

公益財団法人江間忠・木材振興財団 研究助成金 令和3年度～令和5年度

研究報告書

【研究課題】

水撃含浸法による木材への液体浸透促進のための機構解明および技術開発

【報告者】

田中 聡一（京都大学生存圏研究所）

【報告日】

2023年11月6日

【研究概要】

薬液含浸は、木材の三大欠点の改善に欠かせない技術である。一般的な含浸処理法である加圧注入法では、含浸ムラと木材の圧潰が生じることが問題だった。本研究では、水撃含浸法による木材への液体浸透の促進について検討する。同手法では、木材を入れた半開放容器を液体で充填して打撃すると、水撃作用が生じ、それにより木材の圧潰が抑制されつつ液体浸透が促されることがわかっている。これは水撃作用が木材中の浸透阻害組織（閉鎖壁孔やチロース）を貫通したためと推察されたが、その機構は明らかではない。また、水撃作用が液体浸透に及ぼす効果は実用的に十分とはいえなかった。本研究は、木材の水撃含浸法の機構解明と効果促進を行うことを目的とする。

1. 背景と目的

木材の三大欠点の改善のため、難燃化、寸法安定化、保存を目的とした様々な薬液の含浸処理が行われている。含浸処理は加圧注入法が最も一般的な方法であるが、①処理ムラおよび②処理による圧潰が特に重要な問題だった。そこで以上の問題を克服する手法として水撃含浸法を提案した。

水撃含浸法は、木材を入れた半開放容器を液体で充填して打撃することで、水撃作用（液体の衝撃的な圧力変化）を生じさせて、それにより木材への液体浸透を促す手法である。同手法により、木材の圧潰が抑制されつつ液体浸透が促されることがわかっている（S. Tanaka et. al. (2019) Journal of Wood Science, 65:54.）。これは、木材中における液体の浸透阻害組織（例. 閉鎖壁孔やチロース）が水撃作用により貫通されたためと推察された。しかし、水撃作用が浸透阻害組織に及ぼす影響が不明確であること、および水撃作用が液体浸透促進に及ぼす効果が実用的には不十分であることが課題だった。

本研究の目的は、水撃作用が浸透阻害組織に及ぼす影響を解明することである。そのために、水撃作用を付加した木材の組織構造について顕微鏡観察を行う。もう一つの目的は、水撃作用による液体

浸透の効果を高める手法の開発である。そのために、水撃作用を効果的に付加する装置の試作を行い、液体浸透に及ぼす影響を調べる。

2. 水撃発生装置の試作

既往の水撃発生装置には、水撃作用が小さい（液体に生じる最大圧力が低い）、水撃作用を付与できる回数が少ない（水撃をたくさん作用させる前に装置が破損する）という課題があった。これは過去の研究で水撃作用による浸透阻害部の貫通の直接的な証拠が得られていない要因でもあった。そこで、大きい水撃作用をたくさん発生させることができるように、装置の改良を行った。改良した水撃発生装置の外観を図1に示す。液体を入れた容器を治具で固定し、ゴム製のハンマーで打撃することで、容器内の液体に水撃を発生させ、そのときに液体に生じた圧力変化を耐環境デジタル圧力センサ（GP-M025T, Keyence Co.）で検出して、データロガー（NR-500, Keyence Co.）で収集した。なお、測定は室温で行った。

水撃発生に伴い液体に生じた圧力変化を図2に示す。液体の圧力は容器へ打撃が加えられると、増したあとただちに飽和水蒸気圧に相当する圧力付近（ゲージ圧力 -0.0998 MPa ）まで低下し、その後急上昇して最大圧力 0.8 MPa に到達してから、減衰振動して大気圧に近づいた。このときの最大圧力は水撃作用の大きさを表すものであり、本研究ではこれを衝撃圧力と呼ぶこととする。改良した装置では、衝撃圧力は安定的に $0\sim 0.8\text{ MPa}$ の圧力範囲で生じさせることが可能であり、破損するまで水撃を約 10000 回発生させられることが確認された。既往の水撃発生装置では、液体に安定的に生じさせることができる衝撃圧力の範囲は $0\sim 0.3\text{ MPa}$ であり、500 回程度の水撃発生で破損することが多かったことから、装置の性能が大幅に改善されていることがわかる。



図 1. 改良した水撃発生装置(省略)

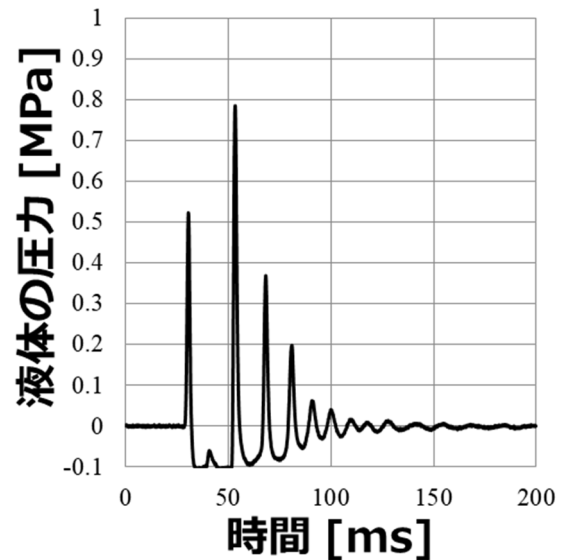


図 2. 容器の打撃で液体に生じた圧力変化

これまで検討した水撃発生装置は、容器の断続的な打撃によってパルス状の水撃を断続的に発生させることが可能だったが、単位時間当たりの水撃発生回数を増加させることができれば、処理効率向上の可能性がある。そこで、容器の連続的打撃により連続的な水撃を発生させる装置を試作し、水撃発生や装置耐久性について検討した。試作した連続水撃発生装置を図 3 に示す。この装置では、打撃を連続的に行う機構を導入することで、容器内の液体に水撃を発生させた。連続的な水撃発生によって液体に生じた圧力変化を図 4 に示す。ゲージ圧力は、飽和水蒸気圧に相当する圧力付近と最大圧力（約 0.7MPa）の間で振動していることがわかる。しかしながら、連続水撃発生装置では部品の破損が頻繁に生じ、連続的に発生させた水撃作用が木材に及ぼす影響を調べることができるほど、安定的に装置を動作させることができなかった。この手法は実用的には優れていると考えられるが、安定的に連続的水撃を生じさせる機構の開発が課題である。

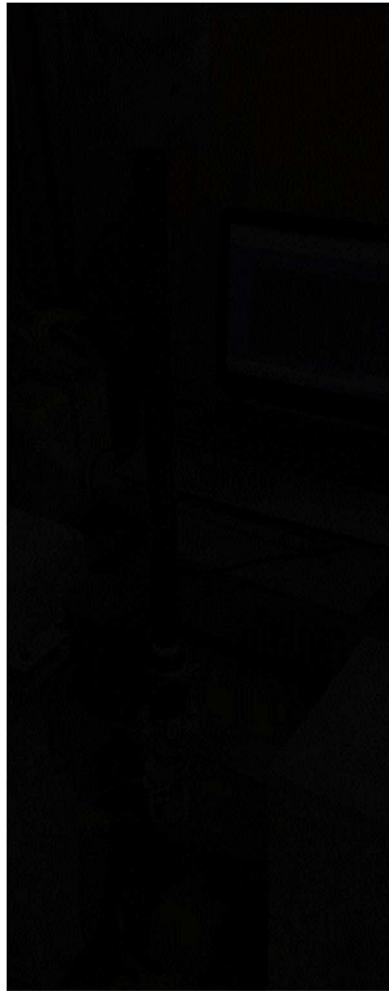


図3．試作した連続水撃発生装置(省略)

