木材の破壊形態—木材の構造から見た基本形と用語—[†]

佐 伯 浩*

Failure Modes of Wood—Basic Types and Terminology—

by

Hiroshi SAIKI*

The failure modes of wood were outlined and their basic types were illustrated in schematic diagrams and pictures. The broken ends of cells and the fractured surfaces of cell walls in the fractured wood pieces had complicated forms and structures. Their fractured types were classified into several categories in relation to wood structure, and their technical terms were proposed.

In tension parallel or perpendicular to grain, failure modes of cellular structure are divided into two main categories, namely, “intercellular (interwall)” and “transcellular (transwall)”. The intercellular failure occurs at or close to the intercellular layer (middle lamella), and the fractured surface is almost parallel to the fibers. The transcellular failure shows the following fracture types, “longitudinal split”, “cross”, “oblique” and “splintering”. As to the transwall failure of the wall layers and lamellae, there are six fracture patterns, “cross”, “oblique”, “plicate-pattern”, “split”, “splintering” and “interlayer (or interlamellar)”. The fractured surfaces of nonfibrillar type are often found on the broken ends of lignin-rich wall.

In compression parallel to grain, minute failures are detected as wrinkles on the lumen surface, or as slip planes or bendings of cell walls. They progressively develop from microscopic failure lines to macroscopic ones. In compression perpendicular to grain, a remarkable deformation occurs in the cross-sectional shape of cells.

Key words : Fractography, Wood structure, Cell, Cell wall, Fibril

1 はじめに

木材の破壊の形態・構造は複雑である。破壊のモード、き裂の進行の仕方、破壊条件などと、木材自身の組織・構造、すなわち、構成細胞の種類、各種細胞の壁の構造とその変化などが複雑にからみ合う。

木材の破壊部を走査電子顕微鏡で観察すると、まず複雑な破断面の構造に目を奪われる。しかし、木材および木質材料のさまざまな破壊についての観察が進み、多くの知見がたくわえられてきたので、複雑な破壊形^{1)~3)}の中から特徴的パターンを抽出し、基本形としてまとめることが可能であり、また、必要と思われる。

昭和60年度および61年度文部省科学研究費総合研究(A)「木材および木質材料の破壊過程と破面形態の研究」において、著者は研究の企画およびまとめ、ならびに基本破壊形の研究を担当した。本稿はその研究を基に、基本形についてさらに検討を行い、修正をしてまとめたものである。

2 木材の破壊形態の二大別

木材の破壊形態は便宜的に次のように二つに大別して考えることができる。

(1) 分断する破壊:典型的にはき裂が発達して材片の全体を貫き、材片は二つあるいはそれ以上に分断され、分離面(破断面)が生ずる。縦引張り、横引張り、縦せん断、割裂などによる破壊がこれに含まれる。

(2) 座屈する破壊:細胞壁さらには細胞・組織が屈曲・座屈し、それが発達して材片全体に及ぶ。屈曲・座屈が特定の箇所に集中することもあれば、全体に分散していることもある。部分的ないし微視的には(1)の分断する破壊が生じていることもあるが、材片全体が分断されることは少ない。縦圧縮、横圧縮による破壊はこれに含まれる。

以下にこの二大別に従い破壊形を説明するが、ここで本稿における破壊と破断、failure と fracture の語の使い方について述べておく。本稿中では「破壊」「failure」は(1)(2)の破壊を含め、広く破壊現象をまとめて言い表す時、ならびに、分断する破壊においても、き裂の進行や分断の仕方の特徴などを表す時に「〇〇破壊」「〇〇 failure」のように用い、「破断」「fracture」は分断により生じた破片の形や破断面(破断面)の構造などを具体的に示す時に「〇〇破断」

† 原稿受理 昭和62年7月28日 Received July 28, 1987

* 正会員 京都大学農学部 京都市左京区北白川追分町, Faculty of Agriculture, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto

