

軸方向圧縮による仮道管壁のスリッププレーン*1

林 弘也*2 · 新垣太一*2

林弘也・新垣太一：軸方向圧縮による仮道管壁のスリッププレーン 九州森林研究 58：101-104, 2005 圧縮応力は仮道管壁にスリッププレーン (SP) という形でひずみ発生位置を記録し、偏光顕微鏡で検出可能である。高倍率の偏光顕微鏡による細胞壁厚さ方向の光学的な SP 構造と走査電子顕微鏡による形態的な微細構造を対照した。SP は細胞内腔表面を凸状または凹状にずれ変位を起こさせる。ずれを起こした壁部位に偏光を生じ、検出される。細胞内腔の表面にも偏光部位が検出され、接線壁または放射壁に細胞軸にほぼ直角な変位が検出された。走査電子顕微鏡では細胞壁厚さ方向には線状の壁変位が確認され、SP に相当するものと考えた。細胞内腔の表面は S₃層に相当する部位に眼窩状のわれが認められ、細胞内腔の壁破壊点であり光学的な SP 相当部位であると推定された。

Slip plane in a tracheid cell wall recorded the deformation of wall under axial compression stress. It was detected with polarized microscope. In this report, it was discussed the relation between SP at surface of cell wall thickness direction by polarized microscope and fine structure of cell wall surface by electron scanning microscope. Cell wall was displaced into the lumen and the adjacent cell lumen. SP was formed at the slipping parts in wall and polarized the light. Polarized parts in lumen side surface of tangential and radial cell wall was detected a line perpendicular to cell axis. By scanning electron microscope, SP was detected a line deformation in direction of cell wall thickness. At the cell wall surface of lumen side, eye hole cracks were detected at S₃ layer. This crack was one of the destroyed cell wall and corresponded to the optical SP.

I はじめに

軸方向に外力を受けた木材はその物理的性質をヤング率やひずみ量 (圧縮変形量) などの物理指標で表わされるが、これらの値は試験した木材片全体の平均値であり、具体的なひずみ発生位置、ひずみの発達過程を表す指標ではない。木材の破壊過程を明らかにするにはひずみ発生位置を具体的に把握する必要がある。軸方向圧縮変形は細胞壁の変位した部分に光学的な偏光を起こし、スリッププレーン (以下 SP とする) として細胞壁に記録される。弾性域から破壊応力に至るまでその発生過程を可視化できる。SP は細胞壁を構成するセルロース結晶による結晶学的な偏光ではないと考えられており (1)、細胞壁の形態的な変形を伴うマクロな変形であると考えられている (4)。

著者らは SP の形態および発生数から以下のようなことを明らかにした。SP は早材細胞、晩材細胞とも同様に発生するが、早材細胞はかなり低い応力域 (大略破壊応力の40%) でも細胞壁がバックリング (座屈) を起こし、細胞壁に曲げ応力を発生する。バックリング壁部は SP が多数発生し、個々の SP を明確に検出することは難しい。一方晩材細胞は破壊応力域 (最大応力域) 以下でバックリングは認められないので、早材から晩材への移行部細胞や晩材細胞が主たる研究対象にされている (3)。

SP は細胞軸縦断面において偏光顕微鏡下で確認される仮道管

壁厚さ方向の直線状の偏光部として確認される。相接する仮道管壁に連続して認められるタイプと単一の仮道管壁に認められるタイプに区分され、複壁型と単壁型の2タイプに大きく分類され、それぞれの SP がさらに細かく分類され、合計5種に区分されている (5)。

仮道管の放射壁は放射柔細胞に接し分野壁孔や、有縁壁孔を有するが、接線壁は成長輪界付近の少数の仮道管を除き、壁孔をもたない。このような細胞壁の形態構造が異なっており、SP の発生位置にも影響している。放射壁は SP が低応力でもレイマージン (放射組織の上端または下端) の壁部分に集中的に発生し、マージンからの距離により指数関数的に減少するが、SP は放射組織に接する壁部分では認められていない (4)。これに対し接線壁では部分的な集中的な SP 発生はなく、壁全体に平均的に発生する。このことは、細胞壁が放射壁と接線壁では異なったひずみ挙動をしていることを示唆している。

