九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

木材の高周波加熱併用減圧乾燥(II) : 減圧および乾燥中における木材の内部圧力

佐々木, 一久

河辺, 純一

森, 稔

https://doi.org/10.15017/10831

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 57, pp.245-265, 1987-03-30. 九州大学農学部附属演習林
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

木材の高周波加熱併用減圧乾燥 (II)

減圧および乾燥中における木材の内部圧力

佐々木一久・河辺純一・森　稔

Vacuum Drying of Wood with High Frequency Heating (II)

The Pressure within Lumber during Evacuation and Drying

Kazuhisa SASAKI, Jun-ichi KAWABE and Minoru MORI

要　旨

木材の減圧乾燥における乾燥機構を解析するためには，減圧および乾燥中における木材内部圧力の変動を明らかにする必要がある．本報では，これについての具体的資料を得る目的から，はじめに減圧雰囲気内に置かれた気乾材の繊維方向における気体の非定常流による内部圧力の減少経過について理論的検討と基礎実験を行ない，つぎに，供試材として気体透過性の著しく異なる3樹種生材の高周波加熱減圧乾燥を行なって，乾燥経過中の材内各部位の圧力ならびに含水率の経時変化を測定した．その結果，内部圧力は材内水分の呈する蒸気圧の増加と外部からの減圧の差として表わされ，含水率の低下にともない，その材の気体透過性と材内の部位によって特徴ある3段階の減少経過を辿ることを明らかにした．

1. 緒　言

近年，木材工業分野においては，材の加熱温度を比較的低くし，しかも樹種によっては乾燥時間の大幅な短縮が可能なことから，高周波加熱併用による減圧乾燥法が注目されるに至っている．これは，誘電加熱の特長として材の内部が表層より高い温度分布を形成し，これによって，一層減圧の効果が促進されるためであるが，このような効果は木材の組織構造や気体透過性に依存するところが大きく，樹種的差異が著しい．このため，既にこの乾燥法について幾つかの研究結果が報告されており（金川ら，1978）（金川ら，1984）（金川ら，1985）（浜野ら，1981）（浜野ら，1982）（浜野ら，1986）(HARRIS *et al.*, 1984 a) (HARRIS *et al.*, 1984 b) (LEE *et al.*, 1984)，乾燥経過にともなう材内温度分布および含水率分布の変化，あるいは乾燥による損傷や樹種特性，残留応力などが測定されている．筆者らも前報（河辺ら，1984）において，この乾燥法における木材の繊維方向による水分蒸発速度の差異および木材寸法の乾燥速度におよぼす影響などについて実験した．そして，これらの研究結果からそれぞれ乾燥機構についての考察が行なわれているが，このような乾燥機構を追究していく上で最も重要と思われる乾燥経過中における材内圧力の変動については，測定技術上の難しさもあって研究結果は乏しい．

そこで本研究では，これらに関する基礎的知見を得る目的から，まず，気乾木材を減圧雰囲気内に置いたときの材内圧力の減少過程について理論的検討と基礎実験を行い，つぎに，気体透過性の著しく異なる3樹種生材を供試し，高周波加熱減圧乾燥したときの材内各部位における圧力と含水率の経時変化を測定し，木材の気体透過性による内部圧力減少経過の差異，これにおよぼす含水率の影響などについて実験的検討を試みた．

2. 減圧による気乾材内部圧力の減少経過

2.1. 理論的検討

木材を減圧雰囲気下に置いたときの材内気体の非定常流動については，RESCH (1967), PRAK (1970), SIAU (1972) (1976), SIAU *et al.* (1981) などの多くの研究結果がある．とくに SEBASTIAN *et al.* (1973) は，木材の繊維方向における透過流動は，その組織構造により透過性の異なる2部分から構成され，また透過係数が KLINKENBERG の式により材の平均圧力の逆数に対して直線的に，あるいは曲線的に変化するモデルを仮定し，次の微分方程式を提唱した．ここに，p は内部圧力，x は流動方向の長さ，α は KLINKENBERG の式の係数，t は時間のいずれも無次元表示である．

$$\frac{\partial p^2}{\partial t} = (p+\alpha)\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial p}{\partial x}\frac{\partial p^2}{\partial x} \tag{1}$$

さらに，SIAU (1976) は，上式に透過流動の中間領域を設けたモデルの厳密な数値解析を試み，その解が実験値とよく一致することを報告している．

しかし，SIAU (1976) などの厳密解は本実験のような実用に近い条件下では直ちに適用することはできない．本項では，ごく簡単に減圧経過中の透過係数（k_g）が材の位置や減圧時間にかかわらず一定と仮定し，減圧雰囲気下におかれた多孔質材料内の気体の非定常流動の解を用いた．いま，材料内の気体が x 方向に透過流動するとき，時間を t，濃度を C，係数を D とすると，よく知られているように，

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{2}$$

である．この場合は気体圧力を p とすると $C=p$ である．両側面が平行な材料で，材長の中心を原点，材長 $x=2l$ のとき，透過に関する係数 D は時間および材の長さ方向の位置によらず一定，初期条件は $t=0$ のとき，$x=l$ では $C=C_0$，$x=0$ では $C=C_i$，減圧中は $t>0$ のとき，$x=l$ では $C=C_0$，$x=0$ では $\partial C/\partial x=0$ と仮定する．

次に，CRANK などの解（CRANK, 1970）に基づき，式 (2) をラプラス変換すると，

$$\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} - \frac{l}{D}(S\bar{C} - C_i) = 0 \tag{3}$$

ただし，

$$\bar{C} = \int e^{-st} C dt \tag{4}$$

これを上述の条件を用いて解くと，

$$\bar{C} = \frac{C_i}{S} + \frac{C_0 - C_i}{S} \cdot \frac{\cosh qx}{\cosh ql} \tag{5}$$

ただし，

$$q^2 = \frac{S}{D} \tag{6}$$

第2項を MACLAURIN の定理を用いて変形する．

$$\frac{\cosh qx}{\cosh ql} = \sum(-1)^n \left[\exp\left\{ -\frac{(2n+1)l - x}{\sqrt{D}} \sqrt{S} \right\} + \exp\left\{ -\frac{(2n+1)l + x}{\sqrt{D}} \sqrt{S} \right\} \right] \tag{7}$$

これを式 (5) に代入し，逆ラプラス変換すると求める解は，

$$C = C_i + (C_0 - C_i) \sum(-1)^n \left\{ \mathrm{erfc} \frac{(2n+1)l - x}{2\sqrt{Dt}} + \mathrm{erfc} \frac{(2n+1)l - x}{2\sqrt{Dt}} \right\} \tag{8}$$

ここで濃度の変化の割合を E とすると，

$$E = \sum(-1)^n \left[\mathrm{erfc} \frac{l}{2\sqrt{\tau}} \left\{ (2n+1) - \frac{x}{l} \right\} + \mathrm{erfc} \frac{l}{2\sqrt{\tau}} \left\{ (2n+1) + \frac{x}{l} \right\} \right] \tag{9}$$

ここに，

$$E = \frac{C - C_i}{C_0 - C_i} = \frac{p^2 - p_i^2}{p_o^2 - p_i^2} \tag{10}$$

$$\tau = \frac{Dt}{l^2} = \frac{\bar{P}}{V_a l^2} k_g t \tag{11}$$

p_i：材内における初期圧力，p_o：表面圧力もしくは平衡圧力，V_a：木材の空隙率．
また，別の解として式 (5) の第2項を HEAVISIDE の定理を利用して逆ラプラス変換すると，次式が得られる．

$$E = 1 - \frac{4}{\pi} \sum \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left\{ -\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} \tau \right\} \cdot \cos \frac{(2n+1)\pi}{2} \cdot \frac{x}{l} \tag{12}$$

