

# 琉球大学学術リポジトリ

## 破壊した木材の細胞の変形：第3報

破壊応力以下の圧縮応力で生じる Slip plane(林学科)

メタデータ	<p>言語:</p> <p>出版者: 琉球大学農学部</p> <p>公開日: 2008-02-14</p> <p>キーワード (Ja):</p> <p>キーワード (En):</p> <p>作成者: 林, 弘也, 大浦, 正嗣, Hayashi, Hiroya, Ooura, Masashi</p> <p>メールアドレス:</p> <p>所属:</p>
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/3896">http://hdl.handle.net/20.500.12000/3896</a>

## 破壊した木材の細胞の変形

### 第3報 破壊応力以下の圧縮応力で生じる Slip plane

林 弘也\*・大浦 正嗣\*

Hiroya HAYASHI and Masashi OOURA : Deformation of cell wall in failure wood III Slip plane occurrence associated with stress level

#### Summary

A slip plane was a first change of mechanical failure in wood with compression stress. The relationship between occurrence of a slip plane and stress would give fundamental informations on the failure process of wood. In this article, it was discussed the relationship between the type, the position, number of a slip plane and stress.

It was used a polarized microscope to detect slip planes of SUGI wood (*Cryptomeria japonica*) and the obtained results may be summarized as follows.

1. In the elastic range of wood, a compression stress produced slip planes more frequent in early wood than in late wood. In the plastic range, a compression stress produced slip planes more frequent in late wood than in early wood.

2. At early wood in tangential section and late wood in radial section, a slip plane was produced at the tracheid walls contact with a ray in elastic range. But in plastic range, a slip plane was produced at tracheid walls in contact with a ray and out of contact with a ray.

3. A slip plane of late wood tracheid was produced more frequent in tangential section than in radial section.

4. A slip plane of single wall type was produced at lower stress level than a slip plane of double wall type.

5. At same stress level, the location and the number of a slip plane varied with a section and a position in one growth ring.

#### 結 言

繊維軸方向に圧縮荷重を受けた木材は、圧縮荷重によって生じた木材の構造変化を直接観察できるという利点から木材の破壊研究の対象とされてきた。圧縮荷重で生じる基本的な細胞壁の構造変化は Slip plane であり<sup>1,2)</sup>、この Slip plane の発生と木材の変形との関連性を明らかにすることが木材の破壊過程の研究に基礎的な知見を与えると考えられる。木材の破壊過程は負荷した荷重に応じて進展していくと考えられるが、その過程は単一の過程ではなく各構成要素に依存する複数の過程が並行的に進行し破壊

---

\* 琉球大学農学部林学科

琉球大学農学部学術報告35：93～100（1988）

に至ると考えられる。そこで材が破壊し、弾性的な変形過程が終了した状態を一応の安定した状態であると考え、破壊したスギ材を対象に Slip plane を検討してきた。その結果<sup>3,4,5)</sup>では、Slip plane は早・晩材の発生数はほぼ同じであるが、Slip plane の形態による差異があることや Slip plane は Ray margin 付近の仮道管壁に高い密度で発生することが明らかになった。しかし、木材の破壊は弾性域から始まり、Slip plane も荷重の増加に伴ってその数が増加することが Dienwoodie<sup>6)</sup>によって確認されている。前報<sup>3)</sup>では破壊した材の Slip plane の発生位置、形態などを明らかにしたので、本報告では材の弾性域を含めた破壊までの荷重範囲すなわち最大荷重までの範囲で荷重と Slip plane の発生状態との関係、発生位置を検討した。

### 実験材料および実験方法

実験に供した材は福岡県粕屋郡の九州大学付属粕屋演習林産の43年生スギ (*Cryptomeria japonica*) 材である。髄からの生長輪数25以上の成熟材を丸太から採取し試験材とし、長さ方向を材の繊維軸方向にした棒材横断面が25×25mm、長さ100mmを切り出し、Fig. 1 に示した形状の試験片に加工した。試験片は材の切線方向に隣接する3本を1組にし、圧縮試験に供した。これらの試験片は約20±0.5°C、相対湿度65±4%の恒温室内で含水率11~13%に調湿した後に圧縮試験に供した。試験片の平均生長輪幅は1.8mm、気乾密度は0.35gr/cm<sup>3</sup>であった。

