

# 修士論文

「Mass Timber 内部の含水率変動に関する研究」

2023年2月10日

広島大学大学院 先進理工系科学研究科

建築学プログラム 建築構造力学研究室

M213533 有木彩乃





## 目次

1. はじめに .....	2
1.1. 研究背景と目的.....	2
1.2. 研究の内容 .....	4
1.3. 含水率による機械的性能の変化.....	6
1.4. 実建物での含水率計測.....	7
1.4.1. 計測の目的.....	7
1.4.2. 計測概要 .....	8
1.4.3. 計測結果 .....	10
1.4.4. まとめ .....	16
1.5. 中大規模建築物での木材使用量.....	17
1.5.1. 調査の目的.....	17
1.5.2. 調査概要 .....	18
1.5.3. カテゴリ別単位材積平均値の比較.....	19
1.5.4. まとめ .....	25
2. 内部含水率計測方法の検討.....	28
2.1. 内部含水率計測方法.....	28
2.1.1. 従来の木材含水率計測方法.....	28
2.1.2. 本研究で検討する含水率計測方法.....	29
2.1.3. 温湿度センサとその設置方法.....	31
2.1.4. 各実験の目的と概要.....	33
2.2. 計測穴を塞ぐ栓に関する実験.....	34
2.2.1. 試験概要 .....	34
2.2.2. 実験結果 .....	35
2.3. スギ・ヒノキ・ベイマツ製材での含水率計測実験.....	36
2.3.1. 試験体概要.....	36
2.3.2. 各サイクルでの材内部計測値.....	38
2.3.3. 計測した内部含水率と全乾法含水率との比較.....	44
2.3.4. まとめ .....	60
2.4. スギ CLT での含水率計測実験（インキュベータ） .....	61
2.4.1. 試験体概要.....	61
2.4.2. 外部環境 .....	64
2.4.3. 計測方法 .....	65

2.4.4. 計測結果 .....	66
2.4.5. まとめ .....	69
2.5. スギ CLT での含水率計測実験（恒温恒湿器） .....	70
2.5.1. 試験体概要.....	70
2.5.2. 外部環境 .....	70
2.5.3. 計測方法 .....	71
2.5.4. 計測結果 .....	72
2.5.5. まとめ .....	76
2.6. 2 章のまとめ.....	77
3. 屋外暴露実験での内部含水率変動.....	80
3.1. 屋外暴露実験の目的と概要.....	80
3.2. 旭川と都城での屋外暴露実験.....	82
3.2.1. 計測の目的.....	82
3.2.2. 試験体概要.....	83
3.2.3. 暴露概要 .....	90
3.2.4. 計測概要 .....	97
3.2.5. 外部環境 .....	106
3.2.6. 試験体各面の様子.....	109
3.2.7. 無処理 CLT 試験体の計測結果 .....	131
3.2.8. 無処理集成材試験体の計測結果.....	151
3.2.9. 薬剤処理 CLT 試験体の計測結果.....	162
3.2.10. 設置条件ごとの中央計測点含水率の推移.....	181
3.2.11. 設置条件ごとの材端計測点含水率の推移.....	196
3.2.12. まとめ .....	203
3.3. 東広島での屋外暴露実験.....	204
3.3.1. 計測の目的.....	204
3.3.2. 試験体概要.....	205
3.3.3. 暴露概要 .....	207
3.3.4. 計測概要 .....	208
3.3.5. 外部環境 .....	211
3.3.6. 試験体各面の様子.....	213
3.3.7. 計測結果 .....	219
3.3.8. まとめ .....	228
3.4. 大分での屋外暴露実験.....	229
3.2.1. 計測の目的.....	229

3.4.2. 試験体概要.....	230
3.2.3. 暴露概要 .....	231
3.2.4. 計測概要 .....	232
3.2.5. 外部環境 .....	233
3.2.6. 試験体各面の様子.....	235
3.2.7. 計測結果 .....	237
3.2.8. まとめ .....	243
3.5. 3章のまとめ.....	244
4. 暴露 CLT・集成材の強度試験 .....	246
4.1. はじめに .....	246
4.2. 試験の概要 .....	247
4.3. 全面圧縮試験.....	259
4.3.1. 試験概要 .....	259
4.3.2. 破壊性状 .....	260
4.3.3. 試験結果 .....	261
4.4. 接着せん断試験.....	264
4.4.1. 試験概要 .....	264
4.4.2. 破壊性状 .....	265
4.4.3. 試験結果 .....	266
4.5. 支圧試験 .....	280
4.5.1. 試験概要 .....	280
4.5.2. 破壊性状 .....	281
4.5.3. 試験結果 .....	283
4.6. 4章のまとめ.....	294
5. CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動 .....	296
5.1. 実験の目的 .....	296
5.2. 試験体概要 .....	297
5.3. 計測概要 .....	299
5.4. 計測結果 .....	302
5.4.1. 試験体 1 (平板試験体) 結果.....	304
5.4.2. 試験体 2 (接合部試験体) ブチルテープ処理部分の結果.....	308
5.4.3. 試験体 2 (接合部試験体) 塗膜塗料処理部分の結果.....	312
5.4.4. 試験体 2 (接合部試験体) 含浸塗料処理部分の結果.....	315
5.4.5. 各防水処理の比較.....	318

## 目次

5.5. TCC 打設後の外部気温に関する確認試験 .....	319
5.5.1. 試験体概要 .....	320
5.5.2. 計測結果 .....	322
5.6. 5 章のまとめ .....	327
6. おわりに .....	330
謝辞 .....	335
参考文献 .....	337





# 第1章 はじめに

## 1. はじめに

### 1.1. 研究背景と目的

近年、地球規模の課題として気候変動問題の解決が急務とされている。2015年に採択されたパリ協定では、世界共通の長期目標として「世界的な平均気温上昇を工業化以前に比べて2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求すること（2℃目標）」や「今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡を達成すること」等が合意されている。<sup>1-1)</sup> この実現に向けて世界が取り組みを進めており、120以上の国と地域が「2050年カーボンニュートラル」という目標を掲げている。カーボンニュートラルは温室効果ガスの排出が全体としてゼロになっている状態を指し、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出量の削減はもちろんだが、植林・森林管理による吸収量を増加させることも大切である。そこで木質構造物における炭素固定が注目され、世界で木質構造を拡大する動きが進められている。

国内では2010年に制定された木促法が2021年に改正され、「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の使用の促進に関する法律」<sup>1-2)</sup> となった。これにより非住宅分野において、民間の建築物にも木材利用の促進がなされるようになってきている。また、国内では戦後に植林されたスギ・ヒノキが成長し木材利用に適した時期を迎えているため<sup>1-3)</sup>、より積極的な木材利用が求められている。

このような背景を受け、写真 1.1 に示すように様々な規模・用途の建築物で木質構造を採用する動きが広まっている。



高知おおとよ製材（株）社員寮



愛媛県武道館

写真 1.1 木質構造物の例

建築物の規模・用途の変化は、要求性能の高度化につながっており、小規模な住宅に比べてより高い水密性や防耐火性能が必要な建築物が増加している。特に木質系材料は1.3節で述べるように、他構造材よりも含水率による機械的性能の変化が大きいことが知られてい

## 第1章 はじめに

る。現在求められているような中大規模木質構造は、水分や湿気に対して、適切な耐久設計や維持保全をおこなう必要がある。

非住宅分野での木質構造物では、写真 1.2<sup>1-4)</sup> に示すように構造躯体をそのまま現しで使用することや、他構造との混構造が採用されることが多くなっている。躯体を現しで使用する場合には、風雨にさらされるなど、内部に隠して使用する場合よりも厳しい環境に耐える工夫（深い軒の出など）が必要である。混構造の場合であれば、異なる挙動を示す構造躯体の取り合い部分や、コンクリート等水分を含む材料からの水分流入を防止するなど、様々な注意が必要である。例えば官庁営繕からは施設の耐久性及び保全性を確保するための留意事項を取りまとめた資料<sup>1-5)</sup>が報告されている。



写真 1.2 非住宅分野での木質構造物の例

また中大規模木質構造では、構造部材として従来から使用されている製材に加えて集成材や CLT (Cross Laminated Timber) といったような Mass Timber の活用がおこなわれている。先に述べたように、水分や湿気に対する適切な耐久設計のためには、構造躯体内部の含水率がどの程度上昇するかを把握する必要がある。しかし、中大規模の建築物で用いられる大断面部材では、図 1.1 に示すように外部環境によってどの範囲かつどの程度の含水率変動が起こっているのか明確にわかっていない。また事故的水掛りや壁内部の結露等の水分が CLT に侵入した際、長期間内部に滞留することが懸念されている<sup>1-6)</sup>。

特に CLT は比較的新しい材料であるということもあり、構造性能や防耐火性能に関する技術基準の整備は進められているが、耐久性能に関する整備が遅れている。例えば薬剤処理 CLT に関して、加圧処理した CLT 製品の AQ 認証（優良木質建材等認証）はおこなわれているものの、基本的には薬剤処理材を現場で塗布するのみで、外皮による防水に頼っている場合が多い<sup>1-7)</sup>。そこで、様々な環境で CLT の内部含水率がどの程度変動するかが分かれば、適切な保存処理方法の提案の一助になるのではないかと考えている。

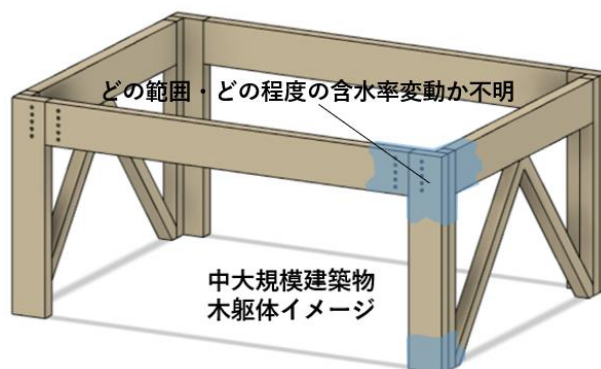


図 1.1 木躯体のイメージ

本研究では、Mass Timber が様々な外部環境下でどのように内部含水率変動をしているのかを明らかにすることを最終の目的とし、内部含水率計測方法の検討とその方法を用いた屋外暴露 CLT、集成材の内部含水率の計測をした。

## 1.2. 研究の内容

本研究は、Mass Timber の中でも、大断面で用いられる CLT と集成材を対象とした。各章の概要を図 1.2 に示す。

CLT と集成材の内部含水率を計測するため、第 2 章では木材の内部含水率変動を計測するための計測方法を検討した。本研究で検討した内部含水率計測方法は温湿度センサを用いた含水率計測方法である。これは木材内の温湿度を計測し、そのごく近傍を平衡状態と仮定することで平衡含水率曲線を適用し局所的な含水率を計測できるのではないかと考えたものである。

第 3 章では、第 2 章で検討した内部含水率計測方法を用いて、日本各地の屋内外で暴露をしている CLT や集成材の計測を実施し、その傾向をまとめた。設置場所や設置の向き、屋根の有無などの暴露条件が内部含水率に及ぼす影響や、材端からの距離が異なる計測点での計測で、躯体内部のどの範囲で水分のやり取りをしているかを明らかにした。

第 4 章では、第 3 章で暴露した試験体の強度試験（全面圧縮試験、接着せん断試験、支圧試験）をおこない、異なる環境で暴露した場合の強度性能への影響を検討した。

第 5 章では混構造の耐久設計に関する検討の一例として、CLT-RC 複合床のコンクリート打設前後のコンクリートから木部への水分流入を、第 2 章の内部含水率計測方法を用いて計測した。また、CLT の木口もコンクリートに接するシアキーを模した接合部試験体では、明確に水分流入があると考えられる木口面に対して有効な防水処理の検討もおこなった。



図 1.2 各章の概要

### 1.3. 含水率による機械的性能の変化

木材の含水率による機械的性能の変化として、主に以下の3点が挙げられる。

- ① 膨潤収縮による寸法変化
- ② 強度特性の変化
- ③ 含水率の増加に伴う腐朽リスクの増大

以下、各点について詳細を述べる。

#### ① 膨潤収縮による寸法変化

繊維飽和点以下で含水率が変化すると、水分は木材の細胞壁の非結晶領域に吸着または脱着するため、木材全体の容積が増減する。この現象を膨潤または収縮という。一般的に木材の膨潤・収縮率は密度に比例し、また方向による異方性があり、接線方向：半径方向：繊維方向=10：5：1～0.5といわれている。<sup>1-8)</sup>

本研究で対象とする Mass Timber の内、CLT はラミナの繊維方向が直交するように積層接着された材料である。部材全体としての寸法安定性が向上することが報告されている<sup>1-9)</sup>が、接着層によって各ラミナの膨潤収縮が抑制されているため、接着層に大きな負担がかかることが予想される。特に屋内外に現して用いられている部材では、膨潤収縮によってラミナの木口での割れや反り、接着層付近での剥離が起きている建築物が報告されており<sup>1-10)</sup>、膨潤収縮を抑制するための対策について研究が進められている。<sup>1-11)</sup>

#### ② 強度特性の変化

繊維飽和点以下の含水率では木材の強度は含水率の増加に伴い減少傾向を示すことが知られている<sup>1-12)</sup>。これは、木材の力学的特性が細胞壁実質の割合に強く影響を受けるため、繊維飽和点以上になると細胞壁の変化を伴わないため、力学的特性の変化は生じないとされている。

#### ③ 含水率の増加に伴う腐朽リスクの増大

木質構造物において、強度に影響を及ぼす主な劣化は生物劣化で、長期的な使用には深刻な強度低下の原因となる、腐朽や蟻害への対策が必要である。生物劣化の内、腐朽が発生する含水率は繊維飽和点以上（含水率約30%）が目安とされている<sup>1-13)</sup>。そのため、生物劣化の防止には構造部材に対する水分作用を軽減することが重要とされている。CLT の場合、4側面に水分が浸透しやすい木口面があり、未接着の幅はぎ部分からも水分が侵入する可能性があることから、製材や集成材とは異なる留意が必要となり、CLT パネル工法においても耐力上主要な部分の生物劣化を誘発する要因は水分（湿分）とされている。

## 1.4. 実建物での含水率計測

### 1.4.1. 計測の目的

1.1 節で述べたように、木質材料は含水率の変化によって部材寸法、強度特性などの機械的性能が変化することや、高含水状態での使用が生物劣化の危険性を高めることが知られており、使用時の木躯体の含水率状態の把握は非常に重要である。また、構造材が現しで利用されている場合、この影響が比較的大きくなることが予想される。木造住宅で用いられるような小断面の部材については、吉田ら<sup>1-14)</sup>や寺床ら<sup>1-15)</sup>によって、全乾法での調査がおこなわれている。しかし国内では、中大規模木質構造で用いられる CLT といったような大断面部材に関して、内部含水率を計測した例は少なく、継続的に木躯体の含水率変動を計測した例も報告されていない。海外では、Steven ら<sup>1-16)</sup>や Lars<sup>1-17)</sup>によって電気抵抗式含水率計を用いて計測した継続的な CLT の含水率変動が報告されているが、いずれも建方中の事故的水がかりによる含水率上昇についての検討であり、建物使用時の含水率計測がおこなわれている例は少ない。

そこで CLT を現しで使用している実建物について、CLT 内部の含水率の長期的な計測を実施し、外部環境が内部含水率にどのような影響を与えているのかを検討した。本計測では以下 2 つの物件を対象に調査を実施した。写真 1.3 に各物件の外観写真と建築物の情報を示す。

物件 1：三東工業社本社（滋賀県甲賀市信楽町 平屋建て）

物件 2：CLT パビリオン（北海道旭川市西神楽林産試験場内 平屋建て）



建築用途：事務所

建築面積：170.51m<sup>2</sup>

延べ床面積：110.00m<sup>2</sup>

構造：木造（CLT）

物件 1 三東工業社本店



建築用途：公共施設

建築面積：115.36m<sup>2</sup>

延べ床面積：83.44m<sup>2</sup>

構造：木造（CLT）

物件 2 CLT パビリオン

写真 1.3 各物件の外観写真と情報

## 第1章 はじめに

### 1.4.2. 計測概要

計測はどちらの物件も電気抵抗式木材含水率センサ（KNS-GWS、コーナー札幌株式会社）を用いておこなった。表 1.1 に計測の概要を示す。また、以下に各物件の計測の詳細を示す。

表 1.1 各物件の計測概要

計測場所	CLT		計測点の場所	計測開始	計測終了	計測間隔	
滋賀県信楽町	スギCLT	5層5プライ	外壁使用	屋外側から2層目	2018/9/27	2022/11/1	1時間
北海道旭川市	カラマツCLT			屋外側から1層目	2021/7/10	継続中	
	トドマツCLT			3層目（中央）	2021/9/13		
				屋外側から1層目	2021/7/10		
		屋内側から1層目	2021/9/13				

#### 【物件1】

図 1.3 に計測の様子を示す。物件1は5層5プライのスギCLTを現しとして使用している。含水率計測機器を入れたBOXは、雨が直接当たらず、構造部材が外気温湿度の影響を直接受ける、半屋外空間の外壁内側に設置した。図 1.4 に含水率計測方法を示す。計測位置は、外壁CLT部材の外側から2層目の、部材下端の木口からの距離が105mmの位置に含水率センサを埋め込んだ。計測は2018年9月27日から2022年11月1日まで1時間おきにおこなった。



図 1.3 計測の様子



## 第1章 はじめに



図 1.4 含水率計測方法

### 【物件2】

図 1.5 に計測の様子を示す。物件2は5層5プライのカラマツ CLT 及びトドマツ CLT が現しで使用されている。どちらの CLT も含水率計測は屋内側からおこなっている。カラマツ CLT は屋外側の外層と3層目、トドマツ CLT は屋外側の外層と屋内側の外層のそれぞれ2点を計測している。屋外側1層目のカラマツとトドマツの計測点は2021年7月10日から現在まで、カラマツの3層目とトドマツの屋内側1層目は2021年9月13日から現在まで、全て1時間間隔で計測している。



図 1.5 計測の様子

## 第1章 はじめに

### 1.4.3. 計測結果

#### 【各物件の外部環境】

表 1.2 に気象庁による物件 1（信楽）の気温と降水量の季節平均を、表 1.3 に同じく気象庁による物件 2（旭川）の気温と降水量、降雪量の季節平均を示す。なお、本計測期間中に信楽で降雪は観測されていなかったため、表から省略している。

表 1.2 信楽の気温と降水量の季節平均

計測年		2018	2019				2020				
計測月		10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	
月平均気温	°C	9.54	3.73	15.37	23.81	10.12	4.90	15.68	23.67	8.85	
降水量の合計	mm/月	52.83	64.50	129.83	212.17	149.00	81.83	164.33	188.67	113.50	
1時間降水量の最大	mm	7.50	5.67	12.00	28.00	10.33	8.67	17.67	19.17	7.33	
計測年		2021				2022					
計測月		1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9			
月平均気温	°C	4.61	15.86	23.33	9.36	2.73	16.31	24.16			
降水量の合計	mm/月	83.17	200.83	252.83	75.17	47.00	124.67	211.67			
1時間降水量の最大	mm	8.00	26.17	29.83	11.50	5.50	13.50	29.67			

表 1.3 旭川の気温と降水量、降雪量の季節平均

計測年		2021		2022		
計測月		7-9	10-12	1-3	4-6	7-9
月平均気温	°C	20.88	-1.93	7.28	20.48	4.44
降水量の合計	mm/月	53.83	132.00	53.83	107.50	4.44
1時間降水量の最大	mm	9.50	8.17	2.83	17.00	27.50
降雪量の合計	cm/月	0.00	51.67	87.67	1.67	0.00
最深積雪	cm	0.00	23.00	63.33	1.00	0.00

## 第1章 はじめに

### 【含水率計測値の温度補正】

図 1.6 に気象庁による信楽町の日平均気温と物件 1 の含水率計測値の日平均を示す。また図 1.7 に気象庁による旭川市の日平均気温と物件 2 の含水率計測値の日平均を示す。電気抵抗式含水率センサの計測値はセンサ打ち込み部材の温度に影響を受けるため、温度補正が必要である。本実験では含水率センサ打ち込み部分の温度を、気象庁の日平均温度と仮定し、木材含水率センサの取り扱い説明書 (p.5) に記載されている、温度による補正式 1.1 に基づき温度補正をした。

$$P_m = P - (0.0025 \times P + 0.08) \times (t - 20) \quad (1.1)$$

$P_m$  : 温度補正含水率 (%)

$P$  : 温度補正前含水率 (%)

$t$  : センサ打ち込み部材の温度 (°C)

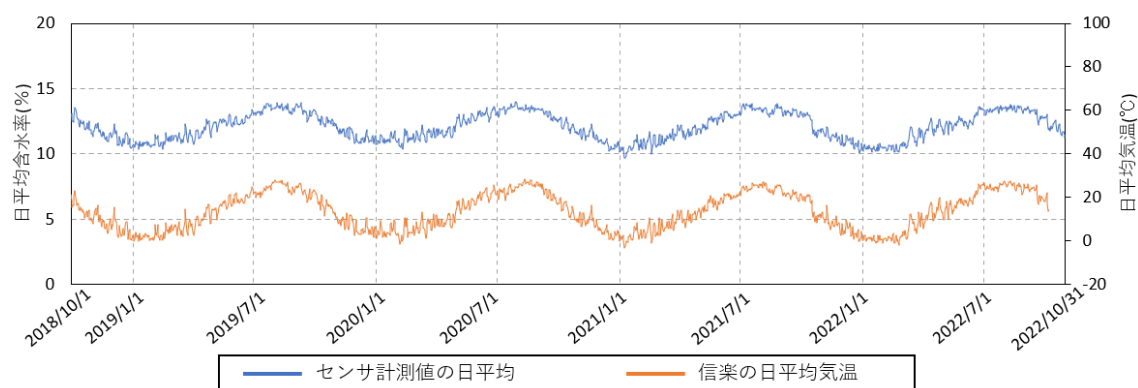


図 1.6 温度補正前の物件 1 の日平均含水率と信楽の日平均気温

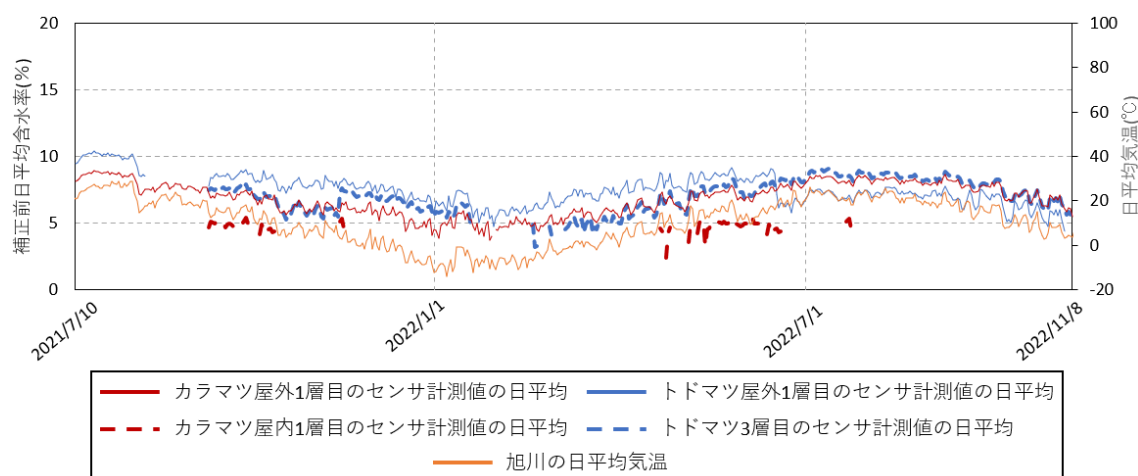


図 1.7 温度補正前の物件 2 の日平均含水率と旭川の日平均気温

## 第1章 はじめに

物件1の計測は、全期間問題なく計測できていた。また、2019, 2020, 2021年のすべての年で同じように温度上昇に伴って計測値の上昇が起こる様子が計測されていた。

物件2の計測は、含水率センサの仕様で低含水率域の計測ができないため（一定値以下の含水率は全て0%と表記される）、特に屋内側を計測していた計測点での冬季の計測がうまくおこなえていなかった。冬季がおこなえていなかった理由として、含水率センサの動作環境が10℃～40℃であるため、旭川の外気温に対応できていなかったことが考えられる。しかし、屋外側1層目を計測していた計測点の方が屋内側の計測点と比べて計測できている期間が長いため、屋内側の計測点のセンサの設置がうまくできていなかった可能性も考えられる。屋外側1層目の計測点については、どちらの樹種のCLTも計測できていない区間はあるものの温度と同じように計測値の変動が起こっていた。

【計測値の推移】

図 1.8 に物件 1 の温度補正後の日平均含水率の推移と気象庁から得た日平均気温、日平均相対湿度、降水量の時間推移を示す。なお、日平均相対湿度は信楽町での計測がおこなわれていなかったため、彦根市のデータとなっている。含水率は計測開始からほとんど変動しておらず、計測していた期間全体での含水率の平均は 12.78%であった。相対湿度や降水による大きな変動は見られず、最大含水率は 13.46%、最小含水率は 12.04%で、その差は 1.42%程度であった。外壁として現しで使用されているような CLT であっても、木口から十分に距離が離れていれば内部含水率の変動はほとんどないことがわかった。

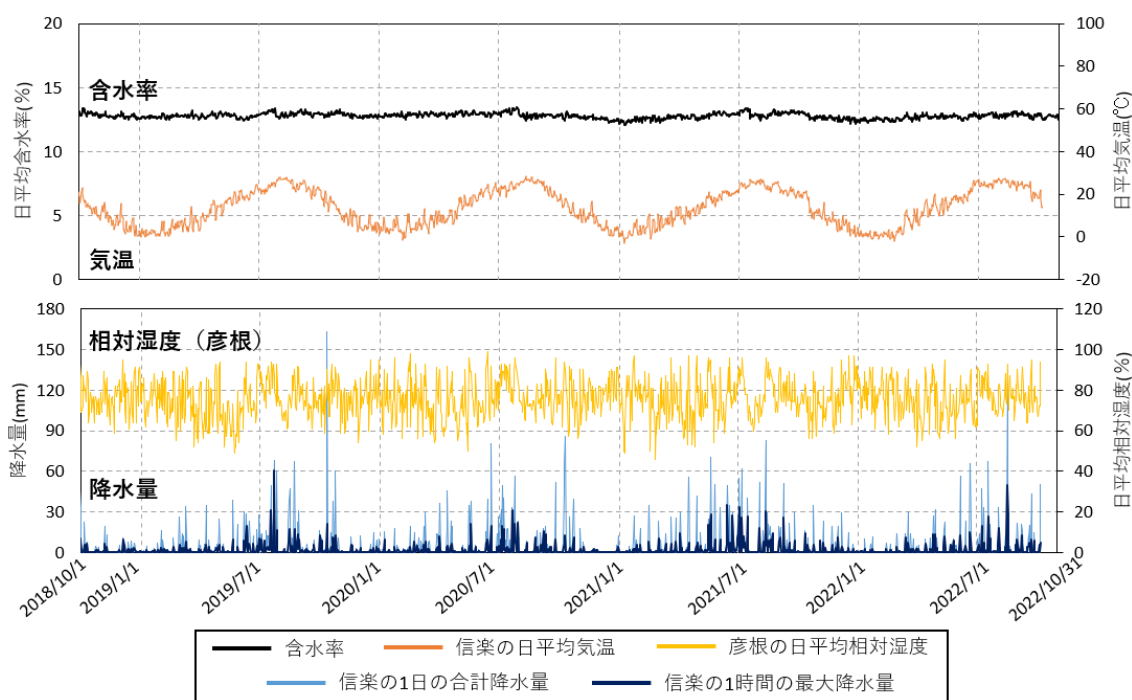


図 1.8 物件 1 の温度補正含水率と気象データ

# 第1章 はじめに

図に物件 1 の温度補正後の日平均含水率の推移と気象庁から得た旭川市の日平均気温、日平均相対湿度、降水量、降雪量の時間推移を示す。また表 1.4 に物件 1 と 2 の含水率計測値を示す。

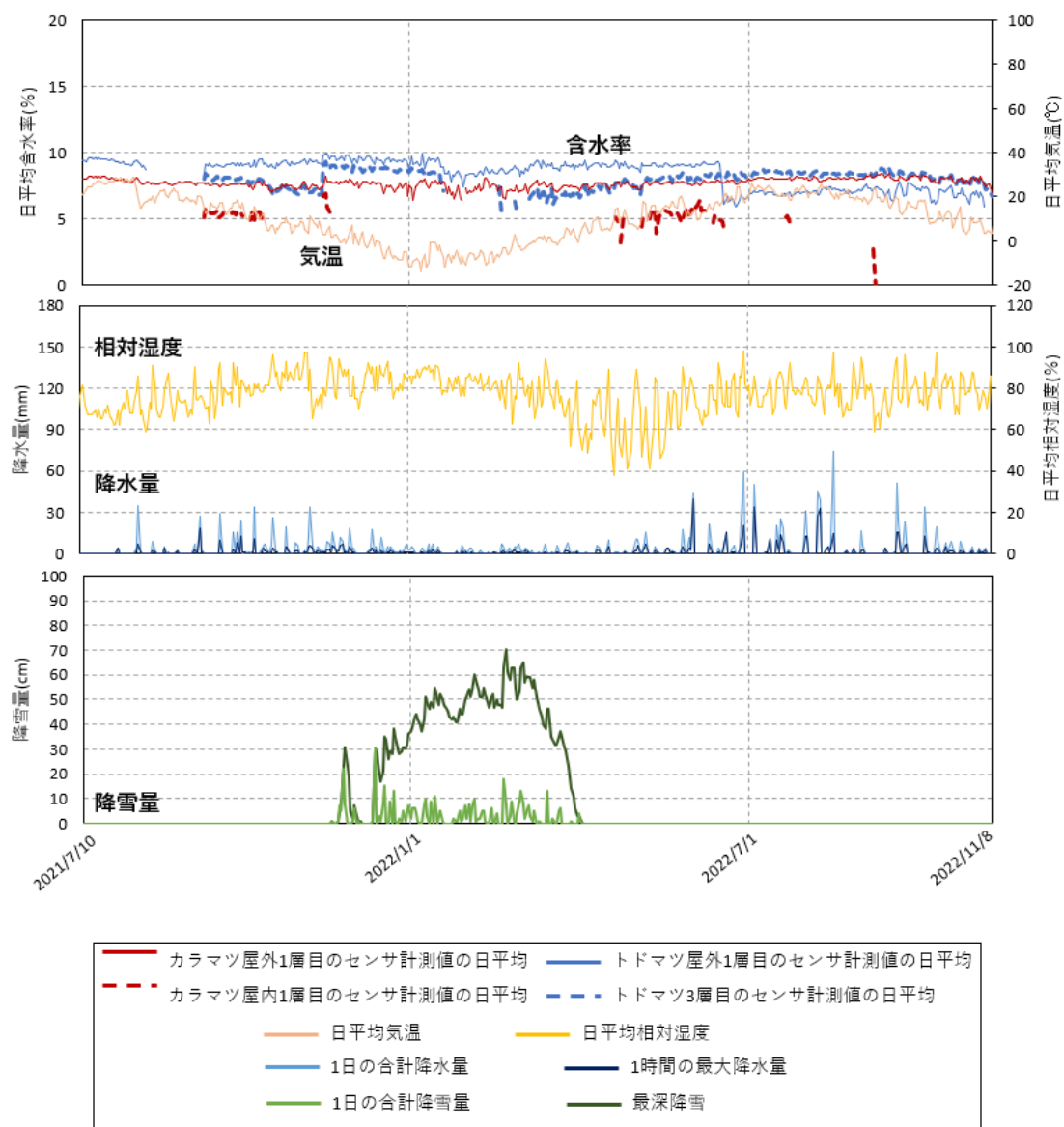


図 1.9 物件 2 の温度補正後含水率と気象データ

## 第1章 はじめに

表 1.4 含水率計測値

	物件1	物件2			
	スギ	カラマツ		トドマツ	
	屋外2層目	屋外1層目	3層目	屋外1層目	屋内1層目
最大	13.46	8.42	6.94	9.90	9.35
最小	12.04	6.42	2.27	5.88	5.27
差	1.42	2.00	4.66	4.02	4.08
平均	12.78	7.70	5.09	8.43	7.97

物件2の含水率は全ての計測点が10%を超えることはなく、ほとんどの期間計測ができていなかったカラマツ3層目の計測点除くと平均は7.5~8.5%で、物件1の12.78%に対して非常に低い値となり、地域によって躯体内部の含水率状態が異なることがわかった。また、物件2の計測値は長期間計測値を得られている屋外1層目の計測点であっても、2021年11月や、2022年6月などのように急激に値の増減が起こる時点があった。これは設置不良が起きているか、温度補正に用いているの値が気象庁から得た気温であるため、建物使用時の暖房等による局所的な温度変化を考慮できていないことが原因ではないかと考えている。

## 第1章 はじめに

### 1.4.4. まとめ

本節では、滋賀県信楽町にある物件1と北海道旭川市にある物件2の現しで使用されている外壁内部の含水率変動を、電気抵抗式含水率センサを用いて計測した。約4年4か月計測をおこなった物件1では、計測開始から含水率はほぼ一定で全計測値の平均が12.78%であった。それに対し、約1年4か月計測をおこなっている物件2では、計測自体がうまくできない期間が多く、各計測点の傾向を述べるまでは至らなかったものの、計測できた含水率の平均値は7.5%~8.5%となっており、CLTが乾燥状態にあったことがうかがえた。また、地域によって平均的な含水率が大きく異なることも分かった。さらにどちらの物件も15%を超える含水率は計測されず、木口から十分離れている部分では含水率の上昇が起こりにくいことが示唆された。



## 1.5. 中大規模建築物での木材使用量

### 1.5.1. 調査の目的

1.1 節で述べたように、2021 年 10 月の木材利用促進法改正によって、民間建築物にも木造・木質化が進められるようになった。木造利用促進法以降、材料・設計・建設コスト（以下、コスト）など、木造・木質化を促すための様々な情報提供がなされている。特にその中でもコスト情報は民間に木造・木質化を推進するために重要であると考えられる。現在公表されているコスト情報としては、試設計に対するコストの資料<sup>1-18)</sup>や、すでに建築されているもののコストの資料<sup>1-19)</sup>が挙げられる。

そこで、建築物の木造躯体材積（以下、材積[単位： $m^3$ ]）は建築基準法に沿った構造計算により決定するため普遍の値になりやすいと考え、材積を施工面積[単位： $m^2$ ]で除した値（以下、単位材積[単位： $m^3/m^2$ ]）を一つの指標とすることを提案する。事業者や設計者は、用途や工法、階高などに応じた単位材積が把握できれば、建築計画の際に、単位材積に施工面積を乗じ、材積を算定し、プレカット工場や集成材メーカー、木造専門下請け業者に概算を依頼することで、木造躯体費を算定し、予算に適合するか否かの判断ができるようになると考えられる。

1.5 節では、国内の集成材メーカーや木造専門下請け業者にヒアリングし、回答のあった 5 社の 79 件のデータを用いて単位材積を把握し、傾向を分析する。

## 第1章 はじめに

### 1.5.2. 調査概要

ヒアリングの項目は下記の15項目とした。

- ・階数
- ・防耐火（準耐火・耐火・制限なし）
- ・積雪地域（多雪・通常）
- ・用途
- ・スパン
- ・階高
- ・断面
- ・樹種（集成材・製材）
- ・構造形式（壁構造系・軸構造系）
- ・耐震要素 構造用合板・筋かい[幅 30・45・90]・ブレース・ラーメン)
- ・物件名
- ・イメージ（形状等）
- ・施工面積
- ・躯体材積

### 1.5.3. カテゴリ別単位材積平均値の比較

表 1.5 にヒアリング項目から分類した 37 項目のカテゴリと、単位材積の平均値を示す。また図 1.10 に全データの単位材積と平均値を示す。全データの平均値の算出に当たって、突出して躯体材積の大きい物件番号 47 と 61 の物件と、混構造、畜舎は除いている。全データの単位材積平均値は  $0.135\text{m}^3/\text{m}^2$  で、戸建て住宅の軸材のみで検討された集計データ<sup>1-20)</sup>によると全国平均値である  $0.154\text{m}^3/\text{m}^2$  (軸組工法の集計結果) よりも低い値となった。

カテゴリ別にみると、全データの単位躯体材積平均値の 1.2 倍を超えるカテゴリは、有効物件数が少ないカテゴリもあるが、軸構造系-ラーメン、庁舎、スギ系、3 階の 4 カテゴリであった。また、全データの単位躯体材積平均値の 0.8 倍以下のカテゴリは、軸構造系-ラーメン+合板、混構造、畜舎、準耐火 (一部燃えしろ)、一部 1 時間耐火の 5 カテゴリであった。

図 1.11 から図 1.18 に物件ごとの単位材積を項目別に示す。項目ごとに平均値を比較すると、階高では階高が高い物件の方が平均値は低くなっていた。構造形式では、軸構造系の方が壁構造系よりも平均値が高くなっていた。積雪では、多雪の方が高くなっていた。用途は最大平均値が庁舎、最小平均値は畜舎であった。樹種では、スギ系の方がマツ系よりも平均値は高くなっていた。階数では、階数が多い方が平均値は高くなっていた。耐火の有無による平均値の違いは見られなかった。スパンでは、スパンが長いと平均値が小さくなる傾向が見られた。

第1章 はじめに

表 1.5 カテゴリ別の単位材積の平均値と有効データ数

項目	カテゴリ	有効物件数	単位材積の平均値 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	平均値/全データ
階高	1 階高4m以下(平均)	42	0.139	1.030
	2 階高4m超(平均)	34	0.129	0.956
構造形式	3 壁構造系	13	0.124	0.919
	4 壁構造系+一部軸構造系	3	0.130	0.963
	5 軸構造系-ブレース	25	0.144	1.067
	6 軸構造系-ラーメン	4	0.168	<b>1.244</b>
	7 軸構造系-ブレース+ラーメン	8	0.129	0.956
	8 軸構造系-ブレース+合板	17	0.135	<b>1.000</b>
	9 軸構造系-ラーメン+合板	4	0.105	<b>0.778</b>
	10 混構造	12	0.103	<b>0.763</b>
積雪	11 積雪-通常	58	0.132	0.978
	12 積雪-多雪	18	0.143	1.059
用途	13 店舗	11	0.135	<b>1.000</b>
	14 保育園・児童館	23	0.121	0.896
	15 事務所	7	0.139	1.030
	16 公民館・集会場	9	0.152	1.126
	17 庁舎	3	0.167	<b>1.237</b>
	18 老健	3	0.117	0.867
	19 畜舎	2	0.085	<b>0.630</b>
	20 学校	14	0.143	1.059
	21 倉庫・工場	3	0.129	0.956
樹種	22 マツ系(RW含む)	51	0.125	0.926
	23 スギ系	15	0.170	<b>1.259</b>
	24 マツ+スギ	13	0.141	1.044
階数	25 平屋	51	0.131	0.970
	26 平屋(置屋根,一部2階を含む)	53	0.132	0.978
	27 2階	25	0.137	1.015
	28 3階	1	0.217	<b>1.607</b>
防耐火	29 準耐火	10	0.133	0.985
	30 準耐火(一部燃えしろ)	2	0.101	<b>0.748</b>
	31 準耐火(見え掛り燃えしろ)	17	0.136	1.007
	32 一部1時間耐火	1	0.101	<b>0.748</b>
	33 耐火無し	51	0.137	1.015
スパン	34 スパン10m以下	30	0.138	1.022
	35 スパン10m-15m	25	0.133	0.985
	36 スパン15-20m	15	0.135	<b>1.000</b>
	37 スパン20m以上	9	0.116	0.859
全データ		79	0.135	<b>1.000</b>

第1章 はじめに

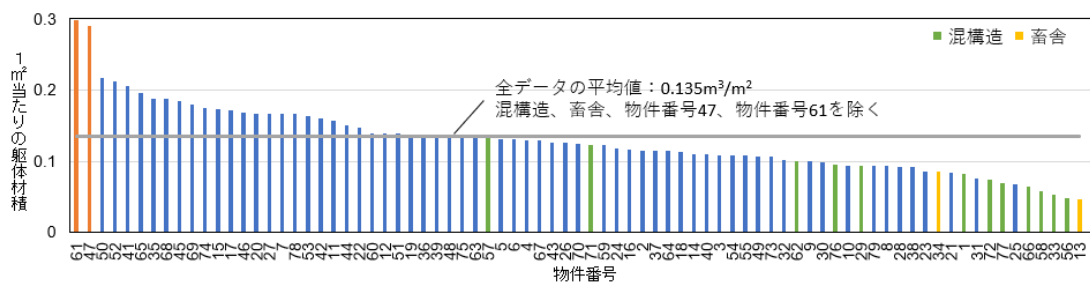


図 1.10 全データの単位材積と平均値

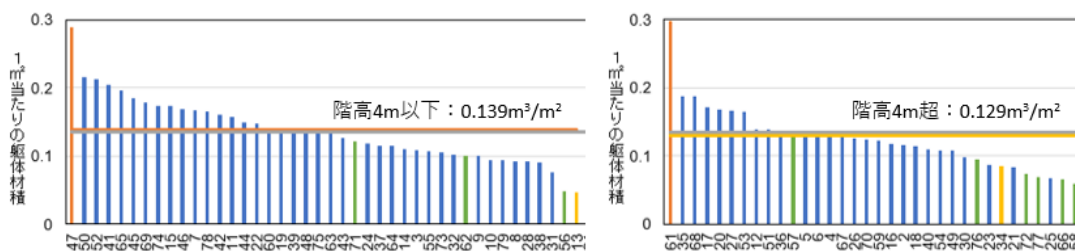


図 1.11 各項目の単位材積と平均値 (階高)

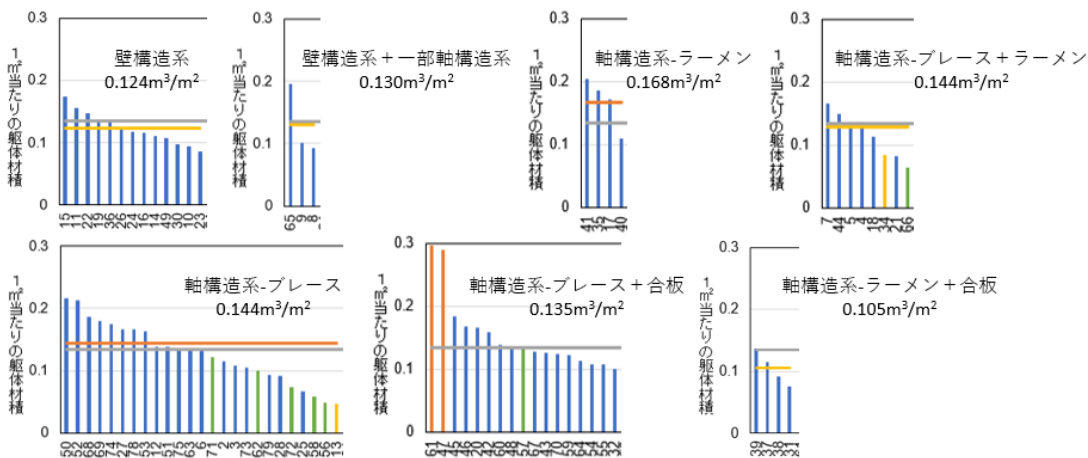


図 1.12 各項目の単位材積と平均値 (構造形式)

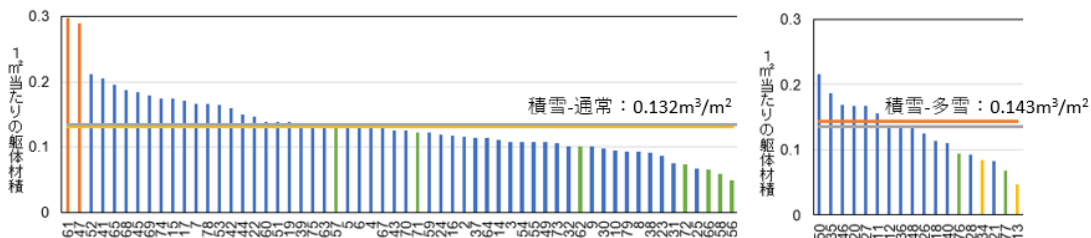


図 1.13 各項目の単位材積と平均値 (積雪)

第1章 はじめに

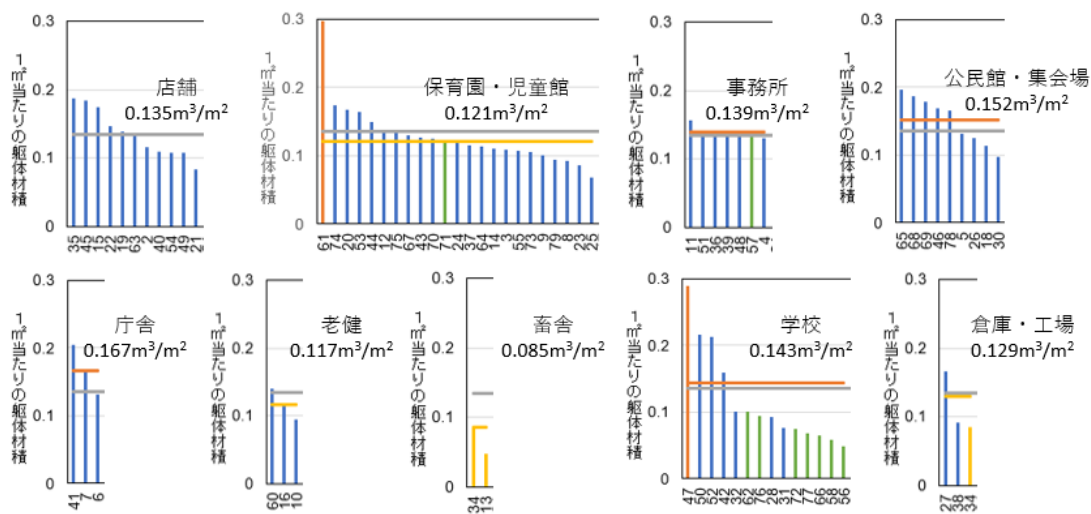


図 1.14 各項目の単位材積と平均値 (用途)

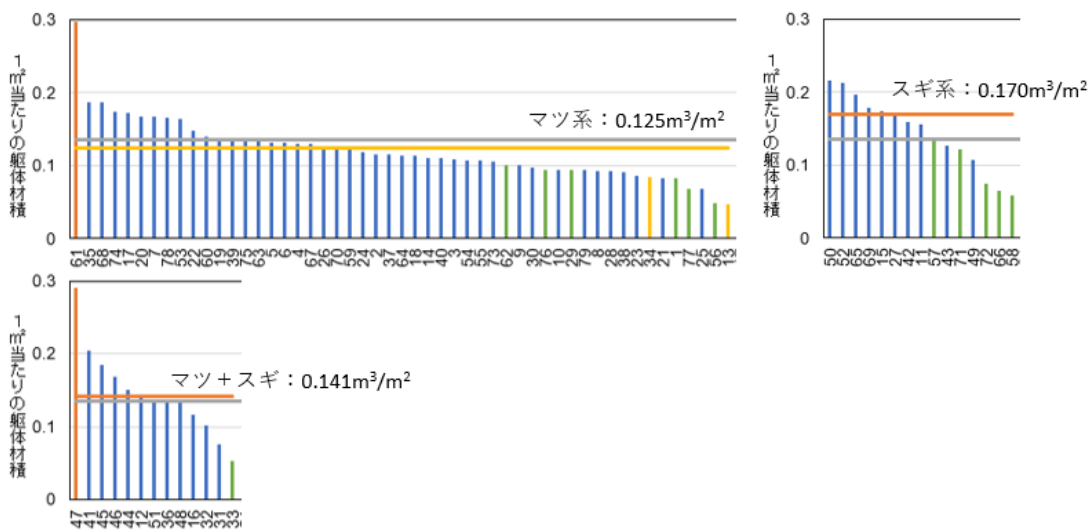


図 1.15 各項目の単位材積と平均値 (樹種)

第1章 はじめに

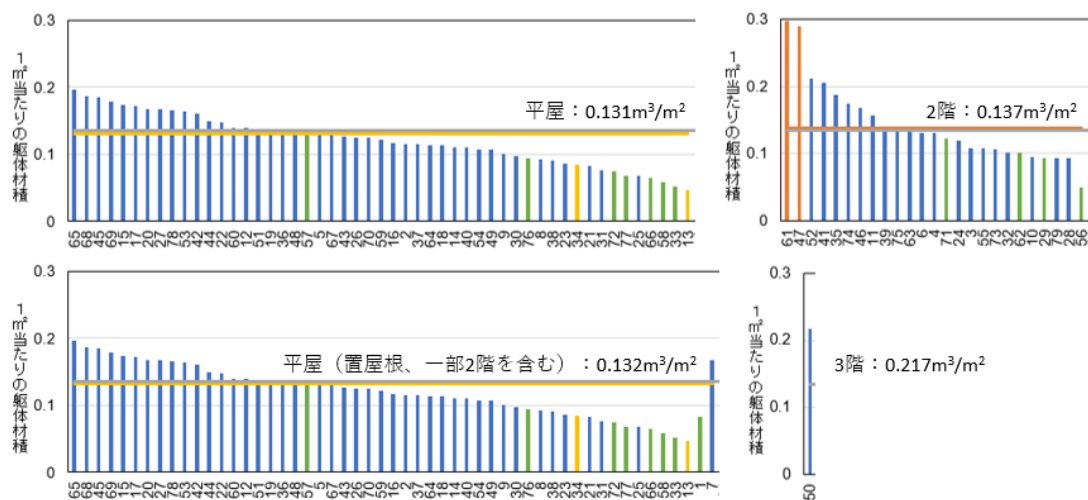


図 1.16 各項目の単位材積と平均値 (階数)

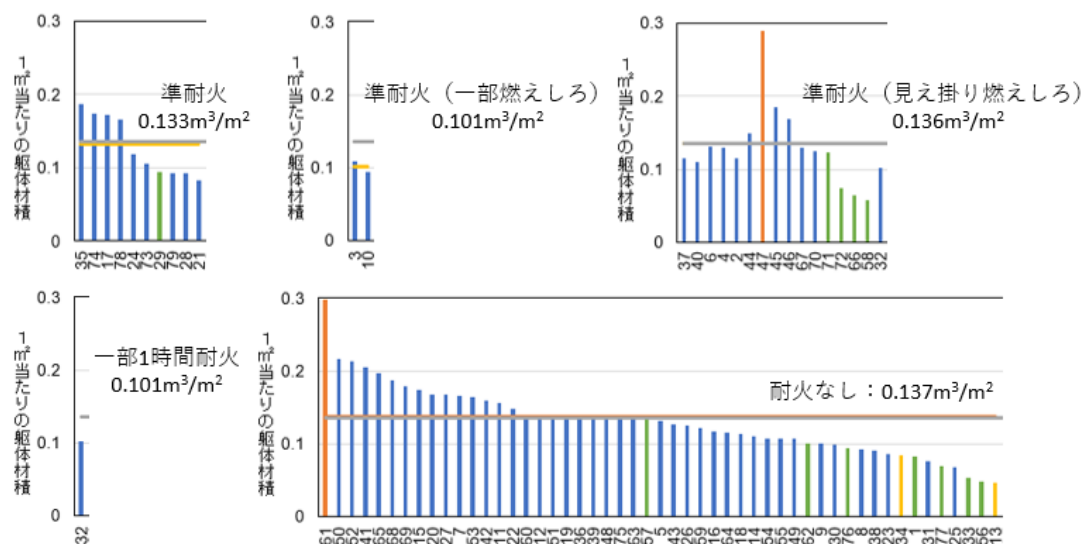


図 1.17 各項目の単位材積と平均値 (防耐火)

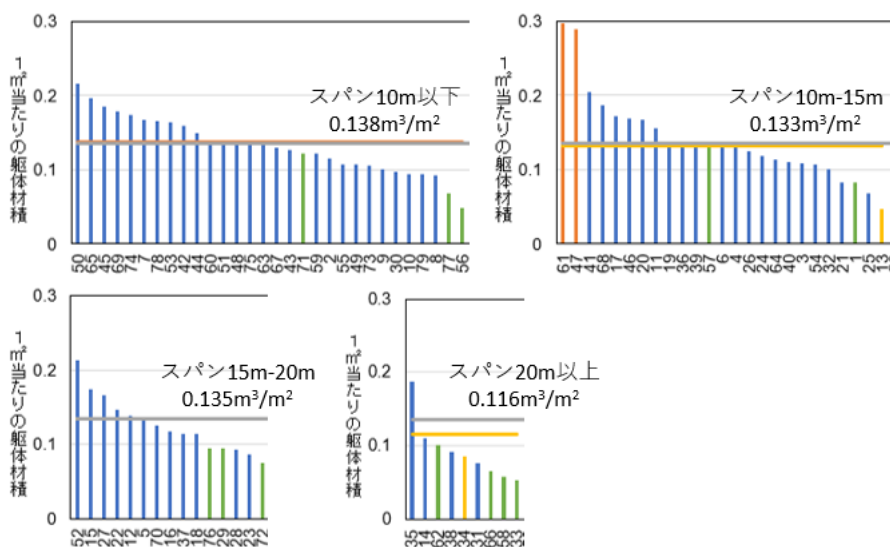


図 1.18 各項目の単位材積と平均値 (スパン)



### 1.5.4. まとめ

データ数が少ないカテゴリもあるが、カテゴリごとに定量的に単位材積の平均値を示した。今回ヒアリングしたデータ全体の単位材積平均値は  $0.135\text{m}^3/\text{m}^2$  で、戸建て住宅の全国平均値である  $0.154\text{m}^3/\text{m}^2$  よりも低い値となった。

現在、コストについてデータベース化の動きがあるが、材積に着目したものはない。今後、材料・加工・金物・施工の材積単価を示すことができれば、それらに単位材積から求めた材積を乗じることで、木造躯体費の概算が可能になり、木造の初期計画において効果的であると考えられる。



## 第 2 章

### 内部含水率計測方法の検討

## 2. 内部含水率計測方法の検討

### 2.1. 内部含水率計測方法

#### 2.1.1. 従来の木材含水率計測方法

中大規模木質構造に使用される大断面部材での含水率計測は、部材の表面と内部とで含水率が異なるため、材内部の含水率を計測する必要がある。木質材料の含水率計測方法は複数の方法が存在し、計測可能範囲に対する試験体の大きさなどで適切な計測方法を選択する必要がある。図 2.1 に含水率計測方法とその計測範囲について示す。ピンタイプの電気抵抗式含水率計や高周波式の含水率計は通常使用だと表面から 40mm 程度までの範囲の含水率計測が可能だが、250×250mm などといった大断面部材では部材内部の含水率を計測することは不可能である。また、人が持った状態で計測するため、経時測定は難しい。一方で全乾法での計測は、計測値の正確性は高いものの、計測した材料全体の含水率の平均値となるため、大断面部材の含水率分布を計測するためには、各部で試験体を切り出す必要がある。そのためこちらも経時測定は不可能である。現状内部含水率計測に用いられているのは、黒塚ら<sup>2-1)</sup>の研究で使用されているようなネジタイプの電気抵抗式含水率計である。例えば KNS-GWS (コーナー札幌株式会社) は、試験体に直径 18mm 程度の穴を 2 つ設け、その中に電極となるネジを埋め込むものである。穴の位置や深さを変更することで、材の様々な箇所での含水率の計測が可能となっている。しかし、その計測値は外気温や振動など材料の外部環境に大きな影響を受けるため、温度補正式や樹種補正が必要である。またこの形式の含水率計の製造をおこなっている会社が少ないことも問題となっている。そこで、本研究では容易な設置でかつ、センサとして種類が豊富な温湿度センサを用いた含水率計測方法について検討した。



図 2.1 木材の含水率計測方法とその計測範囲

2.1.2. 本研究で検討する含水率計測方法

本研究で検討する内部含水率計測方法は、材内部温湿度から局所的な含水率の推移を求める方法である。木材の外部温湿度から含水率を推定する手段として、図 2.2 に示すような Kollmann の平衡含水率曲線<sup>2-2)</sup> が用いられている。本方法では、例えばある時間における木材内部に埋め込まれた温湿度センサの計測値が図 2.3 に示すような状態であった場合、計測点のごく近傍を平衡状態と仮定し、平衡含水率曲線を適用することで局所的な内部含水率の推移を計測できるのではないかと考えたものである。

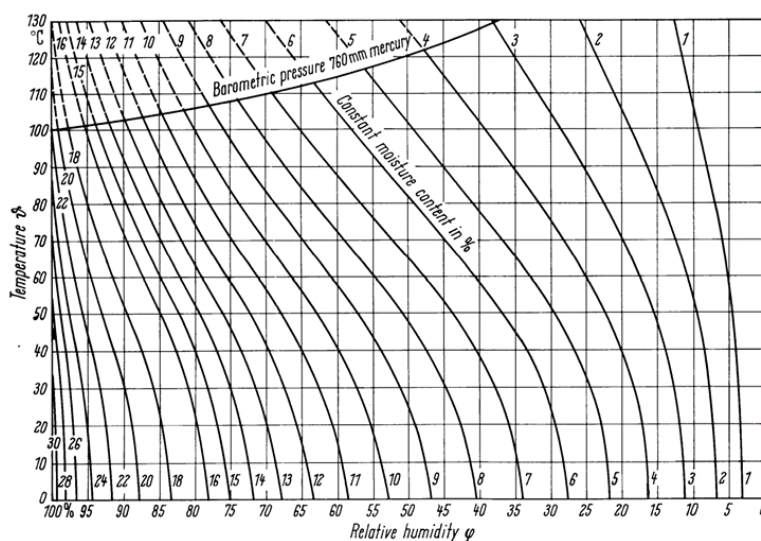


図 2.2 Kollmann の平衡含水率曲線

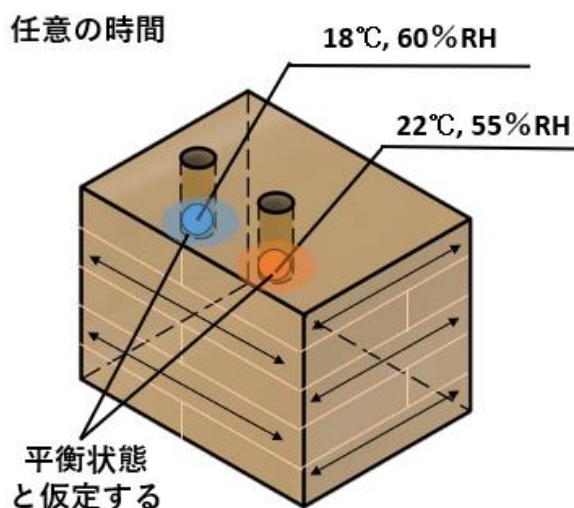


図 2.3 本計測方法の概要

## 第2章 内部含水率計測方法の検討

平衡含水率曲線の適用には、平衡含水率曲線を近似式化した齋藤ら<sup>2-3)</sup>によって提案されている式 2.1 を用いる。

$$EMC_1 = \frac{a+bx+cx^2+dy+ey^2+fy^3}{1+gx+hy+iy^2+jy^3} \quad (2.1)$$

$EMC_1$  : 平衡含水率 (%)

$x$  : 温度 (°C) ( $1 \leq x \leq 90$ )

$y$  : 相対湿度 (%) ( $5 \leq y \leq 99.5$ )

$a$  : 1.33

$b$  :  $-8.27 \times 10^{-3}$

$c$  :  $-6.40 \times 10^{-5}$

$d$  :  $1.10 \times 10^{-1}$

$e$  :  $-2.28 \times 10^3$

$f$  :  $1.47 \times 10^{-5}$

$g$  :  $-1.16 \times 10^{-5}$

$h$  :  $-2.42 \times 10^{-2}$

$i$  :  $2.54 \times 10^{-4}$

$j$  :  $-9.85 \times 10^{-7}$

本計測方法は、使用する温湿度センサの計測可能範囲により計測できる最大含水率が異なるが、 $-20^\circ\text{C}$ 、 $99.5\%RH$  まで計測可能な温湿度センサであった場合の計測可能な最大含水率は  $31.62\%$  である。そのため本計測方法では木材が繊維飽和点付近に到達しているかどうかの判定は可能だがそれ以上の含水率は計測することができない。

また、2.1 式は温度の対応範囲が  $1^\circ\text{C}$  以上となっており、氷点下での計測が可能であるか検討が必要である。さらに本計測方法は木材の仮道管の通り方に大きく影響を受けると考えられるため、樹種や比重に計測値が大きく影響を受ける可能性がある。

温湿度センサの埋め込み方に関して、一定の大きさの温湿度センサを木材内に埋め込む際には、計測用の穴を設けその穴から水分が入ってこないように塞ぐ必要がある。計測穴を木材の繊維方向に多数設けた場合、その木材の実際の水分移動を阻害してしまう恐れがあるため、どの程度の間隔で穴を設けられるのか検討が必要である。また、計測穴を塞ぐ際にも CLT のような繊維方向が異なるラミナが積層接着されている材料だと、計測したい層以外からの水分流入を防ぐ必要があり、計測穴の塞ぎ方の検討も必要である。

このことより、本計測方法を用いるにあたって、以下の項目について検討が必要と考え、2.2 節以降の実験を実施した。

- ① 計測された内部含水率と全乾法含水率とが同様になる範囲またはその補正方法
- ② 計測値に影響を与える要因 (特に樹種)
- ③ 氷点下での計測可否 (2.1 式の対応範囲が  $1^\circ\text{C}$  以上のため)
- ④ 温湿度センサの埋め込み方
- ⑤ 木材の繊維方向に計測点を増やした際の計測値への影響

2.1.3. 温湿度センサとその設置方法

図 2.4 に本研究で検討する温湿度センサを示す。本研究で検討に用いた温湿度センサは、ボタン型温湿度センサ「ハイグロクロン」(以下、HY) と、マルチ温湿度ロガー「MSHTDL-16」(以下、MS) の2種類である。HY は、計測部保護のために3Dプリンターで作製したキャップを装着した状態で計測した。表 2.1 に各センサの概要を示す。また、図 2.5 に温湿度センサ設置の手順を示す。なお本研究での HY の計測値は、すべて専用ソフト(Rh Manager)上で湿度補正をした値を示す。この湿度補正は静電容量式湿度センサのヒステリシスを補正するためのものである。



図 2.4 温湿度センサ

表 2.1 各センサの概要

	ハイグロクロン HY	MSHTDL-16 MS
温度計測範囲	-20°C~80°C	-40°C~105°C
相対湿度計測可能範囲	0%RH~95%RH	0%RH~100%RH
測定精度	温度：±0.8°C 相対湿度：±5%RH	温度：±0.2°C 相対湿度：±1.5%RH
測定間隔	1秒~180分	2~3600秒
測定チャンネル	1	16
記憶媒体	センサ本体	SDカード
電源	3Vリチウム金属電池	USB電源、外部電源
寸法、質量	直径17mm×厚さ6mm、3.3g	136×61×22mm、130g
製品寿命	約3年	-
計測記憶数	連続4096データ	-

※HY は普通モード計測時の値

## 第2章 内部含水率計測方法の検討




1	計測点の穴あけ ハイグロクロン：φ22 MSHTDL-16のみ：φ6	
2	温湿度センサの設置	
3	計測層以外を塞ぐ ウレタン棒と配管用パテ	

図 2.5 温湿度センサ設置の手順



## 第2章 内部含水率計測方法の検討

### 2.1.4. 各実験の目的と概要

2.2 節からは 2.1.1 で述べた温湿度センサを用いた含水率計測方法に関する検討をした実験について詳細を述べる。ここでは、各実験の目的と簡単な概要をまとめる。

### 2.2. 計測穴を塞ぐ栓に関する実験

本計測方法は温湿度センサ埋め込みのために、例えばハイグロクロンを用いた場合であれば直径 22mm の穴を設ける必要がある。本実験では温湿度センサを埋め込んだ後、その計測穴からの湿度による水分流入を防ぐための栓に関して、各材料でどの程度水分流入を防ぐことができるのか検討をした。

### 2.3. スギ・ヒノキ・ベイマツ製材での含水率計測実験

異なる樹種、試験体寸法、外部環境下において本計測方法で得られる内部含水率と全乾法含水率とを比較し、本計測方法で平衡状態と仮定している範囲や氷点下での計測可否を明らかにするとともに、計測値の精度に関して検討した。

### 2.4.と 2.5. スギ CLT での含水率計測実験

CLT の場合、本計測方法で計測できるのか、乾湿繰り返し環境下においた CLT で確認した。また、同じラミナ内の繊維方向に複数の計測点を設けることによる影響の検討をした。なお、2.4 節と 2.5 節は同じ試験体で外部環境を調整する機器を変えた場合の実験となっている。

## 2.2. 計測穴を塞ぐ栓に関する実験

### 2.2.1. 試験概要

写真 2.1 に試験写真を示す。直径 22mm のアクリルパイプ内に HY を設置しその両端をゴム（天然ゴム）、シリコン、配管用パテ、ヒノキ棒、ヒノキ棒+配管用パテの 5 種類の栓を用いて塞いだ試験体を用意した。また、比較用に両端を塞がない試験体で計測した。試験体を底部に水を張った密封容器の中に置き、試験体の外部をインキュベータ（福島工業株式会社：FUM-133I）で 40℃にしたときの、アクリルパイプ内の温湿度変動を計測した。ハイグロクロンは 3 時間間隔で 3 日間の計測とした。



写真 2.1 試験体の写真

2.2.2. 実験結果

図 2.6 に各試験体の計測結果を示す。温度は栓の材質による計測値の差はなかったが、相対湿度に差が生じた。栓をしていない試験体は計測開始後急激に含水率が上昇し、ヒノキとヒノキ+パテはそれに遅れて相対湿度が上昇、3 日経過後にはほぼ同じ湿度状況となった。それに対し、ゴム（天然ゴム）、シリコン、パテはほとんど湿度上昇がなく、この3 材質であれば計測穴からの水分流入を防ぐことが可能であることがわかった。これを踏まえて本計測方法では、最も相対湿度の変動が少なかったゴム（屋外計測のため耐候性のあるウレタンゴムとした）にパテを巻いたものを栓として使用することで、水分流入を防ぎ、かつ、計測穴付近の木材の膨潤収縮に対応できるようにすることとした。

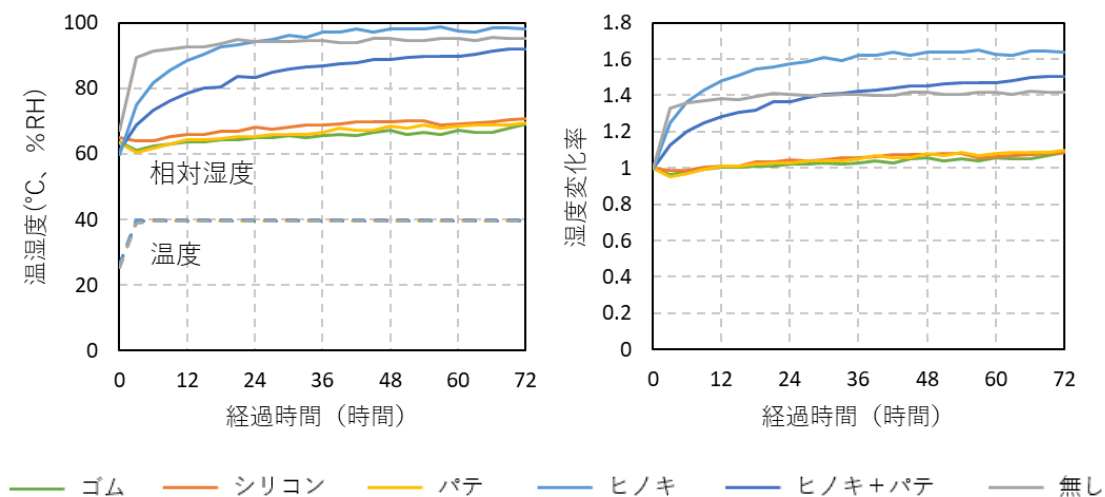


図 2.6 計測結果

## 2.3. スギ・ヒノキ・ベイマツ製材での含水率計測実験

### 2.3.1. 試験体概要

図 2.7 に試験体概要を、表 2.2 に各環境で計測した試験体数を示す。寸法は 50, 75, 100mm 立方の 3 種類とした。樹種はスギ、ヒノキ、ベイマツ（ベイマツは 50mm 立方のみ）で、試験体内に大きな節や割れを含まないように採材した。温湿度センサを試験体中央に埋め込むため、直径 22mm の穴を設けた。材内部に埋め込む温湿度センサは HY とし、計測部保護のため 3D プリンターで作製したキャップを装着した。図 2.8 に使用した温湿度センサ (HY) を示す。温湿度センサ設置後計測穴からの水分流入防止のため、ウレタンゴムと配管用シー ルパテ (AP-1000-I) を用いて穴を塞いだ。各環境の計測で割れが生じた試験体は、次の計測では新しい試験体に交換した。また過半数の試験体で割れが生じていた場合は、全ての試験体を交換した。HY は 1 時間間隔の計測とし、1 日に 4 回試験体重量の計測を、1 日に 1 回試験体木口の割れ観察を、HY の計測と同じタイミングでおこなった。また試験体は恒温恒湿器内に写真 2.2 のように設置した。

試験体の外部環境は表 2.3 に示す 5 種類とした。外部環境の変動には恒温恒湿器 (エスベック : LHU-114) を用いた。環境 1 は吸湿状態、環境 2 は放湿状態、環境 3 は湿度のみ変動させた場合、環境 4 は温湿度どちらも変動させた場合の乾湿繰り返し状態とし、環境 5 は温度を氷点下に下げた状態として検討した。1 度の計測を 4 日間とし、計測開始前は 20℃ 65% で 2 日間試験体を養生した。恒温恒湿器の制御範囲の関係で、0℃ 以下では湿度制御をおこなえていない。

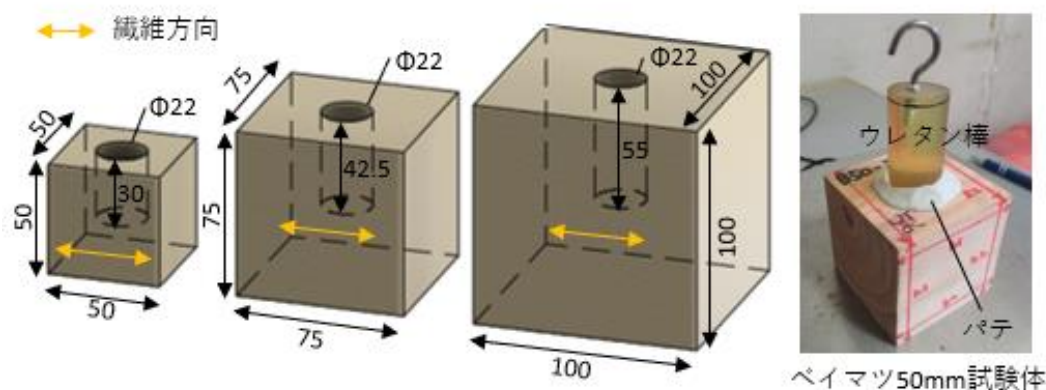


図 2.7 試験体概要 単位 : mm

表 2.2 1 度に計測した試験体数 単位 : mm

	50 × 50 × 50	75 × 75 × 75	100 × 100 × 100
スギ	3	3	2
ヒノキ	3	3	2
ベイマツ	3		

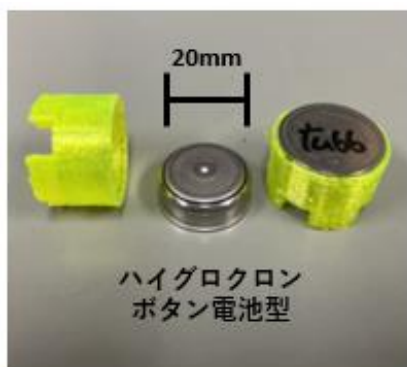


図 2.8 使用した温湿度センサ

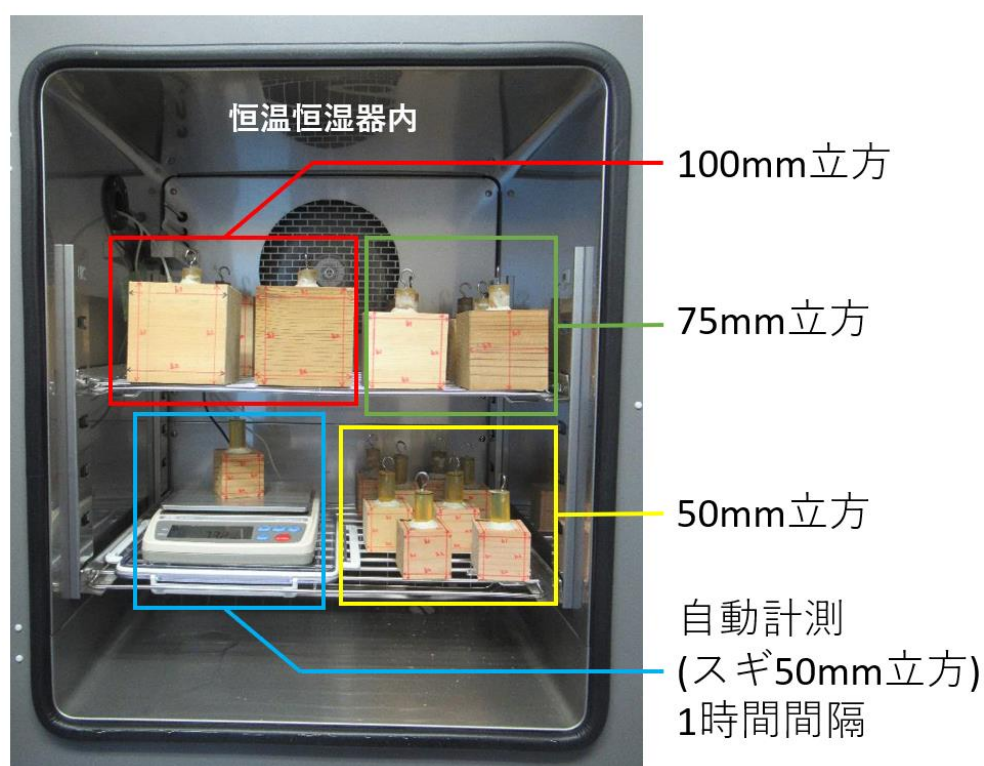


写真 2.2 試験体の設置写真

表 2.3 試験体の外部環境

	計測前	1日目	2日目	3日目	4日目	
環境1	20°C65%	20°C95%	⇒	⇒	20°C65%	吸湿状態
環境2	20°C65%	20°C40%	⇒	⇒	20°C65%	放湿状態
環境3	20°C65%	20°C95%	20°C65%	20°C40%	20°C65%	温度一定の乾湿繰り返し
環境4	20°C65%	40°C95%	20°C65%	0°C	20°C65%	温湿度変動乾湿繰り返し
環境5	20°C65%	-5°C	⇒	⇒	⇒	氷点下

2.3.2. 各サイクルでの材内部計測値

【吸湿・放湿環境】

図 2.9 に吸湿環境での材内部で計測していた温湿度とそこから算出した内部含水率の推移を示す。また図 2.10 に放湿環境での材内部温湿度と含水率を示す。温湿度センサ（おんどとり：RTR-503）で計測した恒温恒湿器内部の相対湿度に対し、遅れて材内部相対湿度が変動する様子が計測できていた。

また図 2.11 に吸湿、放湿状態で3日経過した時点の含水率（ $M_3$ ）と計測開始時の含水率（ $M_0$ ）との差と木口から計測点までの距離との関係を示す。吸湿、放湿状態のどちらも木口からの距離が近くなるほど $M_3 - M_0$ が大きくなっており、本計測方法で繊維方向における含水率分布の計測が可能であることが示唆された。また 50mm 立方試験体に関して、スギに対し、ヒノキとベイマツの変動が小さく樹種によって含水率変動の速度が異なることがわかった。

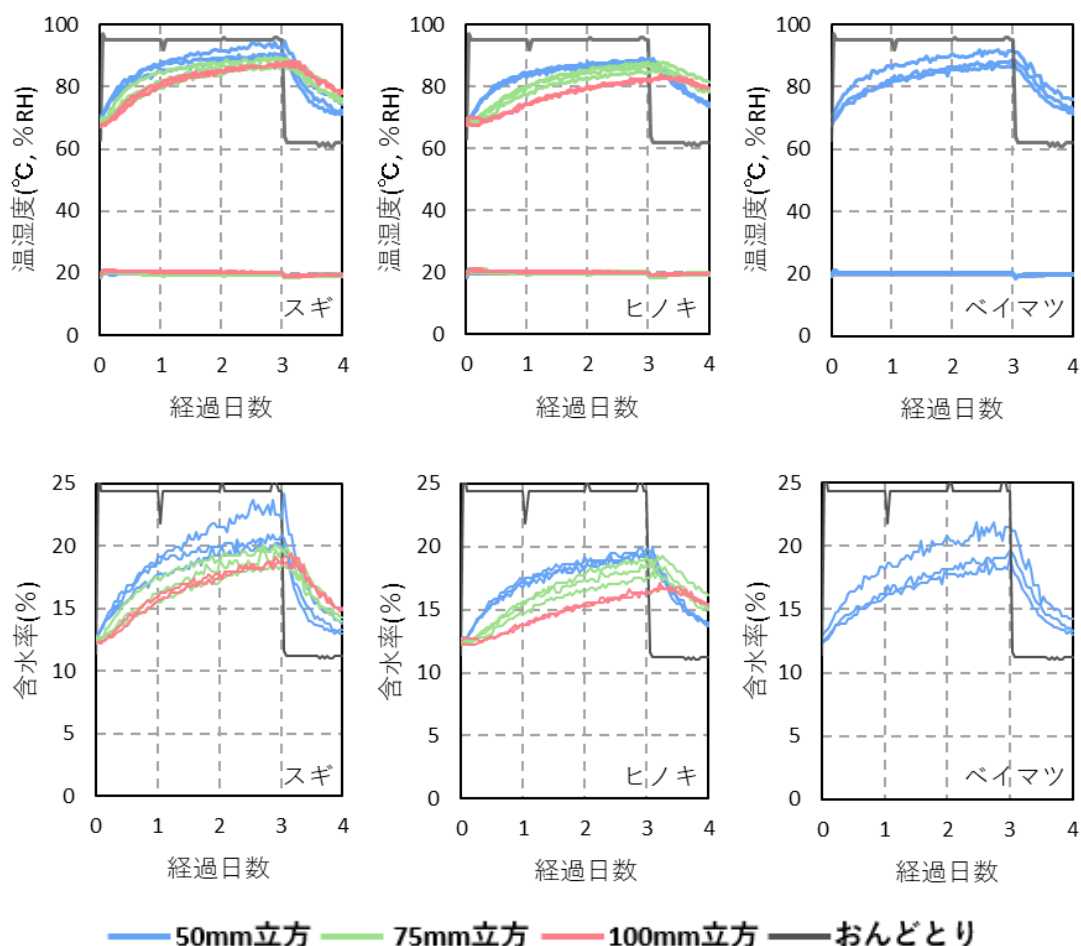


図 2.9 吸湿環境の材内部計測値と含水率

第2章 内部含水率計測方法の検討

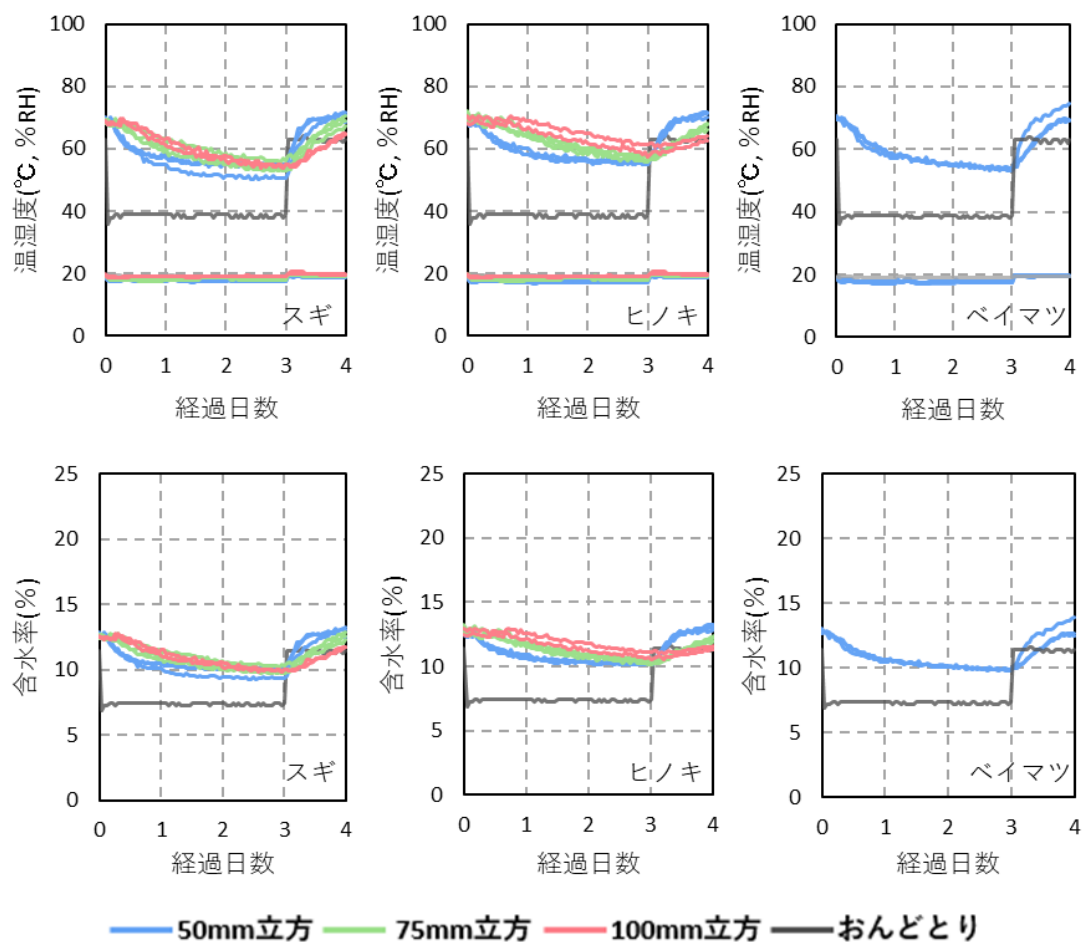


図 2.10 放湿環境の材内部計測値と含水率

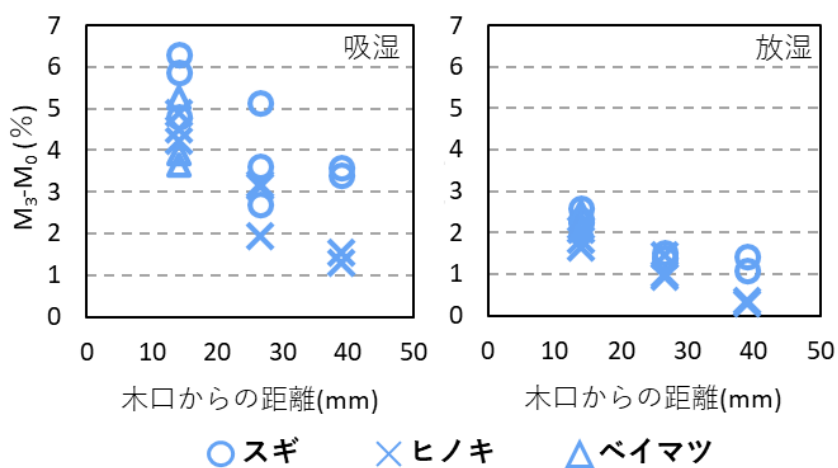


図 2.11 木口から計測点までの距離と含水率の関係

### 【1日間隔で外部環境を変動させた場合】

図 2.12 に温度一定乾湿繰り返し環境の材内部で計測していた温湿度とそこから算出した内部含水率の推移を示す。また図 2.13 に温湿度を変動させた乾湿繰り返し環境の材内部温湿度と含水率を示す。どちらの環境でも吸・放湿環境時と同様、恒温恒湿器内部の相対湿度に対し、遅れて材内部相対湿度が変動する様子が計測できていた。また、今回実験した乾湿繰り返し環境は1日で外部環境を変動させたため、内部含水率の上昇は小さく、一番変動の大きかったスギ 50mm 立方の試験体でも最大含水率は20%以下で、含水率変動は5%であった。また温湿度どちらも変動させた乾湿繰り返し環境では、外部温湿度を変動させるタイミングで材内部の相対湿度計測値が急激に変動していた(図 2.13 中赤丸で示している部分)。本実験の外部環境は温湿度を一度に変動させた場合、温度が先に目標に到達したのちに相対湿度の変動が始まる。そのため1日経過時点での材内部の含水率変動を考えると、本来であれば急激に上昇するはずだが、実際に計測されていた急激な含水率変動は急激に減少している。この理由は明確には不明であるが、使用しているセンサの特性によってこのように計測されたのではないかと考えている。材内部の温度に関しては、外部温度の変動とほぼ同じタイミングで変動していた。



