

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651067

研究課題名(和文)「水分と熱の並び流れ」原理の応用による国内産杉材の低温乾燥と環境負荷低減

研究課題名(英文) Low Temperature Drying of Japanese Cedar by a Principle of the Same Direction Transfer of Heat and Moisture and Its Effect on the Reduction of Environmental Burden

研究代表者

谷口 尚司 (TANIGUCHI, SHOJI)

東北大学・環境科学研究科・教授

研究者番号：00111253

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、杉材の組織異方性を考慮し、且つ「水分と熱の並び流れ」の原理に従った低温乾燥特性を実験的・理論的に検討した。杉の板材を一定の温度勾配の中で一端から乾燥させ、木材組織方向および水分の移動方向によって、乾燥速度と乾燥収縮が大きく変化することを明らかにした。水分と熱を同じ方向に移動させると、含水率および収縮率の場所による差異の小さい乾燥が可能になることを見出すとともに、その結果を蒸発と凝縮を伴う水蒸気の拡散モデルによって再現することに成功した。最後に乾燥後の杉材中の精油成分の含有率が乾燥温度で異なることを示した。

研究成果の概要(英文)：The characteristics of low temperature wood drying has been investigated taking in to account the structural anisotropy of cedar lumber and the principle of the same direction transfer of heat and moisture. Considerable changes in drying rate and drying shrinkage with the direction of moisture transfer and the texture of wood were observed in the experiment of one-directional drying under a constant temperature gradient. In the case of the same direction transfer of heat and moisture, small local difference was found in moisture content and drying shrinkage, of which results were successfully reproduced by a moisture diffusion model including vaporization and condensation of water. Finally, it was shown that the content of oil in wood was changed with the drying temperature.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境技術・環境材料

キーワード：木材乾燥 低温乾燥 水分と熱の並び流れ 乾燥変形 精油成分 林業再生 CO2排出削減

1. 研究開始当初の背景

戦後の植林事業によって、日本の森林は国土面積の 2/3 に達するまでに拡大した。この森林資源は今後の日本の産業基盤となり得る高いポテンシャルを持っている。しかし、それを牽引するべき日本の林業は、外材に大きく依存してきたため、その基盤が極めて貧弱な状況にある。すなわち、木材搬出に必要な路網の未整備による高額な搬出費用、外材中心の輸送・乾燥・製材加工・販売のシステム、林業に従事する人材の圧倒的な不足、等の深刻な問題に直面している。戦後植林された樹種は圧倒的に杉が多く、これを建材に用いるためには、原木の高い含水率と乾燥による木材の変形や割れなど、杉材特有の問題が克服されねばならない。さらに、密植による不健全な成育環境の下で過剰に放散される杉花粉による健康被害も深刻な社会問題となっている。これらの問題の解決のために新しい乾燥法の開発が有効である。

木材の乾燥は、木材に工業材料と同様の高規格、高信頼性を付与するための重要な工程であり、近年では乾燥速度が速く乾燥変形が小さい高温乾燥が主流になっている。しかし木材内部に細かい割れが導入され、強度を損なうこととともに、高いコストや化石燃料による CO₂ の発生が問題になっている。他にも中温、低温、減圧、高周波など様々な人工乾燥法があるが、乾燥機構に関する科学的解明が遅れているため、乾燥法の優劣や選択の根拠は経験に基づいて判断されている。

最近、杉材の精油成分を保持しながら、比較的速い乾燥速度が得られる特殊な低温乾燥法が注目されている。杉の精油は木肌に美しい艶を与えるとともに、防虫効果をもつ成分や人の感覚に作用する様々な化学成分を含むと言われている。このような精油成分の効果が科学的に解明されれば、建材としての杉材の付加価値が高まるとともに、安価でエネルギー消費の少ない低温乾燥の特徴を活かし、木材生産地の近隣に多数導入することによって、日本の林業に経済優位性を与えることが可能になるだろう。

