



Title	応力緩和およびクリープにおける応力レベルのスギ材 Slip plane への影響
Author(s)	林, 弘也; 繁政, 弘造; 金城, 一彦; 屋我, 嗣良
Citation	琉球大学農学部学術報告 = The Science Bulletin of the Faculty of Agriculture. University of the Ryukyus(44): 307-312
Issue Date	1997-12-01
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/3719">http://hdl.handle.net/20.500.12000/3719</a>
Rights	

## 応力緩和およびクリープにおける 応力レベルのスギ材 Slip planeへの影響\*

林 弘也\*・繁政弘造\*・金城 一彦\*・屋我 嗣良\*

Hiroya HAYASHI, Kouzou SHIGEMASA, Kazuhiko KINJYO,  
Shiryo YAGA: Effects of stress levels in the stress relaxation  
test and the creep to slip planes of SUGI wood

キーワード：スギ材、スリッププレーン、仮道管、クリープ、応力緩和  
Keywords: SUGI wood, Slip plane, Tracheid, Creep, Stress  
relaxation

### Summary

The compression of wood parallel to the grain causes progressive structural deformation in the tracheid cell walls known as slip planes and compression creases. Slip planes were the non-elastic deformation of the tracheid cell wall and detected by a polarizing microscope.

By the explanation of the slip plane occurrence related to strain and stress of a solid wood, it is expected to get basic information on the destructive process of a solid wood.

It was cleared some points on the natures of slip planes. Slip planes were affected by a cell kind and a structure of cell wall. And slip planes began to occur at the stress level of 20-30% to breaking stress and it occurred locally in a cell wall.

In this study, it was discussed the number of slip planes to some kinds of stress at some stress levels to breaking stress.

Compression stress applied to coniferous wood SUGI (*Cryptomeria japonica*) and slip planes were detected on the tangential wall of tracheid in late wood. Applied compression stress was static compression stress, stress relaxation and creep of compression stress. At first, a specimen was examined by naked eye and was checked the occurrence state of slip planes by the static compression test. A SUGI specimen of the static compression test occurred slip planes exponentially to stress levels in normal way. (Fig. 2)

---

\* 本報は“木材の破壊過程に関する研究 第1報”とする。

\*\* 琉球大学農学部生物資源科学科

琉球大学農学部研究報告 44: 307~312 (1997)

Slip planes in the stress relaxation test occurred in the same manner as the static compression test to stress levels. But in the creep test, slip planes occurred 1.5-3.0 times as many as slip planes in the static compression test. (Fig. 4)

It was recognized a positive correlation between slip planes in the static compression test and slip planes in the stress relaxation test. (Fig. 3) From this fact, it was considered to be one proof that a stress relaxation came from a expansion of each slip planes occurred in the static compression. On the other hand, slip planes in the creep test were occurred 1.5-3.0 times in the static compression test and a creep strain was occurred new slip planes. In the generating process of a creep strain, slip planes were correlated exponentially to applied stress. (Fig. 5) And it was considered that slip plane occurrence in this process depended on a applied stress level and a creep time. It was recognized that occurrence of slip planes were affected by the applied stress level and the applied method of stress to solid wood.

