



# 琉球大学学術リポジトリ

University of the Ryukyus Repository

Title	破壊した木材の細胞の変形(林学科)
Author(s)	林, 弘也; 遠山, 隆幸; 仲田, 真
Citation	琉球大学農学部学術報告 = The Science Bulletin of the Faculty of Agriculture. University of the Ryukyus(33): 221-227
Issue Date	1986-12-05
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/3927">http://hdl.handle.net/20.500.12000/3927</a>
Rights	

## 破壊した木材の細胞の変形

林 弘也 \*・遠山隆幸 \*・仲田 真 \*

Hiroya HAYASHI, Takayuki TOHYAMA and Sin NAKATA: Deformation of cell wall in failure wood

### Summary

The influence of early and late wood and ray on slip planes in tangential tracheid walls of SUGI-wood (*Cryptomeria japonica*), which was subjected to longitudinal compression, was studied with the polarizing microscope.

The number of slip planes was much the same number in one growth ring of failed wood. But the slip planes of tracheid walls in contact with a ray were more numerous than the slip planes in other tracheid walls at low levels of load to the failure load.

According to the slip plane classification, the slip planes of single wall type were developed mainly in late wood and the slip planes of double wall type were developed mainly in early wood.

The ray significantly influenced the occurrence of slip planes. Slip planes were preferentially developed at the tracheid walls near the ray margin, which were not in contact with a ray. The distance from ray margin, where slip planes developed preferentially, was longer in early wood than in late wood.

At low levels of load, slip planes developed preferentially at the tracheid walls in contact with the most upper or the most lower parenchyma cells of a ray.

Survey with the electron microscope demonstrated that slip planes of S I and D I were the stage shifting from the dislocation in a cell wall to the deformation of cell wall surface.

### 結 言

繊維軸方向に圧縮荷重を受けた木材の挙動は強度的な意味から重要視されるばかりでなく、荷重によって生じた木材の構造変化を各応力レベルごとに観察できるという点でも多くの研究者に注目され、研究対象とされてきた。木材が圧縮荷重を受けて変形するときに、木材組織のどの部分に変形が生じ、その変形がどのように拡大して全体的な破壊に至るかという破壊過程の研究は細胞壁を対象とするミクロな変形過程から試験片を対象とするマクロな変形過程まで広い範囲に及んでいるが、木材の種々の細胞や組織が変形過程に係りがあり、解析を難しくしているばかりでなく、ミクロおよびマクロな変形過程それぞれの研究方法が異なっているために両変形過程を相互に結びつけるに至っていない。圧縮荷重によって生じる細胞壁の微少な構造変化は“Slip plane”として偏光顕微鏡の直交ニコルの下で観察された。

\* 琉球大学農学部林学科

琉球大学農学部学術報告 33: 221~227 (1986)

この Slip plane はセルロース結晶に構造変化を生じたために発生し、その数は圧縮荷重の増加に伴って増加することが認められている。1細胞壁に数本の Slip plane をもつ細胞が水平方向に数個連続して配列する状態になると Crease を形成し、細胞内腔表面に凹凸を生じた状態になり、生物顕微鏡や金属顕微鏡で観察できるしわ状の変形に発達すると考えられている。

Slip plane に関する知見は木材の薄切片から得られたものであり、放射断面に見られる細胞壁内の平面的な構造変化に限られ、細胞内腔表面に現われる変形は考慮されていない。一方細胞内腔表面に現われる変形を対象にするマクロな変形の研究は細胞壁内の構造変化を考慮しておらず、上述した2つの方法による研究結果には接点がないという現状にある。しかし Slip plane が細胞壁内に構造変化が起きたことの結果であるので、多数の Slip plane が集中的に生じた場合には細胞内腔表面に現われる変化と関連を持ってくることは明らかであろう。Slip plane の発生および発達の過程と細胞内腔表面の変形との関連性を明らかにすることはマクロな変形の発生や破壊過程の研究に基礎的な知見を与えるであろう。本研究では、偏光顕微鏡で検出される細胞壁内の構造変化と早・晩材や放射組織との関連性を検討することを目的に行った。