つぎに，式 (9) (12) について，E と τ の関係を $x/l = 0$, 0.5, 0.9 について計算し，図1に示す．図のように，両式の計算値は τ の 0.2～2.0 の範囲ではほぼ一致しているが，式 (12) は τ が 0.2 以下の場合は E が不規則に変化し，また式 (9) では τ が 3 以上になると E が減少するためそれぞれ不合理である．本実験で用いる条件下では τ は 2 以下の範囲で十分であるから，次項からは式 (9) を用いることにする．

2.2. 内部圧力の測定方法

2.2.1. 供　試　材

供試材には，ベイツガとベイスギの気乾材を用い，繊維走行の通直な無欠点部分から追まさ角材を木取りし，その4側面をプレーナで平削して辺長 10 cm に仕上げ，また木口面は鋭利な超硬合金付け刃丸のこで長さ 100 cm に切断した．つぎに，気体透過の方向を繊維方向に限定するため，木口面を残し，その4側面にエポキシ樹脂を厚く塗布して供試した．両樹種供試材の比重などを表1に示す．同表の気体透過係数などは，筆者などが他の実験で得た値である（佐々木ら，1983）．

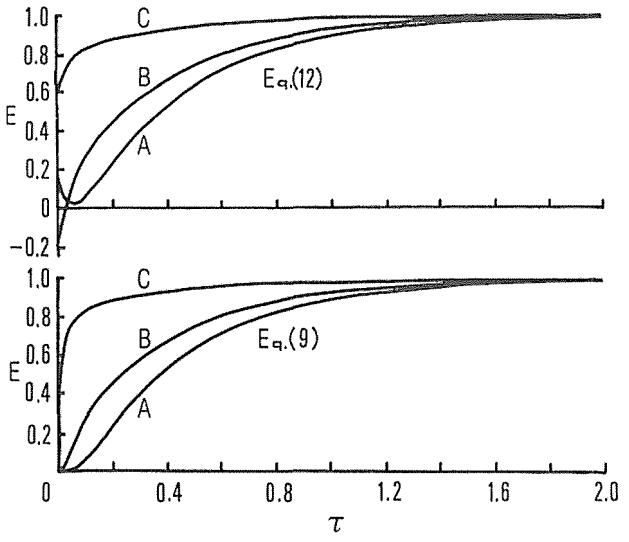

Fig. 1 Comparison between τ-E curves on the bases of Eq. (9) and Eq. (12)
x/l : A=0, B=0.5, C=0.9
x : Distance from the center in longitudinal direction of the lumber
$2l$: Length of the lumber

図1 式 (9) と式 (12) による τ-E 曲線の比較
x/l : A=0, B=0.5, C=0.9
x : 材の中心からの長さ方向の距離
$2l$: 材長

表1 減圧実験における供試材の性質
Table 1 Properties of wood used for exhausion tests

Wood species	r_a	n (1/cm)	$k_o \times 10^{-4}$ (cm²/cm・mmHg・sec)	b (mmHg)
Western hemlock (*Tsuga heterophylla* SARG.)	0.48	2.7	42.6	269
Western red cedar (*Thuja plicata* D.DON.)	0.36	9.6	1.2	362

r_a : 気乾比重
n : 年輪数 (1/cm)
K_o and K_s : 真の，および見掛けの試験片長さ方向透過係数（含水率 15%）
p_m : 試験片の平均内部圧力
b : クリンケンベルグ式の係数
r_a : Specific gravity at air-dried condition
n : Number of annual ring per cm
K_o and K_s : True and superficial longitudinal air permeability of test specimen at 15% of moisture content respectively $K_s = K_o(1 + b/p_m)$
p_m : Average pressure in the specimen
b : Coefficient of the KLINKENBERG equation

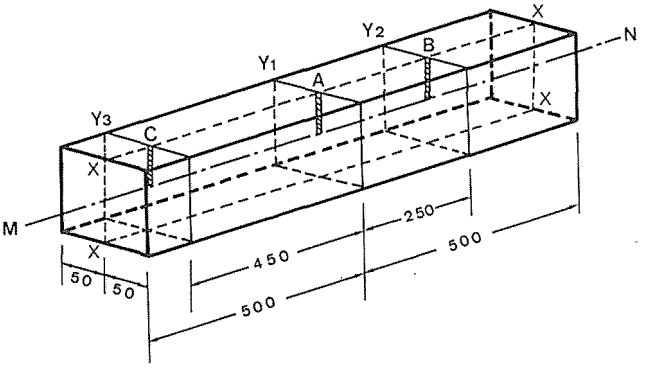

Fig. 2 Longitudinal location of test lumber for measuring pressure (A, B, C)
図2 試験材の長さ方向内部圧力測定位置 (A, B, C)

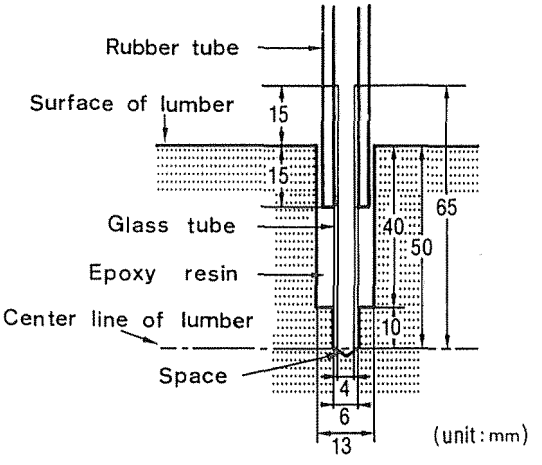

Fig. 3 Vertical section of glass tubu, rubber tube and space at the front of hole for measuring pressure in lumber
図3 試験片の内部圧力測定用ガラス管，ゴム管および穴先端空隙の縦断面

2.2.2. 測定方法

供試材の内部圧力を測定するため，繊維方向気体透過試験片では，図2のように，角材の中心縦断面X（細い点線）の中央線MNの中点A，およびその中点から250 mmの位置B，450 mmの位置Cの3位置にドリル穴を明けた．ドリル穴は図3のように，はじめにゴム管の外径よりやや大きい直径13 mmのドリル穴を深さ40 mmまで明け，次にこの穴の中心位置に直径6 mmの穴を50 mm深さまで明けた．そして外径6 mm，内径4 mmのガラス管をこの小径の深穴の底面まで挿入し，他端をゴム管と接続した．材とゴム管およびガラス管との間には空気の漏れがないようエポキシ樹脂でていねいに充填した．なお，この場合ガラス管先端と残された円錐形のドリル穴底の空隙容積は約10 mm^3である．したがって，本実験における材内圧力の測定値は，この空隙部分の平均圧力を示すことになる．

実験では，供試材を減圧容器（38×38×127 cm^3）に入れ，材内圧力測定用ゴム管を容器

外の水銀マノメータとそれぞれ接続して密閉したのち，150 l/min の真空ポンプで減圧し，減圧時間にともなうマノメータの目盛りを一定時間ごとに測定した．マノメータの目盛りは大気圧との相対的な圧力差を示すため，正確な圧力が得られるように，実験の開始毎にマノメータの目盛りと基準圧力値の間の回帰式を求め，これを用いて測定値を校正した．容器内圧力は，40 mmHg，100 mmHg および 400 mmHg（±2 mmHg）に一定とした．

