

出土木材の乾燥に伴う収縮率の予測(1)

劣化による細胞壁実質の体積減少率から木口面収縮率を算出する方法について

酒井温子¹⁾・今津節生²⁾・横山 操³⁾

1. はじめに

出土木材は、発掘されるまでの長期間に様々な劣化を受け、脆弱な状態になっている。また、含水率の高い土壌から出土することが多く、木材自体も高含水率状態にある。このため、発掘後空气中に放置されると、乾燥に伴って収縮や変形が生じる。出土木材は、図1に示すように(D.Grattan:1987)、1個体内においても劣化状態は一様ではなく、劣化が軽度な部位は収縮量が少なく、劣化が激しい部位は収縮量が多い。

出土木材の劣化の程度は、一般に含水率を

図中のa:非常に脆弱化し灰茶色になっている、セルロースはほとんど残存していない、ポリエチレングリコール(PEG)が容易に浸透する。

b:aよりも木材組織が少し残っているが、セルロースはほとんど残存していない、PEGが容易に浸透する。

c:健全材とほとんど同じくらいのセルロースが残存している、PEGの浸透は困難である。

Class I:cを含まないか、もしくは中心部分に少し含んでいる材

Class II:cをいくらか含んでいる材

Class III:cをかなり含んでいる材

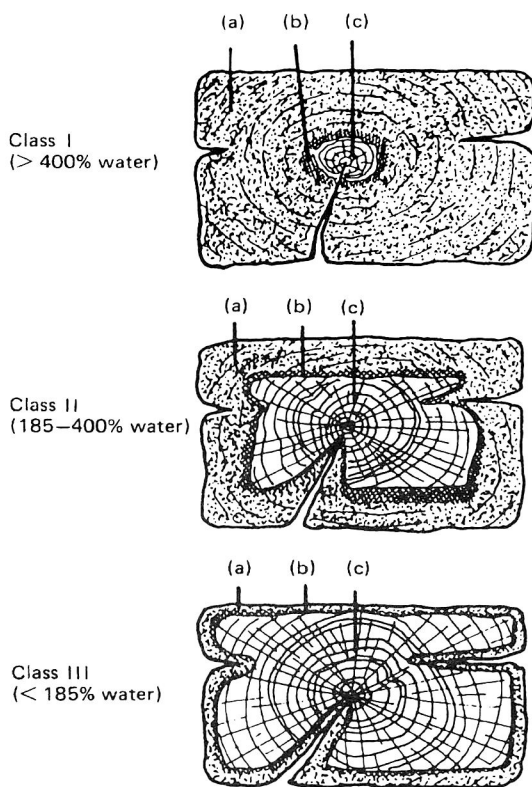


図1 出土木材の断面模式図(D.Grattan:1987)
Fig.1 An illustration of waterlogged wood

¹⁾ 奈良県森林技術センター、現 奈良県庁福祉部健康局健

康対策課:〒630-8501 奈良市登大路町30

²⁾ 奈良県立橿原考古学研究所:〒634-0065 奈良県橿原市畝傍町1

³⁾ 京都大学木質科学研究所、現 京都造形芸術大学:〒606-8271 京都市左京区北白川瓜生山2-116

キーワード:出土木材(waterlogged wood), 収縮(shrinkage), 劣化(deterioration), 含水率(moisture content), 実質率(solid substance volume rate)

指標に表され、含水率が高いほど収縮率も高いという傾向がある（たとえば、酒井：1991a, 高妻・沢田：1996）。しかし、含水率が同じであっても樹種によって収縮や変形の程度が異なることが経験的に知られている。また、図2に示したように（今津：1993）、樹種と含水率が異なると、寸法安定化に必要な薬液濃度も異なる。たとえば、木口面収縮率2%以下の寸法安定化処理をするためには、ラクチトールを用いた場合、最大含水率620%のケヤキ材に対しては薬液濃度を83%まで徐々に上昇させる必要があるが、最大含水率389%のヒノキ材に対しては薬液濃度を55%まで上昇させればよいことがわかる。さらに、含浸させる薬剤の性質（主に分子量の違い）によっても、必要な含浸時間や薬液濃度が異なる。たとえば、PEG # 4000を使用する場合、含浸処理中に木製品に収縮が生じることがある。この現象は、広葉樹材で含水率が300～500%程度の木製品にしばしば認められるが、含浸時間を極めて長くしたり（酒井：1990）、界面活性剤の併用（植田ら：1992）等で回避できる。一方、低分子の糖類を使用した場合にはこの現象はほとんど見られない（姜ら：1997）。

したがって、出土木材の保存処理を安全に行うには、部位ごとの含水率を正確に把握すること、樹種ごとに含水率と収縮率の関係を明らかにすること、さらに、これらの情報を元に保存処理方法を選択し、含浸時の薬液濃度の管理を行うことが必要である。

しかしながら、今のところ、部位ごとに異なる含水率を正確に把握する方法は少なく、出土木製

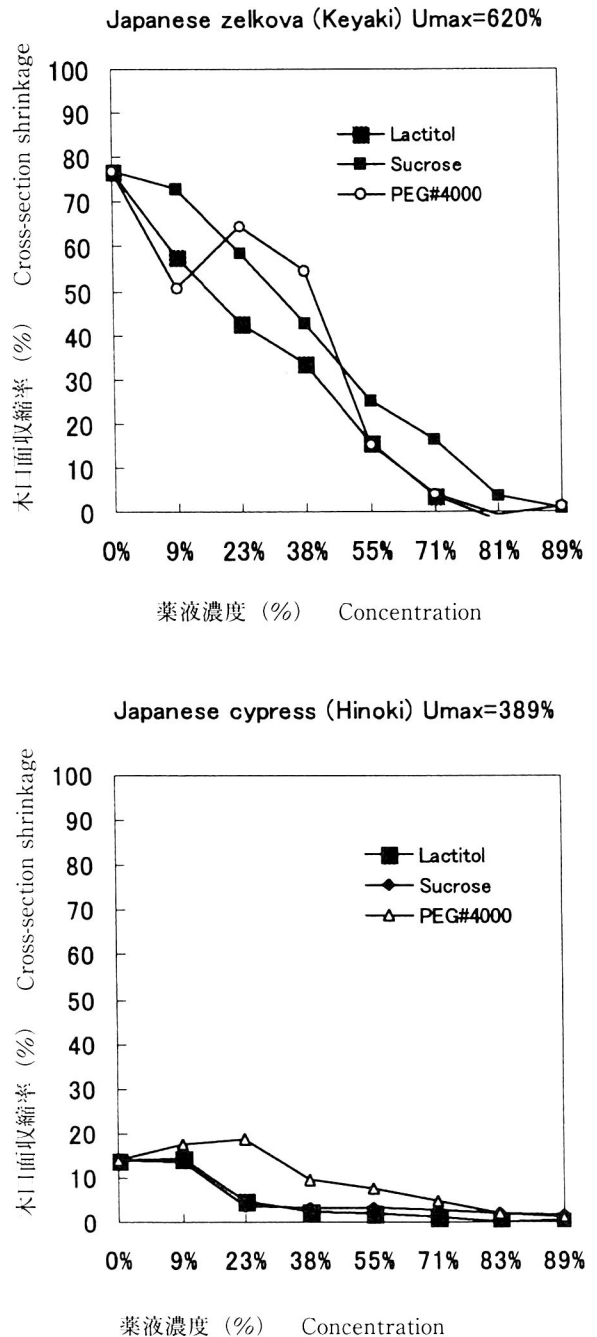


図2 薬液濃度の違いによる木口面収縮率の変化
(今津：1993)
Fig.2 Change of shrinkage of cross-cut section by difference of concentration

品に成長錘により直径数mmの孔を開けてサンプルを採取せざるを得ないこともある。また、樹種ごとの含水率と収縮率の関係についても資料が少ない。したがって、保存処理の事前調査は、樹種を同定したり、非破壊法ではあるが平均値で算出される方法で（松田・植田：1988）含水率を測定したりする程度で、処理方法は最終的には長年の経験から決定されることが多い。

