

ヒノキ材の振りクリープについて

則元 京*・宮野寛文**・山田 正*

Misato NORIMOTO,* Hirobumi MIYANO** and Tadashi YAMADA* : On the Torsional Creep of HINOKI Wood.

I 緒 言

木材にクリープ現象が生ずる原因は、その高次構造の変形と微視的にはおもに木材実質中の非結晶領域の存在、たとえば木材実質の構成分子のセグメントが飛び込むことができる空孔¹⁾の存在に起因していると考えられ、温度および湿度などの環境因子はおもに後者つまり非結晶領域に存在する鎖状分子の運動に影響を与える。クリープ現象におよぼす温度の効果については、たとえば YOUNGS は温度の効果は湿度の効果より著しいことを報告しており²⁾、北原らはヒノキ湿潤材の温度とクリープたわみの関係が指数関数で与えられることを示しており¹⁰⁾、DAVIDSON は White pine, Western red cedar, Sugar maple の曲げクリープおよびクリープ回復では、温度 50°C と 60°C の間でクリープ曲線に大きな変化が現われることを示し¹⁶⁾、さらに山田らはブナ飽水材の曲げクリープ実験から温度の上昇とともにクリープ速度が変化すること、および 30°C~50°C の温度範囲で木材には転移らしきものが存在することを報告している³⁾⁴⁾。湿度の効果については、たとえば HEARMON は Celtis 材のクリープ結果より温度 25°C では関係湿度75%以下で含水率の影響はほとんどなく、それ以上の湿度では差を生ずることを報告しており⁵⁾、竹村らはブナの曲げクリープと含水率についての実験から、クリープ曲線が含水率の増加とともに急昇すること、およびクリープ量が時間と湿度の2因子を変数とする変数分離形であらわされることを示している¹⁷⁾。

本研究においては木材の振りクリープ現象に与える温度および水分の効果を調べた。振り応力を受けた場合の木材の変形機構は非常に複雑であるが、剪断の挙動がよく現われるため、とくに水分効果をみる場合には適当な方法であると考えられる。

II 実 験

2.1 試 片

試料としてヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) の短冊状二方桁試片を使用した。試片の比重、年輪密度、気乾含水率はそれぞれ 0.45, 8~14年/cm, 17.0%である。その寸法形状を Fig. 1 に示す。実験は温度6段階 (15, 30, 40, 45, 50, 60°C), 湿度7段階 (3, 10, 30, 50, 75, 85, 95% R. H.) について行ない、試片数は各条件で3~5本である。ただし、温度 15°C と 45°C における実験に用いた試片は他の条件で使用した試片とは異なる母材より採取したものである。

2.2 装 置

Fig. 2 に装置の主要部の概略を示す。図において、Aは振りハンドル、Bはピアノ線、C

* 木材物理研究部門, Division of Wood Physics

** 新宮商行株式会社, SHINGU SHOKO, LTD.

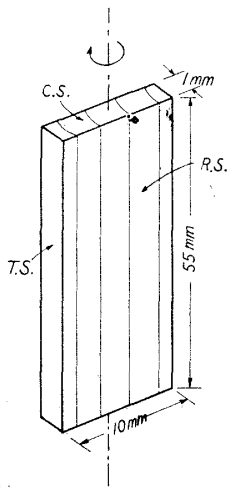


Fig. 1. Specimen.
 C. S. : Cross section
 R. S. : Radial section
 T. S. : Tangential section

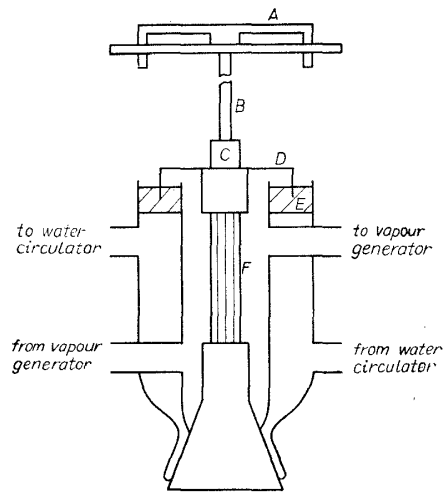


Fig. 2. Experimental apparatus.
 A : Handle D : Cap
 B : Piano wire E : Oil
 C : Mirror F : Specimen

はミラー、Dは試片室のふた、Eは高真空用油、Fは試片である。試片室は二重になつており、外側を一定の温度の温水を循環ポンプにより環流させ、外部からの温度の影響を遮断し、内側に一定の温湿度の空気をファンによつて循環させて恒温湿度に保つた。湿度調整にはシリカゲルおよび塩の飽和溶液を使用した。温度と関係湿度および含水率との関係を Table 1 に示す。

Table 1. Moisture contents of HINOKI wood at various temperatures and relative humidities.