圧縮試験は島津製作所製万能試験機RCS-R-5000型を使用し、室温20°C、相対湿度65%で試験した。圧縮試験のひずみ速度は0.1mm/min. である。

試験片は圧縮試験の後、一辺が7~9mmの立方体に分割し、前報<sup>3)</sup>に述べた方法によりアルコール系列で脱水し、永久プレパラートを作成し、偏光顕微鏡で Slip plane を検出した。

1 生長輪内の材部は仮道管切線壁の放射方向の厚さに対する仮道管内腔の放射方向の長さの比が1.7以上の材部を早材部、1.1~1.7未満の材部を早材部から晩材部への移行材部、1.0以下の材部を晩材部とする3材部に区分した。切線断面の切片は上述した基準による区分が困難であるので、生長輪界近くにある材部を肉眼により識別し、早材部と晩材部の2材部に区分した。Slip plane は、各材部の放射組織に接する仮道管と接しない仮道管のそれぞれについて偏光顕微鏡の倍率400倍を使用し、100視野を観察した。

圧縮試験は試験片が破壊するまで行ない、負荷荷重は、試験片の最小の断面積に対し試験片のそれぞれの断面の断面積に反比例するものとして計算により求め、破壊荷重の0.30~1.00の荷重を負荷されたブロックを試験片から得た。Slip plane のデータは、破壊荷重に対して荷重範囲が0.77~0.91であるとき0.85と表示し、0.71~0.77のとき0.75、0.42~0.53のとき0.45、0.25~0.33のとき0.30と表示した。

### 実験結果および考察

Slip plane は、圧縮破壊したスギ材に生じた Slip plane の発生状態から材の断面、生長輪内の材の位置、放射組織の影響を受けることを明らかにしてきた。材が圧縮破壊するまでに発生する Slip plane も圧縮破壊した材と同種の因子の影響を受けるものと考えられるので、これらの因子を基準に検討した。

#### 1 荷重と Slip plane

Slip plane 数は材の断面や材部にかかわらず負荷した荷重と共にその数を増すが、破壊荷重の0.85~1.00の荷重範囲では Slip plane 数の増加率が急激に大となり、増加率の小さかった切線断面の早材部は破壊時の Slip plane の50%、増加率の大きかった放射断面の晩材部は70%の Slip plane がこの領域で生じていた。しかし切線断面の Slip plane 数は放射断面と比べ破壊荷重時を除いて2~4倍の発生数であり、

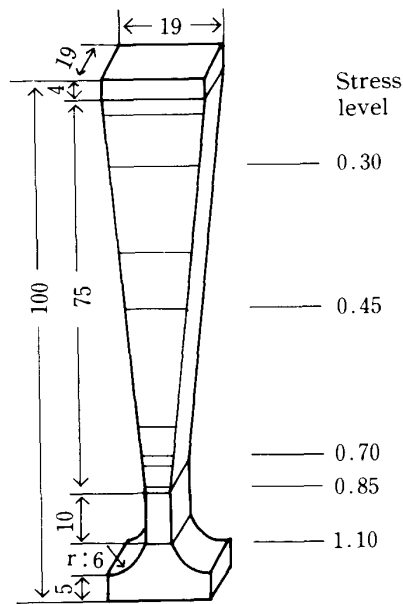


Fig. 1. Shape and dimensions of compression test specimen (Dimension in mm)

Slip plane を生じ、早材部に比較し発生数の割合が少ないばかりでなく、荷重30%と70%との Slip plane の割合は放射断面で2%, 切線断面で13%の差であり、差は早材部よりも少なかった。弾性域では、荷重の増加にともなって Slip plane の数が増加するが、Slip plane 数は破壊時の1/4以下と少なく、荷重の増加に伴う Slip plane 数の増加は塑性域よりも著しく少ない。この傾向は放射断面で一層顕著であった。晩材部は破壊荷重の0.85以上の荷重領域では早材部よりも発生数が多くなるが、破壊時には放射断面と切線断面の発生数はほぼ等しくなり、断面による差異が認められなくなる。Fig. 2 に放射断面および切線断面に認められた Slip plane を早材部、晩材部毎に示した。晩材部と早材部の仮道管壁に生じた Slip plane 数の比を Fig. 3 に示し、各材部の破壊時の Slip plane 数に対する各荷重レベルの Slip plane 数の比を Fig. 4 に示した。以上の結果からは、Slip plane は、破壊荷重に対して低い荷重時には早材部に集中的に発生するのに対し破壊荷重の約80%以上