出土木製品を保存処理しようとするとき、その木製品の劣化は内部まで均一なのか不均一なのか、図1のように不均一であるならば部位によって収縮率がどの程度異なるのか、含水率が同じでも樹種が違えば収縮率はどのくらい異なるのか、その木製品に十分な寸法安定性を付与するためにはどの薬剤を何%まで含浸させればよいのか。これらの疑問を明らかにし、適切な保存処理を行うための指針を確立することは、大変重要で緊急を要する課題である。しかも、その指針は、埋蔵文化財センター等における保存処理の実務において、事前調査の一環として活用できるものでなければならない。したがって、できるだけ簡易でかつ必要十分な内容であり、各地の研究者が同じ方法でデータを共有し蓄積できることが望まれる。

このような視点から、第1報目の今回は、出土木材の乾燥に伴う収縮率を測定し、樹種ごとに含水率と木口面収縮率の関係を再確認すると共に、収縮率を決定する因子について考察を行い、乾燥に伴う収縮率を事前に予測する1方法について提案を行う。

なお、本報の一部は、日本文化財科学会第14回大会(1997年 奈良)および第7回 ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference(1998年 Grenoble)で発表した。

表1 供試した出土木材
Table 1. Waterlogged woods used

| 樹種 Species | 試験体数 Numbers of Samples |
|---|-------------------------------|
| ヒノキ(科) Hinoki : <i>Chamaecyparis</i> sp. | 26 |
| マツ(二葉マツ) Matsu : <i>Pinus</i> sp. | 10 |
| モミ Momi : <i>Abies firma</i> Sieb. et Zucc. | 9 |
| コウヤマキ Kouyamaki : <i>Sciadopitys verticillata</i> Sieb. et Zucc. | 3 |
| スギ Sugi : <i>Cryptomeria japonica</i> D. Don | 8 |
| トチノキ Totinoki : <i>Aesculus turbinata</i> Blume | 12 |
| ケヤキ Keyaki : <i>Zelkova serrata</i> Makino | 23 |
| アカガシ(亜属) Akagashi : <i>Quercus</i> sp. | 18 |
| クリ Kuri : <i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc. | 23 |
| クスギ Kunugi : <i>Quercus acutissima</i> Carruth. | 7 |
| サクラ(亜属) Sakura : <i>Prunus</i> sp. | 4 |

2. 材料と方法

2.1 材料

材料として、日本各地の10カ所の遺跡から出土した木材を使用した。樹種は、ヒノキ(光学顕微鏡による観察で、正確な種の決定が困難であるため、本報ではヒノキ科の樹種をヒノキと称する)、マツ(本報ではアカマツおよびクロマツをマツと称する)、モミ、コウヤマキ、スギ、トチノキ、ケヤキ、アカガシ(本報ではアカガシ亜属に属する樹種をアカガシと称する)、クリ、クスギおよびサクラ(本報ではサクラ亜属に属する樹種をサクラと称する)で、針葉樹5種、広葉樹6種である。1樹種につき、数個体の木材から1辺が約20mm

の立方体の試験体を数個ずつ採取し、表1に示したように合計143体の試験体を使用した。

次に、予備実験として、試験体を水に浸せきさせた状態で倍体（容積0.064 m³）に入れ、真空ポンプ（排気量7.8 m³ / 時）とコンプレッサーにより、試験体内からできるだけ空気を除去し飽水状態に近づけるための方法を検討した。その結果、表2に示すように、試験体内から除去可能な空気を取り除くには約80hPaの減圧操作を15分間実施すればよいことがわかった。これにいくらかの余裕を加えて、本実験では、約80hPaの減圧操作を60分間実施し、試験体を飽水状態にした。この時の含水率を、本報では最大含水率と呼ぶ。なお、より高い減圧あるいは加圧下に置くと、試験体をより完全な飽水状態にできる可能性はあるが、劣化の著しい試験体に破損が生じる恐れがあるため、今回はこの条件を採用した。

表2 減圧および加圧操作による試験体の重量変化
Table 2 Change of weight of specimens (20 × 20 × 20mm) by process of vacuum or pressure.

| 樹種 Species | 最大含水率 moisture content (%) | 操作前重量に対する重量変化率(%)* Change of weight by process | | | | | |
|---------------|----------------------------------|---|-----------|-----------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | 減圧操作(80hPa) Process of vacuum | | | | 加圧操作(0.5MPa) Process of pressure | 加圧操作(1.2MPa) Process of pressure |
| | | 15分(min.) | 30分(min.) | 60分(min.) | 120分(min.) | 60分(min.) | 60分(min.) |
| ヒノキ Hinoki | 211 | 0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 0.2 | 0.8 |
| ヒノキ Hinoki | 320 | 1.5 | 1.5 | 1.3 | 1.3 | 0.9 | 0.9 |
| ヒノキ Hinoki | 320 | 2.2 | 1.2 | 1.1 | 1.1 | 2.0 | 1.1 |
| モミ Momi | 328 | 1.9 | 1.3 | -0.2 | 1.0 | 1.0 | 1.2 |
| マツ Matsu | 360 | 1.1 | 0.9 | 0.7 | 0.9 | 0.9 | 0.8 |
| マツ Matsu | 474 | 0.4 | 0.5 | -0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.1 |
| クスギ Kunugi | 556 | -0.4 | 0.1 | 0.2 | -0.1 | 0 | 0.1 |
| クリ Kuri | 587 | 0.9 | 0.1 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.4 |
| クスギ Kunugi | 591 | 0.7 | 0.9 | 0.2 | 0.6 | 0.5 | -0.1 |
| アカガシ Akagashi | 642 | -0.1 | 0 | -0.3 | -0.3 | 0 | -0.1 |

*：15分の減圧操作を行うことで、重量が増加する試験体があったが、長時間の減圧操作や加圧操作を実施しても、それ以上の重量増加は認められなかった。

2. 2 方法

2. 2. 1 乾燥に伴う収縮率の測定

試験体の木口面にステンレスのピンを接線方向と半径方向に立て、このピンを基準にノギスにより寸法を0.01mmの精度で測定した。その後105℃で48時間乾燥させ、シリカゲルを入れた密閉容器内で室温まで放冷した後に再度寸法を測定した。そして、式1~3により、接線方向収縮率 (β_t)、半径方向収縮率 (β_r) および木口面収縮率 (β_{cs}) を算出した。

なお、既往の研究の中には、乾燥に伴う収縮率を求める際に、飽水状態から自然乾燥を行ない、その後さらに105℃の乾燥を実施している例（たとえばA.Pournouら：1998, B.J.Barbour・L.Leney：1981）がある。そこで、予備試験として、この2方法で木口面収縮率を比較したところ、表3に示すように両者には大差がなかった。このため、本報では、迅速に結果が得られ、かつ繰り返し同じ条件で追加実験ができるように、飽水状態から105℃の乾燥を実施した。

$$\beta_t = \frac{l_{tg} - l_{to}}{l_{tg}} \times 100 (\%) \quad (\text{式1})$$

$$\beta_r = \frac{l_{rg} - l_{ro}}{l_{rg}} \times 100 (\%) \quad (\text{式2})$$

$$\beta_{cs} = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\beta_t}{100} \right) \times \left(1 - \frac{\beta_r}{100} \right) \right\} \times 100 (\%) \quad (\text{式3})$$

ここで、 l_{tg} は飽水時の接線方向の寸法、 l_{to} は全乾時の接線方向の寸法、 l_{rg} は飽水時の半径方向の寸法、 l_{ro} は全乾時の半径方向の寸法である。

表3 乾燥方法による木口面収縮率の違い

Table 3 Difference of shrinkage of cross section by natural drying at 30℃, oven drying at 105℃ or oven drying at 105℃ after natural drying at 30℃

| 樹種 Species | 試験体* Specimens | 最大含水率 Maximum moisture content (%) | 木口面収縮率 (%) Shrinkage of cross section | |
|------------------|-------------------|--|--|-------------------------------------|
| | | | 30℃乾燥** Natural drying at 30℃ | 105℃乾燥*** Oven drying at 105℃ |
| マツ Matsu | A | 183 | — | 9.2 |
| | B | 198 | 6.6 | 7.9 |
| ヒノキ Hinoki | A | 268 | — | 7.5 |
| | B | 258 | 6.2 | 8.0 |
| ヒノキ Hinoki | A | 396 | — | 39.5 |
| | B | 307 | 39.5 | 41.0 |
| クヌギ Kunugi | A | 428 | — | 64.3 |
| | B | 432 | 66.6 | 67.0 |
| クヌギ Kunugi | A | 467 | — | 69.8 |
| | B | 433 | 65.9 | 67.5 |
| アカガシ Akagashi | A | 466 | — | 70.0 |
| | B | 474 | 72.4 | 73.1 |
| クリ Kuri | A | 483 | — | 68.8 |
| | B | 486 | 68.3 | 69.6 |

