

博士論文

ウッドデッキの表面損傷が水濡れ時の
内部水分停滞に及ぼす影響

大澤 朋子

第1章	序論	1
1.1	緒言	1
1.2	先行研究	3
1.2.1	エクステリアウッドの耐久性	3
1.2.2	エクステリアウッドの表面割れと耐久性	4
1.2.3	木材の腐朽と含水率の関係	6
1.2.4	木材の吸水及び乾燥機構	7
1.2.5	内部含水率評価手法	8
1.3	本研究の目的	9
1.4	本論文の構成	9
第2章	屋外暴露したウッドデッキの表面割れ観察	11
2.1	はじめに	11
2.2	実験	11
2.2.1	試験体	11
2.2.2	ウッドデッキの暴露試験と腐朽評価	13
2.2.3	表面割れ測定	13
2.3	結果と考察	14
2.3.1	デッキ材及び根太の腐朽評価	14
2.3.2	表面割れ測定結果	16
2.3.3	樹種による腐朽程度の違い	17
2.3.4	表面割れと腐朽の関係	18
2.4	まとめ	19
第3章	分割法による水濡れ時の内部含水率評価	20
3.1	はじめに	20

3.2	実験	20
3.2.1	割れ加工モデルの吸水・乾燥試験.....	20
3.2.1.1	試験体と割れ加工.....	20
3.2.1.2	吸水処理.....	21
3.2.1.3	乾燥処理.....	22
3.2.1.4	分割法による内部含水率の評価.....	22
3.3	結果と考察	23
3.3.1	割れ加工モデルによる内部含水率の評価.....	23
3.3.1.1	吸水量の比較.....	23
3.3.1.2	吸水と乾燥過程における内部含水率の変化.....	25
3.3.2	高含水率状態と腐朽の関係.....	30
3.3.3	デッキ材の表面割れと水分停滞が腐朽に及ぼす影響.....	31
3.4	まとめ	31
第4章	X線デンシトメトリー法を用いた非破壊内部含水率評価の検討.....	32
4.1	はじめに	32
4.2	実験	32
4.2.1	X線デンシトメトリーによる非破壊内部含水率算出の検討.....	32
4.2.1.1	X線デンシトメトリーの原理.....	32
4.2.1.2	X線撮影装置.....	33
4.2.1.3	試験体.....	35
4.2.1.4	吸水・乾燥試験.....	35
4.2.1.5	検量線作成と含水率算出.....	37
4.2.2	吸水方法の検討.....	38
4.2.2.1	試験体.....	39

4.2.2.2	吸水・乾燥試験.....	39
4.2.2.3	X線デンシトメトリー法による内部含水率測定.....	40
4.3	結果と考察.....	41
4.3.1	検量線の検討.....	41
4.3.2	吸水方法の検討.....	44
4.3.2.1	吸水量による比較.....	44
4.3.2.2	内部含水率分布による比較.....	45
4.4	まとめ.....	51
第5章	割れ加工モデルによる水濡れ後の内部含水率評価.....	52
5.1	はじめに.....	52
5.2	実験.....	52
5.2.1	試験体.....	52
5.2.2	吸水・乾燥試験.....	53
5.2.3	X線デンシトメトリー法による内部含水率測定.....	54
5.2.4	検量線の作成.....	56
5.2.4.1	試験体.....	56
5.2.4.2	吸水・乾燥試験.....	57
5.2.4.3	X線撮影と画像データの処理.....	57
5.3	結果と考察.....	58
5.3.1	検量線の決定.....	58
5.3.2	割れ加工近傍の水濡れ後の含水率変化の特徴.....	61
5.3.3	割れ深さの違いが水分停滞に与える影響.....	70
5.3.4	樹種及び部位の違いが水分停滞に与える影響.....	75
5.4	まとめ.....	75

第6章	釘穴加工モデルによる水濡れ後の内部含水率評価.....	76
6.1	はじめに	76
6.2	実験	76
6.2.1	試験体	76
6.2.2	吸水・乾燥試験.....	77
6.2.3	X線デンスITメトリー法による内部含水率測定	79
6.3	結果と考察	80
6.3.1	吸水・乾燥繰り返しによる影響.....	80
6.3.2	穴深さの違いによる含水率変化の影響.....	98
6.3.3	繊維方向吸水が水分停滞に与える影響.....	102
6.4	まとめ	104
第7章	表面損傷による吸水方向の違いが水分停滞に及ぼす影響.....	106
7.1	はじめに	106
7.2	実験	106
7.2.1	試験体	106
7.2.2	吸水・乾燥試験.....	107
7.2.3	内部含水率測定.....	107
7.2.3.1	使用したデータ	107
7.2.3.2	釘穴モデルの含水率補正.....	107
7.3	結果と考察	109
7.3.1	深さ方向の含水率分布の特徴.....	109
7.3.2	表面損傷内部の含水率変化.....	115
7.3.3	デッキ材に対する耐久性上の配慮.....	117
7.4	まとめ	119

第 8 章	結論	120
引用文献	122	
謝辞	129	

第1章 序論

1.1 緒言

ウッドデッキを始めとするエクステリアウッドは、木材の持つ視覚的な柔らかさや、歩行感・手触りのよさから、公共建築物、公園、住宅など様々な場所で使用されており、特に無機質になりがちな都市空間において住空間のアメニティ向上に寄与している¹⁻³⁾ (Fig. 1-1)。エクステリアウッドに関する居住性評価の観点からの研究としては、多種のデッキ材の表面温度・熱伝導率・比重と、一対比較法による温冷感評価の相関⁴⁾や、多種の材質の座面からなるベンチを設置し、四季を通した利用者数の比較⁵⁾などがある。

一方、屋外で使用するエクステリアウッドは室内で使用する場合に比べて気象条件が過酷であることや、公共に設置される場合は不特定多数の利用があることから耐久性への配慮が不可欠で、特に腐朽による木材の強度低下に注意しなければならない。

エクステリアウッドの耐久性についてはその需要の大きな北米やヨーロッパにおいて研究が盛んである。例えばカナダでは 1992 年の時点で保存処理木材生産量が 2,000,000m³ 近くあり、イギリスはカナダと同程度、アメリカはその 10 倍の生産量があると言われている⁶⁾。同時期の日本での保存処理木材の生産量はカナダの 1/5 にも満たないが、我が国のエクステリア市場も徐々に伸びており⁷⁾、その大半を占めるウッドデッキは最も身近なエクステリアウッドと言える。世界的に見ればウッドデッキ市場は今後成長が見込める分野で、アメリカの民間調査会社に依れば 2015 年時点で 7,210 百万 US ドルの市場が 2021 年には 7,810 百万 US ドルに増加すると予測されている⁸⁾。その市場のほとんどが北米であるが、近年はヨーロッパにおいても生産量が伸びてきていると思われ、EN (European Standard)において保存処理木材等の評価試験法が多数規格化されていることからその傾向が伺える⁹⁾。ヨーロッパでは薬剤処理だけでなく、環境や人体への影響に配慮した化学修飾木材、熱処理木材等

への注目が高まり、その耐久性評価や適切な評価指標が求められている¹⁰⁾。翻って我が国においては、エクステリアウッドに対する耐久性評価方法は開発途上の感がある。屋外使用の木材における耐久性評価は基本的に杭試験のみであり、諸外国のように非接地利用のウッドデッキや手すり等の評価に適した試験方法はない¹¹⁾。一方で、ウッドデッキなどを想定した非接地利用の野外試験の開発の試みも始まってきている¹²⁾。

エクステリアウッドの耐久性において求められるのは、最終的には耐用年数がどのくらいになるか、メンテナンス計画はどのようにすればよいのかという情報であろう。2007年に木材保存関係の初めての国際規格、ISO 21887:2007 “Durability of wood and wood-based products - Use classes”が制定された¹³⁾。これは、木材・木質材料の使用環境を乾燥・湿潤、接地・非接地等によって区分し、要求される耐久性能を評価するための目安とするものである。このような共通の指針を基に、木材・木質材料の耐久性を客観的に評価する仕組みが必要であろう。ISO 21887の使用環境区分（ユースクラス）でも明確に分けられるように、屋外使用の木材は水掛かりの程度が腐朽条件に大きく左右する。一般に、垂直使用の材よりも水平使用の材の方が水分停滞が起こりやすく、ウッドデッキはその点で板壁材などに比べて不利である。さらに、ウッドデッキの板目面に割れや穴等の損傷があった場合にどのような影響が出るのか調べた事例は見当たらない。

本研究では、ウッドデッキの表面損傷が降雨による内部含水率上昇及び水分停滞にどのような影響を与えるのか明らかにし、腐朽の生じる繊維飽和点近くの含水率に長く保たれるかを目安として耐久性上の評価を行うこととした。

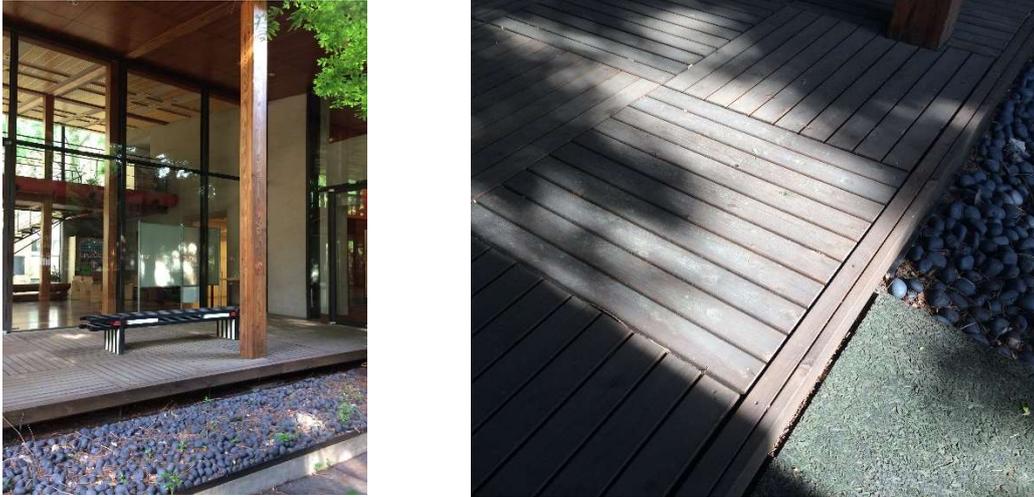


Fig. 1-1 Usage example of wood deck

Note: The left of the picture is wood deck equipped in Yayoi auditorium, and the right is a detail of deck.

1.2 先行研究

1.2.1 エクステリアウッドの耐久性

屋外で使用するエクステリアウッドは風雨、太陽光からの紫外線、土壌からの吸水、空気中の木材腐朽菌の飛来等により、室内で使用する場合に比べて厳しい劣化条件に曝される。エクステリアウッドの劣化は、表面の美観を損ねる退色やカビなどによる変色を別にすれば、問題となるのは木材の強度低下を引き起こす腐朽菌やシロアリによる劣化である。本研究においては生育環境を整えばどこでも被害が発生する可能性のある腐朽に着目して述べる。木材の強度低下は木材腐朽菌による木材細胞壁の分解に起因する。特にセルロース、ヘミセルロースを選択的に分解する褐色腐朽菌においては強度低下が著しい¹⁴⁾。木材腐朽と強度に関する研究は、腐朽が曲げ強度や圧縮強度に及ぼす影響を見たもの¹⁵⁾、木材成分の減少率と曲げ強度低下の関係を見たもの¹⁶⁾、圧縮強度や引張強度への影響を見たもの¹⁷⁾などがあり、いずれも無欠点小試験片を強制腐朽して強度低下が起こることを確認している。

実際の使用条件においての木材腐朽は様々な要因が関係して起こるため、発生要因の特

定や腐朽によりもたらされる影響を確認することが困難であるが、過去の劣化調査からエクステリアウッドの耐久性上の弱点が明らかになっている。実使用材の劣化調査は主に被害が甚大となる木橋や公園遊具において行われている。例えば、高耐久性樹種であるボンゴシの木橋が落下した事故においては継手部の水分滞留が指摘され¹⁸⁾、設置後15年経過した木橋の調査では、梁桁の上部よりも下部の方が腐朽程度が大きかったと報告されている¹⁹⁾。公園遊具の調査では干割れや接合部のがたつきから雨水が浸入し、初期腐朽が進行すると報告されている²⁰⁾。いずれも局所的な水分停滞が木材腐朽を引き起こしている。木材腐朽によって構造上重要な接合部や梁桁の一部の強度が低下すれば、他の部分は健全であっても安全とは言えない。木橋の分野においては安全に使用するための維持管理マニュアルも整備されつつある²¹⁾。

エクステリアウッド耐久性向上のためには、まず適切な材料選択、次に水分停滞の起こらない構造が重要である。木材腐朽は栄養、温度、水、酸素（空気）の4条件が必要²²⁾で、温度と酸素は通常の使用環境では木材腐朽菌の生育範囲外には制御できない。よって栄養分である木材を耐腐朽性のある樹種や防腐処理木材とすること、水分が滞留しないよう風通しのよく水はけのよい構造とすることが重要である。ウッドデッキの使用の盛んなアメリカではウッドデッキを長持ちさせるために必要な施工上の注意が示されており、デッキ材木口からの水の侵入への配慮や水切りのよい納まりなどが推奨されるとともに²³⁾、メンテナンス法についても示されている²⁴⁾。

1.2.2 エクステリアウッドの表面割れと耐久性

屋外で使用する木材は、降雨による膨潤・収縮や太陽光による紫外線劣化によって表面割れ（干割れ）が生じる。特に板目で使用する場合にその影響が顕著である。表面割れが生じても強度的には影響のない程度であるが、表面割れはしばしば腐朽の開始点であると言われる²⁵⁾。表面割れと木材腐朽の関係を調べた研究は、次のようなものがある。山本²⁶⁾は木製窓枠の腐朽率調査を行い、重回帰分析の結果腐朽率への影響は材割れと植栽が高いと指

摘した。矢田²⁷⁾は、CCA 処理した外構部材が干割れによって未浸潤部が露出し腐朽につながったことを指摘した。De Groot ら²⁸⁾は 18 種類の非接地屋外暴露試験によって木材の耐久性を評価し、表面割れが増加すると腐朽度も増加することを述べた。津島ら²⁹⁾は木製柵の劣化調査によって、木製柵の小径丸太の表面に割れが生じ、表面は乾燥していても内部の腐朽が進んだことを指摘した。Brischke ら³⁰⁾は断面寸法の異なる木材を用いて異なる程度の表面割れを発生させ、5 年間の非接地野外試験の結果、表面割れから褐色腐朽が進行したと述べた。

一方、表面割れは腐朽に直接影響しないとの見解もある。雨宮³¹⁾は設置後の表面割れ発生により薬剤処理の未浸潤部が露出することを避けるため、十分に乾かして表面割れを発生させた後に薬剤処理をするべきと述べている。Dahlen ら³²⁾はサザンパイン辺材を屋上暴露と非接地屋外暴露することによって耐久性の相関を評価したが、屋上暴露条件では表面割れが多い方が降雨後に乾きやすく耐久性上優位に働いたと述べた。

表面割れは木材が乾湿繰り返しによって寸法変化することに起因するため、撥水性を高めて膨潤・収縮を抑え、表面割れの発生を抑えようという試みもある。矢田ら³³⁾は、デッキ材を想定して表面割れによる撥水性の低下をパラフィン含浸によって改善できる可能性のあることを述べた。Schultz ら³⁴⁾はサザンパイン由来のアビエチン酸、樹脂酸を用いて撥水剤を試作し、その効果を調べた。Brischke ら³⁵⁾は非接地野外暴露試験であるラップジョイント試験、ダブルレイヤー試験においてワックスによる撥水効果を試みたが、初期は撥水効果があるものの 1 年目には無処理と同程度まで吸水したと述べた。

木取りや加工によって表面割れを低減する試みもある。Sandberg ら³⁶⁾は、木取りによる表面割れの発生比率を顕微鏡的に観察し、柁目木取りが表面割れ低減に有効と指摘した。渡辺ら³⁷⁾は木口面の年輪傾斜角の差異と表面割れ発生との関係を調べ、表面割れは年輪傾斜角が大きくなると発生率が下がり、そのしきい値は 40° であると述べた。Sandberg³⁸⁾は非接地野外暴露試験による耐久性評価において、辺材に割れが多く発生し心材には少ないのは、吸

水性の違いが影響していると考察した。Evans ら³⁹⁾はデッキ材の表面割れ軽減のために畝加工を施すことによって大きな割れを減少できると述べた。

エクステリアウッドに生じる表面割れは雨水を集めて腐朽につながるというのはよく言われることであるが、実際に内部がどのような含水率状態になっているのか調べた事例はほとんど見られない。Bornemann ら⁴⁰⁾は様々な頭部形状を持つ支柱を屋外暴露し、その支柱内部の含水率を抵抗式水分計によって測定したが、表面割れが生じても四方に勾配を設けた柱頭部の含水率は25%以上にならなかったと述べた。

1.2.3 木材の腐朽と含水率の関係

木材の腐朽要因には水が重要な役割を果たす。木材腐朽菌は自由水のみを利用することができ、木材含水率が繊維飽和点以上となると腐朽のリスクが増大する。既に腐朽した材が近くにある場合は健全材の含水率が繊維飽和点以下でも腐朽が始まるため、一般的には木材の含水率が20%以上となると要注意と言われる⁴¹⁾。

木材腐朽菌と含水率との関係については多くの研究がある。水本⁴²⁾はアカマツを用いた室内試験で、含水率15%から腐朽が始まったと述べた。土居ら⁴³⁾はナミダタケの腐朽生育条件を調べ、含水率22%~25%から腐朽が始まると述べた。Suzuki⁴⁴⁾は含水率20~30%では腐朽は始まらず、含水率が50%以上となると腐朽が進むが乾燥工程を挟むとその進行は止まると述べた。Viitanen⁴⁵⁾は含水率28~30%となる温湿度で腐朽が進むが温度に依存し、低温ならより高湿度が必要と述べた。Råberget ら⁴⁶⁾は含水率約30%の繊維飽和点以上で腐朽が進むが、菌種によってはそれ以下でも腐朽が進むものがあると述べた。Meyer ら⁴⁷⁾も複数樹種の室内試験によって繊維飽和点以下でも腐朽が生じたと述べた。

建築物等の劣化診断においても含水率を目安にすることがある。多くは20~30%を腐朽判断の目安の境としている。有馬ら⁴⁸⁾は鉄筋コンクリート造集合住宅の木造床組の劣化および室内湿度の実態調査を行う際、含水率20%を腐朽判断の目安とし、含水率20%となる相対湿度はおおよそ90%程度であり、温度のわずかな下降によって結露等を引き起こす境界

点と判断されるためとしている。Rapp, AO ら⁴⁹⁾は、降雨による濡れと木材の浸透性を比較し、耐用年数算出のための指標 MRI (moisture induced risk index)を提案した。MRI は含水率 25%を腐朽リスクの下限值としている。齋藤ら⁵⁰⁾は腐朽菌が木材を分解する過程で生じる水分も考慮した建築壁体の木材腐朽予測モデルを検討し、室内試験での質量減少率と分解によって生成される水分は比例関係にあることを示した。また繊維飽和点以上の水分があれば含水率の高低は腐朽速度には影響しないと述べた。

このように木材含水率と腐朽の関係には様々な研究報告があるが、腐朽菌が生育できるのは基本的に繊維飽和点以上となる含水率 30%以上であり、腐朽リスクの判断としては含水率 20%~30%のいずれかを目安とすれば問題ないと考えられる。

1.2.4 木材の吸水及び乾燥機構

ウッドデッキを始めとするエクステリアウッドに降雨が生じると、親水性の木材は速やかに濡れる。また、降雨が止めば速やかに表面は乾く。ここで生じる木材の吸水・乾燥機構は、針葉樹であれば仮道管を主体とした毛管現象である。エクステリアウッドの降雨による水濡れに着目した吸水機構の研究はあまり見られないが、現象としては乾燥木材への吸水と同じと考えられる。吸水は主として木口面から繊維方向に毛管の表面張力により生じ、木材の浸透性は、心材よりも辺材が、繊維直交方向よりも繊維方向が大きい。樹種、繊維直交方向、早晚材における浸透性の差異は、その組織構造による影響が強く、樹種によってそれぞれ異なっている⁵¹⁾。乾燥木材は、その乾燥過程で水分通導を担う仮道管の壁孔が閉鎖し、また心材化により心材物質が堆積して壁孔を塞ぐため、吸水性のよい材料ではない⁵²⁾。

乾燥木材にどの程度吸水が行われるかについては古くから様々な研究がある。貴島ら⁵³⁾は顕微鏡を用いて染色した水が木材中に浸透する過程を観察し、繊維方向への浸透が支配的で、その直交方向へは数細胞程度しか浸透しないと述べた。林ら⁵⁴⁾はまた、放射組織の発達したアカマツの繊維直交方向浸透はスギやヒノキと比べて 10 倍以上の浸透量があることを確認した。多様な樹種の吸水性については葉石ら⁵⁵⁾が 70 樹種の JIS Z 2104 による吸水試

験を行っている。浸透性改善については矢田⁵⁶⁾の界面活性剤添加の効果を見たもの、矢田⁵⁷⁾の初期含水率が浸透性に与える効果を見たものがある。

木材乾燥については主に生材からの乾燥研究が主であるが、乾燥材が降雨によって吸水した場合の乾燥は、含水率の変化は生材からの乾燥よりも少なく表層のみで行われるためより単純に捉えられるはずである。

小倉 武夫⁵⁸⁾は表面蒸発速度は含水率 20%、70%を境に傾向が変わることを示した。満久⁵⁹⁾は板の厚さが 1cm 以下では恒率乾燥が主で、それ以上厚くなると内部拡散の影響が出ると述べた。井阪⁶⁰⁾は木材表面上の静止空気層の影響を考慮し同一風速下で温度差同じであれば、樹種・繊維方向にかかわらず一定の蒸発速度であるとした。

1.2.5 内部含水率評価手法

木材の含水率を測定するのに最も簡便な方法は JIS Z 2101:2009 による含水率測定で、いわゆる全乾法と言われるものである。内部の含水率分布を調べるには材料を分割し、それぞれの含水率を測れば精度よく含水率分布を得ることができる。しかし測定の都度試験体を破壊する必要があることや、測定範囲は分割できる部分に限られることから一般的には 1cm 角程度の範囲を測定するのに適している。また、建築現場では電気抵抗式、高周波容量式などの携帯型含水率計による測定も主流であるが、測定範囲は装置の大きさによって制限され、断面の含水率分布情報は得られない。継時的に含水率を測定する手法としては電気抵抗式水分計によるものがよく見られる。Brischke ら⁶¹⁾は屋外木製品の耐用年数評価のために、屋外暴露した木製品の内部に電極を差し込み、継時的な含水率測定を行う仕組みを開発した。Bulcke ら⁶²⁾は同様に含水率計とデータロガを用いて屋外暴露した合板の降雨による含水率の経時変化を調べている。Isaksson ら⁶³⁾も電気抵抗式含水率計とデータロガで非接地屋外暴露した木製品の含水率を継時的に取得している。Ruther ら⁶⁴⁾は木製シングルの実大暴風雨試験において、試験体内部に電極を差し込み含水率を経時取得した。しかし、電気抵抗式による含水率測定は電極の接する部分の含水率しか計測できず、また繊維飽和点以上は

正確性に劣るといふ欠点がある⁶⁵⁾。

一方、新しい非破壊水分測定手法として X 線デンシトメトリー法が注目されている。木材の乾燥に適用したもの^{66, 67)}、や木材の吸湿性を見たもの⁶⁸⁾、木材の吸水性を見たもの^{69, 70)}などがあり、試験体を破壊することなく断面の含水率分布を調べることができる。

1.3 本研究の目的

本研究においては、エクステリアウッドの中でもウッドデッキに注目し、その耐久性向上のためにデッキ材内部の含水率が降雨によりどのように変化するかを詳細に調べることとした。また、デッキ材表面に表面割れや釘穴等の損傷があった場合に内部含水率にどのような影響を与えるのかを把握し、耐久設計に反映することを目的とした。耐久性評価にあたっては、内部含水率が腐朽を生じる危険性のある含水率 20~30%以上に長く保たれるかどうかを判断基準とした。

1.4 本論文の構成

本論文の章立ての構成を以下に示す。

第 2 章では、設置後 10 年経過したウッドデッキの劣化観察及び表面割れの深さ測定等を行い、腐朽と表面割れの関係性を調べた。

第 3 章では、表面割れを模した試験体を用いて水濡れ後の内部含水率変化を分割法を用いて調べた。

第 4 章では、分割法による含水率測定は破壊法であること、1 cm 角程度の大まかな含水率情報しか得られないという欠点を改善するため、X 線デンシトメトリー法による非破壊含水率測定手法を試みた。

第 5 章では、表面割れを模した試験体の水濡れ後の内部含水率変化について X 線デンシトメトリー法を用いて詳細に調べた。

第 6 章では、表面割れとは別のウッドデッキ表面損傷として、釘穴等の穴があった場合の

モデルについても X 線デンシトメトリー法によって評価した。

第 7 章では、第 5 章での割れモデル、第 6 章での釘穴モデルを通して、表面損傷の形状の違いや損傷部分の吸水方向の違いが内部水分停滞に与える影響を考察し、デッキ材の耐久設計への反映を検討した。

第2章 屋外暴露したウッドデッキの表面割れ観察

2.1 はじめに

設置後 10 年経過したウッドデッキの劣化観察及び表面割れの深さ測定等を行い、デッキ材の表面割れと腐朽の関係について考察することを目的とした。

2.2 実験

2.2.1 試験体

ウッドデッキは 1990 年 11 月に東京大学農学部 5 号館（東京都文京区、RC 造 5 階建て）屋上に暴露され、設置後 10 年経過したものをを用いた（Fig. 2-1）。屋上暴露の試験デッキの腐朽試験は一般的な野外試験地と比べれば緩やかな気象条件となるが、複数樹種の比較が目的であれば気象条件は同一となること、降雨による含水率上昇については適切に評価できるとの報告³²⁾もあることから、屋上暴露試験体についても腐朽度の評価を行うことは妥当であると判断した。試験デッキはスギ（*Cryptomeria japonica*）、ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）、レッドウッド（*Sequoia sempervirens*）の 3 樹種とし（Table 2-1）、防腐処理等の耐久化処理は行わずに、樹種ごとに 100 cm 角のパレット状に施工したものである。設置時の全乾密度はスギ 0.29 g/cm³、ヒノキ 0.42 g/cm³、レッドウッド 0.35 g/cm³であった。デッキパレットは、4 cm（R）×8～13 cm（T）×100 cm（L）のデッキ材 8～12 枚を根太側から釘打ちして表面から釘穴が見えない仕様とした。デッキ材はすべて板目、乾燥材を用い、木表が上になるように施工した。根太はすべてベイマツ（*Pseudotsuga menziesii*）とした。デッキパレットは、建物の屋上のコンクリートスラブの上に試験体とは別のウッドデッキを敷き、その上に敷設した。屋根はなく、雨ざらしの状態であった。

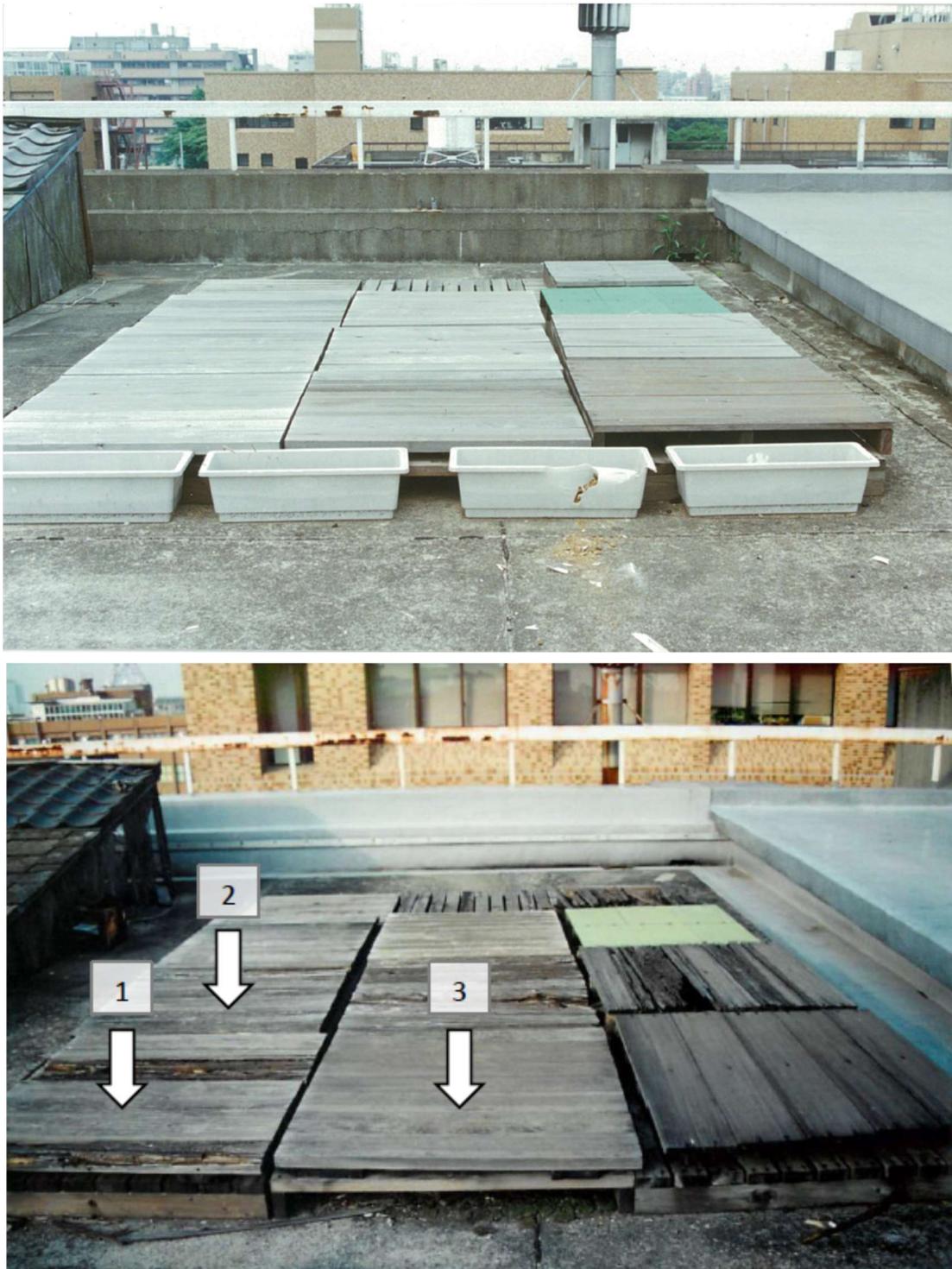


Fig. 2-1 Wood deck panels exposed outdoor for 10 years

Note:

The upper side is just installed wood decks, and the lower side is after 10 years.

Arrows show the deck panels used in this study.

1: Japanese cedar (Sugi) 2: Japanese cypress (Hinoki) 3: Redwood

Table 2-1 Wood deck panel detail

Species	Panel dimension (cm)	Number of deck member	Deck member		
			Ave. width (cm)	Thickness (cm)	Oven-dry density (g/cm ³)
Sugi	100×100	8	12.5	4	0.29
Hinoki		12	8.3	4	0.42
Redwood		8	12.5	4	0.35

Note: Deck members are made of flat grain and air-dried lumber. All members are equipped with face-side up.

2.2.2 ウッドデッキの暴露試験と腐朽評価

まず、デッキの表面と裏面及び根太の腐朽程度を目視と触診で評価した。腐朽程度の評価は木造建築物の劣化診断指針⁷⁾などで定められているが、本研究では「大・中・小・なし」の4段階を用いることとした。評価はデッキパレット内の腐朽したデッキ材の目視による面積割合と個々のデッキ材の腐朽程度とを総合して判断し、デッキパレット内の腐朽面積が、概ね全体の1/2以上で腐朽程度の激しいものを「大」、1/4以上で腐朽程度が中程度のものを「中」、1/4未満でわずかに腐朽が見られるものを「小」、全く腐朽の見られないものを「なし」と評価した。デッキ材の腐朽の有無の判断にあたっては、表面における菌糸・子実体の有無、木材組織のはがれ、触診時の湿り気や材の柔らかさに着目した。

2.2.3 表面割れ測定

次に、ウッドデッキ表面の割れ本数及び深さを測定した。なお、腐朽が激しく割れ幅を測定できない部分を含むデッキ材は測定から除外した。割れ本数の測定は、シクネスゲージ(60M、理研測範製)を用いて割れ幅1mm以上のものを数え、割れ幅1mm以上2mm未満と2mm以上との2種類に区分した。割れ深さは、本数を数えた割れについて厚さ0.5mm

のシクネスゲージを定規として測定した。なお、樹種間でデッキ材の幅が異なったため (Table 2-1)、各樹種の割れ本数は以下のようにデッキ幅 10 cm あたりに換算した平均割れ本数によって評価した。まず、デッキパレット内で測定したすべての割れ本数を測定できたデッキ材の本数で除して樹種別の割れ本数平均値を求め、次いでその値に 10 (cm) を乗じ各樹種のデッキ材平均幅 (cm) で除した。

2.3 結果と考察

2.3.1 デッキ材及び根太の腐朽評価

設置後 10 年経過した各デッキ試験体の写真と腐朽の評価結果を Fig. 2-2 に示す。Fig. 2-3 にはスギ及びヒノキのデッキ木口の写真を示す。スギはデッキ材 8 本中 3 本が激しく腐朽していたが、それ以外の 5 本については目立った腐朽はなかった。腐朽の激しいデッキ材は裏面まで腐朽が進んでおり、腐朽程度は表面及び裏面ともに中と評価した。スギのデッキ材は腐朽が大きいものとそうでないものの差が明確であり、年輪傾斜角を考慮すると、辺材部分に近いデッキ材が腐朽し、心材を用いたデッキ材は健全であったと推定された。ヒノキはデッキ材 12 本中 1 本が腐朽し、表面は全体的に黒ずんでいたが裏面は多少の菌糸が見られるものの目立った腐朽はない状態であり、腐朽程度は表面が中、裏面は小と判定された。ヒノキについてはデッキ材間で大きな違いは見られなかったが、木口割れが目立ち、割れ部分が黒ずんでいた。レッドウッドはデッキ材表面に腐朽が見られず、腐朽程度はなしと判定された。裏面には多少の菌糸が見られ腐朽程度は小であった。

根太は 3 樹種のデッキとも同じベイマツを使用した。それぞれのデッキで根太の腐朽程度は異なった。スギとレッドウッドのデッキでは根太の腐朽が激しく、腐朽程度は大であった。一方、ヒノキのデッキでは根太の腐朽があまり見られず、腐朽程度は小であった。デッキ材と根太材の腐朽の程度の差が最も大きかったのがレッドウッドであり、デッキ材は健全でも根太の腐朽が非常に大きかった。

Species	Face of wood deck		Back of wood deck		Joist
	Overview picture	Rot level	Overview picture	Rot level	Rot level
Sugi		中 Moderate		中 Moderate	大 Severe
Hinoki		中 Moderate		小 Slight	小 Slight
Redwood		なし Sound		小 Slight	大 Severe

Fig. 2-2 Evaluation of rot level in wood deck panels exposed outdoor for 10 years

Note: Rot levels was evaluated by rot area.

Species	Overview picture
Sugi	
Hinoki	

Fig. 2-3 Cross sectional pictures of wood deck panels exposed outdoor for 10 years

2.3.2 表面割れ測定結果

3 樹種のデッキの表面割れを評価した結果を Table 2-2 に示す。また、Fig. 2-4 には、表面割れを幅 1 mm 以上 2 mm 未満と 2 mm 以上とに区分して比較した結果を示す。スギとヒノキについては腐朽したデッキ材の割れを測定できなかったため、スギは 8 本中 5 本、ヒノキは 12 本中 11 本、レッドウッドは 12 本すべての測定結果である。割れ深さは平均値と最大値を示した。Fig. 2-4 において、平均割れ本数が最も多かったのはヒノキであり、そのうち約 3 割が幅 2 mm 以上の大きな割れであった。スギとレッドウッドの平均割れ本数はいずれもヒノキの 1/3 程度であった。スギはヒノキの場合と同様に幅 2 mm 以上の大きな割れが約 3 割を占めていたのに対し、レッドウッドには幅 2 mm 以上の割れはほとんどなかった。また割れの深さについても、スギとヒノキは最大 2 cm であったのに対し、レッドウッドでは最大 1 cm と浅かった。

Table 2-2 Measurement detail of checks in wood decks exposed outdoor for 10 years

Species	Number of measured member per number of all (N/N)	Ave. width of deck member (cm)	Ave. number of checks per deck member (N)	Check depth (mm)	
				Ave.	Max.
Sugi	5/8	12.5	7.2	5.2	20
Hinoki	11/12	8.3	25.7	4.6	21
Redwood	8/8	12.5	8.8	3.8	10

Note: Number of checks with over 1mm width were counted and converted to that of 10 cm width deck member. Check depth was measured by a ruler with a thickness of 0.5 mm.

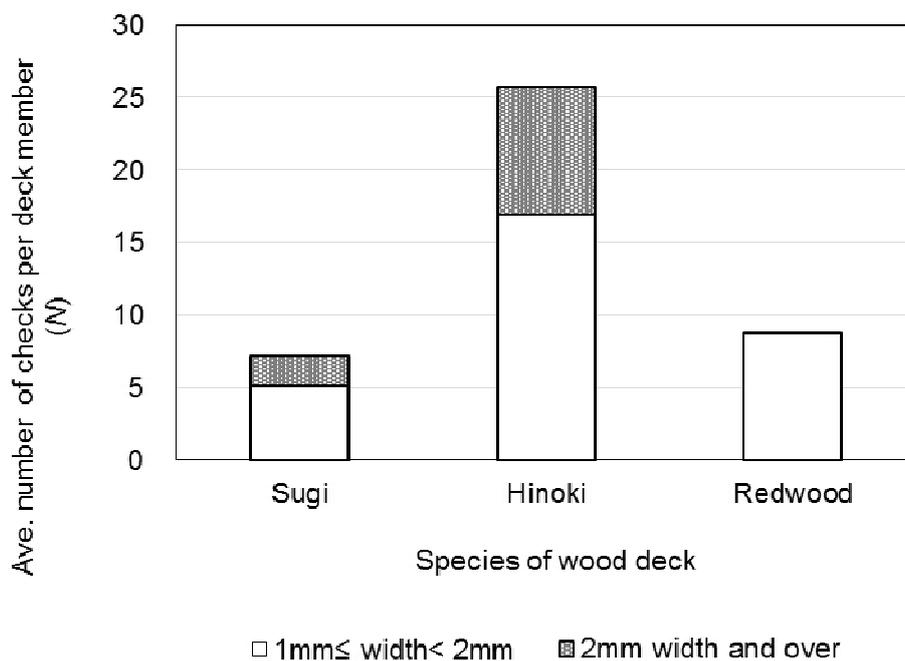


Fig. 2-4 Average number of checks per deck member

Note: Number of checks were converted to that of 10cm width deck member.

