ー研究（Original Article）ー

蒸気式乾燥装置管理システムの開発

中嶌　厚，土橋　英亮，河原　映 [*1]，南出　昇一 [*2]，運上　博子 [*2]

Renovation of Control System for Kiln-Drying

Atsushi NAKAJIMA，Hideaki TSUCHIHASHI，Akira KAWAHARA
Shouichi MINAMIDE，Hiroko UNJYO

We developed a control system for kiln-drying based on a computer-controlled automation system that was developed over 20 years ago. We improved the previous system by adding a stepwise changing drying schedule to the continuously changing type in a conventional system, making it possible for the kind of wood to be chosen on a controller. This is a useful system for effective operation of kiln-drying since the drying process can always be supervised via a remote monitor and be automatically controlled according to the drying schedule.

Key words: drying schedule, moisture content, automatic control
乾燥スケジュール，含水率，自動制御

蒸気式乾燥装置における操作の自動化を目的として 20 余年前に開発された制御システムをベースに，機能性と操作性を考慮した新たな管理システムを開発した。開発では，従来のシステムで採用した連続変化型含水率スケジュールにステップ変化型を追加したことや，樹種選択がコントローラ上で行えるようにするなどの機能拡充を図った。本システムは常時，乾燥経過状況を遠隔でモニタできるほか，含水率スケジュールに従った制御が無人で行えるため，木材乾燥装置の効率的な操作ならびに管理に寄与すると思われる。

1. はじめに

信田らは 1980 年代の中頃，蒸気式木材乾燥装置の自動操作に関する研究に取り組んだ [1-3]。この成果として，ロードセルを応用した含水率センサとこれを用いた乾燥装置の制御システムを開発した。このシステム（**第 1 図**）は操作性・機能性などの点から多くの支持を得て，数十社の製材工場等に導入された。しかし，稼働してから 20 余年経過した今日，機械装置の老朽化に伴う不具合発生が増加しており，特に，制御機能の中枢となるコントローラが正常動作しないケースが頻発している。

第 1 図　従来の自動制御システムの概観
Fig. 1.　Controler for operating drying kiln of currently in use.

そこで，これらの不具合を解消するとともに，従来のシステムをベースに新たな性能と機能を付与した管理システムを開発したので報告する。

2. 従来の制御システム（以下，旧システム）の概要

乾燥操作の自動化を目的とした旧システムの開発では，連続変化型含水率スケジュールの作成，乾燥操作の自動化システムの基本設計および含水率センサとしてロードセルを応用する技術などについて検討した [1-3]。

連続変化型含水率スケジュールとは，木材の含水率低下にしたがって，乾球温度と湿球温度を刻々と変化させる制御方式である。現在主流となっているステップ変化方式に比べ，乾燥時間の短縮の他，小刻みで滑らかな条件変化となるため表面割れが生じやすい材種に対し，割れ抑制の効果が期待できると

されている[4]。

含水率の経過は，装置内の桟積み材近傍に，開発したロードセル式重量計をセットし，サンプル材の重量を計測することで，全乾法による値をリアルタイムで把握できる。乾燥スケジュールは，樹種毎の適正スケジュールを予め磁気カードに記録し，乾燥前にコントローラ付属のカードリーダで読み込むことで自動認識できるようにした。磁気カードには，材厚に応じた温度と湿度条件が記録されており，「標準的」なスケジュールとそれよりも条件が「厳しい」および「緩やか」の 3 水準のスケジュールを状況に応じて選択できるようにした。また，乾燥前の初期設定として，蒸煮，乾燥，調湿，冷却等の工程選択や，含水率センサ上のサンプル材の初期含水率と仕上がり含水率などの初期条件をコントローラ側に与える必要がある。コントローラは乾燥装置からの各種信号を順次取り込み制御する。なお，旧システムでは同時に複数の乾燥装置の制御が可能である。

システムの制御系は，乾燥装置とコントローラを通信ケーブルで繋ぎ，遠隔操作を可能としている。乾燥装置側には，重量と温湿度等の入力信号，制御のための出力信号を受け渡すコントロールユニットが付設されており，これを介して制御される。

旧システムの概要は以上のとおりだが，こうした制御システムの自動化を実現するためには，含水率を常に精度良く測定するセンサ開発が不可欠であった。このセンサは前述のとおりロードセルを用いた重量計（**第 2 図**）である。センサ開発では，乾燥室内の温度変化によってセル出力がドリフトするのを防ぐため，ロードセルを金属製容器内に納め容器内にはシーズヒータを装入した。すなわち，金属製容器およびヒータによってセル自体の温度を乾燥室内温度よりも高温かつ均一に保つことで，セル出力の安定化が図られ測定精度が大きく向上した（特許 1900499）。

第 2 図　含水率（重量）センサ
Fig. 2.　Moisture sensor consisting of a load cell.

