

マイクロ波照射過程における木材繊維直角方向の 曲げクリープ特性

飯田 生穂*¹

IKUHO IIDA*¹

Bending creep in the direction perpendicular to grain
during microwave irradiation

要旨: マイクロ波照射過程における木材繊維に直角方向（半径方向）の曲げクリープ、含水率の経過を針・広葉樹 13 樹種について測定し、照射過程中の乾燥速度と含水率、クリープたわみと含水率の関係を調べた。また、これらの結果を熱気乾燥による結果と比較検討し、マイクロ波照射過程のクリープ特性を考察した。得られた結果は、以下のとおりである。

1) マイクロ波照射過程における乾燥速度係数は、樹種によって 3.40 hr^{-1} から 5.65 hr^{-1} の範囲の値で、全樹種の平均で 4.73 hr^{-1} であった。この値は熱気乾燥の場合の平均 5.3 倍であり、乾燥速度が著しく大きい。

2) 飽水状態で負荷を与え、マイクロ波を照射すると照射初期からクリープたわみが著しく増大する。

3) 飽水状態からほぼ全乾燥状態まで乾燥したときの最大クリープたわみ y_m と飽水状態から平均含水率 30% までに生じたクリープたわみ y_{30} の比 (y_{30}/y_m) は、各樹種で負荷した応力の程度によらない一定の値で、イチョウ材の場合、約 0.73、ブナ材の場合、約 0.44 を示し、樹種によって異なるが、比重や樹種グループによる相違はみられなかった。この値は全樹種の平均で 0.60 であった。

以上の結果より、マイクロ波照射による材の乾燥速度は著しく大きく、クリープたわみは平均含水率 30% 以上で全クリープたわみの $\frac{1}{2}$ 以上を生じていることがわかった。従って、この高含水率領域のクリープ挙動が、マイクロ波による場合の木材変形の大きな特徴である。

緒 言

飽水材にマイクロ波（周波数：2450MHz）を 1.5 ～ 2 分間照射した後、帯鉄を用いて曲げ木加工を行うと繊維方向同様に^{1) 2)}、繊維に直角方向においても極めて小さい曲率半径まで木材を曲げることができる^{3) 4)}。曲げることのできる最小曲率半径 R と板厚さ t の比 (R/t) によって曲げ性能をあらわすとき、その値は 2.3 ～ 1.5、それ以下にもなり、木材変形の程度は極めて大きいものである。従って、

この変形挙動をさらに試片含水率や材の温度上昇などとの関連で詳しく検討してみることは、木材の基本物性を知る上からも意義深いことと考えられる。材の温度上昇経過や最大の温度などについては、すでに森ら^{5) 6)} によって明らかにされており、また、前報⁷⁾ では曲げ木の加工条件などに関連して曲げクリープ測定を試み、曲げの最大クリープたわみ量、クリープたわみの樹種特性を示した。そこで、本報告は、マイクロ波照射過程中の乾燥速度、ならびにクリープ変形と含水率の関係を調べ、熱気乾燥のそ

* 1 京都府立大学農学部木材工学研究室

Laboratory of Wood Technology, Faculty of Agriculture, Kyoto Prefectural University, Kyoto, 〒606, Japan.

れらと比較検討することにより、マイクロ波照射による木材変形の特異性をさらに明確にすることを試みたものである。

実験方法

1. 供試材料及び試験片

供試樹種は、スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don), ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.), シトカスプルス (*Picea sitchensis* Carr.), イチョウ (*Pinus thunbergii* Parl.), クロマツ (*Ginkgo biloba* L.) の針葉樹 5 樹種, ホオノキ (*Magnolia obovata* Thunb.), クスノキ (*Cinnamomum camphora* Sieb.), ブナ (*Fagus crenata* Blume), カバ (*Betula* sp.) の広葉樹散孔材 4 樹種ならびにヤチダモ (*Fraxinus mandshurica* Rupr.), シオジ (*Fraxinus spaethiana* Lingelsh), ケヤキ (*Zelkova serrata* Makino.), ミズナラ (*Quercus crispula* Blume) の広葉樹環孔材 4 樹種の計 13 樹種であった。試片寸法は、長さ 15 cm (半径方向 R), 幅 1 cm (繊維方向 L), 厚さ 0.5 cm (接線方向 T) であり、これらの試片はいずれもあらかじめ減圧吸引して十分飽水状態にもたらし、以下の測定に供した。

