

フーリエ変換による自然環境下における 木材の曲げクリープの解析*¹

川添正伸*², 祖父江信夫*³, 平井信之*³

Analysis of Bending Creep of Wood under Natural Environmental Conditions by a Fourier Transformation Procedure*¹

Masanobu KAWAZOE*², Nobuo SOBUE*³ and Nobuyuki HIRAI*³

Bending creep tests of glued-laminated wood beams of four sizes, ranging from 1.1 cm² to 45.6 cm² in cross section, were done under natural environmental conditions for about one year. The bending creep tests were conducted by a two-point loading method, and stresses at the surface of the beams were 6 Mpa. Deflection and mass of the beam, and environmental conditions were measured hourly using an electronic data recorder. The effects of specimen size on creep behavior under non-steady state moisture conditions were analyzed using a Fourier transformation procedure.

Creep components of typical periods were resolved by applying an inverse Fourier transformation to an amplitude spectrum of time trend creep curves. The creep components of daily and seasonal changes were distinguished within the amplitude spectrum.

Well-known mechano-sorptive creep effects were observed in the creep components of the daily and the seasonal changes resulting from the environmental conditions.

For daily moisture changes the size effect was large for the small specimens and decreased very much with increasing specimen size, because the moisture movement occurs only in the surface part of the specimens. For the seasonal, long-period moisture changes, the specimen size effect was less for all specimen sizes, because the moisture can penetrate deeply enough into the specimens during long exposure to the environmental conditions. The results show that the size effects are remarkably large for short-period creep of small specimens with cross sections below 5 cm².

Keywords : long-term creep, natural environmental conditions, Fourier transformation, spectrum analysis, specimen size effect.

断面寸法が1.1~45.6 cm²の4種類の集成材を用い、自然環境下で約1年間にわたり曲げクリープ試験を行った。その測定データはフーリエ変換によって周期変動の解析を行い、その結果を基に水分非定常クリープ挙動とクリープ挙動に及ぼす試験体の断面寸法の効果について検討を試みた。

測定データの解析から、水分非定常クリープは湿度の日変動と季節変動に対応した変動が特徴的に現れ、その挙動は従来のMechano-sorptive変形と一致することが示された。そして、Mechano-sorptive変形の寸法効果は、湿度の日変動に対しては大きくなり、湿度の季節変動に対しては小さくなることを示された。自然環境下におけるMechano-sorptive変形の寸法効果は、断

*¹ Received April 21, 2000 ; accepted September 18, 2000. 本研究は第50回日本木材学会 (2000年4月, 京都) において発表した。

*² 岐阜大学大学院連合農学研究所 United Graduate School of Agriculture, Gifu University, Gifu 501-1193

*³ 静岡大学農学部 Faculty of Agriculture, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529

断面寸法が 5 cm^2 以下の小断面材における短周期の湿度変化に対して著しく現れることが明らかとなった。

1. 緒 言

水分非定常状態における木材のクリープは吸湿過程と放湿過程で挙動が異なり、さらに水分履歴の影響も受けるために複雑な挙動を示すことが知られている^{1,2)}。このクリープは Mechano-sorptive (メカノソープティブ) 変形と呼ばれ (以下 MS 変形)、これまでに数多くの研究が行われ、水分変動サイクル下における MS 変形のモデル化²⁻⁴⁾ も行われてきた。しかし、いずれの研究も試験体の寸法が小さく、単純な温・湿度変動条件の試験がほとんどである。一方、近年は構造用木材に対するクリープ性能を評価する必要が生じてきたため、自然環境下において実大材のクリープ試験が行われるようになり、わが国でも荒武・有馬⁵⁾ や武田⁶⁾ の報告がある。自然環境下のクリープ試験は、実際に木材を使用する環境におけるクリープを評価するには直接的で有効な方法ではあるが、温・湿度が自由に制御できない環境での試験であるため、気象条件の異なる地域や異なった気象変化が起こるときのクリープの評価に一般化するためには、気象変化の規則性と不規則性を定量的に評価しなければならない。また、木材中の水分拡散には有限の時間を必要とするので、試験体の断面寸法は MS 変形の発生仕方の影響を及ぼす。