3.　旧システムの改良

新たに取り組んだ管理システムの開発では，旧システムの機能および操作性をベースに，以下を検討し改良を図った。

① ステップ変化型乾燥スケジュールの追加
② 乾燥スケジュールの選択方式の変更

先述したように，乾燥スケジュールにおける乾・湿球温度の変化方法は小刻みで滑らかな方が望ましい。旧システムではこれを実現させるため連続変化型のスケジュールを作成したが，開発した管理システムでは，以下を考慮しステップ変化型の追加を行った。

温湿度の段階的変化は一般的なスケジュール式のため管理者にとって馴染みやすく，含水率と温度設定の関係が連続変化に比べ明確で分かりやすい。このことは，例えば乾燥途中で制御トラブルが発生した場合，ステップ変化型の方が温湿度が定値制御のため状況把握が迅速に行えることから，適切に対処できると思われる。また，定値制御のニーズが比較的多いことも理由の一つである。

なお，新たな管理システムでは，連続変化型かステップ変化型を選択できるようにした。

3.1　ステップ変化型スケジュールの検討

ステップ変化型スケジュールについては既にその基本形が確立されている[5]。この方法は国産樹種への適用や，温度変化範囲を 5℃単位とするなどした修正版が広く国内で利用されているため，これを参考に以下の 2 項目についてプログラムした。

3.1.1　乾球温度

樹種によって収縮や割れやすさ，狂いやすさなどの乾燥特性が異なる。このため，乾燥スケジュールでは初期温度と末期温度，および乾燥中の温度変化等が標準条件として樹種別に示されている。具体的には，乾球温度区分として 14 区分（T1 ～ T14）され，樹種と材厚ごとに割り当てられる。材厚は旧システムを参考に，厚さ 39mm 未満，39 ～ 60mm 未満，

60 ～ 90mm 未満，90mm 以上の 4 区分とした。

一例を挙げれば次のとおりである。材厚 35mm のミズナラでは温度区分 T4 となり，初期温度が 45℃，末期温度は 80℃となる。温度変化は含水率 30％までは初期温度が維持され，それ以降は順次，含水率 5％低下毎に 5℃ずつ温度を上昇させる。さらに，含水率 15％以下では，割れなどの損傷に対し安全な状態と考えられるため，乾燥時間の短縮を優先し，末期温度を適用する（**第 1 表**）。

第 1 表　ミズナラ 35mm 厚材の含水率スケジュール
Table 1.　Drying schedule for mizunara（*Quercus crispula*）board.

工程 （含水率%） Process(moisture content)	乾球温度(℃) Dry bulb temp.	湿球温度(℃) Wet bulb temp.
75～40	45.0	42.0
40～35	45.0	41.0
35～30	45.0	39.0
30～25	50.0	39.0
25～20	55.0	35.0
20～15	60.0	32.0
15～8	80.0	52.0
イコーライジング Equalizing	80.0	64.0
コンディショニング Conditioning	85.0	79.0

注）初期含水率75%，仕上がり含水率8%
Note) Initial MC: 75%, Final MC: 8%

3.1.2　乾湿球温度差

湿度スケジュールは，広葉樹と針葉樹別に乾湿球温度差を 8 区分し，初期含水率に対応する含水率段階と乾湿球温度差との組合せとした。

例えば，材厚 35mm のミズナラの場合（第 1 表），乾湿球温度差の区分は 3 であり，仮に初期含水率を 75％とすると，含水率 40％までは乾湿球温度差 3℃，含水率 40 ～ 35％は 4℃差と順次変化させていき，含水率 20％以下の 28℃差まで段階的に低湿化されていく。

