

木材々質の森林生物學的研究 第2報

トドマツ材の濕氣的特性について

Takeshi KANO: Forest biological studies on the wood quality. Report 2.
[Hygroscopical properties of Todo-fir (*Abies Mayriana* Miyabe et Kudo)
lumber.]

札幌支場 農林技官 加 納 孟

目 次

I. 緒 言	73
II. 収縮曲線	74
(1) 供試材及びその測定法	74
(2) 測定結果	75
(i) 低含水率に於ける収縮経過	75
(a) 切線収縮	76
(b) 半径収縮	77
(ii) 高含水率に於ける収縮経過	77
(a) 切線収縮	77
(b) 半径収縮	78
III. 収縮曲線に及ぼす材質的影響	78
(1) 供試材及びその測定法	78
(2) 測定結果	79
(i) 切線収縮	79
(ii) 半径収縮	79
(iii) 面積収縮	79
(iv) 容積収縮	79
(v) 容積密度数 (R) と容積収縮率 (α_u)	81
IV. 濕氣平衡 Hysteresis (吸濕脫濕平衡の特性曲線)	81
(1) 供試材及び測定法	81
(2) 測定結果	82
(i) 濕氣平衡曲線	82
(a) Freundlich の吸着式	82
(b) Langmir の吸着式	83
(c) W.Henry の吸着式	84

(ii) Hysteresis 曲線の討議	85
V. 吸湿脱湿特性に及ぼす材質的影響	85
(1) 供試材及び測定法	85
(2) 測定結果	87
(i) 生 材	87
(ii) 古 材	87
(iii) 檜 材	88
(iv) 年輪巾の影響	88
VI. 伸縮の繰返し変化	88
(1) 供試片及び測定法	88
(2) 測定結果	89
(i) 測定値の修正	89
(ii) 繰返し伸縮に於ける伸縮状態の変化	90
VII. 細胞の収縮変形	90
(1) 供試切片の処理とその測定法	90
(2) 測定結果	91
(i) 含水率の変化と細胞腔径の変化	92
(ii) 含水率の変化と細胞膜の厚さ	93
(iii) 含水率の変化と細胞の変形	94
(iv) 細胞腔の面積変化	95
(v) 細胞の断面積変化	95
(vi) 細胞膜の面積変化	96
(vii) 顕微鏡写真による細胞膜量及び空隙量の変化	97
(3) 測定結果についての検討	98
VIII. 実施した研究概要とその考察	99
(1) 収縮曲線	99
(2) 収縮曲線に及ぼす材質的影響	100
(3) 湿気平衡 Hysteresis (吸湿脱湿平衡の特性曲線)	100
(4) 吸湿脱湿平衡特性に及ぼす材質的影響	100
(5) 伸縮の繰返し変化	101
(6) 細胞の収縮変形	101
(7) 木材含水率の特異点	102
IX. 文 献 (附図)	102
Résumé	104

I. 緒 言

木材材料の特性の一つである湿氣的性質については従来かなり古くから検討され既に数多くの問題に論及されている。これらの中今日迄主要な概念として役立つ事項は

1. 繊維飽和点
2. 湿気平衡の型態
3. 含水率と強度との関係
4. 収縮膨張の機構

等に関する実験的な論拠であり、その中2, 3のものについては既に木材の基本的な性質と見做されているものもあるが、これらの特性は樹種或いは材質的にかなり甚しい偏異を示すものである。例えば木材の収縮経過について見ると所謂繊維飽和点以下に起る収縮現象は樹種及び材質的にかなり共通的な事象とこれらの特性がむしろ不規則に偏異する傾向とがあり、後者については定性的な修正を必要とする事が多い。然もかかる修正の様式は木材構成要素の不均一性の為に実に区々であり、従つて多くの場合に基本的な特性と材質によつて異なる影響との差異を判然しないのが普通である。木材はかかる不均一性の部分から成立している事がむしろ宿命的な特性であると考えれば木材全体としての変化は凡ての部分の変化の集積によつて求め得られる可能性が与えられて居り、凡ての部分に共通的な性質を基本的な材の特性と考え得るであろう。又従来木材の特性として考えられているものの範囲については更に実験の方法、精度等により多少の修正が考えられるものもあり、例えば繊維飽和点が明かに認められると云う事はむしろ実験技術の不完全な事に帰せられるもので実験曲線を飽和状態に追跡して推定しなければならぬもので蒸気圧の曲線がこの追跡範囲に多少とも変化を生じている時は全く疑わしいものとなるのである。この様な場合に於て基本的なものの範囲を明かにする事は極めて困難な事であり、むしろ材質的に個有である不均一性によつて影響される範囲を確実に認識しその箇々のものについて検討を加え、これらの数値的根拠を明確ならしめる事に一つの可能性が与えられていると思う。茲に取扱つたトドマツ材については他樹種との比較に於て既に2, 3の研究が為されて居り、樹種的な特性については一応の数値が示されて居るが、それらの特性に影響する材質的な偏異に関しては論及されていない憾が多い。本実験に於ては該材がその構造上かなり単一であり、又材質的に不均一な性状についても比較的簡単である諸点を考慮して該材に関する2, 3の湿氣的性質とその材質的な偏異とについて検討を加えこれらの個別的な諸要素を統一的な立場に於て数量的に体系づけようとしたものである。

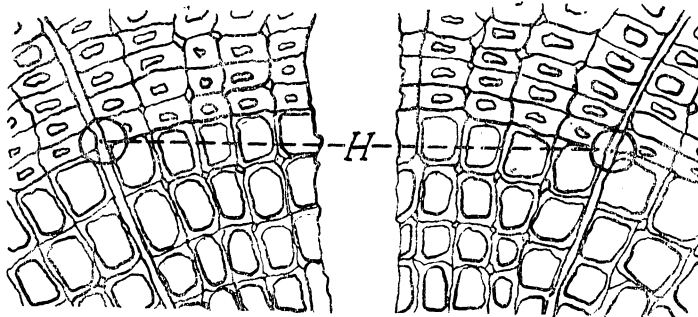
本実験に対し種々御便宜と御指導を賜られた前林業試験場札幌支場長原田泰氏及び林業試験場札幌支場長林行五氏に深甚の謝意を表すると共に測定観測に協力を得た繁沢静夫氏、辻完司氏に併せて謝意を表する。

Ⅱ. 収 縮 曲 線

(1) 供試材及び測定法

供試材としては野幌国有林産のトドマツ材から年輪巾の比較的広いもの *Tg*, 及び *Rd* (年輪密度 1.3~1.6) と比較的狭いもの *tg* 及び *rd* (年輪密度 5.0~5.2) の 2 種の材料を撰出しその各々について切線方向と半径方向の長さの変化を各含水率階程について測定した。供試片の大きさは 10 mm×60 mm×2 mm を標準とし 60 mm の長さの方向を正しく切線方向又は半径方向になる様に木取り, その間に凡そ 40 mm 程度の間隔に標点を附し標線の長さを設定した。標点は第 1 図の如く春秋材細胞の年輪界と髄線細胞の交点を撰び, 低倍率の顕微鏡下に於

第 1 図



て注射用に用いる針を切断してそれに朱肉を付けて標点を Mark した。この様にして測定に用いた供試片の数の切線方向, 半径方向各 5 箇, 合計 20 箇であり, 供試片の年輪密度数, 容積密度数, 飽水含水率及び空隙量を示すと第 1 表の如くであつた。

第 1 表

		切線方向の測定に用いた供試片						半径方向の測定に用いた供試片					
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	平均値	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	平均値
年 輪 巾 の 供 試 片	標点間の年輪数							7	6	6	7	5	
	容積密度数	0.317	0.277	0.289	0.304	0.283	0.278	0.305	0.297	0.298	0.301	0.295	0.299
年 輪 巾 の 供 試 片	標点間の年輪数							20	19	18	19	20	
	容積密度数	0.243	0.294	0.230	0.267	0.309	0.289	0.288	0.288	0.274	0.287	0.277	0.283
		80.44	79.48	78.28	76.86	77.38	78.48	77.97	77.75	81.16	76.41	78.14	78.28
								5.37	5.09	5.37	5.51	5.73	
		78.48	78.31	79.01	85.83	78.57	80.04	78.53	80.22	79.24	81.98	79.99	79.99

標点間の年輪数は半径方向の測定に用いた供試片についてのみ数え, 年輪密度は飽水時の標点距離とその標点間の年輪数から算出し半径方向の測定に用いた供試片についてのみ掲げ, 切線方向の測定に用いた供試片も恐らくこれと類似の数値を示すものと見做した。空隙率は全乾状態に於ける供試片の容積とその空隙量との比率にて示し, その測定は全乾状態に於て Ligroin 液に浸漬し木材中の Ligroin の (Ligroin 液中に於て浮力によつて測られた) 容積と供試片の容積とによつて算出した。供試片は当初ほぼ気乾含水率にあつたので飽和湿気中に放置して飽湿状態までの吸湿平衡の含水率と長さの変化を測定し更に水中に浸漬して最大含水率ま

での吸水平衡の含水率と長さの変化を測定した。最大含水率は供試材が水中に沈下した後、真空ポンプによって減圧し気泡の発生が殆んど全く消失した状態を飽水状態として定めた。供試片が飽水状態で最大含水率に達した後、於てデシケーター中で漸次供試片の水分を蒸発し脱湿方向に於ける含水率の変化と長さの変化を測定した。供試材が飽湿状態の附近に達してからはデシケーターの底に硫酸を入れ材の乾燥を促し漸次デシケーター中の硫酸濃度を交えて脱湿平衡重量を移動せしめ最後に 105°C に於て乾燥しその重量を含水率 (0%) とした。重量測定には 0.1 mg 感度の化学天秤を用い長さの測定には $\frac{1}{1000}$ mm 精度のコンパレーターを用いた。測定期間中材料は凡そ 20°C に調節した恒温器中に入れ、実験室の温度も凡そこの温度に整える様にした。

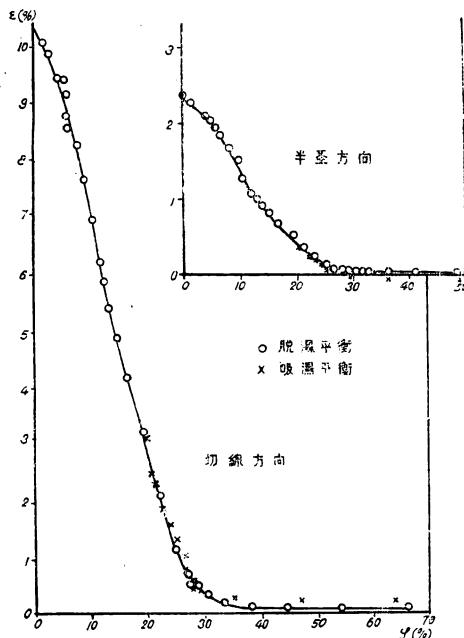
(2) 測定結果

この様にして供試材の重量変化とその標点距離の変化を定期的に測定し全乾状態の重量に対する重量含水率と全乾状態の長さに対する比長及び飽水状態の長さに対する比長を算出し飽水状態からの収縮率と全乾状態に対する伸長率を求め夫々 5 箇の供試片についての平均値を求め更に吸湿方向と脱湿方向について含水率 (ϕ) と収縮率 (ϵ) の 3 組毎の移動平均値を求めた。

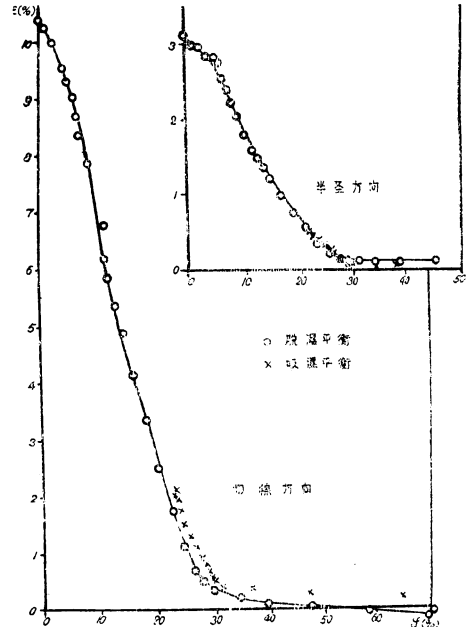
(i) 低含水率に於ける収縮曲線

含水率 (ϕ) と収縮率 (ϵ) との関係を点綴すると第 2~3 図の如くなり収縮曲線はかなり複雑な曲線式になるが低含水率に於ける収縮曲線の変曲の状態を無視して凡そ繊維飽和点までの収縮経過を直線的であると考えれば

第2図 伸縮曲線 $Tg 1 \sim 5$ (年輪密度 $\approx 1.3 \sim 1.6$)



第3図 伸縮曲線 $Tg 1 \sim 5$ (年輪密度 $\approx 5.0 \sim 5.2$)



切線収縮については

$$Tg = -0.3710 \varphi + 10.8241$$

$$tg = -0.3812 \varphi + 10.7975$$

半径収縮については

$$Rd = -0.9070 \varphi + 2.3817$$

$$rd = -0.1220 \varphi + 3.1928$$

これらの実験式の示す如く切線収縮では2組の直線式が殆んど一致しているが半径収縮では年輪巾の狭いものが縦軸に対する intercept は大となり同一含水率に於て大なる収縮率を示している。

(a) 切線収縮

切線方向の収縮曲線は $\varphi \approx 5\%$ の含水率で明かに変曲点が認められ、従つて 5% 以下の含水率に於ては実験式によつて与えられる収縮率よりも遙かに低い数値を与えている。この変曲点は該材について行つた湿気平衡のヒステリシス曲線に現われる変曲点とほぼ同一の含水率状態にあると認められこれについては後述している。 Tg 及び tg を示す実験式から φ 軸に対する intercept を m_p とすると

$$Tg : m_p = 29.18\%$$

$$tg : m_p = 28.30\%$$

高含水率に於て生ずる収縮は表面層の初期の収縮経過によるものと仮定すれば含水率 (m_p %) で収縮の0になる点を与える事になり Wilson¹⁾ の所謂限界含水率を示す事になる。実験式で与えられる直線を点線で示すと $\varphi < 15\%$ に於ては点線はほぼ収縮曲線と一致するが $\varphi > 15\%$ の含水率の状態は収縮曲線はこの点線よりも上位にあり収縮曲線は点線に対して下向きの曲線となり前述せる曲線の変曲点 ($\varphi \approx 5\%$) 附近が最大のズレを示している。これらの関係は Barkas²⁾ が欧州産カバ材の平均収縮曲線として示している曲線とはかなり異つてゐる様に思われ彼によつて明かに認められる $\varphi \approx 20\%$ 附近の変曲点は全然現われずむしろ $\varphi \approx 20\%$ 附近で測点は直線部分として点綴され、吸湿伸長曲線に於て $\varphi \approx 25\%$ 附近で僅かながら伸長曲線が変曲する状態が認められるに過ぎない。この状態は年輪巾の大なる供試片についてのみ認められたものでこの実験の結果では論及する事は出来ない様に思われる。吸湿伸長曲線は本実験の測定範囲 ($\varphi > 20\%$) に於ては何れも収縮曲線の外側に点綴され収縮曲線よりも高い Order で平衡状態に近接する傾向が認められるがこれらの高含水率に於ける収縮平衡につい

- 1) Wilson, T.R.C.: Strength-Moisture Relations for wood. Tech. Bull. U.S. Dep. Agric. 1932. NO. 282.
- 2) W.W. Barkas: Recent work on the moisture in wood in relation to strength and shrinkage. (Department of scientific and industrial research. Forest product Research. Sp. report No. 4 1938.

