溶液含浸木材の養生過程における細胞壁への溶質拡散機構の検証: 相対湿度がポリエチレングリコール水溶液含浸木材の膨潤・収縮挙動に 及ぼす影響†

田中 聡一* 三木 恒久** 関 雅子**
重松 一典* 金山 公三***

Mechanism Verification of Solute Diffusion into Cell Walls in Solution Impregnated Wood under Conditioning Process: Effect of Relative Humidity on Swelling and Shrinkage Behavior of Wood Impregnated with an Aqueous Solution of Polyethylene Glycol†

by

Soichi TANAKA*, Tsunehisa MIKI**, Masako SEKI*,
Ichinori SHIGEMATSU* and Kozo KANAYAMA**

To control the amount of solute in cell walls of solution impregnated wood using the conditioning process, the mechanisms of solute diffusion into the cell walls and of solvent evaporation from wood under the process were verified. The effect of relative humidity (RH) on temporal variability of swelling, shrinkage, and mass of wood impregnated with an aqueous solution of polyethylene glycol (PEG1540) was examined. The impregnated wood specimen swelled under the conditioning at the RH over 75%. The specimen was indicated to swell when the amount of the PEG polymers in the cell walls increase in this RH range. On the basis of this indication, the temporal variability of increasing rate of the polymers in the cell walls and of evaporating rate of water from the specimen under the conditioning was well explained by the mechanisms of the solute diffusion and the solvent evaporation, respectively. In the RH range, the increasing amount of the polymers in the cell walls increased with the evaporating amount of the water, which increased with the decrease in the RH. These results were supported by the mechanisms of the solute diffusion and the solvent evaporation, respectively. The diffusion mechanism also supported the effect of the history of the RH on the polymer amount in the cell walls throughout the conditioning and subsequent drying in a vacuum. It was concluded from these findings that the solute diffusion into cell walls is able to be controlled by the surrounding vapor pressure of solvent when the polymers (PEG1540) and water are employed as the solute and solvent, respectively.

Key words:

Wood, Impregnation, Conditioning, Solution, Polyethylene glycol, Diffusion, Cell walls,
Vapor pressure of solvent

1 緒 言

木材は持続可能な天然資源であり、その材料としての利用は、大気中の二酸化炭素の長期に渡る固定に寄与するなどの大きな利点がある。しかしながら、木材は密度・繊維方向のような材質や、強度・ヤング率のような機械的性質のばらつきが大きく、湿度など周囲の水分状態によって変形や生物劣化を起こすこともある。よって木材の利用は、とくに工業製品の品質管理の厳しい今日においては大きく広がらないのが現状である。木材の制御しがたい性質の抑制に有効な方法の一つに、樹脂などの不揮発物質による処理がある。木材の性質は、処理剤の種類の選択によってある程度制御できることが知られているが、木材の細胞壁

に処理剤を注入できなければその効果は期待できない。したがって、処理剤を細胞壁に確実に注入することが極めて重要である。木材への不揮発物質の注入処理は、一般的に以下の2つのプロセスに分けられる。

1. 含浸: 処理剤を溶質とする溶液に木材を浸漬し、減圧(もしくは加圧)し、常圧で一定期間放置して木材に溶液を浸透させる。
2. 養生: 溶液含浸木材を大気中で一定期間放置し、そこから溶媒を蒸発させる。

含浸過程では溶液が細胞内腔と細胞壁に浸透し、養生過程では細胞内腔から細胞壁へ溶質が拡散すると言われてい¹⁾。含浸過程では、一般的に溶媒は分子量が小さい

† 原稿受理 平成26年10月14日 Received Oct. 14, 2014 ©2015 The Society of Materials Science, Japan

* (独)産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味 Materials Res. Inst. For Sustainable Development, Advanced Industrial Sci. and Tech. (AIST), Moriyama-ku, Nagoya, 463-8560.

** 正 会 員 (独)産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味 Materials Res. Inst. For Sustainable Development, Advanced Industrial Sci. and Tech. (AIST), Moriyama-ku, Nagoya, 463-8560.

*** 正 会 員 京都大学 生存圏研究所 循環材料創生分野 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 (元)独産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 Res. Inst. For Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasho, Uji, 611-0011. (Formerly Materials Res. Inst. For Sustainable Development, Advanced Industrial Sci. and Tech. (AIST), Moriyama-ku, Nagoya, 463-8560.)