2. 曲げクリープ, 含水率の測定

マイクロ波照射装置として、家庭用電子レンジ (出力 100 V, 600 W) を用いた。装置内で飽水試料を 2 点で支持し (スパン 10 cm), 中央に負荷を与え、マイクロ波照射過程における中央のたわみ y_c をマジックスクリーンをとおし、外部より読取顕微鏡を用いて、30 秒間隔で 40 分間測定した。与えた応力は樹種によって異なるが、2.4 ~ 31.6 kg/cm² の範囲であり、一樹種につき 4 ~ 8 段階に変化させた。また、含水率の経時変化は、別に用意した試料を用い、それをマイクロ波照射の過程において適当な間隔で装置から取り出し、質量を測定して求めた。

一方比較のために熱気乾燥過程のクリープについても同様の実験を行った。熱気乾燥過程のクリープは 50 °C, 約 9 % R・H であり、与えた応力は 1.2 ~ 54.2 kg/cm² の範囲であった。なお、熱気乾燥の場合乾燥速度が著しく小さく、たわみの測定は 5 ~ 6 時間にわたって行った。また含水率測定は、熱気乾燥の場合には、クリープ測定と並行して非接着型荷重計 (u ゲージ) を用い、重量の変化を自記記録して求めた。得られた結果より乾燥速度やクリープたわみと含水率の関係を検討した。

結果と考察

1. マイクロ波照射過程中の木材の乾燥速度

飽水材に 600 W のマイクロ波 (周波数 2450 MHz) を照射し乾燥したときのヒノキ材, クスノキ材, ミズナラ材の試片含水率の減少経過を Fig. 1 に示す。

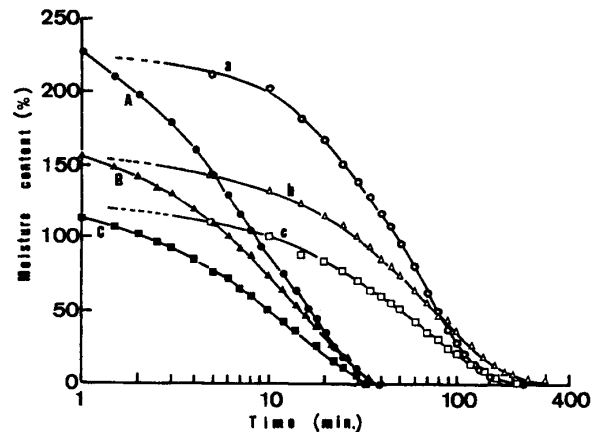


Fig. 1. Drying curves dried from green condition by the microwave irradiation and by the hot-air drying.

Legends; A, B, C = Microwave heating, a, b, c = Hot-air drying, A, a = Hinoki woods, B, b = Kusunoki woods, C, c = Mizunara woods.