*：繊維方向に連続した2つの試験体をA、Bとし、Aには飽水状態から105℃の乾燥を、Bには30℃で自然乾燥し恒量に達した後105℃の乾燥を行った。

**：30℃自然乾燥終了時点の含水率は6～9%であった。

***：飽水状態から105℃の乾燥を実施した場合と、自然乾燥後に105℃の乾燥を実施した場合は、木口面収縮率に大差はなかった。また、前者の方が値が大きくなることも小さくなることもあった。

2. 2. 2 最大含水率の測定

2. 2. 1の測定と同時に、最大含水率を求めた。105℃で48時間の乾燥工程の前後に、室温で試験体の重量を0.01gの精度で測定し、式4により最大含水率 (U_{max}) を算出した。

$$U_{max} = \frac{W_g - W_o}{W_o} \times 100 (\%) \quad (\text{式 4})$$

ここで、 W_g は飽水時の重量、 W_o は全乾時の重量である。

2. 2. 3 走査電子顕微鏡による観察

2. 2. 1および2. 2. 2で使用した一部の試験体と、繊維方向に隣接した部位から、接線方向約10mm、半径方向約10mmおよび繊維方向約1mmの観察用試片を飽水時に採取し、凍結乾燥後、両面テープで試料台に固定し、金蒸着を行い、木口面を走査電子顕微鏡(日立製 N-2250)により観察した。また、2. 2. 1および2. 2. 2で使用した全乾状態の試験体からも観察用試片を採取し、同様の方法で観察を行った。

3. 結果と考察

3. 1 最大含水率と木口面収縮率の関係

3. 1. 1 1個体内の変動

1個体から半径方向に最も多くの試験体が採取できたケヤキ材について、最大含水率と木口面収縮率の関係を図3に示した。図中の各点に付した数字は、樹皮直下から髄に向けて、半径方向に20mmの間隔で採取した試験体の位置を表している。心材辺材を問わず、各点は1本の滑らかな曲線上に位置した。他の個体についても同様の結果が得られた。

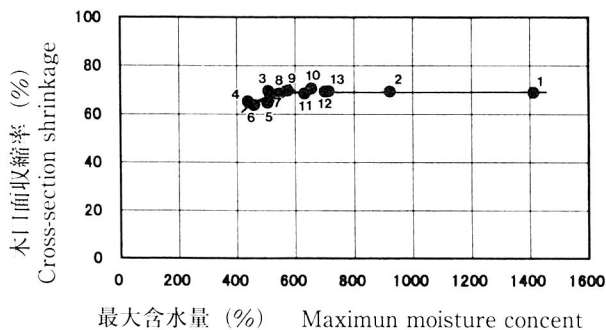


図3 最大含水率と木口面収縮率の関係
(ケヤキ材1個体内における変動)

Fig.3 Relationships between maximum moisture content and cross-section shrinkage for keyaki wood. 13 samples obtained from the same origin.

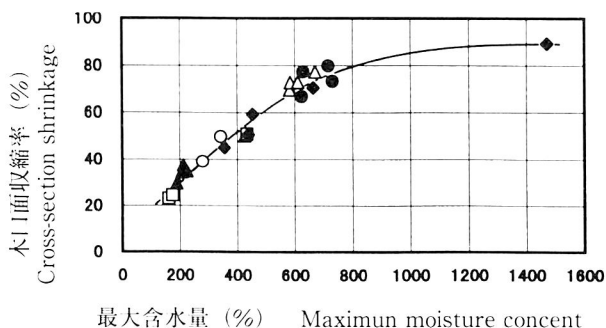


図4 最大含水率と木口面収縮率の関係
(クリ材6個体内における変動)

Fig.4 Relationships between maximum moisture content and cross-section shrinkage for kuri wood. 23 samples obtained from 6 different origins.

3. 1. 2 1樹種内の変動

例として、クリ材の6個体について、

最大含水率と木口面収縮率の関係を図4に示した。ここでは、1個体から2～6個の試験体を採取し、結果を個体ごとに記号を変えて表した。いくらかのばらつきはあるものの、出土した場所や埋没年代の異なる6個体の結果は、1本の滑らかな曲線上に位置した。他の樹種についても同様の結果が得られた。

3. 1. 3 11樹種の最大含水率と木口面収縮率の関係

測定を行った11樹種の出土木材について、最大含水率と木口面収縮率の関係を図5に示した。ここでは、最大含水率に対して木口面収縮率が高い樹種の代表としてアカガシを、木口面収縮率が低い樹種の代表としてモミを、またその中間に位置する樹種としてトチノキを選び、樹種ごとに曲線を示した。また、11樹種の現在の健全材についても、文献(日本材料学会木質材料部門委員会:1982)から得られた平均的な接線方向および半径方向の収縮率から式3により算出された木口面収縮率と、平均的な比重から式5によって算出された最大含水率(U_{max})の関係を、*印を付けて同じ図中に示した。

$$U_{max} = 28 + \frac{1 - \rho / 1.50}{\rho} \times 100 (\%) \quad (式5)$$

ここで、 ρ は木材の比重で、水の比重は1.00、木材の真比重は1.50と仮定した。

図5には多くの点を示したために健全材の位置がわかりにくい、いずれの健全材の値も、最大

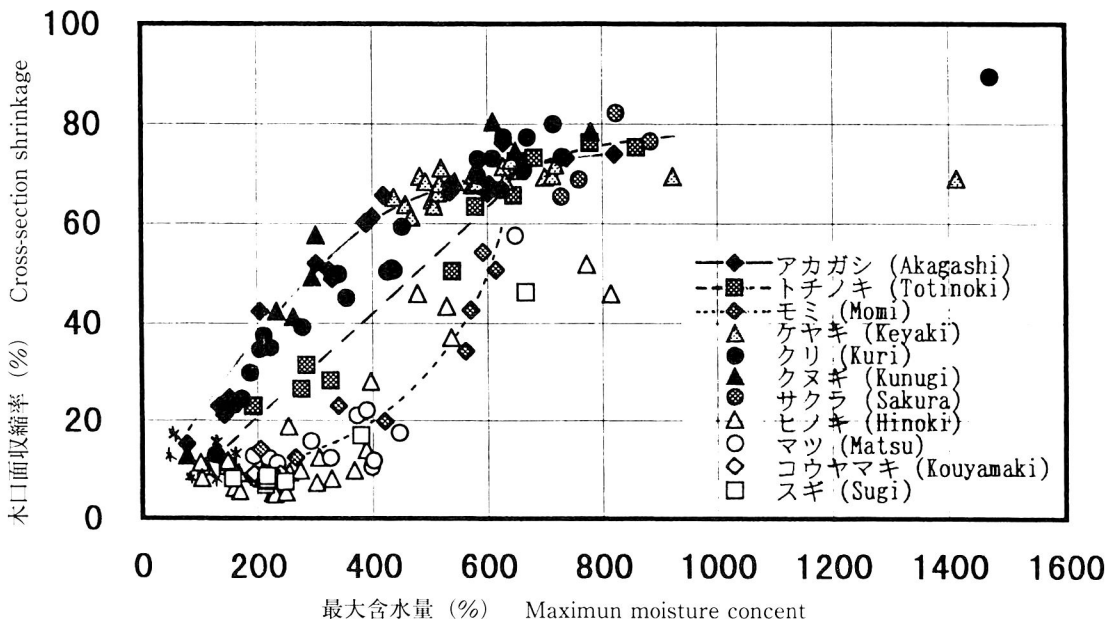


図5 最大含水率と木口面収縮率の関係 (11樹種) *は健全材

Fig.5 Relationships between maximum moisture content and cross-section shrinkage for 11 species.

Note: * were the data of sound woods.