## 緒 言

木材が繊維軸方向に圧縮荷重を受けたとき、圧縮荷重によって生じたひずみを直接観察できるという利点から圧縮試験は木材破壊研究の対象に取り上げられてきた。圧縮荷重で生じるひずみは基本となる細胞壁の構造変化として塑性的な変形を生じ、その変形はSlip planeとして検出される<sup>1) 2)</sup>。このSlip planeの発生状態と木材のひずみ量、応力との関係を明らかにすることが見かけの応力、ヤング率によるバルクな解析とともに、細胞壁の破壊過程に基づいた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が、その過程は単一ではなく構成要素に依存する複数の過程が平行的に進行し、破壊に到ると考えられる。そこで木材の破壊した状態は力学的な細胞の変形過程を終了した状態であり、材中の粗大空隙、間隙を減少していく過程であると考え、まづは破壊したスギ材を対象にSlip planeの状態を検討した。その結果では、Slip planeは早・晩材の発生数はほぼ同じであるが、Slip planeの発生形態に差異があることやSlip planeはRay margin付近の仮道管放射壁に高い頻度で発生することが明らかになった<sup>3) 4) 5)</sup>。しかし、木材の塑性的変形であるSlip planeの発生は弾性域から始まり、Slip planeが荷重の増加に伴ってその数を増加することがDinwoodie<sup>6)</sup>、林ら<sup>7)</sup>によって確認されている。更に大略比例限以下の荷重範囲では仮道管の放射壁と接線壁ではSlip planeの発生状態が異なっており、放射壁では破壊荷重の約40%~70%範囲ではSlip plane数がほぼ一定値となり、その後荷重に伴って増加して破壊に到る<sup>7)</sup>。一方接線壁では荷重に伴ってSlip planeが指数関数的に増加し破壊に到るが、発生数ばかりではなく、発生位置も仮道管の両壁の間には違いが認められる。両細胞壁の負荷荷重に対するSlip planeの発生数が異なる理由は細胞壁の構造形態の結果であると考えられ、一義的には細胞壁にある有縁壁孔が破壊の過程に影響を与えていることを示唆している。また放射組織と仮道管のような細胞の配置構造による相互作用、構成細胞の配列状態も影響を与えていることを示唆している。一方木材のひずみを発生させる様式は静的荷重試験、応力緩和、クリープ等があり、静的荷重試験とクリープは破壊に至る過程であり、応力緩和は応力を吸収する変形機構が作用する。荷重の負荷様式、すなわち静的

強度試験の負荷による破壊変形の過程に対して非常にゆっくりとしたひずみ発生を伴う破壊変形過程がクリープ現象であり、更に進行を遅くした破壊（塑性変形）が応力緩和である。従ってこれらのひずみ発生過程が破壊現象の Slip plane 発生過程をより詳細に解析する知見を与える。本報告は、このような観点からそれぞれの負荷様式について負荷荷重と Slip plane 発生数との関係を実験的に検討したものである。

### 実験材料および方法

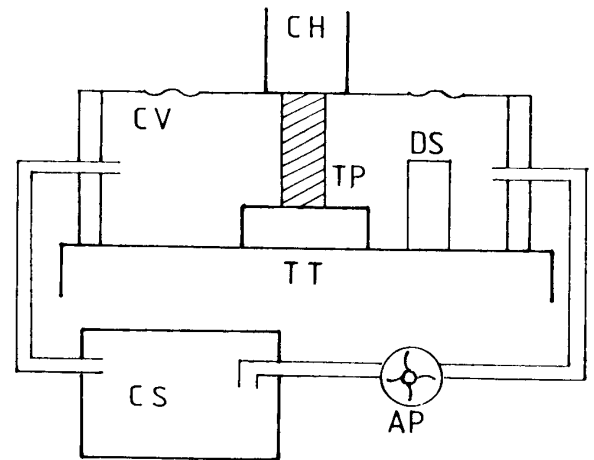
実験に供した材は宮崎大学付属田野演習林産の31年生スギ (*Cryptomeria japonica*) 材である。髓からの成長輪数20以上の成熟材を丸太から切出し試験材とした。横断面が材の接戦方向に10mm、放射方向に10mmであり、長さが繊維軸方向に40mmの直方体を試験材からエンドマッチ状態で切り出し、試験片とした。試験片は、温水浸漬処理 (60°C, 100時間) をした後、室温20°C、相対湿度65%の恒温恒湿室で調湿し、同一の環境下で負荷試験に供した。試験片の平均気乾密度は0.41、平均成長輪幅は1.6 mmであった。

試験は縦圧縮試験を用い、静的試験、圧縮応力緩和試験および圧縮クリープ試験を行った。強度試験機は島津製作所製の万能試験機RCS-R-5000型を使用した。静的強度試験はひずみ速度は0.5mm/min.で行った。エンドマッチの試験片グループごとの破壊応力に対して0.20, 0.30, 0.45, 0.60, 0.85の応力緩和試験、クリープ試験を行った。応力緩和およびクリープ試験はそれぞれ72時間行った。試験中の湿度変化が、Slip planeの発生に影響を与えるため、Fig. 1に示した調湿装置を試験機の Cross head と Table の間に設置し、試験片の温度と湿度を一定に保った。

負荷試験後に、試験片から複数の6~8 mmの立方体を切り出し、含水率を測定すると同時に水、グリセリン混合液で軟化し、常法によりパラフィン包埋ブロックを作製した。包埋ブロックから18~20 μm厚さの薄切片を滑走式マイクロームを使用して切り出し、常法により永久プレパラートを作製した。

