

蒸気式乾燥におけるタイムスケジュールの推定 (第1報)

—任意条件における乾燥時間の推定方法—

中 篤 厚

土 橋 英 亮

河 原 映

Estimation of a Time Schedule for Kiln Drying (I)

- A method to estimate a drying time for optional conditions -

Atsushi NAKAJIMA

Hideaki TSUCHIHASHI

Akira KAWAHARA

To estimate time schedules for kiln drying of karamatsu (*Larix leptolepis*) and todomatsu (*Abies sachalinensis*) sawn timbers, we conducted an investigation to determine the drying rates for six sawing sizes, timber with pith or without it, and three temperature conditions. The method for estimating the time schedule were summarized as follows:

- 1) Drying time was estimated by clarifying the coefficient of the drying rate at the approximating equation (1) which showed the decrease of moisture content (MC) in previous reports^{1,2)} to apply data from the drying tests.
- 2) By using the equation for the relationship between "surface area/volume" and the coefficient of the drying rate, drying time was estimated to interpolate the coefficient of the drying rate at the difference of timber size for the sectional dimensions.
- 3) The drying schedule and drying time were applied in that time schedule for initial MC standardized at roughly 40-70% and revised when they were outside this range.

key words: drying curve, drying time, moisture content

乾燥曲線, 乾燥時間, 含水率

カラマツ・トドマツ製材について、材種6区分、木取り2種類、温度3条件によって、乾燥速度を把握するための乾燥試験を行い、以下の方法でタイムスケジュールを推定した。

- 1) 乾燥時間は、既報^{1,2)}にある乾燥に伴う含水率減少曲線の近似式(1)を適用し、乾燥速度減少係数を明らかにすることで推定した。
- 2) 材種区分が同じ製材で断面寸法が異なる場合には、「表面積/体積」と乾燥速度減少係数の関係から任意な断面寸法に相当する減少係数に補間することで乾燥時間を推定した。
- 3) 上述の乾燥スケジュールと乾燥時間は、初期含水率がおおむね40~70%の範囲に適用した。この範囲外については初期含水率に応じた修正を試みた。

1. はじめに

木造住宅の性能を維持する前提として、建築材に含まれる水分量が使用環境に対し平衡になっていることが挙げられる。一般に平衡含水率は使用部位によって異なり、造作用材は7～12%、構造用材は12～18%程度である^{3,4)}。木材乾燥を行う現場では、この数値目標が効率的に得られるようにあらかじめ乾燥計画を立てる必要がある。乾燥計画とは樹種や製材寸法、初期含水率あるいは木取りなどの情報に基づき、品質や経費あるいは納品までの期間などを加味した上で最善の乾燥工程を選択することと理解されるが、現場にとって扱う製材の種類が多いほど煩雑さが増し負担となる。集成材工場などのように限られた種類の製材を扱う場合でも、製品の種類によって、原板の寸法や初期含水率の違いなどから乾燥に要する時間に対して除去される水分量が一律ではなく、仕上がり含水率が不均一になるなどの問題もある⁵⁾。また、蒸気式乾燥では、樹種や用途などに応じて様々な乾燥スケジュールが提案されているが⁶⁾、被乾燥材に対し適切な条件を選択するには知識や経験が必要とされる。

一方、針葉樹製材の蒸気式乾燥で採られる操作方法は、タイムスケジュールによる制御法が主流である。この方法は、乾燥スケジュールにあらかじめ処理時間を組み入れることで自動運転が可能となるので、操作が簡便といった利点がある。しかし、前述のように、被乾燥材は製材寸法や初期含水率などの諸条件がいつも同じとは限らないため、その都度、適用する温湿度条件を組み処理時間を事前に予測しておく必要が生じる。このため、現状では経験による見込み運転や電気抵抗式水分計を併用し乾燥経過をおおむね把握しながらスケジュールを進行させるなどのケースが多くみられる。