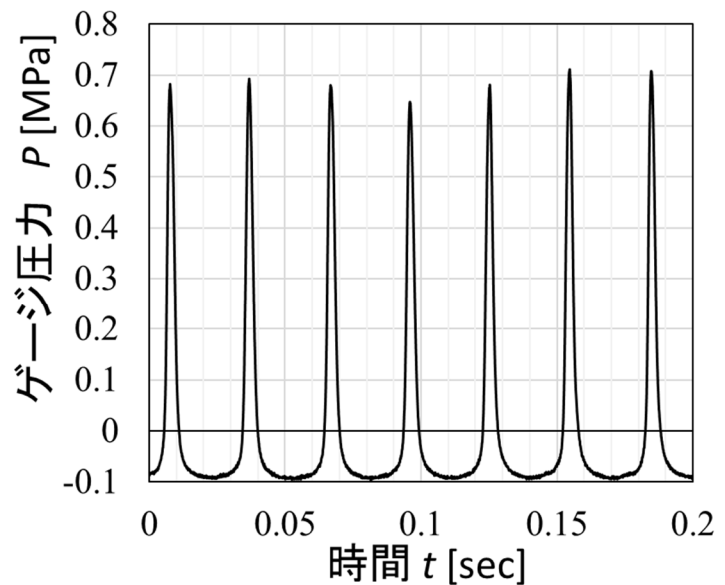


図4．容器の連続打撃で液体に生じた圧力変化

3．水撃作用が木材への液体浸透と組織構造に及ぼす影響

改良した水撃発生装置（図1）を用いて様々な樹種の木材に水撃作用を与え、組織構造と液体浸透に及ぼす影響を調べた。広葉樹については、低比重材のキリおよび高比重材のウリンを用い、針葉樹については、スギ、ヒノキ、アカマツ、およびベイヒバを用いた。

3－1．実験方法

キリ、ウリン、スギ、ヒノキ、アカマツ、およびベイヒバの心材部より、3mm(R)×10mm(T)×40mm(L)の試験片を8枚ずつ切り出し、105℃の送風乾燥器で恒量になるまで48h以上乾燥させ、質量 m_d と体積 v_d を測定し、密度 ρ_d を計算した。キリ、ウリン、スギ、ヒノキ、アカマツ、およびベイヒバの全乾

密度（平均値）は、それぞれ、 0.26 g/cm^3 、 0.96 g/cm^3 、 0.35 g/cm^3 、 0.43 g/cm^3 、 0.34 g/cm^3 、および 0.51 g/cm^3 だった。木材に浸透させる液体として、蒸留水を用意し、温調器を用いて温度を 20 度付近に調整した。

乾燥後の試験片は、ダイヤフラムポンプを用いて 2 h 減圧し（真空到達度 $0.8 \sim 1.0 \text{ kPa}$ ）、液体を注入して常圧に戻したのち、液体中で放置した。注入してから 1 h 後の試験片の質量 m_0 と体積 v_0 を測定し、式(1)を用いて液体の液体浸透度 ϕ_0 を計算した。

$$\phi_0 = \frac{(m_0 - m_d)/m_d}{1/\rho_d - 1/\rho_{cw} + k} \quad (1)$$

ここで、液体浸透度 ϕ_0 は木材中に含まれるすべての空隙（永久空隙と一時空隙）のうち減圧注入によって液体で満たされた空隙の体積比を意味し、式に含まれる ρ_{cw} は木材細胞壁の密度 ($=1.5 \text{ g/cm}^3$)、 k は細胞壁の膨潤係数 ($=0.3 \text{ cm}^3/\text{g}$) を表している。8 つの試験片を 2 つのグループに分けた。その際、液体浸透度 ϕ_0 の平均値と標準偏差が 2 つのグループでなるべく同じになるようにグループ分けした。

一方のグループの試験片は、液体注入から 1.1 h 経過後に水撃発生装置に収め、注入して 1.2h 経過後～2.2h 経過後の間に、3 min 水撃を約 1 回/s で発生させてから 3 min 放置するという操作を 10 回繰り返した。試験片は、注入して 2.3h 経過後に表面の液体をキムタオルで拭い、測定した質量 m_1 と式(2)を用いて液体浸透度 ϕ_1 を得て、水撃に伴う液体浸透度の変化 $\phi_1 - \phi_0$ を計算した。

$$\phi_1 = \frac{(m_1 - m_d)/m_d}{1/\rho_d - 1/\rho_{cw} + k} \quad (2)$$

他方のグループの試験片は、液体中で静置後、注入から 2.3h 後に表面をキムタオルで拭い、測定した質量 m_1 と式(2)で液体浸透度 ϕ_1 を得て、コントロールの液体浸透度の変化 $\phi_1 - \phi_0$ を計算した。

すべて試験片は、試験後も液体中で放置し、繊維飽和点以上を上回る含水率となってから 1 週間以上経過してから体積 v_s を測定し、全乾状態からの体積膨潤率 β ($= (v_s - v_0) / v_0$) を計算した。

3-2. 結果

3-2-1. 木材の樹種が水撃の圧力波形に及ぼす影響

すべての樹種について、1 回の水撃付与において生じた水の代表的な圧力変化を図 5 に示す。樹種によって圧力波形に顕著な違いは見られないことから、すべての樹種に対して同じような水撃に伴う衝撃圧が付与されていることが示唆された。

