

## 圧縮応力下のスギ,イジュ材の含水率

誌名	琉球大学農学部学術報告 = The science bulletin of the College of Agriculture, University of the Ryukyus
ISSN	03704246
巻/号	43
掲載ページ	p. 107-112
発行年月	1996年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 圧縮応力下のスギ、イジュ材の含水率\*

林 弘也\*\*・福田 英昭\*\*\*

Hiroya HAYASHI\*\* and Hideaki FUKUDA\*\*\*: Effects of compression stress on moisture content of Sugi- and Iju-wood

キーワード：平衡含水率、圧縮応力、スリッププレーン

Keyword: Equilibrium moisture content, Compression stress, Slip plane

### Summary

A equilibrium moisture content of Sugi wood and Iju wood were examined under compression stress and free stress. The range of applied stress was 40~85% to the breaking stress. The equilibrium moisture content increased less than 1% after stress was applied about 80 hours. The applied stress increased the equilibrium moisture content in both species. In the case of applied compression stress under 10% of the breaking stress, equilibrium moisture content of wood decrease the equilibrium moisture content by the way of the Barkas's formula but moisture content increase with stress over 40% of the breaking stress in compression. For the reason for this difference, it was recognized the different formula of cell wall deformation. In low stress range, a cell wall was not deformed the outlook of wall. But cell wall was deformed in the way of slip plane formation in high stress range at least over 40% breaking stress. A slip plane caused the rearrangement of cell wall component fibril or microfibril and these rearranged region of the cell wall were absorbed more a water.

### 緒 言

木材の平衡含水率は主に周囲の水蒸気圧、温度によって決定されるが、樹種、樹幹内の材の位置や外力などによっても影響を受ける。

紙や吸湿性のポリマーの平衡含水率（以下EMCとする。）が機械的な外力に影響をうけることが報告されている<sup>7,12)</sup>。一方木材が膨潤圧を受けたとき、時間と共に含水率が変化する<sup>11)</sup>ことから木材のEMCも紙やポリマーと同様に外力依存性を示すと考えられるが、その挙動を研究した報告は余り見受けられ

\* 圧縮力が作用した木材の平衡含水率に関する研究 第1報とする。

\*\* 琉球大学農学部生物資源科学科

\*\*\* 琉球大学教育学部技術教育科

琉球大学農学部学術報告 43:107~112 (1996)

ない。木材の EMC の研究は Barkas<sup>1)</sup> が最初に行った。Barkas は、揮発性成分を含んだ溶液の蒸気圧と溶液の浸透圧との関係を表す Porter の式<sup>2)</sup>に基づいて、水分含量、周囲の相対蒸気圧、溶液中の蒸気圧の関係を検討し、静水圧下のゲルの含水率と相対蒸気圧、静水圧の関係を (p, V, m, h) 図として示した<sup>3)</sup>。この図は完全弾性体であり、均質かつ等方性であることを仮定した熱力学的な考察によっているが、木材にも定性的に適用されると考えられている。Bello は繊維軸に直角方向の面をリングで完全に固定した円形断面の木材では、円盤のひずみから理論的に計算された弾性率が実測した静的弾性率よりも小さく、その差はかなり大きいことを明らかにしたが、外力と EMC の関係を示した Barkas の式が定性的に木材にも適用できることを示した<sup>4)</sup>。この量的な差は理論上仮定した事項の集積した影響のためであると同時に仮定した応力状態と実際の応力状態の乖離がその理由の一つである。また Simpson が示したように材に荷重が加えられたときに時間と共に応力緩和が生じ<sup>5)</sup>、材中の応力状態が変化すること、木材が細胞で構成されていることなどが作用しているのであろう。本報告では、外力の荷重状態と木材 EMC への影響を検討する目的で軸方向の圧縮力を受けた木材の EMC 変化を検討した。