そこで本報では、北海道の主要な人工林材であるカラマツとトドマツを対象に、乾燥に伴う含水率の減少経過を近似式で表すことでこうした煩雑な管理が簡便に行えるタイムスケジュールの推定方法を検討した。第1報では、製材寸法や初期含水率、適用温度などの乾燥速度と品質に影響を及ぼすいくつかの要件を抽出し、これらが任意に組み合わせられた場合の乾燥時間の推定を試みた。

2. タイムスケジュールの要件

2.1 推定要件

カラマツおよびトドマツのタイムスケジュールを推定するにあたり、あらかじめ以下のような要件を与えた。

1) 材種

材厚98mm以下の製材は、材厚を4区分とする。材厚99mm以上については、材厚120mm以下かつ材幅134mm以下とそれ以外の2区分とする(第1表)。なお、材厚は製材断面の短辺寸法、材幅は長辺寸法を示す。材厚99mm以上で材幅基準を設けたのは、製材断面が大きくなれば材幅による乾燥速度への影響が無視できないと考えられるためである。タイムスケジュールの作成は、これらの6区分した材種ごとに行う。

第1表 材種区分

Table 1. Division by timber size.

区分 Division	材厚 (mm) Thickness	材幅 (mm) Width
A	36以下 36 or under	/
B	37～52	
C	53～70	
D	71～98	
E	99～120	99～134
F	99以上 99 or over	135以上 135 or over

注)材厚は製材断面の短辺寸法、材幅は長辺寸法を指す。
Note) Thickness indicates the size of the short side in the cross section; width refers to the long side size.

2) 初期含水率

処理時間の推定精度を高める上で、初期含水率はできるだけ正確に把握することが求められる。しかし、この値は製材間で異なるのが通常であり、その代表値を判断することは困難である。また、人工乾燥の前に予備乾燥が行われ初期含水率が低い場合や、逆に材質特性から標準より高い場合なども想定される。これらの対応として、乾燥経過曲線の近似式を修正する方法を検討する。

3) 温度

温度は、80℃以下(中温)、80～100℃(中高温)、および100℃以上(高温)の3条件とし、いずれも割れの抑制を重視し適切と考えられる乾燥スケジュールをあらかじめ作成する。

4) 木取り

心持ち材と心去り材を区別し、それぞれの乾燥スケジュールを作成する。ただし、材厚99mm以上の心持ち材については、表面割れ抑制が困難と判断される中温条件の乾燥スケジュールを除く。

5) 蒸煮・調湿処理

材種と木取り（心持ち・心去り）から蒸煮温度とその処理時間を、材厚と仕上がり含水率から調湿処理（イコーライジングとコンディショニング）の温湿度条件とその処理時間をあらかじめ定める。

2.2 含水率スケジュールの作成

既往の文献^{6,7)}を参考に、材種、木取り、温度条件ごとに含水率スケジュールを作成した（第2表）。ここではカラマツの一例のみを示す。作成した含水率スケジュールは2.1で述べたとおり、材種(6区分)、木取り(2種類)、温度条件(3種類)の36条件から、

第2表 含水率スケジュールの一例（カラマツ）
Table 2. Example of the drying schedules for karamatsu.

板材（心去り材）：第1表の区分A

Plainsawed board size (without pith): Division A of Table 1

含水率 (%) MC ^{a)}	乾球温度 (°C) D.B.T. ^{b)}	湿球温度 (°C) W.B.T. ^{c)}	備考 Remark
生材 Green	85	85	蒸煮 Steaming
~40	70	64	中温条件 Conventional temperature
40~35	70	62	
35~30	70	59	
30~25	75	61	
25~20	75	56	
20~15	80	56	
15~10	80	50	

平割材（心去り材）：区分C

Baby scantling size (without pith): Division C

生材 Green	90	90	蒸煮 Steaming
~40	85	80	中高温条件 Slightly high temperature
40~35	85	79	
35~30	85	77	
30~25	85	73	
25~20	85	68	
20~15	85	62	
15~10	85	55	

