

圧電現象を利用した木材の破壊機構の解析法の 開発に関する基礎研究

(研究課題番号 01560182)

平成2年度科学研究費補助金一般研究(C)
研究成果報告書

平成2年12月

研究代表者 祖父江 信夫
(名古屋大学農学部 助手)

KAKEN
01560182
集

圧電現象を利用した木材の破壊機構の解析法の
開発に関する基礎研究

平成2年12月

祖父江 信夫

名古屋大学農学部

研 究 組 織

- 研究代表者 : 祖父江 信夫 (名古屋大学農学部 助 手)
研究分担者 : 平井 信之 (静岡大学農学部教授)
研究分担者 : 竹村 富男 (名古屋大学農学部教授)
研究分担者 : 都築 一雄 (名古屋大学農学部助教授)
研究分担者 : 佐々木 康壽 (名古屋大学農学部助手)

研 究 経 費

平成元年度	1, 3 0 0 千円
平成2年度	9 0 0 千円
計	2, 2 0 0 千円

研 究 発 表

口頭発表

- (1) 祖父江 信夫、中井 毅尚

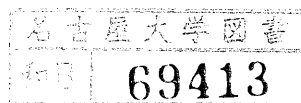
木材の破壊と圧電現象

第40回日本木材学会大会研究発表要旨集, p.374 (1990年4月2日)

- (2) 中井 毅尚、祖父江 信夫

木材の圧電効果における異方性および応力依存の実験的検討

第41回日本木材学会大会研究発表要旨集(1991年4月3日)



はじめに

ガスの着火装置のように、ある種の結晶に力が作用すると電気を発生する現象を圧電効果 (piezoelectric effect) と呼んでいる。圧電性の物質は、工業的にいろいろな分野で利用され、たとえば、ガスの着火装置、マイクロフォン、ヘッドホン、水中聴音器、衝撃センサ、加速度センサ、アクチュエータなどに利用されている。木材もセルロース結晶が圧電性を有し、高分子材料の圧電効果の研究の草分けとなった材料である。木材の圧電率は水晶の約 $1/20$ 程度であることから、残念ながら工業的分野における活用は難しい。

ところで、圧電効果は応力や変形に対応して電荷を発生する現象であるから、逆に電気出力 (電荷) から物体に作用した応力やひずみの状態を知ることができる。したがって、木材に圧電効果があることは、木材の圧電性を知ることにより、ひずみゲージなどを用いなくても直接に木材の応力やひずみの状態を知ることができることを示唆している。何より、木材自身が発生する情報である点が興味深い。しかも、電氣的出力であるので、応答性は速く、破壊の進展過程や衝撃荷重が作用する場合などのような高速現象をとらえられる可能性を有している。

本研究の動機は、このような極めて単純なものである。しかし、予想される問題点も多く、まず木材の圧電効果の発生機構自体が必ずしも明確でない点、圧電効果の発生モードが限定されている点、また従来の測定技術では微小応力下での計測に限られており、破壊が起こるような高い応力下での圧電の実験方法が確立されていない点などが挙げられる。

そこで本研究では、木材の力学的挙動や破壊過程と圧電現象との関係について検討を行ない、圧電現象を利用して木材の破壊機構の解析などへの応用を行なうことの可能性を探ってみることにした。この種の研究は、まだ全く未開拓のテーマである。また、建築構造材の代表的なものに、鉄、コンクリート、および木材があるが、このうち圧電効果を示す材料は木材以外にはない。圧電現象が木材の破壊現象の解析に適用できれば、他の建築構造材料にはみられない特徴的な手法となることが期待される。この研究が、若い木材物性や強度の研究者に”木材の圧電効果の研究”に興味を抱いていただけるような切っ掛けとなれば、著者の望外とするところである。

なお、第1, 2章のまとめは、研究分担者・平井の助言と協力によるものである。

1990年12月

研究代表者 名古屋大学農学部 祖父江 信夫

目 次

1 圧電現象の基礎	1
2 木材の圧電現象に関する既往の研究	5
3 準静的負荷による木材の破壊と圧電現象	10
3. 1 圧電効果の周波数依存性	13
3. 2 圧電効果の異方性	15
3. 3 圧電効果の応力レベル依存性	19
4 衝撃負荷による木材の破壊と圧電現象	23
4. 1 衝撃曲げ応力による破壊と圧電現象	24
4. 2 衝撃せん断応力による破壊と圧電現象	28
4. 3 衝撃一軸圧縮応力による破壊と圧電現象	31
4. 4 衝撃割裂負荷による破壊と圧電現象	35
4. 5 衝撃負荷による圧電の発生機構に関する考察	39
5 木材の圧電性に関する文献	41
6 おわりに	43

1 圧電現象の基礎

1. 1 圧電基本式

結晶に応力 T を与えると電気分極 P が発生し、同時に電界 E が生じる。また、逆に電界 E を与えるとひずみ S が発生し、同時に応力 T が生じる。このことから電気分極 P とひずみ S は次式で表される。

$$P = d T + \eta^T E$$

$$S = s^E T + d E$$

ここで、 d は圧電ひずみ定数とよばれ、圧電体の電極間を短絡したとき ($E=0$) 単位応力により発生する分極、または圧電体を自由にしたとき ($T=0$) 単位電界により発生するひずみを表わす。

$$d = \left(\frac{P}{T} \right)_{E=0} = \left(\frac{S}{E} \right)_{T=0}$$

ここで、 η^T は $T=0$ における電気感受率、 s^E は $E=0$ における弾性コンプライアンスである。

圧電率は異方性を持つので、ベクトルやテンソルを用いて表わす必要がある。圧電率は3次のテンソルで表わすことができるので、18個の圧電ひずみ定数を持ち得る。

木材の圧電効果は細胞壁中のセルロースの結晶から発生する。

セルロースは結晶系の分類からいうと単斜晶系に属し、対称性より次の圧電テンソルが存在する。8つの定数が存在する。

単斜晶系: C_2 $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & d_{25} & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & d_{36} \end{vmatrix}$$

ここで、圧電ひずみ定数の添字は、第一添字が圧電分極の方向 (1:半径方向、2:接線方向、3:繊維方向) を表わし、第二添字が応力の作用面と方向 (1→11、2→22、3→33、4→23および32、5→31および13、6→12および21) を表わしている。

木材では、セルロースの結晶は繊維方向にほぼ平行に一定の方向に配向している。繊維

軸のまわりに一軸配向していると仮定すると、斜方晶系 C_{222} が考えられる。3つの定数が存在することになる。

斜方晶系 C_{222} : $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{vmatrix}$$

1. 2 複素圧電率

木材は粘弾性体であるから、刺激が正弦的に変化するとき、応答関数は一般に複素数で表される。応答関数は、周期的に変動して時間の増加とともにゼロに近づく場合と、単調に減少してゼロに近づく場合とがある。前者を共鳴系、後者を緩和系と呼んでいる。

また、互いに共役な二つの変数間の応答関数は、独立関数が示量的な場合は緩和型、示強的な場合は遅延型となる。たとえば、弾性率は緩和型、誘電率は遅延型となる。

したがって、

$$\text{弾性率は} \cdots E^* = E' + i E''$$

$$\text{誘電率は} \cdots \varepsilon^* = \varepsilon' - i \varepsilon''$$

で表され、虚数部が常に正になるように表示される。

圧電率は力学と電気の結合効果を表す物理定数で、緩和型と遅延型の両方があり、実験的にその存在が確かめられている。

したがって、

$$\text{圧電率は} \cdots d^* = d' - i d'' \text{ と}$$

$$d^* = d' + i d''$$

のどちらかで表現してもよい。

1. 3 圧電温度分散および周波数分散

粘弾性体である木材では、誘電率や弾性率と同じように圧電率にも周波数や温度依存性が現われる。そこで、試験体に温度や応力、電場などの刺激を外部から与え、外部とつりあった熱平衡状態になる過程の緩和現象をとらえると、緩和現象から材料の構造と物性を調べたり緩和現象の発現機構を知ることができる。

各々の分散は、分子の側鎖の回転などの局所運動、主鎖のミクロブラウン運動など分子

のさまざまな運動単位の挙動に対応しており、運動の活性化エネルギーやガラス転移点、融点などの情報を基にして緩和機構を特定することができる。

図1は、木材の圧電率の温度分散の例を示す。

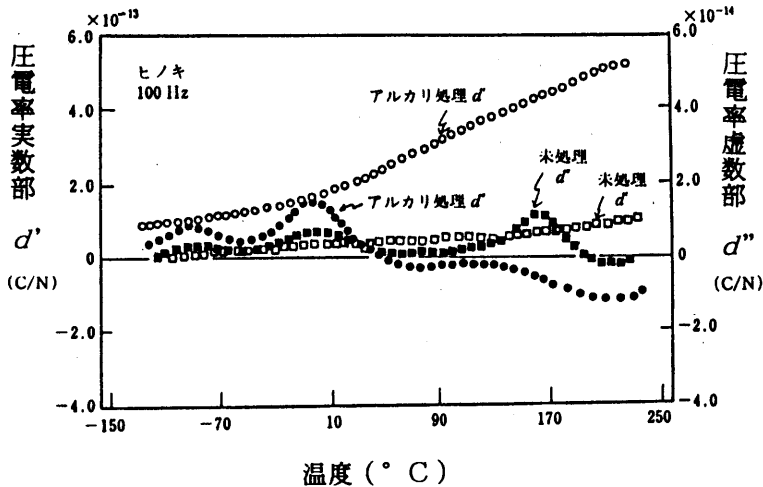


図1 木材およびアルカリ処理木材の圧電温度分散

1. 4 木材の圧電発生機構

前述のように、セルロースの結晶は単斜晶系に属し、8つの圧電定数が存在する。さらに木材中におけるセルロースの結晶の配列状態により対称性が増し、木材としての圧電定数（3つ、または2つ）が得られる。これまでは、主として繊維に平行な ずり変形によって発生する圧電分極が取り上げられてきた。木材の圧電分極がどのようにして発生するかについての定説は現在のところ無いが、木材中におけるセルロース結晶あるいは結晶に近い準結晶領域の水素結合に起因しているものと推測されている。

Slater は磷酸カリウムの強誘電性を水素結合に着目し、H（水素）の有限距離の移動による分極要素間の協力現象的相互作用の考え方を導入して説明している。高い圧電性、誘電性を示すロッシェル塩についても水素結合の存在から説明が試みられている。また、繊維構造を持つ結晶性高分子のコラーゲンやゼラチンなどは圧電効果が存在し、いずれも結晶中に水素結合が存在している。木材の圧電分極もセルロース結晶中の水素結合に起因することはほぼ間違いないであろう。

化学的な処理によってセルロースの結晶構造を変化させ、それにともなう圧電率の挙動を調べることから木材の圧電の発生機構を解明しようとする試みが平井によってなされて

いる¹⁾。木材を水酸化ナトリウム18%水溶液でアルカリ処理すると、圧電率の著しい増加(図1)と結晶格子の熱膨張の温度依存性が極めて小さくなる実験事実が確かめられている。また、セルロースの結晶構造は、アルカリ処理によって天然のセルロースⅠ型構造からセルロースⅡ型構造に変化することがわかっている。セルロースⅠ型からⅡ型に変化すると結晶内部で(002)面上ばかりでなく、 $(10\bar{1})$ 面上にもセルロース分子間の水素結合が新生する。この水素結合の増加が圧電率の増加をもたらすとともに、新生した $(10\bar{1})$ 面上の水素結合によって(002)面の熱膨張が抑制されたと考えられる。これらのことから、木材の圧電分極にセルロース結晶中の水素結合が大きく関与していることが確かめられている。

木材の圧電現象の発生機構の解明に関する直接的な研究は、まだ緒についたばかりといえよう。

文 献

- 1) 平井信之：木材およびセルロース誘導体の圧電性，超音波TECHNO，1(10)，48-51 (1989)。

2 木材の圧電現象に関する既往の研究

約45年程前、わが国の深田栄一博士によって木材の正・逆の圧電効果が確認され、その後圧電に関する多くの研究が続けられている。それらを大きく二つに分けると、木材の微細構造や周波数・温度分散との関係を検討する物性論的な研究と、節や欠点の検出などへの応用を目的とした研究に分類される。

2.1 物性論的検討

理化学研究所の深田栄一博士による研究に始まり、静岡大学の平井らが成果を積み重ねてきている。

圧電温度分散は、物性論的研究の主要なテーマの一つとなっている。

平井ら(1988)によれば¹⁾木材の圧電率を100Hz程度の周波数で測定すると、 -100°C 、 -30°C 、 100°C 付近(10Hzでは 130°C および 180°C 付近)に圧電温度分散が観測される。