### 実験試料及び方法

供試材は針葉樹材スギ (*Cryptomeria japonica*)、広葉樹散孔材イジュ (*Shima wallichii* ssp. *liukiuensis*) の 2 樹種である。供試材の平均成長輪幅、平均容積密度を Table 1 に示した。両樹種とも成熟材である丸太の辺材部から軸方向に約 400mm、断面 25×25mm の材を切り出し、一か月間約 60℃ の水中に保存した後に、気乾状態にした。切出した一本の気乾状態の材から断面が 20×20mm、軸方向の長さ約 40mm のエンドマッチ試験片を 7～8 本作製した。エンドマッチ試験片は各樹種 14～16 グループ調整したが、目切れや欠点を含む試験片を除外し、供試試験片を決定した。試験片は NaCl 飽和水溶液を入れた摂氏 25 度 (相対蒸気圧約 75%) のデシケータのなかで約 1 か月間調湿した。調湿の後にエンドマッチ各グループから 2～3 本の試験片を選択し、試験片の横断面を加圧面とした圧縮試験を行い、ヤング率、圧縮強度を求め、負荷荷重を決定した。負荷荷重は、エンドマッチ試験片で求めた破壊荷重 ( $P_{max}$ ) に対しスギ材では  $0.40P_{max}$ 、 $0.85P_{max}$ 、イジュ材では  $0.40P_{max}$ 、 $0.60P_{max}$ 、 $0.85P_{max}$ 、とした。規定荷重を負荷した後に 72～84 時間の応力緩和試験を行った。強度試験および応力緩和およびクリープ試験は島津製作所製オートグラフ DSC-R-5000 型を使用した。負荷試験の直前および除荷後、含水率を求めるために試験片重量を測定した。試験片の重量は秤量瓶を用いて 0.1mg まで測定した。各条件について 3 回の繰り返し試験をした。負荷試験中の試験室内の水蒸気圧調整は NaCl 飽和溶液で調湿した空気を強制循環させて行い、ダミー試験片を試験室内に設置して試験中の含水率変動をチェックした。実験装置の調湿負荷装置の模式図を Fig. 1 に示した。試験開始前の含水率がダミー試験片と

Table 1 Sample data

	Sugi	Iju
Density in air dry (Moisture content: 15%)	0.40	0.66
Average growth ring width (mm)	2.1	2.0

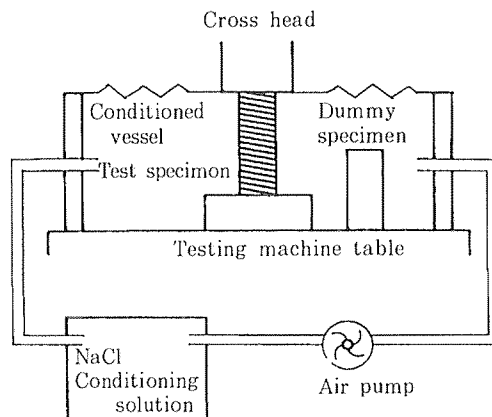


Fig.1 Schematic diagram of conditioned vessel attached to testing machine

供試試験片との間で異なっている場合および負荷試験中にダミー試験片の含水率が変化した場合の試験データは除外した。含水率は、負荷試験後に試験片を103℃の熱風乾燥機で全乾にし、この全乾重量を基準に計算した。試験片の乾燥時間はスギ材が36日、イジュ材が45日である。

実験結果及び考察

試験片への負荷荷重は試験片グループごとに決定され、荷重は一定値ではないので、負荷荷重はペア試験片グループの平均破壊荷重に対する相対値で示した。ペア試験片の応力-ひずみ図から判定された比例限度応力はスギ材では $P_{max}$ の0.57~0.80であり、イジュ材では0.40~0.58 $P_{max}$ であった。負荷荷重は、この比例限度荷重を基準にして、比例限度荷重以下の弾性域内の0.40 $P_{max}$ と比例限度以上である塑性域内の0.60 $P_{max}$ ~0.85 $P_{max}$ とした。