「○○ fracture」のように用い、また、単独には分断と同じ意味に用いることとした。用語をまとめる上で便宜的にこのように定め、できるだけ統一して使用するように努めた。

3 分断する破壊の形態

繊維をはじめとする幾種類かの細胞から構成されている木材中をき裂が進行する時、細胞間の結合あるいは細胞壁またはその両方を破壊して進み、遂に材片は分断される。その基本の破壊形を細胞間の破壊と細胞壁の破壊、さらに細胞壁を構成する壁層・ラメラの破壊とに分けて述べる。

3・1 き裂の方向と細胞間および細胞壁の破壊形

木材を構成している細胞は大部分が幹軸方向に並んだ紡錘形の細長い細胞（広い意味で繊維）からなる。この繊維に対して量的には少ないが、髓から外側に放射状に走る放射組織がある。このような細胞配列から木材は繊維方向、放射方向および接線方向の3方向で力学的性質が著しく異なり、破壊においてもき裂の発生面とその進行方向によって破断の態様が異なる。き裂面が繊維に平行の場合はき裂の進行が容易で、破断面は一般に凹凸が少なく、平滑であることが多い。一方、き裂面が繊維と直交し、繊維を横切る方向にき裂が進行するのは多くの場合に困難で、平滑な破断面を生ずることは少なく、しばしばささくれた破断となる。紡錘形の繊維の配列に対してき裂の方向と細胞間および細胞壁の破断の型を示すと Fig. 1 の通りである。

- (1) 縦破断 longitudinal fracture, 繊維平行破断 fracture parallel to fiber (Fig. 1(a) 1, 2)

(a) fracture parallel to fibers; (b) fracture traversing fibers; 1, longitudinal; 2, longitudinal split; 3, cross; 4, oblique; 5, splintering; 6, pull-out.

Fig. 1. Schematic diagrams of the longitudinal section of wood showing fracture modes, intercellular (1, 6) and transcellular (2-5).

繊維に平行のき裂面が発達して材を破断している。

- (2) 縦裂破断 longitudinal split, longitudinal trans-wall failure (Fig. 1(a) 2)

縦破断の中でき裂が縦方向に細胞壁を切断しているもの。

開口やせん断によりき裂が繊維方向に進行する破壊において、一般に厚壁の繊維（晩材仮道管など）ではき裂は細胞境界に沿って進むが（(a) 1），薄壁の繊維（早材仮道管など）では縦裂破断（(a) 2）が多い⁴⁾。放射柔細胞もしばしば縦裂破断する。

- (3) 直交破断 cross fracture, 横破断 transverse fracture, 繊維垂直破断 fracture perpendicular to fiber (Fig. 1(b) 3)

繊維にはほぼ垂直のき裂が細胞壁を横切り材を破断している。壁が横巻き構造の細胞に一般に生ずるが、急らせん構造の繊維でも薄壁の時は開口によるき裂が重複細胞壁を直交破断することがある（Fig. 5 参照）

- (4) 傾斜破断, 斜め破断 oblique fracture, slant fracture (Fig. 1(b) 4)

繊維に斜めにき裂が進み、壁を切断している破断。薄型の繊維にせん断によるき裂が繊維に斜方向に進む場合などに生ずる。

- (5) とげ状破断 splintering fracture, 鋸歯状破断 dentate fracture (Fig. 1(b) 5)

細胞壁の破断先端がとげ状～鋸歯状を示す破断。急らせん構造の厚壁の繊維に対しき裂が直交して進むのは困難で、壁のらせん構造に沿う割れや裂け、さらに引き裂きなども加わった破壊が生ずることによる。細胞境界には部分的に縦破断が生じていることが多い。

- (6) 引き抜け破断 pull-out fracture (Fig. 1(b) 6)

繊維の先端が引き抜けた破断。き裂が厚壁の繊維の先端にさしかかった時、壁を切断しないで細胞境界に沿う縦破断に移行したものと考えられる。

実際の破断部にはこれらの破壊形が組み合さっていることが多く、例えば(1)と(3)ないし(4)とが交互に生じて階段状破断 stair-like fracture を示す場合などがある。

