

## 省エネ型木材乾燥機における廃熱利用の評価

長瀬 慶紀<sup>1)</sup>・平野 公孝<sup>2)</sup>・菊地 正憲<sup>3)</sup>・弓削 俊夫<sup>4)</sup>

## Estimation of Energy Utilization of Exhaust Heat from Energy Conservation Type of Wood Dryer

Yoshinori NAGASE, Kimitaka HIRANO, Masanori KIKUCHI, Toshio YUGE

## Abstract

To product good quality wood for house construction materials in a short time, wood is dried artificially using a wood dryer. It is necessary for conservation of energy to collect heat in exhaust from the wood dryer. In this study, experiments are carried out using the energy conservation type of wood dryer which collects heat in exhaust. Heat balance in the wood dryer is calculated from the temperatures and the velocities obtained from the experiments. It is found that 16% of the heat energy supplied to the wood dryer is supplied to conditioning rooms. The temperature in the conditioning room is kept 40°C higher than surroundings by the supplied heat. As the result, it is confirmed that the wood dryer which collects heat in exhaust is effective to conservation of energy.

**Keywords:** Wood dryer, Energy conservation, Heat balance, Temperature, Velocity, Measurement

## 1. はじめに

住宅産業において、良質な乾燥木材への需要増加とともに、自然乾燥と比較して短時間で木材を乾燥させることのできる木材乾燥機<sup>1)</sup>の必要性が高まっている。

宮崎県において使用されている木材乾燥機の72%が蒸気加熱式乾燥機であり、その多くは重油を燃料としたボイラを使用している<sup>2)</sup>。そのため、乾燥による燃料のコストを抑える必要があり、蒸気加熱式木材乾燥機の熱効率の向上が望まれる<sup>3)</sup>。また、乾燥機で消費される熱の多くが排気によるものであることから排気された熱を回収する技術が注目されている<sup>4)</sup>。

蒸気加熱式木材乾燥機においてこれまでに行われてきた省エネルギー化のための研究として、乾燥機内の気流の改善<sup>4)</sup>や乾燥機給排気間での熱交換などがあげられるが、エネルギーの有効利用について乾燥システム全体として評価したものはほとんどない。

そこで、本研究は、乾燥機からの排気熱を木材養生庫へ供給するように排気管の改良を行うことによって、これまで大気に捨てていた熱量を回収することにより省エネルギー化を実現するものである。また、乾燥機全体の熱消費を把握するために熱勘定表を作成し、改良による効果の評価したので報告する。

- 1) 機械システム工学科 准教授
- 2) 産学官連携研究員 宮崎大学名誉教授
- 3) 機械システム工学科 教授
- 4) 産学官連携研究員

## 2. 実験装置

本実験で使用した木材乾燥機、養生庫ならびに、木材乾燥機からの排気温度および流速を計測するため以下の装置を用いて実験を行った。

## 2.1 供試木材乾燥機および養生庫

図1に木材乾燥機および養生庫の概略図を、また、主要諸元を表1および表2に示す。

乾燥機は、内容量15m<sup>3</sup>で、蒸気加熱式インターナルファン(IF)型である。また、養生庫は、乾燥機から出された木材を仕上げ乾燥するための装置であり、乾燥機と同じ大きさで2機設置されている。

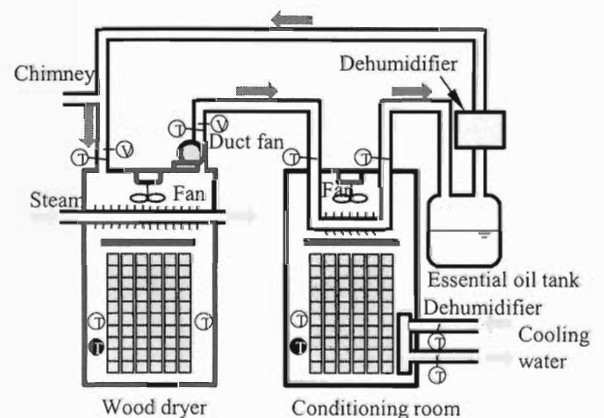


図1. 省エネ型木材乾燥機システム.

表 1. 木材乾燥機の主要諸元.

