

## 周期的な湿度変動下における木材の曲げクリープに及ぼす 湿度変動周期と試験体断面寸法の影響\*<sup>1</sup>

川添正伸\*<sup>2</sup>, 祖父江信夫\*<sup>3</sup>

### Effects of Moisture Cycling Period and Cross Sectional Size of Specimens on Bending Creep of Wood under Humidity Cycling\*<sup>1</sup>

Masanobu KAWAZOE\*<sup>2</sup> and Nobuo SOBUE\*<sup>3</sup>

Bending creep tests of spruce beams  $0.5 \times 1.5$  cm,  $1.0 \times 3.0$  cm and  $1.5 \times 4.5$  cm in cross section were done under four different conditions of humidity cycling. The relative humidity was alternately held at 10 and 90%, at a constant temperature of 20°C. In addition to regular humidity cycling with periods of 1, 4, and 8 days, complex cycles of successive periods of 1, 4, and 8 days were used.

Typical mechano-sorptive creep was observed when the cross section was small or the humidity cycling period was long. However, unusual mechano-sorptive creep, namely creep increases during adsorption and decreases during desorption, was also observed when the cross section was large or the humidity cycling period was short.

At the first adsorption stage, all specimens showed large increases of deflection. The creep during adsorption was affected by the history of moisture changes. However, the mechano-sorptive creep approached being reversible in successive desorption and adsorption stages with increasing numbers of humidity cycles, i.e., the mechano-sorptive creep arrived at a limit cycle stage.

The accumulated deflection caused by the mechano-sorptive creep became larger as the number of humidity cycle increased, and finally approached a limit. The limit became larger as the moisture penetrated deeper into the specimen.

The accumulated deflection was affected by the history of the longest cycle in the previous humidity cycling.

*Keywords*: Creep, moisture non-steady state, size effect, humidity cycling period, moisture history.

湿度変動の周期を1日、4日、8日とした一定周期、およびそれらの周期を組み合わせる1周期とした複合周期による繰り返し湿度変動下で、寸法の異なるシトカスプルス材の曲げクリープ試験を行った。

湿度変動の周期と試験体の断面寸法の組み合わせによって水分非定常クリープの現われ方が異なり、従来から指摘されている典型的なメカノソープティブクリープ(MSクリープ)と逆の挙動を示す例が確認された。

吸湿過程のクリープは湿度履歴の影響を受け、湿度履歴が無い場合はクリープが大きく進行し、湿度変動の繰り返し回数の増加に従いクリープは減少した。そして、湿度変動の周期的な繰り返しを十分に経験した後は、吸湿過程と放湿過程のクリープが可逆的に変動するようになった。

\*<sup>1</sup> Received July 25, 2000; accepted November 1, 2000.

\*<sup>2</sup> 岐阜大学大学院連合農学研究科 United Graduate School of Agriculture, Gifu University, Gifu 501-1193

\*<sup>3</sup> 静岡大学農学部 Faculty of Agriculture, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529

湿度変動の周期的な繰り返しによって生じるクリープ変形の蓄積は、木材への水分拡散が相対的に内部に進行する条件ほど大きく、その蓄積量は過去に受けた最長周期の湿度履歴に左右された。

## 1. 緒 言

木材のクリープ過程で含水率変化に伴って発生する特異な現象は、メカノソープティブクリープ（以下はMSクリープと略す）と呼ばれる<sup>1)</sup>。MSクリープは、研究の初期段階において、木材内部の水分傾斜に基づく内部応力の発生が原因である可能性も指摘されたが<sup>2)</sup>、水分傾斜が生じにくい非常に薄い木材を用いた検討でも典型的なMSクリープが観察され<sup>3,4)</sup>、木材細胞壁に備わる本質的な性質であることが確認された。さらに、MSクリープは含水率変化量に依存することが確認され<sup>5,6)</sup>、その後GrossmannによってMSクリープの特徴も整理され<sup>1)</sup>、木材に特有な性質として広く理解されるようになった。このような研究の発展の経緯から、MSクリープに関する既往の研究は、これ以降、主として水分傾斜の出来にくい比較的断面の小さい木材を用いて検討されるようになった。

木材内部の水分変動とMSクリープの関係について再び関心が払われるようになったのは、建築構造材のような大きな断面の木材に対して、使用環境下における水分非定常クリープを考慮したり<sup>7-12)</sup>、未乾燥材を使用した際の木材のクリープ変形が問題とされるようになってきたためである<sup>8,10)</sup>。これらの研究の特徴は、自然環境下において試験が行われていることであり、その理由のひとつに試験体が大きいと温湿度の制御に規模の大きな装置を必要とすることがあり、また、実大構造材の実験は長期間を必要とする。しかし、実大材の水分非定常クリープも、基本的には木材中の水分移動と試験体の寸法を考慮したMSクリープの問題に帰着できると考えられるので、少し寸法の小さな試験体による実験を行うことにより短期間に詳細を検討できる利点が生じてくる。

そこで、本研究では周期の異なる繰り返し湿度変動下において寸法の異なる木材の曲げクリープ試験を行い、水分非定常クリープに及ぼす湿度変動の周期と試験体の断面寸法の影響を実験的に検討した。その結果、湿度変動の周期や試験体の断面寸法の組み合わせによって、従来から知られている典型的なMSクリープとは見かけ上全く異なる現象が現れることが実験的に確認された。

## 2. 実 験

### 2.1 試験体

試験体は、木理通直で平均年輪幅が約1mmのシトカスプルス (*Picea sitchensis* Carr.) 材の辺材部を用いた。製材は生材から気乾状態に達するまで段階的に分けて行い、寸法の異なる3種類の試験体を作製した。試験体は恒温恒湿室（温度20°C、相対湿度40~60%）で十分に養生してからクリープ試験に用いた。クリープ試験開始時における試験体の含水率は8~11%である。Table 1に、調湿後のクリープ試験用試験体に関する寸法と基礎材質を示す。基礎材質は各寸法の試験体で4体の値から求めている。また、曲げクリープ試験時における試験体の水分移動を梁せい方向のみに制限するため、梁の上下2面（柁目面）だけを残して、その他の4面はシリコンを塗りアルミ箔で被覆した。なお、各寸法の材で長さの短い含水率測定用の試験体も用意して、クリープ試験用の試験体と水分移動条件が等しくなるように同様の被覆処理を施した。

### 2.2 試験法

曲げクリープ試験は単純支持条件で行い、3等分点荷重方式の柁目面荷重とし、いずれの寸法の試験体も外縁の曲げ応力が6MPaとなるように載荷した。たわみは、電気式ダイヤルゲージ（1/100mm精度）を用いてスパン中央の試験体下面で測定した。

Table 1. Dimensions and basic properties of creep test specimens.