本研究ではこのような背景において、杉材の低温乾燥に関する研究を行うこととした。

2. 研究の目的

研究代表者はこれまで熱移動・物質移動・流体流動を 3 要素とする移動現象の研究を、金属材料製造分野において 40 年に亘って展開してきたが、「乾燥」は熱と物質（水分）が同時移動する極めて興味深い現象である。窯業分野においては「水分と熱の並び流れ」と呼ばれる乾燥原理があり、欠陥が少なく速い乾燥を可能にする乾燥法として、大型碍子などの乾燥に利用されている。木材の乾燥は、微視的に複雑な組織の中を水と水蒸気が移動する現象であり、粘土の乾燥よりもはるかに複雑と考えられるが、本原理は低温乾燥の特徴を活かすことに繋がると期待される。

杉材は根から水を運ぶ仮道管の集合体と見なすことができるが、仮道管自体は細長い中空の細胞が連なったもので、細胞壁には有縁壁孔（ピット）と呼ばれる水や蒸気を通す蓋の付いた穴がある。このような組織構造を備えるため、木材の乾燥は組織の方向でその速度に大きな差異がある。これに複雑な熱移動の現象が加われば、乾燥現象の解明は極めて困難となる。そこで本研究では、温度場を固定して水分の移動のみを解析の対象とする単純化を行う。すなわち厚みの小さい板材に一定の温度勾配を加えて、水分の移動方向を熱の移動方向と逆方向（Counter）または順方向（Parallel）にすることで「水分と熱の並び流れ」の効果を検討する。また水分の移動に関する単純なモデルによって現象の解析を試みる。さらに乾燥による収縮率を調べ、変形の少ない乾燥法について検討する。最後に各種乾燥法によって、杉材から抽出される成分の変化について検討し、以上をまとめて低温乾燥法の総合的評価を行う。

3. 研究の方法

(1)一定の温度勾配下での乾燥速度の測定

図 1 に実験装置の本体を示した。ステンレス製ブロックの上下端を水冷および電気加熱し、ブロックの高さ方向に一定の温度勾配を形成する。特定の組織方向に切り出した板材（50mm×50mm×3mm）を 2 つのブロックで挟んで、板材の上下端のいずれかに空気を流して乾燥させる。板材は乾燥端以外をラップで包んで、水分移動を一方向に制限した。

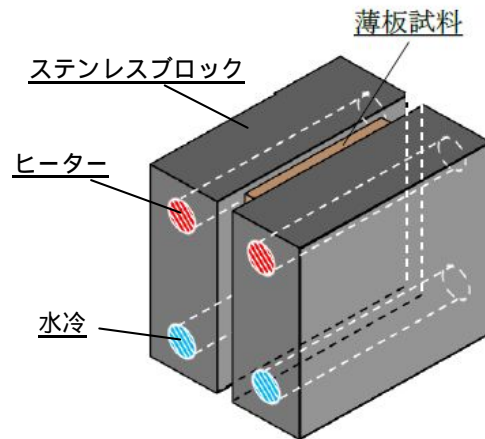


図 1 . 乾燥実験装置本体の概略

乾燥時間は 10 時間とし、乾燥速度は、乾燥面に流した空気中の水分を乾燥剤に吸収させ、その吸収量から求めた。10 時間後に試料を乾燥面に平行に 5 つに切断し、各切片の質量と絶乾質量の差から 5 か所の含水率を算出した。木材試料は心材と辺材のそれぞれについて、長手方向(L)と半径方向(R)の 2 方向を温度勾配に沿わせ、熱および水分の移動が Counter と Parallel の計 8 通りについて乾燥実験を行った。図 2 に上記の組織方向を示した。

