

## 含水率分布によるドラインゲットの推定

松清, 幸司

九州大学大学院生物資源環境科学府森林資源科学専攻生物材料機能学講座木質資源工学研究室

藤本, 登留

九州大学大学院農学研究院森林資源科学部門生物材料機能学講座木質資源工学研究室

小田, 久人

宮崎県木材利用技術センター

<https://doi.org/10.15017/15529>

---

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 87, pp.37-47, 2006-03-27. 九州大学農学部附属演習林  
バージョン：  
権利関係：

## 論文

## 含水率分布によるドライイングセットの推定\*

松清 幸司\*\*・藤本 登留\*\*\*・小田 久人\*\*\*\*

## 抄 録

スギ等の心持ち柱材の横断面内収縮異方性に伴う表面割れを防止する方法として、高温低湿処理が普及してきている。本処理は、表層にドライイングセット（以下セットとする）を形成させ、表層部の接線方向収縮を抑えることにより、割れを防止するものである。その際、高温処理時間を決定するために、セットの状態を処理段階で把握することが重要となる。本研究では、含水率分布よりセットを推定することを目的に検討を行った。

乾球温度120℃湿球温度90℃で乾燥を行い、乾燥開始から3時間後(乾燥初期)、10時間後(乾燥中期)、17時間後(乾燥後期)のセットの推定値と実測値を比較した。その結果、セットの推定値、実測値についても以下のような傾向が見られ、値もほぼ同じになった。すなわち、表層1層目は乾燥初期に強い引張セットが形成され、その後乾燥中期、後期と乾燥が進むにつれて引張セットが減少するとともに、表層2層目、3層目については乾燥初期から乾燥中期において引張セットが増加した後、乾燥後期にかけて減少する傾向を示した。

以上、高温低湿処理において、含水率分布測定によるセット推定の可能性が示唆された。

キーワード：スギ、心持ち柱材、高温低湿処理、ドライイングセット、含水率分布

---

\*MATSUKIYO, K., FUJIMOTO, N. and ODA, H.: Estimation of the drying sets by distribution of moisture content

\*\*九州大学大学院生物資源環境科学府森林資源科学専攻生物材料機能学講座木質資源工学研究室

Department of Forest and Forest Products Sciences, Graduate School of Bioresource and Environmental Sciences, Kyushu University

\*\*\*九州大学大学院農学研究院森林資源科学部門生物材料機能学講座木質資源工学研究室

Division of Forest and Forest Products Sciences, Faculty of Agriculture, Kyushu University

\*\*\*\*宮崎県木材利用技術センター

Miyazaki Prefectural Wood Utilization Research Center

## 1. はじめに

近年、建築基準法の改正や品確法の施行に伴い、木材乾燥に対する需要が高まっている。しかし、心持ち柱材は横断面内の収縮異方性や、大断面材であることなどから割れを発生させずに乾燥することは難しい。そこで、割れの防止法として高温低湿乾燥法(高温セット法)(吉田ら,2000)が開発され、心持ち柱材の割れ抑制法として広く普及している。これは、蒸煮後に、乾燥のはじめから100℃以上の高温で平衡含水率を3~4%程度にすることで、表層に大きな引張セットを形成させ、心持ち柱材の横断面内収縮異方性に伴う表面割れを防止する方法である。この心持ち柱材の割れ抑制に関する基礎的知見として、スギ柱材の表面割れと密接な関係にある粘弾性特性は高温ほど好ましく(藤本ら, 2001)、その破壊じん性値は材温による影響は少ない(藤本ら, 1999)との報告も見られ、高温乾燥の有効性が示唆されている。しかし、高温状態が続くと、内部割れの発生や耐久性の低下を引き起こすことから、乾燥のはじめに高温処理で割れ止め処理を行い、その後、比較的温度を下げた乾燥に連係させる方法が一般的になってきている(片桐ら, 2001)。その際、セットの状態を処理段階で把握できれば、割れ止めに必要な高温処理時間を決定することができると考えられるが、セットの測定は時間と手間を要し(藤本ら, 2004)、現場での実測は不可能である。Takemura et al.(2004)は、マイクロウェーブを用いて木材の含水率分布を求め、非破壊的に応力を推定した。しかし、この研究ではセットの影響について考慮されていない。