柱材（心持ち材）：区分E

Square timber size (boxed heart): Division E

生材 Green	95	95	蒸煮 Steaming
~35	120	90	高温条件 High temperature
35~25	110	80	High temperature
25~15	90	60	

a) Moisture content, b) Dry bulb temperature, c) Wet bulb temperature

材厚99mm以上の心持ち材に適用する中温スケジュールの2条件を除く34条件とした。

3. 乾燥過程の定式化

樹種、材種、初期含水率、温湿度などの乾燥条件が定めれば乾燥過程がある程度予測できるので、タイムスケジュールの推定が可能となる。ただし、含水率減少曲線については、実験により求めなければならない。そこで、基礎試験を実施し乾燥過程を定式化した。

3.1 含水率減少曲線

含水率減少曲線を近似式(1)^{1,2)}によって表し、乾燥時間を推定した。

$$U - U_e = (U_i - U_e) \cdot \exp^{-k \cdot t} \dots (1)$$

ここで、U: 含水率 (%), U_e: 平衡含水率 (%), U_i: 初期含水率 (%), k: 乾燥速度減少係数, t: 経過時間。

具体的には、2.1の1)で述べた6種類の材種を対象に、あらかじめ2.2で作成した含水率スケジュールに準拠した乾燥試験を行い、含水率と経過時間の関係を近似式(1)に当てはめ、最小二乗法によって乾燥速度減少係数(以下、減少係数)を求めた。この減少係数は、温度・湿度条件が一定の期間、すなわち含水率段階(ステップ)ごとに求めた。減少係数を求めたのち、近似式(1)を変形した式(2)から乾燥時間を推定した。

$$t = \frac{1}{k} \log \frac{U_i - U_e}{U - U_e} \dots (2)$$

3.2 定式化のための基礎試験

3.2.1 試験材

カラマツ(上川郡美瑛町産)・トドマツ(上川郡下川町産)を用い、6区分の材種ごとに心去りと心持ちの試験材(材長900mm)を各3体用意した(第3表)。試験材は短尺であり木口からの水分蒸発を無視できないため、製材直後に両木口をコーキング剤でシールした。

3.2.2 乾燥装置と測定方法

電熱・蒸気併用式の小型乾燥装置(内寸法: 幅90

第3表 基礎試験用製材の基準寸法
Table 3. Standard sawing size for the basic drying tests.

木取り Sawing pattern	材種区分 Division	トドマツ Todomatsu		カラマツ Karamatsu	
		材厚 (mm) Thickness	材幅 (mm) Width	材厚 (mm) Thickness	材幅 (mm) Width
心持ち材 With pith	A	30	112	31	112
	B	45	94	43	97
	C	60	114	60	115
	D	85	114	84	115
	E	114	114	115	115
	F	114	218	160	190
心去り材 Without pith	A	28	111	28	111
	B	42	96	42	96
	C	57	112	58	112
	D	82	112	81	112
	E	112	112	113	113
	F	112	218	156	188