Salt	silicagel		ZnCl ₂		MgCl ₂ ·6H ₂ O		Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O		NaCl		KCl		Pb(NO ₃) ₂	
	R. H. (%)	m. c. (%)	R. H. (%)	m. c. (%)	R. H. (%)	m. c. (%)	R. H. (%)	m. c. (%)	R. H. (%)	m. c. (%)	R. H. (%)	m. c. (%)	R. H. (%)	m. c. (%)
15	3.0	2.5		5.3		11.0		13.2	75.9	18.0	86.7	19.2		22.8
30	3.0	2.3	10.0	5.1	31.5	10.4	50.9	12.6	75.9	17.3	84.5	17.9	96.5	21.7
40	3.0	2.1		4.7	31.0	10.0	48.3	12.2	75.9	16.5	82.0	17.3	95.5	20.6
45	3.0	2.0		4.6		9.7		11.7		16.1		16.6		20.0
50	3.0	1.8	10.0	4.3		9.3		11.4	74.9	15.7		16.2		19.6
60	3.0	1.7		4.0		8.9		10.7	74.9	14.9	80.7	15.5		18.3

2.3 方法

あらかじめ調湿しておいた試片を装置にとりつけ、所定の温湿度に平衡させるため約1時間放置した後、振りハンドルAを回転してピアノ線の上端に180度の振り角を与える。使用したピアノ線の剛性率、直径、長さはそれぞれ 8×10^6 kg/cm², 0.051cm, 32.0cmであり、この場合木材試片の振られる角度は3度/cm以下となり、ヒノキの振り応力比例限度は約16度/cmと報告されているため¹²⁾、比例限度の20%以下の振り角が与えられたことになり、その挙動は線型とみなせる。木材試片の振り角の変位は望遠鏡でミラーCに反射させたスケールの読みを

もつて測定し、その読みから木材試片の振り角 θ' を計算し、次の方法でクリープコンプライアンス $J(t)$ を求める。

ピアノ線の単位長さの振りモーメント M は次式で与えられる¹³⁾。

$$M = \frac{\pi}{2} \cdot G \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^4 \cdot \frac{\theta}{l} \dots\dots\dots (1)$$

ここに G はピアノ線の剛性率、 d はピアノ線の直径、 θ はピアノ線の振り角、 l はピアノ線の長さである。

一方木材試片の単位長さの振りモーメント M' は次式で表わされる¹⁴⁾。

$$M' = G' \cdot \frac{\theta'}{l'} \cdot a^3 \cdot b \cdot f\left(\frac{b}{a}\right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに G' は木材の剛性率、 a, b, l' はそれぞれ試片の厚さ、巾、長さであり、 $f\left(\frac{b}{a}\right)$ は a と b とによつて定まる形状係数である。

木材試片とピアノ線の振りモーメントは等しいため、(1)および(2)式より、クリープコンプライアンス $J(t)$ が次式で表わされる。

$$J(t) = \frac{1}{G'(t)} = \frac{32l}{\pi d^4 G} \cdot \frac{a^3 b f\left(\frac{b}{a}\right)}{l'} \bigg/ \left(\frac{\pi}{\theta'(t)} - 1\right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに $G'(t)$ および $\theta'(t)$ は時間 t における木材の剛性率と振り角である。

また、 $J(t) - \log t$ 曲線の勾配より近似的に遅延スペクトル $L(\lambda)$ が次式によつて求められる¹⁵⁾。

$$L(\lambda) = \frac{1}{2.303} \left\{ \frac{dJ(t)}{d \log t} \right\}_{t=\lambda} \dots\dots\dots (4)$$

III 結果および考察

3.1 結果

Table 2 および Fig. 3 はクリープコンプライアンス $J(t)$ と時間 t の関係である。Fig. 4 は Fig. 3 の $J(t) - \log t$ 曲線の勾配より式(4)によつて求めた遅延スペクトル $L(\lambda)$ であり、Table 3 は $\log J(t) - \log t$ 曲線の勾配の値を示している。