そこで、本研究では、含水率分布によるセット推定の可能性について検討を行った。

## 2. セット推定法

木材は繊維飽和点以下で含水率が下がると収縮する。その収縮率と含水率の関係は1次式で表すことができる(藤本ら, 2004)。そこで、その関係式を得ることにより、心持ち柱材の横断面材から切り出した薄層より求めた各層の含水率から、乾燥応力が働いていない場合の各層の収縮率(自由収縮率)を求めることができる。式(1)は、本実験で用いた供試材の表層1層目(図1)の柱材幅方向自由収縮率より得られた実験式である。

$$sh=5.3345-0.2289u \quad (1).$$

ここで、 $sh$ : 自由収縮率(%)

$u$ : 含水率(%)

式(1)より、 $j$ 層目における自由収縮後の長さ( $l_j$ )は以下ようになる。ただし、各層の柱材幅方向の自由収縮率は、全て式(1)で表すことができるものとする。

$$l_j = (1 - sh_j/100)l_i \quad (2).$$

ここで、 $l_j$  : j層目の自由収縮後の長さ (柱材幅方向長さ) (mm)

$l_i$  : 生材時の長さ (柱材幅方向長さ) (mm)

しかし、柱材の各層は乾燥応力を受けながら乾燥収縮する。そこで、各層が自由収縮した後に、同じ長さ( $l_a$ )に積層一体化されたと仮定すると、j層目にかかる力 $P_j$ (kN)は、式(3)で表すことができる。なお、ここでは、各層の長さ方向 (柱材幅方向) のヤング率、各層小片の幅 (繊維方向)、厚さは一定とし、曲がり変形はないように矯正しているものとする。

$$P_j = Ebh(l_j - l_a)/l_j \quad (3).$$

ここで、 $E$  : ヤング率(kN/mm<sup>2</sup>)

$b$  : 幅 (繊維方向長さ) (mm)

$h$  : 厚さ(mm)

$l_a$  : 積層一体化された際の長さ (柱材幅方向長さ) (mm)

$P_j$  : j層目にかかる力 (kN)

n層から構成される各層にかかる力のバランスを考えると、次式が成り立つ。

$$\sum_{j=1}^n P_j = 0 \quad (4).$$

式(3)を式(4)に代入して整理すると

$$l_a = \frac{n}{\sum_{j=1}^n (1/l_j)} \quad (5).$$

式(5)より得られた値を式(3)に代入することにより、柱材幅方向長さの自由収縮後の分布からj層目にかかる理論上の力、さらには、式(6)、式(7)よりj層目にかかる理論上の応力( $\sigma_j$ )、およびその応力により拘束されているひずみ( $\epsilon_j$ )をそれぞれ算出することができる。

$$\sigma_j = P_j/bh \quad (6).$$

$$\epsilon_j = P_j/Ebh \quad (7).$$

木材の乾燥過程の場合、乾燥収縮時に乾燥応力に応じたドライイングセット( $S_j$ ) (以下セットと示す) が形成する。拘束された自由収縮ひずみ( $\epsilon_j$ )は、このセットにより固定化されたひずみと、弾性ひずみとして残存するひずみ( $\epsilon_{ij}$ )に分けて考えることができる。すなわち、セットの推定値は式(8)のように表せる。

$$S_j = (\epsilon_j - \epsilon_{ij}) \times 100(\%) \quad (8).$$

この弾性ひずみ( $\epsilon_{ij}$ )は、各層を切り離した際の解放ひずみとして実測することができる。この様に、含水率分布から算出された各層のひずみ( $\epsilon_j$ )と実測される解放ひずみ( $\epsilon_{ij}$ )から、セット( $S_j$ )を求めることができる。