2.3. 測定値と理論値の比較

減圧中におけるベイツガおよびベイスギ両試験材内部圧力（p）の経時変化の測定結果

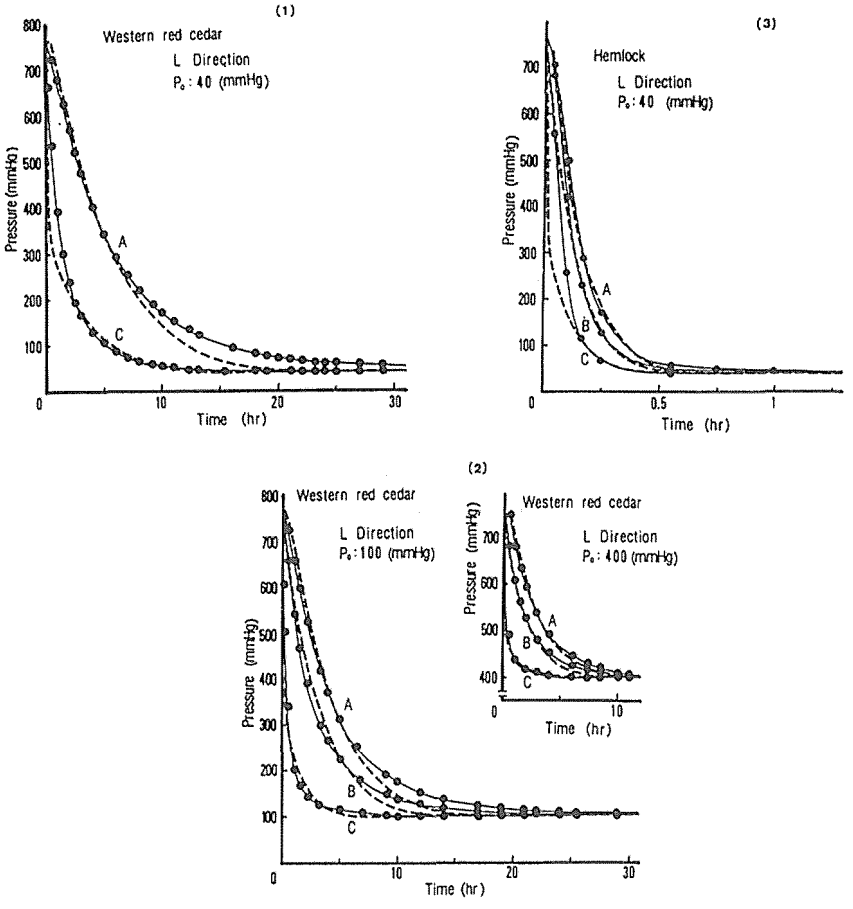

Fig. 4 Comparison between experimental and theoretical values for time-pressure curves during evacuation of test lumber.
——— Experimental value
····· Calculated value
A, B and C: Longitudinal location of test lumber (Refer to Fig. 2)

図 4 減圧中の試験材における時間一圧力曲線の実験値と理論値の比較
——— 実験値
····· 計算値
A, B and C：試験材の長さ方向の位置（2 図参照）

表2　k_g の計算方法
Table 2　Method of calculation of k_g

P (mmHg)	E	Position A		
		τ	t (hr)	k_g (cm²/cm·mmHg·sec) $\times 10^{-4}$
750	0.026215	0.080843		
700	0.152083	0.158075	0.8	2.73
650	0.269271	0.222319	1.3	2.08
600	0.377778	0.289399	1.8	1.98
550	0.477604	0.360545	2.2	1.95
500	0.568750	0.438617	2.7	1.95
450	0.651215	0.524511	3.3	1.91
400	0.725000	0.620457	4.0	1.86
350	0.790104	0.730538	4.8	1.82
300	0.846528	0.857597	5.8	1.77
250	0.894271	1.009050	7.1	1.71
200	0.933333	1.199950	8.7	1.66
150	0.963715	1.452400	11.1	1.57
100	0.984517	1.813200	15.4	1.42
75	0.993012	2.168440	20.0	1.30
50	0.998440	2.787200		
Average $\overline{k_g}$				1.81

k_g は，ベイスギ試験片の減圧中（40 mmHg）の試験材中心位置における内部圧力の測定値を用い，式（9）から逆算して求めた．
The values of k_g were obtained by the revese calculations on the basis of Eq. (9) by use of measured values of pressure at the center of lumber (western red cedar) during exhaustion (40 mmHg).

を図4（1)-(3）に示す．同図において，点線は実験と同条件を用いて式（9）から計算した理論曲線である．計算では，まず p の各圧力段階について，τ その他の値を式（4）に代入して k_g を逆算しておく．次に，その平均値 $\overline{k_g}$ を求め，これを式（9）に代入して描いた理論曲線である．すなわち，実験曲線に適合するように，式（9）の k_g を選んでいる．$\overline{k_g}$ の計算例を表2に示した。この場合の $\overline{k_g}$ の値は容器内圧力40 mmHgのとき，ベイスギではA～C位置で $1.8\sim2.3\times10^{-4}$(cm³/cm·mmHg·sec)，ベイツガはA～C位置で $67\sim73\times10^{-4}$(cm³/cm·mmHg·sec)である．図4（1)-(3）について，両曲線を比較すると，両樹種の場合とも全般的にはほぼ適合するが，減圧初期には材端C位置では理論曲線の低下が実験曲線より速かであり，減圧後期には材中央A位置での実験曲線の雰囲気圧力への到達がかなり遅れている．前者の理由は，理論解では $t=0$ で材表面は雰囲気圧力（p_o）に平衡していると仮定したが，実験では減圧開始（$t=0$）後，容器内圧力が p_o に低下するまでに約

表3　定常および非定常状態における供試材の繊維方向透過係数の比較

Table 3　Comparison of longitudinal permeability of test specimen between under steady state and unsteady state flow condition.

Wood Species	p_o (mmHg)	Position	Unsteady state $\overline{k_g} \times 10^{-4}$ (cm³/cm·mmHg·sec)	Steady state $k_s \times 10^{-4}$ (cm³/cm·mmHg·sec)
Western hemlock (*Tsuga heteropylla* SARG.)	40	A	67.2	71.2
		B	70.3	
		C	73.4	
Western red cedar (*Thuja plicata* D. DON.)	40	A	1.8	2.3
		B	—	
		C	2.3	
	100	A	2.1	2.2
		B	2.4	
		C	4.3	
	400	A	1.6	2.0
		B	1.9	
		C	2.9	

p_o　：減圧容器内圧力
k_s　：定常状態における繊維方向透過係数（表1からの計算値）
$\bar{k}_s$　：図4の時間—圧力曲線からの計算値（表2参照）
A，B，C：図2参照
p_o　: Reduced pressure in vacuum chamber
k_s　: Longitudinal air permeability at steady state flow condition (calculated values from Table 1)
$\bar{k}_s$　: Longitudinal air permeability calculated basing on time-pressure curves in Fig. 4 (Refer to Table 2)
A, B, C : Refer to Fig. 2

20 min を要し，材の表層の平衡圧力への到達がかなり遅延するためと考えられる．後者の理由は，明確ではない．つぎに，KLINKENBERG の式を用い表1から計算した各圧力差における透過係数 k_s（定常流の下での測定値）と図4の k_g を比較し，表3に示した．同表のように両者は大差のない結果を示した．

2.4. 考　　察

内部圧力の経時変化は，まず第一にその材の気体透過性の良否に影響される．前述のように式 (9) は減圧開始後の時間や材内位置にかかわらず，気体透過係数は一定と仮定した解であるが，繊維方向の流動については気乾材による測定結果と傾向的には近似している．つぎに，本式から材内の繊維方向の減圧におよぼす気体透過係数の影響について計算する．一例として，断面 10×10 cm², 長さ 100 cm, 空隙率 0.7 の角材を 40 mmHg の減圧容器内においたときの繊維方向（長さ方向）気体流動による材中心部の内部圧力減少経過の気体透過係数による差異を図5に示す．この場合，材の中心部が一定圧力に減圧されるまでの所要時間 θ は透過係数（k_g）に逆比例し，常数を a とすると次式から計算出来る．

$$\theta = a \cdot k_g^{-1} \tag{13}$$

例えば p_o=40 mmHg の雰囲気下で，p_i=760 mmHg から 50 mmHg，および 500 mmHg まで減圧するときの k_g と θ の関係を図 6 に示した．