また晩材仮道管 (早材から晩材への移行部仮道管を含む) の接線壁と放射壁では SP 発生部位が異なるばかりでなく、応力に対しても SP 発生数挙動が異なっている (7)。SP 数は破壊応力では早晩材仮道管とも大きな差はないが、仮道管放射壁は破壊応力比約40%の応力で破壊応力時 SP 総数の約50%を発生し、応力比70%まではほぼ一定数である。70%以上では急激にその発生数を増加し破壊に至る。仮道管接線壁は放射壁と同様に応力比70%ま

*1 Hayashi, H., Arakaki, T. : Slip planes of tracheid under axial compression stress

*2 琉球大学農学部 Univ. of the Ryukyu Nishihara, Okinawa 903-0213

ではほぼ一定値であるが、数自体は破壊応力時の総数に対し10%程度であり、仮道管放射壁に比較し1/5であるが、応力比70%以上では急激に増大し、破壊応力では両壁のSPはほぼ同数になる。

SPは細胞壁のごく小さな破壊面(線)であるが、多数のSPが発生することにより、複数のSPが相互に関連または複合し、細胞壁内腔側表面の皺状の変位や細胞間層の剥離等の可視可能な細胞壁の形態的ひずみまたは破壊点に達すると考えられる。本研究はSPを主要な判断手段として、針葉樹を構成する主要な細胞の仮道管と他の細胞のひずみ発生過程を追跡し、その結果としての木材破壊過程を明らかにすることを目的とする。針葉樹晩材仮道管(早ら晩材への移行部を含む)の接線壁に発生するSPを対象に細胞壁破壊の解析をすすめた。

II 実験試料および実験方法

供試試験材は九州大学農学部附属柏屋演習林(福岡県柏屋郡篠栗町)産の43年生スギ(*Cryptomeria japonica*)材である。試験材は髄からの成長輪数25以上の成熟材部を使用した。試験片は繊維軸に直角な放射方向、接線方向の長さ10mmの断面を持ち、繊維軸方向の長さ50mmの直方体である。平均成長輪幅は1.8mm、気乾密度は $0.35\text{g}/\text{cm}^3$ であった。試験片は材の接線方向に隣接する3本を1対とし、繊維軸方向に相接した3対を採取した。試験片は温度 20 ± 0.5 、相対湿度 $65\pm 4\%$ の恒温室で調湿し、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%の雰囲気下で縦圧縮試験に供した。ひずみ速度は $0.1\text{mm}/\text{min}$ である。破壊応力は1対3本、成長輪幅、気乾密度は1対3本の平均値とした。1対3本からSPを検出したが、SPを検出する試験片には破壊応力の80%の荷重をかけた。

圧縮試験後に断面の一辺が7-9mm、長さ10mmのブロックを切り出し、水-グリセリン(3:1)混合液で加熱、軟化した。軟化ブロックはパラフィン包埋後にスライディングミクロトームで厚さ $18-22\mu\text{m}$ の放射断面切片を採取した。定法によりアルコール系列の脱水後、永久プレパラートを作成し、日本光学製偏光顕微鏡(ECLIPSE E400 POL型)でSPを検鏡、検出した。検鏡倍率は1000倍を使用した。

細胞壁の微細構造は日本電子製の走査型電子顕微鏡JV-6500型で検鏡した。検鏡試料は上記した薄切片をキシレンで脱パラフィン処理をした。細胞内容物の残滓など付着する諸種の物質を細胞壁表面から除去するために、切片のアルコール洗浄し、さらに細胞壁セルロース骨格物質の間隙にあるマトリックス物質を除去するために脱リグニン処理をした。脱リグニン処理後に、アルコール系列で脱水した。

これらの処理は骨格物質のひずみ変形の状態を明確に確認するためである。偏光顕微鏡で観察された細胞壁内腔側表面の位置のずれの状態を確認するために再度イオンスパッター処理をした試料を電子顕微鏡で検鏡した。イオンスパッターは放電現象により試料面に付着している不純物を除去し、表面の構造をより明瞭にするためであり、脱リグニン処理をした切片を再処理した。