外力を受けた木材のEMCの変化は、Barkasが、Porterの式に基づいて水分含量、周囲の相対蒸気圧、静水圧、溶液中の水蒸気圧の関係を次式のように示した<sup>1)</sup>。

$$dp' = \frac{V (D' - D) \times dm'}{Sp} \quad (1)$$

ここで V: 相対蒸気圧hの下で溶媒の比容積

D': dh/dm', 蒸気圧 p+dp' の時の吸着等温線の勾配

D : dh/dm, 蒸気圧 p の時の吸着等温線の勾配

dm' : 含水率の変化量

Sp: 定静水圧下で含水率mの単位変化量に対する容積Vの変化率

(1)式から定性的には、EMCは引っ張り応力の下で高くなり、圧縮応力の下で低くなることが示された。Simpsonは、低い蒸気圧下で円形試験片の周囲を金属棒で固定した木材を高い蒸気圧下に曝し、相対蒸気圧を増加させて膨潤圧を発生させた。このとき固定された材の含水率が固定しない材の含水率よりも小さいことを確かめた<sup>10)</sup>。このことから圧縮応力の下でEMCが減少し、上述した式が木材にも適用できるとした。Simpsonらの応力の発生方法は繊維軸に垂直方向であるが、細胞壁にbucklingを生じる応力ではEMCが相対的に減少することを示し<sup>6)</sup>、細胞壁の変形状態がEMCに影響することを示唆している<sup>10)</sup>。圧縮力を受けているスギ材、イジュ材のEMCについて圧縮応力を受けている場合と無応力の場合との含水率変化の結果をFig. 2に示したが、EMCが弾性域、塑性域ともに圧縮応力を受

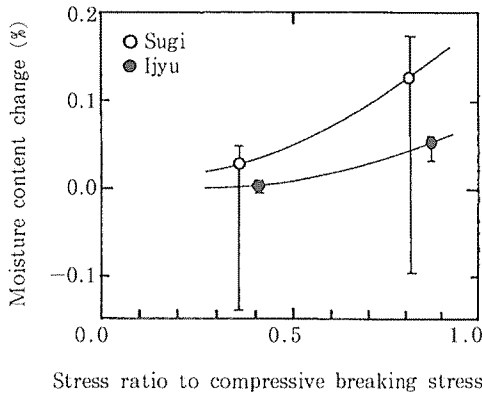


Fig 2. Equilibrium moisture content fluctuated with compression stress

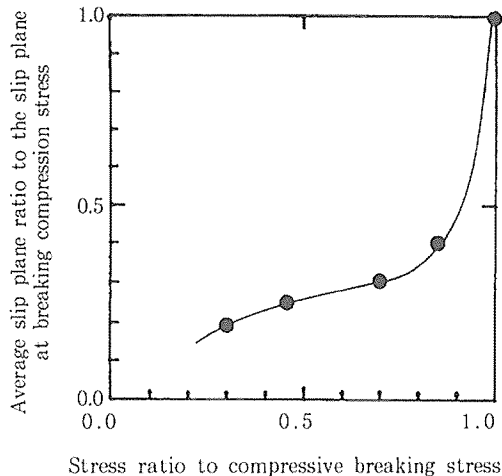


Fig 3. The relation between slip plane and stress ratio of Sugi wood.<sup>5)</sup>

けている場合に増加し、しかも応力が大きくなるに従って EMC の増加量は大となった。この測定結果は Barkas ら<sup>2,3,4)</sup>の圧縮応力下では EMC が低下するという実験結果とは異なった結果を示した。

Bello が木材試験片に負荷した応力と本実験の応力との応力条件は応力値以外は同じ条件であった<sup>9)</sup>。両者の応力値を比較検討すると、Bello の報告した各樹種の応力値について最大応力<sup>4)</sup>に対する負荷応力の比を新たに求めて Table 2 に示した。負荷された応力は最大応力の(0.07~0.08)P<sub>max</sub> であり、本実