繊維以外の構成要素でも等径的な形の細胞は少なく、一般に長軸をもち、組織内で長軸方向が定まっていることが多いから、そのような組織の破壊についても上記と同様に考えることができる。

3・2 細胞間および細胞壁の破壊の特徴

Fig. 1 にみられるように、き裂は繊維細胞の境界に沿って細胞間あるいは境界に近い細胞壁内を通るか、細胞壁を縦、横または斜めに切断して進行する。このような破壊の特徴は金属の破壊における粒界破壊と粒内破壊と同様の区分としてとらえることができる。金属粒に相当する構成要素は木材では細胞であるから、

細胞境界に沿って破壊する細胞界破壊（または細胞間破壊）と細胞を横切り、壁を切断する細胞切断破壊とに区分することができる。

このような区分を細胞壁の破壊の観点からみると、細胞界破壊は壁界破壊（または壁間破壊）、細胞切断破壊は壁切断破壊と呼ぶことができる。これまで細胞境界に沿った破壊が細胞間層で生じているものを細胞間破壊とし、一次壁から二次壁外側までの間で生じているものを壁内破壊としていたが、この2者をまとめて細胞界破壊または壁界破壊と呼び、細胞間層で生じた破壊を区別して呼称する時はそれを細胞間層破壊と呼ぶように改める方がよいと思われる。上述の用語の中で、細胞間破壊および壁間破壊は細胞間層における破壊のような印象を受けるので、細胞境界付近の意味で「細胞界」および「壁界」をおもに用いることとした。

(1) 細胞界破壊 intercellular failure, 壁界破壊 interwall failure

細胞間層破壊と細胞間層に近い細胞壁内での破壊を含む。細胞境界での破壊は、気乾材では一般に二次壁外層 S_1 内あるいは S_1 と二次壁中層 S_2 との境界で破壊することが多いが、煮沸、蒸煮などによる高温高湿状態では破断面は壁の外周に移り、一次壁ないし細胞間層で破断するようになる。

a) 細胞間層破壊 failure at intercellular layer

細胞間層内ないし細胞間層と一次壁との境界で生じた細胞界破壊。熱処理、化学処理、劣化などにより細胞間層の結合力が弱まった場合に生ずる。

b) 壁内破壊, 壁内はくり intrawall failure

一次壁, 二次壁 S_1 , S_2 などの壁層内, 壁層間あるいはラメラ間で, 壁層・ラメラに沿って破断する細胞界破壊。縦裂破断を除く縦破断や引き抜け破断に典型

的に認められる。破断面上には特定の壁層（例えば S_1 ）が出現することが多く（Fig. 2）、その破断面は比較的平たんで、壁層やラメラをはく離したような外観を示す。この破断面は次に述べる壁切断破壊による破断面と明らかに相違するので、壁界破断面として面上の構造について今後厳密な観察研究が望まれる。

壁界破断面には上述のように破断した壁層・ラメラの構造が現れるが、放射組織との交差部などで段 step を生じて別の分断面に移る（Fig. 2 矢印）。同一の壁層内で別の分断面に移る場合もあるが、細胞間層を横切って隣接細胞の壁層に移ることも多い。段の部分には壁層・ラメラを構成するフィブリルの切断や裂けが認められる。

(2) 細胞切断破壊 transcellular failure, 壁切断破壊 transwall failure

き裂が細胞壁の全層あるいはそのほとんどの厚さにわたって、それを貫いてあるいは横切って切断している破壊。細胞の外周に沿う細胞界破壊と異なり、き裂が細胞内方に向かって進み、多くの場合、細胞は分断される。薄壁の細胞では隣接細胞との間の重複細胞壁が一緒に切断あるいは裂けていることが多いが、厚壁の細胞では細胞境界に壁界破壊が多少とも現れるので、一つの細胞の壁切断破壊と隣接の細胞の壁切断破壊は間に細胞界破壊をはさんで個別に生ずると考えられる。