Outside dimension [mm]	3000W×4500H×3900L
Inside dimension [mm]	2160W×3460H×3650L
Capacity for wood [m <sup>3</sup> ]	15
Power of circulatory fan[kW]	0.75
Number of circulatory fans	2
Power of duct fan [kW]	0.4
Number of duct fans	2

表 2. 木材養生庫の主要諸元.

Outside dimension [mm]	3000W×4500H×3900L
Inside dimension [mm]	2160W×3460H×3650L
Capacity for wood [m <sup>3</sup> ]	15
Power of circulatory fan[kW]	0.75
Number of circulatory fans	2
Length of duct pipe [m]	16
Diameter of duct pipe [m]	0.15

木材乾燥機は、木材から発生した水蒸気を外に排出するため換気を行う。これまでは、外気を取り入れ、水蒸気を含んだ乾燥機内の空気を排気していた。今回の改良により、乾燥機からの排気は、排気管内を通る際に養生庫内の空気と熱交換し、乾燥機へと戻る。乾燥機との熱交換の過程で、潜熱も奪われ結露により排気管内は絶対湿度が低下するため、戻った気体は再び水蒸気を含むことが可能となる。

## 2.2 温度計

木材乾燥機の排気管内の温度計測には、直径 0.25mm、長さ 120mm の K 型シース管熱電対を使用した。シース管の直径が太く長さが短いと外部への伝熱量が多くなり、また、結露も生じるため正しい乾球温度を計測できない。よって、排気管内径は 150mm であるので、管中心部の温度を計測するためこの寸法を選択した。

また、庫内の温度についてはシース管型白金抵抗温度計を用い、湿球温度にはシース管の先端に水を含ませたガーゼを巻いた。

温度計測位置を、図 1 の T で示す。黒塗りのものは湿球温度計である。

## 2.3 流速計

木材乾燥機の排気管出口には、結露しても流速が計測できるペーン式流速計を設置した。ペーン式流速計は、流れ

の中にプロペラを置きその回転速度により流速を求めるものである。直径は 16mm で、センサ部を管中心に置いて計測を行った。

一方、木材乾燥機の排気管戻り口では、管内の湿度が十分に低いため結露の心配がないことから中・高温用熱線流速計を用いて流速計測を行った。

流速計測位置を図 1 において V で示す。

## 3. 実験結果および実験条件

### 3.1 実験方法

乾燥機内に杉の柱材 216 本を台車に載せて搬入する。木乾燥スケジュールに従って、木材を加熱乾燥させるが、木材の割れを防ぐため、まず、水蒸気を加えて加湿加熱し木材の細胞を軟化させる。これを「蒸煮」と呼ぶ。その後、高温に保ったまま木材が軟化している状態で表面を乾燥させることで表面割れを防ぎながら乾燥させる。これを「高温セット」と呼ぶ。表面の乾燥が終わったら、内部が乾燥していくが、内部は表面より温度が伝わりにくく表面に比べ温度が低いため高温のまま乾燥を進めると内部割れが発生してしまうため、温度を下げて長時間乾燥を行う。これを「後期乾燥」と呼ぶ。

また、高温での乾燥において、木材の置かれた位置により乾燥の違いが生じないように、乾燥機内部には図 1 に示すようにファンを用いて循環流を生じさせ、その方向は時間を決めて逆転させている。

乾燥を行うと、木材から出た水蒸気のため、乾燥機内の空気が飽和状態となるため、換気をする必要がある。乾燥機内の湿球温度が設定値を超えた場合には、図 1 に示す乾燥機の外に取り付けた換気用ファンを駆動して換気を行う。換気ファンによって、乾燥機から排出された高温・高湿度の空気は、ダクトを通して養生庫を通り再び乾燥機へと戻る。養生庫内を通るダクトは、直径 150mm のフィン付ステンレス管で長さは 16m のものがそれぞれの養生庫に取り付けてある。このダクトに風を当てて、熱交換を行っている。

予備実験において、養生庫を通して戻ってきた空気は湿度が高かったため、養生庫から乾燥機へ戻る間のダクト内の空気を冷却塔を通して湿度を下げた。このことにより、乾燥機内の湿球温度が下がり、常に駆動をしていた排気ファンの運転が間欠的になり、省エネにも寄与している。一方、冷却塔設置により水蒸気の凝縮が進み、ダクト内の気

表 3. 乾燥スケジュール.