Table 2 Applied compressive stress (by Bello, E.D.,1968)

	Birch	Maple	White oak	Hickory	Red oak
Specific density at 12% moisture content	0.637	0.717	0.642	0.709	0.685
Compressive breaking stress parallel to fiber direction gf/cm <sup>2</sup>	0.574	0.550	0.520	0.628	0.494
Applied compressive stress to breaking stress	0.052	0.077	0.058	0.065	0.075

験の負荷応力(0.40~0.85)P<sub>max</sub> に比較してはるかに小さい値である。圧縮力による細胞壁の変形状態は低応力域では単一のスリッププレーン(以下 SP とする。)が発生するが、最大応力域になると、V 字型の帯状の SP を発生し、応力域による SP の発生状態に大きな差異がある<sup>9)</sup>。

繊維軸方向の圧縮応力は細胞壁に塑性的な変形として SP は発生させ、応力による変形を吸収するが、この SP は応力に対し指数関数的に増加する<sup>3,5)</sup>。SP が発生する最小応力レベルは確定されていないが、破壊応力に対し10~30%の応力範囲であり<sup>3,5,13)</sup>、応力と共に発生数が増加する。スギ材の圧縮応力と SP 発生数の関係を Fig. 3 に示した<sup>9)</sup>。Bello の応力レベルは10%以下であり、細胞壁は SP の様な構造的な変化を発生していない応力領域である。すなわち細胞壁は変形または破壊を全く生じていない領域である。今回負荷した 0.40P<sub>max</sub> 以上の応力レベルでは SP が確実に生じており、一例として0.40P<sub>max</sub>の応力を発生した試験片から得られた SP の偏光顕微鏡写真を Fig. 4 に示した。また SP の発生数は材の膨潤乾縮量と直線関係にあり、SP は水分の吸脱着にともなう膨潤乾縮の発生位置の一つになっている<sup>9)</sup>。晩材部仮道管接線壁のデータから圧縮応力比 40、85%の SP 数を推定し、含水率増加量との関係を Fig. 5 に示した。図に示したように応力緩和試験の結果は応力の増加により平衡含水率が増加しているのは、SP により細胞壁中のセルロースの配列が乱れ、細胞壁中に空隙を生じ、水分子の結合の余地が新たに生じていると考えられる。しかし本実験はひずみが一定である応力緩和試験であるので SP 数は変化しないと考えられるので、SP 領域のセルロースの配列が攪乱された領域が増大したと考えられる。SP の繊維軸方向の幅や細胞壁の幅方向の長さが変化することによって応力が緩和され、水分の吸着量が増大するものと考えられる。SP は応力と共に総数を増加するので<sup>9)</sup>、少なくとも破壊応力の30%以上の高い圧縮応力域では含水率が負荷応力に応じてより大きく増加する。しかし SP の定量化には詳細なかつ多くの実験的な検証が必要である。

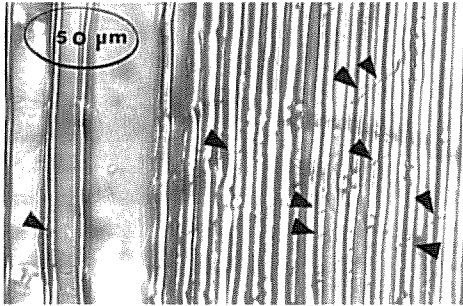


Fig 4. Slip planes at tangential wall of tracheid  
A triangle indicate a slip plane

