

蒸気式乾燥におけるタイムスケジュールの推定 (第2報)

— 検証試験 —

中 篤 厚

土 橋 英 亮

河 原 映

Estimation of a Time Schedule for Kiln Drying (II)

- Drying tests for verification -

Atsushi NAKAJIMA

Hideaki TSUCHIHASHI

Akira KAWAHARA

To verify the estimated time schedules for kiln drying, drying tests were performed for karamatsu (*Larix leptolepis*) sawn timbers. The results were summarized as follows:

- 1) In the estimation of the drying time, the coefficient of the drying rate should be corrected with the MC of all numbers obtained by the practical examinations, because it was influenced by the unevenness of the initial MC and the individual differences of the drying rate.
- 2) The quality (check and warps) of dried timber was greatly influenced by the sawing size and whether the sawn timber had pith or not; therefore it is necessary to choose an optimum drying schedule considering these factors.

key words: drying curve, kiln drying, check
乾燥曲線, 人工乾燥, 割れ

前報¹⁾で推定したタイムスケジュールを検証するため、カラマツ製材を対象にこれに準拠した乾燥試験を行った。得られた結果は、以下のように要約される。

- 1) 乾燥時間の推定精度は初期含水率のバラツキと乾燥速度の個体差による影響が認められたことから、全数の含水率データから乾燥速度減少係数を修正するなどの対応が必要と考えられた。
- 2) 乾燥材の品質 (割れ・狂い) は、材種や木取りによる影響が大きいと考えられ、これらを十分検討し適切な乾燥条件を選択する必要がある。

1. はじめに

本研究は道産カラマツおよびトドマツ製材の蒸気式乾燥において、製材寸法や初期含水率などの初期情報から簡便にタイムスケジュールを推定することを目的としている。前報¹⁾では、タイムスケジュー

ルの推定方法および推定に必要な乾燥速度データを得るための基礎試験について述べた。本報では、推定したタイムスケジュールに準拠して実大の試験材を用いた乾燥試験を行い、推定精度および乾燥材の品質について検証を行った。なお、対象とした樹種

は、トドマツについては既に共同研究²⁾により検証を行ったので、ここではカラマツとした。

2. 実証試験方法

2.1 タイムスケジュールによる乾燥試験

前報¹⁾で推定したタイムスケジュールに準拠して、乾燥の実証試験を行った。試験条件は、樹種、製材寸法、木取り、温度、含水率範囲を組み合わせた無限にある。本報では、乾燥条件の組み合わせから合計13回の実証試験を行った(第1表)。なお、これらの試験では調湿処理を実施しなかった。これは、時間推定の妥当性を検証する上では仕上がり含水率が最も重要な指標になると考えられることから、含水率調整のための調湿処理を省くことにより、試験終了後の含水率を乾燥工程のみのデータとして扱うためである。

2.2 試験材および乾燥装置

乾燥装置(アサヒ動熱製、型式AHX-20S、幅1.6×高さ2.0×奥行4.5m)の公称収容材積は5.6m³であり、試験材のみでは空間が生じ風回りが通常と異なることが考えられたため、空間には板材を挿入し積みの有効容積を確保した。すなわち、積み目の最上下段に板材を1~2段並べ、その間に試験材を高さ方向に等間隔で配置し、積み材の上部には狂い抑制のための重錘(約2.6トン)を載荷した。試験

材は、すべて材長3,650mmの実大材である。また、試験材のなかから、含水率経過を把握するためのサンプル材(材長1.2m)を2本選んだ。サンプル材の選定に当たっては、初期含水率が試験材全体の平均値を下回らないように、あらかじめ全試験材の重量を測定し、これらの中央値(50%)と84%に当たる2本を選び³⁾、含水率の高い方を時間推定のための初期含水率とした。

2.3 含水率測定

乾燥終了後に、全試験材から試験片を採り、全乾法によって含水率を求めた。試験片(長さ約3cm)は、両木口から約40cmを除いた部分から等間隔で5か所採材し、平均値を乾燥後の含水率とした。また、この値と乾燥前後の試験材重量から初期含水率を逆算した。

2.4 品質測定

乾燥材の品質評価のため、割れ・ねじれ・曲がり測定した。割れは四材面についてすべての割れ長さと幅を測定し、「長さ×幅/2」の式で割れ面積を求めた。ねじれは長辺側の二材面(正角材は隣接二材面)について木口両端に角度計を置きその角度差から求め、二材面の平均とした。曲がり材は材長に対する中央矢高を0.5mm単位で測定し、二材面の内、大きい方の値とした。また、狂いの品質判断として針葉樹の構造用製材の日本農林規格を参考に、以下の

第1表 タイムスケジュールによる実証試験(カラマツ)

Table 1. Drying tests for verification of the time schedules for karamatsu.