3・1節で述べた縦裂、直交、傾斜、とげ状などの破断形は壁切断破壊が繊維（細胞）長軸に対してどのような角度に生じているかによるものである。

3・3 壁層およびラメラの破壊形

木材の細胞壁は一次壁と通常3層（ S_1 , S_2 , S_3 ）に区分される二次壁とからなる。さらにこれらの壁層にはフィブリル配向の変動などから幾層かのラメラが認められることがある。壁の破壊を微視的に扱う場合にはこれらの壁層やラメラの破壊の特徴を明確にとらえなければならない。壁層・ラメラの骨格はセルロースミクロフィブリル（以下フィブリル）であり、その配列方向に対するき裂面の角度と、破断面あるいは破断先端の形態の特徴から破壊形をまとめると次の通りである。

(1) 壁層直交破断 cross fracture of wall layer, フィブリル直交破断 cross-fibrillar fracture, C-I型破断 C-I failure (Fig 3-1)

開口型のき裂がフィブリルにほぼ垂直に進み、壁層を破断している。破断面はおおむね平たんで、破断面上にフィブリル（束）の切断端が認められる。

(2) 壁層傾斜破断 oblique (or slant) fracture of wall layer, フィブリル傾斜破断 oblique-fibrillar fracture, C-II型破断 C-II failure (Fig. 3-2)

せん断によるき裂がフィブリルに対し傾斜した面で

Fig. 2. A fractured surface of the intrawall failure in longitudinal shear of sugi latewood. Arrows indicate steps in separation.

Fig. 3. Schematic diagrams showing fracture modes of the wall layer or lamella. The upper diagram shows the crack propagation in relation to fibrillar orientation and the bottom one is the fractured surface of the layer, in each pair of diagrams (modified diagrams from the original ones proposed by I. Furukawa⁵⁾). C-I, cross; C-II, oblique; C-III, plicate-pattern; S-I, -II, split, parallel-fibrillar; S-III, splintering.

壁層を破断している。破断面の特徴は上述の(1)に類似している。線状模様が認められることがある。⁵⁾

- (3) ひだ状破断 plicate-pattern (or pleat-pattern) fracture, 壁層引き裂き破断 tear fracture of wall layer, C-III 型破断 C-III fracture⁵⁾ (Fig. 3-3)

き裂はフィブリルを横切って進み、ほぼ垂直に壁層を破断しているが、破断面は平坦でなく、真上から見るとひだ状パターンが認められる (Fig. 4)。急らせ

Fig. 4. The plicate-pattern fracture (C-III) of the S₂ layer in a sugi latewood tracheid. C-II, oblique fracture.

んのフィブリル配列をもつ壁層で、引張りによる開口に引き裂きが加わって生ずると考えられる。破断端にはフィブリル (束) の切断端が認められる。

- (4) 壁層裂け破断 split fracture of wall layer, フィブリル平行破断 fracture parallel to fibril, S-I 型および S-II 型破断 S-I and S-II failure⁵⁾ (Fig. 3-4)

フィブリルに沿って裂けている破断。開口 (S-I 型) または面内せん断 (S-II 型) によりき裂がフィブリル方向に進むことにより生じ、破断面には平行配列のフィブリル (束) がしばしば認められ、糸のようにはつれていることもある。S-II 型破壊による破断面には対応する破断面がすれ合ったことを示すような構造が認められることがある。また、S-I 型破壊はフィブリルの横引張裂け破断 interfibril separation, S-II 型破壊はフィブリルのすべり裂け破断 interfibril slippage³⁾ と呼称されている。

- (5) とげ状壁破断, とげ状フィブリル破断 splintering fracture of wall layer, or fibrils, フィブリル引き裂き破断 interfibril tear, S-III 型破断 S-III failure (Fig. 3-5)