そこで、本研究では自然環境下において断面寸法の異なる木材の曲げクリープ試験を行い、不規則変動の定量的解析に有効なフーリエ変換の手法を試験結果に適用し、水分非定常クリープの挙動と水分非定常クリープに及ぼす断面寸法の影響を定量的に検討することを試みた。

2. 実 験

2.1 試験体

試験体は断面寸法が $1.1 \sim 45.6 \text{ cm}^2$ の集成材で、

試験体の物理的な基礎データを Table 1 に示す。表層がヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) で中層がスギ (*Cryptomeria japonica*) の等厚のひき板構成であり、ひき板に縦継ぎは無い。集成材を用いたのは、別途実験を行っていた実大構造用集成材の実験との比較を考慮してのことである。積層接着にはレゾルシノール樹脂接着剤を用いている。各寸法の試験体で曲げクリープ試験用と質量測定用の試験体を1体ずつ用意した。また、試験体の木口面はシリコンシーラントで被覆した。

2.2 試験法

曲げクリープ試験は Fig. 1 に示すように三等分点荷重方式で行い、支持点は単純支持とした。試験体のたわみは矢高計の中央に電気式ダイヤルゲージ (精度 $1/100 \text{ mm}$) を設置して全たわみを測定した。試験体の曲げ応力は外縁応力が 6 MPa となるように載荷した。荷重方向はラミナ積層面と垂直である。質量測定は小荷重用ロードセルで、温度と相対湿度はサーモレコーダー (タバイ エスベック社製, RS-10) で測定した。質量とたわみの測定はデータロガーを用いて自動計測とした。なお、測定間隔は1時間である。試験は1996年11月上旬にスタートして1997年10月中旬に終了した。試験期間は8182時間である。試験は外気が直接流入し、雨よけのある建物

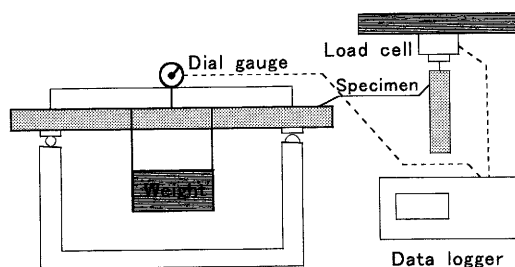


Fig. 1. Experimental setup.

Table 1. Physical parameters of specimens.

Specimen	Width×Height×Length (mm)	Span (mm)	ρ (g/cm ³)	MC (%)	E (GPa)	N	T_N (mm)	E_N max	E_N min	E_N ave.
1	39×117×1800	1440	0.39	12.6	9.6	9	13	11.3	8.1	9.8
2	26×77×1200	900	0.42	12.7	11.3	7	11	14.2	8.7	10.6
3	13×40×780	450	0.44	12.1	12.5	5	8	14.0	8.4	10.9
4	6×18×600	225	0.38	11.1	8.1	3	6	11.2	7.7	9.9

Legend: ρ : density, MC: moisture content, E : modulus of elasticity of a beam by a bending test, N: number of laminae, T_N : thickness of a lamina, E_N : modulus of elasticity of a lamina.

Note: MC was measured by an oven dry method.

のピロティで行った。電気式ダイヤルゲージとロードセルの出力のドリフトは、適宜機械的な示針目盛および分銅を基準に校正を行った。

3. フーリエ変換の適用方法^{7,8)}

フーリエ変換は Microsoft Excel 97 の分析ツールに含まれている離散フーリエ変換ソフトを用いて行った。測定データは一定の時間間隔で取り込まれた離散データである。サンプリング周期は、データ区間を T とするとその M 等分に相当するので $\Delta t = T/M$ で表される。ここで離散データの関数を $x(n)$ とすれば、離散スペクトル $X(m)$ は式(1)で表される。

$$X(m) = \left(\frac{T}{M}\right) \times \sum_{n=0}^{M-1} \{x(n) \times e^{-j2mn\pi/M}\} \\ = C_m \times T (m=0, 1, 2, \dots) \\ j: \text{虚数単位} \quad \dots(1)$$

ここで C_m は複素フーリエ係数であり、実フーリエ係数 a_m , b_m と以下の関係がある。

$$C_0 = \left(\frac{1}{2}\right) \times a_0, \quad C_m = \left(\frac{1}{2}\right) \times (a_m - j \times b_m) \\ (m=1, 2, \dots) \quad \dots(2)$$