図には比較のため熱気乾燥 (温度 50 °C, 9 % R・H の一定乾燥条件) の場合の含水率経過についても示してある。3 樹種の初期含水率はヒノキ材で約 240 %, クスノキ材で約 170 %, ミズナラ材で約 125 % であった。図よりマイクロ波を照射して加熱すると、開始 17 ~ 23 分後に試片含水率が 30 % 以下になり、40 分後にはほぼ全乾燥状態に達する。これに比し熱気乾燥の場合には含水率 30 % に減少するのに約 80 ~ 110 分、全乾付近の含水率 2 ~ 3 % になるのに 240 ~ 300 分を要する。従って、両者の間には乾燥速度に大きな相違のあることがわかる。Fig. 2 は、1 例としてシトカスプルスとクスノキ材の乾燥速度と含水率の関係を示している。図よりマイクロ波を照射した場合の乾燥速度には顕著な最大値を示す挙動が含水率の高い段階で認められ、最大値を示した時点より低い含水率では含水率減少とともに乾燥速度が急激に小さくなり、含水率約 100 % 以下では両者の関係はほぼ直線的な関係を示している。両樹種の最大乾燥速度は、シトカスプルスの場合、含水率約 180 % 付近で生じており、1320 ~ 1326 %/hr. で、クスノキの場合、含水率約 145 % で生じ、846 ~ 876 %/hr. であり、マイクロ波を照射開始後いずれも 1.5 ~ 2.5 分であらわれてい

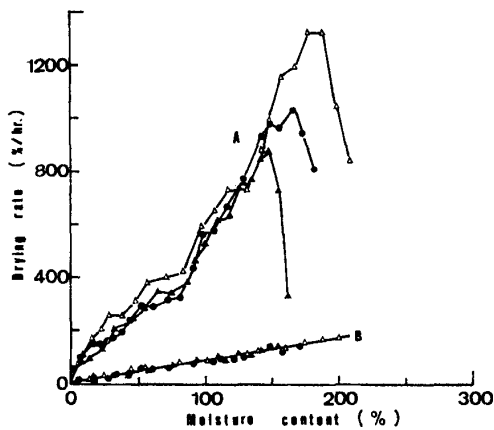


Fig. 2. Relationship between drying rate and moisture content.

A = Microwave irradiation process, B = Hot-air drying process, Δ = Sitka spruce wood, \bullet = Icho wood, \blacktriangle = Kusunoki wood.

に乾燥速度が小さくなる。従って、乾燥速度の最大の値はもっとも含水率の高い段階で、その値はシトカスプルースで約 170 %/hr, クスノキで約 143 %/hr.であった。一般に比較的薄い板を緩慢な乾燥条件で乾燥するときには、加熱乾燥期間, 恒率乾燥期間, 減率乾燥期間の代表的な 3 期間があらわれるが、本乾燥条件の場合にはこれらの乾燥期間が明確でなく、熱気乾燥の場合であっても乾燥開始と同時に減率乾燥に推移する挙動を示している。これは本熱気乾燥の条件が、実際に供されている人工乾燥スケジュール⁸⁾と比べるとかなり厳しい乾燥条件であることによる。この熱気乾燥の乾燥速度と比較してもマイクロ波照射による場合の乾燥速度はさらにかなり大きいことがわかる。Table 1 は、乾燥速度-含水率曲線 (Fig. 2 参照) の直線部分よりその傾きとして求めた乾燥速度係数を各樹種について総括して示している。表中の K_1 は、マイクロ波照

る。一方、熱気乾燥の場合には含水率の低下とも

Table. 1 The coefficients of drying rate dried by the mirowave heating and the hot-air drying for thirteen different wood species.

wood species		$K_1(\text{hr}^{-1})$	$K_2(\text{hr}^{-1})$	Ratio(K_1/K_2)	
Softwoods	Sugi	4.29	1.01	4.2	
	Hinoki	5.31	1.17	4.5	
	Sitka spruce	4.96	0.75	6.6	
	Icho	4.10	0.80	5.1	
	Kuromatu	5.45	0.88	6.2	
Hardwoods	Diffuse-porous woods	Hoonoki	3.40	0.81	4.2
		Kusunoki	4.32	0.85	5.1
		Buna	5.65	1.07	5.3
		Kaba	3.61	0.91	4.0
	Ring-porous woods	Yachidamo	5.05	0.89	5.7
		Sioji	4.93	0.96	5.1
		Keyaki	5.07	1.03	4.9
		Mizunara	5.39	0.67	8.0

K_1 : Coefficient of drying rate by the microwave heating.