含水率50～150%，木口面収縮率8～17%に位置しており，比重が高く最大含水率が低い樹種ほど，木口面収縮率は高い傾向にあった。また，出土木材の3曲線上に，それぞれの健全材の値がほぼ位置していた。

次に，出土木材に注目すると，いずれの樹種においても，劣化が進行し最大含水率が高くなると木口面収縮率は増加したが，樹種間で比較すると，最大含水率が同じでも木口面収縮率は大きく異なった。たとえば，低い最大含水率領域では，アカガシは最大含水率の増加に伴って木口面収縮率が急激に増加するが，モミは緩やかに増加するため，最大含水率が400%の時の木口面収縮率は，約60%と20%であった。今回検討した範囲では，最大含水率が同じであれば，健全時の比重が大きい樹種ほど，また広葉樹材は針葉樹材よりも，木口面収縮率が大きい傾向にあった。

3. 2 最大含水率の増加に伴う細胞壁の変化および乾燥による収縮の様子

図6に最大含水率の異なるアカガシ4試片について，また図7にモミ3試片について，凍結乾燥後の木口面の様子を示した。まず，アカガシについてであるが，最大含水率約200%の試片では，黒矢印で示すように，多くの細胞壁で2次壁が劣化し，ポーラスな状態となり内腔への収縮も見ら

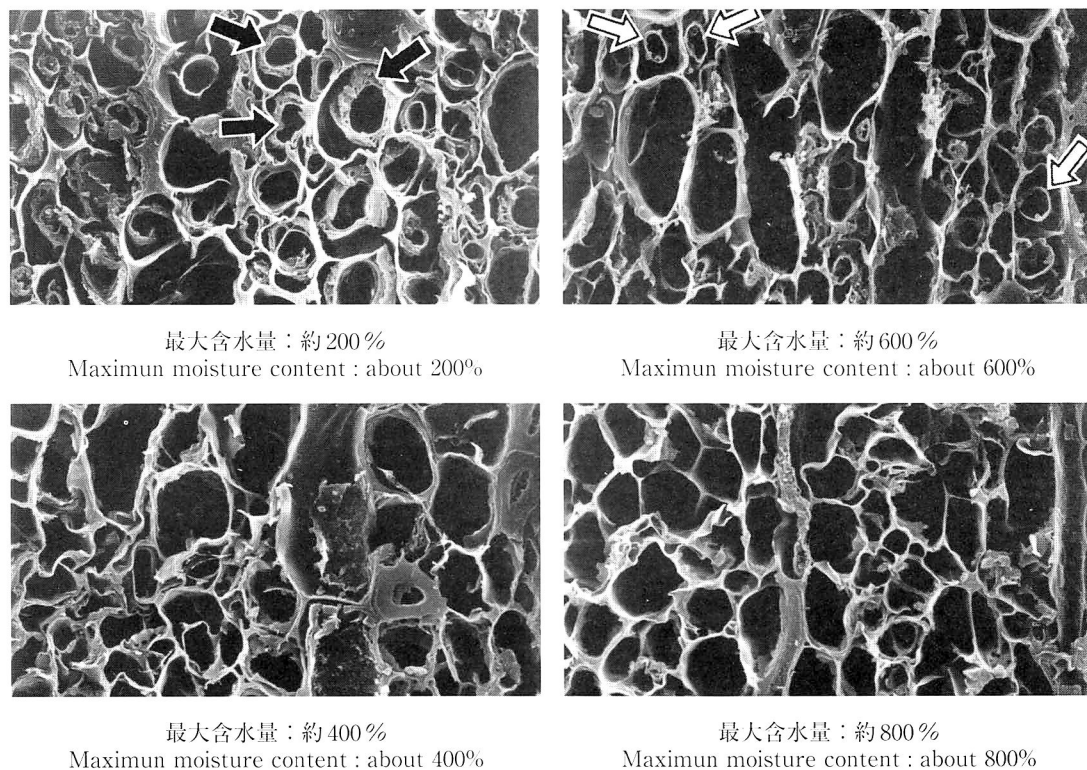
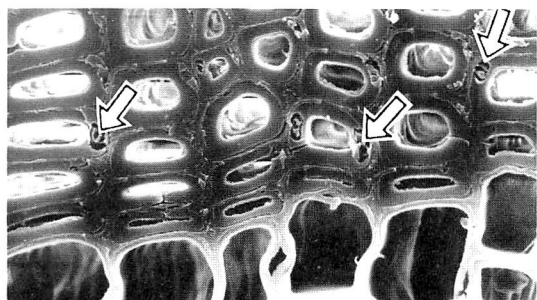
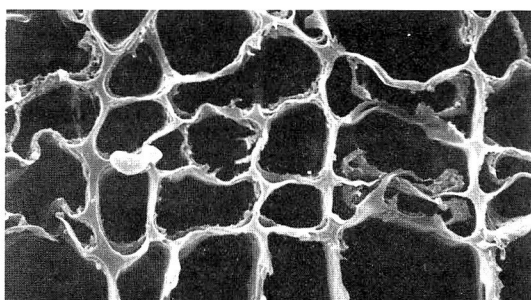


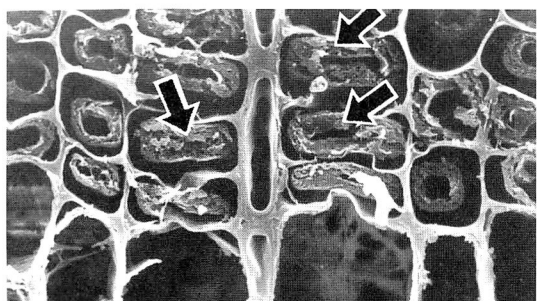
図6 木口面で観察したアカガシ材の細胞壁の様子（凍結乾燥試料）
Fig.6 Scanning electron micrographs of cross sections of freeze-dried akagashi wood.



最大含水量：約 200%
Maximum moisture content : about 200%



最大含水量：約 600%
Maximum moisture content : about 600%



最大含水量：約 400%
Maximum moisture content : about 400%

図7 木口面で観察したモミ材の細胞壁の様子
(凍結乾燥試料)

Fig.7 Scanning electron micrographs of cross sections of freeze-dried momi wood.

れた。続いて、最大含水率約400あるいは600%の試片では、ほぼ健全な細胞もわずかに残存しているものの、多くの細胞壁で2次壁中層がさらに劣化を受けて消失し、白矢印で示すように、2次壁内層だけが残る状態に移行した。さらに、最大含水率約800%の試片では、2次壁内層も劣化により消失し、1次壁や中間層だけが残存している箇所も観察された。一方、モミについてであるが、最大含水率約200%の試片では、細胞壁のところどころで、白矢印で示すように2次壁に劣化による小孔が観察され、また最大含水率約400%の試片では、黒矢印に示すように、多くの細胞壁が劣化によりポラスな状態であった。さらに、最大含水率約600%の試片では、劣化した2次壁が消失し、1次壁や中間層だけが残存する状態へと移行した。以上で説明した最大含水率の増加にともなう劣化形態の変化については、既往の研究結果（酒井：1991b）と類似していた。

また、図6および7を比較すると、同じ最大含水率でも細胞壁の劣化状態はアカガシとモミで大きく異なった。たとえば、最大含水率が約200%の材を比べると、アカガシでは多くの細胞壁で劣化がすでに進行していたが、モミでは劣化部位はわずかししか観察されなかった。むしろ、アカガシで最大含水率約200%の材の劣化状態は、多くの細胞壁で2次壁がポラスになっているという点で、モミの最大含水率約400%の材に近いことがわかる。このように、最大含水率は、同一樹種内では劣化の程度の指標になるが、細胞壁の劣化形態から考えると、異樹種間では劣化の程度の正確な指標にはならない。

一方、自然乾燥後の木口面の様子を図8に示した。ここでは、アカガシで最大含水率約400%の材について例示した。この材は、図6に示した最大含水率約400%の材と繊維方向に連続していたので、両者を比較することで自然乾燥によって生じる細胞の変形状況を知ることができる。凍結乾燥試片からは、多くの細胞壁が劣化によりポーラスな状態になり一部では2次壁中層が消失したことがわかったが、自然乾燥試片では、それらの劣化した細胞に大きな変形が生じたことがわかる。同様の結果は、B.J.Baubourらによっても報告され

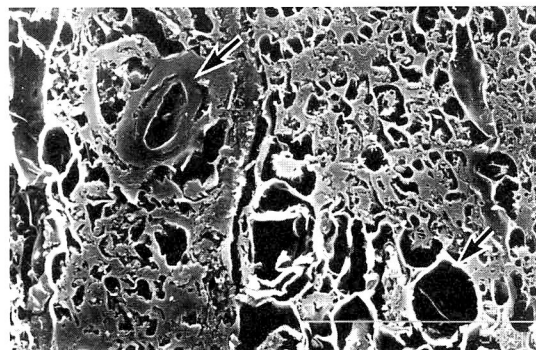


図8 木口面で観察したアカガシ材の細胞壁の様子
(自然乾燥試料, 最大含水率約400%)
Fig.8 Scanning electron micrographs of cross sections of natural-dried akagashi wood. The maximum moisture content was about 400%.