第2章 内部含水率計測方法の検討

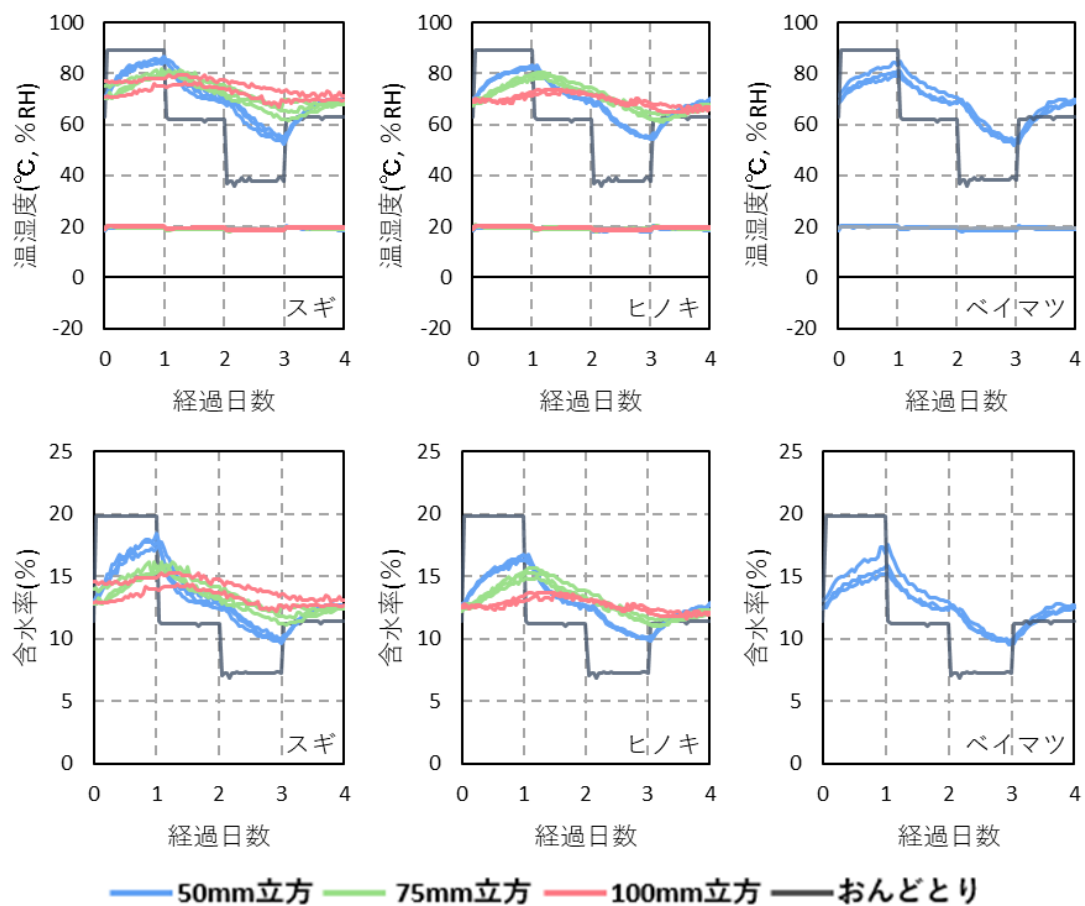


図 2.12 温度一定乾湿繰り返し環境の材内部温湿度と含水率

第2章 内部含水率計測方法の検討

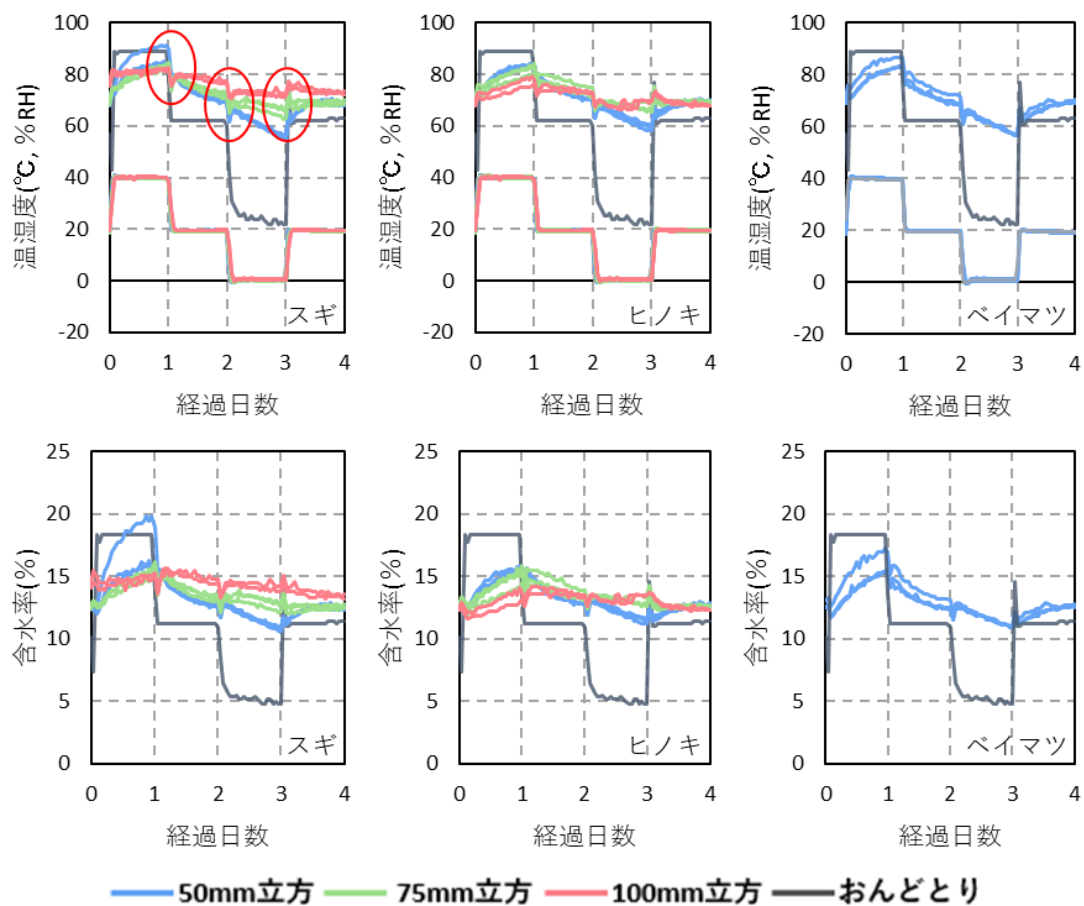


図 2.13 温湿度を変動させた乾湿繰り返し環境の材内部温湿度と含水率

【氷点下】

図 2.14 に氷点下環境の材内部で計測していた温湿度及びそこから算出した内部含水率の推移を示す。恒温恒湿器の制御範囲の制限により、氷点下では相対湿度の制御をおこなえなかった。また、重量計測のタイミングで扉を開けるため、温度が目標の-5°Cに到達していた時間は少なく、日中は-1°C~3°Cの間を推移していた。

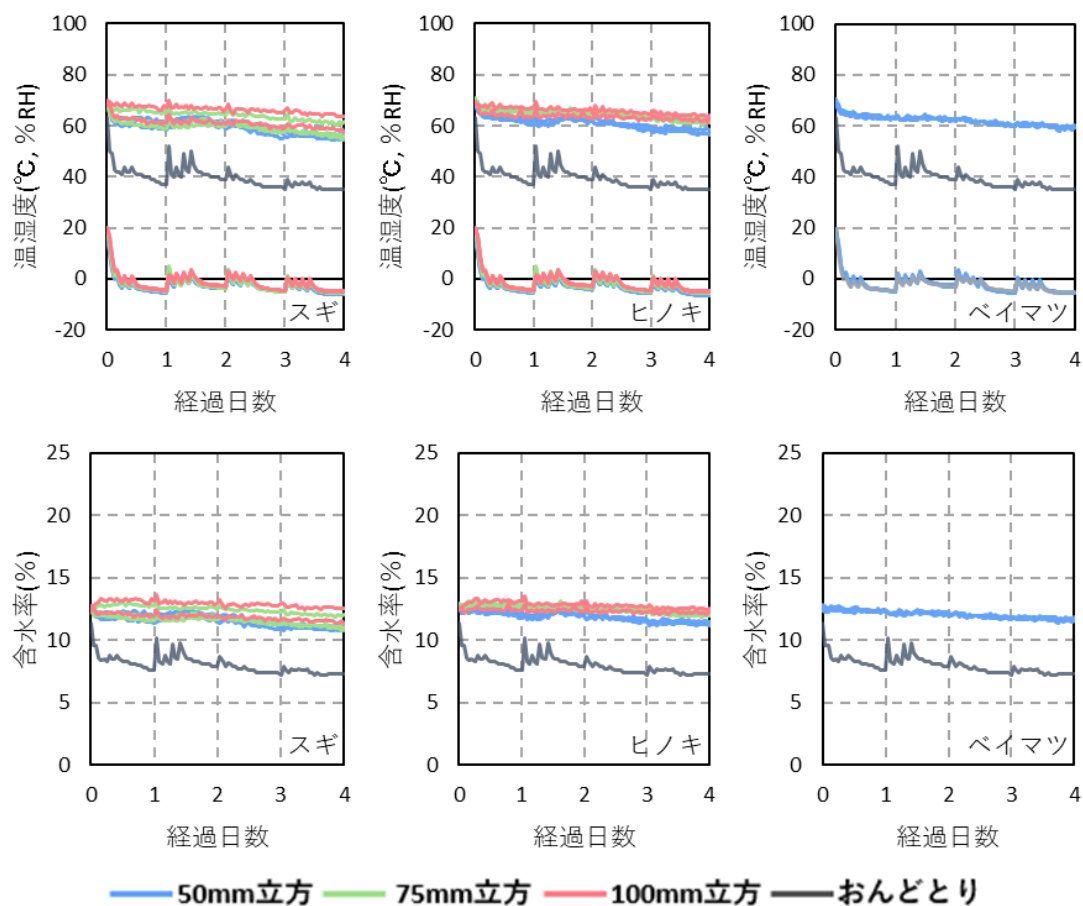


図 2.14 氷点下環境の材内部温湿度と含水率

### 2.3.3. 計測した内部含水率と全乾法含水率との比較

#### 【吸湿・放湿環境】

図 2.15 にスギ試験体の吸湿環境で計測した材内部含水率と全乾法で求めた含水率(以下、全乾法含水率)の推移を、図 2.16 にヒノキ試験体の推移を、図 2.17 にベイマツ試験体の推移を示す。また図 2.18 にスギ試験体の放湿環境で計測した材内部含水率と全乾法含水率の推移を、図 2.19 にヒノキ試験体の推移を、図 2.20 にベイマツ試験体の推移を示す。それぞれのグラフに計測終了時の試験体木口の写真を示している。全乾法含水率は式 2.2 に従って算出した。

$$MC_a = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (2.2)$$

$MC_a$  : 全乾法含水率 (%)

$W_1$  : 計測時の重量 (g)

$W_0$  : 全乾時の重量 (g)

吸湿状態では、内部含水率と全乾法含水率との間に最大 7%程度の差が見られた。特に高含水率になるほど内部含水率が大きくなる傾向があった。放湿状態では、全ての樹種で内部含水率と全乾法含水率とがほぼ一致して推移していた。本来であれば吸湿状態の木材において、本計測方法で計測している内部含水率は局所的な値のため、平均的な値となっている全乾法含水率より低い値を示すと考えられる。しかし、今回の結果は逆の結果となっている。これは吸湿過程で実際に木材に吸着する水分量に対して、仮道管を通過して計測穴を満たす空気に直接流入する水分量が多くなっていることが原因ではないかと考えている。写真 2.3 に放湿環境のヒノキ試験体の内、割れが生じていた試験体の木口の写真のみ拡大して示す。吸・放湿環境のどちらも、ほとんどの試験体で計測中に木口の割れは生じていなかったが、放湿環境のヒノキ試験体のみ試験終了後、木口に割れが生じていた。しかし、割れが生じたことによる計測値の変動はほとんどなく、図に示すような割れであれば計測に問題は生じないと考えている。

第2章 内部含水率計測方法の検討

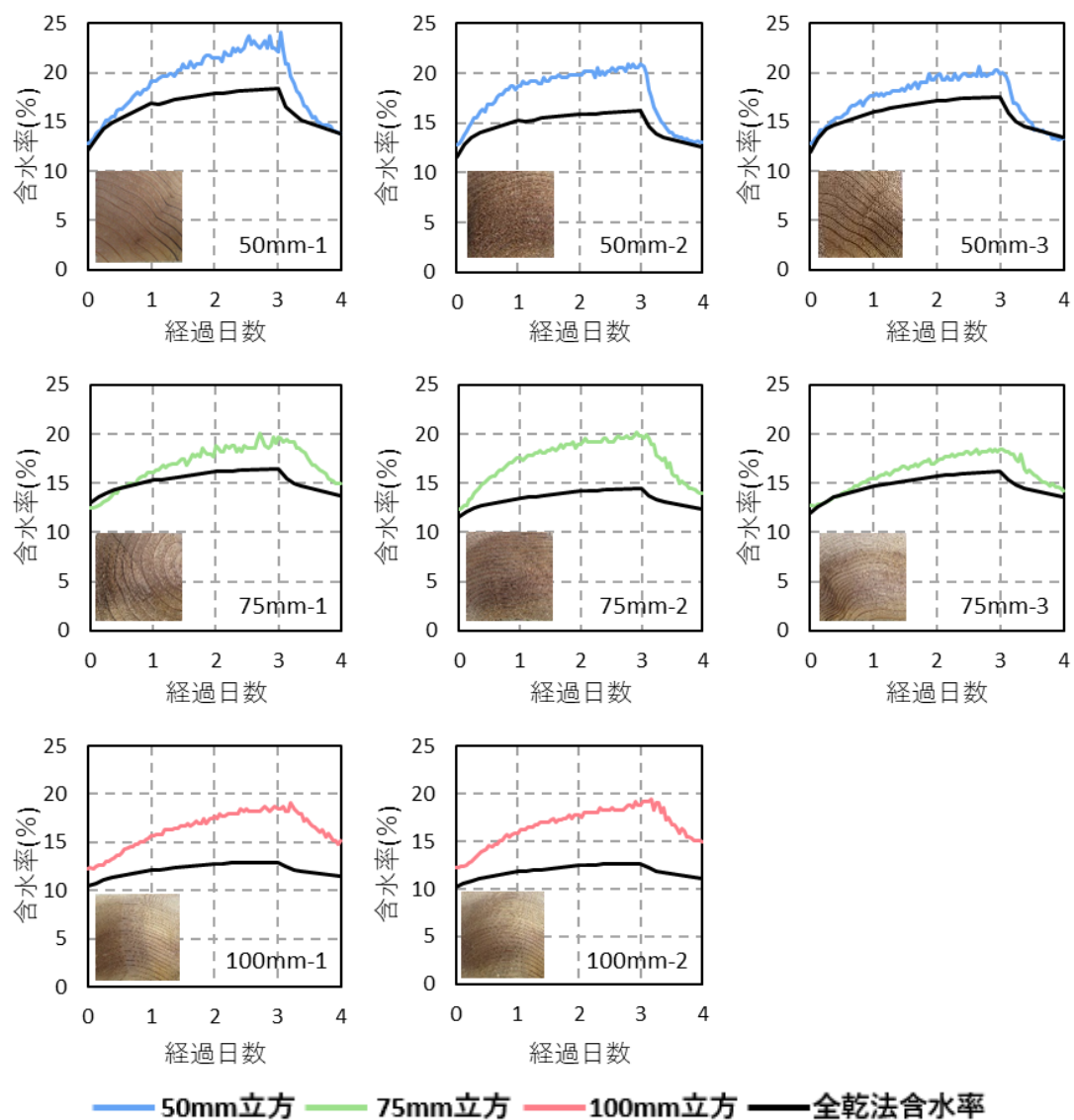


図 2.15 吸湿環境の材内部含水率と全乾法含水率（スギ）

第2章 内部含水率計測方法の検討

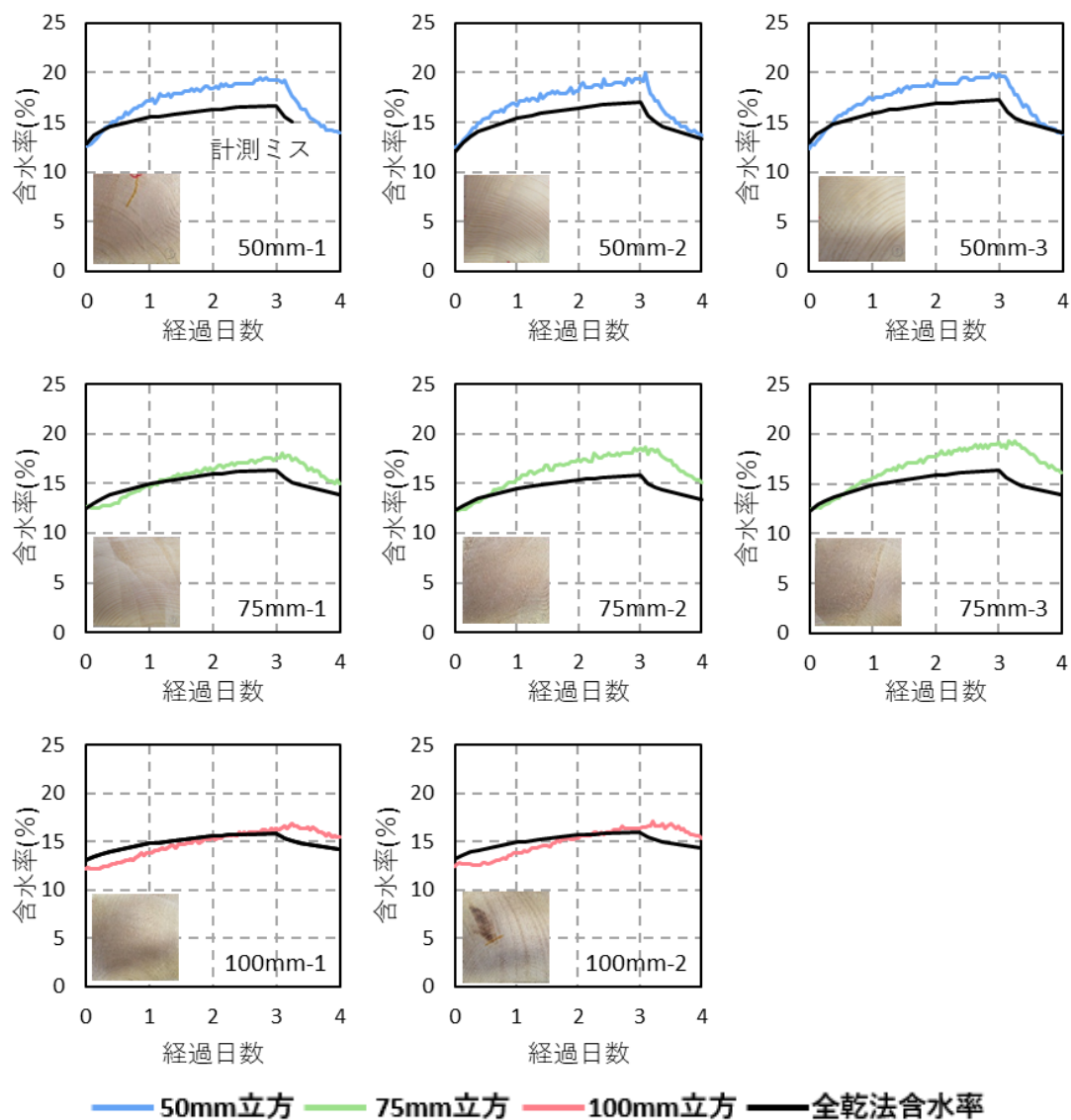


図 2.16 吸湿環境の材内部含水率と全乾法含水率 (ヒノキ)

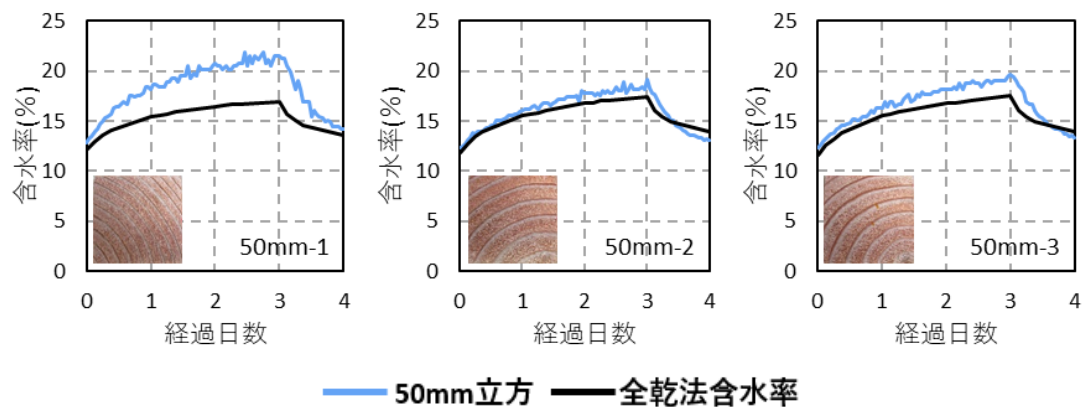


図 2.17 吸湿環境の材内部含水率と全乾法含水率 (ベイマツ)

第2章 内部含水率計測方法の検討

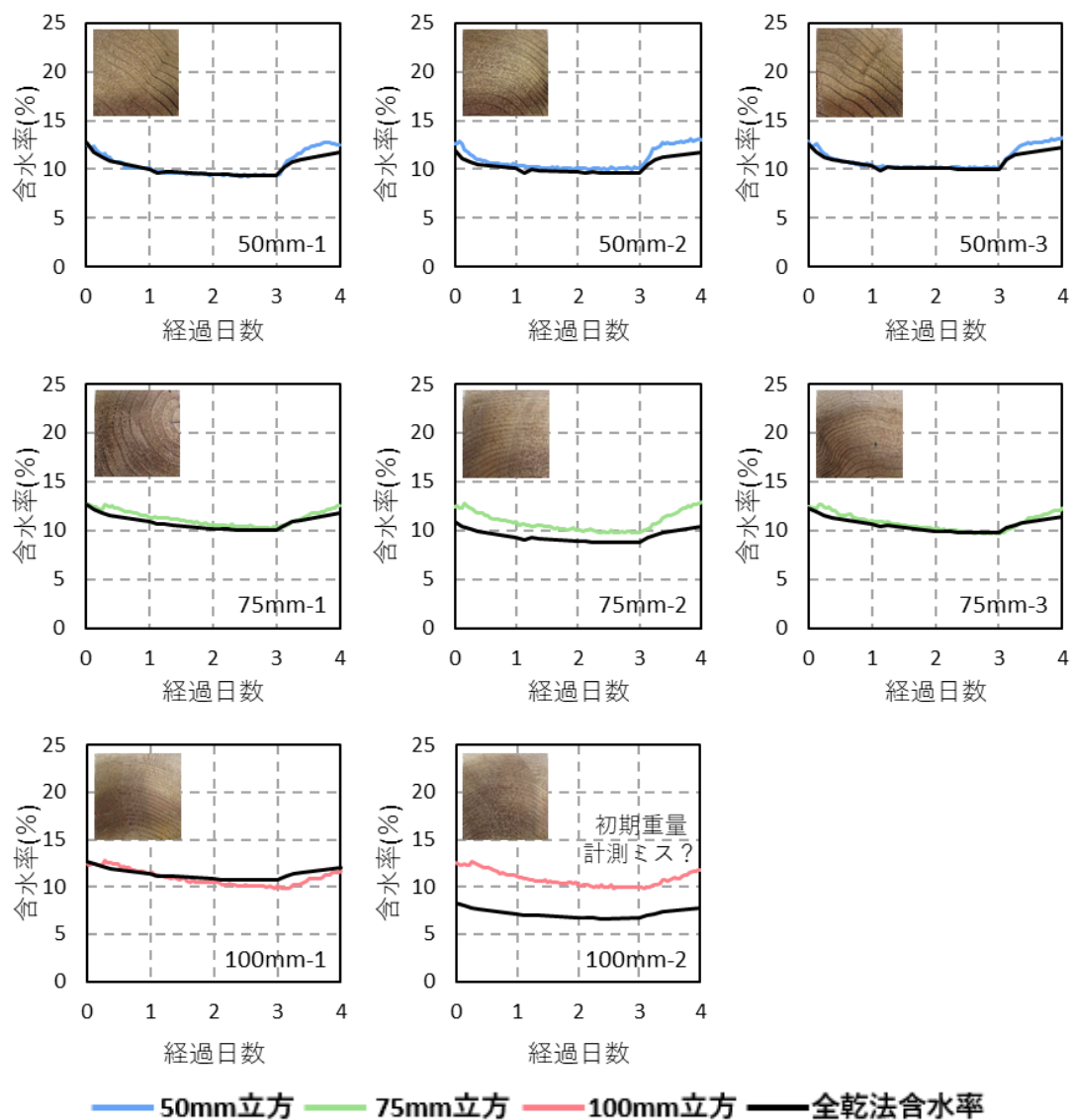


図 2.18 放湿環境の材内部含水率と全乾法含水率の推移 (スギ)

第2章 内部含水率計測方法の検討

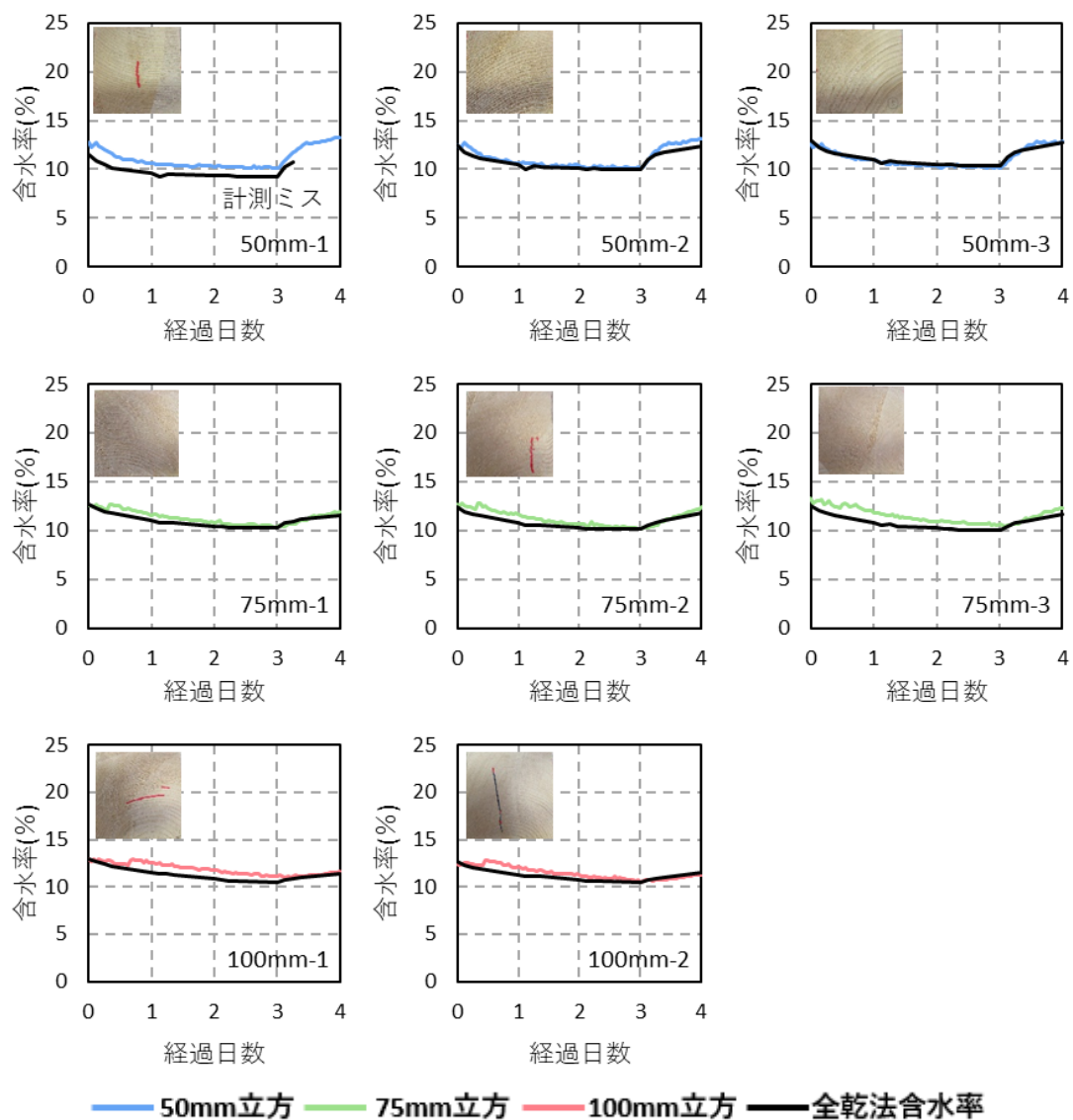


図 2.19 放湿環境の材内部含水率と全乾法含水率の推移（ヒノキ）

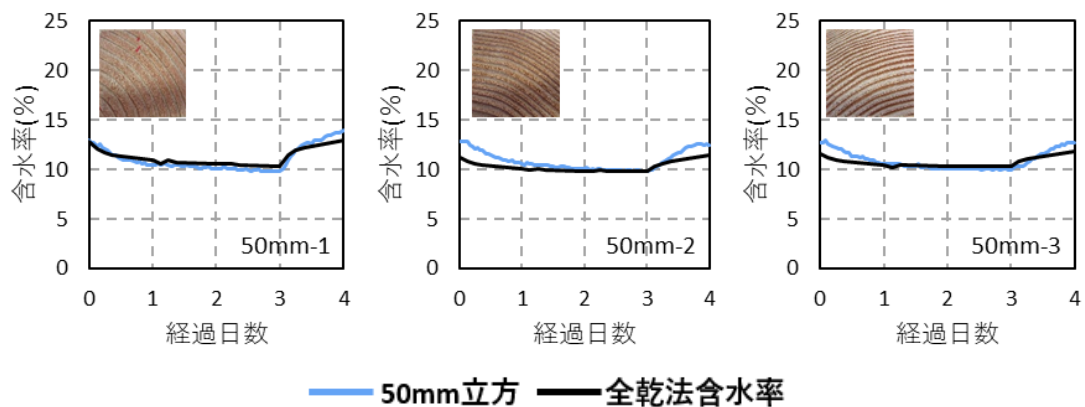


図 2.20 放湿環境の材内部含水率と全乾法含水率の推移（ベイマツ）



## 第2章 内部含水率計測方法の検討

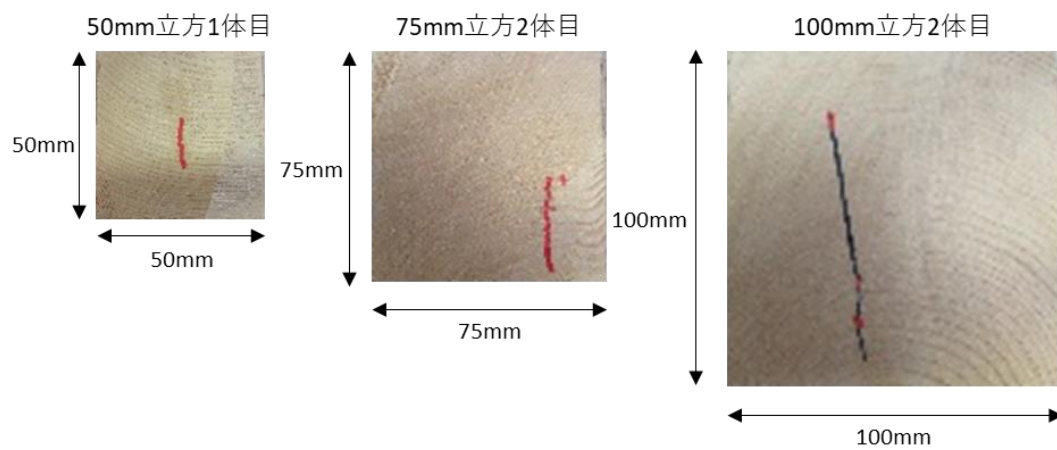


写真 2.3 放湿環境ヒノキ試験体の木口面の割れ

## 第2章 内部含水率計測方法の検討

図 2.21 に吸湿環境の内部含水率と全乾法含水率との差の推移を示す。すべての樹種で計測 3 日目の内部含水率と全乾法含水率との差が最も大きく、特にスギは他樹種に比べてその差が大きかった。試験体寸法に関して、スギは 100mm 立方の差が最も大きかったが、ヒノキでは一番小さくなっていた。また、ベイマツ試験体のように同じ試験体寸法でもその差にばらつきがあった。同樹種であっても繊維の並び方などの要因から仮道管を通る水分量に違いが生じているのではないかと考えている。なお、本環境で使用したベイマツの全乾比重はそれぞれ 0.37、0.38、0.38 であり、比重のばらつきは少なかった。

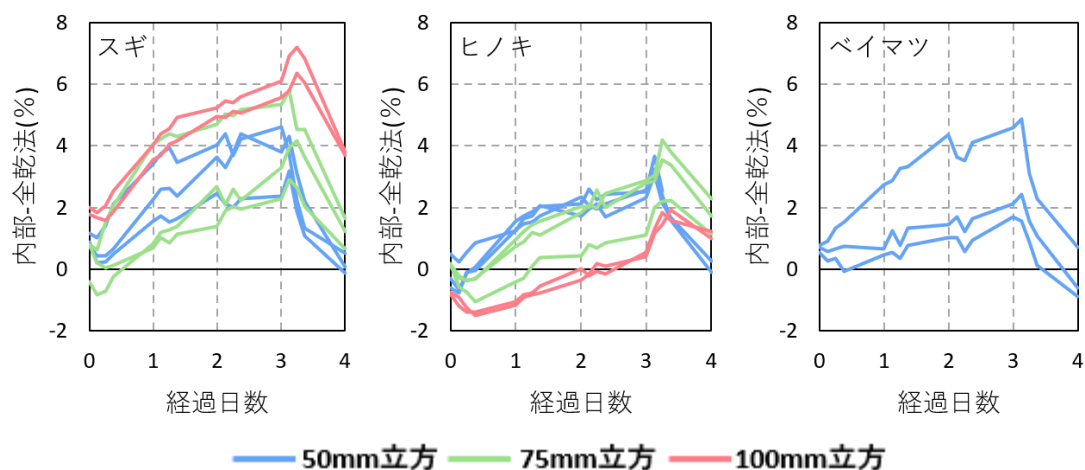


図 2.21 吸湿環境の内部含水率と全乾法含水率との差の推移

## 第2章 内部含水率計測方法の検討

図 2.22 に吸湿環境 3 日目までの各試験体の初期含水率 ( $M_0$ ) に対する各時刻の含水率 ( $M_t$ ) の差を示す。スギとヒノキに関して、50mm 立方試験体の全乾法含水率の推移をみると、初期の傾きは 50mm 立方内部含水率とほぼ同じだが、最終的に 3 日経過後に到達する含水率は、100mm 立方試験体の内部含水率に近い値になっていた。

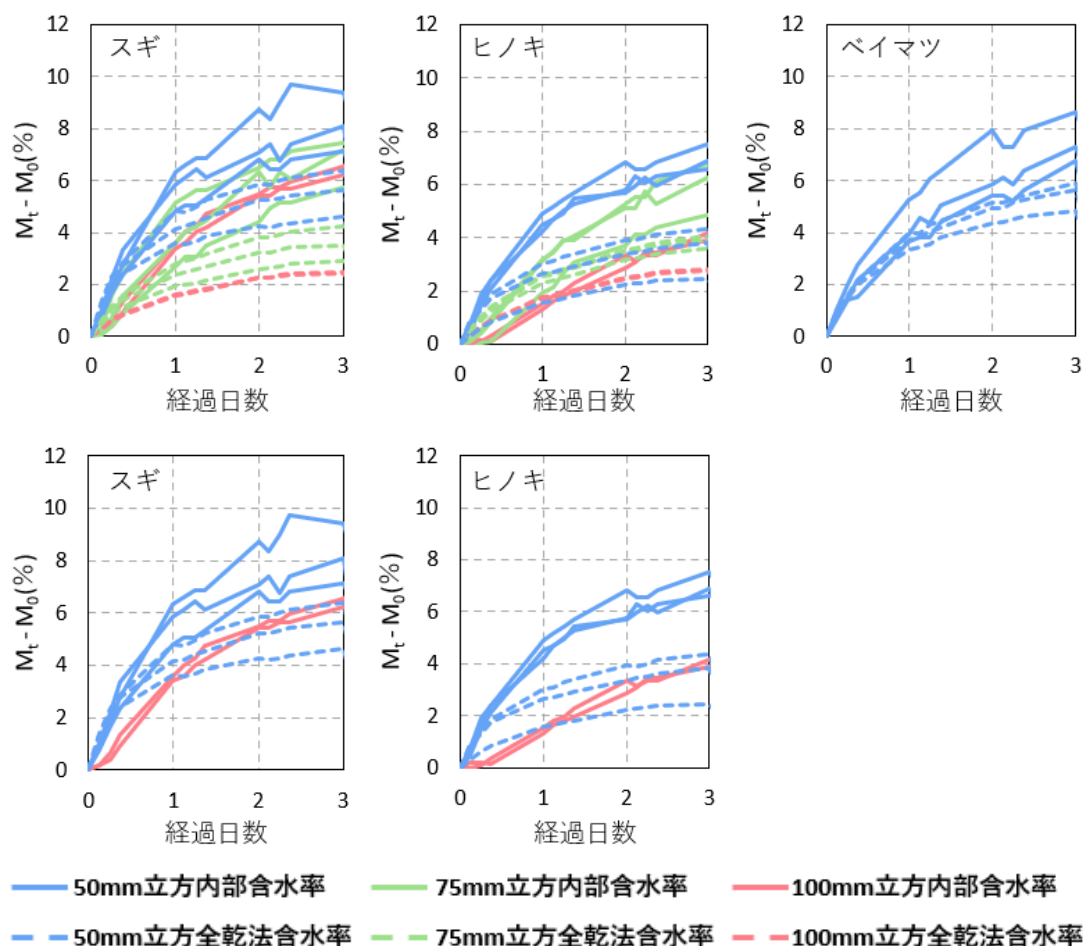


図 2.22 初期含水率に対する各時刻の含水率の差分 (吸湿環境)

## 第2章 内部含水率計測方法の検討

図 2.23 に吸・放湿環境の内部含水率と全乾法含水率との関係を示す。樹種・試験体寸法ごとに  $y$  切片が 0 の線形近似をおこなうと、高い相関が得られた。本計測方法の内部含水率は樹種・試験体サイズに関わらず含水率が高くなるほど全乾法含水率よりも高い値を示す。実際の含水率計測を考えると、本計測方法の内部含水率計測値は実際の内部含水率よりも早く高含水率に到達するため安全側の結果と言える。

この差を補正する場合には、内部含水率を計測点の周囲 50mm 立方の全乾法含水率であると定義すると、本実験の 50mm 立方試験体結果より得た線形近似式を適用することで可能であると考えている。しかし、本実験では含水率が 25%を超える場合や、10%以下の場合での計測を実施できていないため、より吸・放湿期間の長い実験で本補正式の正確性を高める必要があると考える。

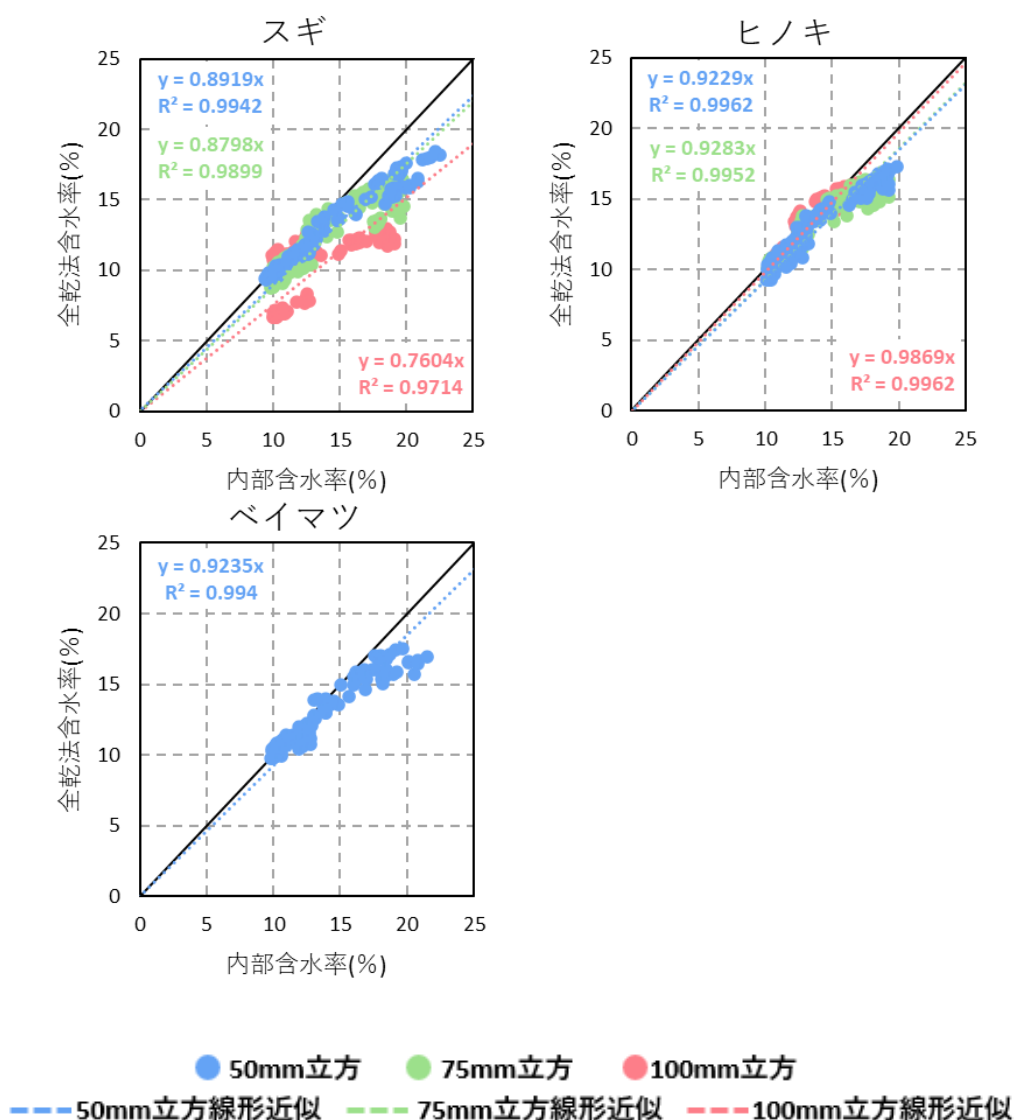


図 2.23 吸・放湿環境の内部含水率と全乾法含水率との関係

## 第2章 内部含水率計測方法の検討

### 【1日間隔で外部環境を変動させた場合】

図 2.24 にスギ試験体の温度一定乾湿繰り返し環境で計測した材内部含水率と全乾法含水率の推移を、図 2.25 にヒノキ試験体の推移を、図 2.26 にベイマツ試験体の推移を示す。また図 2.27 にスギ試験体の温湿度を変動させた乾湿繰り返し環境で計測した材内部含水率と全乾法含水率の推移を、図 2.28 にヒノキ試験体の推移を、図 2.29 にベイマツ試験体の推移を示す。それぞれのグラフに計測終了時の試験体木口の写真を示している。

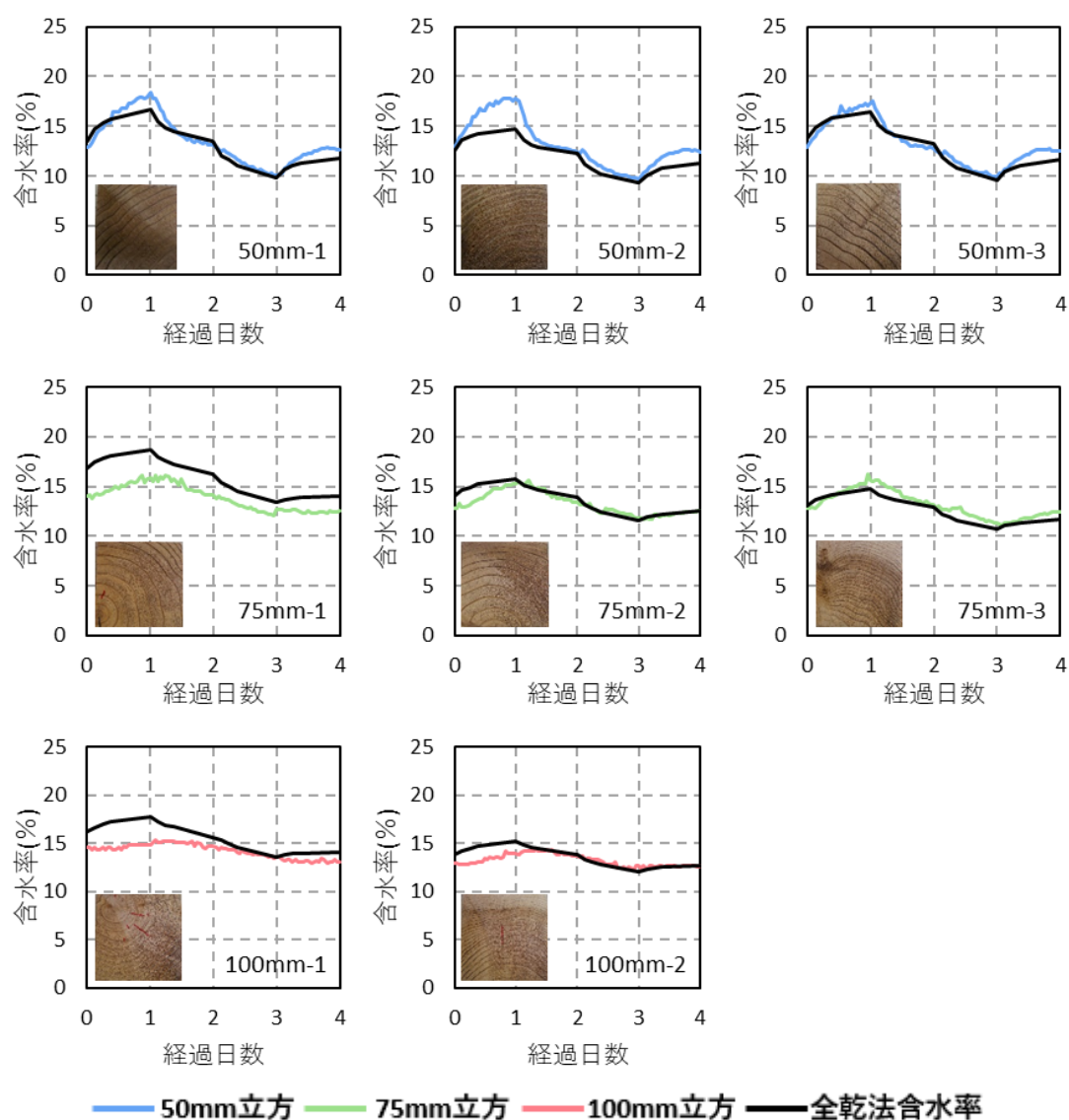


図 2.24 温度一定乾湿繰り返し環境の内部含水率と全乾法含水率の推移 (スギ)

第2章 内部含水率計測方法の検討

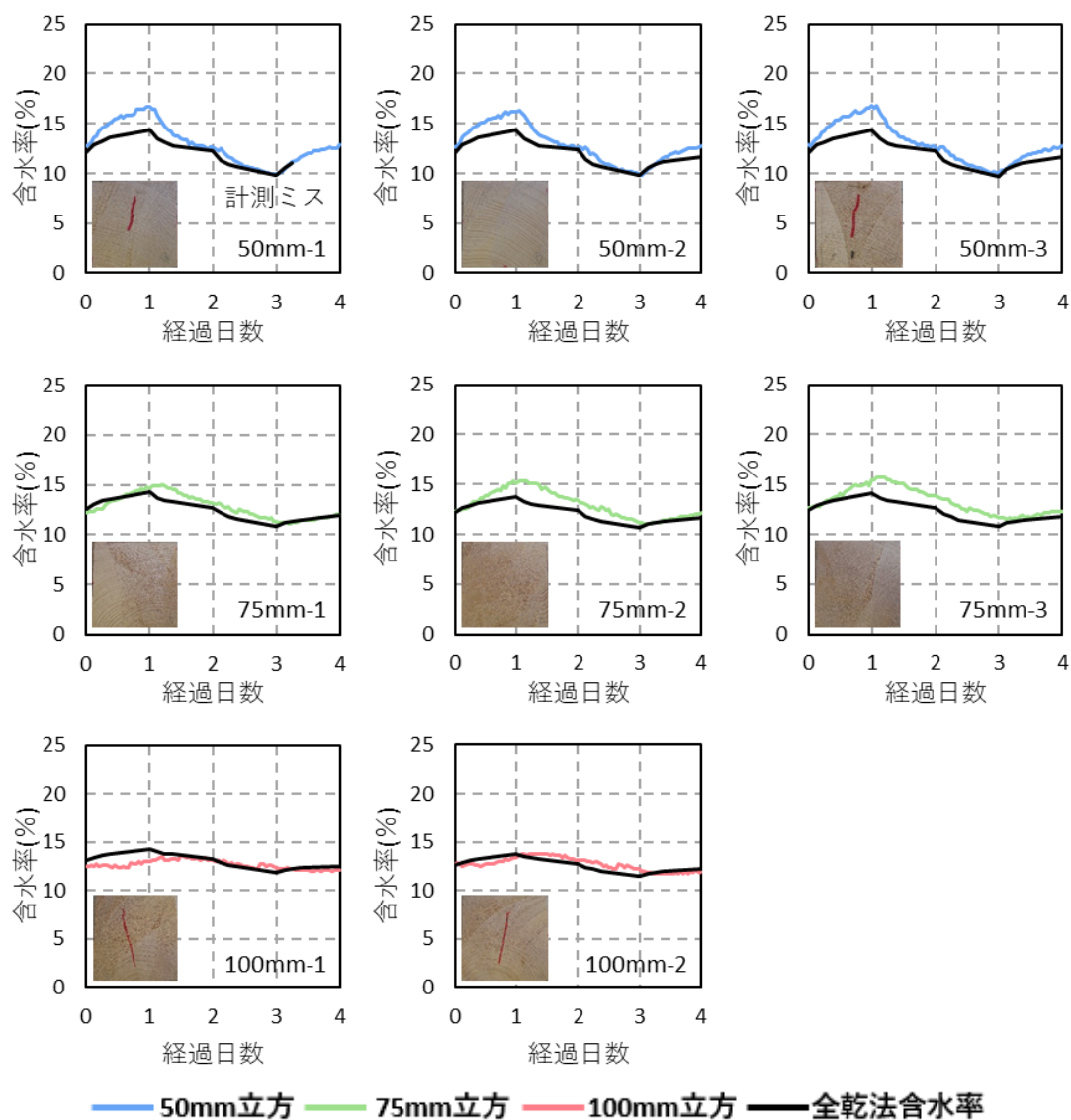


図 2.25 温度一定乾湿繰り返し環境の内部含水率と全乾法含水率の推移（ヒノキ）

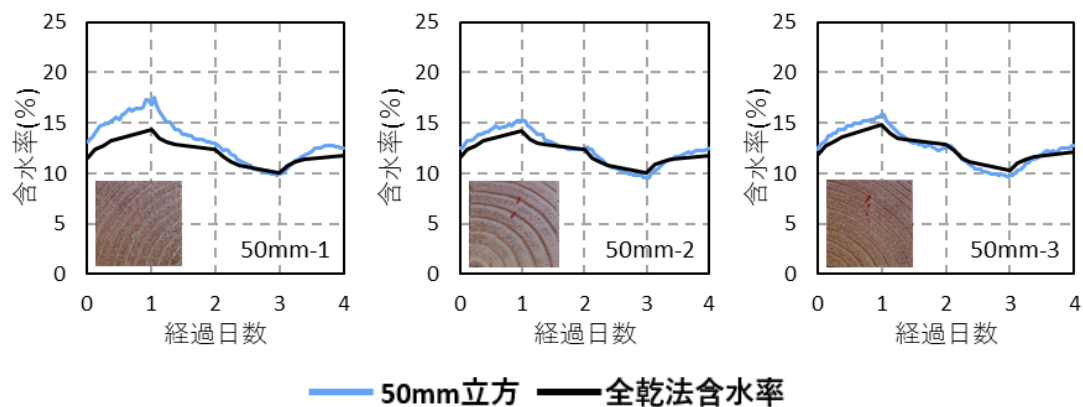


図 2.26 温度一定乾湿繰り返し環境の内部含水率と全乾法含水率の推移（ベイマツ）

第2章 内部含水率計測方法の検討

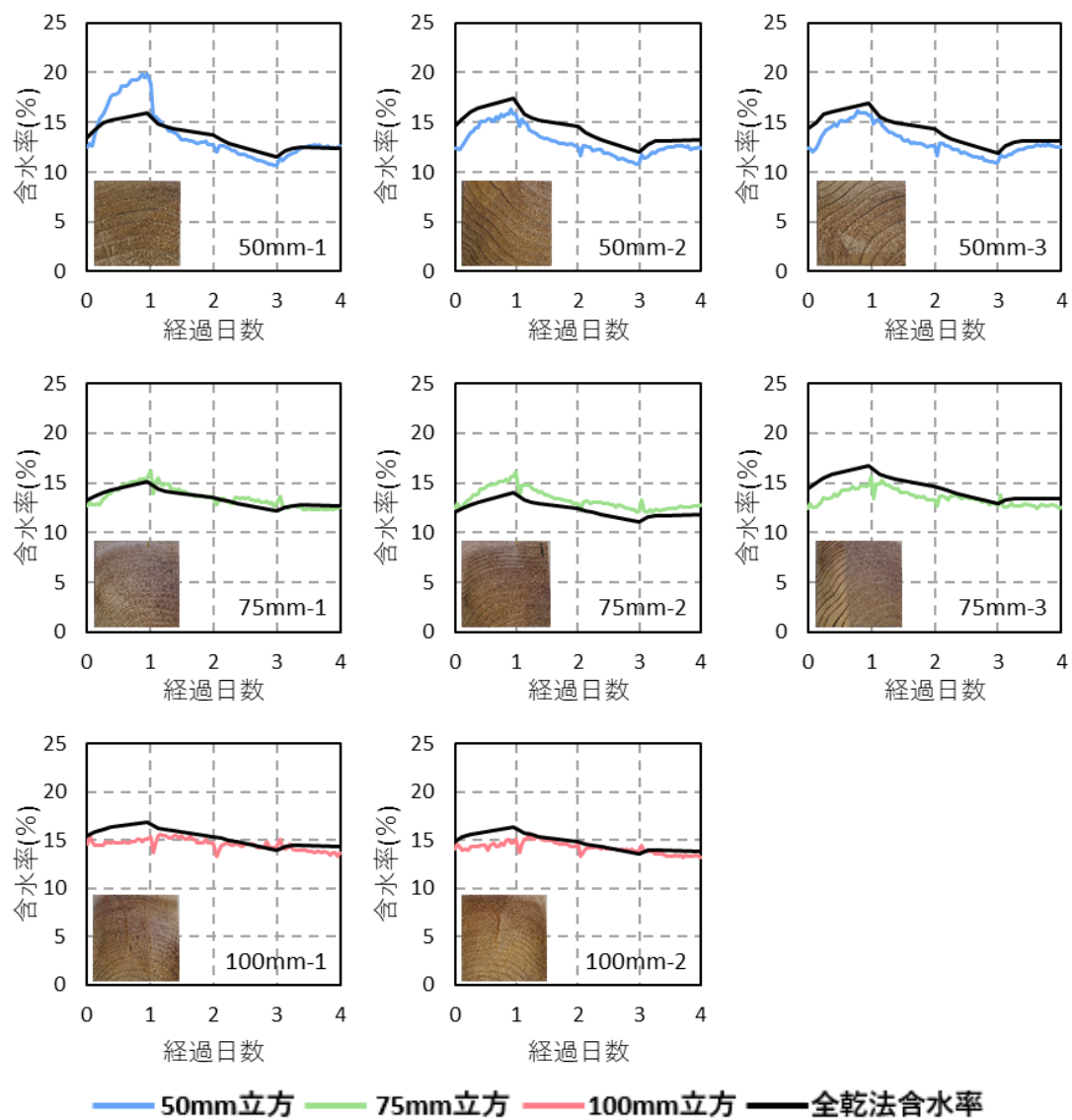


図 2.27 温湿度変動乾湿繰り返し環境の内部含水率と全乾法含水率の推移 (スギ)

第2章 内部含水率計測方法の検討

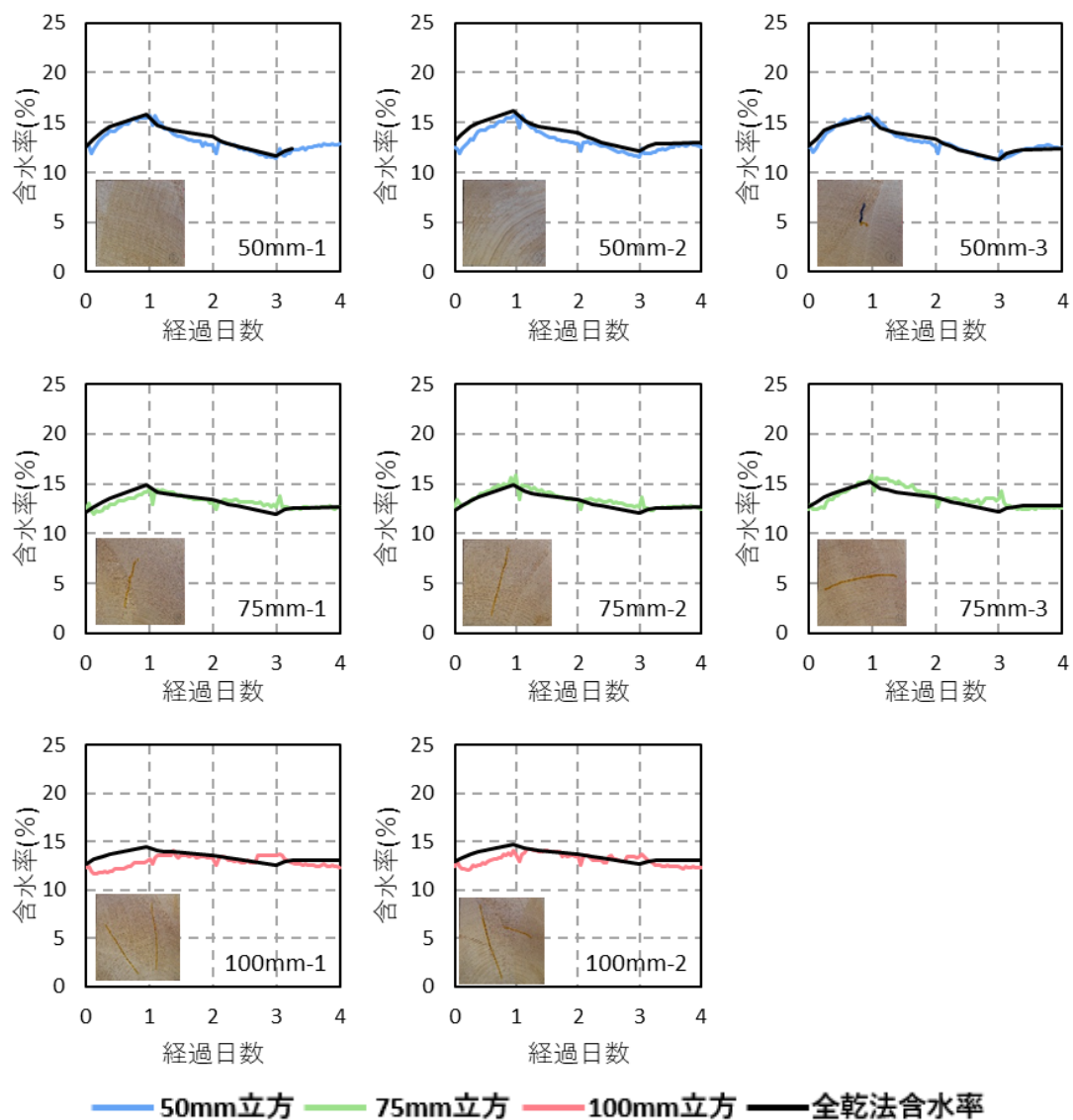


図 2.28 温湿度変動乾湿繰り返し環境の内部含水率と全乾法含水率の推移 (ヒノキ)

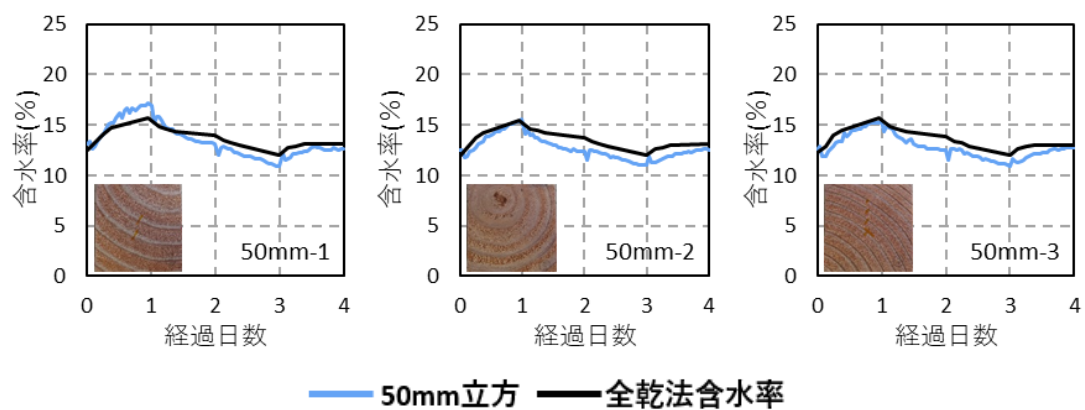


図 2.29 温湿度変動乾湿繰り返し環境の内部含水率と全乾法含水率の推移 (ベイマツ)



## 第2章 内部含水率計測方法の検討

どちらの環境も樹種に関係なく内部含水率と全乾法含水率とがほぼ一致していた。本試験のように 20°C65%から開始した場合、1 日間隔での外部環境の変化に対しては本方法で計測可能であることがわかった。また温湿度変動乾湿繰り返し環境において、2 日目以降試験体木口に割れが生じていたが、内部含水率は問題なく全乾法含水率と一致していた。幅 1mm 程度の小さな割れであれば計測値に影響を及ぼさないことがわかった。しかし、それ以上の割れが計測穴まで通じてしまった場合には、割れからの水分移動が支配的となり実際の内部環境と離れた値を示す可能性がある。

【氷点下】

図 2.30 にスギ試験体の氷点下環境で計測した材内部含水率と全乾法含水率の推移を、図 2.31 にヒノキ試験体の推移を、図 2.32 にベイマツ試験体の推移を示す。それぞれのグラフに計測終了時の試験体木口の写真を示している。

氷点下においても樹種に関係なく内部含水率と全乾法含水率とはほぼ一致し、氷点下でも本方法で内部含水率の計測が可能であることが示唆された。しかし、今回計測した外部環境は-5℃までであることと、恒温恒湿器の仕様上、相対湿度を変動させることができなかったため、氷点下についてより詳細な検討が必要であると考えている。

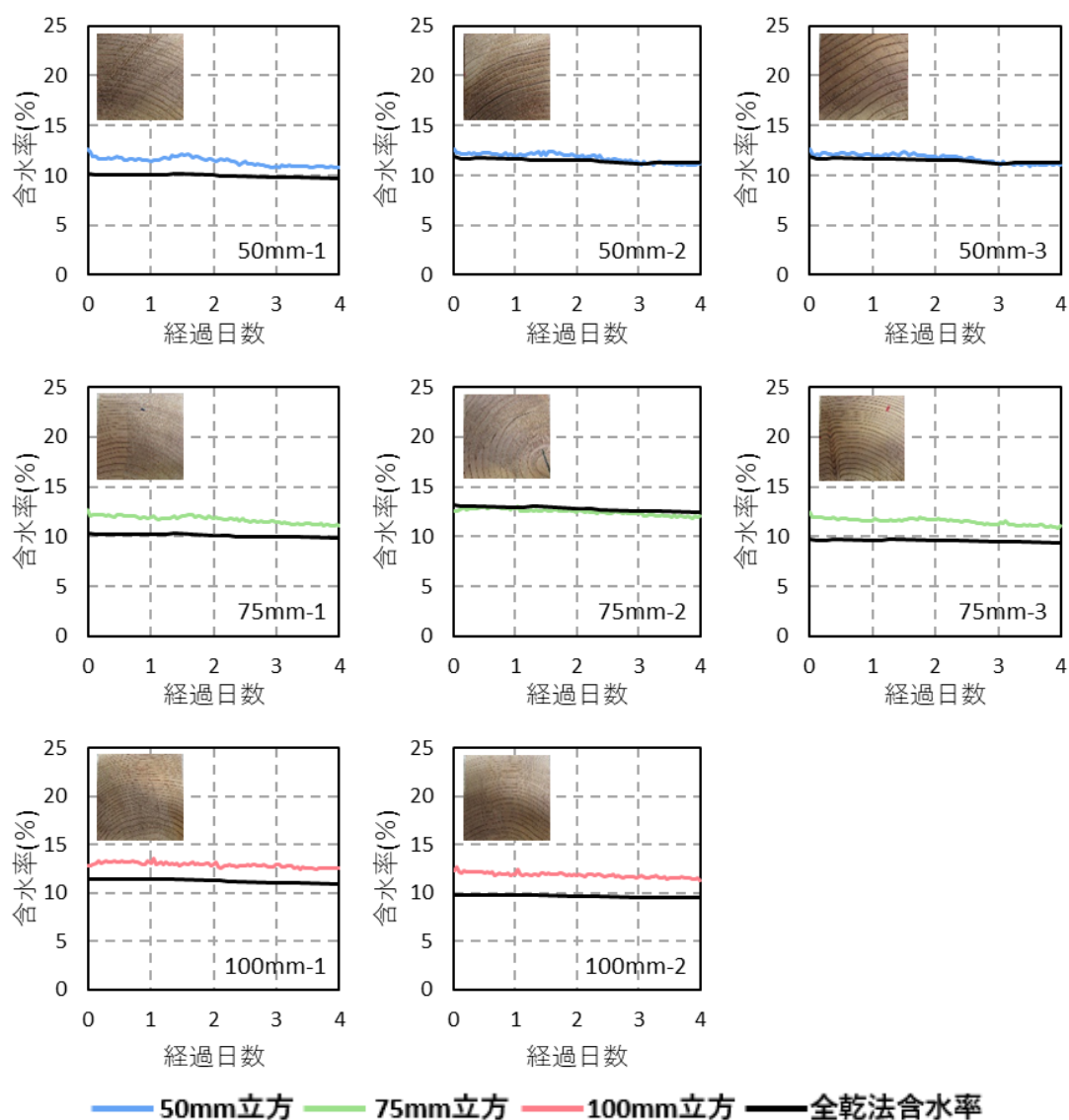


図 2.30 氷点下環境の内部含水率と全乾法含水率の推移 (スギ)

第2章 内部含水率計測方法の検討

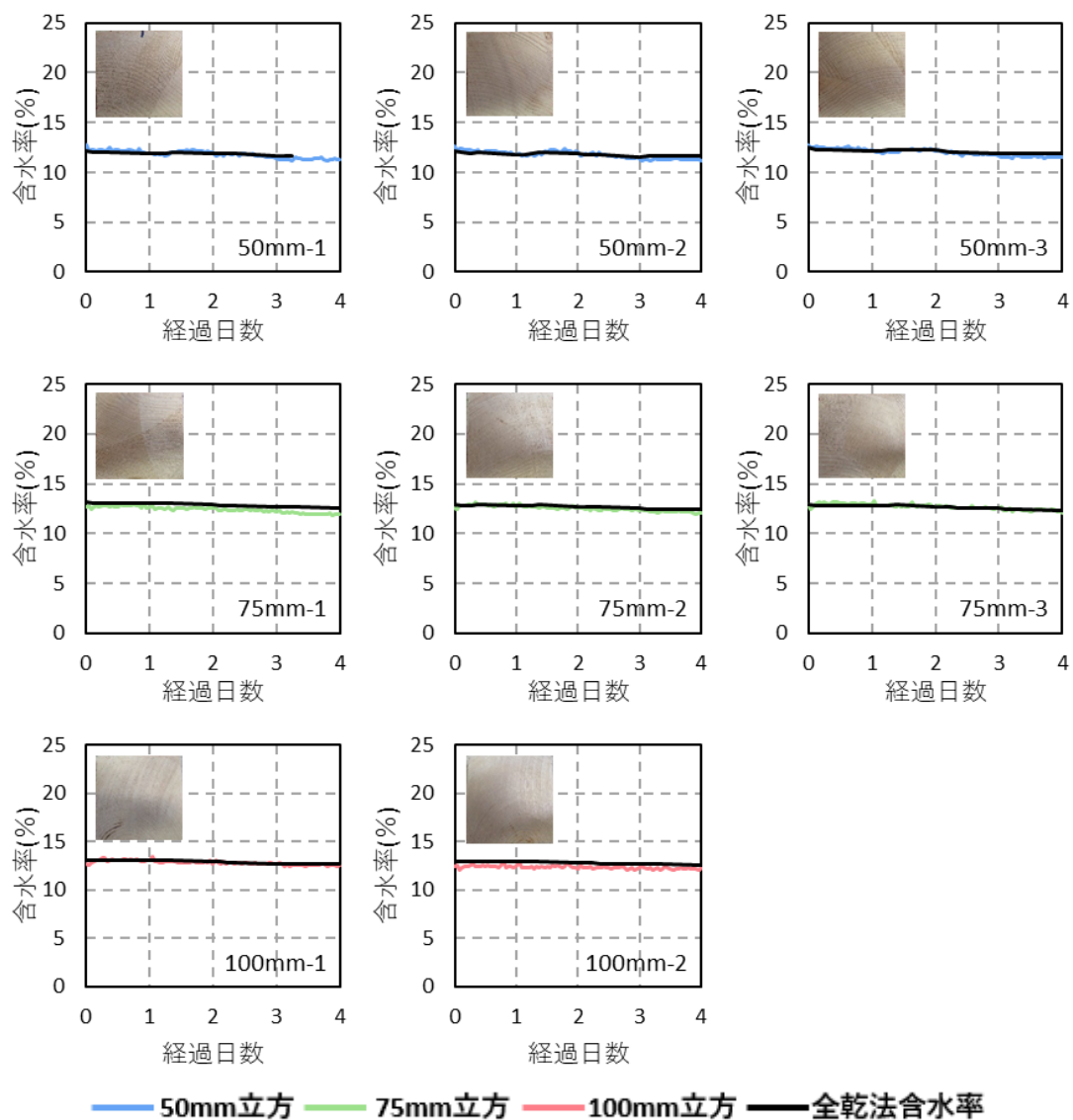


図 2.31 氷点下環境の内部含水率と全乾法含水率の推移 (ヒノキ)

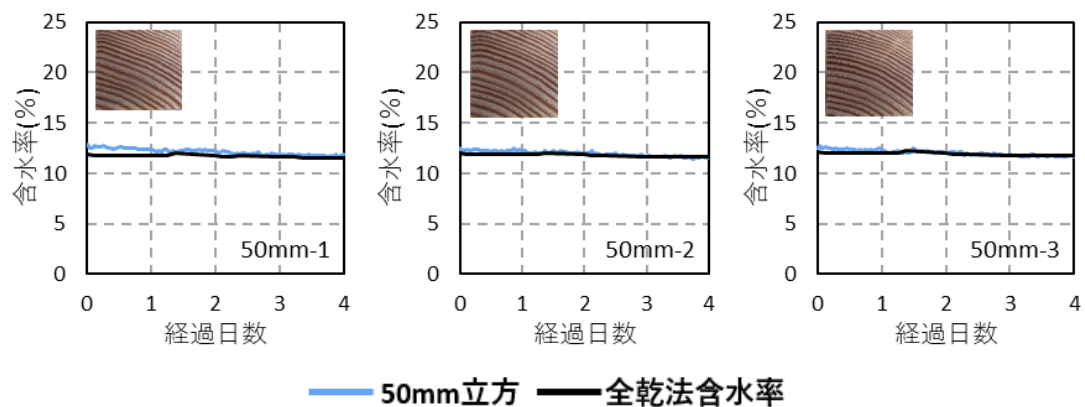


図 2.32 氷点下環境の内部含水率と全乾法含水率の推移 (ベイマツ)

### 2.3.4. まとめ

温湿度センサを用いた含水率計測方法の検討として、樹種と試験体寸法の異なる製材の内部含水率を様々な外部環境で計測し、内部含水率と全乾法含水率との比較をした。

その結果、3日間の吸湿環境では、高含水率になるほど本計測方法の内部含水率が全乾法含水率よりも高い安全側の値を示すことがわかった。また、樹種によりその傾向が異なり、今回実験を実施した中ではスギが最もその傾向が顕著であった。

一方、3日間の放湿環境や、1日間隔での乾湿繰り返し環境、氷点下環境（-5℃）では内部含水率と全乾法含水率とがほぼ一致した。しかし、氷点下においては湿度変化のある実験をおこなえていないため、より詳細な検討が必要ではないかと考えている。

また、吸・放湿環境の同時刻の内部含水率と全乾法含水率の関係から、試験体寸法ごとの内部含水率補正式を得た。

試験体寸法に関しては、吸・放湿環境での3日経過時の含水率変動を試験体寸法ごとに比較したところ、試験体寸法が小さくなるほど含水率変動が大きいことがわかり、本計測方法で繊維方向の含水率分布が計測可能であることが示唆された。

## 2.4. スギ CLT での含水率計測実験（インキュベータ）

### 2.4.1. 試験体概要

各サイクルの概要を表 2.4 に、試験体及び計測点位置を図 2.33 に示す。また図 2.34 に計測点の番号を示す。試験体は 5 層 5 プライのスギ CLT (Mx60, b=150, h=150, l=200, 幅はぎ接着なし, API) とした。試験体には HY と MS を埋め込むため、直径 22mm の穴を加工した。穴深さは HY の計測点が層の中心となるように、2 層目計測点の場合 55mm、4 層目計測点の場合 115mm とした。図 2.35 に計測穴と温湿度センサの位置関係を示す。計測穴からの水分移動を防ぐため、温湿度センサを埋め込んだ後、配管用シールパテ (AP-1000-I) を用いて穴を塞いでいる。

試験は後述する 4 日間の乾湿環境を 1 サイクルとし、同じ試験体で計測点を増やしながから 3 サイクル分乾湿繰り返して計測した。その後長手方向の側面 (l×h 面) を油性ニスでシーリングした状態で 4 サイクル目を、それに加えて短手方向の側面 (b×h 面) もシーリングした状態で 5 サイクル目をおこなった。なお試験体は全 2 体とし、そのうち計測点が 2 層目のラミナをまたぐように配したものを A-type、1 枚のラミナに 2 点配するようになったものを B-type としている。A-type と B-type の詳細を図 2.36 に示す。

表 2.4 各サイクルの概要

1サイクル	試験体中央
2サイクル	2層目ラミナの木口側に計測点を追加
3サイクル	2層目ラミナの木口側に表層から4層目までの深さの計測点を追加
4サイクル	l×h面をシール
5サイクル	b×h面もシール

第2章 内部含水率計測方法の検討

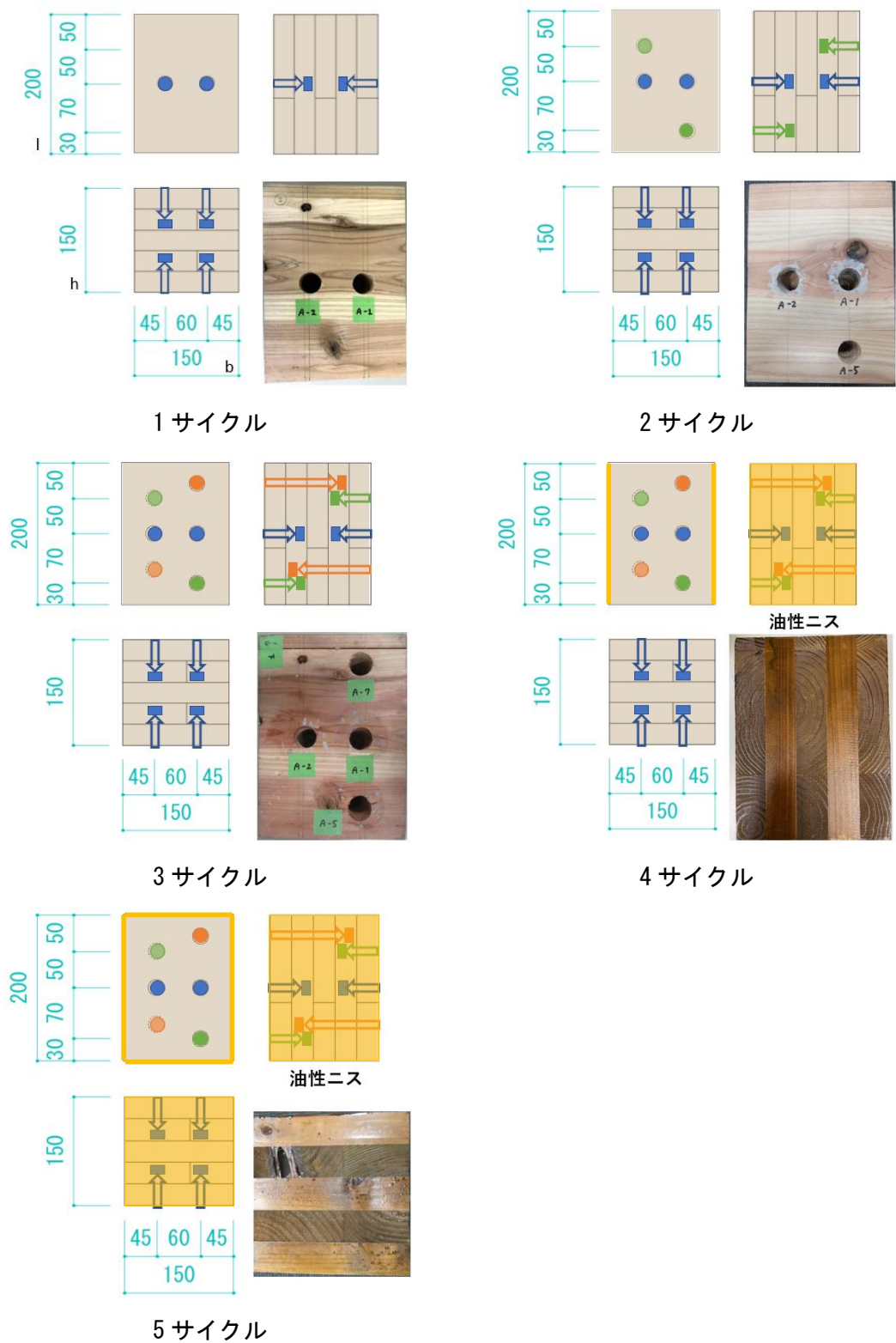


図 2.33 試験体及び計測点位置



図 2.34 計測点の番号

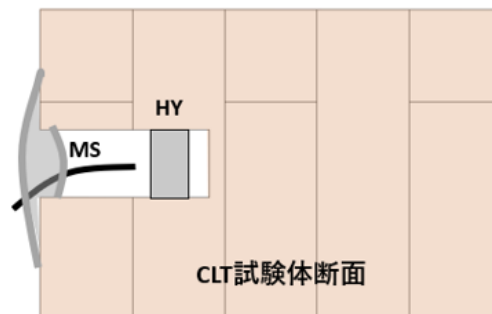


図 2.35 計測穴とセンサの位置関係

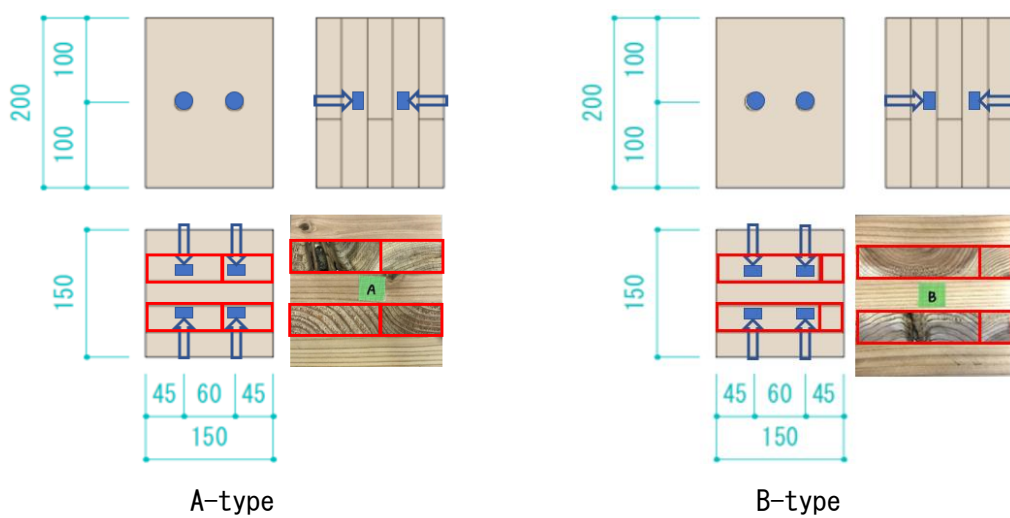


図 2.36 A-type と B-type の詳細

## 第2章 内部含水率計測方法の検討

### 2.4.2. 外部環境

養生は4日間1サイクルとして計測をした。最初の2日間を室温状態、その後2日間を吸湿状態としている。

吸湿環境はインキュベータ（福島工業株式会社：FUM-133I）内を40℃に設定し、試験体と接触しないように水を張ったポリプロピレン容器に試験体を設置し、密閉することとした。写真2.4に各状態時の試験体の様子を示す。なお、庫内の温湿度は1時間ごとに温湿度センサ（おんどとり：RTR-503）を用いて計測した。図2.37に試験時に計測していたインキュベータ内の温湿度を示す。サイクル開始を室温状態としたため、サイクルによってかなり初期値がばらついている。なお各サイクル間は試験体が外気と平衡状態となるように期間を置いた。



