その力学的性質，挙動を材料工学的な観点からとらえて，総合的な研究を行なったものである。材料としては天然紙質を対象とした。

すなわち，紙パルプの製造工程の流れにしたがってはじめて紙の前処理工程において，紙の力学的性質を支配する重要因子を明らかにし，さらに湿紙の乾燥収縮特性の検討を行ないこれらの結果は製品紙質の強度の均一，安定化の向上に効果があった。また，紙の実用時，力学的観点から障害の1つとなっている紙の欠陥を自動的に検出することのできる装置を開発し，これにより製品の紙質の力学的性質が向上することが認められた。これらの研究結果から開発された管理方式は実用化され広く使用されている。

以上のような工程で製造された紙の引張り過程に伴う種々の挙動について材料工学的な観察と考察を行ない紙の力学的性質を包括的に明らかにすることを行なった。また，衝撃的荷重に対する紙の性質について観察し，衝撃破壊，繰り返し衝撃，折り目衝撃などに対する特性について新たな知見を得ると共に紙袋強度との関連性を確立した。

本論文はこれらの研究結果をまとめたものであり6章よりなる。

第1章は緒論である。

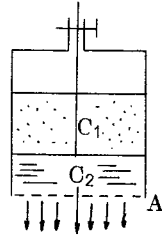
前述のように天然紙質の力学的性質の研究は主として繊維および繊維間の結合のようなミクロ的な観点にもとづく化学的な研究を中心として，一部では紙の引張り過程にあらわれる諸挙動を現象的にとらえることを対象にしているがこれを材料工学的にとらえ，強度および破壊に関する事象を統一的に説明し紙の実用条件，製造工程と関連づける必要性について述べている。

第2章は紙の前処理工程におけるパルプ濾水度が製品紙質の力学的性質を左右する重要因子であることに着目し，従来の濾水度測定法は実験室的に第1図に示されるように側管Cから排出された水の量を求めることによってCSF値として表示され，これは

$$CSF = K_1 \alpha + K_2$$

なる物理量を測定していることがわかった。この値と等価な量を工程中で連続的に測定することを検討し第2図のごとき原理の装置でCSF値との関係を求め第3図のごとき結果が得られた。