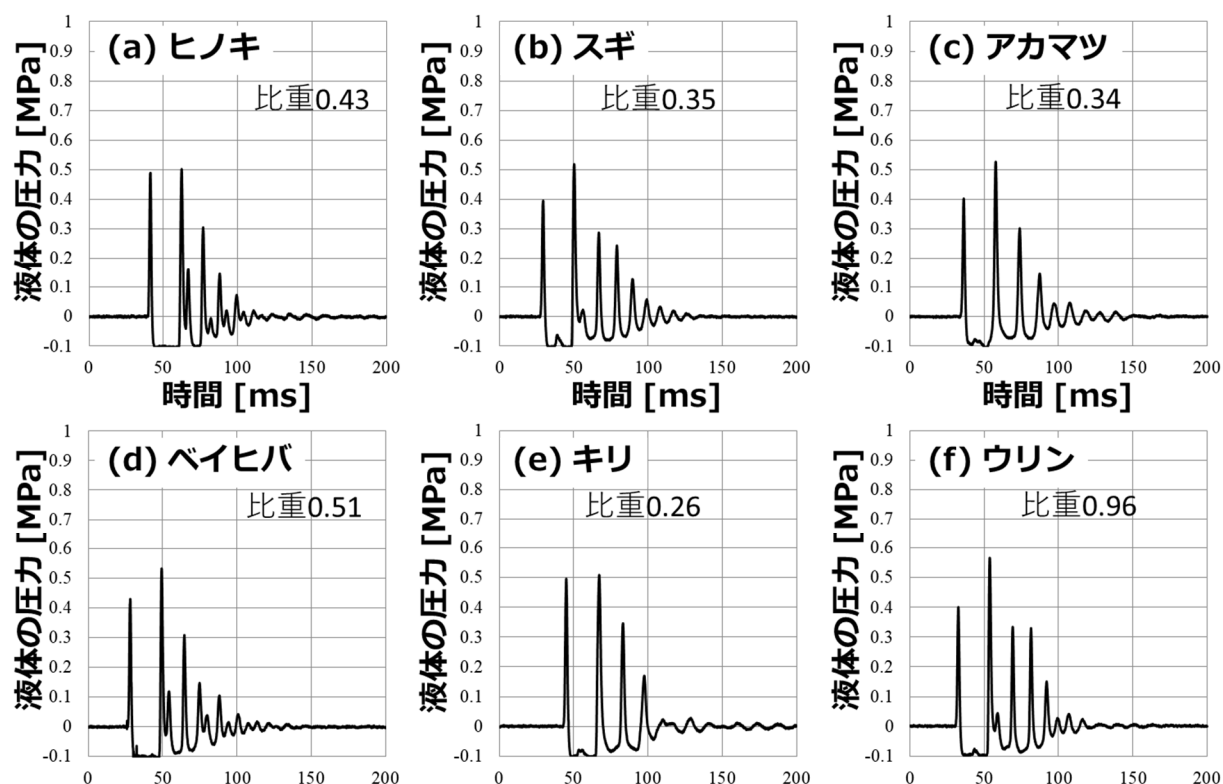


図 5.水撃付与（1 回）によって木材の周辺に生じる液圧変化

3-2-2. 水撃が組織構造に及ぼす影響

広葉樹の木口表面の組織構造に及ぼす水撃の影響を図 6 に示す。観察はデジタルマイクロスコープ（VHX-5000, Keyence Co.）を用い、キリは乾燥状態、ウリンは飽水状態で行ったものである。

キリについて、コントロールの試験片では道管の多くがチロースで閉鎖されていたが、水撃を付加した試験片では、チロースが除去されたり、部分的に破壊されたりした道管が観察された。ウリンについても、コントロールの試験片ではほぼすべての道管がチロースで閉鎖されていたが、水撃を付加

した試験片では、チロースの多くが除去されており、部分的に破壊された道管も観察された。以上の結果から、広葉樹における浸透阻害部である道管のチロースのうち、少なくとも木口表面のチロースについては、水撃によって部分的に破壊あるいは除去できることが確認された。今後は、木口表面からどのくらいの深さまで、チロースが水撃の影響を受けるかを確かめる必要がある。また、針葉樹における浸透阻害部である閉鎖壁孔に及ぼす水撃の影響を明らかにすることも課題である。

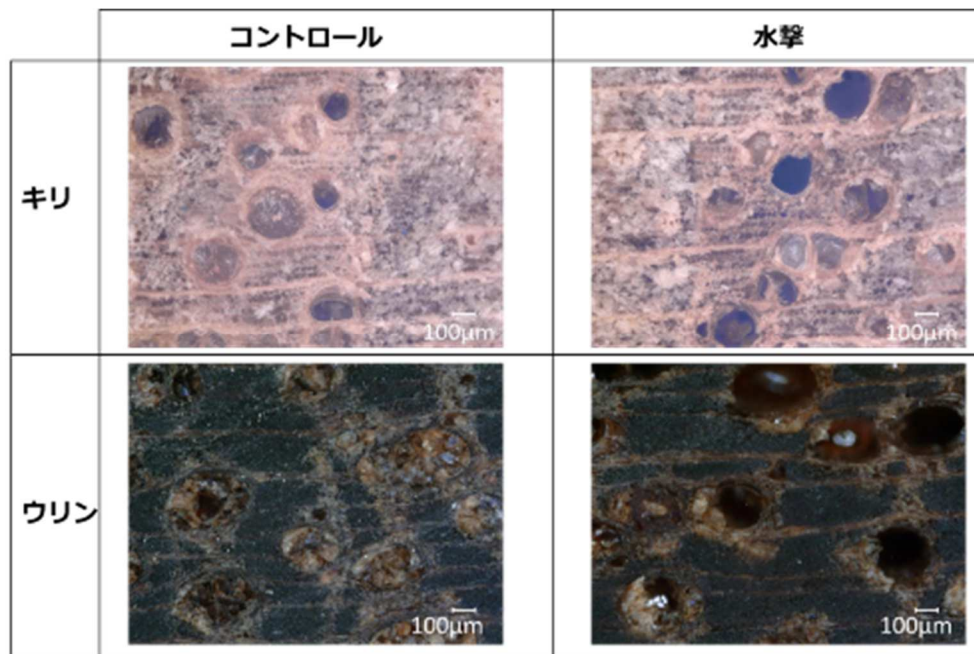


図 6. 木口表面の組織構造に及ぼす水撃の影響

針葉樹の組織構造に及ぼす水撃の影響では、スギについては閉鎖壁孔の貫通が SEM 観察によって認められたが（図 7）、他の樹種については閉鎖壁孔の明確な貫通は観察されなかった。図 7 は、まさ目面断面の有縁壁孔について、いくつも撮像したなかの代表的な写真であるが、水撃を加えたものでは、トールスが除去あるいは破壊されているのに対し、コントロールではトールスがそのまま残っていることがわかる。この観察結果より、水撃によって壁孔が貫通されることが示唆された。