脱リグニン処理は10%硝酸と10%クロム酸の1:1の混合液に室温で8-10時間に浸漬処理した。切片は直径10mm、厚さ5

mmの真ちゅう製の試料台にカーボンテープで固定した。日本電子製のイオンスパッター装置(JFC-1100型)で約3分間スパッターリング処理をし、白金を蒸着して検鏡した。

III 結果および考察

観察倍率がおおむね400倍の偏光顕微鏡で観察されるSPは図-1に示すように5種類の形態を持つが(4)。この形態は、細胞壁の縦断面に認められた変位に準拠したものである。放射壁のSPはレイマージンからの距離によりSP発生数が異なる特異性があり、図-2に距離と発生数を示した(4)。またSPは応力により発生数が異なり、図-3に発生状態を示した(7)。本研究では、液浸100倍対物レンズを使用した高倍観察(1000倍)により細胞壁層や細胞間層の変形を検討した。高倍観察により相接する壁の内腔側表面に変形が認められた。このことは、同一SP位置でひずみを発生していることを示し、両細胞壁に均等に応力が発生していると考えられる。dw型と同時に部分的に偏心した応力をも発生しsw型を生じていると考えられる。SPの数により両型の発生割合は判定でき、図-4に接線、放射両壁の長さ約 $400\mu\text{m}$ のSP発生数比を示した。SPの約75%はdw型であり、約25%はsw型であることから、細胞壁応力はダブルセルウォールにほぼ均等に作用し、SPが発生すると考えられる。異なった発生段階にあるdw型とsw型のSPが同一の応力レベルで発生することを図-5に示した。SPの低倍率偏光顕微鏡写真像から確認できた。また単一の断面にジャストフォーカスになるSPは同じ細胞壁内でもある程度限られ、顕微鏡のフォーカスを移動させることにより、単一焦点面にはないSPの存在が確認された。SPは細胞壁の接線壁または放射壁の厚さ方向に生じているが、各壁の幅方向にはその一部分がひずんでSPを生じていると考えられた。図-6はさらにひずみが進んだSPを示したものであるが、SPの細胞内腔側表面の壁には凹凸部(凹み部)を生じている。一部のSPでは細胞間層(以下ICLとする。)に細胞壁が分離した空隙が発生しており、ICLも細胞壁破壊成長の一つの始点になることを示している。

脱リグニン処理をした細胞壁はSPがより多く発生する傾向を示した。セルロース結晶以外のマトリックス物質が取り除かれたために同じ光学的条件下であるが、弱い偏光を示すSPをも確認