放射断面より Slip plane が発生し易いものと考えられる。各荷重レベルに対する発生数は、両断面とも破壊荷重の0.70以下の荷重領域では晩材部よりも早材部に多数の Slip plane を生じているのに対し破壊荷重の0.85以上の荷重領域では早材部よりも晩材部に多数の Slip plane を生じている。早材部も晩材部もともに同じひずみ量を受けながら荷重領域によって Slip plane の発生数が異なる結果を得た。各材部毎に詳しく見ると、早材部の Slip plane 数は低い荷重レベルから相対的に多く発生しており、放射断面では破壊時の30%の荷重で破壊時の Slip plane の約20%の Slip plane を生じ、切線断面では、30%の荷重で約40%の Slip plane を生じている。荷重30%と荷重70%との Slip plane の割合の差は破壊時の Slip plane 数に対する割合で10~15%の差しかなく、荷重30%以下の低い荷重域で弾性領域で生じる Slip plane の大多数が発生している。晩材部は荷重30%では放射断面は約3%切線断面は約12%の

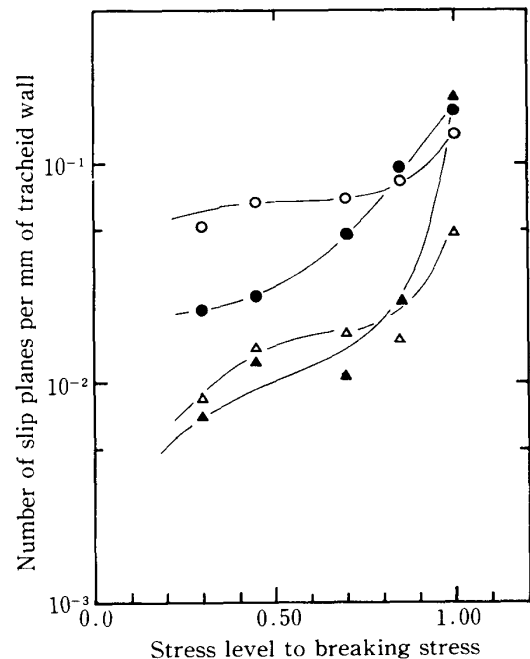


Fig. 2. Relationship of number of slip planes to compression stress of SUGI wood in tangential and radial section

Legend ; ○ : Early wood in tangential section  
● : Late wood in tangential section  
△ : Early wood in radial section  
▲ : Late wood in radial section

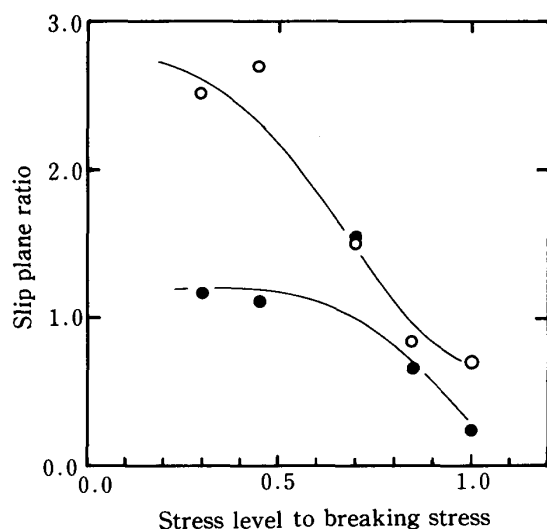


Fig. 3. Relationship of slip plane ratio to compression stress of SUGI wood

Legend : Slip plane ratio

$$= \frac{\text{number of slip planes at early wood tracheid}}{\text{number of slip planes at late wood tracheid}}$$