試験No. Test No.	厚さ×幅 (mm) Thickness×Width	主な木取り With pith or not	試験材数 Number of specimens	温度条件 (範囲 °C) Temperature (range)	初期含水率指定値 (%) Adopted value of initial MC	目標含水率 (%) Target of final MC	推定乾燥時間 (h) Estimated drying time
1	18×120	心去り ^{a)}	143	中温 ^{c)} (70~80)	53	9	21
2	28×114	心去り ^{a)}	54	高温 ^{e)} (100~85)	45	8	51
3	28×114	心去り ^{a)}	54	中温 ^{c)} (75~80)	17	8	43
4	32×130	心去り ^{a)}	120	中高温 ^{d)} (85~90)	59	10	64
5	43×96	心去り ^{a)}	95	中高温 ^{d)} (85)	49	13	80
6	62×110	心去り ^{a)}	54	中高温 ^{d)} (90)	63	12	117
7	75×110	心去り ^{a)}	40	中温 ^{c)} (60~80)	23	9	172
8	90×140	心持ち ^{b)}	28	高温 ^{e)} (115~90)	46	12	137
9	112×112	心去り ^{a)}	32	中高温 ^{d)} (85~90)	54	15	212
10	115×115	心持ち ^{b)}	35	中高温 ^{d)} (90)	42	12	276
11	120×120	心持ち ^{b)}	35	高温 ^{e)} (120~90)	51	15	153
12	115×165	心去り ^{a)}	24	中温 ^{c)} (50~70)	47	15	581
13	130×190	心持ち ^{b)}	20	高温 ^{e)} (130~90)	45	15	184

注) 材長: 3,650mm。試験No.3と7は、天然乾燥後に実施した。

Note) Length: 3,650mm. Tests No.3 and 7: These were examined after air drying.

a) Without pith, b) With pith, c) Conventional temperature, d) Slightly high temperature, e) High temperature.

基準にしたがって等級区分を行った。すなわち構造用IIにおいて、曲がり材長に対する最大矢高が0.2%以下で1級、0.5%以下で2級および3級に規定しており、0.5%を超えるものは格外とした。ねじれについては数値規定がないため、「材幅×sin(ねじれ角度)」を曲がり矢高とみなし、同様に区分した。

3. 結果と考察

3.1 含水率と乾燥経過

仕上がり含水率は試験条件によって一概には言えないが、目標値に対しバラツキが認められる(第2表)。また、平均値は必ずしも目標値に一致せず、改善の余地がうかがえた。例えば、試験No.9の心去り正角材(中高温条件)について考察すると、以下のとおりである。

サンプル材2体の乾燥前の推定含水率は53.5%(A)と47.7%(B)であった。数値の大きいA材の含水率を初期含水率指定値に、仕上がり含水率を15%とした時のタイムスケジュールは、第3表に示すとおりである。ここで推定された乾燥時間は、初期蒸煮13時間を含め212時間となった。サンプル材について予想された含水率経過曲線と実際の乾燥経過を併せて示す(第1図)。乾燥前に推定した初期含水率に対し乾燥後の含水率に基づき算出されたそれは、いずれのサンプル材も1.5ポイントほど高かった。また、

90℃で15時間蒸煮(初期昇温として2時間を加算)した後の含水率は初期含水率より2ポイント程度増加した。これは飽和水蒸気が材表面で凝結したためと考えられる。

初期含水率の高いA材の含水率減少と第3表に示すタイムスケジュールを比べると、温湿度の変更時期は総じて早めであったことがうかがえる。これは推定が実際の乾燥速度に適切に反映されていないためと思われる。その結果、乾燥後の仕上がり含水率は21.1%(A)と20.7%(B)となり、目標値15%より約6ポイント高い含水率であった。

一方、試験材全数の含水率(第2表)は、初期含水率の平均値が48.9%(最小44.2%,最大56.6%),仕上がり含水率の平均値は17.6%(最小13.2%,最大22.1%)と、仕上がり含水率の平均値は目標に対し2.6ポイント高い程度であった。これは、時間推定のため指定した初期含水率に対し試験材の平均値が約5ポイント低いことに起因すると推測できる。

また、B材の初期含水率は49.2%で試験材全数の平均値48.9%とほぼ一致するが、仕上がり含水率では3%の差が生じた。一般に、サンプル材は材長が1m前後の短尺であることなどから、実大材に比べ乾燥速度はやや大きいと考えられるが、B材の乾燥速度は試験材全数に対し緩やかと言える。また、A材とB材の初期含水率は5.5%の差がみられたが、乾燥

第2表 実証試験による含水率(カラマツ)

Table 2. Moisture contents of karamatsu sawn timbers obtained in drying tests for verification.