### 実験材料および方法

実験に供した材は沖縄県国頭村与那産の53年生スギ (*Cryptomeria japonica*) 材である。髄からの生長輪数30以上の成熟材の材部を丸太から採取し試験材とした。試験材から横断面が25mm×25mm、繊維軸方向の長さ約600mmの棒状材を切り出し、各々の棒材から長さが120mmの試験片用ブロックを連続して3個採取し、それぞれを試験片に加工した。試験片の形状は Fig. 1 に示した。試験片は気乾状態のブロックから加工したのちに約20°Cの恒温室で含水率13-15%に調湿し、強度試験に供した。

圧縮試験は島津製作所製万能試験機 R C S - R - 5000型を使用し、室温20°C、相対湿度65%で行った。

圧縮試験の後に試験片の断面が最も狭い部分を4個のブロックに分割し、各ブロックからエルマ光学製スライディングマイクロームを用いて、検鏡用の放射断面切片を連続的に採取した。切片用ブロックは、飽水状態にした後に切片化した。マイクローム刀は切片用ブロックの繊維軸方向とマイクローム刀のエッジが平行になるように設置した。切片用ブロックから厚さ15-18 $\mu$ mの放射断面切片を2切片毎に1切片を採取し、合計20切片の永久プレパラートを常法により作製した。

仮道管壁の Slip plane は日本光学製の偏光顕微鏡により、直交ニコルの下で全プレパラートについて

観察した。細胞内腔表面に現われる変形は電子顕微鏡で観察した。電子顕微鏡用の試料は、偏光顕微鏡で Slip plane を観察した簡易封入プレパラートから切片を取り出し、アルコール系列で脱水乾燥して調製した。乾燥切片は直径10mmの黄銅製試料台にドータイトで固定し、イオンコータ (日本電子製) を用いて金を蒸着した。観察には日本電子製反射型電子顕微鏡 J S M - 25 S 型を用いた。

1生長輪内の材部を早材部、早材から晩材への移行材部、晩材部の3材部に区分した。材の区分は仮道管接線壁の厚さに対する放射方向の仮道管内腔の径の比に基き、この比が1.7以上を早材部、1.1-1.7を移行材部、1.1未満を晩材部とした。

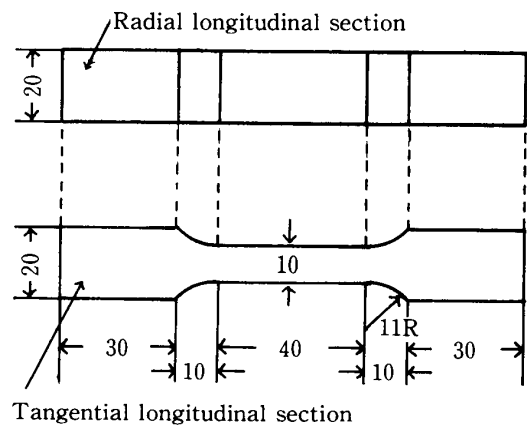


Fig. 1 Shape and dimension of compression test specimen. (Dimensions in mm)

実験結果および考察

圧縮荷重を受けた木材細胞壁の構造変化は Wardrop, Dadswell<sup>4)</sup>らが定義した Slip plane, Minute compression failure と Dinwoodie<sup>1)</sup>が定義した Slip plane, C<sub>1</sub> crease, C<sub>2</sub> crease, C<sub>3</sub> crease がある。Wardrop らは互いに接する仮道管壁に見られる Slip plane に基づいて定義し、隣接する他の仮道管壁の状態は考慮していない。そのために 2 型に区分されているが、細胞壁は多くの仮道管壁が互いに接した状態にあることを考えるとあまりにも限定されすぎている様に思われる。Dinwoodie<sup>1)</sup>は Kissler<sup>2)</sup>らの定義をさらに発展させて Slip plane を区分し、Slip plane の発生数は荷重レベルに対応して変化し、荷重レベルが高くなると C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> の各 Crease も発生数を次第に増加することを示して、Slip plane が構造変化を示す基本的な単位であるとしている。Slip plane が圧縮荷重の増加と共に発生数を連続的に増加していくものであるとするならば、Slip plane の発生過程を明確に区分することは難しいが、Dinwoodie の定義した区分は隣接する仮道管壁をその基準に取り入れており、Slip plane の発生状態と良く対応しているものと考えられる。本報告は Slip plane を仮道管壁の構造変化を示す基本単位と考え、圧縮破壊した木材の仮道管壁に発生した構造変化を対象に研究をすすめた。