室温状態

高温高湿状態

写真 2.4 試験体の様子

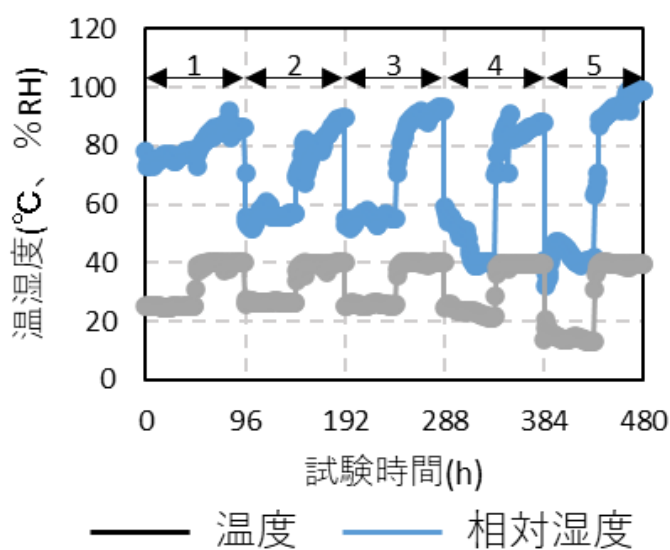


図 2.37 インキュベータ内の温湿度



## 第2章 内部含水率計測方法の検討

### 2.4.3. 計測方法

使用した温湿度センサを写真 2.5 に示す。HY と MS の 2 種類で、計測間隔は HY が 3 時間に 1 回、MS が 15 分に 1 回の計測とした。

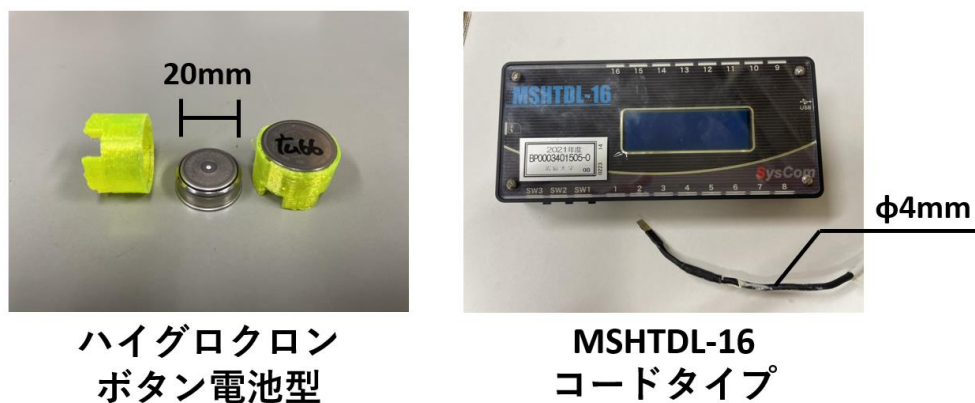


写真 2.5 使用した温湿度センサ

2.4.4. 計測結果

【計測点位置による含水率変動に関する検討】

図 2.38 に HY で計測した計測点 1, 5, 7 の温湿度とそれより算出した内部含水率の 5 サイクル分の結果を示す。内部含水率は各計測点の相対湿度と同様の推移を示した。またサイクル開始時の室温状態により、相対湿度と内部含水率の初期値がサイクルごとに大きくばらつく結果となった。この状態ではサイクルごとの内部含水率の比較が困難であったため、各サイクルの吸湿状態に切り替えた時点での内部含水率（図中赤丸で示している点）が 0 になるように、サイクルごとに変動値（以下、含水率変動値）を算出した。

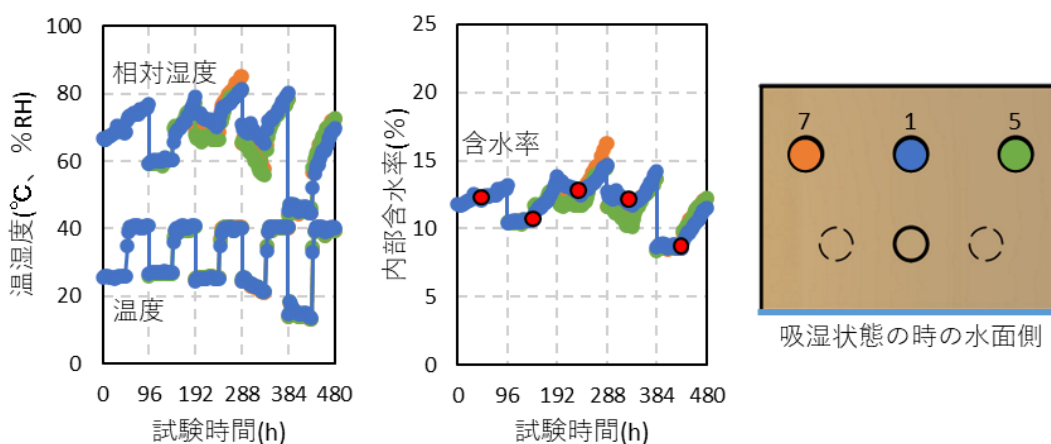


図 2.38 HY で計測した計測点 1, 5, 7 の計測値

図 2.39 に操作後の結果を示す。A-type と B-type の計測点 1, 5, 7 の結果から、木口側の含水率変動が大きくなる傾向があることがわかった。特にこの傾向は 3 サイクル目以降で顕著に見られた。一番大きく含水率が変動していた 3 サイクル目終了時で木口側計測点（計測点 7）と中心部計測点（計測点 1）とで約 2.1%の差が生じた。また、4・5 サイクル目は、水分の移動を防ぐために試験体側面をシーリング処理したが、それ以前のサイクルでの含水率の変動とほぼ同様の変動を示した。油性ニスでは水分の遮断が不十分であったためと考え、2.5 節の実験ではアルミテープを用いて試験体側面のシールをおこなうこととした。また、穴深さを変えて計測している計測点 5, 7 の含水率変動には大きな違いが見られなかった。

A-type 試験体の計測点 1, 5, 7 の結果と 3, 6, 8 の結果より、1, 5, 7 の結果では木口面に近い計測点の含水率変動が大きくなる傾向があったのに対し、3, 6, 8 の結果ではそのような傾向があまり見られなかった。これは計測点 3, 6, 8 の方が吸湿状態で水面からの距離が近く、かつ計測穴の栓が表面のみであったため、2 層目ラミナ（長手方向）による水分移動よりも 1 層目ラミナ（短手方向）による水分移動が支配的であったと考えている。

第2章 内部含水率計測方法の検討

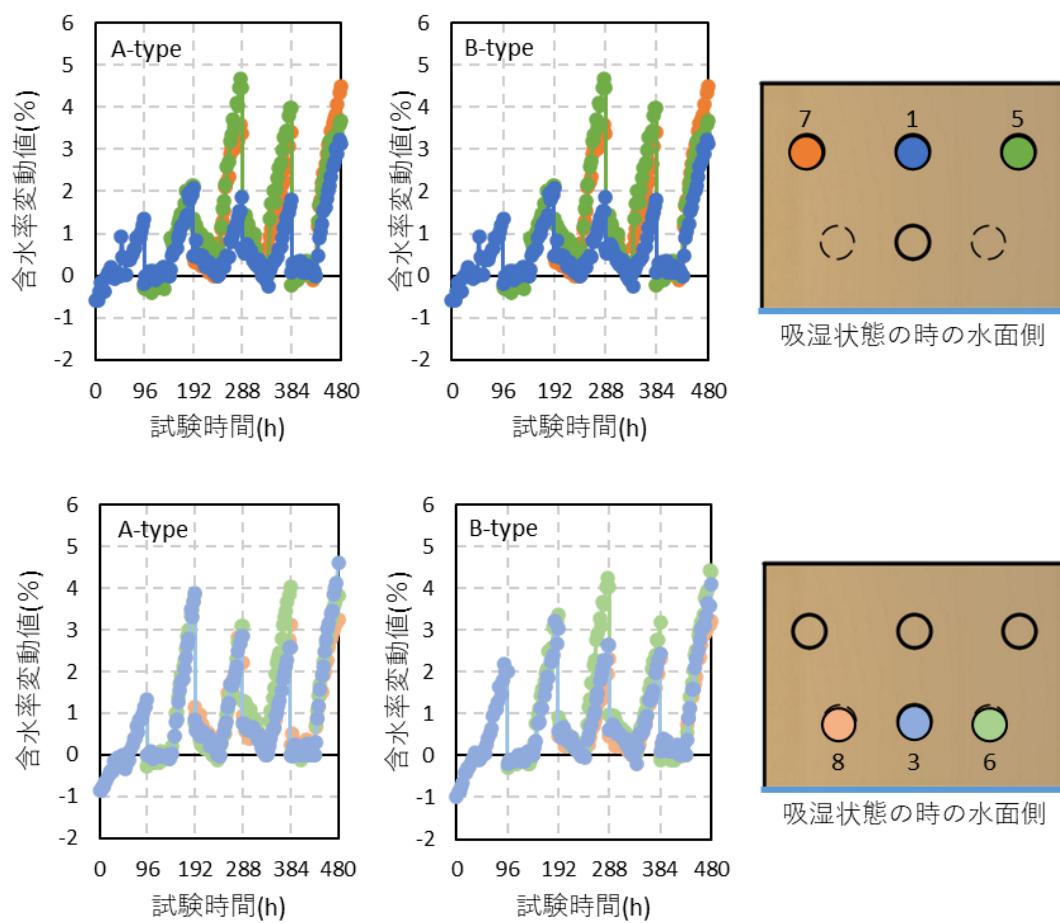


図 2.39 全サイクルの含水率変動値

【温湿度データロガーに関する検討】

図 2.40 に A-type 計測点 1 の温湿度と平衡含水率のデータを示す。MS のデータは 1 時間ごとのプロットを示している。HY のデータは 3 時間ごとのプロットを示している。HY での計測値と MS での計測値を比較すると、温度は両計測点ともに同様の変動を示したが、湿度に関して MS の方が大きく変動する結果となった。またそれに伴い内部含水率も MS 計測値から算出したものの方が大きく変動する結果となった。この理由として、①各データロガーの特性、②計測間隔の違い、③センサの埋め込み方法によるものが挙げられると考えている。②の計測間隔は HY の計測間隔が 3 時間なのに対し、MS の計測間隔が 15 分であるため、より感度よく材内部の温湿度変動を計測できていたためと考えている。図 2.41 に試験体の計測穴のある部分の断面を示す。③のセンサの埋め込み方法は、各センサの計測部の位置が異なることと、計測穴の栓が表面のみであったことから、MS の計測範囲は吸湿状態時に水面からの水分移動の多い 1 層目の影響を受けており、その結果 MS の湿度変動が大きくなったと考える。

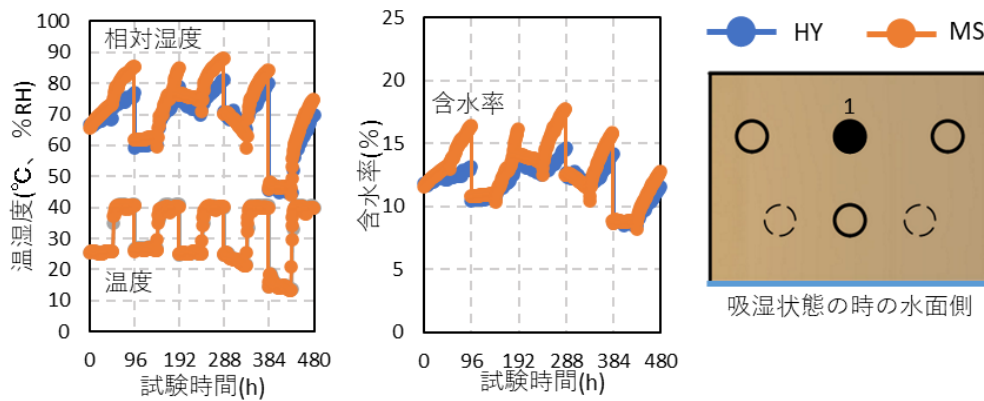


図 2.40 HY と MS の比較

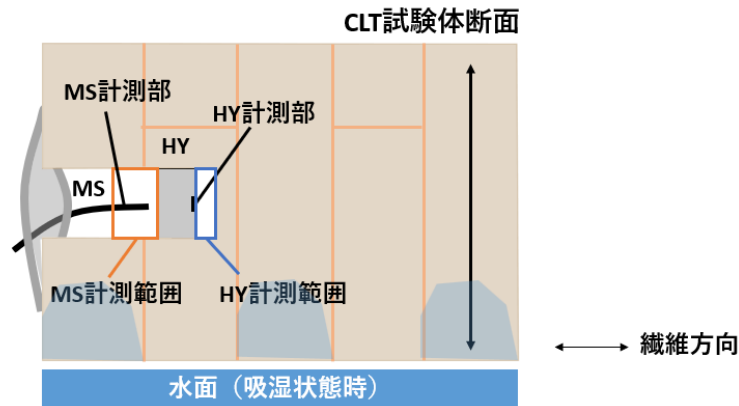


図 2.41 試験体の計測穴のある部分の断面

### 2.4.5. まとめ

繊維方向の異なるラミナを積層接着した CLT での、温湿度センサを用いた内部含水率計測方法の検討のため、同試験体に計測点を増やすなどの操作を施しながら内部含水率の計測をした。また、2種類の温湿度センサで計測し、温湿度センサによる計測値の違いについて考察をおこなった。

その結果、今回の外部環境制御の方法だとサイクル間の初期含水率を一定にすることができなかつたため、吸湿環境に切り替える時点の含水率を 0 とした含水率変動値でサイクルごとに比較した。

また今回の実験では計測穴の表面をパテで覆う形で計測をしていたため、計測値が計測したい層以外からの影響を強く受けてしまっていた。そこでこの結果をもとに、外部環境の制御方法と計測穴の塞ぎ方を改良した実験を実施することとした。

2種類の温湿度センサの計測値は、温度は HY と MS でほぼ同じであったが、湿度は MS の方が大きく変動していた。これはセンサの特性や計測間隔の違い、計測穴内でそれぞれのセンサが計測していた部分が違うために相対湿度の違いが生じてしまったものと考えている。

## 2.5. スギ CLT での含水率計測実験（恒温恒湿器）

### 2.5.1. 試験体概要

試験体概要は、2.4.1 と同様とする。4、5 サイクルでの試験体のシーリングは、2.4 節での油性ニスでは不十分であったため 2.5 節ではアルミテープを用いた。写真 2.6 に 5 サイクル目の試験体の様子を示す。

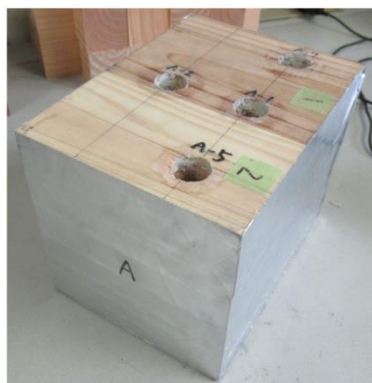


写真 2.6 5 サイクル目の試験体

### 2.5.2. 外部環境

外部環境は10日間1サイクルとして計測をした。実験の外部環境制御は恒温恒湿器(LHU-114: エスペック)でおこない、最初の2日間は20°C60%、次の4日間は40°C95%、最後の4日間は20°C60%とした。図 2.42 に全サイクルの恒温恒湿器内の温湿度を示す。各サイクル開始から3日目に庫内相対湿度が急激に低下しているのは、恒温恒湿器が温湿度を制御するにあたって、温度が先に目標に到達したのちに相対湿度の制御を始めるためである。

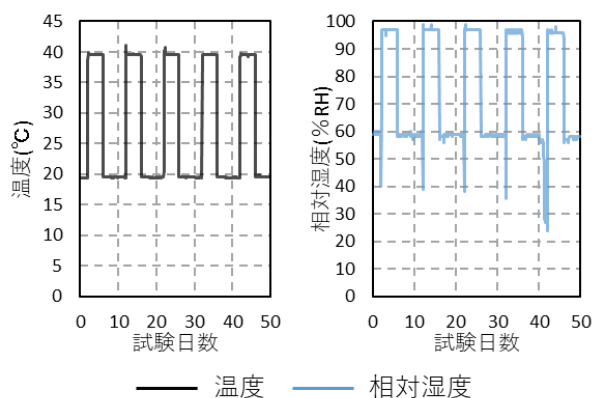


図 2.42 全サイクルの恒温恒湿器内の温湿度

2.5.3. 計測方法

使用する温湿度センサはHYのみで3時間間隔で計測した。また図 2.43 に示すように計測穴を塞ぐことで計測したい層以外からの水分流入を防止することとした。

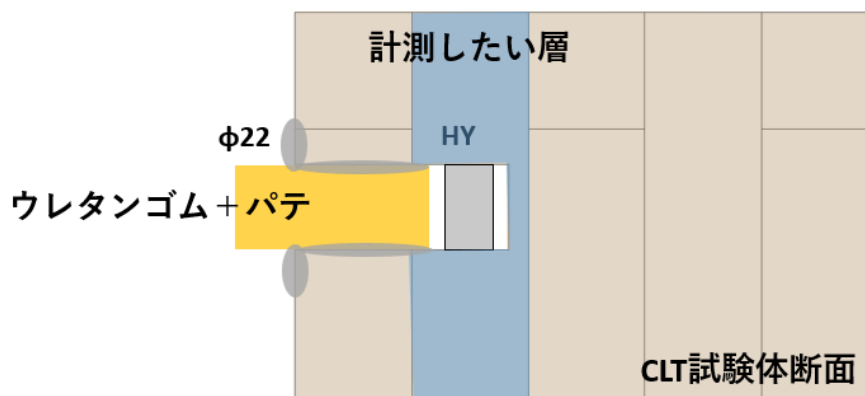


図 2.43 計測穴の塞ぎ方

2.5.4. 計測結果

【内部計測値の推移】

図 2.44 に A-type と B-type の試験体中央で計測していた内部温湿度と、そこから算出した内部含水率を示す。また図 2.45 に計測点 1,5,7、図 2.46 に計測点 3,6,8 の内部温湿度とそこから算出した内部含水率を示す。

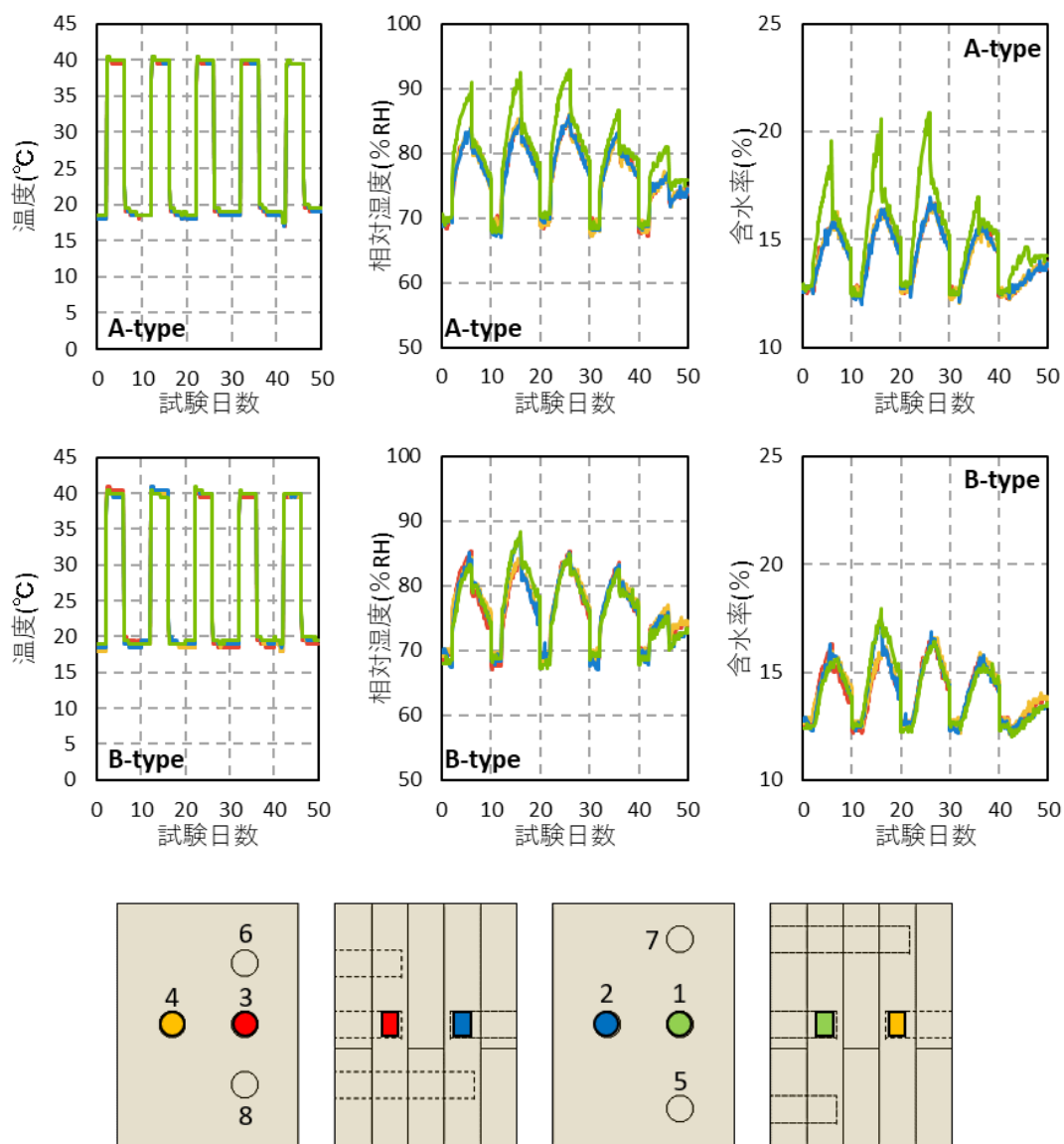


図 2.44 試験体中央の内部温湿度と含水率



第2章 内部含水率計測方法の検討

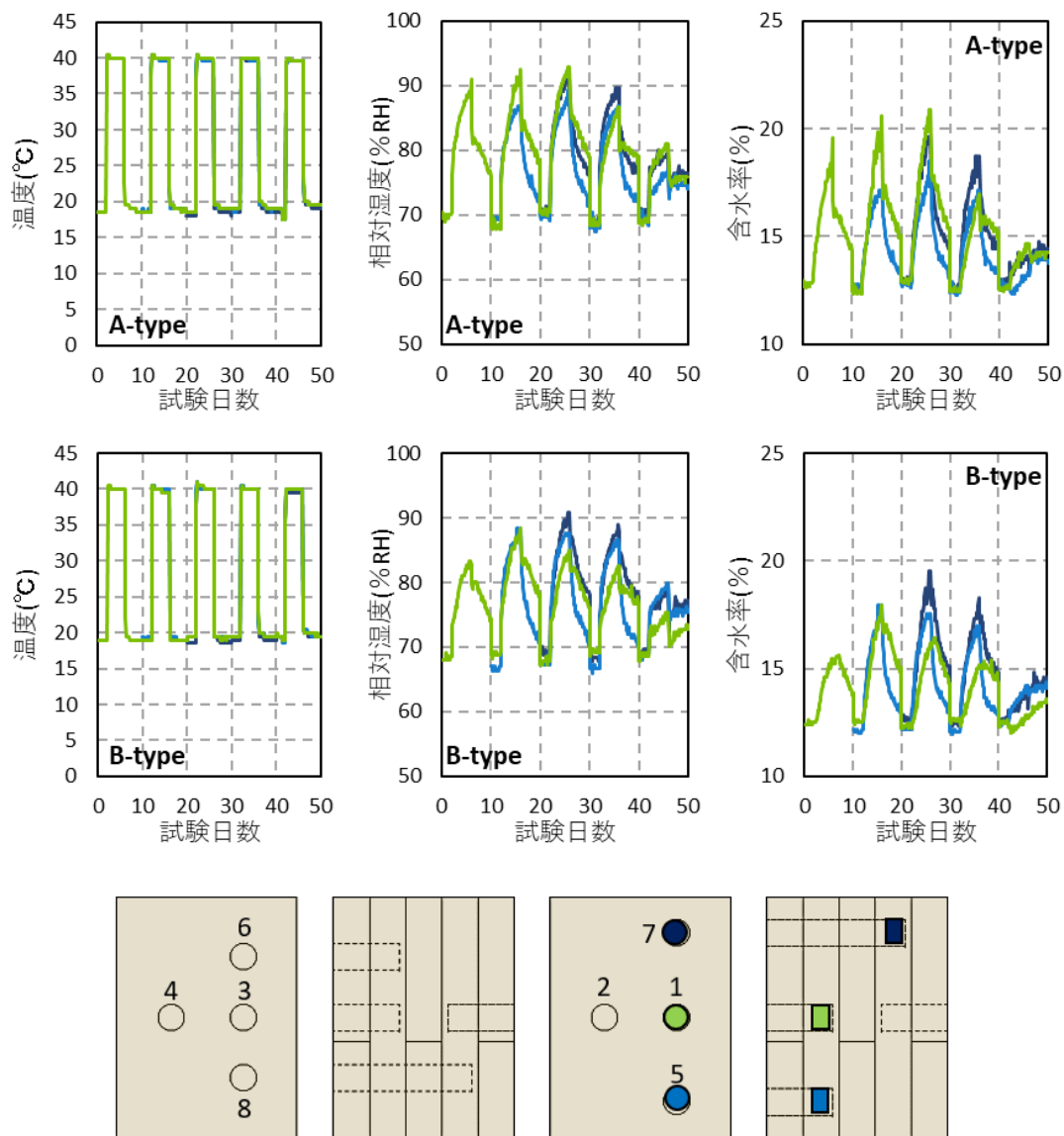


図 2.45 計測点 1. 5. 7 の内部温湿度と含水率

第2章 内部含水率計測方法の検討

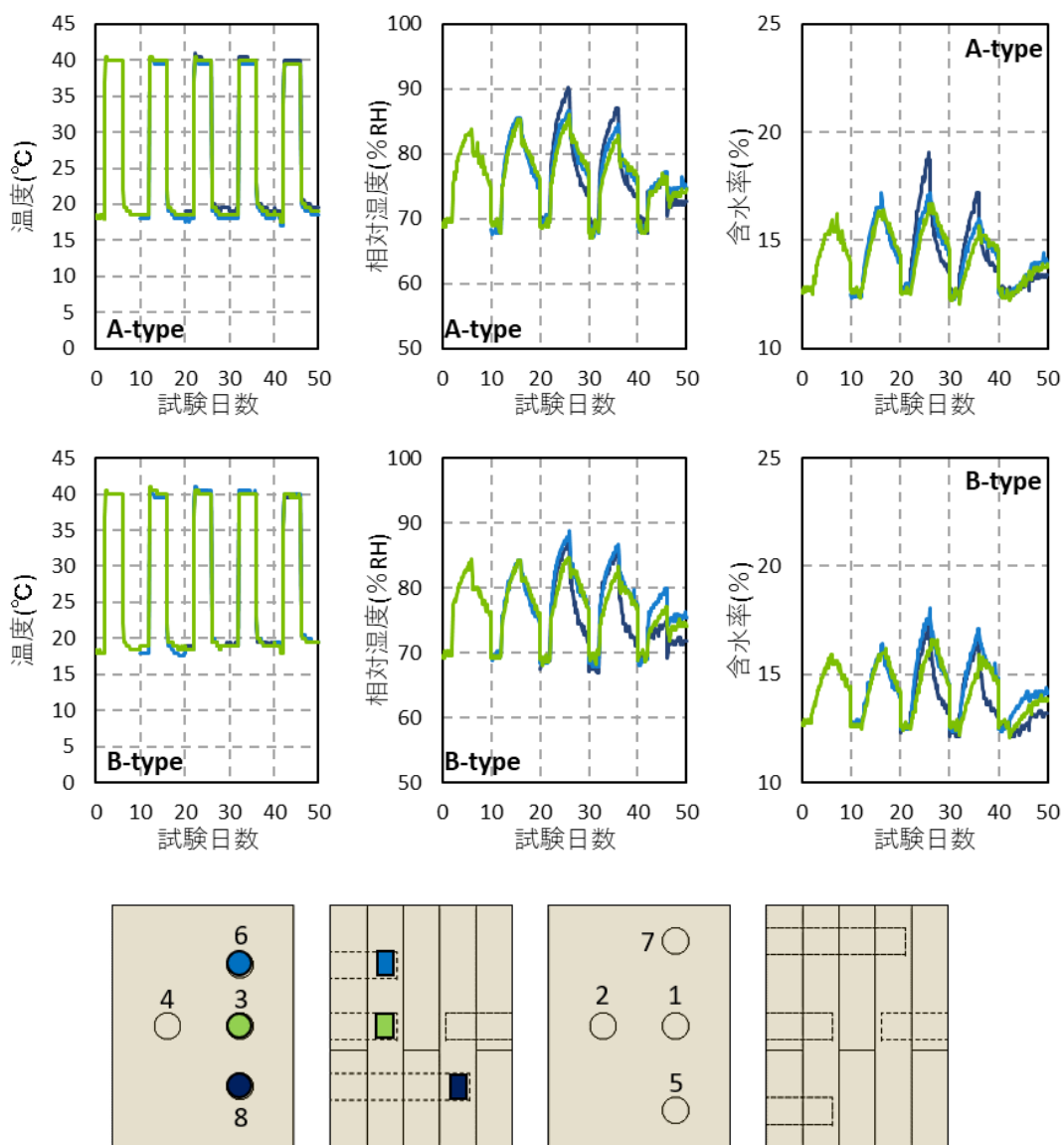


図 2.46 計測点 3. 6. 8 の内部温湿度と含水率

## 第2章 内部含水率計測方法の検討

今回の実験では、恒温恒湿器を用いて外部温湿度の制御をおこなったため、各サイクル開始時の内部温湿度は全ての計測点でほぼ同様であった。このことから、これ以降では各計測点の計測値そのままサイクルごとに比較する。

### ○中央計測点の推移

中央計測点の内部温度計測値は、サイクルによらず全ての計測点で同様の推移を示した。内部相対湿度と含水率は、材側面のシールをおこなっていない1, 2, 3サイクル目まではA-typeの計測点1を除き、ほぼ同様に推移していた。また、各計測点の最大含水率はサイクルによって大きな違いは生じていなかった。1, 2, 3サイクルは試験体の材端に計測点を増やしながら計測しているため、中央計測点の計測値がサイクルによって異なる場合は材端計測点が増えたことによる影響を受けていると考えられる。しかし、本実験ではそのような傾向は見られず、サイクルごとにほぼ同じ推移を示していた。そのため、今回の間隔(最小50mm)であればA-type・B-typeどちらであってもラミナの繊維方向に計測点を増やすことによる計測値の影響は少ないと考えている。

材側面をシールして計測をした4, 5サイクル目の結果は、長手方向の材側面のみシールをおこなった4サイクル目(温湿度センサで計測したいラミナの板目面側をシールした)では、A-typeの計測点1を除き3サイクル目の計測値とほぼ同じ推移を示した。本実験で採用した計測穴の塞ぎ方は、計測したい層以外の層からの水分流入を防止できていることがわかった。一方、4サイクル目で相対湿度が低下したA-typeの計測点1では、何らかの要因で計測層以外の層からの水分流入が生じていたため、1, 2, 3サイクルで他中央計測点よりも高い含水率変動が生じていたと考えられる。材側面をすべてシールした5サイクル目では、全ての計測点で含水率上昇が低下したものの、完全に含水率の上昇をなくすことはできなかった。

### ○繊維方向に並んだ計測点の推移

繊維方向に並んだA-typeとB-typeの計測点1, 5, 7の結果より、B-typeは中央計測点(計測点1)に対し材端計測点(計測点5と7)の方が含水率の変動が大きかった。一方A-typeでは、中央計測点の結果から計測点1は計測層以外の影響を受けていたため3サイクル目の材端計測点と中央計測点とで含水率の変動はほぼ同じであった。しかし計測層以外の影響がなくなった4サイクル目では材端計測点の方が含水率の変動が大きかった。計測点3, 6, 8も1, 5, 7とほぼ同じ結果となっていた。

### 2.5.5. まとめ

繊維方向の異なるラミナを積層接着した CLT での、温湿度センサを用いた内部含水率計測方法検討のため、同試験体に計測点を増やすなどの操作を施しながら内部含水率を計測した。

前回の実験結果より、外部環境の制御方法を恒温恒湿器、計測穴の埋め方をウレタンゴムにパテを巻いたものに、温湿度センサを HY のみに変更して実験を実施した。その結果、各サイクルの初期含水率はほぼ一定となり、サイクルごとの計測値を比較できるようになった。

中央計測点の結果より、材端に計測点を増やしていったサイクル 1, 2, 3 で計測値に大きな違いは見られず、今回の実験の間隔（最小 50mm）で繊維方向に計測点を増やすことは問題ないことがわかった。

また、材側面にシールをおこなった 4, 5 サイクル目の結果より、今回の計測穴の塞ぎ方で計測したい層以外からの水分流入を防ぐことができていたことがわかった。

### 2.6. 2章のまとめ

第2章では、大断面をもつ Mass Timber の内部含水率を計測するため、温湿度センサを用いた含水率計測方法について検討した。

2.1 節では、現在用いられている木材の含水率計測方法の特徴と、温湿度センサを用いた含水率計測方法の考え方とセンサ設置方法をまとめた。

2.2 節では、計測穴を塞ぐ栓の材料によってどれほど計測穴からの水分流入を防止できるのかに関する実験をおこない、ゴム・シリコン・パテが水分流入を防ぐことが可能であることがわかった。

2.3 節では、異なる樹種、試験体寸法の製材内部の含水率を計測し、計測した内部含水率と全乾法含水率とを比較した。その結果、3日間の吸湿環境では、高含水率になるほど本計測方法の内部含水率が全乾法含水率よりも若干高い安全側の値を示すことがわかった。また、吸・放湿環境の同時刻の内部含水率と全乾法含水率の関係から、試験体寸法ごとの内部含水率補正式を得た。さらに、3日間の放湿環境、1日間隔での乾湿繰り返し環境、氷点下(-5℃)環境では、内部含水率と全乾法含水率とが樹種に関わらずほぼ一致することがわかった。

試験体寸法に関しては、吸・放湿環境での3日経過時の含水率変動を試験体寸法ごとに比較したところ、試験体寸法が小さくなるほど含水率変動が大きいことがわかり、本計測方法で繊維方向の含水率分布が計測可能であることが示唆された。

2.4 節と 2.5 節では、スギ CLT の内部含水率を計測した。2.5 節で実施した実験では、今回の実験の間隔(最小 50mm)で同ラミナの繊維方向に計測点を増やすことは問題ないことがわかった。また、今回の計測穴の塞ぎ方で計測したい層以外からの水分流入を防ぐことができていたことがわかった。

これらの結果より、現状、本計測方法を実建物で使用する際には内部含水率が高含水率(繊維飽和点付近)になっているかどうかの検知を目的として用いることは可能であることがわかった。今後計測値をより精度よく計測するための検討や、小型で遠隔のデータ回収が可能な温湿度センサなどのセンサ側の開発が進めば、実建物内部での内部含水率モニタリングにも使用可能になるのではないかと考える。



## 第3章

### 屋外暴露実験での内部含水率変動

### 3. 屋外暴露実験での内部含水率変動

#### 3.1. 屋外暴露実験の目的と概要

現在、劣化の発生や材色の変化、塗料の性能、強度特性の変化等を明らかにするために、様々な木質系材料の屋外暴露実験がおこなわれている<sup>例えば 3-1)~3-3)</sup>。特に本研究で検討している Mass Timber では、接着耐久性に着目し 10 年間スギ集成材の屋外暴露を実施した柳川ら<sup>3-4)</sup>の研究や、層間浸水を許した CLT の耐久性評価のための TL ユニット暴露実験をおこなった令和元年度林野庁補助事業<sup>3-5)</sup>での取り組みが挙げられる。またスギの薄単板を用いた実験で、日本国内の地域による気象劣化の違いを劣化指数（クライメート・インデックス：CI）として試算した研究<sup>3-6)</sup>もあり、現在 Mass Timber の気象劣化の検討はこの指数を用いて行われている。このような屋外暴露の結果は実際使用との関連を検討するうえで重要な指標となる。

しかし、国内で Mass Timber の内部含水率変動を計測した研究は少なく、実験室内で外部環境を制御した状態の CLT 内部含水率を継続的に計測した例として黒塚の研究<sup>3-7)</sup>が挙げられるが、屋外暴露時の CLT 内部含水率の継続的な計測はほとんどおこなわれていない。

そこで第3章では、第2章で検討した温湿度センサを用いて木材内部の局所的な含水率を計測する方法を用いた CLT・集成材の屋外暴露実験の経過を報告する。

なお本計測方法は高含水率になるほど、全乾法含水率よりも高くなるのが2章の実験の結果より判明しており、樹種ごとの含水率補正式を求めたが、本章の実験では2章の実験で検討した範囲以上の高含水率を計測したため、補正はおこなわず計測値をそのまま示す。

表 3.1 に屋外暴露実験の概要を示す。試験地は北海道旭川市、宮崎県都城市、広島県東広島市、大分県大分市の4カ所で、設置条件や樹種に関して比較検討している。3.2 節からはそれぞれの試験地での計測結果を報告する。



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

表 3.1 屋外暴露実験の概要

試験地	試験体						暴露の設置条件	暴露試験体数	暴露開始日
	種類	寸法 (厚さ×幅×長さmm)	規格	樹種	接着剤	薬剤処理の有無			
北海道 旭川市 <sup>※1</sup>	CLT	150×350×1000	Mx60A-5-5	スギ	API	無処理	屋内 屋外平置き 屋外縦置き	25 (各条件5体)	2021/12/6
	集成材	150×105×985	M60A <sup>※5</sup>					25 (各条件5体)	
	CLT	150×350×1000	Mx60A-5-5					25 (各条件5体)	
宮崎県 都城市 <sup>※2</sup>	CLT	150×350×1000	Mx60A-5-5	スギ	API	無処理	屋根付き平置き 屋根付き縦置き	25 (各条件5体)	2021/12/14
	集成材	150×105×985	M60A					25 (各条件5体)	
	CLT	150×350×1000	Mx60A-5-5					25 (各条件5体)	
広島県 東広島市 <sup>※3</sup>	CLT	150×290×1000	5-5	スギ	API	無処理 (インサイ有) <sup>※9</sup>	屋外平置き 屋内 屋外平置き 屋内	2	2022/1/20 (計測開始)
				カラマツ				1	
				スギ				1	
				深浸潤処理 (4面) <sup>※10</sup>				2	
				深浸潤処理(6面)				2	
大分県 大分市 <sup>※4</sup>	CLT	150×480×1200	S90-5-5	ヒノキ	API	無処理	屋外平置き 屋内 屋外平置き	1	2021/12/20 (計測開始)
			S90-6-6 (強軸) <sup>※6</sup>					1	
			S90-6-6 (弱軸) <sup>※7</sup>					1	
								1	

- ※1 北海道旭川市西神楽1線10号 北海道立総合研究機構林産試験場内に設置している
- ※2 宮崎県都城市花栗町21-2 宮崎県木材利用技術センター内に設置している
- ※3 広島県東広島市鏡山1-4-1 広島大学E3棟前に設置している
- ※4 大分県大分市大字旦野原700番地 大分大学構内に設置している
- ※5 M60AのラミナをCLT製造ラインで集成材に加工した
- ※6 暴露時の表層が強軸層の試験体となっている
- ※7 暴露時の表層が弱軸層の試験体となっている
- ※8 側面インサイジング加工を施している。表内深浸潤処理の処理薬剤はサンプルザーOPエース
- ※9 インサイジング加工したラミナを接着したCLTで、側面インサイジングはおこなっていない
- ※10 短手方向の材端2面と板目面2面の計4面を薬剤処理している

## 3.2. 旭川と都城での屋外暴露実験

### 3.2.1. 計測の目的

旭川及び都城で実施している屋外暴露実験では、無処理 CLT、無処理集成材、薬剤処理（深浸潤処理）を施した CLT の3種類の材料に関して、2章で検討した温湿度センサ (HY) を用いた内部含水率計測方法で暴露中の内部含水率計測をおこなっている。また、屋内、屋外平置き、屋外縦置き、屋外で屋根を設けた場合の平置き（以下、屋根付き平置き）、屋外で屋根を設けた場合の縦置き（以下、屋根付き縦置き）の、5条件で暴露している。

この結果から、暴露の条件（試験地、屋内外、屋根の有無、試験体の向き）と内部含水率変動との関係を得ることを目的としている。さらに含水率の計測を試験体の材端から 30, 80, 500mm 離れた3点でおこなうことで、材内部の繊維方向の含水率分布が外部環境によってどのように影響を受けるのかを明らかにする。

また一定期間暴露した試験体で強度試験（支圧実験、全面圧縮実験、接着せん断実験）を実施し、暴露条件と各強度との関係も明らかにする。強度試験の内容については第4章で述べる。

本節では、暴露実験の概要とその結果を報告する。

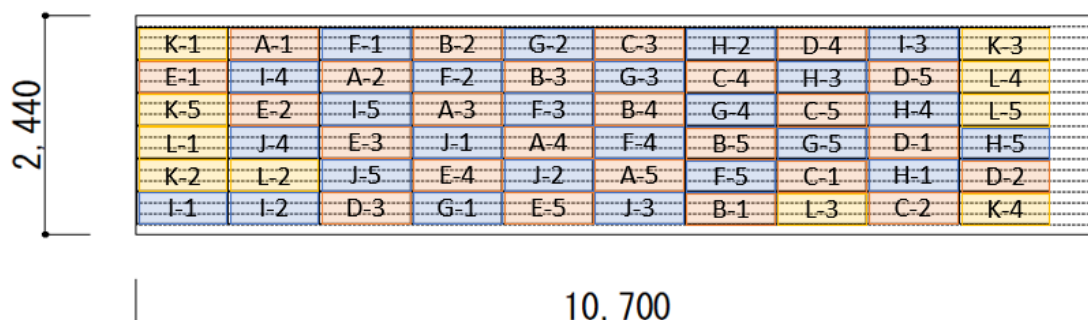
3.2.2. 試験体概要

【無処理試験体】

表 3.2 に無処理試験体の概要を示す。無処理 CLT 試験体は 150×2440×10700mm（厚さ×幅×長さ）のスギ 5 層 5 プライ（Mx60A）パネルから 150×350×1000mm の試験体を採材した。図 3.1 にパネルからの無処理 CLT 試験体木取りを示す。無処理集成材試験体は 150×1830×4000mm のスギ 5 層（ラミナ M60A）のパネルから 150×105×985mm の試験体を採材した。図 3.2 にパネルからの試験体木取りを示す。CLT、集成材どちらも積層用の接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤（API 接着剤）を用いている。CLT の幅はぎ接着はおこなっていない。また、暴露時の設置条件がパネル内で偏らないようにばらけさせている。

表 3.2 無処理試験体の概要

種類	寸法（厚さ×幅×長さmm）	規格	樹種	接着剤	薬剤処理の有無
CLT	150×350×1000	Mx60A-5-5	スギ	API	無処理
集成材	150×105×985	M60A			



グループ	場所	試験体設置方法
A	都城設置	屋内
B		屋根付き平置き
C		屋根付き縦置き
D		平置き
E		縦置き
F	旭川設置	屋根付き縦置き
G		屋根付き平置き
H		縦置き
I		平置き
J	屋内	
K	予備	交替用
L		

図 3.1 無処理 CLT 木取り

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



図 3.2 無処理集成材木取り

【薬剤処理試験体】

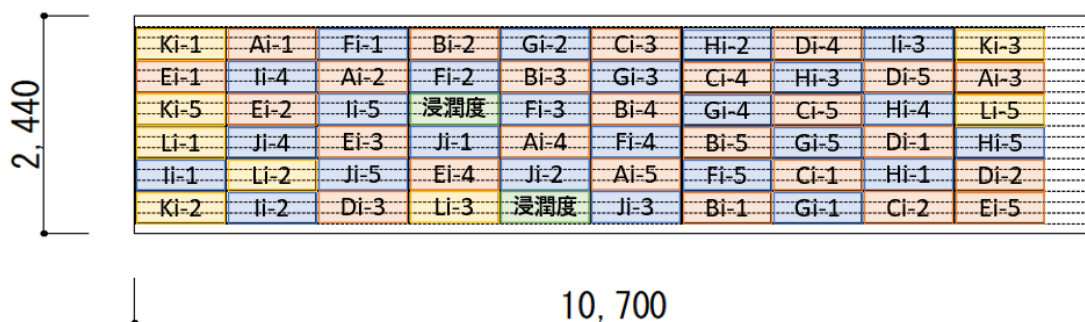
表 3.3 に薬剤処理試験体の概要を示す。薬剤処理 CLT 試験体は無処理 CLT の時と同様に、150×2440×10700mm（厚さ×幅×長さ）のスギ 5 層 5 プライ（Mx60A）パネルから 150×350×1000mm の試験体を採材した。図 3.3 にパネルからの薬剤処理 CLT 試験体木取りを示す。積層用の接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤（API 接着剤）を用いている。また、暴露時の設置条件がパネル内で偏らないようにばらけさせている。

薬剤処理は深浸潤処理を施している。最外層に用いるラミナの板目面の内、CLT の外側に現れる面にインサイジング処理を施したラミナで CLT を製造し、その後薬剤を塗布した。CLT 側面は手打ちでインサイジング処理をおこなっている。図 3.4 に試験体のインサイジングパターンを示す。一般的に使用されているインサイジングパターンに対して、インサイジングの密度は同じだが、1 列に並ぶインサイジング数が少なくなっている。写真 3.1 にラミナのインサイジング処理の様子、写真 3.2 に CLT プレスの様子、写真 3.3 に側面インサイジングの様子を示す。使用した薬剤はサンプルザーOP エース（油溶性）で、材面ごとの塗布量は 500g/m<sup>2</sup> となるように刷毛で全面塗布した。写真 3.4 に薬剤塗布の様子を示す。また、表 3.4 に実際の各試験体の薬剤塗布量を示す。

表 3.3 薬剤処理試験体の概要

種類	寸法（厚さ×幅×長さmm）	規格	樹種	接着剤	薬剤処理の有無
CLT	150×350×1000	Mx60A-5-5	スギ	API	深浸潤処理

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



グループ	場所	試験体設置方法
Ai	都城設置	屋内
Bi		平置き
Ci		縦置き
Di		屋根付き平置き
Ei		屋根付き縦置き
Fi	旭川設置	屋根付き縦置き
Gi		屋根付き平置き
Hi		縦置き
li		平置き
Ji	屋内	
Ki	予備	交替用
Li		
浸潤度		浸潤度確認用

図 3.3 薬剤処理 CLT 木取り

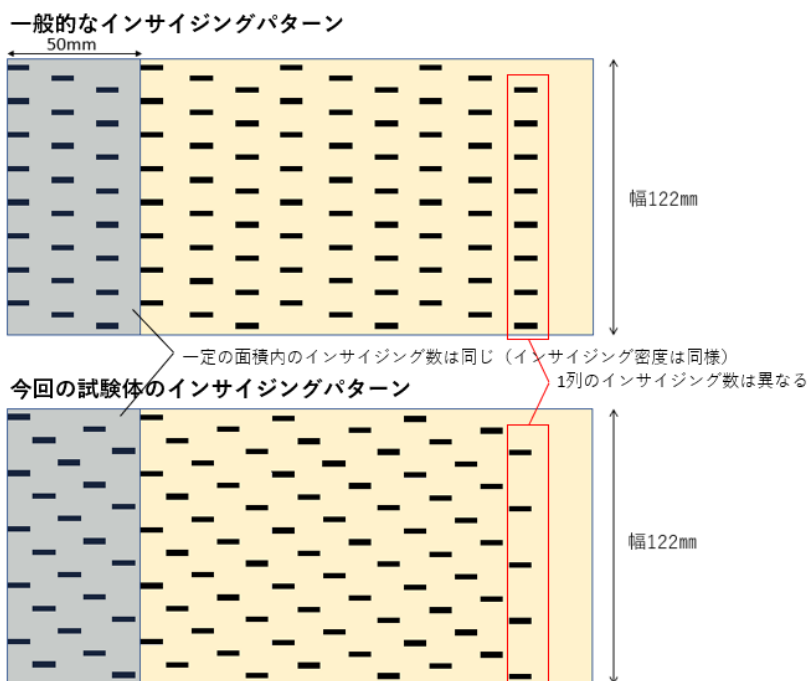


図 3.4 インサイジングパターン



写真 3.1 ラミナのインサイジング処理の様子



写真 3.2 CLT プレスの様子

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



写真 3.3 側面インサイジングの様子



写真 3.4 薬剤塗布の様子



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

表 3.4 各試験体の薬剤塗布量

都城試験体				旭川試験体			
試験体名	塗布前重量 g	塗布後重量 g	付着量 設定554g	試験体名	塗布前重量 g	塗布後重量 g	付着量 設定554g
Ai-1	22540	23080	540	Fi-1	22056	22556	500
Ai-2	21880	22440	560	Fi-2	22447	22959	512
Ai-3	21480	22040	560	Fi-3	21733	22239	506
Ai-4	22780	23320	540	Fi-4	21958	22447	489
Ai-5	21640	22180	540	Fi-5	22120	22643	523
Bi-1	23060	23600	540	Gi-1	22468	22982	514
Bi-2	22860	23400	540	Gi-2	22018	22529	511
Bi-3	22620	23160	540	Gi-3	22319	22840	521
Bi-4	21260	21800	540	Gi-4	22130	22642	512
Bi-5	23240	23780	540	Gi-5	22841	23324	483
Ci-1	21720	22260	540	Hi-1	22008	22509	501
Ci-2	23000	23540	540	Hi-2	22311	22818	507
Ci-3	21680	22220	540	Hi-3	21947	22450	503
Ci-4	22680	23220	540	Hi-4	21678	22205	527
Ci-5	21660	22200	540	Hi-5	21919	22426	507
Di-1	22920	23460	540	li-1	21515	22024	509
Di-2	21620	22160	540	li-2	22995	23514	519
Di-3	22600	23140	540	li-3	22032	22547	515
Di-4	22400	22920	520	li-4	21620	22110	490
Di-5	21640	22180	540	li-5	21853	22391	538
Ei-1	21520	22060	540	Ji-1	22955	23478	523
Ei-2	21880	22440	560	Ji-2	22644	23118	474
Ei-3	22800	23360	560	Ji-3	22151	22666	515
Ei-4	23060	23600	540	Ji-4	22999	23511	512
Ei-5	22560	23080	520	Ji-5	22334	22841	507
予備	22360	22900	540	予備	22478	22985	507
		平均	542			平均	509

※都城薬剤塗布日：2022年3月17日、旭川薬剤塗布日：2022年4月21日

#### 3.2.3. 暴露概要

写真 3.5 に旭川と都城の暴露の様子を示す。旭川試験体は、北海道旭川市西神楽 1 線 10 号の北海道立総合研究機構林産試験場内に設置している。都城試験体は、宮崎県都城市花栗町 21-2 の宮崎県木材利用技術センター内に設置している。どちらの試験地も無処理試験体は暴露開始から約 1 年、薬剤処理試験体は暴露開始から約半年が経過している。

設置条件は屋外平置き、屋外縦置き、屋根付き平置き、屋根付き縦置き、屋内の 5 条件で、各条件 5 体暴露している。各試験体の暴露開始日を以下に示す。

##### 【暴露開始日】

- ・旭川無処理試験体：2021 年 12 月 6 日
- ・旭川薬剤処理試験体：2022 年 5 月 17 日
- ・都城無処理試験体：2021 年 12 月 14 日
- ・都城薬剤処理試験体：2022 年 5 月 11 日

屋外暴露は全て非接地型としている。都城は全ての条件で地面から 300mm 浮かせた台の上に試験体を設置している。旭川では積雪を考慮し、平置き試験体が地面から 1000mm、縦置き試験体が地面から 600mm 浮かせての設置となるようにした。また、都城試験体はアスファルトの上に設置しているが、旭川試験体は除草シートの上となっている。

同じ条件の 5 体は一定期間経過ごとに暴露を終了させ、第 4 章で述べる強度試験を実施している。図 3.5 に現状の暴露スケジュールを示す。また、図 3.6 から図 3.8 に旭川試験体の各試験体の設置場所、図 3.9 から図 3.11 に都城試験体の各試験体の設置場所を示す。各設置条件で多数の計測点で温湿度計測をおこなっている試験体（図 3.6 と図 3.9 中に 1 と表記している試験体）は、設置時に架台の端に来ないようにデータの取り出しを実施するごとに位置を調整している。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



上：旭川試験体（2022年5月17日撮影）、下：都城試験体（2022年5月11日撮影）

写真 3.5 旭川、都城の暴露の様子

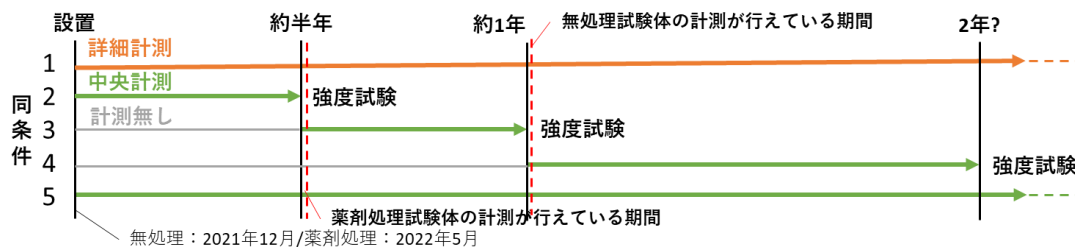


図 3.5 暴露スケジュール

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

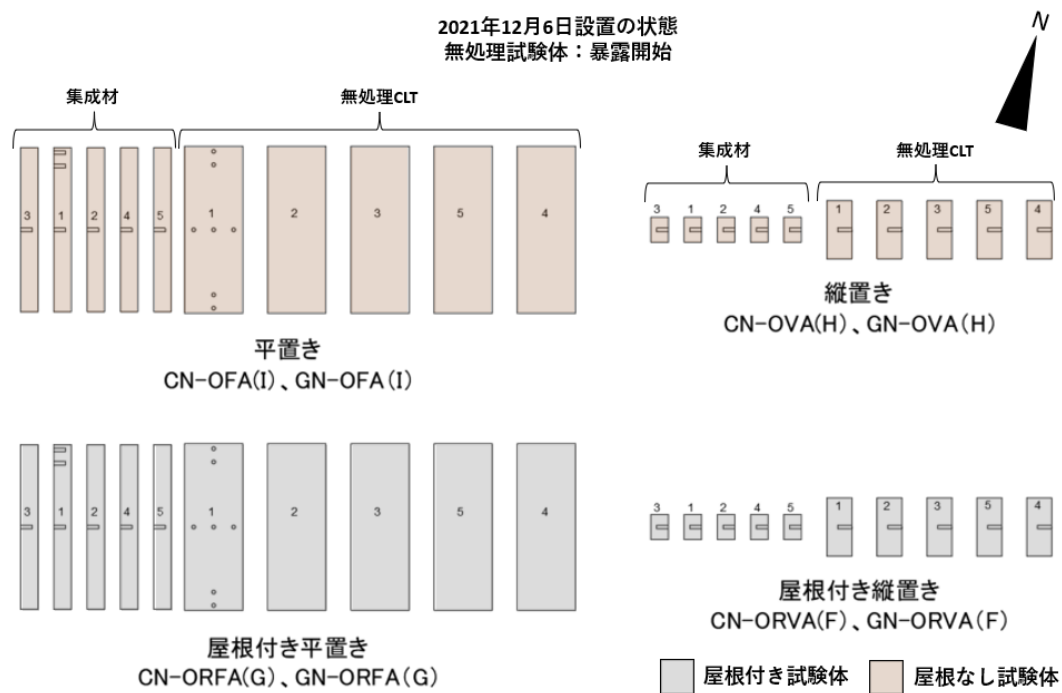


図 3.6 旭川試験体の設置図 (2021/12/6-2022/5-17)

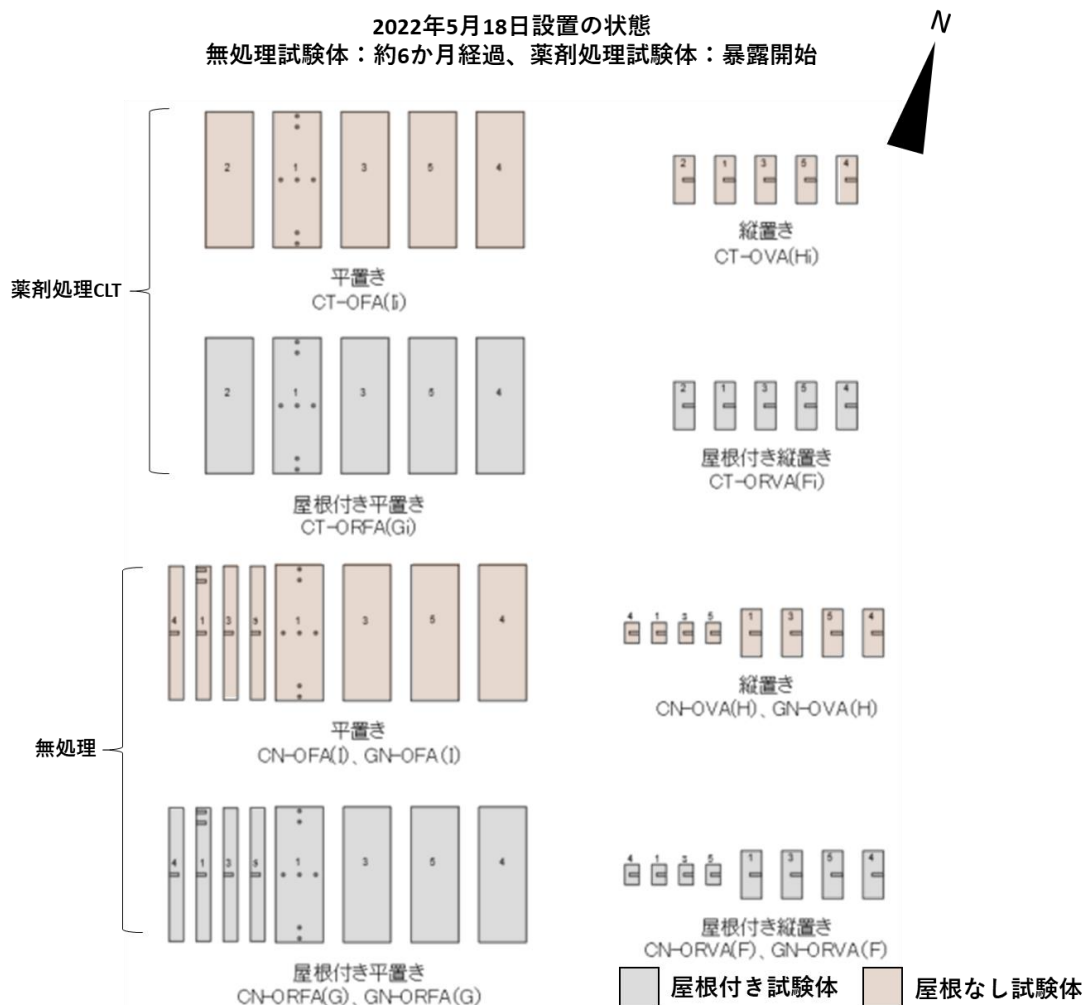


図 3.7 旭川試験体の設置図 (2022/5/18-2022/11/7)

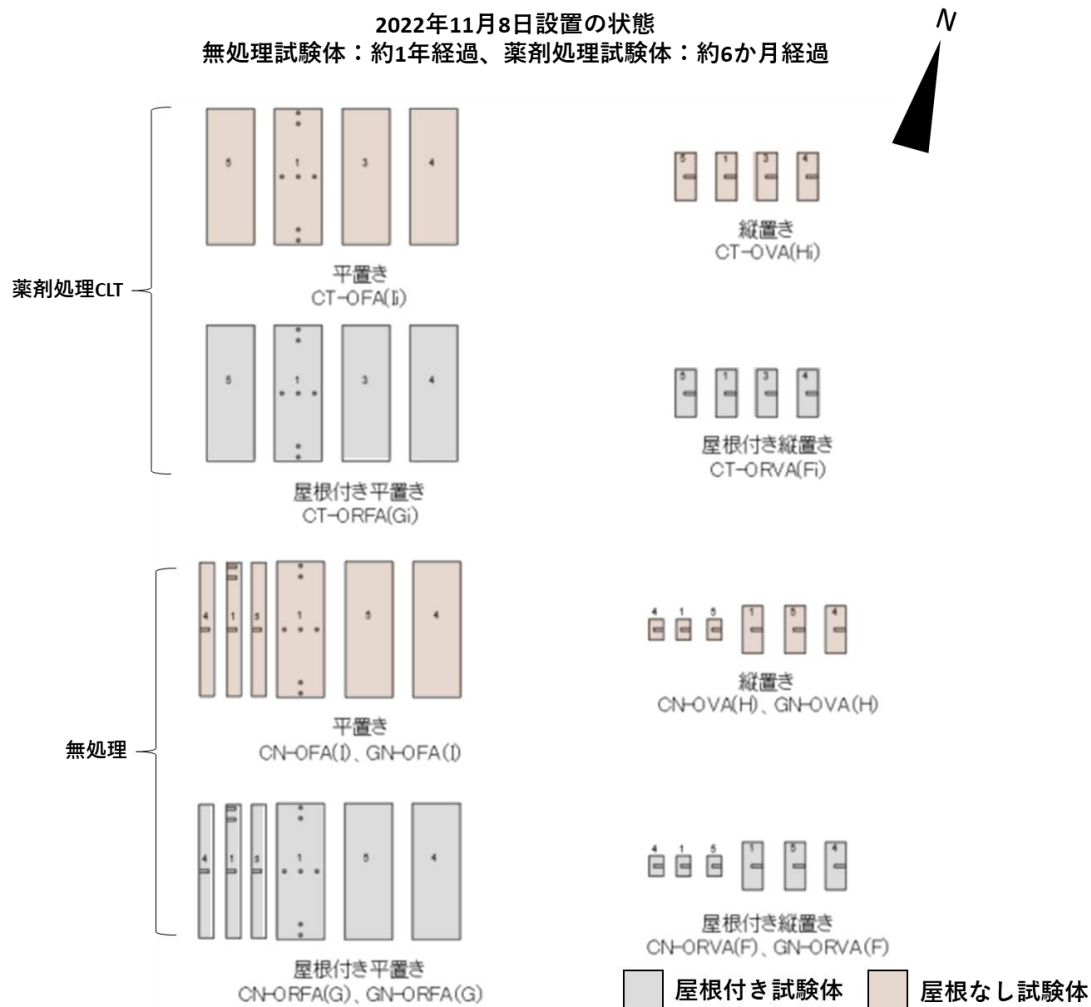


図 3.8 旭川試験体の設置図 (2022/11/7-現在)

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

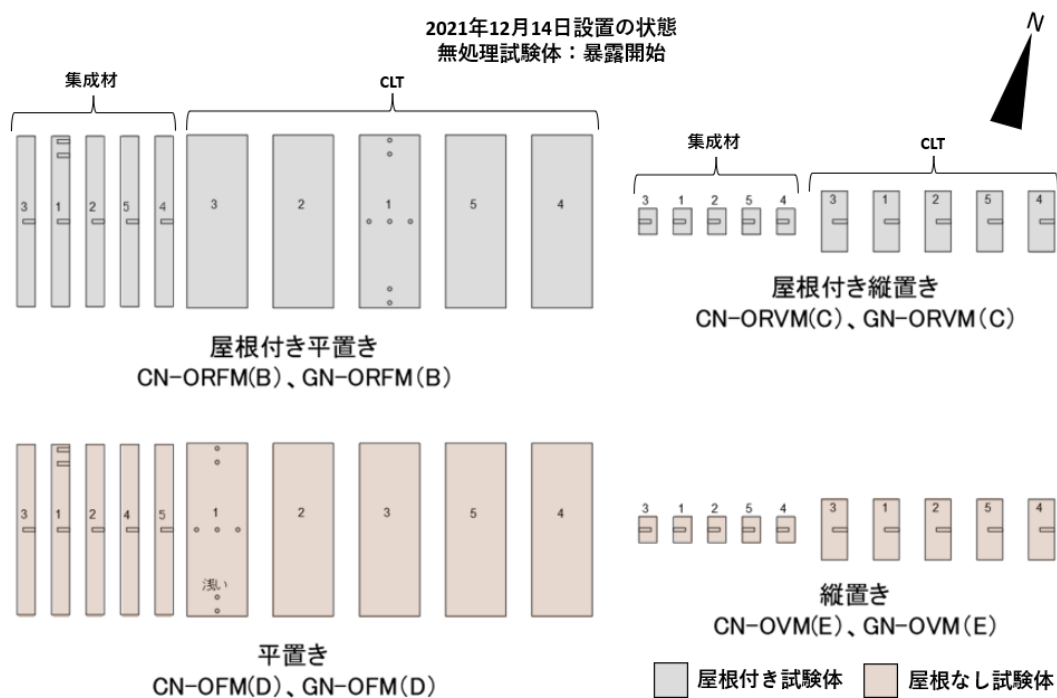


図 3.9 都城試験体の設置図 (2021/12/14-2022/5/10)

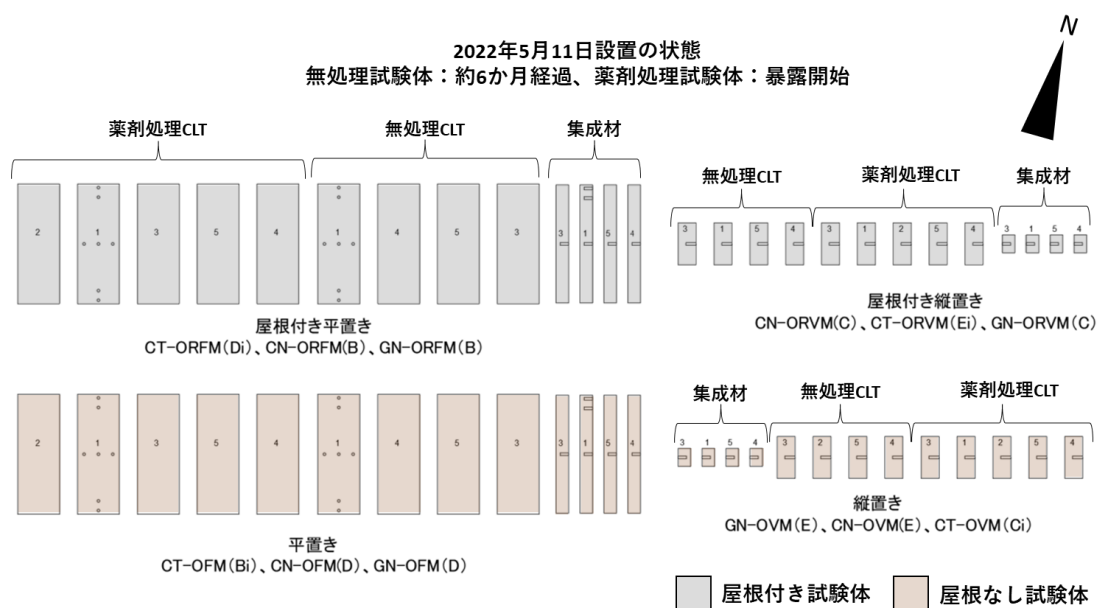


図 3.10 都城試験体の設置図 (2022/5/11-2022/11/29)

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

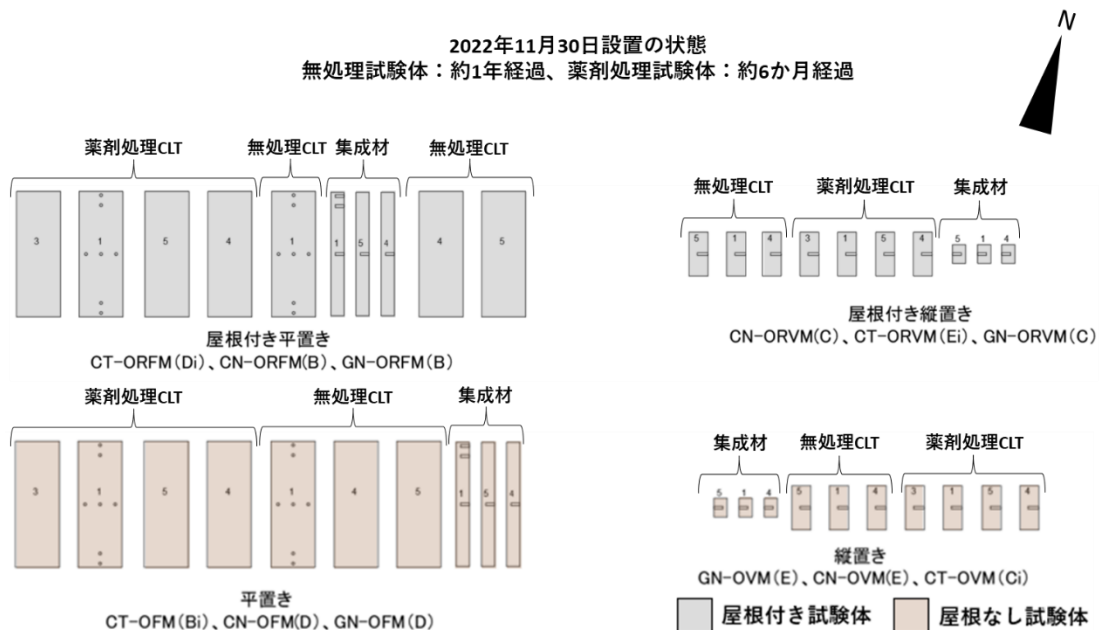


図 3.11 都城試験体の設置図 (2022/11/30-現在)



### 3.2.4. 計測概要

図 3.12 に詳細計測試験体の設置図を、図 3.13 に内部温湿度を計測している CLT 計測点の位置を、また図 3.14 に集成材計測点の位置を示す。計測している層は、平置きの場合設置したときに下面になる層を 1 層目として数える。CLT の計測は、無処理と薬剤処理で同様の計測点で実施している。温湿度センサは HY を用いて 3 時間間隔で計測をおこなっている。温湿度センサを設置した後、計測穴からの水分流入を防ぐために、計測層以外をウレタンゴム棒と配管用パテ (AP-1000-I) を用いて塞いでいる。計測は図 3.5 に示すように、同じ条件で暴露している 5 体の内、常に 3 体の内部温湿度を計測している。またその 3 体の内 1 体は、詳細に計測している。(図 3.5 中の詳細計測) それ以外は、試験体中央のみの計測としている。(図 3.5 中の中央計測) 試験体を設置している場所の外部の温湿度は、温湿度センサ (おんどとり) を用いて 1 時間間隔で計測している。温湿度センサのデータの取り出しは以下の日程で実施した。

#### 【データ取り出しの日程】

- ・旭川無処理試験体：2022 年 5 月 16 日、2022 年 11 月 6 日
- ・旭川薬剤処理試験体：2022 年 11 月 6 日
- ・都城無処理試験体：2022 年 3 月 15 日、2022 年 5 月 9 日、2022 年 11 月 29 日
- ・都城薬剤処理試験体：2022 年 11 月 29 日

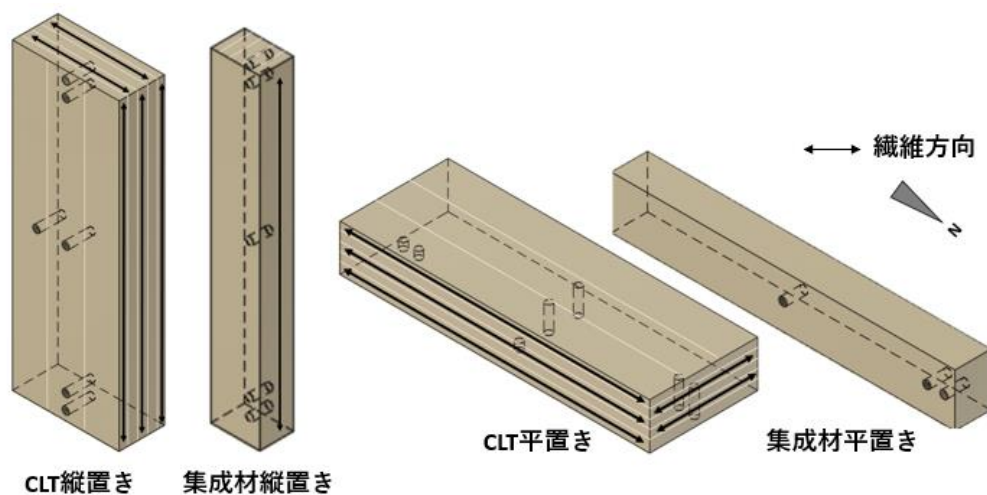


図 3.12 詳細計測点の設置図

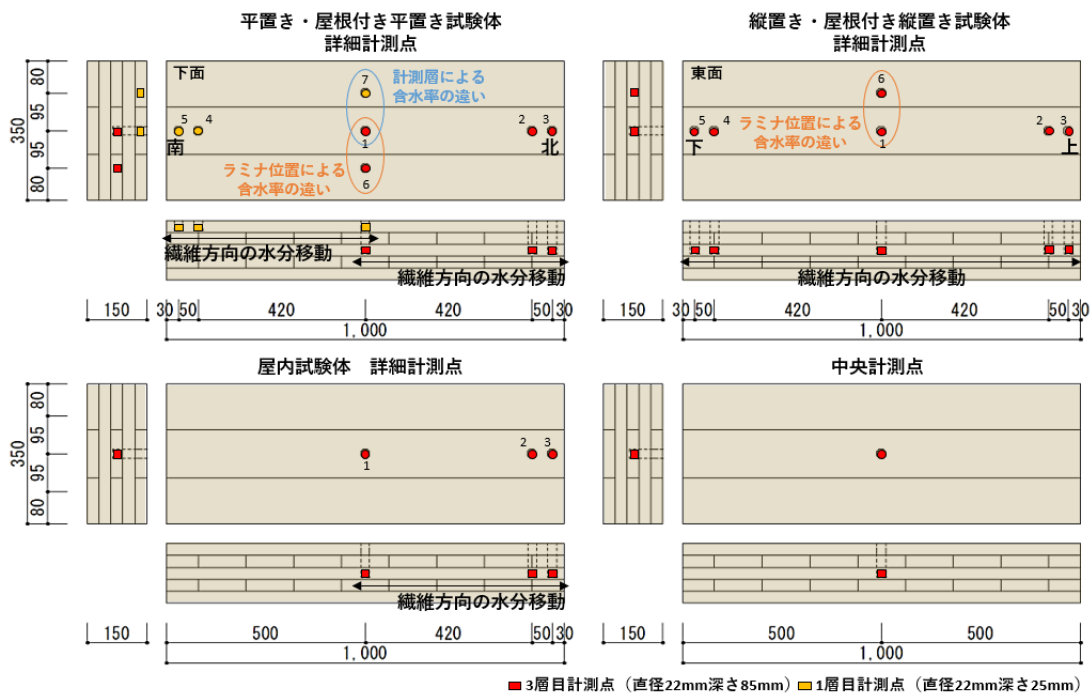


図 3.13 CLT 計測点の位置

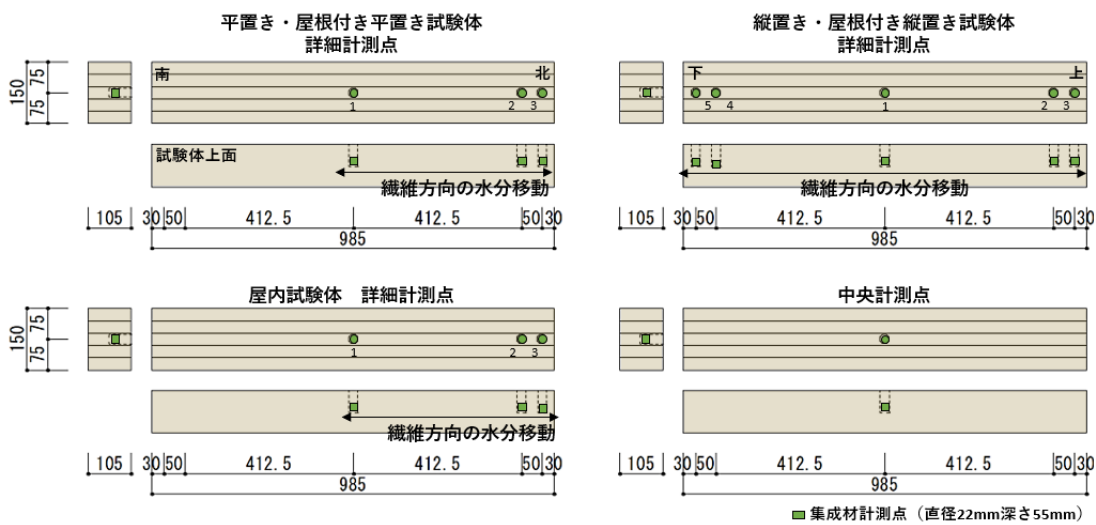


図 3.14 集成材計測点の位置

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

また、データの取り出しと同じタイミングで試験体各部の寸法（厚さ、幅、長さ）、試験体重量（木材のみの重量）、試験体表面の含水率（高周波含水率測定器にて計測）、試験体各面の割れの計測を実施している。図 3.15 に各計測の計測位置を示す。また、図 3.16 にデータ取り出し時の無処理 CLT 試験体寸法の推移を、図 3.17 に無処理集成材試験体寸法の推移を、図 3.18 に薬剤処理 CLT 試験体寸法の推移を示す。また図 3.19 に試験体重量の推移を、図 3.20 に表面含水率の推移を示す。

#### 【各計測の計測方法】

##### ・寸法

CLT 長さ、幅：コンベックスで計測（1mm 刻みで読み取り）

CLT 厚さ：ノギスで計測（0.01mm 刻みで読み取り）

集成材長さ：コンベックスで計測（1mm 刻みで読み取り）

集成材幅、厚さ：ノギスで計測（0.01mm 刻みで読み取り）

##### ・重量

旭川 CLT、集成材：1g 刻みの重量計で計測

都城 CLT、集成材：20g 刻みの重量計で計測

##### ・表面含水率

CLT、集成材：木材水分計（HM-520：ケット科学研究所）で計測

比重スギ（0.34）、厚さ 40mm で計測した

計測は直前の降雨によって各計測値が大幅に変動することを防ぐため、屋外暴露試験体を屋内に移動して約 5 日間経過した状態の試験体に対しておこなった。

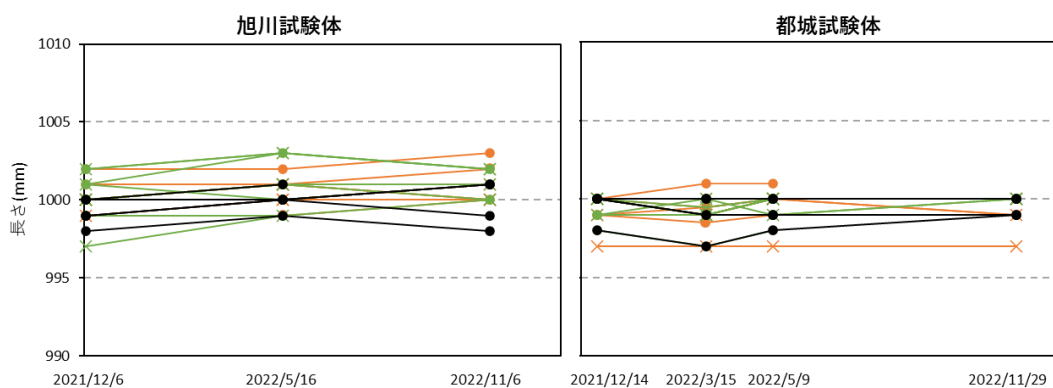
長さ、幅の寸法は暴露期間中全ての試験体で大きな変化はなかった。厚さ寸法は、屋内試験体に対して屋外試験体の方が膨らんでおり、また屋根付き暴露よりも屋根なしで暴露している試験体の方がより大きく膨張が進んでいる。特に薬剤処理 CLT 屋外暴露試験体の厚さは設置の向きに関係なく急激に膨張が進んでいる。試験体重量は暴露期間中すべての試験体で大きな変化はなかった。計測時の表面含水率は、屋内試験体よりも屋外暴露試験体の方が高い値を示していた。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

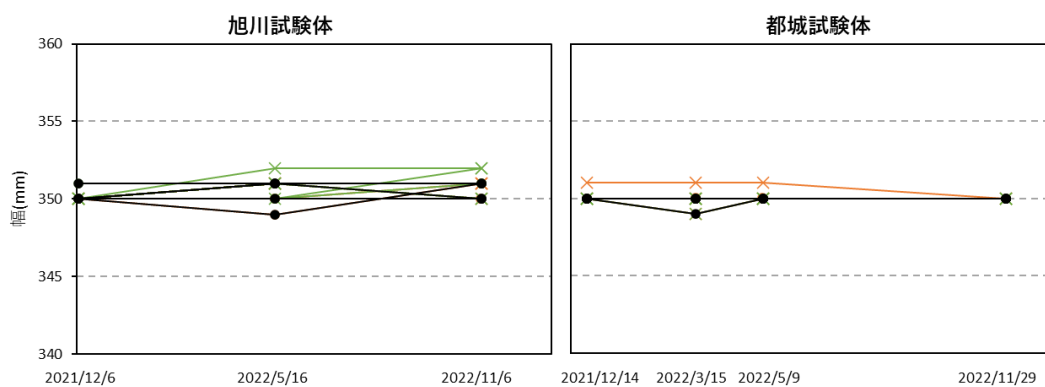


集成材  
図 3.15 各計測の計測位置

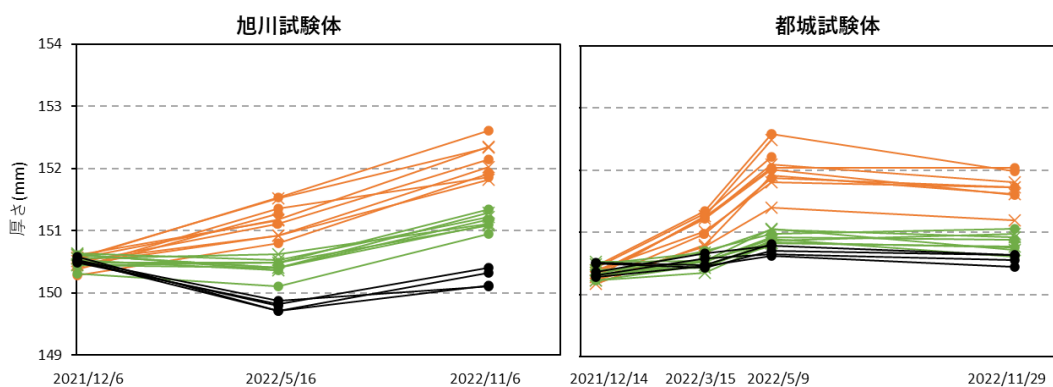
第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