Slip planeは偏光顕微鏡で検出し、放射断面切面-仮道管の接線型-に発生したSlip planeを係数した。Slip planeの形状の型分析は林らの区分<sup>3)</sup>によった。

早晚材の区分は仮道管の放射径に対する接線壁の厚さの和の比により、1.0以上を晩材部、0.6以上1.0未満を早材から晩材への移行材部とした。



CH : Cross head of testing machine.  
 TT : Table of testing machine  
 CV : Conditioning vessel  
 CS : Conditioning solution AP : Air pump  
 TP : Test specimen DS : Dummy specimen

Fig. 1. Schematic diagram of conditioning vessel.

### 実験結果および考察

Slip planeは試験片にひずみを生じた結果として、細胞壁に生じた塑性的な変形として光学的に確認される変形であり、応力に対して指数関数的に増加し、破壊に至る。Slip planeは発生する細胞壁（接線壁であるか放射壁であるか）によって、また細胞と接する他の細胞と位置関係によっても異なるが、本実験では、Slip plane発生数の応力に対する関係が典型的な指数関数で表される晩材および晩材への

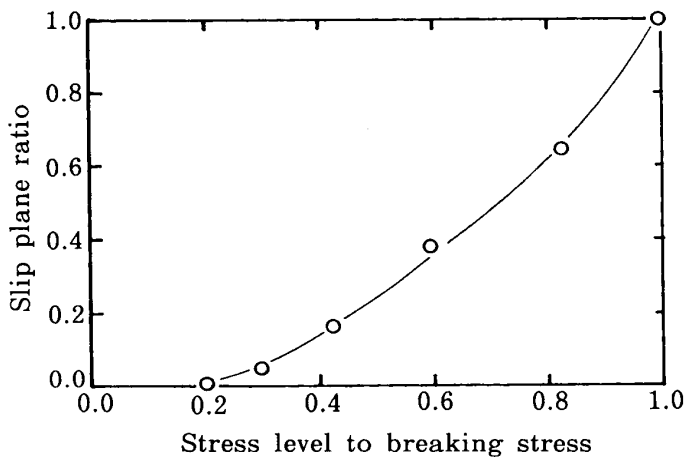


Fig. 2. Slip plane ratio of static compression test.  
 Legend: Slip plane ratio = Slip planes / Slip planes at static breaking stress.

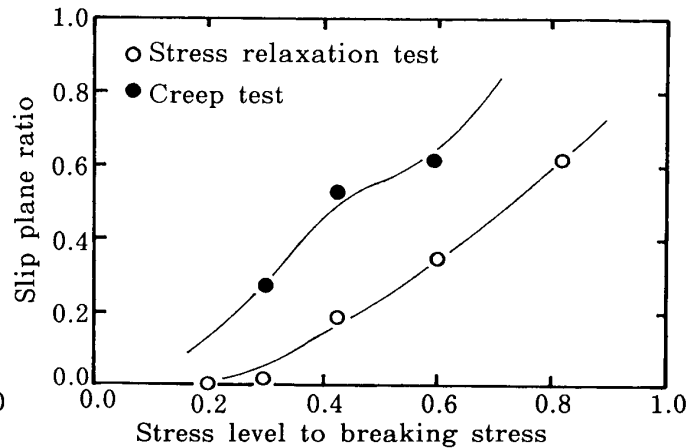


Fig. 3. Slip plane ratio of stress relaxation test and creep test.  
 Legend: Slip plane ratio = Slip planes / Slip planes at static breaking stress.

移行材の仮道管接線壁のSlip planeを対象にしている。実測したSlip planeはFig. 2 に示したように応力に対して指数関数的に増加し、従来の林らの研究結果<sup>7)</sup>と一致した。本実験の試験片では、Slip planeが無応力の試験片で既に発生していた。これは試験材が当初から有していたSlip planeであり、本試験材が立木時に何らかの外力を受けたり、材の搬送時や加工時に受けた外力によるSlip planeであると推定される。