図1に低温域における温度分散を、図2に高温域における温度分散の例を示す。

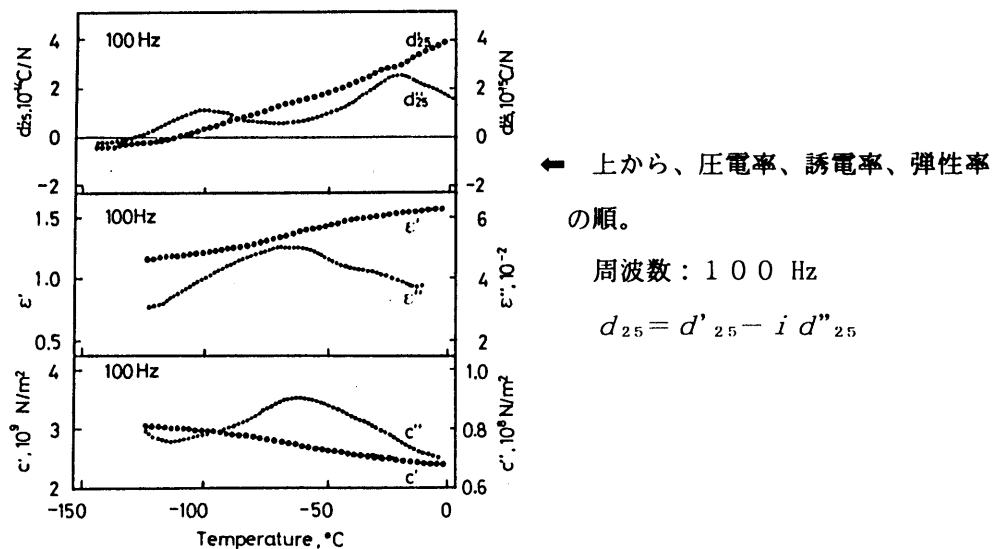


図1 低温域における温度分散

低温部の圧電温度分散は、 -100°C 付近(100Hz)に観測され、圧電、誘電、および弾性の温度分散の検討の結果、セルロース分子鎖中のメチロール基に関係したものと推定されている。活性化エネルギーは約 10 kcal/mol である¹⁾。

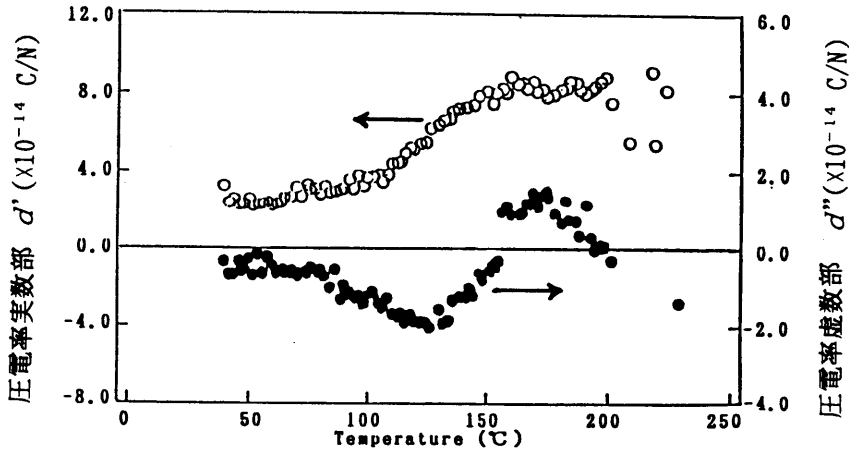


図2 高温域における温度分散

高温部の圧電分散は、約 130°C および 180°C (10Hz)付近にみられる²⁾。
 180°C 付近の圧電温度分散は誘電および力学の温度分散にも観測される。熱分解の影響も考えられるが、周波数の低下に連れて分散温度は低下しており、本質的な粘弾性に起因するものと考えられる。見かけの活性化エネルギーは圧電および誘電で $30\sim40\text{ kcal/mol}$ 、力学では $70\sim80\text{ kcal/mol}$ となっている。一方、 130°C 付近の圧電温度分散は力学や誘電では認められず、圧電固有の分散と考えられている。X線回折法によるセルロース結晶の温度変化から、 $120\sim130^{\circ}\text{C}$ 付近で(002)、(101)および(10 $\bar{1}$)面の面間隔の変化が著しくなることが認められ、 130°C 付近の温度分散はセルロース結晶の状態変化に起因するものと推定されている。

2. 2 圧電現象の応用

圧電現象の応用として、弾性率の予測、節や繊維傾斜などの欠陥の非破壊検査への利用に関する基礎的な研究が海外で進められている。

この研究が始まったのは比較的早く、1960年代前半に既にレポートがある。

Galligan と Bertholf は、図3のように、棒状試験体を縦方向にエアーハンマで打撃

して、木材表面に発生する電荷を観測した³⁾。

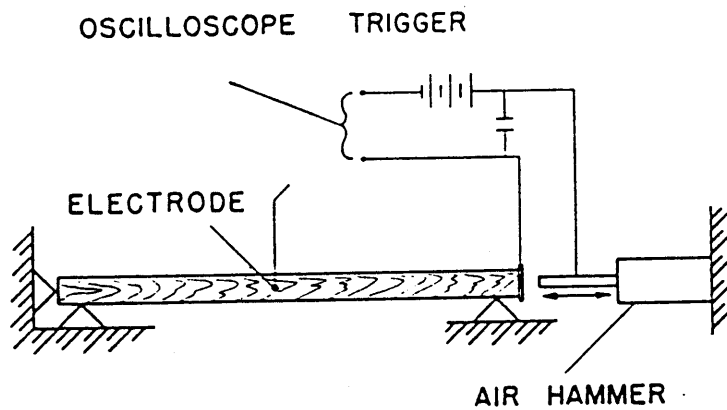


図3 打撃による圧電気の測定

木材の圧電効果の発生は、セルロース分子鎖に平行なせん断応力の作用に起因すると考えられている。しかし、Galligan らのように、繊維方向に長い試験体の縦方向に力が加えられた時にはせん断応力は発生しないので、圧電効果の発生原因については推測の域を出ていない。Galligan らは、局所的な繊維走向の乱れ、春材—夏材の弾性率差、ポアソ

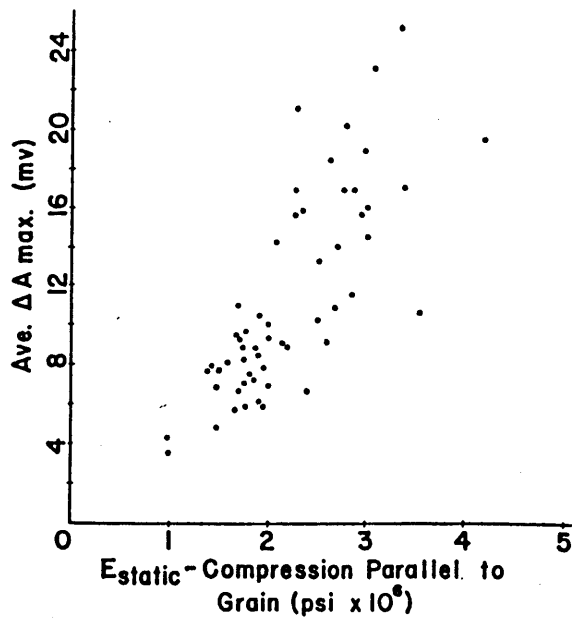


図4 静的ヤング係数（縦圧縮）と圧電気出力の関係

ン効果による断面における応力分布の不均一性に基づくものと推測している。

図4は、静的ヤング係数（縦圧縮）と圧電気出力の関係を示す。圧電気による弾性率の推定の可能性を示唆している。

Smetana と Kelso は¹⁾ 節や割れなどの欠陥と圧電効果との関係を検討し、円孔や節、割れ、ピッチポケット周辺におけるせん断応力の集中が圧電荷の発生に大きく関与していることを確かめた。

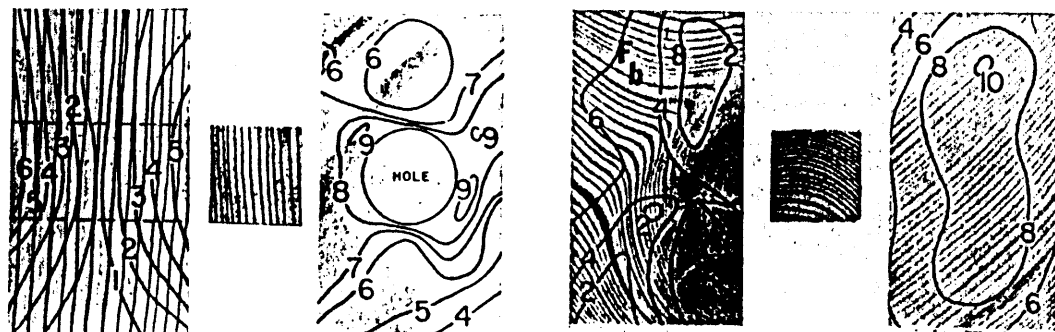


図5 欠陥部分と節周辺における圧電荷の分布

注) 左：円孔のある材、右：有節材

図5は、欠陥部分と節周辺における圧電荷の分布を示す。欠陥部分ではほぼ一様な分布をしているのに対して、節周辺では複雑な分布を示していることがわかる。この現象を逆に利用すれば、節など応力集中を起こしやすい部分を非破壊的に検出できることを示唆している。

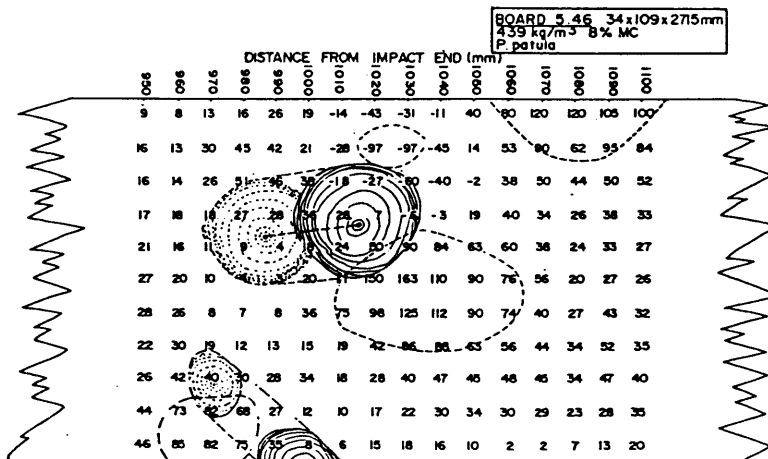


図6 節周辺の電荷の分布

Knuffel と Pizzi は⁵⁾ 実大構造材を縦方向に打撃した際に発生する圧電気の電圧波形の最初のピーク値をパラメータとし、節周辺の欠陥との関係を検討した。図6は、節周辺の電荷の分布を示す。節周辺の点線の領域で大きな値が分布していることがわかる。

図7は、構造材中(34×100×3750 mm)の節の様子と圧電気の電荷の3次元表現との対応を示したものである⁶⁾。図のように適当な閾値を設けてピークを強調すると節のパターンが浮かび上がってくるのがわかる。

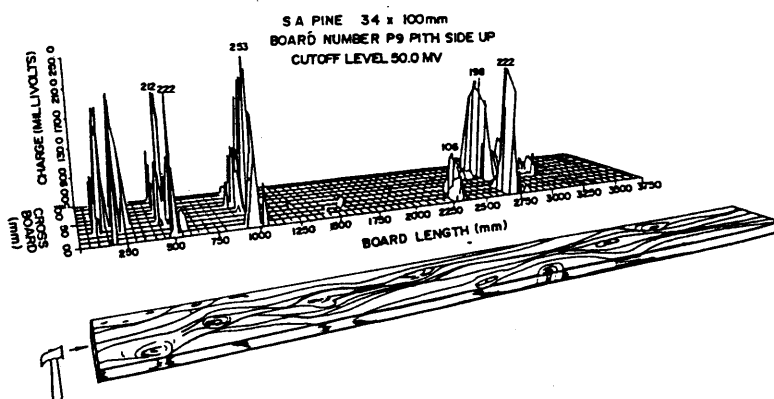


図7 構造材中の節の様子と圧電気の電荷の3次元表現

文 献

- 1) 平井信之, 深田栄一, 鈴木養樹, 宮地康彦: 材料, 37(416), 560-564 (1988).
- 2) 平井信之ら: 第41回日本木材学会大会講演要旨集 (1991).
- 3) Galligan, W. L. and Bertholf, L. D.: Forest Prod. J., 13(12), 517-524 (1963).
- 4) Smetana, J. A. and Kelso, P. W.: Wood Science, 3(3), 161-171 (1971).
- 5) Knuffel, W. and Pizzi, A.: Holzforshung, 40(3), 157-162 (1986).
- 6) Knuffel, W.: Holzforshung, 42(4), 247-252 (1988).