Specimen	Width×Height×Length (mm)	Span (mm)	N	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )			$E$ (GPa)		
				min	mean	max	min	mean	max
L	15×45×1050	900	4	0.47	0.49	0.50	13.2	13.3	13.5
M	10×30×750	600	4	0.45	0.48	0.51	12.3	13.1	13.9
S	5×15×450	300	4	0.45	0.47	0.49	12.1	12.9	13.5

Legend:  $\rho$ : density, N: number of specimens,  $E$ : modulus of elasticity in bending.

Note:  $\rho$  and  $E$  were measured at 20°C, R.H. 50%.

含水率測定用の試験体は、小荷重用ロードセル（定格容量：20～100 gf）で質量変化を測定した。たわみと質量はデータロガーで自動計測し、測定間隔は30分とした。

クリープ試験の温湿度条件については、温度を20°Cで一定に保ち、相対湿度は載荷後5日間を40～60%で一定とし、その後は吸湿（90%）と放湿（10%）を交互に繰り返し変化させた。湿度変動の周期は4条件とし、各条件につき1回のクリープ試験を行っている。湿度条件は、吸湿と放湿の1周期を1日、4日、あるいは8日とした3種類の一定周期条件、および周期が1日、4日、8日の吸放湿を順に組み合わせて1周期とした複合周期条件である。なお、吸湿と放湿の時間比は1：1である。そして、クリープ試験における吸放湿の繰り返し回数（サイクル回数）は5～8回であり、湿度変動に伴うクリープの進行が落ち着くまで行っている。ただし、湿度変動が一定周期で4日周期の場合は、クリープの進行が落ち着いた後も測定を行ったため、サイクル回数が15回となっている。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 水分非定常クリープの挙動

Fig. 1 に、各湿度条件で寸法の異なる試験体の相対たわみと含水率の経時変化を示す。なお、相対たわみは以下のように定義した。

$$\text{相対たわみ} = \frac{\text{全たわみ}}{\text{載荷30分後のたわみ}}$$

載荷30分後のたわみを相対たわみの基準としたのは、載荷直後の初期たわみは変化が急速で値が安定しないためである。いずれの湿度条件でも、寸法の小さい試験体ほど全クリープの進行及び湿度変化に伴うクリープの変動が大きい傾向を示す。これは、木材内部における含水率変化が関係しており、寸法の小さい試験体ほど相対的に材の内部まで水分拡散が速く進み、それがMSクリープに波及するためである。

さて、MSクリープの一般的な特徴として、吸湿過程から始まる周期的な湿度変動下のクリープは、最初の吸湿過程で進行し、その後は放湿過程で進行して吸湿過程で回復する挙動を示すことが知られている<sup>1,3,5)</sup>。そこで、Fig. 1の相対たわみの変化を見ると、最初の吸湿過程ではいずれの場合もクリープが進行している。しかし、その後は試験体の断面寸法や湿度変動の周期によってクリープ挙動が異なる。例えば、湿度変動が8日周期の場合、最も寸法の小さい試験体Sのクリープは典型的なMSクリープの挙

動を示すが、最も寸法の大きい試験体LのクリープはMSクリープと全く逆の挙動を示す。すなわち、クリープは放湿過程で回復して吸湿過程で進行する現象を示す。そこで、クリープ挙動に対する試験体の断面寸法と湿度変動の周期の影響を詳細に検討した。なお、湿度変動が4日周期の場合に関する含水率変化と湿度変動が8日周期の場合に関する試験体Mの相対たわみは、測定器の不具合が原因でデータが欠落している。

Fig. 2 に、湿度変動が一定周期の場合の放湿過程と吸湿過程における相対たわみ変化を試験体LとSについて示す。相対たわみ変化は放湿または吸湿開始からの相対たわみの変化量と定義し、図には湿度変動が3サイクル目以降の平均値を示した。最も寸法の大きい試験体Lの相対たわみ変化は、いずれの湿度条件でも典型的なMSクリープと逆の挙動を示す。一方、最も寸法の小さい試験体Sの相対たわみ変化は、湿度変動が1日周期のように短い場合はMSクリープと逆の挙動を示し、周期がやや長い4日周期の場合は初期の過程でMSクリープと逆の挙動を示すが途中から典型的なMSクリープの挙動に転じ、更に周期が長い8日周期の場合は典型的なMSクリープの挙動を示す。

Fig. 3 には、湿度変動が複合周期の場合の相対たわみ変化を、周期が1日、4日、8日の条件ごとに示す。なお、相対たわみ変化は試験体Mの結果であり、Fig. 2と同様に湿度変動が3サイクル目以降の平均値で示した。複合周期の場合の相対たわみ変化も、Fig. 2に示した試験体Sの結果と同様に、短い周期の湿度変動に対してはMSクリープと逆の挙動を示し、周期が長くなると典型的なMSクリープの挙動に転じることがわかる。