め細胞壁に早く浸入するが、溶質は分子量が大きい場合が多いため細胞壁への浸入には時間がかかる。したがって、養生過程によって溶質の拡散を促進することができれば、処理効率と精度の向上が期待できるが、この点に着目した研究は少ない。

養生過程における木材中の溶質と溶媒の移動機構を Fig. 1 に示す。木材からの溶媒の蒸発量は、細胞内腔からの量 ($-\Delta n_{C0}$) が細胞壁からの量 ($-\Delta n_{W0}$) と比べて大きいいため、細胞壁と細胞内腔の間には溶媒および溶質の濃度(モル分率)勾配 ($x_{W0} > x_{C0}$ および $x_{W1} > x_{C1}$) が生じる。この濃度勾配を駆動力として、溶質は細胞壁へ ($\Delta n_{W1} = K_1(x_{C1} - x_{W1}) \Delta t$)、溶媒は細胞内腔へ ($\Delta n_{C0} = K_0(x_{W0} - x_{C0}) \Delta t$) それぞれ拡散すると考えられる (Fig. 1)。この機構は Stamm によって提唱された。²⁾ しかしながら、溶媒の蒸発と溶質の移動の関係が明らかでないなど、その検証は不十分であった。

Fig. 1 Mechanism of substance migration in and around wood. n_{C0} , n_{W0} , n_{C1} , n_{W1} , n_W , and n_0 , Numbers of mole of solvent in cell cavity and cell wall, solute in cell cavity and cell wall, sorption site of solvent and solute in cell wall, and total amount of solvent in wood; x_{C0} , x_{W0} , x_{C1} , and x_{W1} , Molar fractions of solvent in cell cavity and cell wall and solute in cell cavity and cell wall; K_0 and K_1 , Equilibrium constants for solvent and solute diffusions; Δn , Variation of n during an infinitesimal time, Δt .

Fig. 2 Mechanism of solvent evaporation from specimen. $-\Delta n_0$, Number of mole of solvent evaporated from specimen during an infinitesimal time, Δt ; P_S , Saturated vapor pressure of solvent; P_A , Vapor pressure of solvent in atmosphere; P_R , Evaporating resistance pressure, K , equilibrium constant.

溶媒の蒸発に関する機構を Fig. 2 に示す。溶媒の蒸発速度 $-\Delta n_0/\Delta t$ は、試料表面の溶媒の飽和蒸気圧 P_S 、大気中の溶媒の蒸気圧 P_A および表面蒸発抵抗圧(溶媒の蒸発を抑制する試料からの力に相当する圧力) P_R に比例すると考えら

れる。 P_S は温度に、 P_A は大気中の溶媒の濃度やその流れ(これらは温度にも依存する)に、 P_R は温度、溶液濃度および試料の木取・寸法・形状などにそれぞれ依存することが予測される。さらに、大気中の温度および溶媒の濃度とその移動は、溶媒の吸着媒や装置(水の場合、それぞれ塩の飽和水溶液や恒温恒湿器)などを用いて制御できる。以上から、Fig. 1 と Fig. 2 の機構に基づき、諸因子の関係を解明できれば、大気中の温度と溶媒の蒸気圧や試料中の溶液濃度などを用いて、細胞壁内の溶質量を制御できる可能性がある。

本研究の最終目的は、溶液含浸木材の養生過程における温度、溶媒の蒸気圧、溶液濃度などが溶質の細胞壁への拡散に及ぼす影響を明らかにすることによって、細胞壁内の溶質量を制御し、含浸・養生処理の効率化・高精度化をはかることである。本報告では、同目的を果たす上で重要な細胞壁への溶質の拡散機構(Fig. 1)と溶媒の蒸発機構(Fig. 2)について検証した。そのために養生過程の溶媒の蒸気圧が溶液含浸木材の膨潤・収縮および質量の時間変化に及ぼす影響を調べた。溶液にはポリエチレングリコール (PEG1540)の水溶液を、溶媒の蒸気圧の指標には相対湿度 (RH) をそれぞれ用いた。RH は、その変化量を条件として振るために、3通りのスケジュールを用意し、各スケジュールで段階的に変化させた。