○ : Tangential section

● : Radial section

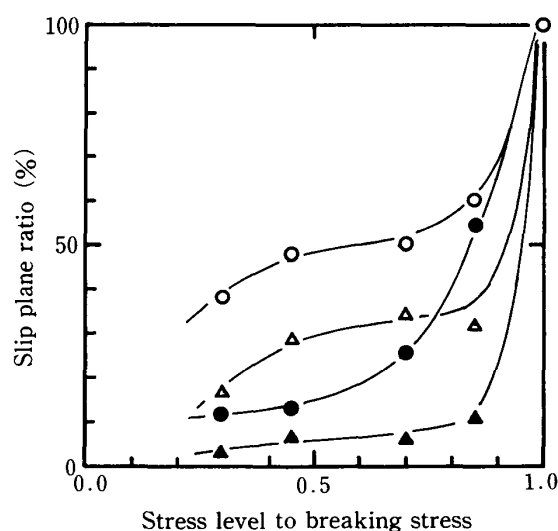


Fig. 4. Percentage of slip planes at various stress level to the slip planes at breaking stress in tangential and radial section

Legend :

○ : Early wood in tangential section

● : Late wood in tangential section

△ : Early wood in radial section

▲ : Late wood in radial section

の高い荷重時には晩材部に集中的に発生する様になり、早材部と晩材部の荷重に対するひずみ機構が異なることが推定される。早材部の Slip plane の発生は弾性域にある低い荷重レベルでも放射断面で破壊時の約20~30%の Slip plane を、切線断面では約40%の Slip plane を発生し、晩材部や移行材部など他の材部と明らかに異なった発生挙動を示した。切線断面は放射断面に比較して多くの Slip plane を生じ、弾性域では放射断面の2~5倍の Slip plane 数であり、荷重に対するひずみの発生状態も断面による差異が認められた。

## 2 放射組織と Slip plane

破壊した材では、放射組織に接する仮道管壁や放射組織の上下にある仮道管壁には Ray margin を中心にして Slip plane が集中的に発生すること、集中的に発生する Slip plane の位置が負荷荷重に影響されることが認められている。<sup>3,4,5)</sup> 放射組織に接する仮道管壁とその他の仮道管壁に生じた Slip plane 数を Fig. 5 に示した。Slip plane は全荷重領域について放射、切線の断面に拘らずともに放射組織に接しない仮道管壁よりも放射組織に接する仮道管壁に多数生じており、この傾向は荷重が破壊荷重の85%以下の荷重領域で顕著である。各負荷荷重で生じた Slip plane 数に対して放射組織に接する仮道管壁に生じた Slip plane 数の比を求め、Table 1 に示した。破壊荷重の30%ではほぼ100%の Slip plane が放射組織に接した仮道管壁に発生しており、特に放射断面の晩材部は破壊荷重の70%の荷重でも放射組織に接した仮道管壁に全 Slip plane が発生している。各断面の早・晩材部ごとにとみると、切線断面の早材部と放射断面の晩材部は放射組織に接した仮道管壁に Slip plane が発生する傾向が顕著であるが、切線

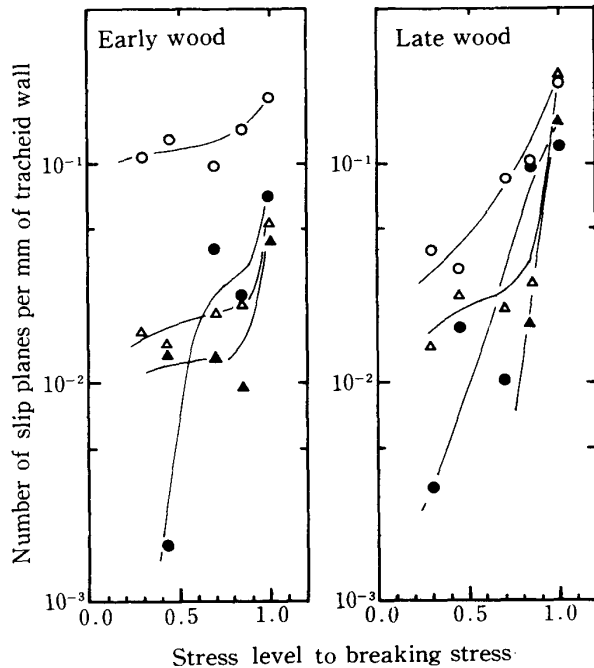


Fig. 5. Slip planes of tracheid wall in contact with a ray and out of contact with a ray in early and late wood