Time from start (h)	Temperature of dry-bulb (°C)	Temperature of wet-bulb (°C)
0 ~ 16	90	90
16 ~ 48	120	90
48 ~ 144	100	70

圧が下がりダクトがつぶれてしまう恐れがあったので、図1に示すようにダクト途中に吸気用の煙突を設けた。

**3.2 乾燥スケジュール** 木材の割れや狂いを防いで短時間で乾燥させるには、乾燥させる木材の種類や形状により最適な温度と湿度の条件を与える必要がある。本実験では、乾燥条件は経過時間を基準として設定した時間スケジュール<sup>6)</sup>を採用し、表3のように決定した。表3に示すように、設定は3つの区間に分かれている。最初の区間は蒸煮であり、次の区間は高温セット、最後の区間は、後期乾燥である。

## 4. 実験結果および考察

乾燥スケジュールに従って実験を行い、その間の温度および流速を計測した。また、それらの計測結果をもとに乾燥機および養生庫を1つのシステムとした木材乾燥装置の熱勘定を作成した。

### 4.1 乾燥庫内温度

乾燥庫内には2個の乾球温度計と1個の湿球温度計が設置されている。図2に乾燥庫内の温度経過を示す。乾燥庫内は、循環ファンによって気流が生じており、この気流は木材の乾燥むらを生じないように一定時間ごとに向きが反対方向に変化する。乾燥庫内にある2個の乾球温度計は、木材をはさんで、それぞれ気流の上流と下流となるように乾燥機側壁近くに設置されている。そのため、乾球温度の指示は、上流側で高温の気体が木材等で熱を奪われ下流では温度が下がるので、図2のように気流の向きが変わることに応じて、乾球温度計の指示が交互に変動している。蒸煮、高温セット、後期乾燥のそれぞれの区間の始まりは別として、乾球温度計が上流側に位置するときの温度は、ほぼ表3の設定温度に保たれていることがわかる。

また、湿球温度についても多少の変動はあるものの、ほぼ表3の設定温度に保たれていることがわかる。

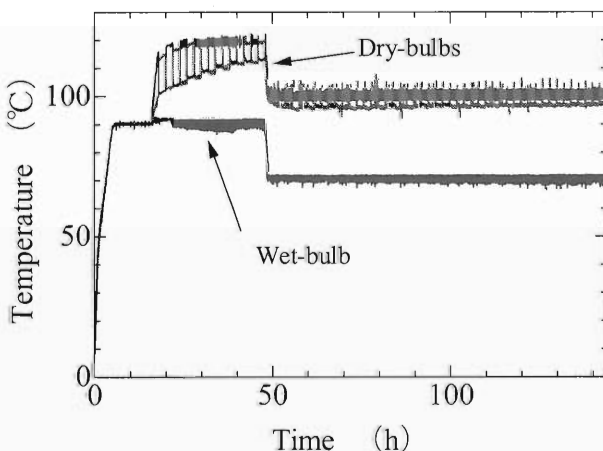


図2. 木材乾燥機内の温度変化。

以上より、乾燥庫内の温度は、表3に示すスケジュール通りになっており、庫内温度を制御するために排気ファン等の機器は正しく動作したことがわかる。

### 4.2 養生庫内温度

図3に養生庫内の湿度および温度の時間経過を示す。なお、実験時の気温は、最低-3.0°C、最高12.7°Cで平均4.0°Cであった。

養生庫内の相対湿度は、除湿器により制御されているためほぼ80%で一定の値を示した。なお、湿度および温度が振動しているのは、乾燥機から間欠的に排気が行われるためである。また、140時間付近で温度および湿度が低下しているのは、確認のため養生庫の扉を開けたためである。

乾燥開始から16時間までの蒸煮の区間では、乾燥機から養生庫へ排気管を通じての熱の供給がないため養生庫内温度は低いままであるが、高温セット以降では、排気管からの熱の供給のため40°C程度に温度が保たれている。

木材の乾燥には、養生庫内温度は多少低めであるが、外気温よりも平均で40°C程度昇温することができ、これまで排気管から捨てていた熱の一部を回収し、木材乾燥に利用することができた。