そして、水分非定常クリープの挙動に及ぼす湿度変動の周期と試験体の断面寸法の影響をTable 2にまとめた。吸湿および放湿の両過程におけるクリープが、共に典型的なMSクリープを示した場合は+、共にMSクリープと逆の挙動を示した場合は-、両者のクリープ挙動がほぼ等しく現れた場合は±と表記した。水分非定常クリープは、試験体の断面寸法が小さくて湿度変動の周期が長い条件ほど典型的なMSクリープの挙動を示すことがわかる。また、湿度変動が複合周期の場合は、一定周期の場合よりも典型的なMSクリープの挙動が現れやすい傾向を示す。

以上の結果から、湿度の繰り返し変動下におけるクリープは、試験体の表層付近のみで水分変化が起きる場合にMSクリープと逆の挙動を示し、ある程

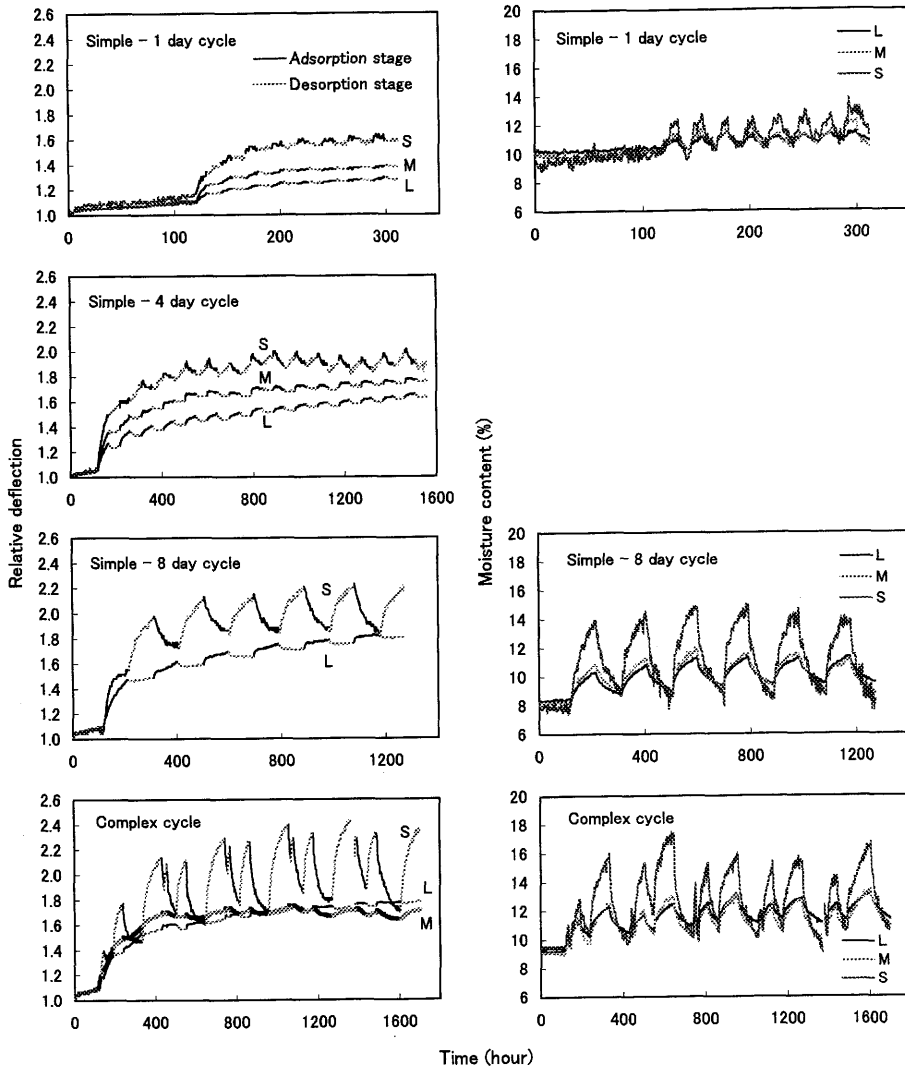


Fig. 1. Bending creep behavior and average moisture content for different conditions of specimen size and humidity cycling period.

Notes: cross sections of specimens are 15×45 mm, 10×30 mm and 5×15 mm, respectively, for specimens L, M and S. the humidity cycling periods are simple cycles of 1, 4 and 8 days each and a complex cycle of successive cycles of 1, 4, and 8 days. relative deflection is defined as total deflection divided by the deflection 30 minutes after loading.

度試験体の内部まで水分拡散が進行するようになると典型的なMSクリープの挙動を示すと考えられる。水分非常クリープが典型的なMSクリープと逆の挙動を示したとされる事例は、Eriksson<sup>13)</sup>や則元<sup>14)</sup>によって報告されている。Erikssonは湿度の繰り返し変動下で繊維方向の引張クリープ試験を行い、含水率変化量が小さい場合に典型的なMSクリ

ープの挙動を示さなかったと報告しているが、繊維方向の引張クリープの変動が非常に小さい上に、吸放湿による試験体の収縮・膨潤量を補正した結果について言及しているので、十分な精度の変化が得られていないことも考えられる。また、則元らは湿度の繰り返し変動下で曲げクリープ試験を行い、木材にアセチル化やホルマル化処理を施した場合お