Legend :

- : Slip planes of tracheid wall in contact with a ray in tangential section
- : Slip planes of tracheid wall out of contact with a ray in tangential section
- △ : Slip planes of tracheid wall in contact with a ray in radial section
- ▲ : Slip planes of tracheid wall out of contact with a ray in radial section

断面の晩材部と放射断面の早材部では、荷重30%では90%以上の Slip plane が放射組織に接した仮道管壁に発生しているけれども、荷重40%以上では急激に減少し50~70%になり、前二者ほどは放射組織に接した仮道管壁に集中していない。しかし全ての荷重レベルで50%以上の Slip plane が放射組織に接した仮道管壁に発生しているので、材が破壊するまでは放射組織に接した仮道管壁により多くの Slip plane を生じると言えよう。

切線断面で観察される早材部の仮道管壁は壁孔を比較的多数有し、分野には多くの分野壁孔を有しており、細胞壁の実質量が比較的小さい壁部分である。一方晩材部の仮道管壁では壁孔は少数または全くない状態であり、分野壁孔も一分野当たり1~2個ないしは全くない細胞壁である。仮道管の壁厚も早材部が1~3  $\mu\text{m}$  晩材部が3~7  $\mu\text{m}$  と晩材部が厚く、細胞壁の破壊荷重でも差があるものと考えられる。材の切線断面を仮道管壁を板状のものに置き換えて考えると、放射組織に接する壁部分は仮道管の double cell wall が放射組織の部分で相反する方向に分離され、内部に放射柔細胞をもつ構造になり、再び相接して一枚の板を形成すると考えられる。この構造に於いて放射組織の切線方向の幅は早材部も晩材部もあまり差がないと仮定すると、放射組織の上下端部分の仮道管壁の切線方向の位置の移動量は同じであっても、細胞壁の曲がりによる細胞壁の曲率は早材部で大きく、晩材部で小さいと考えられる。すなわち

Table 1. Slip plane ratio of tracheid wall

Stress level	Radial section			Tangential section	
	Early wood	Transition wood	Late wood	Early wood	Late wood
0.30	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92
0.45	0.54	1.00	1.00	0.97	0.65
0.70	0.61	1.00	1.00	0.95	0.89
0.85	0.71	1.00	0.59	0.85	0.51
1.00	0.50	0.78	0.79	0.74	0.66

$$\text{Slip plane ratio} = \frac{\text{number of Slip planes of tracheid in contact with a ray}}{\text{number of Slip planes of whole tracheid wall}}$$

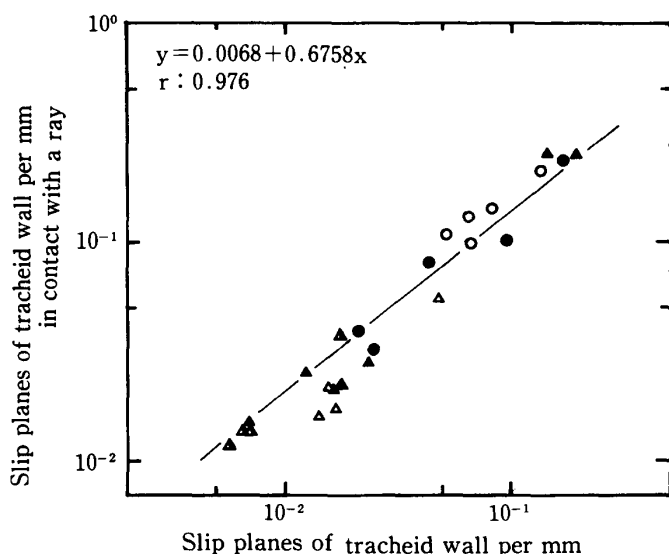


Fig. 6. Relationship between slip planes of tracheid wall in contact with a ray and slip planes of whole tracheid wall