3 準静的負荷による木材の破壊と 圧電現象

この章では、準静的な負荷による木材の破壊と圧電現象の関係について検討した。従来木材の圧電現象は、微小変形の領域で検討されていた。ここでは、油圧制御の材料疲労試験機を用いて静的な平均荷重に微小振動荷重を重畳させ準静的な負荷を与えながら、圧電の周波数依存性、異方性、および小荷重から破壊に至るまでの圧電現象を検討した。

3.0 実験装置

静的負荷における木材の圧電気を検出するには幾つかの問題点がある。まず、圧電体に発生した電荷を検出するために試験体に電圧増幅器を接続すると、増幅器の入力抵抗を通して電荷の移動が発生するので、一般に圧電の測定系では静的感度を持たない。また、良好な低域特性を得るためには増幅器の入力抵抗を極めて高くする必要がある。そこで、通常は圧電気の検出に電荷アンプを用いている。

電荷アンプは、図1のようにフィードバック容量 C_f を持つ演算増幅器であるが、入力の僅かなオフセット電圧によってコンデンサ C_f が飽和するため、フィードバック容量に並列に抵抗 R_f を挿入する必要がある、このため電荷アンプは静的感度を持たなくなる。

さらに複雑な要因は、木材中の水分が発生した圧電気の漏洩の原因となることであり、時定数の長い測定は困難となる。

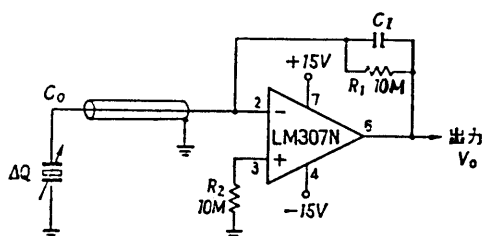


図1 電荷アンプ

したがって、木材の圧電気の検出には10 Hzかそれ以上の周波数の振動負荷が利用されている。低周波域では、指数関数的に圧電出力が低下して行く。

そこで、静的負荷による破壊過程の圧電気を検出するために、微小な振動負荷と静的荷重を複合させる方法を用いた。この方法により、破壊に至るまで徐々に静的負荷レベルを高くしながら圧電気を計測し、従来検討することができなかつた破壊に至るような高い応力レベルにおける圧電現象を検討した。

3. 0. 1 負荷装置

負荷装置に油圧制御式材料疲労試験機（島津サーボパルサ：負荷容量 5 tf）を用いた。微小荷重の周波数は、1 Hzから 110 Hz まで変化させた。

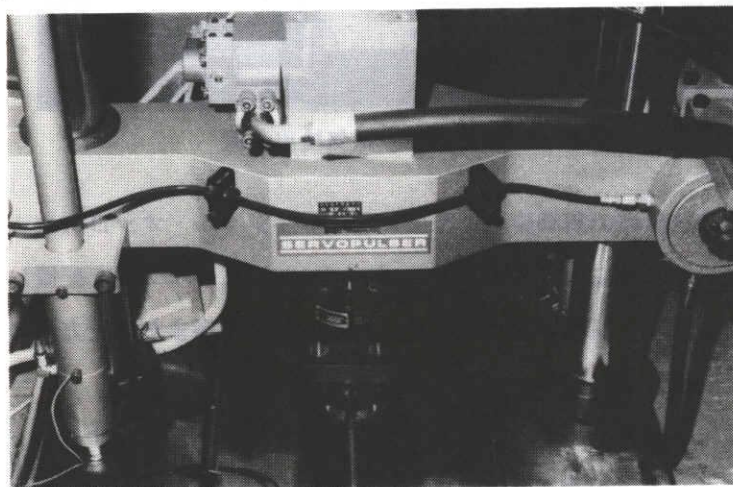


図2 負荷装置（油圧制御式材料疲労試験機）

図3のように、正弦波の微小変動荷重に静的負荷を重畳した。

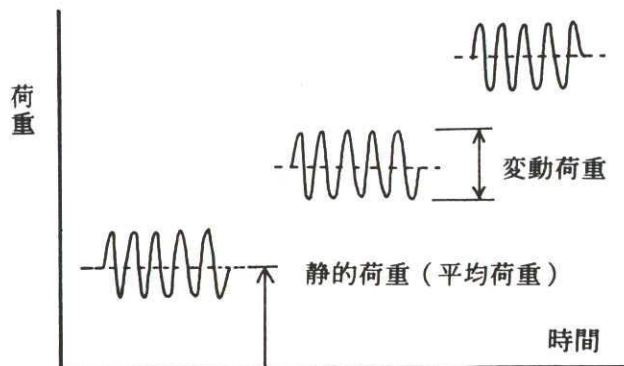


図3 静的荷重と微小変動荷重の重畳

静的荷重に微小な変動荷重を重ね合わせて平均荷重（静的荷重）を段階的に上昇させ、その都度、圧電の測定を行なう。この操作を、試験体が破壊するまで繰り返す。

3. 0. 2 制御および圧電気検出装置

図4に負荷装置の制御装置および圧電気の検出装置を示す。

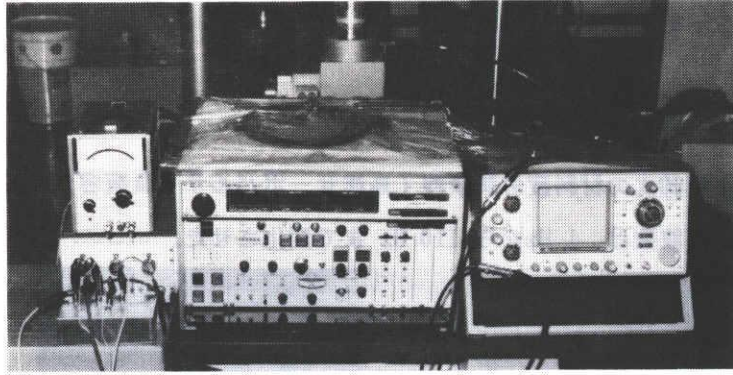


図4 制御および圧電気検出装置

図の中央から疲労試験機の制御装置、右に2現象デジタル・オシロスコープ、左上段に交流微小電圧計、左下段に1/3オクターブ・バンドパスフィルタを配置している。

圧電出力の検出のため、試験体の表裏両面に電極として円形または正方形のアルミ箔を両面粘着テープで固定した。

電極によって取出された信号を、振動負荷の周波数を中心周波数とする1/3オクターブ・バンドパスフィルタ（入力インピーダンス：10 M Ω ）に導き、余分なノイズ成分を除去した。

圧電気の信号と変動荷重の信号を2現象のデジタル・オシロスコープと同時に、交流微小電圧計に導き、電圧信号として計測した。

試験体にかかる負荷の平均荷重は、ロードセル出力を検出してサーボ試験機のデジタルパネルに表示される。

3. 1 圧電効果の周波数依存性

3. 1. 1 はじめに

木材は粘弾性体であるため、圧電効果にも周波数の依存性がある。振動負荷の周波数が1～110 Hz の範囲で主要な3方向（繊維方向に対して0°、45°および90°方向に負荷）について検討を行なった。

3. 1. 2 実験方法

(1) 試験体

供試材にはベイマツ気乾材を用いた。高周波式水分計による含水率は17%であった。試験体は柾目木取りで、その寸法は幅10cm、厚さ2cm、長さ15cmである。試験体の材軸方向は、繊維方向との傾斜角度が0°、45°および90°となるようにした。

(2) 測定方法

圧電気の検出用電極には20mm角のアルミ箔を用い、試験体の中央の表裏に一對ずつ両面粘着テープで貼りつけた。電極とリード線の結合には、導電性塗料を用いた。

試験体には一定（20 kgf）の静荷重を負荷し、これに1 Hz から 110 Hz の微小変動荷重（±5 kgf）を重畳させて、圧電出力と負荷用ロードセル出力を2現象のデジタルオシロスコープで測定した。

3. 1. 3 結果と考察

図1に、0°、45°および90°方向試験体における単位応力当たりの圧電出力の結果を示す。45°方向試験体の出力が一番大きく、0°および90°方向試験体の圧電出力はほぼ等しい。また、いずれの試験体においても、約10 Hz を境にして圧電出力は低周波領域で急激に低下している。これは、木材中の水分による電荷の漏洩に起因するものと考えられる。0°と90°方向試験体で50～60 Hz 付近の出力が変動しているが、圧電出力が小さいため、装置の電源とした周波数60 Hz の商業電流によるノイズの影響を受けたものと思われる。45°方向試験体では圧電出力がほぼ10倍程度あるので、このような影響は現われていない。

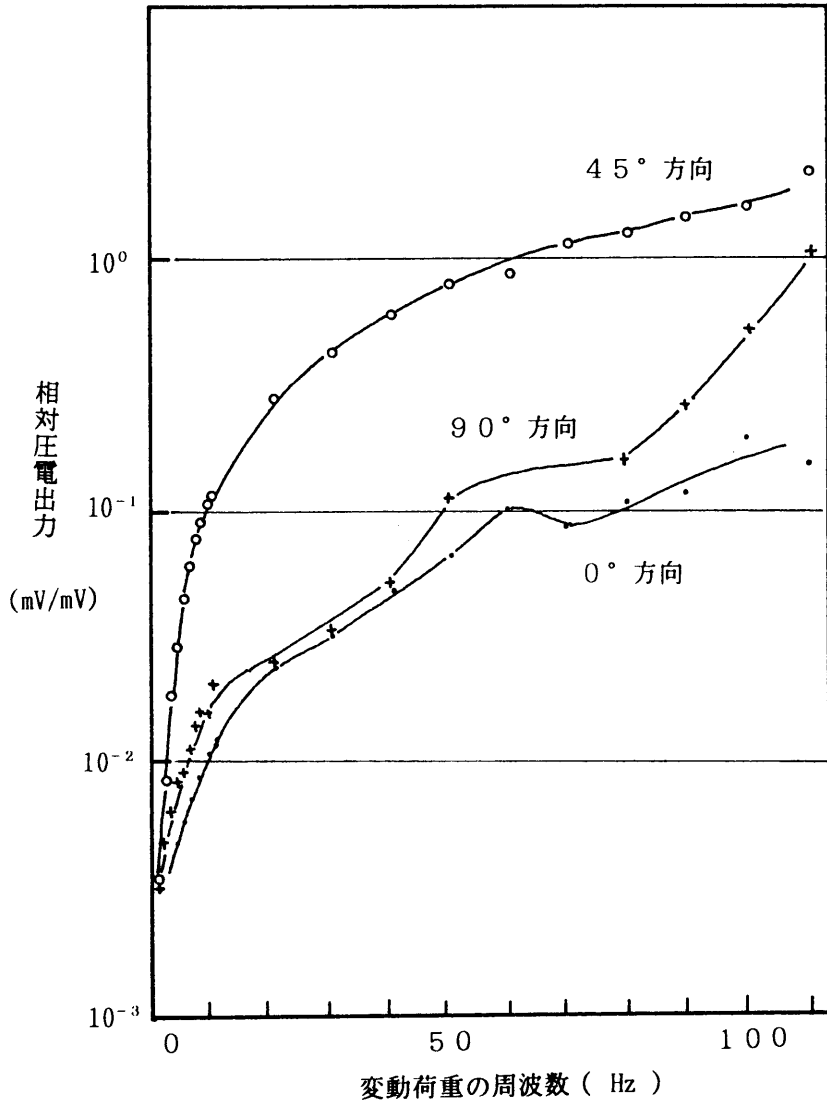


図1 圧電出力の周波数依存性

Smetana らは¹⁾ 小試験体による実験で同様な結果を報告しており、含水率7~10%の間に電荷の漏洩が顕著になる変曲点が存在することを指摘している。

文 献

1) Smetana, J. A. and Kelso, P. W.: *Wood Science*, 3(3), 161-171 (1971).