ては後述する。

(b) 半径収縮

半径方向の収縮曲線が測定に用いた2種の供試材(年輪巾の広いものと狭いもの)によつてかなり相異なる事は前述したが、何れの収縮曲線についても $\varphi \approx 5\%$ の含水率に於て明かな変曲点が認められ、従つて 5% 以下の含水率に於ては実験式によつて与えられる収縮率よりもかなり低い測定値を与えている事は切線方向の場合と同様である。(a) 項に於けると同様に半径収縮を表わす実験式から m_p を算出すれば次の如く、 m_p は切線方向に於けるよりもかなり低い含水率として示され

$$Rd : m_p = 26.26\%$$

$$rd : m_p = 26.17\%$$

而も亦収縮曲線はこれらの実験式によつて与えられる直線に対して $\varphi \approx 10\%$ 附近を変曲点として S 字状に反曲している。即ち $\varphi \approx 5\% \sim 10\%$ の範囲では曲線は直線に対して上向きに彎曲し $\varphi \approx 10 \sim 20\%$ の範囲では下向きに彎曲している。この曲線の彎曲は Barkas がその収縮曲線の彎曲状態を熱効果として疑つている形態とかなり類似している様に思われる。脱湿収縮曲線がこの様にして φ 軸に対して漸近的に平衡するのに反して吸湿伸長曲線は何れもかなり低含水率に於て φ 軸と交つている様に見える。この傾向は測定に用いた供試片の中年輪巾の広いものについてむしろ著しい傾向を有し、 $\varphi \approx 30\%$ 附近で既に $\varepsilon < 0$ の点を与えているがこの附近の ε の測定は実験の精密度の限界に近いのでこの測定値のみでは確言する事は出来ないが、吸湿伸長が脱湿収縮に対して何れもより低い Order で φ 軸に平衡している事は明瞭に認められよう。

(ii) 高含水率に於ける収縮経過

供試片の飽水状態を最大含水率として最大含水率に於ては $\varepsilon = 0$ とした測定結果は高含水率に於ける収縮経過を示す一群の数値を示している。これを (ε) を示すスケールを拡大して図示すると第 4~7 図の如くなり、測定値は何れも実験の精密度の限界に近いのでこれを点綴して結論づける事は困難の様に思われるが供試片の種類と伸縮が測られた方向について一応の傾向性が認め得られる様である。

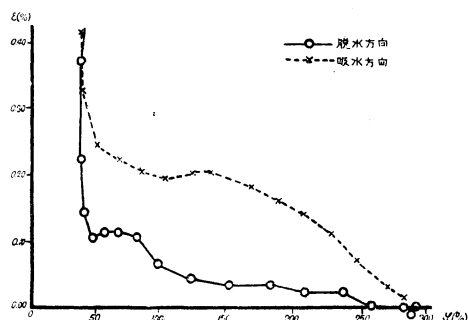
(a) 切線収縮

切線方向の収縮経過は第 4 図及び第 6 図に示したが脱水収縮の際には $\varphi \approx 50\%$ 附近までの収縮は著しく小さく年輪巾の狭い供試片によつて得られた第 6 図に於てはこの範囲までは φ 軸上に測点が分散している。 $\varphi > 50\%$ からは測点は從軸に殆んど平行的な収縮経過を示している。これは吸水伸長経過についてもほぼ同様で $\varphi \approx 40\%$ 程度からの脱水収縮経過に比してかなり高い Order をとりながら伸長は殆んど直線的に漸減して飽水状態に至る。それ故脱水収縮と吸水伸長経過とは、 $\varphi \approx 40\% \sim 300\%$ の間に明かな Hysteresis Loop を認められ、何

れの場合に於ても吸水伸長経過が脱水収縮経過に比して $\varphi \doteq 40\% \sim 300\%$ の範囲では大なる収縮量を与えている事は明瞭であつた。

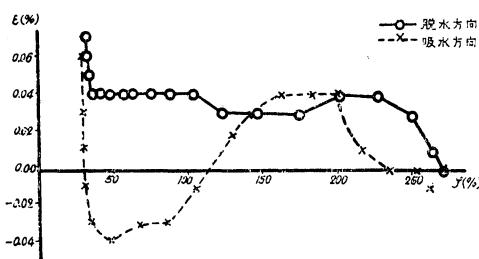
第4図 切線方向に於ける収縮経過

供試片: *Tg*



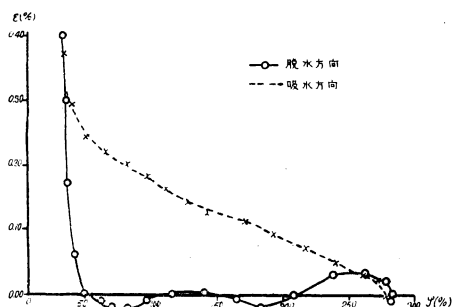
第5図 半径方向に於ける収縮経過

供試片: *Rd*



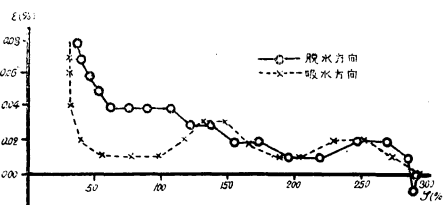
第6図 切線方向に於ける収縮経過

供試片: *tg*



第7図 半径方向に於ける収縮経過

供試片: *rd*



(b) 半径収縮

半径方向の収縮経過は (ϵ) を示すスケールを更に拡大して第5図及び第7図に示したが、脱水収縮経過は何れも $\varphi \doteq 40\% \sim 60\%$ を限界として φ 軸に対して漸減しているが吸水伸長経過は $\varphi \doteq 30\% \sim 50\%$ で (ϵ) の値は最小に近づき、供試片 *Rd* によつて得られた第5図では $\varphi \doteq 30\% \sim 110\%$ の範囲では (ϵ) はむしろ負の値を示している。供試片 *rd* によつて得られた第7図に於ても $\varphi \doteq 30\% \sim 110\%$ の範囲では吸水伸長の (ϵ) の値は脱水収縮に比してかなり低い数値を与え、この脱水と吸水との伸縮経過には $\varphi \doteq 30\% \sim 120\%$ の含水率範囲に著しい Hysteresis 効果が認められた。 $\varphi \doteq 150\%$ 附近でこの Hysteresis 効果は消失し $\varphi \doteq 150\% \sim 300\%$ では脱水吸水の伸縮経過は何れもかなり不規則で一定の傾向は認められない。

Ⅲ. 収縮曲線に及ぼす材質的影響

(1) 供試材及び測定法

収縮曲線に影響する材質的な偏異を求める為に同上の供試材の外に野幌国有林産生材及び檜

材, 古材¹⁾の5種の材料を撰び, 板目及び柁目方向 60 mm, 繊維方向 5 mm の板に正しく鉋削して供試材とし 1 組各 10 枚宛の供試材について前回と全く同様の操作にて飽水状態から全乾状態まで各異の含水率毎に切線及び半径方向の長さと容積及び重量の測定をなし, 切線及び半径収縮率, 面積及び容積収縮率及び含水率を算出した。

(2) 測定結果

かくして得られた 10 組毎の一群の測定値を含水率の階段毎に集計して当該含水率範囲内の平均値として含水率 (ϕ) 及び収縮率 (r), (t), (V) を示し更に面積収縮率 (S) を

$$S = r + t - rt$$

として算出した。

但し

r : 半径収縮率

t : 切線収縮率

(i) 切線収縮

切線方向の収縮率について $\phi \approx 5\%$ に於て現われる収縮曲線の偏異点は生材, 気乾材及び古材ともに認められるが檣材については収縮曲線は殆んど直線的な経過を示しかゝる曲線の偏異点は認められず生材の収縮曲線と古材のそれとは $\phi > 10\%$ に於ては殆んど一致するも $\phi < 10\%$ の範囲では古材収縮曲線はかなり著しい低下を示している。生材と気乾材とのそれは殆んど著しい差違が認められず気乾材について年輪密度の影響は前述した如き結果と一致した。檣材の収縮曲線は著しく低く而も殆んど直線的傾向を示し他のものとかなりその状態を異にした。

(ii) 半径収縮

半径方向の収縮率については何れも前掲のものとほぼ同様な曲線が得られたが, 檣材にては切線方向の場合と同様に殆んど全く直線的な経過を示した。

(iii) 面積収縮率

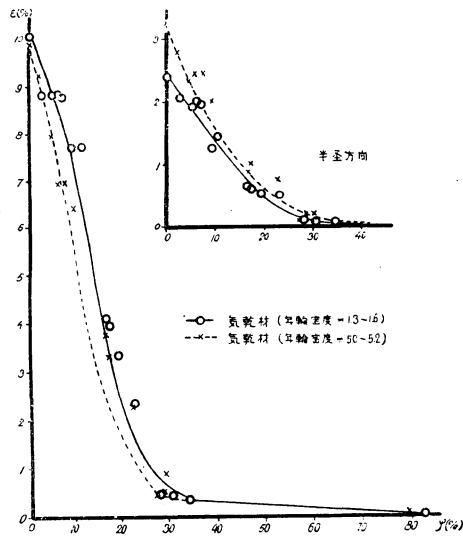
収縮率 r 及び t の測定値から面積収縮率 (S) を算出して S と ϕ との関係を図示すると第 10~11 図の如くなり $\phi \approx 0 \sim 30\%$ の範囲では生材を除く他の材種では $S-\phi$ の関係は殆んど直線的であるが生材については $\phi \approx 15\%$ で方向の異なる 2 組の直線部分として認められる様である。

(iv) 容積収縮率

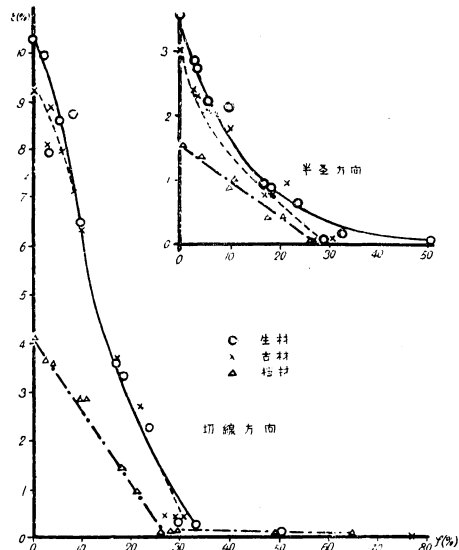
容積収縮率 (α_v) は殆んど面積収縮率と比例するが檣材については繊維方向の収縮の影響を受けて容積収縮率の増加はかなり著しい。飽水状態より全乾状態に至る最大収縮率 (%) は次の第 2 表の如く 面積収縮率 (ϵ) では生材が最大で 13.43%, 檣材が最小で 5.60% を示し古材が 11.44 で気乾材より小なる値を示したが容積収縮率 (α_v) では生材が最大で 13.45%, 檣材が最小で 6.60% を示したが古材は 12.89% で反つて気乾材 (年輪密度 $\approx 1.3 \sim 1.6$) より大なる値を示した。

1) 古材として用いた材料は北海道林業試験集報 68 号 (1949) 記載の材料である。

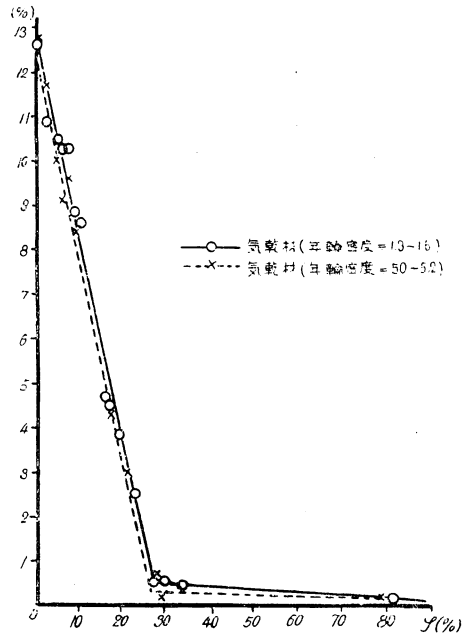
第8図 収縮曲線 (気乾材)



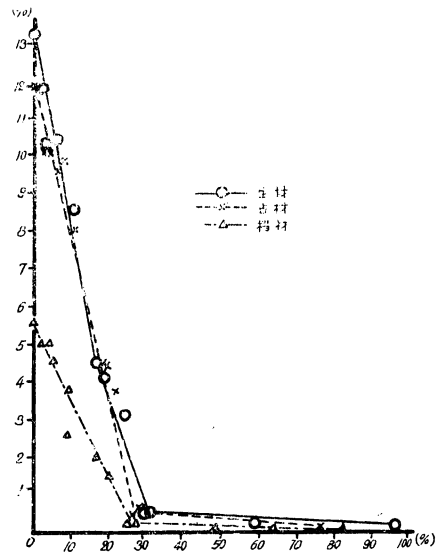
第9図 収縮曲線 (生材, 古材, 檣材)



第10図 面積収縮率 (生材, 古材, 檣材)



第11図 面積収縮率 (気乾材)



第2表 最大収縮率

材 種	年 輪 密 度	飽水より全乾までの収縮率(%)			
		r	t	S	V
気 乾 材	1.3~1.6	2.39	10.68	12.65	12.73
気 乾 材	5.0~5.2	3.25	9.87	12.70	13.02
生 材		3.57	10.26	13.33	13.45
古 材		3.03	9.19	11.44	12.89
檣 材		1.54	4.09	5.60	6.60

(v) 容積密度数 (R) と容積収縮率 (α_v)

実験に用いた供試材の容積密度数 (R) は全材種を通じて気乾材 (年輪密度 $\approx 5.0 \sim 5.2$) の 0.272 から櫛材の 0.600 の範囲に分散した。各材種毎の R と α_v との関係は第 3 表の

第 3 表 容積密度数 (R) と容積収縮率 (α_v)