K_2 : Coefficient of drying rate by the hot-air drying.

射の場合の、また K_2 は熱気乾燥の場合のそれぞれ乾燥速度係数である。表より樹種によって K_1 は約 3.4 ~ 5.7 hr^{-1} , K_2 は約 0.7 ~ 1.2 hr^{-1} の値をとり、結果としてマイクロ波照射による乾燥速度係数は、熱気乾燥のその 4.0 から 8.0 倍で、全樹種の平均として約 5.3 倍の値になる。この結果は、マイクロ波加熱による乾燥速度が極めて大きいことを示

している。

2. クリープ変形と含水率の関係

Fig. 3 および 4 は、マイクロ波照射過程の曲げクリープ経過を負荷応力をパラメータとしてイチョウ材とミズナラ材について示す。図には含水率経過についても示してある。まずイチョウの場合のクリープ経過についてみると、負荷応力の程度によりわず

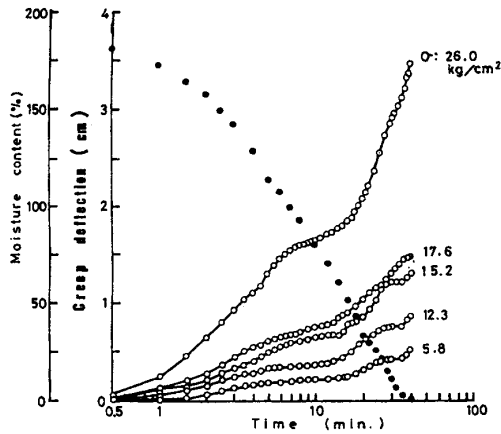


Fig. 3 Creep deflection curves during microwave irradiation process for icho wood.

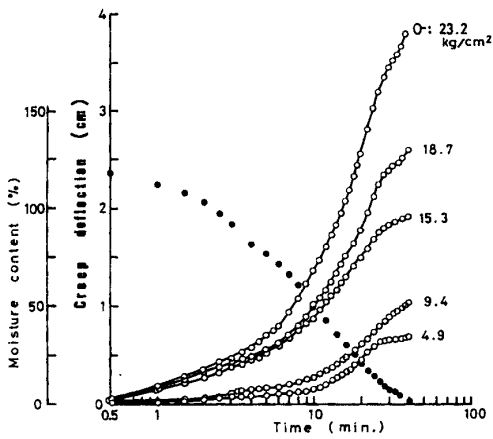


Fig 4 Creep deflection curves during microwave irradiation process for mizunara wood.

かに異なるが照射開始1~7分の間にも急激なたわみの増大がみられ、その後緩慢なたわみの増大する経過が続き、ある時間経た後再び急激なたわみ増加を生じる。このような挙動は、負荷応力 26.0 kg/cm^2 のとき、とくに顕著にみられる。初期の急激なたわみ増加の領域はあきらかに含水率 30%以上の段階で生じている。ミズナラ材の場合にはイチョウの場合と幾分挙動が異なり、時間とともにたわみが漸増している。しかし両樹種とも最大の負荷応力条件の場合にクリープたわみが約 4 cm にもなっている。また、平均含水率 30%以上でかなりの量のクリープたわみを生じている。温度一定の熱気乾燥における著しいクリープ変形の増加は、吸湿あるいは放湿含水率の範囲、すなわち結合水の吸・脱着の過程で生じる^{9) 10) 11)}。従って、熱気乾燥過程のクリープ変形とマイクロ波照射過程のクリープ変形の挙動はあきらかに異なることがわかる。そこで、まず、各樹種について、マイクロ波照射過程中のクリープたわみと含水率の関係がどのような関係として示さ