3. 2 圧電効果の異方性

3. 2. 1 はじめに

圧電効果は力学と電氣的性質の相互効果に起因するので、力学的に著しい異方性を示す木材は圧電効果にも当然異方性を示す。この節では、円盤状の木材試験体を用いて圧電効果の異方性について検討する。

3. 2. 2 実験方法

(1) 試験体

供試材にはベイツガ気乾材を用いた。試験体は柁目木取りで、図1に示すように、直径24 cm、厚さ1.5 cmの円盤状のものを用いた。

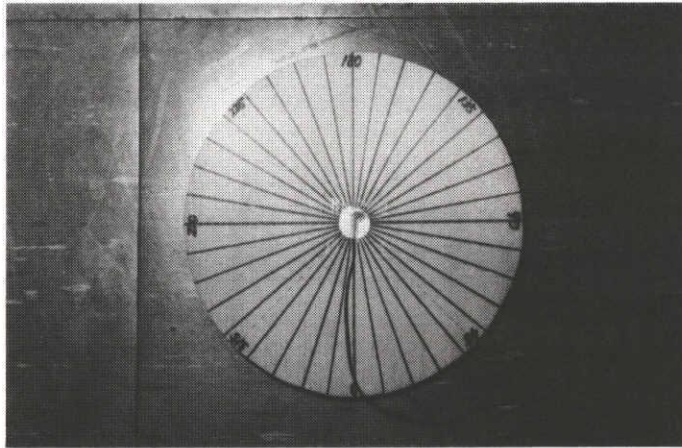


図1 円盤状試験体

(2) 測定方法

試験体への負荷は、一定の静的荷重（20 kgf）に20 Hzの微小変動荷重（ ± 5 kg）を重畳して行なった。振動の周波数は第3.1節の結果を参考にし、圧電出力が十分に確保できるようにして決定した。負荷方向は、図1のように -20° から $+200^\circ$ まで、 10° 刻みで試験体を回転させ、その都度、圧電出力とロードセルの荷重出力を2現象のストレージオシロスコープで計測した。圧電の検出には、電極として試験体中央の表裏に直径2 cmの一对のアルミ箔を両面粘着テープで固定した。電極とリード線の結合には

導電性塗料を用いた。

3. 2. 3 結果と考察

(1) 圧電効果の異方性

図2は、円盤状の試験体で負荷の方向を 10° ずつ変化させながら圧電効果の異方性を調べたものである。およそ 45° と 135° 方向で最大値を示し、ほぼ 90° 方向で最小値、 0° および 180° 方向で極小値（最大値と最小値のほぼ $1/2$ ）を示している。

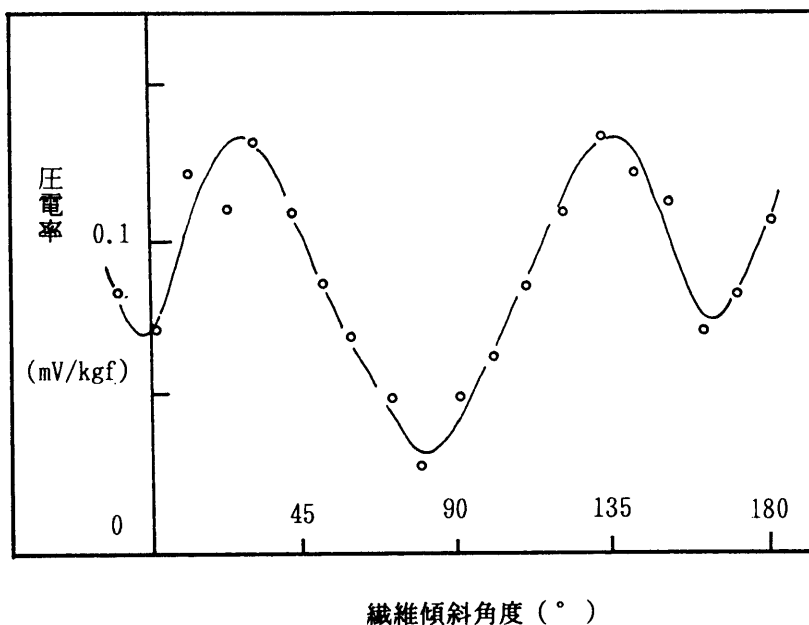


図2 圧電効果の異方性

図3は、応力と圧電出力の信号の位相差を示したものである。 0° と 90° 付近で位相が反転し、約 90° の違いが生じる。この位相の結果と図2の結果より、主たる圧電の発生は、繊維方向に平行なせん断応力に起因していると考えられる。しかし、 0° と 90° 方向においても明らかに圧電出力が観測され、せん断モード以外の圧電効果の発生機構が存在する可能性は否定できない。

さて、木材の圧電効果は細胞壁中のセルロースの結晶から発生する。セルロースは結晶系でいうと単斜晶系に属し、次のような8つの圧電テンソル成分が存在することがわかっている。

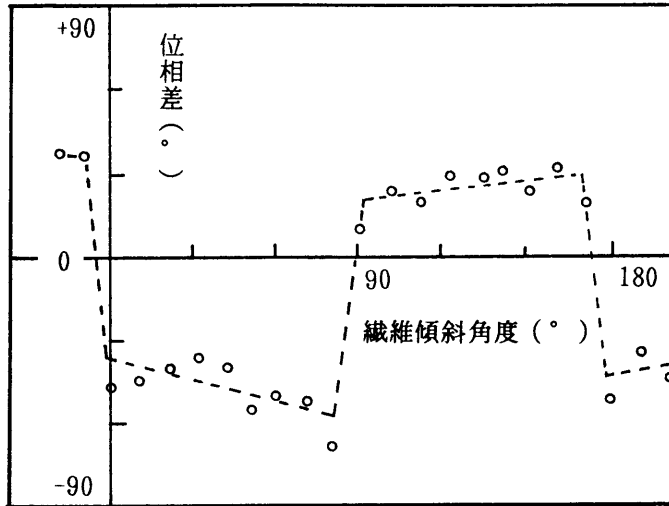


図3 圧電出力と応力信号の位相差

単斜晶系： C_2 $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & d_{25} & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & d_{36} \end{vmatrix}$$

一般には、木材でセルロースの結晶は一定の方向に配向しており、繊維軸のまわりに一軸配向していると仮定すると、斜方晶系 C_{222} が考えられている。

斜方晶系 C_{222} ： $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{vmatrix}$$

このような仮定の下では、3つのせん断モードによる圧電テンソル成分が存在することになる。

図4は、平井らが報告している小試験体を用いた実験結果である¹⁾。45°方向で最大となり、0°および90°方向ではほぼゼロになることから、木材の圧電の発生がセルロースの分子鎖に平行なせん断力が作用したときに発生する d_{14} と d_{25} が主たる発生源と考えている。

しかし、同図を詳細にみると、夏材の0°と90°方向で圧電定数は最大値の約10%程度の値を示している。この原因として、もし木材中の結晶配向が完全に一軸配向とすれ

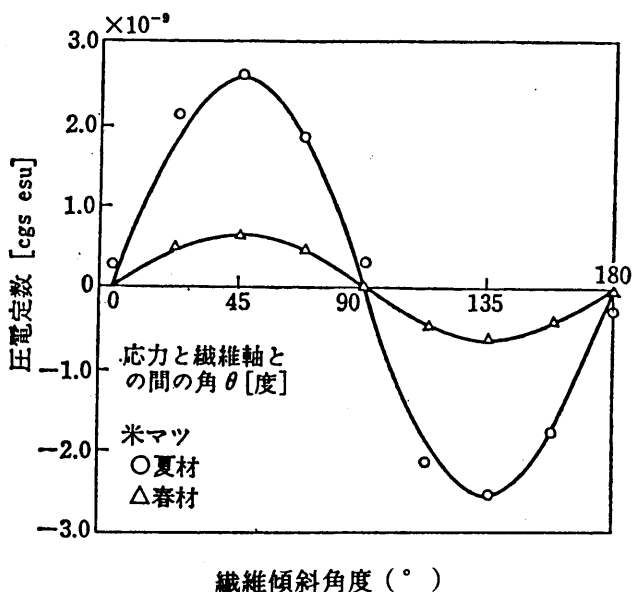


図4 圧電率の異方性 (平井による¹⁾)

ば実験上の繊維軸方向の計測誤差と考えられる。一方、実験上の繊維軸の方向の設定が正しいとすれば、この0°と90°方向で圧電定数の存在は別の原因に求められなければならない。いま、セルロースは単斜晶系に属するので半径方向に軸力が作用する場合 d_{31} が、接線方向に軸力が作用する場合 d_{32} が、また繊維方向に軸力が作用する場合 d_{33} が存在する。細胞壁中では結晶配向に規則性があるために打ち消しあって見掛け上木材では消滅すると考えられるが、もし結晶配向の規則性に乱れがあると、打ち消されない d_{31} や d_{32} 、 d_{33} の成分が検出される可能性がある。

3. 2. 4 まとめ

従来から確かめられているセルロース分子鎖に平行なせん断応力に起因する圧電効果のほかに、繊維方向および半径方向においても圧電効果が確認された。その原因には、単斜晶系に属するセルロースの圧電テンソル成分 d_{31} や d_{32} 、 d_{33} が結晶の配列の乱れから打ち消されないで現われる可能性が考えられる。

文 献

1) 高分子学会編：高分子測定法・構造と物性（上），p.507，培風館（1973）。

3.3 圧電効果の応力レベル依存性

3.3.1 はじめに

従来の木材の圧電効果に関する研究では、非常に微小な変動荷重における測定が行なわれてきた。圧電現象は応力に対する電氣的応答であるので、木材の力学的性質をも反映しており、応力レベルに依存することが予想される。この節では、小荷重から破壊に至る高い応力レベルの圧電効果について検討した。

3.3.2 実験方法

(1) 試験体

試験体は柁目木取りで、負荷方向が繊維方向に対して 0° 、 45° および 90° となる3種類の木取りを行なった。

供試材には、 0° および 90° 材ではベイツガおよびブナ、 45° 材ではヒノキおよびカブールを用いた。樹種がやや不統一なのは、原材料の寸法の制約による。

試験体の寸法は、およそ幅10 cm、厚さ1.5 cm、長さ15 cmとした。繊維方向負荷用試験体の幅は、試験機の負荷能力の関係で2.4 cmとした。

(2) 測定方法

試験体への負荷は、一定の静的荷重に20 Hzの微小変動荷重(± 5 kgf)を重畳し、段階的に静的荷重を増加させ、試験体が破壊に至までこの操作を繰り返した。その都度、圧電出力とロードセルの荷重出力を2現象のストレージオシロスコープで計測した。

圧電の検出には、電極として試験体中央の表裏に2 cm角の一对のアルミ箔を両面粘着テープで固定した。電極とリード線の結合には導電性塗料を用いた。

3.3.3 結果と考察

図1～3にそれぞれ 0° 、 45° および 90° 試験体における平均応力と圧電出力との関係を示す。

0° 試験体では、破壊荷重(1200 kgf)まではほぼ一定出力を示し、終局破壊の進展とともに圧電出力も増加する。終局破壊にともなう圧電は、現象が速いためデジタルオシロ

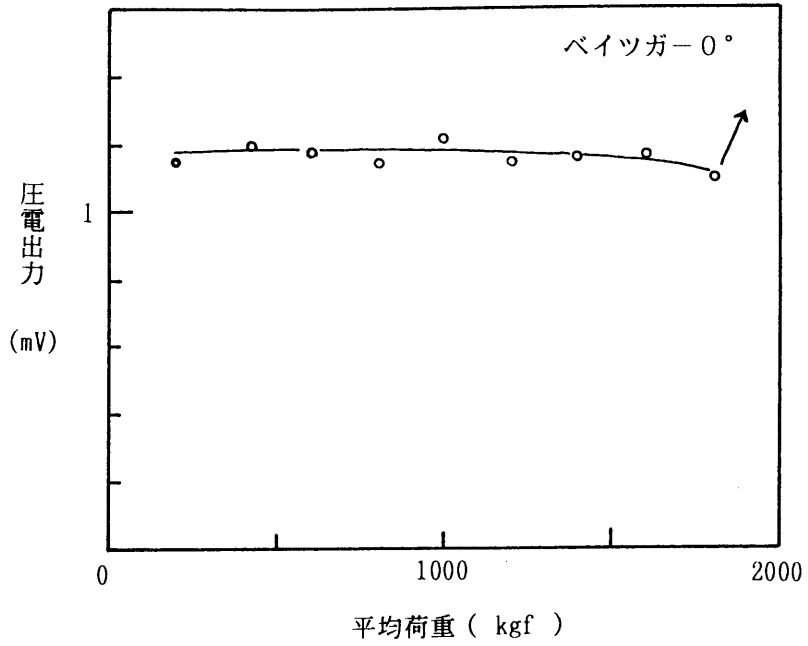


図1 平均応力と圧電出力との関係 (0° 試験体)