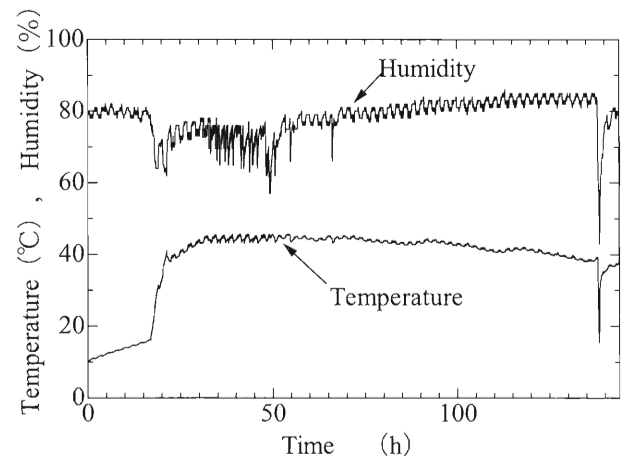


図3. 木材養生庫内の温度および湿度の変化。

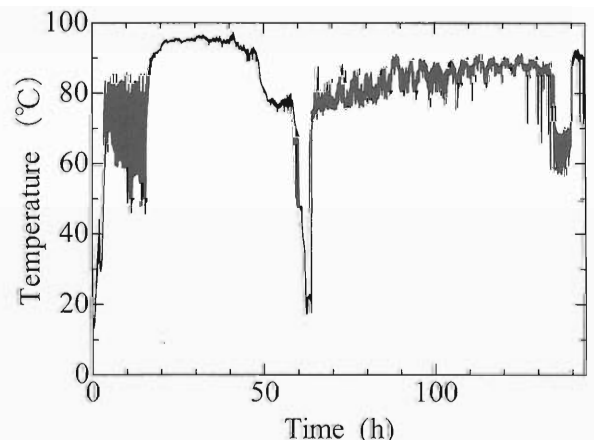


図4. φ1.6 シース管熱電対での木材乾燥機内温度計測結果。

### 4.3 排気管内温度

熱勘定図を作成するために、排気管から失われる熱量を求める必要があり、そのため、排気管内の温度および流速を計測する必要がある。

排気管内の気体は、外気温度にくらべ高温であり湿度も高いため、温度計からの熱損失が大きいと容易に温度計で結露してしまう。温度計表面で結露すると計測される温度は、湿球温度となってしまう。図4は、シース管熱電対の外径が1.6mmのもので計測した結である。図4において、高温セット時では、乾燥機から出口での温度が乾燥機内の乾球温度になっておらず、湿球温度に近い値となり、正しい温度計測ができていないことがわかる。

そのため、温度計からの熱損失をできるだけ低減するように、シース管熱電対の外径をできるだけ小さいものを採用した。本実験では市販のものとしては最も細いφ0.25 mmのK型シース管熱電対を採用し、その結果を図5に示す。図5において温度の高い順に、乾燥機出口、養生庫入口、養生庫出口、乾燥機入口となっている。図5から、乾燥機出口温度が乾燥機内湿球温度よりも高い値を示し、正しく計測が行われていることがわかる。

### 4.4 排気管内流速

ベーン式流速計で計測した乾燥機出口における排気管内流速を図6に、また、熱線流速計により計測した乾燥機入口における流速を図7に示す。両者とも排気が行われているときは、流速が約11 m/sとなっている。

乾燥機からの排気は間欠的に行われるため、排気が行われているときの乾燥機出口における流速と温度を拡大したものを図8に示す。図8より、乾燥機出口および養生庫の出入り口での排気管内温度は、流れが生じているときは乾燥機内の乾球温度に近くなるが、流れが止まると徐々に温度が下がっていくことがわかる。また、乾燥機出口の計測位置は乾燥機本体との間にファンがあるため、ファンが停止すると乾燥機と計測位置は通路が遮断される。しかし、

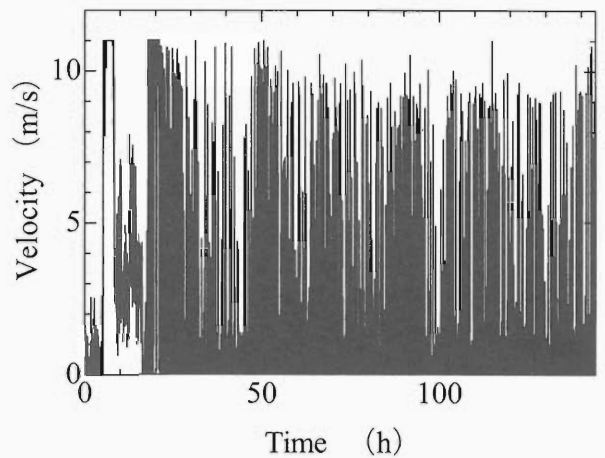


図6. ベーン式流速計による木材乾燥機出口流速計測結果.