2 実 験⁴⁾

2・1 試料の準備と PEG 水溶液による含浸

5mm 厚、25 mm 角の木口試料をヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)の角材から連続的に 9 個作製した。試料は、ビーカーに入れてセパラブルフラスコに収め、真空引きし (0.01 MPa)、圧力を保ちながら注入したイオン交換水に浸漬して常圧に戻し、3 週間以上水中で放置したのち、表面の水をキムタオルで拭き取り、質量 m_A と接線方向(T)の寸法 w_A をそれぞれ電子天秤とマイクロメーターで測定した。同試料は温度 20 °C・RH 60 %で約 2 週間養生したのち、105 °C の恒温乾燥器で一定の質量 m_0 (全乾状態)になるまで乾燥させ、T 方向寸法 w_0 および放射(R)方向と繊維(L)方向の寸法を測定し、均等に 3 つのグループ(Group 1~3)に分けた。各グループに関する試料の全乾密度と飽水状態における T 方向の膨潤率($100 \times (w_A - w_0)/w_0$ [%])を Table 1 にまとめた。

Table 1 Oven-dry density and swelling coefficient in water saturated condition for wood specimen of each group.

	Group 1	Group 2	Group 3
Oven density [g/cm ³]	0.279 ± 0.001 ^a	0.277 ± 0.001	0.277 ± 0.001
Coefficient of swelling in T direction in water saturated condition [%]	4.43 ± 0.01	4.38 ± 0.02	4.38 ± 0.04

^a standard deviation

各グループの全乾試料は、ビーカーに入れてセパラブルフラスコに収め、真空引きし (0.01 MPa)、圧力を保ち

ながら注入した 30 mass% の PEG(PEG1540, E.P., Wako) の水溶液に浸漬して常圧に戻し, 9 週間水溶液中で放置した。

2・2 含浸試料の養生

35 °C に設定した恒温恒湿器(MTH-2200, 三洋電機社)の中に, 3 つのミニデシケータ(MD-1, SANPLANTEC 社)を入れ, 塩化カリウム(KCl), 硝酸カリウム(KNO₃), 硫酸カリウム(K₂SO₄)の飽和水溶液を入れたトレーを収めて, 空間の RH をそれぞれ 83, 91, および 97% に調整した。⁵⁾ 2・1 節の各グループの PEG 水溶液含浸試料は, ただちに各ミニデシケータ内の飽和水溶液の直上で養生した。養生を開始してから 2141, 2528, および 2838 h 後に, すべての飽和水溶液を塩化ナトリウム(NaCl), 臭化ナトリウム(NaBr), および塩化リチウム(LiCl)の飽和水溶液に逐次入れ替え, それぞれ RH = 75, 55, および 11% と変化させた。⁵⁾ 各グループの試料周囲の RH のスケジュールを Fig.3 にまとめた。養生を開始してから 0 ~ 3944 h 後の試料の質量 m と T 方向寸法 w を測定した。

Fig.3 Temporal variability of relative humidity (RH) controlled around specimen for each group in the conditioning process. Two-way arrows the ranges of the first, second, third, and fourth terms which compose the conditioning schedule.

養生後の試料は, 五酸化二リン(P₂O₅)を入れた真空乾燥器中で質量が恒量 m_p に達するまで真空減圧乾燥し (0.01MPa), T 方向寸法 w を測定した。

質量および寸法は, 未処理の全乾状態における値および飽水状態の値を用いて, 重量増加率(WPG) $M = 100 \times (m - m_0)/m_0$ [%]および水に対する比膨潤率 $r = (w - w_0)/(w_A - w_0)$ に換算した。

3 結果と考察

3・1 養生中の含浸試料の寸法・質量の時間変化⁴⁾

Fig. 4a に WPG の時間変化を示す。第一期間では WPG の値 M は, すべてのグループで時間とともに減少し, 平衡状態に達した。溶質である PEG1540 は養生温度 35 °C では揮発しないため, WPG の減少は試料から蒸発した水によるものである。第一期間の平衡状態の試料の WPG は, RH に伴い増加した。WPG の値は, 第二期間の平衡状態ですべてのグループでほぼ同じになり, 第三期間以

降では, すべてのグループでほぼ同一の変化を示した。これは, 木材中の水分量が, RH の履歴には影響されず, そのときの RH によって決まることを示唆している。

Fig.4b に T 方向の水に対する比膨潤率の時間変化を示す。比膨潤率 r は, 養生開始時にはほぼ 1 と等しかったが, 第一と第二期間では時間の経過とともに増加した。第三期間以降では r の値は減少した。第二から第三期間では RH は 75 から 55% に減少する (Fig.3) ことから, 試料は RH が 75% 以上の場合に時間経過とともに膨潤することがわかる。また, 第一期間の RH が低いグループほど, 養生の全期間を通じて膨潤が大きかった。第二期間以降では RH がすべてのグループで一致する (Fig.3) ことから, 膨潤は RH の履歴に影響されることがわかる。この原因については, 3・5 節で考察する。

Fig. 4 Temporal variability of a WPG and b relative swelling in tangential (T) direction of impregnated wood for each group in the conditioning process. Bars standard deviations.