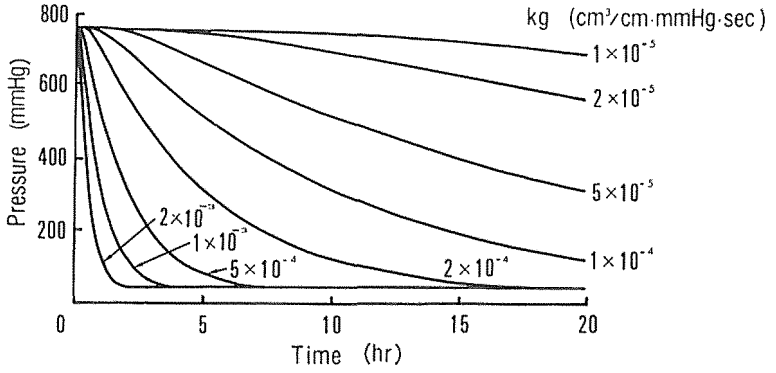

Fig. 5　Time-pressure curves for different values of longitudinal permeability of wood (k_g)
図 5　木材の繊維方向透過係数（k_g）による時間—圧力曲線の変化

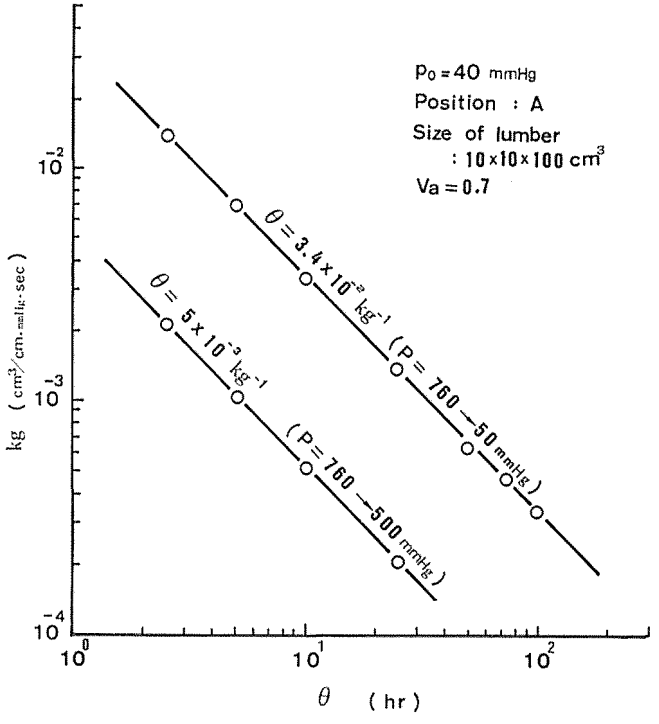

Fig. 6　Relationship between longitudinal permeability of wood (k_g) and time required to fall the pressure from 760 mmHg to 50 mmHg or 500 mmHg (θ)
p_o : Pressure in vacuum chamber　　A : At the center of test lumber
v_a : Void volume of the lumber
図 6　透過係数（k_g）と 760 mmHg から 50，500 mmHg までの圧力低下所要時間（θ）の関係
p_o：減圧容器内圧力　A：試験片の中心　v_a：木材の空隙率

3. 乾燥経過中における内部圧力と含水率の経時変化

3.1. 実験方法

3.1.1. 供試材

供試材には，繊維方向の気体透過性が極めて良好な樹種としてアピトンを，中庸な樹種としてベイツガを，極めて不良な樹種としてベイスギを選び，目切れの少ない追まさ角の生材を用いた．供試材は，前項と同じくその4側面をプレーナで平滑に仕上げ，木口面は鋭利な超硬合金付刃丸のこで切断し，長さ100 cmの10 cm角に仕上げた．

供試材の内部圧力を測定するため，前出図2のA，B，Cの3位置のほか，図7のように，角材の中央断面Y_1の中点Aから25 mmの位置Dおよび45 mmの位置Eにドリル穴を明けた．ドリル穴の詳細は前出図3と同じである．

3樹種供試材の含水率，比重などを表4に示す．同表の繊維方向気体透過係数は，筆者等が行なった他の実験で得られた測定値である（河辺ら，1981）（佐々木，1983）．

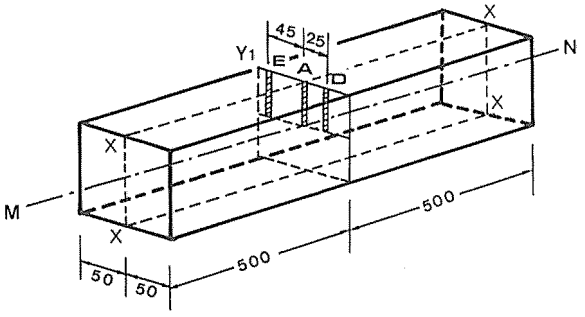

Fig. 7 Transeverse location of test lumber for measuring pressure (A, D, E)
図7 試験材の内部圧力測定位置（A, D, E）

表4 減圧乾燥実験における供試材の性質
Table 4 Properties of wood used for vacuum drying tests

Wood species	u_i (%)	r_a	n (1/cm)	u (%)	$k_0 \times 10^{-4}$ (cm³/cm·mmHg·sec)	b (mmHg)
Apitong (*Dipterocarpus grandiflorus* Blco.)	58	0.80	—	15	9000	—
				25	8500	—
				40	8000	—
Western hemlock (*Tsuga heterophylla* Sarg.)	64	0.48	2.7	15	42.6	269
				25	32.0	80
				40	17.0	40
Western red cedar (*Thuja plicata* D. Don.)	66	0.36	9.6	15	1.2	362
				25	0.8	60
				40	0.4	30

u_i：試験材の初期含水率（%）
u ：透過試験における試験片含水率（%）
r_a , n, k_0, b：表1参照．
u_i : Initial moisture content of test lumber (%)
u : Moisture content of wood specimen at permeability test (%)
r_a, n, k_0, b: Refer to Table 1.

3.1.2.　実験装置

本実験で用いた高周波加熱減圧乾燥装置は前報（河辺ら，1984）と同じで，概略図を図8に示す．同図において本装置の減圧容器（同図，7）は幅および高さはともに38 cm，奥行き127 cmで，前面には試験材を設置するための透明なアクリル開閉板，側面には材内圧力測定用のゴム管および給電線の通路が設けられ，それぞれ空気漏れがないように目止めされている．加熱時における試験材の温度むらを緩和するために，容器に入れた試験材の上下に全面に撥水性塗料を塗布した18 mm厚のあて板（合板，同図，2）を置き，その上下を極板（同図，3）ではさみ，2点起点で給電線（同図，4）と接続した．乾燥経過中の試験材の重量を測定するため，試験材の下部に上皿はかり（同図，5）を設置した．高周波発振機（同図，8）は3 kW，6.7 MHzで出力は4000 V，陽極電流は0.2 Aとし，試験材の中心位置が一定温度を維持するように熱電対方式の制御装置（同図，10）により断続発振させた．容器を減圧する真空ポンプは150 l/minである．