壁層・ラメラの破断部がとげ状、繊維状 (短いとげ状) などを示す破断。らせん構造の壁層が縦引張りされた時、フィブリルに沿った裂けに引き裂きが加わり生ずると考えられている。⁵⁾⁶⁾ フィブリル束はしばしば引き抜けているようにみえる。直交破断した薄壁の早材仮道管においても、S₂ 層はとげ状を示す (Fig. 5)。

- (6) 壁層界破断 interlayer failure およびラメラ界破断 interlamellar failure

壁層境界やラメラの境界に沿って生ずる破断。壁層

Fig. 5. Short splintering fracture (arrow) of the S₂ layer in an akamatsu earlywood tracheid. The tracheid was fractured in the cross fracture type shown as Fig. 1 (b)-3.

やラメラの幅方向の面に平行のせん断,あるいはその面に垂直の引張りにより,壁層・ラメラの境界に沿って破断したもの.壁層やラメラ間ではく離したような破断面を示す.3・2節で述べた壁層破壊は S_1 層内ではしばしば生ずるが,これは S_1 層内のラメラ界破壊である(Fig. 2).

(7) 非フィブリル型破断(面) non-fibrillar fracture (surface)

上述の(1)~(6)による破断面には壁層・ラメラの骨格となっているフィブリルの配向と関連する構造が現れるが,骨格成分の含まれる割合が小さく,配列もほぼランダムな壁層では,き裂の進行や破断形とフィブリル配向との関連性は少ない.破断面上でもフィブリルの切断端あるいは平行配列などの構造は不明りょうか全く認められない.このような破断(面)を総称する.

壁層・ラメラの破壊をさらに追究しようとするれば,フィブリル(束)の引張りやせん断破壊,フィブリルとマトリックス境界における破壊,マトリックス内における破壊などを知る必要があるが,これらについてはほとんどわかっていない.

4 座屈する破壊の形態—圧縮破壊形

座屈する破壊は木材を縦圧縮した時に典型的に現れる.ここでは横圧縮を含めて破壊形をまとめる.

4・1 圧縮による変形・破壊の基本形

(1) 曲り, 屈曲 bending

細胞あるいは細胞壁の曲り変形.変形が進むと壁はS字型(Fig. 6)あるいはU字型の屈曲となる⁷⁾.横圧縮では壁の曲りが著しくなると引張側に裂けが生ずる⁸⁾.

(2) すべり面 slip plane, すべり線 slip line

座屈 buckling は軸方向に圧力を受けた柱または狭い面に圧力を受けた板が力の方向と直角方向に急に湾

Fig. 6. The S-shaped bending (arrow) of tracheid walls of hinoki earlywood in compression parallel to grain.

Fig. 7. A schematic diagram of slip planes (arrows) occurred in the double walls of adjacent fibers. I, the intercellular layer; S_2 , the middle layer of the secondary wall.

曲して破壊する現象である.すべり面は細胞壁に生じた座屈による破壊面(線)で,縦圧縮の場合,繊維壁の S_2 層のフィブリルに局所的な屈曲が生じている(Fig. 7).その屈曲部が壁の厚さ方向に細胞軸にやや傾斜して連続し,すべり面を形成している.すべり面は偏光顕微鏡により容易に検出される.

(3) しわ wrinkle (Fig. 8 矢印)

細胞内こう表面にできたしわ.縦圧縮の初期に,横巻きのフィブリルからなる薄い S_3 層が屈曲あるいは折りこむことによって内こう側に小さくもり上ったものの.

(4) 折りこみ folding, 折りこみ圧縮 telescoping

細胞壁が折りたたんだようになった著しいU字屈曲が「折りこみ」で,発達の初期の形はキンク kink, ノード node と呼ばれる.細胞全周にわたって壁が折りこみ,細胞全体が短縮するように変形するのが「折りこみ圧縮」である.大径・薄壁の細胞で生ずる.