試験No. Test No.	初期含水率 (%) Initial MC				仕上がり含水率 (%) Final MC				目標含水率 (%) Target of final MC
	最小 Min.	平均 Av.	最大 Max.	標準偏差 S. D.	最小 Min.	平均 Av.	最大 Max.	標準偏差 S. D.	
1	25.0	48.8	104.4	14.98	8.8	11.6	17.2	1.74	9
2	32.6	41.2	54.7	5.47	5.2	7.3	10.5	1.50	8
3	12.7	14.1	15.7	0.66	5.7	7.3	8.4	0.68	8
4	32.3	50.6	96.5	14.71	5.8	9.8	19.4	2.73	10
5	28.7	42.9	63.0	5.99	6.3	11.1	18.2	2.66	13
6	36.0	48.7	67.8	6.60	10.1	15.5	21.2	3.01	12
7	22.5	25.5	31.9	1.94	8.1	10.4	15.3	1.38	9
8	39.3	43.8	57.5	3.60	9.5	13.6	21.2	2.43	12
9	44.2	48.9	56.6	3.58	13.2	17.6	22.1	2.69	15
10	34.1	41.6	52.3	4.86	8.4	11.3	15.3	1.97	12
11	39.3	45.4	55.4	3.41	10.0	14.9	19.0	1.84	15
12	39.3	49.5	65.6	7.49	11.5	14.0	16.7	1.44	15
13	39.3	46.4	51.8	3.47	13.4	16.7	20.0	2.28	15

注) 試験No.3と7は、天然乾燥後に実施した。

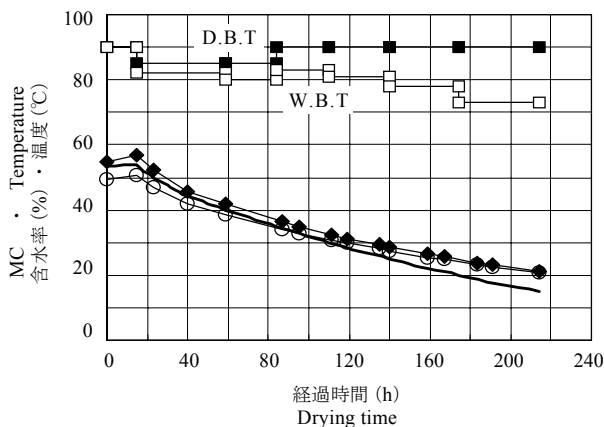
Note) Tests No.3 and 7: These were examined after air drying.

第3表 タイムスケジュール表（カラマツ心去り正角材）
Table 3. Time schedule of kiln drying for karamatsu square timber without pith.

中高温条件 Slightly high temperature			断面寸法 Sawing size 112×112mm	
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) Drying time by estimation
53.5	90	90		13
~40	85	82	0.0130	44
40~35	85	80	0.0095	25
35~30	90	83	0.0102	26
30~25	90	81	0.0106	30
25~20	90	78	0.0116	34
20~15	90	73	0.0127	40
合計時間 : Total time				212

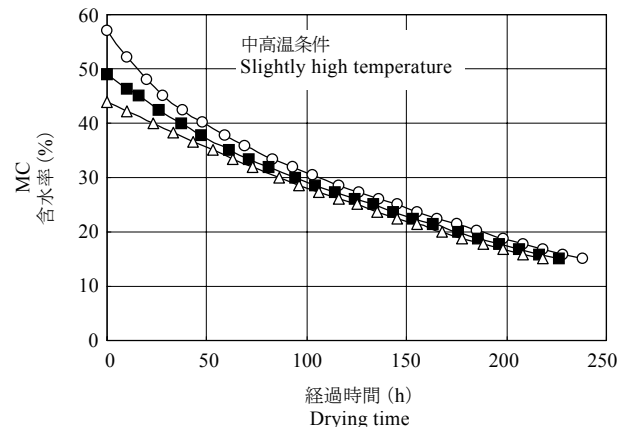
第4表 修正後のタイムスケジュール表（カラマツ心去り正角材）
Table 4. Time schedule after revision of kiln drying for karamatsu square timber without pith.