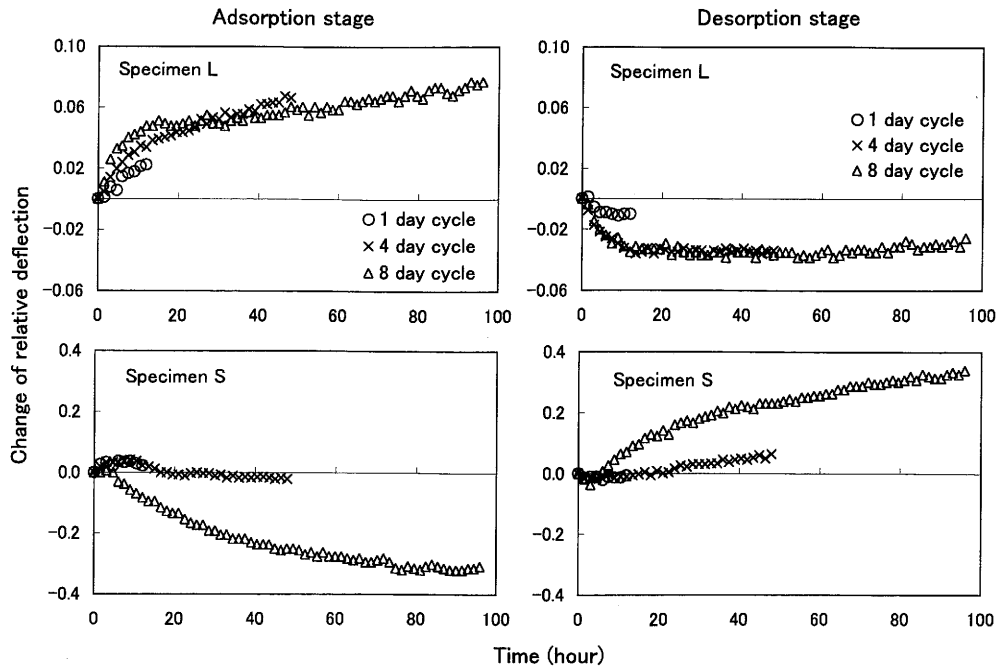


Fig. 2. Effects of the simple humidity cycling periods and specimen size on average creep behavior after the third humidity cycle during the adsorption and desorption stages.

Note: the data are for specimens L and S.

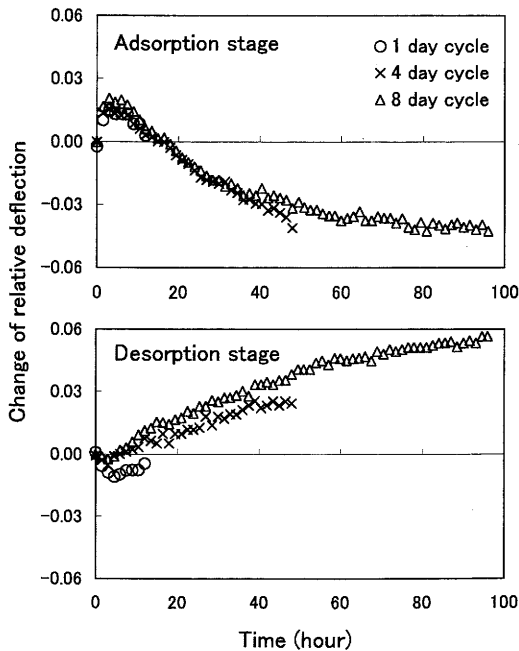


Table 2. Classification of moisture non-steady state creep types.

Humidity cycling Type	Period	Specimen		
		L	M	S
Simple	1 day	-	-	-
	4 days	-	-	±
	8 days	-	-	+
Complex	1 day	-	-	+
	4 days	-	+	+
	8 days	-	+	+

Notes: + : the specimen shows typical mechano-sorptive creep.

- : the specimen shows unusual mechano-sorptive creep.

± : the specimen shows both typical and unusual mechano-sorptive creep.

Fig. 3. Effect of the complex humidity cycling periods on average creep behavior after the third humidity cycle during the adsorption and desorption stages.

Note: the data are for specimen M.

び素材のクリープ試験で応力レベルが低い場合に典型的なMSクリープと逆の挙動を示したと報告している。しかし、測定されたたわみ量には試験体の収縮・膨潤による変形も含まれている。この収縮・膨潤に基づく変化は、たわみ量の変化にMSクリープとは逆の寄与をするので、収縮・膨潤の寄与を差し引いた純粋な水分非定常クリープの結果に基づいて議論する必要がある。その他にも、MSクリープに及ぼす負荷モード<sup>5)</sup>、応力<sup>15,16)</sup>、および樹種<sup>17)</sup>の影響などが報告されているが、水分非定常クリープが典型的なMSクリープと逆の挙動を示す場合があることは報告されていない。

今回の試験から、試験体の断面寸法と湿度変動の周期の組み合わせによって、従来から指摘されているMSクリープと逆のクリープ挙動が現れることが示されたが、この原因については試験体内部の含水率変動と関連づけて今後詳細に検討する必要がある。

### 3.2 水分非定常クリープに及ぼすMSクリープの履歴の影響

水分非定常クリープは、注目している以前のクリープ過程で発生したMSクリープの影響を受ける

ことが報告されている<sup>18)</sup>。そこで、各湿度条件における水分非定常クリープについてMSクリープの履歴の影響を検討した。

#### 3.2.1 湿度変動が一定周期の場合

Fig. 4に、湿度変動が4日周期の場合の各湿度サイクルにおける相対たわみ変化について、吸湿過程と放湿過程に分けてそれぞれ示す。図には試験体LとSの結果を示した。両試験体とも同様のクリープ挙動を示し、吸湿過程では1サイクル目とそれ以降のサイクルで大きく挙動が異なり、1サイクル目でクリープが大きく進行している。また、2サイクル目以降のクリープ挙動もサイクル数によって異なり、サイクル数の増加に従ってクリープ量が減少している。吸湿過程のクリープは、湿度変動のサイクル回数を受けていることがわかる。一方、放湿過程のクリープでは、吸湿過程で見られたような湿度変動の履歴の影響はほとんど現れていない。

そして、湿度変動のサイクル回数を十分に経験した後は、吸湿過程と放湿過程のクリープがほぼ可逆的に変動していることがわかる。これは、与えられた湿度条件における水分非定常クリープが、Huntの指摘するようなMSクリープのクリープリミッ