式(1), 式(2)から、データ区間 T を基本周期とする各周波数成分 m の実フーリエ係数は式(3)のようになる。

$$m=0 \quad \text{のとき} \quad X(0) = \left(\frac{T}{2}\right) \times a_0 \\ m=1 \quad \text{のとき} \quad X(1) = \left(\frac{T}{2}\right) \times (a_1 - j \times b_1) \\ m=2 \quad \text{のとき} \quad X(2) = \left(\frac{T}{2}\right) \times (a_2 - j \times b_2) \\ \vdots \\ m=k \quad \text{のとき} \quad X(k) = \left(\frac{T}{2}\right) \times (a_k - j \times b_k) \\ \vdots \\ m=M-1 \quad \text{のとき} \quad \dots(3)$$

$$X(M-1) = \left(\frac{T}{2}\right) \times (a_{M-1} - j \times b_{M-1})$$

したがって、各周波数成分の振幅 A_k は式(4)で求められる。

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad \dots(4)$$

また、式(4)で得られた振幅スペクトルから特定の周波数成分のみを残し、それ以外の周波数成分の振幅を 0 とした離散スペクトル $X(m)$ を新たに $F(m)$ とすれば、式(5)のような離散フーリエ逆変換によって $x(n)$ における特定の周波数成分に由来する時系列離散データ $f(n)$ を得ることができる。

$$f(n) = \left(\frac{1}{T}\right) \times \sum_{m=0}^{M-1} \{F(m) \times e^{-j2mn\pi/M}\} \quad \dots(5)$$

これは、フーリエ変換を一種のデジタルフィルタとして利用することになる。

なお、フーリエ変換によって振幅スペクトルを求める際、エイリアシングと打ち切り誤差の影響が問題となる^{7,8)}。エイリアシングの影響を避けるため、自然環境下の湿度変動は日変動が最も短周期の変動であると仮定し、データのサンプリング周期を 4 時間とした。また、相対たわみのデータに関しては、始点と終点の値が大きく異なるため周期性が保たれなくなり、打ち切り誤差の影響が大きくなる。そこで、データの周期性を確保するため、相対たわみの時系列データを 1 年で折り返して 2 年分のデータを作製してフーリエ変換を行った。すなわち、相対たわみのデータのみが他のデータと周期のとり方が異なることになる。したがって、相対たわみの周期に関しては、湿度や含水率の周期と対応しやすくするため、以下の文章では解析の最長周期を 1 年と読み換えて表現することにする。また、データの欠落部分はその間の平均的データを補完して処理した。

4. 結果と考察

4.1 たわみ、含水率および温度、相対湿度に関する測定データと振幅スペクトル

Fig. 2 に試験結果を示す。相対たわみと含水率の測定データは、寸法の最も大きい試験体 1 と最も小さい試験体 4 または試験体 3 の結果を示した。相対たわみは式(6)のように定義する。

$$\text{相対たわみ} = \frac{\text{全たわみ}}{\text{載荷直後の弾性たわみ}} \quad \dots(6)$$

含水率は試験体全体の質量から求めた平均含水率である。データの欠落は停電や測定器のトラブルによるものである。また、他の測定データでも計測器のドリフトが原因で十分な測定結果の得られなかった期間のデータは除外して検討を行った。

Fig. 2 から、自然環境下における湿度変動は種々の振幅と周期成分を含み、その変動に対応して相対たわみと含水率も変化していることがわかる。断面寸法の違いによる影響も見られ、小断面材の相対たわみと含水率は寸法の大きい材よりも短周期変動の振幅が大きく現れている。

これらの時系列データから振幅スペクトルを求め、各データの周期変動の特徴について検討を行った。Fig. 3 は、Fig. 2 に示した各時系列データの振幅スペクトルである。温度と湿度の振幅スペクトルでは 1 日周期と 1 年周期の成分の振幅が大きい。これ