第 1 過程



C_1 : パルプスラリーの初期濃度

C_2 : パルプ堆積層濃度

η_0 : 水の粘度

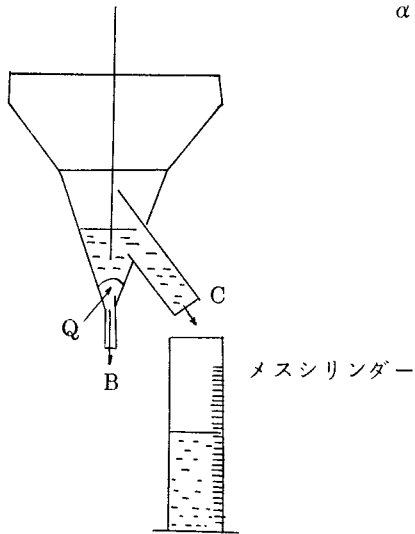
ρ : 水の密度

K_1, K_2 : 定数

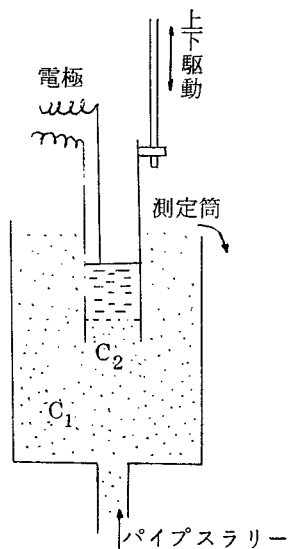
K_3 : 濾水度の程度で変る値

$$\alpha = \frac{\rho C_2}{K_3 \eta_0 C_1}$$

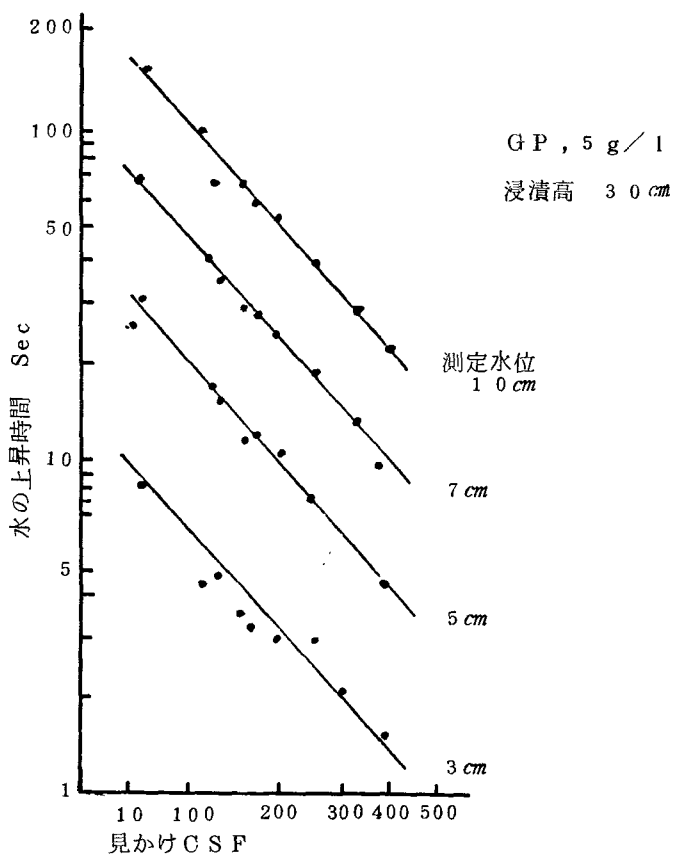
第 2 過程



第 1 図 Canadian Standard Freeness 測定器



第 2 図 連続濾水度計原理図



第3図 水の上昇速度と見かけのCSF

これより、測定筒の上下駆動、洗浄装置、上昇水位の自記記録装置などを組み入れた試作装置により各製造工程中の濾水度の管理を行ない抄紙工程中の湿紙強度の均質および安定化を行なうことによって製品紙質の強度の管理上極めて有効であることを認めた。

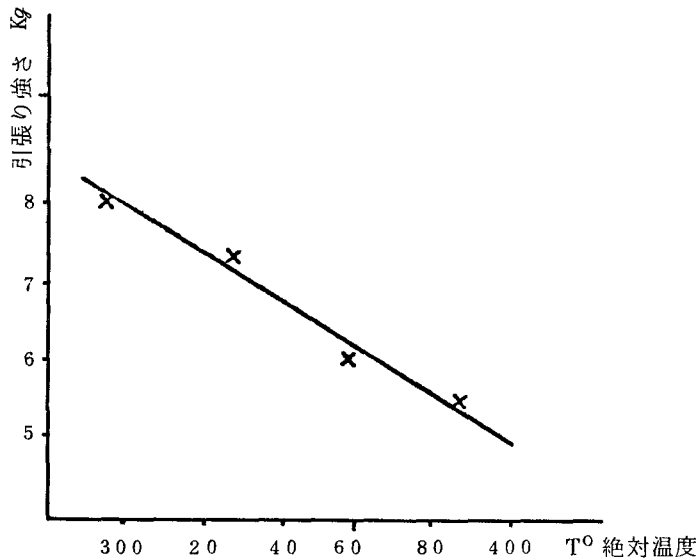
さらに、紙の乾燥特性とその力学的性質に注目しまず各種乾燥条件でのシートの乾燥特性、内部温度の変化について求め含水率30%前後(ウェットベース)で乾燥特性曲線および内部温度特性曲線が変化することを確認した。またシートの水分—収縮率曲線も含水率30%前後で大きく変化し、水分—圧縮率曲線においても同じ現象を見出した。