材種 年輪密度	気 乾 材		気 乾 材		生 材		古 材		櫛 材	
	1.3~1.6		5.0~5.2							
	R gr/cm ³	α_v %	R gr/cm ³	α_v %	R gr/cm ³	α_v %	R gr/cm ³	α_v %	R gr/cm ³	α_v %
供 試 片	0.342	13.37	0.272	13.65	0.305	13.60	0.351	13.48	0.481	7.09
	0.306	13.22	0.276	13.40	0.306	13.69	0.338	13.60	0.531	6.49
	0.307	13.27	0.282	13.16	0.316	14.20	0.339	12.69	0.495	5.84
	0.304	12.77	0.279	13.31	0.314	14.05	0.343	12.61	0.497	6.48
	0.313	13.17	0.283	12.99	0.310	13.38	0.363	12.60	0.518	6.50
	0.306	12.45	0.274	12.79	0.323	13.44	0.347	12.40	0.517	6.79
	0.309	12.92	0.275	12.61	0.325	12.81	0.357	12.19	0.600	6.78
	0.302	12.71	0.302	12.31	0.307	13.28	0.346	11.70	0.514	7.11
	0.291	12.65	0.278	13.20	0.306	13.29	0.345	11.69	0.503	7.48
	0.309	—	0.272	12.78	0.310	12.78	0.351	11.88	0.511	7.48
平均値	0.309	12.73	0.279	13.02	0.312	13.45	0.348	12.89	0.517	6.60

如くであり α_v の最大は $R \approx 0.32$ 附近の生材供試片に認められた。各材種間の定性的な材質の差違を無視すれば $R \approx 0.32 \sim 0.60$ の R の増加の方向については α_v の減少の傾向が認められ、 $R \approx 0.32 \sim 0.27$ の R 減少の方向については又 α_v の減少の傾向が認められる様であり、従つて $\alpha_v = uR$ とする Newlin-Wilson の式は R の一定限界内に於ける定量的関係を示すものの如くであり、 $R > 0.32$ の範囲に於ては既に秋材部の比率が可成り著しいもので後述する秋材細胞の内部収縮の量について定量的な修正を必要とするものと考えられる。即ち春秋材細胞の木材構成状態とその収縮経過就中秋材細胞の内部収縮の経過について充分な修正を行う事によつてのみ $\alpha_v = u \cdot R$ なる Newlin-Wilson の式の意義を見出し得るであろう。

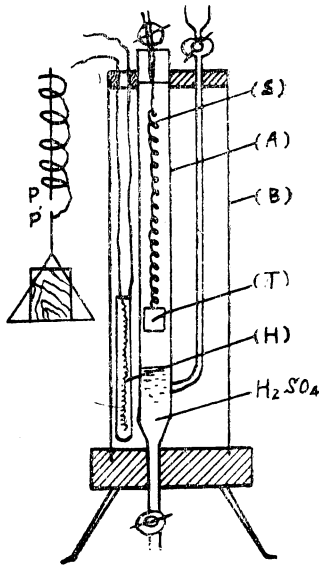
IV. 湿気平衡 Hysteresis (吸湿脱湿平衡の特性曲線)

(1) 供試材及び測定法

正常なトドマツ材から 10 mm×10 mm×0.5 mm 程度の柁目供試片を作り、数箇の供試片について等温吸湿及び脱湿曲線を求めた。測定に用いた装置は宮部氏の実験装置¹⁾によつたこれは第 12 図の如く硝子円筒で作られた水槽 (B) 中に硝子の容器 (A) があり、水槽 (B) は Heater (H) と温度調節器によつて定温に調節され、容器 (A) 中の温度は凡そ均等に且つ一定に保たれる。容器 (A) の底部に硫酸を入れて更に (A) 中の湿度を調節し得る様にしてある供試片 T は (S) なる Silica balance によつて吊され重量は Spring-balance の延びを

1) 宮部宏：材料の湿气的性能 早稲田大学理工学研究所報告 第 1 輯

第 12 図



第 4 表

脱 湿 方 向			吸 湿 方 向		
関係湿度	水蒸気圧	平 衡 含水率	関係湿度	水蒸気圧	平 衡 含水率
%	mm.Hg.	%	%	mm.Hg.	%
91.26	15.86	33.29	90.99	15.80	27.25
72.84	12.65	24.62	70.47	12.23	20.00
49.85	8.57	17.39	48.24	8.34	12.07
28.33	4.92	11.62	28.04	4.84	7.81
11.19	2.05	7.71	12.33	3.59	7.63
4.39	0.74	5.61	4.12	0.70	4.07
0.94	0.22	3.34	0.88	0.15	2.40
0.58	0.11	1.03	0.57	0.10	1.76
0.41	0.06	0			

Kasetometer で読んで算出するもので Spring-balance の伸びを図の如く PP' の長さの変化によつて求めている。測定に於ては温度を 20°C に保ち、硫酸の濃度を約 10%~90% に変化してその際の平衡重量の変化から供試材の含水率を算定した。

(2) 測定結果

測定結果から等温吸湿、脱湿の平衡含水率を算出しこれがトドマツ材について含水特性を示すものと考えた。

測定結果を関係湿度の階級毎に集計して平衡含水率の平均値を示すと第 4 表の如くなり、 $\phi \approx 7\%$ 以下の含水率に於ては湿気移動の方向による Hysteresis の現象は甚だしく小さく殆んど negligible の様に思われるが飽湿状態の附近に於ては実験範囲の最後まで明かなヒステリシス効果が現われている。これは吸湿平衡の際時間効果が甚だしく大きいものと考えられる。

(i) 湿度平衡曲線

恒温吸着式として今日までに与えられている実験式について測定結果と比較して見ると

(a) Freundlich の吸着式

これは固体のガス吸着の法則を示す一般的な実験式であるが

$$a = \alpha \cdot p^{\frac{1}{n}}$$

α : 吸湿量

p : 水蒸気圧

α : 実験結果より得られる常数

n : 材料に特有な常数

として実験結果から最小自乗法によつて α , n を定めると脱湿方向では

$$a = 5.4652 \times P^{0.5946}$$

吸湿方向では

$$a = 4.8919 \times P^{0.5000}$$

となるが、第 13 図に示す如くこの実験式の示す曲線と測定値の示す曲線は、含水率 ϕ の小さい範囲にのみ適用され得る様であり、飽和圧に近い水蒸気の吸収に適用する事は出来ない。この事は水蒸気が殆んど完全ガスの吸収作用と同様に材料の表面に附着する様な場合にのみ適用され飽和点に近い処では木材材料の毛細管作用によつて水を吸収する為に吸収量に激しい増加を示すものでこの法則に従わない様になるものと考えられる。

(b) Langmir の吸着式

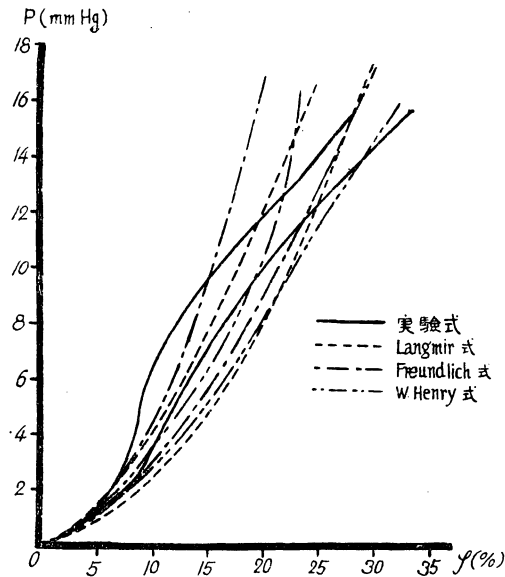
この式は吸着層が一分子層から出来ているものと仮定した完全ガスの吸着式であり

$$a = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot P}{1 + \alpha \cdot P}$$

a : 吸湿量

P : 水蒸気圧

第 13 図



α , β 材料によつて定まる実験常数として実験結果から最小自乗法によつて α 及び β を定めると脱湿方向では

$$a = \frac{4.150 \cdot P}{1 + 0.0831 \cdot P}$$

吸湿方向では

$$a = \frac{2.5173 \cdot P}{1 + 0.0419 \cdot P}$$

となり、第13図に示す如く一層広い範囲に於て実験結果と対照される様であるが、飽和圧に近い部分と $\phi = 10 \sim 20\%$ の範囲に於ける実験結果の曲線の彎曲部分には全て適合されない。

(c) Williams-Henry の式

この式は吸着層が多分子層から出来ているものと仮定した完全ガスの吸着式であり、一般に Langmir の式で適合しないより高い圧の場合に用いられる実験式であり

$$\log \frac{a}{P} = R_1 - R_2 a$$

a : 吸湿量

P : 水蒸気圧

R_1, R_2 : 実験によつて定まる材料の定数として 最小自乗法によつて R_1 及び R_2 を定めると脱湿方向では

$$\log \frac{a}{P} = 0.6945 - 0.0228 a$$

吸湿方向では

$$\log \frac{a}{P} = 0.5299 - 0.00815 a$$

となり飽和圧に近い範囲では次第に実験値によつて与えられる曲線に近づく様であるが、

第 5 表

実 験 値		計 算 値					
水 蒸 気 圧	平衡含水率	Freundlich		Langmir		W-Henry	
P, mmHg	%		実験値との差		実験値との差		実験値との差
15.86	33.29	28.23	-5.06	28.40	-4.89	30.40	-2.89
12.65	24.62	25.33	0.71	25.60	0.98	26.03	1.41
8.57	17.39	19.60	2.21	20.78	3.39	20.01	2.62
4.92	11.62	14.09	2.47	14.50	2.88	13.20	1.58
2.05	7.71	8.37	0.66	7.27	-0.44	6.01	-1.70
0.74	5.61	3.88	-1.73	2.89	-2.72	2.02	-3.59
0.22	3.34	2.21	-1.13	0.90	-2.44	0.50	-2.84
0.11	1.03	1.03	0	0.45	-0.58	0.20	-0.83
0.06	0	0	0	0.15	0.15	0	0
0.10	1.76	1.55	-0.21	0.25	-1.51	0.23	-1.53
0.15	2.40	1.90	-0.50	0.78	-1.62	0.26	-2.14
0.70	4.07	4.09	0.02	1.71	-2.36	2.51	-1.56
3.59	7.63	9.26	1.61	7.86	0.23	10.70	3.07
4.84	7.81	10.45	2.64	10.13	2.32	13.51	5.70
8.34	12.07	14.13	2.06	15.56	3.49	18.61	6.54
12.23	20.00	17.12	-2.88	19.73	-0.27	21.60	1.60
15.80	27.25	19.45	-7.80	23.93	-3.32	28.05	0.80

$\varphi=10\%\sim 20\%$ の範囲に於ける実験値の示す曲線の彎曲には甚だしく適合しない。これらの実験式による計算値と測定値との偏差は第5表に示したがこの実験式の何れもが $\varphi=10\%\sim 20\%$ の範囲では甚だしく実測値と適合していない事が明かでありこれは木材の湿気平衡の一つの特性とも考えられる。

(ii) Hysteresis 曲線の討議

既に示した如くトドマツ材の吸湿及び脱湿の等温特性曲線は一つの Hysteresis Loop を作るが、この特性曲線は Allmand¹⁾ が示摘した多孔性吸着体に於けるヒステリシス現象とかなり近似的であり同氏が化学収着と考えた表面錯化合物の影響については後述する如く、更にトドマツ材料について生材と古材(表面酸化材)との Hysteresis 効果を測定した。低い水蒸気圧の下に於て見られる可逆的な吸着現象と飽和圧の近くで見られる著しいヒステリシス効果は凡そ多孔性吸着体の特長と認められ、本実験に用いたトドマツ材についても明かにこの範囲に属する特性曲線を示している。低圧部に於ける平衡曲線の変曲点は凡そ $\varphi=5\sim 7\%$ に認められ而もこの範囲に於ては Hysteresis 効果は殆んど negligible であるので吸着機構上からは問題にならない含水率範囲とすればこの範囲以上の木材含水率が所謂吸着水の範囲として認められるものと思う。亦 Hysteresis Graph は含水率約 $8\sim 20\%$ の範囲が Loop の中心となり含水率 20% を過ぎると Hysteresis 効果は次第に減少する傾向が認められる。これは前述の多孔質吸着体の示すものとはかなり異つた特性である様であり、これは前述せる収縮曲線に $\varphi=5\%$ 附近に明かな変曲点が現われ、更に亦半径方向の収縮曲線に於ては $\varphi=10\%\sim 20\%$ の範囲で収縮曲線が彎曲する形状とを比較すれば何れも木材に特有な性質と見做し得る様であり、前述の Barkas が熱効果として疑っている点や Tieman²⁾ が細胞内腔の張力として説明している事項又は Koehler³⁾ が Absorption point として説明している含水率と殆んど全く同一種類の傾向を与えている様である。

V. 吸湿脱湿特性に及ぼす材質的影響

(1) 供試材及び測定法

供試材として用いた材料は何れも野幌国有林産トドマツ材で生材、古材⁴⁾ 檣材及び気乾材として年輪巾の比較的広いもの比較的狭いもの5種の材料であり、供試片は $10\times 60\times 2\text{ mm}$ の大きさを規準として鉋削仕上げをなしこれを4箇宛2組に分ち、その中1組は温度 105°C で乾燥し恒量に達せしめ全乾状態から吸湿方向の測定に用い他の1組は飽湿状態に保持してそのまま脱湿方向の測定に用いた。測定はデシケーターの底に $10\sim 90\%$ の濃度の硫酸を入れデシケー

1) Allmand: Journ. phys. chem. 33, 1929. s. 1151~1694.

2) Tieman: Technologie of wood.

3) Koehler. B.S.: The properties and uses wood. 1924.