ている (B.J.Barbour・L.Leney:1981)。一方、矢印で示したように、細胞壁がほぼ健全な細胞は自然乾燥を行っても形状を維持していた。出土木材の乾燥に伴う収縮は、細胞壁の収縮、すなわち細胞壁中の一時空隙に含まれていた水がなくなることで細胞壁の厚みが減少することと、細胞壁の内腔側への落ち込み、すなわち乾燥時の水の表面張力に耐えきれない細胞壁が、内腔をうめるように変形することで生じることが、今までにも指摘されてきた。前者は健全材においても生じるが、図6と図8の比較により後者は劣化により強度が低下した細胞壁において多く発生すると考えられる。

3. 3 収縮率を決定する因子

乾燥に伴う収縮の中で、細胞壁の収縮に由来する木口面収縮率は、今日までの報告によると、20%以下と考えられている (酒井:1991a, Kohdzumaら:1996)。したがって、これ以上の収縮は、細胞壁の内腔側への落ち込みに由来しており、劣化により、細胞壁の強度が低下し、乾燥時の水の表面張力に耐えきれなくなった細胞壁が、どの程度増加したかに関連があると推定される。

そこで、図6および7に示したように、劣化により細胞壁の2次壁がポーラスになったり消失したりすること、すなわち劣化により細胞壁実質の量が減少することに注目し、収縮率は含水率よりも実質率により高い関連があると考え、式6により図5の横軸を最大含水率 (U_{max}) から実質率 (S_w) に変換した。その際、細胞壁の内腔側への落ち込みに注目するために、実質率は一時空隙を含まない乾燥状態の体積換算とした。その結果を図9に示し、図5と同様に、アカガシ、トチノキおよびモミについて曲線を示した。

$$S_w = \frac{100 / 1.50}{U_{max} - 28 + 100 / 1.50} \times 100 (\%) = \frac{66.7}{U_{max} + 38.7} \times 100 (\%) \quad (式6)$$

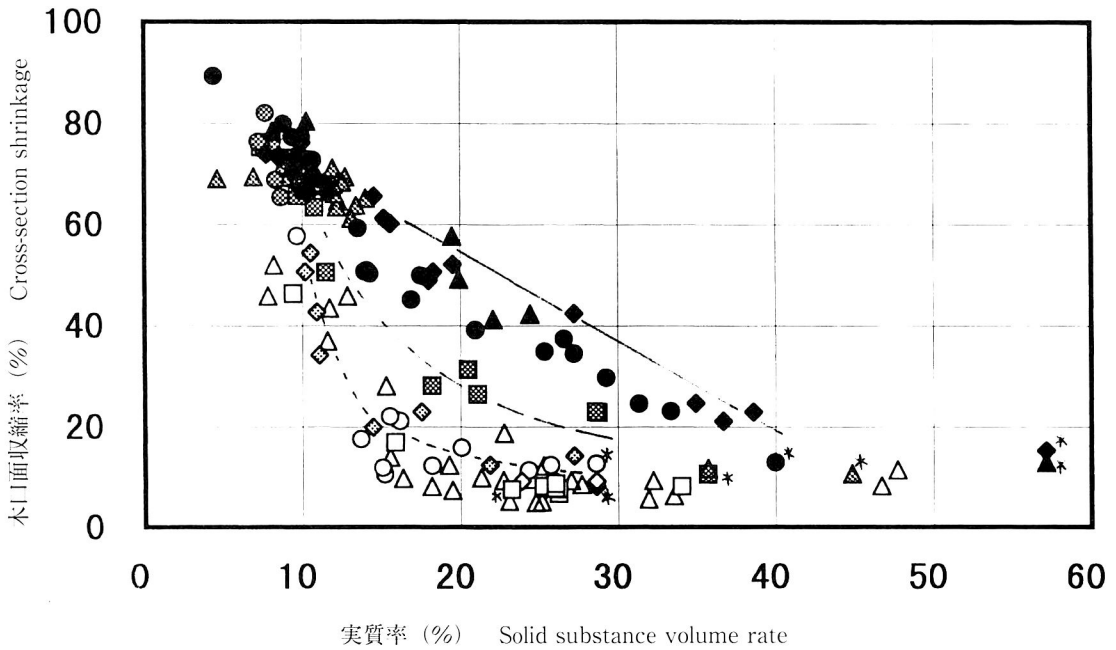


図9 実質率(乾燥状態の体積換算)と木口面収縮率の関係 図中の記号は図5と同じ
 Fig.9 Relationships between solid substance volume rate and cross-section shrinkage for 11 species.

ここで、 U_{max} は最大含水率、出土木材も健全材と同じく繊維飽和点の含水率は28%、真比重は1.50であると仮定した。

すでに松田が実質率と収縮率の関係について(松田:1994)、また高妻が空隙率(=100-実質率)と収縮率の関係について検討し(高妻・沢田:1996)、同一樹種間では両者に高い関連があることを指摘している。図9からも、実質率の低下に伴って木口面収縮率が増加することがわかる。しかし、この図においても樹種間の差が著しい。

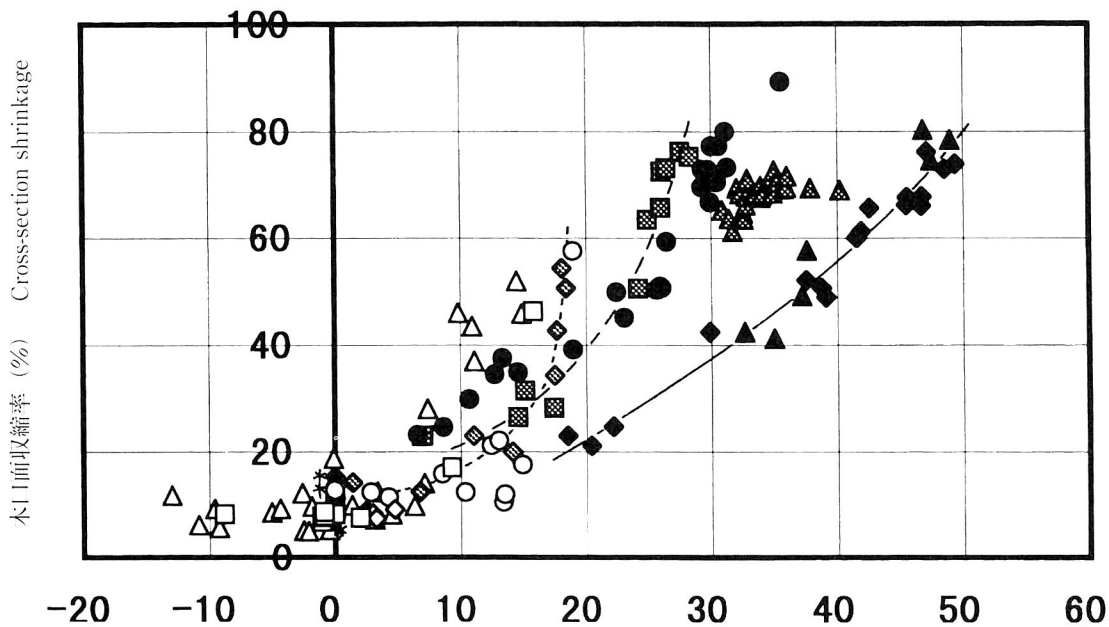
次に、健全材の実質率が樹種によって元来異なることを考慮して、図5の横軸を、図10では式7により劣化による細胞壁実質の体積減少量(S_d)に、さらに図11では式8により劣化による細胞壁実質の体積減少率(S_{lr})に変換した。そして、図5および9と同様に、アカガシ、トチノキおよびモミについて曲線を示した。その結果、図10では樹種間の差が著しいが、図11では、3曲線はかなり一致し、樹種による差が小さいことが明らかになった。