3.2 考察

最初にクリープ現象の水分依存性について考察する。HEARMON は関係湿度 70% 以上で Celtis 材のクリープ曲線に差が明確に生ずることを報告しており⁶⁾、また動的測定の結果からも、平衡含水率 10% 以上で弾性係数の減少が著しく現われることが知られている⁶⁾⁷⁾。Fig. 3 より本実験においても同様の傾向がクリープ速度についてみられるが、それも温度 40°C 以上の場合に限られ、それ以下の温度では明確な差はみられない。とくに温度 45°C においては、クリープ速度に与える水分の影響は著しく現われる。各時間におけるクリープコンプライアンスの値をみると、関係湿度 10% 近辺で最小値を示しており、クリープ速度も温度によつてあまり変化を示さず、非常に安定な状態を示す。このことはブナおよびヒノキについて行なわれた繊維方向の動的弾性率と水分との関係⁷⁾で、含水率 5% 近辺で弾性率が最大値を示すことと一致した傾向である。このように絶乾状態から含水率 5% まで弾性率が増大する理由として配列の

Table 2. Creep compliance $J(t)$ of HINOKI Wood.

5°C							30°C						
$(\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{kg})$							$(10^{-3} \text{cm}^2/\text{kg})$						
R. H. (%)	3	10	30	50	85	95	R. H. (%)	3	10	30	50	85	95
t (sec.)							t (sec.)						
10	0.2962	0.2466	0.2927	0.2968	0.3714	0.2861	10	0.4676	0.4762	0.4497	0.4761	0.4944	0.4995
20	0.2976	0.2472	0.2938	0.2977	0.3745	0.2895	20	0.4692	0.4778	0.4508	0.4777	0.4964	0.5022
50	0.2993	0.2486	0.2949	0.2992	0.3777	0.2917	50	0.4724	0.4808	0.4535	0.4812	0.4995	0.5046
100	0.3020	0.2507	0.2970	0.3012	0.3834	0.2953	100	0.4743	0.4842	0.4562	0.4844	0.5034	0.5077
180	0.3041	0.2521	0.2986	0.3026	0.3878	0.2980	180	0.4782	0.4865	0.4585	0.4880	0.5073	0.5108
480	0.3079	0.2550	0.3015	0.3059	0.3963	0.3035	480	0.4855	0.4932	0.4646	0.4954	0.5134	0.5172
1200	0.3120	0.2583	0.3050	0.3101	0.4046	0.3099	1200	0.4923	0.5020	0.4732	0.5056	0.5250	0.5248
1800	0.3140	0.2598	0.3070	0.3126	0.4096	0.3130	1800	0.5019	0.5094	0.4775	0.5102	0.5297	0.5300
3000	0.3168	0.2620	0.3103	0.3160	0.4166	0.3181	3000	0.5125	0.5180	0.4838	0.5172	0.5372	0.5369
4500	0.3189	0.2635	0.3132	0.3193	0.4214	0.3226	4500	0.5198	0.5221	0.4895	0.5229	0.5441	0.5431
7200	0.3224	0.2662	0.3171	0.3237	0.4268	0.3278	7200	0.5312	0.5290	0.4974	0.5314	0.5503	0.5536
10800	0.3246	0.2687	0.3216	0.3278	0.4316	0.3326	10800	0.5357	0.5339	0.5039	0.5389	0.5589	0.5594
18000	0.3286	0.2720	0.3271	0.3357	0.4378	0.3391							