れるかについて調べた。Fig. 5 は、乾燥終了時点の最大クリープたわみが 3.0 ~ 3.5 cm を示した負荷

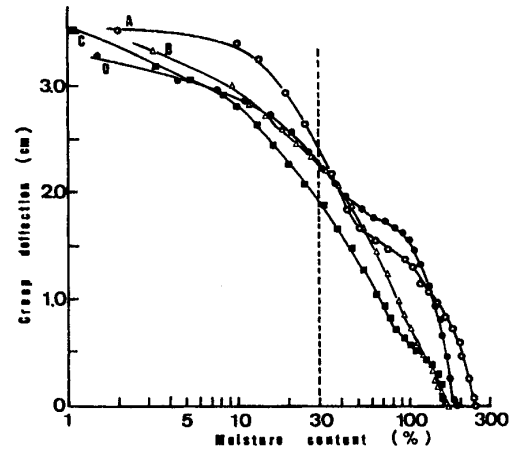


Fig. 5 Relationship between creep deflection and moisture content during the microwave irradiation process.

Legends: A=Hinoki wood (Applied stress = 9.8 kg/cm^2), B=Kusunoki wood (21.4 kg/cm^2), C=Yachidamo wood (13.6 kg/cm^2), D=Icho wood (26.0 kg/cm^2).

A dotted line show the position of 30% moisture content in relation to the magnitude of creep deflection.

応力条件のものを各樹種より選び出し、一例として 2, 3 の樹種についてクリープたわみと含水率の関係をプロットしたものである。また、Fig. 6 は、ほぼ等しい負荷応力条件のものを選び出し、Fig. 5 同様にクリープたわみと含水率の関係を示したもの

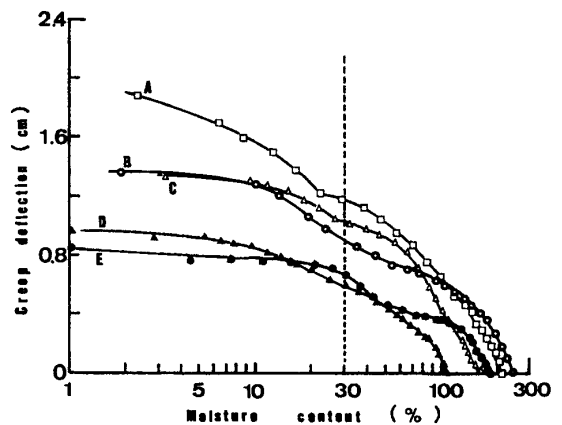


Fig. 6 Relationship between creep deflection and moisture content during the microwave irradiation process.

Legends: A=Sitka spruce (Applied stress = 11.6 kg/cm^2), B=Hinoki (11.2 kg/cm^2), C=Kusunoki (10.8 kg/cm^2), D=Keyaki (11.5 kg/cm^2), E=Icho (12.8 kg/cm^2).

A dotted line show the position of 30% moisture content in relation to the magnitude of creep deflection.

である。両図には平均含水率 30 % 以上で生じたクリープたわみ量を明確にする意味から、平均含水率 30 % 時点を超えて破線で示している。Fig. 5 によるとヤチダモ、イチョウ、クスノキ、ヒノキ材のいずれも高い含水率から著しいクリープたわみを生じており、平均含水率 30 % において約 1.9 ~ 2.3 % に及ぶたわみが生じている。乾燥終了時点のクリープたわみが 3.3 ~ 3.5 % 程度であるので最大クリープたわみに占める平均含水率 30 % までに生じたたわみの割合は、0.5 ~ 0.7 にも達している。また、Fig. 6 についてもほぼ同様の傾向がみられる。前述したように熱気乾燥過程に生じる異常に大きなクリープたわみの増大が、結合水分量の増減に大きく依存して示されると対比して考えると、平均含水率 30 % 以上で著しいクリープたわみの増大がみられるマイクロ波照射過程のクリープ挙動は、熱気乾燥の場合にはみられないマイクロ波照射過程の場合の大きな特徴の一つにあげることができる。しかも、この量がかなり大きいといえる。この原因は、すでに則元¹⁾森⁶⁾らによって明らかにされているように温度の急激な上昇による材の軟化と、主に温度非平衡下の可塑性の増大がクリープたわみの増大をもたらしたと考えられる。そこで、さらにこの特徴を具体的に明確にするため、乾燥終了時までに生じた最大クリープたわみ y_m に占める平均含水率 30 % までに生じたクリープたわみ y_{30} の割合 (y_{30}/y_m) の応力依存性、ならびに樹種特性を調べた。一例として、 y_{30}/y_m の負荷応力による変化を、ブナ材について Fig. 7、イチョウ材について Fig. 8 に示す。両樹種とも負