このような限界含水率附近でのシートの収縮特性は紙の力学的性質に影響し重包装用紙の破断時の伸びを向上するために紙の乾燥工程の含水率30%附近でシートの張力を調節することにより紙の縦方向の破断伸びは従来の2倍程度に向上させ得ることを見出した。

第3章では従来、偶発的にしか発見できなかった紙の欠陥を抄紙機上で光学的に感知し、製品

紙質を安定させることを目的として2つの欠陥検出方式について検討を行なった結果をまとめた。紙に発生する各種欠陥についてこれを光学的に検出するための基礎的検討結果から固定透過複数ホトセル方式，光学的飛像方式の2つの検出装置を試作し，固定透過複数ホトセル方式については長期間の実用試験結果，抄紙工程に対し新しい管理方式を確立し紙の欠陥混入率を従来の1/6～1/8に減少させ，加工工程中の欠陥による断紙を大巾に減少させることができた。

第4章は巨視的観点から検討した紙の力学的性質でまず，引張り速度を変えた場合の紙の応力—ひずみ曲線より弾性要素，塑性要素を求めこれらの引張速度依存性について実験的に確めた。つぎに，紙の引張り破壊強度の温度依存性について検討し第4図のごとく引張り破壊強度と絶対温度とは直線関係があることが認められこれは他の温湿度を変えた実験からもある程度推定でき



第4図 紙の引張り強さと加熱温度

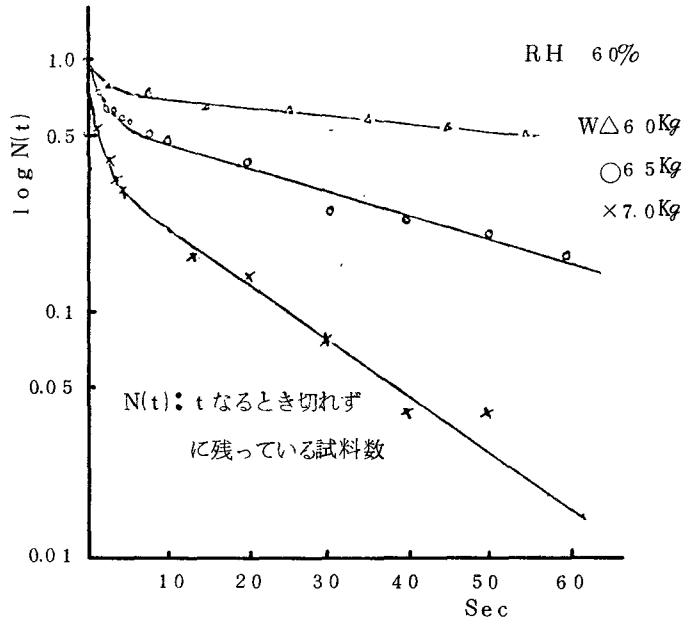
ることを示した。また，紙の引張り試験において試料長が短くなると破断時伸びが大きくなることを実験的に確め試料長 X ，伸び Y の間に

$$Y = \exp\left(b - \frac{b}{a} \log X\right)$$

なる関係があることを認めた。ただし， a ， b は定数である。紙のクリープについては荷重を加えた直後の1/10秒から1000秒程度の比較的短時間のクリープの観察を行ない，伸び S ，時間 t の間に

$$S = b \log t$$

なる関係が得られ定数bは荷重で変化する値であることを明らかにした。さらに、紙の破壊を確率過程として扱うことを導入し、紙に一定荷重を加えてから破断するまでの時間を測定し第5図の結果を得た。