4) 古材として用いた材料は北海道林業試験集報 68 号 (1949) 記載の材料である。

第 6 表

			脱湿方向に用いた供試材					吸湿方向に用いた供試材				
			No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	平均値	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	平均値
生 材	W_0	gr	0.2956	0.2715	0.2970	0.2755		0.2883	0.2402	0.2908	0.2658	
	V_0	cm ³	0.867	0.785	0.829	0.788		0.840	0.707	0.797	0.785	
	V_{max}	cm ³	0.898	0.846	0.933	0.891		0.960	0.813	0.929	0.904	
	W_0/V_0	gr/cm ³	0.341	0.346	0.358	0.350	0.348	0.343	0.340	0.365	0.339	0.346
	W_0/V_{max}	gr/cm ³	0.329	0.321	0.318	0.309	0.319	0.300	0.296	0.313	0.294	0.301
	δ	cm ³	0.700	0.665	0.729	0.706		0.774	0.658	0.740	0.732	
	δ/V_{max}	%	78.00	78.55	78.13	79.28	78.49	80.54	81.00	79.62	81.01	80.54
古 材	W_0	gr	0.3530	0.3837	0.3565	0.3980		0.3835	0.4251	0.3985	0.3924	
	V_0	cm ³	0.920	0.981	0.913	0.984		0.933	0.910	0.979	0.953	
	V_{max}	cm ³	1.003	1.077	1.021	1.077		1.064	1.024	1.101	1.077	
	W_0/V_0	gr/cm ³	0.384	0.391	0.390	0.404	0.392	0.411	0.467	0.398	0.412	0.422
	W_0/V_{max}	gr/cm ³	0.352	0.356	0.349	0.370	0.357	0.361	0.415	0.359	0.364	0.375
	δ	cm ³	0.765	0.810	0.776	0.718		0.811	0.746	0.848	0.822	
	δ/V_{max}	%	76.26	75.71	76.05	72.96	75.24	76.20	72.78	77.01	76.27	75.56
槽 材	W_0	gr	0.5900	0.4965	0.4920	0.4613		0.6076	0.4546	0.4385	0.4106	
	V_0	cm ³	0.855	0.858	0.844	0.783		0.691	0.854	0.772	0.805	
	V_{max}	cm ³	0.917	0.910	0.867	0.833		0.888	0.875	0.821	0.858	
	W_0/V_0	gr/cm ³	0.690	0.579	0.604	0.589	0.615	0.879	0.532	0.568	0.510	0.622
	W_0/V_{max}	gr/cm ³	0.650	0.546	0.568	0.554	0.554	0.684	0.520	0.534	0.479	0.554
	δ	cm ³	0.516	0.574	0.567	0.521		0.489	0.575	0.535	0.587	
	δ/V_{max}	%	56.26	63.03	65.36	62.51	65.79	55.10	65.74	65.12	68.45	63.60
気 乾 材 (1)	W_0	gr	0.2795	0.3055	0.2606	0.3067		0.2591	0.2415	0.2610	0.2345	
	V_0	cm ³	0.875	1.004	0.824	0.986		—	0.883	0.810	0.779	
	V_{max}	cm ³	0.962	1.107	0.912	1.098		0.958	0.913	1.013	0.920	
	W_0/V_0	gr/cm ³	0.319	0.304	0.316	0.311	0.312	—	0.273	0.318	0.301	0.297
	W_0/V_{max}	gr/cm ³	0.291	0.276	0.286	0.279	0.283	0.270	0.265	0.258	0.255	0.262
	δ	cm ³	0.776	0.901	0.737	0.891		0.791	0.752	0.843	0.772	
	δ/V_{max}	%	80.71	81.43	80.75	81.18	81.01	80.53	82.39	83.20	83.91	83.00
気 乾 材 (2)	W_0	gr	0.2657	0.2957	0.3158	0.2735		0.2801	0.2859	0.2604	0.2846	
	V_0	cm ³	0.789	0.875	0.918	0.800		0.814	0.769	0.793	0.818	
	V_{max}	cm ³	0.872	0.968	1.024	0.894		0.937	0.965	0.881	0.949	
	W_0/V_0	gr/cm ³	0.337	0.338	0.344	0.342	0.340	0.344	0.372	0.328	0.348	0.348
	W_0/V_{max}	gr/cm ³	0.305	0.306	0.309	0.306	0.306	0.299	0.296	0.296	0.300	0.298
	δ	cm ³	0.693	0.769	0.811	0.711		0.755	0.779	0.712	0.764	
	δ/V_{max}	%	79.51	79.47	79.21	79.48	79.41	80.52	80.65	80.84	80.48	80.62

W_0 : 全乾重量 (gr)

V_0 : 全乾容積 (cm³)

V_{max} : 飽水時容積 (cm³)

W_0/V_0 : 全乾比重 (gr/cm³)

W_0/V_{max} : 容積密度数 (gr/cm³)

δ : 飽水量 (gr or cm³)

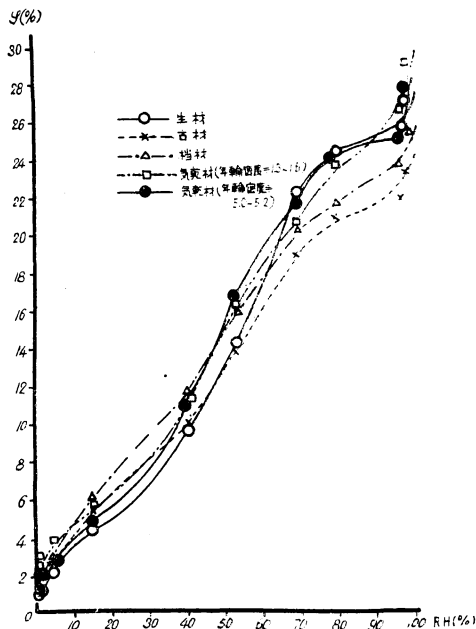
δ/V_{max} : 飽水時容積に対する飽水量の比率 (%)

ター中に5種類の供試材を各4箇宛秤量管に入れて装置しデシケーターのまま恒温器中に放置し、定期的に重量を測定して平衡重量に達した後にデシケーターを変えて同様の操作を繰返した。恒温器の温度は実験を通じて凡そ 20°C に調節しデシケーター中の関係湿度は硫酸比重から Wilson の表 (Journ. Ind. Eng. chem. 1921.13) によつて算出した。実験に用いた供試材について測定後、全乾重量 ($W_0 \text{ gr}$) 全乾容積 ($V_0 \text{ cm}^3$) 飽水時容積 ($V_{max} \text{ cm}^3$)、全乾比重 ($W_0/V_0 \cdot \text{gr/cm}^3$)、容積密度数 (gr/m^3)、飽水量 ($\delta \text{ gr or cm}^3$)、飽水時容積に対する飽水量 (cm^3)、の比率 ($\delta/V_{max} \%$) 等を算出し各供試材について第6表に示した。

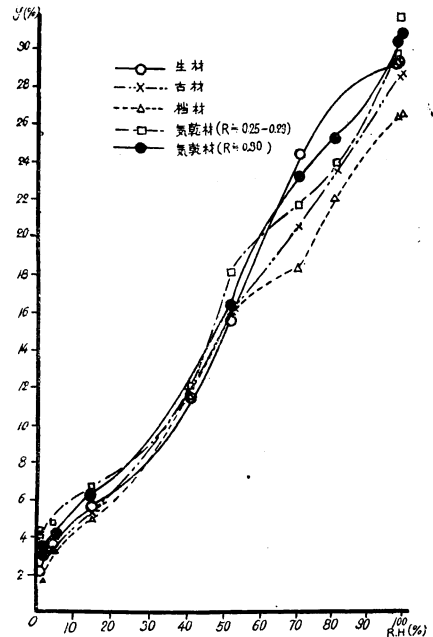
(2) 測定結果

測定の結果は第14, 15図に示した。

第14図 吸湿平衡曲線



第15図 脱湿平衡曲線



(i) 生材

生材についての測定結果は標準的な吸湿脱湿の平衡曲線を与えるものの様であるが、低圧部に於ける曲線の変曲点は凡そ2%附近の様に思われる。変曲点以上は飽和圧の附近まで脱湿、吸湿曲線は殆んど平行的であり飽和圧の附近で脱湿曲線の時間効果の現象が僅かに認められる。

(ii) 古材

古材に就ては生材に比して吸湿脱湿曲線ともかなり低い値を示し含水率凡そ7%位から吸湿及び脱湿の Hysteresis 効果は次第に増加して行く傾向を与え脱湿曲線は含水率約20%程度からかなり著しい時間効果を示している。

(iii) 櫓 材

櫓材については脱湿吸湿曲線共生材に比してかなり低い値を示しており、この差違は低圧部に近づくに従つて減少している様であり、又吸湿脱湿曲線の Hysteresis 効果は殆んど不明であり飽和圧の附近で脱湿曲線の時間効果が僅かに認められる様である。

(iv) 年輪密度の影響

年輪巾の甚だしく異なる材料についての測定結果は第7表に示したが、測定に用いた材料の容積密度数は 0.255~0.309 の範囲であつて、この範囲の比重階にては殆んど差違を認める事は出来なかつた。Zollor¹⁾ が吸湿性と比重との関係を見い出したのは比重階が 0.41~0.80 であり、若しこれを本実験に用いた櫓材と正常材との間に比較して見れば含水率曲線は或る限度までは同様な径路をとるが水蒸気圧の増加と共に比重の小さなものが吸湿量が大きくなるものと認められる。

第 7 表

硫酸比重 gr/cm ³	関係湿度 %	水蒸気圧 mmHg	平 衡 含 水 率 (%)									
			Rings/cm \approx 5.0~5.2					Rings/cm \approx 1.3~1.6				
			No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	平均値	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	平均値
1.000	100.0	17.4	31.20	29.98	26.71	26.21	28.53	29.85	26.65	26.44	26.18	27.28
1.027	98.2	17.1	29.52	24.78	26.02	25.01	26.38	27.36	23.88	23.34	23.29	24.47
1.164	82.4	14.3	24.87	22.41	22.79	23.44	23.38	24.50	23.23	23.18	23.51	23.61
1.225	72.2	12.6	21.04	19.08	19.22	20.70	20.01	22.13	21.64	20.01	20.55	21.08
1.320	54.0	9.4	17.11	15.71	14.74	15.55	15.93	17.54	16.23	15.20	15.58	16.14
1.381	40.2	7.0	13.06	10.08	10.48	10.76	11.10	11.29	10.28	9.91	10.53	10.50
1.525	14.9	2.6	6.38	4.65	5.41	5.71	5.69	5.83	3.96	4.18	4.57	4.64
1.625	4.2	0.7	5.08	2.78	2.92	3.20	3.50	3.69	2.30	1.90	2.38	2.57
1.713	0.5	0.1	4.40	2.13	2.46	2.35	2.84	3.31	1.79	1.33	1.57	2.00
1.836	0.3	0.1	2.61	2.13	2.07	2.05	2.22	2.94	1.52	0.95	1.10	1.63
	0.0	0	2.15	1.47	1.69	1.79	1.78	2.75	1.18	0.76	0.84	1.38
1.836	0.3	0.1	3.78	3.98	2.99	5.42	4.04	2.53	3.04	3.61	2.95	3.03
1.713	0.5	0.1	4.17	4.72	3.49	5.12	4.38	2.78	3.36	3.09	4.11	3.49
1.625	4.2	0.7	4.75	5.18	4.06	5.97	4.99	3.71	4.20	4.35	4.53	4.20
1.525	14.9	2.6	6.33	6.25	5.48	8.27	6.58	5.64	6.12	6.03	6.43	6.06
1.381	40.2	7.0	11.81	11.39	11.07	13.65	11.98	10.35	11.65	11.87	11.70	11.39
1.320	54.0	9.4	19.07	17.93	16.40	19.62	18.26	16.10	16.92	16.67	16.55	16.51
1.225	72.2	12.6	21.96	20.12	21.09	24.73	21.97	21.13	25.15	24.85	22.14	23.32
1.164	82.4	14.3	23.58	23.64	22.57	26.44	24.06	23.24	25.78	25.92	27.27	25.55
1.027	98.2	17.1	24.55	31.51	30.31	33.60	29.99	30.56	29.98	32.57	29.87	30.77
1.000	100.0	17.4	34.00	31.18	30.00	33.05	32.06	29.38	32.77	30.11	31.73	31.00

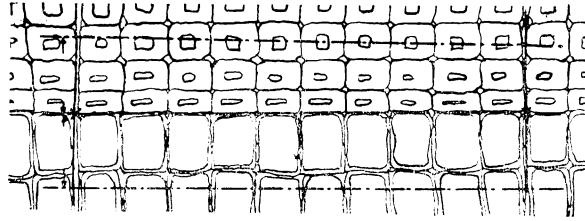
Ⅵ. 伸縮の繰返し変化

(1) 供試片及び測定法

- 1) Zollor: cited by Halord L. Derry. Equiblm moisture content of salt-treated wood.
(Bull. of the New York State Collage of Forestry at Syracuse Univ. Tech. Publication
NO. 58 1941.)

前述せる収縮曲線の測定に用いたものと同様の材料について (年輪密度 $\approx 1.3\sim 1.6$) 供試片を木取り唯だ一本の年輪境界がほぼ $10\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ の供試片の面の中央に位置する様に仕上げ、前述の如き方法で2つの髄線に標点を印し春秋材細胞の相接する年輪境界とそれを挟む秋

第 16 図



材及び春材部に夫々 0.91 mm の間隔に髄線間の距離を測定しこれらを夫々年輪境界及び秋材、春材の長さとした。測定は飽水状態飽湿状態及び乾燥状態の含水状態に於て行い、水分の移動方向は飽水 \rightarrow 飽湿 \rightarrow 乾燥 \rightarrow 飽湿 \rightarrow 飽水の経路に於て脱湿、吸湿の繰返し変化を与えた。各状態共減圧法によつてその平衡状態を可及的等しくする様に調整し、その含水率は全経過を通じて飽水状態に於ては $256\%\sim 302\%$ 、飽湿状態に於ては $27\%\sim 35\%$ 、乾燥状態に於ては $1.5\%\sim 6.5\%$ であつた。測定には精度 $1/1000\text{ mm}$ のコンパレーターを用い飽湿乾燥の状態に於ては測定中の水分変化を防ぐ為に Ligroin 液中に浸漬して測定を行つた。

(2) 測定結果

繰返し回数 20 回の変化に於て供試片に龜裂破損を生じたもの及び測定中に乾裂の生じたものを全て除去し全変化中にかかる外観的な瑕疵を生じなかつたものの測定値は AS 1~4 の4箇の供試片であつた。

(i) 測定値の修正

各測定値はその含水状態が区々であるので飽湿状態及び乾燥状態のものについては同一含水率の状態に測定値を修正した。飽水状態に於てはその含水率が全経過を通じて $256\%\sim 302\%$ であり、この範囲に於ける長さの変化は極めて小であるので〔収縮曲線 (高水率に於て既述せる)〕測定値のまま用いた。飽湿状態に於ては測定値の含水率範囲が $27\%\sim 35\%$ であり、収縮曲線に於ける曲線の変異点は $\varphi \approx 30\%$ に於ける長さとして収縮曲線図より標準長を求めて修正した。修正に用いた計算式は

$$l(30) = l(\varphi) \frac{1 - \varepsilon(30)}{1 - \varepsilon(\varphi)} = l(\varphi) \frac{0.99609}{1 - \varepsilon(\varphi)}$$

であり、乾燥状態に於ては測定値の含水率範囲が $1.5\%\sim 6.5\%$ であり、収縮曲線に於ける曲線の偏異点は $\varphi \approx 5\%$ であるので $\varphi = 5\%$ に於ける長さを規準として同様に収縮曲線図より修正したその計算式は

$$l(5) = l(\varphi) \frac{1 - \varepsilon(5)}{1 - \varepsilon(\varphi)} = l(\varphi) \frac{0.90600}{1 - \varepsilon(\varphi)}$$