無処理 CLT 長さ



無処理 CLT 幅

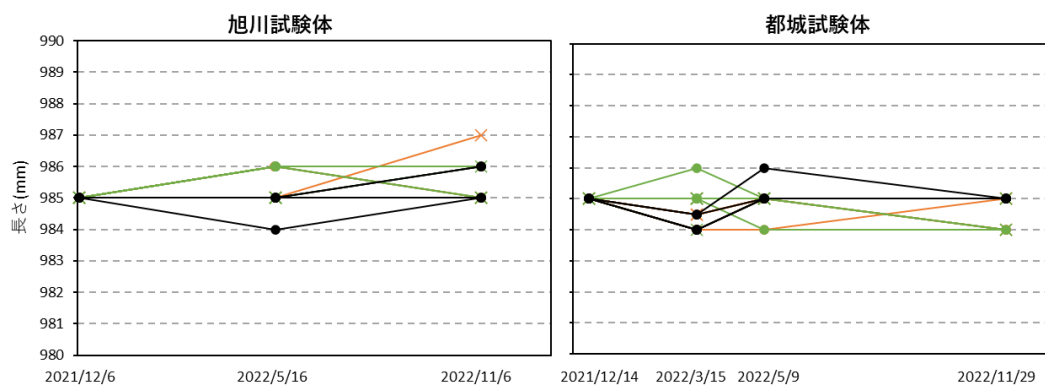


無処理 CLT 厚さ (厚さ①~④の平均値)

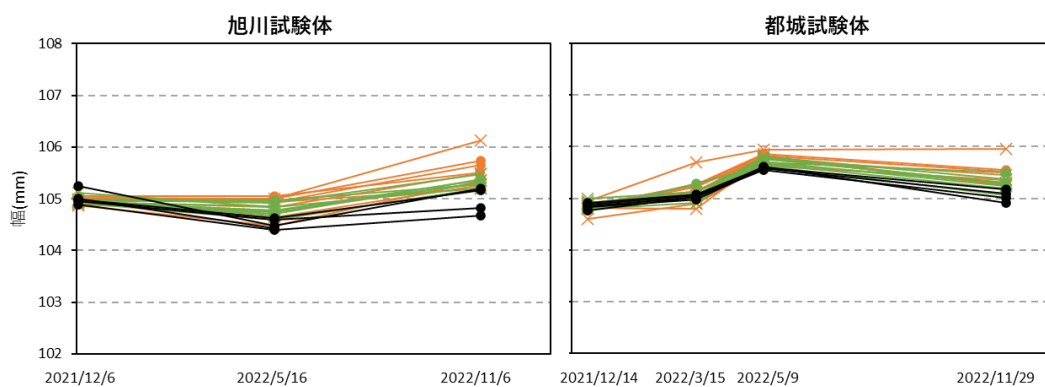
- 屋内
- 屋外平置き
- 屋根付き平置き
- × 屋外縦置き
- × 屋根付き縦置き

図 3.16 無処理 CLT 試験体寸法の推移

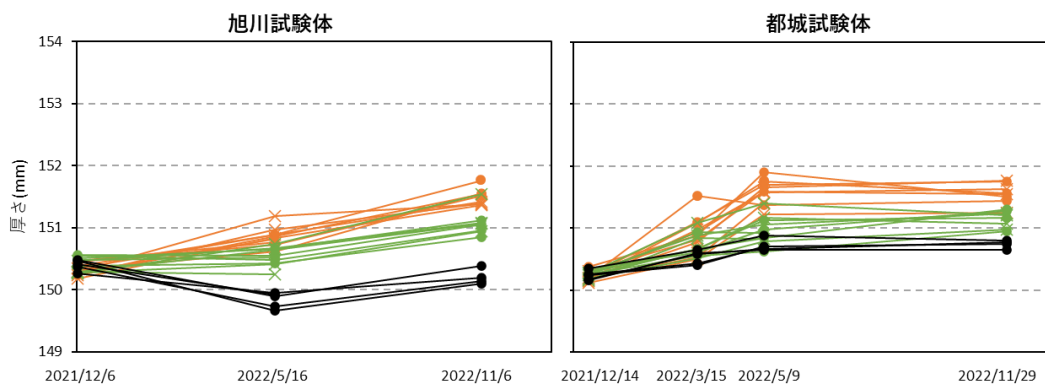
第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



無処理集成材長さ



無処理集成材幅 (幅①～③の平均値)

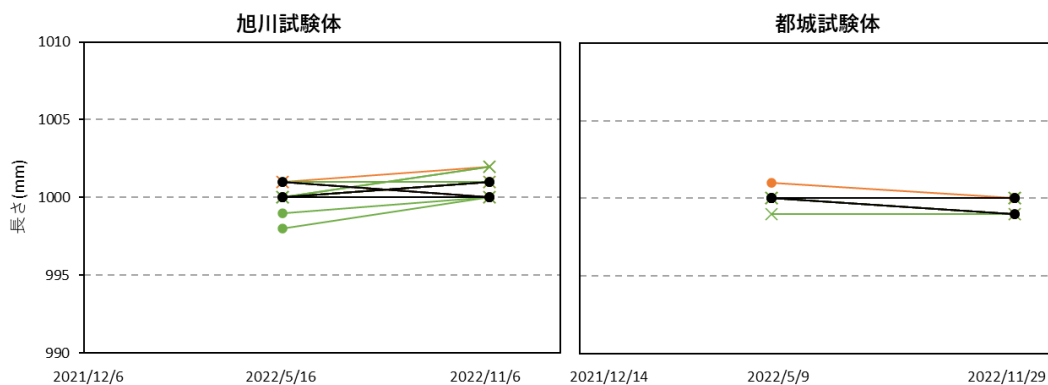


無処理集成材厚さ (厚さ①～③の平均値)

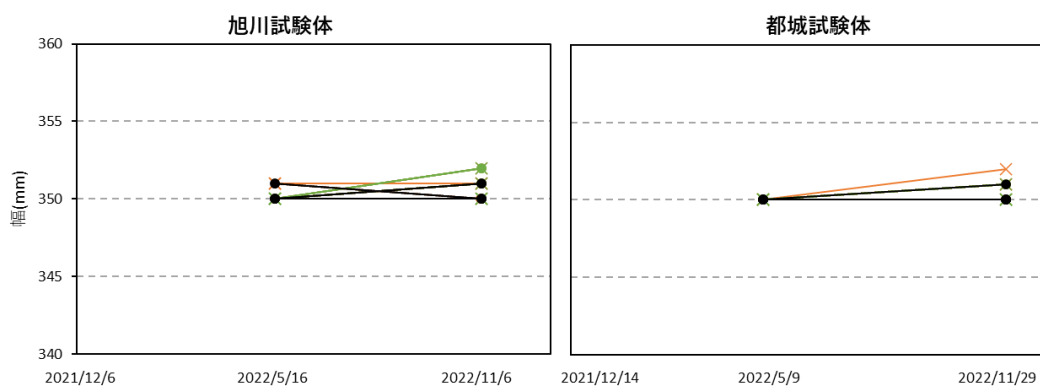
- 屋内
- 屋外平置き
- 屋根付き平置き
- × 屋外縦置き
- × 屋根付き縦置き

図 3.17 無処理集成材試験体寸法の推移

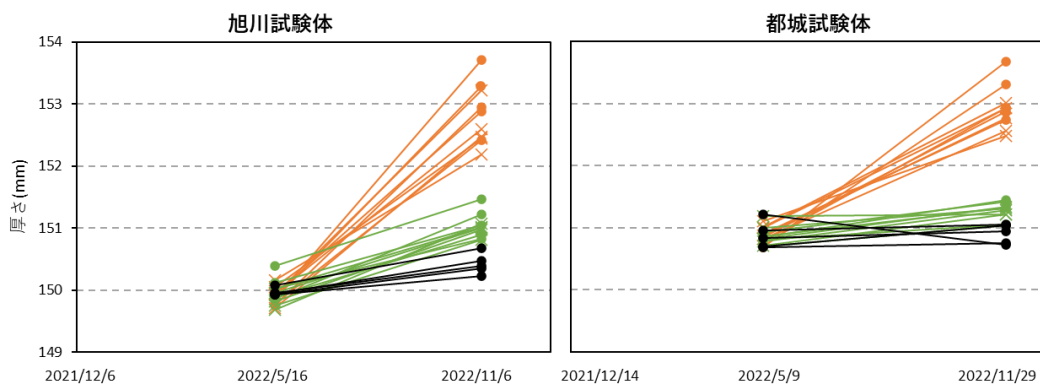
第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



薬剤処理 CLT 長さ



薬剤処理 CLT 幅



薬剤処理 CLT 厚さ (厚さ①～③の平均値)

- 屋内
- 屋外平置き
- 屋根付き平置き
- × 屋外縦置き
- × 屋根付き縦置き

図 3.18 薬剤処理 CLT 試験体寸法の推移

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

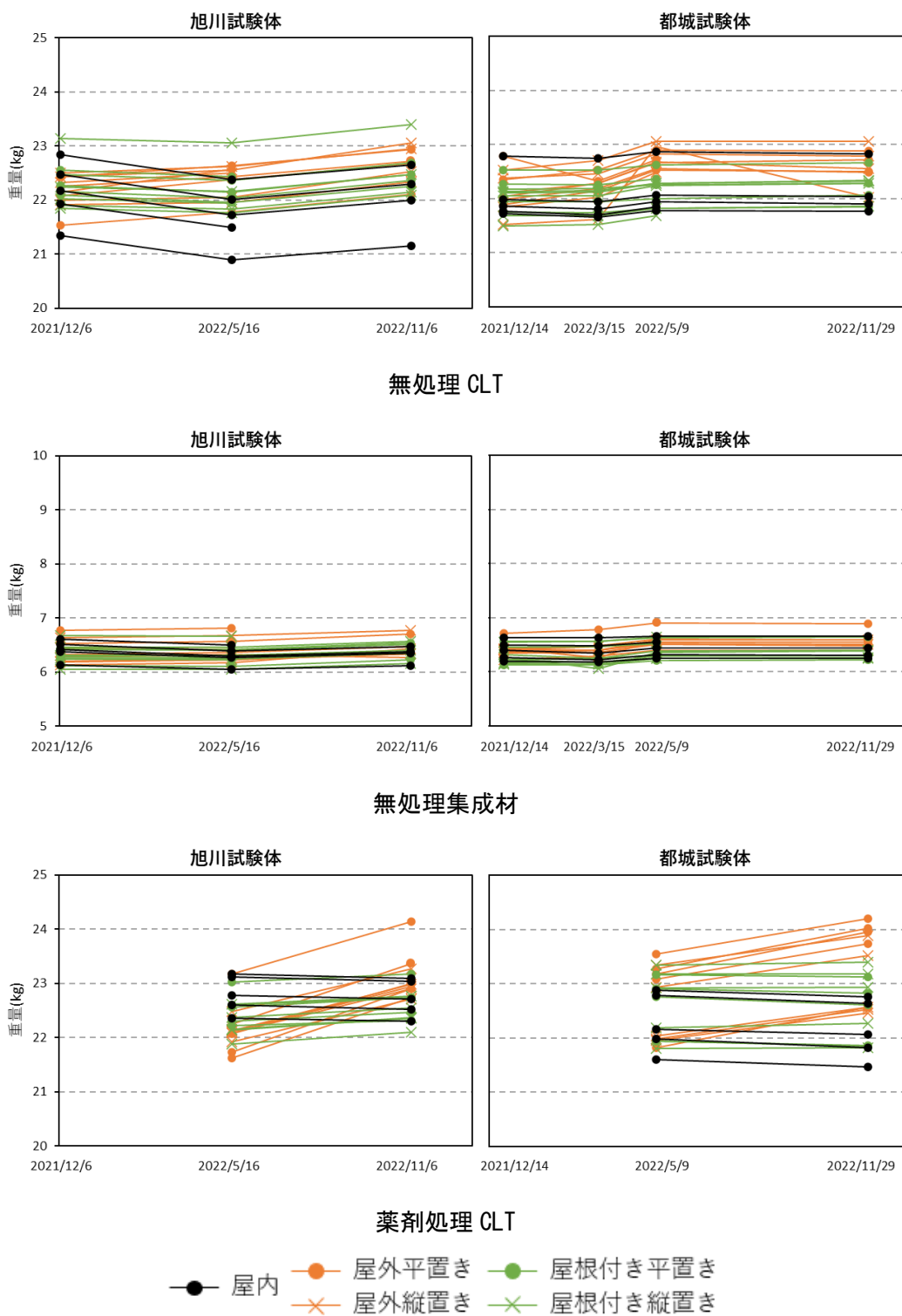


図 3.19 試験体重量の推移



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

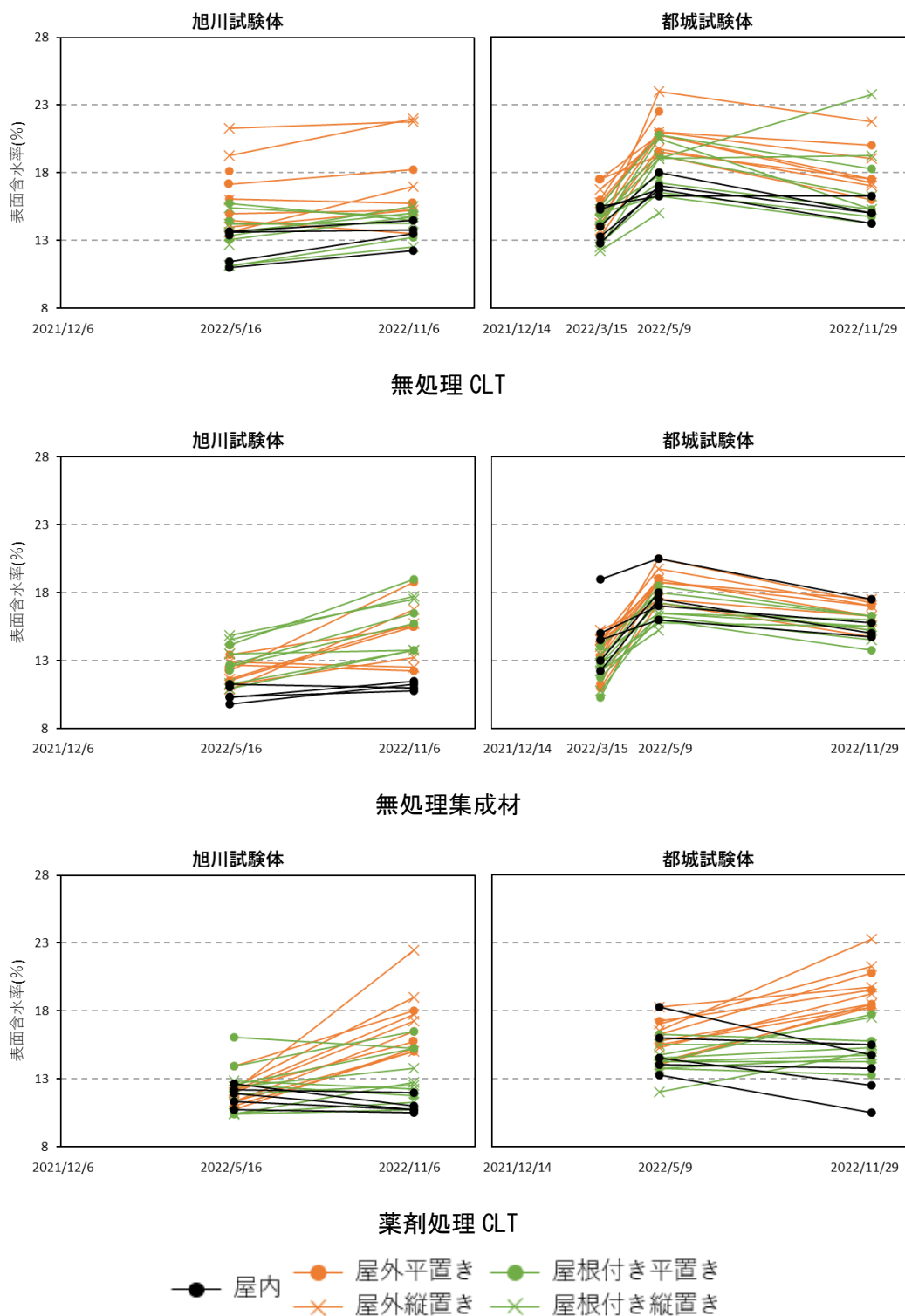


図 3.20 表面含水率の推移（表面含水率①と②の平均値）  
 無処理試験体は設置時の計測がおこなえていない

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

#### 3.2.5. 外部環境

表 3.5 に旭川の屋内外の気温と降水量、降雪量の月別データを示す。また表 3.6 に都城の屋内外の気温と降水量の月別データを示す。気温は試験体設置場所で温湿度センサ（おんどとり）を使用して計測した値、降水量と降雪量は気象庁のデータベース<sup>3-8)</sup>から得た値を用いている。なお、本計測期間中に都城で降雪は観測されていなかったため、表から省略している。

降水量は都城の方が全体的に多かった。また試験体を置いていた環境は、都城の場合、屋内外で温湿度に大きな違いはなかった。一方で旭川は屋内試験体を暖房の使用がおこなえる場所に置いていた関係で、冬季の温湿度が屋内外で大きく異なっている。

表 3.5 旭川の屋内外気温と降水量、降雪量の月別データ

旭川	年	2021	2022										
	月	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
月平均屋内気温	°C		8.66	9.74	12.28	15.36	18.06	20.88	26.00	24.29	21.36	15.62	
月平均屋外気温	°C	-2.81	-8.81	-6.83	0.03	6.98	13.61	17.02	22.28	19.35	15.00	8.43	
月の降水量合計	mm	97.00	53.50	49.50	58.50	30.50	103.00	189.00	134.50	241.00	118.50	108.00	93.50
1時間降水量の最大	mm	5.00	3.00	3.00	2.50	4.50	7.00	39.50	34.00	33.00	15.50	13.00	5.00
月の降雪量の合計	cm	111.00	89.00	103.00	71.00	5.00	-	-	-	-	-	-	18.00
1日の最深深雪	cm	38.00	55.00	70.00	65.00	3.00	-	-	-	-	-	-	9.00

表 3.6 都城の屋内外気温と降水量の月別データ

都城	年	2021	2022										
	月	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
月平均屋内気温	°C			9.27	15.19	19.45	21.23	24.88	28.74	30.41	27.98	23.25	
月平均屋外気温	°C	11.03	6.47	6.61	13.17	17.54	20.28	24.07	27.49	28.28	23.92	20.06	15.62
月の降水量合計	mm	40.50	32.00	30.00	168.50	327.00	219.50	364.00	752.00	94.00	927.00	46.50	187.00
1時間降水量の最大	mm	19.00	4.00	2.50	13.50	41.00	17.50	26.00	68.50	17.00	51.50	7.50	24.00

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

図 3.21 に両試験地の屋内外温湿度の日平均値の変動を示す。また図 3.22 に両試験地の降水量の推移を、図 3.23 に旭川の降雪量の推移を示す。2022年1月から2022年4月の旭川屋内は相対湿度20%とかなり乾燥した状態で試験体を暴露していた。旭川の降雪は2022年4月に終了している。

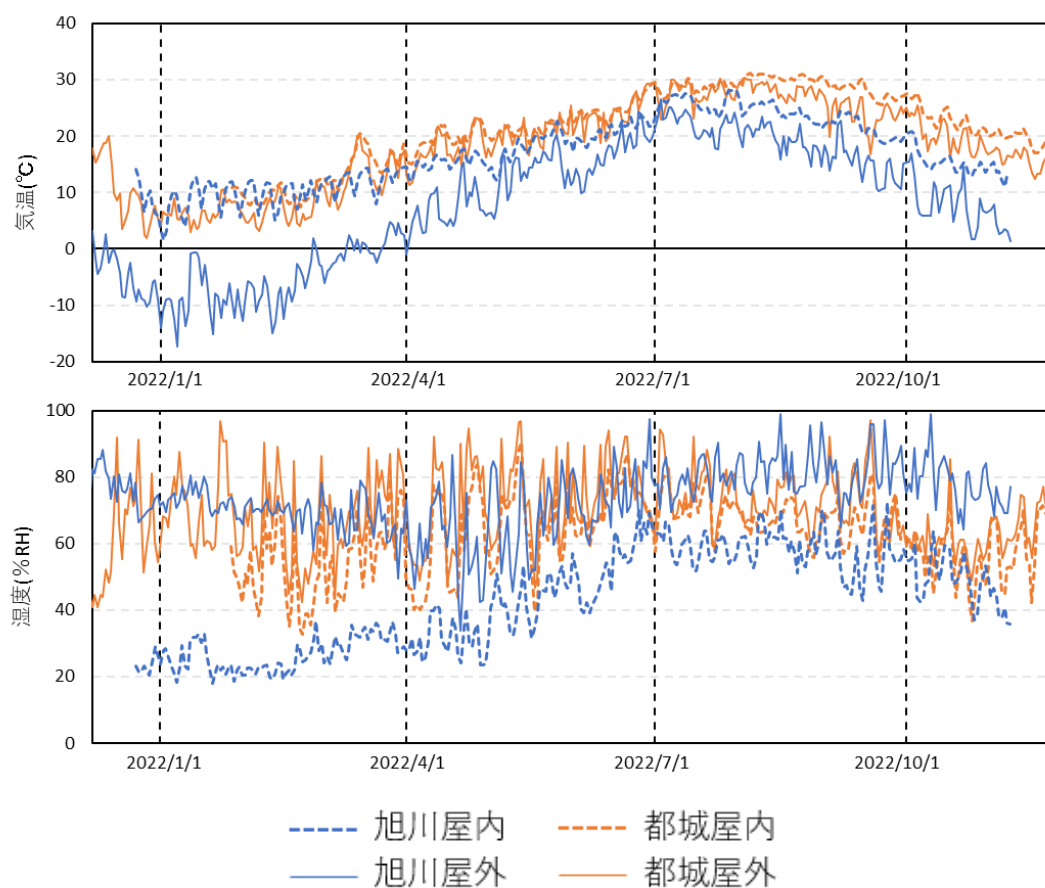


図 3.21 両試験地の屋内外温湿度の日平均値

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

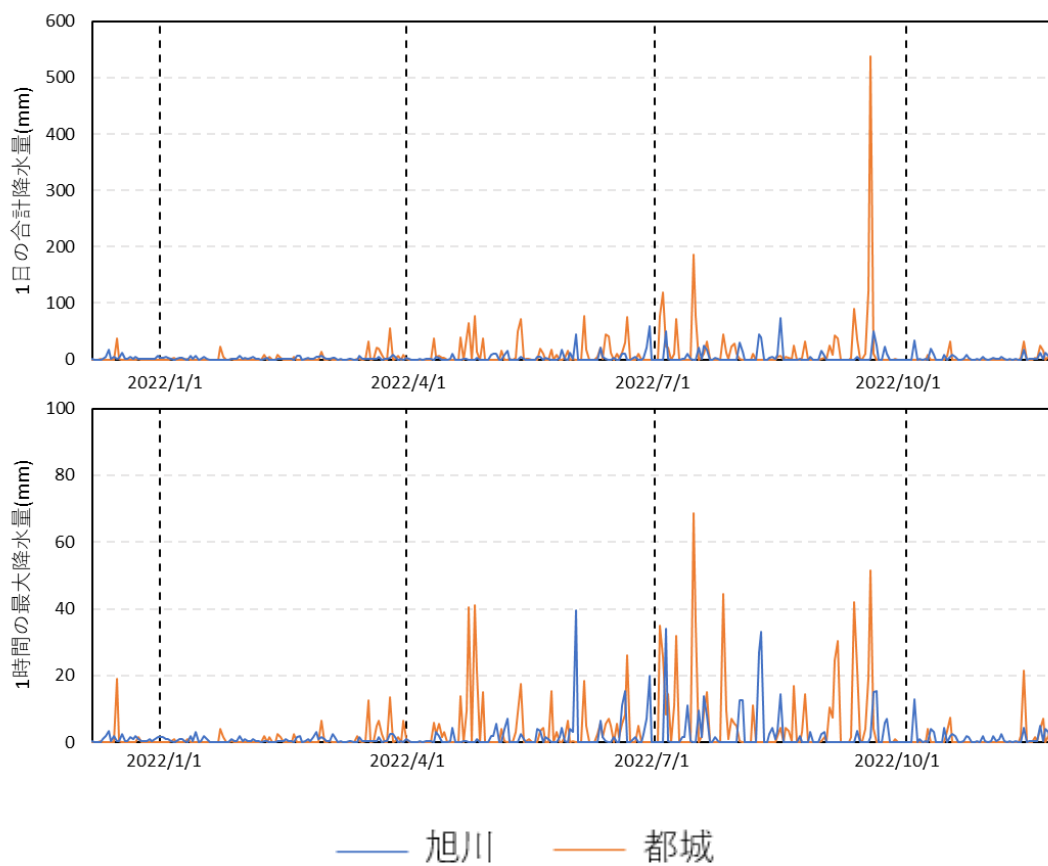


図 3.22 両試験地の降水量の推移

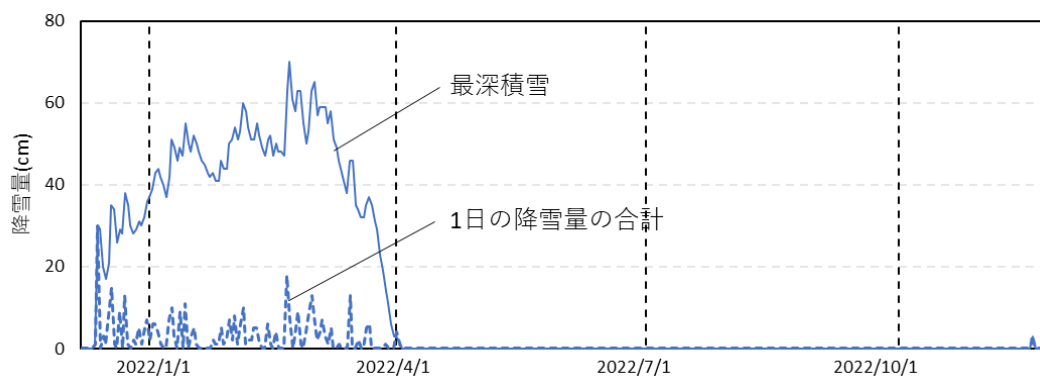


図 3.23 旭川の降雪量の推移

#### 3.2.6. 試験体各面の様子

写真 3.6 から写真 3.33 に暴露条件ごとの無処理試験体各面の暴露開始から半年経過時と約1年経過時の様子と、薬剤処理試験体各面の暴露開始から半年経過時の様子を示す。割れが生じている場所は上からマジックでなぞっている。

全体として、屋内暴露試験体に対し屋外暴露試験体の方が同じ期間暴露していた状態で割れが進んでいた。また屋外暴露試験体でも、屋根付き暴露試験体の方が割れは少なく、無処理 CLT 試験体の屋外暴露試験体では目地が広がっている様子も確認された。

##### 【無処理 CLT・集成材】

無処理 CLT と無処理集成材では、どちらの試験地でも暴露期間とともに屋外暴露試験体の各面の割れが進む様子を確認した。旭川試験体は、暴露開始が冬で屋外平置き、屋外縦置き試験体上部に雪が積もっていたこともあり、6 か月経過時点の材色変化が都城試験体に比べて少なかった。しかし、約1年経過するとどちらの試験地でも同じように屋外平置き、屋外縦置き試験体は灰色に材色が変化した。また屋外平置き試験体は、旭川の場合降雪の影響で試験体上面にカビが発生しており、都城の場合降雨の影響で試験体下面にカビが発生していた（試験体と地面との距離が近いため）。また全体として割れの量は都城試験体の方が多かったが、旭川試験体は幅広の割れが生じていた（無処理 CLT 屋外縦置きの上面など）、この影響で内部温湿度の計測値に影響を及ぼしていた。屋内試験体に関して、都城試験体は1年経過してもほとんど割れていなかったが、旭川試験体は設置場所が暖房の使用等で乾燥していたこともあり CLT の接着層付近に割れが生じていた。現状、全ての試験体に目視でわかる腐朽は発生していない。

##### 【薬剤処理 CLT】

薬剤処理 CLT 試験体は、6 か月経過時点でインサイジング同士がつながるような割れが試験体全体に生じている。屋外縦置き上面ではどちらの試験地でも CLT の接着層付近に幅広の割れが発生している。写真 3.32 に示すように、都城試験体屋根付き縦置きの西面に腐朽のようなものが発生していた。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

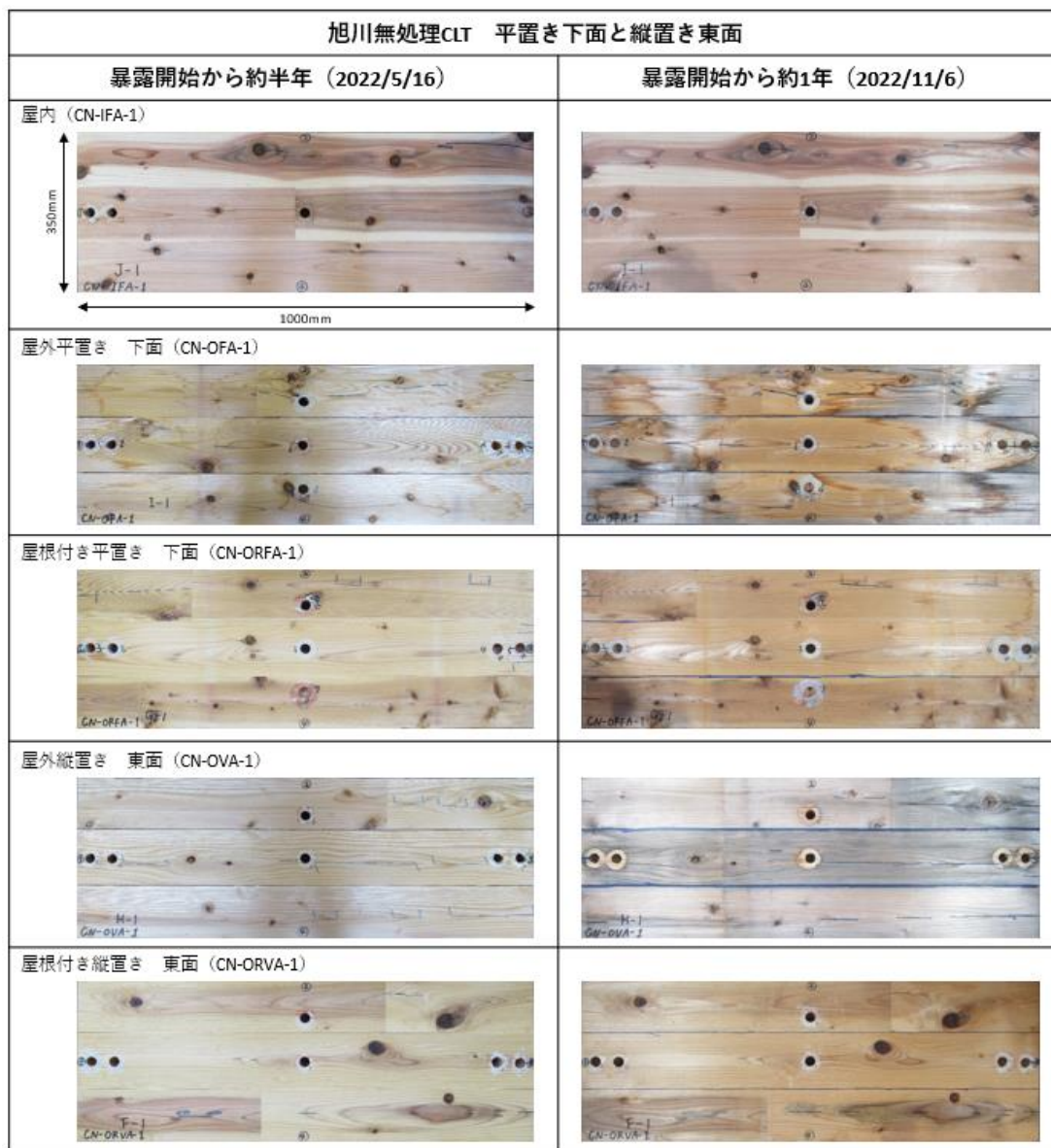


写真 3.6 旭川無処理 CLT 平置き下面と縦置き東面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

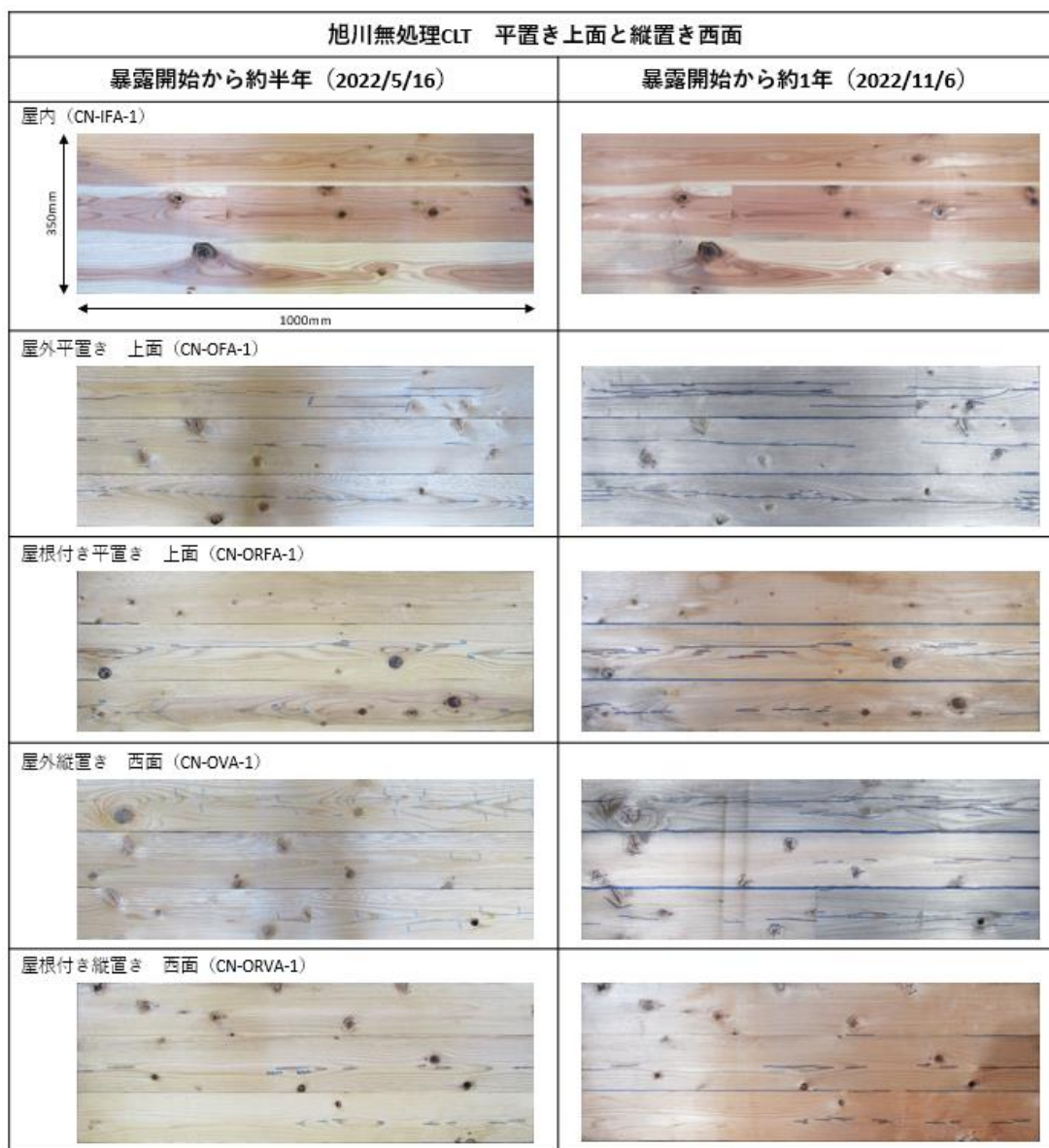


写真 3.7 旭川無処理 CLT 平置き上面と縦置き西面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

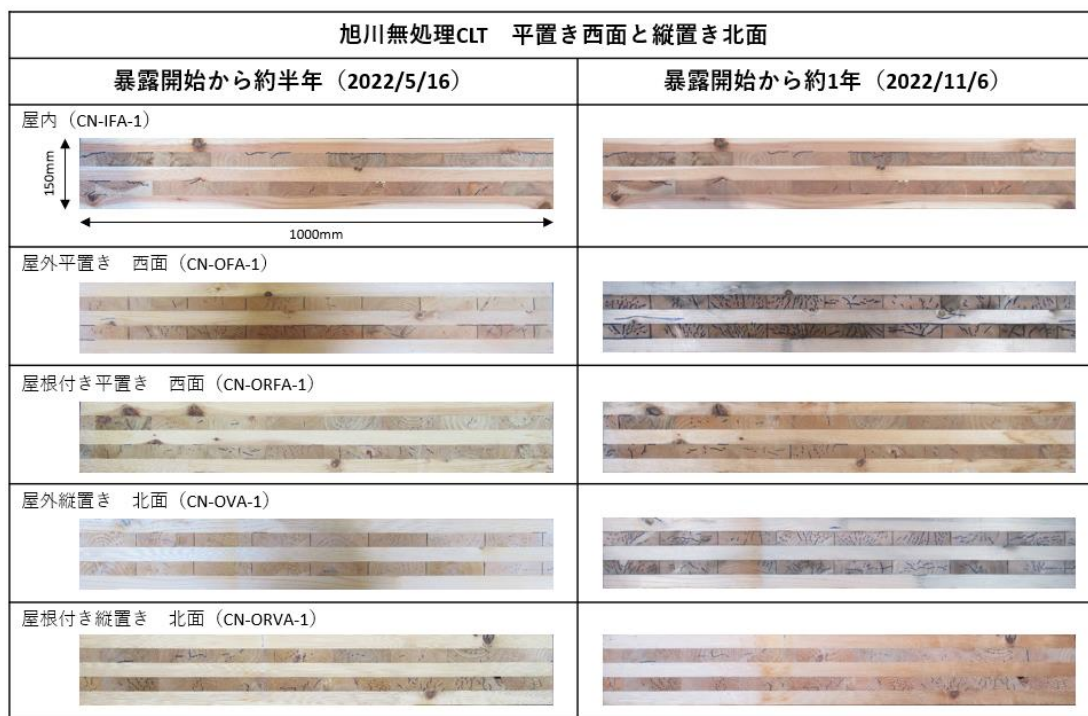


写真 3.8 旭川無処理 CLT 平置き西面と縦置き北面

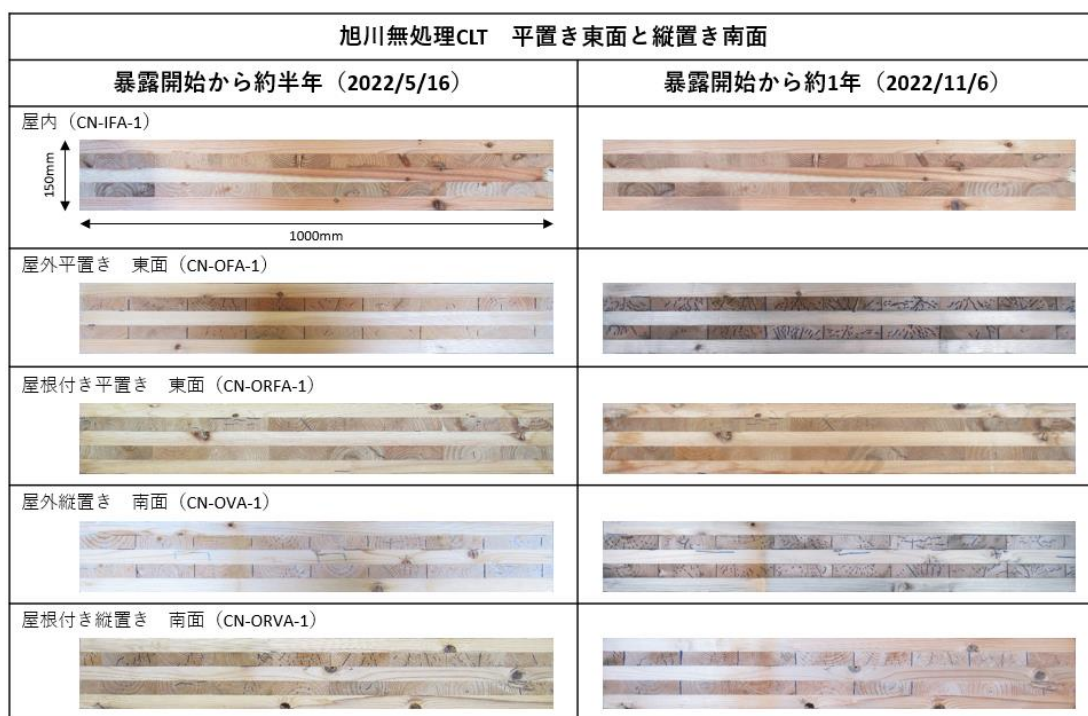


写真 3.9 旭川無処理 CLT 平置き東面と縦置き南面



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

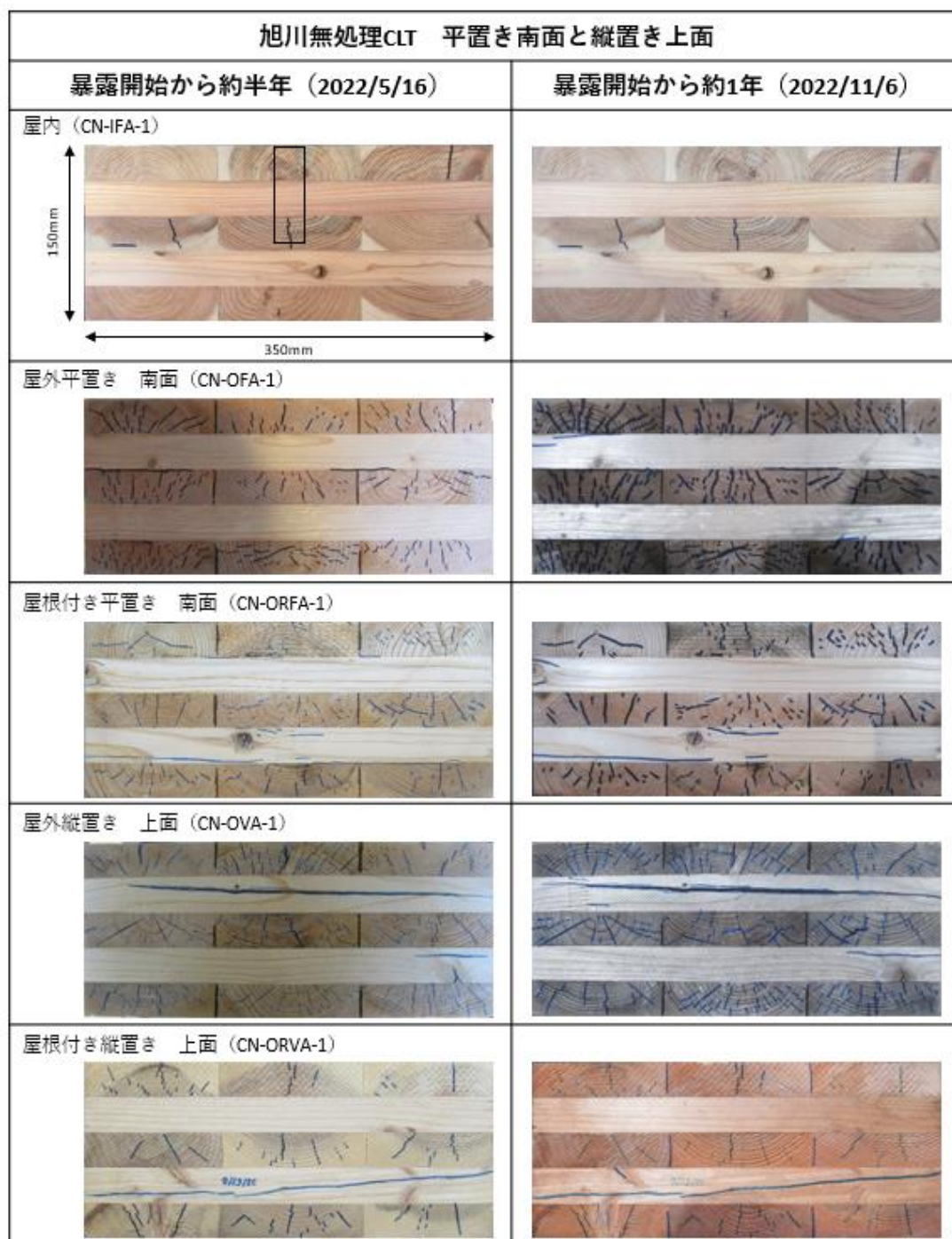


写真 3.10 旭川無処理 CLT 平置き南面と縦置き上面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

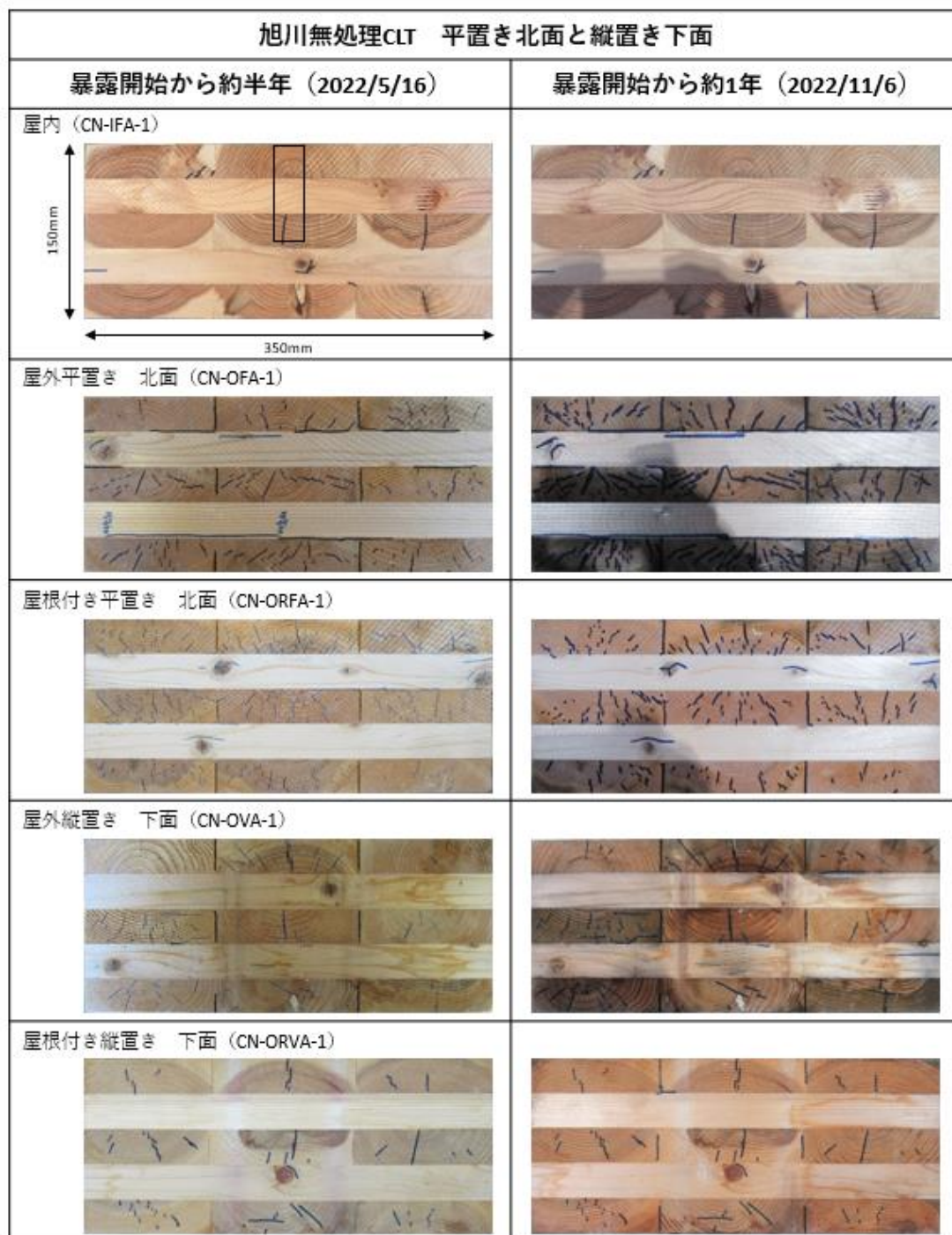


写真 3.11 旭川無処理 CLT 平置き北面と縦置き下面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

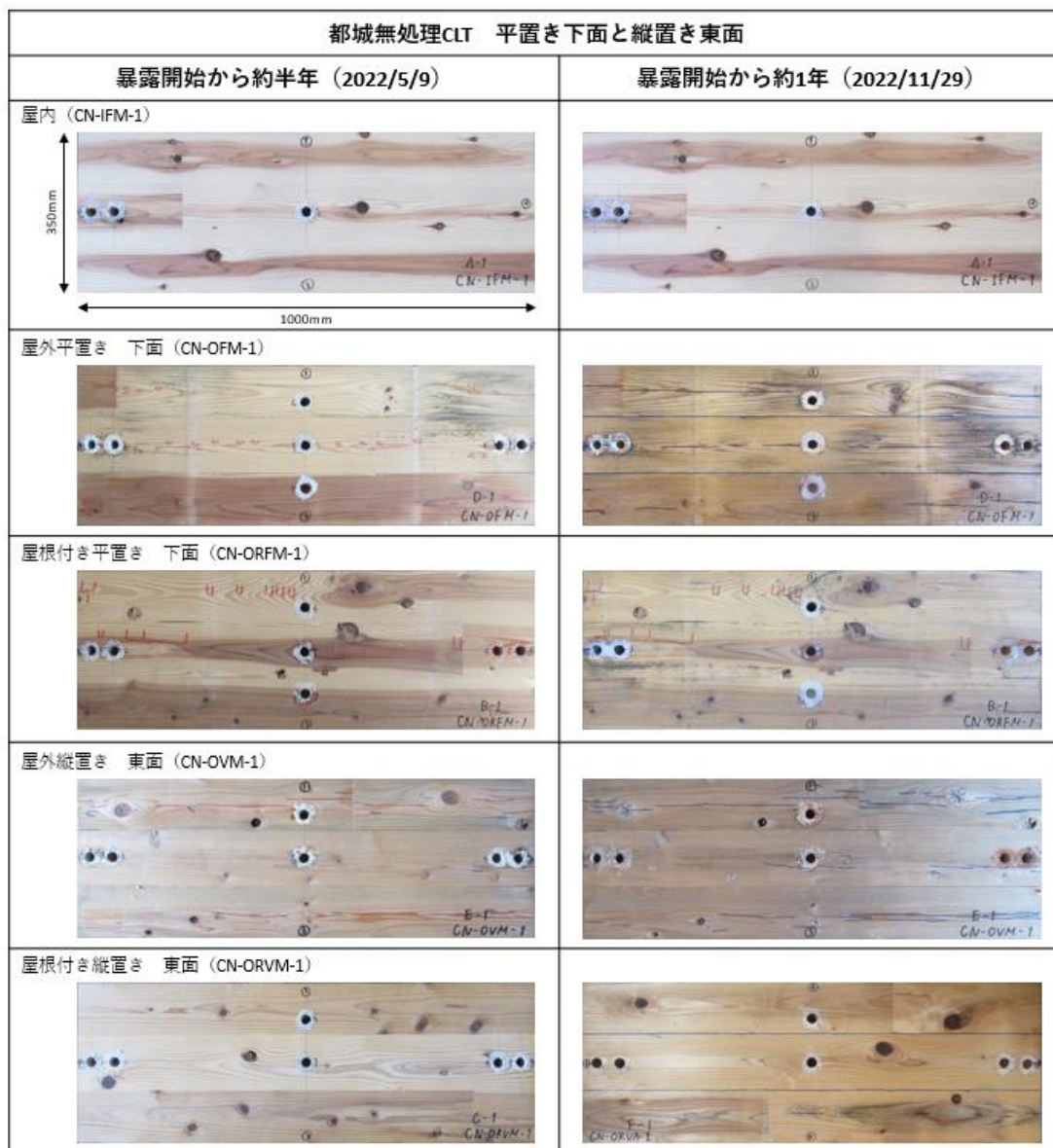


写真 3.12 都城無処理 CLT 平置き下面と縦置き東面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

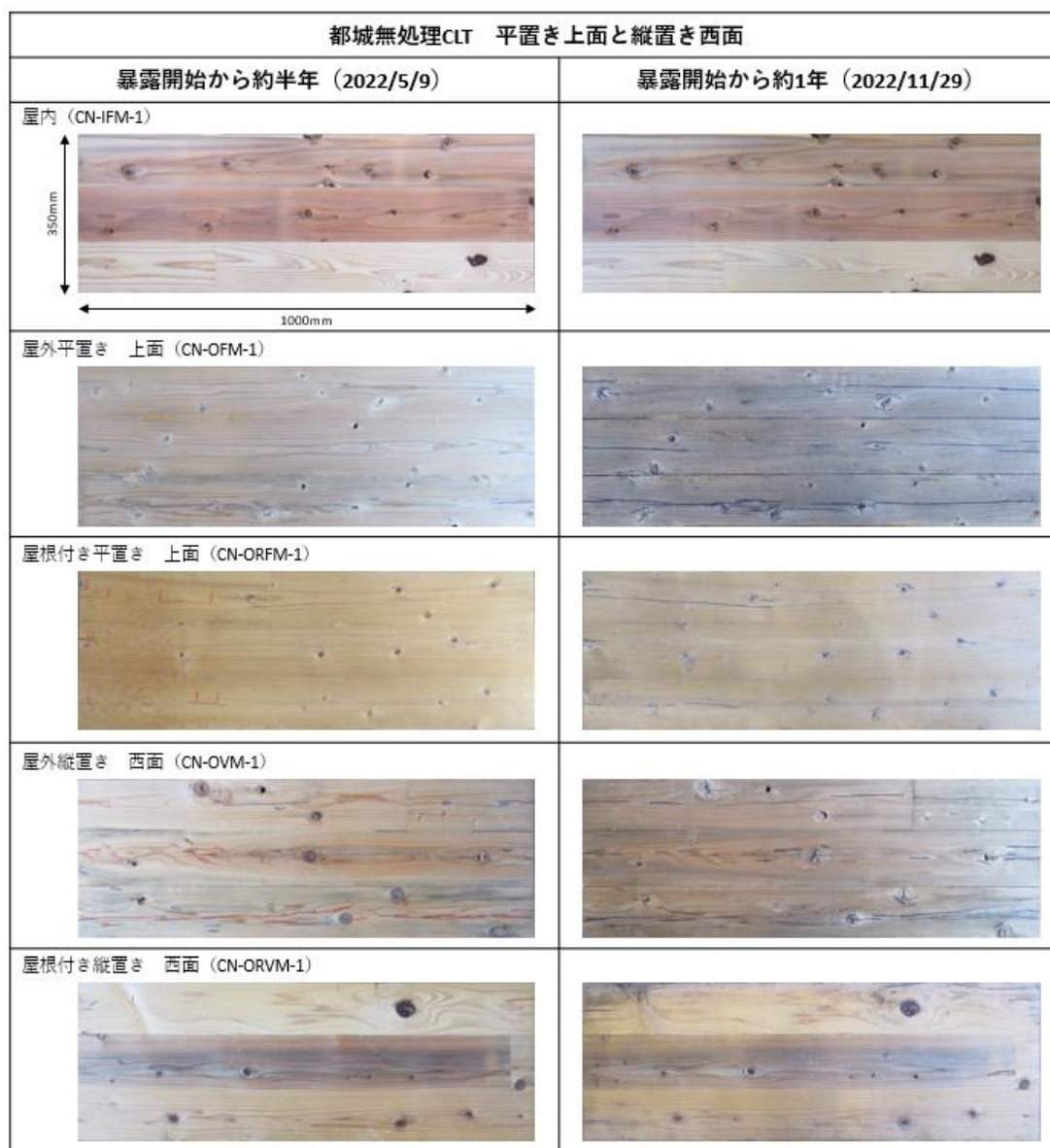


写真 3.13 都城無処理 CLT 平置き上面と縦置き西面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

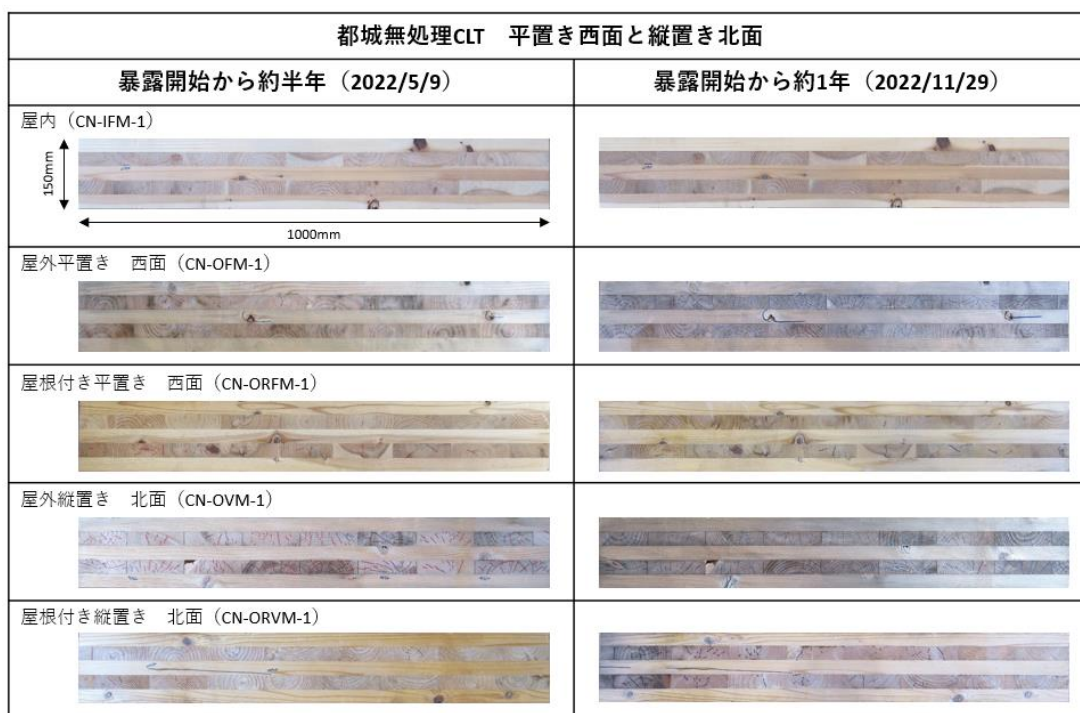


写真 3.14 都城無処理 CLT 平置き西面と縦置き北面

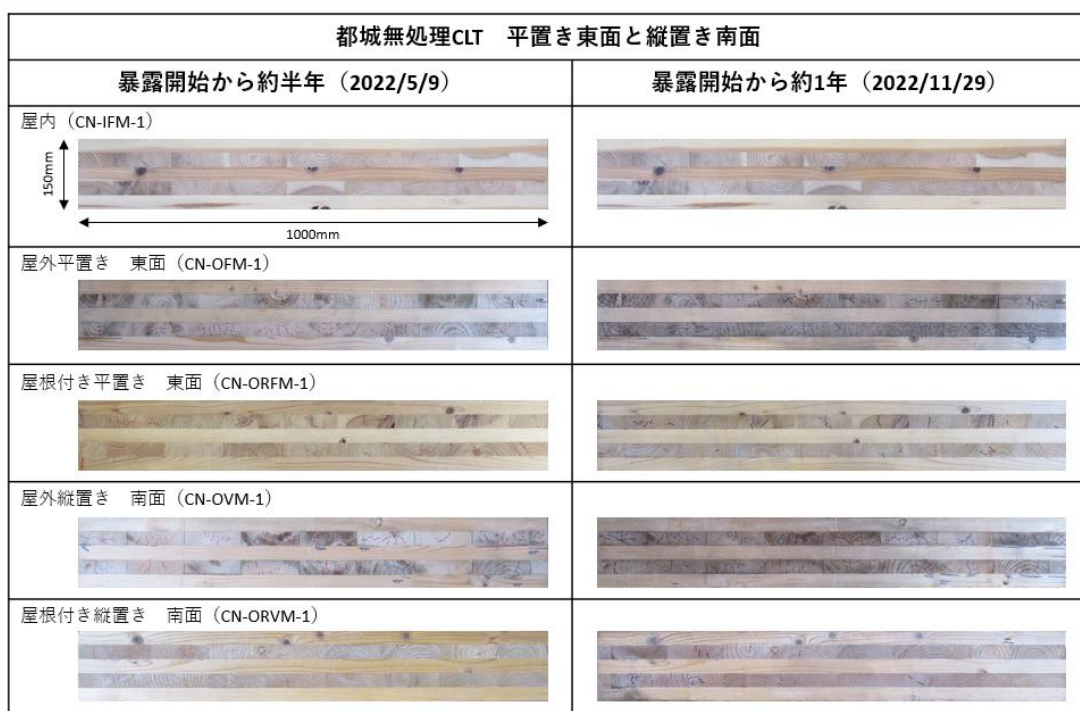


写真 3.15 都城無処理 CLT 平置き東面と縦置き南面

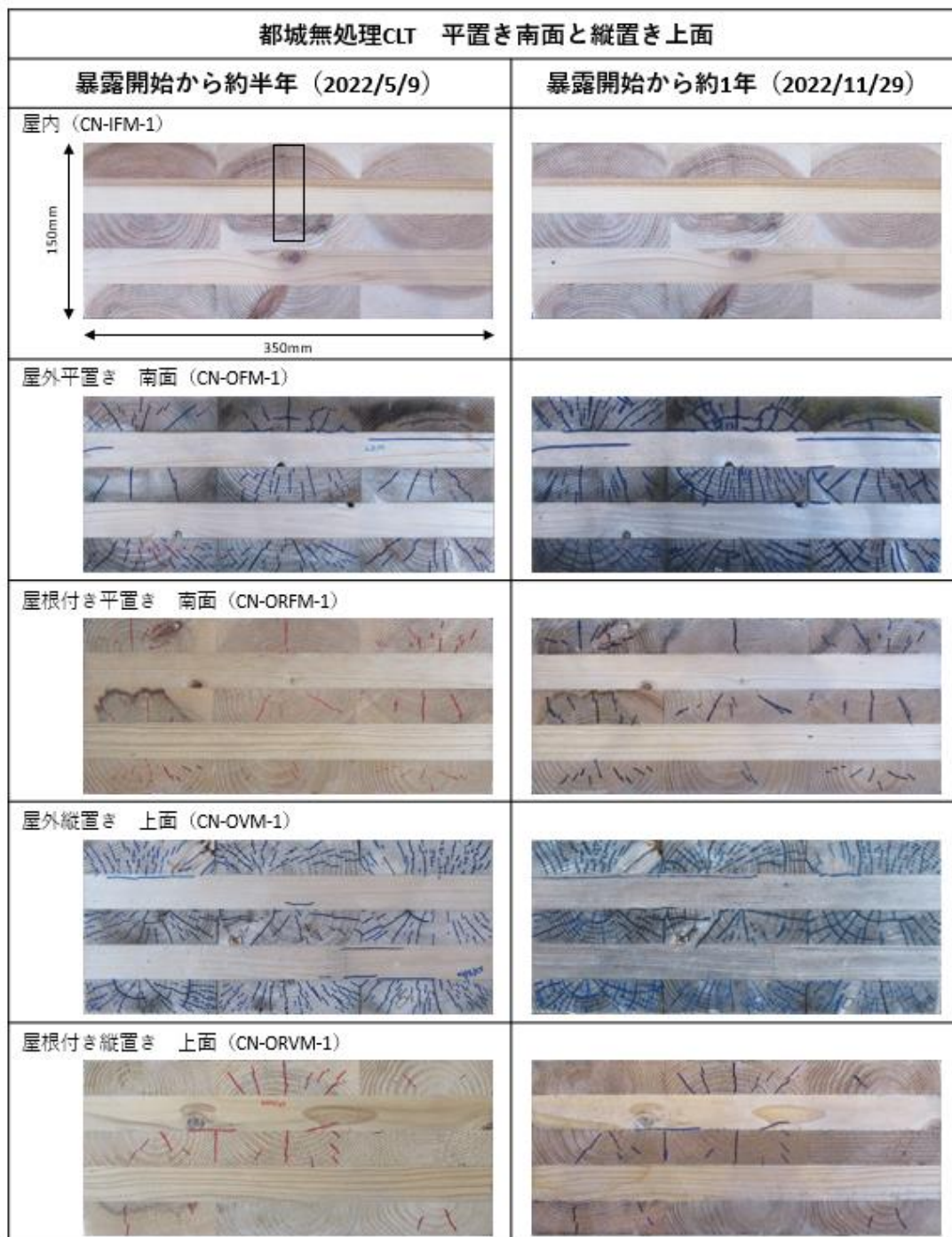


写真 3.16 都城無処理 CLT 平置き南面と縦置き上面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

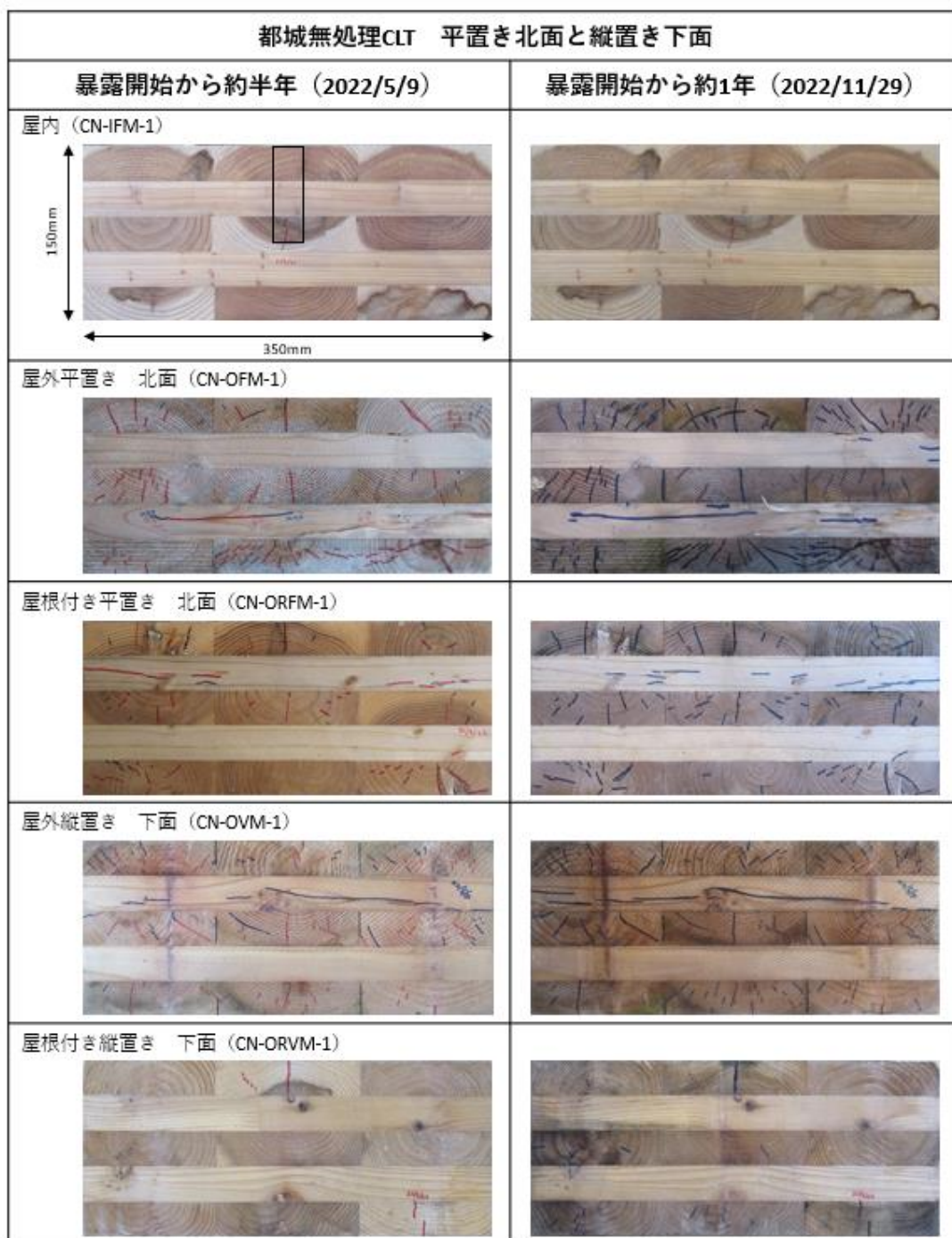


写真 3.17 都城無処理 CLT 平置き北面と縦置き下面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



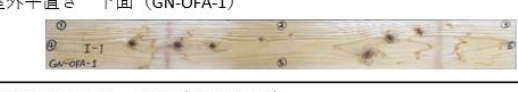






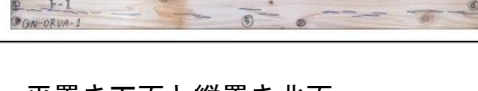
旭川無処理集成材 平置き下面と縦置き北面	
暴露開始から約半年 (2022/5/16)	暴露開始から約1年 (2022/11/6)
屋内 (GN-IFA-1) 	
屋外平置き 下面 (GN-OFA-1) 	
屋根付き平置き 下面 (GN-ORFA-1) 	
屋外縦置き 北面 (GN-OVA-1) 	
屋根付き縦置き 北面 (GN-ORVA-1) 	

写真 3.18 旭川無処理集成材 平置き下面と縦置き北面

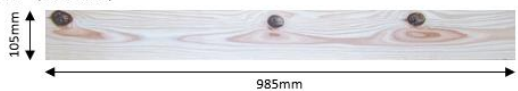









旭川無処理集成材 平置き上面と縦置き南面	
暴露開始から約半年 (2022/5/16)	暴露開始から約1年 (2022/11/6)
屋内 (GN-IFA-1) 	
屋外平置き 上面 (GN-OFA-1) 	
屋根付き平置き 上面 (GN-ORFA-1) 	
屋外縦置き 南面 (GN-OVA-1) 	
屋根付き縦置き 南面 (GN-ORVA-1) 	

写真 3.19 旭川無処理集成材 平置き上面と縦置き南面



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

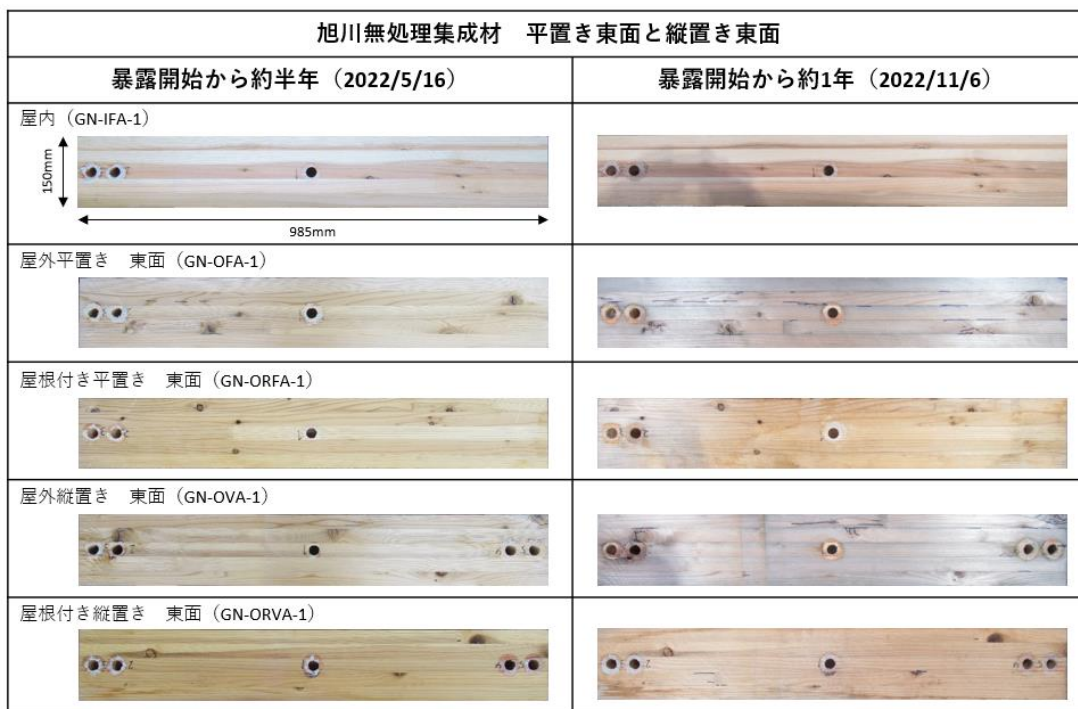


写真 3.20 旭川無処理集成材 平置き東面と縦置き東面

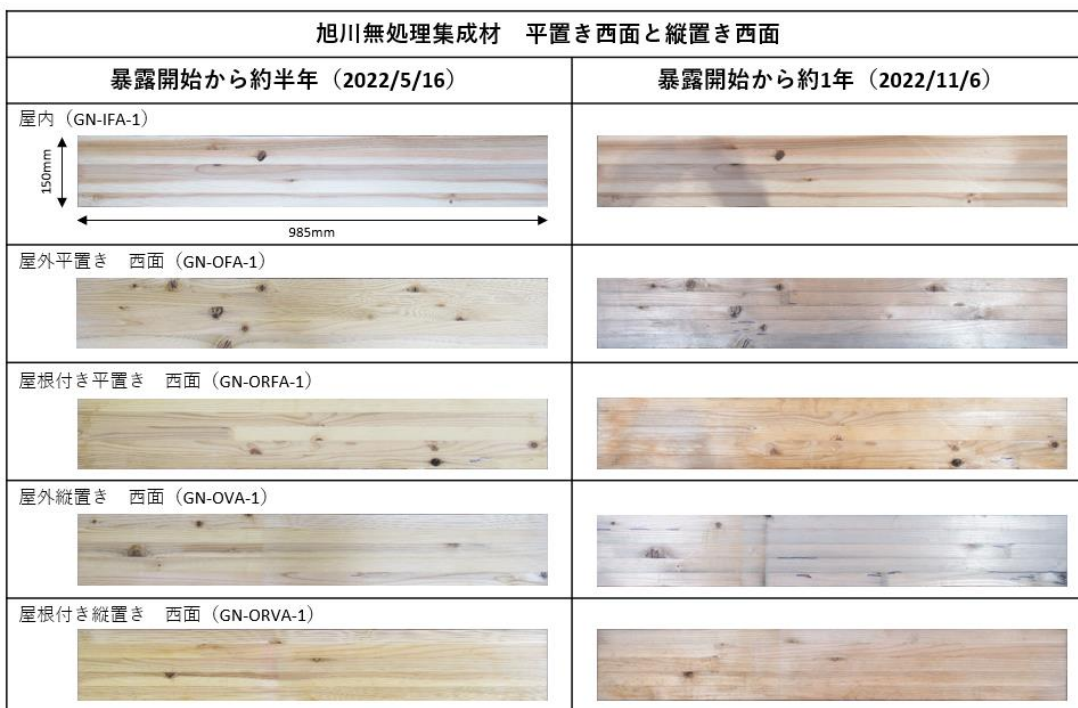


写真 3.21 旭川無処理集成材 平置き西面と縦置き西面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

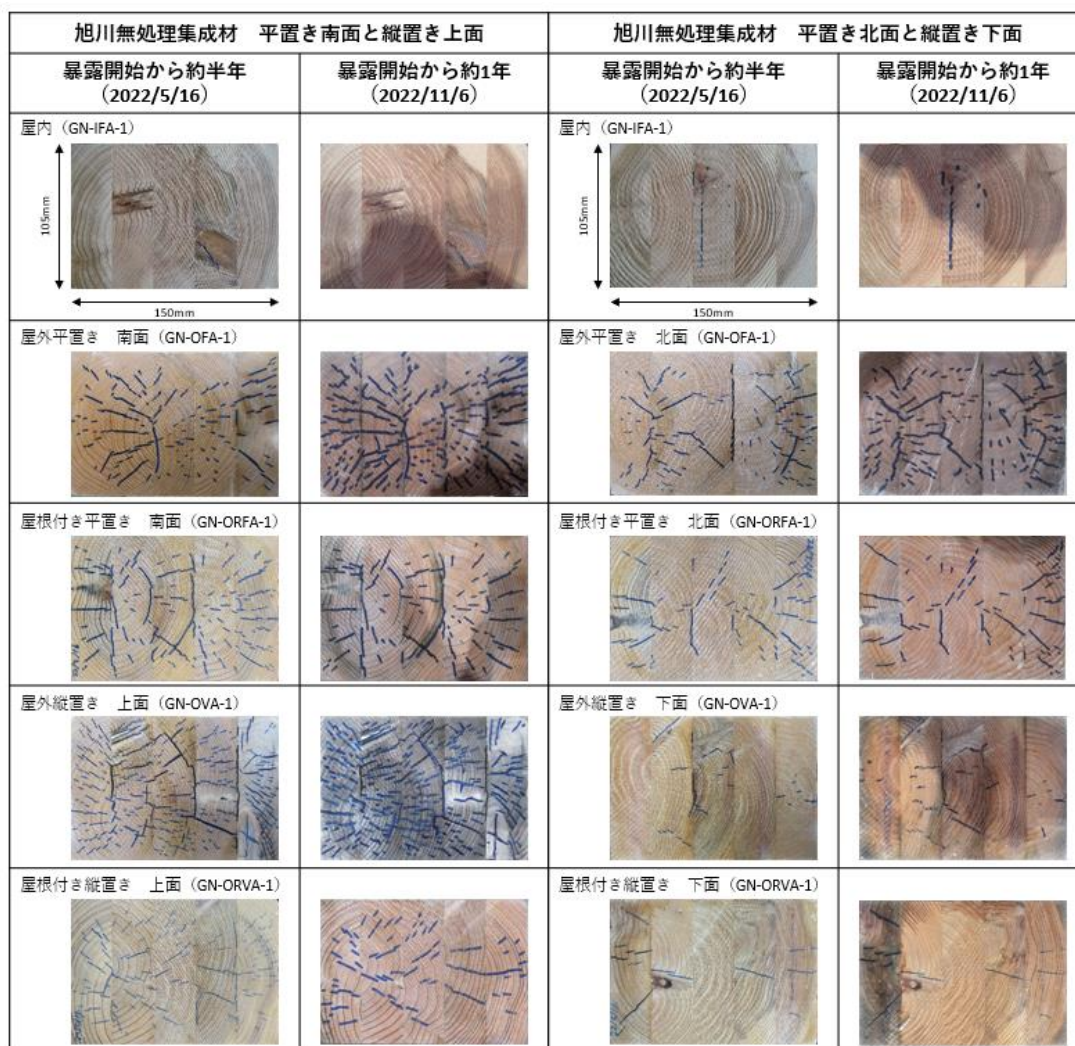


写真 3.22 旭川無処理集成材 木口

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動











都城無処理集成材 平置き下面と縦置き北面	
暴露開始から約半年 (2022/5/9)	暴露開始から約1年 (2022/11/29)
屋内 (GN-IFM-1) 	
屋外平置き 下面 (GN-OFM-1) 	
屋根付き平置き 下面 (GN-ORFM-1) 	
屋外縦置き 北面 (GN-OVM-1) 	
屋根付き縦置き 北面 (GN-ORVM-1) 	

写真 3.23 都城無処理集成材 平置き下面と縦置き北面







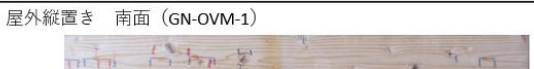



都城無処理集成材 平置き上面と縦置き南面	
暴露開始から約半年 (2022/5/9)	暴露開始から約1年 (2022/11/29)
屋内 (GN-IFM-1) 	
屋外平置き 上面 (GN-OFM-1) 	
屋根付き平置き 上面 (GN-ORFM-1) 	
屋外縦置き 南面 (GN-OVM-1) 	
屋根付き縦置き 南面 (GN-ORVM-1) 	

写真 3.24 都城無処理集成材 平置き上面と縦置き南面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

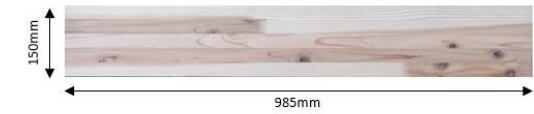









都城無処理集成材 平置き東面と縦置き東面	
暴露開始から約半年 (2022/5/9)	暴露開始から約1年 (2022/11/29)
屋内 (GN-IFM-1) 	
屋外平置き 東面 (GN-OFM-1) 	
屋根付き平置き 東面 (GN-ORFM-1) 	
屋外縦置き 東面 (GN-OVM-1) 	
屋根付き縦置き 東面 (GN-ORVM-1) 	

写真 3.25 都城無処理集成材 平置き東面と縦置き東面









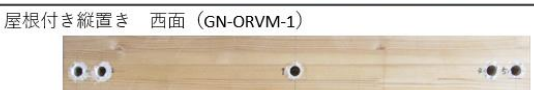

都城無処理集成材 平置き西面と縦置き西面	
暴露開始から約半年 (2022/5/9)	暴露開始から約1年 (2022/11/29)
屋内 (GN-IFM-1) 	
屋外平置き 西面 (GN-OFM-1) 	
屋根付き平置き 西面 (GN-ORFM-1) 	
屋外縦置き 西面 (GN-OVM-1) 	
屋根付き縦置き 西面 (GN-ORVM-1) 	

写真 3.26 都城無処理集成材 平置き西面と縦置き西面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

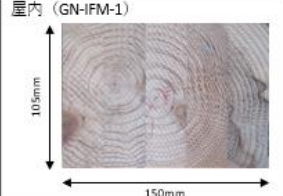

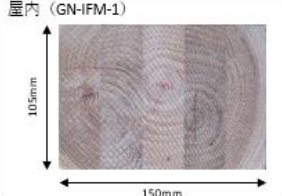

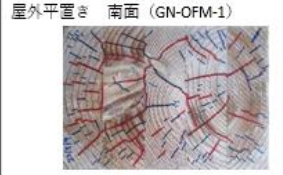
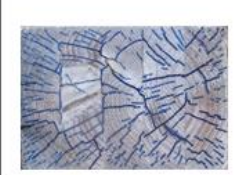
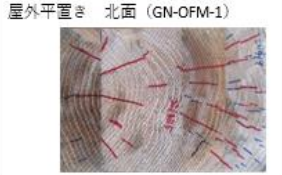
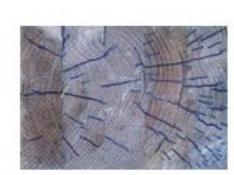
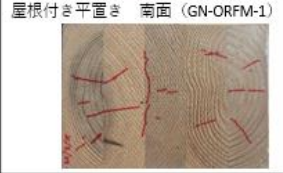