第5図 $\log N(t) \sim t$ の関係

第5図の直線の傾斜は荷重を加えて後 t なる時刻の単位時間に破断のおこる確率 (m) であり、ある範囲内では一定値をとることを示した。いま、紙の破壊は速度過程であると考えると、荷重 (W) と破断までの平均時間 \bar{t} の間に次式が誘導される

$$\bar{t} = \frac{1}{m} = r \exp(-BW)$$

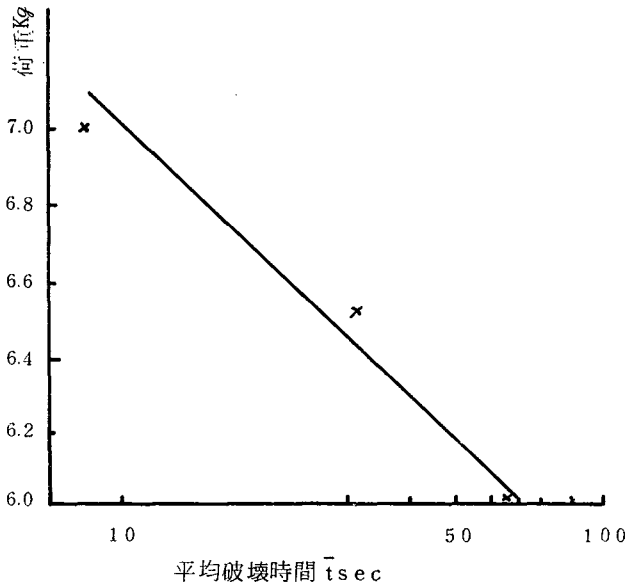
但し r , B は定数である。この結果は第6図の実験より求められた結果とよく一致する。また引張り破壊強度 σ は

$$\sigma = \frac{E_0}{\beta S} + \frac{kT}{\beta S} \log \frac{\beta S \sigma}{\alpha kT}$$

で示される。

ただし、 E_0 = 活性化エネルギー、 S = 試料の断面積、 k = Boltzman Constant、 T = 絶対温度、 α , β は定数。

この式で $\frac{\beta S \sigma}{\alpha kT} < 1$ と考えられるから右辺第2項の T の係数は負であり絶対温度 T の上昇に対