2.3.3 樹種による腐朽程度の違い

今回観察したデッキ材に使用された樹種は、デッキ材としてスギ、ヒノキ、レッドウッド

の3樹種、根太材としてベイマツの1樹種である。一般的な心材の耐久性で言えば、スギ、ベイマツが中、ヒノキ、レッドウッドが大となる²²⁾。3種類のデッキのうち最も腐朽が大きかったのはスギで、ヒノキ、レッドウッドと比べれば耐久性に劣る樹種であったが、デッキ材ごとに腐朽の程度の差が大きく、腐朽の激しかった部位は木口面の観察から辺材部分と推測され、辺材部分が10年で腐朽するのは妥当な結果と思われた。一方、心材に近い部位を使用したスギデッキ材は十分に綺麗な外観を保持しており、木取りに配慮すれば耐久性が大の樹種と同様に使用できる可能性が考えられた。耐久性が大とされるヒノキについては、スギと比べれば腐朽の程度はやや少ないものの表面割れが多く、表面割れを中心に黒ずんで劣化していた。表面の腐朽程度や割れと対照的に、裏面は比較的健全な状態で、雨や太陽光にさらされなければヒノキ本来の耐久性を保っているものと考えられた。ヒノキ同様耐久性が大とされるレッドウッドは、腐朽の程度は小さかった。表面割れについても、本数はあるものの浅いものが多く、デッキの表面、裏面ともに比較的健全であった。

ベイマツの根太については、ヒノキのデッキでは他の2樹種と異なり根太の腐朽が見られず、その一方で、デッキ表面が全く腐朽していなかったレッドウッドのデッキでは根太が激しく腐朽していた。ヒノキのデッキ根太が腐朽していなかった理由としては、ヒノキの抽出成分などデッキ材の樹種耐久性能に加え、デッキ材の幅が狭く、水はけがよかったことが挙げられる。水平部材では水分停滞の観点から幅広の材は好ましくないとされており⁷²⁾、ヒノキと同様に心材耐久性の高いレッドウッドのデッキ面と密着したベイマツ根太が腐朽した原因としては、スギの場合と同様に幅の広いデッキ材を使用したことで水はけが悪くなった可能性が考えられる。これらの結果から、デッキ材が健全であっても根太の腐朽の懸念があり、根太に使用する樹種の選定や接合部の構造について注意が必要であることが示唆された。

2.3.4 表面割れと腐朽の関係

屋外で使用する木材は雨や太陽光にさらされるため、特に板目の場合、材の乾燥収縮や紫

外線劣化によって表面割れを生じやすい。表面に発生した割れが多いほど、また大きく深いほど、木材中での水分滞留を助長しやすく、腐朽の原因となることが予想される。

今回の実験で使用した樹種のうち、デッキ材として表面割れの本数が最も多かったのはヒノキであり、割れの大きさと深さではスギとヒノキがレッドウッドを上回った。一方、腐朽については、スギとヒノキは中程度、レッドウッドは腐朽なしであった。一般的に心材の耐久性はスギが中、ヒノキとレッドウッドが大であるが²²⁾、今回、心材耐久性の高いヒノキとレッドウッドのうち、ヒノキの腐朽が顕著であったことから、ヒノキ表面に多数発生した大きな深い割れが腐朽の原因となった可能性がある。同様の効果は心材耐久性の低いベイツガなどにも見られており、大澤ら⁷³⁾が柾目木取り、板目木取り、板目木取りにおける滑り止め溝付き加工の3種類のウッドデッキについて設置後10年の劣化観察を行ったところ、劣化程度は板目木取り・溝付き>板目木取り>柾目木取りの順であり、溝付き加工では試験体が崩壊したと述べている。デッキ材の表面割れと溝付き加工には性質の違いがあるが、雨水の滞留が腐朽の要因となることは明らかである。そこで次の第3章では、表面にモデル的な割れを施した試験体を用いて吸水及び乾燥過程における内部含水率の変化を調べ、表面割れが材内部の含水率に及ぼす影響を検討することとした。

2.4 まとめ

設置後10年経過したウッドデッキの劣化観察及び表面割れの深さ測定等を行い、最大深さ2 cmの割れを持つスギ、ヒノキのデッキ表面はやや腐朽が進んでいたのに対し、最大深さ1 cmの割れに留まったレッドウッドのデッキには腐朽が見られなかったことを明らかにした。この着眼点より第3章以降のモデル試験に繋げた。

第3章 分割法による水濡れ時の内部含水率評価

3.1 はじめに

第2章での10年経過したウッドデッキの劣化観察では、最大深さ2 cmの割れを持つスギ、ヒノキのデッキ表面はやや腐朽が進んでいたのに対し、最大深さ1 cmの割れに留まったレッドウッドのデッキには腐朽が見られなかった。このことより深い割れがあることによってデッキ材内部の含水率が高く保たれ腐朽が進んだ可能性が考えられた。本章では、表面割れが内部含水率に与える影響を調べるため、モデル的に板目に割れ加工を施した試験体を吸水させ、乾燥過程の内部含水率を明らかにすることを目的とした。

3.2 実験

3.2.1 割れ加工モデルの吸水・乾燥試験

3.2.1.1 試験体と割れ加工

ウッドデッキ表面（板目面）からの吸水や乾燥に対し、表面割れの深さが材の吸水、乾燥過程に与える影響を調べるため、割れ加工を施したモデル試験体を作製した。樹種は、ウッドデッキに用いられる樹種のうち材が均質であり加工しやすいレッドウッド（*Sequoia sempervirens*）心材を用いた。寸法は、一般的なデッキ材の厚さを考慮して4 cm (R)×5 cm (T)×5 cm (L)とし、同条件の試験体は繊維方向にマッチングして9～12体を切り出した。板目面（木表側）に設ける割れ加工の深さ（以下「割れ深さ」という。）は0.5 cm、1 cm、又は2 cmとし、対照として加工なしも用意した。表面割れのモデル加工は、実際の割れを忠実に再現することは困難であるため、板目面にスリットが入った状態のデッキ材の吸水・乾燥過程を把握することを第一の目的とし、丸鋸を用いて板目面中央に木表側から幅1.8 mmの鋸目を繊維方向5 cmに亘って入れた。試験体は、吸水面に対する側面4面を木材干割れ防止剤（ランバーメイト、旭化成製）を十分に塗布して防水シールした後、吸水処理に供す

るまで 20°C、65%RH の恒温恒湿室に数日間静置し、調湿した。

3.2.1.2 吸水処理

吸水処理は降雨を想定し、20°C、90%RH (KNO₃ 調湿塩) の高湿度条件のデシケーター内で、試験体の割れ加工を含む板目面を水道水を入れたバットに 5 時間浸漬して吸水させた (Fig. 3-1)。試験体はバットの底面に敷いた高さ約 5 mm のスペーサー上に置き、試験体が浮かない程度の重しを載せ、割れ深さ 0.5 cm、1 cm、及び割れなしの試験体については試験体の下部 1 cm が水に浸かるように、割れ深さ 2 cm の試験体については試験体の下部 2 cm が水に浸かるように、それぞれバットに水道水を注いだ。なお、吸水処理の前後には各試験体の質量を測定し、吸水量を求めた。

吸水量は、JIS Z 2101 (2009)の吸水性試験に準じて、吸水前と吸水後の試験体の質量差を吸水面積で除して求めた。ただし、計算において割れ面積は考慮せず、割れない場合の板目面の面積と同一とした。また割れ面からの吸水影響についても検討するため、割れなしの試験体の吸水前後の質量差の平均を、割れを除く板目面の吸水増加量とみなし、これを割れ加工試験体のそれぞれの吸水後質量から差し引き、割れ面積 (1 面として計算) で除して割れ面の吸水量を求めた。

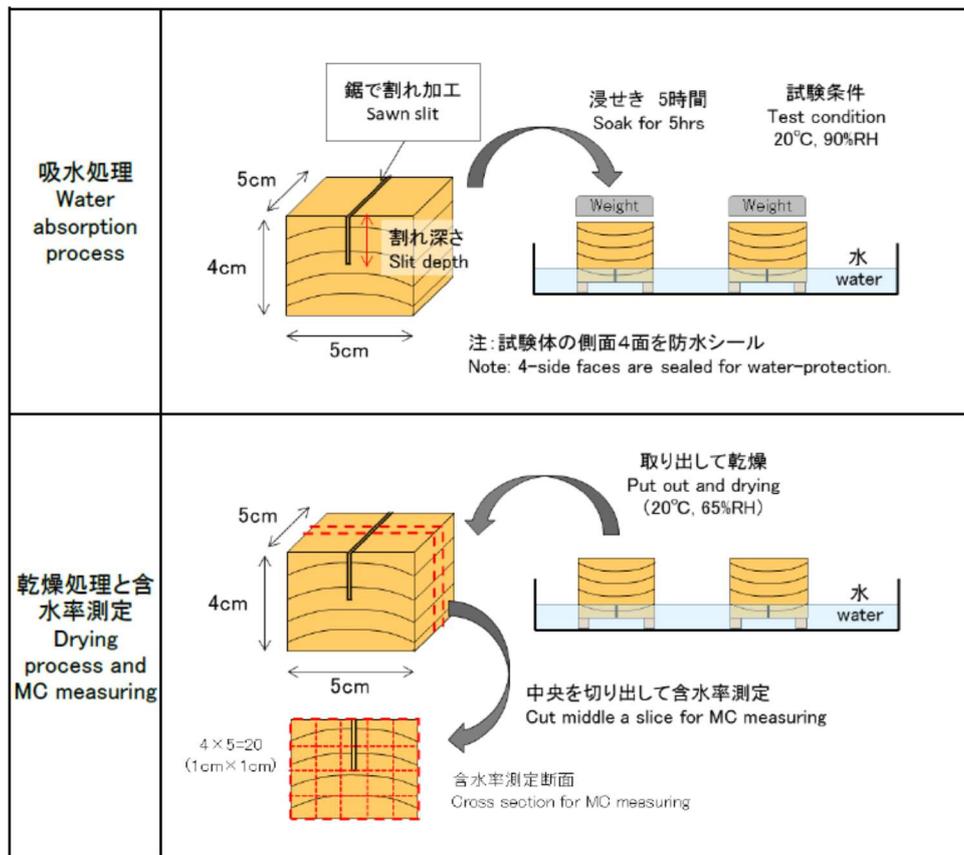


Fig. 3-1 Water absorption process, drying process, and moisture content (MC) measuring

Note: The width of slits is approximately 1.8 mm, and the depth of slits are 0.5 cm, 1 cm, and 2 cm, respectively. No-slit specimens are also tested.

3.2.1.3 乾燥処理

乾燥処理では、3.2.1.2の吸水処理により吸水させた試験体を、通常のウッドデッキ施工時と同じように割れ加工を含む板目面を上にして20°C、65%RHの恒温恒湿室に静置して乾燥させた。乾燥中の試験体内部の含水率変化とそれに及ぼす割れ加工の影響を調べるため、所定時間（2、4、6、18、24、48、72時間後）に各割れ深さの試験体から1体ずつ取り出し、3.2.1.4の分割法によって内部の含水率分布を求めた。

3.2.1.4 分割法による内部含水率の評価

吸水及び乾燥処理に供した試験体の一部は、試験体内部の含水率分布を調べるため、Fig.

3-1のように試験体の繊維方向中央から約1cm厚の木口試片を切り出し、1cm角に20分割して質量を測定した。なお試験体の切り出しと分割にあたっては、作業中の質量変化が最小限となるよう速やかに実施し、分割後の1cm角の小片は直ちに質量を測定した。秤量後の1cm角小片は105℃、24時間の条件で全乾質量を測定し、1cm角ごとの含水率を求め、試験体内部の含水率分布を評価した。

3.3 結果と考察

3.3.1 割れ加工モデルによる内部含水率の評価

3.3.1.1 吸水量の比較

ウッドデッキに生じた表面割れが、吸水量にどのような影響を及ぼすかを調べるため、割れ加工を施したレッドウッド材の吸水試験を行った結果を Fig. 3-2 と Fig. 3-3 に示す。Fig. 3-2 は吸水面あたりの吸水量、Fig. 3-3 は割れ面あたりの吸水量である。今回の試験は、板目表面からの放射方向吸水と割れ加工部分からの接線方向吸水によるものであり、Fig. 3-2 の結果から、5時間の試験で0.04~0.08 g/cm²程度の吸水が生じていたことがわかる。板目面からの吸水については、葉石ら⁵⁵⁾がJIS Z 2104 (1957) (JIS Z 2101 (2009)の吸水性試験と同内容)を用いて、針葉樹材の板目及び柾目面における24時間の吸水量を測定し、心材では0.05 g/cm²前後、辺材では0.1 g/cm²前後であったことを報告している。今回の結果もこれと同程度の値であり、割れ加工の影響や吸水時間に違いはあったものの、概ね類似の吸水が生じていたと考えられる。

Fig. 3-2において、吸水面あたりの吸水量は、割れなしと比べて割れ深さ0.5cmや1cmでは微増し、割れ深さ2cmで大きく増加した。Fig. 3-3の割れ面あたりの吸水量でも同様の傾向が見られ、割れ深さ2cmの増加が顕著であった。吸水は板目面に加えて割れ加工面からも起こるため、割れ加工の深さとともに吸水量が増加したことは妥当な結果である。一方、割れ深さ2cmにおいて吸水量増加の程度が特に大きかった理由については後述する。

なお、針葉樹の木口面からの吸水量について、葉石ら⁵⁵⁾は心材では 0.25 g/cm^2 、辺材では 1 g/cm^2 前後と報告しており、繊維方向の吸水量は放射方向又は接線方向に対して 5 倍以上の値である。放射方向、接線方向の吸水量は微量であるため、割れがあったとしても木口面吸水に比べれば非常に少ないと言える。

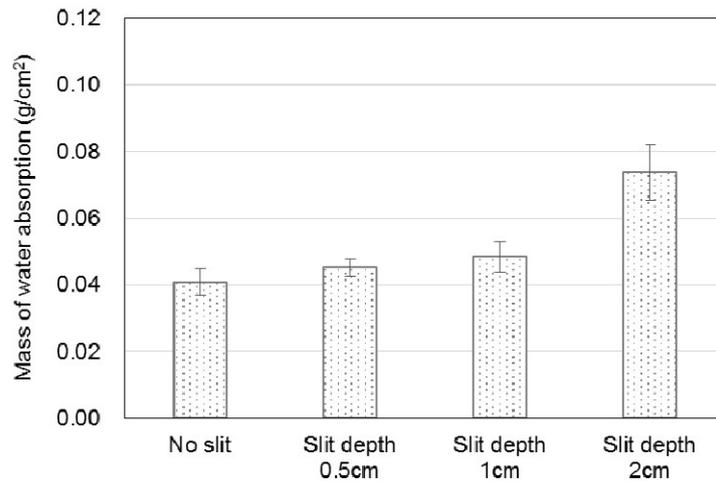


Fig. 3-2 Slit depth and mass of water absorption by absorption area

Note: Error bar shows standard deviation.

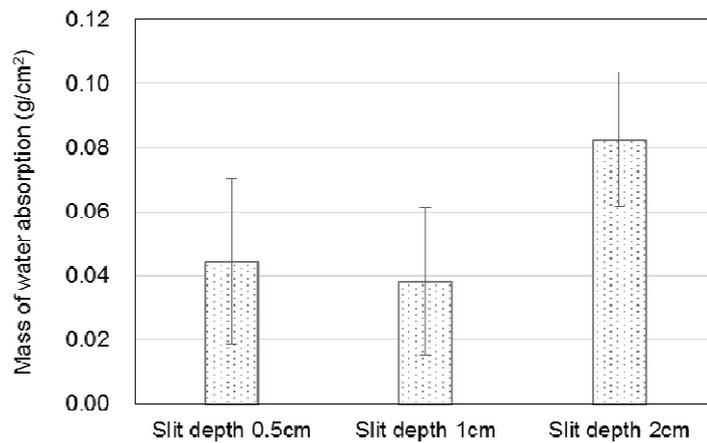


Fig. 3-3 Slit depth and mass of water absorption by slit area

Note: Error bar shows standard deviation.

3.3.1.2 吸水と乾燥過程における内部含水率の変化

(1) 内部含水率分布の変化

Fig. 3-4 に、表面（板目面、木表側）に割れ加工を施したレッドウッド材の試験体の吸水前（調湿後）、吸水 5 時間後、及び乾燥過程（6、18、24、48 時間後）における内部含水率分布の変化を示す。吸処理後は表層 1 cm 及び割れ加工の付近の 1 cm 角のみ含水率変化が大きいため、板目の吸水面及び割れ加工部分から吸水が起こり、その影響は割れ加工を含む 1 cm 角の範囲に収まっていたことが分かる。よって以降の議論は、その部分について行う。

吸水による含水率変化については、Fig. 3-4 より割れ深さが 0.5 cm 及び 1 cm の場合は 5 時間吸水後の含水率が 30%弱であったのに対し、割れ深さ 2 cm の場合は表層 1 cm の部分で含水率が 50%に達し、表層 2 cm（割れの最深部を含む）の部分でも 36%と比較的高かった。他方、割れ加工なしの試験体では、表層 1 cm の含水率が調湿後の 15%程度から、吸水後は 20%程度に増加した。木口断面の中央と両端で若干含水率に差があったが、いずれにしても含水率 20%程度に留まっており、割れがない部分で含水率が 30%を超えることはなかった。

乾燥過程における含水率変化に着目すると、割れ深さ 0.5 cm 及び 1 cm の試験体は、24 時間後にはほぼ吸水前の含水率に戻っていた。一方、割れ深さ 2 cm の試験体は、割れを含む表層 1 cm 角の含水率が 24 時間後でも 20%弱の値を、割れを含む表層 2 cm の 1 cm 角では 30%以上の高い値をそれぞれ維持した。乾燥 48 時間後までに表層 1 cm 角は元の含水率に戻ったが、表層 2 cm の 1 cm 角では元の含水率よりも若干高い 20%弱の値であった。

今回の実験では、割れ深さ 2 cm の試験体の割れ加工部分における吸水後の含水率が他の条件のものよりも高かった。本来、割れ深さ 1 cm の表層 1 cm の部分と割れ深さ 2 cm の表層 1 cm の部分では、吸水性は同じ条件であると考えられるが、今回は割れ深さ 2 cm の試験体のみ水深 2 cm の状態で吸水させたため、水圧の変化が吸水量や表層付近の含水率変化に

影響を与えた可能性が考えられる。

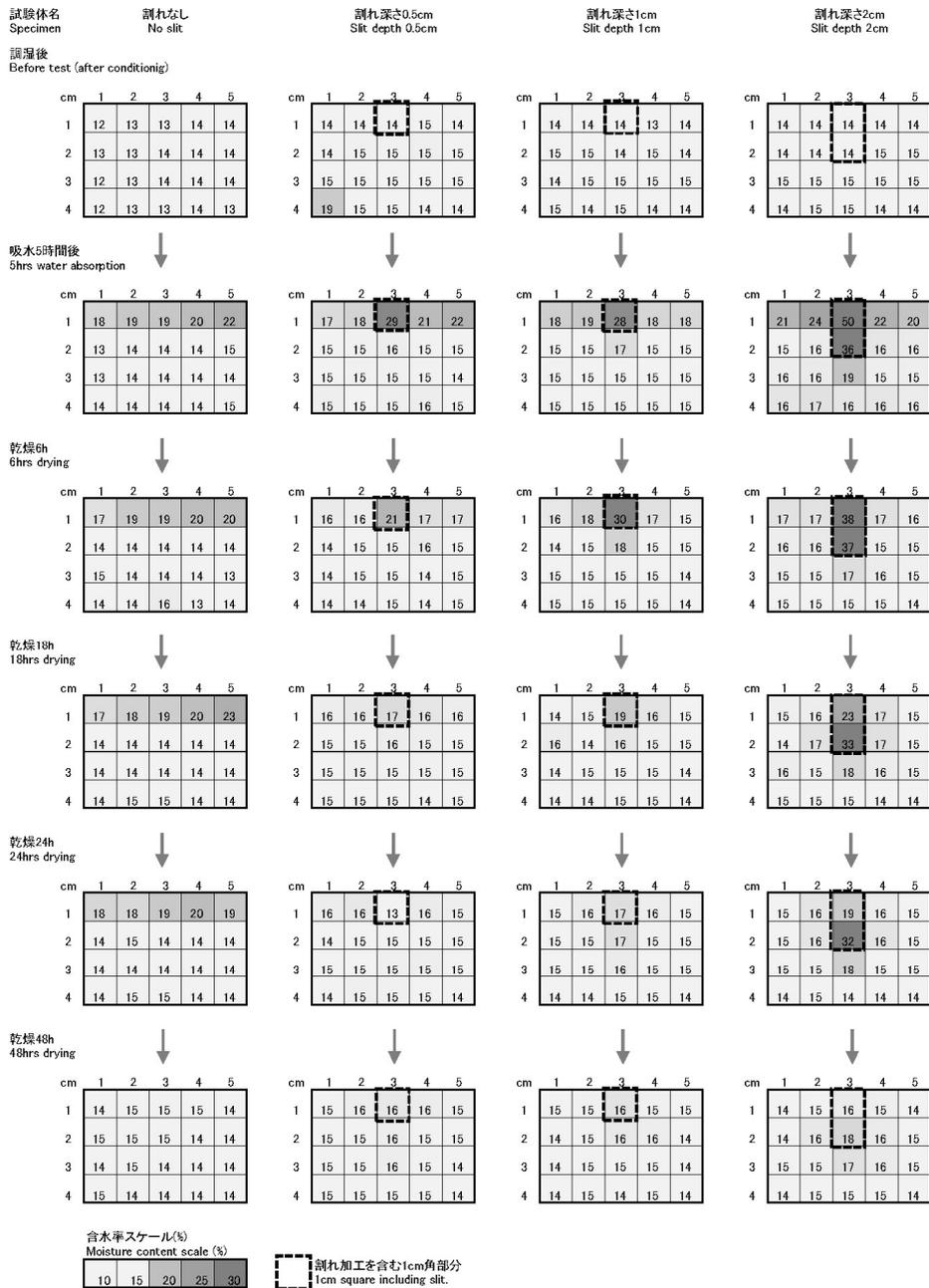


Fig. 3-4 Moisture content distribution of specimen slices in periods of water absorption and drying test

Note: Numbers in specimen slices denote the moisture content (%) in the part of 1 cm square.

(2) 割れ加工部分の含水率変化

割れ加工を含む 1 cm 角の部分の含水率変化を Fig. 3-5 及び Fig. 3-6 に示す。Fig. 3-5 には、割れ深さ 0.5 cm、1 cm、及び 2 cm の試験体について、割れ加工を含む表層 1 cm 角の含水率変化を示した。比較として、割れなしの試験体の表層中央部 1 cm 角の含水率も示した。時間軸は対数表示とした。ここで、割れなしは 1 cm 角に全く割れを含まず、割れ深さ 0.5 cm は 1 cm 角の半分の深さまで割れを含み、割れ深さ 1 cm 及び 2 cm は 1 cm 角のすべてに割れを含んでいる。Fig. 3-6 には、割れ深さ 2 cm の試験体について、割れ加工を含む表層 1 cm 及び表層 2 cm から得た 1 cm 角の含水率変化を示した。

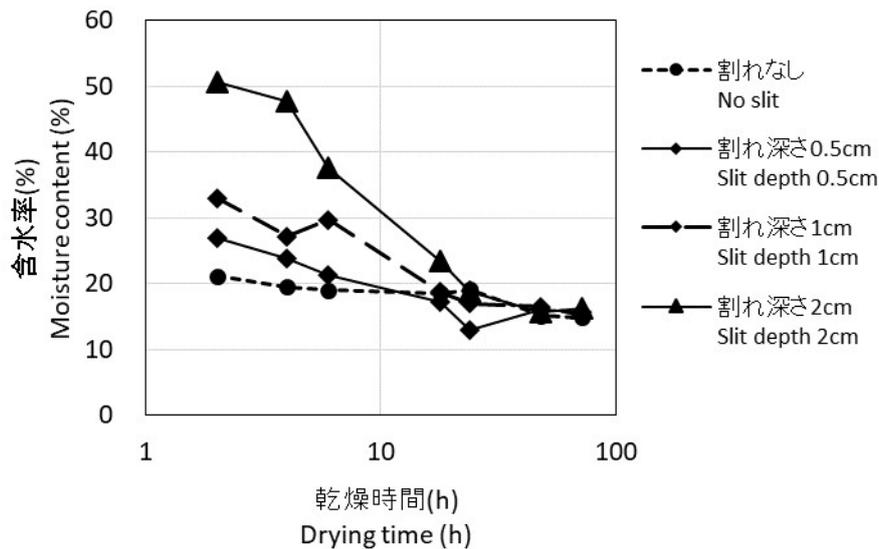


Fig. 3-5 Moisture content transition at surface layer in drying process

Note:

- Drying time was plotted during 2–72 hours.
- Moisture content was measured by 1 cm square including slit, except "No slit" measured same size of middle surface.

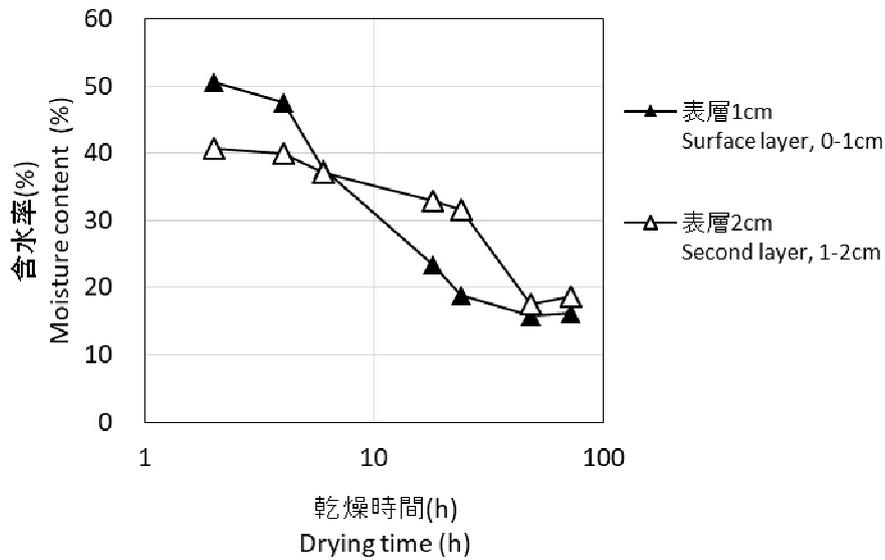


Fig. 3-6 Moisture content transition at slit area in drying process, slit depth 2cm

Note:

- Drying time was plotted during 2–72 hours.
- Moisture content was measured by 1cm square including slit.

Fig. 3-6 において、乾燥開始時の含水率がそれぞれの試験体によって異なり、割れ深さが大きくなるにしたがって吸水後の含水率が高かったが、いずれの試験体も乾燥 24 時間までにほぼ元の含水率に戻った。また、吸水後乾燥 2 時間から 72 時間までの含水率の経時変化は、いずれも乾燥時間の対数に比例した。試験体の乾燥速度を比較するため、Table 3-1 に乾燥 2～72 時間の乾燥時間の対数と試験体の含水率変化に関する近似直線式(Eq. 3-1)における a と b の値を示す。

$$u = a \ln(t) + b \quad \text{Eq. 3-1}$$

u = 含水率(%), a = 近似直線の傾き、 t = 乾燥時間(h)、 b = 近似直線の切片

Table 3-1 Linear approximation for moisture content transition in drying process

Specimen	Part	Slope (a)	Intercept (b)	Coefficient of determination (R ²)
No slit	Surface layer, 0-1cm	- 1.6	22	0.81
Slit depth 0.5mm		- 3.4	28	0.82
Slit depth 1cm		- 5.2	36	0.92
Slit depth 2cm		- 11.0	58	0.94
	Second layer, 1-2cm	- 6.7	48	0.87

Note:

$$u = a \ln(t) + b$$

u : Moisture content (%)

t : Drying time (h) during 2–72 hours

表層 1 cm の部位における近似直線の傾きは、割れ深さ 0.5 cm、1 cm でそれぞれ-3.4、-5.2 と同程度の値であったが、割れ深さ 2 cm では-11.0 とやや大きい結果となった。割れ深さ 2 cm の試験体では吸水後の含水率が約 50%と繊維飽和点よりも高かったが、蒸発量が多くなることによって割れ深さ 0～1 cm の試験体と同様に 24 時間までに乾燥が進んだと考えられる。Fig. 3-5 において、割れ深さ 2 cm の試験体における表層 1 cm と 2 cm の含水率変化を比較すると、表層 2 cm の部分は乾燥 2 時間後の含水率が 40%近くであり、表層 1 cm と同様に繊維飽和点よりも十分高いにもかかわらず、近似直線の傾きは含水率 30%前後からスタートする割れ深さ 0.5 cm や 1 cm の場合と同程度であった (Table 3-1)。この試験体は割れ部分でのみ外気と接していたことから、外気に触れにくく乾燥しにくかったためと考えられる。前述したように、割れ深さ 2 cm の試験体の表層 2 cm の含水率は乾燥 24 時間ではまだ 30%以上であり、乾燥 48 時間においてようやく 20%程度となった。木材乾燥において木

材表面の含水率が十分に高い場合、乾燥速度は風速による影響が大きいですが、表面が繊維飽和点近くまで乾燥してくると風速の影響はわずかとなり、外気との蒸気圧差や内部の水分拡散に影響されると言われている⁷⁴⁾。今回のような吸水状態では、乾燥に伴い表面近傍の含水率はすぐに繊維飽和点以下となると思われる。そのため割れ加工付近の含水率が高く保たれた原因としては、割れ加工面から蒸発した水が割れが深い場合には拡散しづらく、特に割れ深さが2 cm の場合では割れ加工部分が高湿度状態になったことが考えられた。したがって乾燥時の湿度が高い場合、つまり実環境において降雨が続いたり材が密着して風通しが悪い状態に置かれた場合には、割れのある材の内部はさらに乾燥しづらくなることが予想される。

3.3.2 高含水率状態と腐朽の関係

建築物において木材腐朽の危険性が高まるのは、一般的には木材が繊維飽和点以上となる場合であるが、すでに腐朽菌の定着していた木材表面から気中菌糸が発達し繊維飽和点以下の健全な木材を腐朽することがあるため、木材含水率が20%以上となると注意が必要¹⁴⁾と言われることが多い。また建築物の劣化調査においても含水率20%を基準にすることが多く、その理由として有馬ら⁴⁸⁾は、含水率20%となる相対湿度はおよそ90%程度であり、温度のわずかな下降によって結露等を引き起こす境界点と判断されるためとしている。一方Brischkeら⁷⁵⁾は、木質製品の耐用年数を屋外暴露試験体の腐朽度評価や含水率モニタリングによる結果を組み合わせる手法を提案し、含水率25%以上の場合をマイナス評価としている。このように耐久性評価における木材含水率については様々な見解があるが、本研究では含水率20%を腐朽に対するひとつの目安とした。今回の割れモデル試験において含水率が20%以上となったのは、基本的に割れ加工のある部分のみであった。しかし表層1 cm においては、割れ深さ0~2 cm のいずれの試験体についても、24時間程度の乾燥で元の含水率に戻ったことから、通常の使用においては問題のない範囲であると考えられた。一方で割れ深さ2 cm の試験体については表層2 cm の部分（割れの最深部を含

む)の含水率が高いまま乾燥が進まず、乾燥48時間又は72時間においても20%程度の含水率を保っていたことから、実際の使用環境においてこのような状態が続けば、腐朽の恐れが高まると考えられた。

3.3.3 デッキ材の表面割れと水分停滞が腐朽に及ぼす影響

防腐処理を行ったウッドデッキ等において表面割れが生じると、薬剤の未浸潤部が露出して耐久性能が低下することがある。よって薬剤の含浸を高め、使用後にも大きな割れが生じないように、心持ち材を避け、乾燥材を用いるべきと指摘されている²⁷⁾。また十分に表面割れを起こすまで乾かした後に薬剤処理するべきとの意見もある³¹⁾。これは薬剤の浸潤部と未浸潤部の防腐性能の差異が歴然としているためである。本研究で行った割れモデル試験において、深さ2cmの深い割れでは深部の含水率が長時間に亘って20%以上となることが確認され、そのような状態が続けば腐朽菌に侵されやすくなることが示唆された。また第2章の10年間屋外に暴露されたウッドデッキの劣化観察においても、深さ2cmの割れを持つスギやヒノキのデッキは腐朽が進んでいた反面、最大でも深さ1cmの割れしか持たないレッドウッドでは腐朽が見られなかった。以上の結果から、屋外で使用するウッドデッキの腐朽において注意が必要なのは、樹種の耐久性と共に深さ2cm程度の深い割れであると考えられた。逆に深さ1cm程度であれば、水分停滞の点から言えば問題は少ないと考えられた。

3.4 まとめ

表面割れが内部含水率に与える影響を調べるため、モデル的に板目に割れ加工を施した試験体を吸水させ、乾燥過程の内部含水率を分割法(全乾法)により調べた。その結果、割れ深さ0~1cmでは乾燥24時間で元の含水率に戻るのに対し、割れ深さ2cmでは割れの最深部の含水率が24時間後も30%以上に保たれることを明らかにした。

第4章 X線デンシトメトリー法を用いた非破壊内部含水率評価の検討

4.1 はじめに

第3章で用いた分割法による内部含水率の評価では破壊法であることや、1 cm 角範囲の大まかな分布情報に留まるといった欠点があるため、より詳細な内部含水率情報を得るために、非破壊法である X 線デンシトメトリー法を試みた。本章では、X 線デンシトメトリー法による内部含水率の評価手法を確立するとともに、試験体への吸水方法等についても検討することを目的とした。X 線デンシトメトリー法は Watanabe ら⁶⁾が木材乾燥中の内部含水率分布を求めた手法を参考としたが、Watanabe らは厚さ 5 mm 程度の薄い試験体を用い、生材からの乾燥過程の内部含水率分布を求めており、本研究の目的である乾燥材が板目面から吸水・乾燥する過程の内部含水率分布を求める場合と試験体の状況が異なり、新たな検討が必要となった。

4.2 実験

4.2.1 X線デンシトメトリーによる非破壊内部含水率算出の検討

4.2.1.1 X線デンシトメトリーの原理

X 線デンシトメトリー法は、物体に X 線を透過して得られる X 線透過画像の濃淡差を利用して物体の密度を求める手法である。Watanabe らは木材を木材実質と水の複合物ととらえ、含水率の測定に応用した。

物体を通過した X 線の強さは物体に吸収または散乱し、Eq. 4-1 のように減少する⁷⁾。

$$I = I_0 \exp(-\mu d) \quad \text{Eq. 4-1}$$

ここで I は厚さ d (mm) の物体を通過した後の入射 X 線 I_0 の X 線強度、 μ (-mm) は織弱係数を示す。 μ を物質の密度 ρ で割ると物質の種類によって定まる質量減弱係数 μ_m (mm²/g) が求まり、Eq. 4-1 は次のように変形できる。

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho d) \quad \text{Eq. 4-2}$$

さらに変形して以下を得る。

$$\ln(I/I_0) = -\mu_m \rho d \quad \text{Eq. 4-3}$$

X線の入射強さと物体通過後のX線の強さの比は試験体の厚さ d が同じであれば密度 ρ のみの関数となる。一方、Eq. 4-3 の左辺は 4.2.1.2 に示す X線デジタルマイクロスコープによって得られるデジタル画像の輝度値であり、各測定時の X線透過画像の輝度値差は物体の密度差と比例する。よって同一厚さ d による試験体の X線透過画像の輝度値差と既知の水のみかけ密度の関係式（水のみかけ密度の検量線）を実験的に求めておけば、全乾時と求めたい測定時の試験体の X線透過画像の輝度値差により水のみかけ密度が得られる。本研究においては木材の吸水・乾燥過程における変化が水分のみであると考え、同条件で撮影した全乾試験体との輝度値差より水のみかけ密度 ρ_{water} (g/cm^3) を求めることとした。

水のみかけ密度を木材実質の密度（全乾密度）で割ったものが含水率となる（Eq. 4-4）。

$$MC (\%) = \frac{\rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{substance}}} \times 100 \quad \text{Eq. 4-4}$$

ここで ρ_{water} は試験体に含まれる水のみかけ密度 (g/cm^3)、 $\rho_{\text{substance}}$ は試験体の全乾密度 (g/cm^3) である。

4.2.1.2 X線撮影装置

X線透過画像の撮影は X線デジタルマイクロスコープ（ μ B1600、松定プレジジョン製）を用いた（Fig. 4-1）。装置の設置条件は Fig. 4-2 のとおりである。設置条件等については既報¹⁾を参考とした。Fig. 4-2 に示すように、既存のステージで撮影できる X線透過画像では拡大率が大きすぎるため新しく 80 mm の高さのステージを設置し、X線源からの距離を 115 mm として撮影した。また、X線画像の輝度値補正を検討するため、X線撮影の際には Fig. 4-2 に示すように試験体と一緒に 1 mm の厚さの亚克力板も撮影した。撮影条件は管電圧 50 kV、管電流 180 μ A とした。X線透過画像は装置内のデジタルカメラによって 12 ビ

ットグレースケール（4096 階調）で撮影した画像を表示レンジ 500～1600 の範囲で 8 ビットグレースケール（256 階調）に保存した。本装置により得られる X 線透過画像データは、実寸法約 40 mm 角の範囲を 1024 × 1024 pixel の解像度で撮影したものである。

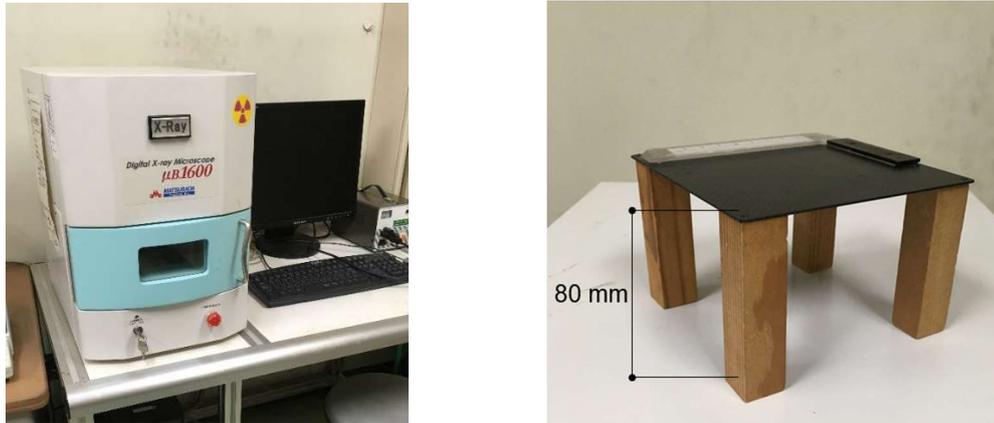


Fig. 4-1 Picture of X-ray digital microscope and new installed atage

Note: The left of a figure is the picture of X-ray digital microscope (μB 1600), and the right is the new installed stage in this test.

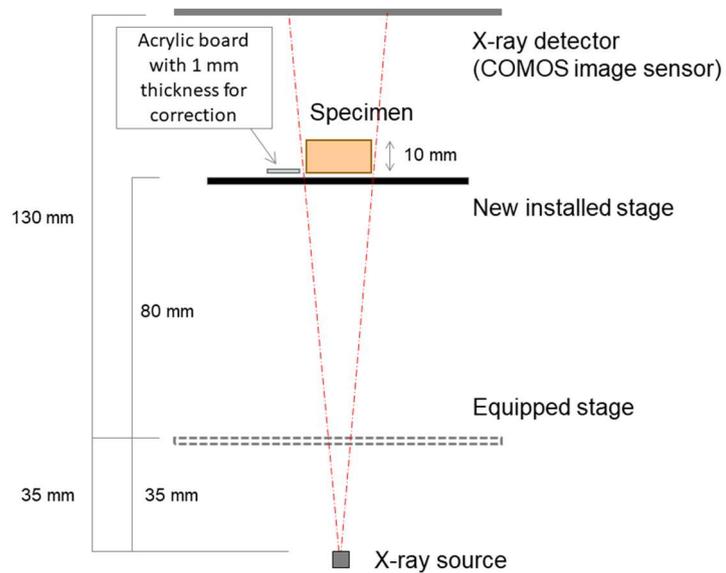


Fig. 4-2 X-ray digital microscope setup

4.2.1.3 試験体

スギ (*Cryptomeria japonica*) 心材を試験体とし、寸法は 10 mm (T) × 20 mm (R) × 30 mm (L)とした。試験体の厚さは X 線画像を撮るにあたり制限があり、歪みのない良質な画像を得るには X 線透過方向に最大 10 mm と考えられるため、今回は 10 mm の厚さ (接線方向)とした。また、今回用いた X 線照射装置では一度に撮影できる試験体の大きさは 40 mm 角であったため、幅 10 mm の輝度値補正用アクリル板を同時に撮影することも想定し幅 20 mm (放射方向)、長さ 30 mm (繊維方向)とした。吸水は試験体への吸水が顕著である繊維方向とした。試験体および吸水試験条件を Table 4-1 に示す。試験体は防水のために吸水面以外の 5 面をシリコン樹脂 (シリコンシーラント 8060 クリア色、セメダイン製) でシールしたもの、シールを一切しないものの二種類とし、それぞれ 3 体用意した。試験体はシリコン樹脂の硬化後、吸水・乾燥試験に供する前に 103°C、24 時間で全乾とした。また、あらかじめシール前の試験体木材の全乾密度を求めておき、平均で 0.35 g/cm³であった。

Table 4-1 Specimen and test profile

Dimension of water absorption face	Waterproof seal	Position of water feeder
10 mm (T) × 20 (R) mm	No seal	Top
	Five-faces except water absorption face	Top

4.2.1.4 吸水・乾燥試験

水のみかけ密度の検量線を求めるにあたり、試験体への吸水は第 5 章以降の本試験で想定する吸水・乾燥試験と同様とした。本試験ではウッドデッキ材の降雨後の内部含水率変化を調べることをしているため、今回の予備試験においても降雨を想定した高湿下で試験体の上部から吸水させた (Fig. 4-3)。吸水・乾燥試験は 24 時間の吸水処理とそれに続く 24 時

間の乾燥処理を基本とするが、今回は検量線の作成及び試験体の吸水限度を調べるため、吸水処理は1週間、乾燥処理も1週間行った。また、試験体は103°C、24時間で全乾としたものを吸水0時間として吸水させた。吸水処理は、同条件の試験体3体ずつを並べ、その上に蒸留水を十分に含ませたメラミン樹脂製スポンジ（断面40 mm × 45 mm × 高さ30 mm）を載せることによって試験体の上から吸水させた。吸水処理は蒸留水を共存させたアクリルデシケーター内で行い、20°C、99%RH、無風であった。メラミン樹脂製スポンジは乾燥防止のため1日ごとに蒸留水を再度含ませた。吸水処理を終えたのち、直ちに乾燥処理を行った。乾燥処理はメラミン樹脂製スポンジを取り除き、20°C、65%RHの恒温恒湿機内で行った。恒温恒湿機のファンにより風速1 m/sであった。

吸水・乾燥試験中の試験体は任意の時間に取り出し、4.2.1.2に示すX線デジタルマイクロスコープによってX線透過画像を撮影した。また、X線撮影の前に電子天秤で試験体の質量も測定した。X線撮影と質量測定は次の時間に行った。

吸水処理時：0、1、4、8、24時間後、及び2～7日後

乾燥処理時：1、4、8、24時間後、及び2～7日後

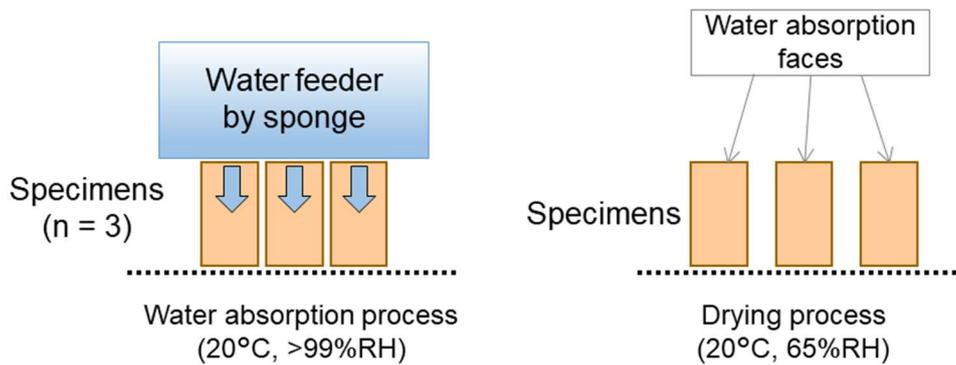


Fig. 4-3 Water absorption and drying test with water feeder sponge

4.2.1.5 検量線作成と含水率算出

X線透過画像は画像処理ソフトウェア (ImageJ1.50i、National Institutes of Health) を用い、試験体全体が入るように選択した ROI (Region of interest、Fig. 4-4 右図) の平均輝度値を各画像において求めた。

全乾時の X 線透過画像と各測定時点の輝度値の差は水の増加分を意味することより、同時に測定した試験体の質量差から水のみかけ密度を求め、全乾との輝度値差と水のみかけ密度の一次関係式 (Eq. 4-5) を求めた。この関係式を検量線とし、試験体の含水率を Eq. 4-6 によって算出した。

$$\rho_{water} = (G_0 - G_i) \times a + b \quad \text{Eq. 4-5}$$

$$MC (\%) = \frac{(G_0 - G_i) \times a + b}{\rho_{substance}} \times 100, \quad \text{Eq. 4-6}$$