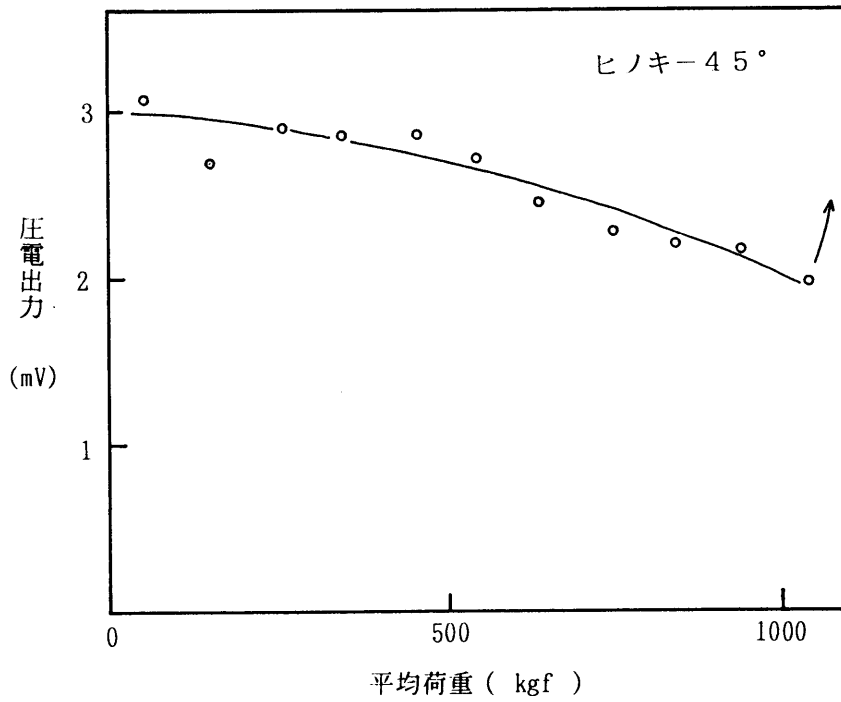


図2 平均応力と圧電出力との関係 (45° 試験体)

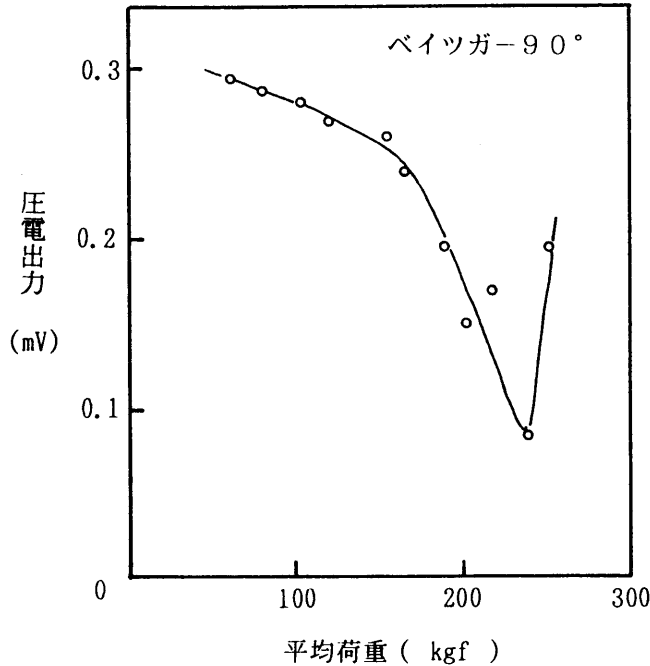


図3 平均応力と圧電出力との関係（90° 試験体）

スコープによる電圧測定はできなかった。

90° 試験体では、応力レベルの増加につれて圧電出力は徐々に低下し、破壊が近づくにつれて一層低下は顕著になり、破壊の急激な進展につれて圧電出力も増加する。この場合は、終局破壊直前の圧電出力の増加が検出できた。

45° 試験体では、0° 試験体と90° 試験体との圧電出力の中間的な様相を示した。圧電出力は45° 試験体が最も高く、次いで0° 試験体、90° 試験体の順であった。圧電出力-荷重曲線の特徴は、試験体の応力-ひずみ曲線の特徴と対応しているように思われる。一般に、0° 方向の応力-ひずみ曲線では破壊に至るまで比較的良好な線形性が保たれ、90° 方向のそれは初期から非線形性を示している。本研究における圧電出力は静的荷重に重畳した微小変動荷重に対応した出力が観測されている。したがって、応力-ひずみ曲線に対応させれば、任意の応力レベルにおける応力-ひずみ曲線の変化率（ヤング率）に相当するものを計測していることになる。このように考えると、図1～3の圧電出力の特徴がよく理解できる。

今後、試験体にひずみゲージを貼付して機械的変形と圧電出力との定量的関係を検討すること、および終局破壊付近における高速な信号の計測法の改良を行なうことを計画して

いる。

3. 3. 4 まとめ

圧電出力は応力レベルに依存し、負荷方向に対応して特徴的な応答を示した。0° 方向では破壊付近までほぼ一定の圧電出力を示し、45° および90° 方向では応力レベルの増加につれて徐々に減少を示した。これらは、木材の応力-ひずみ挙動の特徴とよく対応していた。終局破壊付近では、急激な圧電出力の増加が観測された。

圧電効果は破壊にいたるまで、木材の力学的特徴を反映していることが確かめられた。

4 衝撃負荷による木材の破壊と 圧電現象

この章では、木材に各種の衝撃負荷を与え、破壊に至る過程における圧電現象について検討した。衝撃負荷の種類として、曲げ、せん断、一軸圧縮、および割裂モードの様式を用いた。

木材に低い応力レベルの衝撃を与えて圧電効果を検出する方法は、Galligan, Knuffel-Pizzi らが適用し、応力波による構造材の固有振動数の計測や、製材の節や欠陥の検出を目的として検討されている。

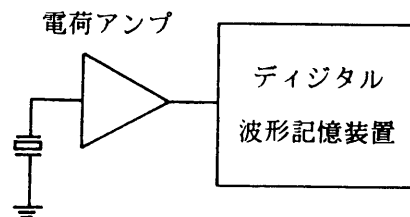
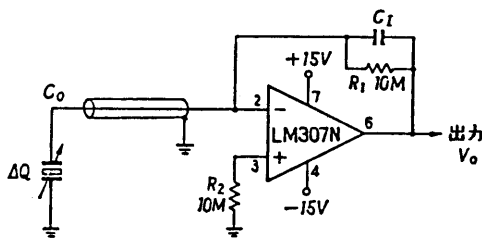
衝撃負荷様式による圧電気の発生については、従来、繊維方向の打撃について存在が報告されていたが、本研究によって、曲げ、せん断、圧縮、割裂の何れの負荷様式によっても木材に圧電効果の存在することが明らかとなった。

4.0 圧電気の検出

以下の検討において圧電気の検出方法は共通するので、ここで説明を行なう。

圧電気の検出には、図1に示す電荷アンプを用いた。すなわち、電荷 ΔQ を電流アンプで受け、フィードバック回路のコンデンサ C_1 で積分して、電荷として取り出した。

電荷アンプの出力を、図2に示すデジタル波形記録計に導き、記録・表示させた。



4. 1 衝撃曲げ応力による破壊と圧電現象

4. 1. 1 はじめに

J I Sの静的曲げ小試験体程度の大きさの試料を用い、中央集中負荷による衝撃曲げ荷重で破壊する過程の圧電現象を検討した。従来、曲げモードにおける圧電気の発生は確認されていない。

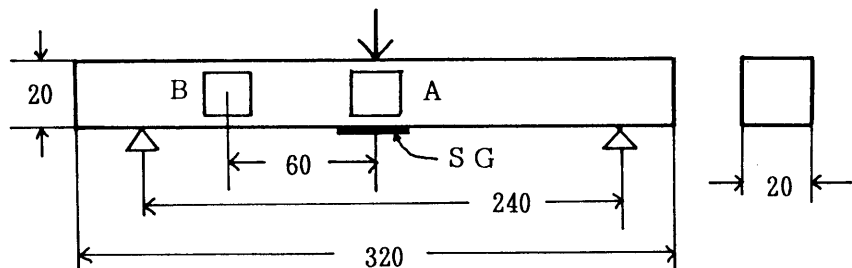
4. 1. 2 試験方法

(1) 試験体：

樹種はスプルスを用い、試験体の寸法は、図1に示すJ I Sの静的曲げ試験体の条件を満たすようにした。

圧電気を検出する電極には図1のように、試験体中央(A点)とこれから60mm離れた位置(B点)に15mm角のアルミ箔を用い、向かい合う側面に一組ずつ両面粘着テープで固定した。電極から引き出すリード線は、導電性塗料で接合した。

また、試験体中央の荷重点の反対側の面(引っ張り側)にはゲージ長10mmのワイヤーストレンゲージを貼りつけ、表面ひずみを測定した。

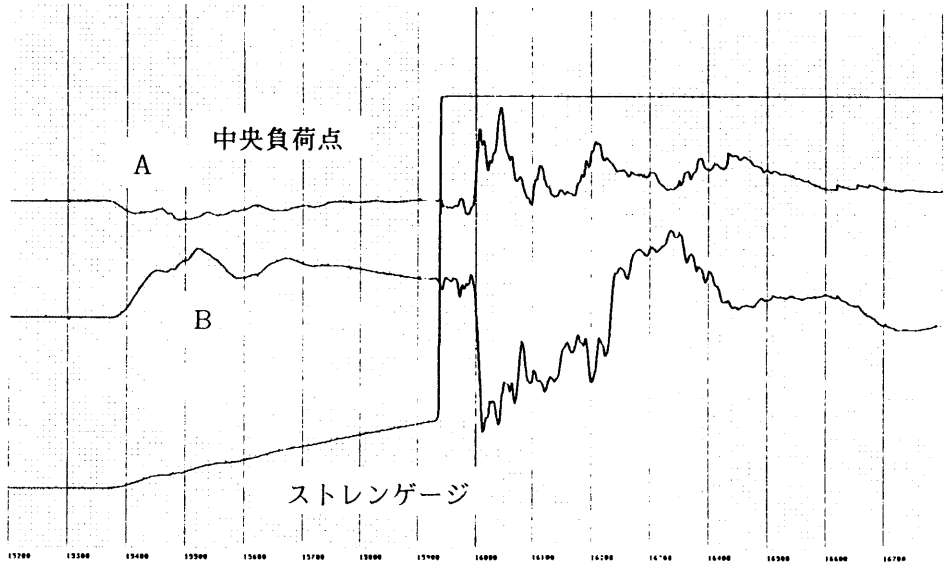
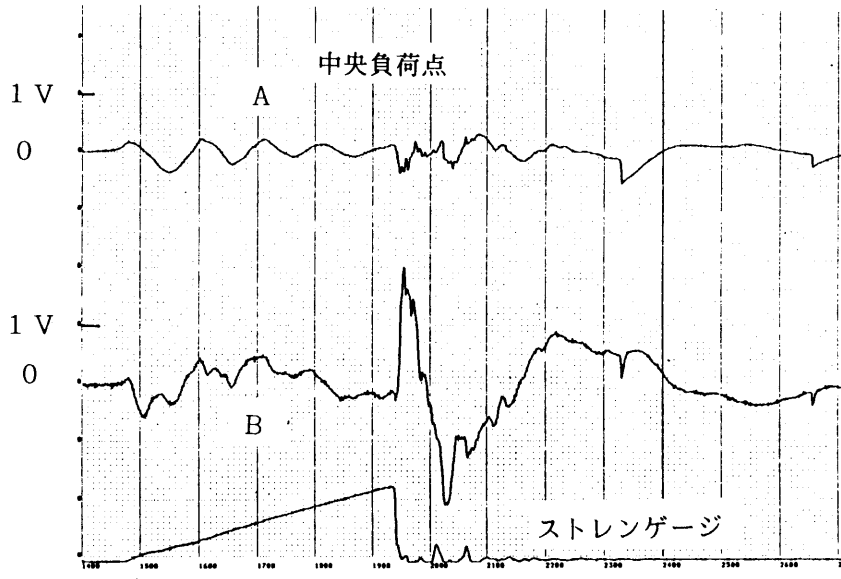