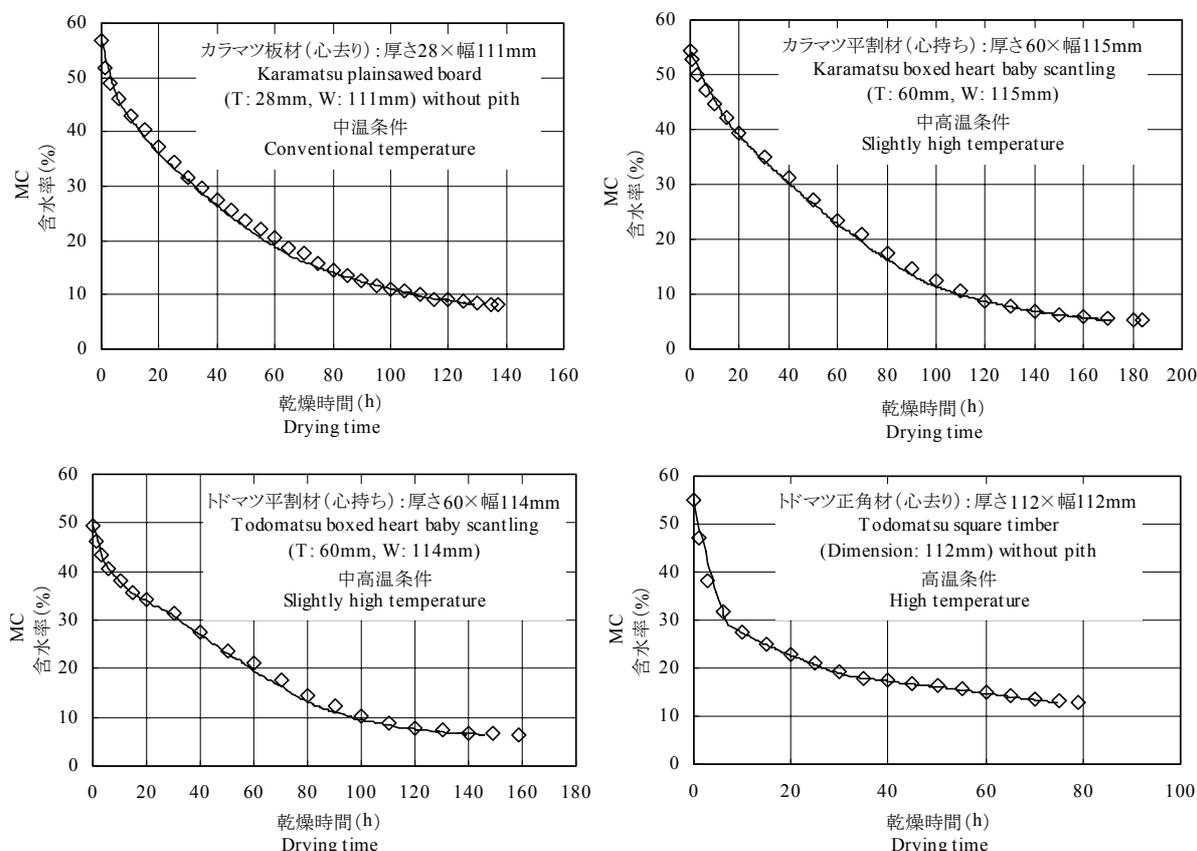
注) 材長: 900mm
Note) Length: 900mm

×高さ70×奥行き100cm)を用い、乾燥速度を把握するための基礎試験を行った。試験では、一度に3体の試験材を供試した。1体は秤量1g単位の吊り下げ天秤で重量を連続的に自動記録し、残りの2体は

含水率スケジュールに準じた温湿度条件変更時にその都度乾燥装置から取り出し、秤量10g単位の天秤で重量を測定した。取り出した2体の試験材は、その都度、割れを観察し適用スケジュールの妥当性を判断するとともに、吊り下げ天秤の試験材と乾燥速度に顕著な個体差がないことを確認した。乾燥経過中の含水率は、あらかじめ試験材両端から含水率試験片を採り、全乾法により初期含水率を求め、推定全乾重量と経過重量から推測した。乾燥終了後、試験材中央部から試験片を採り、含水率を求めた。この値を基準に、乾燥経過中の含水率を改めた。

3.3 基礎試験で得られた減少係数

材種ごとの実測による含水率減少経過と近似式(1)から推定した経過曲線の一例を示した(第1図)。ここで推定した経過曲線の初期含水率は実測データに一致させた。実測データと推定した経過曲線は、ここには示していない材種についてもおおむね一致したため、基準寸法における乾燥条件ごとに減少係数