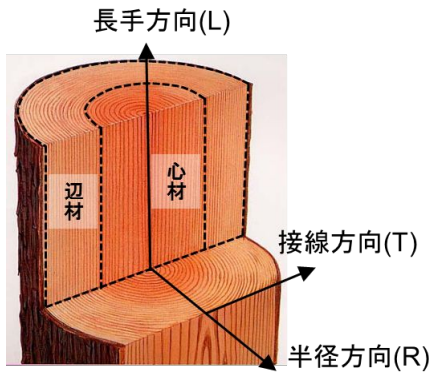


図2 . 木材の構造(心材・辺材)と方向

(2)木材内部の空気透過率の測定

図3に示すような2つのステンレス鋼製の円筒容器を重ね、両容器を隔てる壁面に矩形の窓を開け、絶乾状態にした木材片を挟んだ。実験開始時に一方の容器に空気を注入し、圧力差によって他方の容器へ空気が浸透するようにした。この圧力差の経時変化を精密に測定・記録し、次式で透過速度 \bar{u} と透過率 K を求めた。

$$\bar{u} = \frac{V_0}{aP_0} \frac{d\Delta P}{dt} \quad (1), \quad \bar{u} = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (2)$$

ここに μ は空気の粘度、 ΔP は圧力差、 L は木材の厚みである。装置は恒温槽内に設置し、種々の温度、湿度で透過率を測定した。

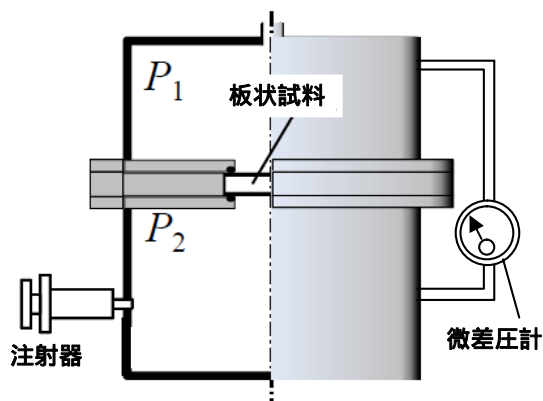


図3 . 木材の気体透過率の測定装置

図4にピットの模式図を示す。ピットには繊維質のマルゴで支持されたツールズという蓋が付いており、その開閉によって水分移動が制御される。そこで、1つのピットを通過する空気の透過率を流れの数値計算により求め、杉材の3方向の透過率のデータから、仮道管細胞一つ当たりの開口ピット数を推算した。ピットは顕微鏡観察から孔径 $5\mu\text{m}$ 、壁厚 $2.5\mu\text{m}$ 、ツールズ径 $5.6\mu\text{m}$ とし、流れは定常・軸対称とした。

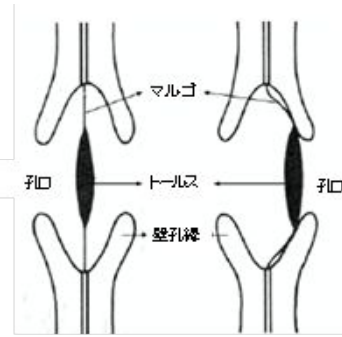


図4 . 有縁壁孔の構造

(3)乾燥過程のシミュレーション

水分移動がL方向の場合について、仮道管内の水分の凝縮と蒸発を伴う水蒸気の拡散過程を再現するシミュレーションを行った。基礎式は(3)式の拡散方程式であり、差分セルごとに定めた温度について、含水率と湿度の平衡関係を参照した。

$$\frac{\partial W_g}{\partial t} = D_{eq} \frac{\partial^2 W_g}{\partial x^2} \quad (3)$$

ここに W_g は気相中の水の濃度、 D_{eq} は有効拡散係数、 t は時間、 x は距離である。

(4)乾燥収縮率の測定

厚さ 3mm の心材と辺材を乾燥機内で乾燥し、含水率と収縮率の関係を調べた。測定は乾燥による重量減少とL、R、T方向の寸法変化について行い、前者から算出した含水率と収縮率との関係を検討した。