$$S_d = S_i - S_w \quad (\%) \quad (\text{式7})$$

$$S_{lr} = (1 - S_w / S_i) \times 100 \quad (\%) \quad (\text{式8})$$

ここで、 S_i は健全材の実質率、 S_w は出土材の実質率で、いずれも乾燥状態の体積換算である。

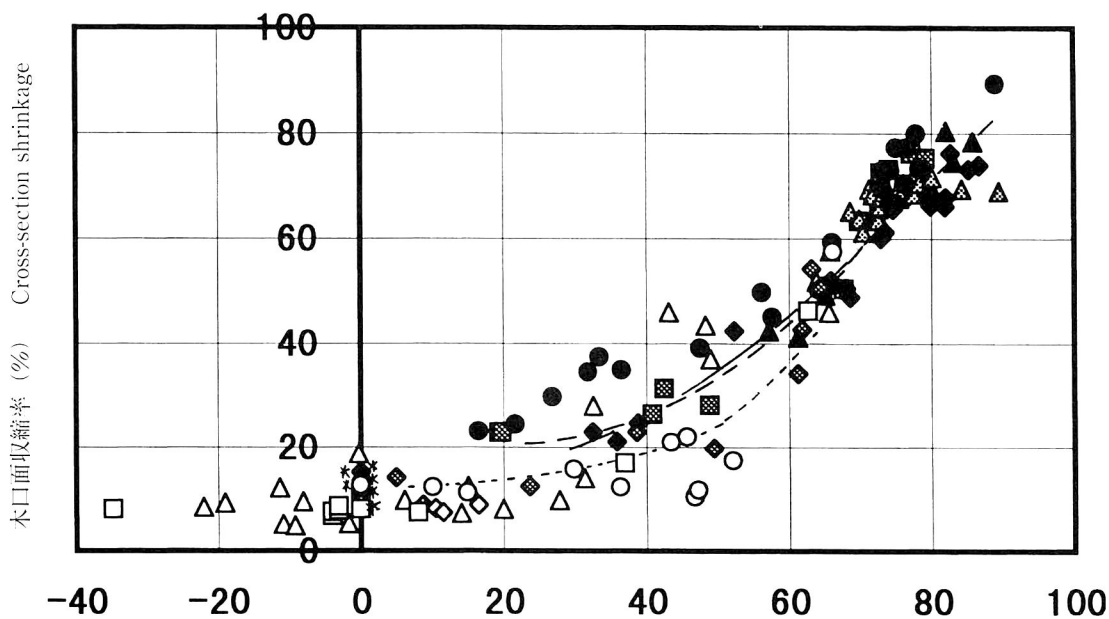
図11によると、いずれの樹種においても、健全材の細胞壁実質の約20%が失われるまでは、木口面収縮率は20%以下で健全時とほぼ同じであり、乾燥に伴う細胞壁の落ち込みはほとんど生じ



劣化による細胞壁実質の体積減少量 (%) Loss of substance volume rate by deterioration

図10 劣化による細胞壁実質の体積減少量と木口面収縮率の関係 図中の記号は図5に同じ
Fig.10 Relationships between loss of solid substance volume rate by deterioration and cross-section shrinkage for 11 species.

Note : Symbols were the same as those in Fig.5.



劣化による細胞壁実質の体積減少率 (%) Loss rate of substance volume rate by deterioration

図11 劣化による細胞壁実質の体積減少率と木口面収縮率の関係 図中の記号は図5に同じ
Fig.11 Relationships between loss rate of solid substance volume rate by deterioration and cross-section shrinkage for 11 species.

Note : Symbols were the same as those in Fig.5.

ないと考えられる。一方、細胞壁実質の体積減少率が約20%以上になると、木口面収縮率も増加し、特にこの減少率が50%以上の領域では、木口面収縮率は直線的に増加している。

そこで、細胞壁実質の体積減少率 (S_{lr}) に応じて、3領域に分けて木口面収縮率 (β_{cs}) を簡易な数式で表すと、

$$S_{lr} < 20 \text{ ならば, } \beta_{cs} \leq 20 \quad (\text{式9})$$

$$20 \leq S_{lr} < 50 \text{ ならば, } 10 \leq \beta_{cs} \leq 40 \quad (\text{式10})$$

$$S_{lr} \geq 50 \text{ ならば, } \beta_{cs} = 1.4S_{lr} - 40 (\pm 10) \quad (\text{式11})$$

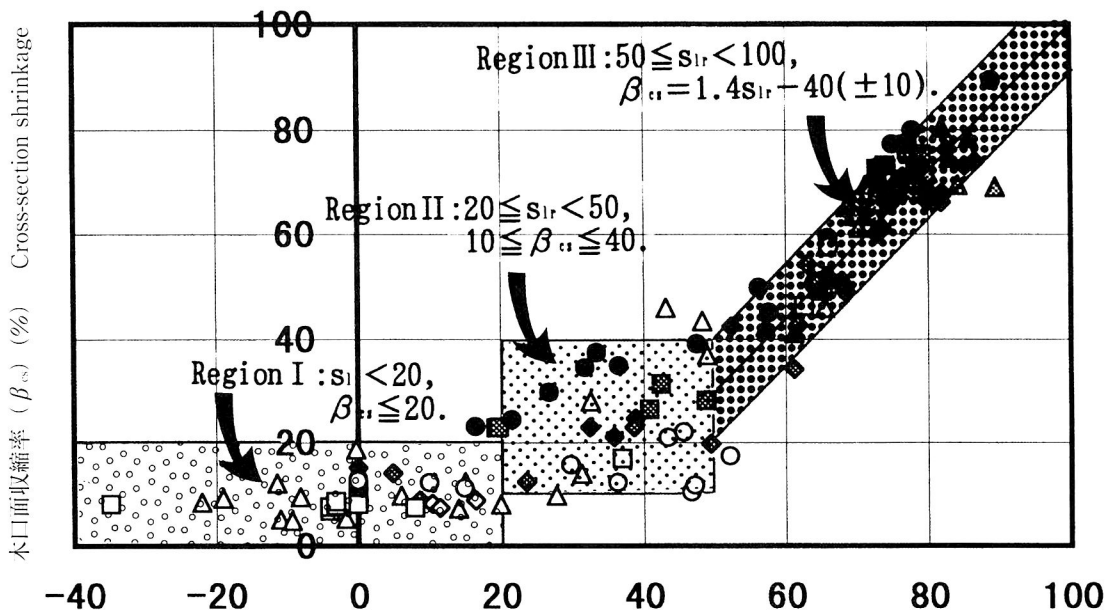
さらに、図12では、図11に示した実験値と式9～11の範囲を同時に示した。実験値の内では数点はこの範囲外に位置したが、残りの大多数はこの範囲内に位置していた。また、高妻らが示したケンボナシ（健全材の実質率は38%）（高妻・沢田：1996）についても、細胞壁実質の体積減少率と収縮率の関係はこの範囲に位置していた。

ここで、図12を利用して木口面収縮率 (β_{cs}) を求める際の手順を整理すると、

①出土木材の実質率 (S_w) の算出

式6を用いる。ここでは、現在、劣化程度の指標としてもっとも一般的に使用されている最大含水率から、実質率を算出する方法を示した。

②出土木材と同じ樹種の健全材の実質率 (S_r) の確認



劣化による細胞壁実質の体積減少率 (S_{lr}) (%) Loss rate of substance volume rate by deterioration

図12 劣化による細胞壁実質の体積減少率と木口面収縮率の関係 図中の記号は図5に同じ
Fig.12 Relationships between loss rate of solid substance volume rate by deterioration and cross-section shrinkage for 11 species.

Note : Symbols were the same as those in Fig.5.

