

針葉樹正角材の水分管理 —容積重による含水率選別—

中 篤 厚

Moisture Control of Softwood Square Lumber

- A method for classifying lumber by moisture content estimated from density -

Atsushi NAKAJIMA

For the purpose of obtaining uniform moisture content of todomatsu (*Abies sachalinensis* Masters) square lumber, a method for classifying green lumber by moisture content estimated from the density was examined. This paper also reports the effects of the final moisture content and lumber storage after kiln drying. The following results were obtained:

1) It might be possible to conclude that the moisture content generally varies too much after kiln drying because of large dispersion of the initial moisture content. The final moisture content remained higher when the initial moisture content was higher.

2) The confidence intervals of moisture contents estimated from equations in which a representative dimension and oven-dry density of the species were $\pm 21.6\%$ when the reliability coefficient was 95%, and $\pm 12.6\%$ with a reliability coefficient of 75%, for the values estimated from a linear regression equation.

3) For accurate estimation by this method, techniques for measuring the oven-dry density of lumber and accurate measurement of the volume of lumber before drying are required.

4) The frequency distribution of final moisture content in low-moisture-content lumber estimated from the density of green lumber was comparatively uniform. On the other hand, lumber with high initial moisture content required an extension of drying time.

5) The ratio of lumber with a moisture content of under 20%, was 62% of all lumber in the case of an average 20% moisture content. To obtain a 90% ratio of lumber with a moisture content of under 20%, the average final moisture content should be at most approximately 16%.

6) Lumber storage after drying was very effective for obtaining an uniform moisture content for all lumber.

Keywords: moisture control, moisture content, drying, square lumber
水分管理, 含水率, 乾燥, 正角材

含水率のバラツキの少ない乾燥材を得るために、乾燥前の容積重から含水率を推定して選別する方法の適用性と、仕上がり含水率および養生条件などの検討をトドマツ建築用正角材を対象として行った。得られた知見は以下のとおりである。

1) 一般的な熱気乾燥において、乾燥材の含水率は大きくばらつく傾向がある。この原因の一つは乾燥前の含水率が大きくばらついており、これらを同じ乾燥装置内で同時に乾燥していることに

ある。また生材時の含水率が高い製材ほど、仕上がり含水率は高い傾向となる。

- 2) 理論式に製材寸法、全乾容積重の代表値を代入し求めた含水率の推定精度は、一次回帰式による予測値に対して、信頼度95%とした場合 $\pm 21.6\%$ 、信頼度75%で $\pm 12.6\%$ が得られた。
- 3) 容積重から含水率を推定する際、推定精度の向上を図るためには、個々の製材の全乾容積重値および正確な体積をあらかじめ知る必要がある。
- 4) 容積重から推定した含水率を基に製材を振り分け、仕上がり含水率の出現頻度を予想した結果、低含水率グループで良好な分布状況が得られた。高含水率グループでは、乾燥時間の調整が必要である。
- 5) 今回の一連の試験データから、仕上がり含水率の平均値が20%の場合、含水率20%以下の製材の出現割合は全体の62%となった。また仕上がり含水率20%以下の製材の出現割合を9割以上確保するためには、仕上がり含水率の平均値を約16%以下としなければならないことが推測できた。
- 6) 乾燥後の養生は個々の製材の含水率のバラツキを解消する上で非常に有効である。

1. はじめに

針葉樹製材の水分管理は、その最大の需要先である住宅用部材の性能を保証し、住宅に関するクレームを最小限に留める意味において今後重要性を増してくる。将来的には人工乾燥後の個々の製材含水率が自動測定されるようなオンラインシステム¹⁻²⁾の構築が必要になることが予測される。特にトドマツやスギの場合、製材直後の含水率は個体差が大きくなりばらつくことが認められており³⁾、これらを同一ロット内に組み入れて限られた時間で人工乾燥を行えば、仕上がり含水率の不均一性は明らかである。

このような問題に対処する方法としては、初期含水率が近似する製材ごとに仕分けして乾燥する、予備乾燥の併用、乾燥時間の十分な確保、乾燥後、個々の製材含水率を計測する（水分グレーダシステム）、乾燥後から加工までの間、十分な養生時間を設ける、ことなどが考えられる。本報告では主に、の手法に着目し、簡便な方法を模索する中で、製材重量から導き出される容積重と含水率のシンプルな関係式を用いて検討した。この関係式については、過去にエゾマツ・トドマツ製材（正角・平割・厚板）を対象に容積重から含水率を推定する方法の可能性を検討している⁴⁾が、ここでは、実大のトドマツ心持ち正角材による乾燥試験データを用いて、本手法への適用性を検証した。また、含水率のバラツキを比較的簡易に抑えることができるものと考えられる上記、の項目についても若干の検討を加えた。