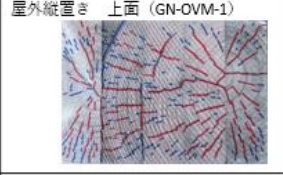
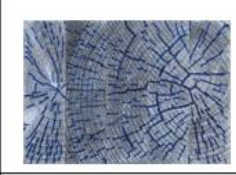


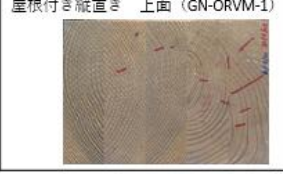

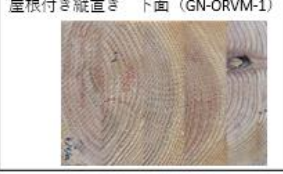

都城無処理集成材 平置き南面と縦置き上面		都城無処理集成材 平置き北面と縦置き下面	
暴露開始から約半年 (2022/5/9)	暴露開始から約1年 (2022/11/29)	暴露開始から約半年 (2022/5/9)	暴露開始から約1年 (2022/11/29)
屋内 (GN-IFM-1) 		屋内 (GN-IFM-1) 	
屋外平置き 南面 (GN-OFM-1) 		屋外平置き 北面 (GN-OFM-1) 	
屋根付き平置き 南面 (GN-ORFM-1) 		屋根付き平置き 北面 (GN-ORFM-1) 	
屋外縦置き 上面 (GN-OVM-1) 		屋外縦置き 下面 (GN-OVM-1) 	
屋根付き縦置き 上面 (GN-ORVM-1) 		屋根付き縦置き 下面 (GN-ORVM-1) 	

写真 3.27 都城無処理集成材 木口

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

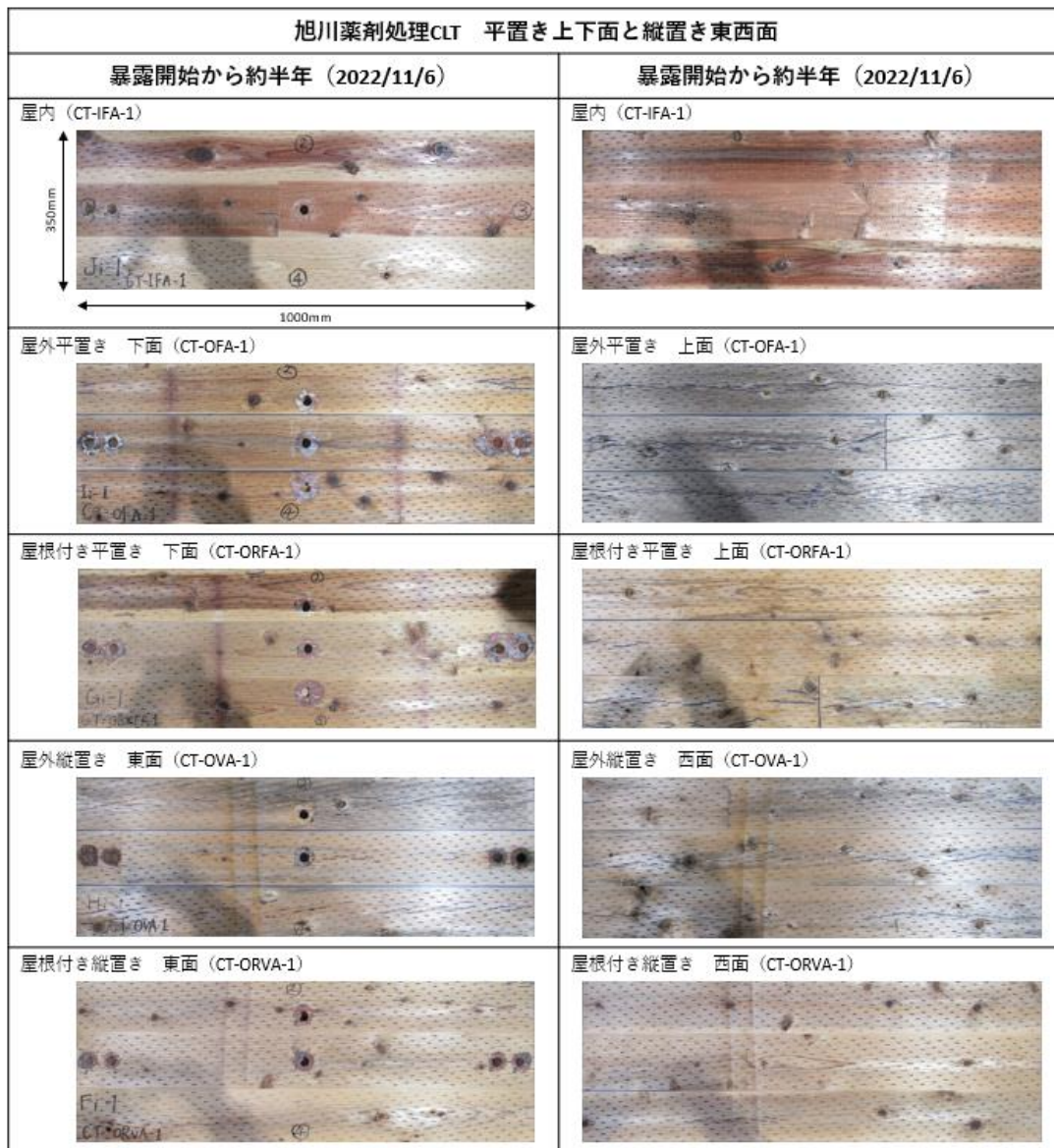


写真 3.28 旭川薬剤処理 CLT 平置き上下面と縦置き東西面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

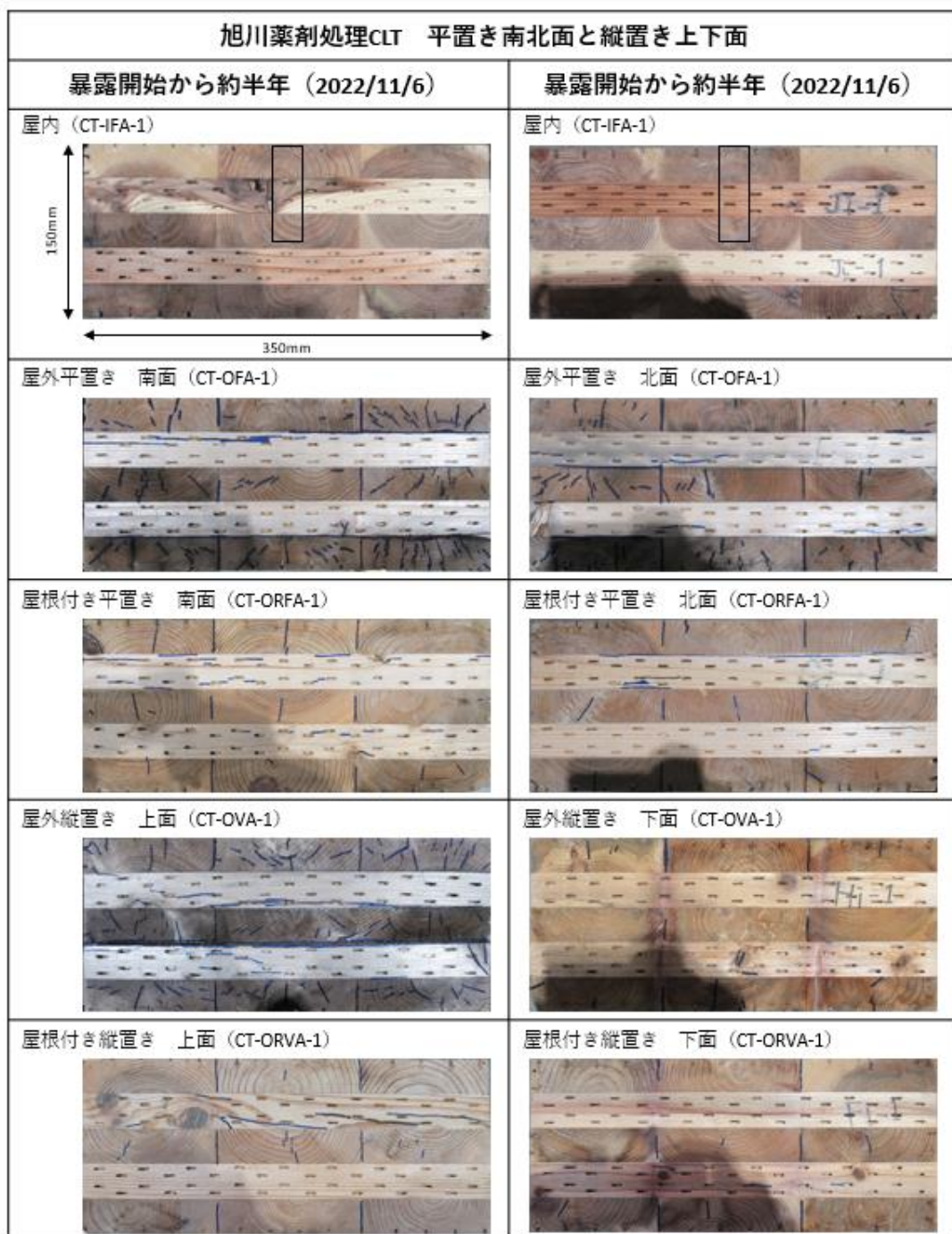


写真 3.29 旭川薬剤処理 CLT 平置き南北面と縦置き上下面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

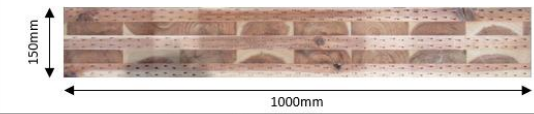









旭川薬剤処理CLT 平置き東西面と縦置き南北面	
暴露開始から約半年 (2022/11/6)	暴露開始から約半年 (2022/11/6)
屋内 (CT-IFA-1) 	屋内 (CT-IFA-1) 
屋外平置き 西面 (CT-OFA-1) 	屋外平置き 東面 (CT-OFA-1) 
屋根付き平置き 西面 (CT-ORFA-1) 	屋根付き平置き 東面 (CT-ORFA-1) 
屋外縦置き 北面 (CT-OVA-1) 	屋外縦置き 南面 (CT-OVA-1) 
屋根付き縦置き 北面 (CT-ORVA-1) 	屋根付き縦置き 南面 (CT-ORVA-1) 

写真 3.30 旭川薬剤処理 CLT 平置き東西面と縦置き南北面

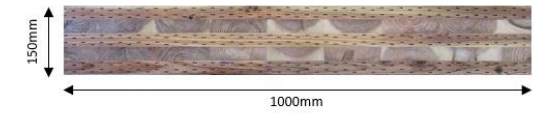



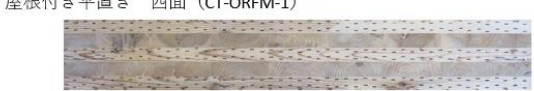

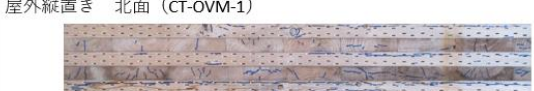



都城薬剤処理CLT 平置き東西面と縦置き南北面	
暴露開始から約半年 (2022/11/29)	暴露開始から約半年 (2022/11/29)
屋内 (CT-IFM-1) 	屋内 (CT-IFM-1) 
屋外平置き 西面 (CT-OFM-1) 	屋外平置き 東面 (CT-OFM-1) 
屋根付き平置き 西面 (CT-ORFM-1) 	屋根付き平置き 東面 (CT-ORFM-1) 
屋外縦置き 北面 (CT-OVM-1) 	屋外縦置き 南面 (CT-OVM-1) 
屋根付き縦置き 北面 (CT-ORVM-1) 	屋根付き縦置き 南面 (CT-ORVM-1) 

写真 3.31 都城薬剤処理 CLT 平置き東西面と縦置き南北面



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

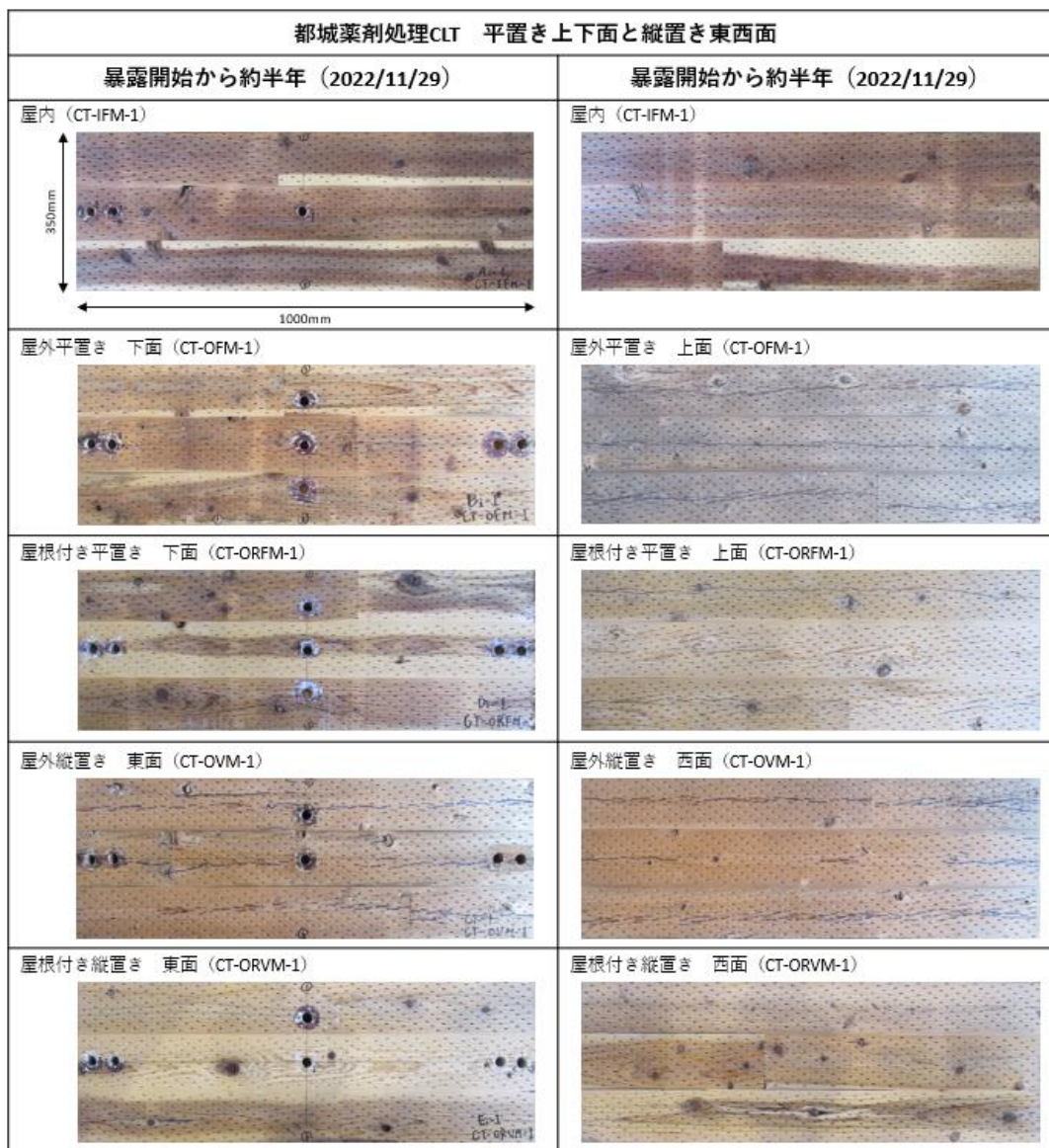


写真 3.32 都城薬剤処理 CLT 平置き上下面と縦置き東西面

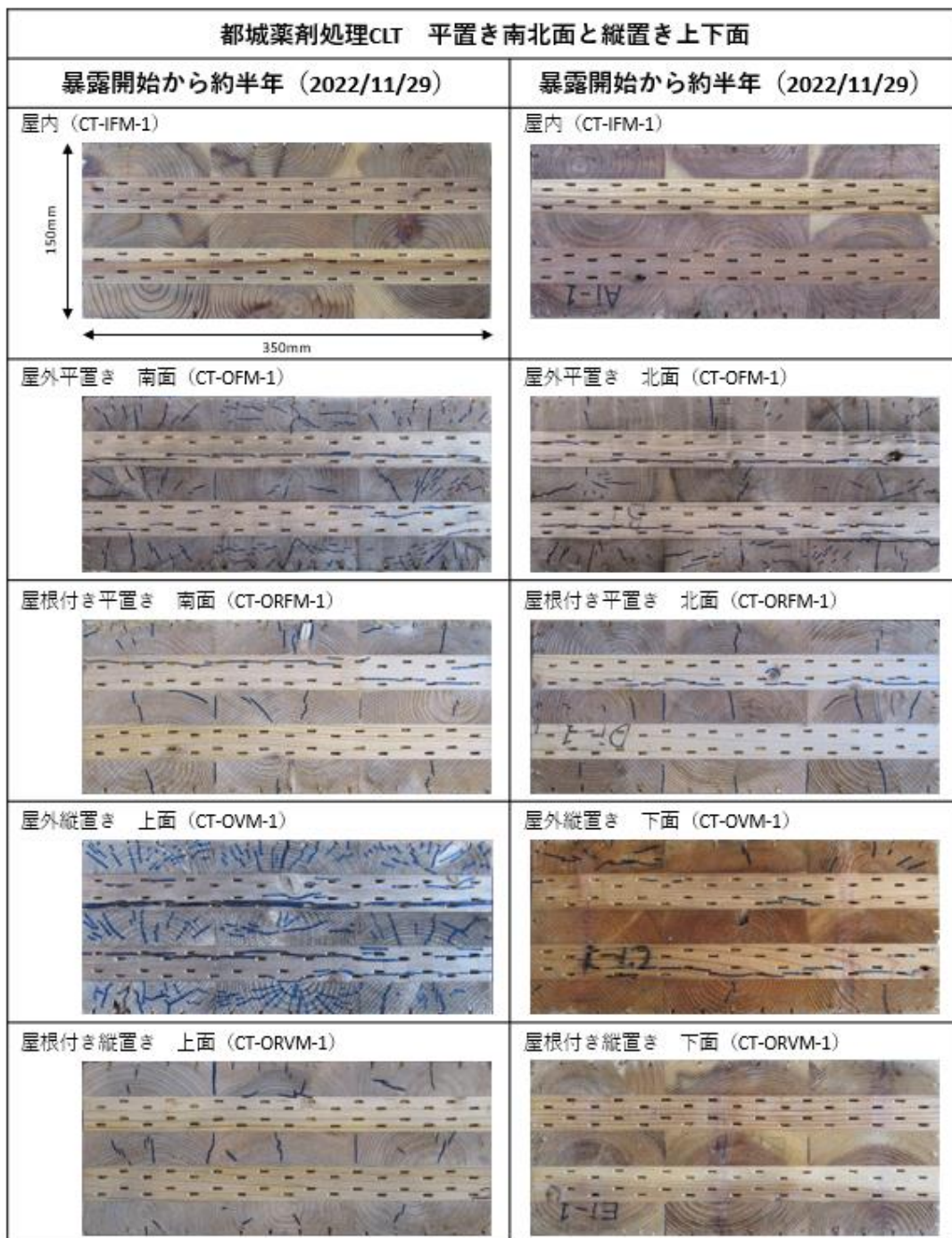


写真 3.33 都城薬剤処理 CLT 平置き南北面と縦置き上下面

#### 3.2.7. 無処理 CLT 試験体の計測結果

【同じラミナ内の材端からの距離が異なる計測点】

図 3.24 から図 3.28 に旭川無処理 CLT の試験体ごとの材端からの距離の異なる計測点の内部温湿度とそこから算出した含水率を示す。(内部温湿度は 3 時間間隔、屋外温湿度は 1 時間間隔) また図 3.29 から図 3.33 に都城無処理 CLT 試験体の計測値を示す。含水率図内にそれぞれの試験地の前 1 時間の降水量と降雪量(屋内試験体は除く、都城は降水量のみ)を合わせて示す。また HY のデータ取り出しにあたって、作業をおこなった日と、作業前に屋内に移動させていた期間はデータから除いて示している。またこれ以降の含水率変動のグラフ中の外部温湿度の値は、試験地の外部温湿度から式 2.1 を用いて算出した平衡含水率となっている。

全体として、内部温度は計測点によって大きな違いはなく、外部温度とほぼ同じように推移していた。屋外縦置き、屋根付き縦置き試験体のみ、設置時の上部から近い計測点ほど温度の変動が 5~10℃大きくなる傾向があった。これは太陽からの距離の違いによるものと考えている。

内部相対湿度と含水率は全ての計測点でほぼ同じように推移していた。外部環境では式 2.1 で計算した含水率は温度よりも相対湿度に大きく影響を受ける。また全ての設置条件で材端からの距離が近くなるほど内部含水率変動が大きくなる傾向があり、材端から 500mm 離れている中央計測点では 1 年を通じて旭川の屋内試験体を除きほぼ一定の値を推移していた。屋外縦置きの内部含水率変動は、旭川の場合上材端から 30mm、上材端から 80mm、下材端から 30mm、下材端から 80mm、中央(材端から 500mm)の順に含水率変動が小さくなっていったが、都城では上材端から 30mm、下材端から 30mm、上材端から 80mm、下材端から 80mm の順になっていた。これは都城試験体の方が設置時の地面からの距離が近いため雨水の跳ね返りの影響を下材端に近い計測点を受けるためと考えられる。

屋外平置き、屋外縦置きの材端から 30mm の計測点(縦置きは上材端から 30mm、旭川屋外縦置きは上材端から 80mm 計測点も)は HY の計測可能最大含水率である 95%に到達していた(計測値上は 100%まで計測されていたため、そのままの値を示す)。算出した含水率としては 31%までとなっているが、実際の本部の含水率は繊維飽和点以上になっていたと考えられる。またこれらの試験体の内、旭川屋外平置き材端から 30mm 計測点、旭川屋外縦置き上材端から 30mm と 80mm 計測点は内部相対湿度が 95%以上で長期間推移したり、急激に内部相対湿度の低下が起こったりと計測値が不安定になっていた。これは写真 3.10 に示すように、割れが計測点まで通じて水分が直接 HY に付着しまったためと考え、1 年暴露時点で計測を中止した。

内部含水率は、材端に近い計測点ほど降水による影響を大きく受けていた。しかし、1 時間の降水量とその後の含水率変動の大きさに明確な関係性はなかった。また都城屋外暴露試験体は季節に関わらず降水による含水率上昇が起こっていたが、旭川試験体は冬季(2022 年 1 月 1 日から 2022 年 4 月 1 日までの期間)の降水による含水率の上昇はほとんど見られ

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

ず屋外縦置き上部の計測点を除き 10～15%を推移していた。これは降雪の影響で外部相対湿度の変動が少なく、その結果内部相対湿度も変動しにくかった、もしくは内部温度が-10℃以下まで低下していたため相対湿度が正確に計測できなかったためと考えているがどちらが正確な理由かわからない。旭川試験体も 2022 年 4 月 1 日以降は都城試験体と同様に降水による含水率上昇が起こっている。

また旭川屋内試験体は木口からの距離に関わらず全ての計測点で冬季の外部環境の乾燥による影響を受けており、材端から 30mm 計測点では 2 月中旬に最も低い 5.9%まで含水率が低下しその後上昇した。一方中央計測点はその後も内部含水率が低下し続け 5 月上旬に最低 8.6%まで低下し、その後上昇した。

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

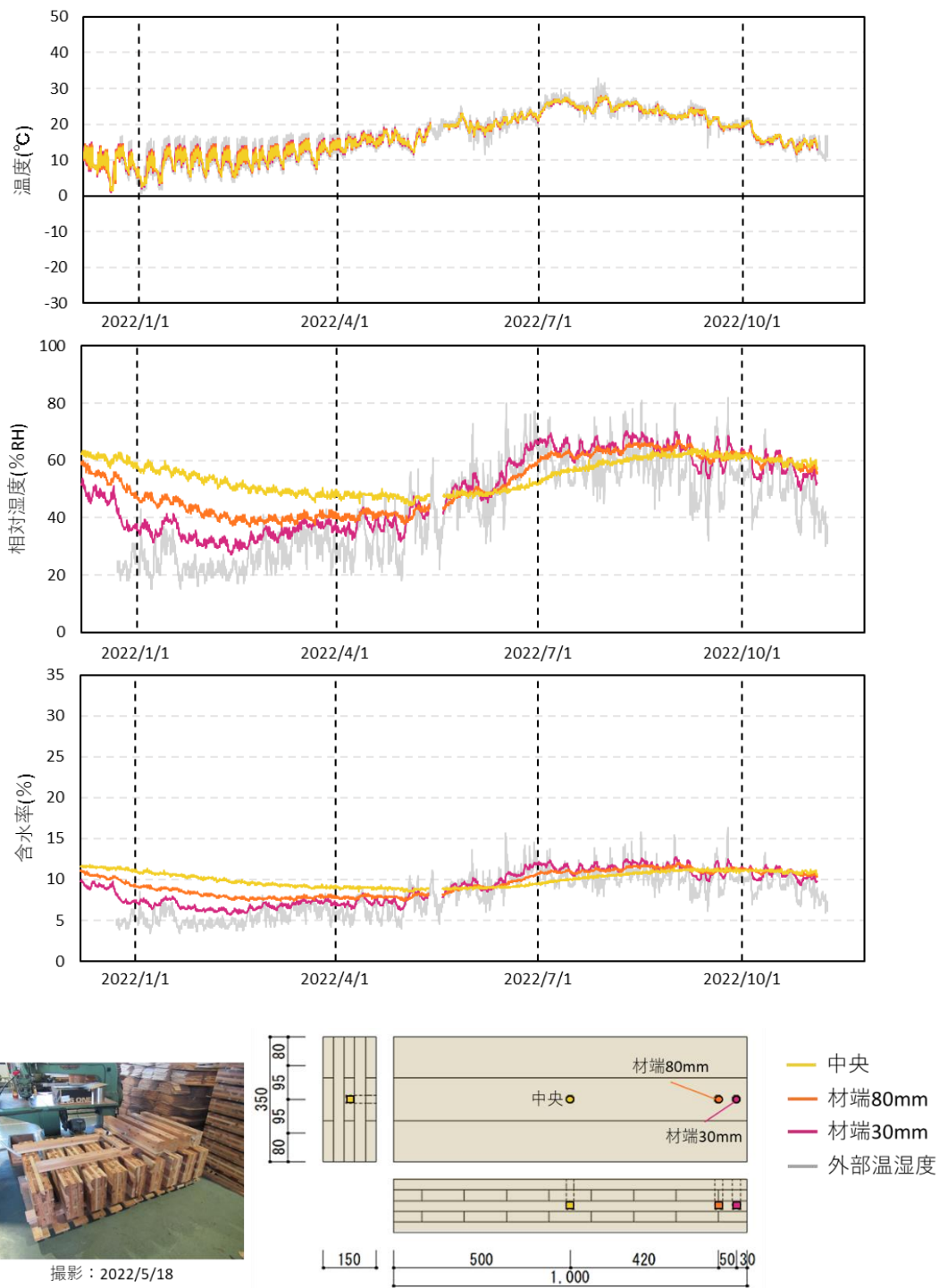
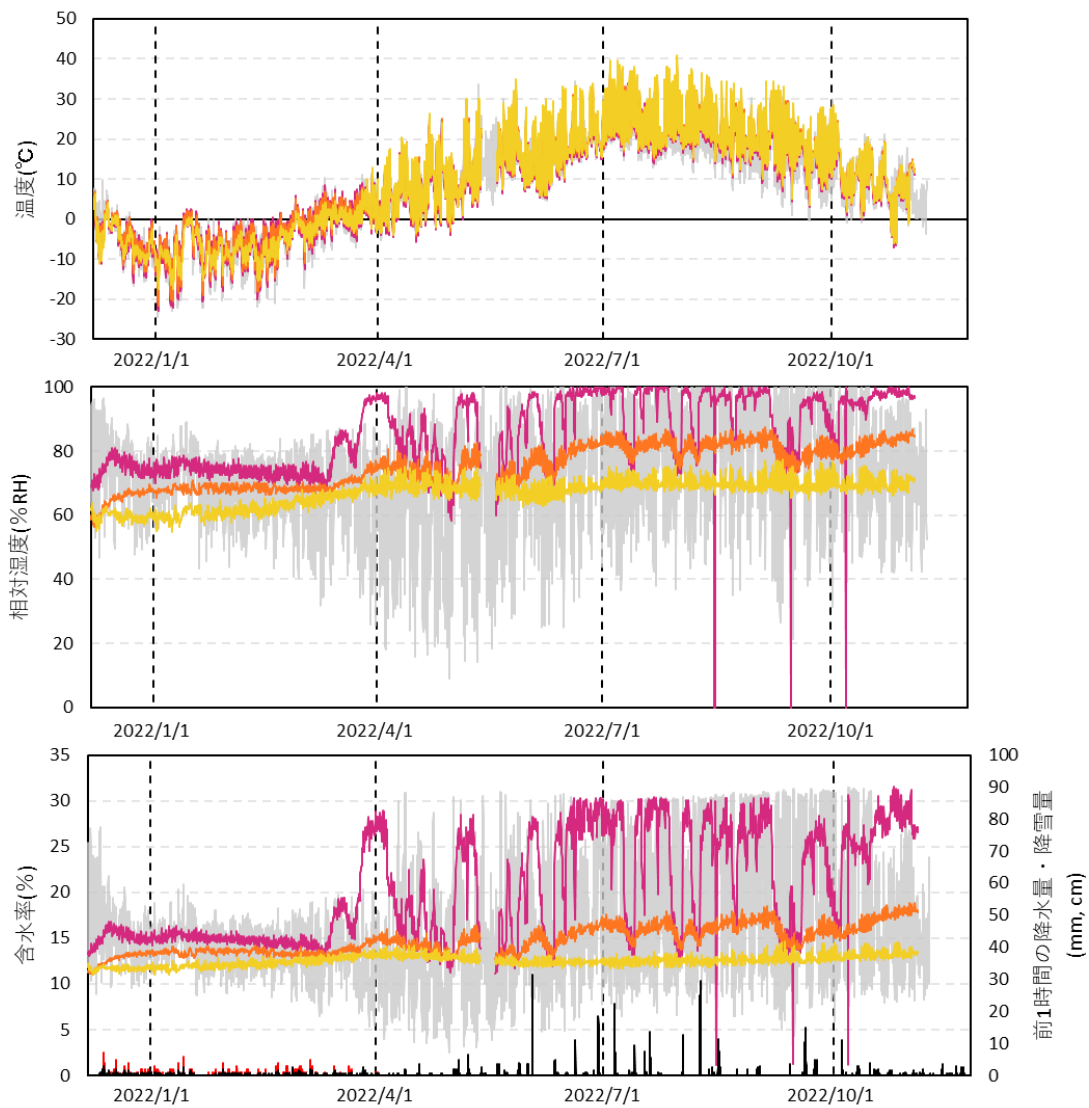


図 3.24 旭川屋内試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2021/12/14

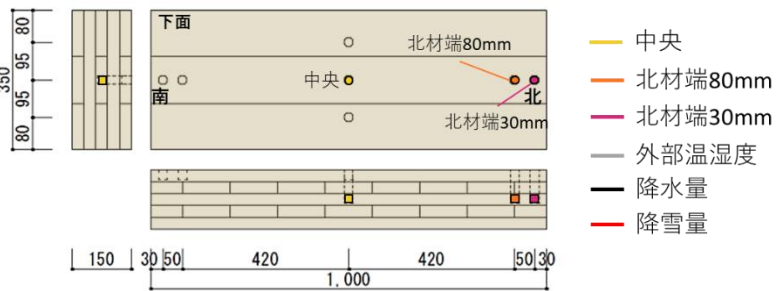
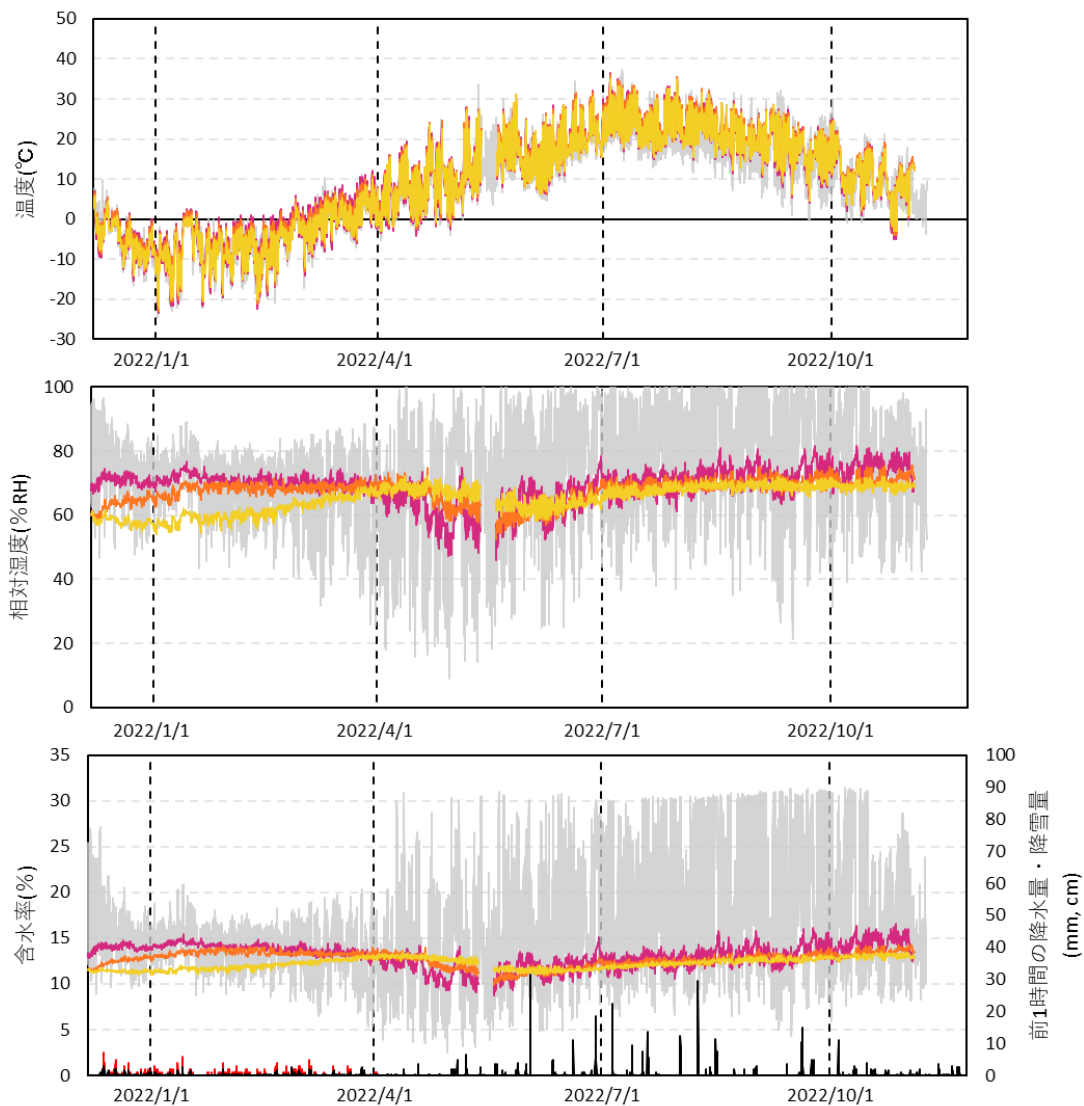


図 3.25 旭川屋外平置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2022/5/18

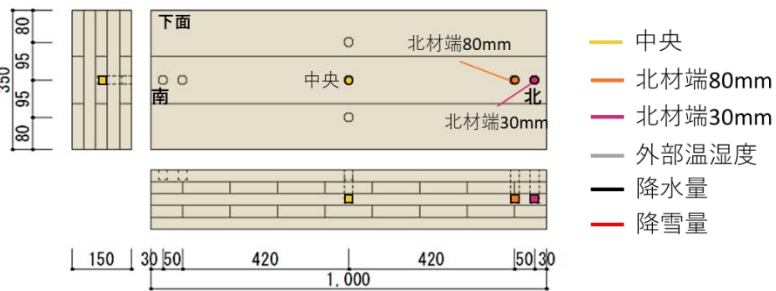
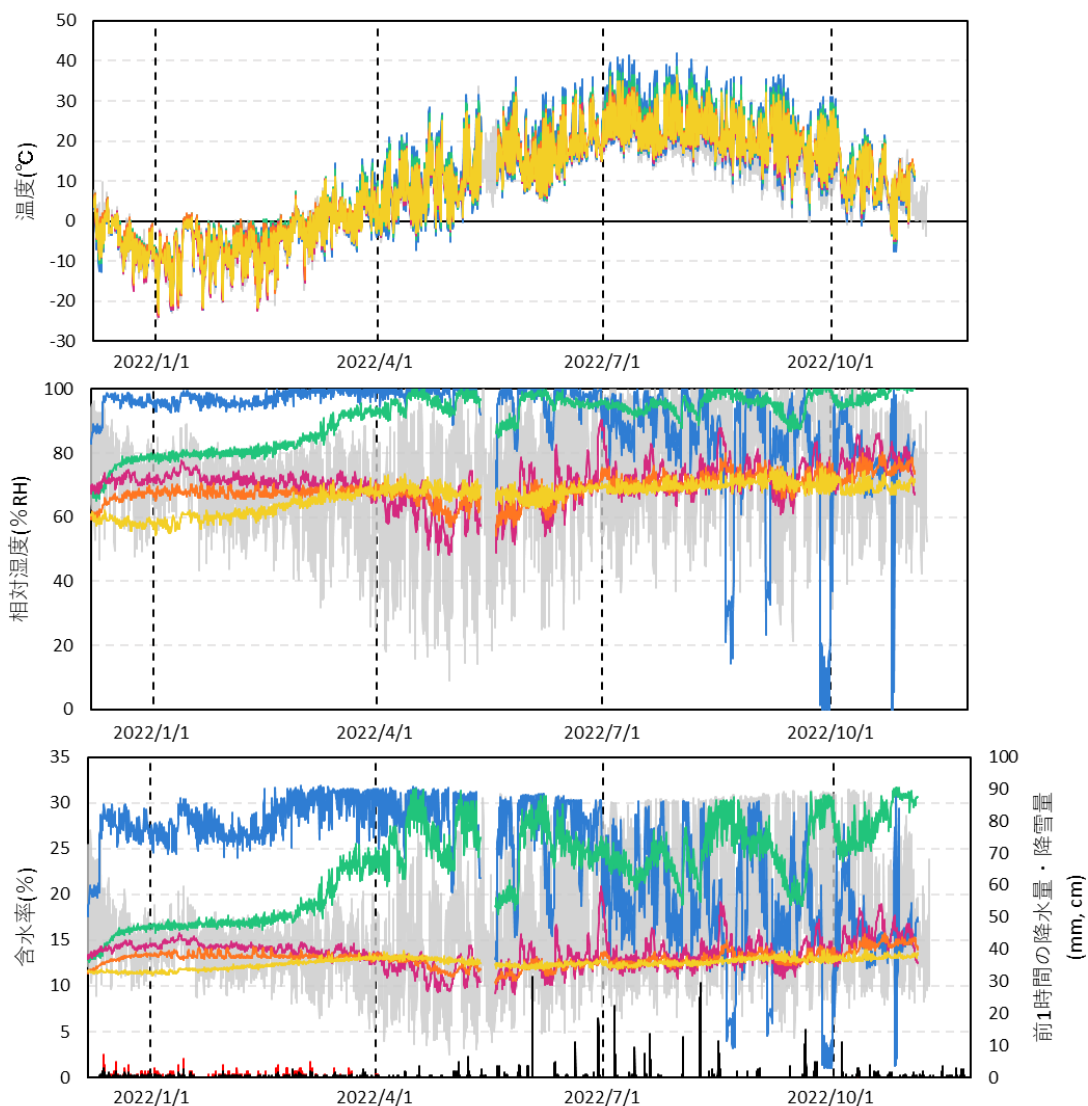


図 3.26 旭川屋根付き平置き試験体の計測値

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2021/12/14

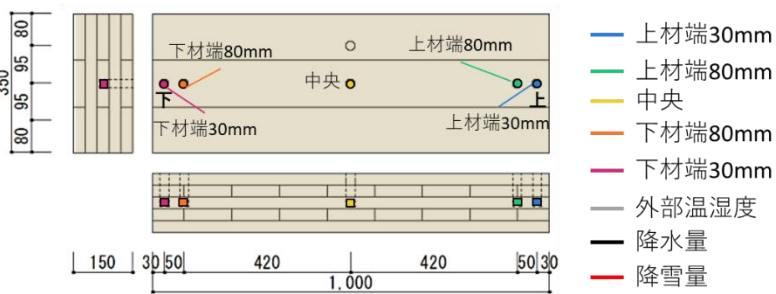
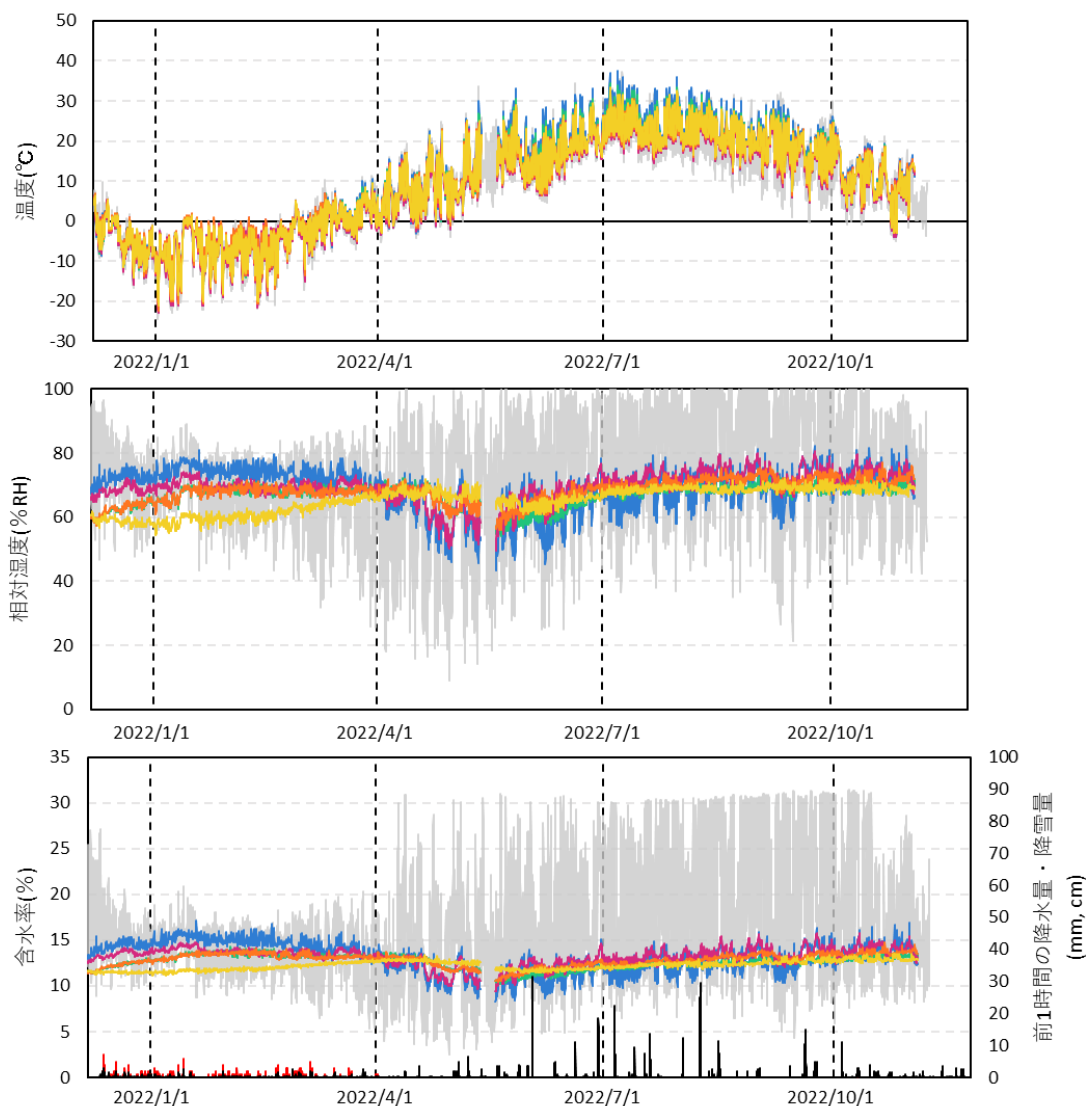


図 3.27 旭川屋外縦置き試験体の計測値



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2022/5/18

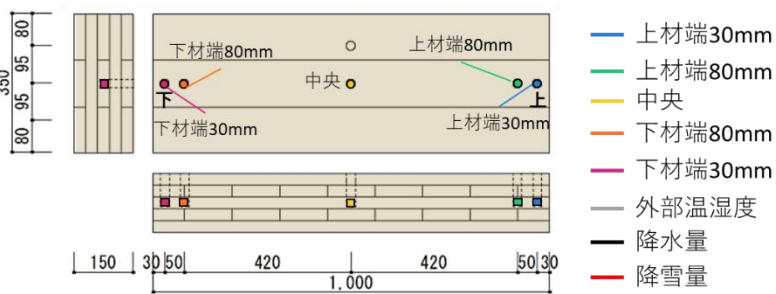


図 3.28 旭川屋根付き縦置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

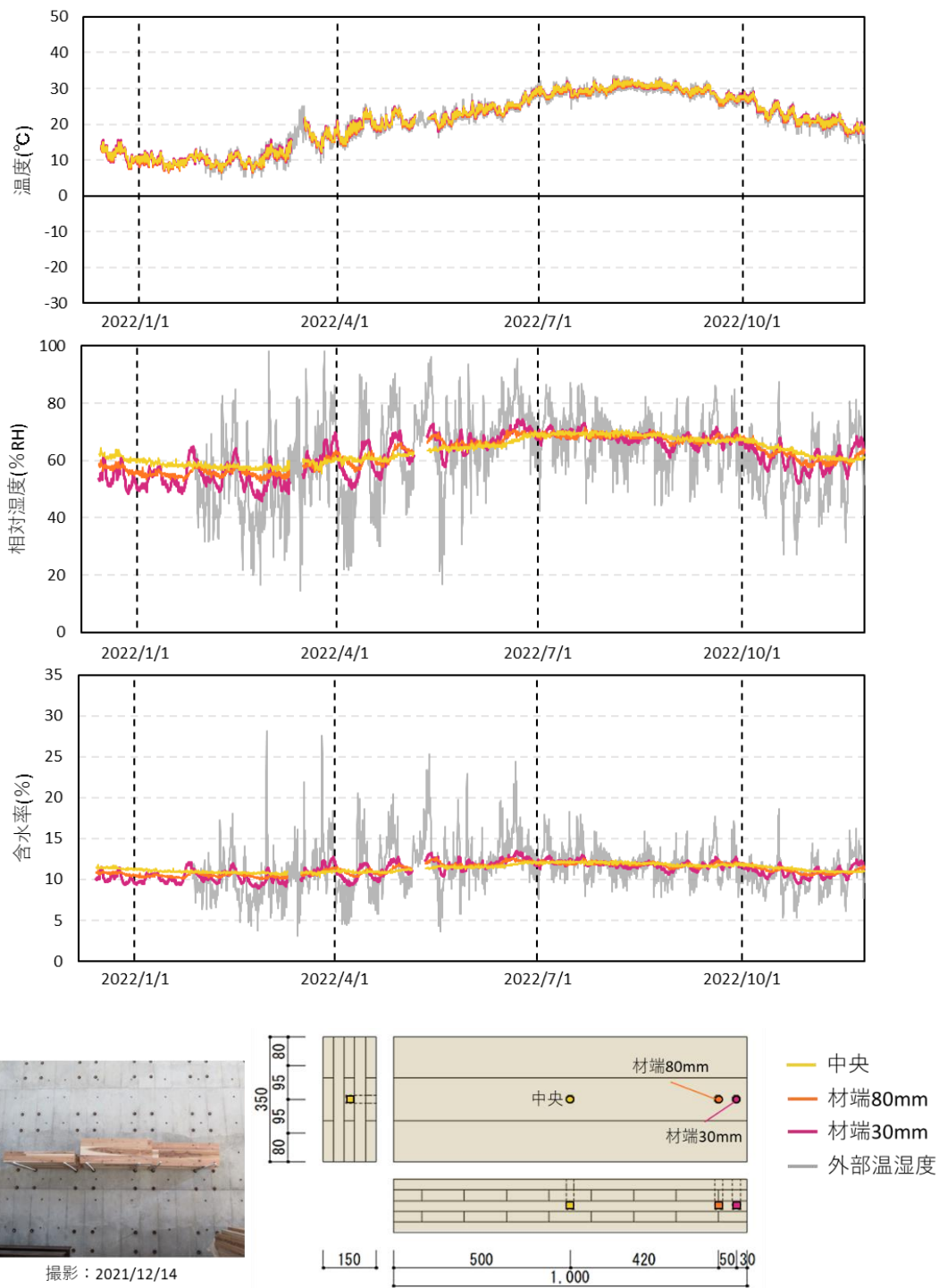
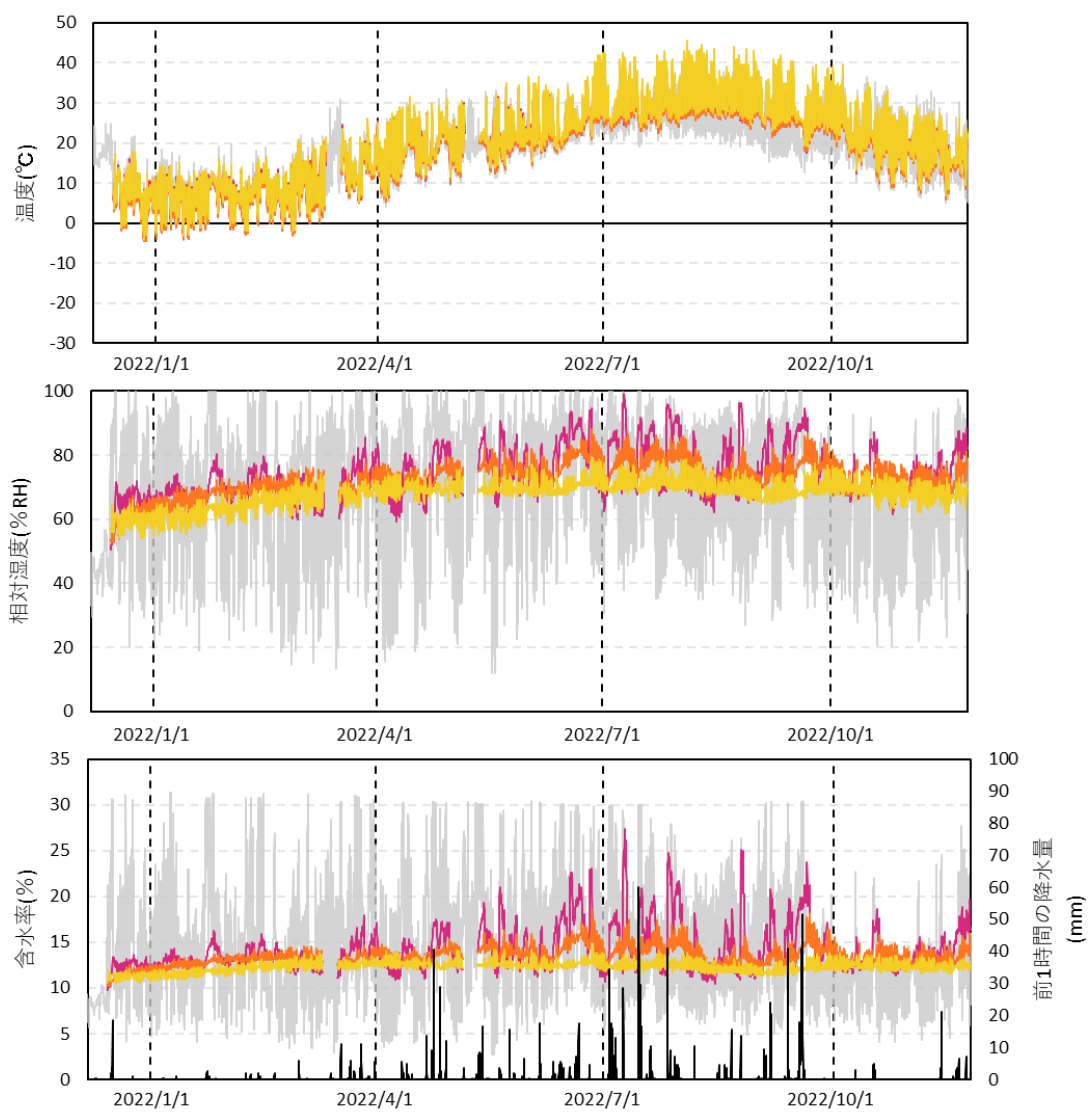


図 3.29 都城屋内試験体の計測値

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2022/5/11

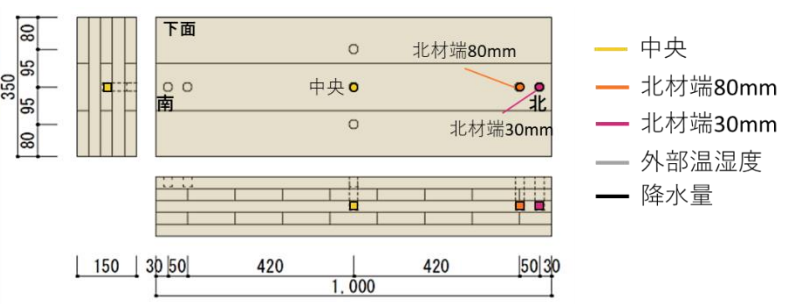


図 3.30 都城屋外平置き試験体の計測値

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

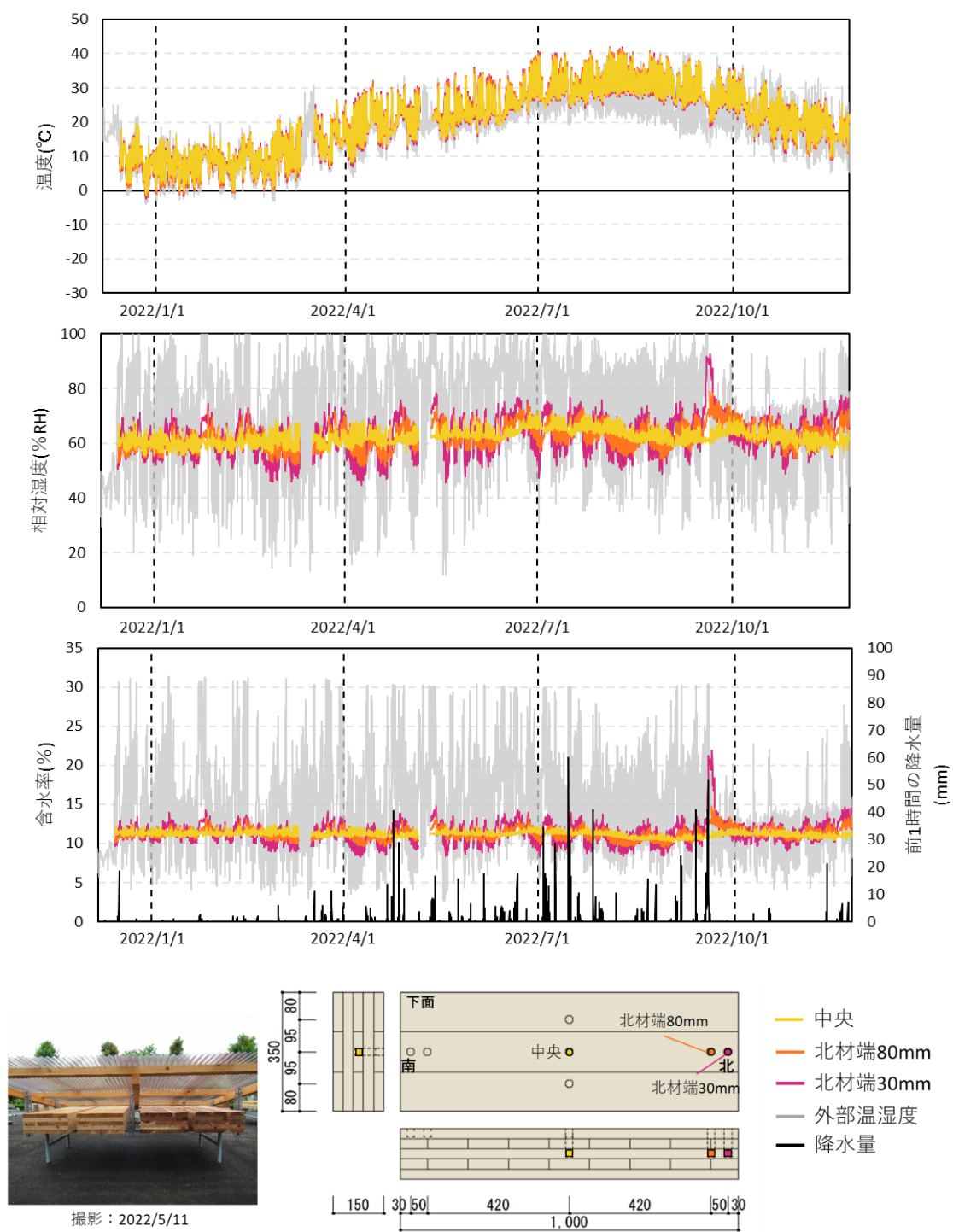
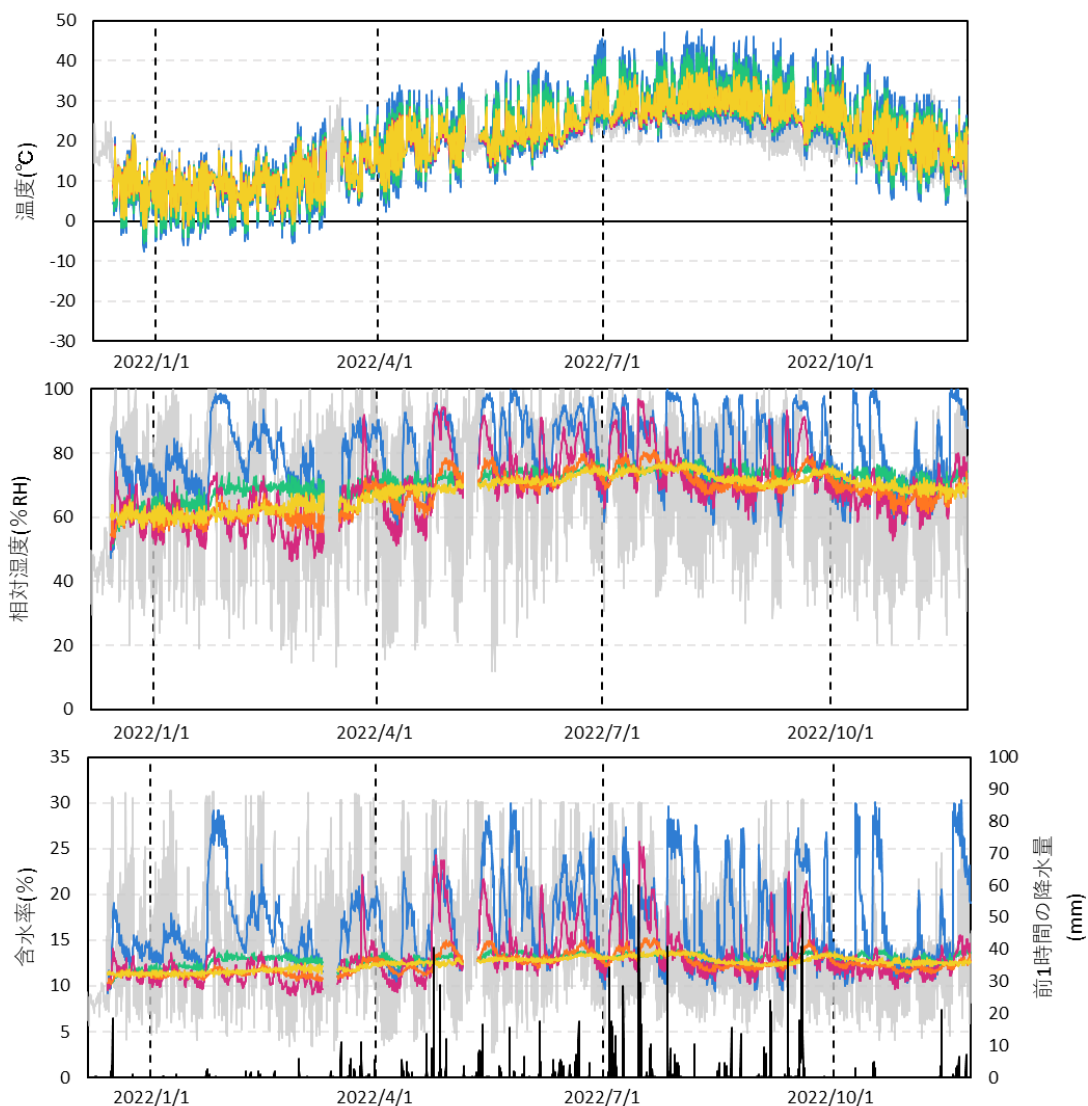


図 3.31 都城屋根付き平置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2022/5/11

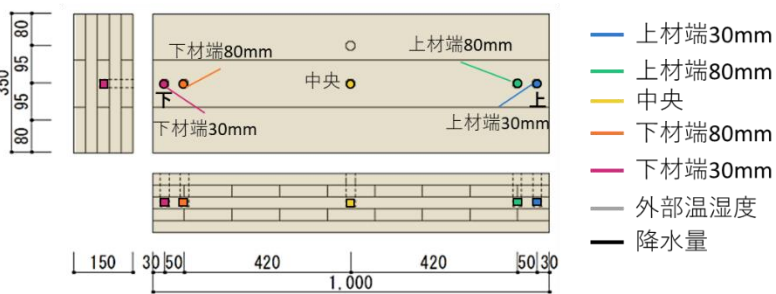


図 3.32 都城屋外縦置き試験体の計測値

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

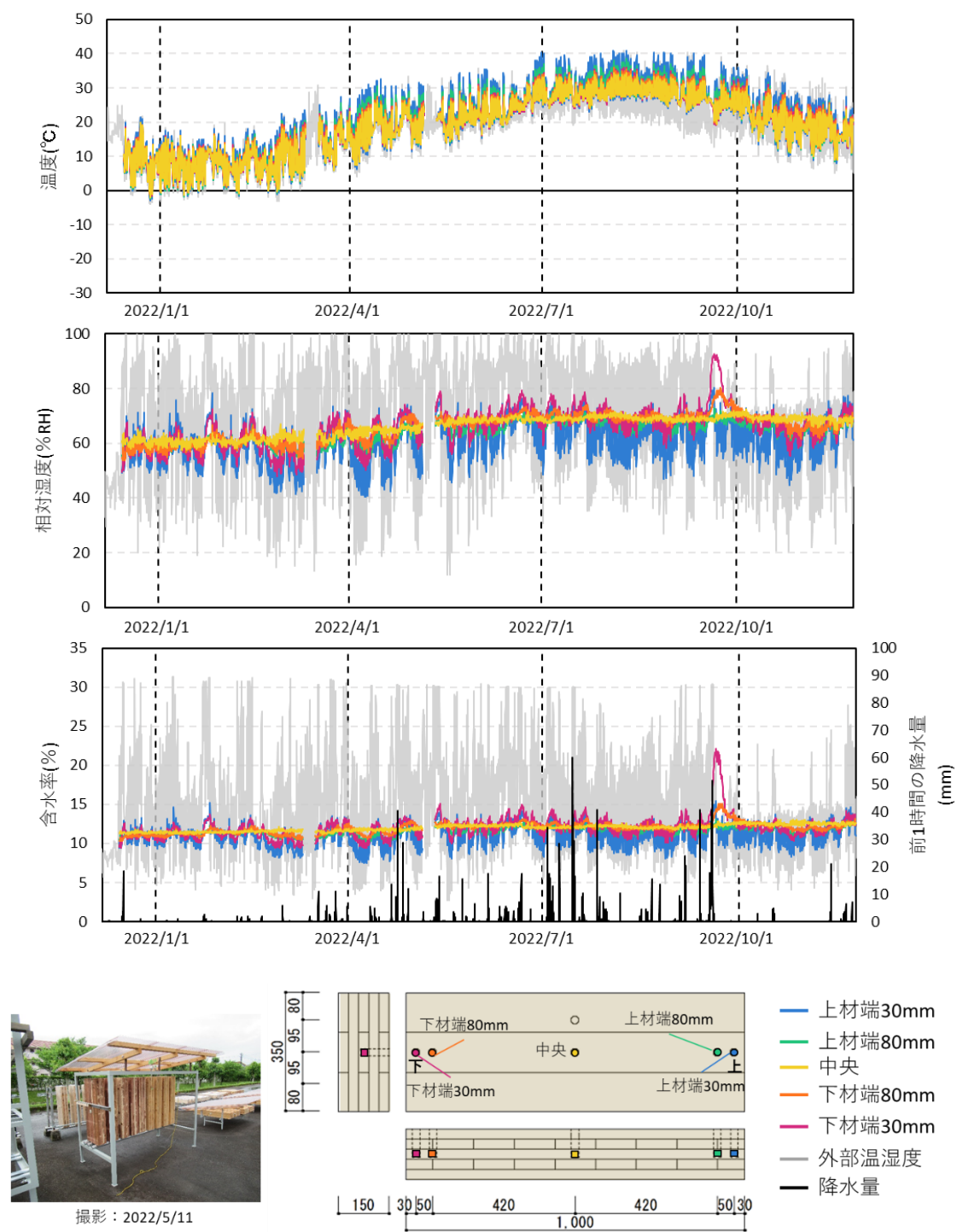


図 3.33 都城屋根付き縦置き試験体の計測値

#### 【CLT 中央ラミナ計測値と材端ラミナ計測値の比較】

図 3.34 と図 3.35 に旭川試験体の中央ラミナの中央計測点と材端ラミナの中央計測点の内部含水率変動を示す。図 3.36 と図 3.37 に都城試験体を示す。CLT は繊維方向のラミナを積層接着した材料であるため、材端のラミナと中央のラミナとで今回の実験では弱軸方向のラミナの水分移動により、計測を行っている強軸方向のラミナの計測値に違いが生じる可能性がある。そこで材端ラミナと中央ラミナの中央計測点を計測し、その違いを比較した。

今回計測を行っている期間では、全ての計測点で中央ラミナと材端ラミナとで計測値に違いはなく、ほぼ同じように推移していたが、都城試験体の方が 1,2%材端ラミナ計測点の含水率変動が大きい時点があった。

このことより無処理 CLT では、CLT 内部の含水率分布は弱軸層と強軸層とで異なり、各層のラミナの木口からの距離で決まっていることがわかった。

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

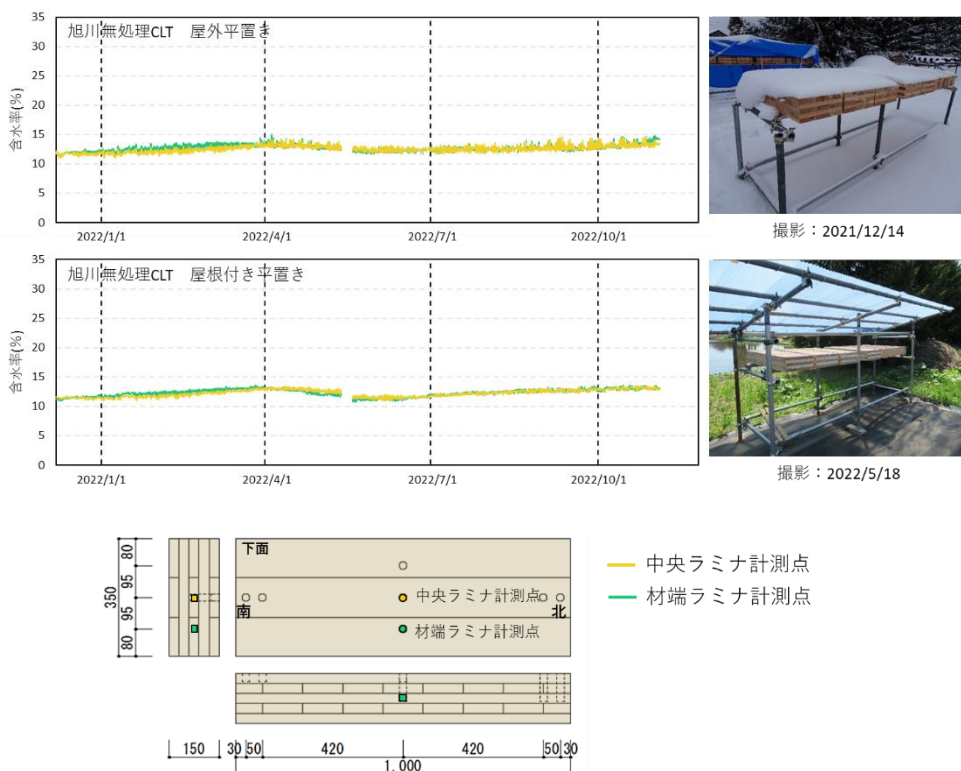


図 3.34 旭川平置き試験体の比較

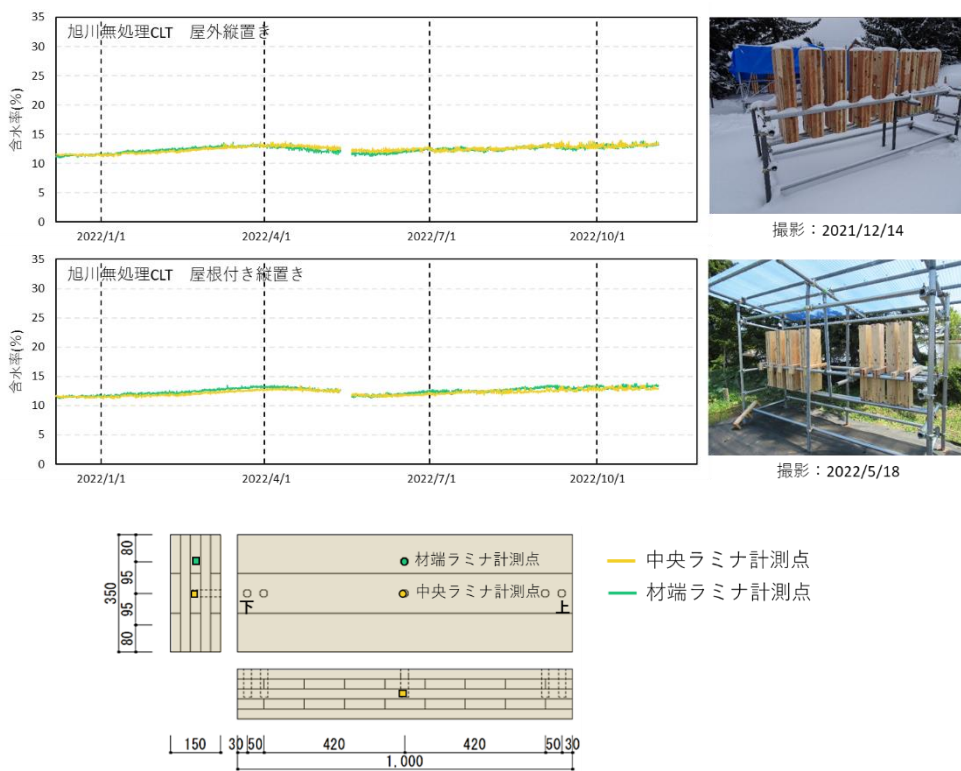


図 3.35 旭川縦置き試験体の比較



### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

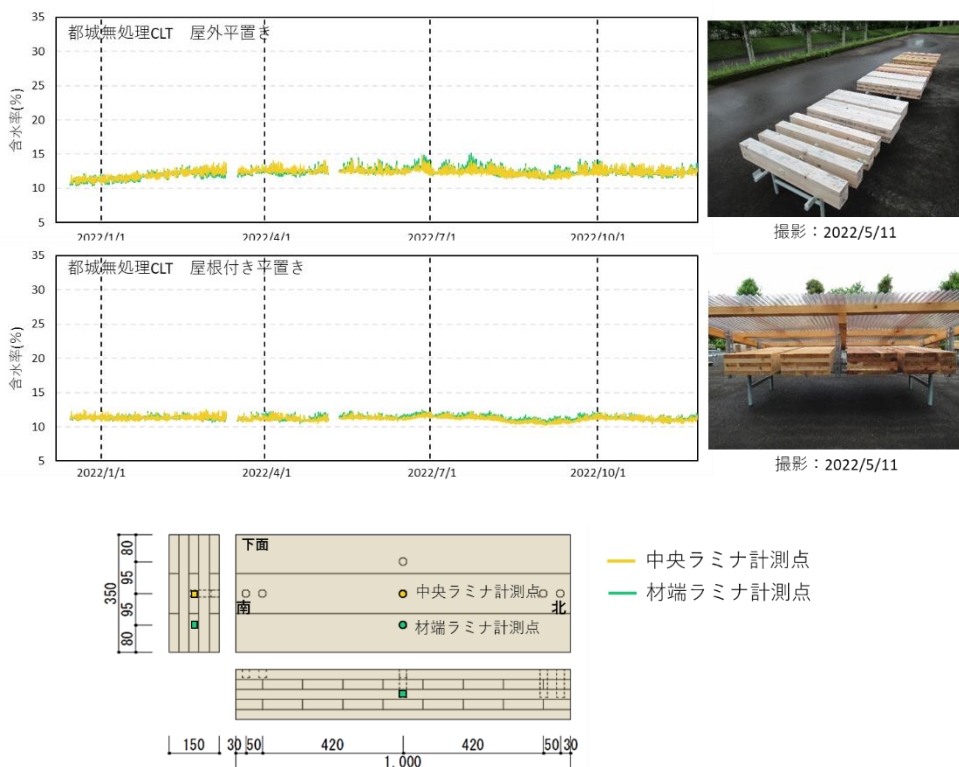


図 3.36 都城平置き試験体の比較

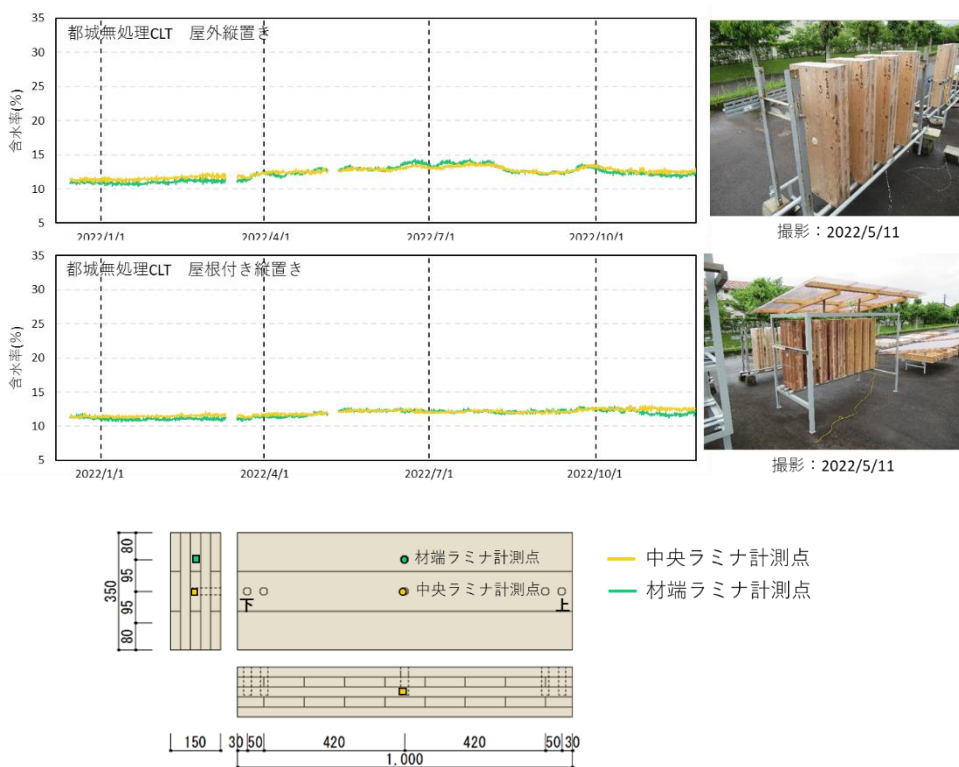


図 3.37 都城縦置き試験体の比較

#### 【平置き試験体の3層目計測点と最下層計測点の比較】

図 3.38 と図 3.39 に旭川平置き試験体の最下層と3層目計測点の内部含水率、図 3.40 と図 3.41 に都城試験体の内部含水率を示す。

平置き試験体は降水などの影響が層によって異なるのではないかと考え、各計測点でHYを埋め込む層の異なる計測点（設置時に一番下になる最下層計測点と3層目計測点）で計測した。

旭川試験体も都城試験体も屋根付き平置き試験体では、層による内部含水率の違いはなかった。屋外平置き試験体は、旭川試験体の材端から30mm計測点では3層目計測点の含水率変動が大きかったが、それ以外の材端から80mm計測点と中央計測点では最下層計測点の変動が大きかった。一方で都城屋外平置き試験体は全ての計測点で最下層の内部含水率変動が大きく、旭川試験体と都城試験体とでは都城試験体の方が最下層計測点の内部含水率変動が大きかった。これは設置時の地面からの高さが都城試験体の方が低く、降水時の雨水の跳ね返りによる影響を受けやすいためと考えられる。また、旭川屋外平置き試験体の材端から30mm計測点では、3層目計測点が計測穴まで通じる割れが発生していたために3層目計測点の含水率変動の方が大きくなってしまったと考えられる。

特に含水率変動の大きかった都城屋外平置き材端から30mmの最下層計測点は今後の計測で雨水が入り、HYの故障につながる恐れがあるとして1年暴露時点で計測を中止した。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