40°C							45°C							
$(\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{kg})$							$(\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{kg})$							
R. H. (%)	3	10	30	50	75	85	95	R. H. (%)	3	10	30	50	85	95
t (sec.)							t (sec.)							
10	0.4880	0.4750	0.4983	0.4648	0.5235	0.5270	0.5134	10	0.3221	0.3497	0.3456	0.3256	0.3659	0.4161
20	0.4894	0.4772	0.5000	0.4679	0.5265	0.5304	0.5150	20	0.3249	0.3518	0.3479	0.3277	0.3700	0.4216
50	0.4931	0.4806	0.5038	0.4762	0.5318	0.5366	0.5189	50	0.3297	0.3556	0.3539	0.3311	0.3803	0.4327
100	0.4975	0.4848	0.5069	0.4846	0.5369	0.5426	0.5235	100	0.3348	0.3596	0.3600	0.3350	0.3914	0.4445
180	0.5017	0.4904	0.5101	0.4946	0.5412	0.5495	0.5273	180	0.3402	0.3639	0.3668	0.3394	0.4039	0.4587
480	0.5077	0.5172	0.5177	0.5134	0.5547	0.5652	0.5376	480	0.3531	0.3740	0.3830	0.3503	0.4322	0.4895
1200	0.5243	0.5351	0.5277	0.5348	0.5707	0.5874	0.5581	1200	0.3682	0.3865	0.4041	0.3646	0.4658	0.5241
1800	0.5328	0.5427	0.5323	0.5450	0.5783	0.5965	0.5690	1800	0.3759	0.3947	0.4157	0.3699	0.4814	0.5401
3000	0.5445	0.5551	0.5390	0.5564	0.5895	0.6074	0.5868	3000	0.3870	0.4040	0.4305	0.3764	0.4993	0.5597
4500	0.5537	0.5607	0.5450	0.5810	0.6001	0.6171	0.5976	4500	0.3948	0.4102	0.4402	0.3817	0.5125	0.5734
7200	0.5655	0.5668	0.5503	0.5922	0.6131	0.6271	0.6098	7200	0.4026	0.4178	0.4505	0.3877	0.5261	0.5876
10800	0.5754	0.5730	0.5553	0.6145	0.6278	0.6320	0.6203	10800	0.4090	0.4246	0.4582	0.3952	0.5369	0.5979
								18000	0.4165	0.4335	0.4679	0.4012	0.5471	0.6107

50°C		$(\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{kg})$						
R.H. (%)		3	10	30	50	75	85	95
t(sec.)								
10		0.4753	0.4559	0.4944	0.4863	0.5075	0.5196	0.5479
20		0.4775	0.4580	0.4973	0.4879	0.5100	0.5200	0.5498
50		0.4798	0.4612	0.5011	0.4922	0.5132	0.5253	0.5549
100		0.4822	0.4631	0.5040	0.4968	0.5179	0.5296	0.5601
180		0.4842	0.4654	0.5076	0.5009	0.5241	0.5336	0.5654
480		0.4892	0.4693	0.5154	0.5113	0.5391	0.5404	0.5779
1200		0.4969	0.4736	0.5258	0.5270	0.5618	0.5520	0.5956
1800		0.5010	0.4766	0.5317	0.5356	0.5736	0.5568	0.6020
3000		0.5066	0.4780	0.5394	0.5475	0.5901	0.5642	0.6134
4500		0.5125	0.4856	0.5491	0.5580	0.6007	0.5719	0.6222
7200		0.5190	0.5001	0.5613	0.5716	0.6158	0.5797	0.6343
10800		0.5240	0.5074	0.5760	0.5837	0.6328	0.5892	0.6464
14400		0.5316	0.5124		0.5946			0.6540

60°C		$(\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{kg})$						
R.H. (%)		3	10	30	50	75	85	95
t(sec.)								
10		0.4906	0.4776	0.5090	0.5188	0.5132	0.5058	0.5338
20		0.4922	0.4790	0.5100	0.5204	0.5143	0.5070	0.5364
50		0.4949	0.4817	0.5135	0.5254	0.5184	0.5120	0.5511
100		0.4980	0.4843	0.5181	0.5293	0.5215	0.5162	0.5455
180		0.5003	0.4870	0.5213	0.5337	0.5242	0.5200	0.5506
480		0.5069	0.4929	0.5305	0.5447	0.5324	0.5295	0.5629
1200		0.5148	0.5010	0.5390	0.5589	0.5472	0.5427	0.5784
1800		0.5197	0.5051	0.5482	0.5682	0.5540	0.5503	0.5862
3000		0.5251	0.5114	0.5532	0.5817	0.5655	0.5602	0.5976
4500		0.5310	0.5166	0.5598	0.5934	0.5723	0.5687	0.6071
7200		0.5381	0.5228	0.5711	0.6061	0.6071	0.5820	0.6159
10800		0.5439	0.5286	0.5800	0.6193	0.6102	0.5952	0.6224
14400		0.5446			0.6365		0.6032	0.6286