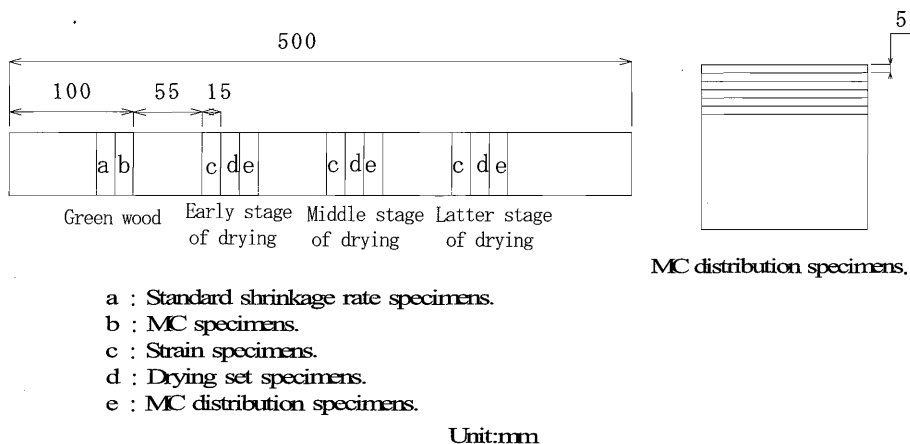


Fig.1 Preparation of test specimens.

図1 木取り図

### 3. 実験方法

福岡県産スギ心持ち柱材(130×130×500mm)を一本実験に供した。図1に示す位置で、生材時に15mm厚の横断面材を2枚切り出し、全乾法により生材含水率と各層の自由収縮曲線(柱材幅方向の各含水率に応じた収縮率)を求めた。ここで、柱材の生材含水率は43%であった。その後、両木口をシリコンでシールした後、蒸煮を5時間、続いて乾球温度120℃、湿球温度90℃で17時間乾燥を行った。乾燥開始から3時間後(乾燥初期)、10時間後(乾燥中期)、17時間後(乾燥後期)に、図1のように木口から55mmのところから15mm厚の横断面材を3枚切り出し、含水率分布、ひずみ、セットを求めた。含水率分布は、表層から5mm厚の薄層を6層切り出し、全乾法で求めた。解放ひずみとセットは表層から5mm厚の薄層を3層切り出して求めた。ひずみの1層目は、横断面材を切り出す前にストレインゲージを貼り付け、横断面を切り出してから解放させたが、2層目、3層目は、随時横断面材にストレインゲージを貼り付け切り離して解放した。セット試験片は、各乾燥段階で切り取られた薄層の長さから収縮率を求めるとともに含水率を調べた。そして、同じ含水率における自由収縮率との差をセットとした。今回の実験では、6層一体と見なし、すなわち上述のセット推定法の $n=6$ として、含水率分布等からセットの推定値を求めた。

## 4. 結果および考察

表1に各乾燥段階におけるひずみ及びセットの推定値と実測値をそれぞれ示す。乾燥初期の表層1層目から2層目と乾燥中期、乾燥後期の表層1層目から3層目では、ひずみの推定値のほうが実測値よりも引張側に大きい。これは、表層の乾燥収縮に伴い、大きな引張セットが形成し、解放ひずみの値が小さくなるためである。一方、乾燥初期の3層目では、ひずみの推定値のほうが、実測値よりも圧縮側の値となった。推定値の計算では未だ乾燥収縮が起こる以前の含水率であり、単純に1,2層目から圧縮変形を受けているひずみが算出されているのに対し、実測値では表層部から受けている圧縮応力が表層部の大きな引張セットの形成により小さなものとなっているためである。また、拘束ひずみの実測値に比べて、推定値は引張側にかなり大きい値を示したことから、収縮ひずみの大部分はセットによって固定されていることがわかる。また、1層目の実測ひずみを見ると、初期には引張応力を示すものの、中期、後期は圧縮応力となる。すなわち、本乾燥においては表面割れの危険性は10時間以前に無くなるものと推察される。一方、ひずみの推定値においては伸びひずみが内層部の乾燥収縮とともに小さくなるものの、表層の含水率が内層よりも常に低く、第1層目がいずれの乾燥段階でも最も大きな伸びひずみとなる。初期の第3層目までの実測ひずみは、第1層目のみが大きく含水率が低下し収縮しようとすることから、第1層目のみ伸びひずみ、第2,3層目は縮みひずみを示す。中期、後期は、いずれの層も含水率11%以下でありながら縮みひずみを示す。これは、引張りのセットがいずれの層にも形成し、さらに内層の方が含水率が高いにもかかわらず、より縮もうとしていることを示す。

表1. 各乾燥段階における各層の含水率とひずみ及びセット  
Table 1. Moisture content, strain and drying set of each layer in each drying stage.