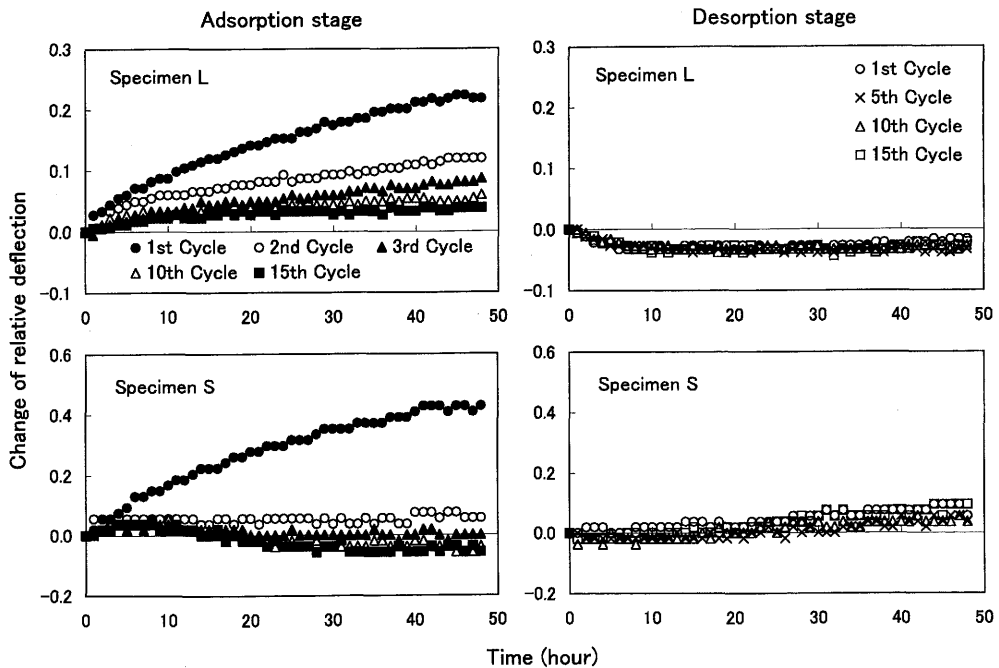


Fig. 4. Effect of the number of simple humidity cycles on the creep behavior during the adsorption and desorption stages.

Notes: the humidity cycling period is 4 days.  
the data are for specimens L and S.

ト<sup>19,20)</sup>に到達したためと考えられる。すなわち、水分非定常クリープは湿度変動を周期的に繰り返しても可逆的な変動を示すのみで、全クリープは一定値を推移する状態になる。

その他の一定周期の場合も同様のクリープ挙動が確認された。ただし、1日周期の場合は若干異なり、吸湿過程のクリープ挙動は2サイクル目以降でほとんど変化が見られなかった。これは、湿度変動の周期が短いために試験体内部への水分拡散が十分に起こらず、定量的比較に十分なクリープ変化を生じていなかったことが原因である。

### 3.2.2 湿度変動が複合周期の場合

Fig. 5に、湿度変動が複合周期の場合で4日周期と8日周期の湿度変動に対する相対たわみ変化を吸湿過程と放湿過程に分けて示す。図には試験体Lの結果を示した。吸湿過程のクリープは、一定周期の場合と同様に1サイクル目で最も大きく進行している。放湿過程のクリープも、2サイクル目以降と比較して1サイクル目で若干大きく進行している。しかし、放湿過程のクリープに対する湿度のサイクル回数の影響は、吸湿過程のそれに比較してかなり影響が小さい。

また、4日周期の吸湿過程におけるクリープは、

2サイクル目以降の挙動がほぼ等しい。図には示さないが、1日周期の吸湿過程でも同様のクリープ挙動が見られた。これは、複合周期で1日周期と4日周期の場合の2サイクル目以降におけるクリープは、既に1サイクル目で水分がより内部まで拡散する8日周期の湿度履歴を経験しているためと考えられる。さらに、2サイクル目以降のクリープは吸湿過程と放湿過程で可逆的な変動を示す傾向があることから、1日周期と4日周期のクリープは既に2サイクル目でMSクリープによるクリープリミットに到達していると考えられる。

一方、8日周期の吸湿過程におけるクリープは、2サイクル目以降もサイクル回数の増加とともにクリープ量が減少している。これは、Fig. 4に示した一定周期の場合の吸湿過程におけるクリープと同様の結果であり、複合周期の場合は8日周期が最も周期の長い湿度変動であるためと考えられる。

試験体MとSのクリープでも同様なクリープ挙動が観察された。ただし、試験体Sの1日周期に関するクリープは、2サイクル目以降の吸湿過程と放湿過程で可逆的に変動せず、吸湿過程のクリープ回復が放湿過程のクリープの進行より大きく現れた。2サイクル目以降における1日周期の吸湿過程は、直

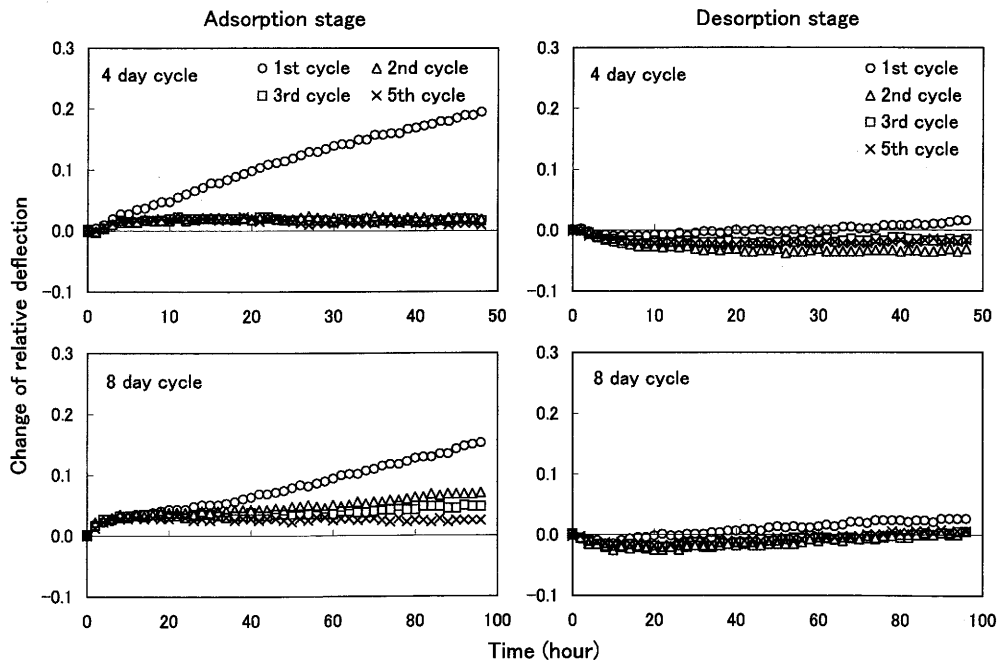


Fig. 5. Effect of the number of complex humidity cycles on the creep behavior during the adsorption and desorption stages.