ここで、 ρ_{water} は水のみかけ密度 (g/cm^3)、 G_0 は全乾時の X 線透過画像の輝度値、 G_i は各測定時間 i における X 線画像の輝度値、 a と b は検量線の傾きと切片である。 MC は含水率 (%)、 $\rho_{substance}$ は全乾密度 (g/cm^3) であり、今回は試験体の平均全乾密度 0.35 g/cm^3 を用いた。 G_0 、 G_i については、得られた画像の輝度値をそのまま使う場合と、同時に撮影した 1 mm 厚さの亚克力板の輝度値が変化しないものとして亚克力板の輝度値が同じとなるように ROI 部分の輝度値に線形補正を行ったものの 2 種類について求めた。 1 mm 厚さの亚克力板の輝度値は各画像によってばらつきがあったが概ね 200 付近であったため、今回はすべて 200 となるように補正した。また、Eq. 4-6 の計算結果が 0 以下となった場合は $MC (\%) = 0$ として扱った。

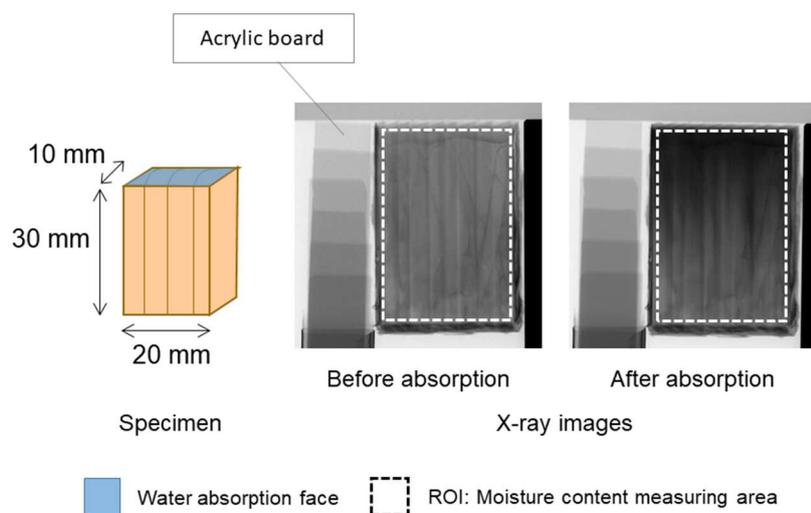


Fig. 4-4 Specimen and X-ray image

4.2.2 吸水方法の検討

試験体への吸水方法について、確認のため複数の方法を検討した。まず、試験体の防水シールを5面とするか4面とするか、次に試験体への吸水を上から行うか、下から行うかである。検討した仕様を Table 4-2 に示す。防水シールは吸水面以外からの吸水を防止するため行うものである。今回は繊維方向吸水（木口面が吸水面）としたため、4.2.1 では吸水面以外の5面を防水シールした。しかし5面シールとすると内部の空気が圧縮されて吸水の駆動力が抑制される可能性がある。よって吸水面の対面をシールせず4面防水シールとしたものも検討した。また、吸水方法についても、水が毛細管現象によって木材に浸透する際、上から押し広がる場合と下から吸い上げられる場合では吸水量等にどの程度の差が生じるのか検討した。

Table 4-2 Specimen and test profile (sealing and absorption direction)

Dimension of water absorption face	Waterproof seal	Position of water feeder
10 mm (T) × 20 (R) mm	Five-faces except water absorption face	Top
		Bottom
	Four-faces except water absorption face and opposite face	Top
		Bottom

4.2.2.1 試験体

スギ (*Cryptomeria japonica*) 心材を試験体とし、寸法は 10 mm (T) × 20 mm (R) × 30 mm (L)とした。試験体および吸水試験条件は Table 4-2 のとおりである。吸水面は木口面 1 面とした。防水シールはシリコン樹脂 (シリコンシーラント 8060 クリア色、セメダイン製) を塗布し、吸水面のみシールしないものを 6 体、吸水面とその対面をシールしないものを 6 体作製した。試験体はシリコン樹脂の硬化後、吸水・乾燥試験に供する前に 103°C、24 時間で全乾とした。また、あらかじめシール前の試験体木材の全乾密度を求めておき、平均で 0.35 g/cm³であった。

4.2.2.2 吸水・乾燥試験

吸水処理 24 時間、乾燥処理 48 時間とした。試験体の吸水は全乾状態から行った。4.2.2.1 の 2 種類のシール方法で作製した試験体のうち、3 体ずつ異なる吸水方法で吸水させた。Table 4-2 に示すとおり、上から吸水させるか下から吸水させるかである。上から吸水では試験体の吸水面の上に蒸留水を含ませたメラミン樹脂製スポンジを置くことにより、下から吸水ではガラス容器に蒸留水を張ってメラミン樹脂製スポンジを沈ませ、その上に試験体を置くことにより行った (Fig. 4-5)。吸水処理は蒸留水を共存させたアクリルデシケーター

内で行い、20°C、99%RH、無風であった。吸水処理を終えたのち、直ちに乾燥処理を行った。乾燥処理は吸水スポンジを取り除き、20°C、65%RHの恒温恒湿機内で行った。恒温恒湿機のファンにより風速1 m/sであった。乾燥処理においては、いずれの試験体も吸水面が上になるように設置した。

吸水・乾燥試験中の試験体は任意の時間に取り出し、4.2.1.2に示すX線デジタルマイクロスコープによってX線透過画像を撮影した。また、X線撮影の前に電子天秤で試験体の質量も測定した。X線撮影と質量測定は次の時間に行った。

吸水処理時：0、4、8、24時間後

乾燥処理時：1、4、8、24、48時間後

24時間吸水後の吸水量 (g/cm^2) は、JIS Z 2101 (2009)の吸水性試験に準じて吸水前と吸水後の試験体の質量差を吸水面積で除して求めた。

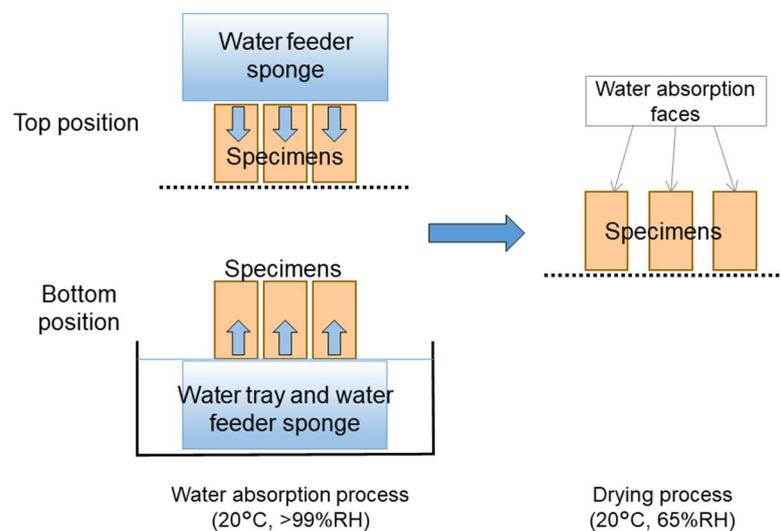


Fig. 4-5 Water absorption and drying test and water feeder position

4.2.2.3 X線デンストメトリー法による内部含水率測定

X線透過画像は、画像処理ソフトウェア (ImageJ1.50i、National Institutes of Health) を用いて処理した。まず、同一試験体の吸水・乾燥試験中の一連の画像を ImageJ プラグイン

(Template matching) を用いて位置合わせを行い、Fig. 4-6 に示す ROI (Region of interest) で切り取った。次に、X 線透過画像の 28 ピクセルが実寸法の 1 mm とほぼ等しいため各画像を 1/28 のサイズに縮小した。こうして得た 1mm 角の平均輝度値情報を持つ画像をテキスト形式で保存し、表計算ソフト (エクセル 2013、マイクロソフト社製) で全乾画像との輝度値差を求めた。最後に 0 で求めた検量線から 1 mm 角の含水率分布を求め、0%~50% のグレースケールグラデーションによってグラフにプロットした (Fig. 4-6)。

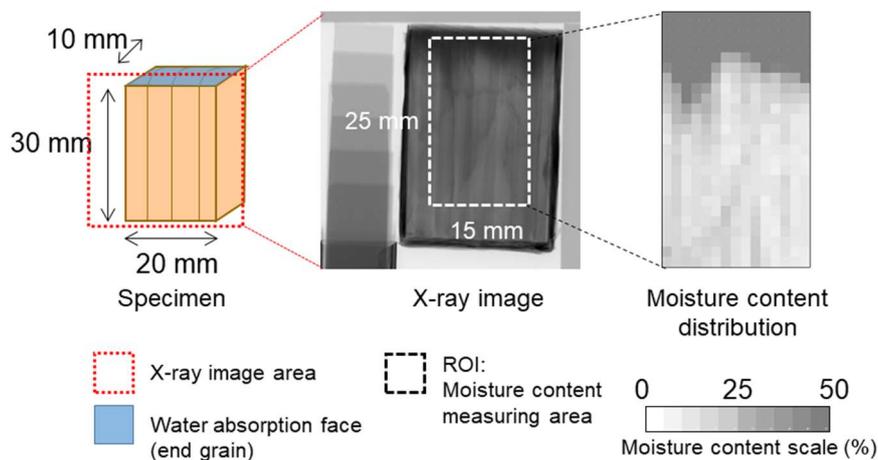


Fig. 4-6 Scheme of moisture content distribution measuring with X-ray densitometry

4.3 結果と考察

4.3.1 検量線の検討

X 線画像の輝度値差と水のみかけ密度の相関図を Fig. 4-7 に示す。左がアクリル板による輝度値補正なし、右が輝度値補正ありである。X 線画像は撮影毎の画像の明暗が若干異なり、特に撮影日が変わるとその影響が大きい。そのため、輝度値補正を行わない場合には特に輝度値差が小さい場合 (水分量が少ない場合) に測定値が大きくばらついた。0 に示す手順で 1 mm のアクリル板の輝度値を基準に補正を行った場合は、輝度値差が小さい場合でもばらつきは少なかった。

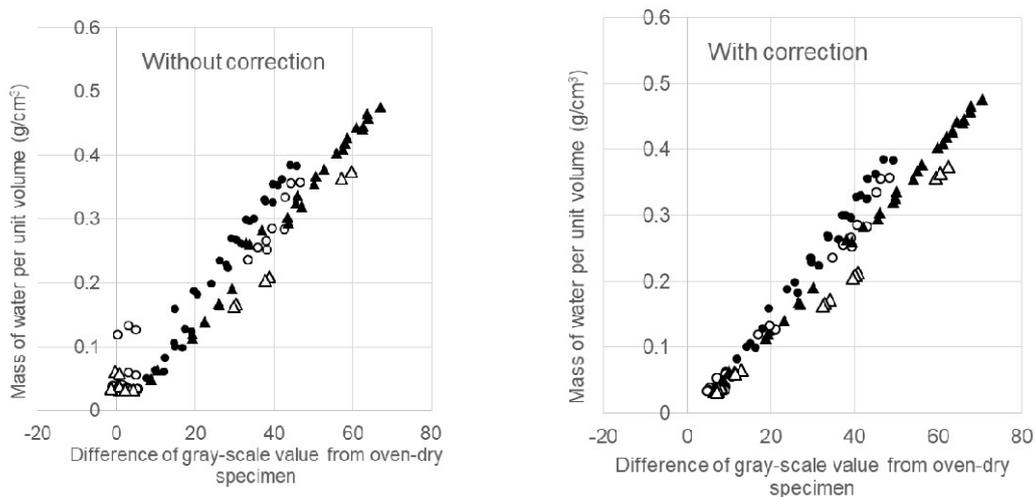


Fig. 4-7 Effect of corrections in calibration curve

Note: Symbols are as follows; ▲: no sealing specimens in water absorption process, △: no sealing specimens in drying process, ●: five-faces sealing specimens in water absorption process, and ○: five-faces sealing specimens in drying process.

シールなし試験体、5面シール試験体では5面シール試験体の方が輝度値差が小さくなった。これはシール剤に用いたシリコン樹脂は原子番号の大きなケイ素を含むため、X線が透過しづらくなった影響と考えられた。また吸水処理時、乾燥処理時の差は、5面シール試験体では差が少ないものの、シールなし試験体では乾燥処理時の方が輝度値差が大きくなった。これは、5面シール試験体では水の蒸発はほぼ吸水面でのみ起こるのに対し、シールなし試験体では6面全てから起こるため、X線透過方向における試験体の厚さでの含水率のばらつきが輝度値に影響していると考えられた。一方5面シール試験体においても、乾燥処理時には試験体の表面近くはすぐに乾燥が進み輝度値が下がるもののX線透過画像からROIを切り取る際に表層部分を完全に含むことが困難であり、実際よりも含水率が高い部分の比率が多くなることが考えられる。このため5面シール試験体においても乾燥処理時の輝度値差は吸水処理時に比べて大きくなっているが、シールなし試験体ほど大きな差は生じなかった。以上のことより、検量線の作成は、1mm厚さの亚克力板の輝度値を用いて補正を行った輝度値を用い、シリコン樹脂による5面シールを行った試験体から得ら

れた値を用いることとした。吸水処理、乾燥処理については、求めたい試験体の内部含水率にも両方の工程があることから、両者を合わせた値で検量線を作成することとした。Fig. 4-7 右図のシールあり試験体の吸水・乾燥過程のプロットから一次近似式を求め、Eq. 4-7 を得た。

$$y = 0.008x - 0.0166 \quad \text{Eq. 4-7}$$

$$R^2 = 0.9819$$

ここで y は水のみかけ密度 (g/cm^3)、 x は全乾との輝度値差である。決定係数は 0.9819 を得た。ところで Eq. 4-7 における輝度値差 x の値は、Fig. 4-7 からおよそ 5~50 の範囲である。よって一般的にはこの範囲から外れる場合は水のみかけ密度 y の値の正確性が下がると言える。特に $x < 5$ の場合は $y = 0.0234 \text{ g/cm}^3$ となり、Eq. 4-6 の ρ を 0.35 g/cm^3 とすれば含水率 6.7%の時である。さらに、Eq. 4-7 の切片 b は -0.0166 と計算されたため、輝度値差 $x < 2$ となる場合、 y は 0 となってしまう。含水率 0%~10%の算出値の正確性が下がることを避けるため、 $x < 5$ の場合は検量線の切片 b を用いない、原点通過のものを使用することを検討した。原点通過の場合の検量線はとなった。決定係数は 0.9766 であった。

$$y = 0.0075x \quad \text{Eq. 4-8}$$

$$R^2 = 0.9766$$

以上より、輝度値差 $x \geq 5$ の時に Eq. 4-7、 $x < 5$ の時に Eq. 4-8 を適用して 4.2.1 のシールあり試験体 3 体の含水率を X 線デンストメトリー法で求めたものと、同時刻に測定した質量差から全乾法によって求めた含水率を左図に示す。一次近似式の傾きは 0.9828 となり、ほぼ 1 であった。また、決定係数は 0.9821 となり高い相関性を示した。併せて、X 線デンストメトリー法で求めた含水率と全乾法で求めた含水率の差を右図のプロットしたところ、含水率 60%程度までは $\pm 5\%$ の精度、含水率 60%以上では $\pm 10\%$ の精度となった。

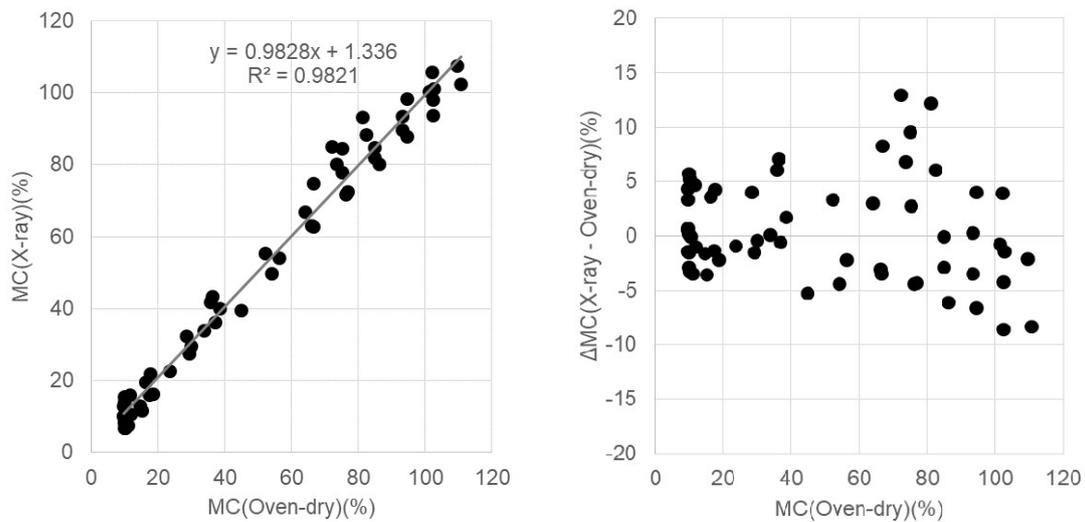


Fig. 4-8 Accuracy of calibration curve

Note: MC denotes moisture content calculated from the oven-dry method or the X-ray method.
 Δ MC denotes the difference in MC between the X-ray method and the oven-dry method.

4.3.2 吸水方法の検討

4.3.2.1 吸水量による比較

24 時間吸水後の吸水量を Table 4-3 に示す。5 面シール試験体の上から吸水を行った 3 体のうち 1 体が吸水 8 時間後においても吸水面の全面が濡れなかったため、その 1 体を除いた平均と標準偏差をアスタリスク付きで示した。24 時間の吸水量で比較すると、4 面シール吸水（吸水面の反対側がシールされていない）の場合は 5 面シールよりも吸水量が多くなったが、5 面シール試験体で上から吸水の場合の異常値を除いたアスタリスク値で比較すれば、5 面シール試験体の下から吸水以外は概ね同じ吸水量であると言える。吸水処理における経過ごとの吸水量を Fig. 4-9 に示す。この図における 5 面シール上から吸水の試験体は、異常値を除いた 2 体の平均を用いた。Table 4-3 と同様、5 面シール試験体の下から吸水のものを除けば他の 3 種類の試験体は概ね同様の吸水傾向を示していると言える。

Table 4-3 The mass of water absorption after 24 hours (g/cm²)

Waterproof seal	Position of water feeder	Mass of water absorption (g/cm ²)	
Five-faces except water absorption face	Top	0.52	(0.28)
	Bottom	0.64*	(0.28)*
Four-faces except water absorption face and opposite face	Top	0.65	(0.31)
	Bottom	0.72	(0.32)

Note: The value of each specimens is the average of three (n = 3) except asterisked. The value with asterisk shows the average of two (n = 2) except an irregular datum. The number in parentheses shows standard deviation.

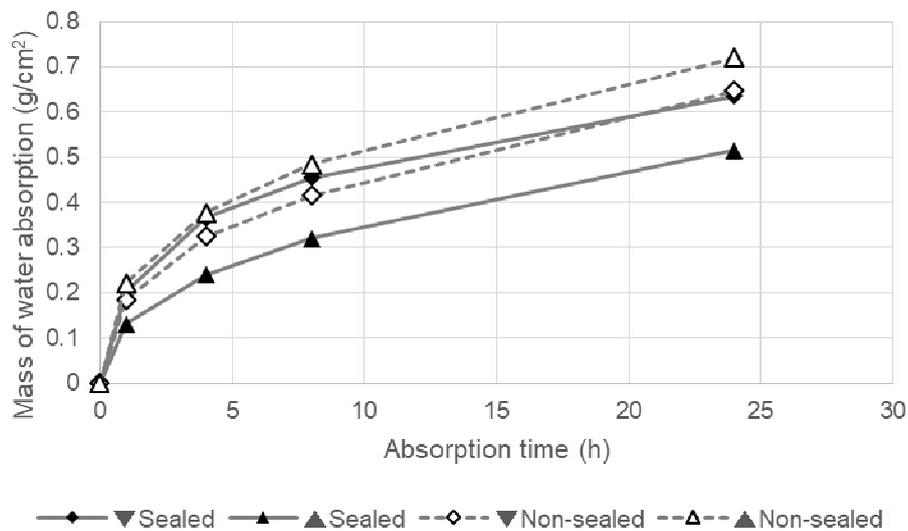


Fig. 4-9 Absorption time and mass of water absorption

Note: Symbols are as follows; ▼: water feeder at the top, and ▲: water feeder at the bottom.

4.3.2.2 内部含水率分布による比較

4.2.2.3 によって求めた試験体内部の含水率分布を Fig. 4-10、Fig. 4-11 に示す。Fig. 4-10 が 5 面シール試験体、Fig. 4-11 が 4 面シール試験体である。全乾状態から吸水させ、吸水 4～

24 時間、乾燥 4~48 時間の含水率分布を示した。Fig. 4-10 における試験体番号 L-08 は、吸水 8 時間後にも吸水面の全面が濡れなかったために吸水量の計算から外したものである。吸水 24 時間後には吸水面全面が濡れたが、吸水スポンジとの接触が悪かったものと考えられる。今回行った吸水・乾燥試験では、同条件の 3 体の試験体のうち 1 体が他の 2 体と大きく異なる吸水性を示した。これは、3 体のうち 1 体(同条件のうち試験体番号の大きいもの)が他の 2 体とは別の日に切り出しを行ったため、採取部位や切断面に違いが生じた可能性がある。試験体木口の年輪傾斜角を分度器で測定したところ Table 4-4 のようになり、3 体のうち 1 体は年輪傾斜角が緩やかな傾向にあった。4 面シールの試験体においては晩材に先行して吸水が起き、試験体番号 L-15、L-18 においては吸水 1 時間後に吸水面と反対側の晩材部に水濡れが見られた。吸水 24 時間後には 4 面シールのすべての試験体において、吸水面の反対側に水濡れが見られた。木材は乾燥過程において気体及び液体の通導経路となる壁孔が閉鎖される⁵²⁾。既往の研究から、晩材部は細胞壁が厚いために乾燥過程で壁孔閉鎖が生じにくく、乾燥材の浸透経路としては早材部よりも有利に働くことが知られている⁷⁷⁻⁷⁹⁾。今回のスギによる結果においても同様のことが見られた。Table 4-4 に示した年輪傾斜角が 40° と小さな試験体は、Fig. 4-11 において 24 時間の吸水で試験体の全域に亘って吸水が確認された L-15、L-18 の試験体と対応することから、吸水の進みやすい晩材部に率先して吸水が起こり、試験体に含まれる晩材部分の比率の影響が含水率分布にも表れたものと考えられる。ただし年輪傾斜角が 60° もの (Table 4-4 の L-09、L-13) においては Fig. 4-10、Fig. 4-11 の内部含水率分布において吸水が進むものとそうでないものがあり、採取位置の差の影響も考えられた。

試験体の吸水における浸透長を比較するため、Fig. 4-10、Fig. 4-11 の含水率分布から吸水方向 1 mm ごとの平均含水率を求め、含水率が 20%以上となる位置を浸透長の先端とみなして経時変化を比較した (Fig. 4-12)。ただし、浸透長の先端が含水率分布図内の 25 mm 以上となった試験体は平均から外した。Fig. 4-12 より、上からの吸水では 5 面シール、4 面シ

ルどちらも変わらず下から吸水の場合よりも短い浸透長を示した。下から吸水の場合は上から吸水よりも浸透長が長く、そのうち 4 面シールの方が 5 面シールよりも長かった。浸透長について言えば、4 面シールの方が木材内部の空気が圧縮されない分自由な毛管力が働き、浸透長が大きくなるようである。上から吸水と下から吸水では、下から吸水して吸い上げる方が毛管力がうまく働いているようである。浸透長の平均に用いた試験体の吸水量の経時変化を Fig. 4-13 に示す。これらの試験体中では吸水量の値はほとんど変わらない結果となった。つまり、浸透長が変わっても木材中に含まれる水の量は変わらないことを示し、上からの吸水では水が若干押し込まれていると思われる。

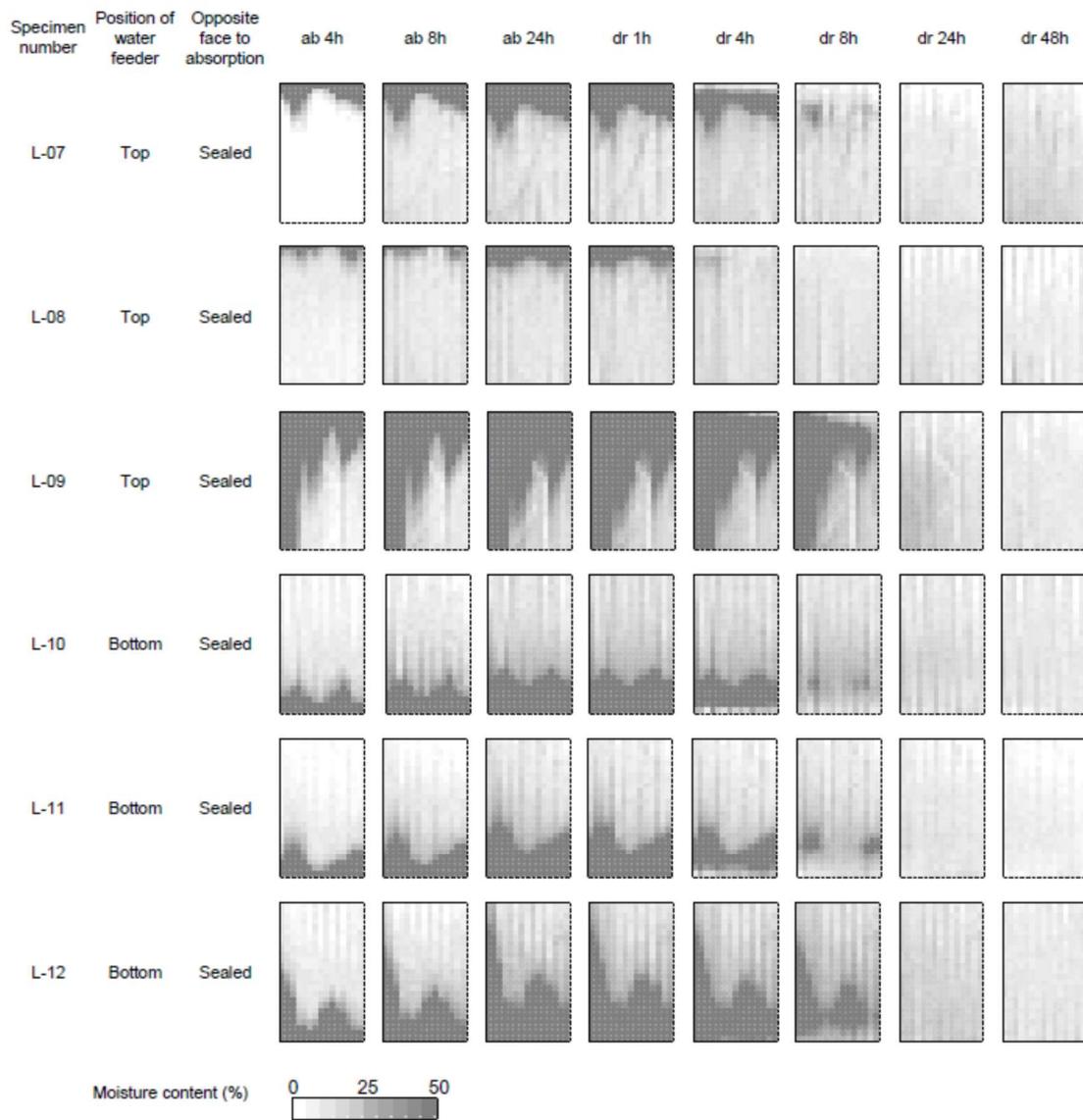


Fig. 4-10 Moisture content distribution in water absorption and drying test (sealed specimens)

Note: This figure shows absorption process (ab) at 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, 24 and 48 hours.

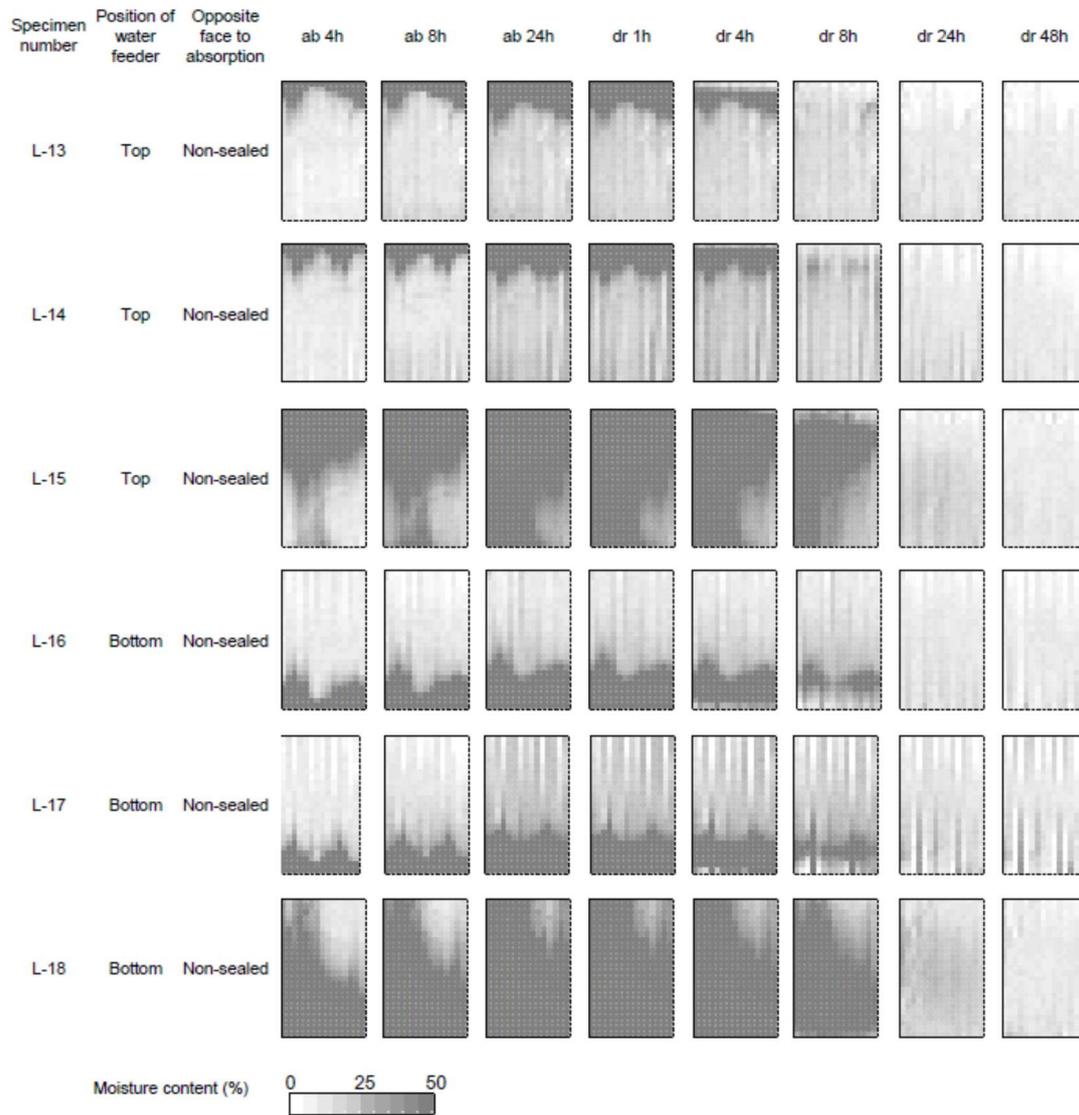


Fig. 4-11 Moisture content distribution in water absorption and drying test (non-sealed specimens)

Note: This figure shows absorption process (ab) at 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, 24 and 48 hours.

Table 4-4 Slope angle of annual ring in specimens

Waterproof seal	Position of water feeder	Specimen number	Slope angle of annual ring (°)
Five-faces except water absorption face	Top	L-07	75
		L-08	75
		L-09	60
	Bottom	L-10	75
		L-11	70
		L-12	70
Four-faces except water absorption face and opposite face	Top	L-13	60
		L-14	75
		L-15	40
	Bottom	L-16	70
		L-17	80
		L-18	40

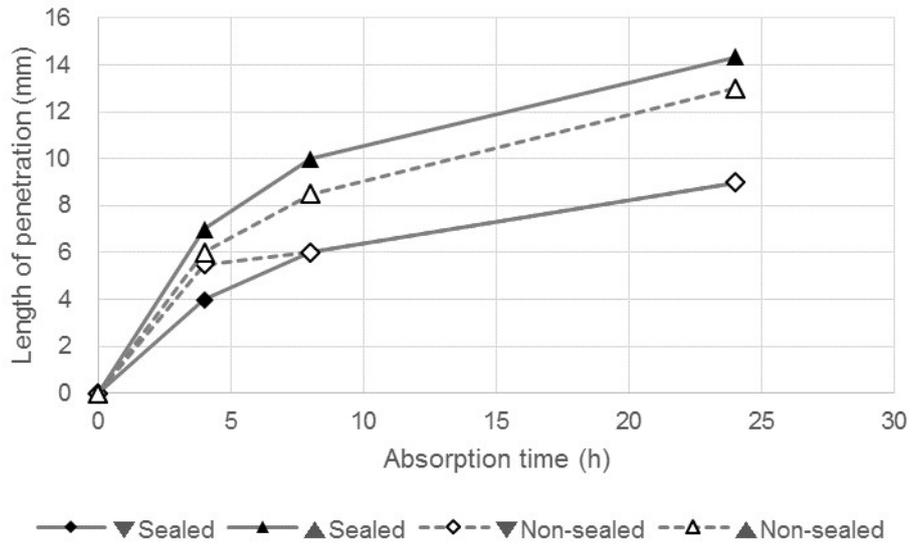


Fig. 4-12 Absorption time and water uptake

Note: Symbols are as follows; ▼: water feeder at the top, and ▲: water feeder at the bottom.

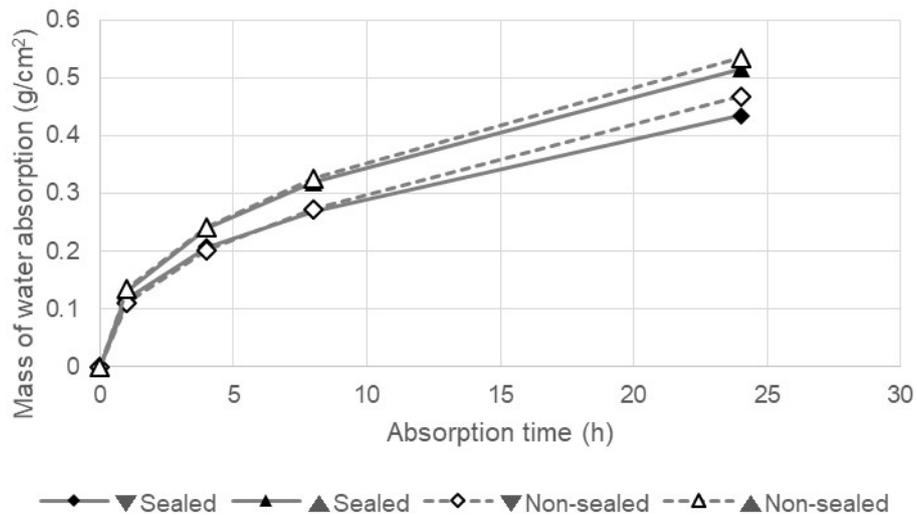


Fig. 4-13 Absorption time and mass of water absorption with the specimens which corresponds with a water uptake graph (Fig. 4-12)

Note: Symbols are as follows; ▼: water feeder at the top, and ▲: water feeder at the bottom.

4.4 まとめ

X線デンストメトリー法による非破壊含水率測定手法を試みた。X線透過方向の厚さ10mmの試験体を用いて、内部の含水率分布を1mm角の範囲でプロットし、視覚的に分かりやすく表現することに成功した。また、含水率算出に用いるX線画像は撮影毎の輝度値ムラを補正するためアクリル板の輝度値を用いた補正が必要であることが明らかとなった。

吸水試験における試験体のシール方法や吸水方法について検討したところ、吸水面の対面をシールしない4面シールでは毛管力が自由に働き、個体によって吸水性に差が生じやすいことが分かった。吸水方法については上からの吸水と下からの吸水では吸水量に大きな差は生じなかったが浸透長でいえば下からの吸水の方が若干大きくなることが分かった。試験体のシール方法や吸水方法については全体として見れば大きな差は生じないため、試験体の形状によって適宜選択すればよいと判断した。これらの知見は第5章以降の吸水・乾燥試験に供する試験体の仕様や吸水方法に反映させることとした。

第5章 割れ加工モデルによる水濡れ後の内部含水率評価

5.1 はじめに

本章では、第4章で確立したX線デンストメトリー法を用いて、第3章で行った割れモデル試験と同様に割れ加工を施した試験体の水濡れ後の内部含水率分布の変化を調べた。分割法では把握困難な1mm角範囲の詳細な内部含水率の変化について、吸水・乾燥過程の水分挙動を明らかにすることを目的とした。

5.2 実験

5.2.1 試験体

試験体は第2章の劣化観察でも使用した樹種である、デッキ材として一般的なレッドウッド (*Sequoia sempervirens*) 心材、スギ (*Cryptomeria japonica*) 辺・心材、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) 心材とし、いずれも気乾材を用いた。寸法は40 mm (R) × 40 mm (T) × 10 mm (L) とした。第3章と同様に、表面割れをモデル的に加工するために板目面に深さ10 mm、20 mmの割れ加工を丸鋸で入れた。対照として割れ加工なしも用意した。レッドウッドはさらに5 mmの深さも作製した。以降、割れ加工深さをそれぞれ割れ深さ0 mm、5 mm、10 mm、20 mmと呼ぶ。第3章においては割れ加工の幅は鋸挽き1回により幅1.8 mmとしたが、X線デンストメトリー法を用いる場合試験体の厚さが10 mm (L) と薄くなるため、乾燥しやすくなる影響を鑑み本章では幅1.0 mmに加工することとした。1回の鋸挽きで約0.8 mmの加工幅であったため複数回に亘って鋸挽き加工を行ったが、樹種の硬軟により割れ加工の幅は樹種間で若干異なり、平均はそれぞれレッドウッド1.3 mm、スギ1.0 mm、ヒノキ1.0 mmであった。吸水面は板目面1面とした。防水シールはシリコーン樹脂 (シリコーンシーラント 8060 クリア色、セメダイン製) を吸水面以外の5面に塗布し、各条件について5つの試験体を作製した。試験体は20°C、65%RHで1週間養生してから吸水・乾燥試験に供し

た。また、試験体のマッチング材から 103°C、24 時間で全乾とした全乾密度を求め、それぞれ平均でレッドウッド 0.39 g/cm³、スギ 0.26 g/cm³、ヒノキ 0.44 g/cm³であった。

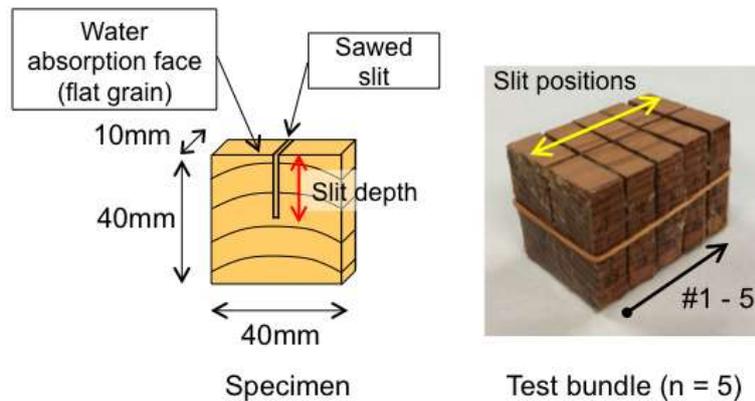


Fig. 5-1 Schematic diagram of specimens and test bundle

5.2.2 吸水・乾燥試験

吸水・乾燥試験は、雨によるデッキ材の濡れとその後の乾燥過程を想定して行い、吸水処理とその後の乾燥処理から成る (Fig. 5-2)。同じ条件 (割れ深さと樹種) の試験体は 5 体を一組とし、割れ加工が連なるように縦に並べてゴムバンドで軽く縛って試験に供した (Fig. 5-2 右図)。5 体一組として並べることで実際のデッキ材の寸法に近づけ、特に割れ加工内部が過度に外気や水に曝されないようにした。

吸水処理は 24 時間行った。試験体は 5 体一組として、板目面 (割れ加工面) を下にして蒸留水に浸した。試験体が浮き上がらない程度の重しを載せ、すべての試験体条件で水の深さは 20 mm に設定した。吸水処理は水を共存させたアクリルデシケーター内 (無風) で 20°C、>99%RH で行った。

乾燥処理は、24 時間の吸水処理後に直ちに行った。試験体を水中から取り出し、20°C、65%RH の恒温恒湿機内 (ファンにより風速 1 m/s) に吸水面を上にして静置した。