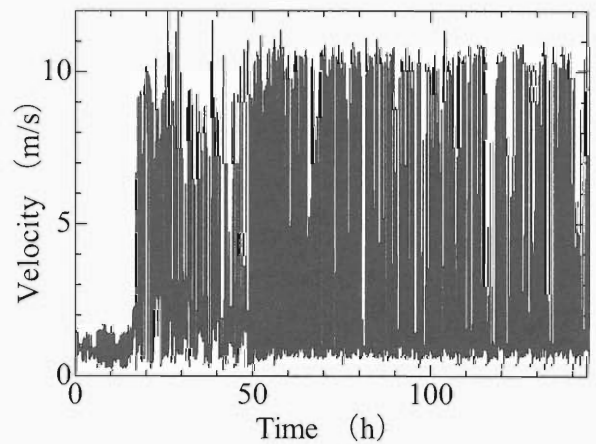


図7. 熱線流速計による木材乾燥機出口流速計測結果.

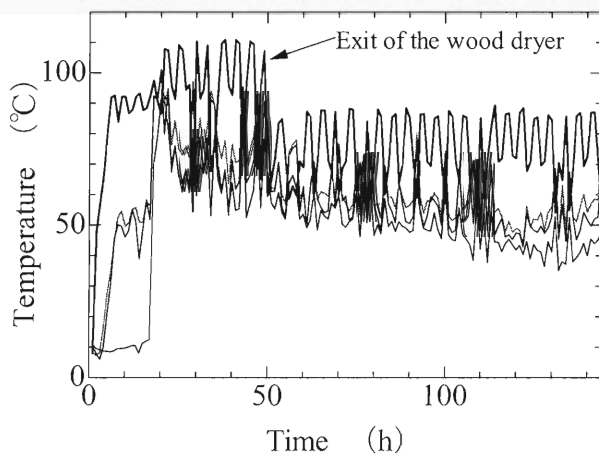


図5. φ0.25シース管熱電対によるダクト内温度計測結果.

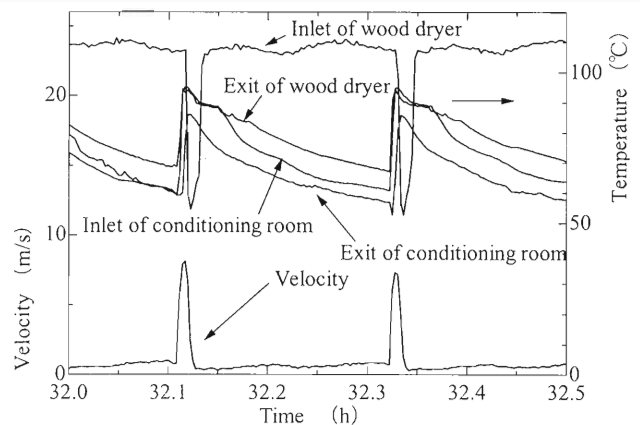


図8. 木材乾燥機出入口の速度と温度の比較.

表4. 木材乾燥全行程における熱勘定.

Condition of heat transfer	Heat value	
	[MJ]	[%]
① Supplied heat energy for wood dryer	14430	100
② Supplied heat energy to conditioning room	2250	16
③ Heat loss through the wall of wood dryer	2020	14
④ Sensible heat for water in wood, wall, door and equipment in wood dryer	1260	9
⑤ Sensible heat for evaporated water in wood	1180	8
⑥ Latent heat for water in wood	5430	38
⑦ Heat loss through drain of wood dryer	140	1
⑧ Heat loss to essential oil tank	750	5
⑨ Returned heat by condensation on the wall of wood dryer	-700	-5
⑩ The others	2100	15

表5. セット時および後期における熱勘定.