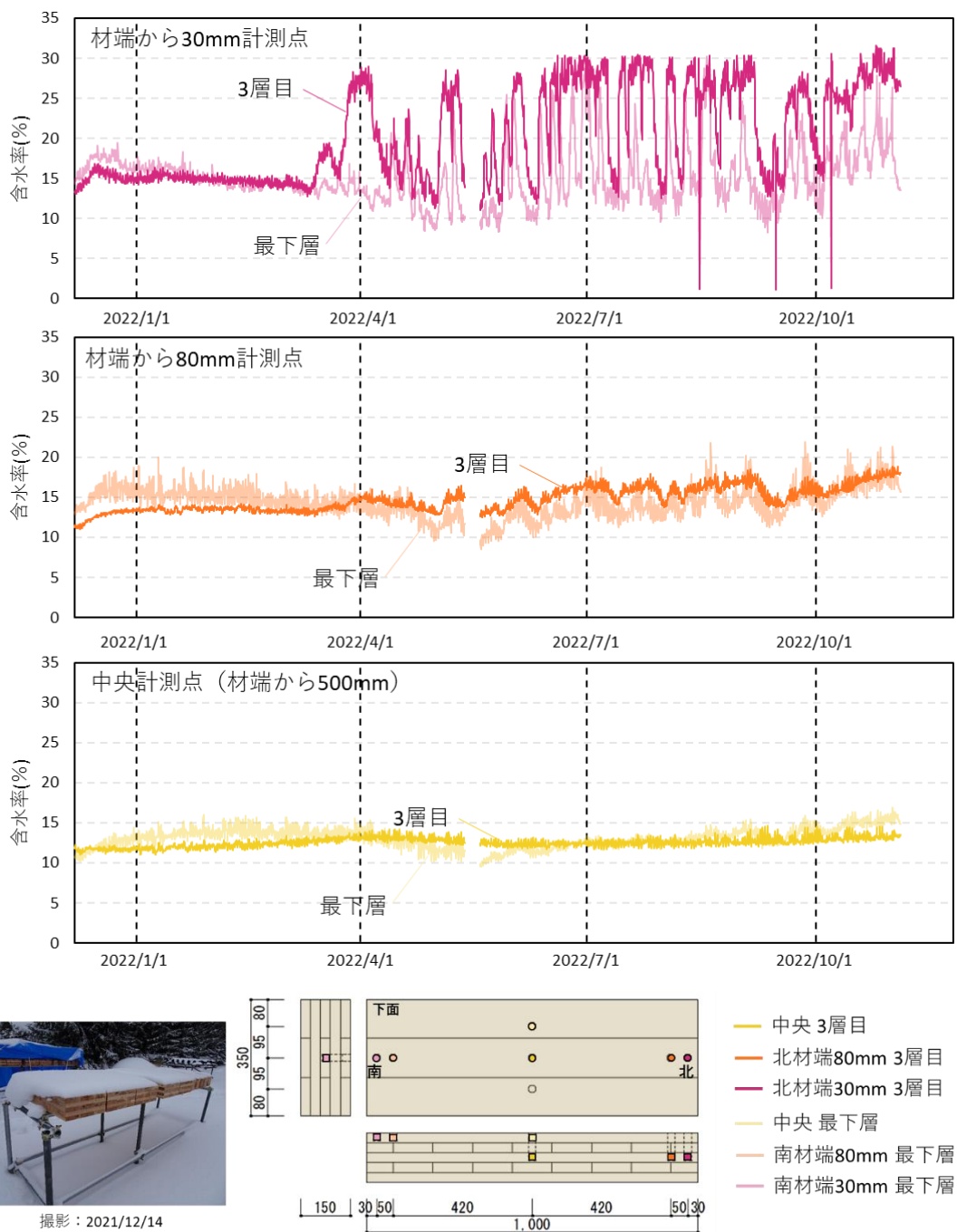


図 3.38 旭川屋外平置き試験体

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

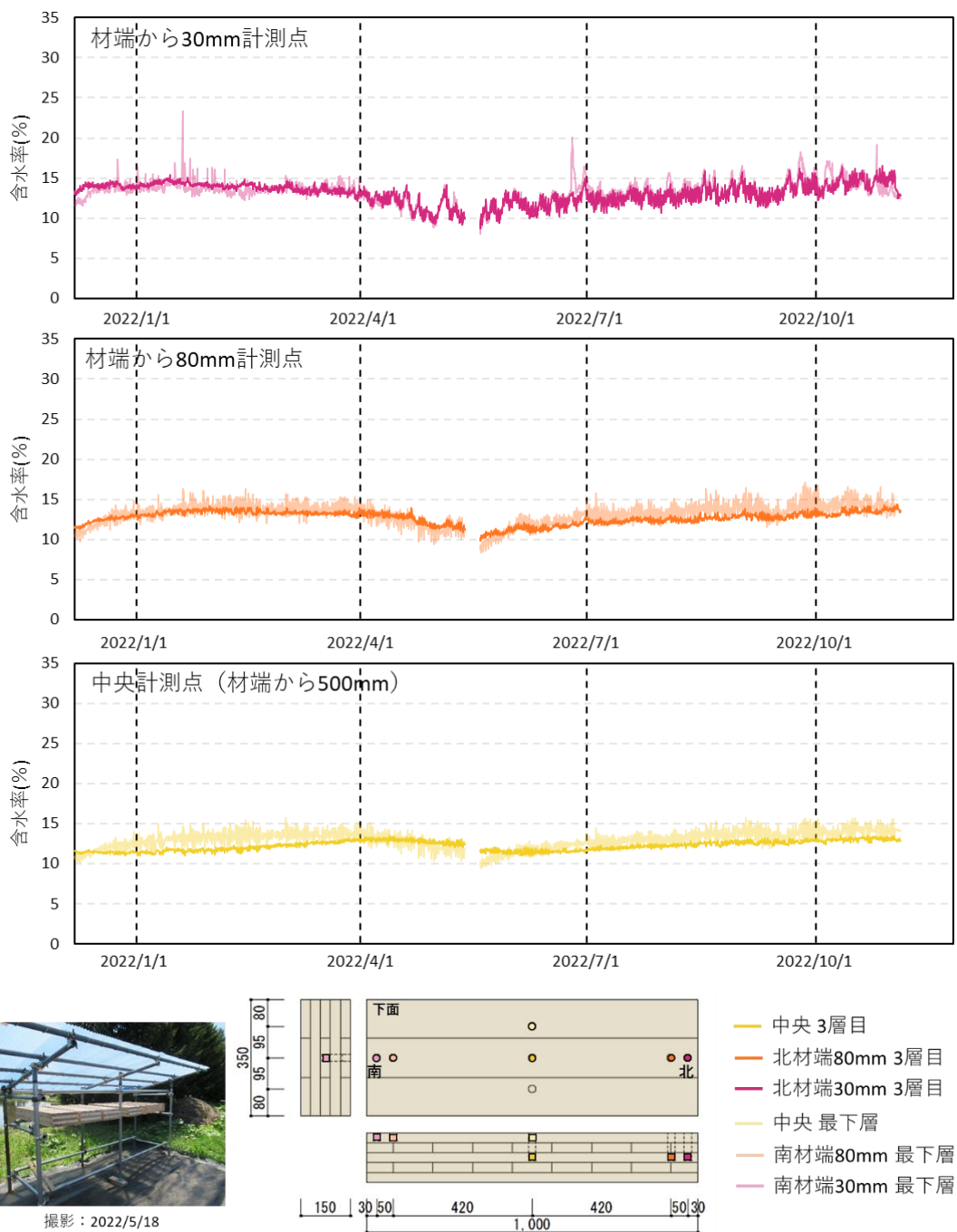


図 3.39 旭川屋根付き平置き試験体

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

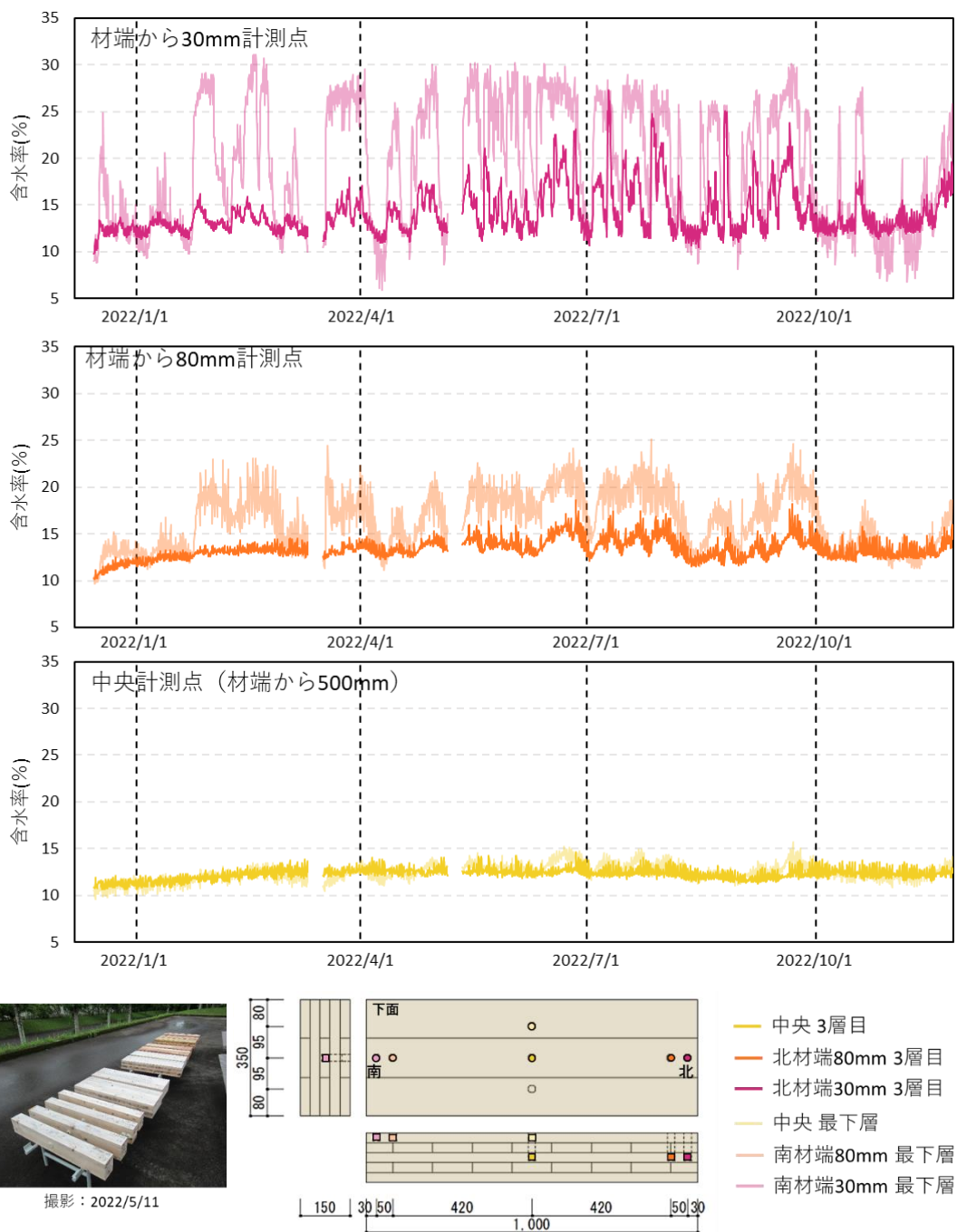


図 3.40 都城屋外平置き試験体

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

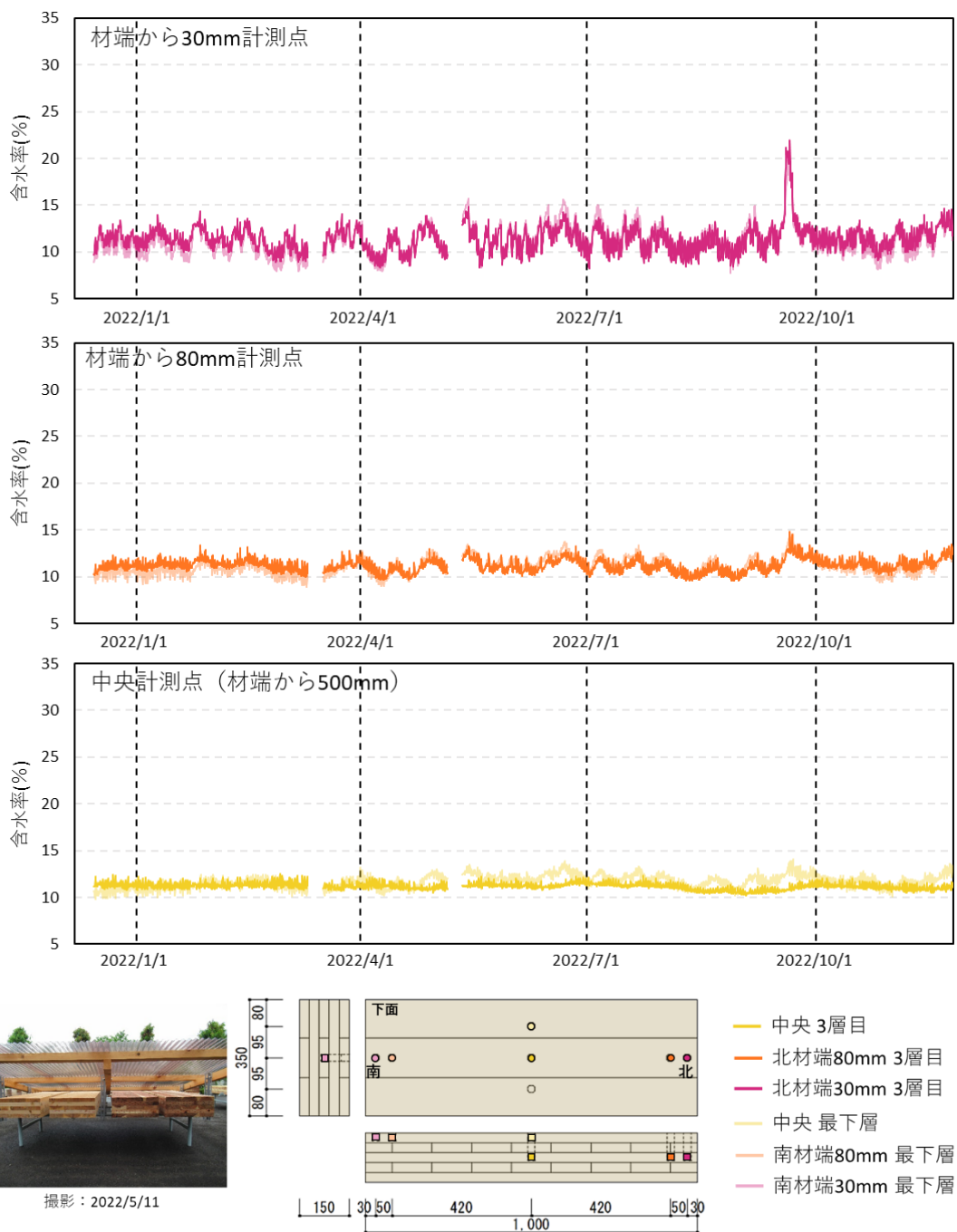


図 3.41 都城屋根付き平置き試験体

### 3.2.8. 無処理集成材試験体の計測結果

#### 【同じラミナ内の材端からの距離が異なる計測点】

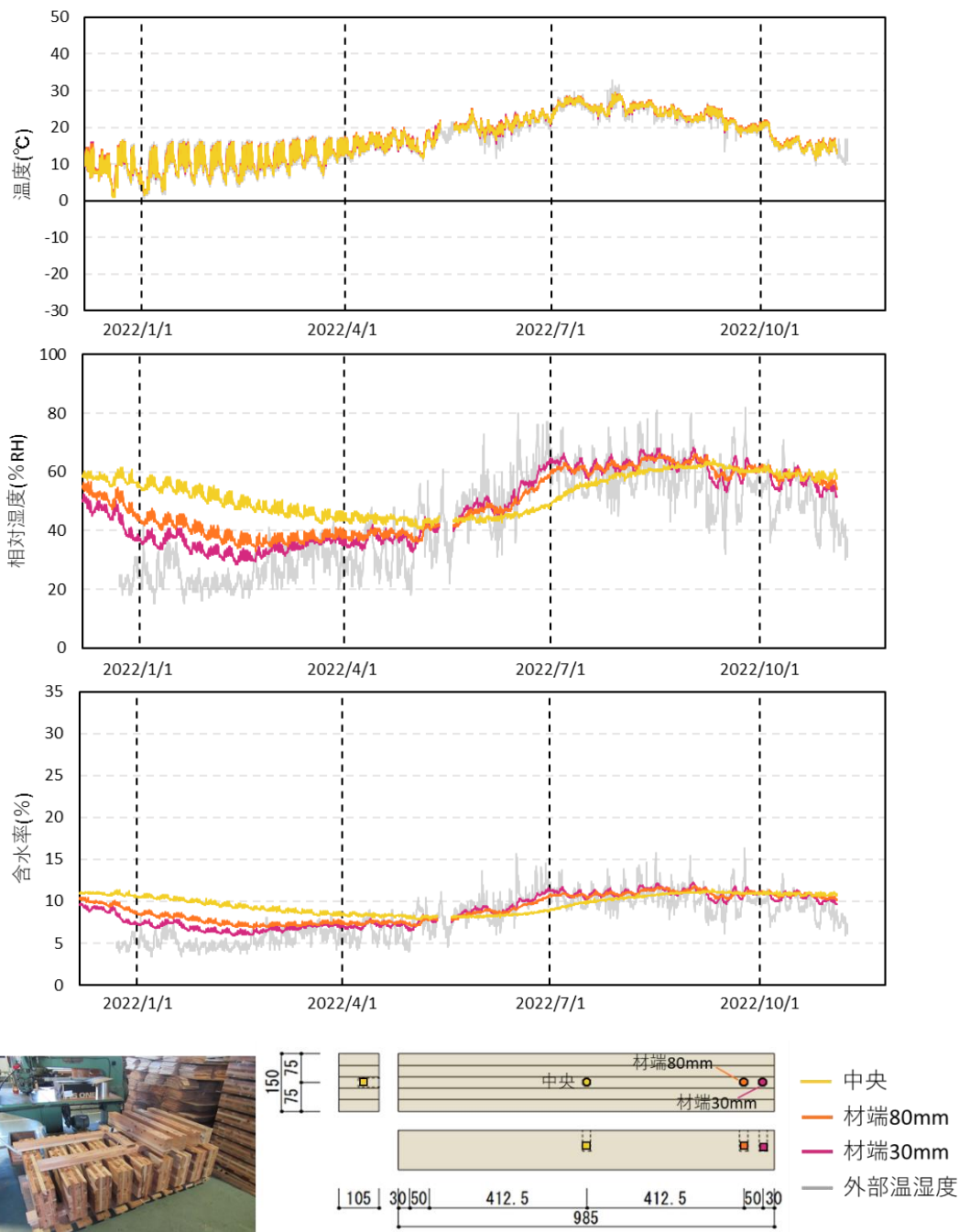
図 3.42 から図 3.46 に旭川無処理集成材の試験体ごとの材端からの距離の異なる計測点の内部温湿度とそこから算出した含水率を示す。また図 3.47 から図 3.51 に都城無処理集成材試験体の計測値を示す。

全体の傾向としては3.2.7の無処理 CLT と同様で、内部温度は計測点によって大きな違いはなく、外部温度とほぼ同じように推移していた。屋外縦置き、屋根付き縦置き試験体のみ、設置時の上部から近い計測点ほど温度の変動が5~10℃大きくなる傾向があった。

内部相対湿度と含水率は全ての計測点でほぼ同じように推移していた。また全ての設置条件で材端からの距離が近くなるほど内部含水率変動が大きくなる傾向があった。

また旭川冬季の乾燥で写真 3.22 に示すように屋外平置きと屋外縦置きの木口に幅広の割れが発生し、その割れが計測点まで通じていたために、材端計測点の内部相対湿度が95%以上で長期間推移したり、急激に内部相対湿度の低下が起こったりと計測値が不安定になっていた。そのため屋外平置きの材端から30mm計測点と屋外縦置きの上材端から30mm、80mm計測点は1年暴露時点で計測を中止した。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2022/5/11

図 3.42 旭川屋内試験体の計測値



### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

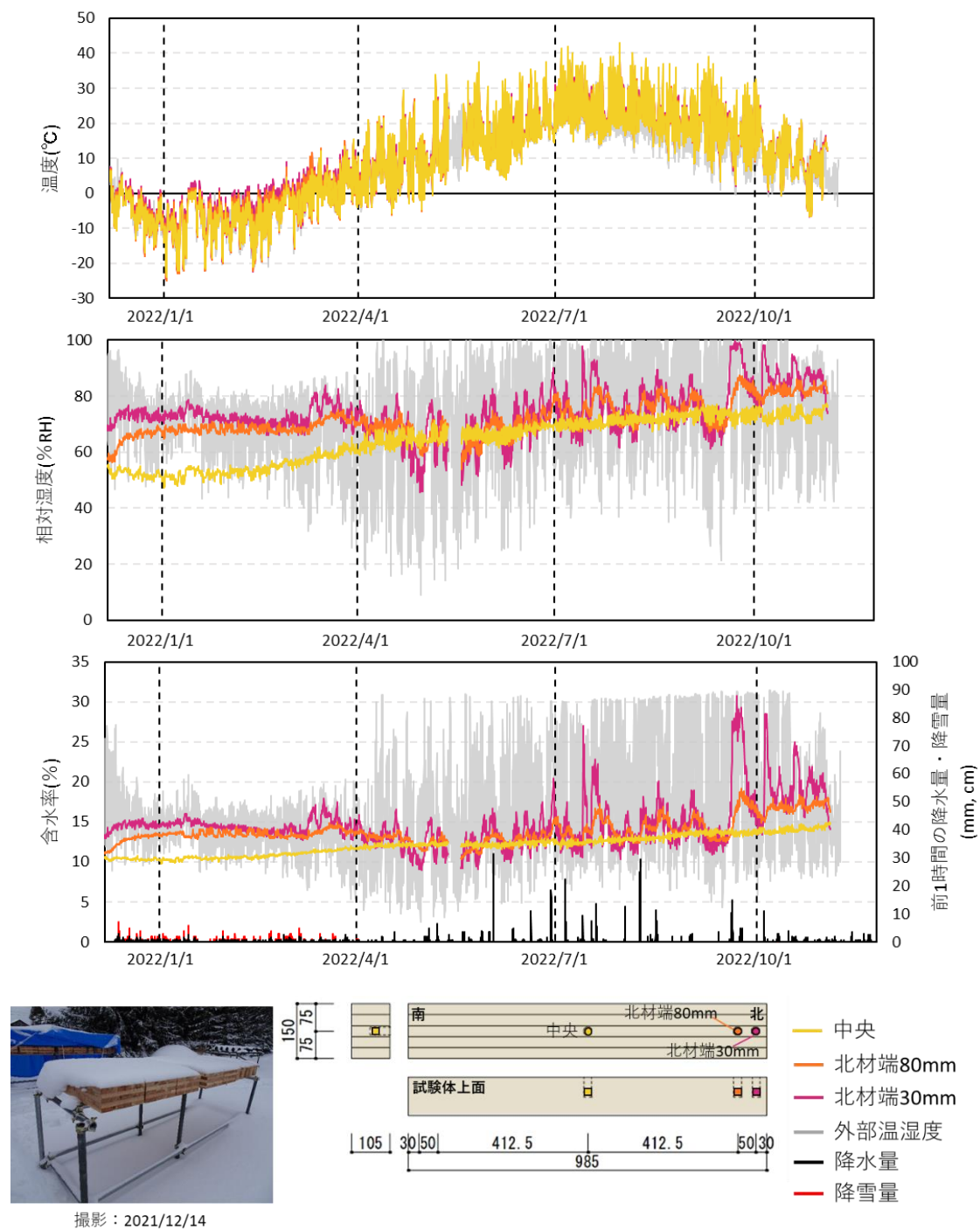


図 3.43 旭川屋外平置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

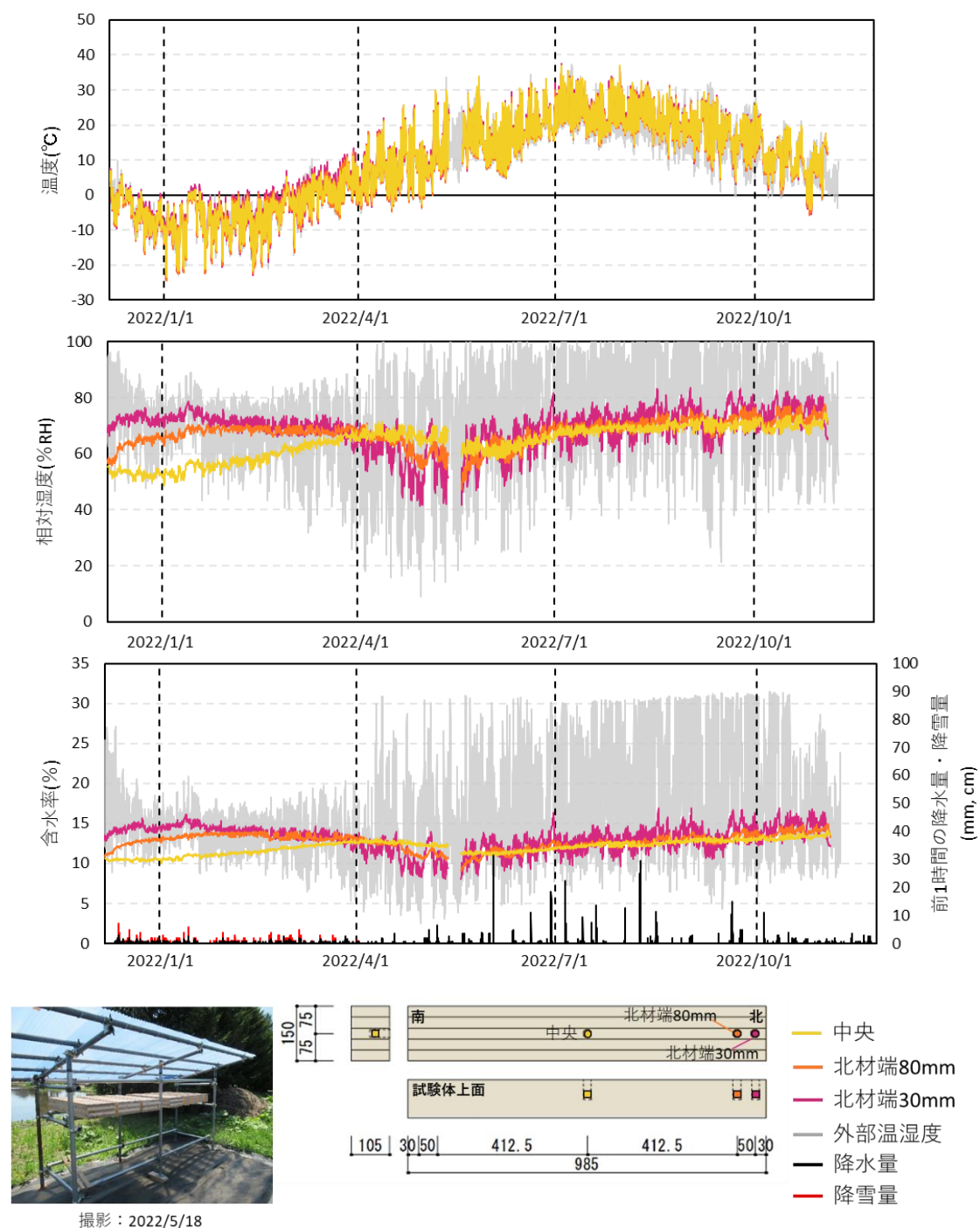


図 3.44 旭川屋根付き平置き試験体の計測値

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

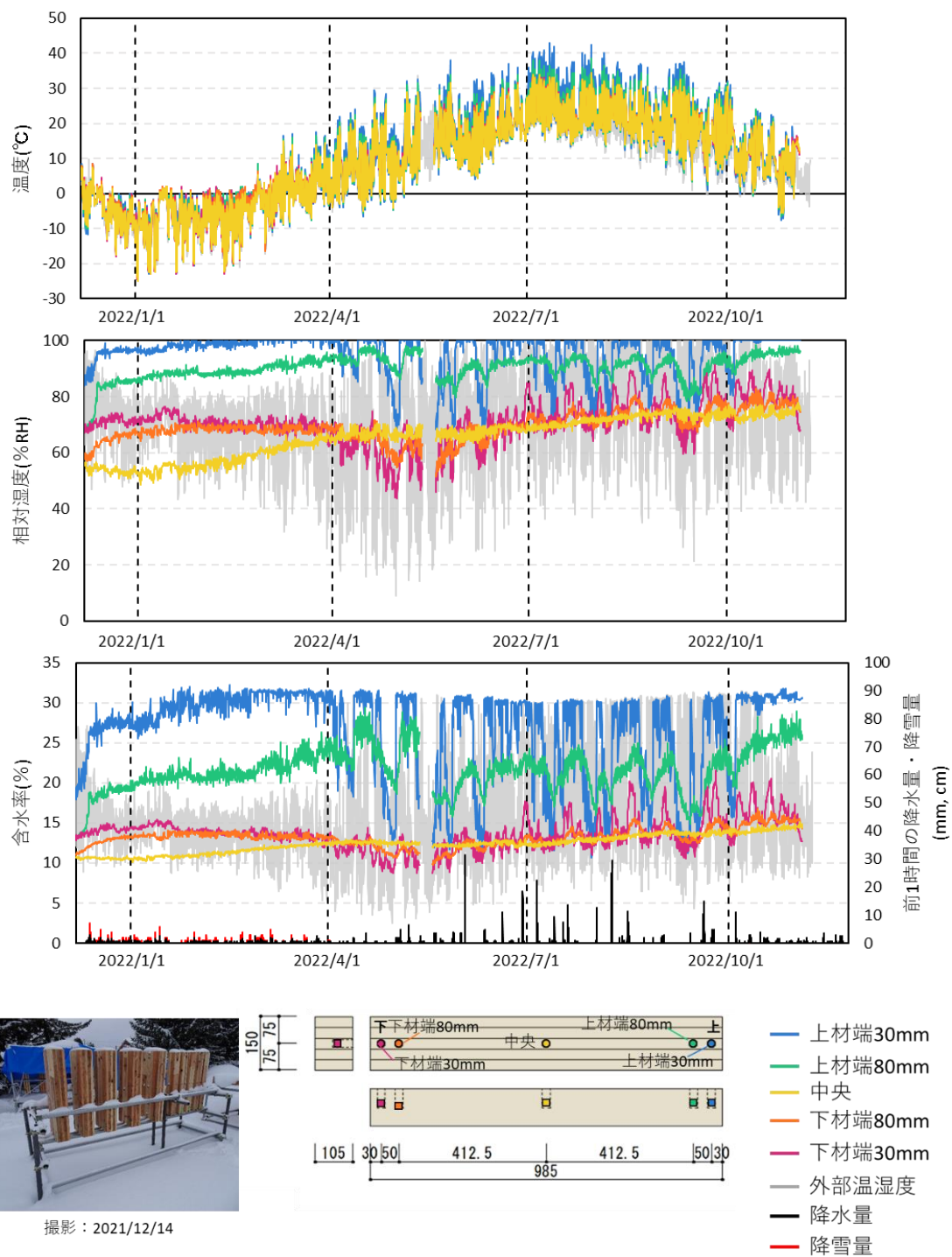


図 3.45 旭川屋外縦置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

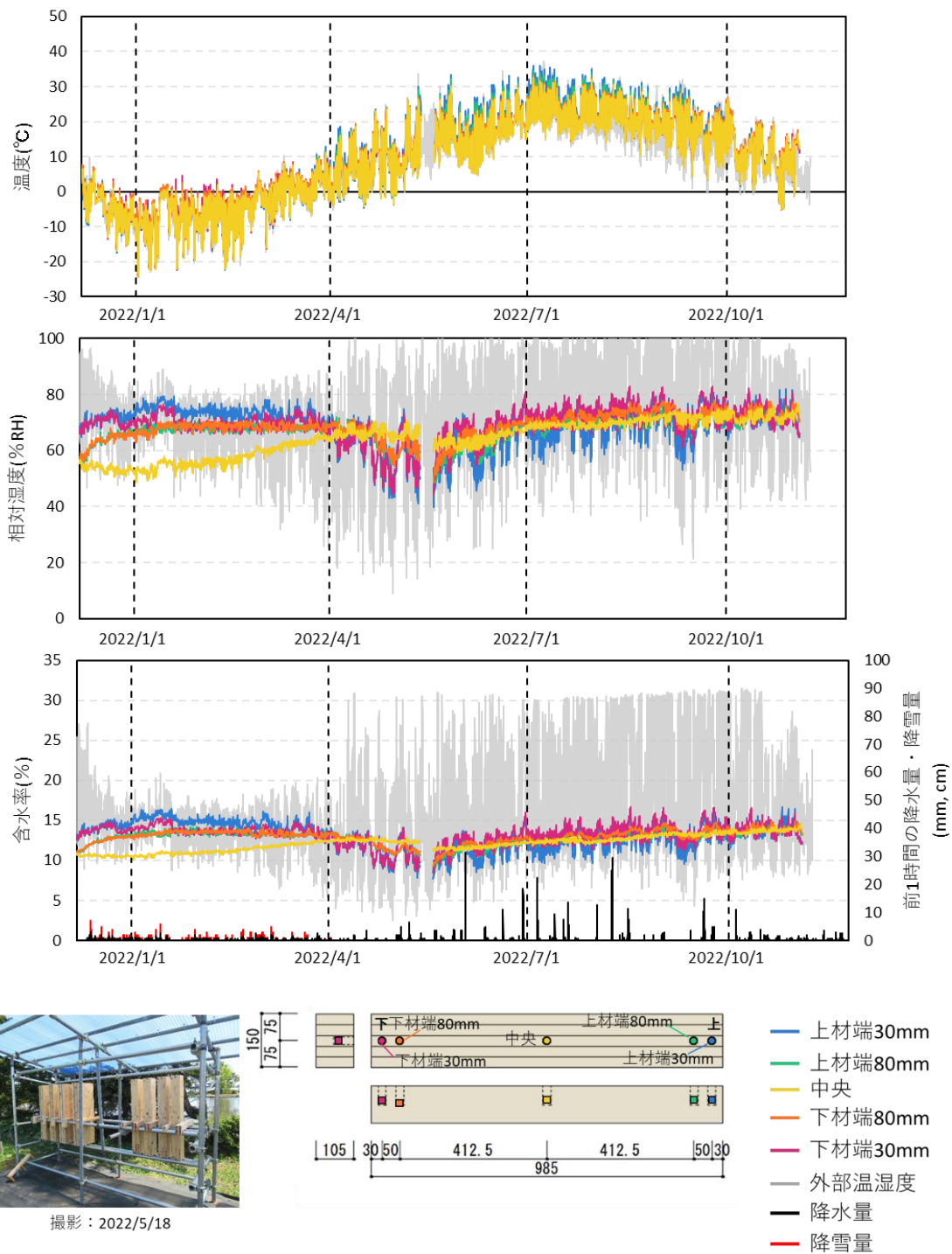
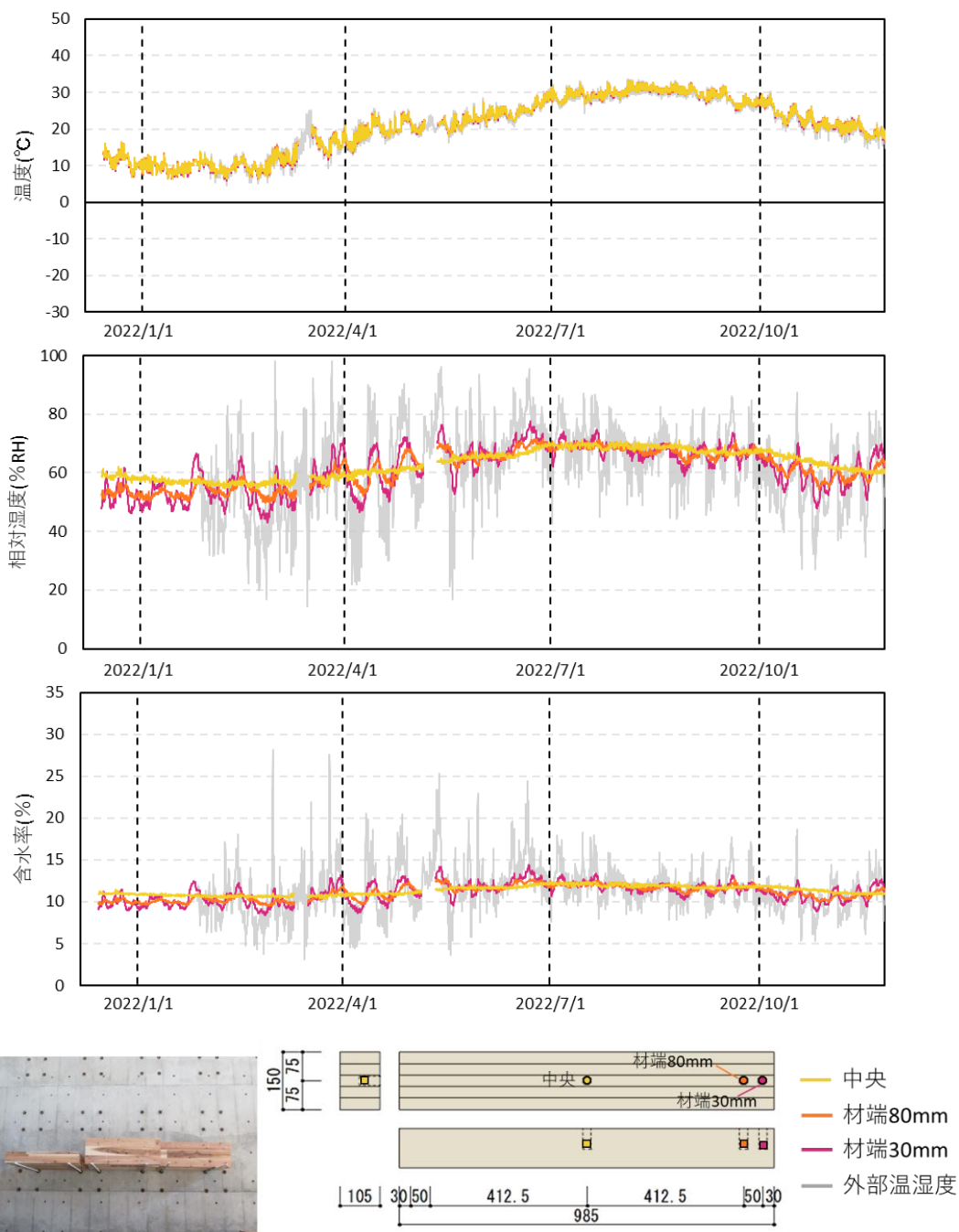


図 3.46 旭川屋根付き縦置き試験体の計測値

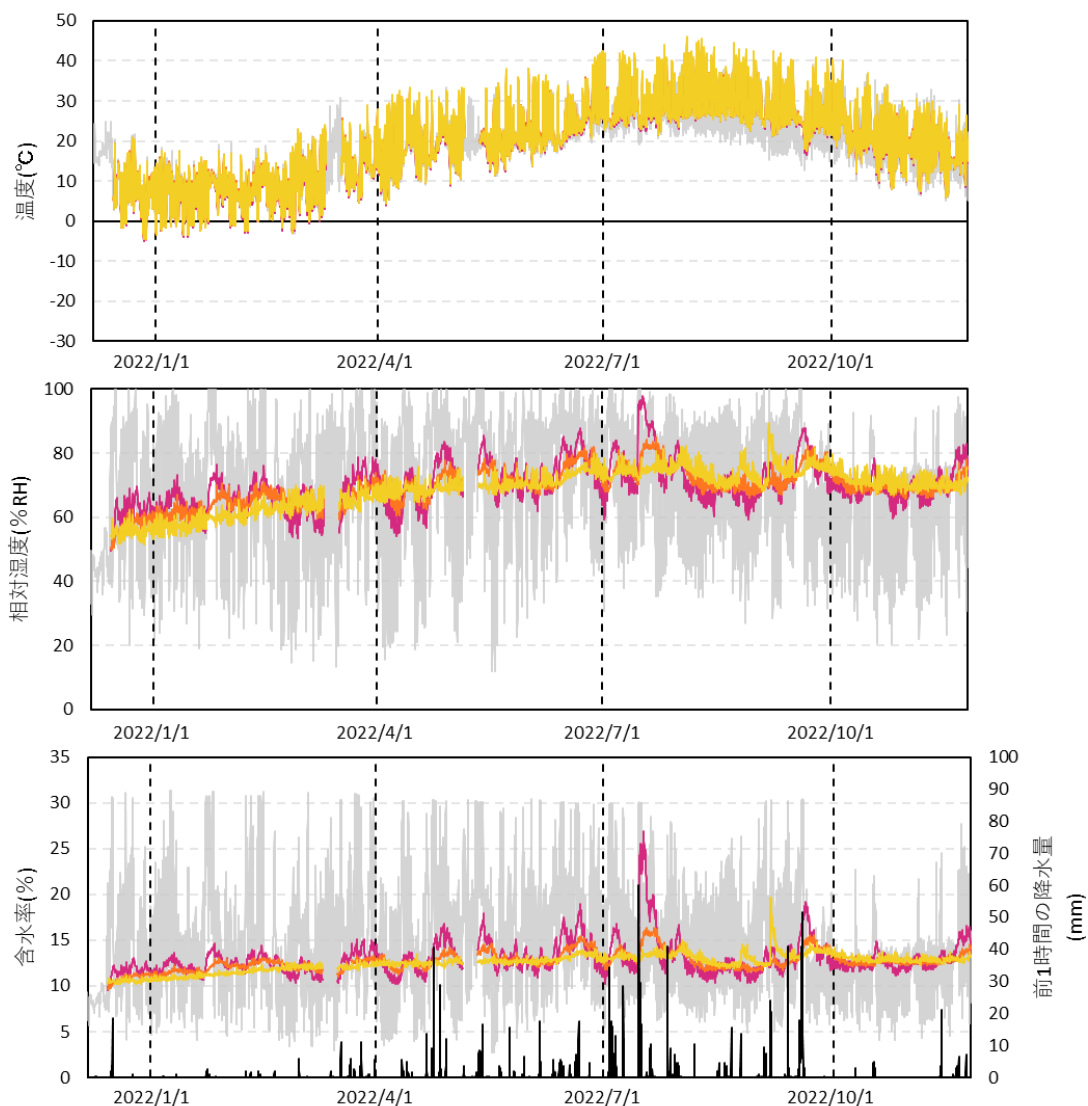
第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2021/12/14

図 3.47 都城屋内試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2022/5/11

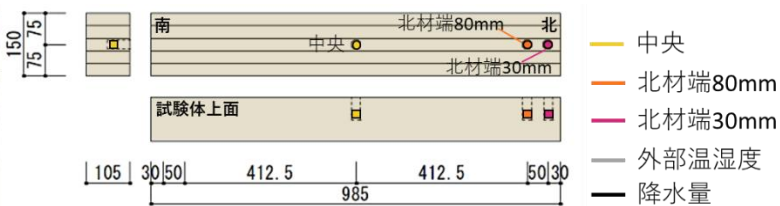


図 3.48 都城屋外平置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

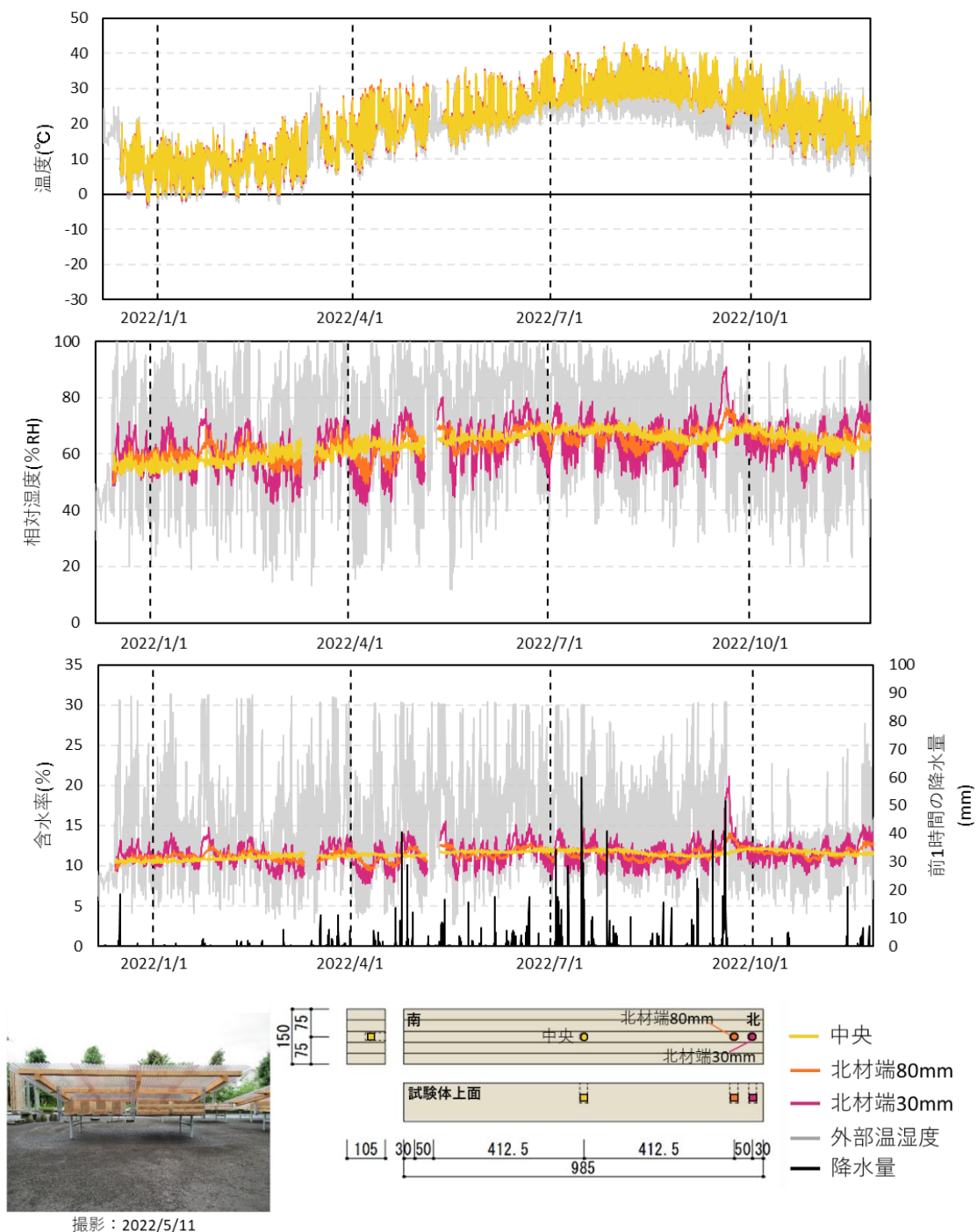


図 3.49 都城屋根付き平置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

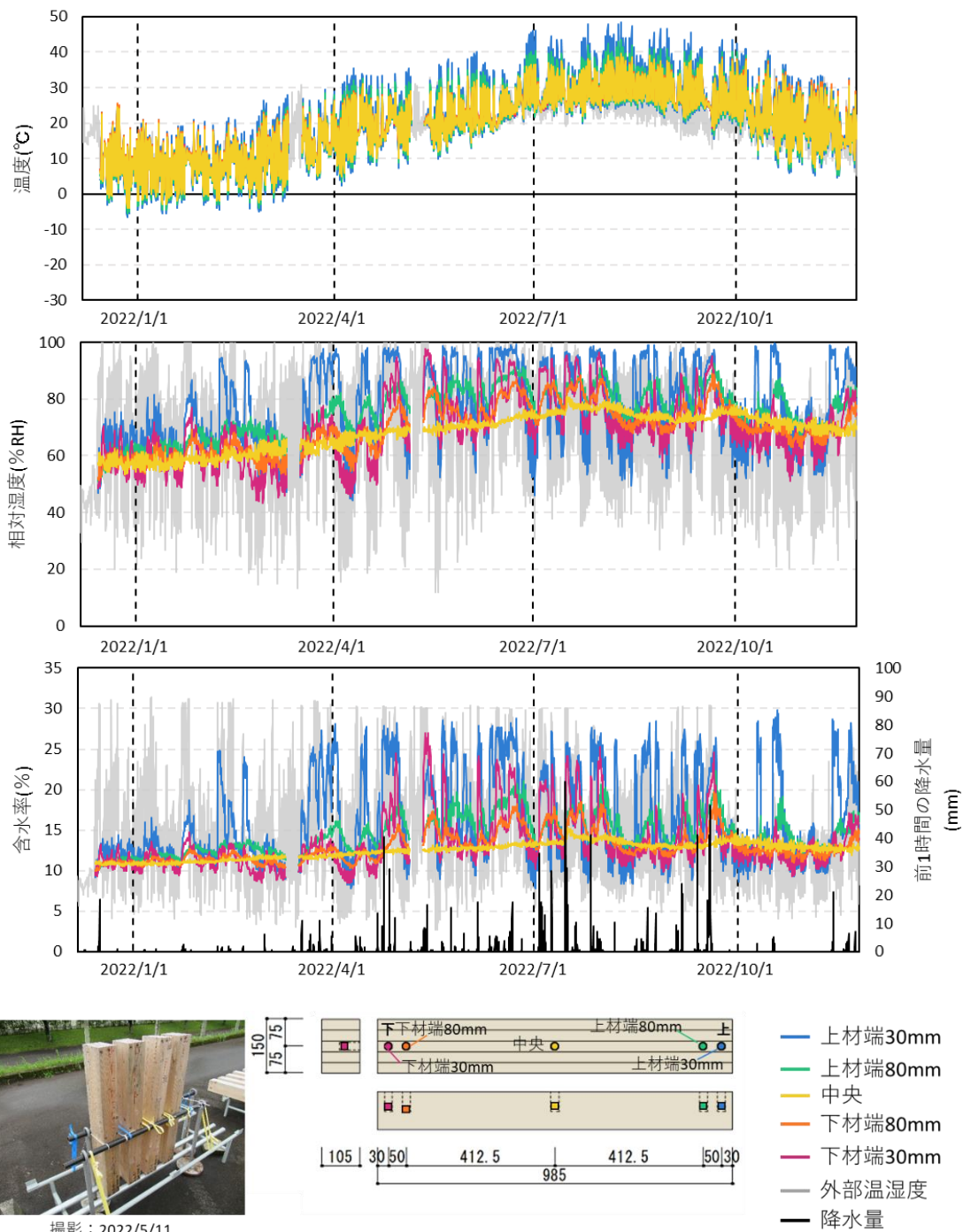


図 3.50 都城屋外縦置き試験体の計測値



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

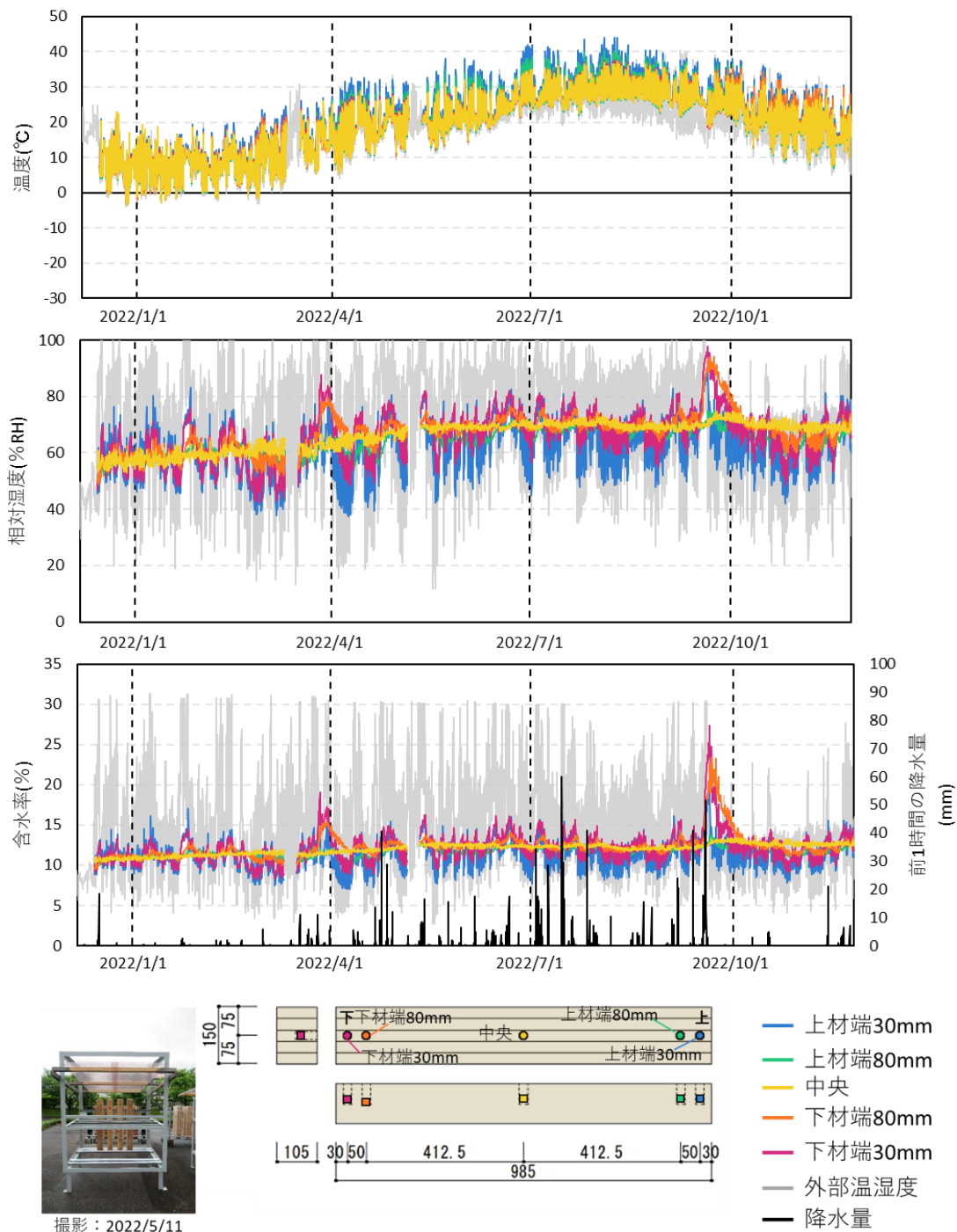


図 3.51 都城屋根付き縦置き試験体の計測値

### 3.2.9. 薬剤処理 CLT 試験体の計測結果

#### 【同じラミナ内の材端からの距離が異なる計測点】

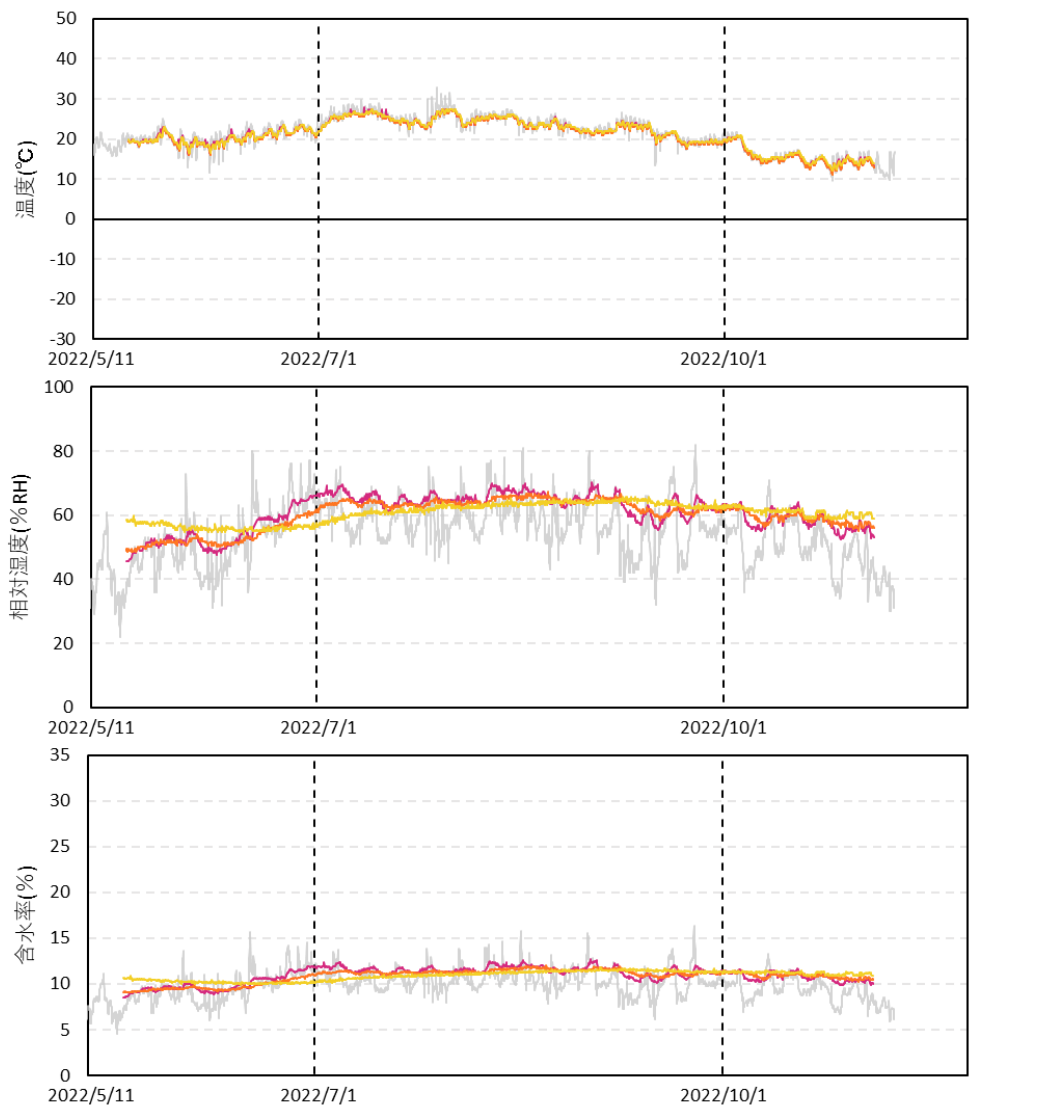
図 3.52 から図 3.56 に旭川薬剤処理 CLT の試験体ごとの材端からの距離の異なる計測点の内部温湿度とそこから算出した含水率を示す。また図 3.57 から図 3.61 に都城薬剤処理 CLT の計測値を示す。薬剤処理 CLT 試験体は暴露開始が 2022 年 5 月からのため、無処理試験体と横軸を変更して示す。薬剤処理 CLT 試験体の暴露開始から最終データが取得できている期間に降雪は観測されていない。

内部温度は無処理試験体と同様、計測点によって大きな違いはなく、外部温度とほぼ同じように推移していた。屋外縦置き、屋根付き縦置き試験体のみ、設置時の上部から近い計測点ほど温度の変動が 5~10℃大きくなる傾向があった。

内部相対湿度と含水率は全ての計測点でほぼ同じように推移していた。また全ての設置条件で材端からの距離が近くなるほど内部含水率変動が大きくなる傾向があった。

また、材端計測点の内、旭川屋外平置き試験体の 30mm 計測点と旭川屋外縦置き試験体と都城屋外縦置き試験体の上 30mm 計測点は写真 3.29 と写真 3.33 に示すように計測穴まで割れが通じていたため今後雨水が侵入して HY の故障につながらないように計測を中止した。

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2022/5/18

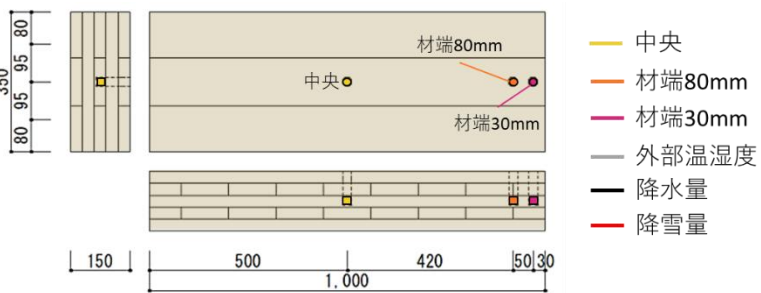
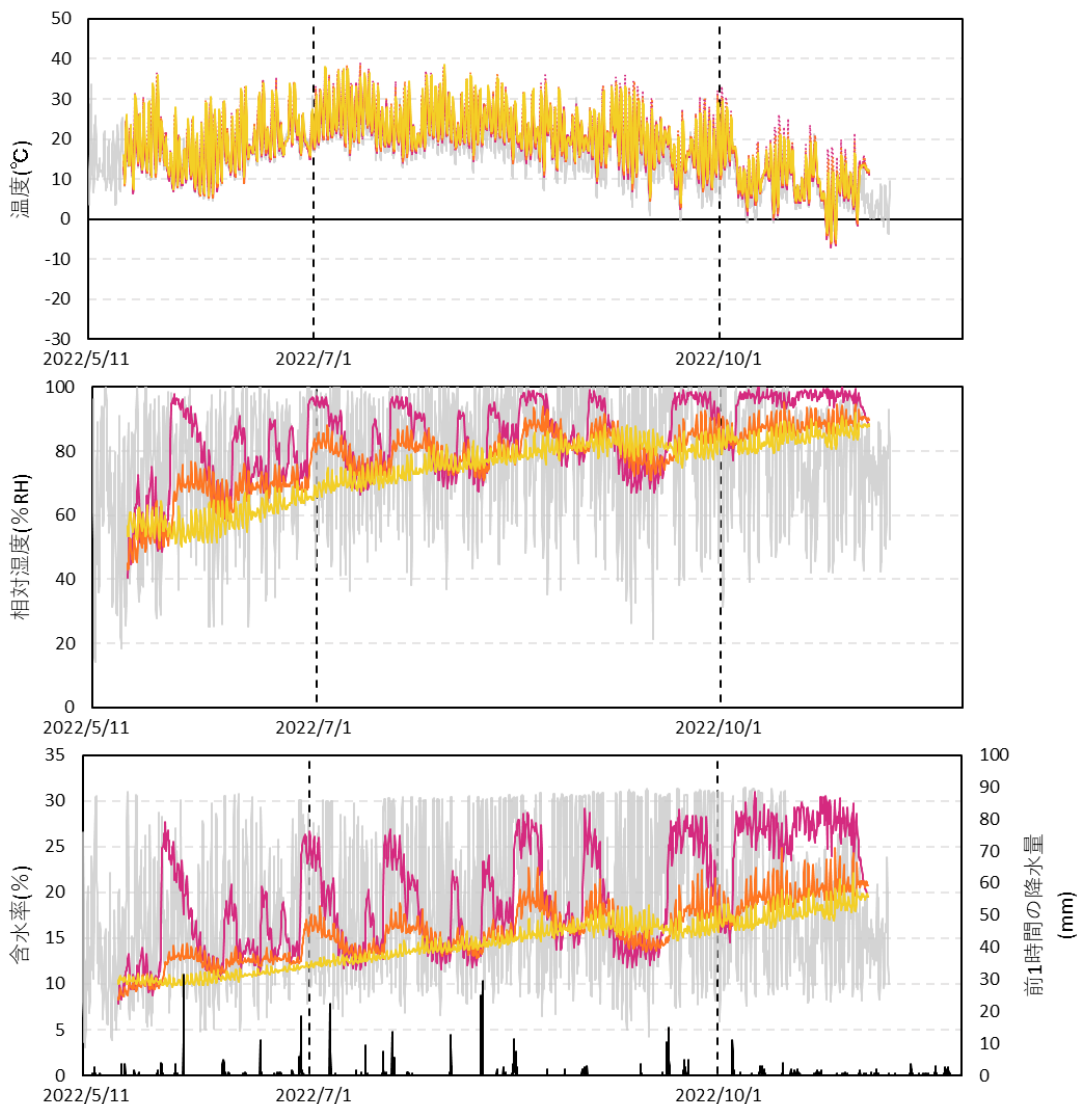
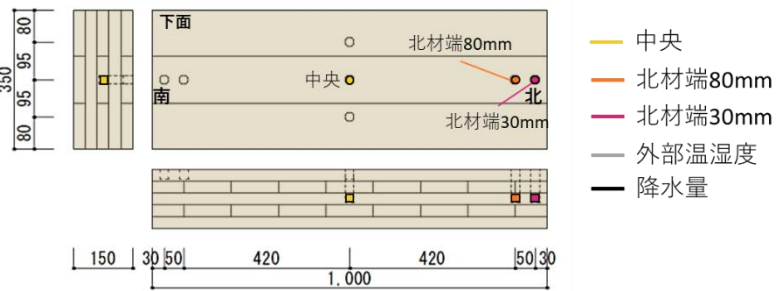


図 3.52 旭川屋内試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



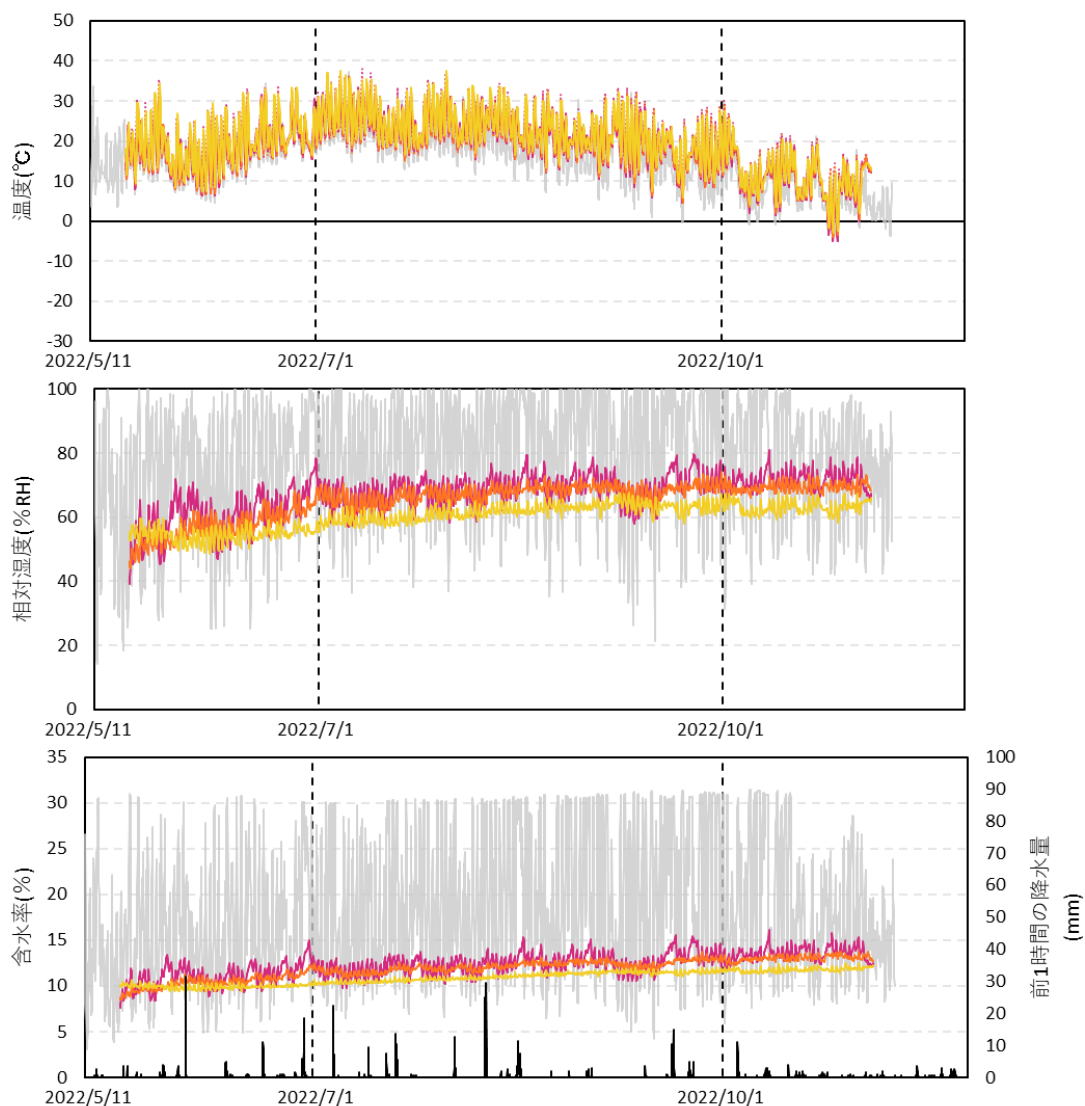
撮影：2022/11/8



- 中央
- 北材端80mm
- 北材端30mm
- 外部温湿度
- 降水量

図 3.53 旭川屋外平置き試験体の計測値

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2022/11/8

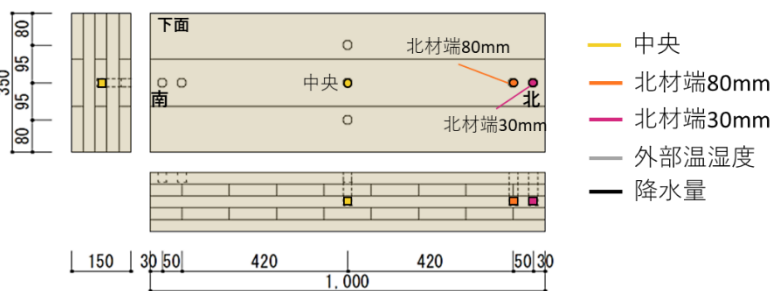
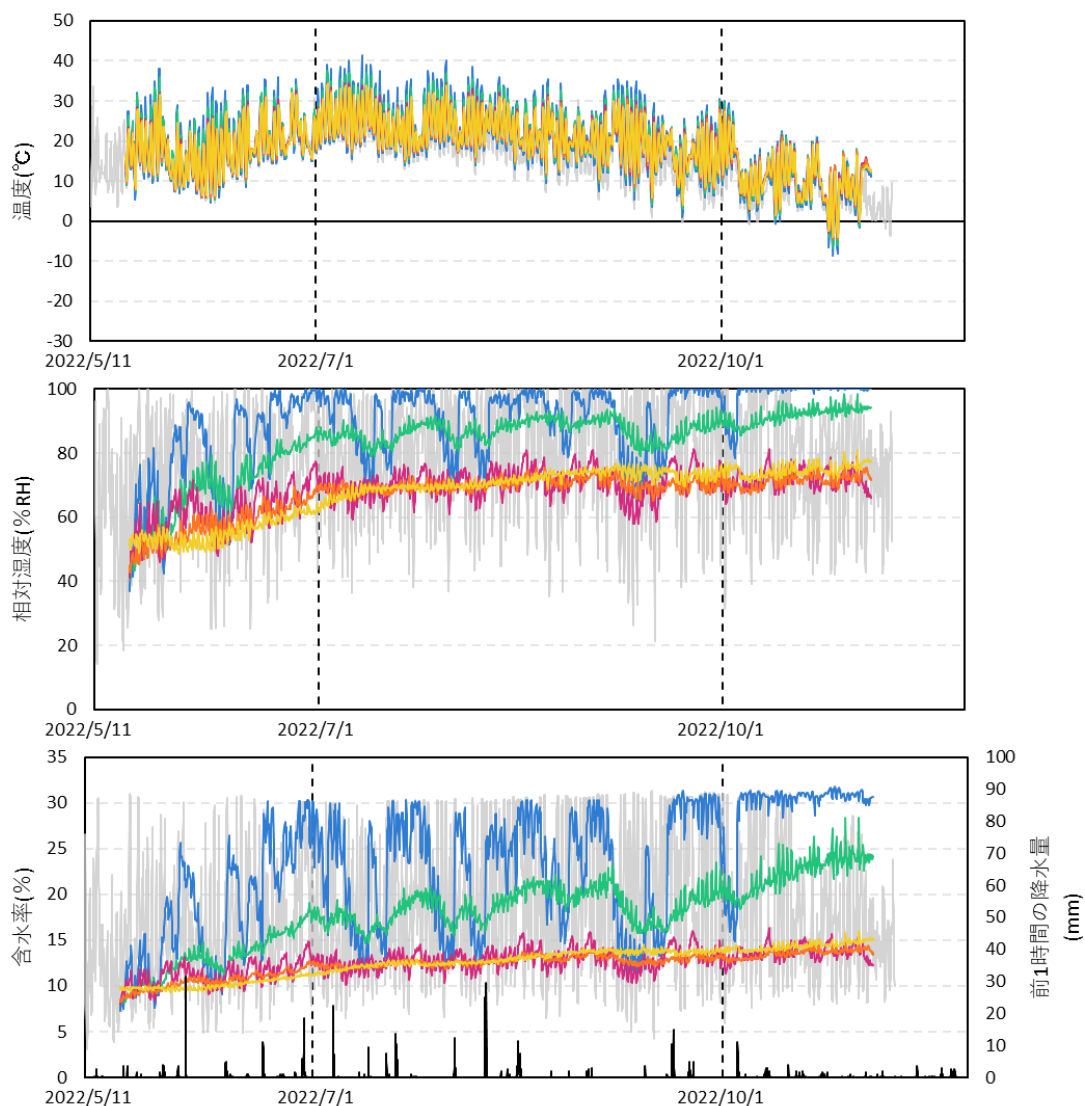


図 3.54 旭川屋根付き平置き試験体の計測値

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2022/11/8

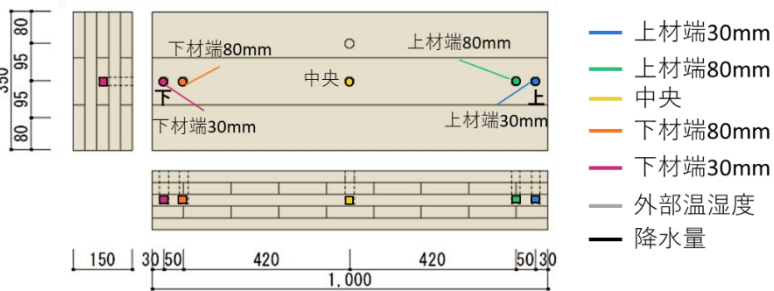


図 3.55 旭川屋外縦置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

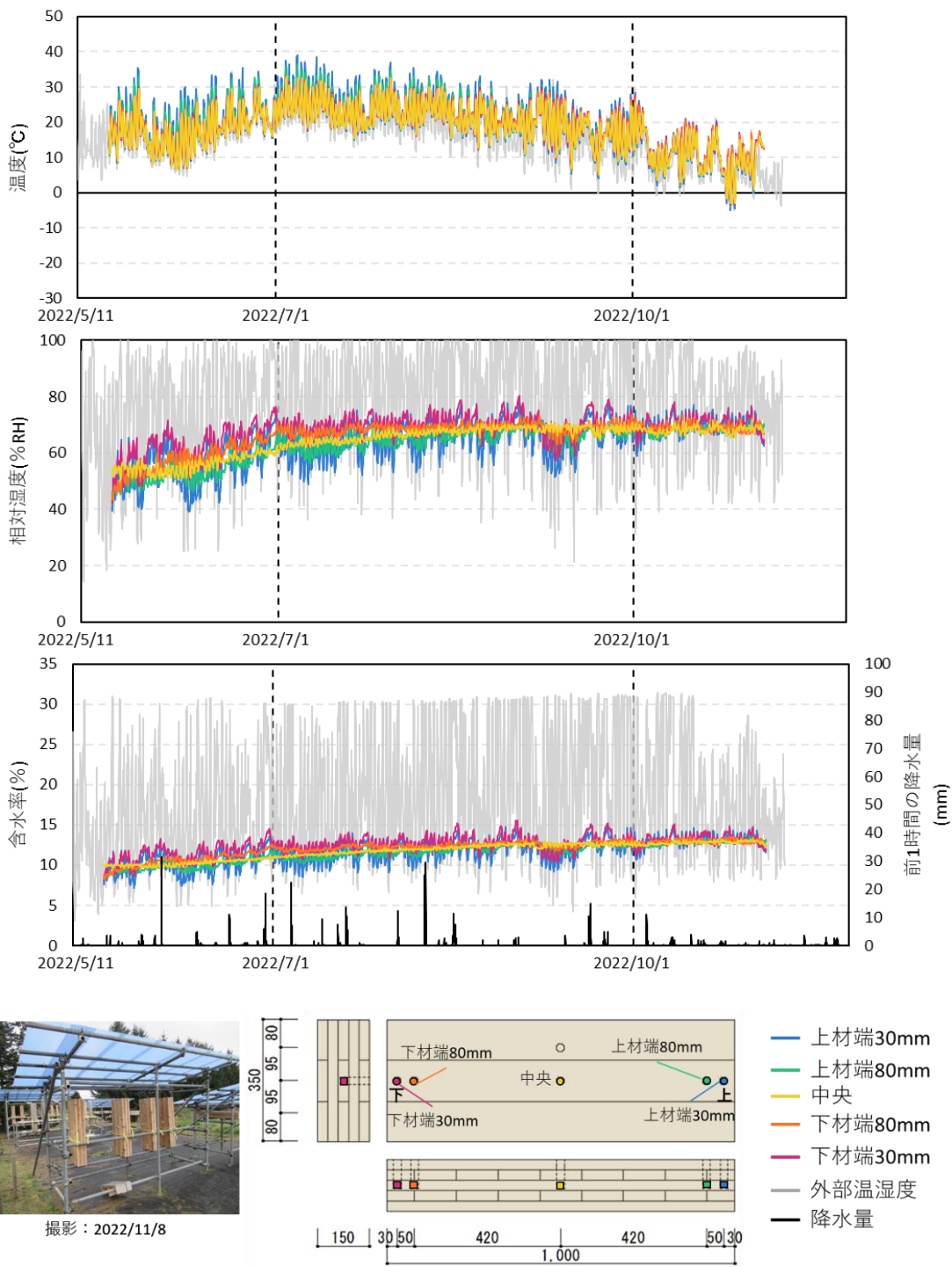


図 3.56 旭川屋根付き縦置き試験体の計測値

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

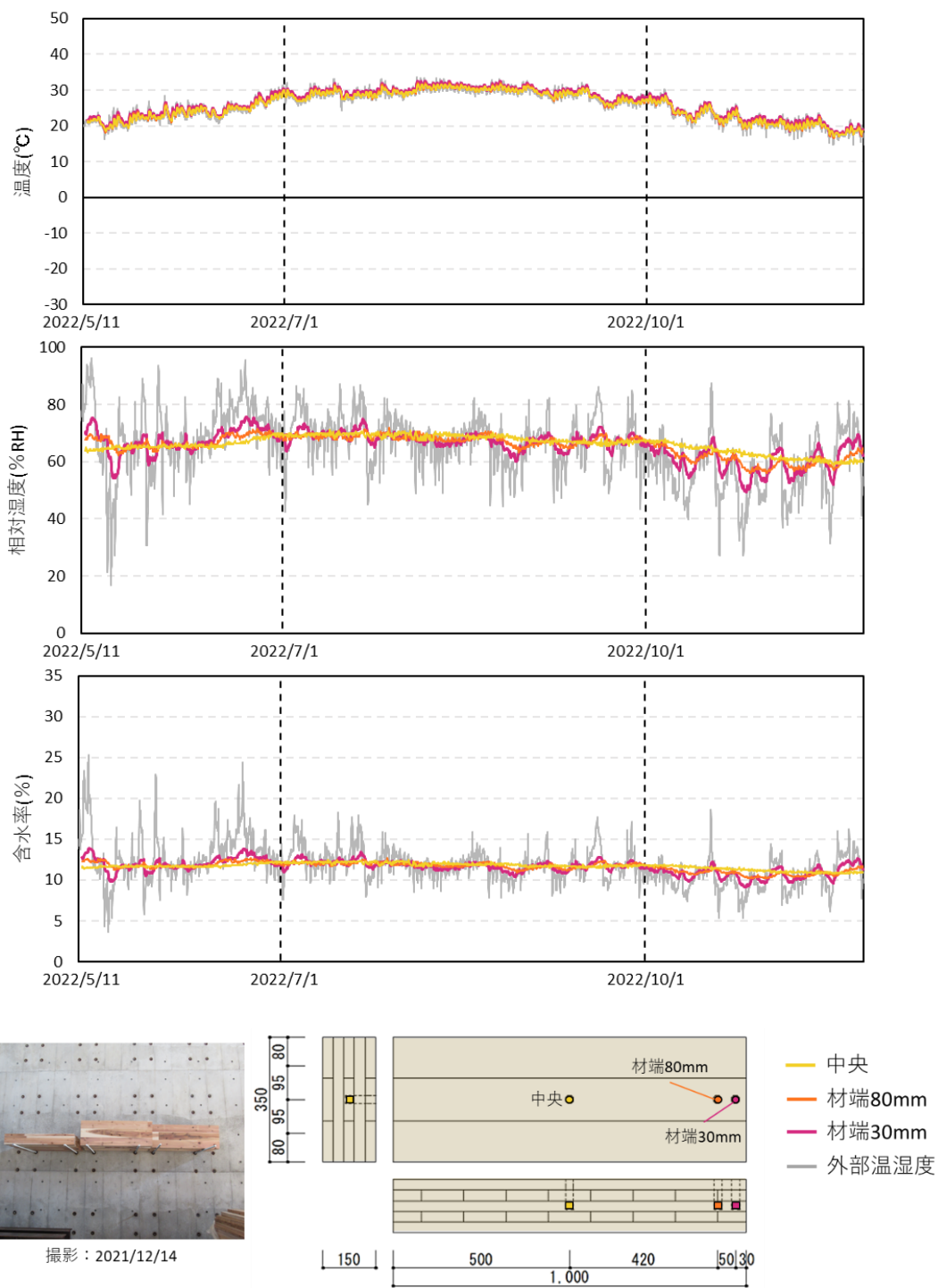
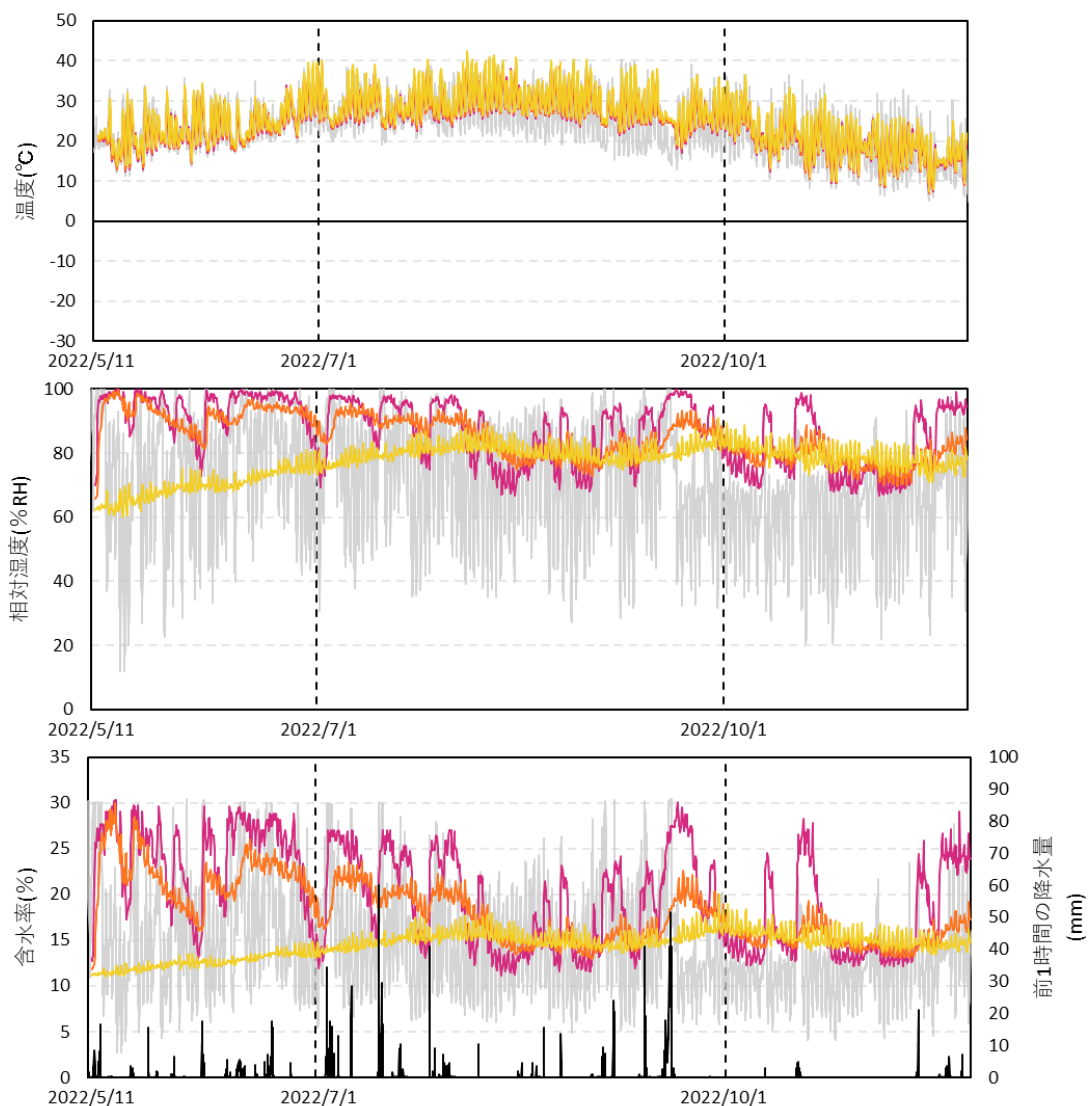