1. Slip plane と仮道管の関係

針葉樹材の仮道管は、同一生長輪内であっても早材部仮道管と晩材部仮道管とでは、放射方向の径、細胞壁厚さなどの形状が異なっており、物理的に同じ性能をもっている仮道管として取り扱い難い面がある。また圧縮荷重によるマクロな変形も異なっている。マクロな変形に差異があることはミクロな仮道管壁単位の変形にも差異を生じていると考えられるので、最初にミクロな変形である Slip plane の発生状態と 1 生長輪内での仮道管の位置との関係を検討した。

Slip plane の定義は研究者によって異なり、必ずしも一致していないが、Slip plane が偏光顕微鏡下

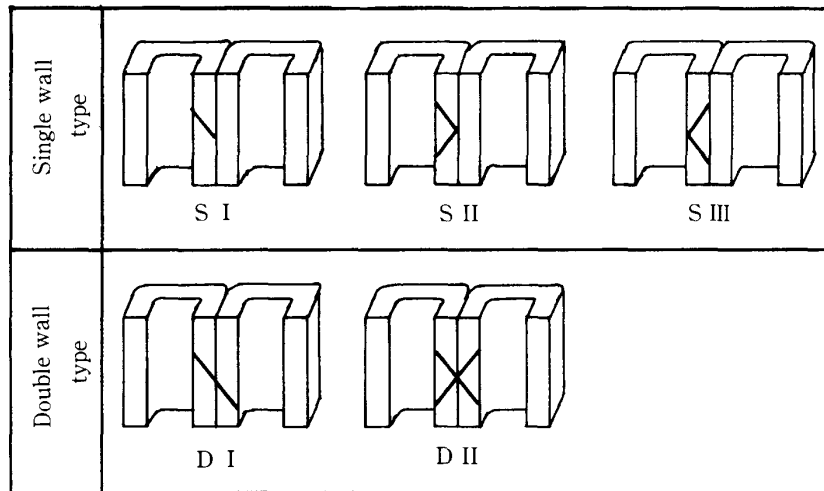


Fig. 2 Schematic diagram of slip planes.

で認められる仮道管壁の構造変化であることは一般に認められている。Slip plane は互いに接する仮道管の 2 細胞壁に連続して存在する構造変化を対象にしながら、仮道管壁中に存在する状態の区分基準は異なっており、種々の名称が使われている。Wardrop, Dadswell らは 1 本の構造変化を Slip plane, 2 本の構造変化が交差した状態を Microscopic compression failure とした。Dinwoodie は互いに接する仮道管壁 1 列または 2 列に連続して生じた構造変化

を Slip plane とし、1 本または 2 本の構造変化が仮道管壁 3 列以上に連続して生じる場合を C<sub>1</sub> crease (Fine microscopic crease) としている。更に多くの構造変化が 1 列の仮道管壁に集中し、しかも 3 列以上の仮道管壁に連続して生じている場合を C<sub>2</sub> crease, C<sub>3</sub> crease などとした。本報告では、細胞壁の構造変化と仮道管との関係を得るために互いに接する仮道管壁を 1 単位にし、Fig. 2 に示した模式図のように Slip plane を区分した。この区分には、仮道管壁の構造変化を全体的に把握するために、互いに接する仮道管壁の一方の壁に生じた構造変化が加えられている。この型の構造変化を単壁型、互いに接す