24 時間吸水後の吸水量 (g/cm²) は、JIS Z 2101 (2009)の吸水性試験に準じて吸水前と吸水

後の試験体の質量差を吸水面積で除して求めた。吸収面の面積は、割れ加工がないものとして板目吸水面のみの面積を用いた。

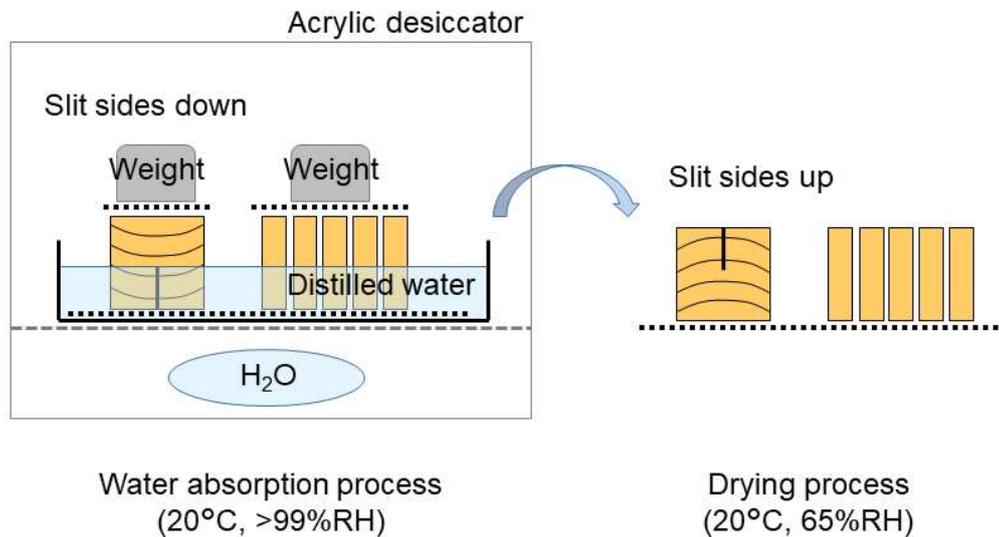


Fig. 5-2 Procedure of water absorption and drying test

5.2.3 X線デンストメトリー法による内部含水率測定

第4章で確立したX線デンストメトリー法を用いて試験体の内部含水率分布を求めた。ただし検量線については試験体形状及びX線撮影時期が変わったため5.2.4の手順で新しく作成した。

5.2.2の吸水・乾燥試験の実施中、任意の時間に試験体を取り出し断面のX線画像を撮影した (Fig. 5-3)。X線画像はX線デジタルマイクロスコープ (μ B1600、松定プレジジョン製) を用いて撮影し、撮影条件は管電圧 50 kV、管電流 180 μ A とした。撮影した画像は輝度値 500~1600 の範囲を 8 ビットグレースケールに変換して保存した。また各 X 線画像の輝度値は、同時に撮影した厚さ 1 mm のアクリル板の輝度値が同じとなるように線形補正した。

X線撮影は次の時間に行った。

吸水処理時：0、4、8、24 時間後

乾燥処理時：1、4、8、24 時間後及び 2～3 日後

乾燥処理を終えたのち、試験体を 103°C、24 時間で全乾とし、全乾時の X 線透過画像についても同様に得た。

試験体の内部含水率は 4.2.1 で示したとおり、Eq. 5-1 から得られる。

$$MC (\%) = \frac{(G_0 - G_i) \times a + b}{\rho} \times 100 \quad \text{Eq. 5-1}$$

ここで、 MC は含水率 (%) であり、 G_0 は全乾時の X 線画像の輝度値、 G_i は各測定時間 i における X 線画像の輝度値、 a と b は検量線の傾きと切片を示す。 ρ は試験体の全乾密度 (g/cm^3) で今回はマッチング材の全乾密度を用い、レッドウッド $0.39 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、スギ $0.26 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、ヒノキ $0.44 \text{ g}/\text{cm}^3$ であった。 a と b の値については 5.2.4.3 の方法で検討し、5.3.1 で決定した。

試験体から求めた内部含水率分布は、吸水面と割れ加工に接する片側 10 mm (T) × 25 mm (R) の範囲とし、Fig. 5-3 の ROI (Region of interest) で示した。各 ROI は吸水が典型的で、防水シール漏れの見られない側を選んだ。割れ加工が無い場合は試験体のほぼ中央の吸水面に接する部分を選択した。X 線画像は画像処理ソフトウェア (ImageJ1.50i、National Institutes of Health) を用いて加工した。まず、試料の吸水・乾燥工程における一連の原画像を ImageJ プラグイン (Template matching) を用いて同じ位置にスタックし、ROI で切り取った。次に、X 線画像の 28 ピクセルが実寸法の 1 mm とほぼ等しいため、切り取った画像を 1/28 のサイズに縮小した。最後に、Eq. 5-1 を用いて ROI の 1mm 角範囲の含水率を求め、0%～50% の範囲のグレースケールグラデーションによってグラフにプロットした (Fig. 5-3)。

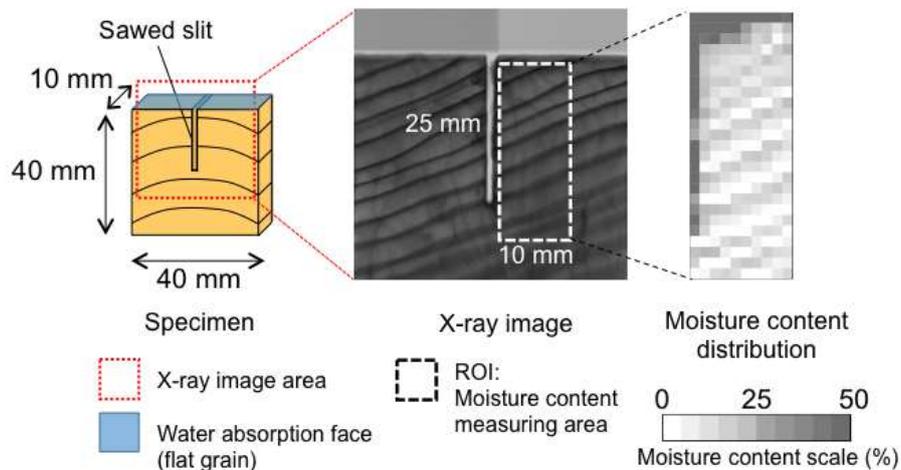


Fig. 5-3 Scheme of moisture content distribution measuring with X-ray densitometry

5.2.4 検量線の作成

5.2.4.1 試験体

第4章では断面20 mm × 30 mm、厚さ10 mm (X線照射方向)の試験体を用いて検量線を作成したが、本章では割れ加工の都合上、断面40 mm × 40 mm、厚さ10 mm (X線照射方向)の試験体を用いており、X線照射方向は同じ寸法であるが断面寸法が異なる。測定に用いたX線照射装置はFig. 4-2に示すように点光源から発するX線が広がるため、試験体の寸法が異なるとX線照射角度が異なり透過画像のズレが生じる可能性がある。また、本章での測定は第4章で作成した検量線の測定から半年以上経過しており、X線ランプのエネルギー量の変化も想定される。実際、第4章で求めた検量線によって含水率を算出すると本章の試験体では若干低めとなったため、再度検量線を作成することとした。

検量線用の試験体は、5.2.1の試験体のうちレッドウッドの割れ深さ0 mm及び20 mmを各3体、0の試験体のうちスギを3体とした。各寸法はレッドウッドが40 mm (R) × 40 mm (T) × 10 mm (L)の板目面吸水、スギが10 mm (R) × 20 mm (T) × 30 mm (L)の木口面吸水で、それぞれ吸水面以外をシリコーン樹脂 (シリコーンシーラント 8060 クリア色、セメダ

イン製)で防水シールした。スギの木口面吸水の試験体を加えたのは、今回の試験体と同寸法の板目面吸水では高含水率領域のデータを取ることが困難なため、繊維方向吸水のデータを加えるためである。

5.2.4.2 吸水・乾燥試験

5.2.2と同様に、吸水・乾燥試験を行った。ただし、試験体は103°C、24時間で全乾としたものを吸水0時間として開始した。また、試験体は厚さ10mm部分を水深とし、試験体全体が完全に水中に沈むように重ならないように横に寝かせて蒸留水の入ったトレイに沈めた。試験体の上には浮き上がらない程度の重しを載せた。吸水処理は水を共存させた20°C、>99%RHのアクリルデシケーター内(無風)で24時間行った。

乾燥処理は、5.2.2と同様に同条件の試験体を密着させて並べ、吸水面が上になるようにして20°C、65%RHの恒温恒湿機内(ファンにより風速1m/s)で48時間行った。ただし今回は試験体がすぐに乾燥するのを防ぐため、乾燥処理の間中、吸水面に厚さ0.45mmのクラフト紙(37g/m²)をゴムバンドで留めつけた状態で行った。

吸水・乾燥試験中の試験体は任意の時間に取り出し、X線透過画像を撮影した。また、X線撮影の前に電子天秤で試験体の質量も測定した。X線撮影と質量測定は次の時間に行った。

吸水処理時：0、1、4、8、24時間後

乾燥処理時：1、4、8、48時間後

5.2.4.3 X線撮影と画像データの処理

吸水・乾燥試験中の任意時間の試験体について、X線デジタルマイクロスコープ(μ B1600、松定プレジジョン製)を用いて吸水方向と垂直のX線透過画像を撮影した。撮影条件は管電圧50kV、管電流180 μ Aとした。ただし断面が40mm×40mmとなるレッドウッド試験体は一度の撮影で試験体全体を含むX線透過画像を得ることができないため、撮影ステ

ージを動かし4回に分けて撮影した画像を最後に合成した。断面が20 mm × 30 mm のスギ試験体は一度の撮影で試験体全体を写すことができるため、1回の測定画像を用いた。

X線画像は画像処理ソフトウェア (ImageJ1.50i、National Institutes of Health) を用いて、試験体全体が入るように選択した領域の平均輝度値を各画像において求めた。各画像の輝度値データは、同時に撮影した1 mm厚さの亚克力板の輝度値が同じとなるように線形補正した。

X線透過画像の全乾画像との輝度値差と、同時刻に測定した試験体の質量差から求めた水のみかけ密度の一次関係式を求め、これを検量線とし、試験体の含水率を Eq. 5-2 によって算出した。

$$MC (\%) = \frac{(G_0 - G_i) \times a + b}{\rho} \times 100, \quad \text{Eq. 5-2}$$

ここで、 MC は含水率 (%), G_0 は全乾時の X 線透過画像の輝度値、 G_i は各測定時間 i における X 線画像の輝度値、 a と b は検量線の傾きと切片である。 ρ は全乾密度であり、今回は試験体木材の平均全乾密度を用い、レッドウッド 0.40 g/cm^3 、スギ 0.36 g/cm^3 であった。また、Eq. 5-2 の計算結果が 0 以下となった場合は $MC (\%) = 0$ として扱った。

5.3 結果と考察

5.3.1 検量線の決定

5.2.4 によって得た、X 線透過画像の全乾画像との輝度値差と水のみかけ密度を Fig. 5-4 に示す。断面が 40 mm × 40 mm のレッドウッド試験体 (板目面吸水) と断面が 20 mm × 30 mm のスギ試験体 (木口面吸水) を分けて表示した。両者は概ね同じ一次相関式に乗ると思われるが、今回は含水率の低い部分を詳細に見ることとしたいため輝度値差 5 を境に使用する検量線式を分けた。すなわち、輝度値差 (ΔG) ≥ 5 では断面が 20 mm × 30 mm のスギ試験体 (木口面吸水) から得た一次近似式を用い (Eq. 5-3)、輝度値差 (ΔG) < 5 では断面が 40 mm × 40 mm のレッドウッド試験体 (板目面吸水) から得た一次近似式を用いる

ことした (Eq. 5-3、Eq. 5-4)。

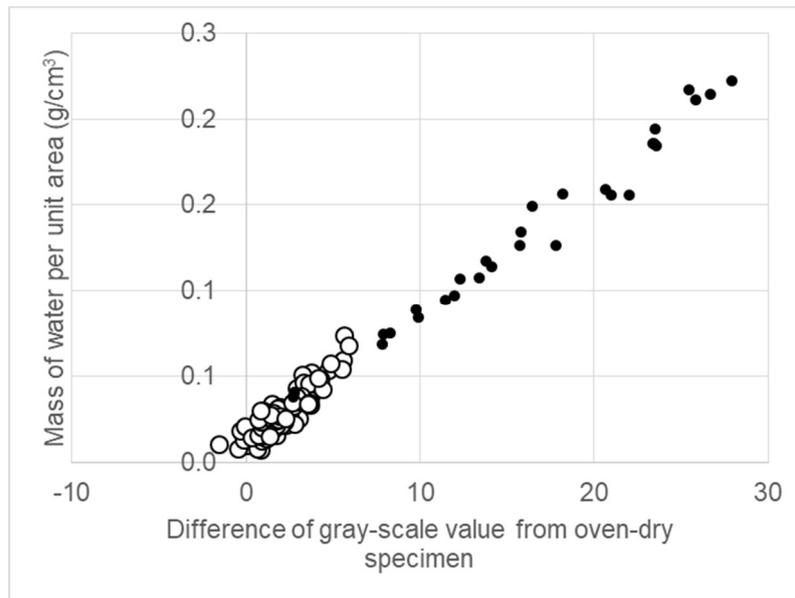


Fig. 5-4 Relationship between difference of gray-scale value and mass of water per unit area

Note: Symbols are as follows; ○: Redwood specimens with water absorption from flat grain, and

●: Japanese cedar specimens with water absorption from end grain.

$$\text{if } \Delta G \geq 5 \qquad y = 0.0073x + 0.0147 \qquad \text{Eq. 5-3}$$

$$R^2 = 0.9794$$

$$\text{if } \Delta G < 5 \qquad y = 0.0081x + 0.0118 \qquad \text{Eq. 5-4}$$

$$R^2 = 0.7809$$

Eq. 5-3、Eq. 5-4 の検量線式を用いて Eq. 5-2 から含水率を求め、同時刻に測定した試験体の質量差から求めた全乾法による含水率を比較したものを Fig. 5-5 左図に示す。一次近似式の傾きは 0.9573、決定係数は 0.9856 となり、検量線として妥当と判断した。また、Fig. 5-5 右図に全乾法と X 線デンストメトリー法との含水率差をプロットしたところ、±5%の精度であることが確認された。一方、第 4 章で求めた検量線を使用して含水率を計算したところ、Fig. 5-6 のようになり、全乾法と X 線デンストメトリー法の含水率算出値の関係は大きく変わらないものの、含水率差で表すと X 線デンストメトリー法による含水率が一律に低

く計算されていることが明らかとなった。

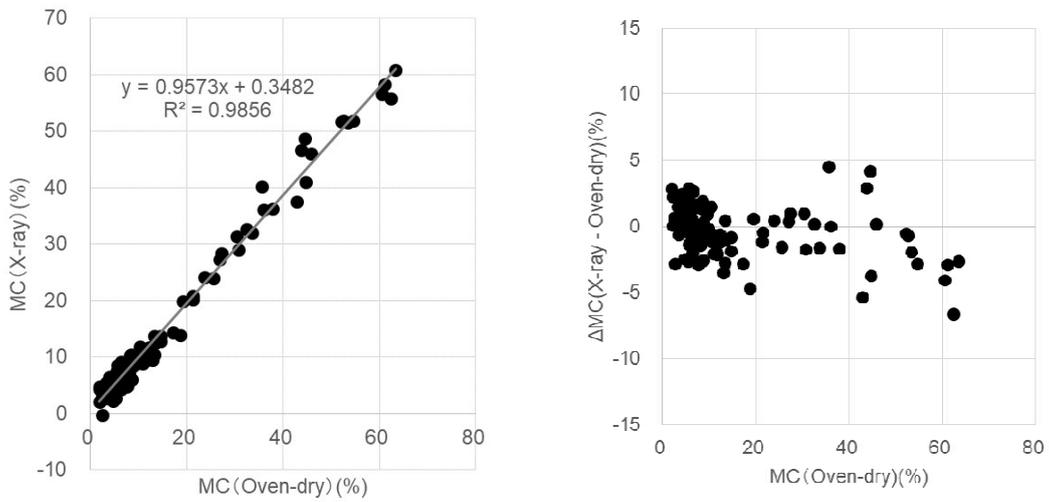


Fig. 5-5 Accuracy of measured MC using a calculation curve of 5.2.4

Note: MC denotes moisture content calculated from the oven-dry method or the X-ray method.
 Δ MC denotes the difference in MC between the X-ray method and the oven-dry method.

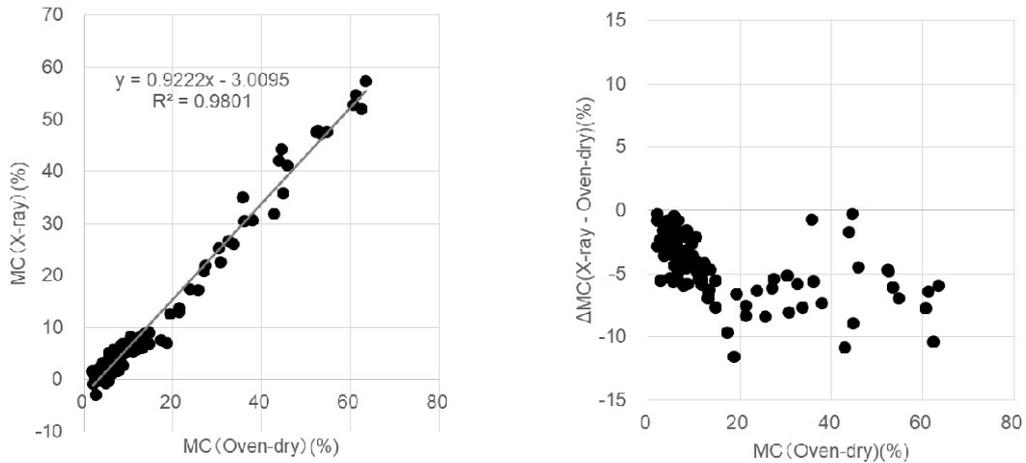


Fig. 5-6 Accuracy of measured MC using a calculation curve of 4.3.1

Note: MC denotes moisture content calculated from the oven-dry method or the X-ray method.
 Δ MC denotes the difference in MC between the X-ray method and the oven-dry method.

以上の検討より、本章の含水率算出に用いる検量線は Eq. 5-3、Eq. 5-4 を用いることとした。

5.3.2 割れ加工近傍の水濡れ後の含水率変化の特徴

24 時間後の吸水量の平均を Table 5-1 に示す。レッドウッド及びスギの試験体は割れ深さの増大に伴って吸水量が増加し、全体の傾向は第 3 章の結果とほぼ同様である。ただしヒノキ試験体については、Fig. 5-7 に示すように試験体の防水シールが不完全で木口からの吸水が起こり、他の試験体の 5 倍近くと非常に大きな吸水量を示した。ヒノキのみシリコーン樹脂による防水シールに失敗した理由は明らかではないが、おそらくヒノキ抽出成分とシリコーン樹脂との相性が悪かったと推察している。ヒノキ試験体に作製した割れ加工を、手違いにより木表側ではなく木裏側に入れてしまったことも要因として考えられたが、スリットなしの試験体においても木口吸水が起こっていることから樹種特有のものと考えられる。ヒノキ試験体については評価する吸水面以外からの吸水が起こったため、以降の評価からは除外する。なお、レッドウッドの割れ深さ 0 mm の試験体のうち 1 体は、吸水処理 8~24 時間においてシールされた面から吸水を行ってしまったため平均値算出には用いなかった。

Table 5-1 The mass of water absorption per unit area after 24 hours (g/cm²)

Slit depth	Redwood (RW)		Japanese cedar (JC)		Japanese cypress (JY)	
0mm	0.10	(0.01)	0.13	(0.01)	0.59	(0.09)
5mm	0.11	(0.01)	N.A.		N.A.	
10mm	0.12	(0.01)	0.18	(0.03)	0.69	(0.09)
20mm	0.14	(0.02)	0.20	(0.02)	0.66	(0.12)

Note: The value of each species is the average of five (n = 5), except the value of Redwood specimens with slit depth of 0 mm is the average of four (n = 4). The number in parentheses shows standard deviation. N.A. means not applicable.

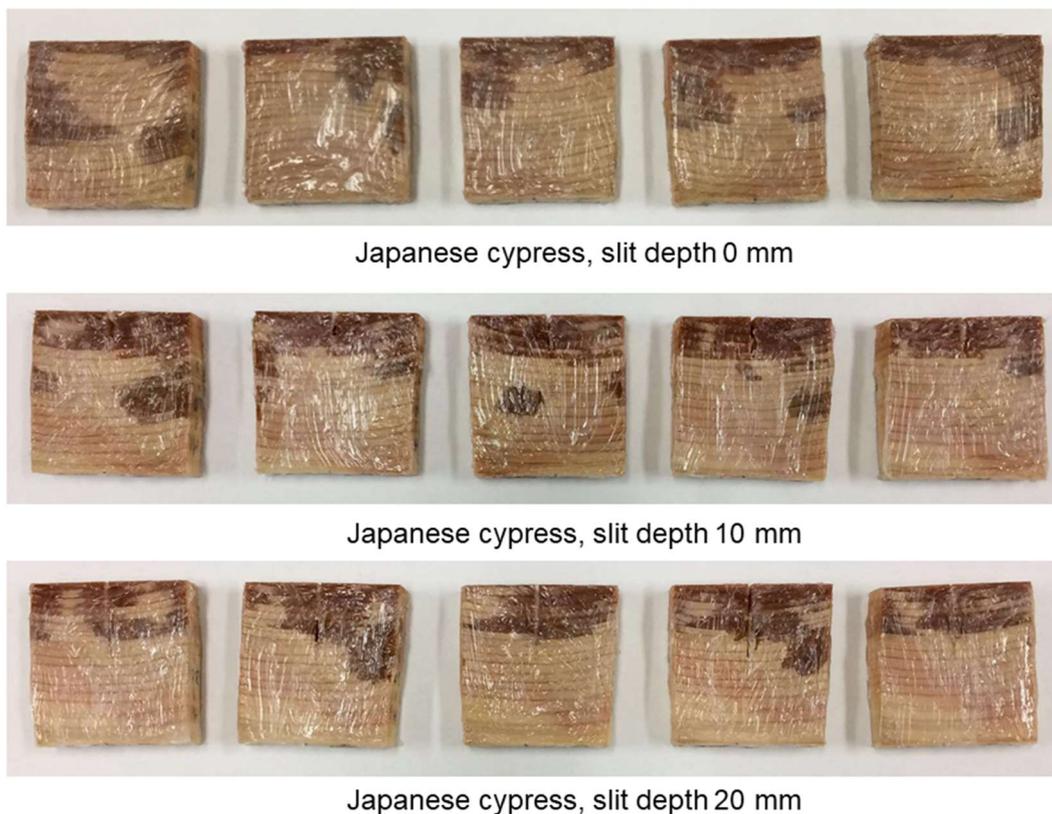


Fig. 5-7 Waterproof failure in Japanese cypress specimens

Note: This pictures show Japanese cypress specimens after 24 hours water absorption. The upper ones are slit depth 0 mm, the middle ones are slit depth 10 mm, and the lower ones are slit depth 20 mm. The position numbers of specimens are #1-#5, from the left to the right. The darker areas of specimens denote waterproof failure.

次に、レッドウッド、スギの試験体の吸水処理時（0～24 時間）および乾燥処理時（1～72 時間）の内部含水率分布を Fig. 5-8～Fig. 5-14 に示す。各画像の上側は吸水面、左側は割れ加工面（割れ深さ 0 mm を除く）である。第 4 章で検討したように、試験体内部の含水量分布は X 線デンシトメトリー法によって 1 mm 角の精度で詳細に得ることができた。Fig. 5-8～Fig. 5-11 がレッドウッド試験体のそれぞれ割れ深さ 0 mm、5 mm、10 mm、20 mm のもの、Fig. 5-12～Fig. 5-14 がスギ試験体のそれぞれス割れ深さ 0 mm、10 mm、20 mm のものである。同条件の 5 体すべてについて示した。試験体番号の#1～#5 は 5 体一組として繊維方向に並べた吸水・乾燥試験の試験体の順序を示す。一部のデータは吸水処理または X 線撮影

方法が適切でなかったものが含まれる（レッドウッド：割れ深さ 0 mm #1、スギ：割れ深さ 10 mm #5、割れ深さ 20 mm #1）。吸水処理の不具合については吸水面の暴露間違いであり、X 線撮影方法の不具合は、試験体の撮影時に表裏逆に撮影したものである。試験体の撮影が表裏逆であっても画像処理で同じ向きに変換することができるが、X 線の透過具合が異なることと画像加工時に輝度値が類似の値に補完される影響により、得られた含水率分布図には若干の乱れが見られた。これらは各図の注釈に記し、含水率の平均などの処理には用いていない。

Fig. 5-8～Fig. 5-14 の各画像の上側は吸水面、左側は割れ加工面（割れ深さ 0 mm を除く）を示すが、これらの図から、含水率 50%以上を示す濃い灰色のプロットは吸水面および割れ加工面から約 1 mm の範囲にしか見られず、他の部分では顕著な変化は見られなかった。このことは、木材の半径方向または接線方向に生じる吸水は非常に少ないことを示している。一般に、半径方向または接線方向の吸水量は、繊維方向の吸水量よりもはるかに小さい⁸⁰⁾。そのため、ウッドデッキに表面割れが生じたとしても、降雨後、木材内部の含水率を必ずしも増加させるとは言えない。一方、Fig. 5-11、Fig. 5-14 の乾燥 8 時間後に見られるように、割れ深さが 20 mm と深い場合には表層付近が乾燥しても割れ加工底部の含水率が 30% 以上と十分に高く、水分停滞が起こっていることが示唆された。この現象は割れ深さが 10 mm 以下の試験体には見られず、第 3 章の結果と一致した。しかし本章の実験においては乾燥 24 時間後にはすべての試験体が元の含水率まで乾燥していた。いずれにしても、割れ深さが深くなると割れ加工底部の乾燥が困難となることは明らかであろう。このような状態が続けば木材内部の含水率が高く保たれ、腐朽につながる可能性があることを示唆している。ウッドデッキに関して言えば、デッキ材の表面割れの深さが 20 mm を超えると腐朽のリスクが高くなる可能性があると言える。

次項では、割れ深さの違いが含水率停滞に与える影響について考察する。

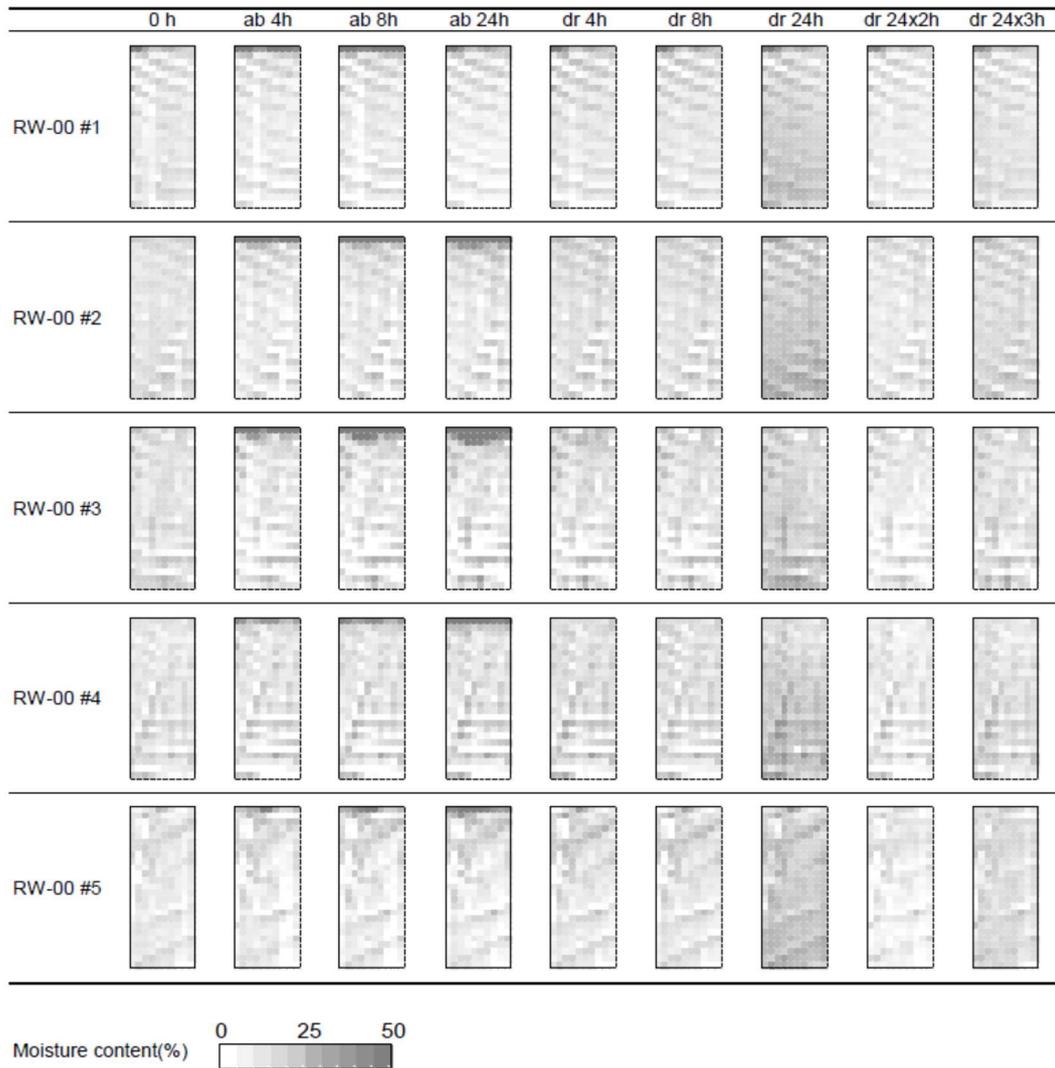


Fig. 5-8 Moisture content distribution in Redwood, slit depth of 0 mm

Note: Symbols are as follows: RW-00 denote slit depths of 0 in Redwood specimens. A number after a symbol means a specimen position in the test bundle. The upper sides of the images are the water absorption faces. This figure shows absorption process (ab) at 0, 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 4, 8, 24, 48 and 72 hours. RE-00 #1 indicates a less water absorption because of a mistake in the absorption process.

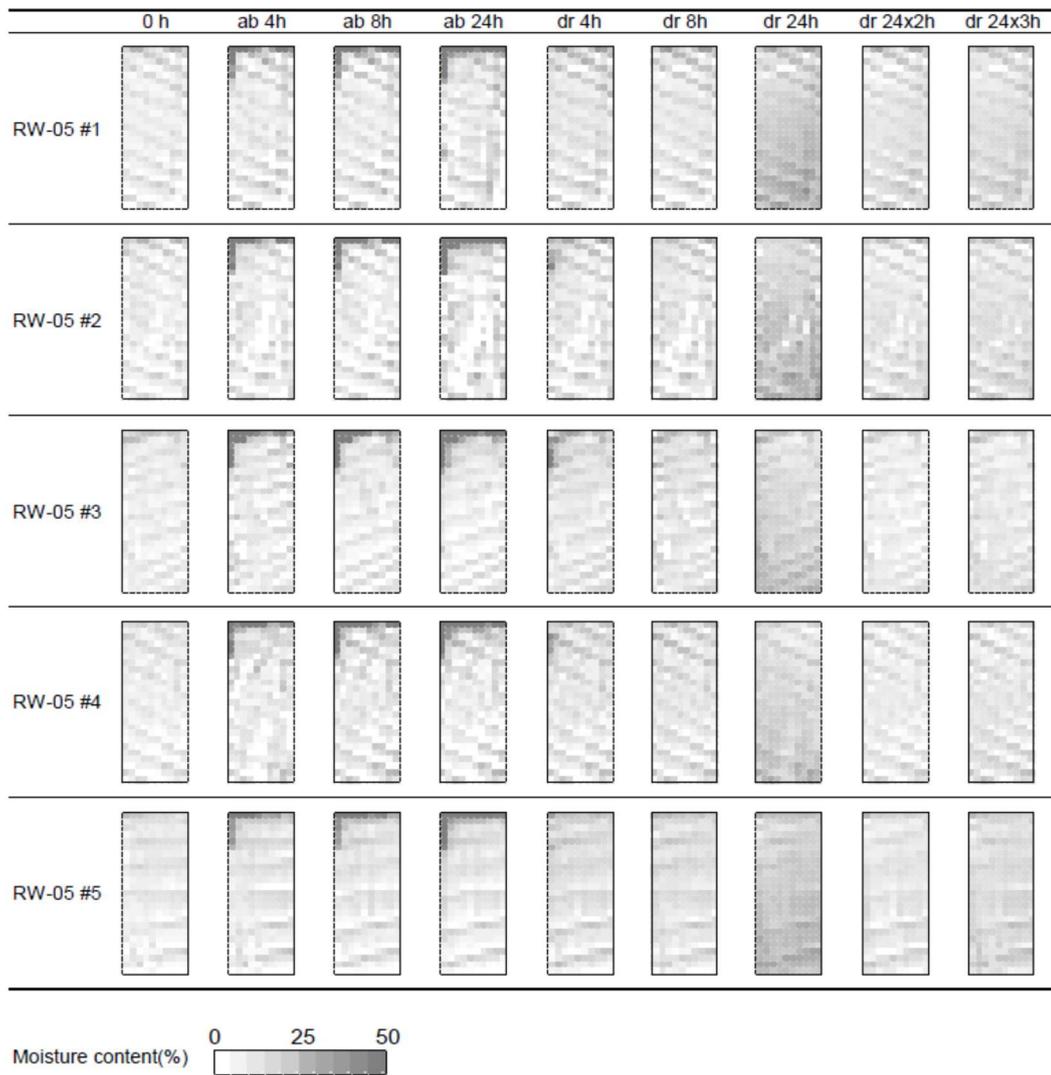


Fig. 5-9 Moisture content distribution in Redwood, slit depth of 5 mm

Note: Symbols are as follows: RW-05 denote slit depths of 5 mm in Redwood specimens. A number after a symbol means a specimen position in the test bundle. The upper sides of the images are the water absorption faces, and left sides are next to a slit. This figure shows absorption process (ab) at 0, 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 4, 8, 24, 48 and 72 hours.

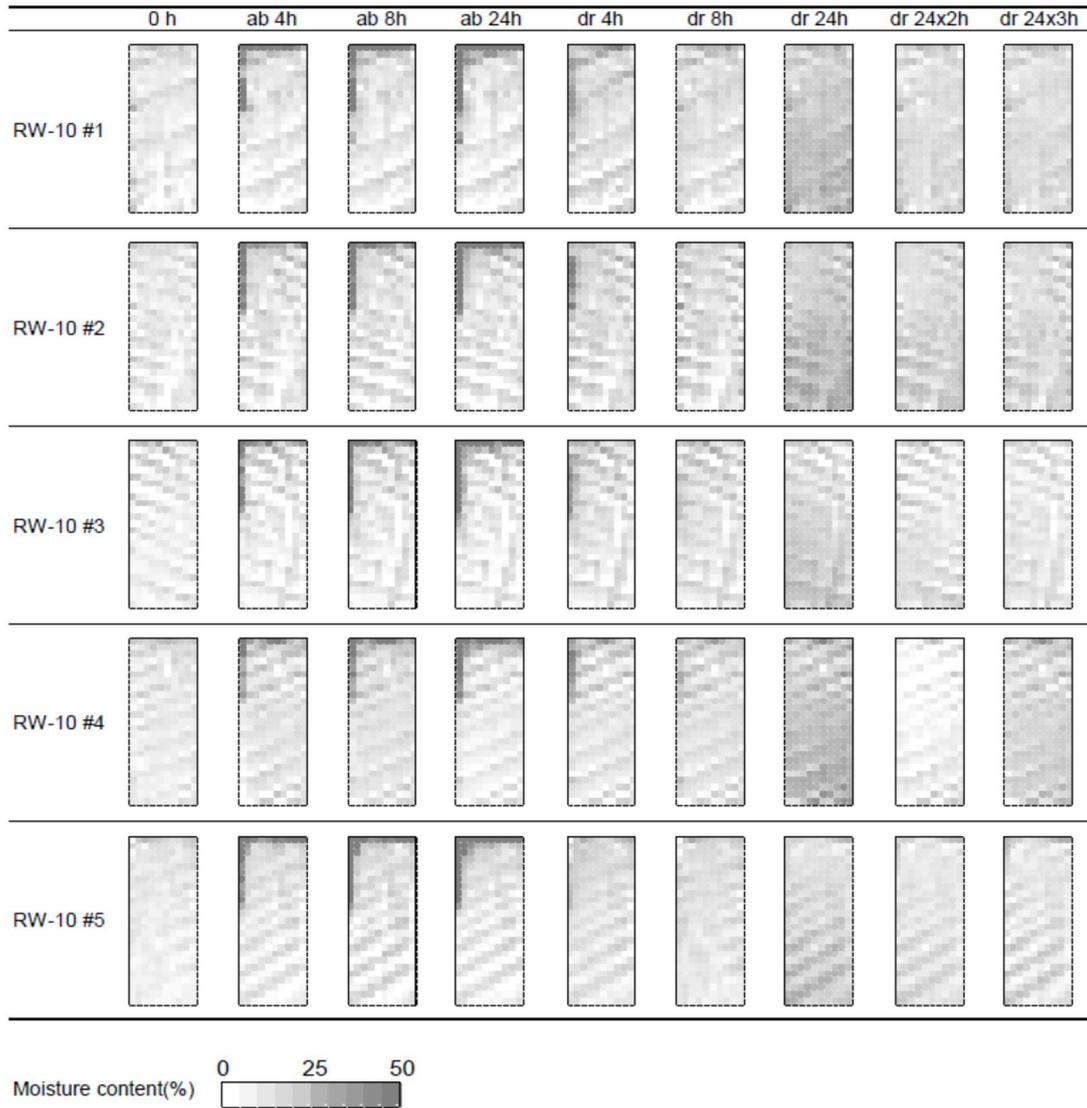


Fig. 5-10 Moisture content distribution in Redwood, slit depth of 10 mm

Note: Symbols are as follows: RW-10 denote slit depths of 10 mm in Redwood specimens. A number after a symbol means a specimen position in the test bundle. The upper sides of the images are the water absorption faces, and left sides are next to a slit. This figure shows absorption process (ab) at 0, 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 4, 8, 24, 48 and 72 hours.

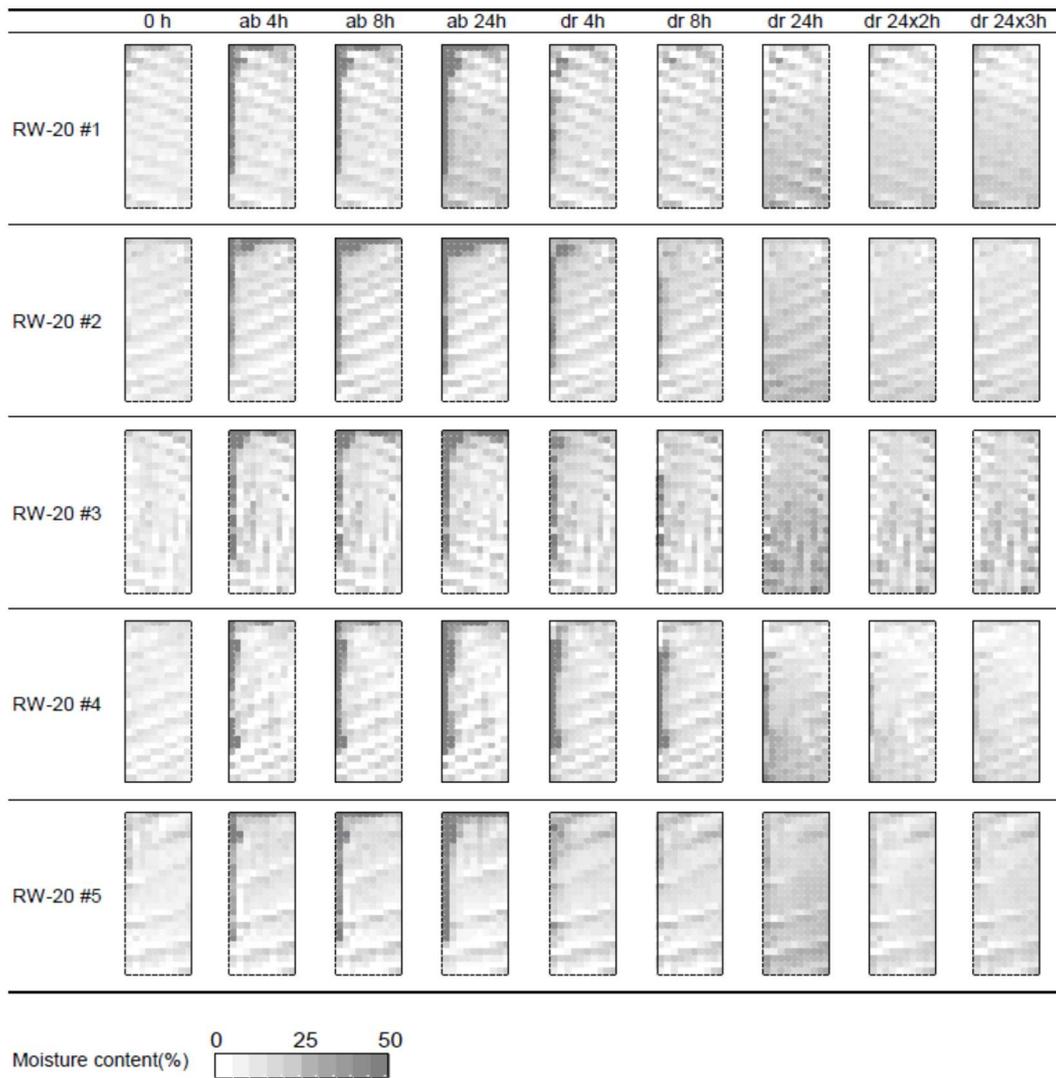


Fig. 5-11 Moisture content distribution in Redwood, slit depth of 20 mm

Note: Symbols are as follows: RW-20 denote slit depths of 20 mm in Redwood specimens. A number after a symbol means a specimen position in the test bundle. The upper sides of the images are the water absorption faces, and left sides are next to a slit. This figure shows absorption process (ab) at 0, 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 4, 8, 24, 48 and 72 hours.