3.2　乾燥スケジュールの選択方式の変更

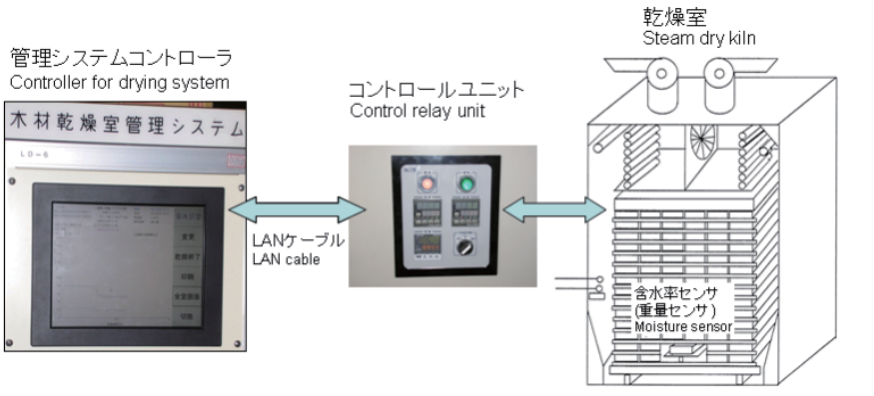
旧システムでは，コントローラ付属の磁気カードリーダの老朽化に起因するデータ読出し不能が頻発するようになった。そこで，新たなシステムではコントローラ上に樹種選択機能を設け，乾燥スケジュールを提示する方式に変更した。システムに登録した樹種は，針葉樹 26 種類，広葉樹 43 種類である。なお，登録されていない樹種についても簡易に追加登録できる機能を設けた。

4.　管理システムの概要

本管理システムでは，乾燥装置に付設のコントロールユニットを LAN ケーブル（旧システムは光ファイバーケーブル）で繋ぎ，温度等センサ情報を取り込みながら制御プログラムに基づき温湿度制御信号を乾燥装置側へ返す方式で，複数の装置を遠隔操作で同時に管理できるなど，旧システムの基本性能を継承しながら機能性と操作性の改善を図った。主な改良点は前述（3.）の 2 点であるが，その他，インターネット回線を介して自宅など外部から乾燥経過を監視できたり，条件の変更などにも簡易な操作で対応できるようにした（**第 3 図**）。

また，含水率センサを用いた自動制御以外にも，温湿度の定値制御やタイムスケジュール方式[6)]による制御も可能とした。

さらに乾燥の開始直前での乾燥スケジュールの確認の際に温度等の条件変更ができるほか，乾燥中でもステップ変更が可能となるなど，旧システムにはなかった操作性・機能性の拡充を図った。



第 3 図　管理システムの構成
Fig. 3.　Schematic diagram of the control system for operating kiln-drying.

5. 管理システムによる乾燥試験

管理システムを収容材積約 3m^3 の蒸気式乾燥装置に接続し，動作確認と性能試験を以下の方法で実施した。

5.1 試験方法

試験にはヤチダモの板目材を用いた。制御方法は，連続変化型とステップ変化型を各 1 回とした。連続変化型に供試した試験材は製材寸法 10 × 110× 2,400mm を 82 枚，ステップ変化型には 30×110× 2,400mm を 84 枚用い，常法によって桟積みを行い乾燥装置内に収容した。含水率経過は 2 枚のサンプル材（材長 1m）の重量変化から推定した。サンプル材は乾燥前に試験材全数の重量を測定し，中央値および 84%に相当する 2 枚を選び，中央値の材を含水率センサ用に，もう一方は乾燥途中に適宜取り出し重量を測定した。なお，サンプル材は短尺のため，木口からの水分蒸発が無視できないことから両木口をコーキング剤でシールした。

5.1.1 連続変化型による乾燥スケジュール

第 2 表に示す初期条件をシステム入力することで，含水率スケジュールが表示される（**第 3 表**：途中省略)。連続変化のため含水率が 0.1%低下するごとに乾球温度，湿球温度が以下の条件で小刻みに変化する。すなわち，乾球温度が上昇を始める含水率は 32.5%で，含水率 12.5%以下では末期温度 80℃となる。また，サンプル材の初期含水率は 69.8%であり，乾湿球温度差が変化し始める含水率は 42.5%，最大差（28℃）となる含水率は 17.5%以降となる。

第 2 表　初期条件

Table 2.　Initialization of drying conditions.