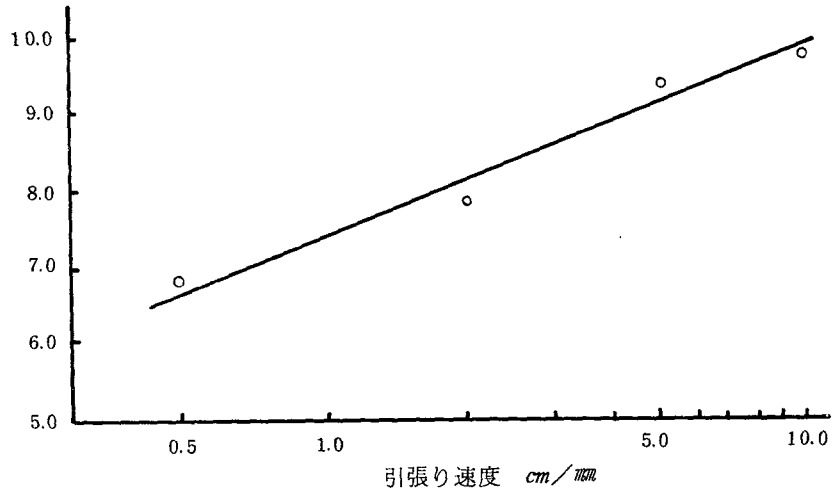
第 6 図 破壊寿命の荷重依存性

して直線的に減少し第 4 図の実験結果を説明している。また σ の増加とともに強度が増すことも第 7 図の実験結果とよく一致している。

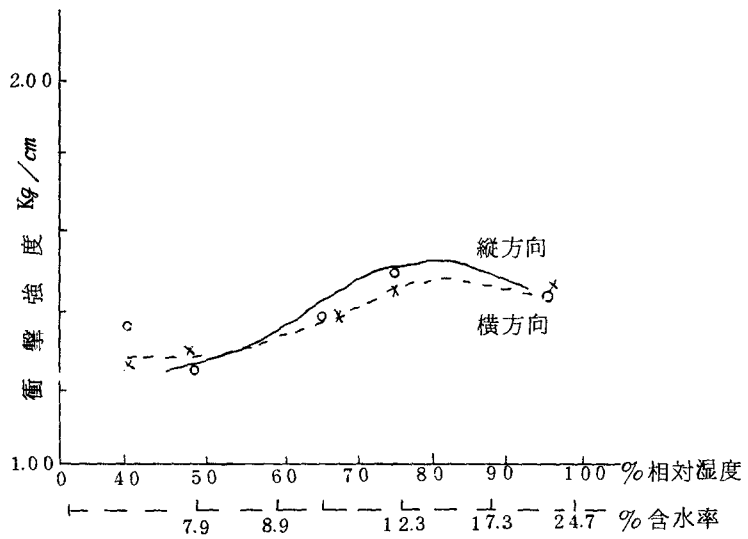
したがって、天然紙質の力学的性質を材料工学的にとらえてしらべた結果、つぎのようなことがわかった。

- (1) 天然紙質の強度を支配する過程は他の多くの固体と同じ様に分子運動にもとづく速度過程であること。
- (2) 強度および破壊を支配する限界事象が確率過程であると考えることにより紙質の引張り破壊強度の荷重速度依存性、一定荷重下での破壊寿命の荷重依存性などに関して本報で得た実験特性が速度過程の内容をもつ確率過程として統一的に説明される。
- (3) 一定荷重下での紙質の破壊寿命の統計的ばらつき特性を実験的に求めたがこれは上述の確率過程として説明される。

第 5 章では重包装紙袋の実用強度の解析には衝撃的荷重に対する紙質の挙動を観察する必要を述べ紙用衝撃試験機を開発するとともに種々の条件での衝撃的性質を求めた。第 8 図は相対湿度と衝撃強度との関係でこれより紙の衝撃強度は相対湿度 85% 近辺で最大値を示し含水率として 15% 近辺に相当することを実験的に求めた。この挙動はさらに数種のクラフト紙についても確認され、さらに小型紙袋の大型実用紙袋の落下破壊強度と相対湿度との間に類似の関係があることを認めた。



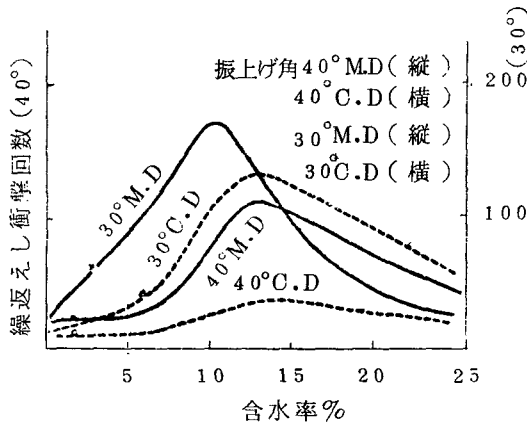
第7図 引張り強さと引張り速度の関係



第8図 相対湿度と衝撃強度の関係

つぎに、紙が一度で破壊しない程度で繰り返し衝撃を加え、加える衝撃力が小さくなるにしたがって破壊するまでの繰り返し回数が紙の縦横で大巾に異って来ることを見出した。また、このような繰り返し衝撃を受けた紙の静的測定では引張り強さよりもむしろ破断時伸びが変っている結果を得た。