Note: the data are for specimen L.

前に最も周期の長い8日周期の放湿過程があり、Fig. 1に示すように、その放湿過程におけるクリープの進行が非常に大きいことから、このMSクリープの履歴が1日周期の吸湿過程におけるクリープ回復に影響したためと考えられる。

### 3.2.3 湿度変動が一定周期と複合周期の湿度サイクル1回目におけるクリープ挙動の比較

湿度変動が1サイクル目の吸湿過程におけるクリープは特異的で、常にクリープが増加してクリープ量自体も大きいため、試験体の全クリープに及ぼす影響も大きい。また、吸湿過程のクリープは湿度履歴の影響を受け、一定周期と複合周期ではクリープ挙動の傾向に異なる点も確認された。そこで、1サイクル目の吸湿過程におけるクリープについて湿度変動が一定周期と複合周期の場合で比較した。Fig. 6に試験体Mの結果を示す。

Fig. 6(a)は湿度変動が4日周期までの相対たわみ変化の比較である。既に1日周期の湿度変動を経験した複合周期で4日周期のクリープは、吸湿履歴を受けている12時間までは1日周期(複合周期)のクリープと比較して増加が少ないが、12時間付近でクリープの傾斜が折線的に変化して大きくなり、その後は一定周期で4日周期のクリープの傾きと近い増

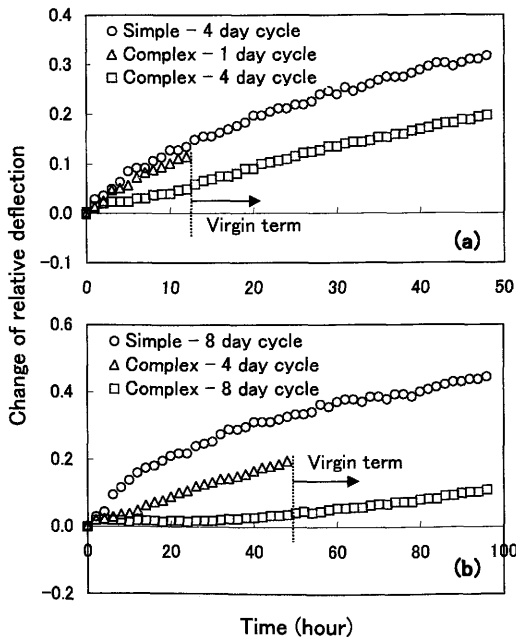


Fig. 6. Effect of moisture history on the subsequent creep during complex humidity cycling.

Note: the data are for specimen M.

加を示す。Fig. 6(b)は湿度変動が8日周期までの相対たわみ変化の比較である。上記の現象と同様に、既に4日周期の湿度変動を経験した複合周期で8日周期のクリープは、吸湿履歴を受けている48時間までは4日周期(複合周期)のクリープと比較して明らかに増加が少ないが、48時間以降は一定周期で8日周期のクリープにおける傾きと近い増加を示す。

以上の結果より、吸湿過程のクリープは、木材中のそれぞれの領域であたかも変形能力が割り当てられているかのように、新たな湿度履歴によって新たなクリープ変形が引き出されることがわかる。徳本らも同様の現象の存在を報告している<sup>16)</sup>。試験体Lの吸湿過程におけるクリープでも同様な湿度履歴の影響が確認されたが、試験体Sでは確認できなかった。Fig. 1から同一の湿度周期に対する試験体Sのクリープ変動を一定周期と複合周期で比較した場合、複合周期のクリープ変動が明らかに大きいため、複合周期のクリープ試験に用いた試験体の個体差がクリープ挙動に影響したと考えられる。

### 3.3 MSクリープによって生じるクリープ変形の蓄積

Fig. 1の結果および上記の検討から、MSクリープによって生じるクリープ変形は、周期的な湿度変動を繰り返すことで徐々に蓄積されていくことがわかる。そこで、そのクリープ変形の蓄積に及ぼす試験体の断面寸法と湿度変動の周期の影響を検討した。

まず、「MSクリープによって生じるクリープ変形の蓄積」を以下のように定義し、Fig. 7にその概略図を示す。図には湿度変動が一定周期の場合における模式的なクリープ挙動を用いた。1サイクル目の吸

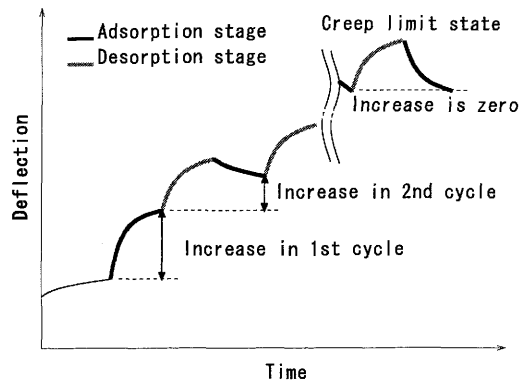


Fig. 7. Schematic graph showing accumulated deflections caused by mechano-sorptive creep in each cycle of simple humidity cycling.