(5)各種乾燥温度における精油成分の変化

生木、低温乾燥、中温乾燥、高温乾燥のそれぞれの杉材チップから抽出した精油成分を(株)パーキンエルマー・ジャパンに委託して、GC/MSによって分析した。

4 . 研究成果

(1)一定の温度勾配下での乾燥速度の測定

低温部を 25 、高温部を 80 とし、心材と辺材、L方向とR方向、CounterとParallelの各条件で乾燥速度と10時間後の含水率分布を求めた。図5に含水率と乾燥速度との関係を模式的に示した。まずL方向について見ると、含水率が 30% 以下では、CounterとParallelの間に差がなく乾燥速度は $3\%/h$ 程度であるが、含水率が 30% 以上になると、Counterでは含水率の増加とともに急激に増加するのに対して、Parallelでは含水率が 200% 程度まで緩やかに増加している。乾燥速度には心材と辺材の違いはあまり影響していない。一方、R方向の乾燥速度はL方向よりも小さく、CounterとParallelによる違いはない。また心材と辺材の差異も小さい。含水率 30% は遷移飽和点と呼ばれ、木材中の水が自由水として存在する下限に対応する。これ以下の含水率では水は木材組織中に

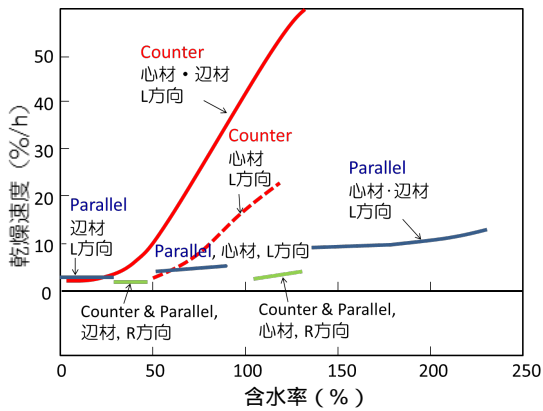


図5．含水率と乾燥速度の関係の整理

固定されるため、乾燥速度は著しく小さくなる。この領域では後述のように、乾燥収縮が始まるため、乾燥速度を大きくするとともに、乾燥収縮を防止することが大切になる。

次に、L方向の乾燥について乾燥面からの距離と乾燥時間 10h での含水率との関係を、辺材について図6に示した。図には Counter と Parallel とを比較して示した。まず Counter について見ると、初め 25%であった含水率が 10h 後には高温の乾燥面近くでは 1.5%、反対側の低温面では初期よりも 10%大きい 35%となっている。一方 Parallel では、初めに 32%の含水率が 10h 後にはどの位置でも初期含水率より低いが、その分布は低温の乾燥面から 15mm で約 18%の最大値を示し、乾燥面で 12%、その反対の高温面では 4%に達している。この現象は、高温の乾燥面近くで気化した蒸気が乾燥面から抜けるとともに、低温の内部に拡散して凝縮するためである。乾燥によって木材中で大きな含水率分布が生まれることは乾燥変形や欠陥の原因となる望ましくない現象である。なお、この現象は他の条件（心材、R方向）でも一般的に認められた。

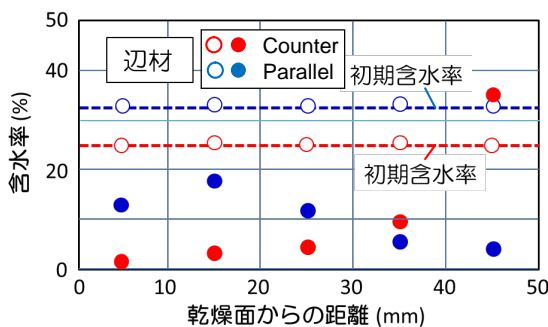


図6．木材内の含水率分布

(2)木材内部の空気透過率の測定

木材のR、T、Lの3方向、温度 20、40、80 の3通り、湿度 0%と 100%について測定した透過率は、温度及び湿度に対する明確な依存性は認められなかった。木材試料の透過率が開口したピット数で決まるのであれば、温度および湿度はピットの開閉には関係しないことになる。各温度および湿度の条件で得られた透過率の測定結果を平均したものを表1に示した。

表1．杉材の透過率

部位	方向/板厚	透過率 K/m^2
心材	R/5mm	6.97×10^{-15}
	T/10mm	3.79×10^{-14}
	L/150mm	1.07×10^{-12}
辺材	R/10mm	7.69×10^{-14}
	T/10mm	5.17×10^{-14}