2. 試験材

乾燥試験に供試した材は、トドマツ人工林の末口径14～24cmの中径木から、乾燥後、モルダー鉋削^{ほうさく}により105mm正角材に仕上げを前提として、断面寸法114mm、材長3660mmの心持ち正角材を製材して用いた。

人工乾燥は乾燥スケジュールを変え計8回実施し、1回の乾燥試験に60本の供試材を用いたが、この内の54本、合計432本をデータ処理の対象とした。

3. 試験方法

3.1 含水率測定方法

含水率は、乾燥材を鉋削後、一方の木口から約1mの部位で小試片を採材し、全乾法に準じた方法で求め、乾燥前・後および工場内で一定期間養生した時の製材重量と、小試片の含水率から算出した製材の全乾重量を基に、各時点での含水率を推定した。

3.2 乾燥条件別の乾燥前後の含水率状況

乾燥条件は高温乾燥スケジュールが7条件と、中温乾燥スケジュールを1条件適用した。これらはトドマツ心持ち正角材の乾燥条件の検討用に設定したもので、第1表に示すように乾燥条件別に初期含水率と仕上がり含水率の分布に差が認められる。

3.3 容積重と含水率の関係

含水率と容積重の関係は理論的に次の式が提案されている⁴⁾。すなわち、繊維飽和点以下の含水率状態では、水の密度を1と仮定すれば、水分重量の増加（減少）＝体積増加（減少）と考え、この場合の含水

第1表 乾燥前後の含水率

Table 1. Green and final moisture content (M.C.).

乾燥条件 Drying conditions		中温条件 Conventional	高温条件 High temperature						
			条件 1	2	3	4	5	6	7
乾燥前 Green	平均 (%) Ave.	51.4	70.7	61.7	57.3	54.5	59.5	59.9	61.7
	最小 (%) Min.	28.5	38.3	34.0	30.3	30.5	36.5	33.1	34.2
	最大 (%) Max.	77.3	106.9	107.6	106.0	133.4	120.3	104.5	161.5
	標準偏差 S.D.	12.4	15.8	14.0	15.5	18.0	19.9	17.1	21.9
乾燥後 Final	平均 (%) Ave.	16.6	20.3	19.5	20.2	20.5	29.6	25.7	25.6
	最小 (%) Min.	11.3	11.1	12.9	12.6	13.4	19.2	17.3	15.0
	最大 (%) Max.	28.7	33.5	38.7	37.7	53.9	63.8	41.8	75.9
	標準偏差 S.D.	3.6	5.9	4.7	5.0	6.6	9.7	6.3	9.3

率と容積重の関係は以下の式 (1) で表せる。

$$u = \frac{100(ru - r0)}{r0(1 - ru)} (\%) \quad (1)$$

ここで u : 含水率 (%)

ru : 含水率 $u\%$ 時の製材の容積重 (g/cm^3)

$r0$: 全乾容積重 (g/cm^3)

一方、繊維飽和点以上の含水率状態では、同じく水の密度を1として、水分重量の増加(減少) = 空隙体積の減少(増加)と考え、自由水の増減は単に材料内の空隙の増減に影響するのみで、重量のみ増加(減少)して材料体積の変化はなく、繊維飽和点時の体積で一定であると仮定している。この場合、以下の式 (2) で含水率と容積重の関係が表せる。

$$u = \frac{(100 + ufsp \cdot r0) ru}{r0} - 100 (\%) \quad (2)$$

ここで、 $ufsp$: 繊維飽和点 (%)

また、これらの関係式を利用して、実際の含水率選別法に応用する場合、製材重量の他に製材寸法と

全乾容積重および繊維飽和点などが必要となる。ここでは、これらの数値を実用的見地から、既存値を用いることとした。すなわち、製材寸法は挽き立て時の表示寸法 ($11.4 \times 11.4 \times 366\text{cm}$) 一定とし、全乾容積重は文献⁵⁾で見られる一般的な値(トドマツ: 0.37)を、繊維飽和点はすべてに対して28%を適用した。