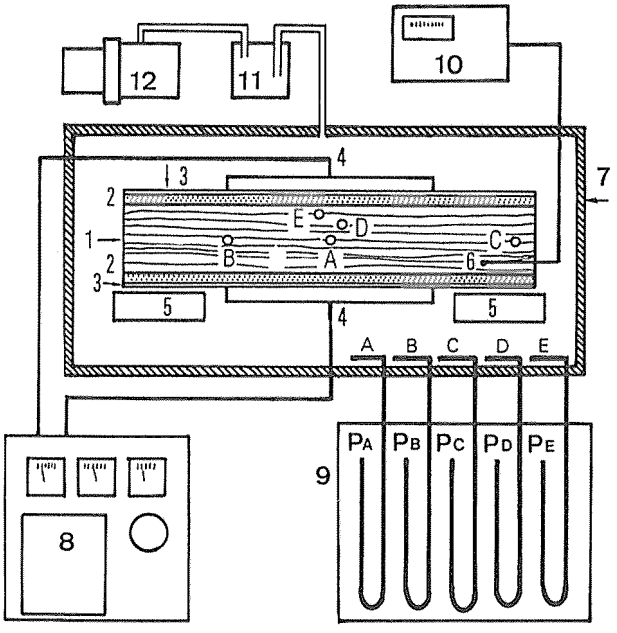

Fig. 8　Schematic diagram of the apparatus for measuring pressure in test lumber during vacuum drying with high frequency heating
1. Test lumber　2. Relief board　3. Electorode　4. Electric feeder　5. Weigh scale
6. Thermocouple　7. Vacuum chamber　8. High frequency oscillator　9. Manometer
10. Control apparatus for temperature　11. Cooling apparatus　12. Vacuum pump
A-E : Measured point for pressure

図8　高周波加熱減圧乾燥における試験材内部圧力測定装置の概略図
1．試験材　2．当て板　3．極板　4．導線　5．天秤　6．熱電対　7．真空容器　8．高周波発振機
9．マノメータ　10．温度制御装置　11．冷却機　12．真空ポンプ
A-E：内部圧力測定位置

3.1.3. 材内圧力および温度の測定方法

材内圧力は，極板を当てない側面から前記のA～E 5位置にドリル穴を明けてガラス管を挿入し，ゴム管を介して容器外の5本の水銀マノメータと接続して測定した．

温度測定位置は，材長の中央から30 mm，253 mmおよび447 mm離れた3断面の幅方向のそれぞれ3位置で，ドリル穴を明け，アルコール寒暖計を挿入し，空気漏れのないよう十分ていねいに目止めして測定した．

3.1.4. 実験条件

実験では，高周波を印加して試験材の中央A位置の温度が40°Cに達するまで加熱し，その時点から減圧をはじめ，5位置の材内圧力，9位置の温度，および材の重量を一定時間ごとに測定する．試験材の加熱はA位置を基準にして温度40°C（±1°C）に制御し，容器内圧力は40 mmHg（±2 mmHg）とした．

なお，減圧容器内の関係湿度は測定しなかったが，金川等の測定例（金川ら，1984）にならって材の基準温度に対する飽和蒸気圧55 mmHgと容器内圧力40 mmHgの比をとり，減圧容器からの気体漏れによる空気流入の影響を考え，その80～85%をとると関係湿度62%がえられる．

生材の乾燥実験では，アピトンでは初期含水率58%から，仕上げ含水率13%まで35 hr連続乾燥した．このほかに長さ100 cm，10 cm角の穴あけしない試験材4本を，平均含水率50%，40%，30%，および20%までそれぞれ同条件で連続乾燥し，乾燥終了後，試験材長さ方向の9断面について，幅と高さをそれぞれ3等分，計9分割して試験材の含水率分布を求めた．

ベイツガでは含水率64%から28%まで33 hr連続乾燥し，その後8 hrごとの間欠乾燥を行ない，計約50 hrで16%まで乾燥した．ベイスギでは含水率66%から59%まで12 hr連続乾燥し，その後5～8 hrごとの間欠乾燥を8%まで行なった．

3.2. 実験結果

3.2.1. 材内圧力の経時変化

3樹種の生試験材について，減圧開始から乾燥時間にともなう材内各位置の圧力変化の測定結果を図9に示す．繊維方向透過性の良好なアピトンは同図（1）のように，各部位とも速やかに減圧される．木口面から50 mm内側のC位置では容器内の雰囲気に追従して減圧され（容器内はほぼ20 minで40 mmHgまで低下する），約1.5 hr後には55 mmHgでほぼ平衡状態に達する．長さの中央位置で側面から10 mm内側のE位置では，材内の減圧はこれよりやや遅れるが，比較的速く減圧されていく．木口面から250 mm内側のB位置ではさらに減圧が遅れるが，前2者とほぼ同様の経過で減圧されてゆく．材中央A位置および側面から25 mm内側のD位置ではこれより減圧が遅れるとともに，減圧開始後ほぼ1.5～6 hrでは120～150 mmHgの範囲で材内圧力の停滞ないし増加がみられ，その後乾燥が進むにつれて再び減圧されていく．

材内圧力は，温度の上昇による細胞内の空気の膨張および含有水分の蒸発による圧力増加とそれらの外部からの減圧との差であるから，前記の停滞期はこの両者の作用がつり合っている時期と考えられる．同図において，側面から25 mm内側のD位置が50 mm内側

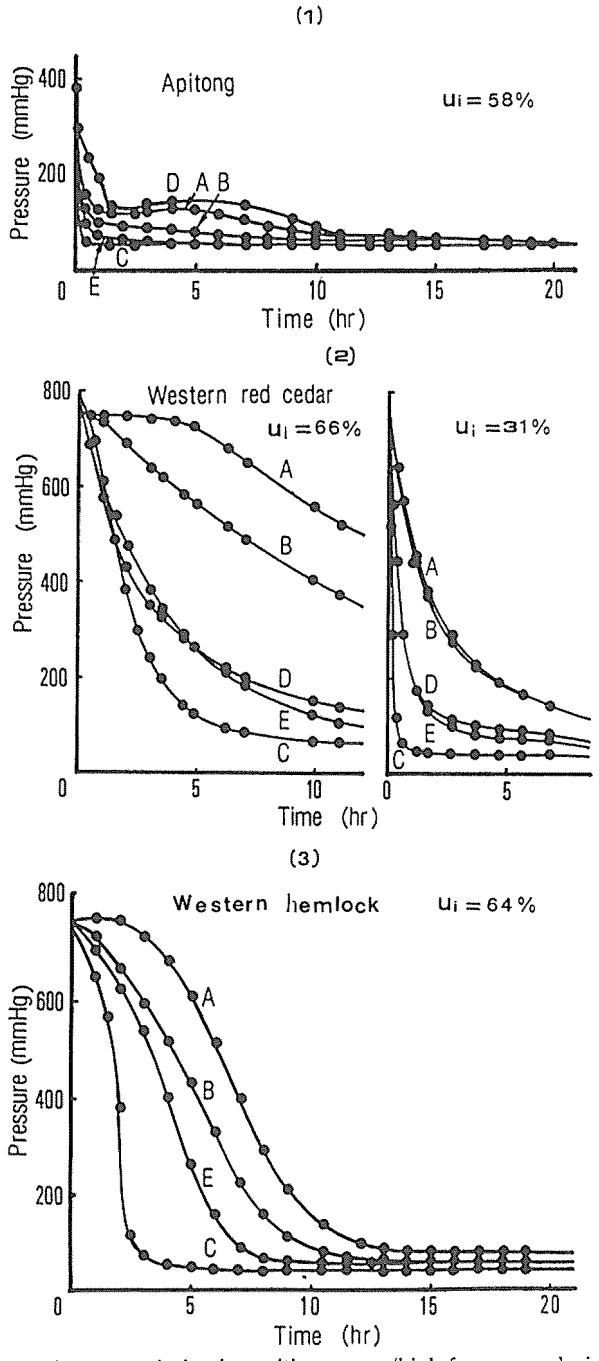

Fig. 9　Changes of pressure in lumber with vacuum/high-frequency drying time
u_i : Initial moisture content of test lumber
A-E :　Longitudinal and widthwise location of lumber for pressure
図 9　高周波加熱減圧乾燥における木材内部圧力の経時変化
u_i：試験材の初期含水率
A-E：内部圧力測定位置（図 2 参照）