第1図 実測による乾燥経過と推定による近似線
Fig. 1. Drying process of actual measurement and estimated drying curve.
凡例) ◇: 実測, —: 近似線
Legend) ◇: Measurement, —: Estimated line

を確定した。これらは、樹種（カラマツ・トドマツ）、材種（6区分）、木取り（2種類）、温度条件（3種類）の組み合わせで合計68種類のスケジュールについて作成した。

4. タイムスケジュールの推定方法

定式化した個別のスケジュールを基に、材種や初期含水率などの条件が変化した場合のタイムスケジュールの推定方法を検討した。

4.1 同一材種内の減少係数の補間

乾燥スケジュールおよび初期含水率が一致しても、断面寸法によって乾燥速度は異なる。したがって、第1表で示した同一材種区分であっても断面寸法の違いに応じて、含水率減少曲線を修正する必要がある。本報では、乾燥速度に影響を及ぼすと考えられる水分傾斜に着目するとともに、修正の簡略化を図るため、材の表面積と体積の比「表面積/体積」と減少係数の関係について検討し、減少係数の補間を試みた。ここで表面積には、材面に比べ水分の蒸発速度が大きい木口面を含めない。

その結果、心持ち・心去り材とも極めて高い相関が認められた（第2図）。図はカラマツについて示すが、トドマツも同様の関係が得られ、これらの関係から導かれる補正減少係数は、断面の大きさの差違によって影響する乾燥速度を推測するのに有効と思われた。

4.2 初期含水率に応じた修正

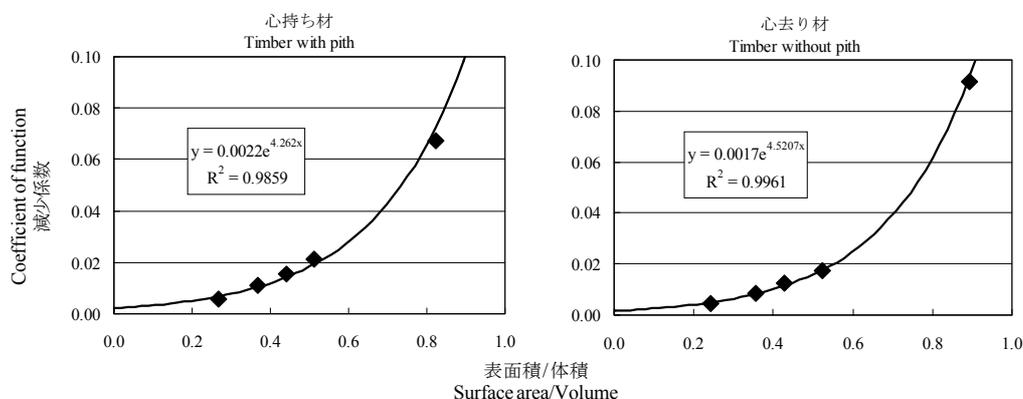
通常の含水率スケジュールでは、湿球温度を次の

ステップ（含水率段階）へ変更する時期を初期含水率の高低に応じて前後させる方法がとられる。しかし、ここでは含水率45%以下において5%刻みのステップごとに乾球温度と湿球温度を対の固定値とした。これは、通常の方法によれば乾燥速度推定が煩雑となり困難と判断したためである。また、この適用は初期含水率が約40～70%の場合に限ることとした。理由は次の4.2.1および4.2.2項による。

4.2.1 初期含水率が高い場合

初期含水率が高い場合は、乾燥時間を前述の近似式から推定すると、含水率減少経過は指数曲線的に表現されるので、正規の乾燥時間より短い傾向となる。そこで、初期含水率の違う試験材を一定の温度条件（乾球温度80℃、乾湿球温度差3℃）で同時に乾燥させた時の含水率減少曲線から減少係数を求め、これと初期含水率との関係を検討した。試験材には、心材部において含水率のバラツキが大きいトドマツを用いた。その結果、両者に相関がみられ、第3図に示すような回帰直線が得られた。