応力に対する応力緩和試験のSlip plane、クリープ試験のSlip planeをFig. 3にプロットして示した。応力緩和は試験片に一定量のひずみを与え、その一定ひずみを長時間維持すると試験片の応力が時間とともに減少し、緩和される現象である。従って応力緩和現象では、ひずみが新たに発生することではなく、一定ひずみであるので、実験的に得られた同応力レベルの静的強度試験によるSlip plane数と応力緩和試験によるSlip plane数は同じであると推定される。Fig. 4に示したように両者は直線で表され、両者のSlip planeの発生状態が応力に対して同じ関係にあると考えられる。本実験では、応力緩和のSlip planeが静的試験のSlip planeよりも少ない結果となったが、これは試験片のグループが異なることによるものと推定される。相関式の勾配は対象とする試験片グループによって異なるが、直線で表されることによってこの関係が認められる。静的試験のSlip planeを基準にすると応力緩和試験のSlip planeは発生材部、応力レベルにおいてほぼ一致した。このことから応力緩和はSlip planeが新たに発生するのではなく、発生しているSlip planeがそれぞれのスリップ量を増大させ、すなわちひずみ量を増加させることによって材中の応力を減少させると考えられる。ただしこの時のひずみ量は万能試験機の記録計には記録されないため、新たなひずみが発生していたとしても記録計では検出できないくらいに微小なひずみである。これに対しクリープは試験片に一定量の応力を発生させ、この応力を一定時間維持すると、試験片のひずみが増大し、応力を維持する時間によって変動するが、ある応力で破壊する現象であるため、時間とともに試験機の記録計で検出できるほど大きくひずみが増大することから、Slip planeがそれぞれのひずみ量を増加させる可能性もあるが、クリープ過程において新たなSlip planeを発生することによって大部分のクリープひずみを吸収している。Fig. 3に示したように静的強度試験時のSlip plane数に対し1.5~3倍の発生数であり、発生数を静的強度試験時の応力レベルに換算すると、30%負荷クリープは約55%に、45%負荷クリープは約75%に、60%負荷クリープは80%に相当する。クリープ過程で新たなSlip planeを多量に発生していることから上記の考え方は首肯できた。クリープを経験した試験片のSlip plane数はクリープを起こさせる初期の負荷荷重に応じて異なり、負荷荷重に対して指数関数的に増加する。試験片のSlip plane数の比 (Slip plane数 / 静的強度試験の

破壊時のSlip plane数)はクリープ破壊を起こす初期荷重で1.0となる。クリープ試験によるSlip plane数の比と静的強度試験によるSlip plane数の比の差はFig. 5に示したように負荷応力に対し増大値を持つ変化を示し、負荷応力に対するSlip plane数の比較はS字カーブを示して変化すると考えられる。従ってクリープ変形を起こす負荷時間に応じて、負荷応力に対して発生するSlip plane数を表す指数関数は変化する。

Slip planeはSingle wall type (以下SWTとする。)とDouble wall type (以下DWTとする。)との2 typeが認められる。両typeとも検出した全ての応力レベルで確認されるが、SWTはDWTよりも低い応力レベルから発生しはじめ、DWTよりも多数の発生が確認された。DWTは高い応力レベルで急激に多数発生していることから、同一の応力レベルDWTはSWTよりも大きなひずみを吸収していると考えられる。

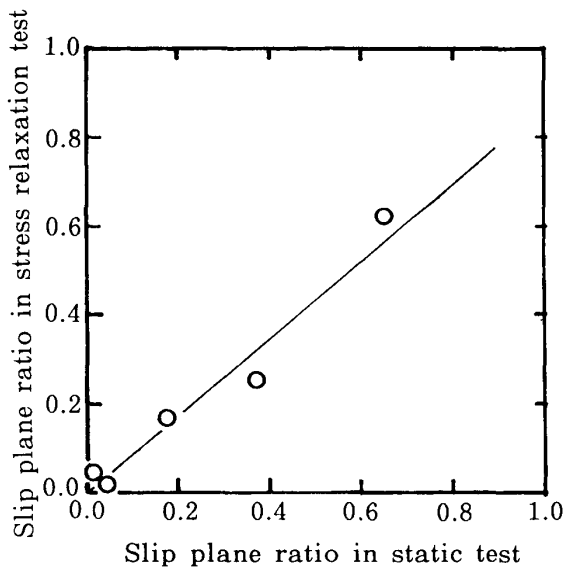


Fig. 4. Interrelation of Slip plane ratio at same stress levels in static test and stress relaxation test