る2仮道管壁に生じた構造変化を両壁型とした。単壁型の Slip plane は接している2つの仮道管壁が壁毎に別々の挙動をしたと考えられるが、両壁型の Slip plane と同時に同じ仮道管壁に生じており、明らかに圧縮荷重による仮道管壁の構造変化によるものであり、Slip plane として取り扱われるべきである。Wardropらが Microscopic compression failure としての構造変化は同じ場所に生じた Slip plane であるが、大きな圧縮荷重を受けたときに細胞内腔側に位置がずれたに過ぎないと考え、1つの単位をなす構造変化として Slip plane の1つに取り扱った。

破壊した試験片に生じた各材部毎の Slip plane 発生数を Fig. 3 に示した。Slip plane 数は放射組織に接する仮道管壁でも接しない仮道管壁でもほぼ同数であり、放射組織の影響は顕著でなかった。しかし、放射組織に接していない晩材部仮道管壁の Slip plane 数は他の仮道管壁に比較しかなり多く、他の仮道管とは異なった挙動を示唆している。Dinwoodie の定義した Slip plane に限定すると、晩材部の Slip plane は放射組織に接する仮道管壁に多く生じ、Dinwoodie の得た結果と一致した。従って Slip plane の数が異なった結果を示したのは主に単壁型の Slip plane に起因している。

Slip plane を単壁型および両壁型に区分すると、Slip plane の発生数は早材部と晩材部とは異なっていた。放射組織に接しない仮道管壁では、単壁型の Slip plane は晩材部に多く生じ、両壁型の Slip plane は早材部に生じていた。早材部の仮道管は細胞壁の厚さが薄く、例えば圧縮荷重に対する性質が互いに接する2つの仮道管壁の間で差異があったとしても、壁が薄いためにその差は小さく、2つの仮道管壁は対をなし同じ挙動を示すと考えられる。一方壁が厚い晩材部の仮道管では、性質の差が顕著に現われ、

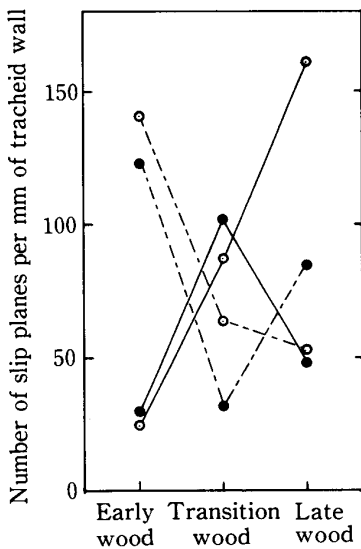


Fig. 3 Relationship of number of slip planes to tracheid formed in a growth ring.

- Slip planes of single wall type.
- - - Slip planes of double wall type.
- Tracheid contact with a ray.
- Tracheid devoid of a ray contact.

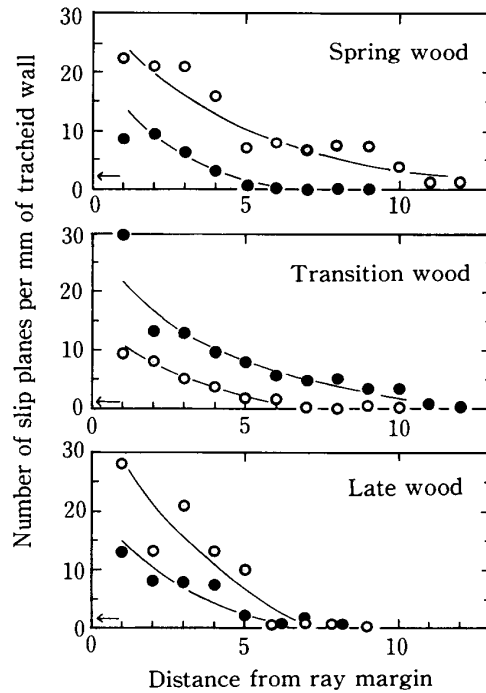


Fig. 4 Relationship of number of slip planes to distance from ray margin.

- A distance from ray margin is expressed the number of length divided by the average width of the ray parenchma cell in fiber axis direction
- Slip planes of single wall type.
  - Slip planes of double wall type.
  - ← The average number of slip planes of tracheid devoid of ray contact.