図5の乾燥実験では、低含水率における乾燥速度はL方向とR方向の間で大きな差はなかった。これより、低含水率における乾燥に対して、木材内部の圧力差による水蒸気の強制移動は主要な機構にはならないと予想される。一方、高含水率においてL方向がR方向よりも乾燥速度が速くなるのは、圧力差による水蒸気あるいは水の強制移動が関与している可能性がある。

1つのピットを通過する空気の流速分布を計算によって求め、その結果からピット1つ当たりの透過率を算出し、その値で透過率の実測値を除すことにより、開口ピット数を推算してみた。文献より、仮道管細胞の長さを 35mm とし、細胞 1 個当たりの開口ピット数を推算すると心材の場合に 5.4 個となり、ピット総数の 50~300 個より著しく少ないことが分かった。これは心材に多く含まれる精油成分による閉塞のためと思われる。

(3)乾燥過程のシミュレーション

シミュレーションは図6に示した実験条件で行った。図7(a)、(b)にその結果を示した。

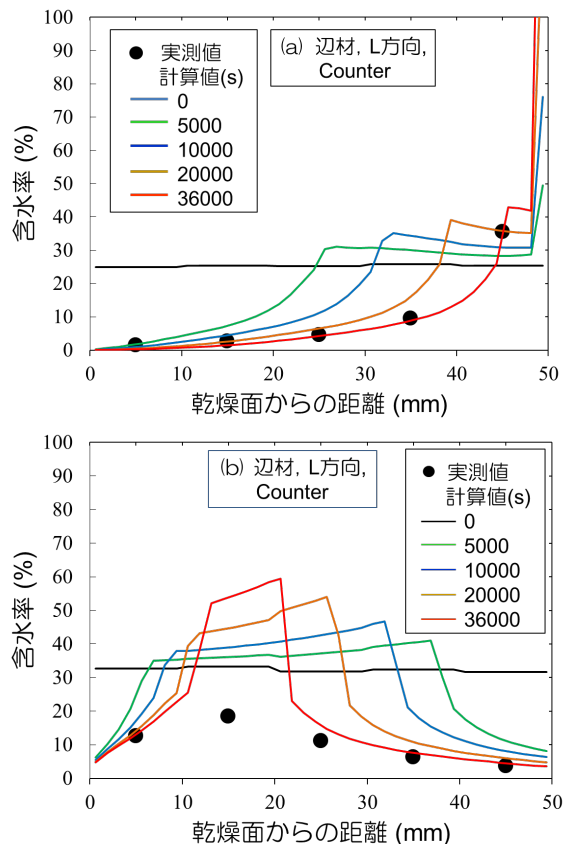


図7．含水率分布の計算値と実測値の比較

図中の実線はシミュレーション結果であるが、含水率が不連続的に大きくなっている箇所があるのは、凝縮した水がその位置に留まるとしたためである。実際には毛管現象により周囲に移動することにより、計算のような含水率の著しい増加は緩和されるはずである。この点を除外すれば、Counter では含水率が乾燥面の反対側の低温面で増加すること、Parallel では中間位置で増加することがいづれもよく再現されている。

(4) 乾燥収縮率の測定

図8に、乾燥器内で測定した厚さ3mmの板材の各方向の乾燥収縮率と含水率との関係を示した。また図9には異なる温度での辺材のT方向の乾燥収縮率と含水率との関係を示した。乾燥収縮率は含水状態と絶乾状態の長さの差を含水状態の長さで除した値である。図8より、乾燥収縮率はT方向、R方向、L方向の順に小さくなっている。また、高含水率では乾燥収縮率に変化がなく(収縮せず)ある含水率を下回ると収縮し始めることが分かる。一般に木材中の水分は、木材組織に固定された結合水と、仮道管などにある自由水の2つの状態で存在するが、ある含水率以下になると後者は枯渇して前者のみになる。この含水率は繊維飽和点と呼ばれるが、図8の収縮が起きている含水率において、木材中の水は結合水のみと考えられる。