3・2 養生中の寸法と PEG 水溶液濃度の関係

養生中および真空減圧乾燥後の試料内の PEG1540 の水溶液濃度と膨潤の関係をわかりやすくするため, その平均的濃度を $u = 100 \times (m_p - m_0)/(m - m_0)$ [%] と見積もり, T 方向の比膨潤率との関係を調べた (Fig. 5)。養生開始時の平均水溶液濃度 u は 27 mass% で, 含浸過程で木材を浸漬した水溶液濃度 30 mass% より低かった。これは, 細胞壁内の一時空隙には, PEG 分子よりも水分子のほうが入

りやすいため、細胞壁内の PEG の割合が周囲の水溶液と比べて低下するためである。T 方向の比膨潤率 r は u の増加に伴い増加し、 $u = 74 \text{ mass\%}$ で最大値をとり、それより高濃度では減少した (Fig. 5)。養生過程では試料内の PEG の量は一定だが、水の量は減少するので、濃度 u の増加に伴い、PEG は細胞壁に浸入し、水は細胞壁から浸出すると考えるのが自然である。したがって $u = 74 \text{ mass\%}$ 付近までは、PEG の浸入が細胞壁の膨潤に及ぼす影響が大きく、それより高濃度では水の浸出が細胞壁の収縮に及ぼす影響のほうが大きかったと考えられる。これは同時に、第一と第二期間 (RH が 75% 以上、つまり $u = 27 \sim 74 \text{ mass\%}$ の領域) では、比膨潤率 r は細胞壁内の PEG 量の増加に伴い増加することを示している。⁹⁾ この示唆を踏まえて、養生の第一と第二期間における比膨潤率 r の時間変化の結果 (Fig. 4b) に立ち返ると、細胞壁における PEG の量は、養生過程で増加し、周囲の RH の履歴に影響されることがわかる。さらに第一期間で、 r の値は平衡に達しなかったことから、細胞壁にはまだ PEG 分子が侵入する余地が残っている可能性があるといえる。

Fig. 5 Relation of relative swelling in T direction to percentage of solution by mass averaged in impregnated wood for each group. Bars standard deviations.

比膨潤率 r は、養生の間 ($u = 27 \sim 89 \text{ mass\%}$) からその後の全乾状態 ($u = 100 \text{ mass\%}$) に至るまで常に 1 より大きかった (Fig. 5)。佐道らは、⁹⁾ 含浸させる PEG1000 の水溶液濃度を、溶液を入れ替えながら上昇させたときの木材の体積の比膨潤率が、水溶液濃度の増加に伴い 0 ~ 40 mass% までは 1 で一定で、40 ~ 70 mass% までわずかに増加し、それより高濃度では減少し、 $u = 80 \text{ mass\%}$ 以上では 1 を大きく下回るとの結果を得ている。養生によって水溶液濃度を上昇させた今回の実験と比較すると、本検討における PEG による木材の膨潤は、佐道ら検討における膨潤と比べて、とくに高濃度領域で顕著に高いことがわかる。これは、養生によって PEG 分子が細胞壁に拡散する効果が大きいことを示している。

3・3 溶媒蒸発機構と溶質拡散機構の検証

溶媒蒸発機構と溶質拡散機構の検証には、水の蒸発量と細胞壁内 PEG 分子の増加量に関する評価の指標が必要である。水の蒸発量は、WPG の減少量 $-\Delta M$ で表すことができる。一方、細胞壁内 PEG 分子の増加量は、3・2 節で得られた示唆に基づくと、第一と第二期間に限り、比膨潤率の変化量 Δr で近似的に表すことができる。本節と次節では、考察の対象を第一と第二期間に限定し、水の蒸発量を $-\Delta M$ 、細胞壁内 PEG 分子の増加量を Δr と表すこととする。

Fig. 6 Temporal variability of a evaporating rate of water (decreasing rate of WPG) and b increasing rate of PEG polymers in cell walls (relative swelling in T direction) at the early stage of the first term in the conditioning process. Bars standard deviations.