中高温条件 Slightly high temperature			断面寸法 Sawing size 112×112mm	
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) Drying time by estimation
53.5	90	90		13
~40	85	82	0.0136	44
40~35	85	80	0.0101	24
35~30	90	83	0.0081	33
30~25	90	81	0.0083	39
25~20	90	78	0.0092	43
20~15	90	73	0.0102	50
合計時間 : Total time				246



第1図 カラマツ心去り正角材の乾燥経過
Fig. 1. Drying process of karamatsu square timber without pith.

凡例) ◆: サンプルA材, ○: サンプルB材, —: 予想経過
Legend) ◆: Drying curve of sample A, ○: Drying curve of sample B, —: Estimated line



第2図 乾燥経過の推定（カラマツ心去り正角材）
Fig. 2. Estimation of drying curve for karamatsu square timber without pith.

凡例) ○: 最大初期含水率, ■: 平均, △: 最小
Legend) ○: Max. of initial MC, ■: Av., △: Min.

終了後はほぼ一致しており、乾燥速度は明らかに異なる。

以上のことから、乾燥速度は温湿度や風速などの乾燥環境の影響が無視できないものの、個体差の影響も考慮すべき点の一つと思われた。そこで、今回の実証試験で得られた試験材全数の含水率データを用いることで、タイムスケジュールを以下の方法で修正した。

実測の含水率データを用いた含水率経過曲線を前報¹⁾で示した式(1)から予測し、各ステップで乾燥速度が近似するよう乾燥速度減少係数を改めた。

一例として、既に考察している試験No.9のカラマツ心去り正角材について、修正後のタイムスケジュール(第4表)および乾燥経過予測(第2図)を示す。修正前のタイムスケジュール(第3表)に対し、乾燥時間が延長されており、含水率は十分妥当な値にまで低下することが期待できる。今後、トドマツを含め乾燥データの蓄積を図り、タイムスケジュールの精度向上を図る必要がある。

3.2 乾燥材の品質

3.2.1 割れ

乾燥後に現れた割れは、材厚の薄い板類では少な

く、断面寸法の大きい心持ち材では多い傾向が認められた(第3図)。試験No.3の板材は、その断面の大きさに類似する製材に比べ割れは比較的多かった。これは人工乾燥前に天然乾燥を実施したためである。天然乾燥後の含水率は15%(第2表の試験No.3)程度まで下がっており、既に割れが生じていた。同様の理由で、試験No.7の割れが多かった。また、心去り正角材(試験No.9)の割れはほぼ皆無であるが、適用した温度条件(中高温)が同じで心持ち正角材を対象とした試験No.10は、今回の試験の中で最も多く割れが発生した。また、心持ち正角材でも高温条件を適用した試験No.11(120mm角)は、断面寸

法が試験No.10(115mm角)に比べてやや大きいものの、割れ面積は1/3以下であった。

以上のことから、乾燥材の品質として割れが重視される場合には、天然乾燥は避け、材種や木取りによって適切な温度条件を選択する必要性が認められた。

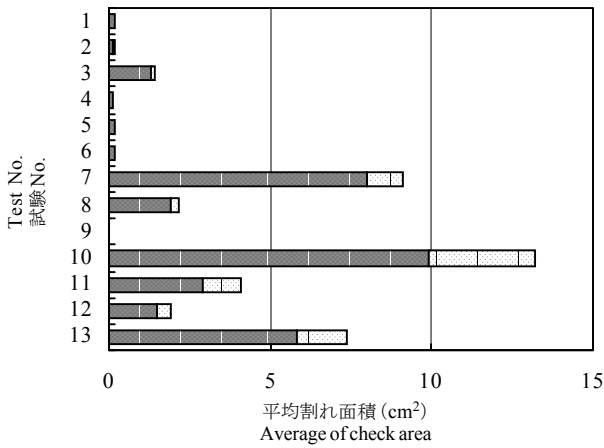
3.2.2 狂い

曲がりとねじれの品等格付け割合を示す(第4図)。曲がりは格外的ものがごくわずかであり、1級格付けがほとんどを占め、品質上の問題は少ないと思われる。ねじれについては、未成熟材の領域が大部分を占める心持ち材で大きい傾向となり、特に試験No.8とNo.10の格外割合は6割を超えた。また、心去り正角材(試験No.9)については1級割合が8割を超えるなど、木取りによる影響が顕著である。