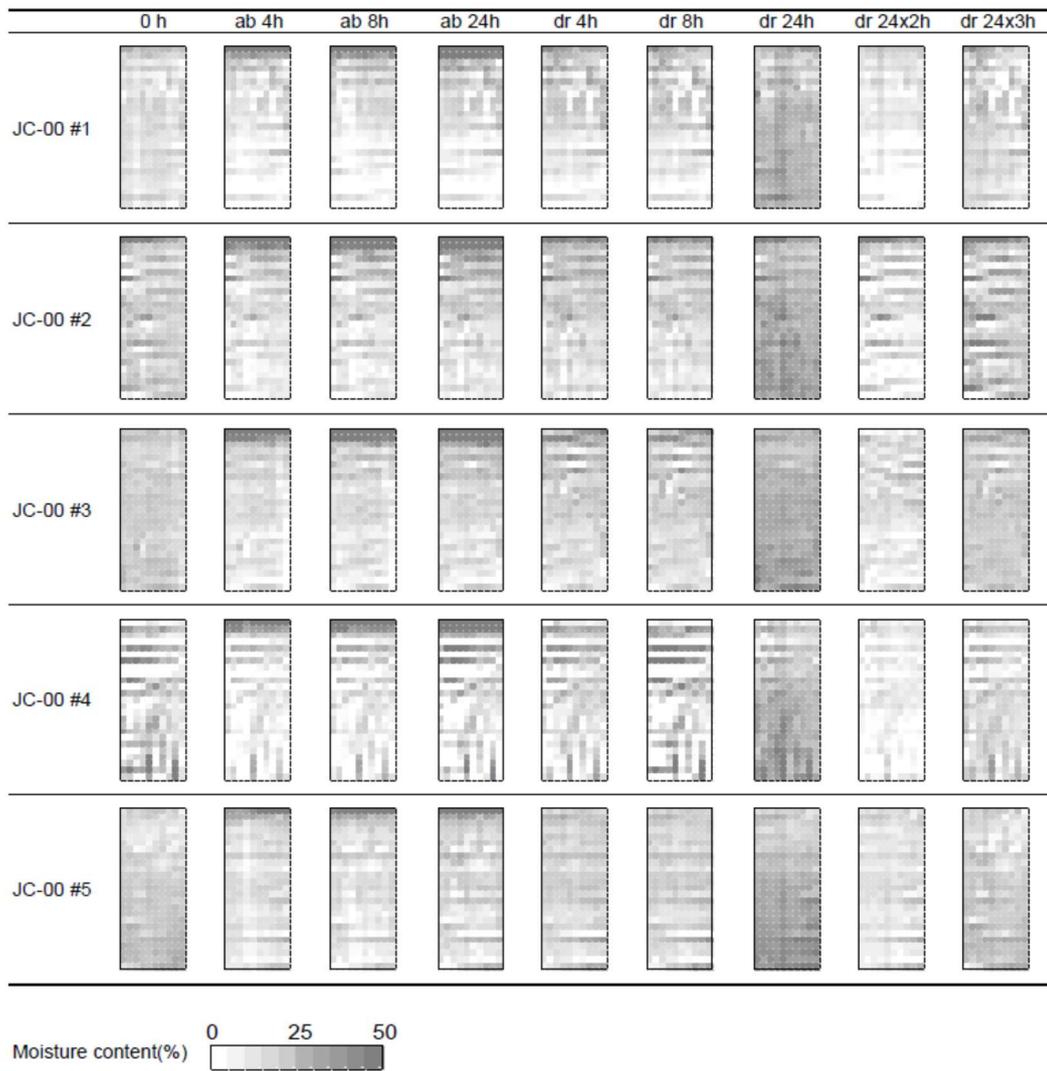


Fig. 5-12 Moisture content distribution in Japanese cedar, slit depth of 0 mm

Note: Symbols are as follows: JC-00 are slit depth of 0 mm in Japanese cedar specimens. A number after a symbol means a specimen position in the test bundle. The upper side of the images are the water absorption faces. This figure shows absorption process (ab) at 0, 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 4, 8, 24, 48 and 72 hours.

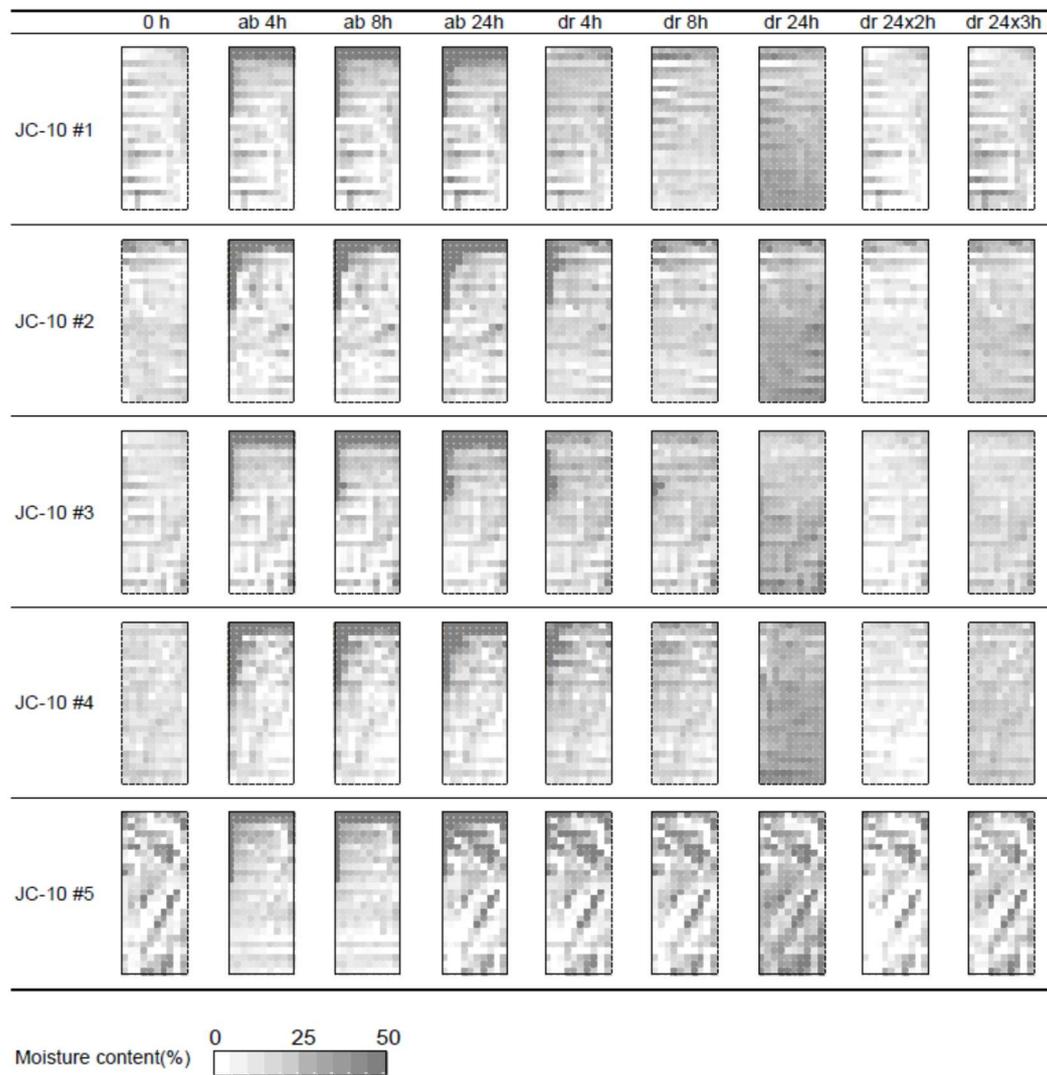


Fig. 5-13 Moisture content distribution in Japanese cedar, slit depth of 10 mm

Note: Symbols are as follows: JC-10 are slit depth of 10 mm in Japanese cedar specimens. A number after a symbol means a specimen position in the test bundle. The upper side of the images are the water absorption faces, and the left sides are next to a slit. This figure shows absorption process (ab) at 0, 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 4, 8, 24, 48 and 72 hours. JC-10 #5 contains uncertain results because some X-ray images were taken at backside in front (at ab 0h, ab 4h and ab 8h).

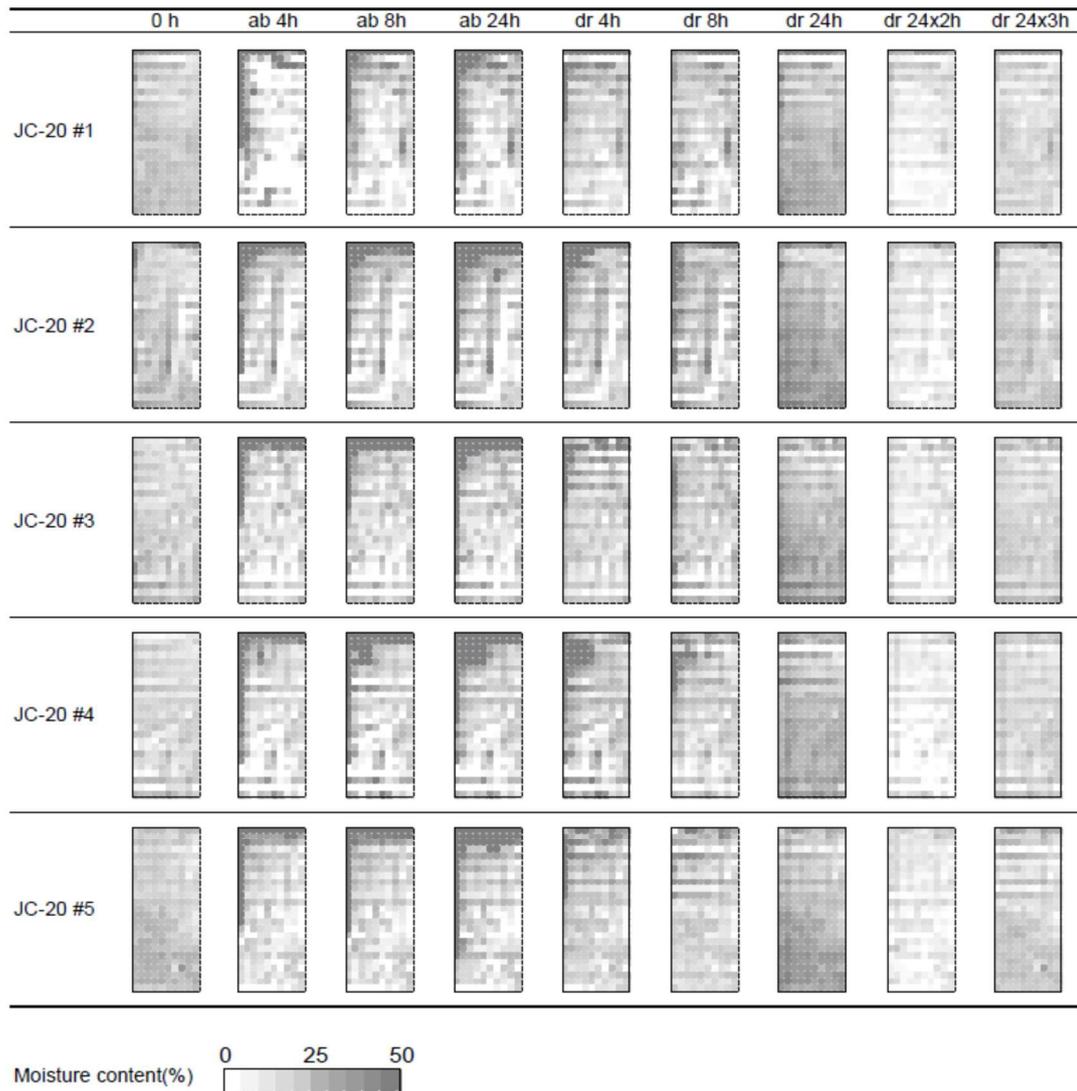


Fig. 5-14 Moisture content distribution in Japanese cedar, slit depth of 20 mm

Note: Symbols are as follows: JC-20 are slit depth of 20 mm, in Japanese cedar specimens. A number after a symbol means a specimen position in the test bundle. The upper side of the images are the water absorption faces, and the left sides are next to a slit. This figure shows absorption process (ab) at 0, 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 4, 8, 24, 48 and 72 hours. JC-20 # contains uncertain results because some X-ray images were taken at backside in front (at ab 4h).

5.3.3 割れ深さの違いが水分停滞に与える影響

Fig. 5-8～Fig. 5-14 では、割れ加工近傍の含水率の変化が、表面及び割れ加工面から幅約 1 mm の範囲にのみ現れた。そこで、割れ加工に接する幅 1 mm の範囲の含水率データを用い、

割れ加工の深さ方向における含水率分布を調べた。ここで吸水・乾燥試験では、同じ条件(割れ深さ及び樹種)の試験体を5体一組として試験に供した。同じ組の試験体は、外側に位置する試験体(Fig. 5-1の#1及び#5)の割れ加工の方が内側に位置する試験体(Fig. 5-1の#2~4)の割れ加工よりもより外気に曝され乾燥しやすくなっている可能性がある。同じ組における設置位置の影響を確認するために、レッドウッド試験体を用いて割れ加工に接する幅1mmの範囲の含水率のうち深さ0mm~5mmの部分について、乾燥時間、割れ深さ、設置位置(内側または外側)における統計的有意性を、危険率5%として三元配置分散分析によって調べた(R ver. 3.5.0)。これらの3つの変数間の有意な交互作用は見られなかったが、乾燥時間($F_{2, 27} = 361, p < 0.01$)および設置位置($F_{1, 27} = 10.9, p < 0.01$)において統計的に有意な差が見られた。よって以降の議論には、内側3体の含水率データのみを使用した。

割れ加工に接する幅1mmの範囲の深さ方向の含水率分布をFig. 5-15、Fig. 5-16に示す。Fig. 5-15がレッドウッド試験体、Fig. 5-16がスギ試験体であり、それぞれ吸水0、24時間後、乾燥4、8、24時間後を示す。割れ深さの違いが内部含水率に影響を及ぼす乾燥工程に注目すると、表面から0mm~5mmの深さ範囲は割れ深さの差異にかかわらず急速に乾燥することを示している。一方、Fig. 5-15、Fig. 5-16の乾燥8時間後に見られるように、割れ深さ20mmの試験体のみが割れ加工底部の水分停滞を有した。さらに、同じく乾燥8時間後の割れ深さ20mmの試験体の表面から5mm~10mmの深さ範囲の含水率は、割れ深さ10mmのものよりも高かった。Fig. 5-15のレッドウッドでは割れ深さ10mmでは含水率20%付近であるのに対し割れ深さ20mmでは含水率50%近く、Fig. 5-16のスギでは割れ深さ10mmでは含水率20%付近であるのに対し割れ深さ20mmでは含水率100%近くであった。表面から0mm~10mmの深さの試験体の含水率は、特に乾燥時に割れ深さの差異によって影響されるようである。

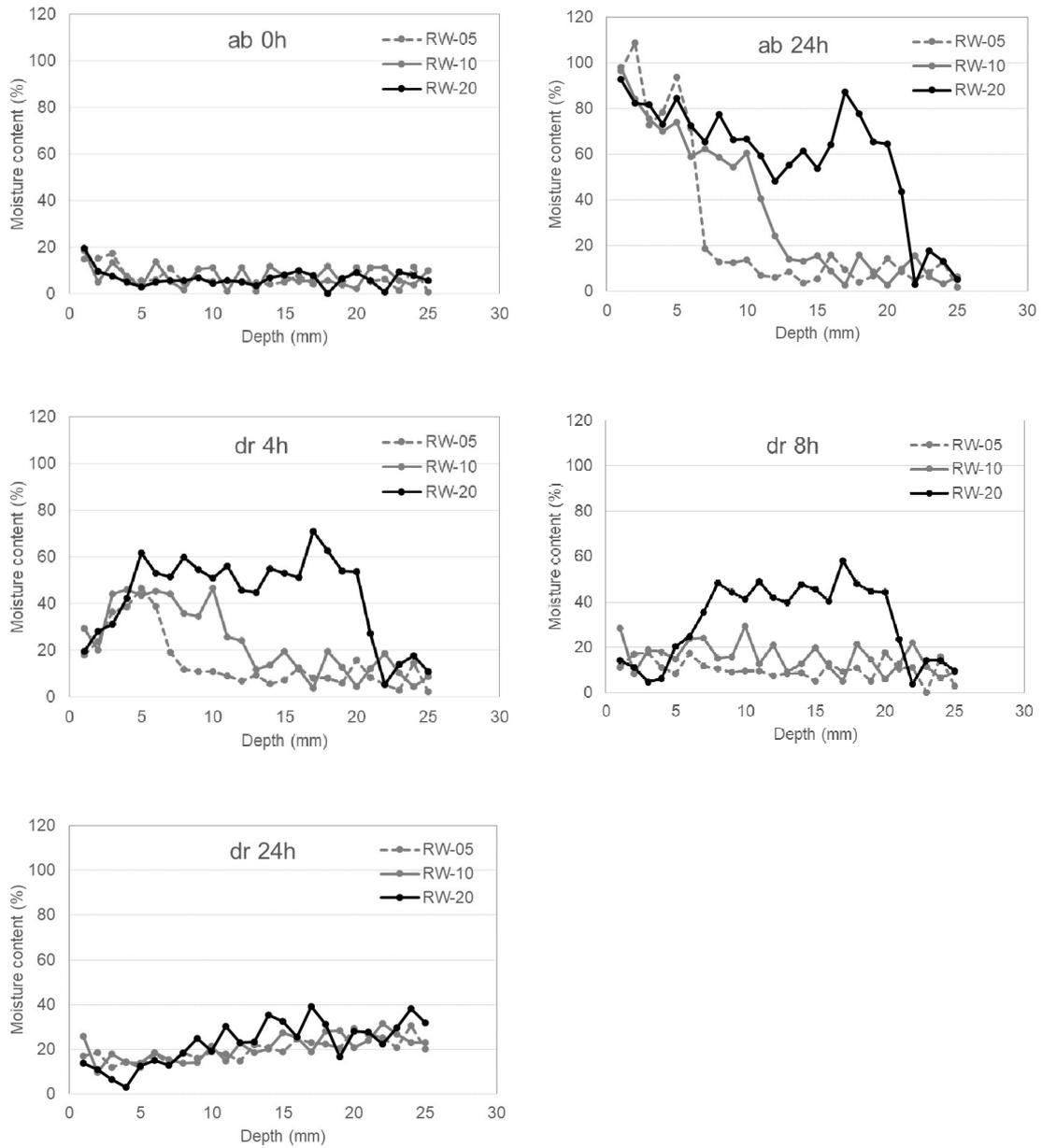


Fig. 5-15 Moisture content transition toward depth, within 1 mm of the slit (Redwood, n = 3)

Note: Symbols are as follows: RW-05, RW-10, and RW-20 denote slit depths of 5, 10 and 20 mm, respectively, in Redwood specimens. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 4, 8, and 24 hours.

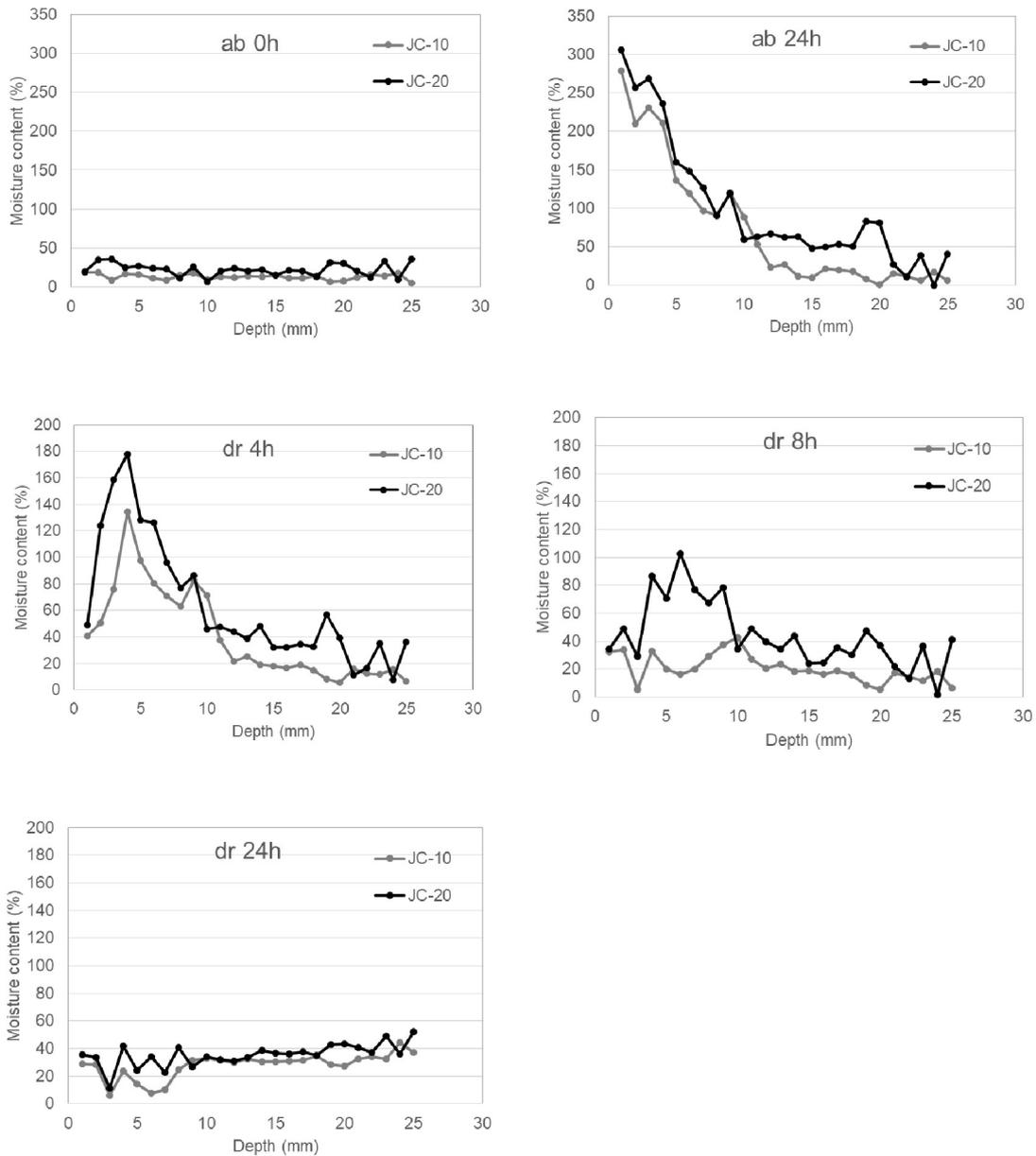


Fig. 5-16 Moisture content transition toward depth, within 1 mm of the slit (Japanese cedar, n = 3)

Note: Symbols are as follows: JC-10, and JC-20 are slit depth of 10 and 20 mm, respectively, in Japanese cedar specimens. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 4, 8, and 24 hours.

次に、厚さ方向の含水率分布に及ぼす割れ深さの影響を調べるために、10 mm および 20 mm の割れ深さの試験体について表面から 5 mm~10 mm の深さ範囲での含水率の経時変化を Fig. 5-17 に示す。Fig. 5-17 もまた割れ加工に接する幅 1 mm の範囲の含水率である。割れ

深さ 10 mm 及び 20 mm の含水率経時変化は、樹種にかかわらず同様の傾向を示している。割れ深さ 10 mm 及び 20 mm の含水率の差は、乾燥 8 時間後でのみ大きくなった。この結果は、割れ深さの差異は吸水処理時の含水率には影響せず、乾燥処理時における含水率の変化に大きく影響することを示す。一般に物質の熱移動において、空気層が 10 mm 以下であると対流が妨げられると言われる⁸¹⁾。本章で用いた試験体の割れ加工幅は約 1 mm であり 10 mm より十分に狭いため、割れ加工近傍の乾燥の駆動力は、割れ加工内部の水蒸気拡散であると考えられる。一方、細い割れ加工内部であっても表面 0 mm~5 mm のような吸水面近傍の空気は周囲と比較的容易に混合することができ、吸水面付近の乾燥速度は速く、より深い部分は空気が混合しにくく乾燥が遅くなると考えられる。以上より、割れ加工に接する深さ 5 mm~10 mm の同一範囲の含水率が割れ深さ 10 mm と 20 mm で差が生じたことは、割れ加工内部の湿度特性の違いに影響を受けているのではないかと考えられる。

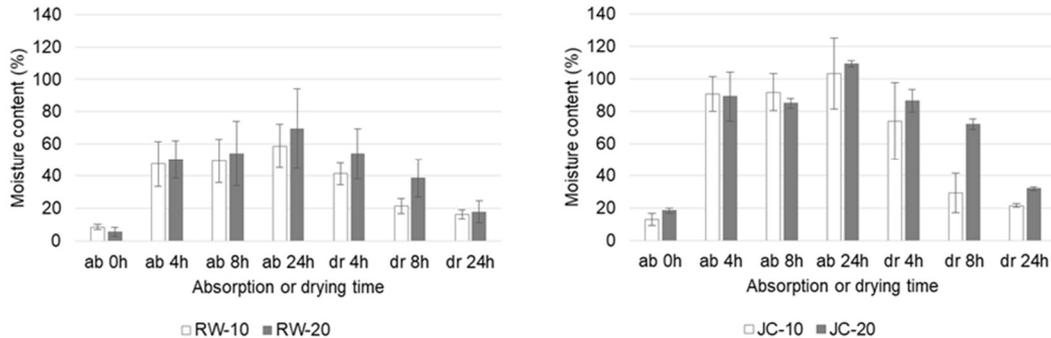


Fig. 5-17 Moisture content transition in the absorption and drying processes, at the depth of 5-10 mm and within 1 mm of the slit (n = 3)

Note: Symbols are as follows: RW-10 and RW-20 denote slit depths of 10 and 20 mm in Redwood specimens, and JC-10 and JC-20 denote slit depth 10 and 20 mm in Japanese cedar specimens, respectively. This figure shows absorption process (ab) at 0, 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 4, 8 and 24 hours. Error bar shows standard deviation.

5.3.4 樹種及び部位の違いが水分停滞に与える影響

Table 5-1 及び Fig. 5-15～Fig. 5-17 に示すように、スギの吸水量はレッドウッドの吸水量よりもはるかに多い。木材の耐久性に関しては、スギの心材は耐久性「中」とみなされ、耐久性「大」のレッドウッドよりも耐久性が低いがある程度の耐久性を持っている²²⁾。木材の耐久性は、密度、抽出物、および吸水性の影響を受けると言われ、密度が高い樹種、抗菌性を持つ心材抽出物の多い樹種、吸水性の低い樹種の方が一般に耐久性が高い²²⁾。また、辺材の吸水性は心材の吸水性よりも高いことが知られている⁸²⁾。本章の実験では、スギ試験体は辺材を含み、レッドウッド試験体は心材のみであった。その結果、スギ試験体は Fig. 5-12～Fig. 5-14 及び Fig. 5-16 に示すように、より多くの吸水が起こったことが観察された。スギの辺材部分は板目表面から約 10 mm の深さまであり、この部分で観察された高い吸水領域と一致している。さらに、心材と辺材の間にある移行材は特異的な吸水特性を有することがあり⁸³⁾、その影響も懸念される。したがって、本章の実験結果は樹種の違いだけでなく、試験体の部位の差異によっても影響されたと言える。このような要因により、本章の結果からは樹種の影響のみを確認するには至っていないが、ウッドデッキ材の実使用においては辺・心材を用いて施工されることが想定されるため、本章の結果についても十分価値のあるものと考えられる。

5.4 まとめ

3章と同様の手法の割れモデル試験体（レッドウッド、スギ、ヒノキ）を、本章では X 線デンシトメトリー法を用いて詳細な内部含水率分布の変化を調べた。その結果、24 時間吸水での割れ加工からの接線方向吸水は幅 1 mm 程度の範囲と非常に狭い範囲であることが明らかとなった。また、3章での割れモデル試験体と同様に、割れ深さ 20 mm の試験体のみが、割れ深部の含水率を乾燥 8 時間後まで含水率 20%以上に保つことを明らかにした。

第6章 釘穴加工モデルによる水濡れ後の内部含水率評価

6.1 はじめに

ウッドデッキの表面損傷として、前章までは主に表面割れを想定して検討を行ってきたが本章では新しく釘穴モデルについて検討した。表面割れにおいては割れが繊維方向に生じるため、木口面の暴露を考慮しなければ主に接線方向吸水のみが行われる。第5章で明らかにしたように、木材の接線方向の吸水は非常に少なく吸水範囲は幅1 mm以内と限定的である。それに比べ釘穴のような円形状の損傷では、接線方向に加えて繊維方向の吸水が生じるため、降雨による内部含水率上昇に大きな影響を与える可能性がある。よって本章では、釘穴モデルについて水濡れ時の内部含水率の変化の特徴を明らかにすることを目的とした。

6.2 実験

6.2.1 試験体

スギ (*Cryptomeria japonica*) 心材を試験体とし、加工の種類を Table 6-1 に、試験体の概要を Fig. 6-1 に示した。吸水面の断面寸法は 10 mm × 20 mm とし、木口面吸水もしくは板目面吸水とした。木口面吸水試験体では 20 mm (R) × 10 mm (T) × 30 mm (L)、板目面吸水では 30 mm (R) × 10 mm (T) × 20 mm (L) とした。板目面吸水試験体には釘穴を模した穴加工を小型ボール盤を用いて施し、穴の寸法は直径 1 mm または 2 mm、深さ 10 mm または 20 mm とした。試験体は吸水面以外の 5 面をシリコン樹脂 (シリコンシーラント 8060 クリア色、セメダイン製) で防水シールし、吸水・乾燥試験に供するまで 20°C、65%RH の恒温恒湿機内で 1 週間養生した。吸水・乾燥試験を行う直前に、穴直径 1 mm 及び深さ 20 mm の試験体の一部に釘打ちを行った。釘寸法は胴径直径 1.25 mm、長さ 19 mm のステンレス製であった。同条件の試験体は各 3 体とした (n=3)。各試験体はシリコン樹脂による防水シール前に 103°C、24 時間で全乾として全乾密度を求め、平均で 0.36 g/cm³ であった。

Table 6-1 Specimen profile

Absorption face	Hole diameter and depth	Nail diameter and length
End grain	No holes	No nails
Flat grain	No holes	No nails
	$\phi 1 \text{ mm} * 10 \text{ mm}$	No nails
	$\phi 1 \text{ mm} * 20 \text{ mm}$	No nails
		$\phi 1.25 \text{ mm} * 19 \text{ mm}$
	$\phi 2 \text{ mm} * 10 \text{ mm}$	No nails
$\phi 2 \text{ mm} * 20 \text{ mm}$	No nails	

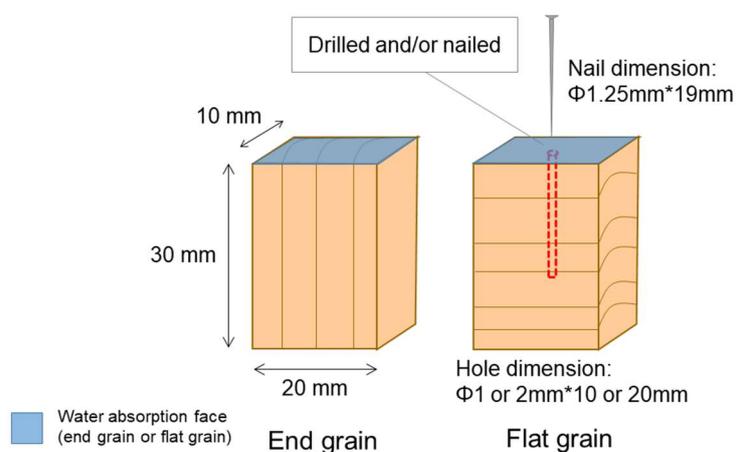


Fig. 6-1 Schematic diagram of specimens

6.2.2 吸水・乾燥試験

吸水・乾燥試験の概要図を Fig. 6-2 に示す。吸水・乾燥試験は 24 時間の吸水処理とそれに続く 24 時間の乾燥処理から成る。吸水処理は、同条件の試験体 3 体ずつを並べ、その上に蒸留水を十分に含ませたメラミン樹脂製スポンジ(断面 40 mm × 50 mm × 高さ 30 mm)

を載せることによって試験体の上から吸水させた。これは穴加工に降雨を想定して上から吸水させるためである。吸水処理は蒸留水を共存させたアクリルデシケーター内で行い、20°C、99%RH、無風であった。吸水処理を終えたのち、直ちに乾燥処理を行った。乾燥処理はメラミン樹脂製スポンジを取り除き、20°C、65%RHの恒温恒湿機内で行った。恒温恒湿機のファンにより風速1 m/sであった。

24時間吸水後の吸水量 (g/cm^2) は、JIS Z 2101 (2009)の吸水性試験に準じて吸水前と吸水後の試験体の質量差を吸水面積で除して求めた。吸水面積は穴加工による欠損がないものとして吸水面一面の面積を用いた。

吸水・乾燥試験は同じ試験体に対して合計3回行った。それは、1回目の吸水・乾燥試験では十分な吸水量が得られなかったためである。1回目の吸水・乾燥試験の後には、全乾時のX線透過画像を得るため103°C、24時間で試験体を全乾とした。その後、2回目の吸水・乾燥試験を行う前に20°C、65%RHの恒温恒湿機で1週間養生した。3回目の試験については1回目、2回目の差を考察するために行い、20°C、65%RHの恒温恒湿機で1週間以上養生してから吸水・乾燥試験を実施した。

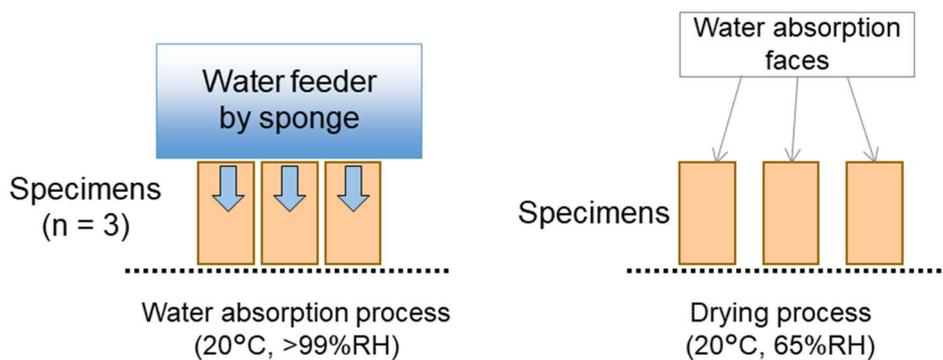


Fig. 6-2 Schematic diagram of water absorption and drying test

Note: This figure is the same as Fig. 4-3.

6.2.3 X線デンストメトリー法による内部含水率測定

6.2.2 の吸水・乾燥試験の実施中、任意の時間に試験体を取り出し断面の X 線画像を撮影した (Fig. 6-3)。X 線画像は X 線デジタルマイクロスコープ (μ B1600、松定プレジジョン製) を用いて撮影し、撮影条件は管電圧 50 kV、管電流 180 μ A とした。撮影した画像は輝度値 500~1600 の範囲を 8 ビットグレースケールに変換して保存した。また各 X 線画像の輝度値は、同時に撮影した厚さ 1 mm のアクリル板のグレースケール値が同じとなるように線形補正した。

X 線撮影は次の時間に行った。

吸水処理時：0、24 時間後 (場合により 4、8 時間後を含む)

乾燥処理時：1、4、8、24 時間後

試験体の内部含水率は第 4 章で示したとおり、Eq. 6-1 から得られる。

$$MC (\%) = \frac{(G_0 - G_i) \times a + b}{\rho} \times 100 \quad \text{Eq. 6-1}$$

ここで、 MC は含水率 (%) であり、 G_0 は全乾時の X 線画像の輝度値、 G_i は各測定時間 i における X 線画像の輝度値、 a と b は検量線の傾きと切片を示す。 ρ は試験体の全乾密度 (g/cm^3) で、全試験体の平均全乾密度 $0.36 \text{ g}/\text{cm}^3$ を用いた。 a と b の値については第 4 章で求めた次の数字を適用した。すなわち、全乾 X 線透過画像との輝度値差 (ΔG) が $\Delta G \geq 5$ の時、 $a = 0.008$ 、 $b = -0.0166$ 、 $\Delta G < 5$ の時、 $a = 0.0075$ 、 $b = 0$ とした。

X 線透過画像は、画像処理ソフトウェア (ImageJ1.50i、National Institutes of Health) を用いて処理した。まず、同一試験体の吸水・乾燥試験中の一連の画像を ImageJ プラグイン (Template matching) を用いて位置合わせを行い、Fig. 6-3 に示す ROI (Region of interest) で切り取った。ROI は穴加工を中心とし、吸水面に接するように幅 15 mm \times 高さ 25 mm の範囲を選択した。ただし穴加工の直径が 2 mm の場合は、穴加工 2 mm の位置を切り取り後の画像の中央 2 mm 幅とするために、穴加工を中心として幅 16 mm \times 高さ 25 mm の範囲を選択した。次に、X 線透過画像の 28 ピクセルが実寸法の 1 mm とほぼ等しいため各画

像を 1/28 のサイズに縮小した。こうして得た 1 mm 角の平均輝度値情報を持つ画像をテキスト形式で保存し、表計算ソフト（エクセル 2013、マイクロソフト社製）で全乾画像との輝度値差を求めた。最後に Eq. 6-1 から 1 mm 角の含水率分布を求め、0%～50%のグレースケールグラデーションによってグラフにプロットした (Fig. 6-3)。なお、ここで得られる含水率は X 線透過方向の厚さ 10 mm の試験体の厚さ方向の平均の含水率となるため、穴加工からの吸水のように厚さ 10 mm の一部分が高含水率であっても厚さ 10 mm の平均として示されるため、穴加工に近接した部分の含水率を表しているわけではない。

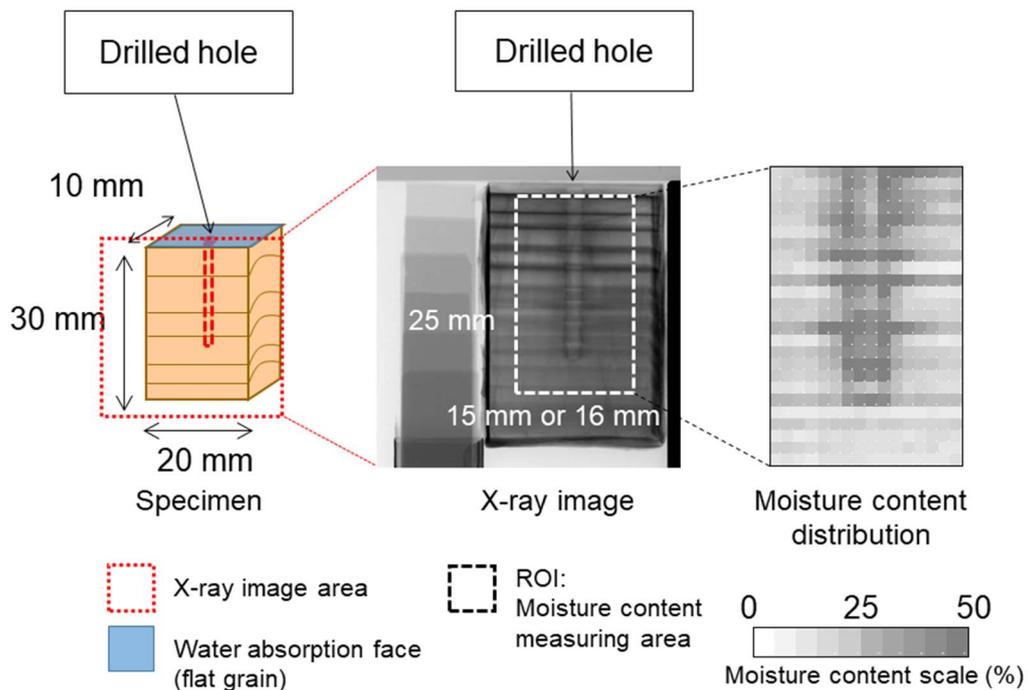


Fig. 6-3 Scheme of moisture content distribution measuring with X-ray densitometry

6.3 結果と考察

6.3.1 吸水・乾燥繰り返しによる影響

(1) 吸水量の比較

1～3 回目の吸水・乾燥試験における 24 時間の吸水量の結果を Table 6-2、Fig. 6-4 に示す。

Table 6-2 には初期含水率も併せて記載した。吸水が行われるのは主に木口面からの繊維方向吸水のみで、板目面からの放射方向にはほとんど行われてない。板目面吸水については吸水量が少ないためか、試験体や測定回ごとのばらつきも小さかった。一方、木口面吸水は板目面吸水よりも吸水量が多く、試験体、測定回共に測定差が大きかった。全体的に2回目の吸水量が他の2回と比べて大きくなったが、Table 1 より初期含水率が低かった影響ではないかと考えられた。一般に、乾燥している木材の方が吸水性が高まることが知られている⁵⁷⁾。1回目と2回目の間には全乾工程を挟み、2回目と3回目の間は吸水後からの乾燥であった。よって2回目の試験体は低含水率からの吸湿、3回目の試験体は高含水率からの放湿となり、ヒステリシスによって平衡含水率が変化した可能性がある。1回目と3回目の吸水・乾燥試験開始時の初期含水率はほぼ同じであり、気乾状態から調湿すればほぼ同じ平衡含水率となると考えられる。同じ初期含水率であった1回目と3回目では、木口面吸水の吸水量は 0.27 g/cm^3 と同じで、初期含水率の違いが吸水量に影響しているように思われる。しかし、穴加工ありの試験体においては1回目と2回目、3回目では傾向が異なっており、1回目よりも2回目、3回目の方が吸水量が多く生じ、濡れ性がよくなり吸水しやすくなったことが考えられる。吸水処理においても、1回目では穴が水をはじいていたものが2回目から水が入りやすくなったことも特徴として見られた。木材表面の濡れについては、毛細管のメニスカスが存在する限り行われる「浸透ぬれ（浸せきぬれ）」^{84, 85)}と、固体表面への濡れ広がり⁸⁶⁾や壁孔を通じた異なる細胞間への濡れ広がり⁸⁵⁾を示す「拡張ぬれ」によって説明される。拡張ぬれは接触角が 0° でないと起こらず、浸せきぬれよりも条件が厳しい。本章の実験における穴加工内での濡れは、穴の深さ方向に水が進む「拡張ぬれ」と考えられ、穴直径が1 mm程度の小さなものでは水の表面張力によって水が穴内部に入りづらく、穴直径が2 mm程度であれば水が浸入しやすくなるものの、1回目の試験では木材表面に存在する疎水性成分の影響が大きいためか、吸水しにくかったと考えられる。2回目以降ではその影響はあまり見られなくなった。

Table 6-2 Specimen profile and 24 hours mass of water absorption (n=3)

Water absorption face	Hole diameter and depth	Initial MC (%)	Mass of water absorption (g/cm ²)	Initial MC (%)	Mass of water absorption (g/cm ²)	Initial MC (%)	Mass of water absorption (g/cm ²)
		1 st test		2 nd test		3 rd test	
		End grain	No holes	8.5 (0.1)	0.27 (0.01)	6.3 (0.1)	0.37 (0.02)
Flat grain	No holes	7.5 (0.1)	0.06 (0.01)	5.8 (0.2)	0.06 (0.00)	7.5 (0.1)	0.06 (0.00)
	φ1*10mm	7.7 (0.1)	0.06 (0.01)	5.8 (0.1)	0.08 (0.01)	7.7 (0.1)	0.08 (0.01)
	φ1*20mm	7.7 (0.2)	0.06 (0.00)	5.8 (0.1)	0.09 (0.01)	7.7 (0.2)	0.09 (0.01)
	φ1*20mm +Nail	7.8 (0.2)	0.08 (0.03)	5.9 (0.4)	0.07 (0.02)	7.8 (0.2)	0.07 (0.02)
	φ2*10mm	8.0 (0.1)	0.08 (0.01)	6.0 (0.0)	0.11 (0.02)	8.0 (0.1)	0.10 (0.01)
	φ2*20mm	8.4 (0.4)	0.08 (0.00)	5.9 (0.0)	0.15 (0.04)	8.4 (0.4)	0.13 (0.03)

Note: See Table 6-1 for specimens' details. Numbers in parentheses show standard deviation.