のA位置より減圧が遅れている理由は明確でないが，供試材の初期含水率分布のむら，あるいはA位置の蒸気移動に原因するものと考えられる．

ベイツガでは図9（3）のようにアピトンに比してかなり減圧が遅れる．木口面から50 mm内側のC位置では約5 hr後に45 mmHg，250 mmの距離B位置では約10 hr後に55 mmHg，材の中心位置Aでは温度上昇による蒸気圧のため暫く増加もしくは停滞し，そののち減圧されて約15 hr後に80 mmHgでそれぞれほぼ平衡に達している．以降，各位置とも長時間をかけて含水率の減少とともに徐々に減圧されていく．

3供試樹種のうち繊維方向気体透過性の最も低いベイスギは，材内減圧が図9（2）のようにベイツガよりさらに遅れ，減圧開始後12 hrでは，木口面から50 mm内側のC位置で約60 mmHg，中心A位置で約500 mmHgに減圧されたにすぎない（材内含水率は66%から59%に減少）．その後，間欠乾燥を行ない，含水率が31%の時点についての測定結果は，同（2）右図のように材内減圧速度は乾燥初期に比べ著しく促進されている．つぎに，3樹種各供試材の中心A点について，乾燥時間にともなう減圧速度の変化を計算し図10に示す．気体透過性の良好なアピトンでは乾燥初期の減圧速度が極めて高く，乾燥時間と共に急速に低下するが，ベイツガでは乾燥時間の経過と共に減圧速度が次第に増加し，7〜8 hr経過後最大減圧速度に達し，その後次第に減少していく．気体透過性の不良なベイスギでは，6〜10 hr後にベイツガと同じく減圧速度の最大値を示すが，その値は低い．

3.2.2. 材内の圧力分布

上記の測定結果から乾燥中における材内圧力分布を求め図11（1）〜（5）に示す．アピトンでは同図（1）のように，長さ方向圧力分布は材長の中央A位置が最も高く木口面に近づくほど低下する緩やかな曲線を示し，乾燥時間の経過とともにA位置の圧力がしだいに減少して分布曲線は平坦になっていく．幅方向分布は同図（2）のように，乾燥初期から中期にかけては中心A位置より側面から25 mmのD位置の方が高く，側面から10 mmのE位置で急速に減少している．乾燥後期にはこの波形が次第に平坦になっていく．

ベイスギとベイツガの場合は，同図（3）〜（5）のように長さ方向分布はほぼアピトンの

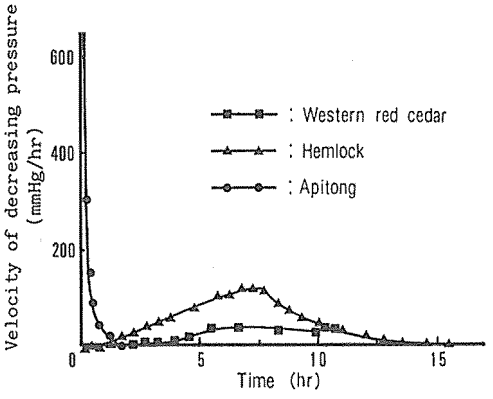

Fig. 10 Variation of decreasing rate of pressure in lumber with drying time

図10 乾燥時間にともなう材内圧力減少速度の変化

場合と類似した傾向を示すが，幅方向圧力分布はこれと異なり，表面に近いほど圧力の低い分布波形を示した．

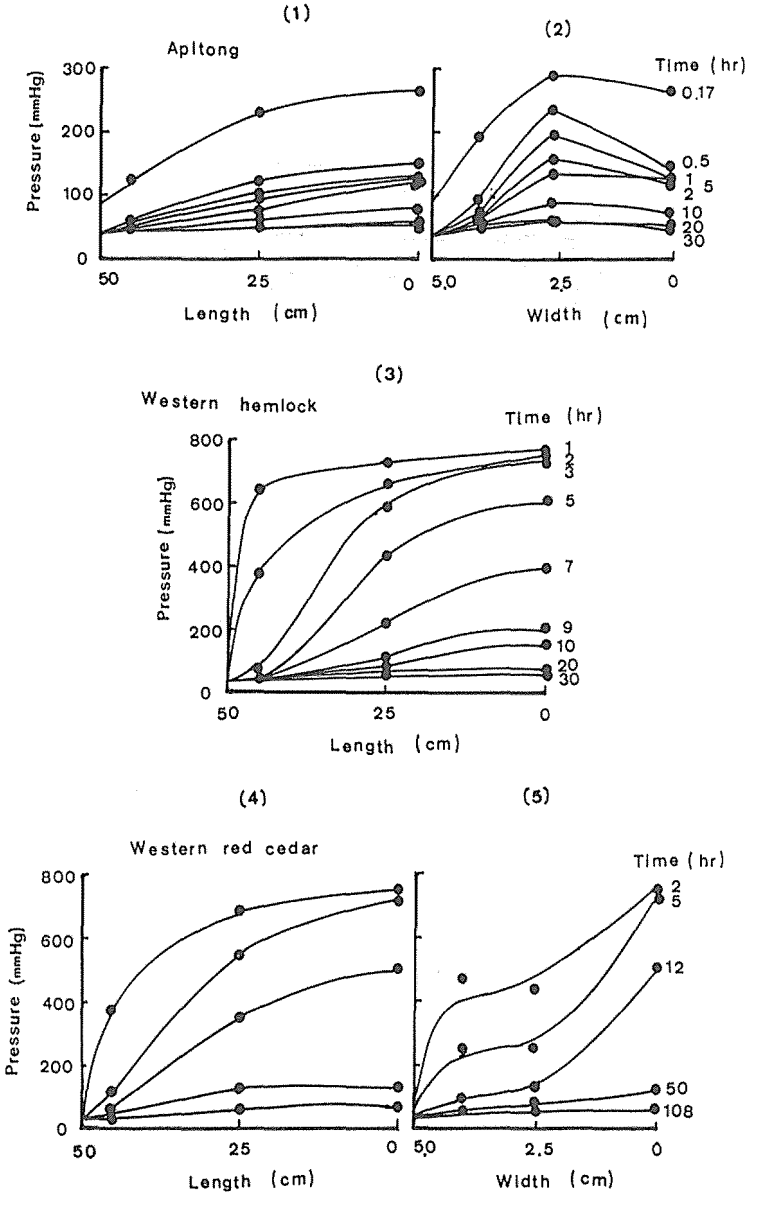

Fig. 11　Longitudinal and widthwise distribution of pressure in lumber during drying
Length :　Longitudinal distance from the center of lumber
Width :　Widthwise distance from the center of lumber

図 11　乾燥中における試験材の長さおよび幅方向における内部圧力の分布
Length : 中心からの長さ方向の距離　　Width : 中心からの幅方向の距離

3.2.3. 含水率分布

アピトンの減圧乾燥経過における含水率分布の変化を図 12 にしめす．同図において上図は幅（FG）方向が極板に平行な場合，下図は直角な場合である．長さ方向の分布をみると，平均含水率 50～20%の間では木口面付近の方がその内部よりも含水率が高い．これは，アピトンの透過性が良好なためわずかの蒸気圧差で中央部分の水分が両木口方向へ移動するためである．幅方向含水率分布は極板に対する方向によって異なり，下図の極板に