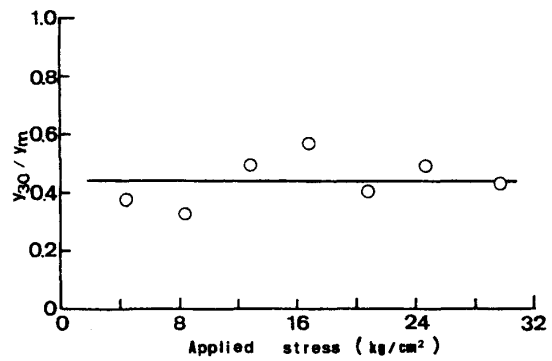


Fig. 7. Relationship between (y_{30}/y_m) and applied stress for buna wood.

Legends: y_{30} = Creep deflection from green state till 30 % moisture content, y_m = Maximum creep deflection from green state till oven-dry state.

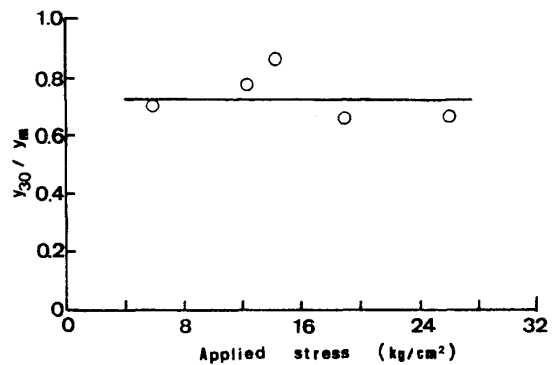


Fig. 8. Relationship between (y_{30}/y_m) and applied stress for icho wood.

Legends: y_{30} = Creep deflection from green state till 30 % moisture content, y_m = Maximum creep deflection from green state till oven-dry state.

Table. 2 The values of specific gravity and (y_{30}/y_m) for the thirteen different wood species.

wood species		S.G.	y_{30}/y_m^*	
Softwoods	Sugi	0.38	0.68 ± 0.05	
	Hinoki	0.40	0.57 ± 0.06	
	Sitka spruce	0.45	0.50 ± 0.06	
	Icho	0.45	0.73 ± 0.08	
	Kuromatu	0.53	0.70 ± 0.03	
Hardwoods	Diffuse-porous woods	Hoonoki	0.47	0.62 ± 0.06
		Kusunoki	0.55	0.74 ± 0.06
		Buna	0.70	0.44 ± 0.08
		Kaba	0.75	0.55 ± 0.09
	Ring-porous woods	Yachidamo	0.49	0.67 ± 0.13
		Sioji	0.57	0.52 ± 0.11
		Keyaki	0.73	0.59 ± 0.05
		Mizunara	0.69	0.54 ± 0.09

S.G. = Specific gravity in air-dry condition, y_{30} = Creep deflection from green till 30 % moisture content, y_m = Maximum creep deflection from green till oven-dry state.