Condition	High-temperature setting		Latter drying	
	[MJ]	[%]	[MJ]	[%]
①	4390	100	3190	100
②	1180	23	1070	30
③	450	9	1350	38
④	220	4	0	0
⑤	140	3	0	0
⑥	3590	72	1840	52
⑦	100	2	40	1
⑧	540	11	210	6
⑨	-470	-9	-230	-7
⑩	1790	41	420	13

乾燥機入口の温度計測位置ではダクト内にそのような障害物がないため、ファンが止まったら、乾燥庫内の気体はダクトを逆流して温度計に達する。そのため、ファン停止時では温度が上昇し、ファンが動くとき乾燥機から出て外部

で冷やされた気体が温度計に達するため、温度が低下する。したがって、乾燥機入口温度計は、その他の温度計の指示と逆の温度経過を示している。

#### 4.5 熱勘定

本来、熱勘定は、ボイラの燃料の発熱量を基準として計算すべきであるが、本装置は、ボイラから木材乾燥機までの距離が長くその間に多くの熱損失があるため、乾燥機に供給された熱量を基に計算を行った。

表4に木材乾燥全行程における熱勘定を示す。表中②に示すように、木材乾燥機へ供給された熱量の約16%が養生庫へ供給されたことがわかる。これにより、従来、換気のために捨てられていた高温の気体から熱を回収することができ、省エネルギー化に貢献できることがわかる。なお、⑩の項目には、養生庫以外で排気管からの熱損失や乾燥機内の空気加熱量などが含まれる。

また、表5は、高温セット時と後期乾燥時における熱勘定の計算結果である。項目①～⑩は表5と同様であり、①の乾燥機に供給される熱量を基準として計算している。表5より、高温セット時の時間は短いものより多くの熱を必要とするが、その分、養生庫への供給熱量も多いことがわかる。

#### 5. まとめ

これまで排気していた気体からの熱の一部を熱交換機により回収することができるように木材乾燥機を改良し、回収した熱を木材の養生のために使用する木材乾燥システムを用いて実験を行い、以下の結論を得た。

(1) シース管温度計の径がφ0.25mmの小さなものを使用することで、乾球温度を計測することが可能になった。またペーン式風速計および熱線流速計を用いることで排気管内流速を計測することができた。

(2) 木材の全乾燥工程において、乾燥機に供給された熱量の約16%を養生庫に供給することができた。このことにより、養生庫の室内温度を外気温度よりも約40℃高めることができた。

よって、これまで排気として捨てていた熱量を回収することができ、木材乾燥における省エネルギー化を実現することができた。

#### 謝辞

本研究の一部は、農林水産省新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「新しい木材乾燥システムによる低コスト化と有用成分の回収」(平成19年度~21年度)による支援を受けた。研究を進めるあたり、実験に協力していただいた平成20年度卒業研究生の榎田雅人氏、西牟田昌吾氏ならびに平成21年度卒業研究生の相本隆明氏、隈本翔太氏に記して感謝の意を表す。

また、宮崎県木材利用技術センター材料開発部長藤本英人氏ならびに副部長小田久人氏にも協力をいただいた。さらに、実験用の木材乾燥機の開発にあたっては、九州オリンピア工業（株）工場長長友隆氏をはじめ多くの方々のご支援をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 寺澤眞：木材乾燥のすべて，海青社，p.449，2004.
- 2) 小田ほか4名：スギ材の蒸気加熱式乾燥に要する燃料消費量，日本木材加工技術協会第23回年次大会，pp.25-26，2005.
- 3) 黒田尚宏：スギの乾燥－概説，林業技術，No.736，pp.8-13，2003.
- 4) 黒田尚宏：木材の乾燥に関する研究の現状と課題，木材工業 Vol.51，日本木材加工技術協会，pp.10-12，2005.
- 5) 平野ほか3名：小型木材乾燥機の中天井が室内空気の流れに及ぼす影響の数値シミュレーション，木材工業 Vol.63，日本木材加工技術協会，pp.456-462，2008.
- 6) 黒田尚宏：スギ心持ち乾燥のための基礎研究の展開，木材学会誌，Vol.53，No.6，pp.243-253，2007.