図 3.57 都城屋内試験体の計測値



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2022/5/11

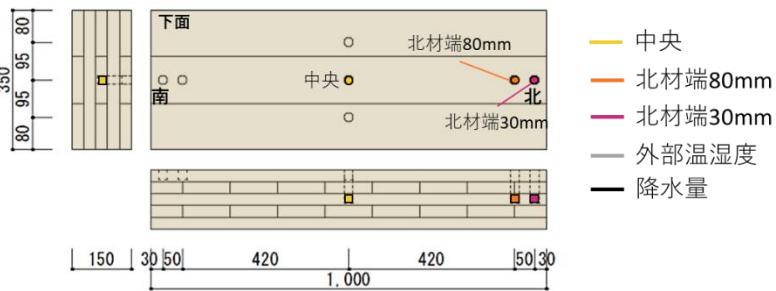


図 3.58 都城屋外平置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

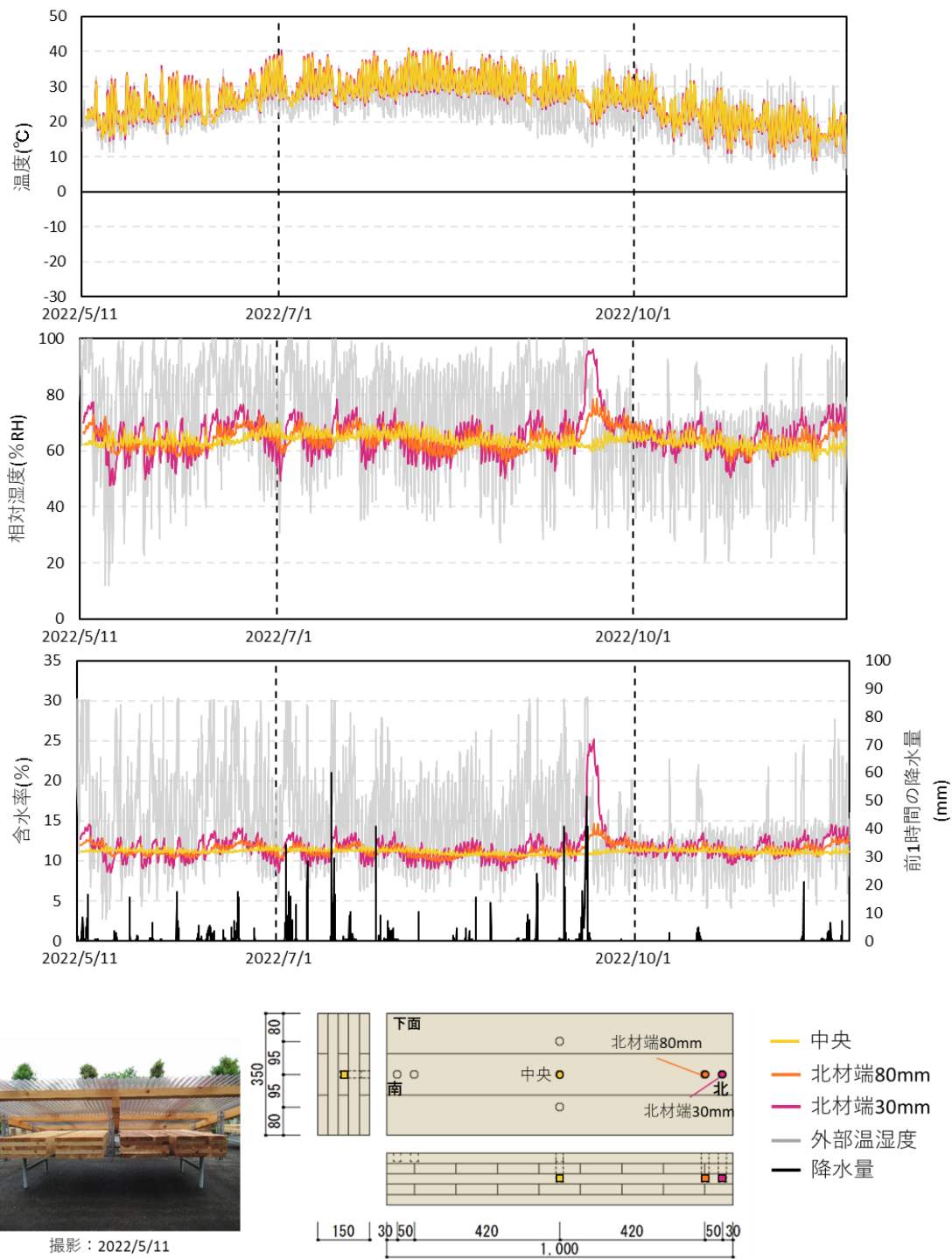
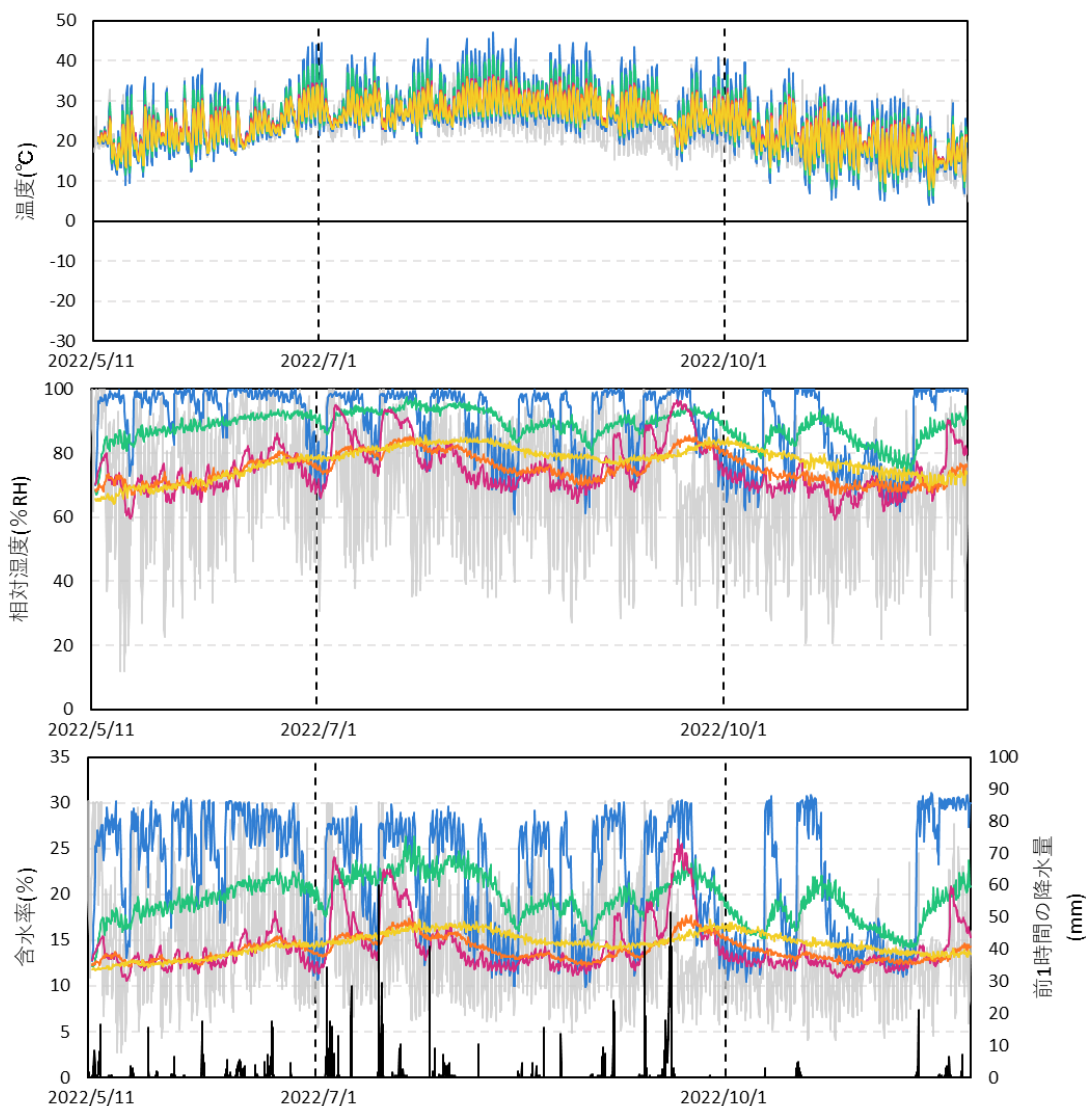


図 3.59 都城屋根付き平置き試験体の計測値

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動



撮影：2022/11/29

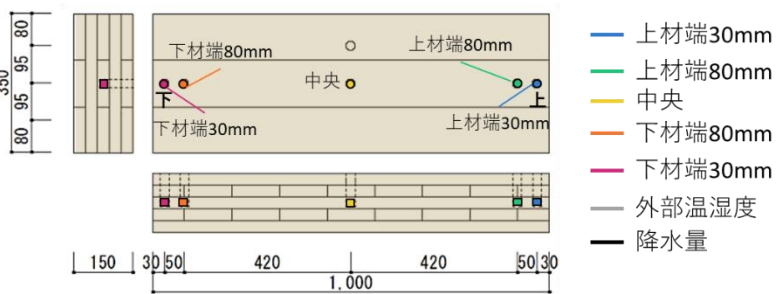


図 3.60 都城屋外縦置き試験体の計測値

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

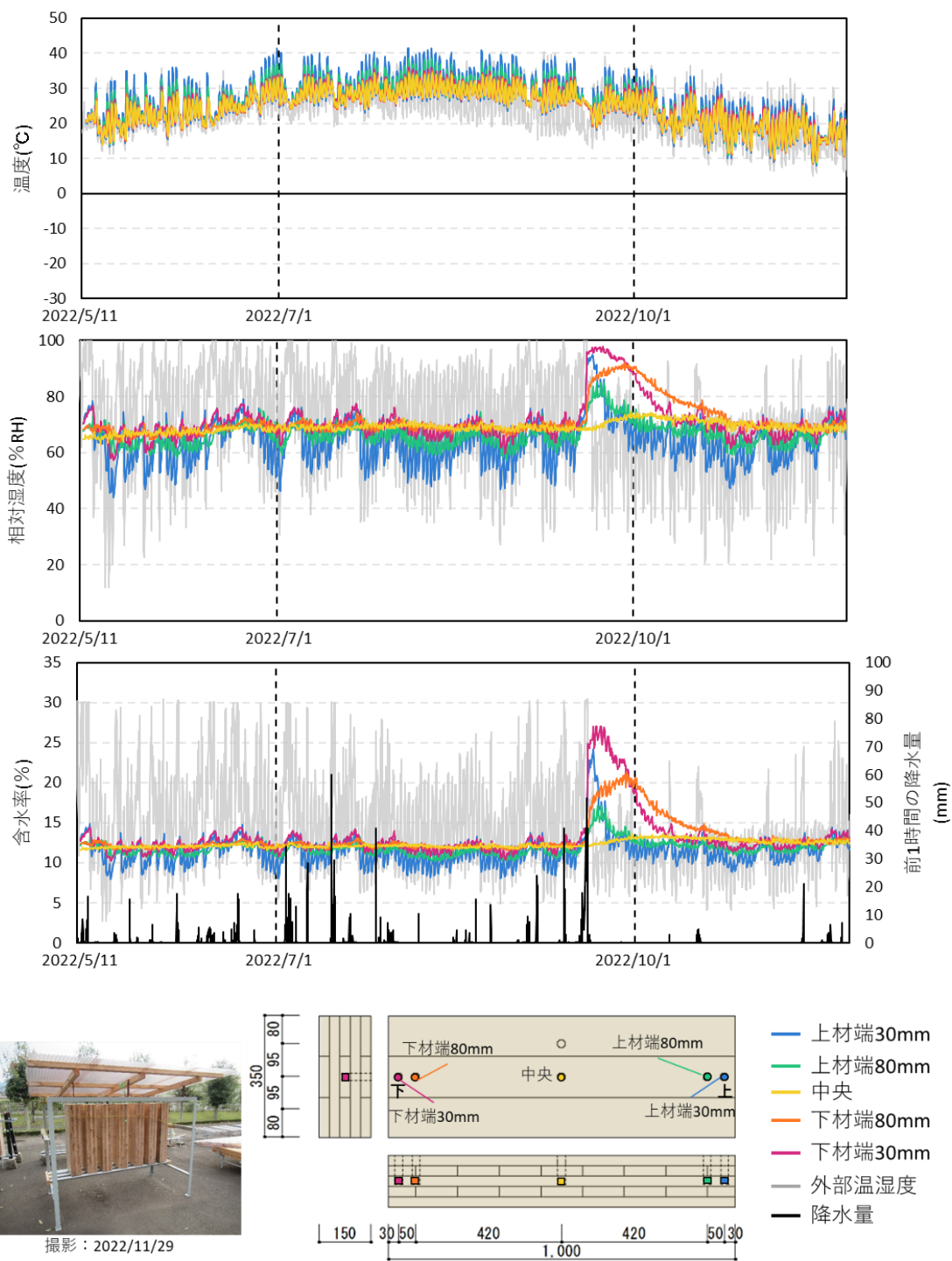


図 3.61 都城屋根付き縦置き試験体の計測値

#### 【CLT 中央ラミナ計測値と材端ラミナ計測値の比較】

図 3.62 と図 3.63 に旭川試験体の中央ラミナの中央計測点と材端ラミナの中央計測点の内部含水率変動を示す。図 3.64 と図 3.65 に都城試験体を示す。CLT は繊維方向のラミナを積層接着した材料であるため、材端のラミナと中央のラミナとで今回の実験では弱軸方向のラミナの水分移動により、計測を行っている強軸方向のラミナの計測値に違いが生じる可能性がある。そこで材端ラミナと中央ラミナの中央計測点を計測し、その違いを比較した。

今回計測を行った期間では、旭川では屋根付き平置き試験体、屋外縦置き試験体、屋根付き縦置き試験体の計測点で、都城ではすべての設置条件で中央ラミナと材端ラミナとに計測値の違いはなく、ほぼ同じように推移していた。旭川の屋外平置き試験体のみ、材端ラミナ計測点の方が含水率の上昇が大きく、最終的に3%ほど差が生じていた。材端ラミナの含水率が上昇した要因として、側面インサイジングに雨水がたまったことが考えられるが、旭川と都城とで傾向が異なる要因はわからない。

このことより薬剤処理 CLT では、CLT 内部の含水率分布は弱軸層と強軸層とで異なり、各層のラミナの木口からの距離で決まっていることがわかった。しかし、平置きの場合材端ラミナは側面インサイジングによる影響を受ける可能性があることが判明した。

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

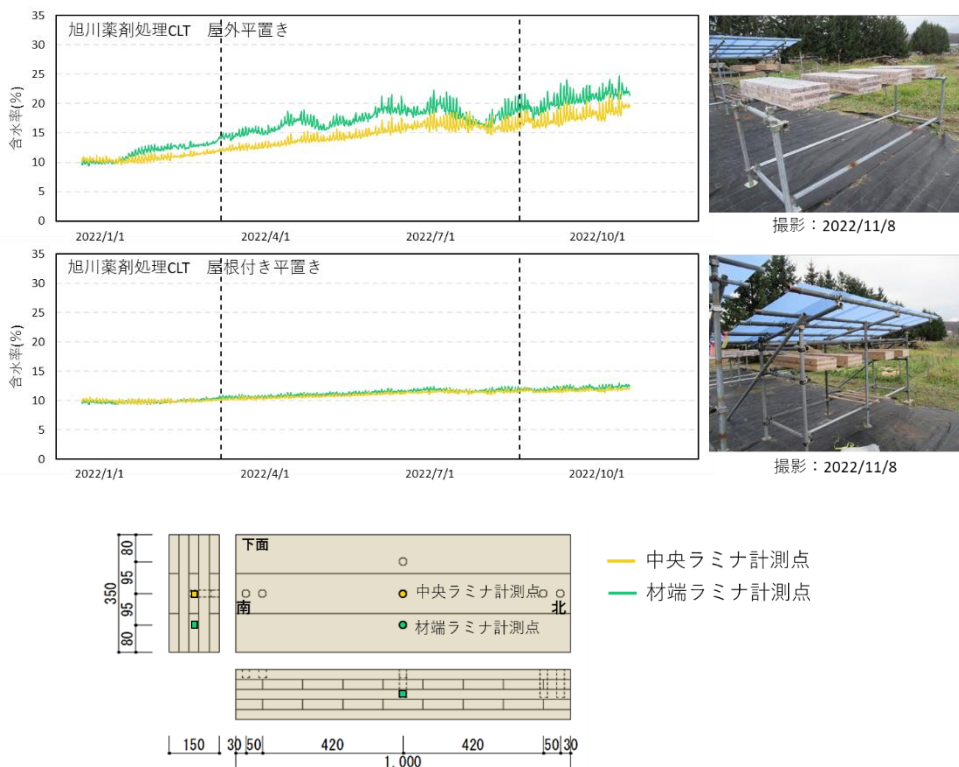


図 3.62 旭川平置き試験体の比較

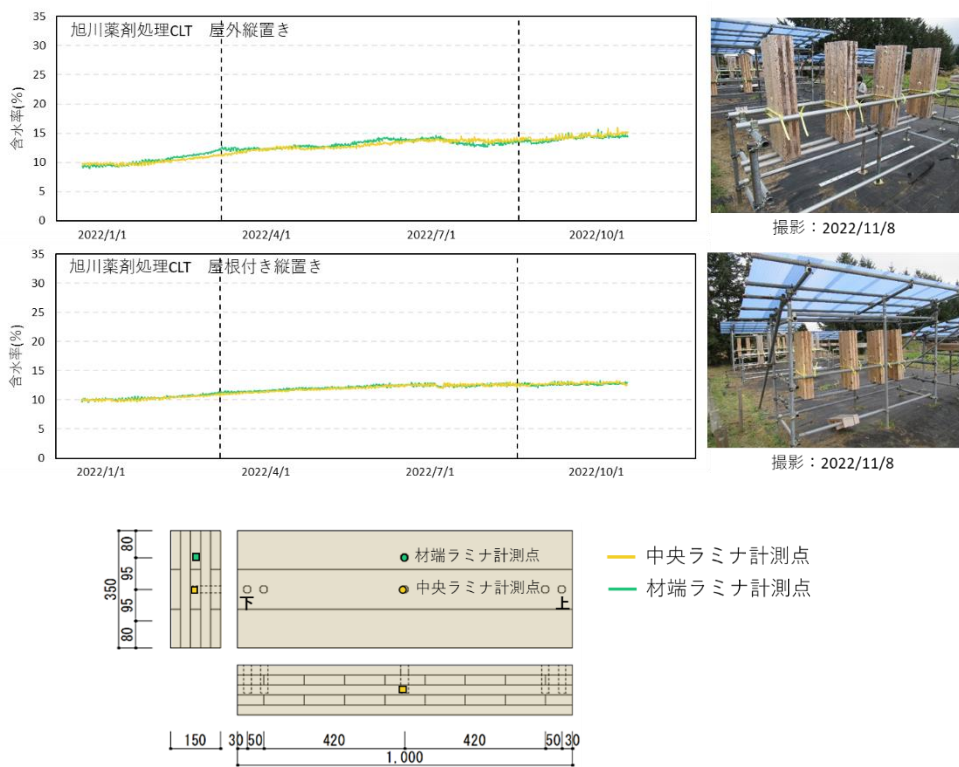


図 3.63 旭川縦置き試験体の比較

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

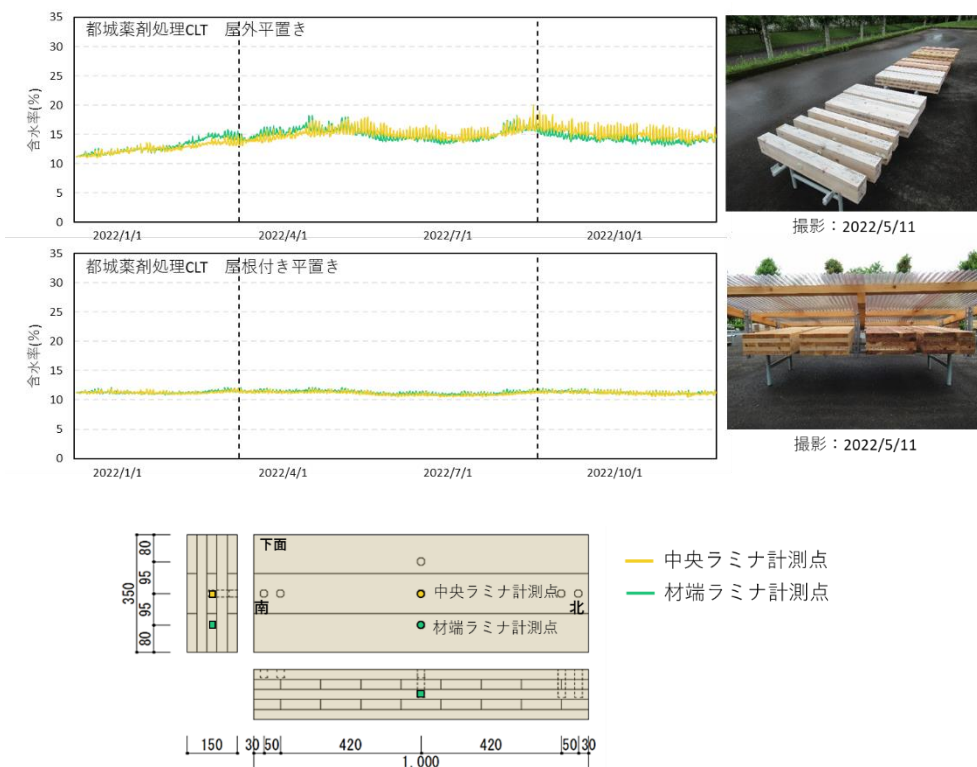


図 3.64 都城平置き試験体の比較

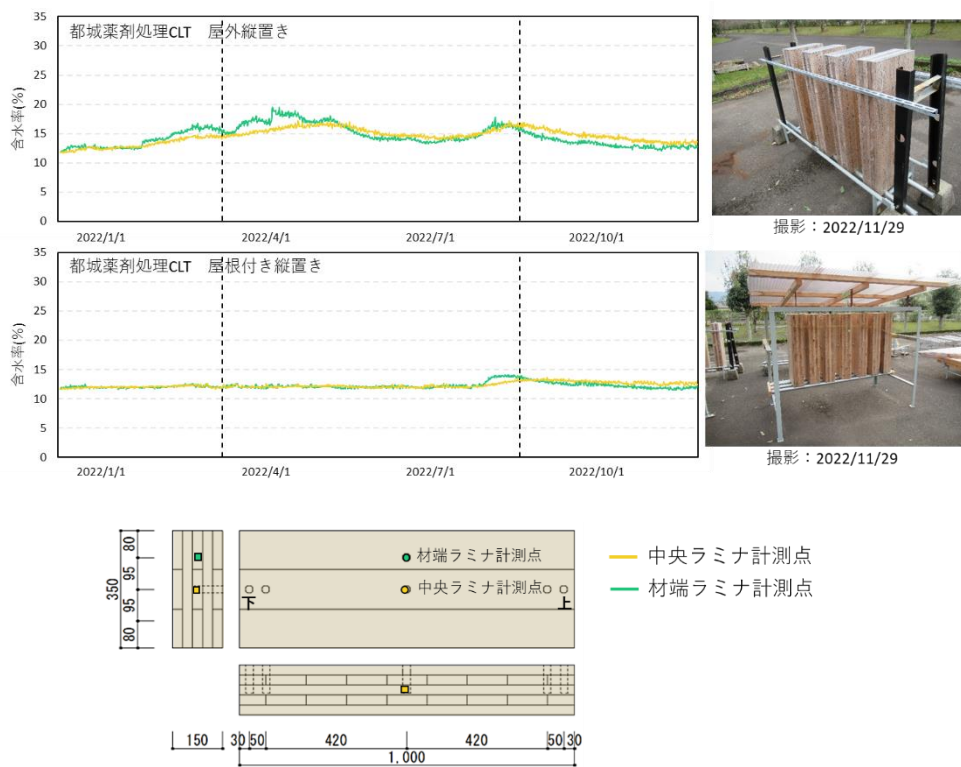


図 3.65 都城縦置き試験体の比較

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

#### 【平置き試験体の最下層計測点】

図 3.66 と図 3.67 に旭川平置き試験体の最下層と 3 層目計測点の内部含水率、図 3.68 と図 3.69 に都城試験体の内部含水率を示す。

平置き試験体は降水などの影響が層によって異なるのではないかと考え、各計測点で HY を埋め込む層の異なる計測点（設置時に一番下になる最下層計測点と 3 層目計測点）で計測した。

旭川試験体も都城試験体も屋根付き平置き試験体では、層による内部含水率の違いはなかった。屋外平置き試験体は、旭川試験体も都城試験体も全ての計測点で最下層計測点の方が含水率変動は小さく、無処理 CLT とは逆の傾向を示した。



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

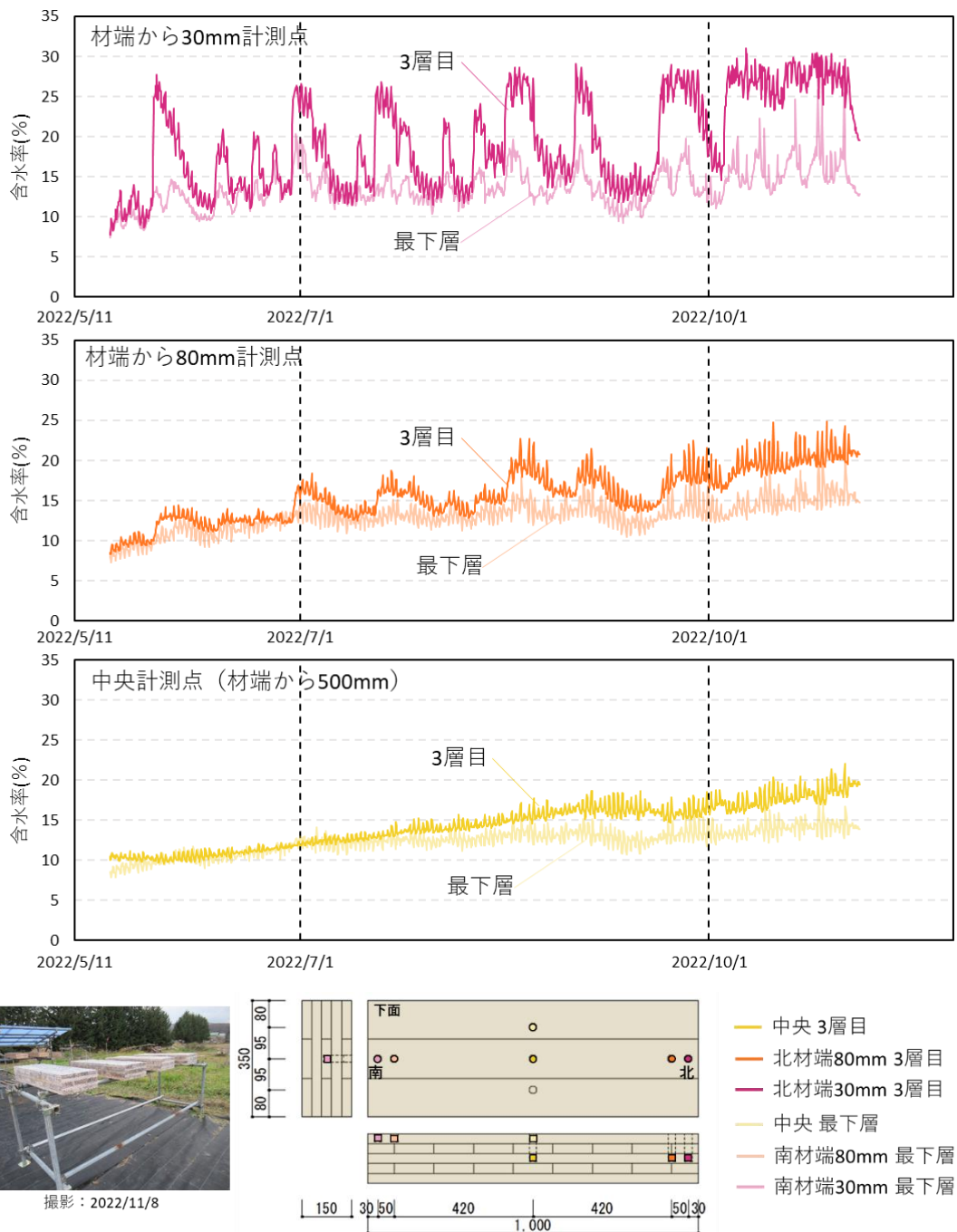


図 3.66 旭川屋外平置き試験体

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

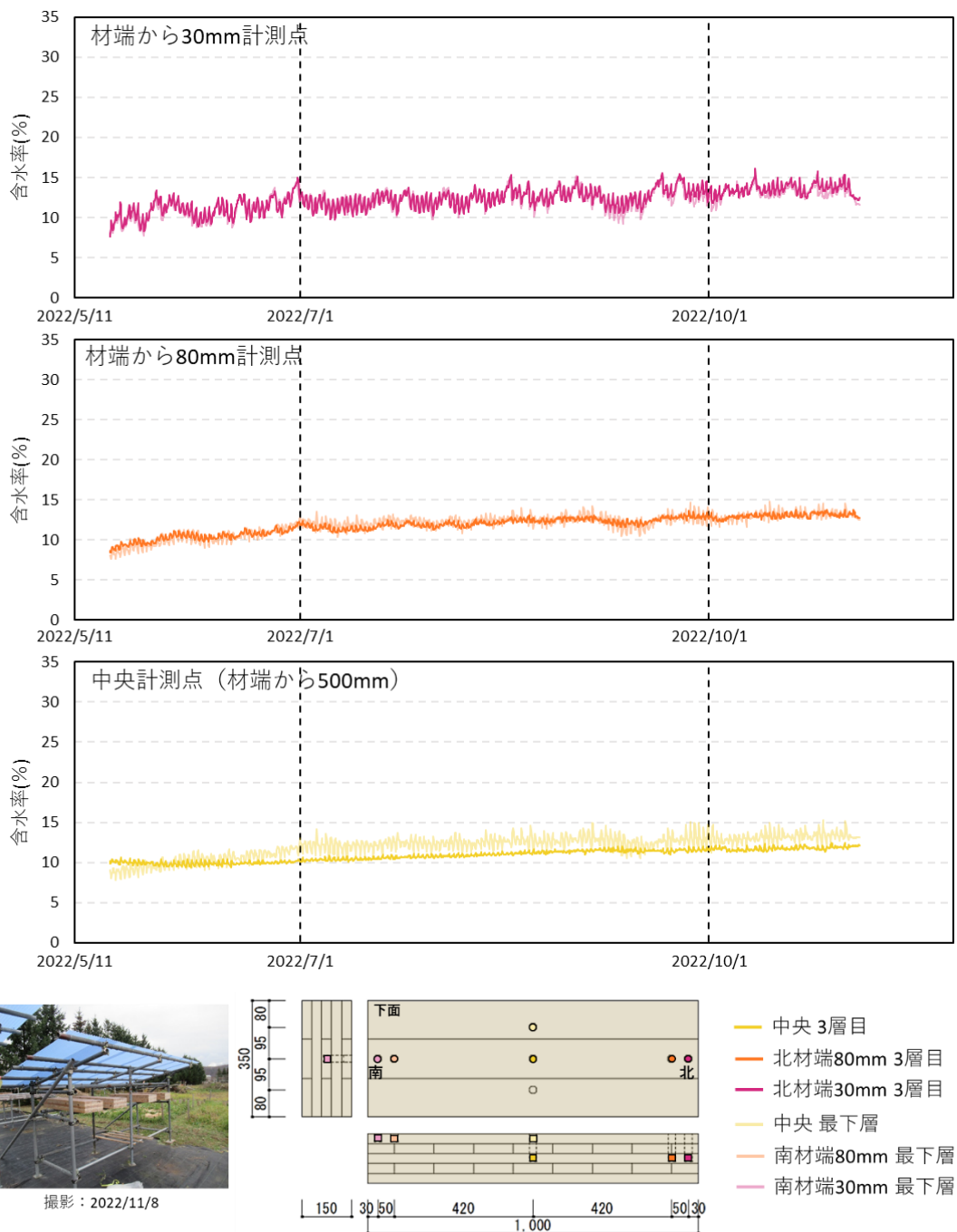


図 3.67 旭川屋根付き平置き試験体

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

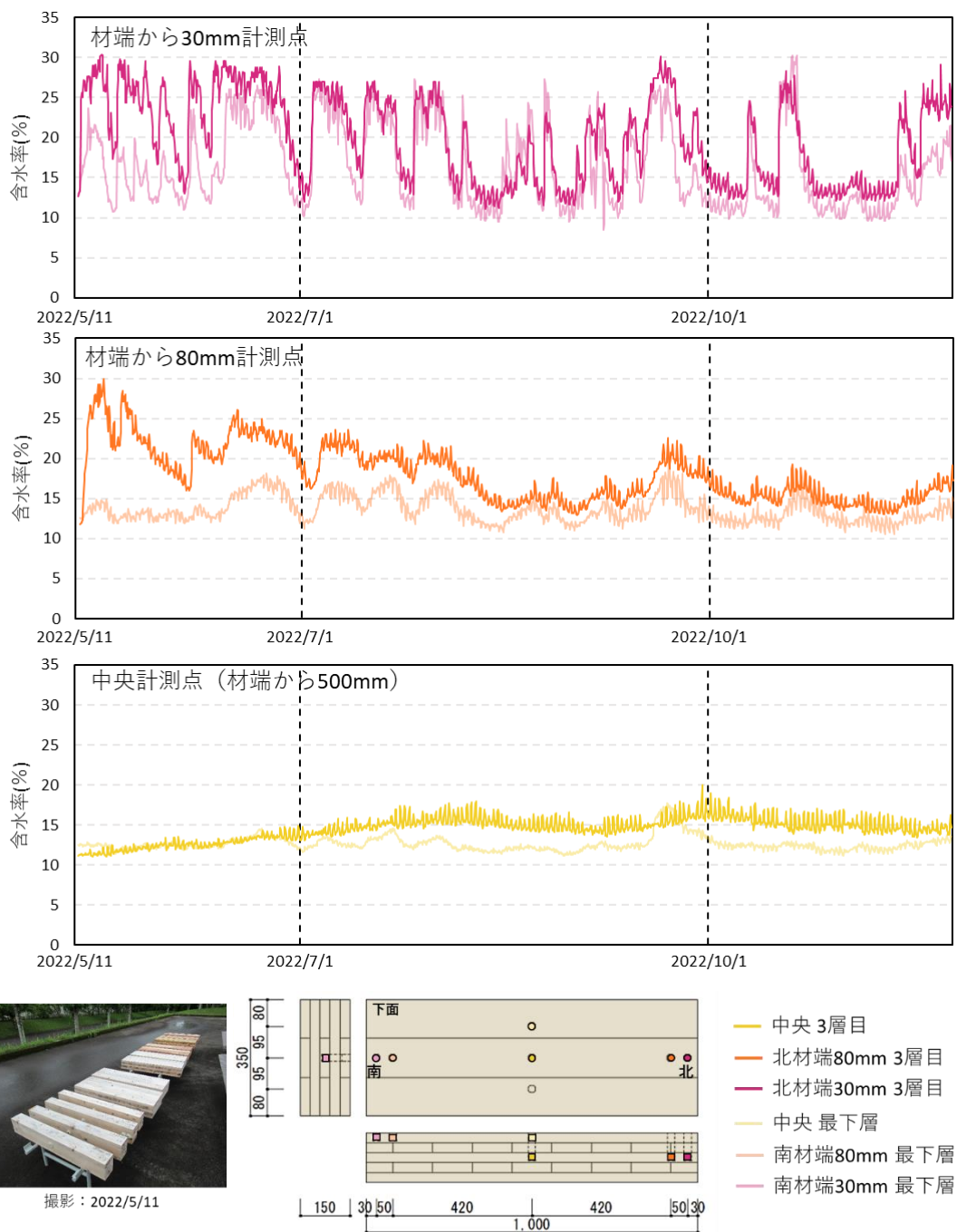


図 3.68 都城屋外平置き試験体

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

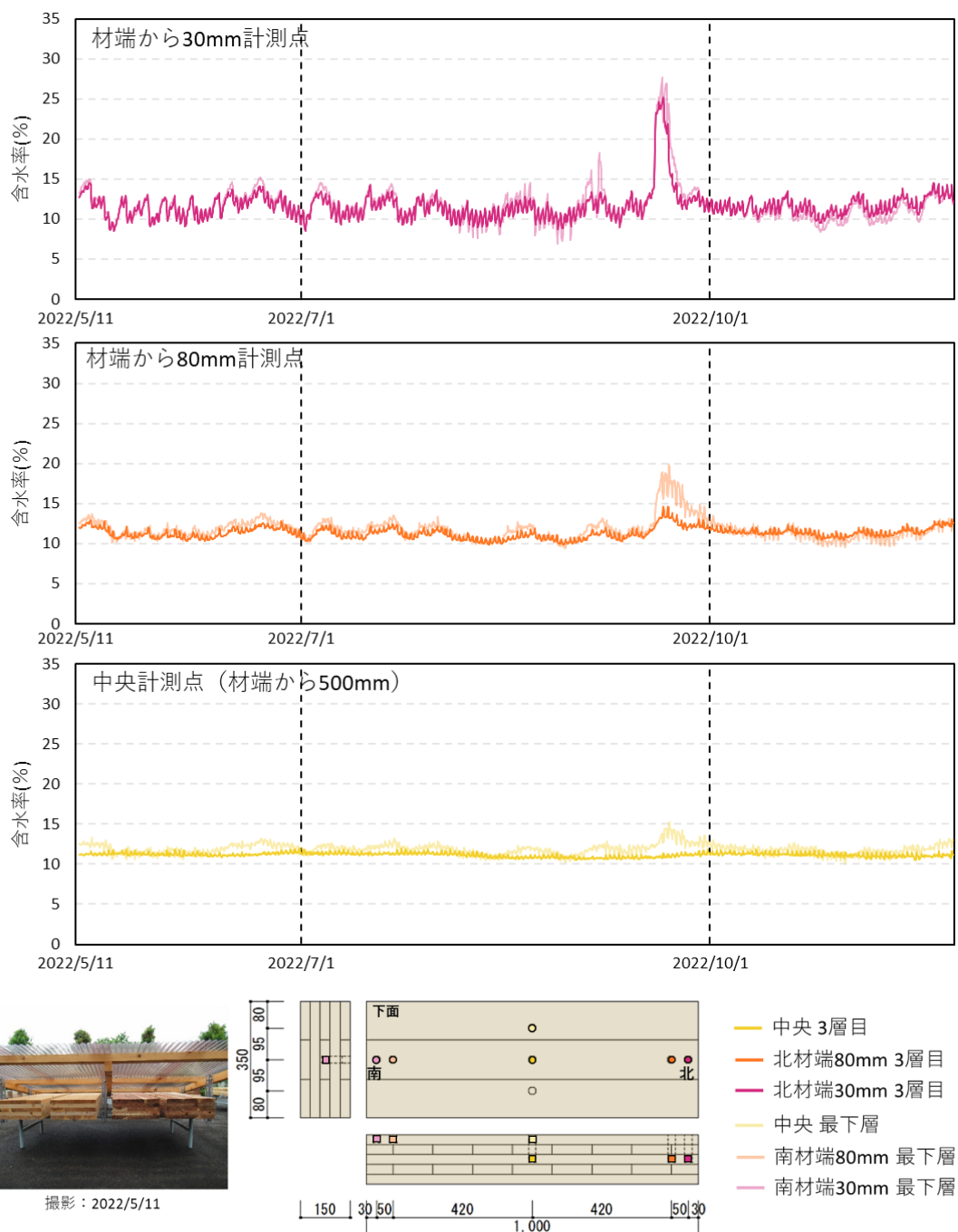


図 3.69 都城屋根付き平置き試験体

#### 3.2.10. 設置条件ごとの中央計測点含水率の推移

##### 【設置条件の異なる試験体の中央計測点の比較】

図 3.71 に旭川試験体の設置条件ごとの中央計測点内部含水率を、図 3.72 に都城試験体の内部含水率を示す。なお、グラフに示す中央計測点は図 3.70 に示す計測点とする。

旭川では、無処理 CLT の屋内試験体と薬剤処理 CLT の屋外平置き、屋外縦置き試験体の中央計測点の内部含水率以外は、季節・降水量・降雪量によらず大きな変動はなく、10～15%の間を推移していた。無処理 CLT の屋内試験体では、冬季の外部環境が暖房の使用などで乾燥状態にあったため最低 8.6%まで低下した。薬剤処理 CLT の屋外平置き試験体では、暴露開始から含水率が上昇を続けており、暴露開始から約半年で 20%まで到達した。薬剤処理 CLT の屋外縦置き試験体でも、屋外平置き試験体ほどではないが暴露開始から含水率が上昇を続けており、暴露開始から約半年で 16%まで到達している。薬剤処理 CLT の屋外平置き、縦置き試験体では材端から 500mm 離れた中央計測点まで含水率上昇があることが判明した。これはインサイジングからの水分流入があり、無処理よりも多くの雨水が侵入してしまうためと考える。

都城では、無処理 CLT の屋外平置き試験体で 2020 年 9 月下旬の大雨を観測したときと、薬剤処理 CLT の屋外平置き、屋外縦置き試験体の中央計測点内部含水率以外は、季節・降水量によらず大きな変動はなく、10～15%の間を推移していた。屋外平置き試験体の 9 月下旬の含水率上昇は 20%まで到達していたが、その後降雨がなくなると急激に減少し、上昇前と同じ含水率を推移している。薬剤処理 CLT の屋外平置き、縦置き試験体は暴露開始から 18%程度まで上昇したのちに 15%まで減少、そして再び 20%まで上昇しており、旭川試験体の含水率とは異なる変動を示した。含水率上昇が起こった要因としてはインサイジングが挙げられるが、降雨の有無によって含水率変動が異なると考えられる。

また旭川試験体、都城試験体のどちらも無処理 CLT と無処理集成材とでは含水率変動に大きな差は生じていない。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

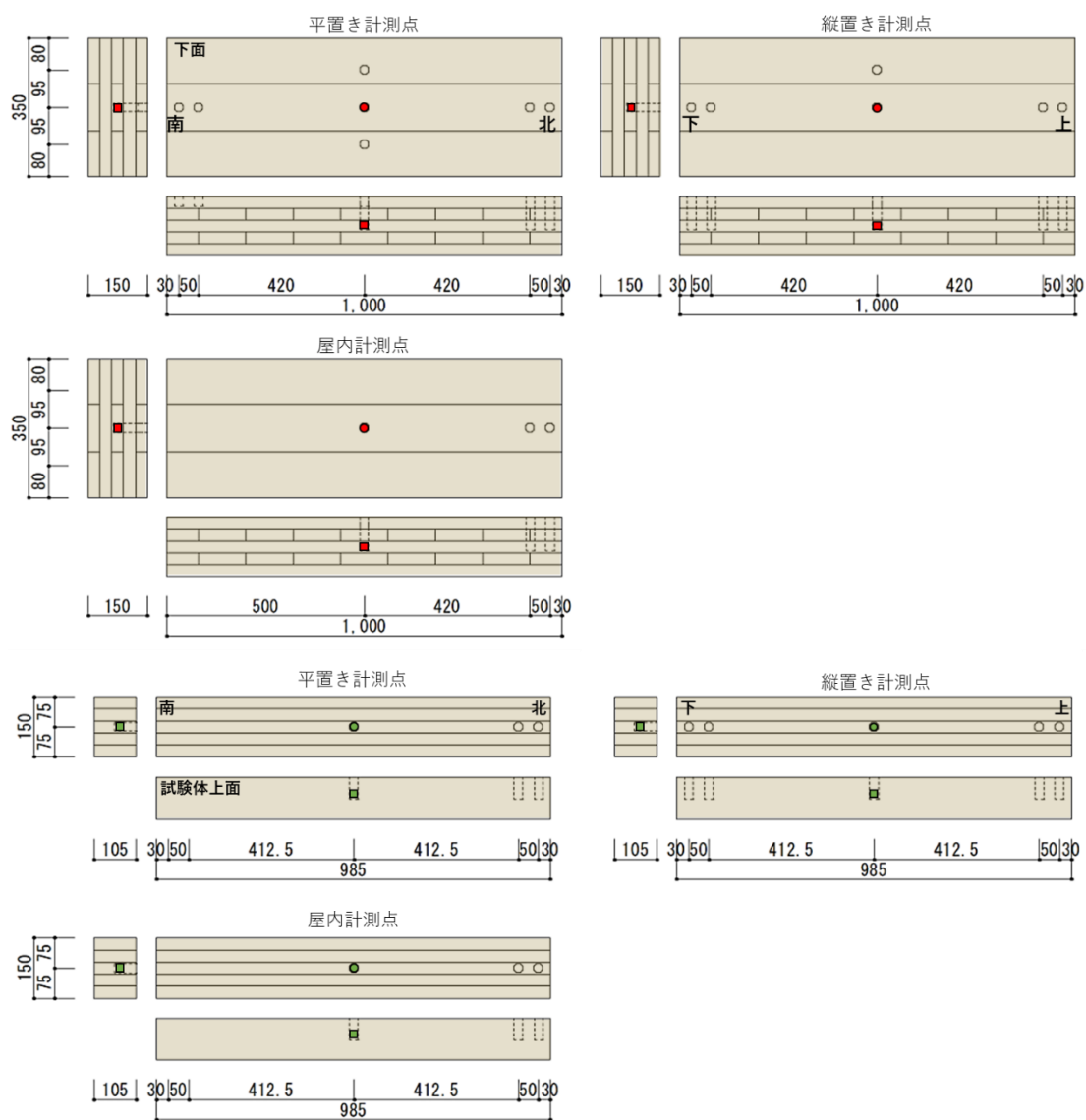


図 3.70 各設置条件の中央計測点

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

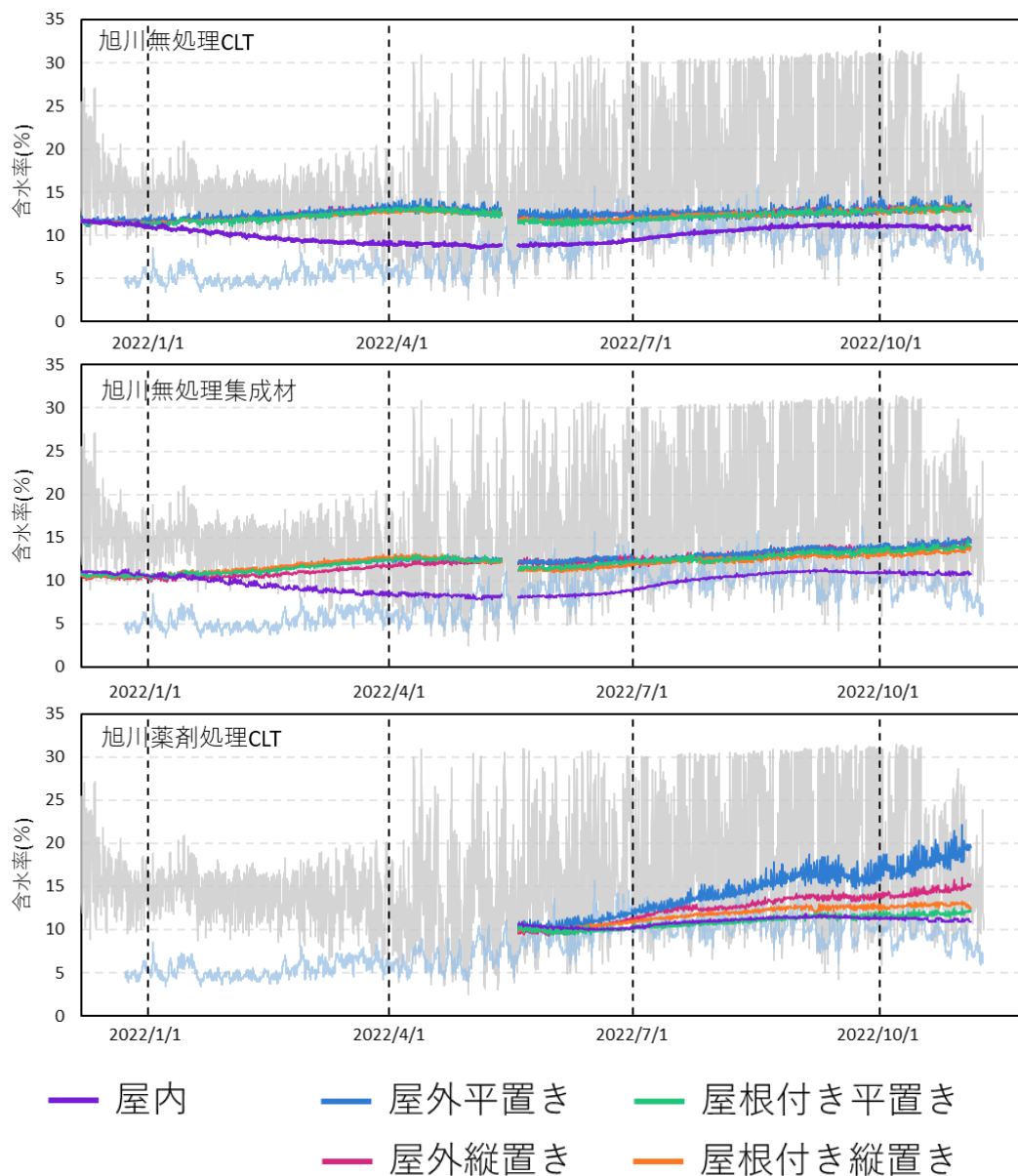


図 3.71 旭川試験体の中央計測点内部含水率

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

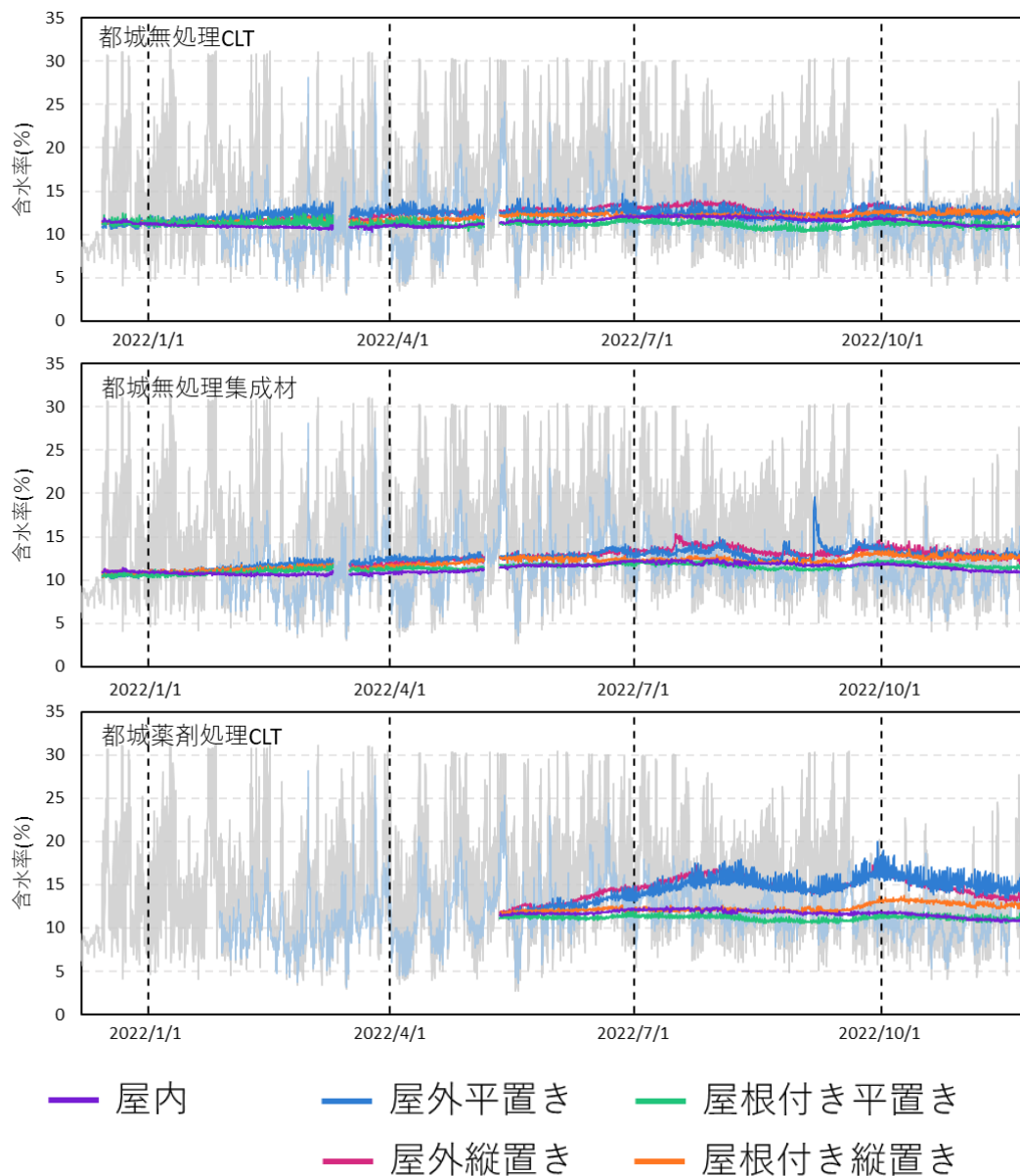


図 3.72 都城試験体の中央計測点内部含水率



### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

#### 【設置条件の同じ試験体の中央計測点】

図 3.73 から図 3.77 に旭川の同じ設置条件で暴露していた試験体の中央計測点内部含水率を、図 3.78 から図 3.82 に都城試験体の中央計測点内部含水率を示す。旭川薬剤処理 CLT 屋外平置き試験体の試験体 5 は HY の内部エラーで計測できなかった。

中央計測点の内部含水率は同じ設置条件の試験体によって大きく異なることはなく、ほとんどの試験体が同じように推移していた。しかし、旭川試験体では薬剤処理 CLT 屋外平置き試験体のみ詳細計測を行っていた試験体の内部含水率が他の試験体よりも 5%ほど高くなっており、同じ設置条件でも試験体によって内部含水率に違いが生じていた。これは、表層ラミナのインサイジングの位置等によって違ってしまったのではないかと考えている。

都城試験体では、2020 年 9 月下旬の大雨によって一部の試験体で内部含水率が上昇していたが、それ以外の期間では同じ設置条件で内部含水率に大きな差は生じていない。

材端から 500mm 程度離れた場所の内部含水率は試験体の材料特性によらずほぼ一定になることがわかった。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

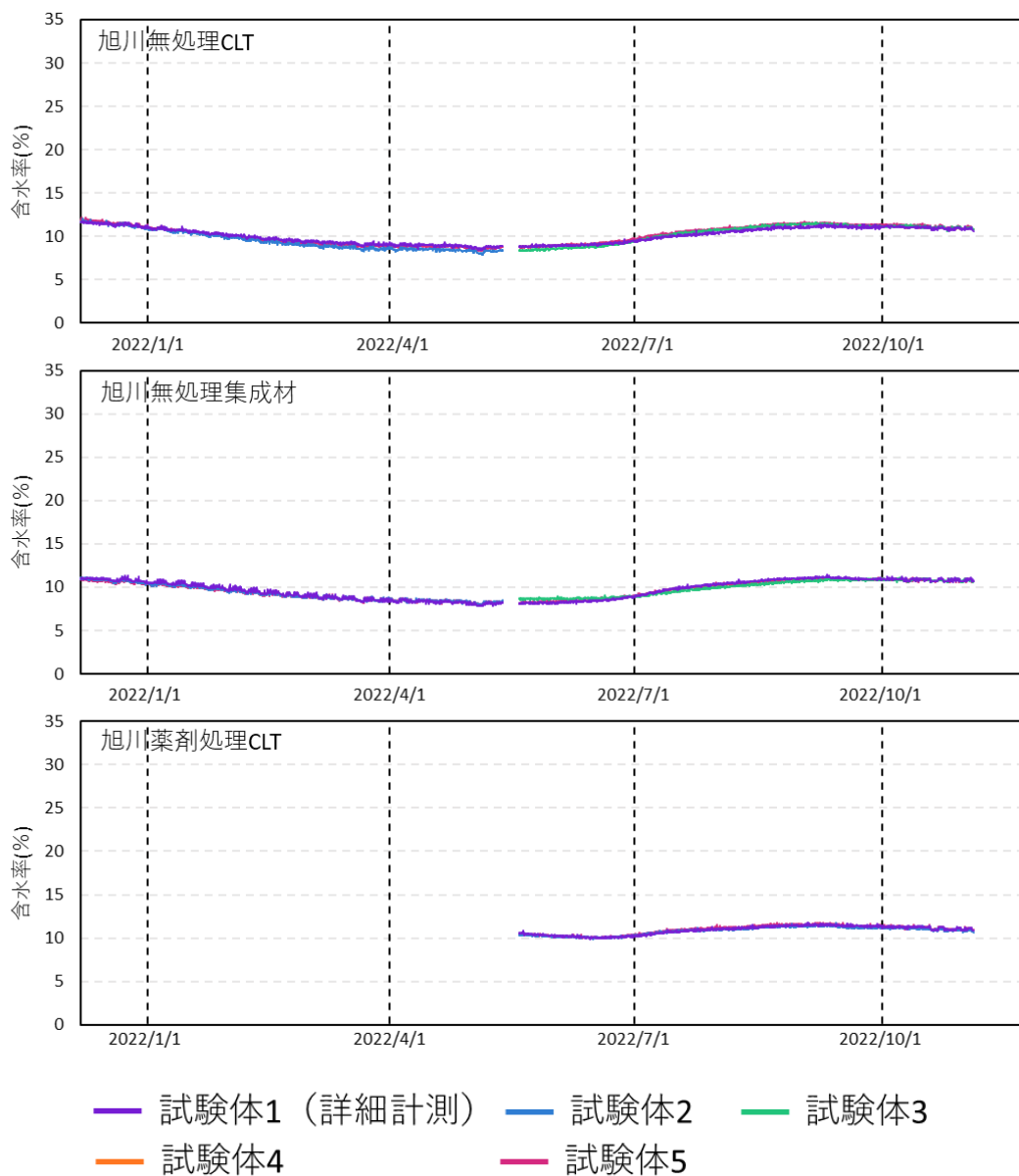


図 3.73 旭川屋内試験体の中央計測点内部含水率

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

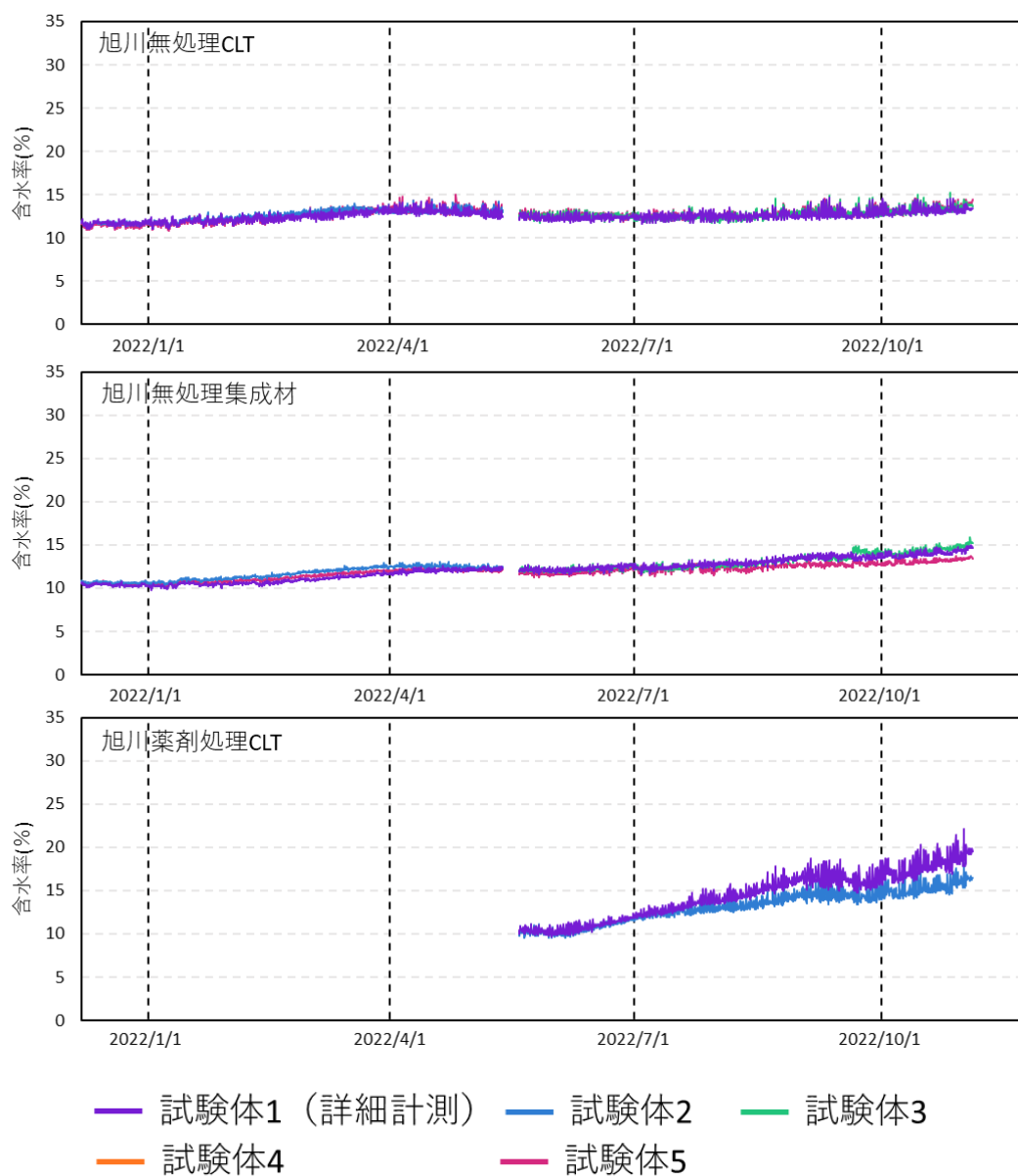


図 3.74 旭川屋外平置き試験体の中央計測点内部含水率

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

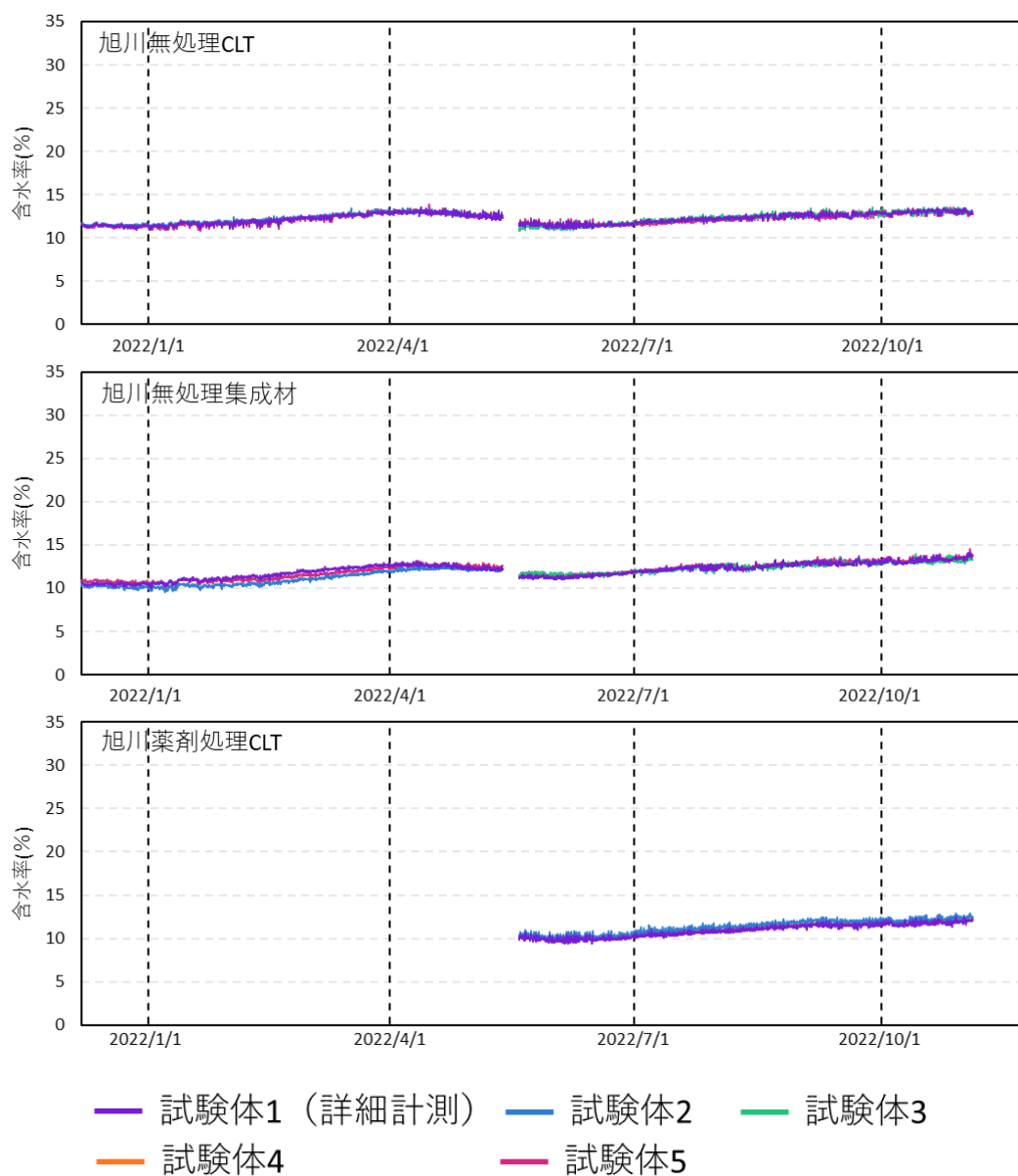


図 3.75 旭川屋根付き平置き試験体の中央計測点内部含水率

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

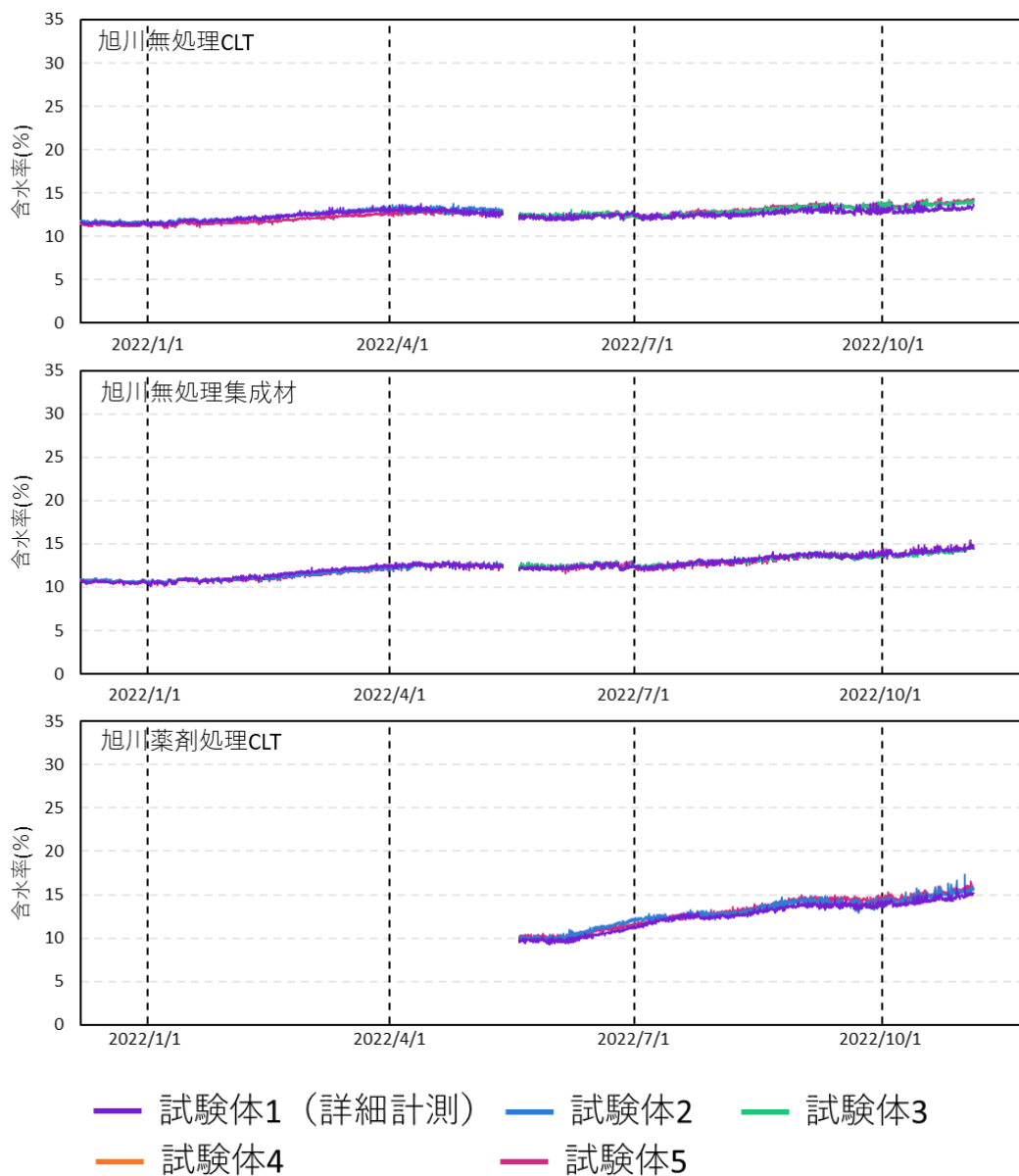


図 3.76 旭川屋外縦置き試験体の中央計測点内部含水率

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

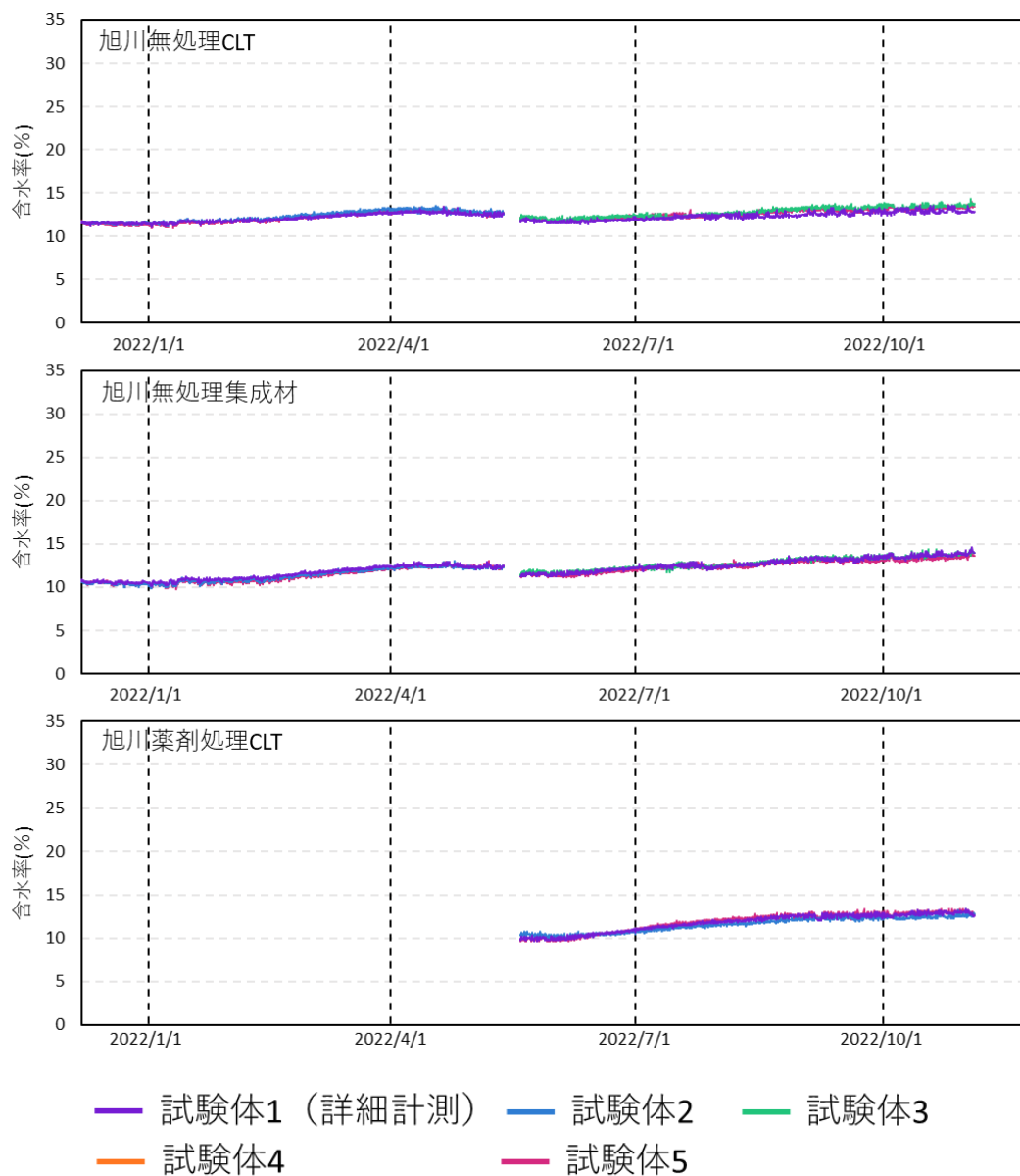


図 3.77 旭川屋根付き縦置き試験体の中央計測点内部含水率

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

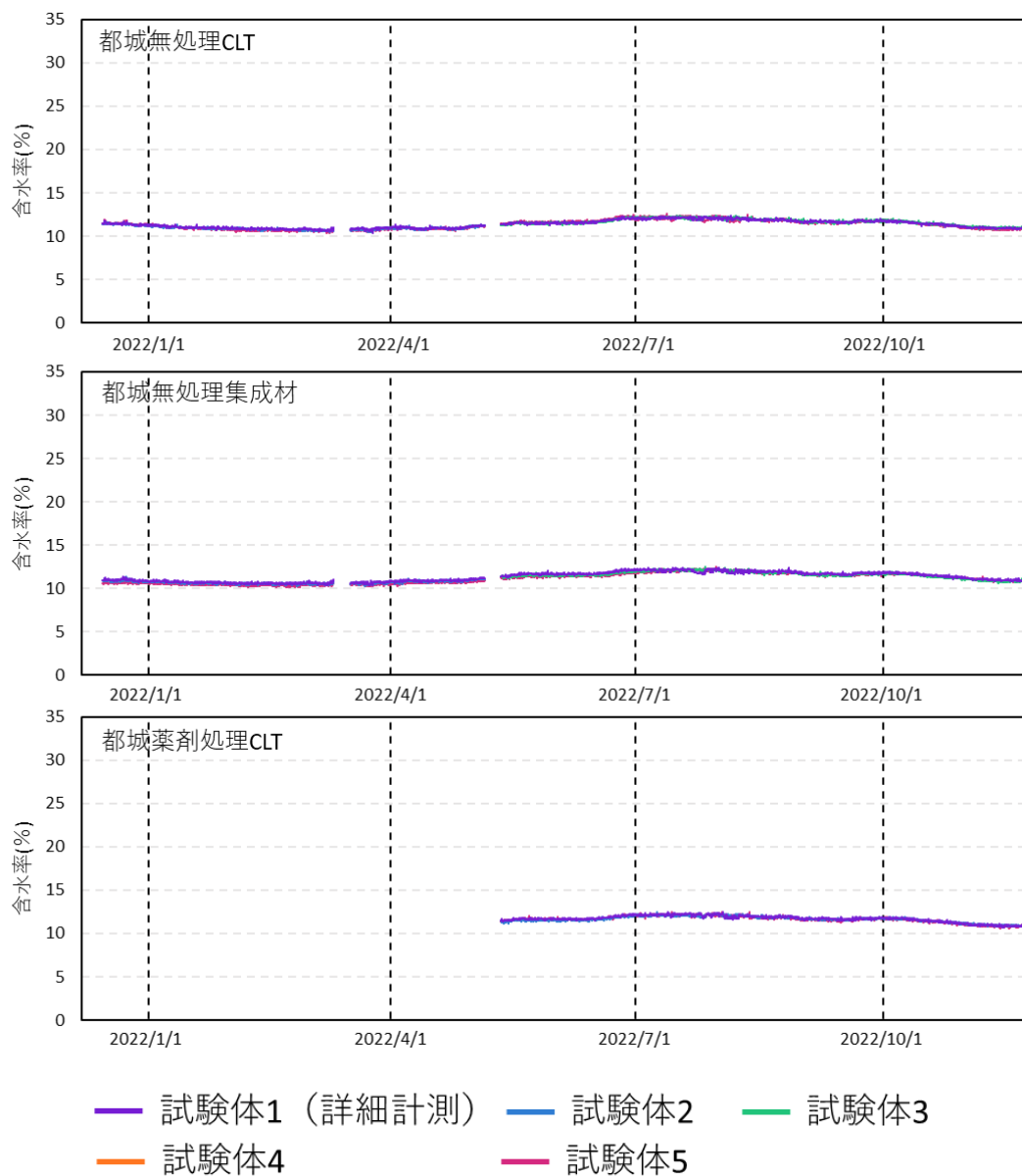


図 3.78 都城屋内試験体の中央計測点内部含水率

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

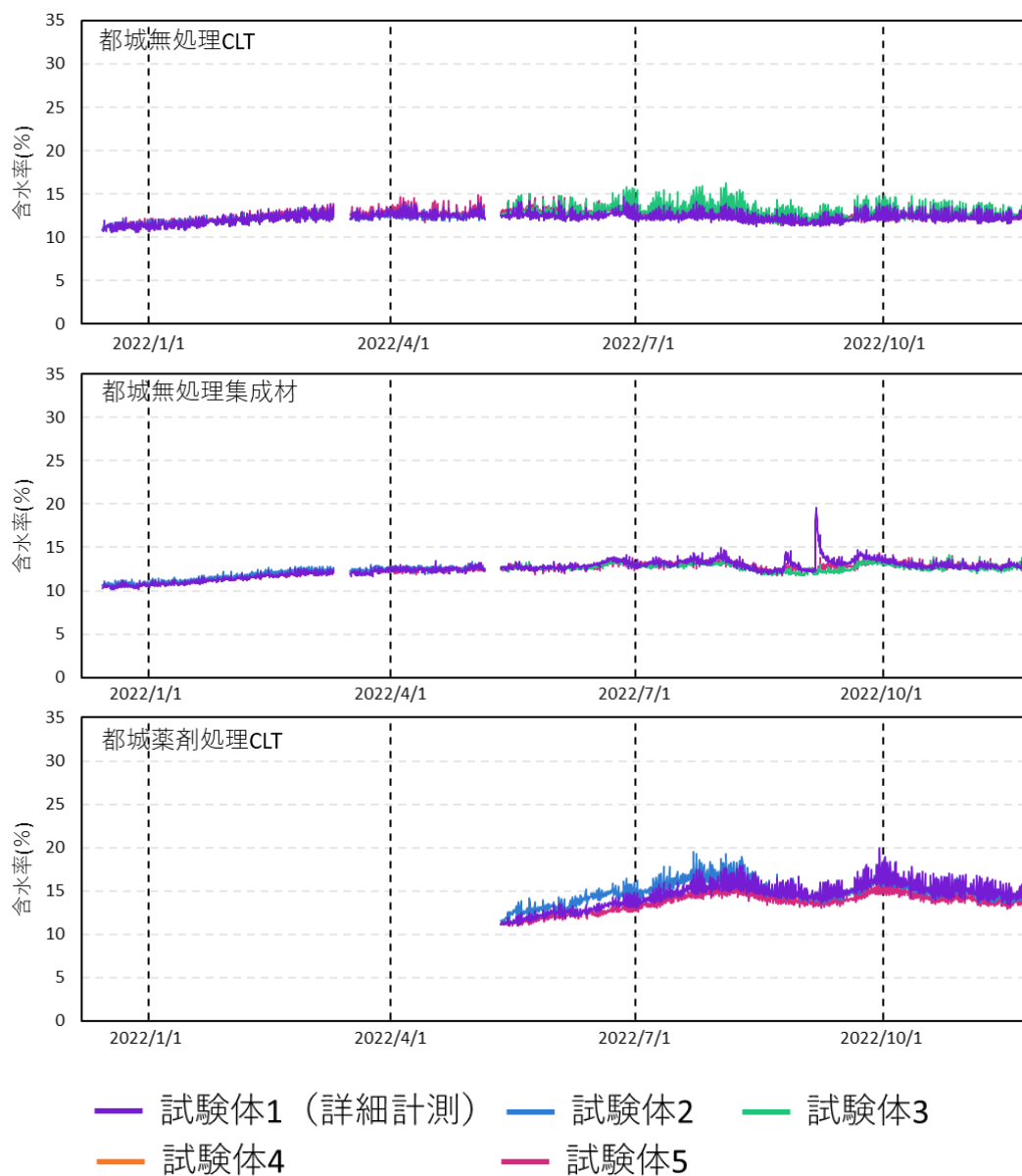


図 3.79 都城屋外平置き試験体の中央計測点内部含水率



### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

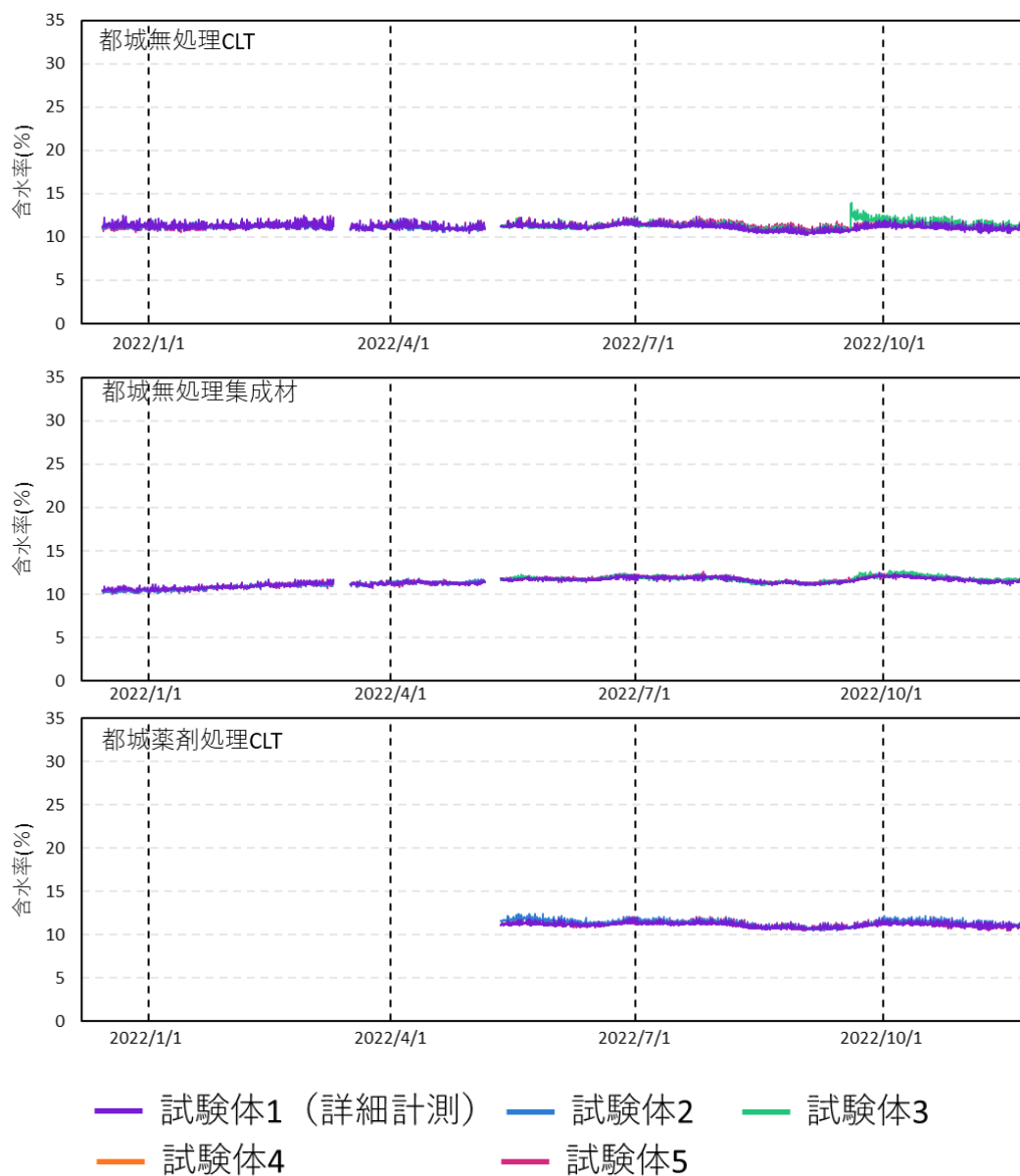


図 3.80 都城屋根付き平置き試験体の中央計測点内部含水率

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

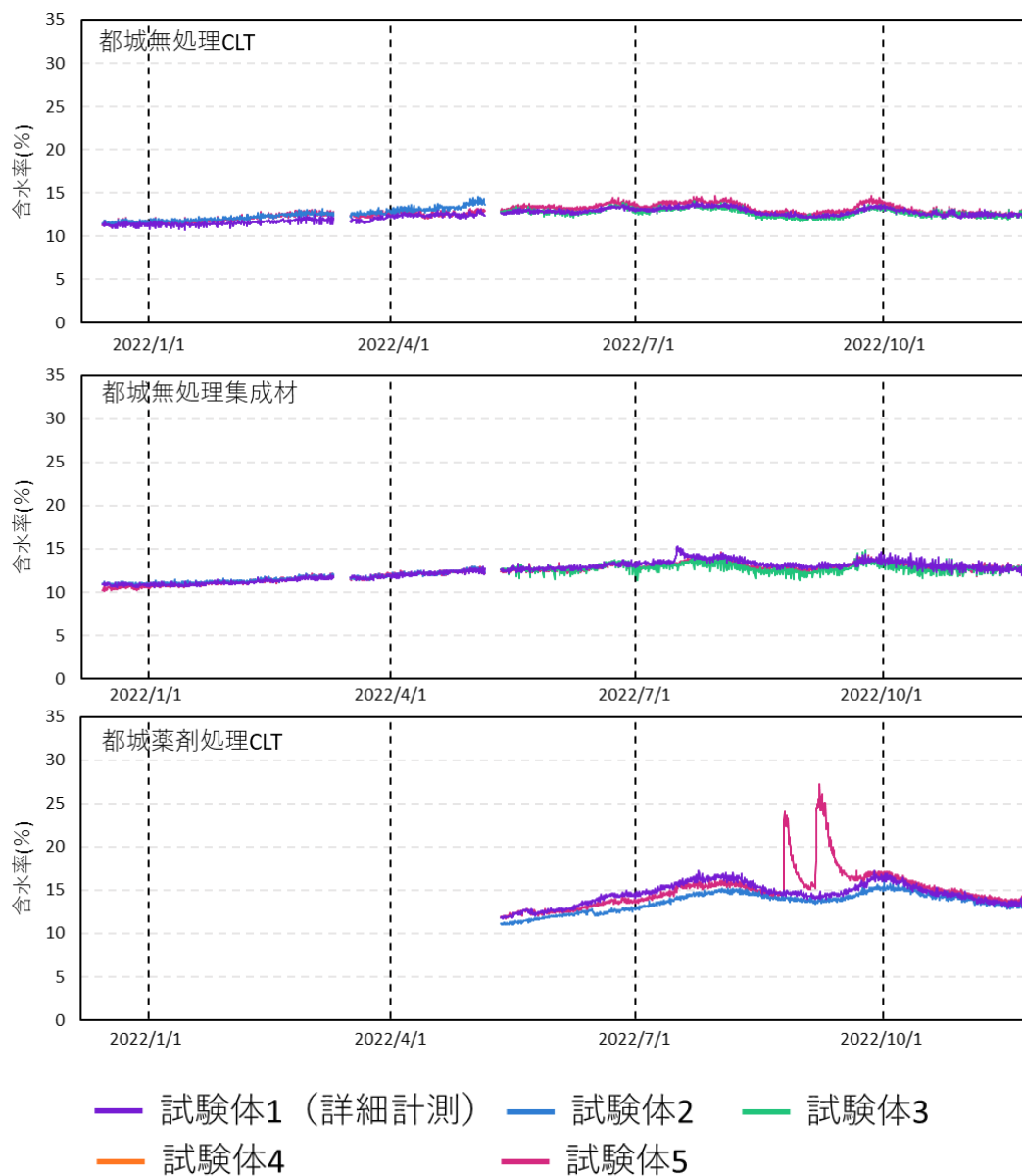


図 3.81 都城屋外縦置き試験体の中央計測点内部含水率

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

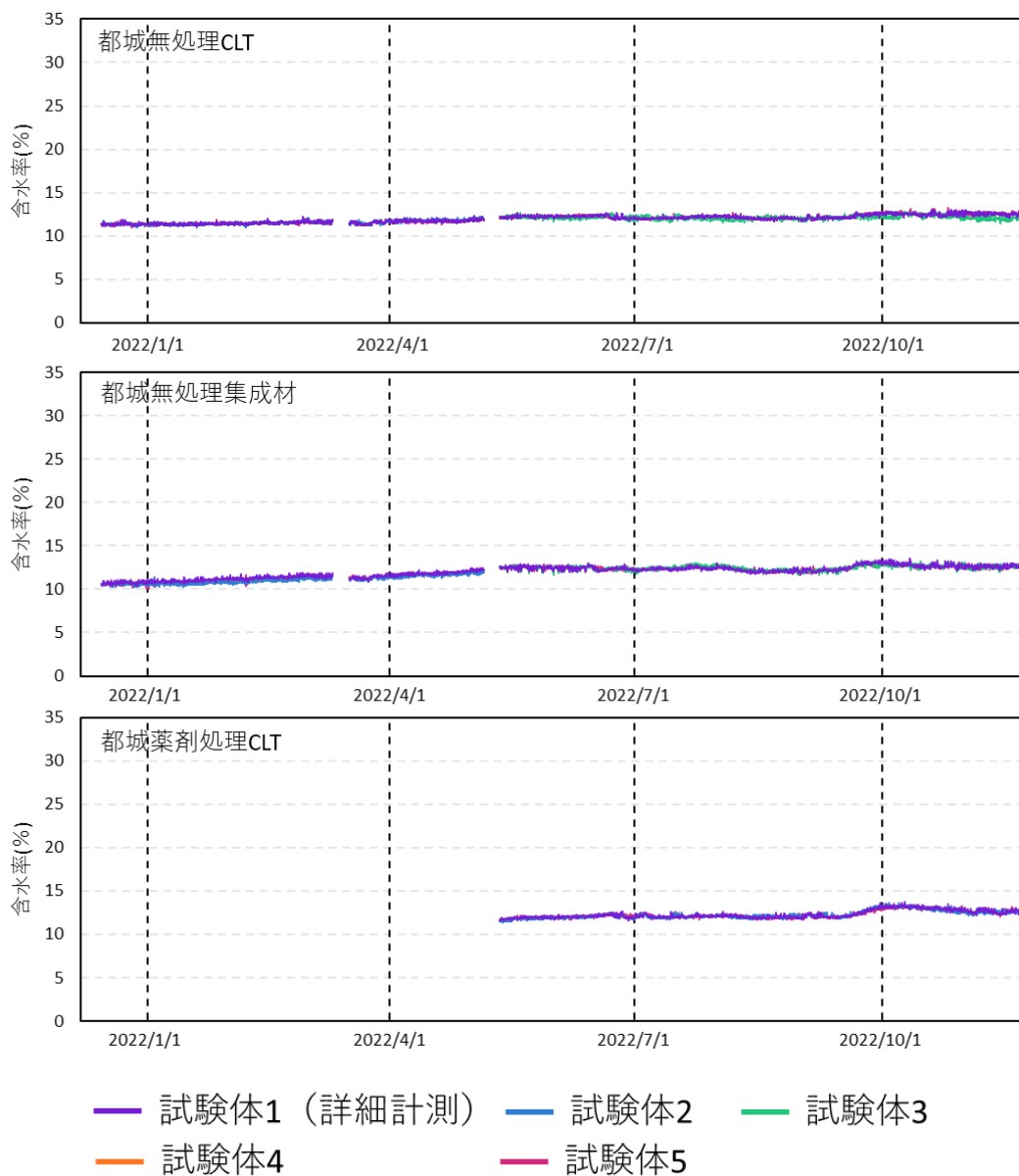


図 3.82 都城屋根付き縦置き試験体の中央計測点内部含水率

#### 3.2.11. 設置条件ごとの材端計測点含水率の推移

図 3.85 に旭川試験体の設置条件ごとの材端から 80mm 計測点内部含水率を、図 3.86 に都城試験体の内部含水率を示す。また図 3.87 に旭川試験体の設置条件ごとの材端から 30mm 計測点内部含水率を、図 3.88 に都城試験体の内部含水率を示す。なお、縦置きの場合、変動の大きい上部材端の計測点を示しており、グラフの材端から 80mm 計測点は図 3.83 に、材端から 30mm 計測点は図 3.84 に示す。