荷応力によって変化しない一定値で、その値はブナの場合、 0.44 ± 0.08 、イチヨウの場合、 0.73 ± 0.08 であった。従って、 Y_{30}/y_m は、イチヨウの方がブナよりも1.65倍の値を示し、両樹種でその挙動が明らかに異なる。供試13樹種の Y_{30}/y_m を総括してTable. 2に示す。表には樹種の比重についても示している。表より Y_{30}/y_m は樹種によってかなり値が異なり、イチヨウやクスノキは大きく約0.73で、ブナやシトカスプルスは小さく約0.44~0.50である。この値は個々の樹種特有の値で、比重や、針葉樹材グループ、広葉樹散孔材グループ広葉樹環孔材グループなどの樹種グループによる一定の傾向は認められない。そこで、全樹種の平均値を求めるとその値は、 0.60 ± 0.09 となる。この結果は最大クリープたわみの $\frac{1}{2}$ 以上が、飽水状態から平均含水率30%に乾燥する過程で生じたことを示している。

以上の結果をまとめると、マイクロ波加熱による材の乾燥速度は、熱気乾燥の場合の約5.3倍大きく、また飽水状態から平均含水率30%に乾燥する過程で著しく大きなクリープたわみを生じていることが明確になった。

謝 辞

本研究は、「マイクロ波加熱を用いた木材の曲げ加工」(農林水産業特別試験研究 代表者: 則元京, 昭和57-59年度)の補助を受けて行ったものである。研究の遂行にあたりご指導と数々の有益なご助言をいただいた京都大学木材研究所則元京助教授に、またプロジェクトのメンバーの方々に心から感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 則元京: 木材研究・資料, No.14, 13-26 (1979)
- 2) 則元京, 和田博, 長谷川賢司, 飯田生穂: 日本レオロジー学会誌, 8, 166-171 (1980)
- 3) 飯田生穂, 則元京: 日本レオロジー学会誌, 9, 162-168 (1981)
- 4) 則元京ほか9名: 「マイクロ波加熱を用いた木材の曲げ加工に関する研究」農水省特別試験研究成果報告書, 17-25 (1984)
- 5) 森光正, 則元京, 脇谷慶之: 木材工業, 38, 29-234 (1983)
- 6) 森光正, 安田博彦: 木材学会誌, 32, 777-781 (1986)
- 7) 寺沢真, 筒本卓造: 木材の人工乾燥, 社団法人日本木材加工技術協会, 90-115 (1987)
- 9) 飯田生穂: 京府大学報・農, 39, 62-81 (1987)
- 10) Schniewind, A.P: Holz als Roh- und Werkstoff, 24, 87-95 (1966)
- 11) 久田卓興: 木材学会誌, 25, 688-696 (1979)

Summary

Bending creep tests in the radial direction perpendicular to the grain were carried out on the thirteen different wood species during the microwave irradiation and during the hot-air drying. The course of moisture content of specimen during creep tests were measured at the same time. And then, relationships between the drying rate and the moisture content, or the creep deflection and the moisture content were investigated and discussed. Results obtained are as follows:

- 1) The coefficients of drying rate (K_d) during microwave irradiation process were from values of 3.40 hr^{-1} to 5.65 hr^{-1} for different species. With average value of all woods, there were of 4.73 hr^{-1} . Therefore, this value show a value of 5.3 times as much as these of hot-air drying.
 - 2) Creep deflection of woods dried by the microwave heating increase remarkably from the start of the microwave irradiation.
 - 3) Ratio (Y_{30}/y_m) of creep deflection y_m , in region of green~30% moisture content, to the maximum creep deflection y_m were thought the values differ from each wood species, in no relation with the applied stresses and these values have the constant in a wood. Those were estimated about 0.73 for Icho wood and about 0.44 for Buna wood, and moreover it was about 0.6 with average value for all wood species. Consequently, it was recognized that drying rate became remarkably magnitude value during microwave heating.
- Creep deflection on the 30% moisture content take beyond about half of the total creep deflection. Consequently, the large creep deformation developed during the high moisture content process, and it constitute a characteristic fracture of microwave heating.