(ii) 繰返し伸縮に於ける伸縮状態の変化

第 8 表

	$\phi=5\%$ に於ける長さ			飽水時に於ける長さ			飽水時から $\phi=5\%$ 時までの収縮					
	年 輪	秋 材	春 材	年 輪	秋 材	春 材	年 輪	%	秋 材	%	春 材	%
1	3.2720	3.2555	3.2828	3.5511	3.5691	3.5827	0.2791	7.9	0.3436	9.6	0.2999	8.4
2	3.2804	3.2636	3.3006	3.5730	3.5654	3.5801	0.2926	8.2	0.3018	8.5	0.2795	7.8
3	3.2809	3.2662	3.3000	3.5724	3.5642	3.5765	0.2915	8.2	0.2980	8.4	0.2765	7.7
4	3.2749	3.2610	3.2956	3.5682	3.5625	3.5793	0.2933	8.2	0.3015	8.5	0.2837	7.9
5	3.2932	3.2760	3.3136	3.5750	3.5677	3.5825	0.2818	7.9	0.2917	8.2	0.2689	7.5
6	3.2947	3.2773	3.3186	3.5743	3.5664	3.6065	0.2797	7.5	0.2891	8.1	0.2879	8.0
7	3.2845	3.2703	3.3092	3.5749	3.5663	3.5821	0.2804	7.8	0.2960	8.3	0.2729	7.6
8	3.2710	3.2480	3.2938	3.5715	3.5629	3.5793	0.3005	8.4	0.3149	8.8	0.2855	8.0
9	3.2838	3.2635	3.3305	3.5725	3.5632	3.6053	0.2887	8.1	0.2997	8.4	0.2748	7.6
10	3.2758	3.2538	3.2887	3.5733	3.5635	3.5827	0.2975	8.3	0.3097	8.7	0.2940	8.2
11	3.2849	3.2618	3.3066	3.5785	3.5700	3.5862	0.2936	8.2	0.2957	8.3	0.2796	7.8
12	3.2742	3.2571	3.2987	3.5772	3.5688	3.5848	0.3030	8.5	0.3117	8.7	0.2861	8.0
13	3.2769	3.2495	3.2963	3.6036	3.5726	3.5842	0.3267	9.1	0.3231	9.0	0.2879	8.0
14	3.2888	3.2673	3.3333	3.5753	3.5682	3.5845	0.2855	8.0	0.3009	8.4	0.2512	7.0
15	3.2635	3.2614	3.2955	3.5755	3.5750	3.5843	0.3120	8.7	0.3136	8.4	0.2888	3.1
16	3.2806	3.2654	3.2967	3.5772	3.5701	3.5853	0.2966	8.3	0.3047	8.5	0.2886	8.0
17	3.2826	3.2607	3.3035	3.5782	3.5578	3.5852	0.2956	8.3	0.2971	8.4	0.2817	7.9
18	3.2544	3.2479	3.2643	3.5760	3.5710	3.5801	0.3216	9.0	0.3231	9.0	0.3158	8.8
19	3.2768	3.2828	3.2928	3.5746	3.5656	3.5802	0.2978	8.3	0.2828	7.9	0.2874	8.1
20	3.2952	3.2885	3.3095	3.5751	3.5678	3.5807	0.2799	7.8	0.2793	7.8	0.2712	7.6

飽水状態に於ける長さとして $\phi=5\%$ に修正した長さを（前記の如く 4 箇の供試片について繰返し回数毎に）平均して年輪境界及び秋材春材別夫々各回毎の収縮量と飽水状態に対する収縮率とを算出すれば第 8 表の如くなり、各回に於てその収縮率はほぼ秋材年輪境界春材の順に減少し秋材の収縮率は 9.6%~7.8%，年輪界では 9.1%~7.8%，春材では 8.8%~7.6% の範囲で変化し繰返し度数と共に秋材及び春材の収縮率は次第に年輪境界の収縮率に近接する傾向が見られるが、年輪境界の収縮率はこの実験の繰返し度数以内では尙不規則であり、一様な増加及び減少の傾向は認められなかつた。

VII. 細胞の収縮変形

(1) 供試切片の処理と測定法

供試材として用いた材料は前記の伸縮測定に用いた生長状態正常と見做されるトドマツ材で生材を水中に浸漬して凡そ飽水状態に保ち、無処理のままマイクローム切片を作つた。作られた木口切片を水中でサフラン染色をなし、そのまま供試材料としその水分を飽水状態（最大含水率）飽湿状態（繊維飽和含水率）気乾状態（凡そ 15% の含水率）乾燥状態（絶対乾燥）

の3の状態に於て測定を行つた。測定は800倍の顕微鏡視野に於て切線方向及び半径方向の細胞内腔の径、細胞膜の厚さの測定をなし同一切片について春材細胞、秋材細胞夫々50箇づつ切片10箇について行い測定値の平均値と Probable error を求めた。又一切片に於て顕微鏡視野を Mark し同一視野について上記の3つの水分状態の顕微鏡写真を撮り、作られた写真について Planimeter を廻して細胞膜及び空隙の変化を面積比率にして求めた。水分状態を一定に保つ為に飽湿状態、気乾状態(及び乾燥状態)は何れも Ligroin 液に僅かにバルサムを溶して切片を固定して測定を行つた。又乾燥状態は無水アルコールで脱水して、そのまま Ligroin 液に浸漬し液を変えて数度繰返し2~3日間放置して切片中のアルコールが Ligroin 液で置換されたと見做した。

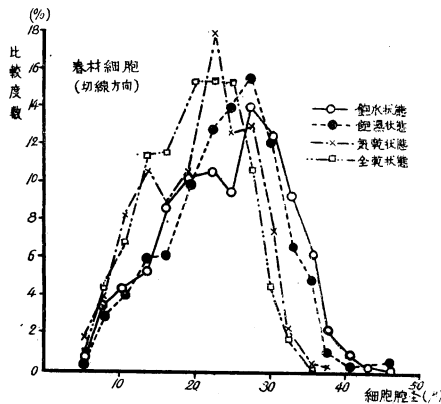
(2) 測定結果

かくして測定した春秋材細胞の細胞内腔の径及び細胞膜の厚さは第9表及び第17~22図に掲げたが何れもかなりの分散値を示し夫々特異な頻度曲線を与えたが、測定値の平均値及び Probable error を算出して各項毎に取纏めると次の如くである。

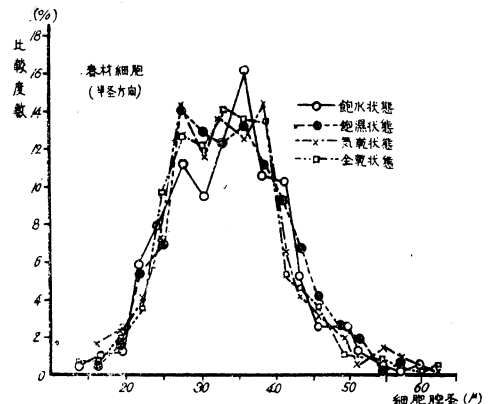
第 9 表

		細胞膜の厚さ μ	飽 水 状 態		飽 湿 状 態		気 乾 状 態		全 乾 状 態	
			出現数	比較度数 %	出現数	比較度数 %	出現数	比較度数 %	出現数	比較度数 %
春	切線方向	1.4	145	48.33	281	63.86	315	70.00	387	77.40
		~2.7	155	51.67	159	36.14	135	30.00	113	22.60
		算 術 平 均	2.1		1.9		1.8		1.7	
		推 差	0.4		0.4		0.4		0.4	
材	半径方向	1.4	65	19.35	87	19.71	152	33.77	153	30.97
		~2.7	212	68.39	353	80.23	296	65.78	341	69.03
		~4.1	31	10.00			2	0.44		
		~5.5	2	0.65						
		算 術 平 均	2.5		2.5		2.3		2.3	
		推 差	0.5		0.4		0.4		0.4	

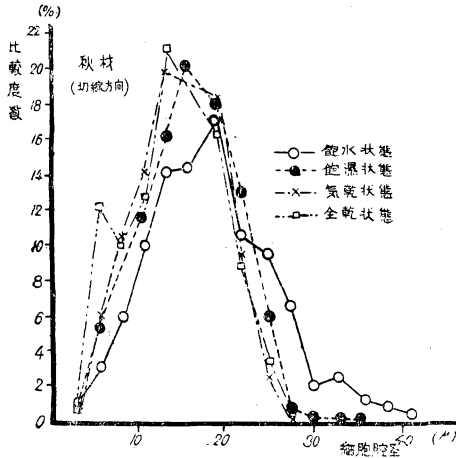
第 17 図 春 材 (切線方向)



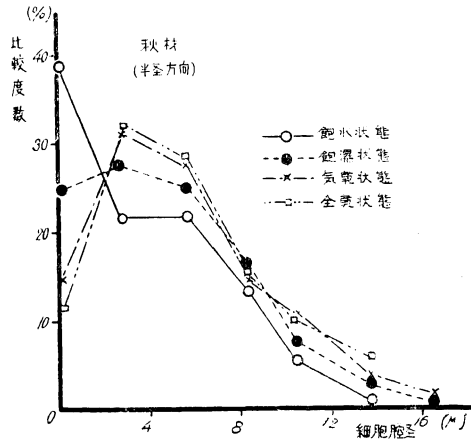
第 18 図 春 材 (半径方向)



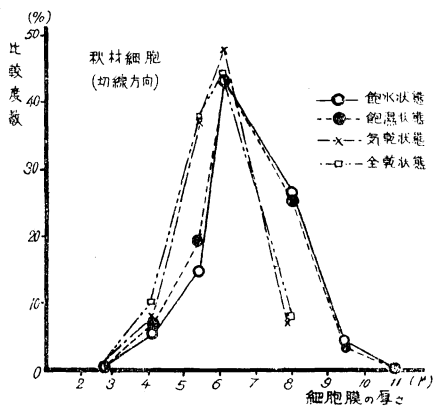
第 19 図 秋 材 (切線方向)



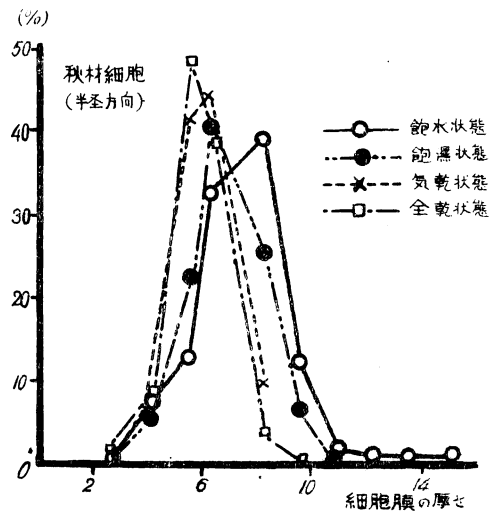
第 20 図 秋 材 (半径方向)



第 21 図 秋 材 (切線方向)



第 22 図 秋 材 (半径方向)



(i) 含水率の変化と細胞腔径の変化

細胞腔径の測定値の平均値及び Probable error を求め全乾状態の測定値よりの伸縮量及び伸縮率を算出し切線方向及び半径方向毎に春秋材細胞の比率と春秋材細胞毎に切線方向及び半径方向の比率を求めると第 10 表及び第 23 図の如くである。

第 10 表

			飽 水 状 態			飽 湿 状 態			気 乾 状 態			全乾状態
			測定値 μ	伸縮量 μ	伸縮率 %	測定値 μ	伸縮量 μ	伸縮率 %	測定値 μ	伸縮量 μ	伸縮率 %	測定値 μ
切線 方向	{	秋 材	18.2 ± 5.1	3.7 ± 6.2	25.5	15.8 ± 3.8	1.3 ± 5.2	9.0	14.6 ± 3.4	0.1 ± 4.9	0.7	14.5 ± 3.5
		春 材	24.0 ± 5.4	4.0 ± 6.8	20.0	23.9 ± 6.8	3.9 ± 8.0	19.5	20.2 ± 6.2	0.3 ± 6.2	1.5	20.0 ± 4.2
		秋 材 / 春 材	0.8			0.7			0.7			0.7
半径 方向	{	秋 材	3.5 ± 2.4	-1.9 ± 3.3	-35.2	4.3 ± 1.9	-1.1 ± 2.4	-20.4	5.1 ± 2.0	-0.3 ± 3.0	-5.6	5.4 ± 2.2
		春 材	33.8 ± 5.2	0.4 ± 7.4	1.2	34.2 ± 5.2	0.8 ± 7.4	2.4	33.3 ± 5.2	-0.1 ± 7.4	-0.3	33.4 ± 5.3
		秋 材 / 春 材	0.1			0.1			0.2			0.2
		秋材切線方向										
		秋材半径方向	5.2			3.7			2.9			2.7
		春材切線方向										
		春材半径方向	0.7			0.7			0.6			0.6

切線方向では春秋材細胞は何れも含水率の減少と共に Lumen の径の明らかな減少が認められ、秋材細胞は飽水状態と飽湿状態との間にかなりの収縮がある様に思われるが秋材細胞では飽水状態から飽湿状態までには殆んど収縮は認められず、飽湿状態から臨界的に収縮が移行している様に認められる。これに反して半径方向については含水率の減少に伴う腔径の縮小は認められずかえつてその拡大が測定された。而もこの現象は秋材細胞で著しく恰も切線方向の収縮経過と対照的な拡大経過が観察されたが春材細胞に於てはその拡大は極めて小であり、而も臨界的な変化も殆んど認められなかつた。

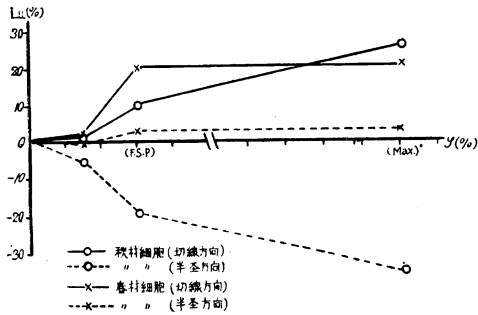
(ii) 含水率の変化と細胞膜の厚さ

細胞膜の厚さについては何れも含水率の減少に伴う厚さの収縮が測定されたが、切線方向に於ては春材細胞膜が秋材細胞膜より 僅かに大なる収縮率を示しているが、半径方向に於てはこれに反して春材細胞膜の収縮率は秋材細胞膜に比して著しく小さく測定された。これらは

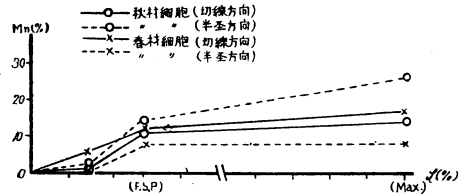
第 11 表

			飽 水 状 態			飽 湿 状 態			気 乾 状 態			全乾状態
			測定値 μ	伸縮量 μ	伸縮率 %	測定値 μ	伸縮量 μ	伸縮率 %	測定値 μ	伸縮量 μ	伸縮率 %	測定値 μ
切線 方向	{	秋 材	7.0 ± 0.9	0.9 ± 3.8	14.8	6.8 ± 0.9	0.7 ± 3.8	11.5	6.2 ± 0.1	0.1 ± 3.4	1.6	6.1 ± 0.8
		春 材	2.0 ± 0.4	0.3 ± 0.6	19.6	1.9 ± 0.4	0.2 ± 0.6	11.8	1.8 ± 0.4	0.1 ± 0.6	5.9	1.7 ± 0.4
		秋 材 / 春 材	3.5			3.6			3.4			3.6
半径 方向	{	秋 材	7.5 ± 1.1	1.5 ± 1.3	26.7	0.9 ± 0.9	0.9 ± 1.1	15.0	6.2 ± 0.7	0.2 ± 1.0	3.3	6.0 ± 0.7
		春 材	2.5 ± 0.5	0.2 ± 0.6	8.7	2.5 ± 0.4	0.2 ± 0.6	8.7	2.3 ± 0.4	0.0 ± 0.6	0.0	2.3 ± 0.4
		秋 材 / 春 材	3.0			2.8			2.7			1.0
		秋材切線方向										
		秋材半径方向	0.9			1.0			1.0			1.0
		春材切線方向										
		春材半径方向	0.8			0.8			0.8			0.7