A, B : 電極

unit: mm

SG : ストレンゲージ

図1 衝撃曲げ試験体



400 μ sec

図2 衝撃曲げ応力による圧電出力と時間との関係

(2) 実験方法：

負荷には容量10kg・mの衝撃曲げ試験機を用い、試験体中央を打撃した。

電極を前述の電荷アンプに接続し、圧電電を検出した。

4. 1. 3 結果および考察

図2に、A点（試験体中央）、B点（中央から60mm）における圧電電の出力およびストレングスの出力と時間との関係を示す。上の図の場合は、試験体の破断がストレングスの位置から離れて起こったため破断点でストレングスの出力が急激に低下している。一方、下の図の場合では、ストレングスの位置で破断が起こったため、ストレングスの切断時点でひずみ計のバランスが乱れ出力が瞬間的に飽和している。したがって、後者の場合には、試験体の破断点はストレングスの切断点に遅れて現れている。

圧電電の出力は、負荷と同時に変動を開始し、試験体の破断開始点以降で著しい変化を示している。ストレングスの出力は、負荷初期にわずかな変動を伴いながらほぼ直線的に増加している。このわずかな変動は、試験体の振動に起因すると考えられる。また、変動周期は、電極Bの圧電出力の変動と近いように観察される。

曲げ試験において圧電効果が認められる原因は次のように考えられる。材料力学によれば、はりの曲げにおいて、図3のように試験体中にせん断力が発生することがわかる。

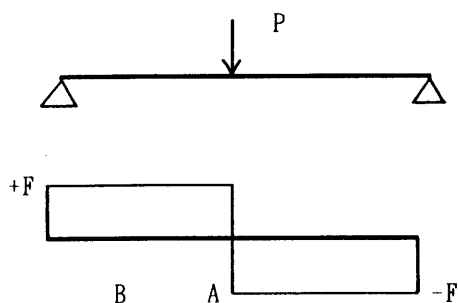


図3 せん断力分布図

試験体中央では、せん断力はゼロとなり、それ以外の位置においては一定値を示すことがわかる。ところで、木材の圧電効果はセルロース分子鎖に平行にせん断力が作用したときに発生すると考えられるので、電極Aの位置では、電荷は発生しないと考えられる。一方、電極Bの位置では、せん断力が存在するので、電荷が発生する可能性がある。

電極Aと電極Bの出力を比較すると電極Bの方が出力が大きく、曲げ試験における圧電効果が試験体内部に発生するせん断応力に起因する可能性はあると考えられる。

試験体の破断開始点以降に著しい圧電電の変動が認められるが、これは曲げによる破断

が脆性的には起こらず、複雑な様相を示すことに対応しているためと考えられる。非常に多くの情報が盛り込まれていると思われるが、現時点ではその解釈はできない。

4. 1. 4 結 論

曲げモードの衝撃破壊試験においても、圧電効果が認められた。負荷と同時に電荷は変動し、試験体の破断の開始点以降で著しい変動を示し、破壊の進展に伴った複雑な変化の様相を示した。圧電効果の原因には、試験体の内部に発生するせん断応力が関与していると思われる。圧電荷の波形の詳細な解釈は、今後の検討課題である。

4.2 衝撃せん断応力による破壊と圧電現象

4.2.1 はじめに

木材の圧電効果が、セルロース分子鎖に平行にせん断力が作用するときには発生することが確かめられている。この節では、DINタイプの2面せん断試験体を用い、せん断力によって木材が破壊する際の圧電現象について検討した。

4.2.2 試験方法

(1) 試験体：

樹種はスプルスを用い、試験体の形状はDINの2面せん断試験体に準じ、図1のようにした。図のAおよびBの位置の表裏に、一対ずつの15mm角のアルミ箔を電極として両面粘着テープで貼りつけた。電極とリード線の結合には、導電性塗料を用いた。

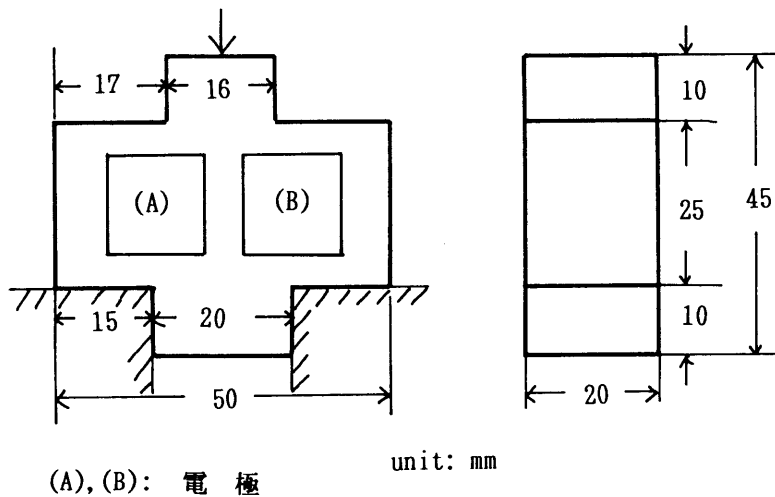


図1 試験体の形状・寸法

(2) 実験方法

図2のように、試験体を重錘落下装置に取り付け、重量 10.4 kg の錘を高さ 40 cm の位置から自由落下させて、試験体を破壊に至らせた。

なお、破壊時に十字の腕の下端部分が開くため、腕の底面を重錘落下装置の試験体支持部分に両面粘着テープで固定した。

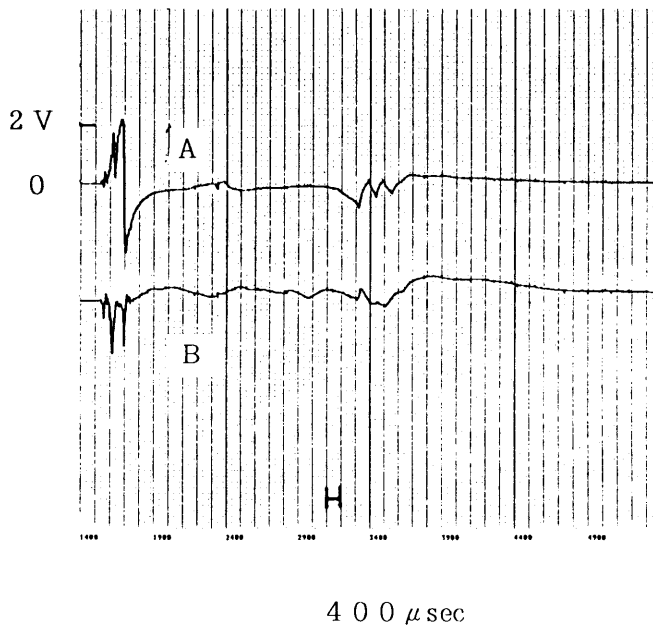
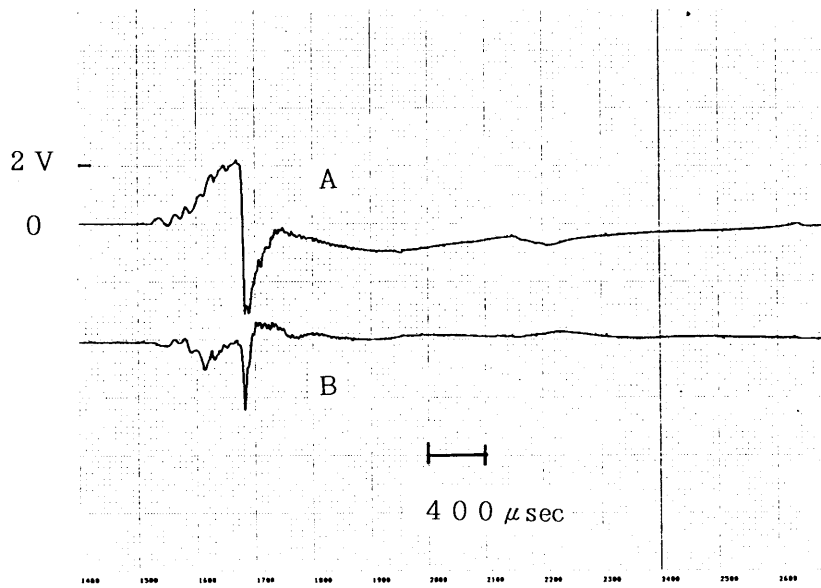


図3 衝撃せん断応力による圧電出力と時間との関係

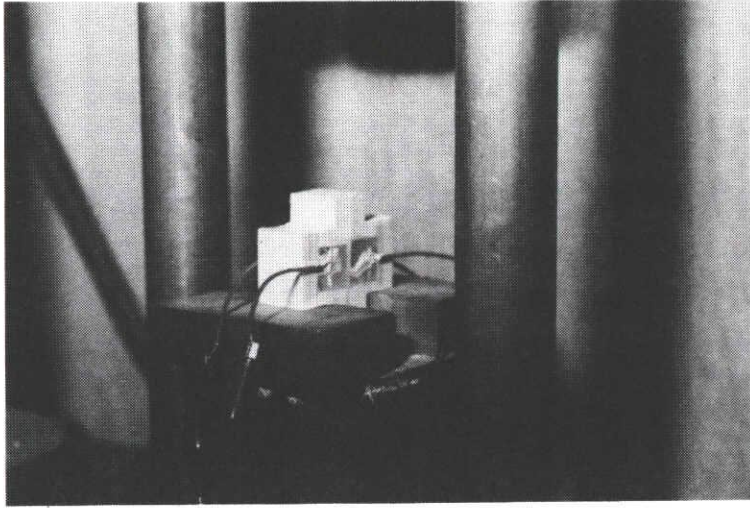


図2 重錘落下装置にセットした試験体

4. 2. 3 結果および考察

図3に、圧電気の出力和時間との関係を示す。負荷と同時に圧電出力は変動しながら増加し、破断と思われる瞬間に出力が急変する経過を示している。電極AとBでは、極性が反転していることがわかる。これは、図4に示すように、電極AとBの位置ではせん断力の方向が逆転しているためである。

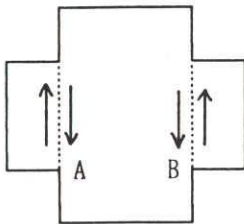


図4 せん断力の方向

上・下の図ともに、電極Aの波形は ほぼ時間に比例して増加しているのに対して、電極Bの波形は大きな変動をしている。これは、変形が両面で不均一に進行するためと考えられる。出力が大きく低下する点は試験体の分離が起こった時点と考えられる。

4. 2. 4 結 論

2面せん断試験体を用いて、衝撃せん断応力による破壊過程の圧電現象について検討した。微小荷重における従来の結果と同様に、圧電効果が確認された。破壊過程の変形は一樣ではなく、不均一に進行していることが認められた。また、試験体の振動に起因すると思われる変動が重畳していることが明らかとなった。

4.3 衝撃一軸圧縮応力による破壊と圧電現象

4.3.1 はじめに

木材の繊維方向に一軸の衝撃力が作用するときに圧電効果が現れることは、従来よりわかっている。この節では繊維方向を含め、木材の半径方向、接線方向、繊維軸から45°方向に一軸の衝撃力を負荷した際の破壊過程における圧電効果について検討する。