Drying stage	Layer	MC $u$ (%)	Strain*	Strain*	Set**	Set**
			(Estimated value) $\epsilon$ ( $\mu$ )	(Measurement) $\epsilon_i$ ( $\mu$ )	(Estimated value) $s$ (%)	(Measurement) $s_i$ (%)
Early 3hr	1st	10.4	23311	1200	2.21	1.87
	2nd	18.6	4027	-890	0.49	-0.01
	3rd	25.8	-6834	-940	-0.59	-1.63
	4th	28.8	-6834			
	5th	30.2	-6834			
	6th	32.6	-6834			
Middle 10hr	1st	7.8	14450	-1520	1.60	1.45
	2nd	7.9	14245	-1400	1.57	0.79
	3rd	10.3	8485	-960	0.95	-0.09
	4th	15.5	-3752			
	5th	20.1	-14333			
	6th	22.2	-19095			
Latter 17hr	1st	4.6	10215	-1750	1.20	0.35
	2nd	5.6	7821	-360	0.82	0.45
	3rd	7.2	3971	-2830	0.68	-0.03
	4th	8.7	416			
	5th	12.2	-7853			
	6th	15.1	-14569			

\* - means shrink, and + means expansion.

\*\* - means shrink, and + means expansion.

セットの推定値と実測値は0.15~1.04%の差がある程度で、ほぼ類似した値となった。図2に、1層目から3層目の各乾燥条件におけるセットの推定値と実測値の関係を示す。ど

の層においても、セットの推定値は実測値とほぼ同じ傾向を示した。よって、本手法は、含水率分布および解放ひずみ測定値から各層に形成されるセットを推定する有効な手段であるといえる。また、1層目は乾燥初期に強い引張セットが形成され、その後、乾燥が進むにつれて引張セットは減少した。一般に、セットは繊維飽和点以下で含水率が下がる過程で形成され、引張応力がかかっている場合は引張セット、圧縮応力がかかっている場合は圧縮セットとなる。つまり、1層目では、乾燥初期の引張応力下において強い引張セットが形成され、その後、乾燥中期、後期の圧縮応力下で、圧縮側にセットが積み重ねられ、引張セットが減少したものと考えられる。一方、2層目、3層目は、乾燥初期から乾燥中期において引張セットは増加し、その後、乾燥後期にかけて引張セットは減少した。これは、2層目、3層目は、乾燥初期から中期にかけて引張応力、乾燥中期から後期にかけて圧縮応力がかかっていたと推察される。つまり、本供試材の1層目、2層目、3層目のセットの最大値は乾燥段階でこの順番に訪れることがわかる。また、3層目までの深さのセットは本乾燥処理の17時間でピークを過ぎていた。また、実測される解放ひずみ( $\epsilon_{ij}$ )は含水率分布から算出される各層のひずみ( $\epsilon_j$ )に比べ非常に小さく、セット( $s_j$ )はこの $\epsilon_j$ のみで表すことも可能と考えられる。

本実験の供試材は、生材含水率が低かったため、式(1)より得られる繊維飽和点が低く自由収縮率が小さくなったため、実測のセットも小さな値となった。そこで、森林総研で得

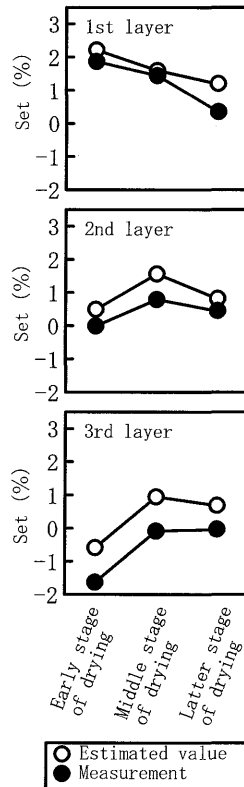


Fig.2 Changes of drying sets of each layer during drying.