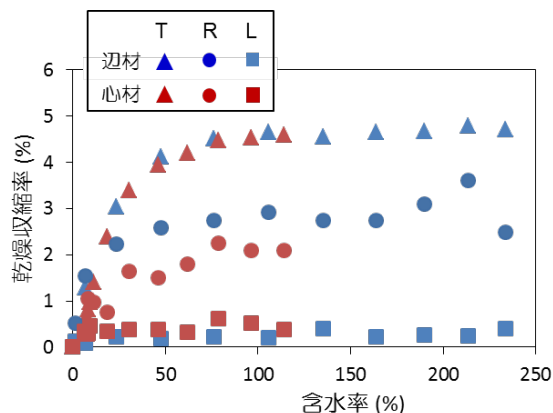


図8．乾燥収縮率と含水率との関係

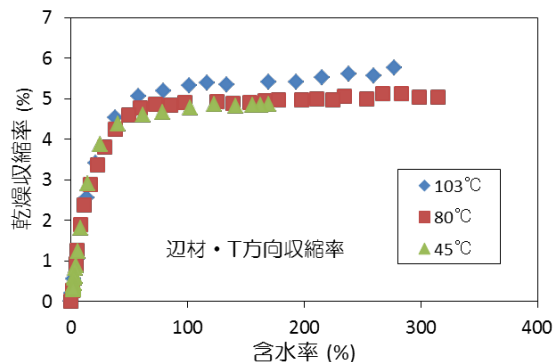


図9．乾燥収縮率の温度依存性

一方、図9によれば、乾燥収縮率の温度依存性は小さく、収縮率自体は乾燥速度の大きい高温でも、乾燥速度の小さい低温でも差異

はないことが分かる。以上の知見を総合すると、以下ようになる。

乾燥収縮が起きるのは含水率が繊維飽和点以下になってからであり、その含水率は本実験では50%程度で、収縮が起きるのはT方向が最も大きい。通常のCounter乾燥では表層から内部に向かって繊維飽和点以下になっていくため、大きな引張り応力が蓄積して縦割れが起きる。この傾向は乾燥速度を小さくすれば緩和されるものと期待される。すなわち、小さな乾燥速度の下では材料内の含水率に大きな差ができないために、局所的な収縮が避けられると考えられる。Parallel乾燥ではその傾向は更に顕著になるため、Counterよりも応力の発生や変形は小さくなるものと考えられる。

(5) 各種乾燥温度における精油成分の変化

検出された46種類の精油成分の乾燥温度による差異を調査したところ、防虫成分であるアセトアルデヒドは高温乾燥材を除く材から検出され、芳香成分であるプロパン酸は生木を除く材から検出された。アセトアルデヒドが酸化して生成したと考えられる酢酸と、人体に有害なフルフラールが高温乾燥材で最も多く検出された。

(6) まとめ

以上、木材の乾燥における熱と水分の移動方向(CounterとParallel)、組織方向(L, R, Y)、心材と辺材の条件について、乾燥速度、乾燥途中の含水率分布、ピットを通じた気体透過率、乾燥収縮について調査した。また、各種乾燥条件の精油成分の特徴についても知見を得た。その結果、木材の収縮がない高含水率ではCounter乾燥が優れ、含水率50%以下では木材中の含水率分布が平坦で、収縮による変形が小さいと考えられるParallel乾燥がより優れている。低含水率乾燥では水分移動は水蒸気の拡散と水の蒸発・凝縮で支配され、ピットを通過する気体抵抗の影響は小さい。低温～中温乾燥は有効な精油成分が残留するために乾燥材の付加価値を高めると考えられる。さらに、エネルギー消費の小さい低温乾燥にParallel乾燥を組み合わせた乾燥法が有効であると結論される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 1件)

中屋裕登、和賀春佳、嶋崎真一、谷口尚司：木材乾燥における含有水分の移動現象に関する研究、日本木材学会、2013年3月27日～30日、盛岡市、(2013)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等 なし

6．研究組織

(1)研究代表者

谷口 尚司 (TANIGUCHI, Shoji)
東北大学・大学院環境科学研究科・教授
研究者番号：00111253

(2)研究分担者

清和 研二 (SEIWA, Kenji)
東北大学・大学院・(連合)農学研究科(研
究院)教授
研究者番号：40261474

(3)連携研究者

なし