4.3.2 試験方法

(1) 試験体

試験体の樹種はスプルースである。図1に示す4種類の試験体を用いた。

L試験体：LR面に電極を貼りつけ、L方向に負荷する。

T試験体：TL面に電極を貼りつけ、T方向に負荷する。

R試験体：RL面に電極を貼りつけ、R方向に負荷する。

L T-45試験体：LT面でL方向と45°方向に負荷する。

試験体の寸法は、厚さ20mm、幅30mm、長さ60mmとした。

電極は、試験体中央の表裏二面に一辺15mmの正方形のアルミ箔を両面粘着テープで固定した。電極とリード線の結合には導電性塗料を用いた。

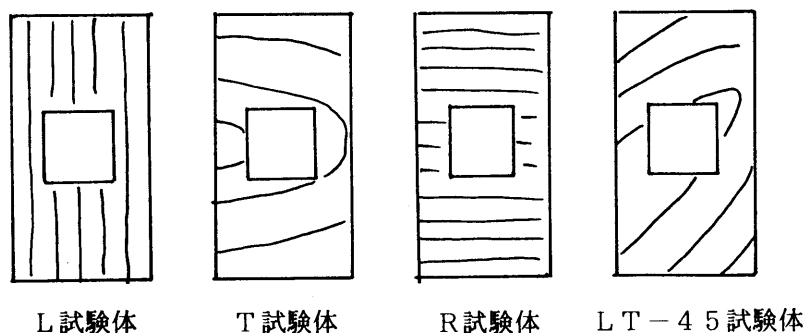


図1 圧縮試験体

(2) 実験方法

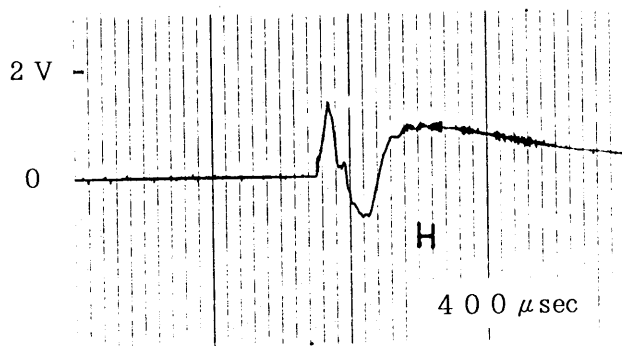
試験体を重錘落下装置に取り付け、重量 10.4 kg の錘を一定の高さ（T，R試験体：

40 cm、L、L-T45 試験体：50 cm) から自由落下させて試験体を破壊させた。

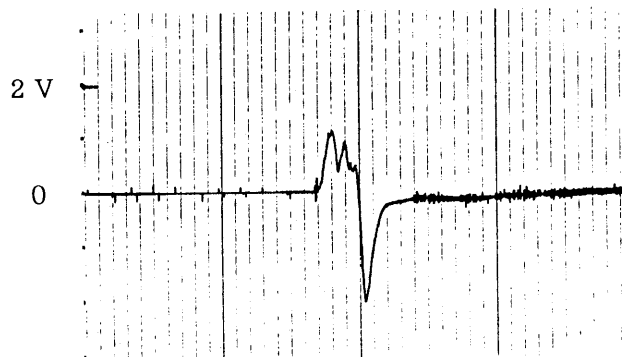
4. 3. 3 結果および考察

図2に、L方向負荷における圧電出力と時間の関係を示す。上段は一度目の衝撃の場合で、表面には肉眼的なダメージは認められなかった。負荷とともにほぼ直線的に圧電出力が増加し、重錘の跳ね戻りに起因すると思われる急激な減少が認められる。この時点では木材はまだ完全には破壊しておらず、続く2回目の衝突でなだらかな圧電出力が認められている。

下段の図は二度目の衝撃負荷の場合で、表面にしわが現われ試験体が完全に圧縮破壊した。初期の増加は一度目の場合と同様に直線的に増加する。最大値を経過後、一旦急激に減少し再び増加の傾向が見られる。この間に破壊が更に進展していると考えられる。終局



圧縮によるしわは認められない



2度目の負荷：しわが現われた

図2 繊維方向一軸衝撃圧縮負荷による圧電出力と時間の関係

注) 上：一度目の打撃，下：二度目の打撃

的な破壊が起こると急激な出力低下が起こる。二度目の衝撃負荷では既に塑性破壊領域に至っていると思われ、一度目の後期に現われたなだらかな山は消滅している。

図3に、T方向およびR方向の一軸衝撃負荷における圧電出力と時間との関係を示す。

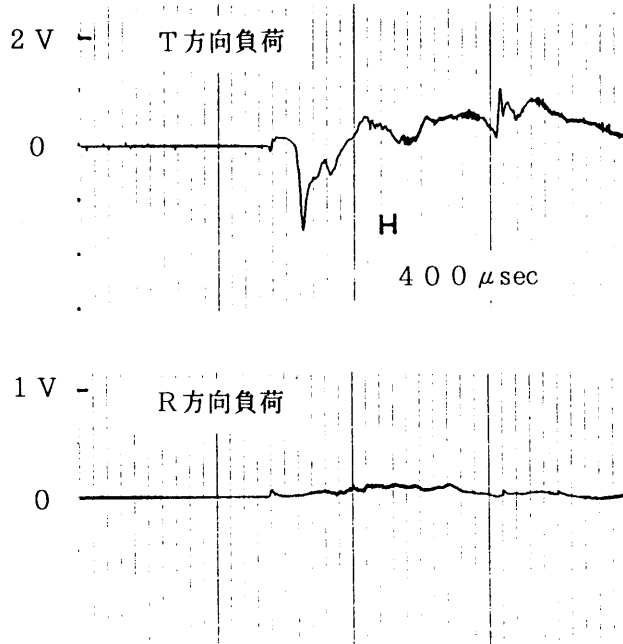


図3 T方向およびR方向の一軸衝撃負荷における圧電出力と時間との関係

注) 上：T方向一軸衝撃負荷，下：R方向一軸衝撃負荷

T方向の負荷では、初期に負の側に大きな出力を示したのち不規則な変動をしている。横圧縮による木材の破壊は、パイプ状の細胞の横座屈をともなうため複雑な様相を呈し、圧電の出力に反映されていることが推察される。

R方向の負荷ではわずかに圧電の出力が認められたが、T方向ほど顕著でなかった。

図4は、LT-45度方向の負荷における圧電出力と時間との関係を示す。試験体の破壊は、せん断応力が最大となる45度方向（繊維軸に沿った方向）にすべり線が現われ、終局的にはせん断破壊による試験体の分離が起こる。圧電出力は、負荷と同時にほぼ直線的に負の方向に変化、せん断破壊が生じたと思われる点から急激にゼロに減少する。終期にやや変化が認められるが、LT-45度の試験体では圧縮力も加わっているため、せん断破壊後の横圧縮に起因する出力が現われているものと推察される。初期の大きな圧電の変化はせん断モードによる出力で、セルロース分子鎖にせん断力が作用したことに起因

するものと考えられる。

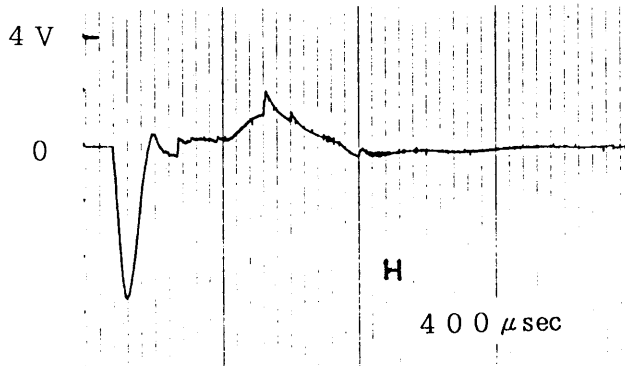


図4 LT-45度方向の負荷における圧電出力と時間との関係

4. 3. 4 結 論

木材の繊維方向、接線方向、半径方向、繊維軸から45°方向に一軸の衝撃力を負荷して、破壊に至る過程の圧電効果について検討した。いずれの場合も、圧電効果が認められた。接線方向および半径方向においても圧電効果が検出されたことは新しい知見であり、興味深い実験事実である。

4・4 衝撃割裂負荷による破壊と圧電現象

4.4.1 はじめに

木材に衝撃的な割裂が起こるように負荷した際の破壊過程における圧電現象について検討した。同じような割裂現象がおこる試験でも、くさびを挿入するタイプの試験と き裂材の横引っ張りを行うタイプの試験では異なった現象が認められた。

4.4.2 試験方法

(1) 試験体

樹種はスプルースを用いた。図1に、試験体の寸法を示す。

電荷の検出用にアルミ箔による電極を両面粘着テープで貼り付けた。電極の位置は、切り欠き先端（電極A）と き裂進展の延長線上約30mm離れた位置（電極B）とした。

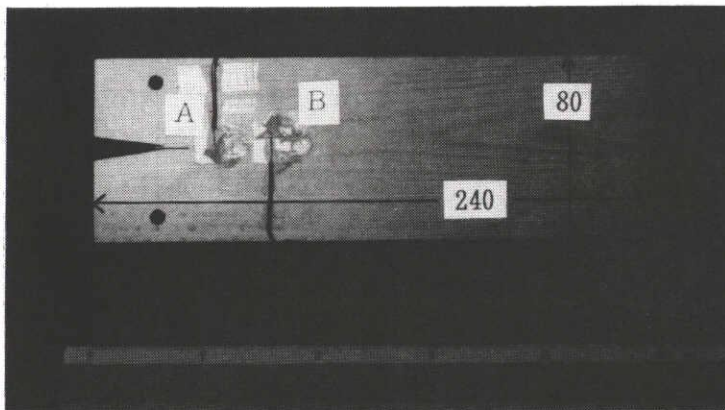


図1 割裂試験体

(2) 実験方法

割裂試験は、引っ張りタイプの試験とくさび挿入タイプの負荷様式で行った。

引っ張りタイプの試験では、図2のように重錘落下試験機の上端に試験体をピンで支持し、重錘（10.4 kg）を一定の高さまで持ち上げて自由落下させた。持ち上げ高さは、鎖が伸びきった状態から20cmとした。

くさび挿入タイプの試験では、図3のように、切り欠き部に鋼性のくさびをあてがい、ハンマで強打して試験体を破壊に至らせた。

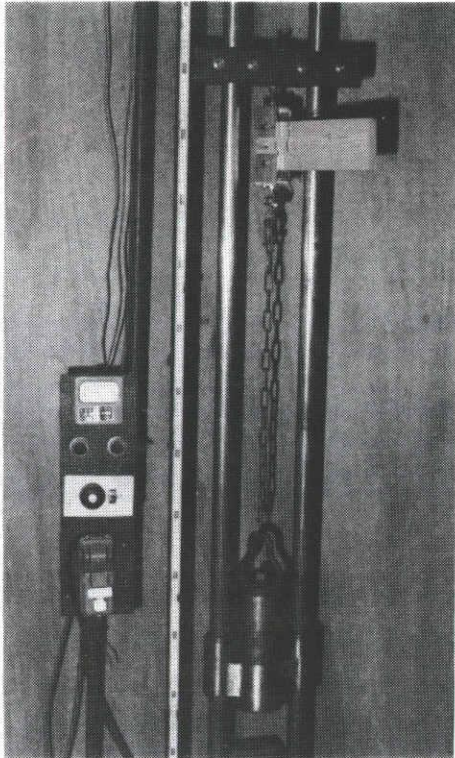


図2 引っ張りタイプの割裂試験装置

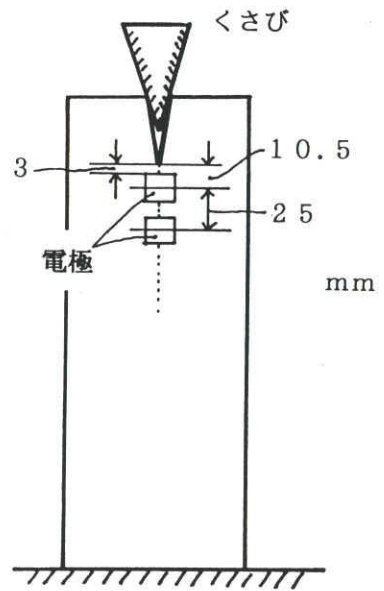


図3 くさび挿入タイプの試験

4. 4. 3 結果および考察

図4に引っ張りタイプの試験における圧電出力と時間との関係を示す。

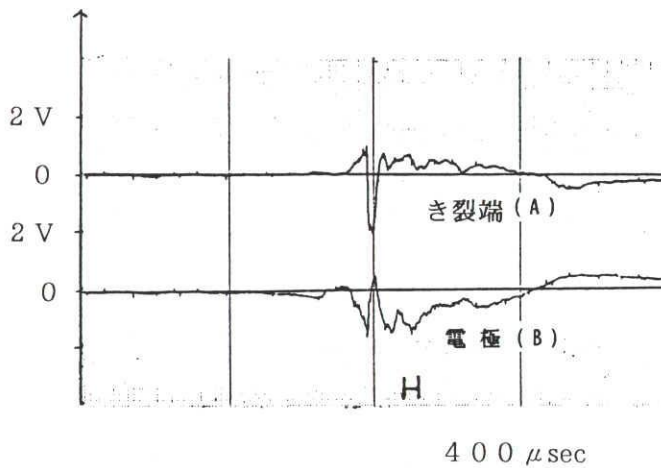


図4 引っ張りタイプの試験における圧電出力と時間との関係

き裂端では、負荷とともに出力が増加し、突発的に減少する。出力が急変する点は、切り欠き端から き裂が進展を開始した時点と考えられる。

その後、やや出力の高い状態を維持している。き裂先端からやや離れた電極Bの位置では、電極Aと極性が反転しているが、電極Aの波形とほぼ同様な変化を示している。

圧電現象がセルロース分子鎖に平行なせん断力に起因するとすれば、電極を通る中心線上では上下の対称性から圧電は打ち消されて消滅することになる。しかし、電極AとBでは極性が反転することから、なんらかの原因で、両者の付近では応力状態が反転しているのか、別の可能性としては せん断力以外の要因（例えば引っ張りや圧縮）によって電荷が発生する機構が関与することが考えられる。興味ある実験結果ではあるが、現時点では明快な解釈を与えることはできない。