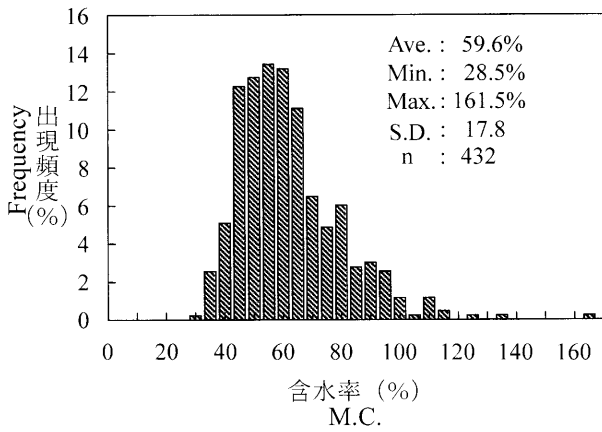
樹種と製材寸法が一定の時、単純には重量による含水率選別法が簡便だが、ここでは製材工場が扱う様々な樹種や材種にも対応できるように、上述の理論式から推定される含水率に基づき取りまとめた。

4. 結果および考察

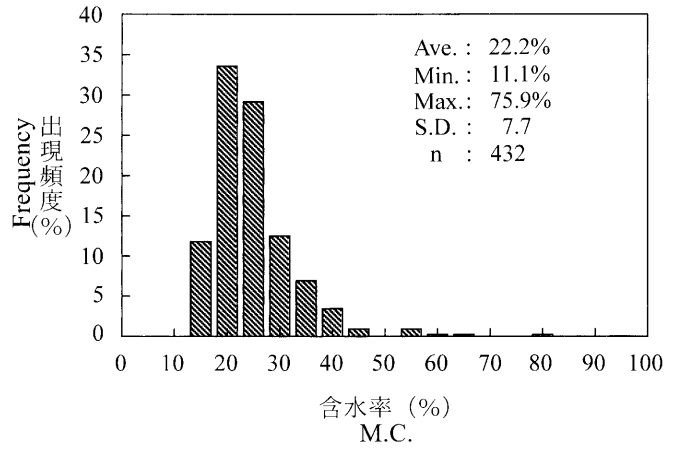
4.1 実測データによる含水率分布

トドマツ心持ち正角材(432本)の生材時の含水率分布をヒストグラムとして第1図に示す。平均値は59.6%、最低値28.5%、最高値161.5%、標準偏差17.8が得られ、含水率の分布範囲は大きい。またその多くは40~80%の範囲にあるが、特に高含水率材の出現が広範囲に認められる。

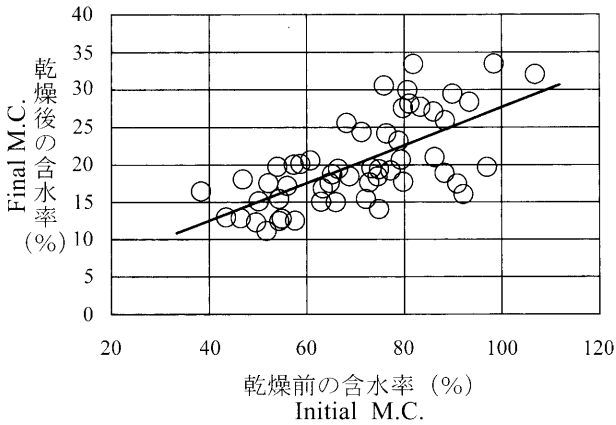
乾燥直後の含水率分布を乾燥条件が異なる全数について同様にヒストグラムとして第2図に示した。



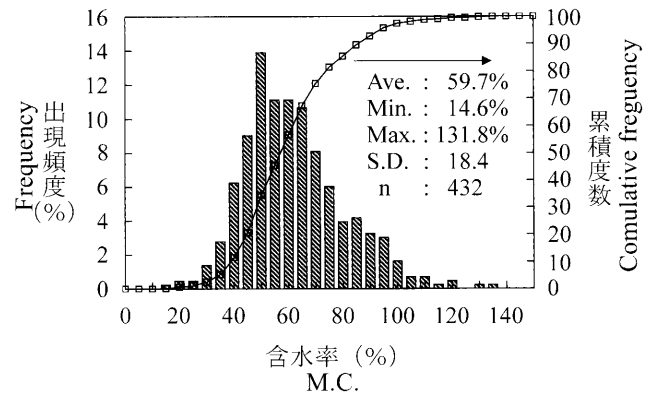
第1図 生材の含水率分布
Fig. 1. Histogram of green Moisture content (M.C.).