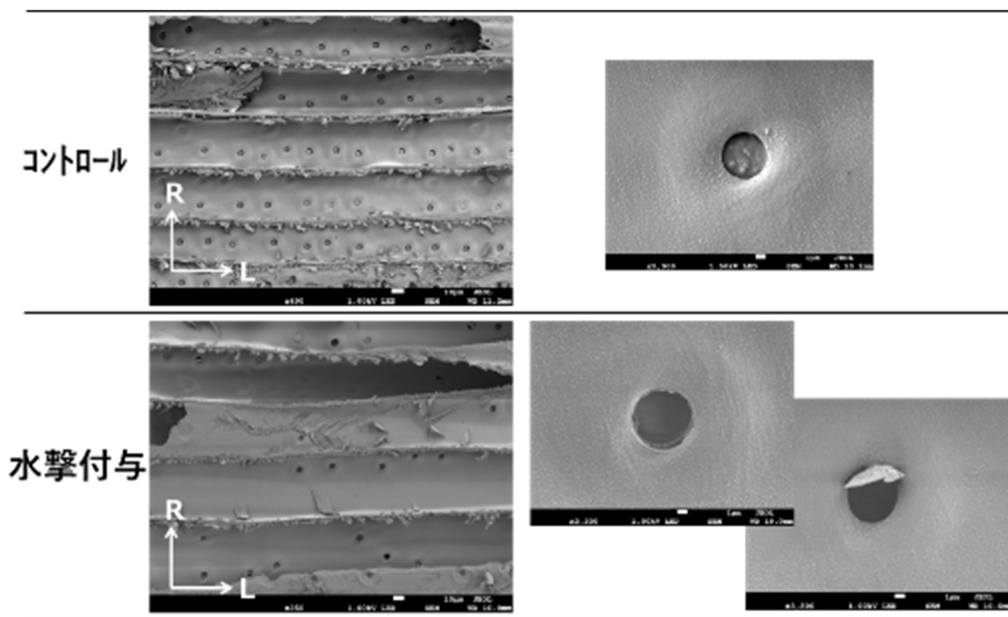


図 7. スギの組織構造（閉鎖壁孔）に及ぼす水撃の影響（RT 表面から深さ 5mm の LR 断面）

3-2-3. 水撃に伴う液体浸透度の変化

水撃に伴う液体浸透度の変化を図 8 に示す。減圧注入に伴う初期浸透度 ϕ_0 （横軸）は、各樹種とも水撃とコントロールで ϕ_0 はほぼ同じ範囲に分布していることがわかる。これは、ほぼ同様の水分通導性を有する試験片が、コントロール用と水撃付与用の試験片として割り振られたことを意味する。

同じ初期浸透度 ϕ_0 で比較したとき、すべての樹種について水撃のほうがコントロールと比べて浸透度変化 $\phi_1 - \phi_0$ が高い傾向にあった。これは、チロースの除去あるいは部分的な破壊により液体浸透が促進されたためであると推察される。

ウリン、ヒノキ、ベイヒバ、およびアカマツについては水撃による顕著な液体浸透効果は認められなかったが、スギとキリについては、明確に液体浸透効果が表れた。

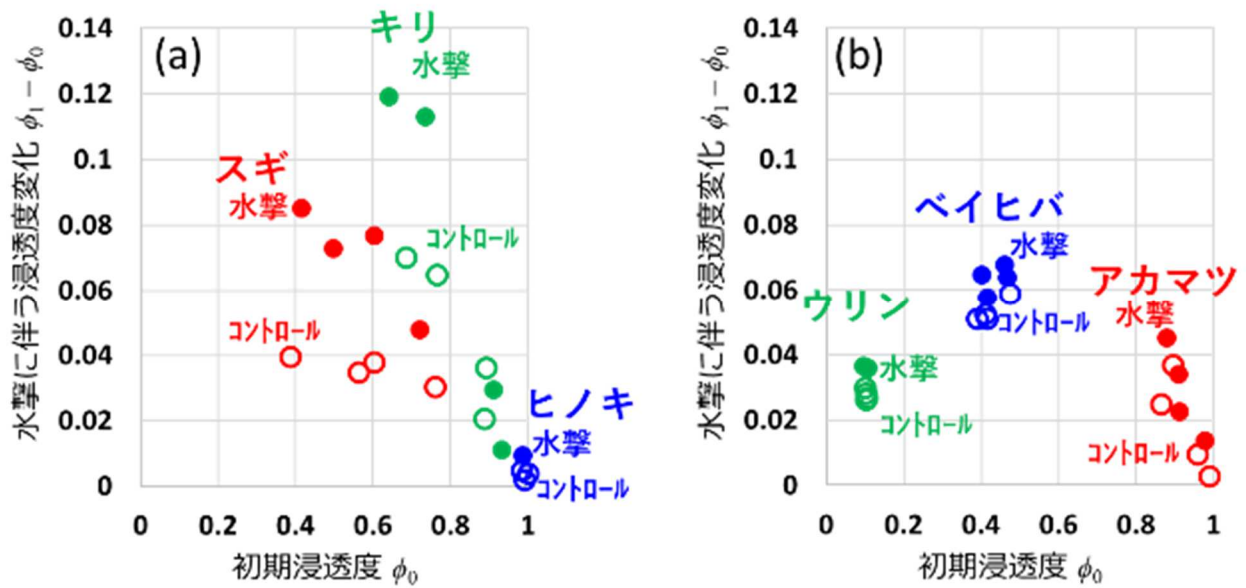


図 8. 液体浸透に及ぼす水撃作用の影響

3-2-4. 水撃に伴う体積変化

水撃に伴う体積変化を調べるため、繊維飽和点以上の含水率になってから1週間以上放置した試験片の体積膨潤率 β を水撃とコントロールで比較した（図9）。すべての樹種について、体積膨潤率には水撃付与した試験片とコントロール試験片の間で有意差は認められなかった。以上から、キリ、ウリン、スギ、ヒノキ、アカマツ、およびベイヒバでは水撃の付加によって、統計学的な有意差が認められるほどの圧潰は生じておらず、仮に圧潰があったとしても木材の水分吸着に伴う膨潤のばらつきや測定誤差などに埋もれる程度しか生じないものと考えられる。