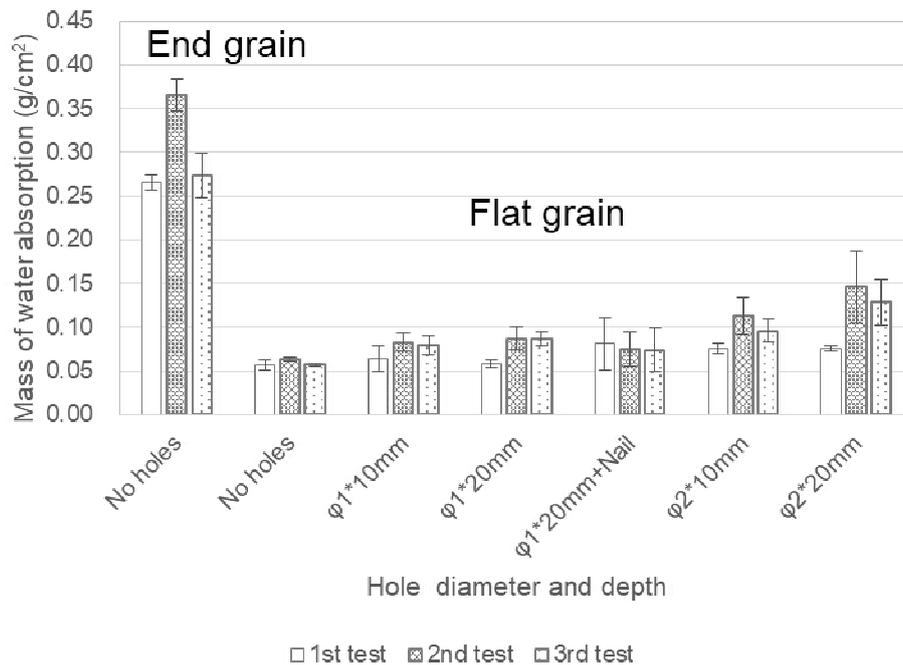


Fig. 6-4 Twenty-four hours mass of water absorption (n = 3)

Note: See Table 6-1 for specimens' details. Error bars show standard deviation.

(2) 内部含水率分布の比較

試験体の内部含水率分布について、まず木口面からの繊維方向吸水試験体のものを Fig. 6-5～Fig. 6-7 に示す。1～3 回の吸水・乾燥試験を続けて示した。繊維方向吸水では、Table 6-2 の吸水量の増減に応じて含水率 50%以上を示す濃いグレーの部分に変化し、浸透長の変化として現れた。同じ試験体の中でも年輪に沿って吸水が速い部分と遅い部分があり、含水率の高い部分が波型の形を作った。この傾向は 1～3 回目ではほぼ同じで、吸水・乾燥の繰り返し回数が増えると吸水しやすい部分が変わるということは見られなかった。つまり、木材の仮道管中の壁孔閉鎖割合に応じて吸水しやすさは決まり、吸水時の材料の含水率によって吸水速度が左右されると考えられる。含水率分布と早材、晩材部との位置の整合は行っていないが、第 4 章で得られた傾向や既往研究⁷⁷⁻⁷⁹⁾から言って晩材部の吸水が多いと考えられる。一方、第 4 章の Fig. 4-12 で検討したように深さ方向 1 mm ずつの含水率を平均し、それが 20%以上となる位置を浸透長と仮定すれば、1～3 回の繰り返しの影響は Fig. 6-8 のよ

うに示せる。同条件の3体の試験体のうち、L-01、L-02の2体は2回目だけの浸透長が長くなる傾向であったがL-03の試験体は1~3回でほぼ変わらない結果となった。いずれにしても木口面からの吸水による含水率上昇は24時間でおおよそ10mmの範囲まで起こることが言える。L-01~L-03の3体を平均して深さ方向の含水率分布を表すとFig.6-9のようになり、3回の試験の繰り返しの依らず含水率が20%以上に上昇するのは吸水面から深さ10mmの範囲であることが分かる。

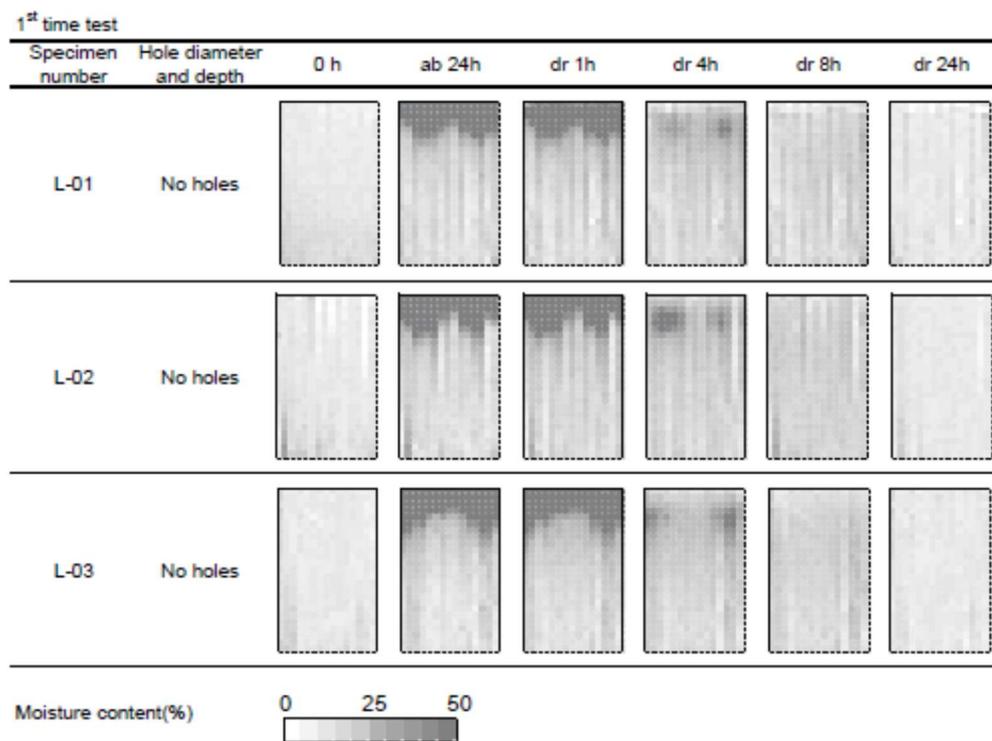


Fig. 6-5 Moisture content distribution of specimens in the water absorption from the end grain at the 1st time test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

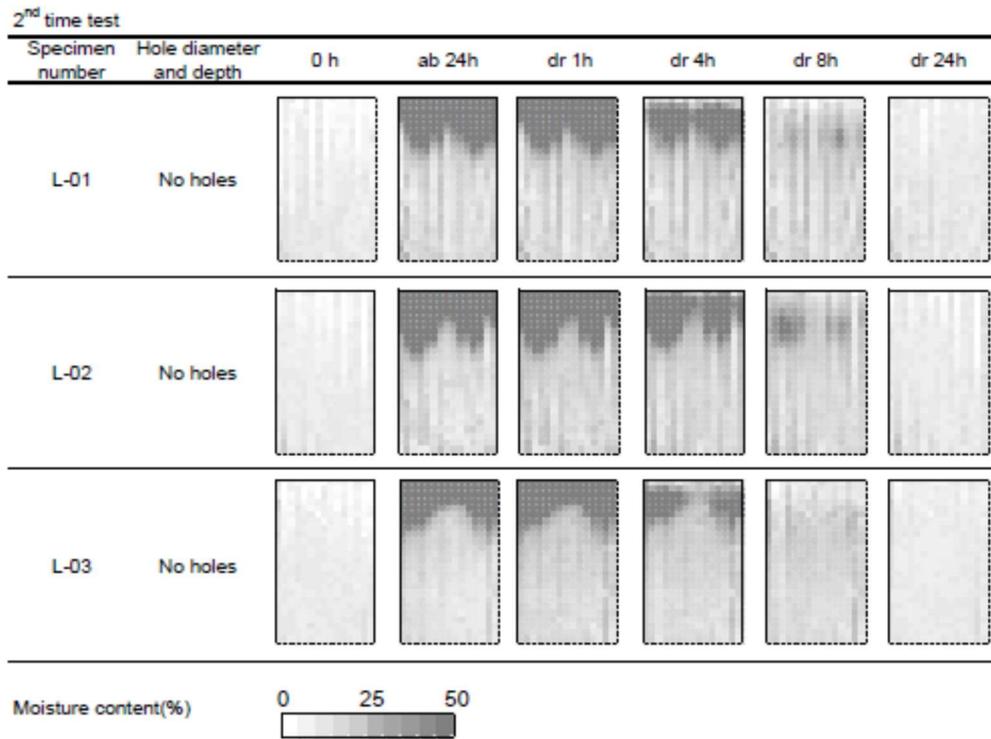


Fig. 6-6 Moisture content distribution of specimens in the water absorption from the end grain at the 2nd time test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

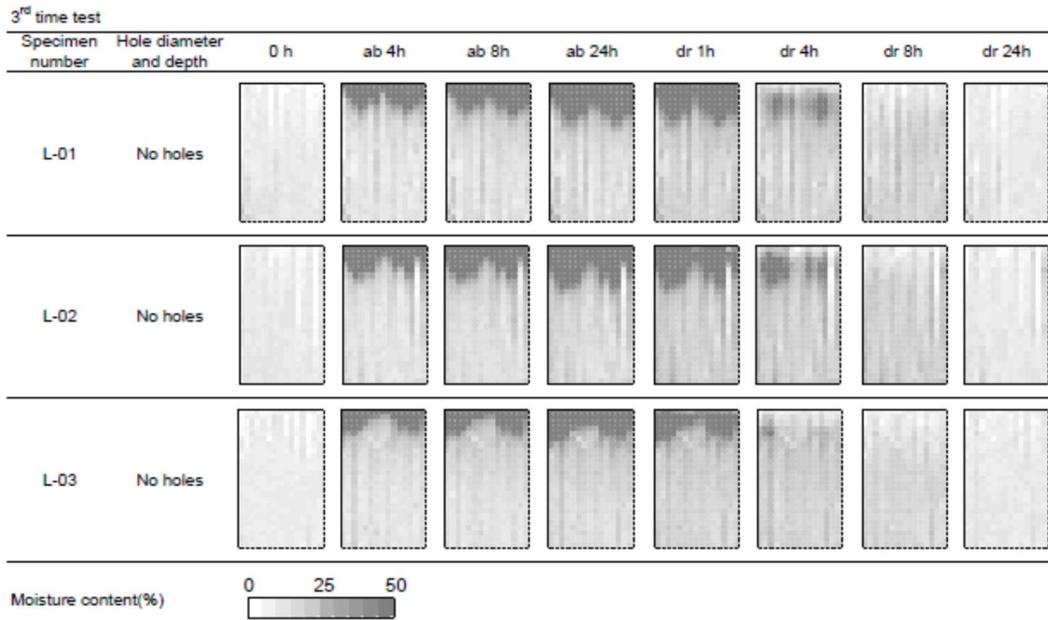


Fig. 6-7 Moisture content distribution of specimens in the water absorption from the end grain at the 3rd time test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces. This figure shows absorption process (ab) at 0, 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

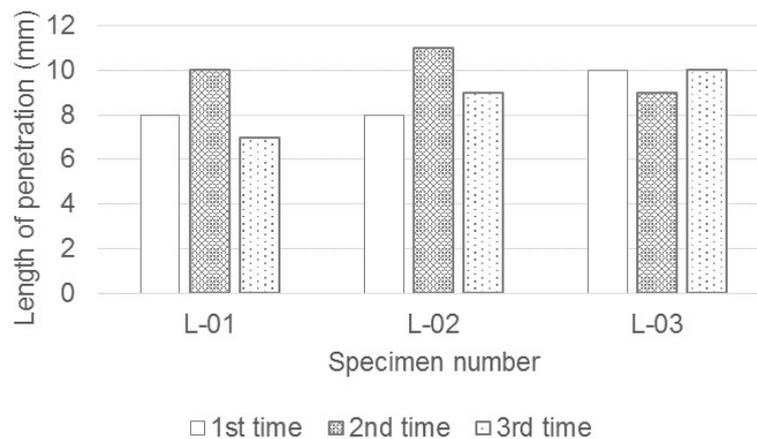


Fig. 6-8 Effect of test repetitions on water penetration from longitudinal direction

Note: This figure shows 24 hours water absorption from longitudinal direction.

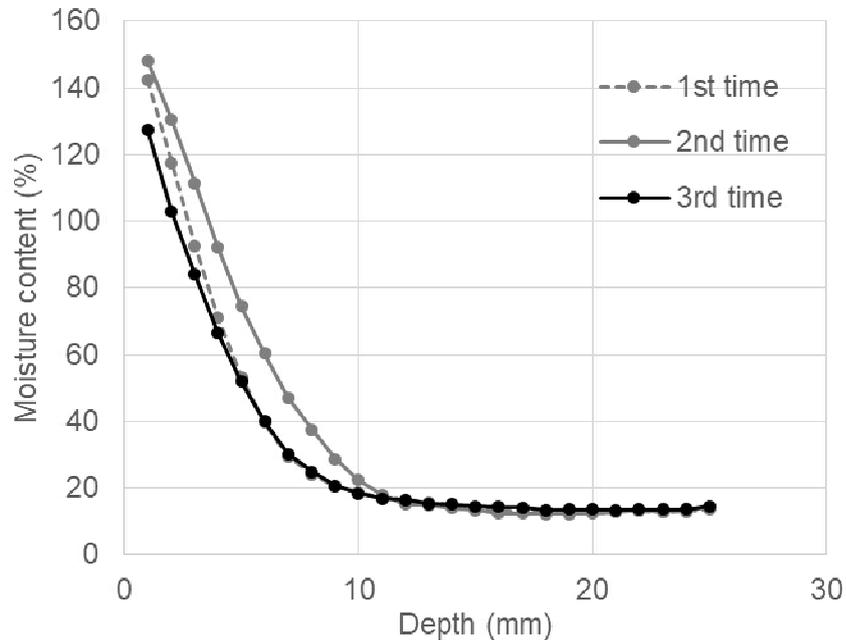


Fig. 6-9 Moisture content gradient toward depth (n = 3)

Note: This figure shows 24 hours water absorption from longitudinal direction.

次に板目面からの放射方向吸水を Fig. 6-10～Fig. 6-18 に示す。1～3 回の吸水・乾燥試験を続けて示した。Fig. 6-10～Fig. 6-12 が直径 1 mm の穴加工試験体（穴深さ 10 mm 及び 20 mm）の 1 回目～3 回目の含水率分布、Fig. 6-13～Fig. 6-15 が直径 2 mm の穴加工試験体（穴深さ 10 mm 及び 20 mm）の 1 回目～3 回目の含水率分布、Fig. 6-16～Fig. 6-18 が穴加工なしの板目面吸水及び直径 1 mm、深さ 20 mm の穴加工に直径 1.2 mm の釘を打ち込んだものの 1 回目～3 回目の含水率分布である。放射方向吸水では、Table 6-2、Fig. 6-4 でも示したように通常はほとんど吸水は起こらない。しかし、板目面に穴のある試験体においては穴加工から水が浸入し、さらに穴内部から繊維方向の吸水が確認された。Fig. 6-10～Fig. 6-15 の含水率分布図のちょうど中心に穴加工があり、繊維方向である横方向へ高含水率を示す濃いグレーの領域が広がっていることが分かる。そして穴加工内部に吸水が起こると、その乾燥過程においては高含水率の部分はしばらく継続して留まっていることが見られた。一方、吸

水・乾燥繰り返しの影響については、穴加工が直径 1 mm～2 mm と小さいために水が入りにくく、一度濡れることによって徐々に濡れ性が高まることが確認できた。一旦穴深さのすべてが濡れれば次からは同様に濡れるようであった。しかし本実験においては直径 1 mm の穴は深さ 20 mm まで濡れることはなく、直径 2 mm の穴の試験体のみ深さ 20 mm まで吸水された。Fig. 6-16～Fig. 6-18 の釘打ち試験体は、含水率分布図の中央に釘が位置している。金属である釘は X 線透過画像において輝度値 0 と表示されるため、含水率の計算値も 0 となり、分布図内に白抜きで表示される。釘打ち試験体では釘から水が伝って含水率の上昇が起こることも予想していたが、釘に緩みがない状態では特に含水率の上昇は見られなかった。24 時間吸水後に若干釘の周りの含水率が高くなったが、このデータからはそれ以上の細かな検討をすることはできなかった。

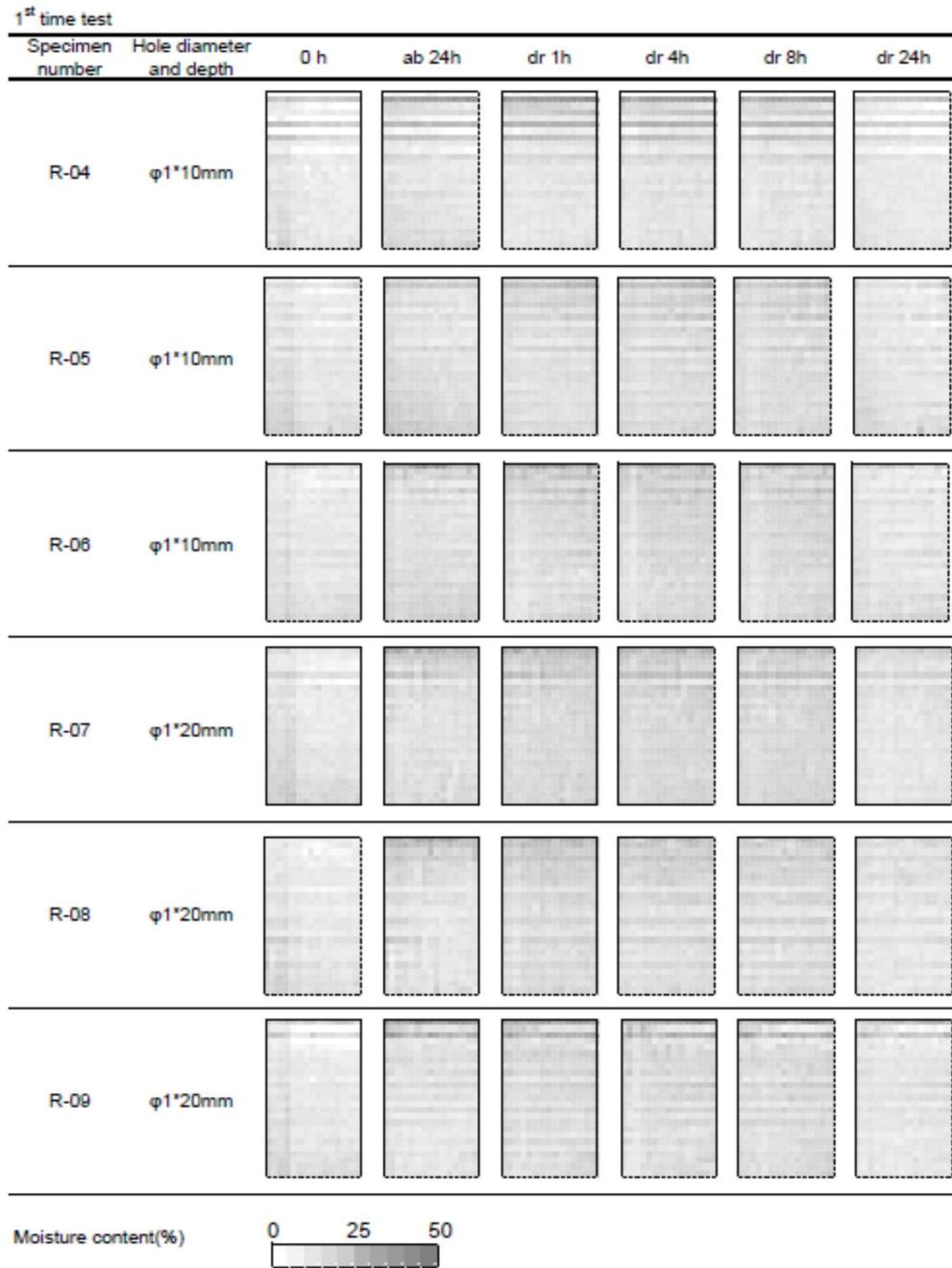


Fig. 6-10 Moisture content distribution of specimens in holes with 1 mm-diameter at the 1st time

test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces, and the centers of images are held holes with 1 mm-diameter. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.



Fig. 6-11 Moisture content distribution of specimens in holes with 1 mm-diameter at the 2nd time

test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces, and the centers of images are held holes with 1 mm-diameter. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

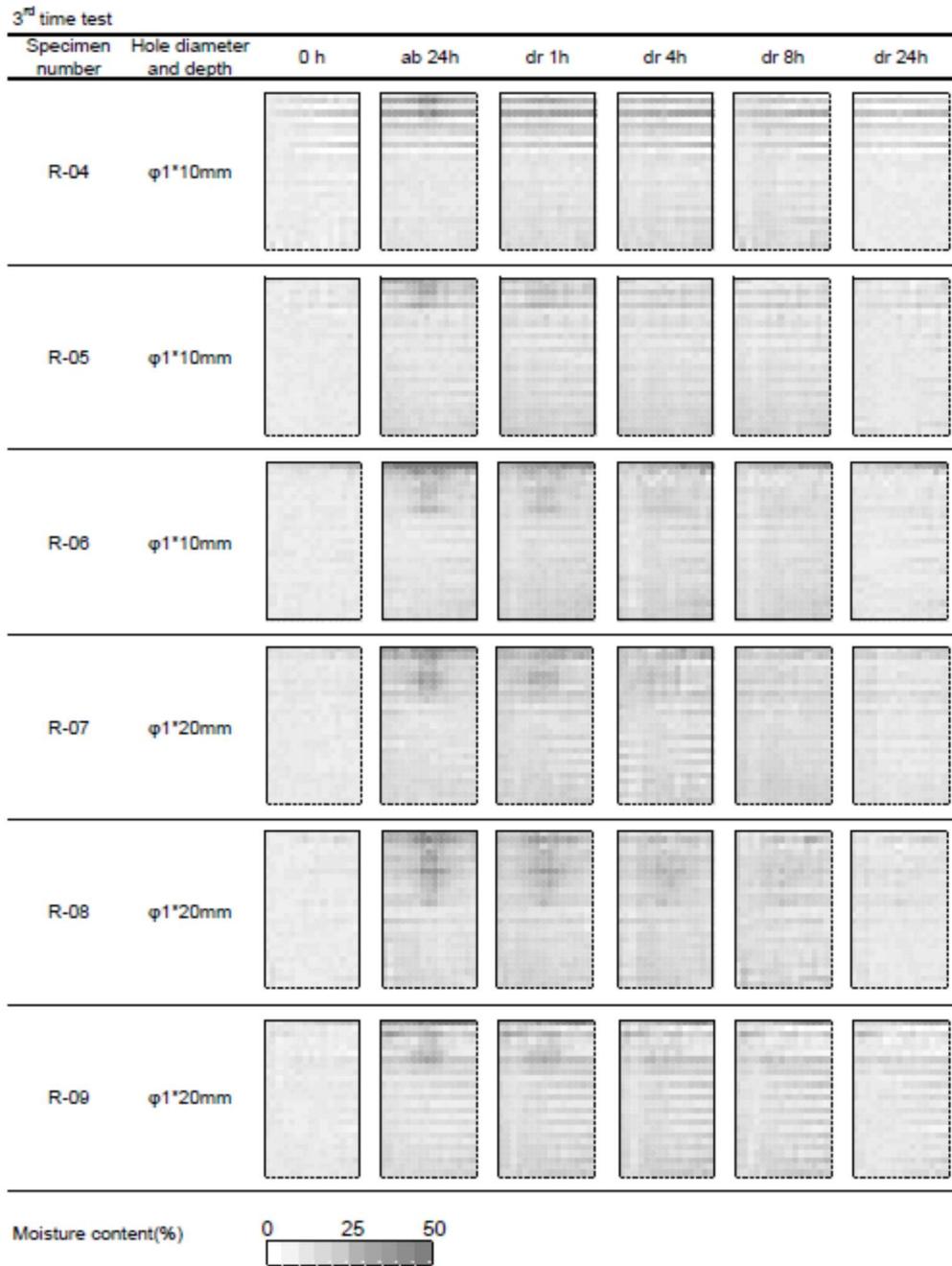


Fig. 6-12 Moisture content distribution of specimens in holes with 1 mm-diameter at the 3rd time

test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces, and the centers of images are held holes with 1 mm-diameter. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

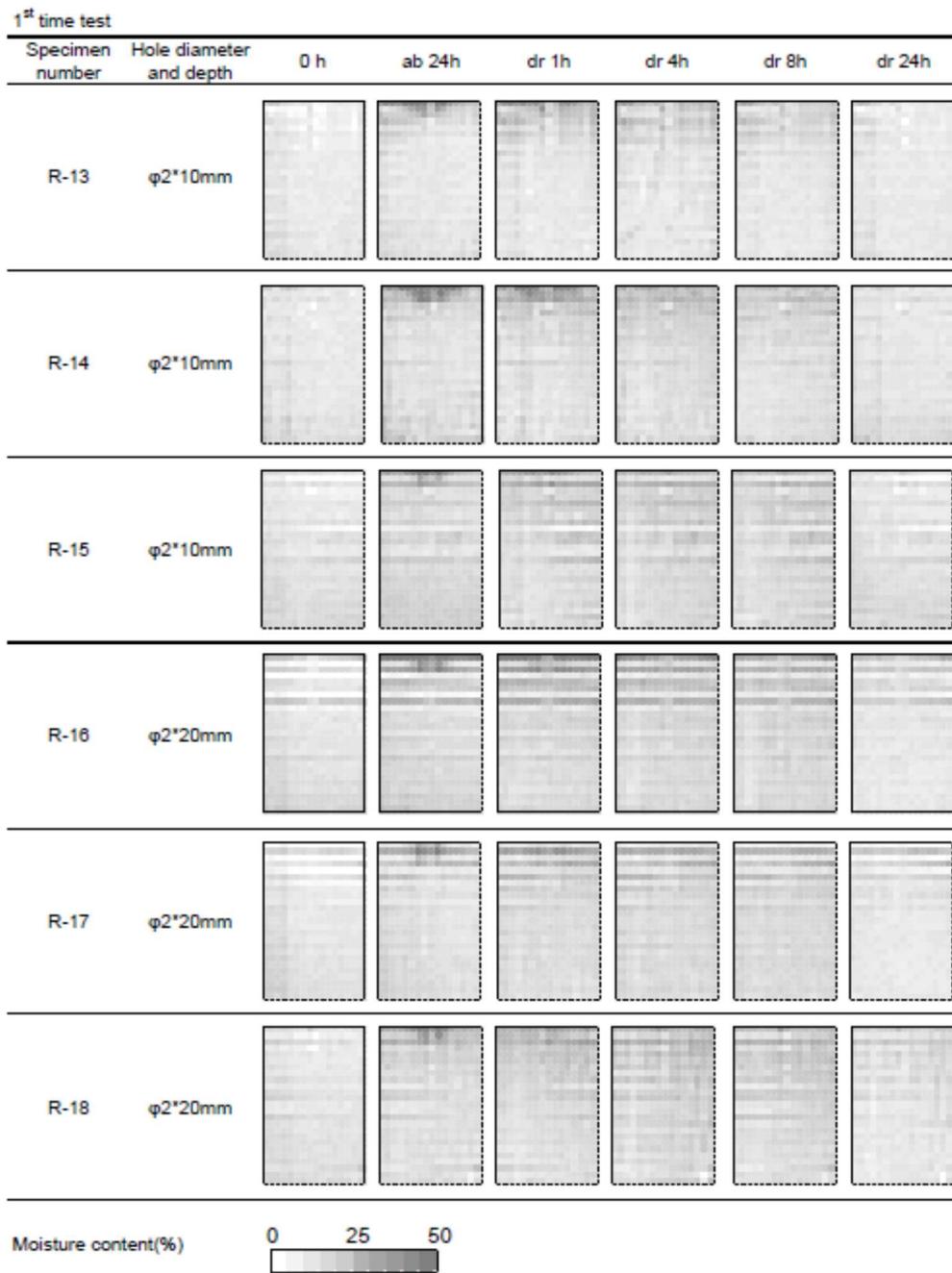


Fig. 6-13 Moisture content distribution of specimens in holes with 2 mm-diameter at the 1st time

test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces, and the centers of images are held holes with 2 mm-diameter. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

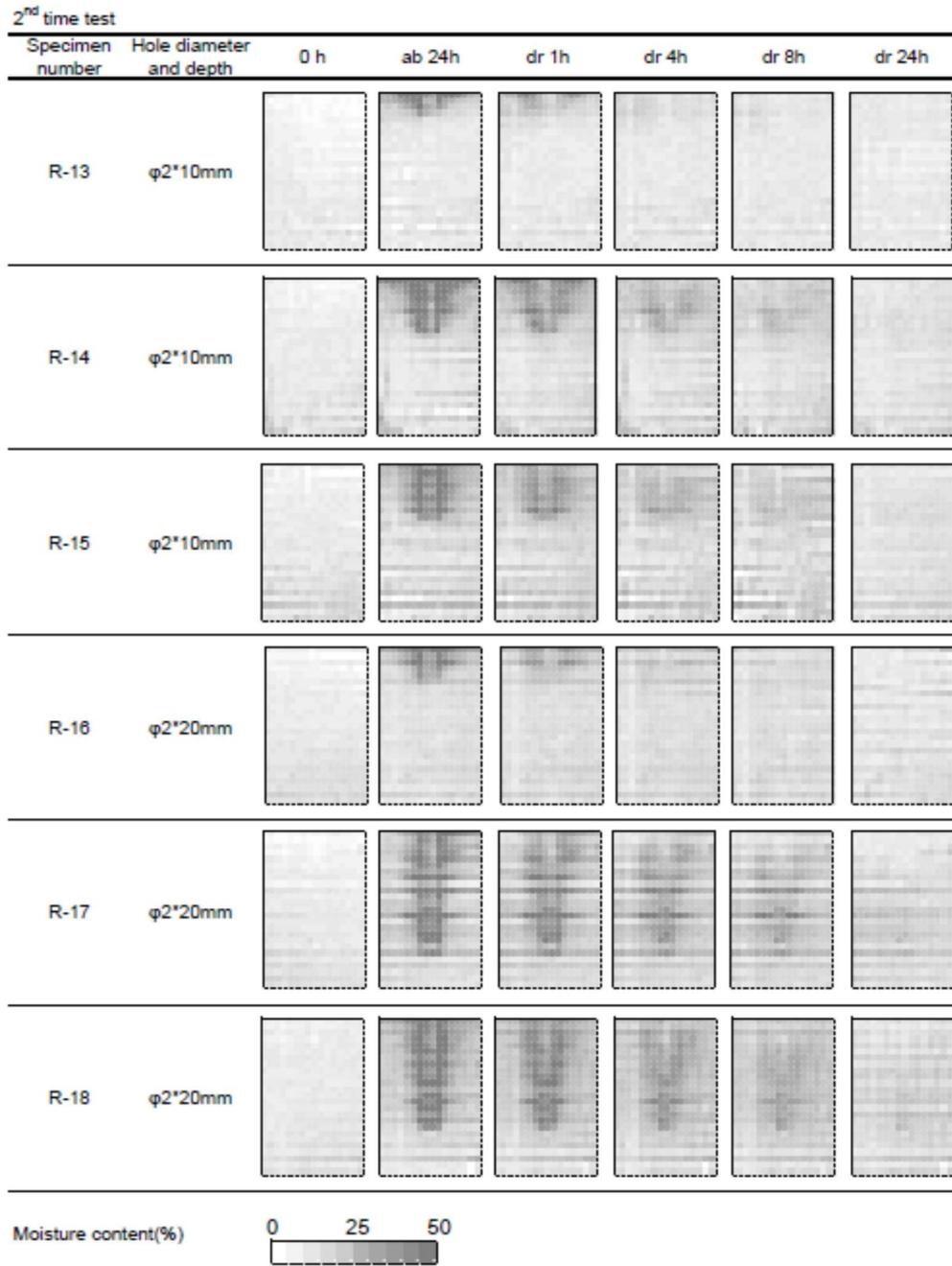


Fig. 6-14 Moisture content distribution of specimens in holes with 2 mm-diameter at the 2nd time

test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces, and the centers of images are held holes with 2 mm-diameter. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

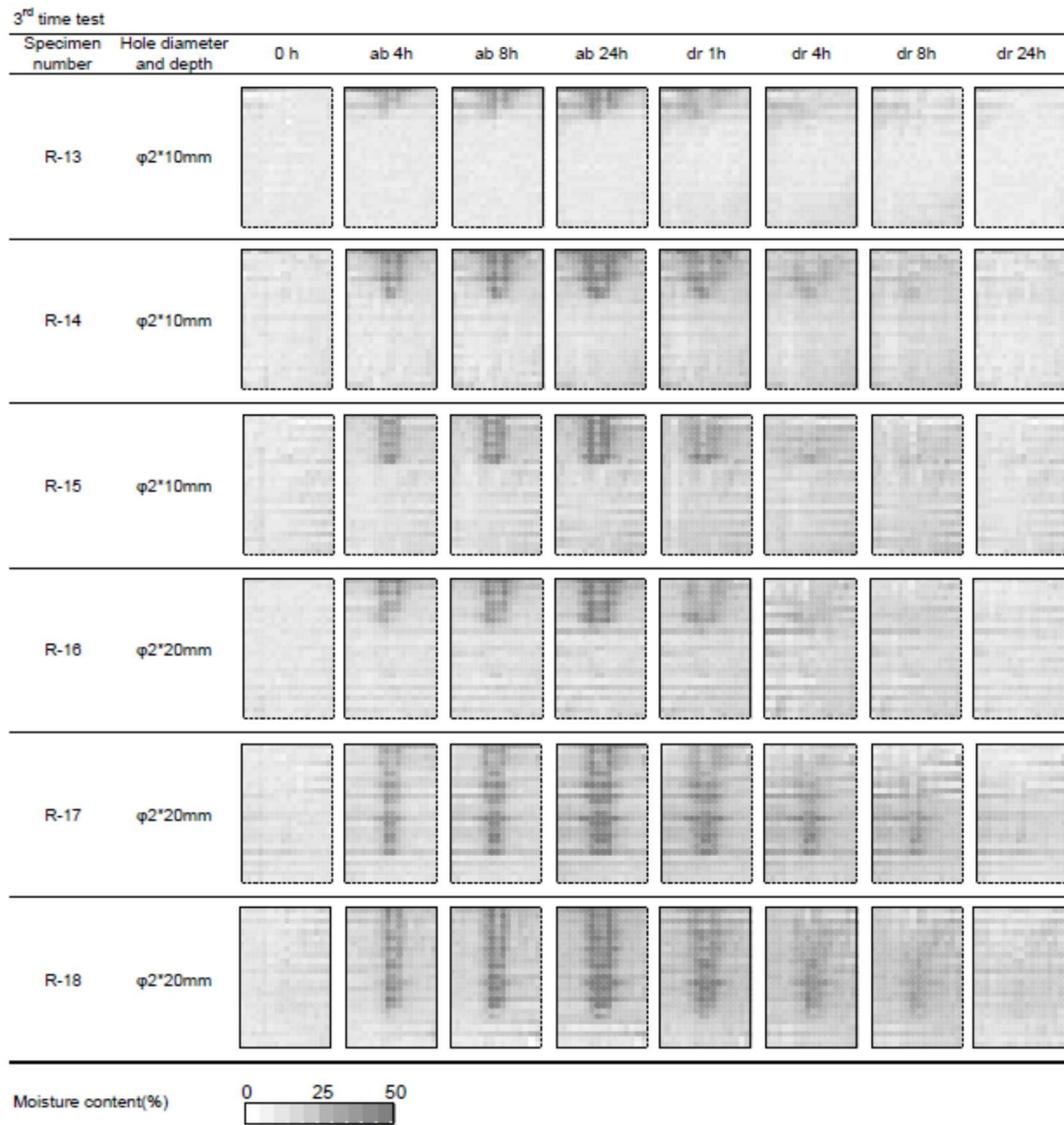


Fig. 6-15 Moisture content distribution of specimens in holes with 2 mm-diameter at the 3rd time test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces, and the centers of images are held holes with 2 mm-diameter. This figure shows absorption process (ab) at 0, 4, 8, and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

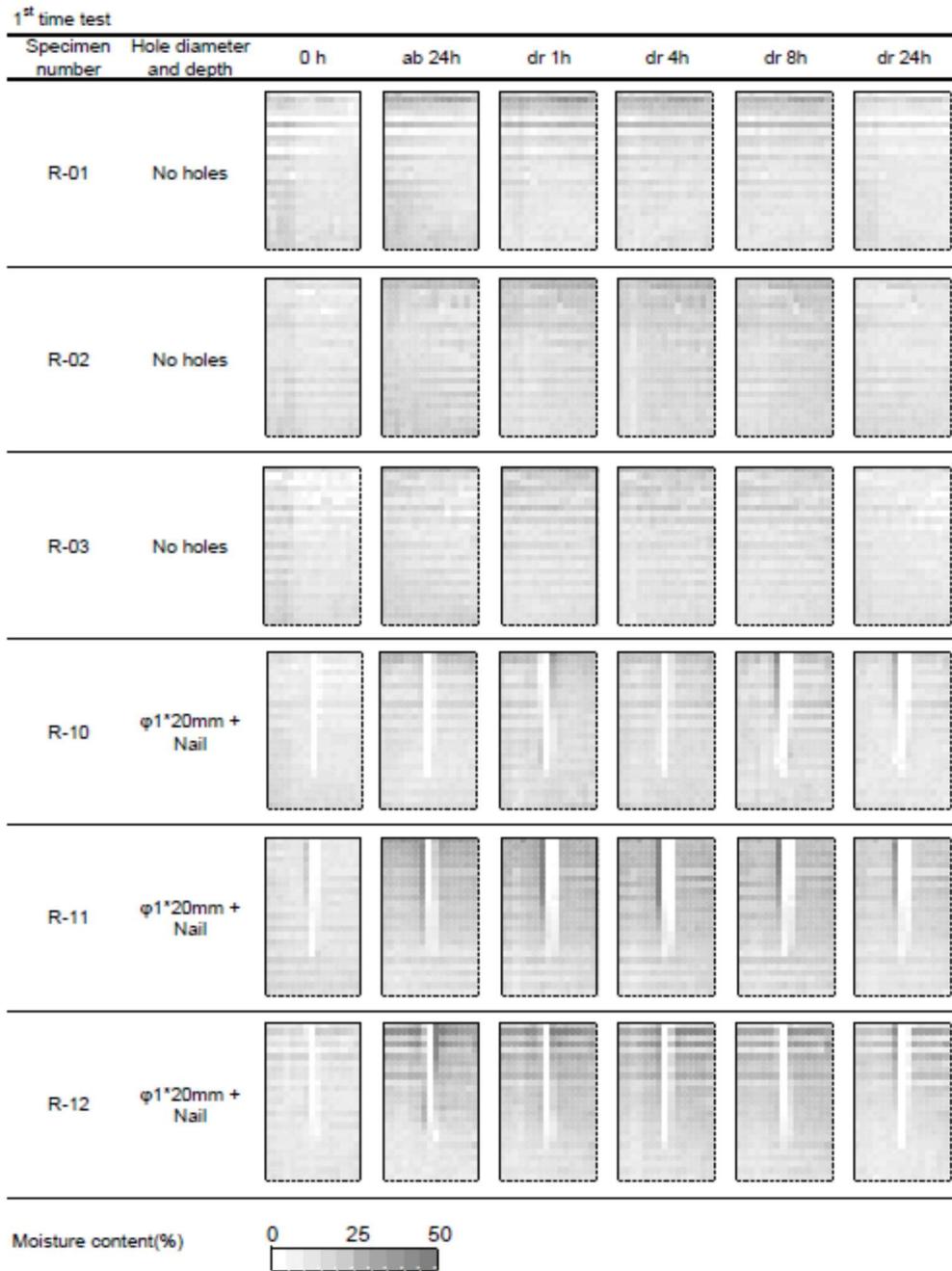


Fig. 6-16 Moisture content distribution of specimens with no holes or with holes and nails at the

1st time test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces, and the centers of images are held holes and nails, except no holes specimens. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.