第2図 乾燥直後の含水率分布
Fig. 2. Histogram of final M.C..



第3図 乾燥前・後の含水率の関係
Fig. 3. Relation between initial M.C. and final M.C.



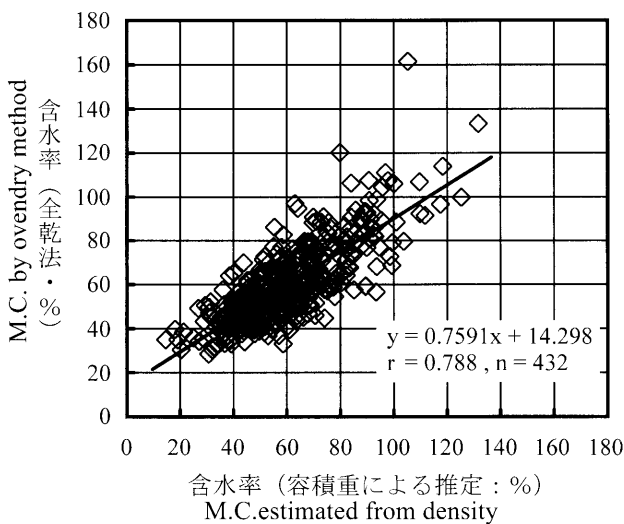
第4図 生材の容積重から推定した含水率分布
Fig. 4. Histogram of green M.C. estimated from density.

平均値は22.2%、最低値11.1%、最高値75.9%、標準偏差7.7となり、全体の傾向としては明らかに高含水率側、すなわち未乾燥材の出現が顕著に認められる。

また第3図には生材時と乾燥後の含水率の関係の一例を示した。生材時に高含水率の材が未乾燥材となる傾向が見いだされる。

4.2 容積重から推定した含水率分布

第4図に容積重から推定した生材の含水率分布を示す。平均値は実測値と変わらないが、最低値は14.6%、最高値は131.8%といずれも実測値に比べて低含水率側にシフトし、より正規分布に近い形が示された。また、実測データと容積重から推定した含水率の関係には第5図のような相関が得られ、この時の精度について区間推定を行い信頼幅を求めたものを第2表に示した。すなわち、信頼度が95%の場合の平均値信頼幅は±21.6%、信頼度75%では±12.6%となった。これは、過去に信田ら⁴⁾が報告した全乾容



第5図 全乾法と容積重による含水率の関係
Fig. 5. Relation between M.C. by oven-dry method and M.C. estimated from density.

第2表 容積重から推定した含水率の信頼区間

Table 2. Confidence intervals of M.C. estimated by the green density.

信頼度 (%)	相関係数	含水率の信頼区間 Confidence intervals of M.C.		
		最小値 (%) Min.	最大値 (%) Max.	平均値 (%) Ave.
95	0.788	± 21.5	± 21.9	± 21.6
75		± 12.6	± 12.8	± 12.6

第3表 生材容積重から推定した含水率をグループ分けした時の含水率データ

Table 3. M.C. for classified lumbers estimated from green density.

容積重から推定した生材含水率区分 Classifying M.C. estimated from green density		50%以下 Under 50% M.C.	50~70%	70%以上 Over 70% M.C.
初期含水率 (全乾法) Initial M.C. by oven dry method	平均値 (%) Ave.	47.3	62.1	79.8
	最低値 (%) Min.	30.3	38.3	51.7
	最高値 (%) Max.	70.0	97.0	133.4
	標準偏差 S.D.	8.9	11.8	15.3
仕上がり含水率 (全乾燥) Final M.C. by oven dry method	平均値 (%) Ave.	17.0	19.4	26.2
	最低値 (%) Min.	11.1	12.5	14.2
	最高値 (%) Max.	24.7	30.7	53.9
	標準偏差 S.D.	2.9	3.3	7.1
データ数 Number		75	91	50

積重を一定値とした時の含水率推定精度(±15.0%:信頼度75%の時)とほぼ同様かわずかに改善されている。また、信頼幅は含水率域によりそれほど変化しない。

以上から、乾燥前の容積重による製材選別は仕上がり含水率のバラツキを抑える上で、ある程度の効果が期待できるものと思われる。

4.3 生材含水率の選別による仕上がり含水率の影響

生材容積重から算出された推定含水率値を基に3区分(50%以下, 50~70%, 70%以上)に振り分け、各区分ごとに全乾法で求めた仕上がり含水率のバラツキの程度を調べ、結果を第3表に示した。また、参考値として生材時の含水率データも示した。この際、乾燥条件によって仕上がりの程度が異なるため、本