第 23 図 細胞内腔の径の伸縮率 (%)



第 24 表 細胞膜の厚さの伸縮率 (%)



第 11 表及び第 24 図に取纏めたが、切線方向に於ては秋春材細胞何れも飽水状態から飽湿状態までに僅かながら膜収縮が認められているが、半径方向に於ては秋材細胞のみ膜収縮が認められ春材細胞に於てはこの膜収縮が全然観察されなかつた。

(iii) 含水率の変化と細胞の変形

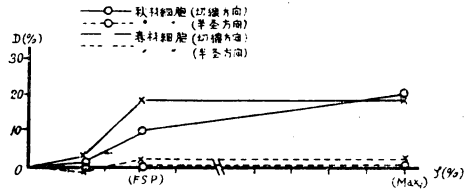
秋春材細胞は上述の様に細胞内腔の伸縮と細胞膜の伸縮は必ずしも同一の経過を示さないから一つの細胞膜で囲まれた細胞の外部変形について切線方向及び半径方向の伸縮量をこれらの値から算出して見ると第 12 表及び第 25 図の如くなり、切線方向に於ては秋材、春材細胞共含水率の減少に伴う外径の収縮を示し、而も秋材細胞に於ては飽水状態から飽湿状態までにかな

第 12 表

			飽 水 状 態			飽 湿 状 態			気 乾 状 態			全乾状態
			測定値 μ	伸縮量 μ	伸縮率 %	測定値 μ	伸縮量 μ	伸縮率 %	測定値 μ	伸縮量 μ	伸縮率 %	測定値 μ
切線 方向	{	秋 材	32.2 ± 6.5	5.5 ± 8.2	20.6	29.4 ± 5.5	2.7 ± 9.3	10.1	29.0 ± 4.6	0.3 ± 6.9	1.1	26.7 ± 5.0
		春 材	28.0 ± 5.7	4.6 ± 7.3	19.7	27.7 ± 7.1	4.3 ± 8.4	18.4	23.9 ± 4.9	0.5 ± 6.8	2.1	23.4 ± 4.6
	{	秋 材 / 春 材	1.2			1.1			1.1			1.1
		秋 材	18.5 ± 3.8	1.1 ± 3.8	0.6	18.1 ± 2.8	0.7 ± 6.1	0.4	17.5 ± 3.7	0.1 ± 3.3	0.1	17.4 ± 3.8
半径 方向	{	春 材	38.8 ± 5.6	0.8 ± 7.4	2.1	39.2 ± 5.5	1.2 ± 7.4	3.2	37.9 ± 5.5	-0.1 ± 7.4	-0.3	38.0 ± 5.6
		秋 材 / 春 材	0.5			0.5			0.5			0.5
	{	秋材切線方向										
		秋材半径方向	1.7			1.6			1.5			1.5
		春材切線方向										
		春材半径方向	0.7			0.7			0.6			0.6

りの収縮量が認められるが、春材細胞についてはこの収縮量は殆んど認められない様な結果を示した。更に又半径方向に於ては秋春材細胞は何れも含水率の減少に伴う外径の収縮を示しているが、春秋材細胞の差違は秋材細胞の著しい内部収縮によつて外径変形の差違は極く僅かに認められるに過ぎない。従つて又飽水状態から飽湿状態に至る外部収縮は秋材、春材細胞何れに於ても著しく小さく現われているのみである。

第 25 図 細胞外径の収縮率 (‰)



(iv) 細胞内腔の面積変化

前項に述べた如く細胞内腔の径の伸縮は切線方向及び半径方向について秋材細胞について全く異つた形態を示し、秋材細胞に於てはその半径方向には含水率の減少に伴う収縮の経過は全然認められずむしろ明かな内部膨張の経過を示している。腔径がかくの如くそれぞれ特異の伸縮経過をとる場合に内腔の断面積変化は細胞内腔を長方形断面として算出すれば第 13 表の

第 13 表

		飽水状態			飽湿状態			気乾状態			全乾状態
		測定値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	測定値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	測定値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	測定値 μ^2
秋	材	63.7	-14.6	-18.6	67.9	-10.4	-13.3	74.5	-3.8	-4.9	78.3
春	材	811.2	143.2	21.4	817.4	149.4	22.4	676.0	8.0	1.2	668.0
秋	材 / 春 材	0.08			0.08			0.11			0.12

如くなり面積的に見ても春材細胞は含水率の減少に伴つて内腔は伸縮経過をたどるが秋材細胞に於ては半径方向の著しい内部膨張の為に含水率の減少に従つて明かな内腔の膨張経過が示された。

(v) 細胞の面積変化

含水率の変化に伴う細胞内腔の面積変化が上述の如く春秋材細胞について全く異つた経過を示しているが、細胞膜で囲まれた一の細胞の面積変化を春秋材細胞毎に算出すれば第 14 表の

第 14 表

		飽水状態			飽湿状態			気乾状態			全乾状態
		計算値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	計算値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	計算値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	計算値 μ^2
秋	材	595.7	131.1	28.2	532.1	67.5	14.5	472.0	7.9	1.7	464.6
春	材	1086.4	197.2	22.2	1085.8	196.6	22.1	905.8	16.6	1.9	889.2
秋	材 / 春 材	0.6			0.5			0.5			0.5

如くなり秋材、春材細胞何れに於ても含水率の減少に伴う面積収縮を示し而も春材細胞に於ては飽水状態から飽湿状態に至る変化量は殆んど認められないが、秋材細胞に於ては前述の各変化量の場合と同様に飽湿状態に至るまでに明かな変化量が認められる。

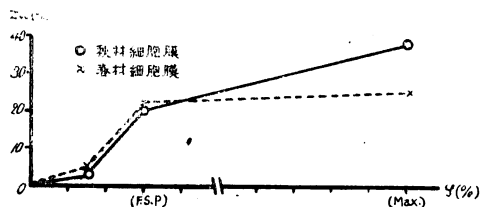
(vi) 細胞膜の面積変化

上述の細胞面積と細胞内腔の面積から細胞膜量のみの面積変化について算出すれば第 15 及

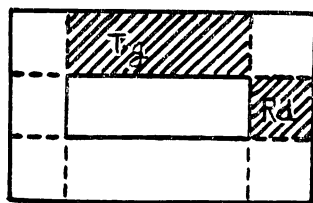
第 15 表

		飽 水 状 態			飽 湿 状 態			気 乾 状 態			全乾状態
		計算値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	計算値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	計算値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	計算値 μ^2
秋	材	532.0	145.7	37.7	464.2	77.9	20.2	398.0	11.7	3.0	386.3
春	材	275.0	54.0	24.4	268.4	47.2	21.3	229.8	8.6	3.9	221.2
秋	材 / 春 材	1.9			1.7			1.7			1.7

第 26 図 細胞膜量の変化率 (%)

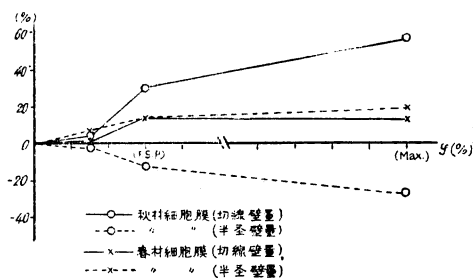


第 27 図



Tg: 細胞膜, 切線壁量
Rd: 細胞膜, 半径壁量

第 28 図 細胞膜の切線壁量及び半径壁量の変化率 (%)



第 16 表

		飽 水 状 態			飽 湿 状 態			気 乾 状 態			全乾状態
		計算値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	計算値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	計算値 μ^2	伸縮量 μ^2	伸縮率 %	計算値 μ^2
Tg	秋 材	136.5	49.5	56.9	109.0		25.3	90.5	3.5	4.0	87.0
	春 材	60.0	14.0	30.4	59.8	13.8	30.0	46.7	0.7	1.5	50.8
	秋 材 / 春 材	2.3			1.8			1.9			1.9
Ra	秋 材	24.5	-8.4	-25.5	29.2	-3.7	-11.2	31.6	-1.3	-4.0	32.9
	春 材	67.6	10.8	19.0	65.0	8.2	14.4	57.9	3.1	5.5	50.8
	秋 材 / 春 材	0.4			0.4			0.5			0.6
秋材細胞切線壁量											
秋材細胞半径壁量		0.6			0.4			0.3			0.3
春材細胞切線壁量											
春材細胞半径壁量		0.9			0.9			0.8			0.8

び第 26 図の如くなり, 膜全量の変化は秋春材細胞膜何れにしても含水率の減少に伴う膜量の

面積収縮が明かに認められ、而もこの傾向は亦上述の場合の如く秋材細胞膜に於ては飽水状態から飽湿状態に至る変化量が可成り明白であるにもかかわらず春材細胞ではこの差違は殆んど全く認められない様に思われた。細胞膜全量についての以上の結果から秋春材細胞の明かな定性的因子を結論する事は困難の様に思われるので、第27図の如く細胞膜を切線壁のもの (Tg と半径壁のもの (Rd) に分けて夫々切線壁量と半径壁量の変化量を算出してみると第16表及び第28図の如くなり、秋材細胞に於ては切線壁量と半径壁量との変化は全く異つた状態を示した。即ち切線壁の秋材細胞膜は含水率の減少に伴う膜面積の収縮経過が認められるが、半径壁の細胞膜ではこれに反しむしろ明かな膨張経過が認められる。春材細胞膜については切線壁のものも半径壁のものも殆んど全く同様な変化の状態を示し膜量は含水率の減少と共に収縮の経過をとるが飽水状態より飽湿状態に至る変化量は何れも極めて小さいものとして示された。

(vii) 顕微鏡写真による細胞膜量及び空隙量の面積変化

顕微鏡視野を Mark して同一視野について切片の水分状態を飽水状態→全乾状態→飽水状態の方向に移動させ附図の如き顕微鏡写真を撮り写真上に大約同一と見做される視野 70 mm × 100 mm の面積を固定してその面積中の細胞膜量、空隙量及び髓線空隙量の総和を Planimeter を廻して面積比率にて算出した。測定値から算出された細胞膜量空隙量及び髓線空隙量の変化は第17表の如くなり、秋春材細胞共含水率の減少に伴う細胞膜量の減少と空隙量

第 17 表

		春				材				秋				材			
		細胞膜量		髓線空隙量		空隙量				細胞膜量		髓線空隙量		空隙量			
		面積 mm ²	比率 %	面積 mm ²	比率 %	面積 mm ²	比率 %			面積 mm ²	比率 %	面積 mm ²	比率 %	面積 mm ²	比率 %		
飽	水	1946	27.8	196	2.8	4858	69.4			4032	57.6	210	3.0	2758	39.4		
飽	水→飽	1876	26.3	245	3.5	4883	69.8			3031	43.3	280	4.0	3689	52.7		
飽	湿→気	1925	27.5	245	3.5	4830	69.0			2912	41.6	280	4.0	3808	54.4		
気	乾→全	1561	22.3	259	3.7	5180	74.0			2814	40.2	336	4.8	3850	55.0		
全	乾→気	1936	24.8	231	3.3	5033	71.9			3017	43.1	238	3.4	3745	53.5		
気	乾→飽	1736	24.8	252	3.6	5012	71.6			3647	52.1	266	3.8	3151	45.1		
飽	湿→飽	—	—	—	—	—	—			4095	58.5	245	3.5	2660	38.0		

第 18 表

			飽 水 状 態			飽 湿 状 態			気 乾 状 態			全乾状態	
			測定値	伸縮量	伸縮率	測定値	伸縮量	伸縮率	測定値	伸縮量	伸縮率	測定値	
			μ ²	μ ²	%	μ ²	μ ²	%	μ ²	μ ²	%	μ ²	
細胞膜量	秋	材	4032	1215	43.2	3031	217	7.7	2912	98	3.5	2814	
	春	材	1946	385	24.7	1876	315	20.2	1925	364	23.8	1561	
髓 線	秋	材	210	-126	-37.5	280	-56	-16.7	280	-56	-16.7	336	
	春	材	196	-63	-24.3	245	-14	-5.4	245	-14	-5.4	259	
空 隙 量	秋	材	2758	-1065	-27.7	3689	-161	-4.2	3808	-42	-1.4	3850	
	春	材	4858	-322	-6.2	4886	-294	-5.7	4830	-75	-1.4	5180	

及び髓線空隙量の増加の傾向を示したのは前項と同様であつた。これを全乾状態に対する変化の比率として示すと第9表の如くなり前項に於て算出した細胞膜全量の変化の状態とは可成りの差違を示しているが、秋材細胞膜量の飽水状態から飽湿状態に至るまでの変化の経過は大約同様な傾向と見做し得る。細胞膜量の変化に次いで空隙量及び髓線空隙量の変化は大約第18表の示す如き傾向を示し空隙量は全く含水率の減少に伴い増加の傾向を与えた。

(3) 測定結果についての検討

木材の伸縮に対する理論的説明は主として細胞膜の微細構造に基礎を置いて考えられている。即ち一般的には木材の外形的容積変化は繊維飽和点まではその含水率に比例する事が認められて居り高含水率に於ける収縮量を無視すれば収縮が生ずる限界含水率があると見做しているのであつて、従つて水分移動が非常に緩慢に進行し水分傾斜が生ぜず又含水分布が均等である様な場合には収縮曲線から初期収縮が全く除去されるものと推定している。従つて一般的には繊維飽和点は木材中の細胞内腔は空で細胞膜のみが水で飽和されている状態であると定義している様である。木材は湿氣的導体であるから木材中の水分をかくの如く細胞間隙中のものと細胞膜中のものに分類してもこれは常に“Potential gradient”によつて一の状態から他に移行するものである。この湿氣の移行を定める Potential は水の蒸気圧である。この蒸気圧が木材中に於て同一であるとすれば平衡状態は定まるが単位容積当りの水の量は同一になるを要しない。従つて木材中に湿氣移動が生じないときは細胞膜中の水と細胞間隙中の水の蒸気圧は等しくなる。細胞間隙中の水が全く自由な水とすれば細胞間隙中の水は飽和蒸気圧を示し外部湿度の減少が無限小であつても完全に蒸発する事になる。而し木材中の細胞内腔は極めて小さいものであり、内腔中の水はこの毛細管との表面張力によつて保持され、一部細胞膜に分子的に吸着されている水の蒸発が始まれば水は細胞膜と内腔から同時に移行すると考えられる。而も春材細胞は秋材細胞に比して可成り大きな内腔をもつものであるから蒸発による初期の湿氣移動は春材細胞に生ずる事になる。然しこの測定結果から明かな様由高含水率による初期の収縮経過は秋材細胞にのみ生じこれは細腔の内腔変形についても亦細胞の膜収縮についても、従つて又細胞の外形変形についても明かに観察されている。この事は秋材細胞の限界含水率が春材細胞乃至は木材のそれよりかなり大である事を推察すれば首肯し得られる事であり、秋材細胞の限界含水率はその飽水含水率（前述した）と共に一つの特異点を示すものと考えられ、前述した収縮曲線に高含水率に於ける特性を与えたものと考えられる。木材中の水分は一部分は毛管現象により物理的に細胞膜の微細構造中に保持されて居り、木材が均質体であるとすれば細胞膜も細胞内腔も同一比率の収縮膨張を示す筈である。然し不等質体である木材に於てその細胞内腔の小さい秋材細胞は春材細胞に比して収縮率大であり、而もこの伸縮経過に於て細胞内腔の伸縮は膜實質に比して甚だしく小さいか乃至は秋材細胞に於ける如くしばしば全く負の伸縮形態を示している。これは細胞内腔中の水分が全く消失する点即ち繊維飽和点に於けるま