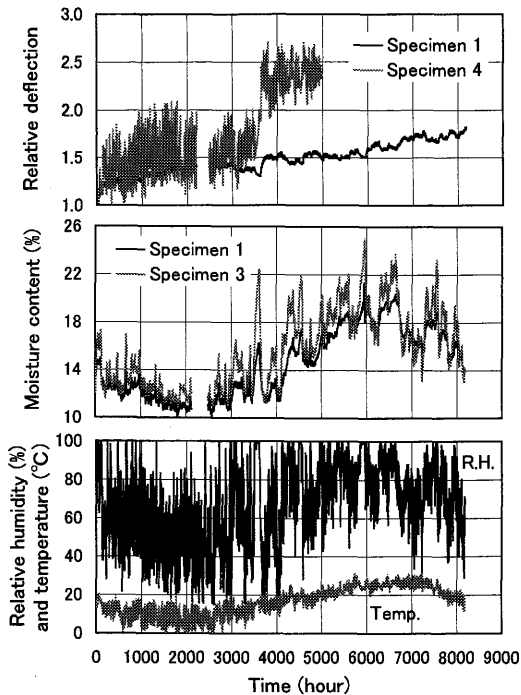


Fig. 2. Time trend figures of creep, moisture content, relative humidity and temperature under natural environmental conditions for about one year.

Notes: cross sections of specimens are 39×117 mm, 13×40 mm, 6×18 mm, respectively for Specimen 1, Specimen 3 and Specimen 4. relative deflection is defined as total deflection divided by instantaneous deflection.

は、自然環境下の温度と湿度が1日と1年の周期で規則的に大きく変動していることを示す結果である。一方、相対たわみと含水率の振幅スペクトルでも、寸法の大きな試験体1では1年周期の成分の振幅が大きい。寸法の小さい試験体3または4では1年周期の成分の振幅と相対たわみに関する1日周期の成分の振幅が大きい。この結果は、クリープ変動が自然環境の変動に対応したことを示し、さらに相対たわみに対する試験体の寸法効果も示している。含水率の振幅スペクトルで断面寸法の影響が小さいのは、測定データが平均含水率であること、また試験体3がやや断面の大きな材であるためである。以上の結果から、以下に湿度の日変動と季節変動に対応した水分非定常クリープに注目して、その挙動と寸法効果の検討を行った。

4.2 季節変動に関する検討

Fig. 4に、試験体1の相対たわみと含水率、および温度と相対湿度に関する測定データと1年周期の成

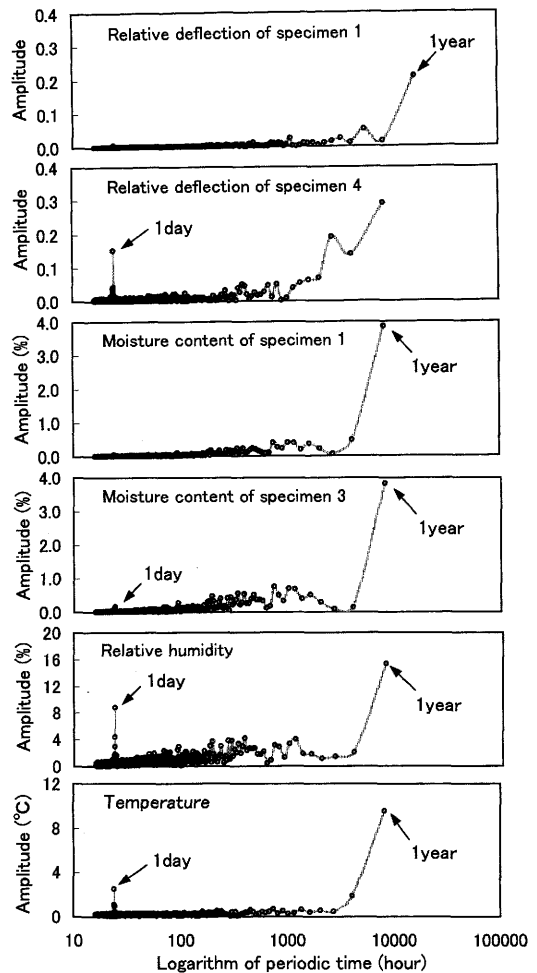


Fig. 3. Frequency spectrum of each measured data set during 8188 hours.