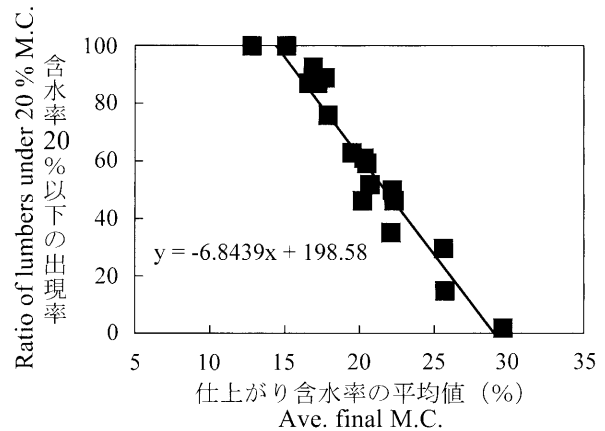
来は同一の乾燥条件および時間で処理した試験材を用いて検討する必要があるが、これを3区分するとデータ処理数が少なくなるため、今回は仕上がり含水率の平均値が比較的近似した乾燥条件1～4の計216体を対象に検討した。なお、推定含水率50%時の容積重は0.50g/cm³、製材重量は23.9kg、70%時の容積重は0.57g/cm³、製材重量は27.1kg、および繊維飽和点28%時の容積重は0.43g/cm³、製材重量が20.4kgと、前述の式から求められる。

乾燥後、仕上がり含水率の平均値が17%となった低含水率グループ（推定された生材含水率50%以下）では、最低値11.1%、最高値24.7%とすべて含水率25%以下となり、比較的良好な分布状況と言える。容積重による含水率推定精度の向上によっては、バラツキをさらに小さくすることが可能である。このためには、個々の製材の正確な製材寸法や全乾容積重値を与えることが要求される。この場合、あらかじめこれらの数値を個々の製材について知るための測定ラインの構築が新たに必要となるが、今回の結果から、重量測定のみでもある程度の効果が得られるものと判断された。

生材の推定含水率50～70%のグループでは、仕上がり含水率の平均が19.4%、最低12.5%から最高30.7%までの製材が存在し、同じく推定含水率70%以上の高含水率グループでは、仕上がり含水率の平均値が26.2%で、最低14.2%から最高53.9%と乾燥不十分な製材がかなり含まれ問題と言える。これらの結果が意味することは、低含水率の製材グループでは、乾燥時間の適正化がほぼ図られているが、これ以上の含水率値を示す製材グループでは乾燥時間の延長あるいはイコーライジング処理によってバラツキの縮小を図る必要があるということである。今回は、製材を3グループに振り分けたが、より一層の均一化のためには、例えば40%以下、40～60%、60～80%、80～100%、100～120%など、20%範囲程度の振り分けが有効と考えられ、これによって各含水率グループごとに乾燥時間の設定が容易となる。

4.4 仕上がり含水率の平均値と未乾燥材の関係

第6図に仕上がり含水率の平均値と含水率20%以下となった製材の出現率との関係を示す。乾燥条件



第6図 仕上がり含水率平均と含水率20%以下の出現割合の関係

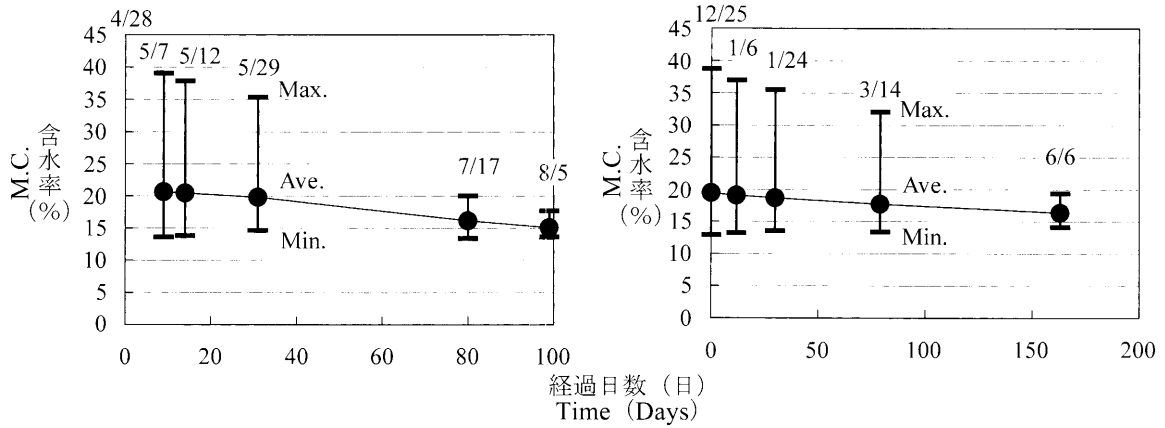
Fig. 6. Relation between average final M.C. and ratio of ladders under 20% M.C..