で継続される木材の特性であり、木材の見掛上の容積変化 (α_v) が細胞膜中の水の容積によつてのみ制約され細胞内腔中の水はこれと全く無関係であるとする繊維飽和点の概念を基礎として作られた Newlin-Wilson の式 $\alpha_v = u \cdot R$ に於ても秋材細胞の2次肥厚膜の内部変化による修正を施さなければならない。

VIII. 実施した研究の概要とその考察

(1) 収縮曲線

トドマツ気乾材中年輪巾の比較的広いもの Tg, Rd (年輪密度 $\approx 1.3 \sim 1.6$) と比較的狭いもの tg, rd (年輪密度 $\approx 5.0 \sim 5.2$) の2組の供試片について含水状態から全乾状態までの含水率変化に伴う伸縮経過を測定して脱湿吸湿の方向別に収縮経過を検討した。低含水率に於ける収縮経過は殆んど直線的と見做されるが含水率 $\varphi \approx 5\%$ に於て明瞭な変曲部分を示し切線収縮では $\varphi < 15\%$ の範囲に於ては収縮経過は常に直線に対して凸形であり、半径収縮では $\varphi < 10\%$ の範囲に於ては凸形 $\varphi \approx 10 \sim 20\%$ の範囲では凹形を示す S 字状経過を与えた。切線及び半径方向の低含水率に於ける収縮経過を直線式として示せば

$$Tg = -0.3710\varphi + 10.8241$$

$$Rd = -0.0907\varphi + 2.3817$$

$$tg = -0.3812\varphi + 10.7975$$

$$rd = -0.1220\varphi + 3.1928$$

となり、この直線式の示す限界含水率 mp は

$$Tg: mp = 29.18\%$$

$$tg: mp = 28.32\%$$

$$Rd: mp = 26.26\%$$

$$rd: mp = 26.17\%$$

として与えられる。上述の直線式によつて与えられる収縮率は大沢正之氏が北見産トドマツ材について求めた

$$\lambda_t = 0.31568\varphi^{0.99855}$$

$$\lambda_r = 0.15049\varphi^{0.90348}$$

の拋物線式又矢沢龜吉氏が樺太産材について得た

$$\lambda_t = \frac{8.86}{26} \cdot \varphi$$

$$\lambda_r = \frac{3.47}{26} \cdot \varphi$$

に比し切線収縮については何れも可成り大なる値を与えているが、これは繊維飽和点の長さを規準としたものと飽水状態の長さを規準としたものとの差違を示すものと考えられる。高含水率に於ける収縮経過は脱水及び吸水に従つて収縮曲線に明瞭な Hysteresis 効果が見られ、切

線収縮に於ては吸水伸長が脱水収縮より常に大なる伸縮量を与え半径収縮ではこれに反して吸水伸長は脱水収縮より $\varphi \approx 30 \sim 120\%$ の範囲に於て例外なく小なる値を示して Hysteresis Loop を作り $\varphi > 150\%$ 以上ではこの関係は殆んど消失して不規則な変化を示した。切線伸縮のかかる効果は木材表面層の初期の伸縮経過に基くものと考えても半径収縮に於ては初期の含水移動は吸水経過に於ては秋材細胞と脱水経過に於ては春秋材細胞に起り吸水経過に於ては秋材細胞の半径収縮を伴う事によつて首肯し得られるもので $\varphi \approx 100 \sim 150\%$ は秋材部の含水率を示す特異点として認められよう。

(2) 収縮曲線に及ぼす材質的影響

生材、気乾材、古材、櫛材等の供試片によつて伸縮特性に影響する材質的效果を検討したが生材、古材について得られた曲線には形態的な差違は殆んど認められなかつたが、櫛材については低含水率の収縮経過は殆んど全く直線的であつた。供試片として用いた各材種間の定性的差違を無視して容積密度数 (R) と容積収縮率 (α_v) とについて見ると α_v の最大値は $R \approx 0.32$ に認められ $R \approx 0.32 \sim 0.60$ の R 増加の方向については α_v の減少の傾向を示し $R \approx 0.32 \sim 0.27$ の R 減少の方向に於ても亦 α_v の減少の傾向が認められた。これらの関係により Newlin-Wilson の式 $\alpha_v = u \cdot R$ は秋材細胞の内部収縮について充分な修正を行う事によつてのみその妥当性を見出すものと考えた。

(3) 湿気平衡 Hysteresis (吸湿脱湿平衡の特性曲線)

トドマツ気乾材について等温脱湿吸湿平衡曲線を求めその特性を検討したが、吸湿脱湿平衡の Hysteresis 効果は $\varphi \approx 7\%$ の含水率から認められ吸湿平衡の際には飽和圧の附近で平衡の時間効果が甚だしかつた。平衡曲線はガス吸着を示す一般的な実験式 (Freundlich, Langmir, Williams-Henry) では何れも飽和圧に近い部分と $\varphi \approx 10 \sim 20\%$ の範囲でこの特性曲線に殆んど適合しない様に思われた。低圧部に於ける平衡曲線の変曲点は凡そ $5 \sim 7\%$ でこれ以下の含水率に於ては Hysteresis 効果は殆んど negligible であるから $\varphi < 5\%$ の含水率を吸着機構に無関係な含水範囲と考えれば所謂結合水の範囲とも見做され、前述の収縮曲線の特異点とも一致している。 $\varphi \approx 10 \sim 20\%$ の含水範囲はガス吸着の実験式に適合しない範囲であり、又この部分が Hysteresis Loop の中心をなしている事を考えれば同様に木材に特異なる含水範囲と見做され、更に又収縮曲線の示す特異点とも一致した。

(4) 吸湿脱湿特性に及ぼす材質的影響

生材、古材、櫛材、気乾材を供試材として湿気平衡状態に及ぼす材質的偏異を検討したが、生材については低圧部から飽和圧の近くまで Hysteresis 曲線は殆んど平行的に表われ古材については $\varphi \approx 7\%$ から Hysteresis 効果は次第に増加の傾向を示し、櫛材についてはかかる Hysteresis 効果は殆んど不明でさえあつた。櫛材について、かかる現象はその収縮曲線が殆んど直線的である事と共に更に検討を要する問題であらう。

(5) 伸縮の繰返し変化

飽水状態から $\phi \approx 5\%$ に至る 20 回の含水繰返し効果によつて受ける材質的变化について検討し年輪境界を挟む秋材及び春材の収縮経過は繰返し度数と共に年輪境界の収縮経過に近接する傾向が認められたが年輪境界の収縮経過は尙不規則で一様な傾向は認められなかつた。

(6) 細胞の収縮変形

春秋材細胞別に飽水→全乾に至る細胞の変形を膜の厚さ細胞内腔の径について観察し、これらの測定値から更に細胞の外形、細胞膜、細胞内腔及び細胞外形の断面積収縮等について検討して次の事項を明かにした。

(i) 細胞腔径の収縮は春秋材細胞共切線方向について認められるが秋材細胞半径方向についてはむしろ伸長経過が測定された。飽水→飽湿に至る腔径の収縮は秋材細胞のみに認められた。

(ii) 細胞膜厚の収縮は秋材細胞半径方向に最大で春材細胞半径方向に最小であり、切線方向については春秋材細胞共大差がなかつた。

(iii) 細胞外形の収縮は春秋材細胞共切線方向に著しく半径方向については何れも極めて小であり飽水→飽湿に至る外形収縮は秋材細胞にのみ認められた。

(iv) 細胞内腔の断面積収縮は春材細胞にのみ認められ秋材細胞ではむしろその膨張経過が測定された。

(v) 細胞外形の断面積収縮は春秋材細胞共に測定されたが飽水→飽湿に至る収縮は秋材細胞のみに認められた。

(vi) 細胞膜量の収縮は春秋材細胞共に測定されたが飽水→飽湿に至る収縮経過は秋材細胞のみに認められた。

(vii) 膜量の収縮を更に切線壁と半径壁とに分けて見ると春材細胞では何れについても収縮経過を示すが秋材細胞では切線壁は収縮経過を示し半径壁は膨張経過を示した。

(viii) 飽水→飽湿に至る経過に於て秋材細胞が常に明瞭な収縮を示したのは秋材細胞の限界含水率が春材細胞乃至は木材の限界含水率よりかなり大である事を推察すれば首肯し得られる事であり、高含水率に於ける収縮経過に特性を与えるものと考えられる。細胞諸元の伸縮を総括して

収縮経過の認められるもの……………(+)

膨張経過の認められるもの……………(-)

伸縮経過がないか又は極めて小さいもの……(±)

の記号で示すと第 19 表の如くなり細胞の外形変形がその半径方向に極めて小なる事は細胞内腔の半径方向の収縮が極めて小なるか、又はむしろ伸長経過が認められる事から容易に理解され、木材の伸縮経過についての説明により妥当性を与えるものと思う。

第 19 表

	腔 径		膜 厚		外 形		内腔の面積	膜 量		膜 量	
	Tang	Rad	Tang	Rad	Tang	Rad				Tang	Rad
春材細胞	+	±	+	+	+	±	+	+	+	+	+
秋材細胞	+	-	+	+	+	±	-	+	+	+	-

(7) 低含水率及び高含水率の伸縮経過、湿気平衡の特性曲線及び春秋材細胞の伸縮形態から木材の水分状態について特異点として考えられる含水率は次の如きものであつた。

$\phi \approx 5\%$ (結合水の範囲)

$\phi \approx 10 \sim 20\%$ (Tieman の細胞内腔の張力, Barkas の熱効果, Koehler の Aosorption Point)

$\phi \approx 26 \sim 29\%$ (Wilson の限界含水率)

$\phi \approx 50\%$ (高含水率に於ける伸縮の限界含水率 ?)

$\phi \approx 120 \sim 150\%$ (秋材飽水含水率)

Ⅱ. 文 献

- 1) 三好東一：気候的影響が同一樹種の材質に及ぼす関係調査（帝室林野局林業試験場報告第1巻4号）
- 2) 田中勝吉：本邦産主要樹種収縮試験（北海道林業会報第 25 巻 12 号）
- 3) 諸戸北郎：木材の理学的性質の研究（林業試験報告 明治 42 年 6 号）
- 4) 杉浦庸一，井上重則：木材の吸湿膨張試験（林業試験報告 大正 7 年 17 号）
- 5) 大沢正之：環境湿度と木材含水率との関係（札幌農林学会報 昭和 3 年 89 号）
- 6) 森 三郎：木材の吸湿膨張試験（林業試験報告 昭和 4 年 29 号）
- 7) 矢沢龜吉：樺太産主要木材の物理的性質に関する研究（樺太庁中央試験所報告第 2 類 昭和 11 年 11 号）
- 8) 矢沢龜吉：樺太産主要木材の繊維飽和点収縮率全乾比重に就て（林学会誌 昭和 11 年）
- 9) M.Ohsawa: Vergleichende Untersuchungen über die Qualitäten, insbesondere die Elastität und Festigkeiten der Tannen und Fichtenhölzer Hokkaidos.
(The Journal of College of Agriculture, Hokkaido Imp. Univ. Vol. 27)
- 10) F. Kollman: Technologie des Holzes. 1936. s. 89.
(Die Quellung in verschiedenen Flüssigkeiten.)
- 11) Wilson, T. R. C.: Strength Moisture Relations for wood.
(Tech. Bull. U.S. Dep. Agric. 1932. No. 282.)

- 12) W. W. Barkas: Recent work on the moisture in wood in relation to strength and shrinkage. (Dep. of scientific and industrial reserch. Forest Products Reserch. special report No. 4 1938.)
- 13) 宮部宏: 材料の湿氣的性能 (早稲田大学理工学研究所報告 第1輯)
- 14) Allmand: Journ. phys. chem. 33, 1929, 1151—1694.
- 15) Tieman: Technology of wood.
- 16) Koehler.B.S.: The properties and uses of wood. 1924.
- 17) Halord L.: Equilibrium moisture content of salt-treated wood.
(Bull. of the New York State College of Forestry at Syracuse Univ. Tech. Publication No. 58 1941.)
- 18) Trendlenburg, R: Das Holz als Rohstoff. München 1939.
- 19) A, Frey-Wyssling: Die Ursache der anistropen Schwindung des Holzes.
(Holz als Roh und Werkstoff. 1940, Heft 11 s. 24)
- 20) D. Johanson: Über Früh und Spätholz in Schwedischen Fichte und Kiefer und über ihren Einfluss auf die Eigenschaften von Sulfit und Salfatzellstoff.
(Holz als Roh und Werkstoff. 1940, Heft 3 s. 3)
- 21) 宮部宏: 木材の伸縮に就いて (建築雑誌第 43 輯第 524 号昭和 4 年)
- 22) 田丸節郎, 落合和男: 木材の物理化学的研究 II: (木材の湿気による伸縮のヒステリシス及び吸水量に就いて) (日本化学会誌第 53 帙第 6 号 629 頁)
- 23) 小栗捨蔵: 纖維素の吸湿に就いて (工業化学雑誌第 33~34 卷昭和 5, 6 年)
- 24) 長沢武雄: 板材の乾燥に関する解析的研究 (九州大学農学部学芸報告 昭和 3 年 3 卷 2 号)
- 25) 田丸節郎, 安藤暹: 木材の物理化学的研究 I (湿度による木材の各方向の膨張)
(日本化学会誌第 52 帙第 8 号昭和 6 年)
- 26) 真島正市: 木材の「枯レ」に対する一実験 (理学研究所彙報第 13 輯第 3 号 P. 163 ~168)
- 27) R.E.Wilson: Journ. Ind. Eng. Chem. 1921, 13. s. 328.
- 28) W.Beiser: Die Mikroskopische Untersuchungen über den Schwinden der Fichten und Buchenhölzer. (kolloid Zeitschrift 1933, 65, s. 203~211.)
- 29) 宮部宏: 木材含水率に及ぼす大気の湿度と温度との影響 (建築雑誌第 43 輯第 520 号 P. 49 昭和 4 年)
- 30) 加納孟: 古材の湿氣的性質について (北海道林業試験集報第 68 号 昭和 24 年)
- 31) A.J.Stamm: Passage of Liquids, Vapours, and Dissolved Material through Softwood. (Tech. Bull. No. 929, 1946.)