Legend : Tangential section

○ : early wood

● : late wood

Radial section

△ : early wood

▲ : late wood

◐ : transition wood

放射組織の上下端に接する仮道管壁部分に圧縮の力が作用するとき、この部分には応力の集中を生じると考えられるが、応力の集中による影響は晩材部よりも早材部に著しいと推定される。従って早材部の放射組織に接する仮道管壁は晩材部よりも低い荷重で Slip plane をより多く生じ、高い荷重でも Slip plane の集中する結果になっているのであろう。一方晩材部は応力の集中が小さいために放射組織に接する仮道管壁への Slip plane の集中が少ないのであろう。

放射断面で観察される仮道管壁は、早材部、晩材部共に壁孔のない壁である。放射組織に接する壁は放射組織のためにその断面積を減少されることになるが、壁の断面積に対する減少割合が早材部、晩材部とも同じであったとしても晩材の断面積が大きいため断面に負荷される荷重の絶対値は早材部と晩材部では異なり、晩材部の方が大きな荷重を受ける。その為負荷荷重が晩材部の放射組織に接する仮道管壁で多くなり、晩材部の他の仮道管壁よりも多くの Slip plane が放射組織に接する仮道管壁に発生するのであろう。

う。早材部は放射組織に接する仮道管壁と接しない仮道管壁との断面積の差が少ないために両仮道管壁の Slip plane の発生数に差が少ないのであろう。

各荷重レベルの仮道管壁の Slip plane 数と放射組織に接した仮道管壁の Slip plane 数の関係を Fig. 6 に示した。切線断面、放射断面とも早材部、晩材部それぞれの相関係数は高く、Slip plane の発生数は放射組織に接した仮道管壁の Slip plane により支配されているものと考えられる。

### 3 Slip plane の型と発生状態

Slip plane を単壁型と両壁型に分類し、さらに放射組織に接する仮道管壁と接しない仮道管壁に分けて示したのが Fig. 7 である。切線断面では単壁型が両壁型よりも多く、かつ低い荷重域から生じている。放射断面では放射組織に接する仮道管壁では単壁型が多く生じているが、放射組織に接しない仮道管壁では両者の差は認められなかった。単壁型の Slip plane が Slip plane の約70%を占め、特に切線断面では単壁型が多い傾向にあった。負荷荷重との関係では、放射断面の早材部は特定の傾向はなく、放射断面の晩材部、切線断面の早材部、晩材部は低荷重で単壁型が多く、荷重が高くなるにしたがい両壁型が多くなるが、全ての荷重範囲で単壁型が両壁型よりも多く生じており、Slip plane は単壁型が両壁型よりも発生しやすいと考えられ、また両壁型と併存して発生していくのであろう。