Fig. 6-17 Moisture content distribution of specimens with no holes or with holes and nails at the

2nd time test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces, and the centers of images are held holes and nails, except no holes specimens. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

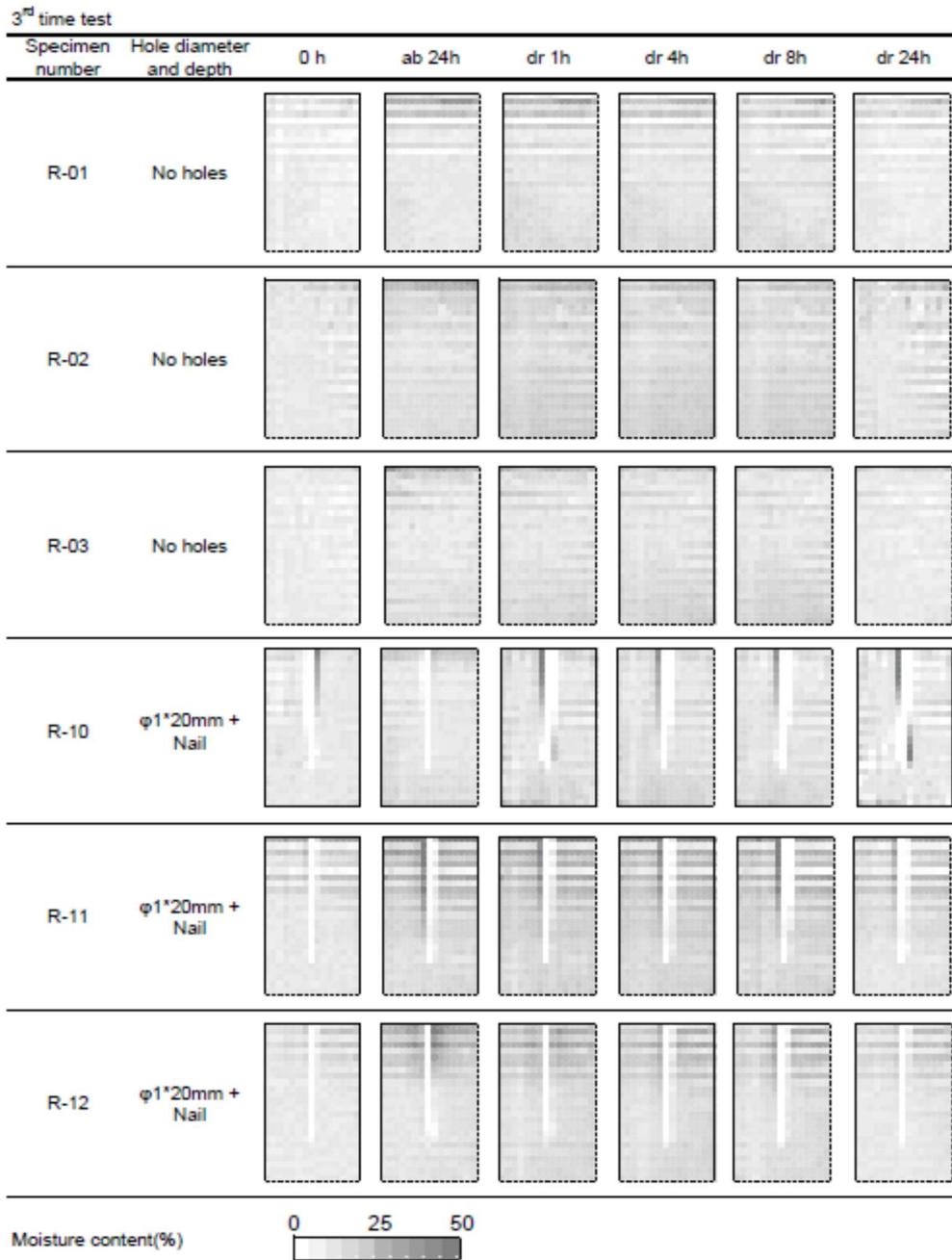


Fig. 6-18 Moisture content distribution of specimens with no holes or with holes and nails at the

3rd time test

Note: See Table 6-1 for specimens' details. The upper sides of the images are the water absorption faces, and the centers of images are held holes and nails, except no holes specimens. This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

6.3.2 穴深さの違いによる含水率変化の影響

穴の深さが吸水及び乾燥に与える影響を調べるため、直径 2 mm の穴加工を行った試験体の含水率分布を用いて各測定時間の比較を行った (Fig. 6-19、Fig. 6-20)。Fig. 6-14、Fig. 6-15 に示した含水率分布のうち中央の 2 mm 幅が穴加工位置であるとして、その両側 1 mm 幅の含水率を平均して深さ方向の含水率分布とした。その際穴深さ全域に亘って吸水しなかった R-13、R-16 は除外し、穴深さ 10 mm、20 mm のそれぞれ残りの 2 体で平均した。Fig. 6-19 は 2 回目の吸水・乾燥試験時で、吸水 0、24 時間後、乾燥 1、4、8、24 時間後を示す。Fig. 6-20 は 3 回目の吸水・乾燥試験時で、吸水 0、4、8、24 時間後、乾燥 1、4、8、24 時間後を示す。吸水・乾燥試験の 1 回目においては穴への吸水がほとんど見られなかったが、穴への吸水が起こった 2 回目以降の深さ方向の含水率分布に繰り返しの影響は見られない。Fig. 6-19、Fig. 6-20 共に同様の傾向を示した。吸水については 3 回目の Fig. 6-20 でのみ測定しているが、穴深さ 10 mm であっても 20 mm であっても穴深さ全域に亘って一律に含水率が上昇した。水分の供給があれば深さにかかわらず同様に含水率の上昇が起こることが分かる。繊維方向では 6.3.1(1)で述べた「浸せきぬれ」⁸⁵⁾が生じているためであると考えられる。また、Fig. 6-14、Fig. 6-15 に見られる穴加工からの繊維方向吸水 (図の横方向への吸水) の測定回による差は、Fig. 6-14 の試験体の方が含水率が低かったためにより広い範囲に吸水が起こったと考えている。乾燥している木材の方が吸水性が高くなる傾向にあるため⁵⁷⁾、材の含水率状態等によって左右されたと考えられる。乾燥過程については、第 5 章の割れモデル試験体においては表層 0 mm~5 mm の範囲が急速に乾き、その下の深さ 5 mm~10 mm の範囲が割れ深さの差異によって変化した。しかし本章の釘穴モデルにおいては Fig. 6-19、Fig. 6-20 に見られるように、穴深さ 10 mm、20 mm いずれについても同様の含水率推移をたどった。すなわち、表層に近い部分のみが急速に乾くわけではなく、深さ 10 mm も 20 mm も同様の乾燥速度であることを示す。Fig. 6-19、Fig. 6-20 における深さ方向の含水率分布を 5mm ごとに区切り、表層から 0 mm~5 mm (0 mm を含まず 5 mm を含む。以下同じ。)、5

mm～10 mm、10 mm～15 mm、15 mm～20 mm の領域の平均含水率の経時変化を Fig. 6-21 に示した。各領域の含水率の経時変化は時間の対数に比例し、すべての場所でほぼ同じ傾きとなった。直径 2 mm の穴に接する木材は、深さにかかわらずいずれの場所でも乾燥が進みにくいことが示唆された。

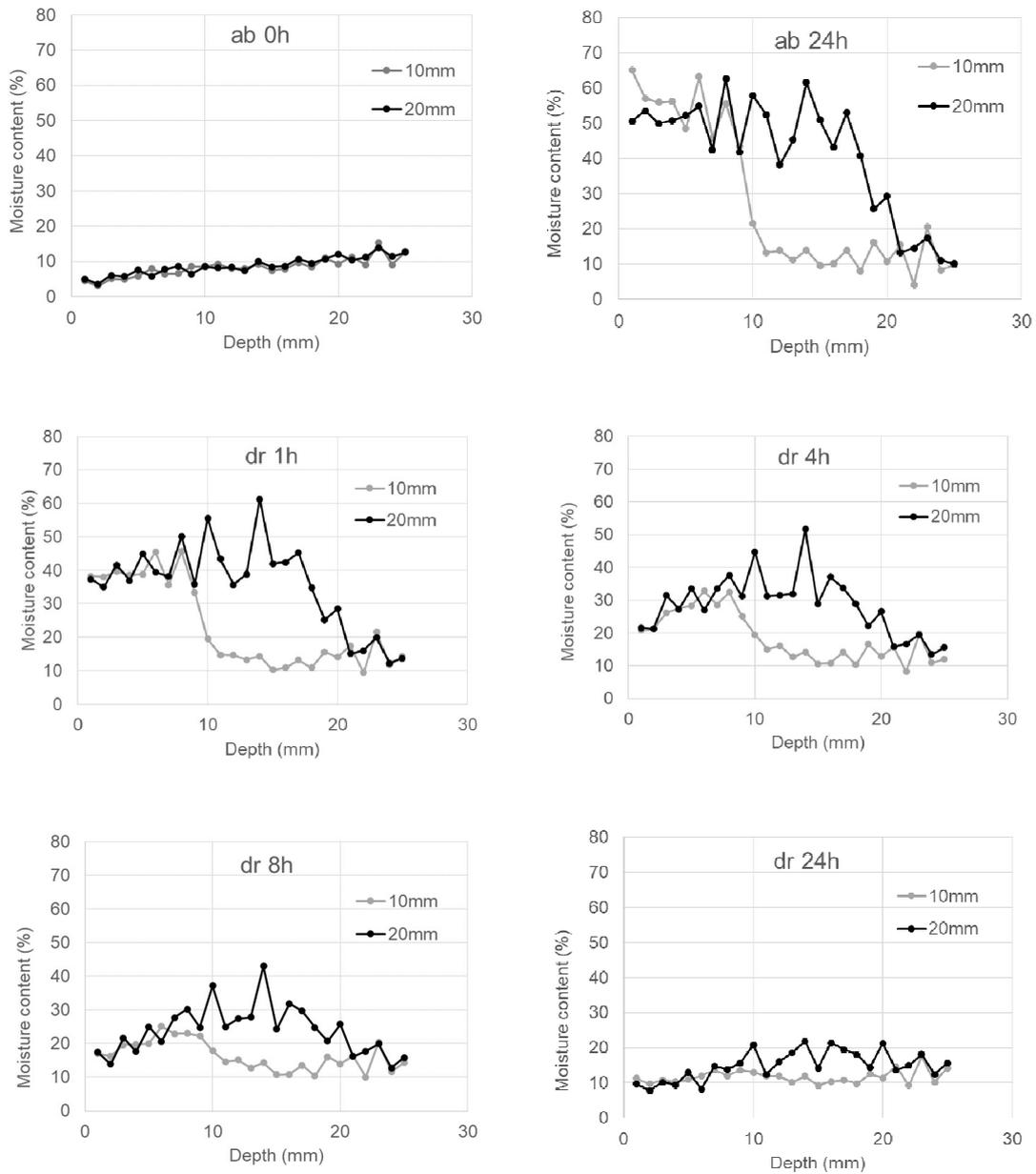


Fig. 6-19 Moisture content transition toward depth, within 2 mm of the hole at the 2nd time test
 Note: This figure shows absorption process (ab) at 0 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

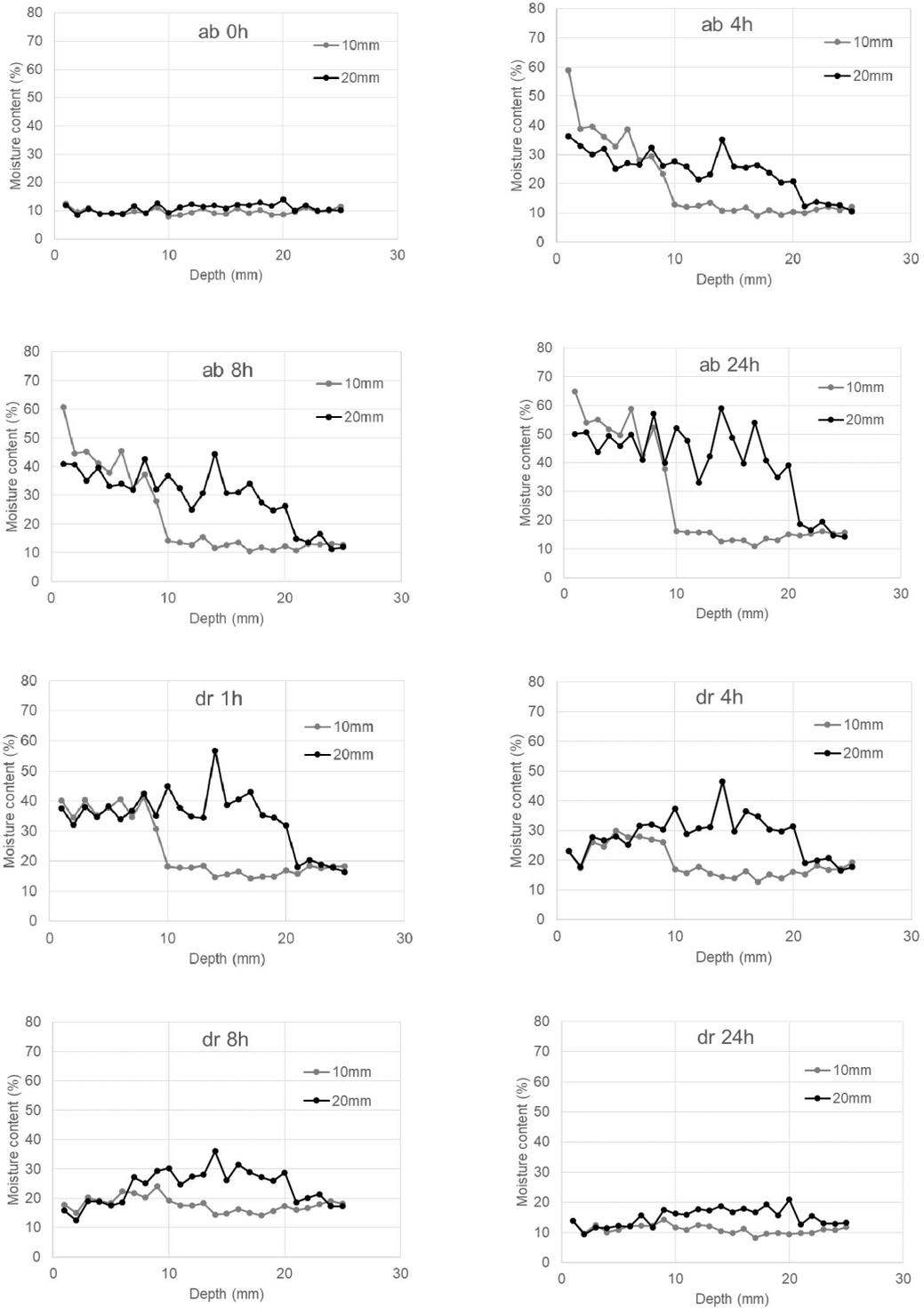


Fig. 6-20 Moisture content transition toward depth, within 2 mm of the hole at the 3rd time test
 Note: This figure shows absorption process (ab) at 0, 4, 8 and 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

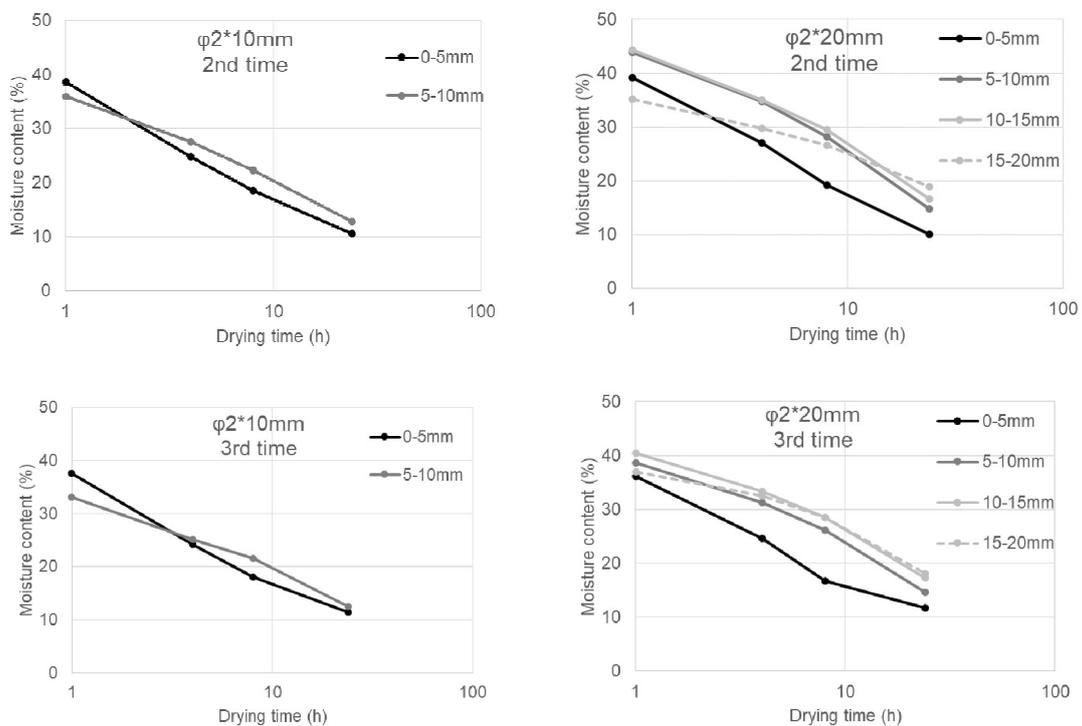


Fig. 6-21 Effect of hole depth on moisture content transition in drying process

Note: This figure shows drying process at 1, 4, 8, and 24 hours. Symbols denote the regions of following part; 0-5mm: $0 < \text{depth} \leq 5$ mm, 5-10mm: $5 < \text{depth} \leq 10$ mm, 10-15mm: $10 < \text{depth} \leq 15$ mm, 15-20mm: $15 < \text{depth} \leq 20$ mm, respectively. All regions are within 1 mm width of the hole.

6.3.3 繊維方向吸水が水分停滞に与える影響

Fig. 6-13～Fig. 6-15 に示したように、穴直径 2 mm の試験体については穴加工から繊維方向への吸水が多く見られた。そこで繊維方向にどの程度まで吸水が起こったのかを調べるため、穴深さ 10 mm または 20 mm の範囲において、幅方向に 1 mm ごとの平均含水率を求めた。穴深さ全てに亘って吸水が起こった R-14、R-15（穴深さ 10 mm）、R-17、R-18（穴深さ 20 mm）のそれぞれ 2 体の平均を Fig. 6-22 に示した。含水率は 2 回目の吸水・乾燥試験の値を用い、穴加工の両側の含水率は、それぞれ穴からの距離が同じものとして平均した。これより、穴深さ 10 mm 及び 20 mm において含水率に大きな差はなく、いずれも幅 5 mm 程度の範囲まで含水率が上昇し吸水が起こったことが示唆された。同様に、穴加工に接する

幅 1 mm の範囲の含水率分布を深さ方向に示す (Fig. 6-23)。6.3.2 でも述べたが、第 5 章の割れ加工モデルのように表面付近が急速に乾燥することはなく、徐々に乾燥が進むことが分かる。一方、通常の繊維方向吸水では Fig. 6-24 に示すように木口が空気に曝される場合、表層の 5 mm 程度は急速に乾燥が進む。Fig. 6-24 は 2 回目の吸水・乾燥試験のうち、繊維方向吸水である L-01~L-03 の 3 体を平均したものである。Fig. 6-24 の吸水 24 時間後の吸水面に接する 1 mm 角の含水率が約 150%であることから、穴加工モデルの穴加工に接する部分の含水率も同程度を示すと考えられる。穴加工のような細く長い損傷が木材表面にあった場合、その内部への吸水は繊維方向吸水によって広く起こり、また乾燥過程においては深さにかかわらず乾燥が遅いということが言える。よって、釘穴のような細く長い損傷の場合、表面割れよりも内部水分停滞の影響が大きい可能性が示唆された。

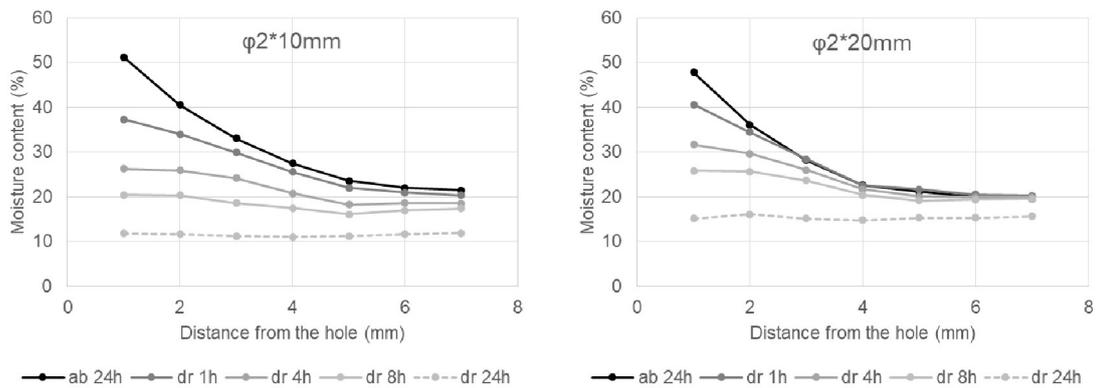


Fig. 6-22 Moisture content gradient along the hole in drying process

Note: Both figures show absorption process (ab) at 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

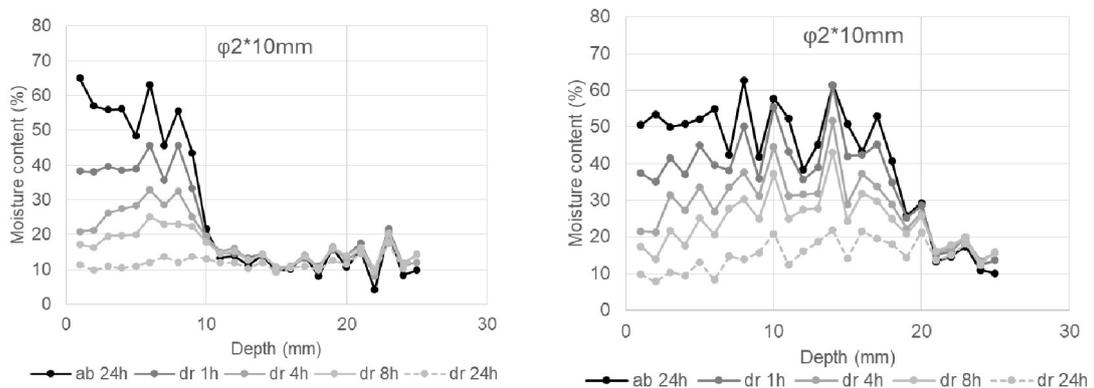


Fig. 6-23 Moisture content gradient toward depth within 1 mm of the hole in drying process

Note: Both figures show absorption process (ab) at 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

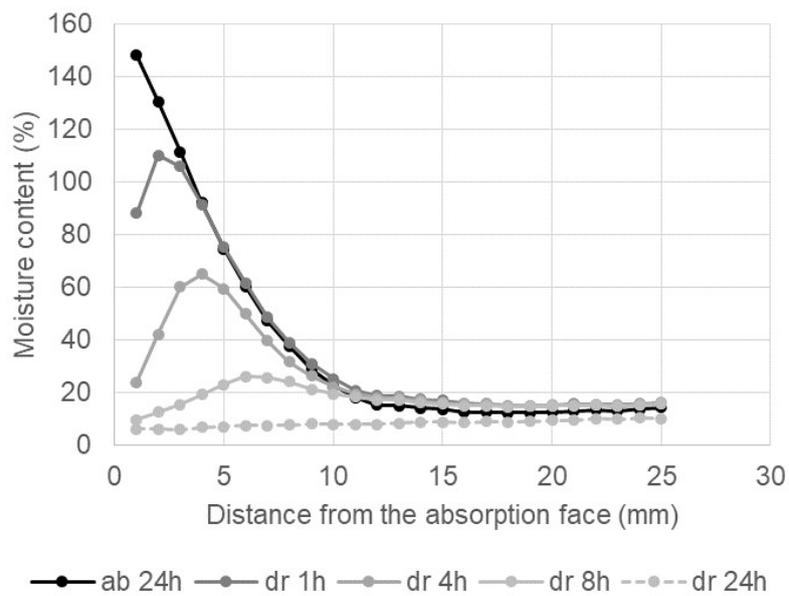


Fig. 6-24 Moisture content gradient of longitudinal direction in drying process

Note: This figure shows absorption process (ab) at 24 hours, and drying process (dr) at 1, 4, 8, and 24 hours.

6.4 まとめ

ウッドデッキに想定される表面損傷として、釘穴モデルについても X 線デンシトメトリ

一法によって水濡れ後の内部含水率を評価した。その結果、特に穴直径が2 mm の場合に穴加工から繊維方向への吸水が多く確認され、浸透長さは穴加工から5 mm 程度であった。乾燥過程においては穴深さ10 mm 及び20 mm のいずれにおいても同様に内部の乾燥が緩やかに進み、穴加工内部の含水率が長時間高含水率状態に保たれる可能性を示唆した。穴加工に釘打ちを行った場合については、釘に緩みがない状態では含水率の上昇はあまり見られなかった。

第7章 表面損傷による吸水方向の違いが水分停滞に及ぼす影響

7.1 はじめに

第5章での割れモデル、第6章での釘穴モデルによる吸水・乾燥試験によって、表面損傷の形状の違いにより吸水及び乾燥過程に違いがあることが明らかとなった。割れモデルでは多くが接線方向吸水であるため吸水範囲は幅1 mm以内と限定的に起こり、乾燥過程では深さが10 mm程度の割れでは内部がすぐに乾くのに対し、深さが20 mmと深い場合に割れの深部が乾きにくいことが分かった。一方釘穴加工モデルでは、穴直径2 mmの場合に穴加工から繊維方向への吸水が多く確認され、その浸透長さは約5 mmであった。乾燥過程においては穴深さが10 mm、20 mmのいずれにおいても同様に内部の乾燥が遅くなることが明らかとなった。これらの形状の違いについて、水分停滞に及ぼす影響を考察することを目的とする。

7.2 実験

7.2.1 試験体

割れ加工モデルは第5章で用いた試験体のうち、吸水が均等に起こったレッドウッド (*Sequoia sempervirens*) 心材の測定データを用いた。寸法は40 mm (R) × 40 mm (T) × 10 mm (L) で、板目面の繊維方向に亘って深さ5 mm、10 mm、20 mmの割れ加工を丸鋸で施した。釘穴加工モデルは第6章で用いたスギ (*Cryptomeria japonica*) 心材の測定データを用いた。寸法は30 mm (R) × 10 mm (T) × 20 mm (L) で、板目面の中央に直径2 mm、深さ10 mm及び20 mmの穴を小型ボール盤を用いて加工した。吸水面はいずれも板目面とし、吸水面以外の5面をシリコン樹脂(シリコンシーラント 8060 クリア色、セメダイン製)で防水シールした。

7.2.2 吸水・乾燥試験

割れ加工モデルは第 5 章の吸水・乾燥試験結果を、釘穴加工モデルは第 6 章の 2 回目及び 3 回目の吸水・乾燥試験結果を用いた。すなわち、吸水処理は 24 時間、乾燥処理も 24 時間とした。

7.2.3 内部含水率測定

7.2.3.1 使用したデータ

吸水・乾燥試験の任意の時間において、X 線デンシトメトリー法によって試験体の内部含水率を測定した。測定方法の詳細は、割れ加工モデルは第 5 章に、釘穴加工モデルは第 6 章に示したとおりである。いずれの試験体においても吸水・乾燥の影響が強く表れるのは割れ加工または釘穴加工に接する幅 1 mm 程度の範囲であるため、幅 1 mm に限定してデータ処理を行った。すなわち、割れ加工モデルにおいては割れ加工に接する片側 1 mm 幅の含水率を、釘穴加工モデルにおいては穴直径と接する両側 1 mm 幅の含水率の平均を求めた。また、割れ加工モデルでは 5 体一組として吸水・乾燥試験を行った内側 3 体の平均を、釘穴加工モデルでは穴深さ全てに亘って吸水の起こった 2 体の平均を用いた。

7.2.3.2 釘穴モデルの含水率補正

釘穴モデルについては、厚さ 10 mm の試験体が均等に含水率変化するわけではなく、主に中央に空けられた穴加工から繊維方向に吸水が起こる。しかし X 線の特性上、透過画像の濃淡には試験体内部の距離情報は反映されない。そのため X 線デンシトメトリー法によって求めた含水率はあくまでも厚さ 10 mm の試験体の厚さ方向の平均含水率のみである。本来であれば穴加工に接する部分の含水率が知りたい情報であるため、以下のように含水率を推定することを試みた。

Fig. 7-1 左図に示すように、厚さ 10 mm の試験体のうち穴加工が直径 2 mm、それ以外が 8 mm である。穴加工からの吸水はほとんどが繊維方向のみに起こるとして、それ以外の部

分の含水率はほとんど変化しないと仮定する。穴加工以外の部分の含水率を MC_A 、穴加工に接する部分の含水率を MC_B 、全体の含水率を MC_C と置くと、以下の関係式で表される。

$$MC_C (\%) = \frac{8 \times MC_A + 2 \times MC_B}{10} \quad \text{Eq. 7-1}$$

MC_B について解いて

$$MC_B (\%) = 5 \times MC_C - 4 \times MC_A \quad \text{Eq. 7-2}$$

ただし $MC_B \geq MC_A > 0$ とすれば $MC_C \geq MC_A$ である必要がある。

よって、 MC_C は X 線デンストメトリー法によって算出される含水率、 MC_A は試験体の含水率のうち吸水・乾燥による変化がほとんどない、穴加工の存在しない含水率測定範囲の下部 5 mm の含水率 (Fig. 7-1 右図) の平均として、補正後の含水率 MC_B を求めた。ただし $MC_C < MC_A$ となる場合は MC_C の値をそのまま含水率とした。含水率計算には穴加工に接する両側 1mm の含水率の平均を使用し、深さ方向については補正による誤差の影響を除くため 0 mm～5 mm (0 mm を含まず 5 mm を含む。以下同じ。)、5 mm～10 mm、10 mm～15 mm、15 mm～20 mm、20 mm～25 mm の 5mm 間隔で平均した。

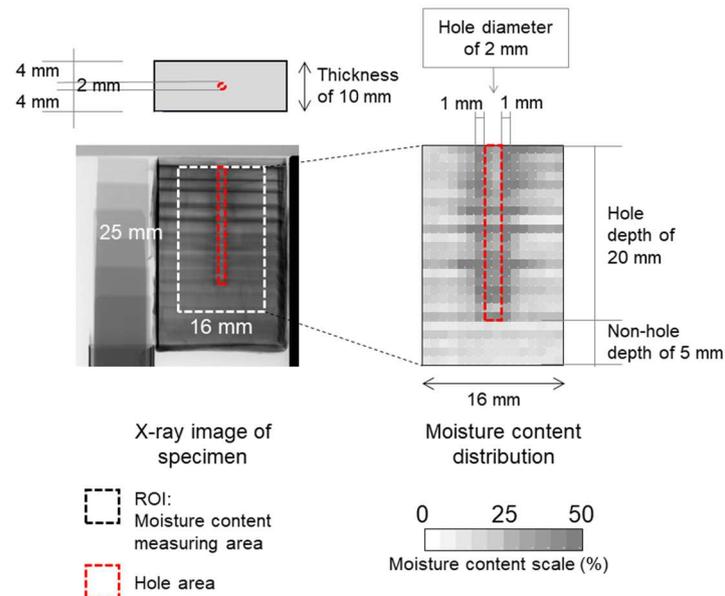


Fig. 7-1 Hole position in specimen and moisture content measuring area

7.3 結果と考察

7.3.1 深さ方向の含水率分布の特徴

割れモデルと釘穴モデルの二つの表面損傷形態について、その損傷内部の湿度状態をモデル化したものを Fig. 7-2 に示す。試験体表面は常に外気と接するため水分蒸発が盛んな層、表面損傷内部の表層に近い部分は比較的水蒸気が拡散しやすい層、表面損傷の深い部分は外気に遠く水蒸気が拡散しにくい層と考えられる。このような状態を仮定して考察を進める。

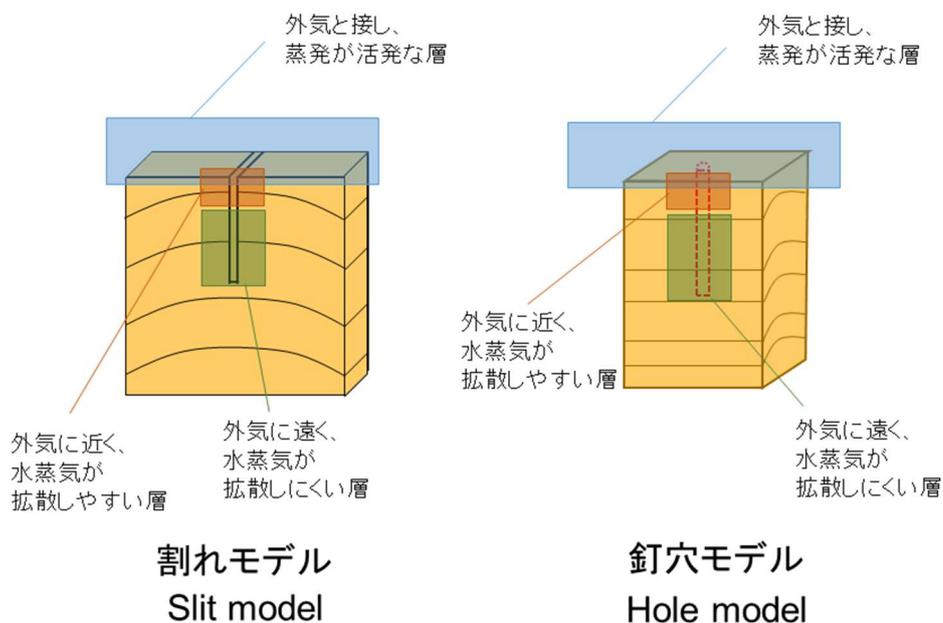


Fig. 7-2 Schematic diagram of evaporation of water from specimen with slit or hole

割れ加工モデルの吸水過程の含水率変化を Fig. 7-3 に、乾燥過程の含水率変化を Fig. 7-4 に示す。割れ加工の深さ（以下「割れ深さ」という。）は 5 mm、10 mm、20 mm の 3 種類で、割れ加工に接する 1 mm 幅の含水率を深さ方向 5 mm ごとに示した。表層から 0 mm～5 mm の部分はいずれの割れ深さの場合でも吸水 24 時間で含水率 80%に達した。表層より下の範

囲については若干表層の含水率よりも下がる傾向にあった。深い部分の方が表層に近い部分よりも吸水に時間がかかるためと考えられる。Fig. 7-4 の乾燥過程では、表層から 0 mm～5 mm の部分は速く乾燥するのに対し、それより下の部分は乾燥が遅くなっている。しかし割れ深さ 10 mm の試験体の表層から 5 mm～10 mm の部分は表層と同様に乾燥するのに対し、割れ深さ 20 mm の試験体の表層から 5 mm～10 mm の部分は、それより深い部分と同様に乾燥が遅くなり、乾燥 24 時間後に含水率 20%以上を示した。深さ方向に同じ位置であっても割れ深さの差によって乾燥過程に差が生じるのが割れモデルの特徴である。

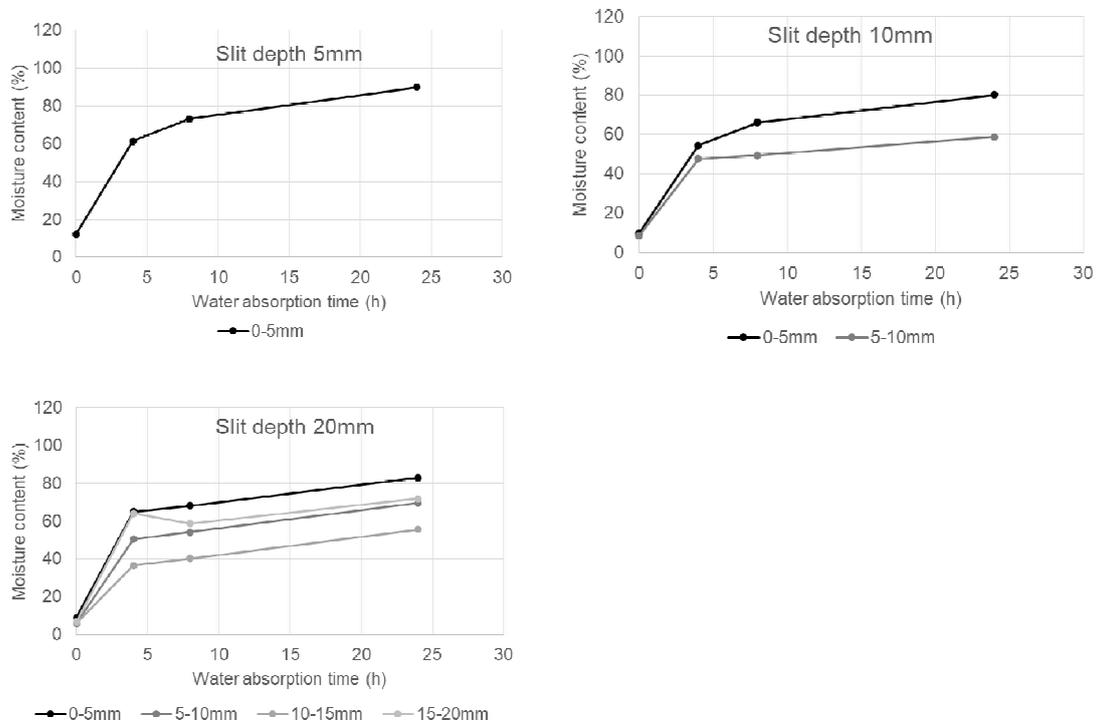


Fig. 7-3 Effect of slit depth on moisture content transition within 1 mm width of the slit in water absorption process

Note: These figures show water absorption process at 0, 4, 8, and 24 hours. Symbols denote the regions of following part; 0–5mm: $0 < \text{depth} \leq 5$ mm, 5–10mm: $5 < \text{depth} \leq 10$ mm, 10–15mm: $10 < \text{depth} \leq 15$ mm, 15–20mm: $15 < \text{depth} \leq 20$ mm, respectively. All regions are within 1 mm width of the slit.

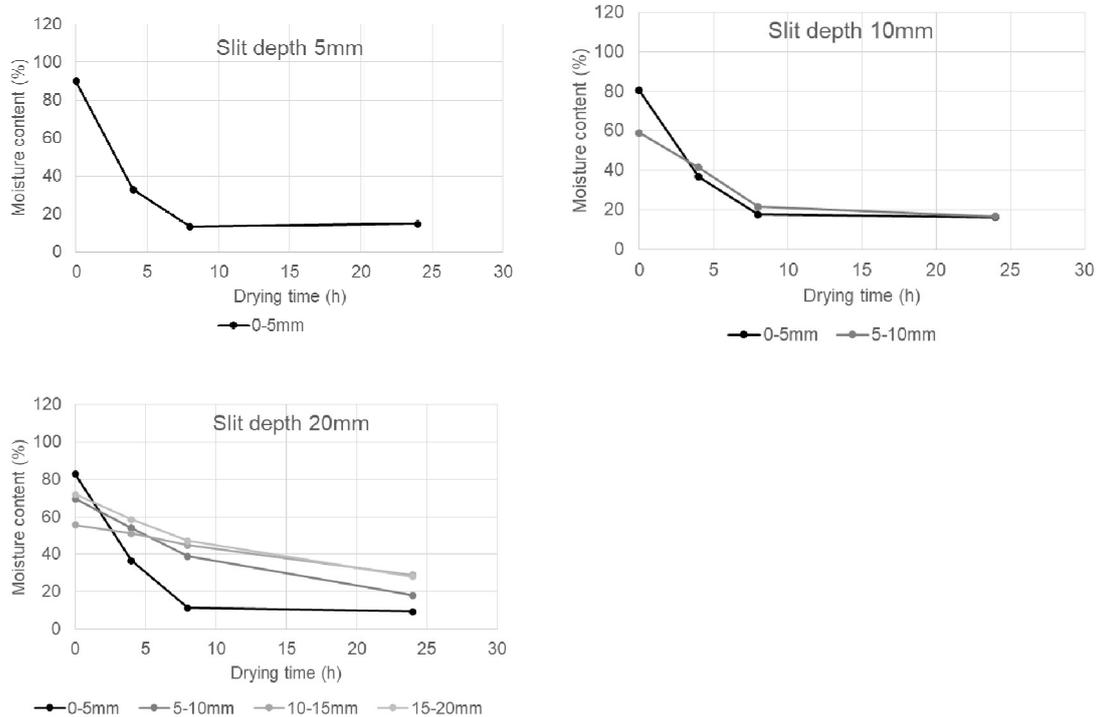


Fig. 7-4 Effect of slit depth on moisture content transition within 1 mm width of the slit in drying process

Note: These figures show drying process at 0, 4, 8, and 24 hours. Symbols denote the regions of following part; 0-5mm: $0 < \text{depth} \leq 5$ mm, 5-10mm: $5 < \text{depth} \leq 10$ mm, 10-15mm: $10 < \text{depth} \leq 15$ mm, 15-20mm: $15 < \text{depth} \leq 20$ mm, respectively. All regions are within 1 mm width of the slit.