樹種 A kind of tree	ヤチダモ *Fraxinus mandshurica*
材厚 Thickness	10mm
初期重量 Initial weight of sample lumber	1330g
初期含水率 Initial moisture content	69．8%
仕上がり含水率 Final moisture content	10%
スケジュール条件 Type of drying schedule	標準 Standard
制御方法 Changing type of temperature	連続変化型 Continuously
工程 Drying process	主乾燥工程のみ Only main drying process

第 3 表　連続変化型含水率スケジュール

Table 3.　Drying schedule of continuously changing type.

重量(g) Weight	含水率(%) MC	乾球温度(℃) DBT	湿球温度(℃) WBT	乾湿球温度差(℃) ⊿T.
1330	69.8	55.0	51.0	4.0
1329	69.7	55.0	51.0	4.0
1329	69.6	55.0	51.0	4.0
1328	69.5	55.0	51.0	4.0
		～		
1116	42.5	55.0	51.0	4.0
1116	42.4	55.0	51.0	4.0
1115	42.3	55.0	50.9	4.1
1114	42.2	55.0	50.9	4.1
		～		
1038	32.5	55.0	46.3	8.7
1037	32.4	55.1	46.3	8.8
1036	32.3	55.2	46.3	8.8
1036	32.2	55.3	46.4	8.9
		～		
922	17.7	72.6	45.0	27.6
921	17.6	72.7	44.9	27.8
921	17.5	72.8	44.8	28.0
920	17.4	73.0	45.0	28.0
		～		
883	12.7	79.7	51.7	28.0
882	12.6	79.8	51.8	28.0
881	12.5	80.0	52.0	28.0
881	12.4	80.0	52.0	28.0
		～		
864	10.3	80.0	52.0	28.0
863	10.2	80.0	52.0	28.0
863	10.1	80.0	52.0	28.0
862	10.0	80.0	52.0	28.0

MC:Moisture content,　DBT:Dry bulb temperature,
WBT:Wet bulb temperature,　⊿T:DBT−WBT

5.1.2 ステップ変化型による試験スケジュール

初期条件を**第 4 表**に示す。初期設定により**第 5 表**の含水率スケジュールが表示される。

ここでは，蒸煮・乾燥・冷却工程のほかイコーライジングとコンディショニング工程（調湿工程）を選択しているが，調湿工程では仕上がり含水率に応

第 4 表　初期条件

Table 4.　Initialization of drying conditions.

樹種 A kind of tree	ヤチダモ *Fraxinus mandshurica*
材厚 Thickness	30mm
初期重量 Initial weight of sample lumber	3750g
初期含水率 Initial moisture content	84．2%
仕上がり含水率 Final moisture content	10%
スケジュール条件 Type of drying schedule	標準 Standard
制御方法 Changing type of temperature	ステップ変化型 Conventional type
工程 Drying process	蒸煮・乾燥・イコーライジング・コンディショニング・冷却 Steaming・Main drying・Equalizing・Conditioning・Cooling

第 5 表　ステップ変化型含水率スケジュール
Table 5.　Drying schedule of conventional type.

工程（含水率%） Process(moisture content)	乾球温度(℃) Dry bulb temp.	湿球温度(℃) Wet bulb temp.
蒸煮 Steaming	65.0	65.0
84.2～50	55.0	51.0
50～40	55.0	49.5
40～35	55.0	46.5
35～30	55.0	41.0
30～25	60.0	38.0
25～20	65.0	37.0
20～15	70.0	42.0
15～10	80.0	52.0
イコーライジング Equalizing	80.0	69.0
コンディショニング Conditioning	85.0	81.0