第一期間の初期における水の蒸発速度 (単位時間当たりの蒸発量) $-\Delta M/\Delta t$ の時間変化をそれぞれ Fig. 6a に示す。 $-\Delta M/\Delta t$ の値は養生直後に最大値をとり、その後急激に減少して $t = 150 \text{ h}$ にはほぼ 0 に漸近した (Fig. 6a)。この結果は、先に挙げた溶媒の蒸発機構 (Fig. 2) で以下のように説明できる。試料が水溶液中から養生過程で大気中に移された直後は、試料表面と周辺の水蒸気圧差 $P_S - P_A$ が駆動力となって溶媒 (水) は大気中へ移動する ($-\Delta n_0$) が、それが進むと PEG 分子や木材実質による拘束を受けないフリーな水分子の量が減り、表面蒸発抵抗圧 P_R が大きくなるため蒸気圧差 $P_S - P_A - P_R$ は小さくなり、蒸発速度 $-\Delta n_0/\Delta t$ は低下する。また、水の蒸発速度は、Group 3, 2, 1 の順に大きかった (Fig. 6a)。これは、周辺の蒸気圧 P_A 、つまり RH がこの順に小さいので (Fig. 3)、蒸気圧差 $P_S - P_A - P_R$ は同順序で大きくなるため蒸発速度 $-\Delta n_0/\Delta t$ もこの順に大きくなると説明できる (Fig. 2)。

第一期間の初期における細胞壁内 PEG 分子の増加速度

(単位時間当たりの増加量) $\Delta r/\Delta t$ の時間変化を Fig.6b に示す。 $\Delta r/\Delta t$ は $-\Delta M/\Delta t$ (Fig.6a) より遅れて最大値をとり、その後ゆっくり減少して $t = 250$ h にほぼ 0 に漸近した。この結果は、溶質の細胞壁への拡散機構(Fig.1)で以下のように説明できる。養生過程で初めに溶媒(水)が木材から蒸発するが($-\Delta n_0$)、そのうち細胞内腔からの蒸発量 $-\Delta n_{c0}$ が細胞壁からの蒸発量 $-\Delta n_{w0}$ と比べて大きいので、細胞壁と細胞内腔の間の溶質(PEG 分子)の濃度勾配 $x_{w1}-x_{c1}$ が増加し、それを駆動力として、溶質は細胞壁へ($\Delta n_{w1} = K_1(x_{c1}-x_{w1}) \Delta t$) 拡散する。蒸発速度と比べて PEG 増加速度のピークが現れる時間および 0 に漸近する時間が遅れるのはこの因果関係のためである。水の蒸発速度が高いほど(Fig.6a), PEG 増加速度は大きかった(Fig.6b)。これは、総蒸発量が $-\Delta n_0$ 多いほど、拡散の駆動力である濃度勾配 $x_{c1}-x_{w1}$ が大きいためであると説明できる(Fig.1)。

3・4 溶質拡散量と溶媒蒸発量の評価

第一・第二期間における水の蒸発量 $-\Delta M$ と細胞壁内の PEG 増加量(T 方向の比膨潤率) Δr をそれぞれ Fig.4a と b の値を用いて計算した。 $-\Delta M$ と Δr の関係を Fig.7 に示す。PEG 増加量 Δr は常に正の値をとり、水の蒸発量 $-\Delta M$ に伴い増加し、グループに関わらず同じ傾向を示した。また、その傾向は第一期間と第二期間で変わらなかった。この結果は、拡散機構(Fig.1)で裏付けことができ、水の蒸発量が大きいほど細胞壁と細胞内腔の間の溶質(PEG)の濃度勾配が大きくなり、より多くの PEG が拡散し、細胞壁内の PEG 増加量が大きくなることを示している。

Fig. 7 Relation of increasing amount of PEG polymers in cell walls (relative swelling in T direction) to evaporating amount of water (decrease in WPG) during the first and second terms.

Fig. 8 Relation of evaporating amount of water (decrease in WPG) to the decrease in RH during the first and second terms.