表4 主要な日本国産材（健全材）の平均的な比重と実質率（全乾体積当たり）
 （日本材料学会木質材料部門委員会：1982）

Table 4. Specific gravities and solid volumes of main Japanese woods(sound woods).

| 比重 Specific gravity | 実質率 Solid volume (%) | 主要な樹種 Species | |
|---------------------------|----------------------------|--|---|
| | | 針葉樹材 Soft wood | 広葉樹材 Hard wood |
| 0.27 | 18 | シラベ (<i>Abies veitchii</i> Lindl.) | キリ (<i>Paulownia tomentosa</i> Steud.) |
| 0.31 | 20 | サワラ (<i>Chamaecyparis pisifera</i> Endl.) | |
| 0.35 | 23 | スギ (<i>Cryptomeria japonica</i> D. Don) トマツ (<i>Abies sachalinensis</i> Mast.) ネズコ (<i>Thuja standishii</i> Carr.) | |
| 0.4 | 27 | アスナロ (<i>Thujopsis dolabrata</i> Sieb. et Zucc.) エゾマツ (<i>Picea jezoensis</i> Carr.) コウヤマキ (<i>Sciadopitys verticillata</i> Sieb. et Zucc.) トウヒ (<i>Picea jezoensis</i> Carr. var. <i>hondoensis</i> Rehd.) ヒノキ (<i>Chamaecyparis obtusa</i> Endl.) ヒメコマツ (<i>Pinus parviflora</i> Sieb. et Zucc.) モミ (<i>Abies firma</i> Sieb. et Zucc.) | コシアブラ (<i>Acanthopanax sciadophylloides</i> Fr. et Sav.) サワグルミ (<i>Pterocarya rhoifolia</i> Sieb. et Zucc.) ドロノキ (<i>Populus maximowiczii</i> Henry) |
| 0.45 | 30 | カラマツ (<i>Larix leptolepis</i> Gordon) チョウセンゴヨウ (<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.) ツガ (<i>Tsuga sieboldii</i> Carr.) トガサワラ (<i>Pseudotsuga japonica</i> Beissn.) | カツラ (<i>Cercidiphyllum japonicum</i> Sieb. et Zucc.) キハダ (<i>Phellodendron amurense</i> Rupr.) シナノキ (<i>Tilia japonica</i> Simonkia) ホオノキ (<i>Magnolia obovata</i> Thunb.) ヤマナラシ (<i>Populus sieboldii</i> Miquel) |
| 0.5 | 34 | アカマツ (<i>Pinus densiflora</i> Sieb. et Zucc.) イチイ (<i>Taxus cuspidata</i> Sieb. et Zucc.) イチヨウ (<i>Ginkgo biloba</i> Linn.) イヌマキ (<i>Podocarpus macrophylla</i> D. Don) カヤ (<i>Torreya nucifera</i> Sieb. et Zucc.) クロマツ (<i>Pinus thunbergii</i> Parl) ナギ (<i>Podocarpus nagi</i> Zoll. et Moritzi) | オニグルミ (<i>Juglans mandshurica</i> Maxim. subsp. <i>sieboldiana</i> Kitamura) クスノキ (<i>Cinnamomum camphora</i> Presl) シオジ (<i>Fraxinus spaethiana</i> Lingelsh.) シダレヤナギ (<i>Salix babylonica</i> Linn.) トチノキ (<i>Aesculus turbinata</i> Blume) ハリギリ (<i>Kalopanax pictus</i> Nakai) ハンノキ (<i>Alnus japonica</i> Steudel) ミズキ (<i>Cornus controversa</i> Hemsley) ヤチダモ (<i>Fraxinus mandshurica</i> Rupr. var. <i>japonica</i> Maxim.) |
| 0.57 | 38 | | イスエンジュ (<i>Maackia amurensis</i> Rupr. et Maxim. subsp. <i>buergeri</i> Kitamura) エノキ (<i>Celtis sinensis</i> Persoon) クリ (<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc.) シラカンバ (<i>Betula platyphylla</i> Sukatchev var. <i>japonica</i> Hara) スタジイ (<i>Castanopsis cuspidata</i> Schottky var. <i>sieboldii</i> Nakai) ハルニレ (<i>Ulmus davidiana</i> Planch. var. <i>japonica</i> Nakai) ヤマグワ (<i>Morus australis</i> Poirer) ヤマザクラ (<i>Prunus jamasakura</i> Sieb. ex Koidz.) |
| 0.64 | 43 | | アオダモ (<i>Fraxinus lanuginosa</i> Koidz.) イタヤカエデ (<i>Acer mono</i> Maxim. subsp. <i>marmoratum</i> Kitamura) ウダイカンバ (<i>Betula maximowicziana</i> Regel) エゴノキ (<i>Styrax japonica</i> Sieb. et Zucc.) ケヤキ (<i>Zelkova serrata</i> Makino) タブノキ (<i>Machilus thunbergii</i> Sieb. et Zucc.) ブナ (<i>Fagus crenata</i> Blume) ミズナラ (<i>Quercus mongolica</i> Fisch var. <i>grosseserrata</i> Rehd. et Wils) ムクノキ (<i>Aphananthe aspera</i> Planch.) |
| 0.72 | 48 | | アサダ (<i>Ostrya japonica</i> Sarg.) クマシデ (<i>Carpinus japonica</i> Blume) コナラ (<i>Quercus serrata</i> Murray) ツゲ (<i>Buxus microphylla</i> Sieb. et Zucc. <i>japonica</i> Rehd. et Wils.) トネリコ (<i>Fraxinus japonica</i> Blume) |
| 0.82 | 54 | | ミズメ (<i>Betula grossa</i> Sieb. et Zucc.) アカガン (<i>Quercus acuta</i> Thunb.) イスノキ (<i>Distylium racemosum</i> Sieb. et Zucc.) クスギ (<i>Quercus acutissima</i> Carruth.) シラカシ (<i>Quercus myrsinaefolia</i> Blume) |

表4を用いる。表4では、様々な日本国産樹種について健全材の平均実質率 (S_i) を示した。ここでは、文献に示された健全材の平均気乾比重 (日本材料学会木質材料部門委員会：1982) を全乾比重に変換し、その値を真比重1.50で除して算出した。

③細胞壁実質の体積減少率 (S_{ir}) の算出

式8に、出土木材の実質率 (S_w) と健全材の実質率 (S_i) を代入する。

④木口面収縮率 (β_{cs}) の算出

細胞壁実質の体積減少率 (S_{ir}) が図12のI～IIIのどの領域に該当するかを確認し、式9～11により木口面収縮率 (β_{cs}) を算出する。

なお、図11および12の点にはいくらかのちらばりがあり、横軸の数値が0以下の場合もあるが、この理由として、①埋没中に出土木材内へ土壌成分が流入した、②劣化により真比重は変化するが (高妻・沢田：1996, Kohdzumaら：1996, 高妻：1992)、ここでは真比重を健全材と同じ1.50と仮定した、③ここで使用した健全材の実質率は文献に示された現在の木材の平均実質率であり、個々の劣化前の実質率は不明である、④木口面で測定した収縮率は乾燥時の割れや反り等で測定誤差を含んでいる、⑤一部の試験体の最大含水率は、今回の方法では未飽和の状態では測定された可能性がある等が考えられる。これらは、試験材料が出土木材であるが故の避けられない誤差といえる。また、樹種による細胞の組織構造の違いが、図11および12におけるばらつきの1因である可能性も考えられるが、この点については今後の検討課題である。

さらに、ここで求めた細胞壁実質の体積減少率は、出土木材の真比重が健全材と同じであると仮定すると、健全時から劣化によって生じた重量減少率と数値的に等しくなる。木材利用の立場から、劣化による重量減少率と木材の強度の関係が検討されているが、たとえば図13に示すように (藤平ら：1997)、重量減少率の増加と共に強度は低下し、重量減少率が20%付近で強度は健全時の10%程度になっている。一方、図11および12に示したように、木口面収縮率は細胞壁実質の体積減少率、すなわち重量減少率が20%付近から増加し始める。強度の低下と収縮量の増加には関連があると予想され興味深い。

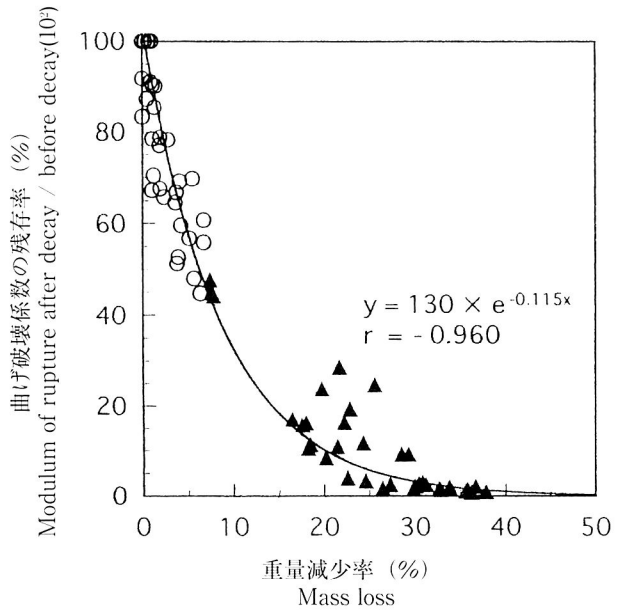


図13 人工的に腐朽させたスギ材の重量減少率と曲げ破壊係数の残存率の関係 (供試菌は褐色腐朽菌の1種であるオオウズラタケ) (藤平ら：1997)

Fig.13 Relationships between the mass losses and the ratios of moduli of rupture of sugi specimens decayed by *T. palustris*.