分をそれぞれ示す。ここで1年周期の成分とは、温度・湿度と含水率に関してはFig. 3の振幅スペクトルにおける実際の時間スケールの1年周期の成分であり、相対たわみに関しては実験方法で述べたデータ変換を行っているため、長周期側の3成分のみを残してフーリエ逆変換することで得られた時系列データのことである。

相対たわみと含水率の変化は、Fig. 3の振幅スペクトルの結果を反映して1年周期の成分で測定データがほぼ近似されている。この1年周期の成分から、クリープ挙動と含水率変化の対応は以下になる。この試験は秋季に開始し、2000時間付近は冬、4000時間付近は春、6000時間付近は夏、そして8000時間付近は秋に相当する。秋季から冬季にかけては含水率の減少に伴いクリープが進行している。冬季

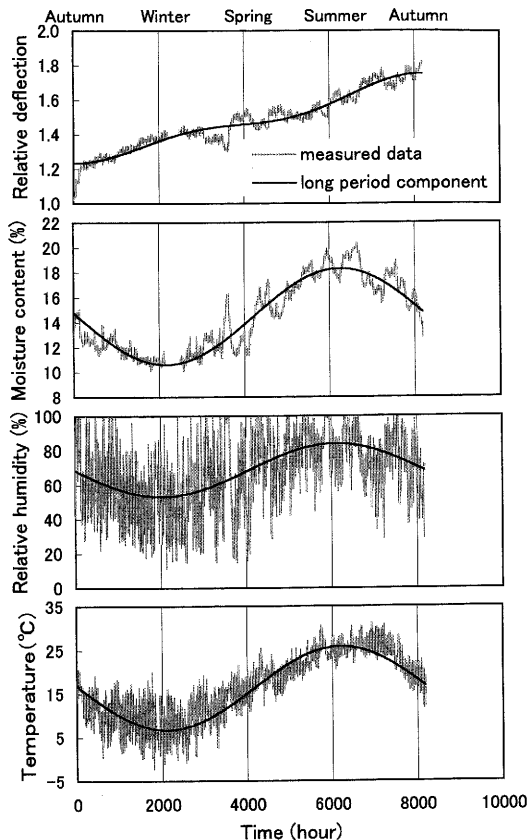


Fig. 4. Comparison between measured data and a long period component estimated by a Fourier transformation procedure.

Note: relative deflection and moisture content are for data of specimen 1.

から春季、そして梅雨を経て夏季にかけては含水率の増加に伴いクリープは停滞している。その後の夏季から秋季にかけては再び含水率が減少することでクリープも再び進行している。この結果から、水分非定常クリープの季節変動は従来のMS変形と同一の挙動であり、極めて長い周期のMS変形であることがわかる。

また、木材のクリープは温度の影響を受けることが知られており、これまでの研究から木材のクリープは温度が高いほど進行し⁹⁾、また温度の上昇過程でもクリープが進行すると報告されている¹⁰⁾。そこで、今回の試験結果を照らし合わせてみると、温度の季節変化は最低気温が6.6°Cで最高気温が25.7°Cであり、試験時間2000~6000時間で温度が上昇している。しかし、その期間のクリープはむしろ停滞していた。つまり、本実験における温度条件ではクリ

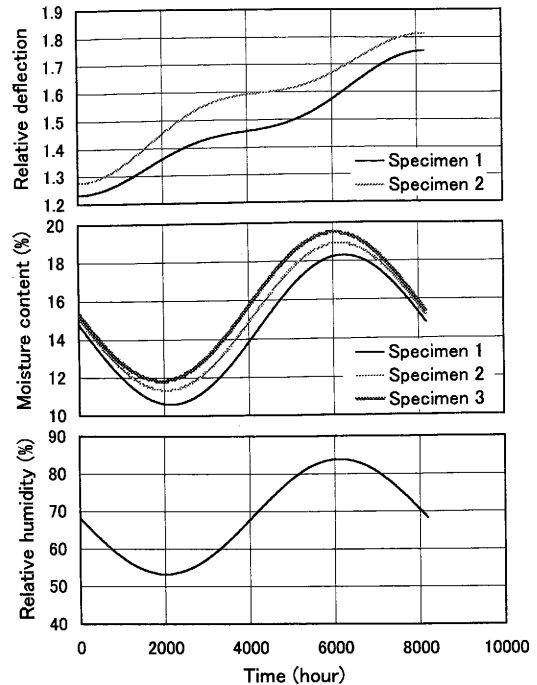


Fig. 5. Size effect on a long period component estimated by a Fourier transformation procedure.