じた乾湿球温度と材厚を加味して便宜的に以下の式で処理時間を求めた。

・イコーライジング工程

処理時間（h）＝ 材厚 mm ×仕上がり含水率%／ 17

・コンディショニング工程

処理時間（h）＝ 材厚 mm × 0.4（広葉樹）

同上　　＝ 材厚 mm × 0.25（針葉樹）

但し 24 時間を上限とする。

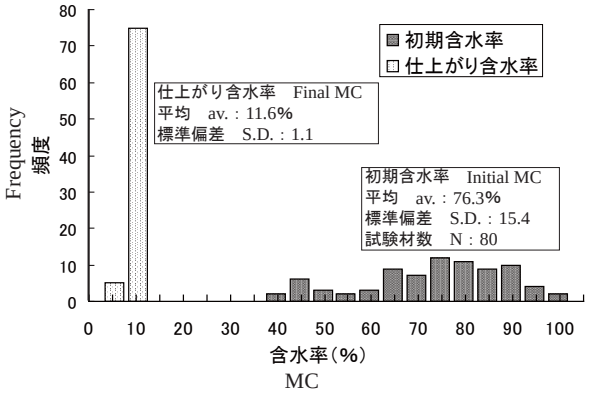
5.2　結果と考察

5.2.1　連続変化型による乾燥試験

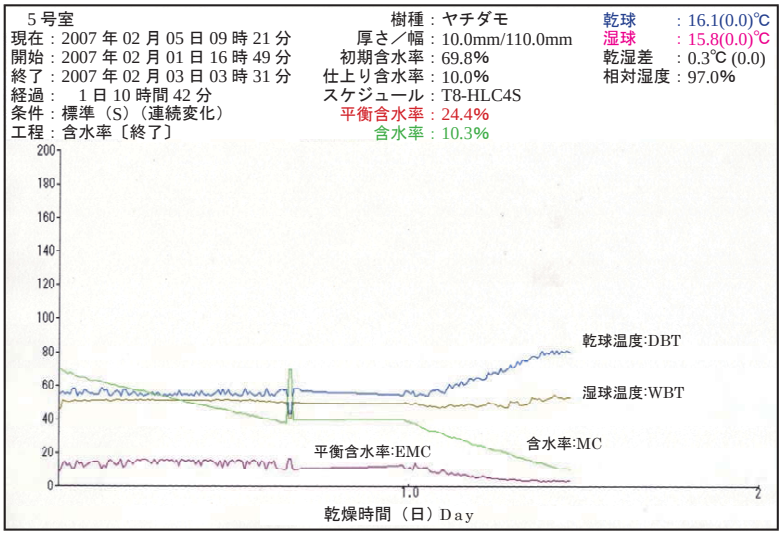
第 4 図に乾燥経過のモニタ状況を示す。この試験では，乾燥開始から約 16 時間経過し含水率約 40%の時点で制御異常が発生した。この原因は，システム側の問題による通信エラーと判明し，異常発生から約 8 時間後に正常復帰できた。

温湿度制御は制御異常の時間帯を除き良好であり，含水率 10%までの乾燥時間は，約 27 時間（制御異常を除く）であった。

第 5 図に初期含水率と仕上がり含水率のヒストグラムを示す。初期含水率は 40 ～ 100%まで広く分布しているが，乾燥後の仕上がりは平均 11.6%で概ね均一化された。平均値は目標含水率の 10%に対しやや高めであるが，イコーライジング処理を実施していないことから妥当な結果と考えられる。また，乾燥材の品質評価として割れと狂いを目視観察したところ，割れは極めて軽微で，狂いは板目材のため幅ぞりが生じたがその程度は予想範囲であり，問題のない仕上がり状態であった。



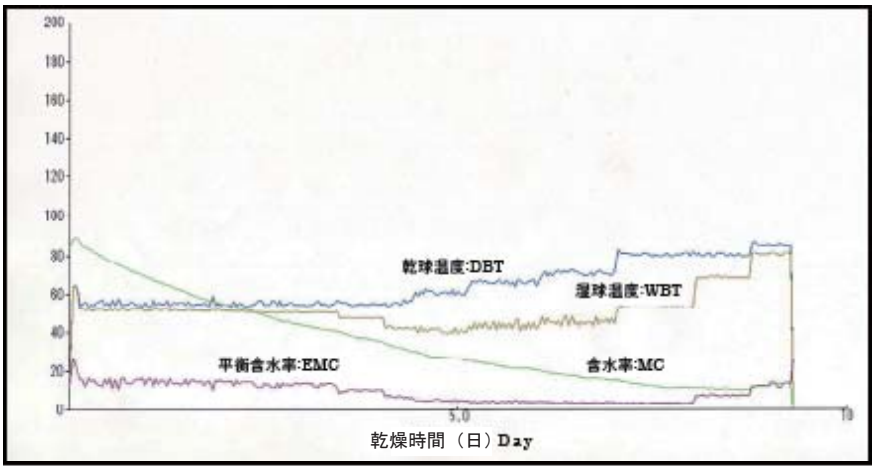
第 5 図　乾燥前後の含水率分布
Fig. 5.　Histogram of moisture contents before and after kiln-drying.