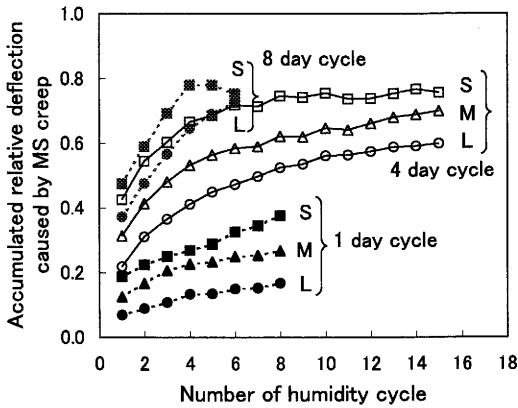


Fig. 8. Effect of specimen size and humidity condition on the accumulated deflection caused by the mechano-sorptive (MS) creep in each cycle of simple humidity cycling.

湿過程におけるクリープは特異的であり、そのクリープ変形はそのまま蓄積される変形であると仮定する。次の湿度変動過程からは、先行する放湿過程とそれに続く吸湿過程のクリープで生じたクリープ量の増加を新たなクリープ変形の蓄積と定義する。なお、湿度変動が複合周期の場合も、一定周期の場合と同様に湿度履歴を受けていない吸湿過程のクリープを分けて取り扱うことでMSクリープによるクリープ変形の蓄積を求めた。

Fig. 8に、湿度変動のサイクル回数とMSクリープによる相対たわみの蓄積の関係を、湿度変動が一定周期の場合について示す。これより、湿度変動の周期が同じ場合は寸法の小さい試験体ほどMSクリープによる相対たわみの蓄積は大きく、試験体の寸法が同じ場合は湿度変動の周期が長いほど相対たわみの蓄積は大きいことがわかる。このことは、木材中への水分拡散が相対的により内部に進行する条件ほどMSクリープによる相対たわみの蓄積も大きくなることを示す。

また、湿度変動が4日周期の場合においてより明確に現れているが、MSクリープによる相対たわみの蓄積は湿度変動のサイクル回数の増加につれてある限度に収束する傾向を示す。これは、Fig. 4とFig. 5で示したように、湿度変動のサイクル回数を十分に経験すると吸湿過程と放湿過程のクリープが可逆的に変動する傾向があることを反映した結果である。そこで、湿度の周期変動に対してクリープが可逆的な変動を示すまでのサイクル回数およびMSクリープによるクリープリミットを定量的に評価す

Table 3. Estimation of the number of humidity cycles to reach the mechano-sorptive creep limit in the cases of the simple humidity cycling.

Humidity cycle	Specimen	Parameter A	Parameter B	$N_{95\%}$
1 day	L	0.18	3.2	9.6
	M	0.27	2.2	6.6
	S	0.36	2.4	7.2
4 days	L	0.59	3.2	9.6
	M	0.66	2.3	6.9
	S	0.75	1.7	5.1
8 days	L	0.82	2.5	7.5
	S	0.82	1.6	4.8

Notes: the regression line used is  $y=A(1-\exp(-N/B))$ .

$y$ : accumulated relative deflection caused by mechano-sorptive creep.

$A$ : limit of accumulated relative deflection caused by mechano-sorptive creep.

$N$ : number of humidity cycles.

$B$ : a time constant representing rate of saturation.

$N_{95\%}$ : number of humidity cycles which give 95% of the amount of the value  $A$ .

るため、(1)式を Fig. 8の結果に適用し、最小二乗法によって定数  $A$  と  $B$  を求めた。

$$y=A\left(1-\exp\left(-\frac{N}{B}\right)\right) \quad \dots(1)$$

ここで、 $y$ はMSクリープによる相対たわみの蓄積、 $A$ はMSクリープによる相対たわみの蓄積の限度、 $N$ は湿度変動のサイクル回数、 $B$ は試験体の断面寸法および湿度変動の周期によって決まる定数で、時定数に相当する物理量である。

Table 3に定数  $A$  と  $B$  を示す。MSクリープによる相対たわみの蓄積の限度を示す定数  $A$  は Fig. 8の結果を定量的によく表しており、湿度変動の周期が長いほど、また試験体の断面寸法が小さいほど大きな値を示す。また、湿度変動の周期が短い場合は定数  $A$  に及ぼす試験体の寸法効果が大きく、周期が長くなると寸法効果が小さくなることもわかる。定数  $B$  については断面寸法の大きい試験体ほど大きな値を示し、これはクリープリミットに到達するまでの湿度変動のサイクル回数の増加を意味する。得られた帰式から、MSクリープによるクリープリミットに到達するまでの湿度変動のサイクル回数を、リミットの95%に到達するまでのサイクル回数で評価すると、5~10回程度でほぼリミット状態に入ることがわかる。

Fig. 9には、MSクリープによる相対たわみの蓄

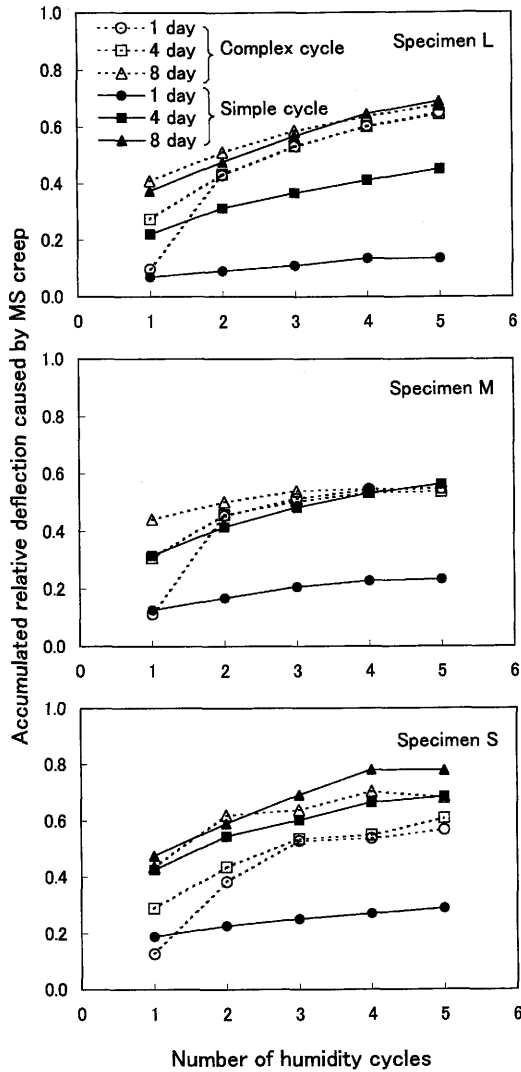


Fig. 9. Comparison of the accumulated deflection caused by the mechano-sorptive (MS) creep in the simple and the complex humidity cycling of each specimen.