図2 各層の各乾燥段階におけるセット

られているスギの接線方向の収縮率を参考に(平成14年度木材乾燥講習会テキスト),  $sh_j = 6.5 - 0.24u_j$ として, セットの推定値と実測値を求めた. 図3に,  $sh_j = 6.5 - 0.24u_j$ を用いた場合の1層目から3層目の各乾燥条件におけるセットの推定値と実測値の関係を示す. 式(1)の場合よりも, 推定値と実測値は差が小さくなった. これは, 自由収縮率が大きくなり実測のセットが大きくなったためだと考えられる. 一方, セットの推定値は, 式(1)の場合とあまり変わらなかった. これは, 層ごとの自由収縮率から求めた相対的なひずみからセットを算出しているためである. すなわち, 含水率と自由収縮率の関係式がセットの推定にあまり影響しないので, 材のバラツキに関係なく, 一般的な関係式より誤差の少ないセットの推定ができる可能性があり, 今後の検討が必要である.

図4にセット(推定値)と含水率の関係を示す. なお, セット(実測値)と含水率の関係は同じ傾向を示したので省略する. 前述の通り1層目は, 含水率の減少とともに引張セットが

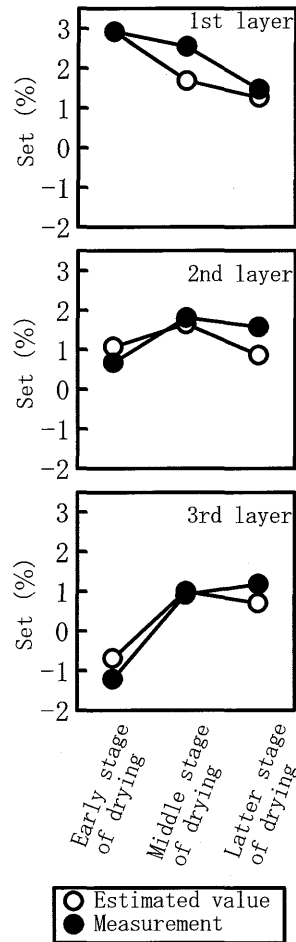


Fig. 3 Changes of drying sets of each layer during drying.  
( $sh=6.5-0.24u$ )

図3 各層の各乾燥段階におけるセット  
( $sh=6.5-0.24u$ )



減少した。一方、2層目と3層目は、含水率が比較的低い7%~11%の間に引張セットのピークが見られた。つまり、含水率が比較的低い段階で引張応力から圧縮応力へ転換したと推察されるが、乾燥初期と中期、乾燥中期と後期の間のセットの状態が分からないので、更なる検討が必要である。

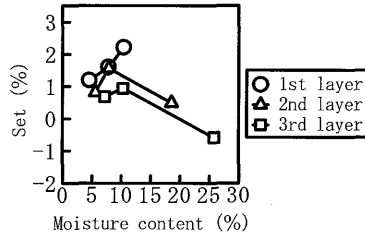


Fig. 4 Relationships between the drying sets (estimated value) and moisture content.

図4 セット(推定値)と含水率の関係

表2に2~6層一体( $n=2\sim6$ )とした場合のひずみの推定値を示す。層の数 ( $n$ ) が多くなるほど (実大の寸法に近づくほど)、表層の伸びひずみの値は大きくなった。また、乾燥初期の方が、乾燥中期、後期に比べて、比較的小さい層数でも表層のひずみが大きい値を示した。これは、乾燥初期は表層部の含水率傾斜が大きいいため、隣接する層に与える力が大きくなるためだと思われる。つまり、含水率傾斜の大きい乾燥初期においては、表層のセットを推定する場合に、比較的小さい層数でも誤差が少ない推定が可能であると考えられる。また前述のように、セットの推定値( $s_j$ )は含水率分布から算出される各層ひずみ( $\epsilon_j$ )で近似できる。この近似を用いて表2のひずみより計算した1層目から3層目までのセットの推定値と、表1の1層目から3層目までセットの実測値との差の絶対値の合計は、乾燥初期で3層一体 ( $n=3$ )、乾燥中期、後期で4層一体( $n=4$ )の時に最小となった。なお、式(1)の代わりに $sh_j=6.5-0.24u_j$ を用いた場合、乾燥初期で5層一体( $n=5$ )、乾燥中期、後期で6層一体( $n=6$ )の時に差の合計は最小となった。つまり、層数が多いほど、正確な推定を行うことができると考えられるが、柱材の高温低湿乾燥では表層30mm以内の5~6層でも、十分表層のセットを推定することができると考えられる。