第 4 図　乾燥経過モニタ（連続変化型）
Fig.4.　The monitor display for the continuously changing drying process.

5.2.2　ステップ変化型による乾燥試験

ステップ変化による乾燥経過のモニタ状況を**第 6 図**に示す。含水率約 10%までの乾燥時間は，調湿処理工程を含め 223 時間であった。試験中の制御は正常であったが，含水率 30 ～ 15%の間で湿球温度がやや不安定に推移する状況が観察された。これは，この間の相対湿度が 20%前後と低く，外気湿度との関係で低湿化が困難な状況にあったと考えられる。この場合，装置内湿度を低下させるのに排気と吸気が休止することなく連続動作するため，エネルギーロスが生じる。



第 6 図　乾燥経過モニタ（ステップ変化型）
Fig. 6.　The monitor display for the conventional-type drying process.

また，材中心部と表層部の含水率の差は 1%以下であり，ほぼ均一な水分状態であった。

なお，木口割れが全試験材の 1/4 に発生したが，その程度はいずれも軽微で利用上の問題はないと思われた。

6. おわりに

従来の蒸気式木材乾燥装置の自動制御システムをベースに，機能性と操作性の向上を目的として，新たな管理システムを開発した。

開発では，従来の温湿度制御の連続変化型にステップ変化型を加えたことや，樹種選択がコントローラ上で行えるようにしたことなど，機能拡充を図った。

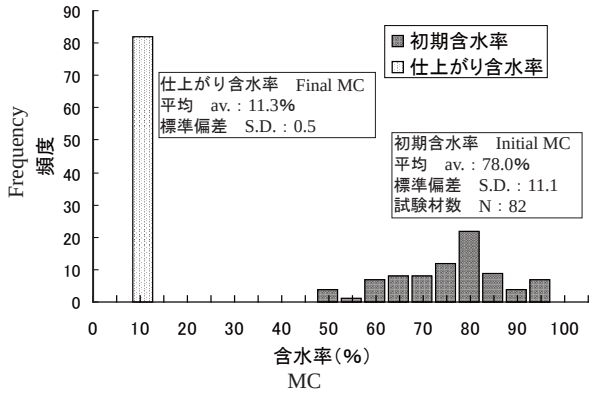
開発した管理システムによる乾燥試験では，通信障害や湿度制御に係る課題が生じたが，前者は解消し，後者についても解決の方策が提示できた。

また本システムは，常時，含水率や温湿度などの乾燥経過が遠隔でモニタできるほか，含水率スケジュールに従った制御が無人で行えるため，木材乾燥装置の効率的な管理に役立つものと思われる。

こうした状態を回避する対策としては，含水率スケジュールの見直しや除湿機能の強化，あるいは外気雰囲気に応じて吸排気作動が最小となる湿度制御をプログラムすることなどが考えられる。

初期含水率と仕上がり含水率のヒストグラムを**第 7 図**に示す。初期含水率およびその分布範囲は先述の 10mm 厚材とほぼ同様である。また，仕上がり含水率の平均値は目標よりやや高めであるが，最小値 10.6%，最大値 13.0%とほぼ均一に仕上げることができ，イコーライジング処理による効果が得られたものと考えられる。

コンディショニング処理による応力除去の効果を確かめるため，試験材から 5 枚抜き取り，5 分割スライス法で残留歪を測定した。その結果，歪みの範囲は全て± 1/1000mm 以内であったことから，概ね適切なコンディショニング条件であると思われる。



第 7 図　乾燥前後の含水率分布
Fig. 7.　Histogram of moisture contents before and after kiln-drying.

文　献

1）信田聡，千葉宗昭，奈良直哉：林産試験場月報 415（8），1-11（1986）.
2）信田聡, 奈良直哉:林産試場報 2（1）, 1-10（1988）.
3）信田聡，奈良直哉：林産試場報 2（2），10-20（1988）.
4）斉藤周逸：木材学会誌 49（2），68-77（2003）
5）寺沢真，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，pp.90-108.
6）中嶌厚, 土橋英亮, 河原映:林産試験場報 21（1），15-28（2007）.

ー技術部　生産技術グループー
ー *1：北海道後志総合振興局ー
ー *2：（株）デック・システムー
（原稿受理：11.1.17）