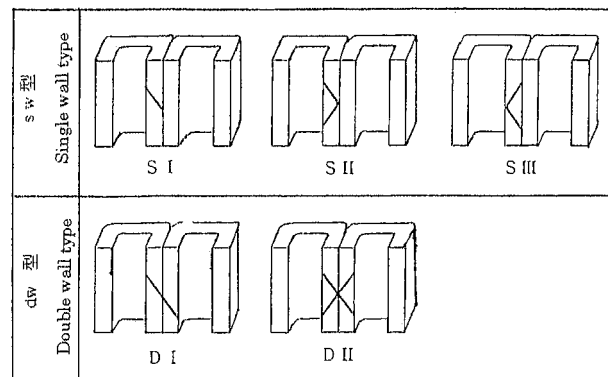


図-1. Slip planeの模式図
Schematic diagram of slip plane

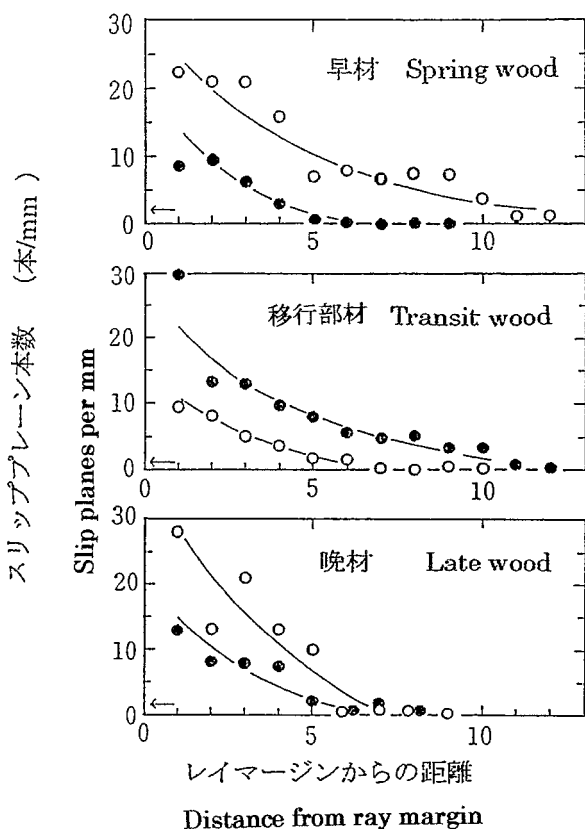


図-2. レイマージンからの距離とスリッププレーン（破壊ひずみの120%ひずみ時）

Relationship between length from ray margin and slip planes at the 120% strain level to breaking strain.

● sw型 Single wall type

○ dw型 Double wall type

Distance from ray margin is expressed as the ratio of tracheid wall to the average height of the ray parenchyma contacting the tracheid.

されるようになり、SP数が多くなったものである。しかし偏光観察であるために細胞壁縦断面の内腔側表面にある微細な変位を確認することは難しいと考えられた。同一のSPを偏光顕微鏡像と電子顕微鏡像を対応させて、正確なSPの位置を確認することはできないが、電子顕微鏡によるSPは図-7に矢印で示したように電子顕微鏡像の細い線として確認できる。SPは仮道管断面表面に認められるものに限られるので、SPであると判定される数はかなり少数になったと思われる。偏光顕微鏡像のSPは壁断面表面のSPのみならず切片の厚み方向の表面以外の位置にあるSPも含んでいるのに対し、電子顕微鏡像は壁断面表面上のSPに限られているためであると考えられる。一方内腔表面に見られた偏光顕微鏡像は脱リグニン処理をしない場合は細胞内容物に覆われているため偏光を確認できなかったが、処理したことにより偏光が確認されたものと考えられる。脱リグニンした細胞壁面は図-8に示すように、内腔表面に細胞軸にほぼ直角な偏光を示す線が認められた。この線は接線壁および放射壁の両者とともに認められた。壁面をクリーニングすることにより認められた壁面の面的な変位であると考えられた。SPとは異なる偏光顕微鏡による細胞壁面の変位である。細胞内腔表面の電子顕微鏡像は図-9に示すように最内層部分に破断した孔状の像が確認された。SPの内腔側表面は

細胞壁層の一部が破断していると考えられる。内腔側壁層はS₂であり、セルロース結晶は網状に配列しており、光学的には等方

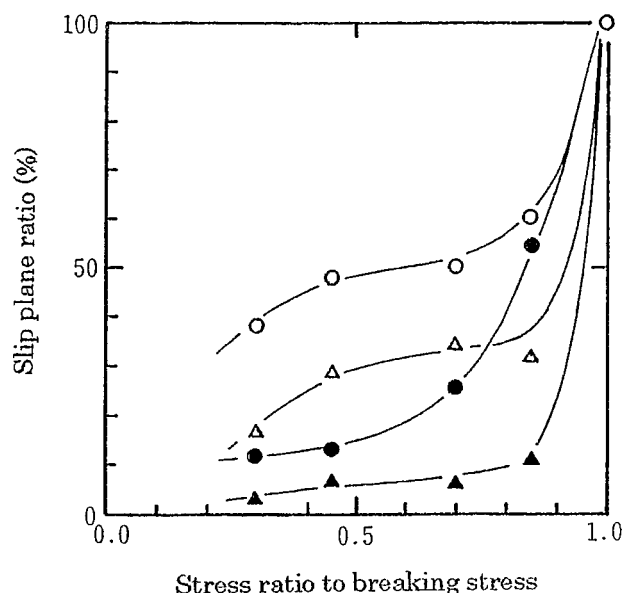


図-3. 破壊応力時に対する各応力レベルのスリッププレーン発生比

Slip plane ratio to the slip plane at breaking stress.