積の過程を湿度変動が一定周期と複合周期の場合で比較した結果について各寸法の試験体ごとに示す。なお、複合周期における相対たわみの蓄積は、周期が1日、4日、8日の湿度変動後の蓄積量を各湿度サイクルで示した。1サイクル目では、いずれの試験体でも相対たわみの蓄積が一定周期と複合周期でほぼ等しい値を示す傾向が見られる。2サイクル目以降は、複合周期における相対たわみの蓄積が一定周期で8日周期の相対たわみの蓄積量に近づく傾向が見られる。これらの結果は、MSクリープによるク

リープ変形が、過去に受けた最長周期の湿度履歴に対する蓄積量に近づき、その後の湿度変動の周期に影響されないことを示す。このことを自然環境下のような湿度が不規則に変動する環境におけるクリープに置き換えて考えると、突発的に生じる比較的周期の長い湿度変動や湿度の季節変動がクリープの進行に重要な意味を持つことを予見させる。

#### 4. 結 論

周期の異なる繰り返し湿度変動下で寸法の異なる木材の曲げクリープ試験を行い、水分非定常クリープに及ぼす湿度変動の周期、試験体の断面寸法、およびMSクリープの履歴の影響を検討し、以下の結論を得た。

- 1) 水分非定常クリープの挙動は、湿度変動の周期と試験体の断面寸法の組み合わせによって従来から知られている典型的なMSクリープとは逆の挙動を示す場合があることが実験的に明らかとなった。そして、水分の拡散が木材のある程度内部まで進行する条件になると典型的なMSクリープの挙動に転じることがわかった。
- 2) 水分非定常クリープの挙動に及ぼすMSクリープの履歴の影響は吸湿過程で明確に現れ、吸湿過程のクリープは湿度変動のサイクル回数の増加とともに減少した。また、湿度変動のサイクル回数を十分に経験した後は、吸湿過程と放湿過程のクリープが可逆的に変動し、MSクリープによるクリープリミットに到達した。
- 3) 先行する湿度変動の周期より長い周期の吸湿過程では記憶効果が認められ、経験した湿度変動の範囲まではクリープの進行がほとんどない。また、既に当該の湿度変動の周期よりも長い周期の湿度変動を経験している場合は、吸湿過程と放湿過程のクリープが可逆的に変動する傾向が強まった。
- 4) 周期的な湿度変動下でMSクリープによって生じるクリープ変形の蓄積は、木材中への水分拡散が相対的により内部に進行しやすい条件で大きくなる。そのクリープ変形の蓄積の限度は、湿度変動の周期が短い場合に試験体の寸法効果が明確に現れ、周期が長くなると寸法効果は小さくなった。
- 5) 周期的な湿度変動下でMSクリープによって生じるクリープ変形の蓄積は、過去に受けた最長周期の湿度履歴に対するクリープ変形の蓄積量に近づき、その後の湿度変動の周期に影響されない。

## 文 献

- 1) Grossman, P. U. A.: *Wood Sci. Technol.* **10**, 163-168 (1976).
- 2) Armstrong, L. D., Kingston, R. S. T.: *Nature* **185**, 862-863 (1960).
- 3) Armstrong, L. D., Christensen, G. N.: *Nature* **191**, 869-870 (1961).
- 4) 藤田晋輔, 中戸莞二: 木材学会誌 **11**(2), 36-40 (1965).
- 5) Armstrong, L. D., Kingston, R. S. T.: *Aust. J. Appl. Sci.* **15**, 257-276 (1962).
- 6) Christensen, G. N.: *Aust. J. Appl. Sci.* **13**, 242-256 (1962).
- 7) Ranta-Maunus, A.: *Wood Sci. Technol.* **9**, 189-205 (1975).
- 8) 荒武志朗, 有馬孝禮: 木材学会誌 **41**, 359-366 (1995).
- 9) 荒武志朗, 有馬孝禮: 木材学会誌 **42**, 755-761 (1996).
- 10) 武田孝志: 木材工業 **51**, 511-513 (1996).
- 11) Koponen, S., Absetz, I., Toratti, T.: Proc. International Wood Engineering Conference, New Orleans, LA, 1996, pp. 420-428.
- 12) Lu, J. P., Leicester, R. H.: *Wood Sci. Technol.* **31**, 331-337 (1997).
- 13) Eriksson, L., Norén, B.: *Holz Roh. Werkst.* **23**, 201-209 (1965).
- 14) 則元 京, ジョセフ・グリル, 湊 和也, 岡村圭三, 棕代純輔, ロジャー・ロウエル: 木材工業 **42**, 504-508 (1987).
- 15) Hearmon, R. F. S., Paton, J. M.: *Forest Prod. J.* **14**, 357-359 (1964).
- 16) Zhou, Y., Fushitani, M., Kubo, T.: *Wood Fiber Sci.* **32**, 20-28 (2000).
- 17) Zhou, Y., Fushitani, M., Kubo, T., Ozawa, M.: *J. Wood Sci.* **45**, 113-119 (1999).
- 18) 徳本守彦, 長江英樹, 武田孝志, 中野達夫: 材料 **47**, 374-379 (1998).
- 19) Hunt, D. G., Shelton, C. F.: *Wood Sci. Technol.* **22**, 199-210 (1988).
- 20) Hunt, D. G.: *Wood Sci. Technol.* **23**, 323-333 (1989).