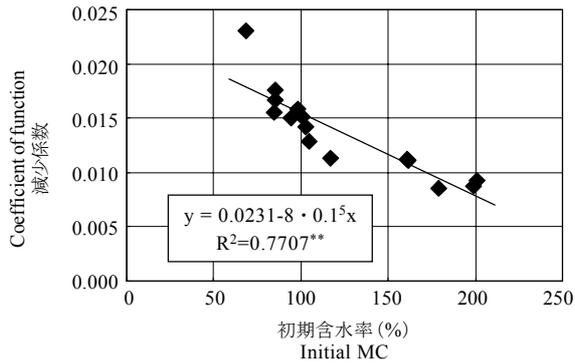
一方、初期含水率に応じた時間増加比による修正方法が既に報告されている⁸⁾。この方法は、初期含水率70%、仕上がり含水率10%を基準とした時の、初期含水率の違いによって生じる時間のずれを単純な増加（減少）比によって修正するもので、初期含水率と増加比が直線関係で示されている。これについても検討を行った結果、初期含水率が75%以上の時は、以下の二つの方法の併用によって減少係数を補正することが妥当と判断された。



第2図 製材体積に対する表面積の比と含水率減少係数の関係（カラマツ）

Fig. 2. Relationship between ratio with surface area to volume of timbers and coefficient of function with the drying rate (karamatsu).

注) 表面積には木口面が含まれない。
Note) Surface area exclude end surface.



第3図 トドマツ平割材の初期含水率と減少係数の関係

Fig. 3. Relationship between initial moisture content (MC) and coefficient of function with drying rate for todomatsu baby scantling.

**）1%有意を示す。
 **) Significant at 1% level.

①第3図に示した回帰式から初期含水率75%の時の減少係数は0.0171となる。これを基準に含水率75%以上の初期含水率に対応する減少係数の比を4.1で検討した補正減少係数に乗じることで補正する。

②初期含水率に応じた時間増加比による修正は、初期含水率の程度に応じて適用する。

すなわち、小試験材（厚さ40×幅100×長さ300mm）を用いた予備実験では、①と②を重複適用することで時間推定の精度が向上した。この際、温湿度条件の変更時期は、第一ステップが初期含水率の7割に達した時、次ステップが6割、以降は含水率10%の低下ごととして、通常の含水率範囲（5%刻み）に適合するステップ以降では標準の含水率スケジュールに一致させた。

こうしたルーチン処理は、辺材部や水食いなどの高含水率の部位を含む材の乾燥に際し、仕上がり含水率の精度を高めるための手段として取り入れた。

4.2.2 初期含水率が低い場合

初期含水率がおおむね35~40%以下の場合には、天然乾燥材を対象とする時の含水率スケジュール作成の考え方が既に示されている⁷⁾。これを参考に、スケジュール修正を次の方法で行った。以下の方法は中温および中高温の温度条件に適用するものである。なお、ここでは時間推定に必要な含水率低下量についても言及した。

①第一ステップの温湿度条件は、標準の含水率スケジュールの二つ前のステップとして、以降は順次、

ステップ進行にしたがう。

②第一ステップの処理時間は、含水率低下量を2%として計算する。

③第二ステップの処理時間は、含水率低下量を3%として計算する。

④第四ステップの処理時間は、計算値から第一ステップの処理時間を差し引く。

⑤第五ステップの処理時間は、同じく第二ステップの処理時間を差し引く。

以上は、既往の文献⁷⁾に示されているように、木口割れや表面割れを防止するため、通常の含水率スケジュールに比べ初期の湿度を高くし、含水率低下に応じて小刻みに低湿化させながら、実際の含水率とのずれを修正していくという手順に大筋でならったものである。