(5) こま形 pincushion-shaped, たる形 barrel-

Fig. 8. The wrinkles (arrows) on the tracheid lumen surface of hinoki earlywood tracheids in compression parallel to grain.

Fig. 9. Deformation patterns of the cross-sectional shape of cells in compression perpendicular to grain ((a) (b) (c)), and a stretched pattern in the tension side of a beam bent by heating.

shaped, ひし形変形 diamond-shaped deformation (Fig. 9 (a) (b) (c))

横圧縮を受けた細胞の横断面の形の変形の型。¹⁰⁾¹¹⁾

(6) 延伸変形 stretched shape (Fig. 9 (d))

曲げ木加工の材の引張側では細胞横断面に接線壁(幅方向)の屈曲を伴う接線径の短縮と放射径(はりたけ方向)の伸びが生ずる。¹²⁾

4・2 縦圧縮破壊の進行過程と破壊形

縦圧縮による変形・破壊は圧縮の進行に伴って現れ, 顕著になる。Kučera⁷⁾による移行段階は次のとおり。

(1) 応力線 stress lines, thrust lines

細胞内こう面に水平～やや傾斜したしわができる。

(2) すべり面

(前出)。細胞・細胞壁の形態変化は著しくない。

(3) 顕微鏡的圧縮破壊線 microscopic compression failure lines

壁の屈曲や折りこみにより細胞形状に顕微鏡的に明りょうな変化が生ずる。細胞壁に S 字型, U 字型などの屈曲が現れ, 応力線やすべり面がいくつも生じている。

(4) 巨視的圧縮破壊線 macroscopic compression failure lines

肉眼的にも認められる「もめ」あるいはさらに発達した破壊域で, 顕微鏡的圧縮破壊が進行し, 幾重にも

集積している。細胞・細胞壁の著しい屈曲に伴い, 細胞間層破壊, 壁内破壊なども局部的に生ずる。

5 おわりに

破壊形の観察の際には, 材料を構成しているエレメントを考え, エレメントを分断する破壊とエレメント界の破壊を識別しつつ行うことが重要である。木材ではエレメントは細胞であり, 細胞界での破壊の発生は細胞長軸の方向に強く依存し, 細胞を分断する破壊には壁のらせん状のフィブリル配向が著しく影響する。本稿はこのような観点からとりまとめたが, これが木材および木質材料の破壊形態の観察に役立つことを願って結びとする。

なお, 本稿ははじめにも述べたように昭和 60 年度および 61 年度文部省科学研究費総合研究 (A) (代表者 60 年度佐伯浩, 61 年度野測正) による「木材および木質材料の破壊過程と破面形態の研究」の一部をとりまとめたものである。研究の助成を受けたことに深謝する次第である。

参考文献

- 1) 佐伯 浩, 材料, **22**, 894 (1973).
- 2) 佐伯 浩, 電子顕微鏡, **19**, 25 (1984).
- 3) 野測 正, 佐伯 浩, 昭和61年度科学研究費補助金(総合研究 A) 研究成果報告書(課題番号 60302083), 京都大学, p. 7, p. 90 (1987).
- 4) H. Saiki, Proc. XIth Int. Cong. on Electron Microscopy, Kyoto, 3303 (1986).
- 5) 古川郁夫, 島大農演林報, No. 12, 1 (1980).
- 6) 古川郁夫, 木材学会誌, **24**, 369 (1978).
- 7) L. J. Kučera and M. Bariska, Wood Sci. Technol., **16**, 241 (1982).
- 8) 相内泰造, 石田茂雄, 北大農演林報, **36**, 623 (1979).
- 9) C. T. Keith and W. A. Côté, Forest Prod. J., **18** (3), 67 (1968).
- 10) 相内泰造, 石田茂雄, 北大農演林報, **38**, 73 (1981).
- 11) 相内泰造, 北大農演林報, **39**, 236 (1982).
- 12) 今村祐嗣, 和田 博, 則元 京, 林 昭三, 木材学会誌, **28**, 743 (1982).