ープに対する温度の影響が小さく、含水率変化によるMS変形がクリープ挙動に支配的に作用したと考えるのが妥当である。

Fig. 5は、フーリエ変換操作によって取り出された、相対たわみ、含水率および相対湿度の1年周期の成分に及ぼす試験体の断面寸法の影響を示す。相対たわみに関しては1年間を通した結果が得られた試験体1と2の比較となるが、寸法の小さい試験体2の値が試験体1と比べて若干大きな値を示している。4000時間付近では一時的に試験体間の相対たわみの差が大きくなっている。これは、3500時間付近で降雨が数日続いたために比較的大きな含水率変動が起こり、木材内部への水分拡散は寸法の小さい材(試験体2)でより深く進行するため、MS変形もより多く発生してクリープの増加に寄与したためである。なお、試験開始1年後の相対たわみは、試験体1で1.75、試験体2で1.81となった。含水率に関しては、寸法の小さい試験体ほど高含水率で推移しているが、年間の変動幅はいずれの試験体も7.6~7.7%となり、断面寸法の影響は見られなかった。

4.3 日変動に関する検討

Fig. 6は、クリープが比較的安定した周期的変動を示す区間における試験体1と4の相対たわみと相

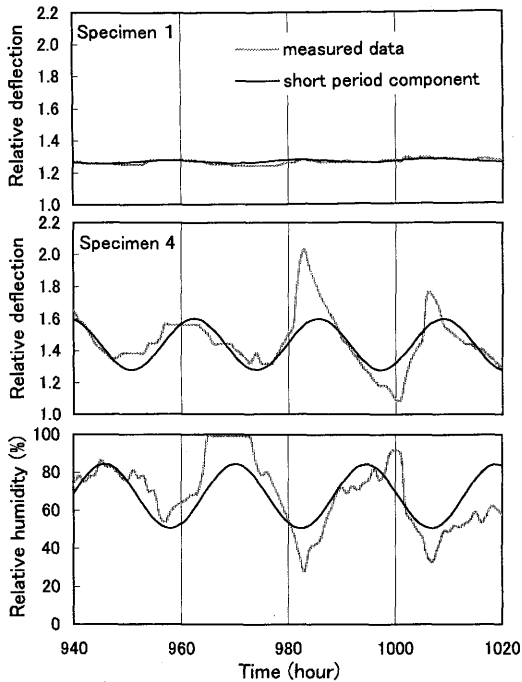


Fig. 6. Comparison between measured data and a short period component estimated by a Fourier transformation procedure.

対湿度に注目し, その時系列データと1日周期の成分を示す。1日周期の成分について相対たわみの変動幅を寸法の異なる試験体間で比較すると, 寸法が最も小さい試験体4の変動幅は最も大きい試験体1の変動幅の16倍であった。短周期の湿度変化に対するMS変形は寸法効果の影響が非常に大きくなり, 試験体の断面寸法が大きくなると湿度の日変動に対するMS変形はクリープ挙動にあまり影響を及ぼさないことがわかる。また, 湿度変化と試験体4の相対たわみの対応関係を1日周期の成分についてみると, 放湿過程でクリープが進行して吸湿過程で回復する従来のMS変形と一致する挙動が確認される。

4.4 その他の周期成分に関する検討

自然環境下の湿度変化には日変動と季節変動以外にも様々な周期変動が含まれている。そこで, 試験開始から約4000時間までの測定データについて周期1ヶ月以上の中・長周期成分に関するクリープ挙動の検討を行った。

Fig. 7は, フーリエ変換操作によって取り出された, 相対たわみと含水率の中・長周期成分に及ぼす試験体の断面寸法の影響を示す。相対たわみは寸法の小さい試験体ほど大きな値を示し, 変動も大きく

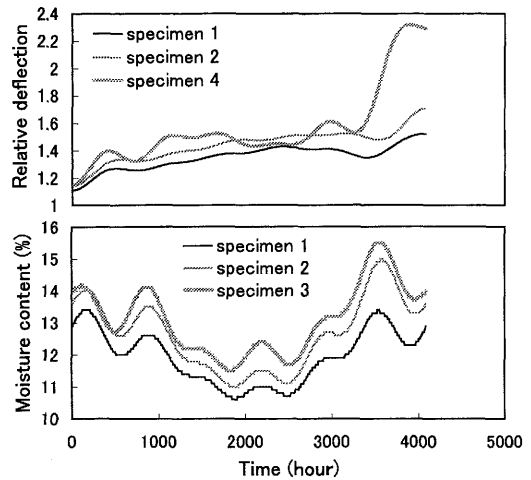


Fig. 7. Size effect on middle and long period components estimated by a Fourier transformation procedure.