さらに、紙の含水率を繰り返し衝撃強度との関係を第9図に示す。



第9図 繰り返し衝撃強度と含水率の関係

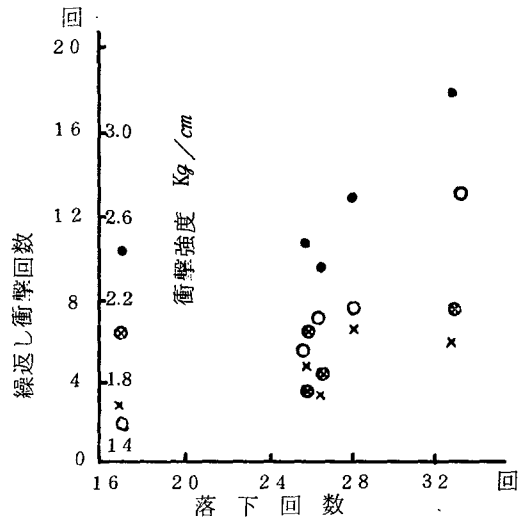
この結果を第8図の結果と比較すると繰り返し衝撃回数の含水率に対する最大値は衝撃強度の最大値と略々一致し水分15%よりやや低目にあるが振り上げ角度が小さい場合は含水率の低い方に繰り返し衝撃回数の最大値が移行し縦方向ではその傾向が顕著である。

この2つの衝撃試験の方式と落下破壊回数との関係を対比するために5種類の原紙より作った小型紙袋を用い検討した結果を第10図に示す。この結果から最も相関性の高い測定値は横方向衝撃強度で普通一般に行なわれる落下破壊試験の場合の破壊回数程度では衝撃疲労的要素が少ないことを明らかにした。

また、紙袋の折り目から破壊する現象を判定するために折り目加工した試料の衝撃強度を測定することを提案し紙の縦方向に直角につけた折り目劣化が激しいことを見出し、さらに5種類の原紙で折り目加工を強化して製袋した実用袋の落下破壊回数と折り目衝撃強度の間は高度の相関性を示した。

第6章は本研究の結論である。

- ⊗ 衝撃強度 (タテ)
- " (ヨコ)
- 繰返し衝撃強度 (タテ)
- × " (ヨコ)



第10図 落下試験と衝撃強度

繰返し衝撃回数との関係

審査結果の要旨

紙質の力学的性質に関する従来の研究は、繊維の集合体からなる材料としての観点からよりも、繊維自身ないし繊維素分子の尺度での、すなわちこの意味でのミクロ的な面に焦点を合わせたものが多かった。したがって、材料としての紙質の力学的挙動とは現在まだ十分に結びついていない。さらに、紙質の強度向上の方法も明確でない点が多い。

本論文は紙を1つの材料として、その力学的挙動を材料工学的に明らかにしたものである。紙としては天然紙質を対象としている。本論文は6章よりなる。

第1章は緒論であり、天然紙質の力学的挙動に関する従来の研究、問題点を論じ、本研究の目的と意義を述べている。

第2章では、まず紙の前処理工程、すなわち原料パルプスラリーの製造工程の流れにしたがって、紙質の力学的性質を支配する重要因子を明らかにし、紙質の改善策を提案している。すなわち、実験的および理論的研究により連続的に濾水度を測定・制御できる連続濾水度計を開発した。これによって湿紙の強度および製品紙質の強度の均一性の向上に成功した。さらに、湿紙の乾燥収縮特性を明らかにし、この特性を利用することによって製品紙質の力学的性質を向上させることをしめしている。

第3章では、紙の実用時の力学的観点から障害の一つとなっている紙質の欠陥を自動的に検出可能な装置を開発し、本装置を紙の実際の製造工程に利用することによって、その強度の均一性が向上することを認めている。

第4章では、紙質の各種力学的挙動を明らかにしている。とくに、(1)紙質の強度が、他の多くの固体材料と同様に分子運動にもとづく速度過程にしたがうこと、(2)紙質の引張り破壊強度の荷重速度依存性、温度依存性、一定荷重下での破壊寿命の荷重依存性など本章で得た実験特性が速度過程の内容をもつ確率過程として説明されることなどを明らかにしている。

第5章は、重包装紙袋の強度の動的研究に関するものである。破袋強度と紙質の衝撃エネルギー、紙袋の落下試験と折り目衝撃強度との間に強い相関性のあること等、紙袋の破壊と紙質の衝撃性質の関連について重要な知見を与えている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は、紙質の力学的挙動を材料工学的に解明するとともに、最終製品としての天然紙質の強さを向上させる方法を開発したものであり、材料工学ならびに製紙工業に貢献するところきわめて大なるものがある。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。