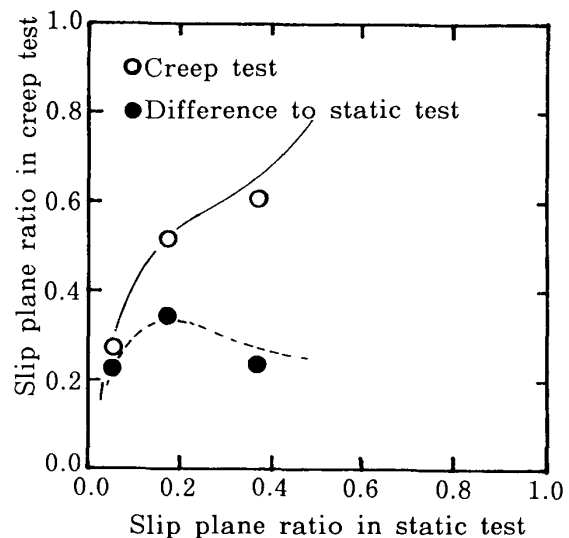


Fig. 5. Interrelation of Slip plane ratio in static test and creep test

## 結 論

木材の破壊過程を解明する方法として、木材構成細胞の細胞壁の破壊過程を針葉樹材のスギ材仮道管について、荷重負荷様式が異なる静的強度試験、応力緩和試験およびクリープ試験を実施し、Slip planeを検出による実験的検討を行った。

検討結果をまとめると次のようになる。

1. 応力緩和試験では、初期負荷荷重によるSlip planeは緩和によってその発生数を増加することはないが、緩和は個々のSlip planeがplane幅を拡大するような新たなひずみ吸収機構があるものと考えられる。

2. クリープでは、初期負荷荷重によるSlip planeは他の負荷様式の発生数と同じ数であるが、クリープ時間や負荷荷重によってSlip planeの発生数は異なるが、負荷荷重に比例的にSlip planeの発生数が増加し、静的試験破壊時のSlip planeの発生数になり、クリープ破壊するものと考えられる。

実験は寛英司君の協同で行ったことを記し、謝意を表す。

## 引用文献

- 1) Wardrop, A. B., Dadswell, H. B. 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) Kieth, 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 接線断面のSlip plane, 琉大農学報, 34:75-81
- 6) Dienwoodie, J. M. 1968 Failure in timber, Part 1 Microscopic changes in cell-wall structure associated with compression failure, J. Inst. Wood Sci., 4: 37-53
- 7) 林 弘也, 大浦 正嗣 1988 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 琉球農学報, 35:93-100

## 和文要旨

木材は繊維軸方向の圧縮応力により, Slip planeを細胞壁に発生し, Slip planeは細胞壁の塑性的な変形であり, 偏光顕微鏡により光学的に検出される。Slip planeはひずみ量, 応力との関係を解明することによって, 木材の破壊過程に基礎的な知見を与えられ考えられる。木材の破壊過程は, 細胞の構成, 細胞の構造が相互に作用し合い複雑な過程を辿っており, 仮道管壁のSlip planeは破壊応力の20-30%の応力レベルから発生すること, 細胞壁の部位によって同じ応力レベルでも発生数が異なることなどが明らかにされている。本報告は応力の発生状態のSlip planeの発生状態に対する影響を実験的に検討した。

針葉樹スギ (*Cryptomeria japonica*) 材の成熟材仮道管を対象に, 圧縮応力緩和, 圧縮応力クリープを起こさせ, 応力レベルとSlip planeの発生状態を検討した。実験対象の仮道管壁は晩材の接線壁である。

静的強度試験では, Slip planeの発生数が, 既報<sup>4)</sup> のように応力に対し指数関数的に増加し, 正常状態の試験片であることが確かめられた。(Fig. 2)

静的強度試験と応力緩和試験とのSlip planeはほぼ同数である。クリープ試験では静的強度試験の1.5-3.0倍発生した。(Fig. 4)

応力緩和試験のSlip planeは静的強度試験のSlip planeと正の相関関係 (Fig. 3) にあり, 応力緩和過程に新たなSlip planeは発生せず, Slip planeのひずみ量がわずかに増大して応力を緩和していると考えられた。クリープ過程のSlip planeの静的強度試験のSlip planeの発生数の数倍になり, クリープひずみは新たなSlip planeを発生していると考えられる。クリープ過程のSlip planeはSlip planeを発生する応力レベルに影響されることが推定された。負荷状態が応力やひずみと同じくSlip planeの発生時に影響していることが確認された。