釘穴モデルについては Fig. 7-5 に吸水過程を、Fig. 7-6 に乾燥過程を示す。両方の工程で測定を行った3回目の吸水・乾燥試験のデータである。穴加工はいずれも直径2mmで、穴深さが10mm及び20mmである。上段に第6章による含水率算出値、下段に7.2.3.2による補正後の含水率を示した。割れ加工モデルと同様に、穴加工に接する幅1mmの含水率を深さ方向に5mmずつに区切って示した。上段の破線で示した系列は穴加工が存在しない部分の含水率で、いずれも吸水による含水率上昇がほとんど見られない。下段の補正後の含水率については、表層から0mm~5mmの範囲は24時間の吸水で含水率が200%程度まで達した。Fig. 6-9の繊維方向吸水試験体の含水率が表層付近では140%程度になったことから、概ねこの程度の数字で間違いないと思われる。吸水過程において、穴深さ10mmの試験体の

表層 0 mm～5 mm の範囲の含水率が穴深さ 20 mm と比べても大きくなったが、Fig. 6-14、Fig. 6-15 の含水率分布に見られるように、繊維方向の吸水が大きくなったためと考えられる。それ以外の場所は深さ方向に行くにしたがって緩やかに含水率は下がり、表層から穴の奥まで含水率が上昇するのに時間差があるためと考えられる。

乾燥過程については、割れ加工モデルと比べれば緩やかに乾燥が進むが、表層 0 mm～5 mm の範囲はそのほかの部分と比べて明らかに乾燥が早い。表層は板目面で外気に接するため、穴加工面のみで外気と接するそのほかの部分よりも乾燥が早いのは当然と言えるだろう。表層から 5 mm～10 mm の範囲については、第 6 章の考察では穴深さに依らずほぼ同じ程度に乾燥しづらいと述べたが、Fig. 7-6 の補正後の含水率で比べると、穴深さによる差異が割れモデルと同様に見られることが分かった。穴深さ 20 mm の試験体の表層 5 mm～10 mm の範囲は、穴深さ 10 mm の試験体の同位置よりも乾燥が遅く、どちらかと言えばそれよりも深い表層から 10 mm 以下の範囲の含水率推移と同様の経過をたどった。穴深さ 20 mm の試験体の表層から 10 mm 以下の範囲の含水率は、乾燥 24 時間後において補正後の含水率で 30%以上を示した。また、乾燥経過が他の測定回においても同様に生じるかを確認するため、2 回目の吸水・乾燥試験における乾燥過程の含水率推移を Fig. 7-7 に示す。この測定においては、穴深さ 20 mm の試験体の表層から 15 mm～20 mm の範囲が他の部分に比べて著しく乾燥が遅くなったが、傾向としては概ね同様のものが得られた。木材表面に釘穴のような細く長い損傷がある場合、表面割れよりも水分停滞に与える影響は大きいと考えられる。

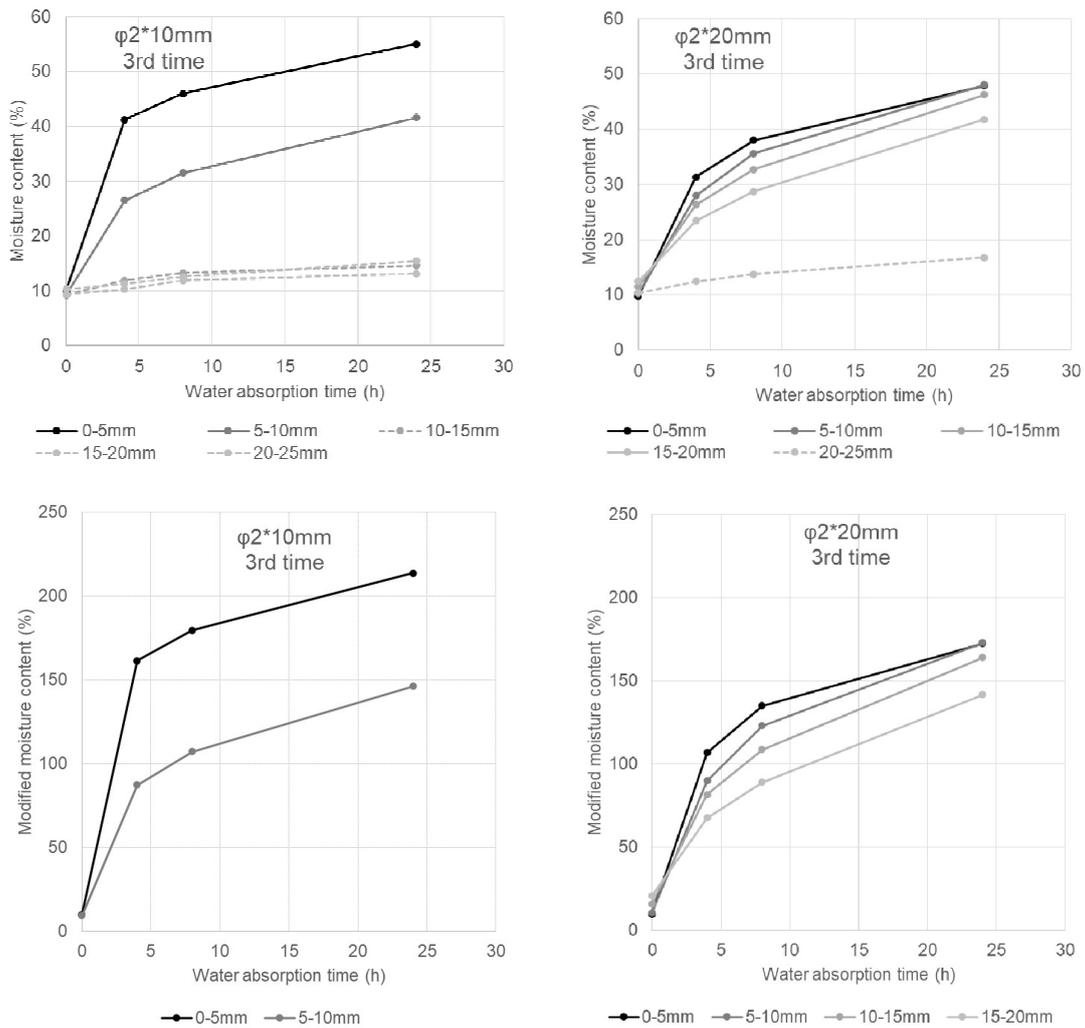


Fig. 7-5 Effect of hole depth on moisture content transition within 1 mm width of the hole in water absorption process

Note: These figures show water absorption process at 0, 4, 8, and 24 hours. Symbols denote the regions of following part; 0–5mm: $0 < \text{depth} \leq 5$ mm, 5–10mm: $5 < \text{depth} \leq 10$ mm, 10–15mm: $10 < \text{depth} \leq 15$ mm, 15–20mm: $15 < \text{depth} \leq 20$ mm, respectively. All regions are within 1 mm width of the hole.

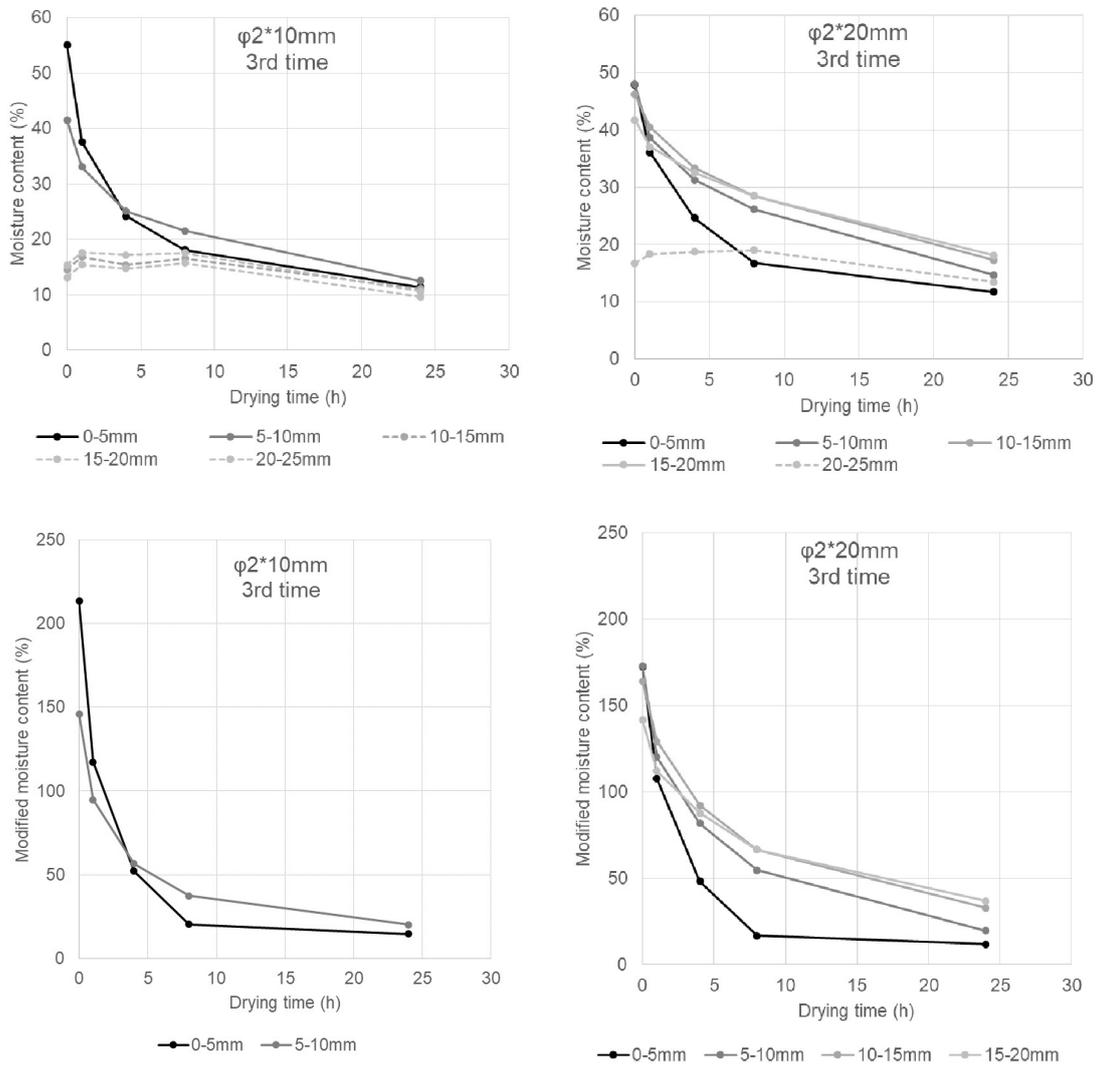


Fig. 7-6 Effect of hole depth on moisture content transition within 1 mm width of the hole in drying process

Note: These figures show drying process at 0, 4, 8, and 24 hours. Symbols denote the regions of following part; 0–5mm: $0 < \text{depth} \leq 5$ mm, 5–10mm: $5 < \text{depth} \leq 10$ mm, 10–15mm: $10 < \text{depth} \leq 15$ mm, 15–20mm: $15 < \text{depth} \leq 20$ mm, respectively. All regions are within 1 mm width of the hole.

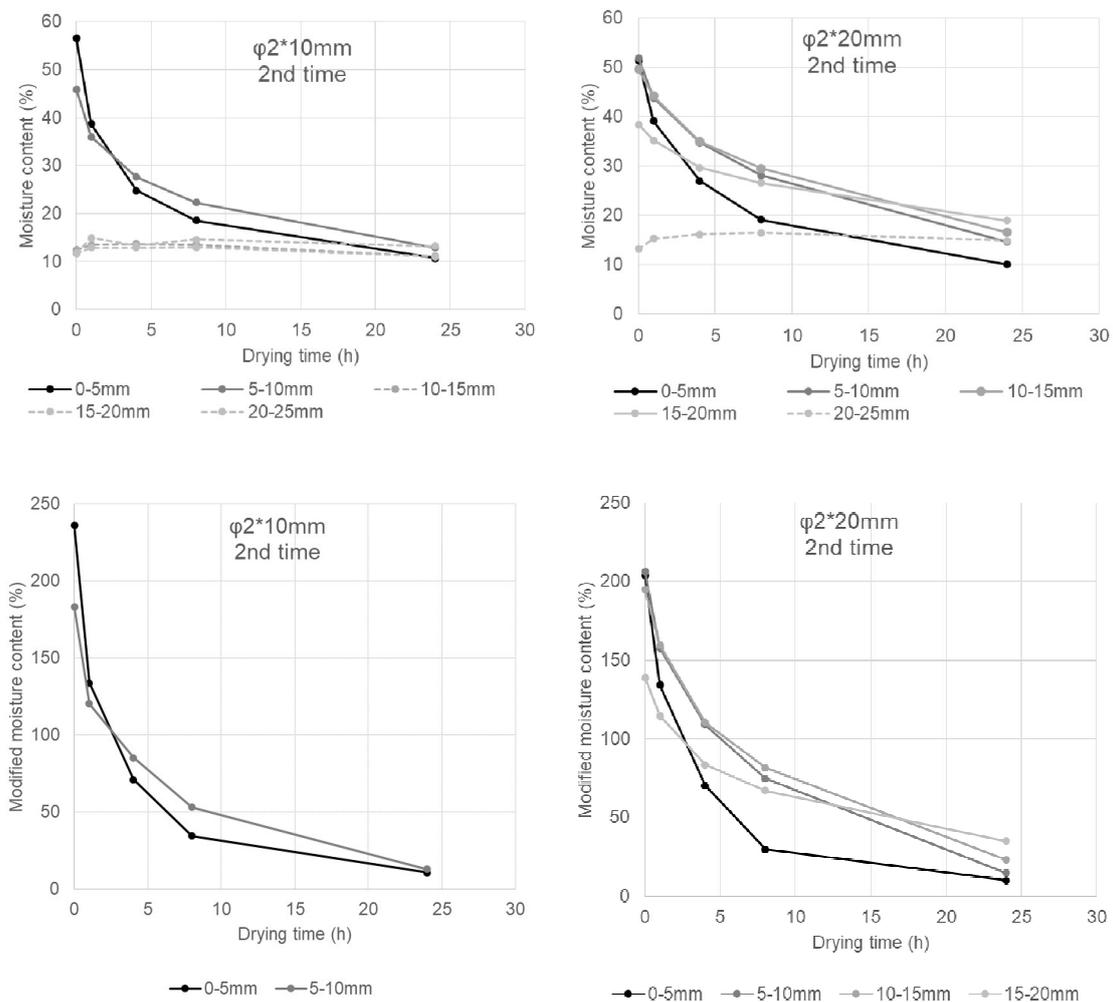


Fig. 7-7 Effect of hole depth on moisture content transition within 1 mm width of the hole in drying process (at 2nd time test)

Note: These figures show drying process at 0, 4, 8, and 24 hours. Symbols denote the regions of following part; 0-5mm: $0 < \text{depth} \leq 5$ mm, 5-10mm: $5 < \text{depth} \leq 10$ mm, 10-15mm: $10 < \text{depth} \leq 15$ mm, 15-20mm: $15 < \text{depth} \leq 20$ mm, respectively. All regions are within 1 mm width of the hole.

7.3.2 表面損傷内部の含水率変化

表面損傷内部の含水率の変化は、表面損傷の幅が数ミリメートルと非常に狭いことから、その水分蒸発の駆動力は損傷内部の湿度の影響を受けると考えられる。Fig. 7-2 に示したように、木材表面は常に外気に接するため空気の流れを受け迅速に乾燥が進む。次に表層から少し入った部分、Fig. 7-4、Fig. 7-6、Fig. 7-7 で言えば表層から 0 mm~5 mm の範囲は外気に

近く、水蒸気が拡散しやすい層と言えるだろう。表層から遠い部分、Fig. 7-4、Fig. 7-6、Fig. 7-7 で言えば表層から 5 mm 以下の部分は外気に遠く水蒸気拡散が起こりにくい層と考えられる。そのため表層から 5 mm～10 mm の範囲は下部の含水率状況（表面損傷内部の湿度状況）により乾燥過程が左右されるのではないか。本研究において、表面損傷の深さが 10 mm よりも深い場合に 10 mm～20 mm の範囲の含水率が長時間高く保たれる水分停滞が確認されたが、表層から 5 mm～10 mm の範囲の含水率は表面損傷の深さが 10 mm の場合と 20 mm の場合で異なった。これは 5 mm～10 mm の範囲の乾燥条件が下部の含水率の影響を受けているためと考えられる。木部が繊維飽和点以上となる高含水率状態は表面損傷内部を高湿度環境とし、空気の対流のほとんど起こらない表面損傷内部は高湿度環境が続くことによりさらに乾燥が阻害されると考えられる。

表面損傷の形状による差異については、釘穴モデルのような繊維方向が露出する損傷の場合は吸水に与える影響が大きく、さらに乾燥においても繊維方向に連なる表面割れよりも局所的な釘穴の方が乾燥時間が遅く水分停滞が生じやすいことが確認された。この理由も、釘穴モデルでは空気の対流が阻害されるためと考えられる。以上の結果を踏まえて損傷内部の乾燥状況の概念図を Fig. 7-8 に示す。ただし、これらの結果は幅 1 mm 程度で深さ 10 mm～20 mm の損傷によるものであるため、損傷の寸法が異なる場合、周辺環境が異なる場合（温湿度、通風等）には生じる水分停滞状況は異なってくると考えられる。

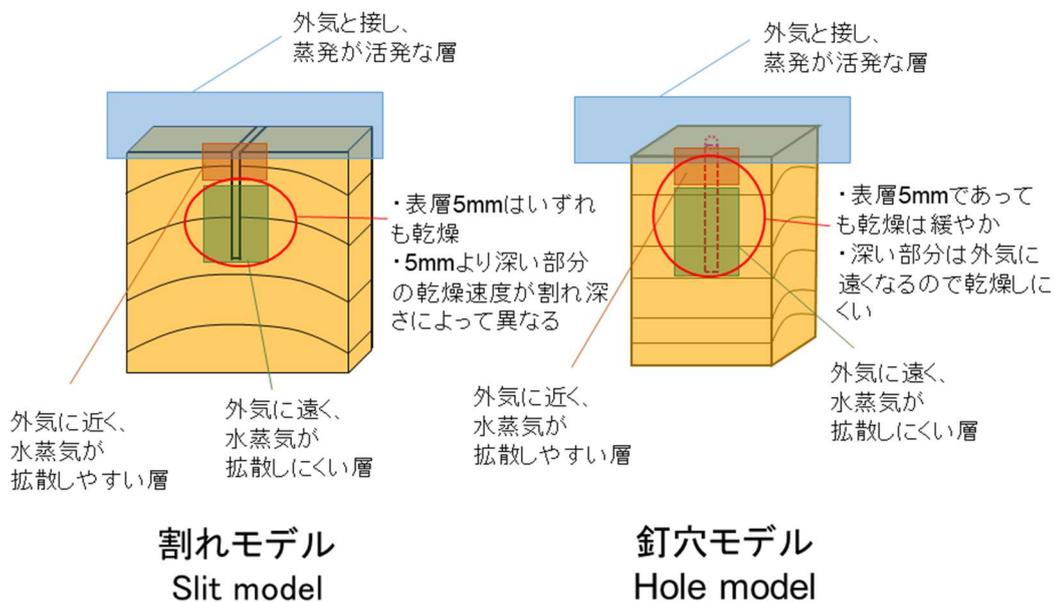


Fig. 7-8 Characteristics of ambient air along the slit or hole in specimens

7.3.3 デッキ材に対する耐久性上の配慮

本章で得られた結果を踏まえ、異なる二つの表面損傷形状がもたらす内部含水率上昇及びその後の内部水分停滞について、ウッドデッキ設計時に想定される耐久性上の配慮をTable 7-1 にまとめた。釘穴モデルについては実使用では穴のみが生じている場合や緩みのある状態というのは少ないと考えられるが、繊維方向吸水が起こった上で木口が外気に接しにくい状態というのは木口の突き付け面などにも想定される。割れモデルについては干割れは通常生じる現象であり、深さが深い場合に注意を要するというは重要な知見と思われる。本研究におけるモデル試験はすべて未使用の挽き板材を用いたが、実使用においては木材表面の光劣化、風化により濡れ性が高まることが報告されている^{87,88)}。よって、実使用においては今回のモデル試験よりも吸水性や水分停滞状態が促進される可能性がある。また、割れ幅についても様々な見解があり、幅1mmにも満たない狭い割れは降雨によって

木材が膨潤して閉じるとの報告⁸⁹⁾もあり、本研究においては幅 1mm 以上の大きな割れを扱ったが、どの程度の割れ幅、割れ深さが降雨後の水分停滞に影響するのかについても明確にしていく必要があるだろう。

Table 7-1 Application of these results to durable design of wood decks

損傷モデル	割れ加工（表面割れ）	釘穴加工（釘穴等の円形損傷）
損傷からの吸水方向	接線方向	繊維方向（及び接線方向）
浸透長（吸水 24h）	接線方向に 1 mm 以内	繊維方向に 5 mm
損傷近傍の含水率	約 60%	約 200%
損傷深さの影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ 深さ 10 mm と 20 mm で乾燥速度が大きく異なる ・ 深さ 10 mm は乾燥速い 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 深さ 10 mm と 20 mm でいずれも乾燥は遅い ・ 深くなるほど深部は乾燥しにくい
本研究で得られた知見からの設計上の留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 深さが 20 mm 以上は水分停滞の危険性大 ・ 深さが 10 mm 以下であれば水分停滞の影響小 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 深さに依らず水分停滞の危険性あり ・ 深さが深くなるほど水分停滞の影響大きい
想定される耐久設計	<ul style="list-style-type: none"> ・ 深い割れを防止（十分な乾燥、寸法安定化等） ・ 施工後の防腐処理等 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 釘穴等に水が侵入しないよう配慮 ・ 接合具の緩み防止 ・ 施工後の防腐処理等

7.4 まとめ

第 5 章での割れモデル、第 6 章での釘穴モデルを通して、表面損傷の形状の違いや損傷部分の吸水方向の違いが内部水分停滞に与える影響を考察した。その結果、いずれの表面損傷においても深さが 20 mm と深い場合に深部の含水率が 30%以上と高く保たれる水分停滞が生じ、表層からの深さが 5 mm~10 mm の範囲においては損傷深さの差異により乾燥傾向が異なることが明らかとなった。さらに、二種類の異なる表面損傷モデルにおける水濡れ後の水分停滞状況を鑑み、ウッドデッキ設計時における耐久性上の配慮をまとめた。

第8章 結論

本研究では、ウッドデッキの耐久性向上のために、木材表面の損傷が水濡れ時の内部含水率に与える影響を明らかにし、ウッドデッキを始めとするエクステリアウッドの耐久設計に資することを目的とした。本研究により以下の知見が得られた。

第2章では、設置後10年経過したウッドデッキの劣化観察及び表面割れの深さ測定等を行い、最大深さ2 cmの割れを持つスギ、ヒノキのデッキ表面はやや腐朽が進んでいたのに対し、最大深さ1 cmの割れに留まったレッドウッドのデッキには腐朽が見られなかったことを明らかにした。この着眼点より、割れ深さの差が腐朽条件としての高含水率状態に与える影響を想定し、以降のモデル試験に繋げた。

第3章では、分割法を用いてモデル的に割れ加工を施した試験体の水濡れ時の内部含水率変化を調べた。その結果、割れ深さ0~1 cmでは乾燥24時間で元の含水率に戻るのに対し、割れ深さ2 cmでは割れの最深部の含水率が24時間後も30%以上に保たれることを明らかにした。

第4章では、分割法による含水率測定は破壊法であること、1 cm角程度の大まかな含水率情報しか得られないという欠点を改善するため、X線デンシトメトリー法による非破壊含水率測定手法を試みた。その結果、内部の含水率分布を1 mm角の範囲でプロットし、視覚的に分かりやすく表現することに成功した。また、吸水・乾燥試験における試験体への吸水条件等についても検討し、以降の試験のための知見を蓄積した。

第5章では、割れ加工モデルの水濡れ後の内部含水率変化についてX線デンシトメトリー法を用いて詳細に調べた。その結果、吸水24時間における割れ加工からの接線方向吸水は幅1 mm程度と非常に狭い範囲に起こることを明らかにした。また、第3章での割れモデル試験体と同様に、割れ深さ20 mmの試験体のみが割れ深部の含水率を乾燥8時間後まで

含水率 20%以上に保つことを明らかにした。

第 6 章では、ウッドデッキに想定される表面損傷として、釘穴モデルについても X 線デ
ンシトメトリー法によって評価した。その結果、特に穴直径が 2 mm の場合に穴加工から繊維
方向への吸水が多く確認され、浸透長さは穴加工から 5 mm 程度であることが明らかとな
った。乾燥過程においては穴深さ 10 mm 及び 20 mm のいずれにおいても同様に内部の乾燥
が緩やかに進み、穴加工内部の含水率が長時間高含水率状態に保たれる可能性を示唆した。
穴加工に釘打ちを行った場合については、釘に緩みがない状態では含水率の上昇はあまり
見られないことが分かった。

第 7 章では、第 5 章での割れモデル、第 6 章での釘穴モデルを通して、表面損傷の形状の
違いや損傷部分の吸水方向の違いが内部水分停滞に与える影響を考察した。その結果、い
ずれの表面損傷においても深さが 20 mm と深い場合に深部の含水率が 30%以上と高く保た
れる水分停滞が生じ、表層からの深さが 5 mm~10 mm の範囲においては損傷深さの差異によ
り乾燥傾向が異なることが明らかとなった。

以上の知見より、ウッドデッキの表面損傷が水濡れ時の内部水分停滞に及ぼす影響につ
いて考察した結果、以下の結論を得た。

- ・表面損傷からの吸水は、接線方向へは 24 時間の吸水で幅 1 mm 程度の範囲と限定的であ
る一方、表面損傷から繊維方向への吸水は 24 時間の吸水で 5 mm 程度浸透する。
- ・表面損傷が 20 mm 程度と深い場合に深部の含水率が高く保たれる水分停滞が生じる可能
性があり、耐久設計において注意が必要である。
- ・表面損傷の深さが表層から 5 mm 程度まではすぐに乾燥が進むが、それ以下の範囲におい
ては乾燥が緩やかとなり、表面損傷の深さの差異によって乾燥の程度が左右される。特に損
傷深さが 20 mm と深い場合に表層から 5 mm~10 mm の範囲の乾燥も影響を受ける。

引用文献

- 1) 信田 聡: エクステリアウッドの現状と課題(1): 人に優しい利用と欧米の状況: 人に優しい利用と欧米の状況, 木材保存, 20 (4), 180-188 (1994)
- 2) 信田 聡: エクステリアウッドの現状と課題(2)完 : 日本における利用と課題, 木材保存, 21 (1), 2-9 (1995)
- 3) 信田 聡: エクステリアウッド, 木材工業, 60 (7), 344-346 (2005)
- 4) 信田 聡 , 渋沢 龍也 , 福嶋 豊: エクステリアウッドの利用と評価-2-デッキ材料の接触温冷感, 木材学会誌, 37 (12), 1123-1128 (1991)
- 5) 信田 聡: エクステリアウッドの利用と評価(第8報)-サークルベンチの四季別利用観察による好まれる座板の評価-, 木材工業, 52 (2), 67-72 (1997)
- 6) モリス ポール・アイ , 木口 実 [訳]: カナダにおける木材保存-1999-, 木材保存, 25 (4), 153-163 (1999)
- 7) 金井 徹: エクステリア市場の現状と木製エクステリア, 木材保存, 35 (3), 96-101 (2009)
- 8) Wooden Decking Market by Type (Pressure-Treated Wood, Cedar Wood, Redwood), Application (Building Material, Rails & Infrastructure), Type of Construction (Repairs & Remodeling, New Decks on New Constructions), End-Use, and Region - Global Forecast to 2021: , marketsandmarkets.com (2018.7.1 閲覧)
- 9) Meyer, Linda; Brischke, Christian; Preston, Alan: Testing the durability of timber above ground: A review on methodology, Wood Material Science & Engineering, 11 (5), 283-304 (2016)
- 10) Kutnik, Magdalena; Suttie, Ed; Brischke, Christian: European standards on durability and performance of wood and wood-based products – Trends and challenges, Wood Material Science and Engineering, 9 (3), 122-133 (2014)
- 11) 酒井 温子: 素材および処理木材の野外耐朽性評価, 材料, 58 (4), 271-279 (2009)
- 12) 酒井 温子: 野外における木材耐久性試験, 木材保存, 44 (3), 160-161 (2018)
- 13) 土居 修一: 「ISO21887 木材及び木質製品の耐久性-使用環境区分」について, 木材保存, 34 (5), 231-233 (2008)
- 14) 高橋 旨象: きのこと木材, 築地書館株式会社, pp. 63-65 (1989)
- 15) Wilcox, WW: Review of Literature on The Effects of Early Stages of Decay on Wood Strength, Wood and Fiber, 9 (4), 252-257 (1978)
- 16) Winandy, JE; Morrell, JI: Relationship Between Incipient Decay, Strength, and Chemical-composition of Douglas-Fir Heartwood, Wood and Fiber Science, 25 (3), 278-288 (1993)
- 17) Maeda, K; Ohta, M; Momohara, I: Relationship between the mass profile and the strength property profile of decayed wood, Wood Science and Technology, 49 (2), 331-344 (2015)

- 18) 鈴木 憲太郎 , 軽部 正彦 , 宮武 敦 , 加藤 英雄: ボンゴシ材を使った公園用木橋の落下について, 木材工業, 55 (2), 78-81 (2000)
- 19) 栗崎 宏 , 中谷 浩: 15年経過した木製歩道橋の劣化調査事例, 富山県農林水産総合技術センター木材研究所研究報告, (1), 29-37 (2009)
- 20) 矢田 茂樹: 公園に設置された木製遊具およびベンチの劣化, 木材工業 , 43 (6), 268-272 (1988)
- 21) 木橋技術協会: 木橋の点検マニュアル 第2版, 木橋技術協会, pp. 1-24 (2009)
- 22) 鈴木 憲太郎: 木造住宅の耐久設計と維持管理・劣化診断, 財団法人日本住宅・木材技術センター, pp. 144-147 (2002)
- 23) Knet A. McDonald, et.al.: Wood Decks; Materials, Construction, and Finishing, Forest Products Society, pp. 43-60 (1996)
- 24) Knet A. McDonald, et.al.: Wood Decks; Materials, Construction, and Finishing, Forest Products Society, pp. 77-81 (1996)
- 25) Stirling R; Morris P I: Factors Affecting Performance of Preserved Wood Decking Against Decay Fungi, IRG/WP 46th IRG Annual Meeting, Viña del Mar, Chile, 15-30663, (2015)
- 26) 山本 幸一: 木造校舎の木製窓枠の腐朽要因, 木材保存, 11 (2), 97-102 (1985)
- 27) 矢田 茂樹: 最近の外構施設と劣化防止対策, 木材保存, 17 (4), 150-158 (1991)
- 28) De Groot, Rodney C.: Test Assemblies for Monitoring Decay in Wood Exposed above Ground, International Biodeterioration & Biodegradation, 29, 151-175 (1992)
- 29) 津島 俊治 , 栗崎 宏 , 長谷川 益夫: 大分県における土木用木製構造物の劣化原因と耐用年数, 木材保存, 31 (5), 199-206 (2005)
- 30) Brischke, Christian; Meyer-Veltrup, Linda: Moisture content and decay of differently sized wooden components during 5 years of outdoor exposure, European Journal of Wood and Wood Products, 73 (6), 719-728 (2015)
- 31) 雨宮 昭二: 木材の屋外利用の歴史と今後の方策, 木材工業, 46 (11), 503-508 (1991)
- 32) Dahlen, Joseph; Schultz, Tor P.; Prewitt, Lynn; Nicholas, Darrel D.: Effect of chemical and physical properties on the decay susceptibility of southern pine sapwood decking in two aboveground exposures, Forest Products Journal, 59 (9), 74-78 (2009)
- 33) 矢田 茂樹, 田本 真志, 田村 健: パラフィンによる木材の防水処理, 木材保存, 21 (3), 113-118 (1995)
- 34) Schultz, Tor P., Nicholas, Darrel D.; Ingram Jr., Leonard, L.: Laboratory and outdoor water repellency and dimensional stability of southern pine sapwood treated with a waterborne water repellent made from resin acids, Holzforschung, 61 (3), 317-322 (2007)

- 35) Brischke, Christiane; Melcher, Eckhard: Performance of wax-impregnated timber out of ground contact: results from long-term field testing, *Wood Science and Technology*, 49 (1), 189–204 (2015)
- 36) Sandberg, Dick; Söderström, Ove: Crack formation due to weathering of radial and tangential sections of pine and spruce, *Wood Material Science and Engineering*, 1 (1), 12-20 (2006)
- 37) 渡辺 憲 , 信田 聡: ウッドデッキ材の木口面年輪傾角が材面割れ発生に及ぼす影響, *木材工業*, 62 (9), 410-413 (2007)
- 38) Sandberg, Karin: Degradation of Norway spruce (*Picea abies*) heartwood and sapwood during 5.5 years' aboveground exposure, *Wood Material Science and Engineering*, 3 (3-4), 83-93 (2008)
- 39) Evans, Philip D.; Cullis, Ian; Morris, Paul I.: Checking of Profiled Southern Pine and Pacific Silver Fir Deck Boards, *Forest Products Journal*, 60 (6), 501-507 (2010)
- 40) Bornemann, Thomas; Brischke, Christian; Alfredsen, Gry: Decay of wooden commodities – Moisture risk analysis, service life prediction and performance assessment in the field, *Wood Material Science and Engineering*, 9 (3), 144-155 (2014)
- 41) 高橋 旨象: きのこと木材, 築地書館株式会社, pp. 88-89 (1989)
- 42) 水本 晋: Relation of Moisture Content of Wood and Relative Humidity in an Atmosphere to the Decay of Japanese Red Pine Wood, Due to the Attack of Four Species of *Gloeophyllum*, *日本林學會誌*, 46 (1), 9-13 (1964)
- 43) 土居 修一 , 齊藤 光雄: ナミダタケ生育条件の検討, *木材学会誌*, 28 (11), 733-739 (1982)
- 44) Suzuki, K: Moisture content levels and decay of hemlock, IRG/WP 17th IRG Annual Meeting, Avignon, France, 1287, (1986)
- 45) Viitanen, H.A.: Modelling the Time Factor in the Development of Brown Rot Decay in Pine and Spruce Sapwood - The Effect of Critical Humidity and Temperature Conditions, *Holzforschung*, 51 (2), 99-106 (1997)
- 46) Råberg, Ulrika; Edlund, Marie-Louise; Terziev, Nasko; Land, Carl Johan: Testing and evaluation of natural durability of wood in above ground conditions in European overview, *Journal of Wood Science*, 51 (5), 429–440 (2005)
- 47) Meyer, Linda; Brischke, Christian: Fungal decay at different moisture levels of selected European-grown wood species, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103, 23-29 (2015)
- 48) 有馬 孝礼, 丸山則義, 早村俊二, 佐藤雅俊: 鉄筋コンクリート造集合住宅の木造床組の劣化および室内湿度の実態調査, *木材工業*, 38 (7), 331-335 (1983)

- 49) Rapp, AO; Peek, RD; Sailer, M: Modelling the moisture induced risk of decay for treated and untreated wood above ground, *Holzforschung*, 54 (2), 111-118 (2000)
- 50) 齋藤 宏昭, 福田 清春, 澤地 孝男, 大島 明: 水分収支を考慮した木造外皮の耐久性評価のための木材腐朽予測モデル 建築外皮の湿害に対する評価手法の開発 その1, *日本建築学会環境系論文集*, 73 (630), 971-978 (2008)
- 51) 佐道 健: 木材の物理, 文永堂出版株式会社, pp. 42-57 (1995)
- 52) 今村 祐嗣: 木材への液体注入 : ピットの構造と浸透性向上技術, *木材研究・資料*, 31, 11-30 (1995)
- 53) 貴島 恒夫, 林 昭三: 木材に水が浸透する過程の顕微鏡的観察, *木材研究*, 24, 33-45 (1960)
- 54) 林 昭三, 貴島 恒夫: 針葉樹材への水の横浸透に関する研究, *木材研究*, 36, 61-70 (1965)
- 55) 葉石 猛夫, 中野 達夫: 木材の吸水量, *林業試験場研究報告*, 291, 117-167 (1977)
- 56) 矢田 茂樹, 梅原 勝雄: 木材中への液体浸透に及ぼす界面活性剤添加の効果, *木材工業*, 39 (8), 371-375 (1984)
- 57) 矢田 茂樹: 木材中への液体浸透に及ぼす初期含水率の影響, *横浜国立大学理科紀要. 第二類, 生物学・地学*, (34), 59-66 (1987)
- 58) 小倉 武夫: 木材の乾燥機構に関する研究 (第1報) 表面蒸発速度及水分伝導度と板の厚さとの関係, *林業試験場研究報告*, 42, 11-25 (1949)
- 59) 満久 崇麿: 木材乾燥に関する研究 第1報, *木材研究*, (6), 51-70 (1951)
- 60) 井阪 三郎: 木材表面境界層における熱および水分の移動, *北海道大学農学部演習林研究報告*, 25 (1), 107-145 (1967)
- 61) Brischke, Christian; Rapp, Andreas Otto; Bayerbach, Rolf: Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes, *Building and Environment*, 43, 1566-1574 (2008)
- 62) Bulcke, Jan Van den; Acker, Joris Van; Smet, Jordi De: An experimental set-up for real-time continuous moisture measurements of plywood exposed to outdoor climate, *Building and Environment*, 44, 2368-2377 (2009)
- 63) Isaksson, Tord; Thelandersson, Sven: Experimental investigation on the effect of detail design on wood moisture content in outdoor above ground applications, *Building and Environment*, 59, 239-249 (2013)
- 64) Ruther, Petra; Time, Berit: External wood claddings - performance criteria, driving rain and large-scale water penetration methods, *Wood Material Science & Engineering*, 10 (3), 287-299 (2015)

- 65) 上村 武: 誘電率による木材含水率の測定に関する基礎的研究, 林業試験場研究報告, 119, 95-172 (1960)
- 66) Watanabe, K; Saito, Y; Avramidis, S; Shida, S: Non-destructive measurement of moisture distribution in wood during drying using digital X-ray microscopy, *Drying Technology*, 26 (5), 590-595 (2008)
- 67) Watanabe, K; Lazarescu, C; Shida, S; Avramidis, S: A Novel Method of Measuring Moisture Content Distribution in Timber During Drying Using CT Scanning and Image Processing Techniques, *Drying Technology*, 30 (3), 256-262 (2012)
- 68) Tanaka Takashi, Avramidis Stavros, Shida Satohi: Evaluation of moisture content distribution in wood by soft X-ray imaging, *Journal of Wood Science*, 55 (1), 69-73 (2009)
- 69) Sandberg, Karin; Salin, Jarl-Gunnar: Liquid water absorption in dried Norway spruce timber measured with CT scanning and viewed as a percolation process, *Wood Science And Technology*, 46 (1-3), 207-219 (2012)
- 70) Li, Wanzhao; Bulcke, Jan Van den; Windt, Imke De; Loo, Denis Van; Dierick, Manuel; Brabant, Loes; Acker, Joris Van: Combining electrical resistance and 3-D X-ray computed tomography for moisture distribution measurements in wood products exposed in dynamic moisture conditions, *Building and Environment*, 67, 250-259 (2013)
- 71) 鈴木 憲太郎: 木造住宅の耐久設計と維持管理・劣化診断, 財団法人日本住宅・木材技術センター, pp. 105-115 (2002)
- 72) 矢田 茂樹: 屋外設置木製品の初期劣化の現状と劣化防止対策, *木材工業*, 44 (10), 461-464 (1989)
- 73) 大澤 朋子, 信田 聡, 有馬 孝禮: 設置後 10 年経過したウッドデッキの劣化状況, 第 50 回 木材学会大会研究発表要旨集, Q3018 (2000)
- 74) 寺澤 眞: 木材乾燥のすべて, 海青社, pp. 496-519 (1994)
- 75) Brischke, Christian; Meyer, Linda; Bornemann, Thomas: The potential of moisture content measurements for testing the durability of timber products, *Wood Science and Technology*, 47 (4), 869-886 (2013)
- 76) 宮川 正: X 線診断学, 株式会社文光堂, pp. 3-4 (1982)
- 77) 山元 久美子, 大越 誠, 中戸 莞二, 佐道 健: 針葉樹材中への水の自然縦浸透: 軟 X 線デンシトメトリーによる解析, *材料*, 32 (359), 869-874 (1983)
- 78) 近藤 久晴, 金川 靖: ダグラスファー材の通水性に関する研究, *材料*, 32 (359), 875-880 (1983)

- 79) 松村 順司 , 堤 壽一 , 小田 一幸: 乾燥に伴う有縁壁孔の閉鎖と気体透過性自然乾燥と凍結乾燥されたカラマツ材について, 木材学会誌, 41 (4), 433-439 (1995)
- 80) John F. Siau: Flow in Wood, Syracuse University Press, pp. 15-34 (1971)
- 81) 松尾 陽: 新建築学大系 10 環境物理, 株式会社彰国社, pp. 36-40 (1990)
- 82) Knet A. McDonald, et.al.: Wood Decks; Materials, Construction, and Finishing, Forest Products Society, pp. 3-17 (1996)
- 83) 永井 智 , 谷口 義昭: スギ材の気体透過性 : 生材丸太における心材・白線帯・辺材の気体透過性, 材料, 50 (4), 409-414 (2001)
- 84) 鈴木 寧: 木材の濡れについて-1-, 木材工業, 12 (10), 455-458 (1957)
- 85) 矢田 茂樹: 木材中への液体浸透, 木材工業, 41 (5), 209-214 (1986)
- 86) 鈴木 寧: 木材の濡れについて-2-, 木材工業, 12 (11), 509-512 (1957)
- 87) Kalnins, MA; Feist, WC: Increase in Wettability of Wood with Weathering, Forest Products Journal, 43 (2), 55-57 (1993)
- 88) Niklewski, J; Brischke, C; Hansson, EF; Meyer-Veltrup, L: Moisture behavior of weathered wood surfaces during cyclic wetting: measurements and modeling, Wood Science and Technology, 52 (6), 1431-1450 (2018)
- 89) Gellerich, A; Brischke, C; Emmerich, L; Meyer-Veltrup, L; Kaudewitz, P: Evaluation of surface cracks on wood – physical assessment versus subjective sensation, IRG/WP 48th IRG Annual Meeting, Ghent, Belgium, 17-20617 (2017)

謝辞

本研究を行うにあたって、多大なるご教授、ご指導をいただきました木材物理学研究室の信田聡教授、恒次祐子准教授、前田啓助教に心から感謝いたします。

信田教授には要所で重要なご指示をいただき、すぐに散漫してしまう私の思考を上手く方向づけてくださいました。恒次准教授には多方面から新たな気づきをアドバイスいただくとともに、特に英語論文の作成においては的確なご指示をいただき、自分の中で新たな目標を見つけることができました。前田助教にはなかなか昼間に都合をつけることができない私のために貴重なお時間を割いていただき、休日や夜中まで実験や論文のアドバイスをいただきました。ここに深くお礼申し上げます。

また、博士論文の査読を通じて東京大学木質材料学研究室の稲山正弘教授、青木謙治准教授、日本大学の木口実教授からいただいた貴重なご意見によって、本論文の考察を深めることができました。深く感謝いたします。

木材物理学研究室の同窓諸氏には試験体製作等の実験準備にご協力いただくとともに、研究室ゼミを通じて様々なご意見をいただいたことに感謝します。

最後に、勤務先である公益財団法人日本住宅・木材技術センターにおいては、3年間の博士課程進学を認めていただいたことに感謝します。仕事と学業との両立は大変でしたが、非常に得るものの大きな3年間でした。

皆様のお陰でこの博士論文を書き上げることができました。本当にありがとうございました。

平成 31 年 3 月

大澤 朋子