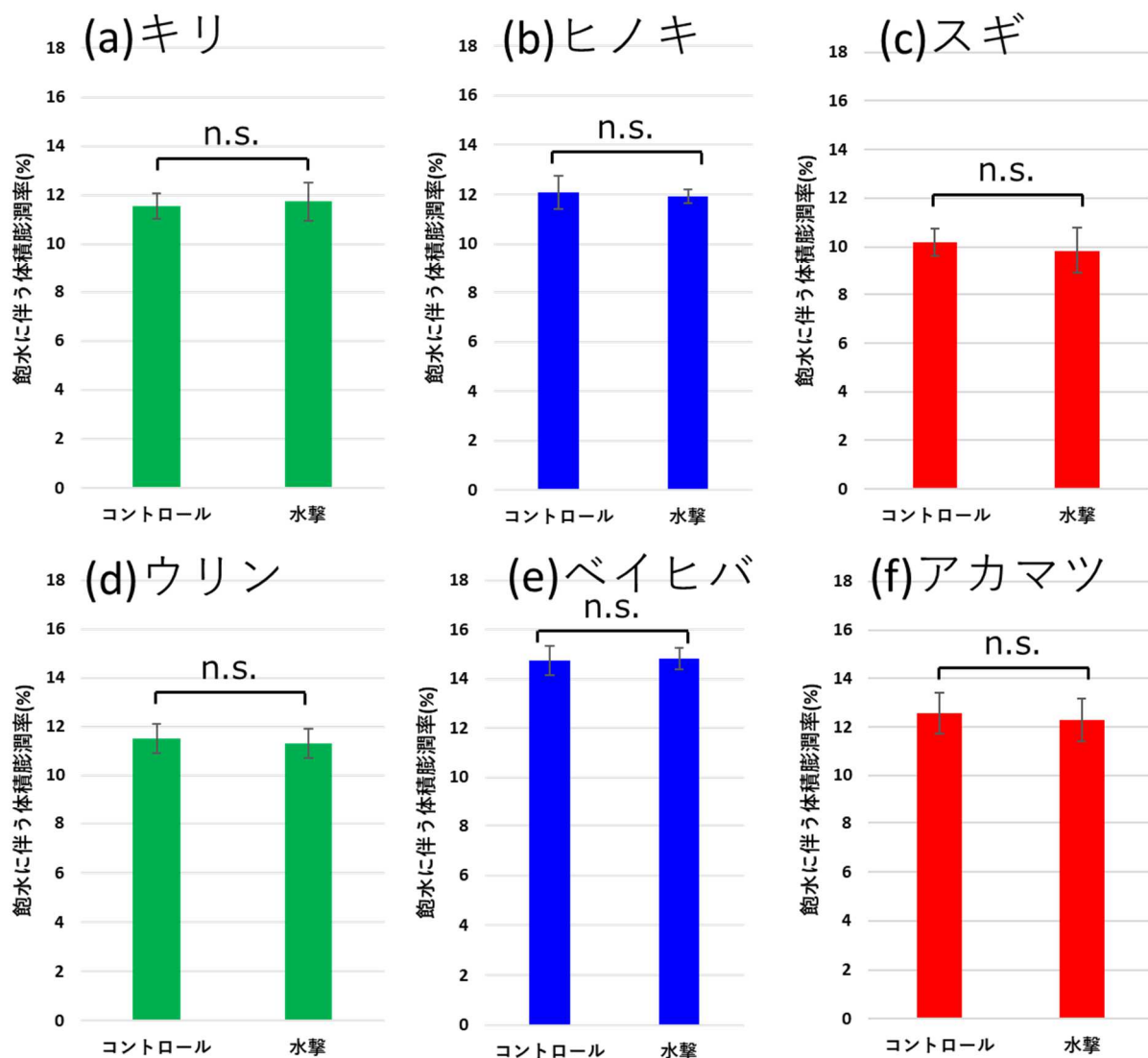


図 9. 水撃付与した試験片とコントロール試験片に関する体積膨潤率

4. 水撃付与スケジュールが木材への液体浸透に及ぼす影響

前章では、木材への液体浸透への水撃作用の効果が様々な樹種について確かめられたが、水撃付与のスケジュール（水撃の強さ、付与回数、付与のタイミングなど）の影響は明らかでなかった。そこで、本章では、特に水撃作用の効果が顕著であったスギとキリについて、水撃付与スケジュールが木材への液体浸透に及ぼす影響について調べた。

4-1. 水撃の強さの影響

4-1-1. 実験方法

キリ、スギの心材部より、3mm(R)×10mm(T)×40mm(L)の試験片を 20 枚ずつ切り出し、105℃の送風乾燥器で恒量になるまで 48h 以上乾燥させ、質量 m_d と体積 v_d を測定し、密度 ρ_d を計算した。木材に浸透させる液体として、蒸留水を用意した。蒸留水の温度は約 20 度だった。

乾燥後の試験片は、ダイヤフラムポンプを用いて 1 h 減圧し（真空到達度 0.8～1.2 kPa）、液体を注入して常圧に戻したのち、液体中で放置した。注入してから 1 h 後の試験片の質量 m_0 と体積 v_0 を測定し、式(1)を用いて液体の液体浸透度 ϕ_0 を計算した。20 個の試験片を 5 つのグループに分けた。その際、液体浸透度 ϕ_0 の平均値と標準偏差が 5 つのグループでなるべく同じになるようにグループ分けした。

試験片（グループ 1～4）は、液体注入から 1.1 h 経過後に水撃発生装置に収め、注入して 1.2h 経過後～2.0 h 経過後の間に、1 min 30 s 容器を約 1 回/s で打撃してから 30 s 放置するという操作を 1 回行った。このとき、容器を打撃する強さを変えることで、発生させる水撃の強さを制御した。具体的には、液体のゲージ圧力の最大値が、0.1、0.3、0.5、または 0.7 MPa となるように制御した。液体浸透試験片は、注入して 2.0 h 経過後に表面の液体をキムタオルで拭い、測定した質量 m_1 と式(2)を用いて液体浸透度 ϕ_1 を得て、水撃に伴う液体浸透度の変化 $\phi_1 - \phi_0$ を計算した。コントロール用の試験片（グループ 5）は、液体中で静置後、注入から 2.0 h 後に表面をキムタオルで拭い、測定した質量 m_1 と式(2)で液体浸透度 ϕ_1 を得て、コントロールの液体浸透度の変化 $\phi_1 - \phi_0$ を計算した。

4-1-2. 結果

容器を打撃する強さによって制御された水撃作用の強さを、試験片がスギおよびキリの場合について、それぞれ図 10 および図 11 に示す。どちらの樹種においても、ゲージ圧力の最大値が、0.1、0.3、0.5、または 0.7MPa となっていることがわかる。また、樹種による圧力波形の違いもほとんどみられなかったことから、各樹種とも同様の水撃作用が付与されていることがわかる。