Tangential wall △ Early wood ▲ Late wood

Radial wall ○ Early wood ● Late wood

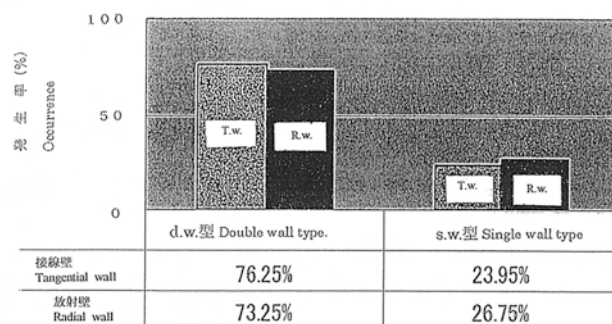


図-4. sw型, dw型のSPの発生率
Occurrence of SP types

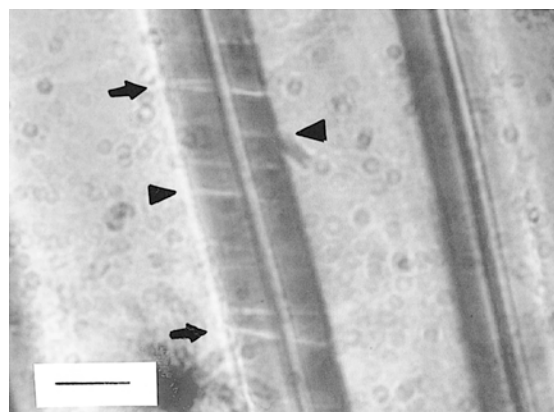


図-5. 細胞壁のSP
SP in cell wall
Bar : 10 μm

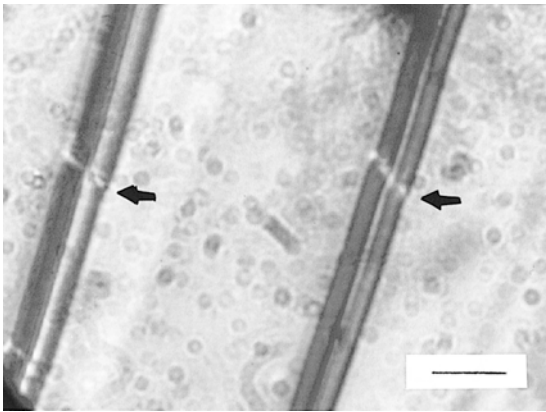


図- 6 . 内腔表面, I.C.L. の変位
Deformation of lumen surface and I.C.L.
Bar : 10 μ m

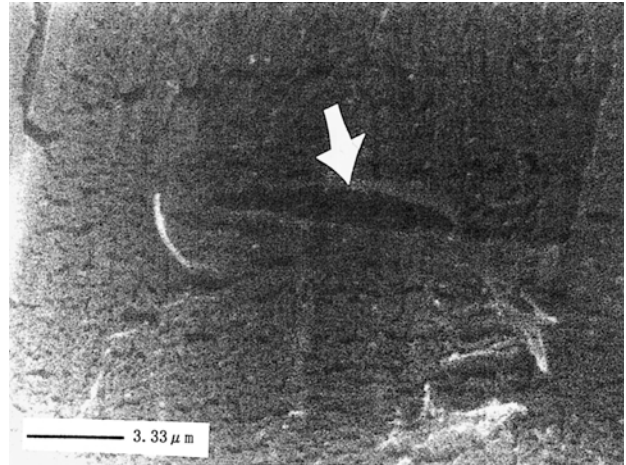


図- 9 . 細胞内腔側表面の破壊
Destried wall in lumen surface.