は中温と高温条件をまとめてプロットしたものであるが、一次回帰で高い負の相関が認められる。すなわち、仕上がり含水率の平均値が20%の場合、含水率20%以下の製材の出現率は全体の62%であること、また含水率20%以下の製材の出現率を9割以上確保するためには、仕上がり含水率の平均値を約16%以下としなければならないことが推測できる。平均含水率が16%の時の含水率の標準偏差は2.6となる。

これらのことから、含水率のバラツキを抑える上で、仕上がり含水率、言い換えれば乾燥時間の設定は重要である。

4.5 養生中の含水率変化

乾燥後の製材を数か月、屋内放置した時の含水率の経時変化を第7図に示した。一つは気温の低い冬場（12月25日）に乾燥が終了した例、もう一つは気温が上昇し始める春先（4月28日）の例である。データ数は両者とも54体で、図中には最高、最低および平均値を示した。冬季の場合、乾燥直後、最低含水率12.9%、最高含水率38.7%、平均値19.5%のものが、翌年6月6日の163日経過後には、最低値14.1%、最高値19.4%、平均値で16.4%となった。一方、春先のデータでは乾燥後9日経過時の最低含水率が13.6%、最高含水率が39.1%、平均値20.7%であったものが、7月17日の80日経過後には最低値13.4%、最高値20.0%、平均値16.2%となり、ある程度の養生期間を設けることによっていずれも含水率のバラツキはかなり改善されている。



第7図 養生中の含水率変化
Fig. 7. Change in M. C. after kilndry.

養生期間中の含水率低下による製材の狂いを考慮すると、製品を仕上げる際の表面飽削、修正挽きは、含水率変化がさほど起きない、十分に安定した時点で行うべきである。

5. まとめ

含水率のバラツキの少ない乾燥材を得るために、乾燥前の容積重から含水率を推定し、選別する方法の適用性と、仕上がり含水率および養生条件などの検討をトドマツ建築用正角材を対象として行った。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 一般的な熱気乾燥において、乾燥材の含水率は大きくばらつく傾向がある。この原因の一つは乾燥前の含水率が大きくばらついており、これらを同じ乾燥装置内で同時に乾燥していることにある。また生材時の含水率が高い製材ほど、仕上がり含水率は高い傾向となる。
- (2) 理論式(1), (2)に製材寸法、全乾容積重の代表値を代入して求めた含水率の推定精度は、一次回帰式による予測値に対して、信頼度95%とした場合 $\pm 21.6\%$ 、信頼度75%で $\pm 12.6\%$ が得られた。
- (3) 容積重から含水率を推定する際に、推定精度の向上を図るためには、個々の製材の全乾容積重値および正確な体積をあらかじめ知る必要がある。
- (4) 容積重から推定した含水率を基に製材を振り分

け、仕上がり含水率の出現頻度を予想した結果、低含水率グループで良好な分布状況が得られた。高含水率グループでは、乾燥時間の調整が必要である。

- (5) 今回の一連の試験データから、仕上がり含水率の平均値が20%の場合、含水率20%以下の製材の出現割合は全体の62%となった。また仕上がり含水率20%以下の製材の出現割合を9割以上確保するためには、仕上がり含水率の平均値を約16%以下としなければならないことが推測できた。
- (6) 乾燥後の養生は個々の製材の含水率のバラツキを解消する上で非常に有効である。

文 献

- 1) 信田 聡：木材工業，43(8)，8-13(1988)。
- 2) 北海道林務部：木材高度利用複合化システム開発事業第2章，3，89-166(1991)。
- 3) 例えば三好誠治，村田良範：愛媛県林試研報，19，65-69(1998)。
- 4) 信田 聡，中蔦 厚，奈良直哉：木材学会誌，36(12)，1019-1026(1990)。
- 5) (社)日本木材加工技術協会：日本の木材(1984)。

- 技術部 乾燥科 -
(原稿受理：1998.7, 10.)