図5にくさび挿入タイプの試験における圧電出力と時間との関係を示す。図4の引っ張りタイプの試験の場合とは対照的に負荷開始より著しい変動を示す。このような波形は、無欠点の棒を繊維方向に打撃した場合にも認められる。

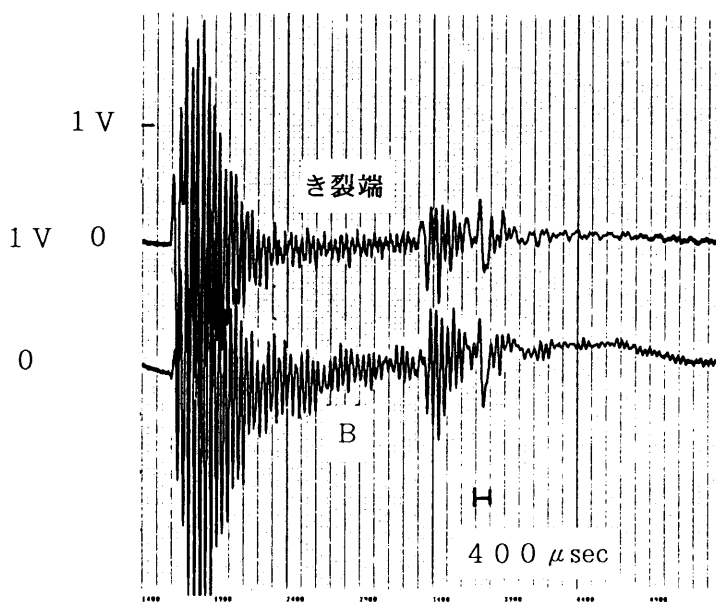


図5 くさび挿入タイプの試験における圧電出力と時間との関係

くさびを挿入する場合には、図6のように試験体を繊維に沿って割裂させる応力成分と繊維方向の軸応力成分が複合している。したがって、図5の波形には両者の応力に起因す

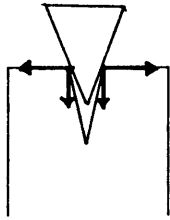


図6 くさびの応力成分

る波形が重畳されているものと考えられる。その結果、引っ張りタイプの試験に見られたような波形がマスキングされたと思われる。図5の波形では、最初の大きな山を経過したのちにやや小さな山が認められる。このことから、き裂の進展が2段階で進行していることが推察される。

4. 4. 4 結 論

割裂タイプの衝撃破壊試験においても、圧電効果が認められた。くさび挿入タイプの試験では、繊維方向の衝撃力成分に起因する圧電効果が重畳されていた。引っ張りタイプの割裂試験においても圧電効果が認められたことから、圧電の発生機構にセルロース分子鎖に平行なせん断応力以外の要因が示唆された。

4.5 衝撃負荷による圧電の発生機構に関する考察

第4章の検討結果から、木材に衝撃荷重が負荷された場合、曲げ、軸応力、せん断、割裂のいずれのモードにおいても圧電現象が認められた。

このうち、繊維方向に軸応力が作用した場合に圧電効果が発生することは、Galliganらによって実験的に明らかにされた事実である。また、衝撃によるせん断応力が作用する場合も、従来 of 知見から当然予想されることである。

新しい知見としては、曲げモード、繊維方向以外の軸応力によるモード、および割裂モードによっても圧電効果が認められた点がある。

木材中のセルロース結晶配向の不均一性に起因する圧電効果の可能性については、第3章に述べたとおりであるが、衝撃荷重が負荷された場合のように応力波の伝播に基づく変形の局所的な不均一性に起因する圧電効果の可能性について考えてみる。

Kogan*)は、結晶中の音波の伝播にともなう不均一なひずみに基づく圧電性について理論的な考察を行っている。

一様なひずみに基づく分極は次式で表される。

$$P_i = \beta_{ijk} u_{jk} \quad (1)$$

ここで、 u_{jk} はひずみテンソルで、変位 $u_j(x)$ と次の関係にある。

$$u_{jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

また、 β_{ijk} は対称中心を持たない結晶においてのみ、ゼロではない圧電定数を持つ。

しかし、もし物体の変形が不均一な場合は、すなわち、

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_l} \neq 0 \quad (3)$$

となる条件では、ひずみばかりでなく、ひずみの変動関数にも依存するので、分極は次の式で表される。

$$P_i = \beta_{ijk} u_{jk} + \gamma_{ijkl} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_l} \quad (4)$$

*) Kogan, Sh. M.: Soviet Physics - Solid state, 5(10), 2069-2070 (1963).

ここで、 γ_{ijkl} は4階のテンソルで対称中心を持つ結晶でもゼロとはならない。

したがって、対称中心を持つ材料でも、ひずみが不均一であれば4式の第一項は消滅するが第二項が残り、分極は次式で表される。

$$P_i = \gamma_{ijkl} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_l}$$

このことから、木材を繊維方向に打撃した際には、対称性の条件から第4式の第一項は消滅するが、第二項の応力波の伝播に基づくひずみの局所的な不均一性によって圧電気が発生することが説明できる。この考え方にたてば、Galligan らの推測したような無欠点材に局所的な繊維のみだれの存在を仮定したり、春-夏材の弾性率差に圧電性の原因を求めようとする不自然な解釈をする必要はない。

事実、春-夏材の弾性率差のないような年輪の無い南洋材を用いて実験を行っても、明らかに圧電気は確認される。

このようなことから、木材に衝撃荷重が負荷された場合には、どのような負荷の様式においても圧電効果が発生する可能性はあり、圧電性は木材の持つ普遍的な物性の一つと解釈される。

5 木材の圧電性に関する文献

木材の圧電性に関する研究は、理化学研究所の深田栄一博士の研究を嚆矢としてわが国で多くの蓄積がなされてきている。ここでは、木材素材に関する文献のみを取り上げた。木材およびその他の材料のセルロース誘導体に関する研究も多いが、今回は割愛した。

- 1) Fukada, E.: Piezoelectricity of wood, *J. Phys. Soc. Jap.*, 10(2), 149-154 (1955).
- 2) 深田栄一, 安田栄夫, 小原二郎, 岡本一: 木材の動的弾性率及び圧電率の年代経過による変化, 小林理学研究所報告, 6(2), 104-107 (1956).
- 3) 深田栄一: 結晶性高分子物質の圧電効果, 小林理学研究所報告, 9(1/2), 45-56 (1959).
- 4) Bazhenov, V. A.: Piezoelectric properties of wood, Consultant Bureau, N.Y. (1961).
- 5) Galligan, W. L. and Bertholf, L. D.: Piezoelectric effect of wood, *Forest Prod. J.*, 13(12), 517-524 (1963).
- 6) Fukada, E., Date, M., Hirai, N. and Hara, K.: Temperature variation of complex piezoelectric modulus of wood, *Reports on Progress in Polymer Physics in Japan*, Vol X, 403-406 (1967).
- 7) Fukada, E., Date, M., and Hirai, N.: Effect of temperature on piezoelectricity in wood, *J. Polym. Sci.*, Part C, 509 (1968).
- 8) 平井信之, 伊達宗宏, 深田栄一: 木材の圧電効果に関する研究(第1報), 日本木材学会誌, 14(5), 247-251 (1968).
- 9) 平井信之, 伊達宗宏, 深田栄一: 木材の圧電効果に関する研究(第2報), 日本木材学会誌, 14(5), 252-256 (1968).
- 10) Fukada, E., Date, M., and Hara, K.: Temperature dispersion of complex piezoelectric modulus of wood, *Jap. J. Appl. Phys.*, 8(2), 151-158 (1969).
- 11) Hirai, N., Asano, I., Sobue, N. and Naitoh, H.: Studies on piezoelectric effect of wood. III., Tree growth and variation of piezoelectric modulus, *Mokuzai Gakkaishi*, 16(7), 310-318 (1970).

- 12) Smetana, J. A. and Kelso, P. W. : Piezoelectric charge density measurements on the surface of Douglas-fir, *Wood Science*, 3(3), 161-171 (1971).
- 13) Hirai, N., Sobue, N. and Asano, I.: Studies on piezoelectric effect of wood. IV., Change of crystallinity of wood by heat treatment and piezoelectricity, *Mokuzai Gakkaishi*, 18(11), 535-542 (1972).
- 14) 平井信之, 浅野猪久夫, 祖父江信夫: 木材の圧電異方性, 材料, 22(241), 948-955 (1973).
- 15) Hirai, N. and Okamura, K.: Studies on piezoelectric effect of wood VI., Temperature dispersion of complex piezoelectric modulus of wood, *Mokuzai Gakkaishi*, 23(9), 413-418 (1977).
- 16) Hirai, N. and Yamaguti, A.: Studies on piezoelectric effect of wood VII., Effect of moisture content on piezoelectric dispersion of wood, *Mokuzai Gakkaishi*, 25(1), 1-6 (1979).
- 17) Pizzi, A. and Eaton, N.: Correlation between the molecular forces in the cellulose I crystal and the piezoelectric effect in wood, *Holzforsch. Holzverwert.*, 36(1), 12-14 (1984).
- 18) 平井信之: 木材の圧電温度分散について, 材料, 34(383), 955-958 (1985).
- 19) Knuffel, W. and Pizzi, A.: The piezoelectric effect in structural timber, *Holzforshung*, 40(3), 157-162 (1986).
- 20) Maeda, H. and Fukada, E.: Effect of bound water on piezoelectric, dielectric, and elastic properties of wood, *J. Appl. Poly. Sci.*, 33, 1187-1198 (1987).
- 21) 平井信之, 深田栄一, 鈴木養樹, 宮地康彦: セルロースおよび木材の低温での圧電緩和, 材料, 37(416), 560-564 (1988).
- 22) Knuffel, W.: The piezoelectric effect in structural timber, part II. The influence of natural defects, *Holzforshung*, 42(4), 247-252 (1988).

おわりに

新約聖書の一節「…たたけ、さらば開かれん。」の言葉にあるように、木材をいろいろな方向から叩いてみたら、ほとんど例外なく圧電気が発生した。木材の破壊の様相に対応して異なった圧電のメッセージを伝えているようである。複雑なモードの破壊では悲鳴に近い複雑な信号が、素直なモードではあっさりとした信号が伝えられている。

この研究を通して、今まで木材の圧電効果は「重箱のすみを突っついている？」限られた木材物性研究者の趣味的なテーマのように思われていたが、圧電効果は私達に非常に多くの情報を伝達している、かなり木材に普遍的な物性であることがわかってきた。

そして、木材の圧電効果の発生機構を解明することの重要性が改めてクローズアップされてきた。この点については、最近、木材を化学処理することにより解明をしようとする試みが始められ、少しずつわかりかけてきた。また、圧電の発生機構が明らかになることにより、木材をより圧電性の高い材料に改質することができるようになる。木材素材の圧電率は水晶の1/20程度であり、現時点では工業的な利用は困難であるが、最近アルカリ処理などによって飛躍的に圧電率が増大し、水晶に近いレベルまで達成できそうなことが現実的となってきた。

この研究期間において、木材の破壊過程で複雑な圧電現象が発生するいろいろな実験事は確認されたが、まだ破壊機構の解析に直接応用できる水準には至っていない。今後、さらにこの研究を推進していく計画である。

私的なことになるが、筆者がこの研究のまとめの時期に入る頃、何かの縁で静岡大学に出向することになり、木材の圧電効果の研究で知られる平井信之博士と研究室をともにさせていただけることになり、いろいろな助言をいただくことができるようになった。

また、研究を進めるにあたり、名古屋大学農学部学生・中井毅尚君には卒業論文および修士論文の課題として取り組み、実験に協力をしていただいた。記して謝意を表します。

1990年12月

著者しるす