2つの仮道管壁が圧縮荷重に対しそれぞれ異なった挙動を示し、単壁型 Slip plane が増加するものと考えられる。放射組織に接する仮道管壁では、放射組織に接しない仮道管壁と異なり、早材部仮道管壁および晩材部仮道管壁とともに両壁型 Slip plane が単壁型 Slip plane よりも多く生じ、移行材部仮道管壁には単壁型 Slip plane が両壁型 Slip plane よりも多く生じる傾向を示した。このことは晩材部の仮道管壁は放射組織の柔細胞の影響を受け、Slip plane の数や Slip plane の型が変化しており、放射組織の作用は早材部の仮道管壁には効果を持たないが、晩材部の仮道管壁に対して効果をもつのであろうと考えられる。

## 2. Slip plane の発生と放射組織の関係

放射組織は圧縮荷重を受けた木材が最初に変形する位置として多くの研究者に注目され、特に ray margin が最初に変形する部分であるとされてきた。しかし Kučera と Bariska<sup>3)</sup> はマクロな圧縮破壊では放射組織の影響が認められないとし、ミクロな細胞壁内の構造変化とマクロな細胞壁の変位との関連性を否定した。放射組織がミクロな細胞壁内の構造変化に影響することは明らかであるが、その影響範囲を明らかにするために ray margin からの距離と Slip plane の発生数との関係を Fig. 4 に示した。Slip plane は放射組織の端に最も近い仮道管壁の部分に最も多く発生し、距離と共に指数関数的に減少する。Slip plane 数が放射組織に接しない仮道管壁とほぼ同数になるのは、仮道管が接する放射組織について材の繊維軸方向の放射柔細胞幅の平均値を求め、その平均細胞幅を単位にすると、早材部では放射組織の端から約12細胞幅であり、移行材部では約10-12細胞幅、晩材部では約6細胞幅である。このことは単壁型、両壁型の両 Slip plane にともに認められた。放射柔細胞の壁厚さが早材部、晩材部とも同じで

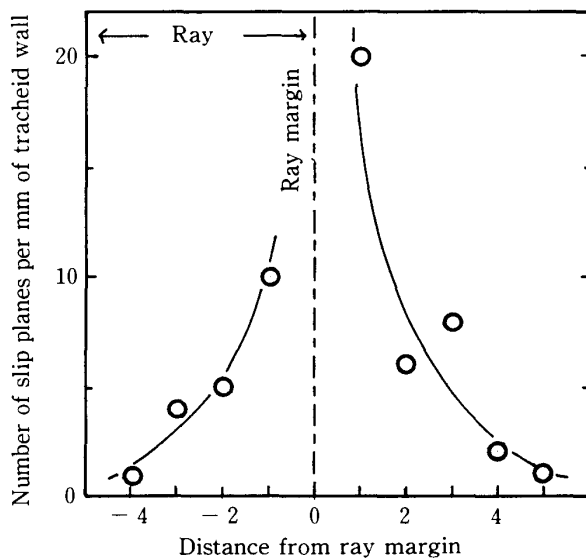


Fig. 5 Relationship of number of slip planes to distance from ray margin. (Late wood sample No. 14)

A distance from ray margin is expressed the number of length divided by the average width of the ray parenchyma cell in fiber axis direction.

The minus sign of the distance indicate the tracheid walls in contact with a ray.

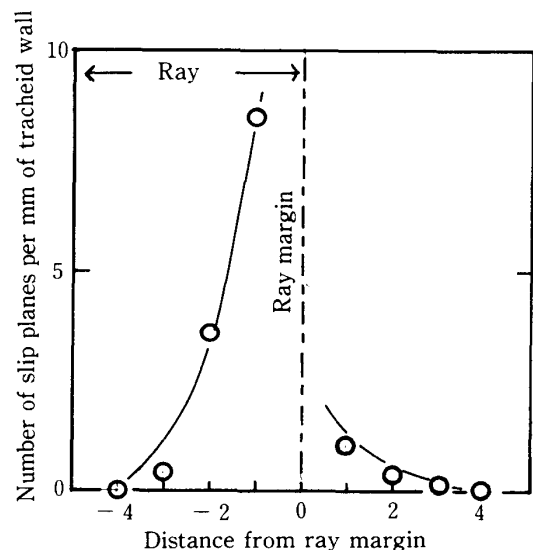


Fig. 6 Relationship of number of slip planes to distance from ray margin in about 63% level of load to failure load.