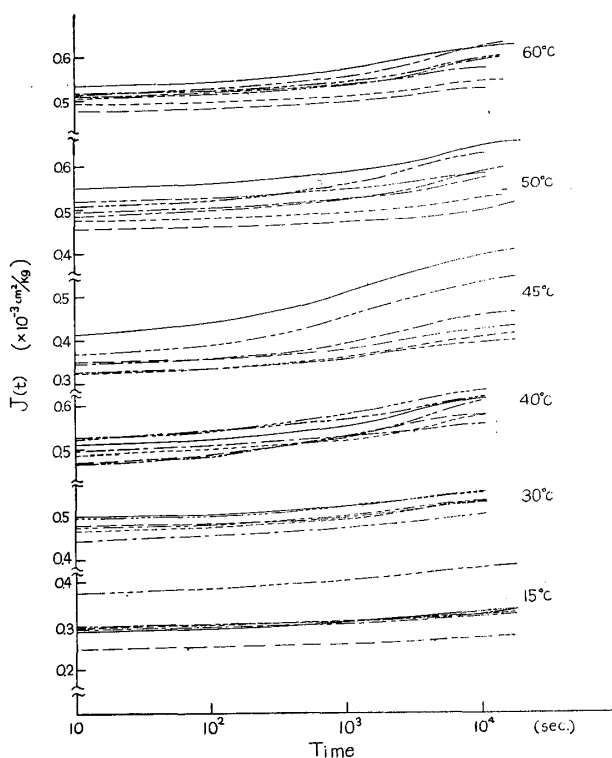


Fig. 3. The effect of temperature and relative humidity on creep of HINOKI wood.

——— 95% R.H. - - - - - 30% R.H.
 - - - - - 85% R.H. - - - - - 10% R.H.
 - - - - - 75% R.H. - - - - - 3% R.H.
 - - - - - 50% R.H.

向上⁷⁾ や有効鎖⁸⁾ の増加が考えられている。次にクリープコンプライアンス曲線より求めた遅延スペクトルについて考える。木材について求められた緩和および遅延スペクトルに関する報告は非常に少ない。たとえばブナ湿潤材のクリープおよび応力緩和より求められた遅延スペクトルおよび緩和スペクトルによると⁹⁾、温度の上昇とともに短時間側にスペクトルは移動し、 10^4 分以内にピークの存在することが報告されている。Fig. 4より本実験において遅延スペクトルに山が 10^3 秒と 10^4 秒の間にみられ、含水率の増加とともにピークが短時間側に移動し、 40°C 以上の温度では含水率の増加とともに遅延スペクトルのピークは大きくかつ平になる傾向を示して

Table 3. $n = \frac{d(\log J(t))}{d \log t}$ vs. time.

15°C						45°C					
t (sec.)	10	10^2	10^3	n_{max} $10^3 < t < 10^4$	10^4	t (sec.)	10	10^2	10^3	n_{max} $10^3 < t < 10^4$	10^4
R.H.(%)						R.H.(%)					
3	0.007	0.011	0.017	0.021	0.021	3	0.009	0.027	0.032	0.038	0.032
10	0.005	0.008	0.015	0.022	0.022	10	0.008	0.021	0.035	0.044	0.036
30	0.006	0.010	0.017	0.021	0.021	30	0.011	0.017	0.021	0.028	0.026
50	0.005	0.008	0.017	—	0.029	50	0.009	0.019	0.029	0.032	0.033
85	0.013	0.022	0.029	0.041	0.023	85	0.013	0.037	0.042	0.072	0.049
95	0.010	0.015	0.026	0.034	0.030	95	0.024	0.042	0.074	0.078	0.061

30°C						50°C					
t (sec.)	10	10^2	10^3	n_{max} $10^3 < t < 10^4$	10^4	t (sec.)	10	10^2	10^3	n_{max} $10^3 < t < 10^4$	10^4
R.H.(%)						R.H.(%)					
3	0.006	0.011	0.027	0.044	0.030	3	0.006	0.007	0.017	0.024	0.024
10	0.008	0.009	0.024	0.036	0.033	10	0.006	0.007	0.010	0.029	0.029
30	0.006	0.009	0.024	0.036	0.034	30	0.008	0.011	0.023	0.038	0.030
50	0.007	0.013	0.023	0.040	0.027	50	0.010	0.014	0.034	0.057	0.057
85	0.007	0.011	0.022	0.034	0.020	75	0.010	0.014	0.035	0.057	0.055
95	0.007	0.010	0.019	0.046	0.025	85	0.008	0.014	0.028	0.039	0.034
						95	0.010	0.015	0.031	0.056	0.052