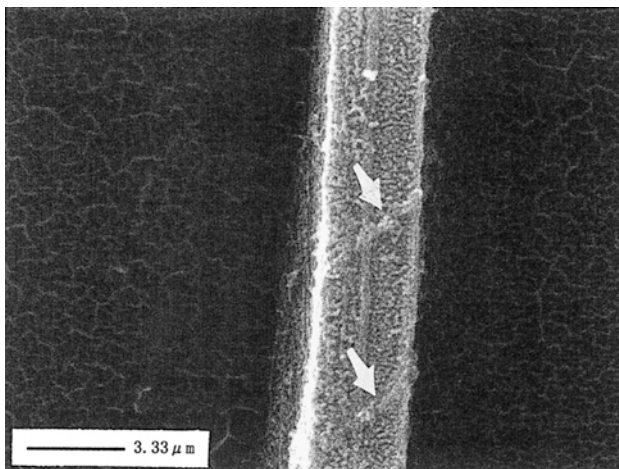


図- 7 . 細胞壁厚さ方向の縦断面の SP
SP at vertical surface in cell wall thickness direction

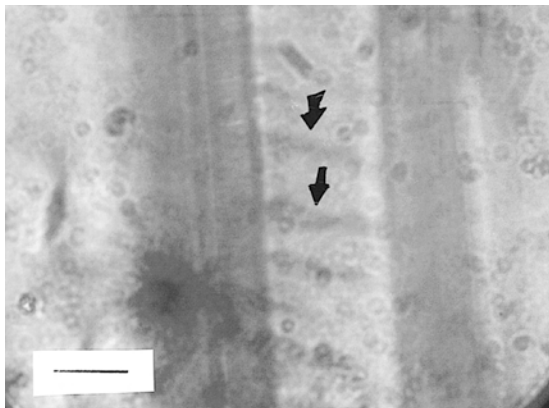


図- 8 . 細胞壁幅方向の変位
Deformation line on lumen surface
Bar : 10 μ m

性であるが、その内側のS₂層は壁層の中ではもっとも厚く、セルロース結晶は一定方向に配列し偏光を示すので、偏光顕微鏡像は偏光を示したものである。細胞壁はSPのような細胞壁厚さ方向の変形と細胞壁面に最内壁層の破壊変位を発生していることが確認された。

IV 結 論

軸方向圧縮応力を受けた針葉樹仮道管のSPを偏光顕微鏡および電子顕微鏡で検鏡し、SPは圧縮応力による細胞壁厚さ方向の変位を示すと同時に、細胞壁破壊の初期破壊点の位置を示すことが確認された。単壁型、両壁型のSPが同時に発生し、細胞壁厚さ方向の変位を示すが、多くのSPはダブルセルウォールが同時に変位を生じて発生していると考えられる。細胞壁厚さ方向には2細胞壁のSP位置がICL部分でずれを生じ、両SPの間隔が拡大しており細胞壁破壊の破壊点の一つである。細胞壁の幅方向の変位はSPの発生と異なった変位を示し、細胞軸にほぼ直角方向に細胞壁の最内腔側壁層が破断していることが認められた。細胞壁の破壊はSP、ICLと細胞壁層の破断が同時に発生し、破壊が進展していくと考えられる。

参考文献

- 1 Kučera,L.J. and Barisla,M.:1982,Wood Sci. and Tech. 16,201-259.
- 2 日本電子技術サービス：イオンスパッター JFC-1100 取扱説明書.
- 3 仲田真 (1986) 破壊した木材細胞壁の変形 1985年度卒業論文 未発表.
- 4 林弘也ほか (1986) 破壊した木材の細胞変形, 琉大農学報, No. 33, 221-227.
- 5 林弘也ほか (1986) 破壊した木材の細胞変形, 琉大農学報, No. 33, 221-227, 1986.
- 6 林弘也・実吉安彦 (1987) 破壊した木材細胞の変形 第2報 接線断面のSlip plane, 琉大農学報, No34, 75-81.
- 7 林弘也, 大浦正嗣 (1988) 破壊した木材細胞の変形 第3報 破壊応力以下の圧縮応力で生じるSlip plane, 琉大農学報, No35, 93-100.
- 8 竹内正幸, 石原勝敏編著 (1992) 生物の実験 1992, 2-10 掌華房, 東京.

(2004年11月8日 受付：2005年1月11日 受理)