あるとするならば、仮道管壁に対する放射組織の影響はむしろ仮道管壁の厚さに支配されると考えられる。

破壊した材の Slip plane の発生数とその位置との関係の 1 例を Fig. 5 に示した。放射組織に接する仮道管壁に生じる Slip plane の数は放射組織の上下 1 - 3 平均柔細胞幅の範囲にある仮道管壁の Slip plane の数より少なく、放射組織の仮道管壁への影響は放射組織の上下にある仮道管壁により大きいことを示している。

圧縮荷荷が小さい場合の Slip plane 発生数を Fig. 6 に示した。図示した例の圧縮荷重は破壊荷重の約 63% である。破壊した材の Slip plane 発生状態と異なり、Slip plane は放射組織の上下端にある放射柔細胞に接する仮道管壁に最も多く生じている。圧縮荷重が小さい時には、放射組織に接する仮道管壁に Slip plane を生じてエネルギーを吸収し、圧縮荷重が大きくなると放射組織の上下にある仮道管壁に発生してエネルギーを吸収するものと考えられる。これは大きな圧縮荷重を受けたときに、放射組織は放射組織に接する仮道管壁を補強する効果があることを示している。

### 3. Slip plane と細胞内腔表面の変位との関係

偏光顕微鏡で観察した細胞壁の構造変化と反射型電子顕微鏡で観察した細胞内腔表面の変位を直接に関連づけることは顕微鏡の原理が異なるために難しさがある。次の方法で両者の関連性を検討した。

各切片にある Slip plane を偏光顕微鏡で検出し、Slip plane の位置を切片内の種々の距離と材の組織との相互関係から決定した。同じ切片について、位置を確定した Slip plane がある部分の仮道管壁断面および仮道管内腔表面を反射型電子顕微鏡で観察した。偏光顕微鏡と電子顕微鏡の結果が対応できた Slip plane は単壁型の S I 型は 3 例、S II, S III 型は各 40 例、両壁型の D I 型は 50 例、D II 型は 40 例であった。仮道管壁の断面には Slip plane に一致する部分に線状の変位が観察され、Fig. 7 (1) に D I 型の Slip plane の例を示した。S I 型、D I 型の Slip plane とともに細胞内腔表面に変形が生じていると認められたが、D I 型、D II 型の Slip plane は比較的容易に認められたのに対し、S I 型の Slip plane は内腔表面