40°C						60°C					
t (sec.)	10	10^2	10^3	n_{max} $10^3 < t < 10^4$	10^4	t (sec.)	10	10^2	10^3	n_{max} $10^3 < t < 10^4$	10^4
R.H.(%)						R.H.(%)					
3	0.008	0.013	0.025	0.040	0.040	3	0.006	0.008	0.022	0.033	0.025
10	0.009	0.013	0.023	—	0.035	10	0.006	0.008	0.019	0.032	0.024
30	0.007	0.011	0.021	0.034	0.031	30	0.007	0.010	0.022	0.039	0.030
50	0.018	0.030	0.041	0.056	0.056	50	0.009	0.013	0.043	0.052	0.048
75	0.011	0.016	0.041	0.053	0.048	75	0.007	0.013	0.024	0.050	0.046
85	0.013	0.020	0.037	0.045	0.038	85	0.009	0.013	0.037	0.056	0.050
95	0.008	0.012	0.043	0.053	0.045	95	0.010	0.010	0.025	0.045	0.042

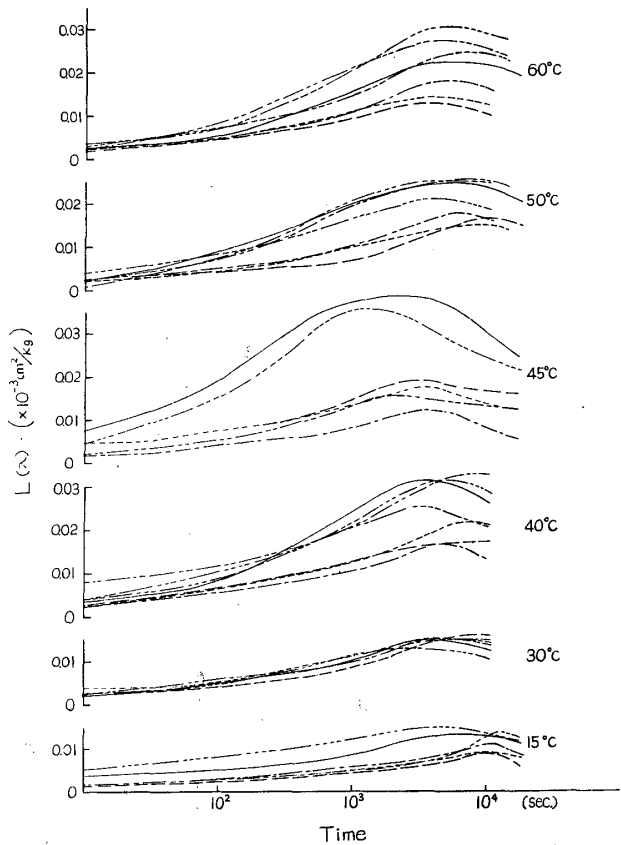


Fig. 4. The effect of temperature and relative humidity on retardation spectra of HINOKI wood.

——— 95% R.H. - - - 30% R.H.
 - - - - 85% R.H. - - - 10% R.H.
 - - - - 75% R.H. - - - 3% R.H.
 - - - - 50% R.H.

温度の上昇とともに弾性率は低下を示す。Fig. 2 より繊維方向の振りクリープにおいては、クリープコンプライアンスの値には明確な差は生じなかつた。しかしクリープ速度に関しては関係湿度30%以上で温度の上昇とともに増大を示し、とくに 45°C 近辺では著しい増加を示し、木材にはこの温度近辺で転移らしきものの存在がうかがえる。同様の結果がブナ湿潤材の曲げクリープ³⁾ およびブナ湿潤材の板目面に一定荷重で鋼球を圧入した場合の圧入深さと時間の関係からも報告されている⁴⁾。低湿度では温度によつてあまりクリープ速度に差異は認められない。以上の結果から木材の振りクリープに与える効果は温度より湿度に大きく現われ、その現われ方は温度によつて加速されるものと考えられる。