4.3 蒸煮および調湿処理工程の検討

乾燥工程の前後に取り入れられる蒸煮および調湿処理について検討した。

4.3.1 蒸煮処理

蒸煮処理については、材種と木取りに応じた温度と処理時間をあらかじめ定めた。また、乾燥開始から蒸煮温度あるいは初期温度に到達するまでの初期昇温が必要なため、実際の制御ではこれに要する時間を加算する必要がある。初期昇温時間は、乾燥装置の断熱性能や加熱容量などによって差が生じるため任意設定が基本となる。

4.3.2 調湿処理

調湿処理はイコーライジングとコンディショニングに分けられ、温度条件と材種および仕上がり含水率に応じたような条件を与えた。

・イコーライジング

乾球温度:乾燥工程の最終温度、またはその±5℃とする。

湿球温度:「仕上がり含水率-2%」の平衡含水率を保つ湿度条件とした。

時間:便宜上、以下の式を当てはめた。ただし、60時間を超える場合は60時間とする。

$$D \times U_f / 17 \text{ (h)}$$

ここで、Dは材厚(mm)、U_fは仕上がり含水率(%)である。

また、初期含水率が35%以下の場合には、以下の式

とする。ただし、36時間を超える場合は36時間とする。

$$D \times U_f / 34 \quad (h)$$

・コンディショニング

乾球温度：イコーライジングと同じとする。

湿球温度：「仕上がり含水率+2.5%」の平衡含水率を保つ湿度条件とした。

時間：既往の文献⁹⁾を参考に、以下の式を当てはめた。

$$D \times 1 / 4 \quad (h)$$

ただし、初期含水率が35%以下の場合は、以下の式とする。

$$D \times 1 / 5 \quad (h)$$

なお、これらの計算値が24時間を超える場合は24時間とする。

5. 推定されたタイムスケジュール例

以上の検討から得られた減少係数を用いて作成したタイムスケジュールの一例を、トドマツ心去り平割材について温度条件ごとに示す(第4表)。ここでは、基準断面寸法(厚さ57×幅112mm)に対し任

第4表 タイムスケジュール表の一例(トドマツ心去り平割材)

Table 4. Example of the time schedules for todomatsu baby scantlings without pith.

中温条件 Conventional temperature			基準断面寸法 Standard sawing size 57×112mm		任意断面寸法 Optional sawing size 53×105mm		
含水率 (%) MC	乾球温度 (°C) D.B.T.	湿球温度 (°C) W.B.T.	減少係数 Coefficient of function	推定乾燥時間 (h) Estimated drying time	補正係数 Revisional coefficient	推定乾燥時間 (h) Estimated drying time	
60~35	60	56	0.0282	32	0.0321	29	
35~30	60	54	0.0168	17	0.0192	15	
30~25	65	56	0.0262	13	0.0299	11	
25~20	70	59	0.0243	18	0.0277	16	
20~15	75	61	0.0269	21	0.0307	19	
15~10	80	60	0.0307	27	0.0350	24	
イコーライジング Equalizing	80	68	/	34	/	32	
コンディショニング Conditioning	80	75	/	15	/	14	
合計時間： Total time				177	合計時間： Total time		160
中高温条件 Slightly high temperature			基準断面寸法 Standard sawing size 57×112mm		任意断面寸法 Optional sawing size 53×105mm		
含水率 (%) MC	乾球温度 (°C) D.B.T.	湿球温度 (°C) W.B.T.	減少係数 Coefficient of function	推定乾燥時間 (h) Estimated drying time	補正係数 Revisional coefficient	推定乾燥時間 (h) Estimated drying time	
60~40	85	82	0.0347	23	0.0395	20	
40~35	85	81	0.0320	8	0.0365	7	
35~30	85	79	0.0363	8	0.0414	7	
30~25	85	77	0.0331	10	0.0377	9	
25~20	90	79	0.0353	12	0.0402	11	
20~15	90	75	0.0403	14	0.0460	12	
15~10	90	68	0.0423	18	0.0483	16	
イコーライジング Equalizing	85	74	/	34	/	32	
コンディショニング Conditioning	85	80	/	15	/	14	
合計時間： Total time				142	合計時間： Total time		128
高温条件 High temperature			基準断面寸法 Standard sawing size 57×112mm		任意断面寸法 Optional sawing size 53×105mm		
含水率 (%) MC	乾球温度 (°C) D.B.T.	湿球温度 (°C) W.B.T.	減少係数 Coefficient of function	推定乾燥時間 (h) Estimated drying time	補正係数 Revisional coefficient	推定乾燥時間 (h) Estimated drying time	
蒸 煮 Steaming	95	95	/	10	/	10	
60~30	110	95	0.1422	6	0.1621	6	
30~15	100	85	0.0726	17	0.0827	16	
15~10	90	68	0.0423	18	0.0483	16	
イコーライジング Equalizing	85	74	/	34	/	32	
合計時間： Total time				85	合計時間： Total time		80