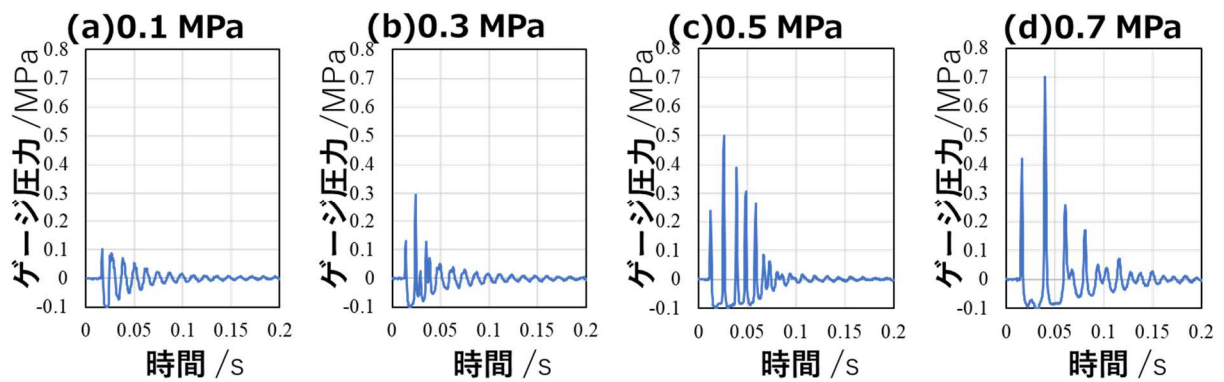


図 10. 容器打撃の強さにより制御した水撃作用の強さ（スギ）

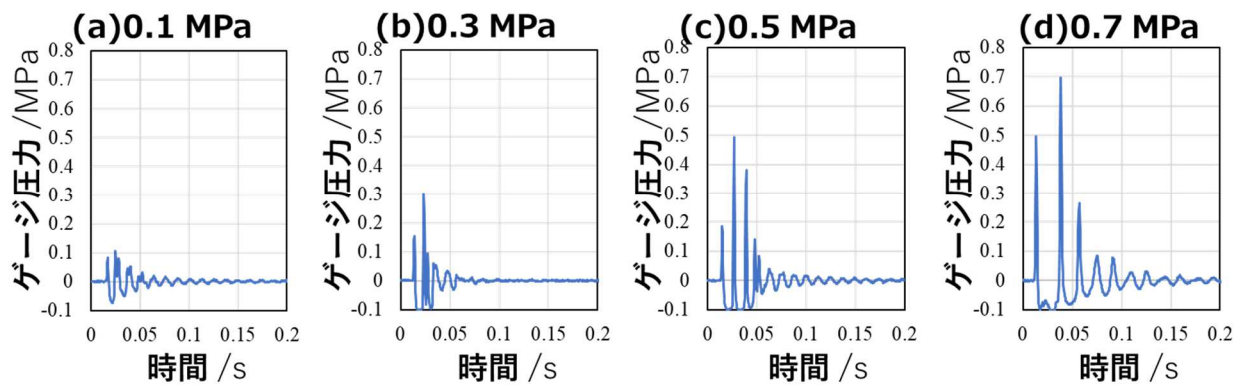


図 11. 容器打撃の強さにより制御した水撃作用の強さ（キリ）

水撃作用の各強さについて、木材への液体浸透に及ぼす影響を図 12 に示す。コントロールと同じ初期浸透度（横軸）について 0.1MPa～0.7MPa までの浸透度変化を比較してみると、スギでは、0.1MPa から 0.3MPa までは、強い水撃を与えるほど液体浸透は促進されたが、それ以上の強さ（0.5MPa や 0.7MPa）になっても液体浸透の促進の程度は変わらなかった。これは、水撃作用の強さを増加させても、それが液体浸透に及ぼす効果は頭打ちになることを示していると考えられる。一方、キリのでは、コントロールから、0.1MPa、0.3MPa、0.5MPa、0.7MPa となるにつれて、液体浸透度変化の分布が上に移動していることがわかる。これは、キリについては、強い水撃作用を与えるほど、液体浸透がより促進されることを示していると考えられる。

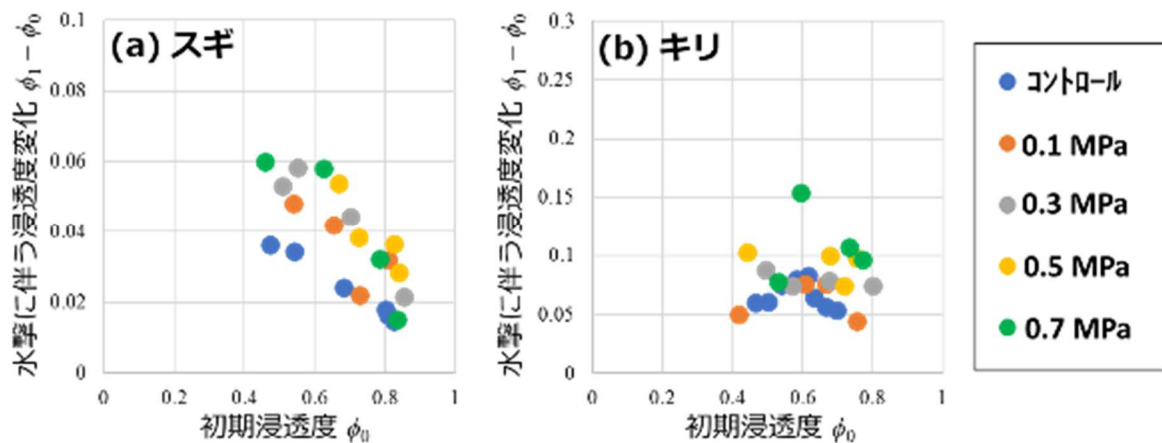


図 12. 水撃作用の強さが木材への液体浸透に及ぼす影響

4-2. 水撃付与回数の影響

4-2-1. 実験方法

キリ、スギの心材部より、3mm(R)×10mm(T)×40mm(L)の試験片を 16 枚ずつ切り出し、105℃の送風乾燥器で恒量になるまで 48h 以上乾燥させ、質量 m_d と体積 v_d を測定し、密度 ρ_d を計算した。木材に浸透させる液体として、蒸留水を用意した。蒸留水の温度は約 20 度だった。

乾燥後の試験片は、ダイヤフラムポンプを用いて 1 h 減圧し（真空到達度 0.8～1.2 kPa）、液体を注入して常圧に戻したのち、液体中で放置した。注入してから 1 h 後の試験片の質量 m_0 と体積 v_0 を測定し、式(1)を用いて液体の液体浸透度 ϕ_0 を計算した。16 個の試験片を 4 つのグループに分けた。その際、液体浸透度 ϕ_0 の平均値と標準偏差が 4 つのグループでなるべく同じになるようにグループ分けした。

試験片（グループ 1～3）は、液体注入から 1.1 h 経過後に水撃発生装置に収め、注入して 1.2h 経過後～2.0 h 経過後の間に、1 min 30 s 容器を約 1 回/s で打撃してから 30 s 放置するという操作を 1 回（水撃付与回数合計 90 回）、5 回（水撃付与回数合計 450 回）、または 20 回（水撃付与回数合計 1800 回）繰り返し行った。水撃の強さについては、液体のゲージ圧力の最大値が、0.5 MPa となるように

制御した。液体浸透試験片は、注入して 2.0 h 経過後に表面の液体をキムタオルで拭い、測定した質量 m_1 と式(2)を用いて液体浸透度 ϕ_1 を得て、水撃に伴う液体浸透度の変化 $\phi_1 - \phi_0$ を計算した。コントロール用の試験片（グループ 4）は、液体中で静置後、注入から 2.0 h 後に表面をキムタオルで拭い、測定した質量 m_1 と式(2)で液体浸透度 ϕ_1 を得て、コントロールの液体浸透度の変化 $\phi_1 - \phi_0$ を計算した。

4-1-2. 結果

水撃付与回数が木材への液体浸透に及ぼす影響を図 13 に示す。スギでは、コントロールから、90 回水撃付与においても液体浸透が大きく促されますが、450 回、1800 回と付与回数を増やしても液体浸透の促進の程度は、90 回付与と液体浸透の程度が変わらなかった。このことから、スギでは 90 回以下の付与回数で水撃作用の液体浸透効果は頭打ちになることがわかる。キリでは、水撃付与回数が多いほど、プロットは上のほうに分布した。このことから、キリでは水撃を与える回数を増やすほど、液体浸透は増加する傾向にあることがわかった。