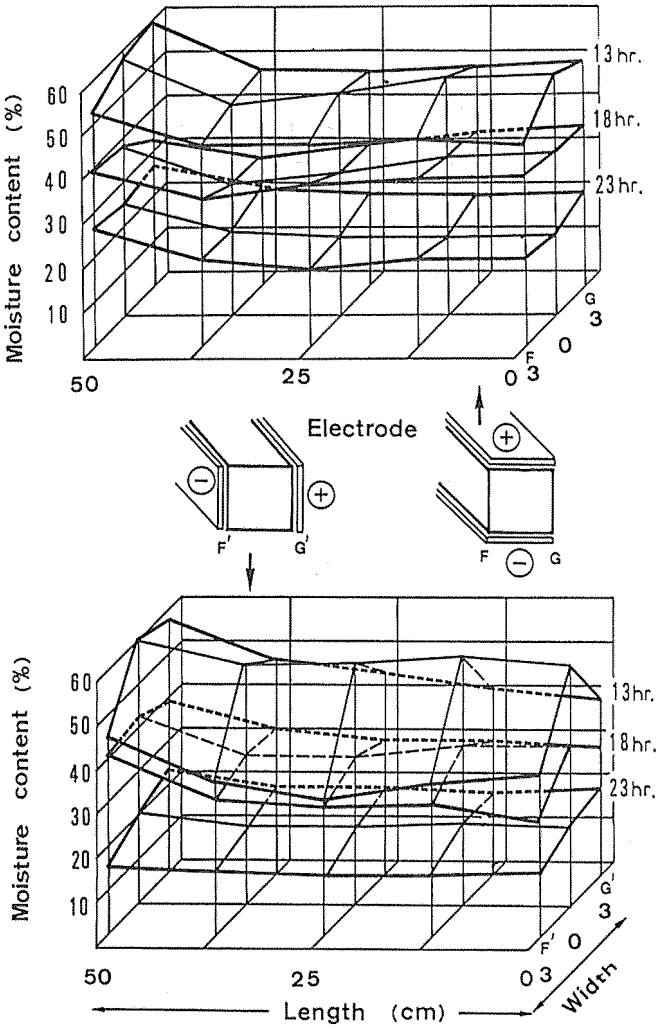

Fig. 12 Distribution of moisture content in test lumber during drying (Distribution after 13, 18 and 23 hr)
Length : Longitudinal distance from the center of lumber
Width : Widthwise distance from the center of lumber
図 12 乾燥中における材内の含水率分布（13，18 および 23 時間後の含水率分布）
Length：中心からの長さ方向の距離
Width：中心からの幅方向の距離

直角方向の分布は陰極側が陽極側に比べ温度が低いため常に陰極側の方が含水率が高い．上図の平行方向ではほぼ左右対称であり，高含水率域では幅の中央が高く，繊維飽和点以下ではむしろ中央の方が低い．これは高含水率時では減圧の進む側面近くの方がさかんに蒸発するのに対し，幅の中央では減圧が遅れ乾燥も遅れるが，含水率40％前後には飽和蒸気圧に達し，そこでの蒸発が活発になるためと推察される．これは多くのアピトン試験材で，40％前後の含水率域において乾燥速度の極大値がみられたことと一致する．

3.2.4.　材内の温度，含水率と内部圧力の関係

乾燥中の材内圧力は，外部雰囲気からの減圧による圧力低下と加熱による材内空気の膨張および水分蒸発による圧力増加の差から決められると考えられるが，これらの関係は材内温度と含水率の影響を受けるところが大きい．そこで，つぎに前記の実験結果から試験材各部位における温度，含水率と圧力の関係について検討する．アピトンとベイツガについて，材内A～E位置の含水率低下にともなう圧力変化の関係をプロットして図13（1）～(4）に示す．これらの結果から，両者の関係は模式的に図14の3タイプで表わしうる．図14において，材内の各部位では，初期含水率（u_i），初期圧力（p_i=1 atm）の状態から含水率の低下と共に急速にあるいは緩やかに減圧されて行くが，ある含水率から暫くは平衡状態を維持し，繊維飽和点（F. S. P）付近まで乾燥されると，それ以降からは再び減圧が進み，最終的には外部雰囲気に平衡した内部圧力（p_o）と含水率（u_f）に到達する．この場合の平衡状態における内部圧力は，各部位の置かれた条件により，材内の基準加熱温度40°Cに対する飽和蒸気気圧（p_s=55 mmHg）に等しい場合（Type II），p_sより高い場合（Type I，$p_h>p_s$），p_sより低い場合（Type III，$p_i<p_s$）の3者が観察される．

アピトンの場合は，図13(1)（2)において，木口面から50 mmのC位置では初期の高含水率域から，直ちに内部温度(ここでの内部温度は蒸発潜熱を奪われるため40°Cより低く35～37°Cである）に対応する飽和蒸気圧51～53 mmHgまで低下し，これを繊維飽和点まで保持する（Type III）．また，木口面から250 mmのB位置，材中心のA位置および側面から10 mmのE位置では，初期含水率60％から50％前後まで急速に減圧が進み，それ以降繊維飽和点付近（20～30％）までは加熱温度40°Cに対する飽和蒸気圧55 mmHgを呈する（Type II）．側面から25 mmのD位置では含水率45％まで急速に減圧されるが，その以下は圧力60～63 mmHgを保持しながら繊維飽和点に至り，その後含水率の減少とともに減圧されていく（Type I）．

ベイツガについては，各位置の含水率変化を測定しなかったため，図13(3)（4)の横軸は材の平均含水率である．木口面から内側50 mmのC位置では材温は35～40°Cを呈し，Type IIIを示している．木口面から250 mmのB位置および側面から10 mmのE位置ではほぼType IIに近い経過を示している．これに対し，側面から25 mmのD位置および中心のA位置では，水分および蒸気の透過が困難で材温の上昇による蒸気圧の影響が加わるためType Iに近い形態を呈している．しかしアピトンの場合と異なりベイツガは気体透過性が低いため，繊維飽和点以下においても減圧されにくいことがわかる．

ベイスギについては間欠乾燥のため，含水率―内部圧力の連続した関係線は得られなかったが，透過が悪いため間欠乾燥の測定結果では材のほとんどの位置でType Iを呈した．

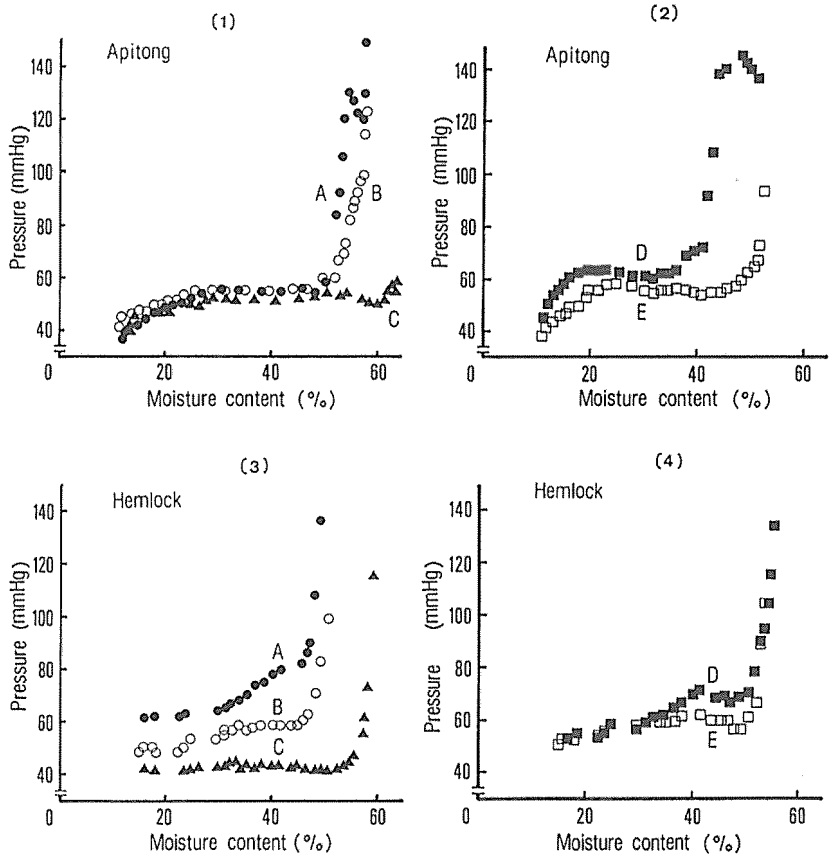

Fig. 13 Variation of pressure in test lumber with lower moisture content
A-E : Longitudinal and transeverse location of lumber for measuring pressure (Refer to Fig. 2, 7)
図 13 試験材の含水率低下にともなう内部圧力の変化
A-E ：試験材の長さおよび幅方向の内部圧力測定位置（図 2， 7 参照）