意断面寸法として厚さ53mm, 幅105mmを仮定し, それぞれの減少係数および製材断面に相当する補正係数に基づき推定した乾燥時間を示した。なお, 初期含水率を60%, 仕上がり含水率の目標を10%とした。これによれば, 任意断面寸法の製材の推定乾燥時間は, 基準断面寸法に対し1割程度短い結果となった。また, 調湿処理時間を含めた乾燥日数は, 中温条件が約1週間に対し, 高温条件ではその半分となった。ただし, 高い温度を適用し時間短縮を図ることが一概に有効とは言えず, 乾燥材に要求される品質(仕上がり含水率の均一性や材色など)によって判断が分かれる。また, 減少係数の調整によって時間変更が容易に行えることから, ここで提案する以外にも乾燥速度が明らかとなればタイムスケジュールの追加作成が可能である。

次報では, 以上の方法で推定したタイムスケジュールに準拠して乾燥試験を行ったので, その検証結果について報告する。

6. まとめ

カラマツ・トドマツ製材について, 材種6区分, 木取り2種類, 温度3条件の組み合わせによる乾燥試験を行い, タイムスケジュールを以下の方法で推定した。

- 1) 乾燥時間は, 既報^{1,2)}にある乾燥に伴う含水率減少曲線の近似式(1)を適用し, 減少係数を明らかにすることで推定した。
- 2) 材種区分が同じ製材で断面寸法が異なる場合には, 乾燥時間を「表面積/体積」と減少係数の関係

から任意な断面寸法に相当する減少係数に補間することで推定した。

- 3) 乾燥スケジュールと乾燥時間は, 初期含水率がおおむね40~70%の範囲に適用した。この範囲外については初期含水率に応じた修正を試みた。

文 献

- 1) 寺澤眞, 岩下睦: 林業試験場研究報告 No.81, 82-93(1955).
- 2) 信田聡, 中畠厚, 千葉宗昭, 奈良直哉: 林産試月報 392号, 1-9(1984).
- 3) (社)日本木材加工技術協会: “木材乾燥講習会テキスト(平成16年度)”, 2004.
- 4) 近藤佳秀: 林産試だより, 9月号, 4-6(2002).
- 5) 例えば, 北海道立林産試験場: “3層・4層構成集成柱材について”, 2005.
- 6) 例えば, (社)全国木材組合連合会: “樹種別乾燥材生産の技術マニュアル”, 2003.
- 7) 寺澤眞, 筒本卓造: “木材の人工乾燥(改訂版)”, (社)日本木材加工技術協会, 東京, 1995.
- 8) 寺澤眞: “木材乾燥のすべて”, 海青社, 大津, 1994, pp.420-431.
- 9) 信田聡, 奈良直哉: 林産試験場報 2(2), 10-20(1988).

—技術部 製材乾燥科—
(原稿受理: 06.11.9)