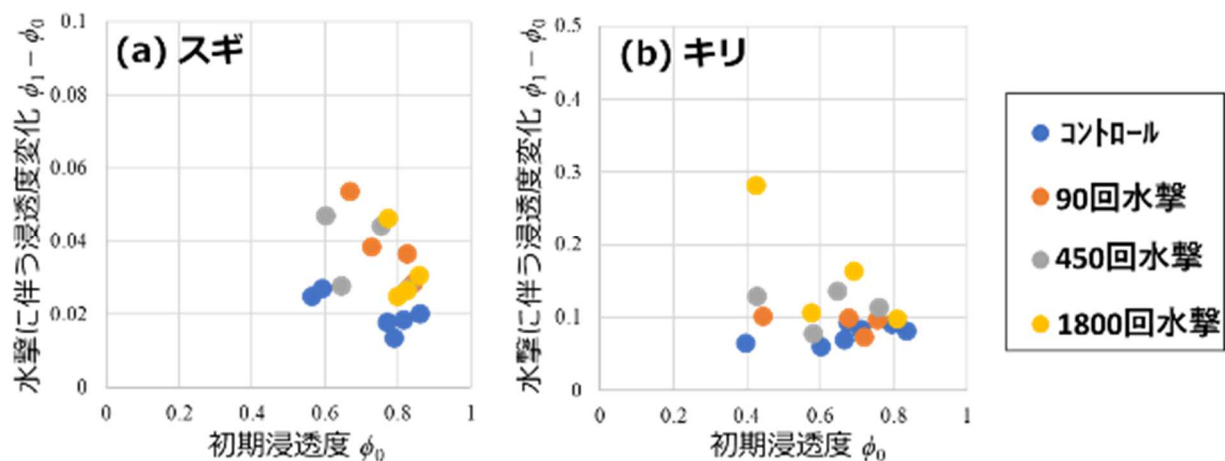


図 13. 水撃付与回数が木材への液体浸透に及ぼす影響

スギとキリでこのように水撃付与回数と強さの影響が異なるのは、水撃付与によって浸透障害部が貫通されてから液体が次の浸透障害部に到達するまで経路によるものと推察される。スギの場合

は、浸透阻害部間の距離は、仮道管 1 つ分の長さと考えられるが、キリの場合は、主にチロースから次のチロースまでの間隔、あるいは柔細胞 1 つ分の長さであると考えられる。従って、キリのほうが、次の浸透阻害部に到達するまでの時間が短いと考えられるため、水撃付加回数を増やすほど液体浸透が促されるものと解釈できる。

このほかに、液体浸透が進むほど、スギの閉鎖壁孔を貫通するのに必要な水撃作用のエネルギーが増加する可能性もある。これは、液体浸透が進むほど、水撃作用で生じる圧力波が木材中を伝搬する距離が長くなるため、圧力波が木材中を伝搬する間に減衰して、水撃作用の効果が低減されると考えられるためである。

4－3．水撃を付与するタイミングの影響

水撃を付与するタイミングとして、最初に液体（水）を減圧注入してから比較的短い時間で水撃を付加した場合（ $t = 1.0 \sim 2.0$ h の間）、および注入後比較的長い時間放置してから水撃を付加した場合（ $t = 7.0 \sim 8.0$ h の間）の 2 通りの条件について検討を行った。

4－3－1．実験方法

キリ、スギの心材部より、3mm(R)×10mm(T)×40mm(L)の試験片を 12 枚ずつ切り出し、105℃の送風乾燥器で恒量になるまで 48h 以上乾燥させ、質量 m_d と体積 v_d を測定し、密度 ρ_d を計算した。木材に浸透させる液体として、蒸留水を用意した。蒸留水の温度は約 20 度だった。

乾燥後の試験片は、ダイヤフラムポンプを用いて 1 h 減圧し（真空到達度 0.8～1.2 kPa）、液体を注入して常圧に戻したのち、液体中で放置した。注入してから 1 h 後の試験片の質量 m_0 と体積 v_0 を測定し、式(1)を用いて液体の液体浸透度 ϕ_0 を計算した。12 枚の試験片を 3 つのグループに分けた。その際、液体浸透度 ϕ_0 の平均値と標準偏差が 3 つのグループでなるべく同じになるようにグループ分けした。

1つのグループの試験片(グループ1)は、液体注入から1.1 h 経過後に水撃発生装置に収め、注入して1.2h 経過後～2.0 h 経過後の間に、1 min 30 s 容器を約1 回/s で打撃してから30 s 放置するという操作を20 回繰り返し行った(水撃付与回数合計1800 回)。水撃の強さについては、液体のゲージ圧力の最大値が、0.5 MPa となるように制御した。液体浸透試験片は、注入して2.0 h 経過後に表面の液体をキムタオルで拭い、測定した質量 m_1 と式(2)を用いて液体浸透度 ϕ_1 を得て、水撃に伴う液体浸透度の変化 $\phi_1 - \phi_0$ を計算した。残り2つのグループの試験片(グループ2と3)は、液体中で静置後、注入から2.0 h 後に表面をキムタオルで拭い、測定した質量 m_1 と式(2)で液体浸透度 ϕ_1 を得て、コントロールの液体浸透度の変化 $\phi_1 - \phi_0$ を計算した。その後、すべての試験片は、液中に放置した。

注入してから7.0 h 後の全ての試験片の質量 m_2 と体積 v_0 を測定し、式(3)を用いて液体の液体浸透度 ϕ_2 を計算した。

$$\phi_2 = \frac{(m_2 - m_d)/m_d}{1/\rho_d - 1/\rho_{cw} + k} \quad (3)$$

グループ2の試験片を、液体注入から7.1 h 経過後に水撃発生装置に収め、注入して7.2h 経過後～8.0 h 経過後の間に、1 min 30 s 容器を約1 回/s で打撃してから30 s 放置するという操作を20 回繰り返し行った(水撃付与回数合計1800 回)。水撃の強さについては、液体のゲージ圧力の最大値が、0.5 MPa となるように制御した。液体浸透試験片は、注入して8.0 h 経過後に表面の液体をキムタオルで拭い、測定した質量 m_3 と式(4)を用いて液体浸透度 ϕ_3 を得て、水撃に伴う液体浸透度の変化 $\phi_3 - \phi_2$ を計算した。

$$\phi_3 = \frac{(m_3 - m_d)/m_d}{1/\rho_d - 1/\rho_{cw} + k} \quad (4)$$

残り2つのグループの試験片(グループ2と3)は、液体中で静置後、注入から $t = 8.0$ h において表面をキムタオルで拭い、測定した質量 m_3 と式(4)で液体浸透度 ϕ_3 を得て、液体浸透度の変化 $\phi_3 - \phi_2$ を計算した。

4-3-2. 結果

水撃付与のタイミングが木材への液体浸透に及ぼす影響を図 14 と 15 に示す。

スギについては（図 14）、液体（水）を減圧注入してから液体中で比較的短い時間放置してから水撃を付与した場合（ $t = 1.0 \sim 2.0$ h の間）、コントロールと比べてプロットが上方に分布していることから（図 14(a)）、明確に液体浸透が促されていることが確認できる。一方、注入後の木材を液体中で比較的長い時間放置してから水撃を付与した場合（ $t = 7.0 \sim 8.0$ h の間）、その間の水撃による液体浸透の促進は認められたものの（図 14(b)）、促進の程度は、 $t = 1.0 \sim 2.0$ h の間に水撃付与する場合（図 14(a)）と比べて低下した。これは、注入後に長時間放置すると、その間にも液体浸透が進み、水撃作用で生じる圧力波が木材中を伝搬する距離が長くなるため、圧力波が木材中を伝搬する間に減衰して、水撃作用の効果が低減された可能性が考えられる。このほかにも、水撃によって比較的突破が容易な閉鎖壁孔が、長時間の液中放置によって突破された可能性も考えられる。