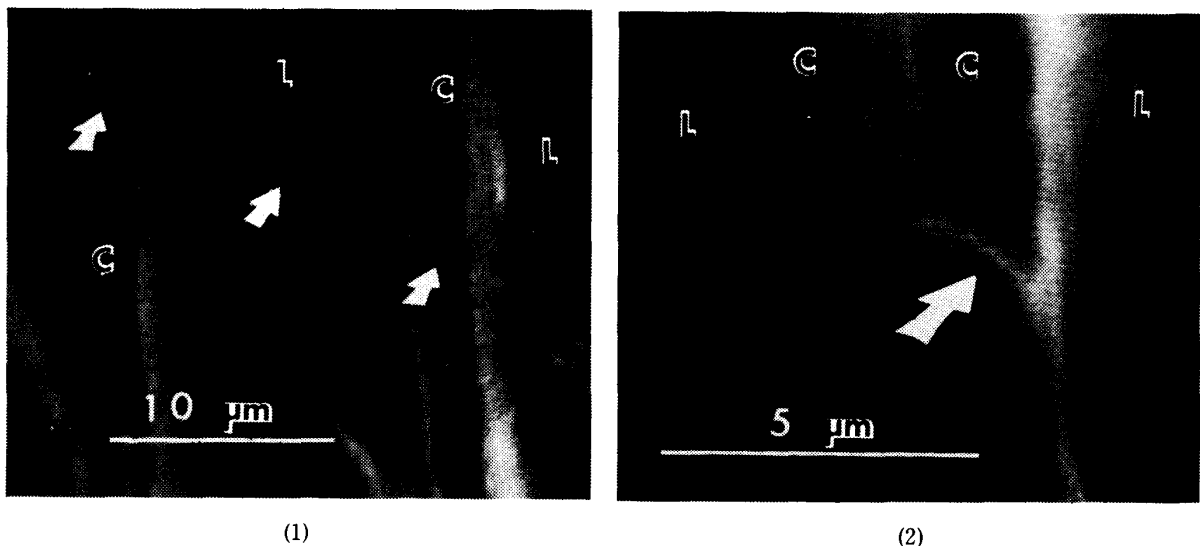


Fig. 7 Slip planes of tracheid walls in radial longitudinal section.

- (1) A slip plane of double wall type in early wood tracheid. This micrograph provided the slip planes in the section of tracheid cell walls and in the surface of cell wall viewed from the lumen.
  - (2) A slip plane of single wall type in radial longitudinal surface of late wood tracheid.
- Details : C ; cell wall of tracheid. L ; lumen of tracheid. Arrows ; slip plane

に変位が認められないことが多い。Fig. 7の(2)は内腔表面に変位が認められない例であり、変位が認められたのは本実験では1例にすぎなかった。このことはS I型のSlip planeはD I型の構造変化よりも小さな構造変化であることを示している。S II型、S III型やD II型のSlip planeにも内腔表面に変形を示さないSlip planeが認められ、Slip planeは壁内の構造変化から内腔表面の変形に移行する過程にあるのであろう。

## 結 論

繊維軸方向に圧縮荷重を受けた木材の仮道管壁のSlip planeを観察し、次の結果を得た。

1. Slip planeは単壁型と両壁型があり、単壁型は3型式、両壁型は2型式ある。
2. 早材部仮道管壁には主に両壁型Slip planeが生じ、晩材部仮道管壁には主に単壁型Slip planeが生じる。
3. 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のSlip plane数とほぼ同数であるが、晩材部では放射組織に接しない仮道管壁のSlip plane数が多い傾向にあった。
4. 放射組織の上下にある仮道管壁は多数のSlip planeを生じるが、Slip planeの数は放射組織からの距離とともに指数関数的に減少し、一般の仮道管壁と同じになる。
5. 圧縮荷重が小さい場合は、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のSlip plane数よりも多く、放射組織の上下端にある放射柔細胞に接する仮道管壁に最も多くのSlip planeを生じる。
6. Slip planeは細胞壁内の構造変化であるが、仮道管内腔表面に変形を生じる場合もあることが認められた。

## 引 用 文 献

1. Dinwoodie, J.M. 1968 Failure in timber. Part 1. Microscopic changes in cell wall structure associated with compression failure, J. of inst. of wood sci., 4 (3): 37~53
2. Keisser, J. and Steininger, A. 1952 Makroskopische und mikroskopische Strukturänderungen bei Biegebeanspruchung von Holz, Holz als Roh- und Werkstoff, 10 (11): 415~421
3. Kučera, L.J. and Bariska, M. 1982 On the fracture morphology in wood. Part 1: A SEM-study of deformations in wood of spruce and aspen upon ultimate axial compression load, Wood sci. and tech., 16: 241~259
4. Wardrop, A. B. and 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

## 和 文 摘 要

繊維方向に圧縮荷重を受けたスギ (*Cryptomeria japonica*) 材について、早晚材や放射組織と仮道管接線壁のSlip planeとの関係を検討した。Slip planeは、破壊材では全材部にほぼ同数生じ、単壁型は晩材に、両壁型は早材に主として生じた。Slip planeは放射組織の影響を受け、破壊材では放射組織の上下端に接した壁に最も多く生じ、その範囲は晩材より早材が広い。未破壊材では放射組織に隣接する壁に多く生じ、ray marginの柔細胞に隣接する壁に最も多い。電子顕微鏡の結果とつき合せると、Slip planeは壁内の構造変化から内腔表面の変位に移行する過程にある。