### 4 縦圧縮による変形過程

縦圧縮による木材の変形は Slip plane の発生過程によると次のように考えられる。材が荷重を受け、

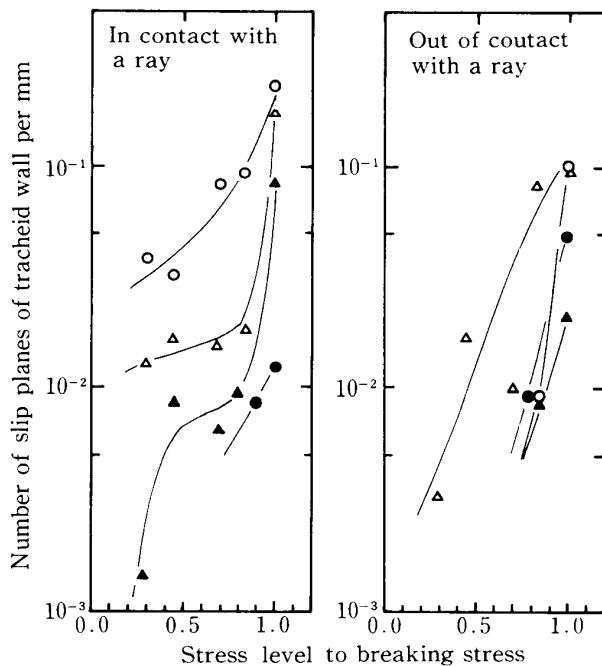


Fig. 7. Slip planes of tracheid wall of late wood in relation to stress level

Legend : Tangential section

○ : Single wall type

● : Double wall type

Radial section

△ : Single wall type

▲ : Double wall type

壁型は低い荷重領域で発生し始め、荷重が大になるに従い両壁型が並行して発生する。単壁型がいずれの荷重でも両壁型よりも多いことは単壁型がより発生しやすい Slip plane であろうと考えられる。

断面による Slip plane の発生数や発生位置、荷重と発生数との関係が異なっており、各断面の Slip plane は少なくとも弾性領域では相互に影響しあっていないのであろうと考えられる。

## 結 論

スギ材をサンプルに圧縮荷重を負荷した試験片に生じた Slip plane を偏光顕微鏡で検出し、負荷荷重と材の構造との関係を検討して次の結果を得た。

- 1, Slip plane は弾性領域では早材部の仮道管壁に多く発生するが、塑性領域では晩材部の仮道管壁に多く発生する。
- 2, 切線断面の早材部と放射断面の晩材部は弾性領域では放射組織に接する仮道管壁にのみ Slip plane を生じ、塑性領域ではその他の仮道管壁にも Slip plane が認められた。
- 3, Slip plane はいずれの荷重レベルでも放射断面よりも切線断面に多く発生した。
- 4, 単壁型の Slip plane は両壁型の Slip plane よりも低い荷重レベルで発生した。
- 5, Slip plane の発生の位置は断面や材部によって同一荷重レベルでも異なる。

変形する時は弾性領域の範囲であっても細胞壁には Slip plane という永久的な変形を生じる。この変形は最初に放射組織に接する仮道管壁に発生する。荷重が増加するに従いその数を増すと共に放射組織に接しない仮道管壁にも Slip plane を生じるが、破壊時でも放射組織に接する仮道管壁の Slip plane 数は放射組織に接しない仮道管壁よりも多く生じている。

破壊荷重の30%以下の荷重で破壊時の30~50%の Slip plane が生じ、破壊荷重の80%以上の塑性領域では50~70%の Slip plane が生じるが、弾性領域は早材部の Slip plane が晩材部の Slip plane よりも多いが、塑性領域は晩材部の Slip plane が早材部の Slip plane よりも多くなる。

Slip plane は断面によってその発生の様相を異にしており、切線断面は放射断面よりも多くの Slip plane を生じる。弾性領域では早材部に、塑性領域では晩材部に多く生じ、破壊に至る。特に弾性領域では、切線断面の早材部と放射断面の晩材部は放射組織に接する仮道管壁に Slip plane が集中的に発生するが、切線断面の晩材部と放射断面の早材部の2材部は Slip plane の集中の度合いが小さく、Slip plane 数の60~70%である。しかし放射組織に接する仮道管壁に Slip plane が多いことはいずれの材部でも変わらない。Slip plane の型は2型に区分され、単



## 引用文献

1. Wardrop, A. B., Dadswell, H. E. 1947 Contributions to the study of the cell wall, 5, The occurrence, structure and properties of certain cell wall deformation, Aust. C. S. I. R. O. Bull., 221: 14~22
2. Keith, C. T., Cote, Jr. W. A. 1968 Microscopic characterization of slip planes and compression failures in wood cell walls, Forest Pro. J. 18: 67~74
3. 林 弘也, 遠山隆幸, 仲田真 1986 破壊した木材の細胞の変形, 琉大農学報, 33: 221~227
4. 林 弘也, 遠山隆幸, 仲田真 1987 圧縮試験による細胞壁の変形, 日林九支研論 40: 251~252
5. 林 弘也, 実吉安彦 1987 破壊した木材の細胞の変形 第2報 切線断面の Slip plane, 琉大農学報, 34: 75~81
6. Dienwoodie, J. M. 1968 Failure in timber, Part I, Microscopic changes in cell-wall structure associated with compression failure, J. Inst. Wood Sci., 4: 37~53