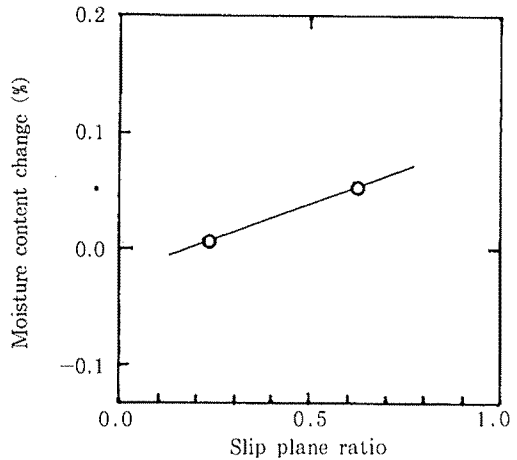


Fig. 5 The relation between moisture content change and slip plane ratio of Sugi wood  
Legend Slip plane ratio = Slip plane number / Slip plane number at breaking stress  
Moisture content change = (Moisture content of compressed specimen) - (Moisture content of stress free specimen)

## 結 論

木材に応力を生じ、細胞壁が変形したときには、細胞壁中に水分の吸着点が増加するため Barkas の式を適用することが出来ない応力域がある。繊維軸方向に圧縮破壊応力の40%以上の応力を受ける木材の平衡含水率は無応力の木材よりも高い平衡含水率を示した。含水率変化量は圧縮破壊応力以下の応力では、0.1%オーダの増加であった。その水分吸着に影響する因子の一つは細胞壁のスリッププレーンである。

## 引用文献

- 1) Barkas, W.W., R.F.S. Hearmann, H.F. Rance 1953 Mechanical properties of wood and paper, Interscience Publisher Inc., New York
- 2) Bello, E.D. 1968 Effect of transverse compressive stress of equilibrium moisture content of wood F.P.J. 18(2):69~76
- 3) Dinwoody, J.M., 1968 Failure in timber, Part 1 Microscopic changes in cell wall structure associated with compression failure J.Inst.Wood Sci. 21:37~53
- 4) Forest Prod. Lab. 1987 Wood handbook, 4-7~4-15, U.S. Dep. Agri., Washinton DC
- 5) 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, 琉大農学報, 35:75~81
- 6) Hoffmeyer, P. 1993 Non-linear creep and caused by slip plane formation, Wood Sci, Tech., 27:321~335
- 7) Kubat, J., L. Nyborg, 1960 Influence of mechanical stress on the sorption equilibrium of paper, Svensk Papperstidning, 65: 698~702
- 8) Poter, A.W. 1907 The osmic pressure of compressible solution of any degree of

- concentration, Proc. Royal Soc. A 79: 519, (Heatle, J.W.S., R.H. Peters 1960 Moisture in textiles, Textile Book Publishers, Inc., New York)
- 9) Simpson, W.T., C.Skaar 1968 Effect of restrained swelling on wood moisture content, US For. Serv. Res. Note, FPL-0197,
- 10) Simpson, W.T. 1971 Moisture changes induced in red oak by transverse stress, Wood and Fiber 3:13~21
- 11) Skaar, C. 1988 Wood-Water relations, Springer-Verlag, Berlin, 75~77
- 12) Treloar, R.L.G. 1953 Trns, Far. soc., 49: 816~823 (Kubat, J., L.Nyborg, 1960 Svensk Papperstidning, 65:698~702)
- 13) Young, R. L., H. C. Hillbrand 1963 Time related flexural behavior of small Douglas-fir beams under prolonged loading, For. Pro. J. 13:227~332

### 和文摘要

高い圧縮応力下にある木材の平衡含水率変化と無応力時の平衡含水率をスギ材とイジュ材について比較検討した。負荷した圧縮応力は破壊応力の40~85%に設定した。負荷開始から約80時間後に、平衡含水率は両樹種ともに0.1%オーダであるが増加をしめた。応力の大きさに対応して含水率の増加量は増大した。圧縮応力が破壊応力の10%以下の低い応力の場合には平衡含水率は Barkas の式に従うが、高い応力の場合には式とは異なった挙動が認められた。これは、低い応力では、壁構成要素の再配列を発生する細胞壁の形態上の変化を生じないが、高い応力では、細胞壁の形態上の変化がスリッププレーンの形で細胞壁に発生し、セルロースの配列が乱れた領域に水分が吸着したと考えられた。