IV 要 約

ヒノキ二方柱目の振りクリープに与える温度および湿度の影響を調べた結果次のことが明らかになつた。

(1) 温度 30°C までは湿度の効果はあまり現われず、40°C 以上になるとかなり含水率効果が著しくなり、一般に含水率の増加とともにクリープ速度は増大し、クリープコンプライアン

いる。またブナ材の曲げクリープコンプライアンス曲線より近似的に求めた内部摩擦 $\tan \delta$ の値は気乾で0.015、湿潤で0.038をとることが報告されているが⁹⁾、Table 3 より $\log J(t) - \log t$ 曲線より求めた勾配 n の値は 10^3 秒および 10^4 秒の間で最大値を示し、一般に含水率の増加とともに大きな値を示している。以上のように高含水率領域においてこのようにクリープ現象に含水率の効果が現われる理由の一つとして、木材実質の非晶領域の隣接鎖状分子間に形成されている水素結合が水分子によつて切断され、水分子が可塑的な効果を示すためと考えられる。

次に温度依存性について考察する。YOUNGS はクリープに与える温度の影響は水分よりも著しいという報告をしており²⁾、北原らは湿潤材では温度とクリープたわみの関係が指数関数で与えられることを示している¹⁰⁾。またブナ湿潤材の応力緩和の結果から Time-Temperature Superpositionは成立せず、木材は熱レオロジ的に単純な物質ではないことが示されている⁹⁾。温度と弾性率の関係はある温度範囲では一般に近似的に直線関係にあり¹¹⁾、

スの値は増加する。

(2) 遅延スペクトルは 10^3 と 10^4 秒との間にピークをもち、一般に含水率の増加とともに若干ピークの位置が短時間側に移動し、 40°C 以上では含水率の増加とともにピークは大きくかつ平になる。

(3) $\log J(t) - \log t$ 曲線の勾配 n は 10^3 と 10^4 秒との間で最大を示し、一般に含水率の増加とともに増大し、関係湿度85%以上で温度 45°C 近辺に転移らしきものが存在する。

Summary

In this report we investigate the effect of relative humidity and temperature on the torsional creep of HINOKI (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) wood. The results obtained are shown in Figs. 3, 4 and Tables 2, 3 and summarized into the following three points.

(1) Above 40°C the effect of relative humidity on creep arises remarkably, and in general the creep rate and the value of creep compliance $J(t)$ increase with increasing relative humidity.

(2) The peak of retardation spectrum $L(\lambda)$ appears in the range of time scale between 10^3 and 10^4 sec. and its position shifts to shorter time with increasing relative humidity. Above 40°C the height of the peak greatly increases and it becomes broad at high relative humidity.

(3) The values of n , the slope of $\log J(t) - \log t$ curves, generally increase with increasing relative humidity and have the maximum in the range of time scale between 10^3 and 10^4 sec. At higher relative humidity above about 85% R. H. there exists something like a transition at about 45°C .

文 献

- 1) EYRING, H. and G. HALSEY, High Polymer Physics, Remsen Press Division, New York, 61 (1948).
- 2) YOUNGS, R. L., F. P. J., 7, 315 (1957).
- 3) 山田 正, 京都大学農学部附属演習林報告, No. 34, 159 (1960).
- 4) 大迫, 山田, 木材研究, No. 33, 29 (1964).
- 5) HEARMON, R. F. S., The Mechanical Properties of Wood and Paper, Interscience Pub. Inc. New York (1953).
- 6) CARRINGTON, H., Phil. Mag., 43, 871 (1922).
- 7) 梶田, 山田, 鈴木, 木材誌, 7, 31 (1961).
- 8) HERMANS, Physics and Chemistry of Cellulose Fibers, 277 (1949).
- 9) 山田, 佐道, 白石, 材料試験, 11, 50 (1962).
- 10) 北原, 岡部, 木材誌, 5, 12 (1959).
- 11) HEARMON, R. F. S., Forest Product Res. Special Rep., No. 7. (1948).
- 12) 浦上, 山田, 未発表.
- 13) 太田友弥, 材料力学, 山海堂, 172 (1961).
- 14) 小野鑑正, 材料力学, 丸善, (1938).
- 15) TOBOLSKY, A. V., Properties and Structure of Polymers, John Wiley & Sons., 118 (1960).
- 16) DAVIDSON, R. W., F.P. J., 12, 377 (1962).
- 17) 竹村, 福山, 春名, 島根農科大学研究報告, 第9号, 104 (1961).