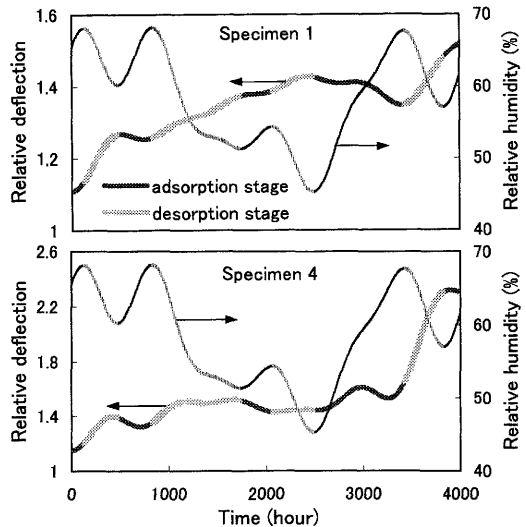


Fig. 8. Relationships between relative deflection behavior and relative humidity change.

Note: original data are the same as those of fig. 7.
Legend: thin line: relative humidity, thick line: relative deflection, dark-colored segment: adsorption stage, light-colored segment: desorption stage.

現れている。また, 試験体4のクリープは3500時間付近で特に大きく進行している。この原因は, 試験体4の断面寸法が試験体1, 2と比べて非常に小さいため, 履歴の無い比較的大きな含水率変動がこの時間付近で生じ, 材内部への水分拡散が相対的に深く進行したためである。なお, Fig. 7に示した3500時

間付近の含水率変動は試験体間の差が小さいが、これは中・長周期成分の経時変化に、可逆的で周期の短い成分が含まれていないためである。

Fig. 8は、Fig. 7に示した相対たわみと相対湿度変動の関係を詳細に比較するため、両者の関係を試験体1と4に分けて示す。相対たわみと湿度の経時変化は、放湿過程と吸湿過程で曲線の濃淡を分けて示している。クリープは放湿過程で進行し、吸湿過程で回復または停滞する傾向を示している。なお、湿度変化と相対たわみ変化の位相の関係は明確に得られなかった。その理由として、今回の解析は突発的に起こる変動や中・長周期の不均一な周期変動が含まれるデータを一括してフーリエ変換していることが挙げられる。この問題を解決するには、時間と周波数を変数とする周波数解析を試みる必要があると考えられる。

4.5 MS変形の寸法効果に関する検討

試験開始から約2000時間(約2.8ヶ月)における相対たわみに関して、測定データの振幅スペクトルから日変動と季節変動に関する振幅を求め、試験体間でその振幅を比較することによりMS変形に対する寸法効果の検討を行った。Fig. 9は、断面積と相対たわみの振幅値の関係を示している。この図から、日変動では相対たわみの振幅値が断面寸法の小さいときに大きく、断面寸法の増加につれて急激に小さくなるのがわかる。一方、季節変動では、小さな断面の場合は日変動の振幅と同程度の振幅を示し、断面積が増加しても大きな振幅を維持している。

短周期の変動で試験体の断面寸法の違いによる影響が現れやすい原因は、湿度変化に伴う木材中の水分拡散にはある一定の時間を必要とするため、比較的断面寸法の大きい材では短周期の湿度変動に対して表面付近のみの水分変動しか起こらないからと考えられる。また、長周期の湿度変化に対しては、試験体の材の内部まで水分が移動するのに十分な時間があることから断面寸法による水分分布の差が生じにくいためであると考えられる。