Résumé

This report covers in outline the work on the hygroscopical properties of wood in relation to the shrinkage and the cellular constraction of wood. Early experiments on the change of physical properties of wood with changes in moisture content showed that most of all properties appeared to be constant for all moisture contents above a certain critical value, whereas this value it changes rapidly and continuously, as the moisture contents fell. This value appeared to be a natural property of the material and was called the Fiber Saturation point. For most wood it lies between 25 and 30 percent moisture content. This has been fully explained by Wilson and need not be detailed here, but it showed should be noted that the inherent variability of wood makes an accurate determination a matter of some difficulty. Work on shrinkage brought to light the fact that, on drying green wood very little shrinkage occurs until moisture contents of between about 35 and 25 percent are reached, whereas below this region the shrinkage increases progressively and appears to be proportional to the fall in moisture content. So this investigation has a purpose to systematise the respective factors of wood property by means of studying the cellular constraction of wood. The designation of project and the result obtained are as follows.

(1) The shrinkage curve.

Measuring the shrinkage progress of air-dried wood corresponding to various water contents between the condition filled with water and dried absolutely on two groups of sample which had comparatively broad width of annual ring (density of growth ring $\approx 1.3 \sim 1.6$) and comparatively narrow (density of growth ring $\approx 5.0 \sim 5.2$), their shrinkage curves according as absorption and desorption were respectively searched. The progress of shrinkage at low moisture contents was approximately almost linear, but it showed an evident inflexion zone at moisture content 5%, and at 15% in tangential shrinkage it was always convex against this line, radial at $\varphi \approx 10\%$ convex, and both at 10~20% concave against this line. The value of shrinkage progress as considering almost linear, is calculated from the equation.

$$Tg = -0.3710\varphi + 10.8241$$

$$Rd = -0.0907\varphi + 2.3817$$

$$tg = -0.3812\varphi + 10.7975$$

$$rd = -0.1220\varphi + 3.1928$$

Where Tg and R is the tangential or the radial shrinkage percent showed by the sample which had comparatively broad width of annual ring, and tg and rd is the other one that had comparatively narrow and φ the water content of these samples.

Fig. 1~2 shows typical shrinkage curves for Todo-fir obtained by averaging the individual curves obtained by several samples. The samples measure 600 mm³ and 40 mm in the direction in which shrinkage is to be measured. Only radial and tangential shrinkage are given because the longitudinal shrinkage is very small and may be neglected. The small shrinkage occurring at high moisture content is seen in there graphs and on the assumption that this is due to the premature shrinkage of the surface layers, a straight line shown dotted has been drawn through the points of lower moisture content to cut the zero shrinkage line at mp , the moisture content at which shrinkage is supposed to

start. This is shown by the four samples:

Tg : *mp* = 29.18%

tg : *mp* = 28.32%

Rd : *mp* = 26.26%

rd : *mp* = 26.17%

It will be seen that the intersection point for the tangential section is at a higher moisture content than for the radial as is usually the case in such curves.

On the progress of shrinkage at high moisture contents, an undoubted hysteresis effect of shrinkage curve according to giving and taking out water was observed. The curve for tangential shrinkage appeared such that at any moisture content the dimension on trying were smaller than on wetting but the curve for radial was found to be coincident with the shrinkage between the critical moisture content and about 120% moisture content, whereas under this value a distinct hysteresis appeared such that at any moisture content the dimensions on drying were greater than on wetting. Above 150% moisture content this relation disappeared and the progress was very irregularly. The tangential shrinkage hysteresis at high moisture contents is considered on the assumption that this is due to the premature shrinkage of the surface layers, but on the radial hysteresis we may consider as the different shrinkage process between the spring and the summer wood.

(2) The effect of wood quality to their shrinkage curves.

The effects of wood quality to their shrinkage a swelling properties were observed about the shrinkage progress as above, employing as samples green lumber, air dried wood, compression wood and the wood exposed in the open for a long period of time. Between the shrinkage curves of green lumber and aged lumber then was no formal difference, but as to compression wood the progress of shrinkage at low moisture contents was almost completely linear and it showed no point of inflexion as above. If the qualitative difference of these samples is neglected, the relation between the bulk density (R) and the volumetric shrinkage (α_v) is shown that the maximum value of (α_v) appeared at the point of $R=0.32$, so at any direction either increasing or decreasing of R in the range of $R=0.27\sim0.60$ there is a tendency to decreasing the volumetric shrinkage (α_v).

(3) The hysteresis of moisture equilibrium.

The equilibrium moisture contents on isothermal desorption for moisture equilibrium of air dried Todo-fir were searched. The hysteresis effect of absorptive or desorptive equilibrium was given above 7% and at absorption the time effect of equilibrium was especially very remarkable. It seemed that the common experimental equations on the absorption of gas (Freundlich's Langimir's or W. Henry's equation) did not almost fit for this natural property curve. The inflexion point for the equilibrium curve seemed from this experiments to disappear near the range of $\varphi=5\sim7\%$, below these points the effect of hysteresis was almost negligible. This result were similar to those obtained the shrinkage curve and the departure from the equation of gas absorption at the moisture content $\varphi=10\sim20\%$ was found to be coincident with the hysteresis effect of moisture equilibrium, and with the shrinkage between about 10~20% moisture content that might be supposed a thermal effect by W. W. Barkas.

(4) The effect of wood quality to the moisture equilibrium.

The differency of hysteresis effect above mentioned influenced by wood quality were observed employing as samples green lumber, air dried wood, compression wood and the wood exposed in the open for a long period of times.

This hysteresis effect for the green lumber are remarkable from about 100% relative vapour pressure to a slightly reduced one, and for the aged lumber they are not noticed below about 7% moisture content, but as to the compression wood the progress of this effect seemed to be negligible.

(5) The transformation in repeating shrinkage.

The transformation of wood quality effected by 20 times shrinkage from the condition filled with water to about 5% moisture content was observed. As to the shrinkage progress of springwood and summerwood which pinched one border-line between annual rings, it was shown that the more increased the number of repeating times the more they approached to the shrinkage progress of the border-line, but that of the border-line showed still irregular form and no constant tendency.

(6) The shrinkage deformation of wood cell.

The deformation of wood cell was observed from the condition filled with water to dried absolutely by being measured the thickness of cellmembrane and the diameter of cell-lumen about spring-wood and summer-wood respectively.

(a) As for the transformation of cell-lumen in tangential direction spring-wood and summer-wood both showed the reduction of the diameter of lumen according to the decrease of moisture content but in radial direction showed rather the expansion of the diameter of lumen according to the decrease of moisture content and this fact was especially very notable on the cell of summer-wood.

(b) It was observed that in tangential direction the shrinkage mass of cellmembrane of spring-wood was a little larger than that of summer-wood but in radial that of spring-wood was remarkably small.

(c) As for the spring and summer-wood shrinkage of external cell form in tangential direction, it was remarkably larger than in radial, and the deformation from the condition filled with water to the fiber saturation point was only observed on the summer-wood.

(d) The area shrinkage of cell-lumen was observed only in the spring-wood, but in summer-wood the expansion of cell-lumen was rather remarkably.

(e) The area shrinkage mass of external cell form was observed both in the spring and summer-wood, but the deformation from the condition filled with water to the fiber saturation point was only observed on the summer-wood.

(f) The shrinkage of the mass of cellmembrane was observed both on the spring and the summer-wood but the deformation from the condition filled with water to the fibre saturation point was only observed on the summer-wood.

(g) As for the tangential or the radial wall of cellmembrane, in the spring-wood both showed the shrinkage process according to the decrease of moisture content, but in the summer-wood the tangential showed the shrinkage process, the radial rather the expansion. The shrinkage from the condition filled with water to fibre saturation point may be due to the fact that the critical water content of summer-wood is larger than that of spring-wood, and so the shrinkage progress at the high moisture content are considered as the special character on the cell of summer-wood.

Now it can be shown that the swelling and the shrinkage of cell elements according to the next Table:

Where (+)....The shrinkage process are observed.

(-)....The swelling process are observed.

(±)....The deformation of swelling and shrinkage are negligible small.

	Diameter of cell-lumen		Thickness of cellmenbrane		External cell-form		Area of cell-lumen	Mass of cell-men-brane	Mass of cell-menbrane	
	tang.	rad.	tang.	rad.	tang.	rad.			tang.	rad.
Spring-wood	+	±	+	+	+	±	+	+	+	+
Summer-wood	+	—	+	+	+	±	—	+	—	—

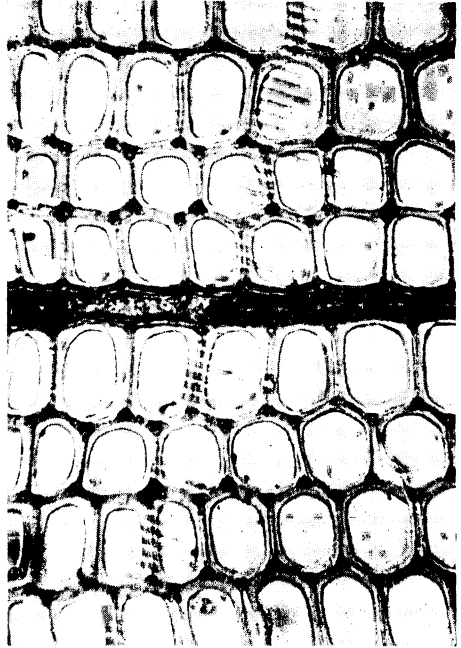
The small deformation of the external cell-form in radial direction may be due to the facts that the transformation of cell-lumen in radial direction is observed very small or rather the expansion of the diameter of lumen according to the decrease of moisture content is observed. These experimental result will give a number of appropriateness to the explanation of the shrinkage and the moisture content of wood.

附 図 (秋材細胞)

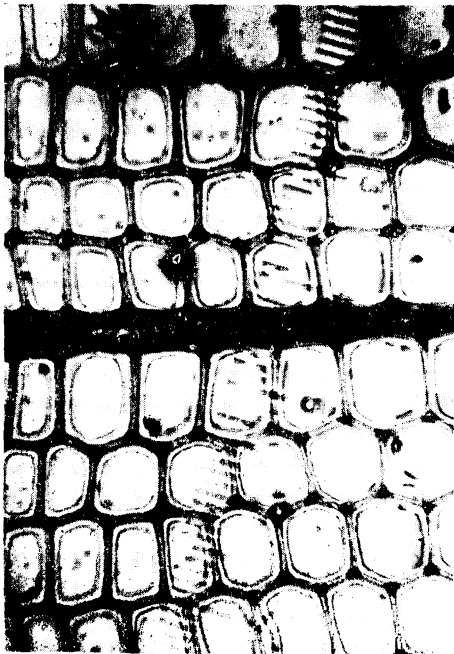
(飽水状態)



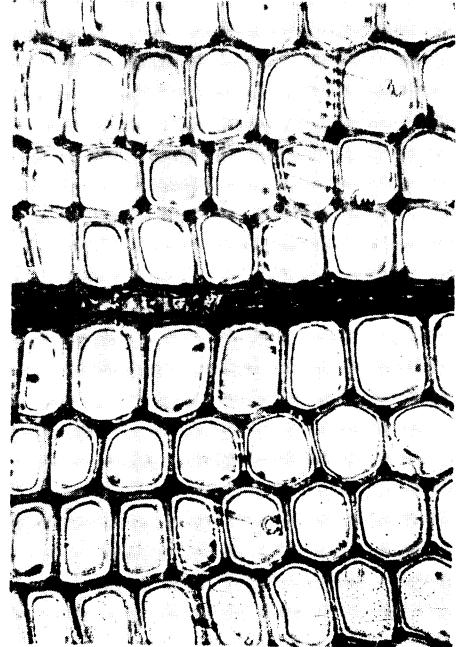
(飽湿状態)



(気乾状態)

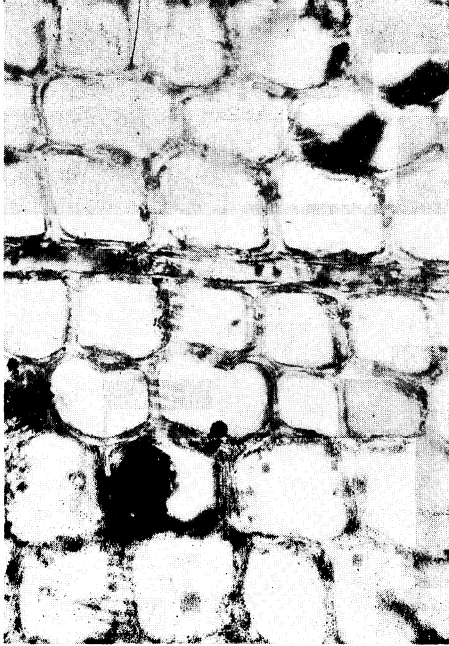


(乾燥状態)

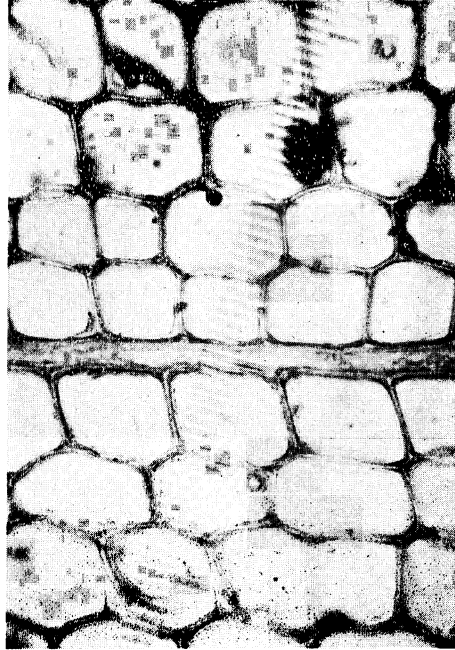


附 圖 (春材細胞)

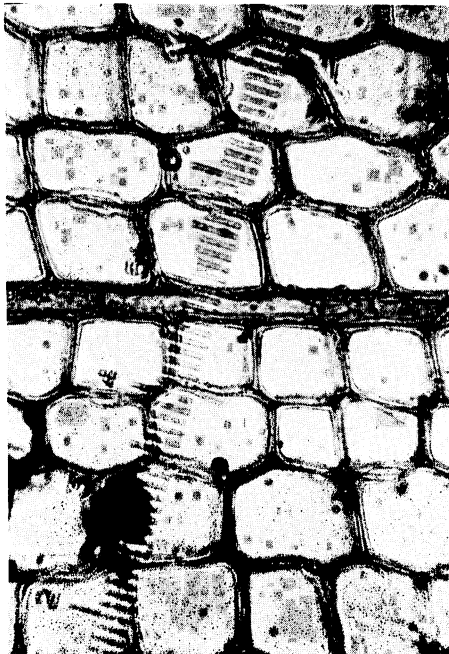
(飽水狀態)



(飽湿狀態)



(気乾狀態)



(乾燥狀態)