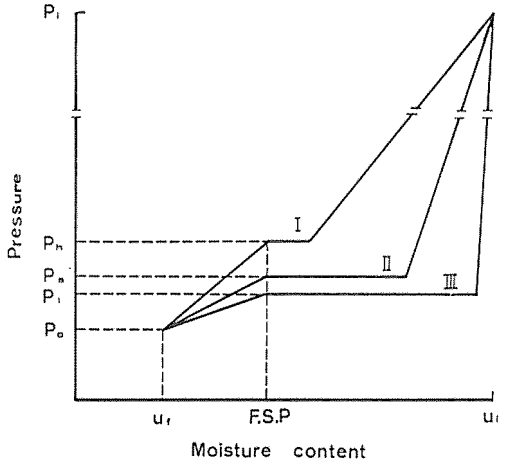

Fig. 14 Three typical relationships between moisture content and pressure in test lumber
図 14 試験材の含水率と内部圧力の代表的な 3 つの関係

4．結　　語

木材の高周波加熱減圧乾燥における乾燥機構を研究するためには，減圧および乾燥にともなう内部圧力の変動についての具体的資料が必要である．この目的から，はじめに，減圧雰囲気内におかれた気乾材の繊維方向における気体の非定常流による内部圧力の減少経過について理論的検討と基礎実験を行なった．つぎに，供試材に繊維方向気体透過性の良好な樹種としてアピトンを，不良な樹種としてベイスギを，その中間的な樹種としてベイツガを選び，それぞれ長さ 100 cm の 10 cm 角材を供試し，40 mmHg，40°C で高周波減圧乾燥を行ない，乾燥経過中の材内各部位の圧力と含水率の経時変化を測定した．

(1) 気乾材を減圧雰囲気内においたときの繊維方向気体流動による圧力減少経過の測定値は，多孔質材を対象とした非定常気体流動に関する理論式からの計算値と近似した傾向を示す．この場合，材内圧力を一定値まで減圧させるための所要時間は，その材の気体透過係数に逆比例する．

(2) 減圧乾燥の初期段階では，材内各位置の内部圧力は外部雰囲気からの減圧によって急速にあるいは緩やかに減少していくが，ある含水率から，繊維飽和点までは自由水の蒸発による圧力増加と減圧による材内圧力低下の両者が平衡し，内部圧力は一定値を示すようになる．材内の含水率が繊維飽和点以下になると，最終段階にはいり，内部圧力は再び減少し，含水率の減少とともに外部雰囲気に近接してゆく．

(3) 上記の平衡圧力は，アピトンのように透過性の良好な材の内部ではその部位の温度に対する飽和蒸気圧（p_s）とほぼ等しくまた木材中で発生した水蒸気が盛んに流出するような木口面近くでは平衡圧力が p_s より低くなる．これに対し，ベイツガやベイスギのように透過性の不良な材の内部では圧力が低下しきれず，しかも自由水の呈する蒸気圧が加わるため p_s より高い値を示す．

引　用　文　献

CRANK, J. (1970): "The Mathematics of Diffusion", Oxfod, London: 17～46

浜野義昭・西尾　茂（1981）：高周波減圧乾燥法について（第1報）．木材工業　**36**（2）：62～66

浜野義昭・西尾　茂（1982）：高周波減圧乾燥法について（第2報）．木材工業　**37**（3）：122～126

浜野義昭・西尾　茂（1986）：高周波減圧乾燥法について（第3報）．木材工業　**41**（8）：376～380

HARRIS, R. A. and TARAS, M. A. (1984a): Comparison of moisture content distribution, stress distribution, and shrinkage of red oak lumber dried by a radio-frequency/vacuum drying process and a conventional kiln drying. For prod J. **34**: 44～54

HARRIS, R. A., TARAS, M. A. and SCHROEDER, J. G. (1984b): Sound quality upholstered frame part yields from lumber and green cuttings dried by a radio-frequency/vacuum system and by conventional kiln-drying. For Prod J. **34**: 19～21

金川　靖・寺沢　真・伊藤基信（1978）：木材の高周波減圧乾燥（1）．木材工業　**33**（6）：241～246

金川　靖・寺沢　真（1984）：木材の高周波減圧乾燥（2）．木材工業　**39**（4）：168～172

金川　靖（1985）：木材の高周波減圧乾燥（3）．木材工業　**40**（2）：66～70

河辺純一・森　稔（1981）：木材15樹種の繊維方向気体透過性．材料　**30**（334）：666～672

河辺純一・森　稔（1984）：木材の高周波加熱併用減圧乾燥（Ⅰ）．九大演報　**54**：125～135

河辺純一・森　稔 (1985)：木材 15 樹種の繊維直角方向空気透過性．材料　**34** (383)：918～924

LEE, A. W. C. and HARRIS, R. A. (1984): Properties of red ork lumber dried by radio-frequency/vacuum process and dehumidification process. For prod J. **34** (5): 56～58

PRAK, A. L. (1970): Unsteady-State Gas Permeability of Wood. Wood Sci and Tech. 4 (1): 50～69

RESCH, H. (1967): Unsteady-State Flow of Compressible Fluids Through Wood. For Prod J. **17** (3): 48～54

佐々木一久 (1983)：気体透過性からみた木材の減圧乾燥機構．九州大学農学研究科修士論文

SEBASTIAN, L. P., SIAU, J. F. and SKAAR, C. (1973): Unsteady-State Axial Flow of Gas in Wood. Wood Sci. **6**: 167～174

SIAU, J. F. (1971): "Flow in Wood". Syracuse University Press: 97～110

SIAU, J. F. (1972): The Effects of Specimen Length and Impregnation Time Upon the Retention of Oils in Wood. Wood Sci. **4**: 163～170

SIAU, J. F. (1976): A Model for Unsteady-State Gas Flow in the Longitudinal Direction of Wood. Wood Sci. and Tech. **10**: 149～153

SIAU, J. F., KANAGAWA, Y. and PETTY, J. A. (1981): The Use of Permeability and Capillary Theory to Characterize the Structure of Wood and Membrane Filters, Wood and Fiber. **13** (1): 2～12

Summary

It is essential for investigating the mechanism of vacuum drying of lumber to obtain the quantitative information on the pressure behavior in the lumber during evacuating and drying. Hence the purpose of this work is to obtain these data.

Green and air-dried square lumbers ($10^2 \times 100$ cm^3) of three kinds of wood species having widely differing permeabilities were prepared for the tests. The evacuational property of air-dried lumbers in the longitudinal direction were tested in a vacuum chamber under reduced pressure of 40-400 mmHg. Drying tests of green lumbers were performed in a vacuum dryer under 40 mmHg, heating up to 40 °C at the center of the lumber with radio frequency. The pressure within lumber (p) was measured by use of the mercury manometers which were inserted into the lumber at the center and the other four positions.

The results obtained were as follows.

(1) Experimental curves of p versus evacuating time for air-dried lumber at the center and the other four positions show a certain degree of approximation with the theoretical curves calculated by substituting the best fitting coefficient value of air longitudinal permeability of the wood (k_g) into the unsteady-state diffusion differential equation.

(2) The pressure at each position in a green lumber during vacuum drying decreases in a characteristic course with lower moisture content and the following three phases occur:

The first phase; In the initial stage, the value of p decreases rapidly or gradually depending on the value of k_g and the distances from the measured positions to both the ends and the edges of the lumber.

The second phase; The decreasing rate of pressure becomes to be equilibrated with the increasing rate of moisture vapor pressure generated in the lumber, and the value of p maintains nearly a constant value.

The third phase; After being dried under the fiber saturation point, the value of p begins to decrease again and approaches to the reduced pressure in the chamber.