表2 各乾燥段階における2~6層一体条件での各層のひずみ  
 Table 2 Strain of each layer in 2-6 layers at each drying stage.

Drying stage	Layer	Strain( $\mu$ )				
		2 layers	3 layers	4 layers	5 layers	6 layers
Early 3hr	1st	9512	16364	19826	21914	23311
	2nd	-9512	-2788	608	2656	4027
	3rd		-13576	-10217	-8190	-6834
	4th			-10217	-8190	-6834
	5th				-8190	-6834
	6th					-6834
Middle 10hr	1st	101	2031	6042	10590	14450
	2nd	-101	1829	5839	10386	14245
	3rd		-3860	127	4648	8485
	4th			-12008	-7542	-3752
	5th				-18083	-14333
	6th					-19095
Latter 17hr	1st	1186	2858	4584	7280	10215
	2nd	-1186	482	2203	4893	7821
	3rd		-3340	-1626	1054	3971
	4th			-5161	-2491	416
	5th				-10735	-7853
	6th					-14569

## 5. おわりに

含水率分布よりセットを推定することを目的に検討を行った。その結果、セットの推定値は実測値と同様の傾向を示し、本手法はスギ心持ち柱材の高温低湿乾燥において表層部セットを推定する有効な方法であると考えられた。本実験では、セットを推定する際、層ごとの自由収縮率、ヤング率を一定としたが、更なる正確な推定をするには、今後、層ごとの補正が必要であろう。

## 引用文献

- 藤本登留・後藤健輔・又木義博(1999)：スギ心持ち柱材表層の乾燥割れに関する破壊じん性. 材料48：223-228
- 藤本登留・川原聡(2004)：熱板処理によるスギ心持ち柱材の割れ抑制. 九大演習林報告85: 1-9
- 藤本登留・立和名一城・大内一浩・又木義博(2001)：スギ心持ち正角材の外層部接線方向横引張クリープおよび内層部放射方向横圧縮クリープ. 材料50：914-919
- 片桐幸彦・藤本登留・豆田俊治・近藤宏章(2001)：湿度無制御で熱風乾燥された心持ち柱材の品質に及ぼす高温低湿処理の効果. 木材工業56：617-620
- 日本木材加工技術協会：平成14年度木材乾燥講習会テキストpp.9
- TAKEMURA,T.,and TANIGUCHI,T.(2004):Method to estimate the internal stresses due to moisture in wood using transmission properties of microwaves. J. Wood Science 50:15-21
- 吉田孝久・橋爪丈夫・藤本登留(2000)：カラマツ及びスギ心持ち正角材の高温乾燥特性－高温低湿乾燥条件が乾燥特性に及ぼす影響. 木材工業55：357-362

(2005年12月2日受付；2006年1月26日受理)

## Summary

In order to monitor the drying sets of sugi (*Cryptomeria japonica* **D. Don**) boxed heart timber treated with high-temperature and low-humidity condition, we tried to estimate by the distribution of moisture content in this study.

The changes of estimated and measured drying sets at each layer showed a same tendency during drying. The large tension set of the surface layer was formed at the early stage of drying. And then, the tension set decreased as the drying proceeded. The changes of drying set as described above were clarified with this estimation calculated by the moisture distributions or measurement.

Therefore, this method would be effective in the estimation of the drying set under the high-temperature and low-humidity drying of sugi boxed-heart timbers.

**Key words:** Sugi; Boxed-heart timber; High-temperature and low-humidity drying; Drying set; Moisture distribution