以上を総合すると、割れや狂いは材種や木取りによる影響が大きく、加えて適用する乾燥条件によって発生量が異なる。このため、品質の良い乾燥材を生産するためには、これらを十分検討した上で適切な乾燥条件を選択する必要がある。

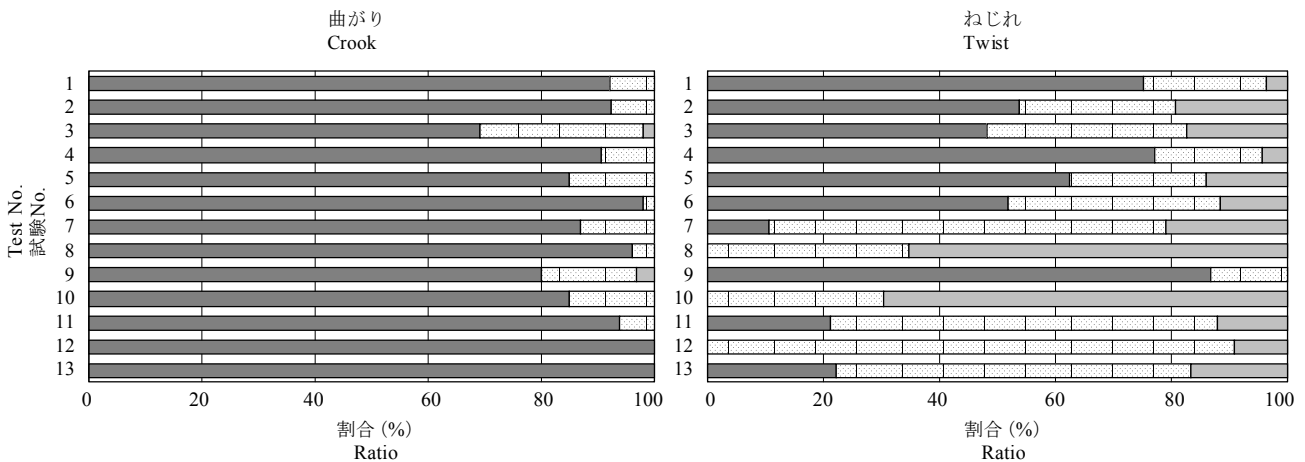
4. まとめ

前報¹⁾で推定したタイムスケジュールを検証するため、カラマツ製材を対象にこれに準拠した乾燥試験を行った。その結果、以下の知見が得られた。



第3図 乾燥後の割れ面積(カラマツ)
Fig. 3. Check area of karamatsu sawn timbers after kiln drying.

凡例) ■: 表面割れ, □: 木口割れ
Legend) ■: Surface check, □: End check



第4図 狂いの品等格付け割合(カラマツ)
Fig. 4. Grading ratio of warps (karamatsu).

凡例) ■: 1級, □: 2・3級, ▨: 格外
Legend) ■: Class 1, □: Class 2 or 3, ▨: Irregular

1) 乾燥時間の推定精度は初期含水率のバラツキと乾燥速度の個体差による影響が認められたことから、全数の含水率データから乾燥速度減少係数を修正するなどの対応が必要と考えられた。

2) 乾燥材の品質（割れ・狂い）は、材種や木取りによる影響が大きいと考えられ、これらを十分検討し適切な乾燥条件を選択する必要がある。

5. おわりに

検証試験で得られた知見を考慮し、適正なタイムスケジュールを検討した。このタイムスケジュールは、温度や木取りおよび材種などの条件を選択することにより、乾燥時間が推定できるため、乾燥材の生産管理にとって有益な情報となり得る。また、この情報を管理者が即座に確認できるように、表計算ソフト上にタイムスケジュールを自動表示させるためのプログラムを作成した⁴⁾。さらに、このプログ

ラムを乾燥装置の制御システムに組み込むことで、簡便な操作による自動制御が可能となる。このシステムは（株）デックシステム（旭川市）が製造しており、今後、カラマツ・トドマツ人工林材の乾燥に活用されることを期待する。

文 献

- 1) 中畠厚，土橋英亮，河原映：林産試験場報 **21** (1)，15-22 (2007)。
- 2) 北海道立林産試験場，（株）デック・システム：“平成14年度共同研究報告書 高温乾燥対応の蒸気式乾燥装置自動制御システムの開発”，2003。
- 3) 斉藤周逸：木材学会誌 **49**(2)，68-77(2003)。
- 4) 中畠厚：林産試だより，5月号(2006)。

—技術部 製材乾燥科—
(原稿受理：06.11.9)