第一と第二期間における RH の減少 $-\Delta H$ を計算した。ただし、養生開始直前の RH を $H = 100\%$ とした。 $-\Delta H$ と水の蒸発量 $-\Delta M$ の関係を Fig.8 に示す。 $-\Delta H$ の増加に伴い $-\Delta M$ は増加した。これらの結果も、溶媒の蒸発機構(Fig.2)で以下のように裏付けることができる。試料からの水の蒸発が RH の減少により生じる試料表面と周辺の空气の蒸気圧差 $P_s - P_A$ (Fig.2)によってもたらされるためである。また、第一期間と比べて第二期間のグラフが下に位置しているのは、第二期間のほうが水の乾燥が進んでいるため表面蒸発抵抗圧 P_R が大きくなり、蒸気圧差 $P_s - P_A - P_R$ が低下したためである(Fig.2)。

3・5 RH の履歴が寸法に及ぼす影響

養生において、RH の履歴は、重量には影響しなかったが(Fig.4a)、寸法には影響し(Fig.4b)、第一期間で RH の低かったグループほど養生中(Fig.4b)や減圧乾燥後(Fig.5の $u = 100$ mass%の状態)において常に寸法が大きかった。これは、主に第一・第二期間において PEG の細胞壁への拡散量がグループごとに異なることによるものである。この原因についても溶質拡散機構(Fig.1)を使って以下のように裏付けができる。PEG の拡散量($\Delta n_{w1} = K_1(x_{c1}-x_{w1}) \Delta t$)には、3・3 節で議論した濃度勾配($x_{c1} > x_{w1}$)に加えて、拡散のしやすさ(K_1)が影響する (Fig.1)。PEG の拡散のしやすさは、溶媒である水が木材や PEG の中に多く存在するほど高いと考えられる。したがって、試料中に水が多く存在する第一段階において濃度勾配が大きくつけられた順、すなわち水の蒸発量の多い順 (Group3 > Group2 > Group1)に、細胞壁中の PEG 量が多くなり、膨潤量が大きくなったと考えられる。

4 結 言

養生過程の相対湿度(RH)がポリエチレングリコール(PEG1540)の水溶液を含浸した木材の膨潤・収縮と質量の時間変化に及ぼす影響をさまざまな RH スケジュールについて調べた。

含浸木材は、養生の RH が 75%以上のときに、水の蒸発に伴い膨潤した。この RH 範囲では、試料は細胞壁内の PEG 量の増加に伴い膨潤することが示唆された。この示唆に基づく、細胞壁内 PEG の増加速度の時間変化は溶質拡散機構(Fig.1)によって良好に説明された。水の蒸発速度も溶媒蒸発機構(Fig.2)によって良好に説明された。同 RH 範囲では、細胞壁内 PEG の増加量は水の蒸発量に伴い増加し、水の蒸発量は RH の減少量に伴い増加した。この結果は、それぞれ溶質拡散機構と溶媒蒸発機構で裏付けられた。RH の履歴が養生中・減圧乾燥後の細胞壁中の PEG 量に及ぼす影響も溶質拡散機構で裏付けられた。

一連の検証から、溶質と溶媒としてそれぞれ PEG1540 と水を用いた場合には、養生過程における細胞壁への溶質の拡散は、周辺雰囲気中の溶媒の蒸気圧で制御できることが明らかとなった。今後は、溶液含浸木材の膨潤に及ぼす温度、溶液濃度および溶質・溶媒の種類などの影響を調べ、より最適な養生条件を探すことが課題である。

本報の一部は, The 9th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (Venice-Istanbul, 平成 26 年 9 月) にて発表した。

参 考 文 献

- 1) Y. Ishimaru, “PEG to mokuzai no hanashi”, *Mokuzaihozon*, Vol.19, No.5, pp.204-218 (1993).
- 2) A.J. Stamm, “Dimensional stabilization of wood with carbonwaxes”, *Forest Products Journal*, Vol.6, No.5, pp. 201-204 (1956).
- 3) T. Ogura, “Studies on the mechanisms of wood drying. (3) on the evaporating rate of moistures in wood”, *Ringyoshikenjyohokoku*, No.51, pp.61-75 (1951).
- 4) S. Tanaka, T. Miki, M. Seki, I. Shigematsu and K. Kanayama, “Method to impregnate poly ethylene glycol polymers to cell walls of wood by drying treatment at an appropriate relative humidity”, *Proceedings of 9th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 0144, Venice-Istanbul, September (2014)
- 5) L. Greenspan, “Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions”, *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section A: Physics and Chemistry*, Vol.81A, No.1, pp.89-96 (1977)
- 6) T. Sadoh and M. Hashihira, “A note on the swelling of wood with polyethylene glycols”, *Bulletin of the Kyoto University Forests*, No.45, pp.227-237 (1973).