さらに、MS変形の寸法効果に対する湿度の変動周期の影響を明確にするため、断面寸法の最も大きい試験体1の相対たわみのスペクトル振幅値に対する振幅の比をそれぞれの変動周期で求め、その結果をFig. 10に示す。この図から、MS変形の寸法効果は短周期の湿度変化に対して大きくなるのが明確に示され、断面寸法が20 cm²以上になるとMS変形の寸法効果に対する湿度周期の差違の影響がほとんどなくなることもわかる。

以上の結果から、実大構造物のような大きな断面

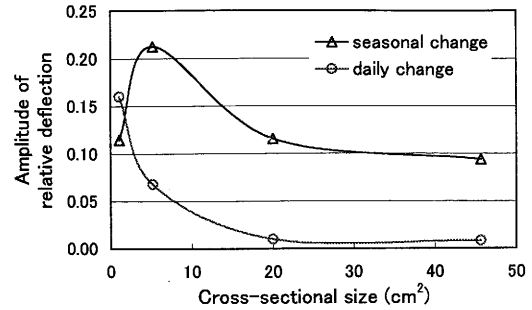


Fig. 9. Relationships between amplitude of relative deflection and cross-sectional size.

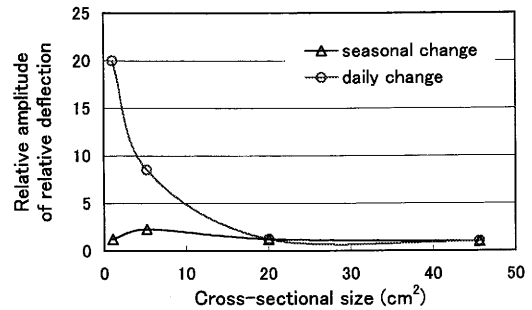


Fig. 10. Relationships between relative amplitude of relative deflection and cross-sectional size.

Note: relative amplitude of relative deflection is the ratio for specimen 1 with cross sectional area of 45.6 cm².

寸法の木材では、日変動のような短周期の湿度変化に起因するMS変形がクリープ挙動に及ぼす影響は小さく、梅雨期のように長時間多湿の状態が続いたあとの高湿度状態からの回復期や、季節変動のような長い周期の湿度変化に起因するMS変形がクリープ挙動に及ぼす影響を考えればよいことがわかる。

5. 結 論

自然環境下の曲げクリープに関して、測定した時系列データを周波数解析することによって水分非定常クリープの挙動と寸法効果の解析を試み、以下の結論を得た。

- 1) 自然環境下の水分非定常クリープは、湿度変化の周期に関わらず従来のMS変形と一致する挙動を示すことが確認された。
- 2) 自然環境下では日変動と季節変動の成分が規則的で大きな変動を示し、MS変形もその周期に対応して顕著な変動を示した。
- 3) 断面寸法が5 cm²以下の材では湿度の日変動と

季節変動に対応したクリープの変動が顕著であり, 断面寸法が20 cm²以上の材では湿度の季節変動に対応したクリープ変動のみが顕著に現れた。

- 4) MS変形の寸法効果は湿度の変動周期によって現われ方が大きく異なった。これは, 湿度の変動周期によって試験体内部における水分分布に差違を生じるためである。また, 断面寸法が20 cm²以上になると, MS変形に対しては長周期の湿度変動のみに支配されるようになる。

文 献

- 1) Grossman, P. U. A.: *Wood Sci. Technol.* **10**, 163-168 (1976).
- 2) Ranta-Maunus, A.: *Wood Sci. Technol.* **9**, 189-205 (1975).
- 3) Mukudai, J., Yata, S.: *Wood Sci. Technol.* **20**, 335-348 (1986).
- 4) Mukudai, J., Yata, S.: *Wood Sci. Technol.* **21**, 49-63 (1987).
- 5) 荒武志朗, 有馬孝禮: 木材学会誌 **41**, 359-366 (1995).
- 6) 武田孝志: 木材工業 **51**, 511-513 (1996).
- 7) 倉部 誠, 市原千治: “振動モード解析入門”, 日刊工業新聞社, 1989, pp. 1-97.
- 8) 船越満明: “キーポイント フーリエ変換”, 岩波書店, 1997, pp. 186-209.
- 9) 北原覚一, 岡部 登: 木材学会誌 **5**, 12-18 (1959).
- 10) 北原覚一, 岡部 登: 木材学会誌 **10**, 169-175 (1964).