4. まとめ

日本国内で発掘された11樹種の出土木材を用いて、最大含水率と木口面収縮率の関係を求めたところ、得られる曲線は樹種によって大きく異なった。出土木材の乾燥に伴う収縮が、細胞壁の収縮と共に細胞壁の内腔への落ち込みに由来することから、劣化による細胞壁実質の体積減少率との関係を検討したところ、樹種を問わず両者の間には高い関連があった。そして、図12に示すように、両者の関係は3領域に分けて簡易な数式で表現できた。したがって、出土木材の含水率から実質率を算出し(式6)、さらにその樹種の健全材の実質率を表4から求めれば、式8の細胞壁実質の体積減少率から、乾燥に伴う木口面収縮率を予測することが可能になった(図12)。

この方法による木口面収縮率の予測は、出土頻度が低い樹種で、最大含水率と収縮率の関係が未知である場合に、特に有効である。出土木製品の保存処理の事前調査で、たとえば、その樹種がコシアブラで含水率が500%であることがわかった場合、式6より出土材の実質率(S_a)は13%、表4より健全材の実質率(S_0)は27%、これらを式8に代入して、細胞壁実質の体積減少率(S_{ra})は52%。これは図12において、Ⅲの領域にあるため、木口面収縮率(β_{sa})は $33 \pm 10\%$ と予測できる。

さらに、保存処理の事前調査で、木製品の細胞壁実質の体積減少率が20%以下であることがわかれば、木口面収縮率は20%以下と小さいことから、含浸させる薬剤の濃度は高くまで上昇させる必要がなく、含浸期間も短くできる可能性がある。一方、木製品の細胞壁実質の体積減少率が50%以上であることがわかれば、その値が高いほど収縮率は高く、寸法を安定させるために十分な濃度の薬剤が必要となる。細胞壁実質の体積減少率あるいは木口面収縮率と、その木製品に適した保存処理のスケジュールを明らかにすることが、今後の課題である。

ただし、本方法により収縮率を予測するためには、含水率を測定する必要がある。空中重量と水中重量から含水率を算出する場合(松田・植田：1988)、非破壊で測定が可能であるが、大型木製品での測定は困難であり、さらに木製品全体の平均的な含水率しか算出できない。多くの出土木製品に見られるように、表面と内部で劣化の程度が異なる場合には(図1)適さない方法である。一方、木製品から成長錘で試料を採取し、表面から内部に向かって部位ごとに乾燥前後の重量を測定し含水率を算出すれば、表面から内部までの劣化の程度を知ることができる。しかし、この方法では木製品の一部を破壊することになる。また、その樹種の健全材の実質率を知るためには、あらかじめ樹種の鑑定が必要であり、そのためにもごく少量ではあるが、木製品から試料を切り出し顕微鏡で観察しなければならない。

以上の作業は高度な技術を必要としないが、保存処理の現場では、一部を破壊するという点で、あるいは設備のもしくは技術的な面で実施が困難な場合もありうる。そこで、次報では、出土木材に針を刺し、その時の抵抗力から最大含水率あるいは細胞壁実質の体積減少率を算出するという、より簡便でダメージの少ない方法により、乾燥に伴う収縮率の予測を行う。

(2000. 7. 18受理)

引用文献

- 今津節生 (1993) 考古学と自然科学 28 : 77-95
- 植田直見・井上美知子・増澤文武 (1992) 材料 41 (461): 148-152
- 姜愛慶・酒井温子・今津節生・今村祐嗣・朴相珍 (1997) 木材学会誌 43 (6): 504-512
- 高妻洋成 (1992) 日本文化財科学会第9回大会研究発表要旨集 : 16-17
- 高妻洋成・沢田正昭 (1996) 日本文化財科学会第13回大会研究発表要旨集 : 24-25
- 酒井温子 (1991a) 元興寺文化財研究 37 : 2-8
- 酒井温子 (1991b) 木材学会誌 37 (4): 363-369
- 酒井温子 (1990) 元興寺文化財研究 34 : 3-12
- 日本材料学会木質材料部門委員会 (1982) 木材工学辞典. 工業出版. pp. 752-753
- 藤平真紀子・中村嘉明・磯田憲生・疋田洋子 (1997) 木材学会誌 43 (7): 589-594
- 松田隆嗣・植田直見 (1988) 古文化財科学会第5回要旨集 : 54-55
- 松田隆嗣 (1994) 第16回古文化財科学研究会大会講演要旨集 : 34-35
- B. J. Barbour, L. Leney (1981) Proceedings of the ICOM Waterlogged Wood Working Group Conference (Ottawa 1981): 209-225
- D. Grattan (1987) "Waterlogged wood, Conservation of Marine Archaeological Objects" Colin Pearson (Editor), Butterworths : 55-67
- Y. Kohdzuma, K. Minato and Y. Katayama (1996) Mokuzai Gakkaishi. 42 (7): 681-687
- A. Pournou, S. T. Moss, A. M. Jones (1998) Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference (Grenoble 1998): 104-109

Estimations of Shrinkage of Waterlogged Wood Accompanying its Drying (I)

Haruko SAKAI ¹⁾, Setsuo IMAZU ²⁾, Misao YOKOYAMA ³⁾

¹⁾ Nara Forest Research Institute, Takatori-cho, Tataichi-gun, Nara 635-0133

²⁾ Kashihara Archaeological Institute, Unebi-cho, Kashihara-shi, Nara 634-0065

³⁾ Kyoto University of Art and Design, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 606-8271

To estimate the degree of shrinkage of waterlogged wood accompanying its drying, the determining factor was examined with the experimental data.

Relations between maximum moisture content and cross-section shrinkage for one species obtained from the same origin were shown in fig.3 and from 6 different origins in fig.4. Plots existed on one curve in each figure. But the curves of the relations were characterized by species, as shown in fig.5.

Relations between solid substance volume rate and cross-section shrinkage were shown in fig.9 and between loss of solid substance volume rate by deterioration and cross-section shrinkage shown in fig.10. Each curve in fig.9 and fig.10 was also characterized by species. Each curve was similar among different 11 species in fig.11 where relations between loss rate of solid substance volume rate by deterioration and cross-section shrinkage were shown. The average curve in fig. 12 was divided into three regions based on loss rate of solid substance volume rate (S_r): region I to 20%, region II from 20 to 50% and region III from 50 to 100%. Next three expressions may help to estimate the cross-section shrinkage of waterlogged wood accompanying its drying (β_{cs}).

Region I : $S_r < 20$, $\beta_{cs} \leq 20$.

Region II : $20 \leq S_r < 50$, $10 \leq \beta_{cs} \leq 40$.

Region III : $50 \leq S_r < 100$, $\beta_{cs} = 1.4S_r - 40 (\pm 10)$.

Where $slr(\%)$: loss rate of solid substance volume rate by deterioration,

$$S_r = (1 - S_w / S) \times 100,$$

$\beta_{cs}(\%)$: cross-section shrinkage,

S_w : solid substance volume of waterlogged wood derived from maximum moisture content,

S : average of solid substance volume of sound wood known from table 4 or another textbook.