キリについては（図 15）、液体（水）を減圧注入してから液体中で比較的短い時間放置してから水撃を付与した場合（ $t = 1.0 \sim 2.0$ h の間）、液体浸透が大きく促されることが確かめられた。一方、注入後の木材を液体中で比較的長い時間放置してから水撃を付与した場合（ $t = 7.0 \sim 8.0$ h の間）、その間の水撃による液体浸透の促進は認められ（図 15(b)）、その程度は、 $t = 1.0 \sim 2.0$ h の間に水撃付与する場合（図 15(a)）と比べて低下する傾向はスギと同様だった。しかし、試験片によっては、 $t = 7.0 \sim 8.0$ h の間に水撃を付与した場合でも、大きく液体浸透が促される場合もあった。これは、キリについては、木材への液体浸透を妨げるのに柔細胞が寄与している可能性があり、液中で木材を放置しても柔細胞に液体が浸透せず、そこに水撃が付与されて、柔細胞が壊れることによって、液体浸透が促された可能性が考えられる。水撃付与されたキリの木口断面の観察結果をみると（図 6）、道

管の周囲柔細胞について、細胞内腔が暗くなっていることも、水撃付与による柔細胞の破壊の可能性を支持するものである。

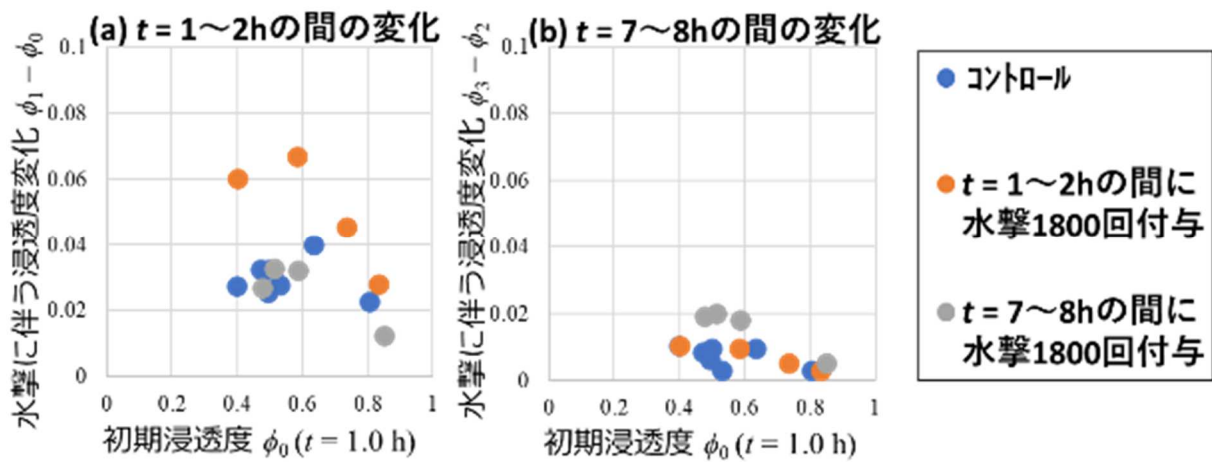


図 14. 水撃付与のタイミングが木材への液体浸透に及ぼす影響（スギ）

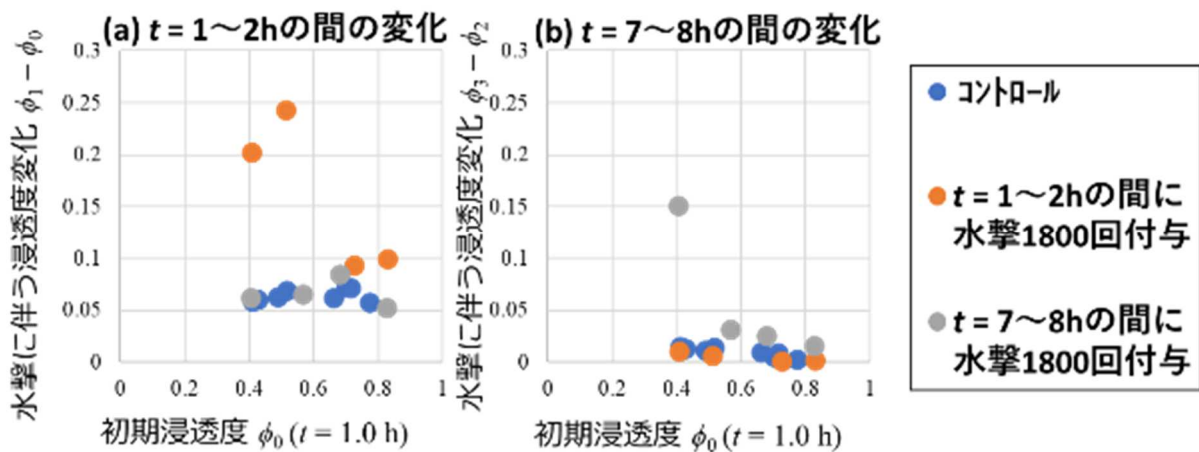


図 15. 水撃付与のタイミングが木材への液体浸透に及ぼす影響（キリ）

5. まとめ

水撃発生装置の改良および連続水撃発生装置の試作を行った。改良した水撃発生装置は、安定的に水撃作用を発生させることができ、木材に水撃作用が及ぼす影響を調べられる程度までには、装置の耐久性を高めることができた。一方、連続水撃発生装置では、連続的な水撃作用の発生には成功した

ものの、装置の耐久性が十分ではなく、木材への連続的水撃作用の影響を調べられるものとはならなかった。

改良した水撃発生装置を用いて、広葉樹（キリとウリン）および針葉樹（スギ、ヒノキ、アカマツ、ベイヒバ）の心材に対して水撃作用を付与したところ、いずれの樹種においても水撃による液体浸透の促進も確認された。水撃付与に伴う寸法変化も統計学的な有意差が認められるほどではなかった。広葉樹のキリとウリンにおいては、浸透阻害組織であるチロースの部分的破壊や除去が木口表面において認められた。キリについては、水撃付与による柔細胞の破壊の可能性も示唆された。一方、針葉樹では、スギについてのみ水撃作用による閉鎖壁孔の貫通が観察されたが、他の樹種においては、観察できなかった。

水撃付与スケジュールに関する検討の結果、スギでは、水撃付与回数と強さを増加させても液体浸透への影響はある程度のところで頭打ちになった。キリでは、水撃付与回数と強さの増加に伴って液体浸透は増加する傾向だった。これは、水撃付与によって浸透阻害部が貫通されてから液体が次の浸透阻害部に到達するまで経路が、スギがキリと比べて長いことによるものと推察された。また、液体浸透を開始してから、長い時間をとってから水撃を付与すると、特にスギについて水撃作用の効果が大きく低減されることがわかった。これは、水撃作用で生じる圧力波が木材中を伝搬する距離が長くなるため、圧力波が木材中を伝搬する間に減衰して、水撃作用の効果が低減されたためであると推察された。特に、ある程度液体浸透が進んだ針葉樹材では、閉鎖壁孔を十分に貫通するために必要な衝撃圧は、今回発生させた水撃作用で生じる衝撃圧よりもずっと高い可能性があり、水撃作用の威力を高めることが今後も求められる。また、他の課題として、水撃作用と他の処理の組み合わせによる効果的な液体浸透促進の模索や、水撃作用による液体浸透促進メカニズムのさらなる詳細な検討が求められる。