材端から 30mm、80mm 計測点のどちらも屋外平置き、屋外縦置き試験体の変動が大きく、屋根付き平置き、屋根付き縦置きの変動は比較的小さかった。材端から 30mm 計測点でも屋根付き平置き、屋根付き縦置き試験体は腐朽が発生するような 25%以上の含水率にならず、都城の大雨で一時的に 25%を超えた場合も 3 日後には上昇前の含水率まで低下している。このことより屋外で CLT や集成材を使用する場合は、直接雨水が当たらないような設置方法であれば、暴露 1 年では材端付近でも腐朽が発生するような含水率状態になりにくいことがわかった。

薬剤処理の有無による含水率変動の違いに関しては、旭川試験体の無処理試験体は冬季の間に木端面の割れなどが生じたことで材端含水率変動が大きくなってしまった影響により無処理試験体と薬剤処理試験体との間に明確な差はなかった。一方、都城試験体では、屋外平置き、屋外縦置き試験体において材端から 30mm、80mm どちらの計測点も薬剤処理 CLT の含水率変動が最も大きく、また高含水率状態が長期間続いていた。中央計測点の比較でも述べたように、インサイジングによってより多くの水分が木材内に流入しており、インサイジングを伴う薬剤処理は内部含水率的には不利に働いてしまうことがわかった。この含水率状態でどの程度の期間腐朽を抑制することができるのかが、今後の検討項目であると考えられる。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

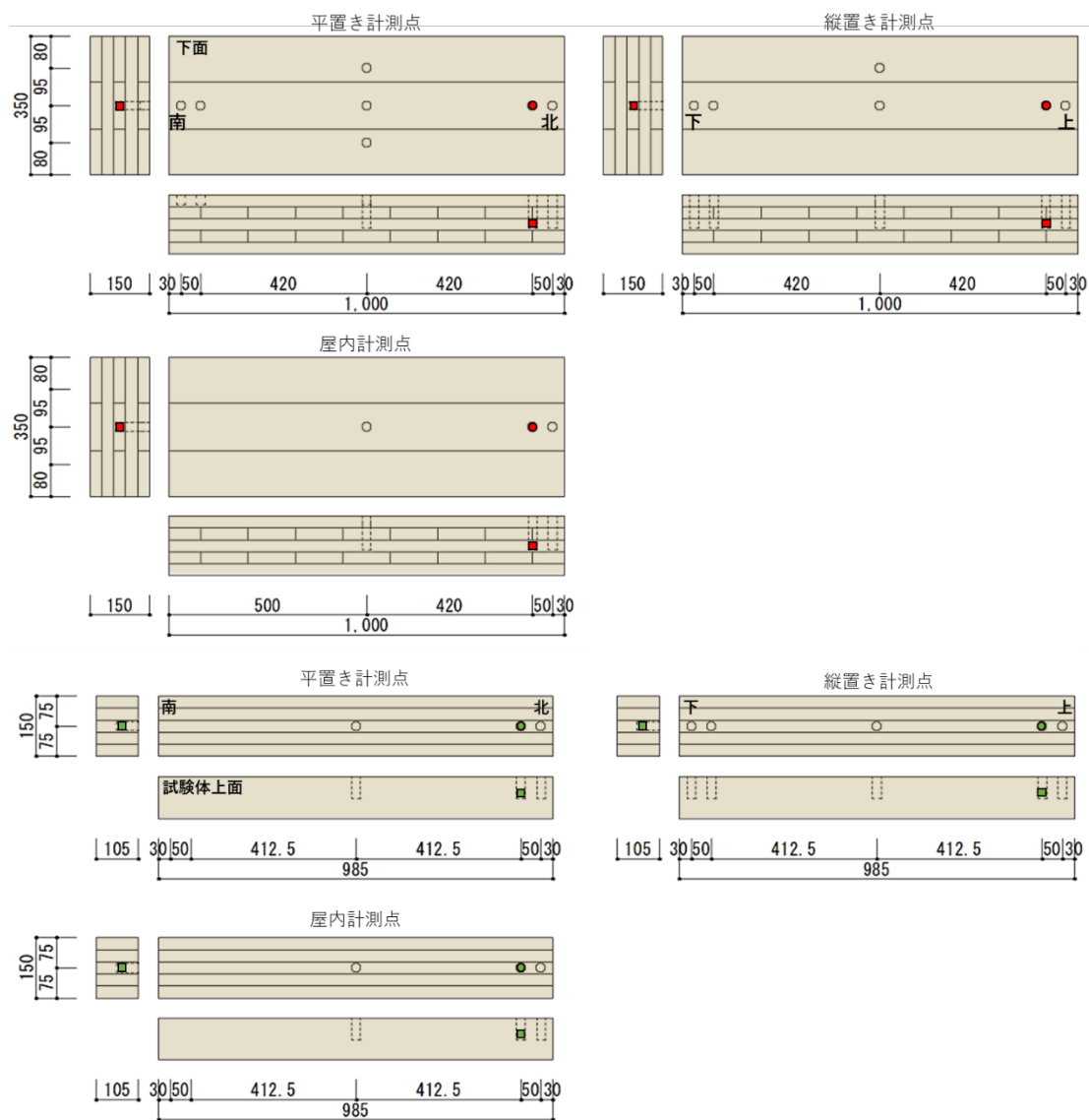


図 3.83 各設置条件の材端から 80mm 計測点

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

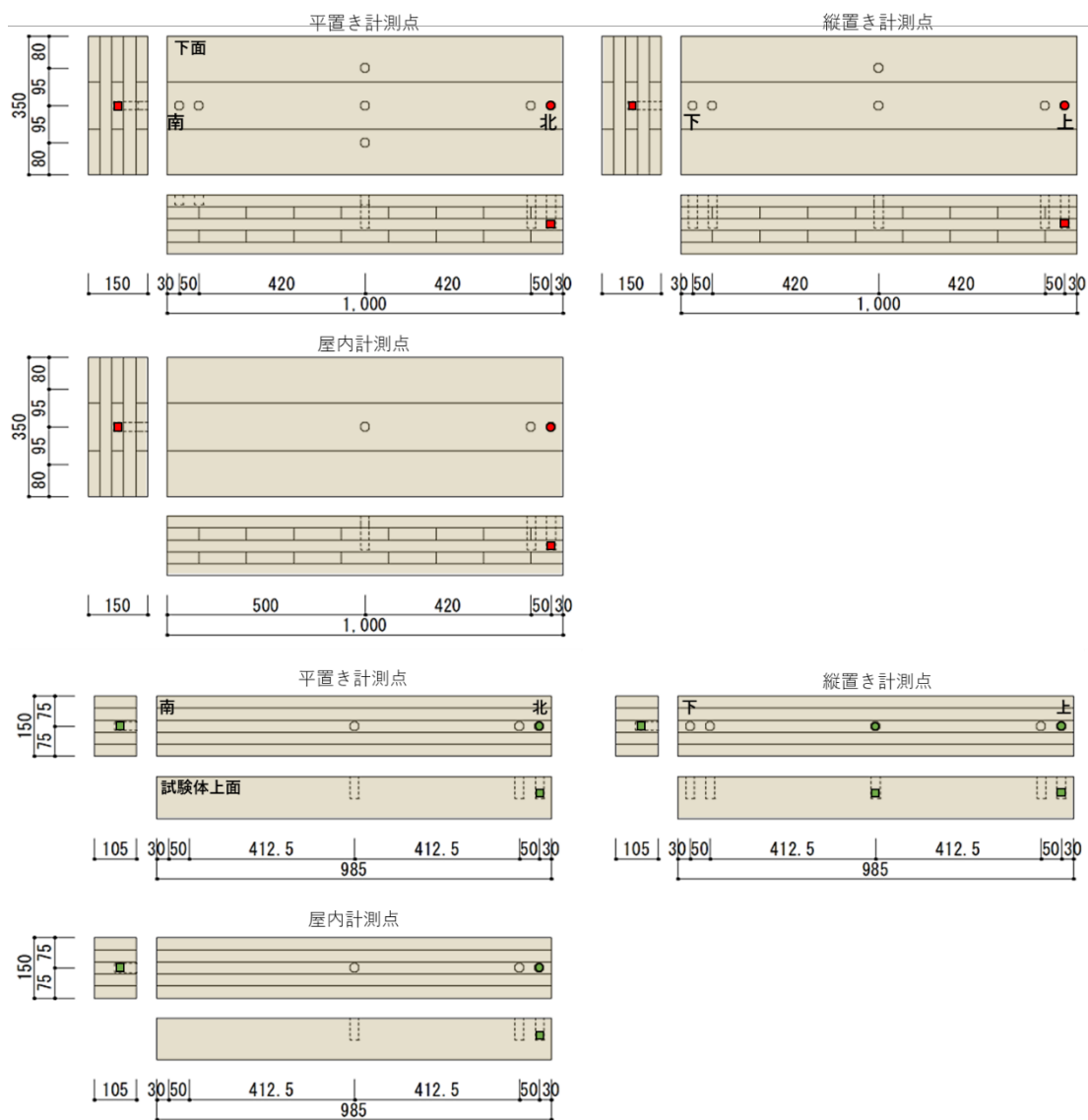


図 3.84 各設置条件の材端から 30mm 計測点

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

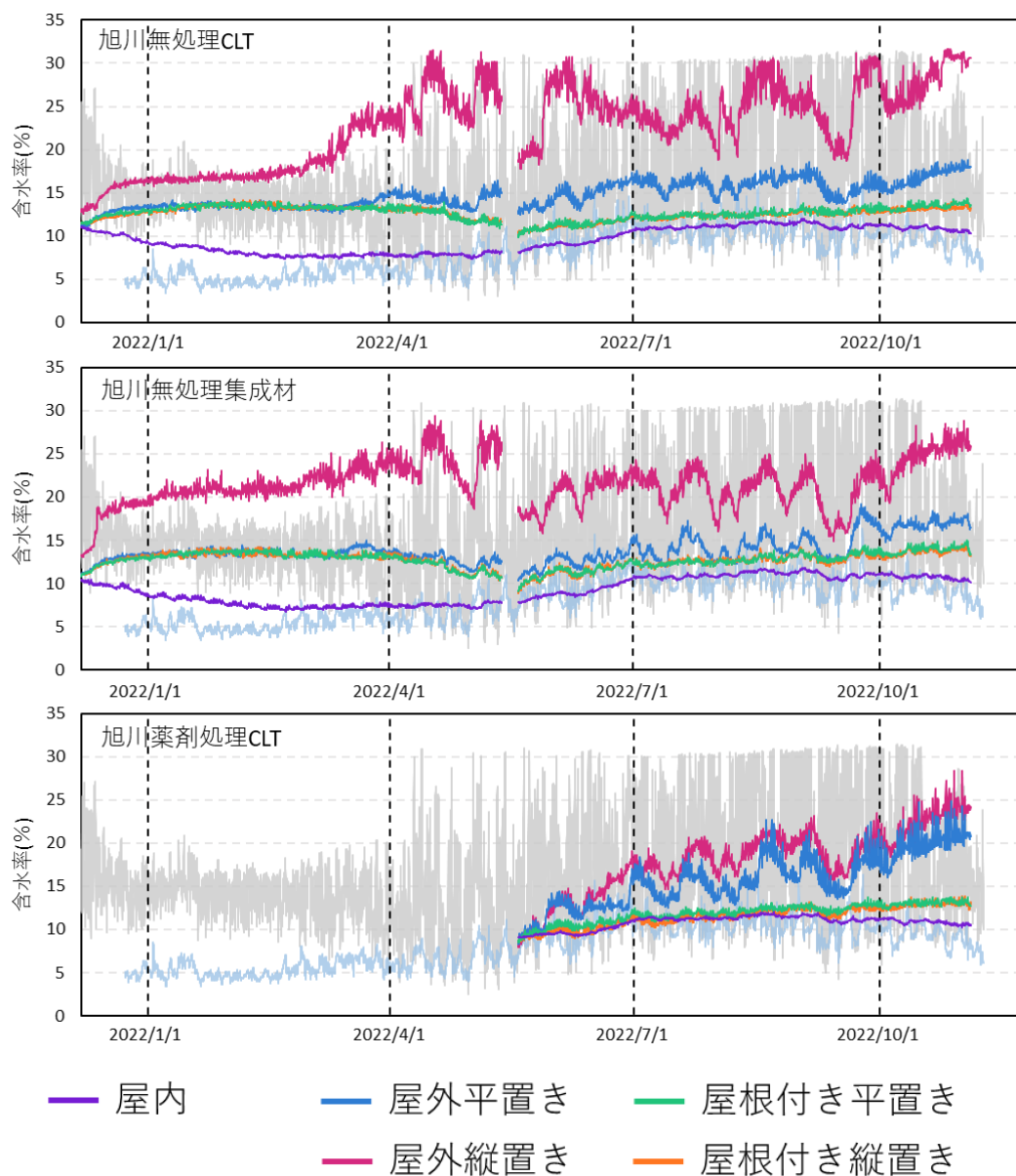


図 3.85 旭川試験体の材端から 80mm 計測点内部含水率

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

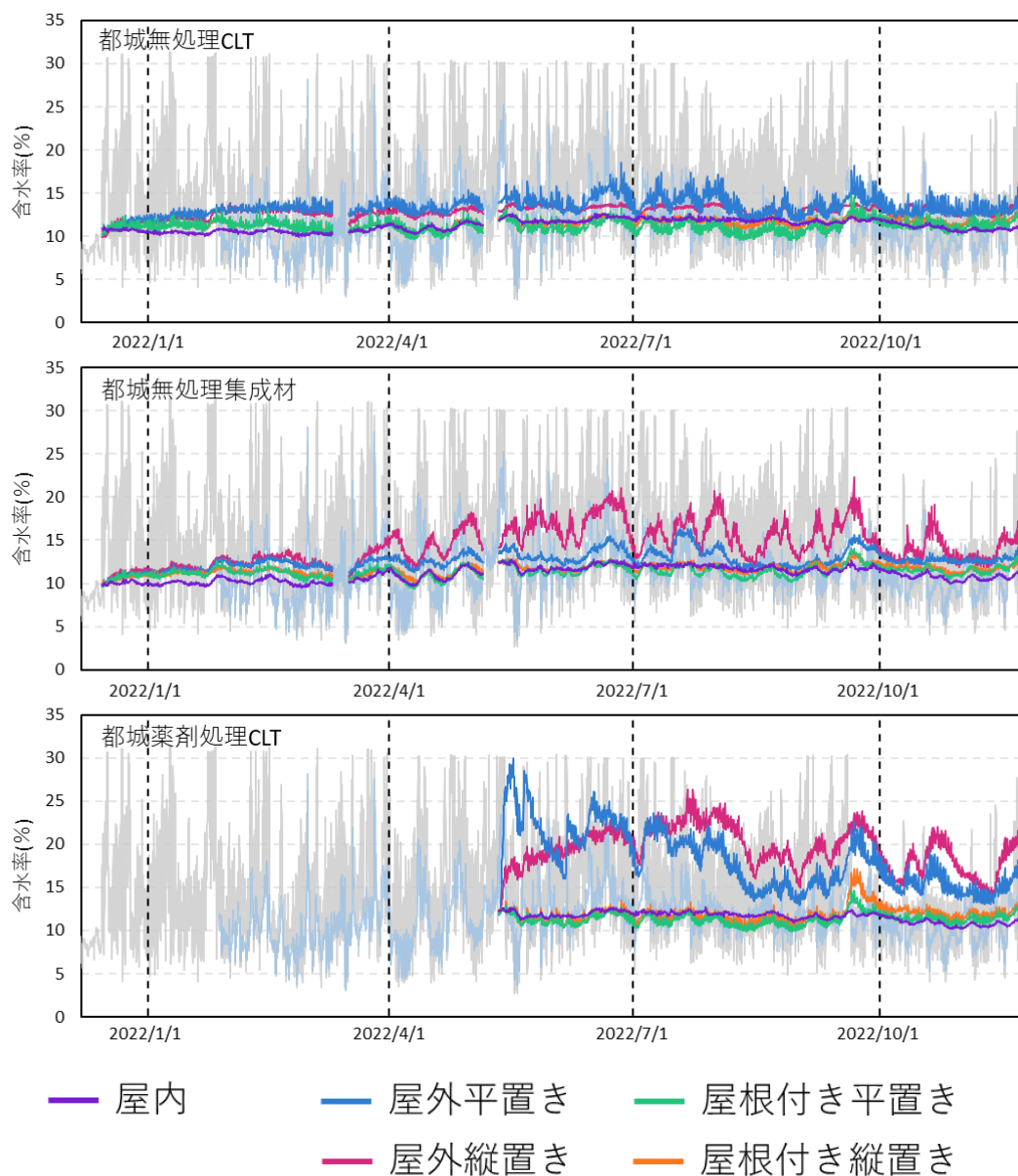


図 3.86 都城試験体の材端から 80mm 計測点内部含水率



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

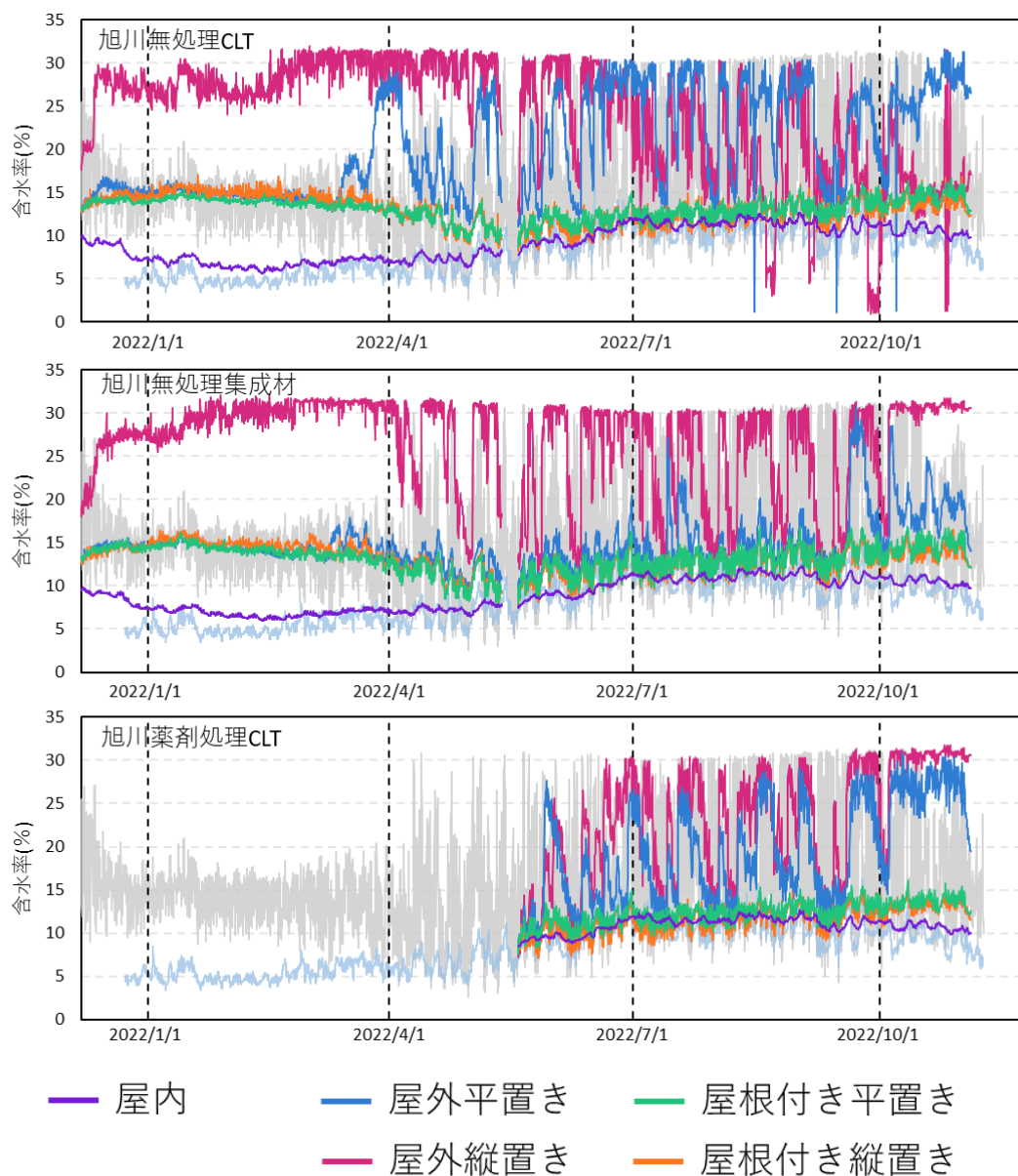


図 3.87 旭川試験体の材端から 30mm 計測点内部含水率

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

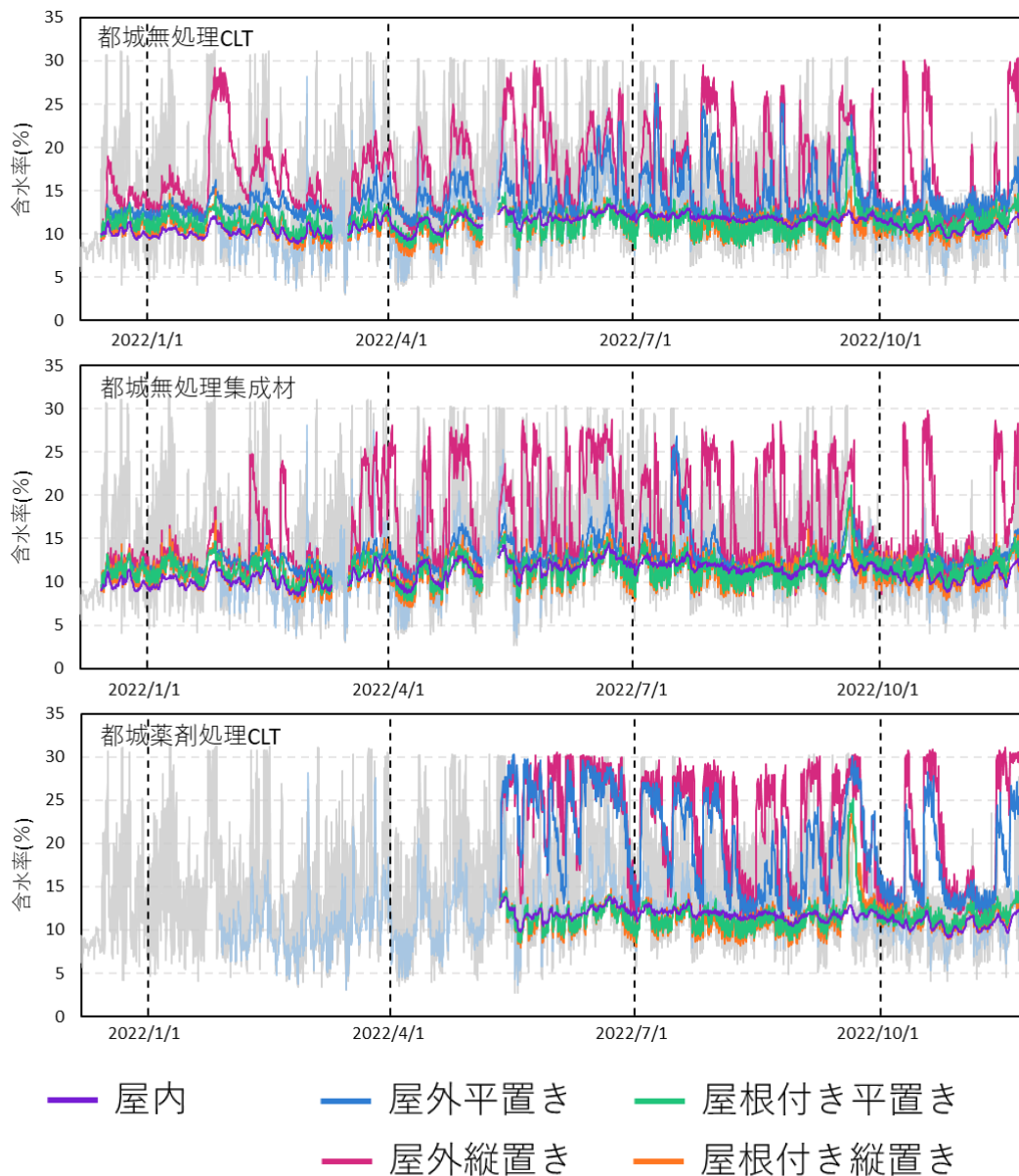


図 3.88 都城試験体の材端から 30mm 計測点内部含水率

#### 3.2.12. まとめ

無処理 CLT、無処理集成材、薬剤処理（深浸潤処理）を施した CLT の 3 種類の材料に関して、異なる設置条件で暴露し、その内部温湿度と含水率を計測した。

その結果全ての設置条件で、材端（計測している層のラミナの木口）からの距離によって含水率変動の大きさが異なり、材端からの距離が遠いほど含水率変動が小さくなることがわかった。特に材端からの距離が 500mm 離れた中央計測点では、薬剤処理 CLT を除いて季節や降水量、降雪量に関係なく含水率変動が小さく、設置条件によって若干の差が生じるものの 10～15%の間を推移することがわかった。

また屋根付き試験体では、屋根なしの試験体よりも含水率変動が大幅に小さく、材端から 30mm の計測点であっても 25%を超えるような含水率は極端な大雨の日を除き計測されなかった。このことより屋外使用時に直接雨水が材料にかからないような設置方法であれば、木口付近であっても 1 年間の暴露で腐朽が懸念されるような高含水率状態になりにくいことがわかった。

試験地による含水率変動の違いも見られた。都城では季節に関係なく、降雨によって内部含水率の上昇が起こっていたが、旭川の冬季は、降雪により屋外縦置き上部の計測点を除いてほとんどの計測点で含水率変動が小さくなっていた。また旭川屋内試験体は、冬季の暖房の使用により外部環境が乾燥状態にあったため、内部含水率も材端付近で 5.9%、中央でも 8.6%まで低下していたことがわかった。

薬剤処理 CLT に関しては、冬季の割れによる無処理計測点の影響が少なかった都城試験体と比較すると、材端計測点と中央計測点のどちらも薬剤処理 CLT の変動の方が大きいことがわかった。これはインサイジング処理によって無処理よりも多く水分流入が起こるためと考えられ、インサイジング処理を伴う薬剤処理は含水率的には不利に働くことが判明した。今後、この含水率状態で腐朽の発生を抑制できるかが検討項目である。

### 3.3. 東広島での屋外暴露実験

#### 3.3.1. 計測の目的

東広島で実施している屋外暴露実験では、インサイジングがある無処理のスギ CLT、インサイジングがある無処理のカラマツ CLT、薬剤処理（深浸潤処理）を4面施したスギ CLT、薬剤処理（深浸潤処理）を6面施したスギ CLT の4種類の材料に関して、2章で検討した温湿度センサを用いた内部含水率計測方法で暴露中の含水率を計測している。またインサイジングがある無処理のスギ CLT とインサイジングがある無処理のカラマツ CLT に関しては、屋内と屋外平置きの2条件で暴露をしている。それ以外の種類の試験体は屋外平置きのみ暴露している。

この結果から、暴露の条件（薬剤処理の処理面数、屋内外、樹種）と内部含水率変動との関係を得ることを目的としている。さらにインサイジングがある無処理のスギ CLT、インサイジングがある無処理のカラマツ CLT、薬剤処理（深浸潤処理）を4面施したスギ CLT の3種類では、含水率の計測を試験体の材端から 30, 80, 500mm 離れた3点ですること、材内部の繊維方向の含水率分布が外部環境によってどのように影響を受けるのかを明らかにする。

本節では、暴露実験の概要とその結果を報告する。

3.3.2. 試験体概要

表 3.7 に試験体の概要を示す。試験体は 150×900×1000mm（厚さ×幅×長さ）の 5 層 5 プライ CLT のパネルから 150×290×1000mm に切り出した。各材面の薬剤処理の有無による含水率変動の違いを計測するため、無処理試験体に加え、4 面薬剤処理と 6 面薬剤処理試験体を暴露した。図 3.89 にそれぞれの試験体の薬剤処理面を示す。

試験体を切り出した CLT パネルは全て宮内ら<sup>3-9)</sup>の実験で使用されている試験体の一部で、実験（2019 年度）後に屋外の屋根のある場所で保管されていた。図 3.90 に無処理 CLT パネルの詳細と木取りを、図 3.91 に薬剤処理 CLT パネルの詳細と木取りを示す。無処理、薬剤処理どちらのパネルも、最外層に用いるラミナの板目面の内、CLT の外側に現れる面にインサイジング処理を施したラミナで CLT を製造している。切り出す前の CLT パネルの薬剤処理は、浸漬処理である。またパネルから試験体を切り出した後、CLT 側面の薬剤処理の有無による比較をするため、6 面処理試験体は別途薬剤の塗布をおこなった。この際、CLT 側面のインサイジングはしていない。ラミナのインサイジングのパターンは図 3.4 中の一般的に使用されているインサイジングパターンとしている。CLT 積層用の接着剤は全ての試験体で水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤（API 接着剤）を用いている。

表 3.7 東広島での屋外暴露実験試験体概要

種類	寸法（厚さ×幅×長さmm）	規格	樹種	接着剤	薬剤処理の有無
CLT	150×290×1000	5-5	スギ	API	無処理（インサイ有）
			カラマツ		
			スギ		深浸潤処理（4面）
					深浸潤処理(6面)

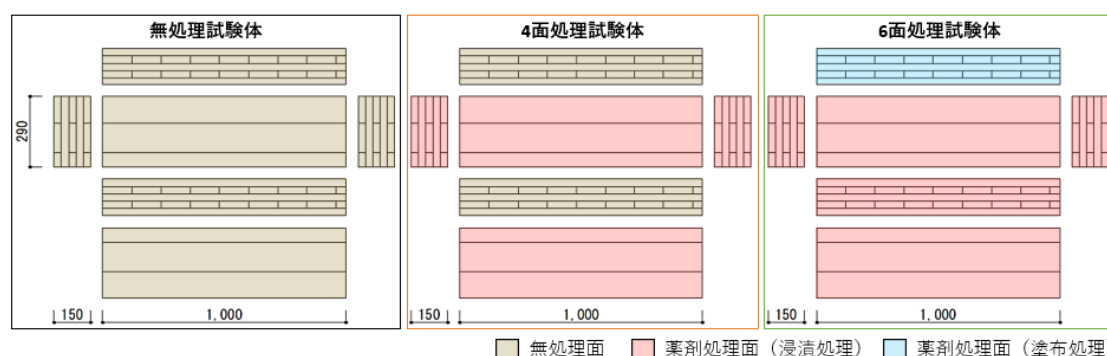


図 3.89 試験体の薬剤処理面

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

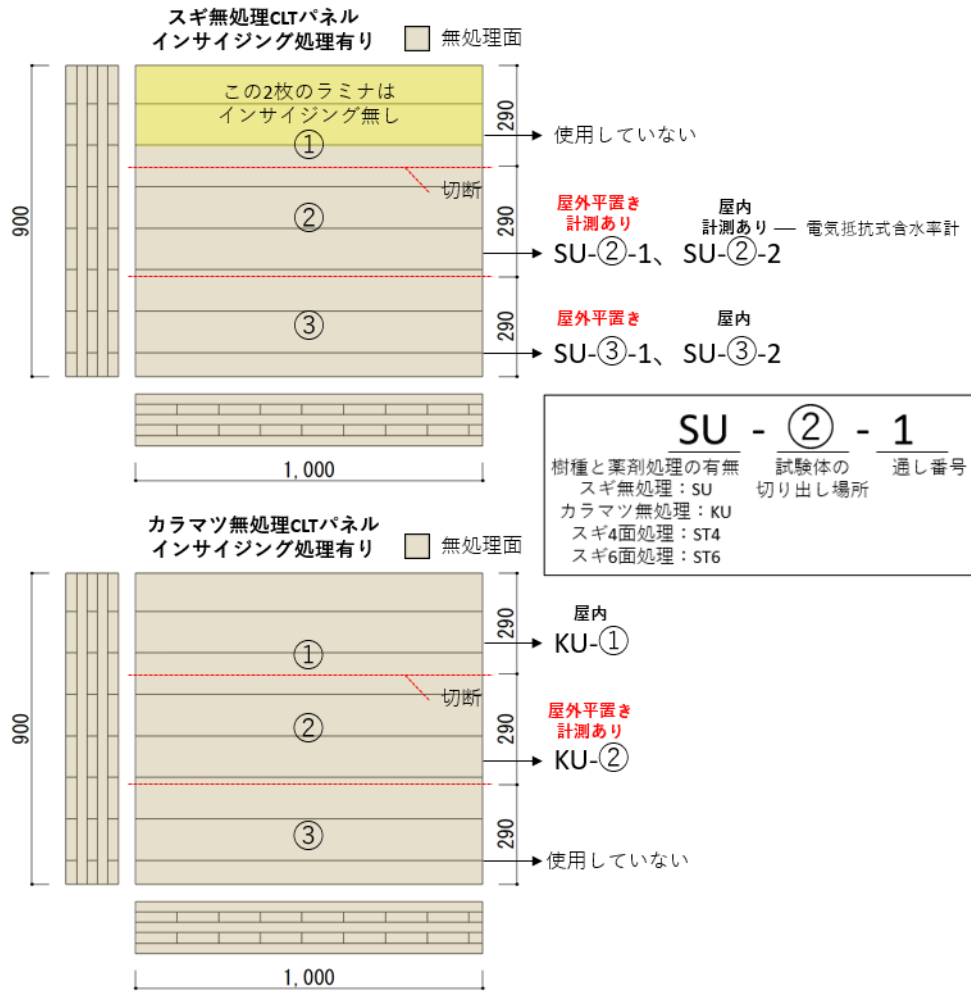


図 3.90 無処理 CLT パネルの詳細と木取り

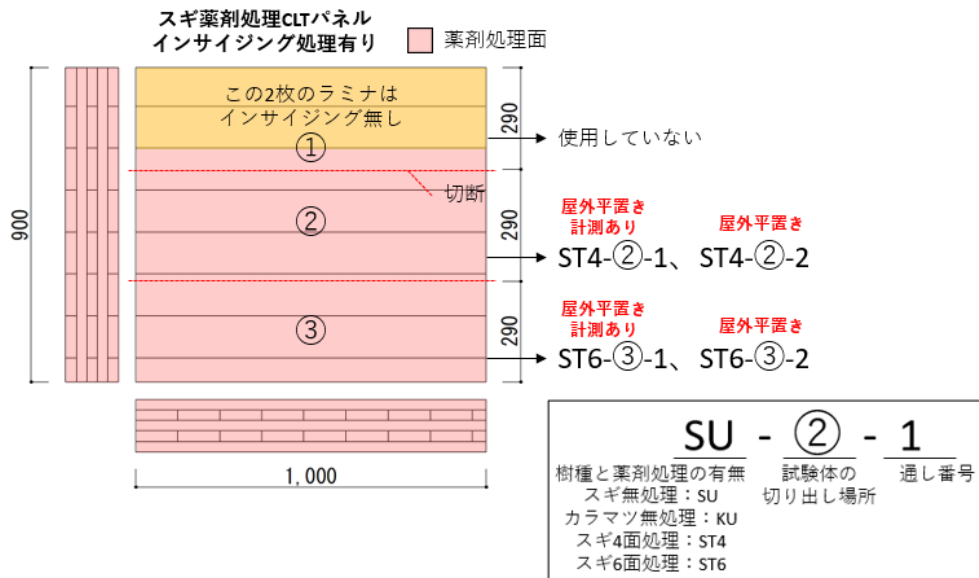


図 3.91 薬剤処理 CLT パネルの詳細と木取り

3.3.3. 暴露概要

写真 3.34 に暴露の様子を示す。試験体は広島県東広島市鏡山 1-4-1 の広島大学 E3 棟前に設置している。広島大学での暴露及び計測開始日は 2022 年 1 月 20 日で、現在約 1 年経過している。各試験体の設置条件は図 3.90 と図 3.91 に示す通りで、スギ無処理試験体は、2 体が屋外平置きで 1 体が屋内、カラマツ無処理試験体は、1 体が屋外平置きで 1 体が屋内、スギ 4 面薬剤処理試験体とスギ 6 面薬剤処理試験体はどちらも 2 体ずつ屋外平置きで設置している。

屋外平置き暴露は全て非接地型としている。E3 棟外の地面の上にコンクリートブロックを置き、その上に PP ロープで試験体を固定している。雨水が試験体の上にとまらにくくするために、コンクリートブロックの高さを変えることで試験体を少し傾斜させている。

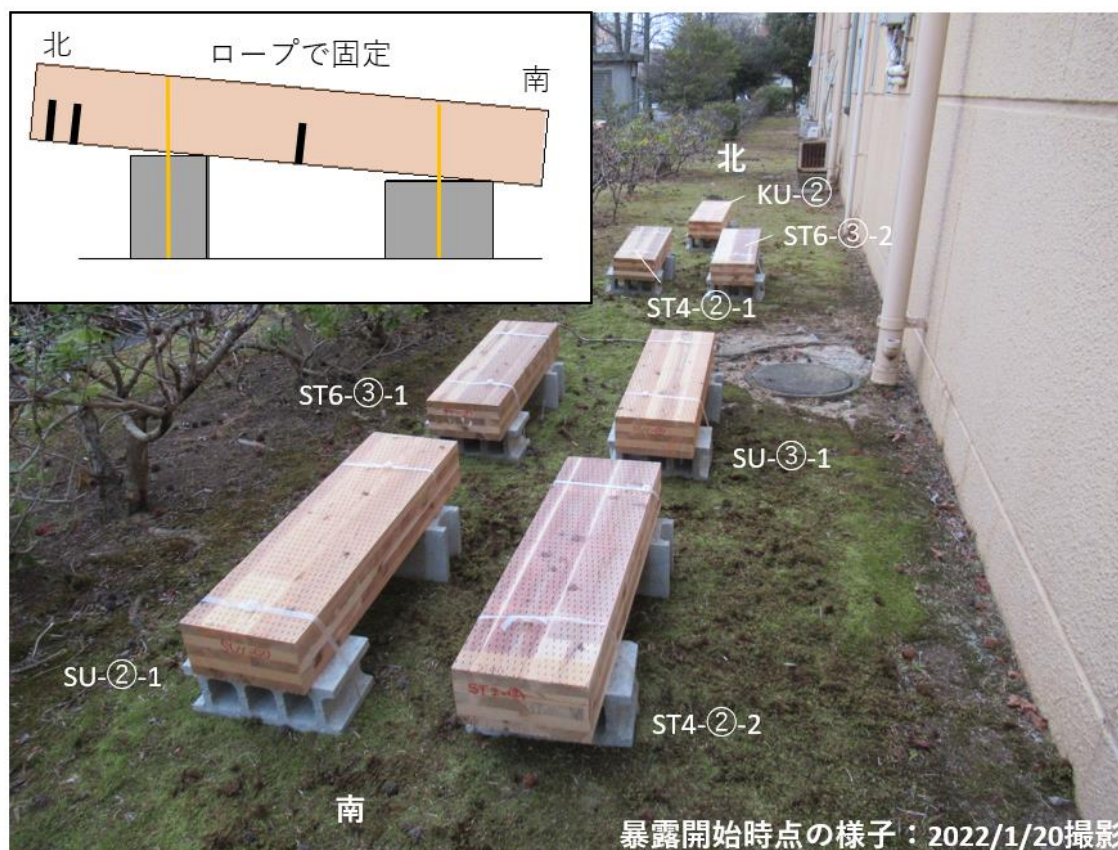


写真 3.34 暴露の様子

3.3.4. 計測概要

図 3.92 に計測点の位置を示す。計測している層は、設置したときに下面になる層を1層目として数える。内部温湿度の計測は図 3.90 と図 3.91 に示すように無処理スギ CLT、無処理カラマツ CLT、4面薬剤処理スギ CLT、6面薬剤処理スギ CLT の屋外平置き試験体でそれぞれ1体ずつおこなっている。温湿度センサは HY を用いて3時間間隔で計測をしている。HY を設置した後、計測穴からの水分流入を防ぐために、計測層以外をウレタンゴム棒と配管用パテ (AP-1000-I) を用いて塞いでいる。また屋内に設置しているスギ無処理 CLT 試験体は1体試験体中央を、電気抵抗式含水率センサ (KNS-GWS: コーナー札幌株式会社) を用いて、1時間間隔で内部含水率の計測をしている。試験体を設置している場所の外部の温湿度は、温湿度センサ (おんどとり: TR-72wb-s) を用いて1時間間隔で計測している。温湿度センサのデータの取り出しは、2022年4月12日、2022年8月1日、2023年1月10日の計3回おこなっている。

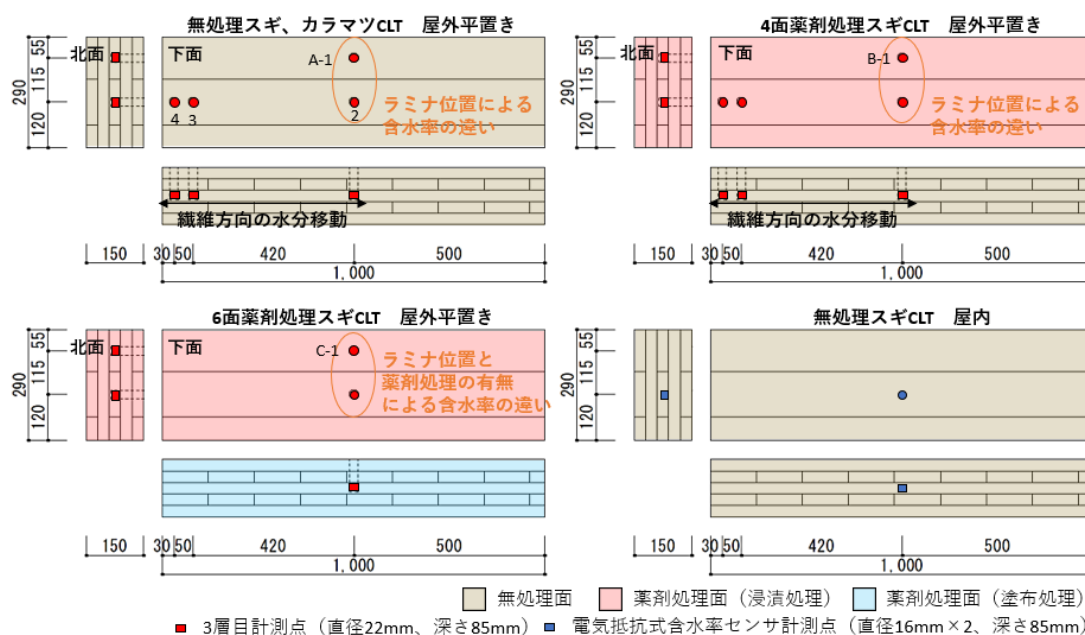


図 3.92 計測点の位置



### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

また、データの取り出しと同じタイミングで試験体各部の寸法（厚さ、幅、長さ）、試験体重量（木材のみの重量）、試験体表面の含水率、試験体各面の割れの計測を実施している。図 3.93 に各計測の計測位置を示す。また、図 3.94 にデータ取り出し時の試験体寸法の推移を、図 3.95 に試験体重量の推移と表面含水率の推移を示す。

#### 【各計測の計測方法】

- ・ 寸法  
長さ、幅：コンベックスで計測（1mm 刻みで読み取り）  
厚さ：ノギスで計測（0.01mm 刻みで読み取り）
- ・ 重量  
50g 刻みの重量計で計測
- ・ 表面含水率  
木材水分計（HM-520：ケット科学研究所）で計測  
スギ：比重スギ（0.34）、厚さ 40mm で計測した  
カラマツ：比重 0.53、厚さ 40mm で計測した

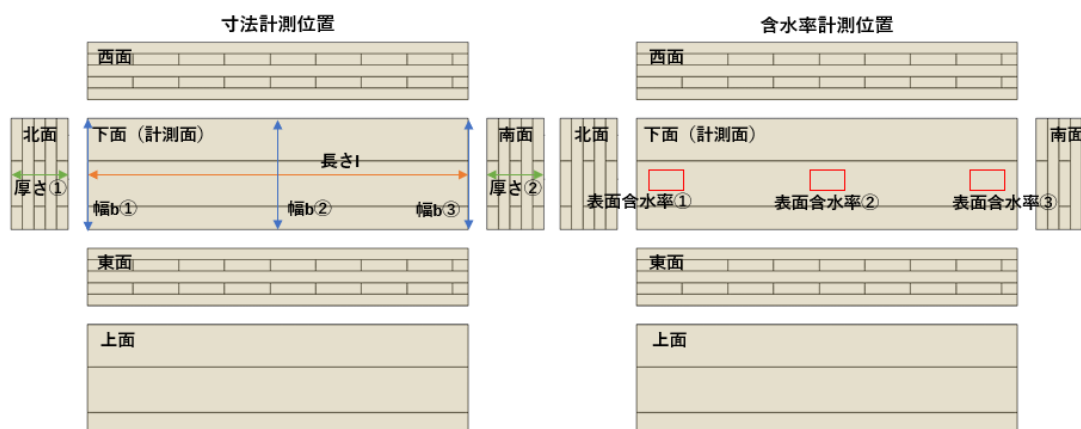


図 3.93 計測位置

長さ、幅、重量は各計測日ではほぼ同様であった。一方、屋外平置き試験体の厚さと表面含水率は暴露の経過とともに上昇していることが確認できた。表面含水率は試験体によってかなりばらつきが大きいことが確認できた。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

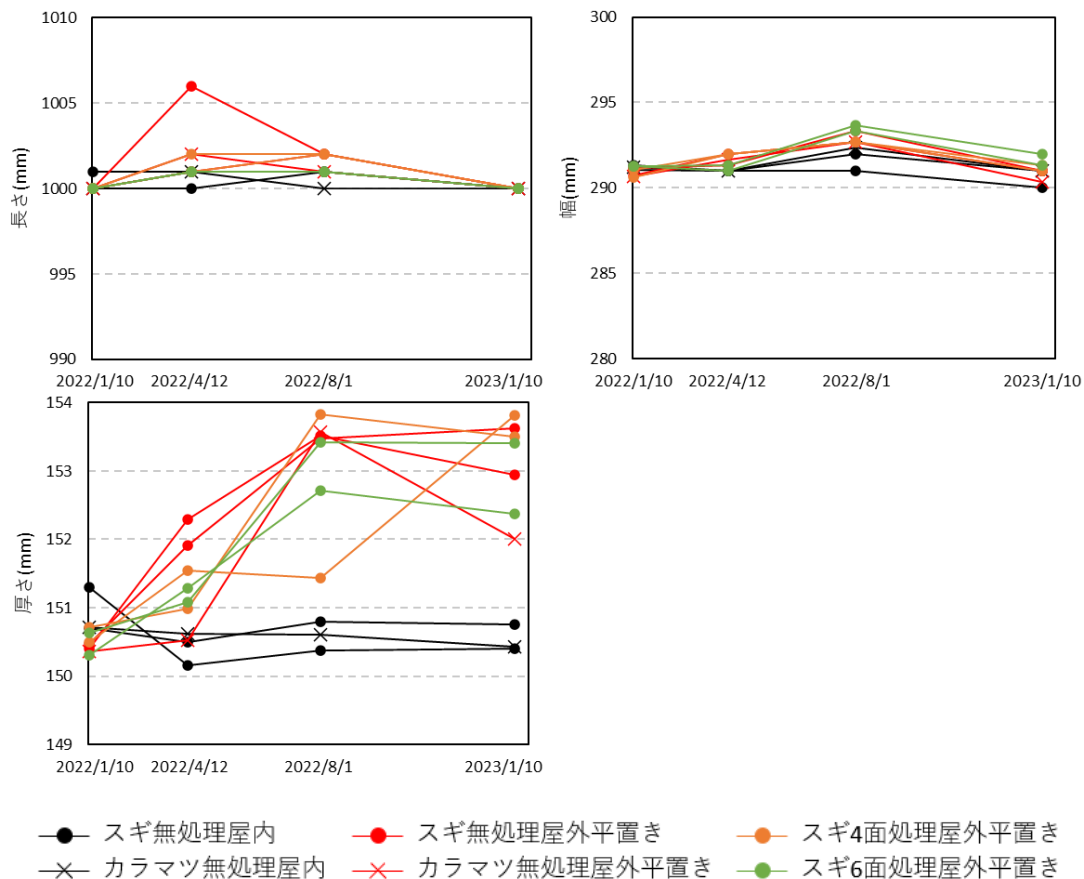


図 3.94 試験体寸法の推移

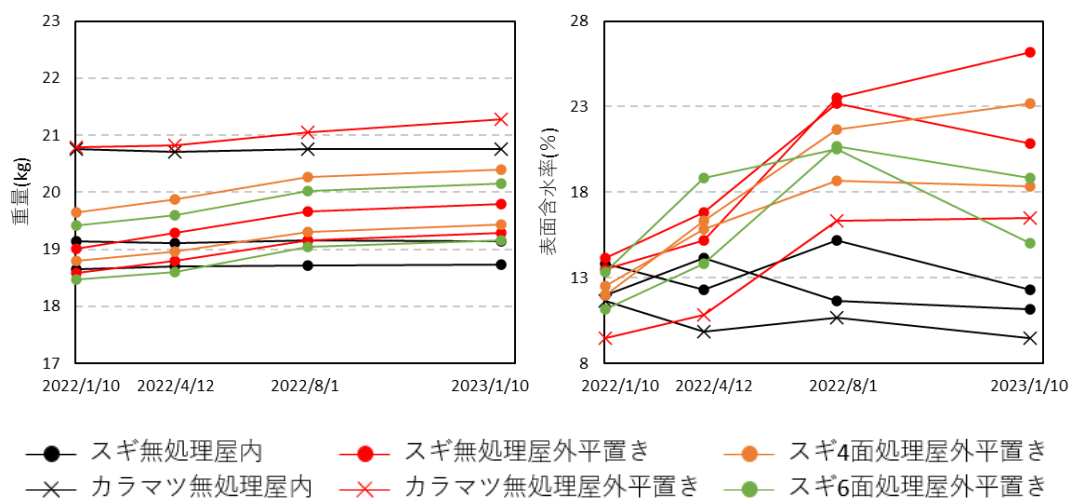


図 3.95 試験体重量と表面含水率の推移

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

#### 3.3.5. 外部環境

表 3.8 に東広島の屋内外の気温と降水量の月別のデータを示す。気温は試験体設置場所で温湿度センサ（おんどとり：TR-72wb-s）を使用して計測した値、降水量は気象庁のデータベース<sup>3-8</sup>から得た値を用いている。なお、屋外の温湿度（おんどとりを用いて計測していた値）は、2022年4月11日から2022年6月16日まで温湿度センサの電池切れで計測できていなかった。

また図 3.96 に屋内外温湿度の日平均値の変動を、図 3.97 に降水量の推移を示す。

東広島での実験では、屋内暴露を行っていた場所に暖房等がついていないため、屋内外で温度、相対湿度ともに大きな違いはない。

表 3.8 東広島の屋内外気温と降水量の月別データ

	年	2022											
	月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
月平均屋内気温	°C	5.26	4.78	11.49	17.65	21.85	25.48	29.53	30.64	26.90	19.72	14.98	7.28
月平均屋外気温	°C	3.05	2.47	9.62	13.66	-	25.14	26.50	27.49	23.83	16.45	12.17	4.15
月の降水量合計	mm	15.50	19.00	108.50	145.00	44.50	92.50	239.00	141.00	222.50	33.50	43.00	19.00
1時間降水量の最大	mm	1.50	2.50	7.50	15.50	8.50	8.50	31.50	34.00	44.50	8.50	7.00	5.50

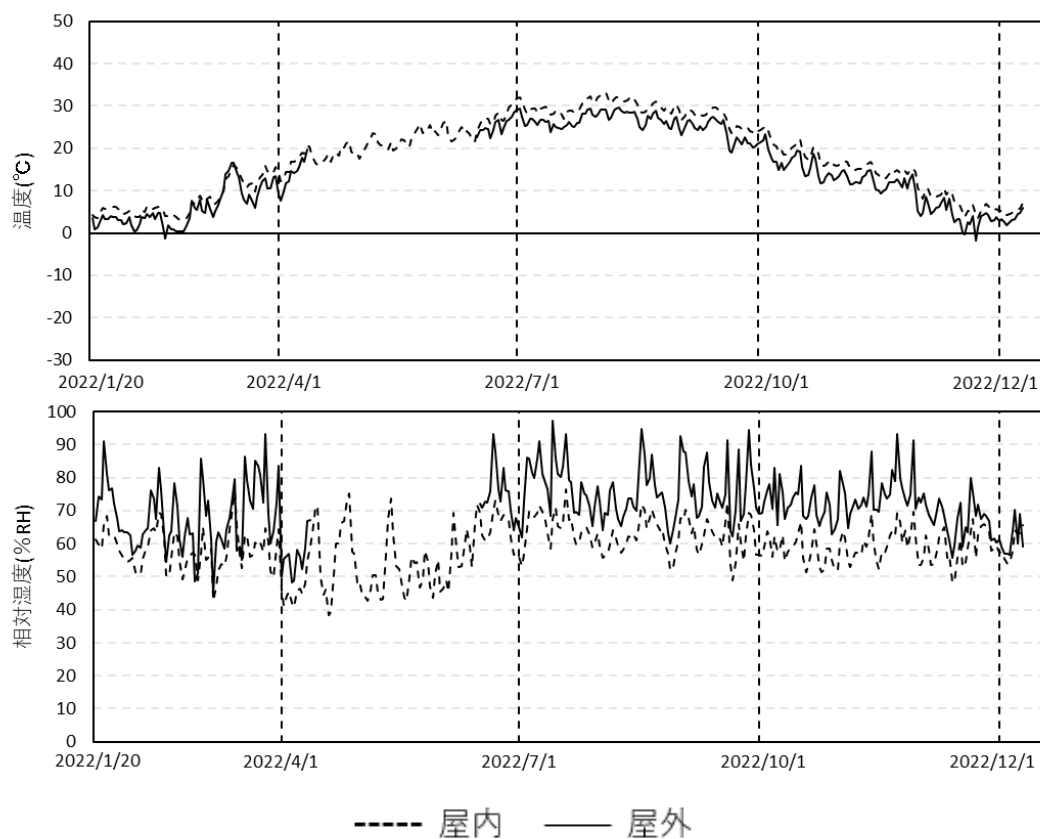


図 3.96 屋内外温湿度日平均値の推移

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

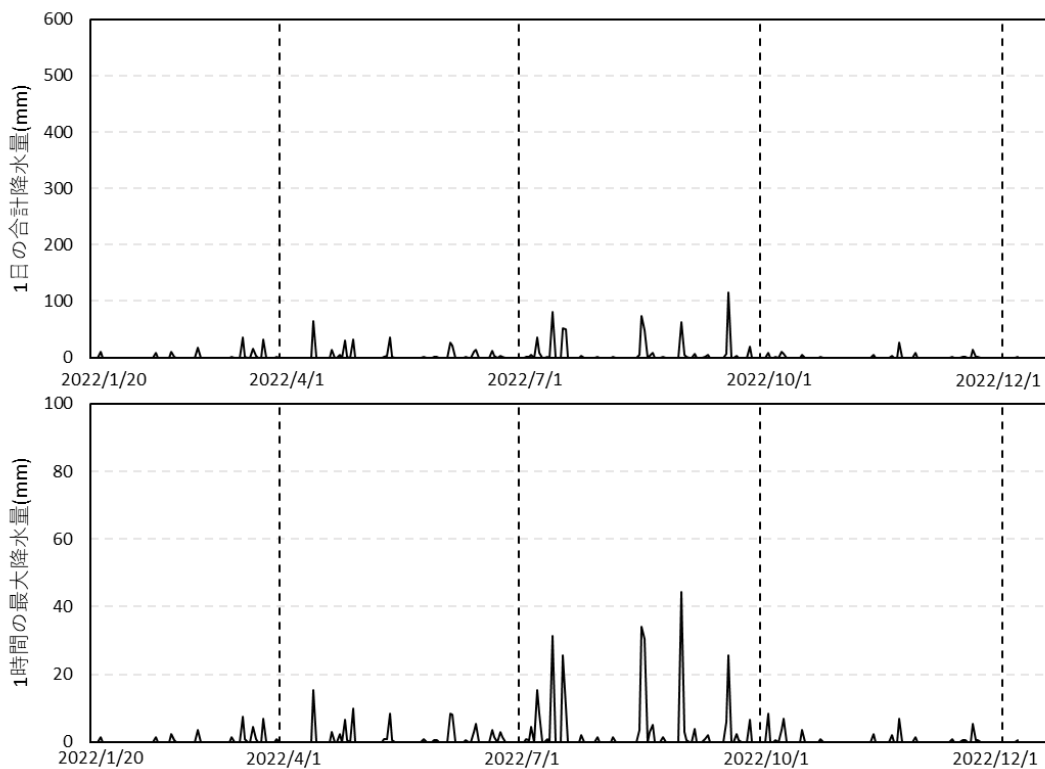


図 3.97 降水量の推移

#### 3.3.6. 試験体各面の様子

写真 3.35 から写真 3.39 に暴露条件ごとの試験体各面の暴露開始から半年経過時と約 1 年経過時の様子を示す。割れが生じている場所は上からマジックでなぞっている。

試験体下面は全ての屋外暴露試験体で、インサイジング同士をつなぐような割れが少し生じていた。また、スギとカラマツの無処理屋外試験体は、コンクリートブロックと接する部分にカビが若干生じていた。材色の変化は少ない。

試験体上面は、全ての屋外暴露試験体でインサイジング同士をつなぐような割れが多数生じており、暴露期間が経過するごとに割れが多くなっている。材色は日焼けによって灰色に変化しているが、腐朽やカビは見られていない。

試験体東西面は、全ての屋外暴露試験体でラミナの木口面に割れが生じている。暴露期間が経過するにつれて割れは多くなっている。東西面で割れに差は生じていない。

試験体南北面は、全ての屋外暴露試験体でラミナの木口面に割れが生じている。また、ラミナの板目面や接着層付近にも長い割れが生じている。南北面で割れに差は生じていない。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

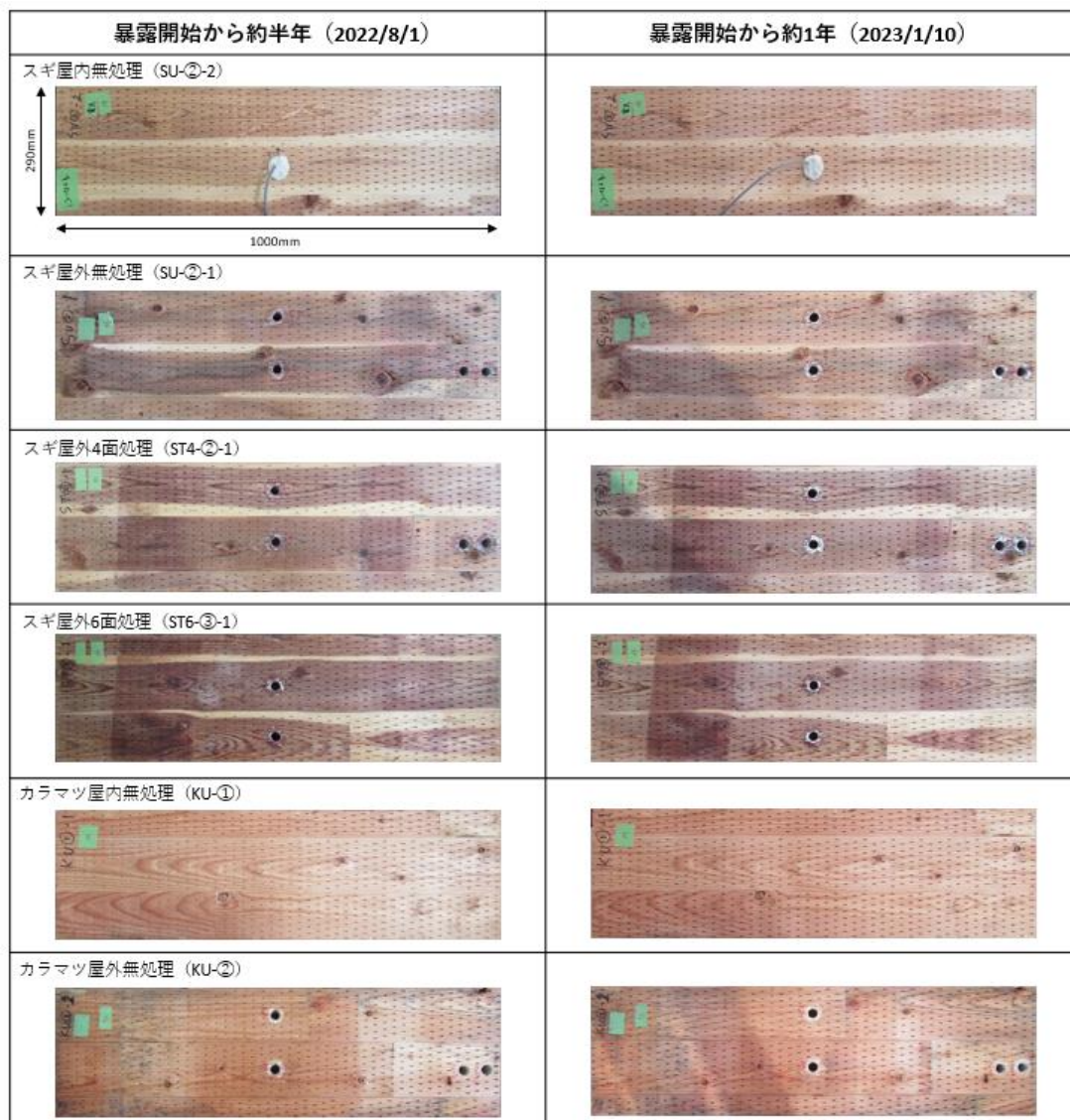


写真 3.35 試験体下面の様子

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

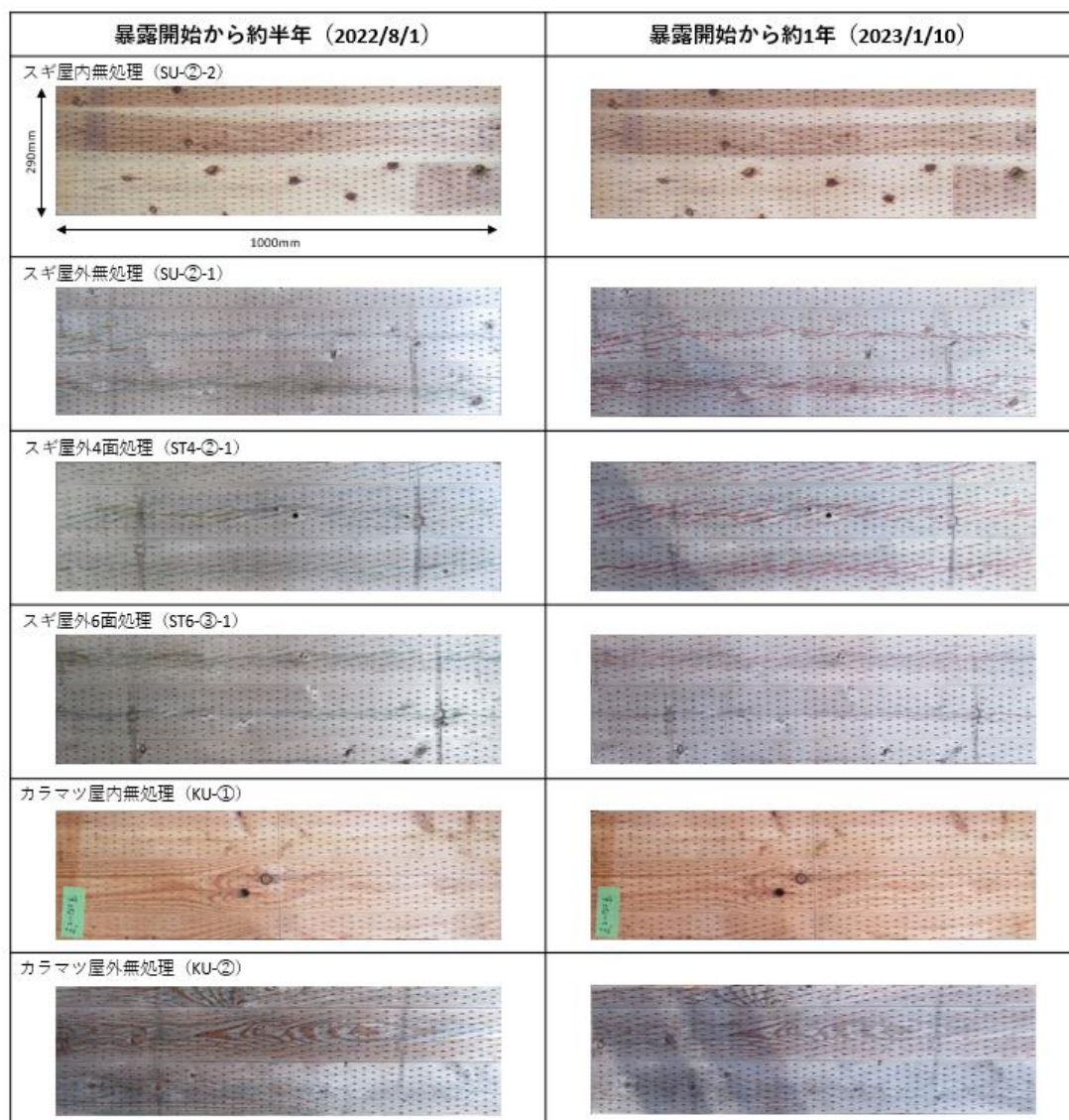


写真 3.36 試験体上面の様子

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

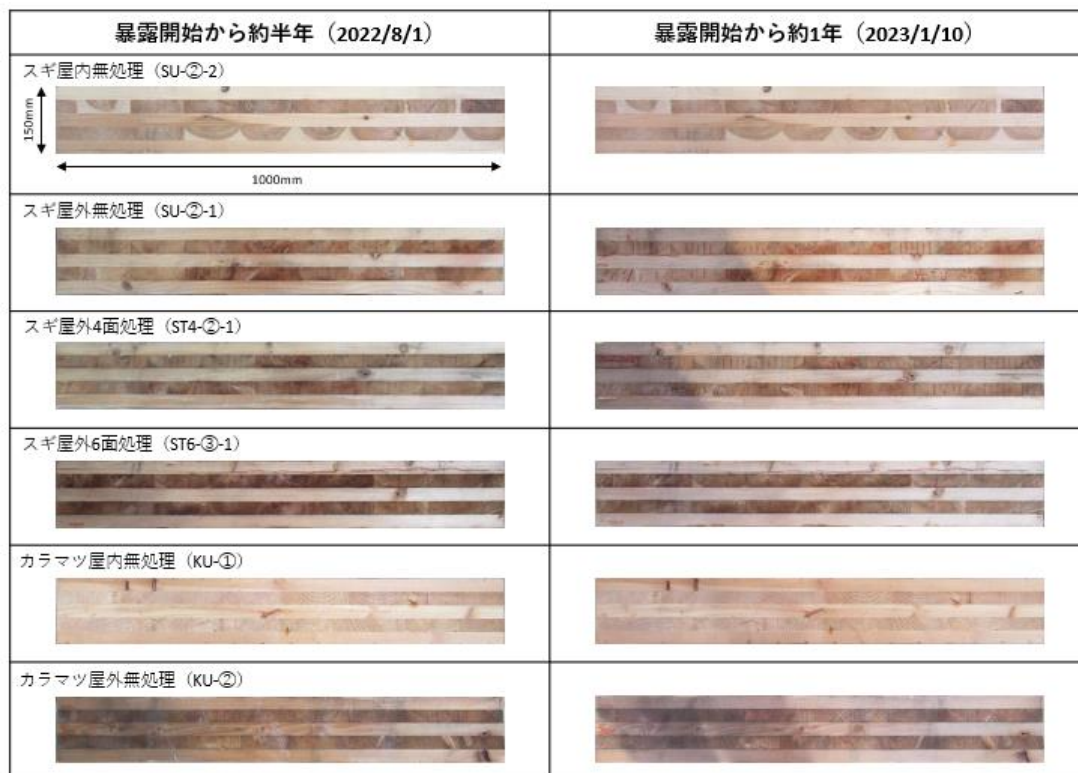


写真 3.37 試験体西面の様子



第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

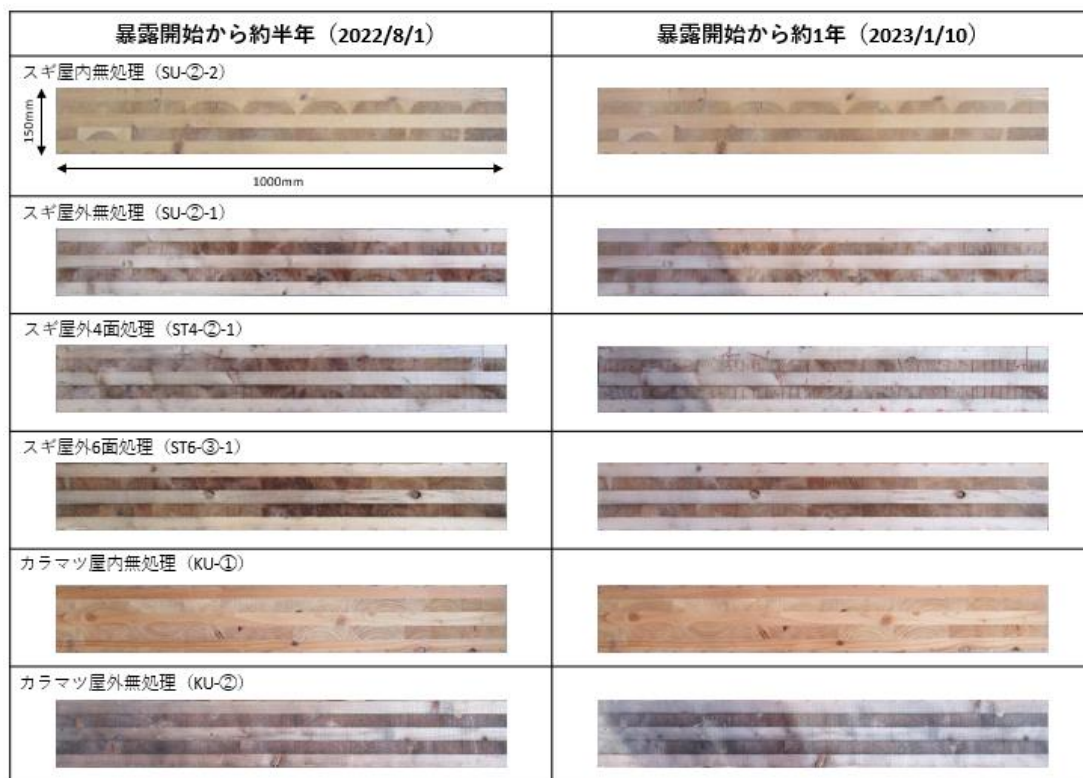


写真 3.38 試験体東面の様子

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

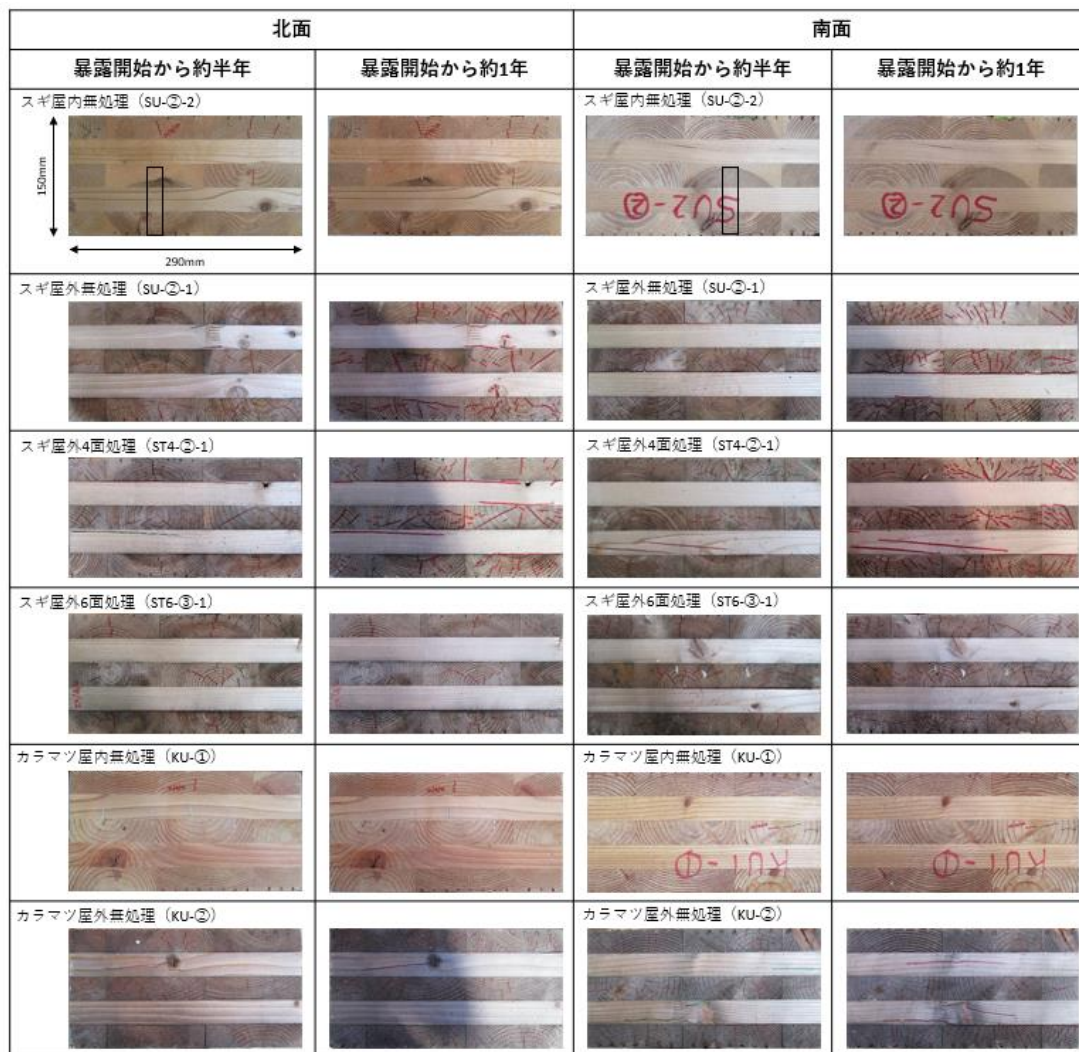


写真 3.39 試験体北面と南面の様子

#### 3.3.7. 計測結果

図 3.98 から図 3.102 に試験体ごとの内部温湿度と内部含水率（屋外試験体：3 時間間隔計測、屋内試験体：1 時間間隔計測）及び、気象庁のデータベースから得た東広島市の 1 時間降水量を示す。なお、スギ無処理屋内試験体については、電気抵抗式含水率計での計測であったため、内部温湿度は計測していない。屋外試験体の内部含水率は温湿度計測値から算出した値をそのまま用いている。スギ無処理屋内試験体は、電気抵抗式含水率計で計測した値に補正式 1.1 を用いて温度補正した値を示す。

カラマツ無処理屋外平置き試験体の材端から 80mm 計測点は、2022 年 8 月 1 日から 2023 年 1 月 10 日の間、温湿度センサのエラーにより計測できなかった。またスギ無処理屋外平置き試験体の材端から 30mm 計測点は、2023 年 1 月 10 日データ取り出しの時点で、相対湿度が 1 か月程度 95%RH（計測可能最大値）以上となっていたため、屋外から水が計測穴に流入していると判断し計測を中止した。しかし、写真 3.35 や写真 3.39 に示すように試験体表面に計測穴までつながっているような割れは見つけられなかった。

内部温度は樹種や薬剤処理の有無によらず、全ての計測点で外部温度と同じように推移していた。材端からの距離の違う計測点でも温度はほぼ同じであった。

一方で相対湿度は降雨があった後に上昇を開始し、全ての試験体で材端からの距離が近くなるにつれて、降雨後の上昇が大きくなっており、内部含水率も材端（ラミナの木口）からの距離が近くなるにつれて変動が大きくなっていった。特にスギ無処理屋外試験体は木口からの距離が 80mm の計測点でも 25%を超える含水率が計測されており、1 か月程度継続することから、今後腐朽が発生する可能性のある状態であることがわかった。現状、目視や触った感触で腐朽が生じているような箇所はない。

中央ラミナの中央計測点と端部ラミナの中央計測点とでは、それぞれの試験体で大きな差は見られなかったが、約 1%端部ラミナの中央計測点の方が降雨後の変動が大きい傾向があった。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

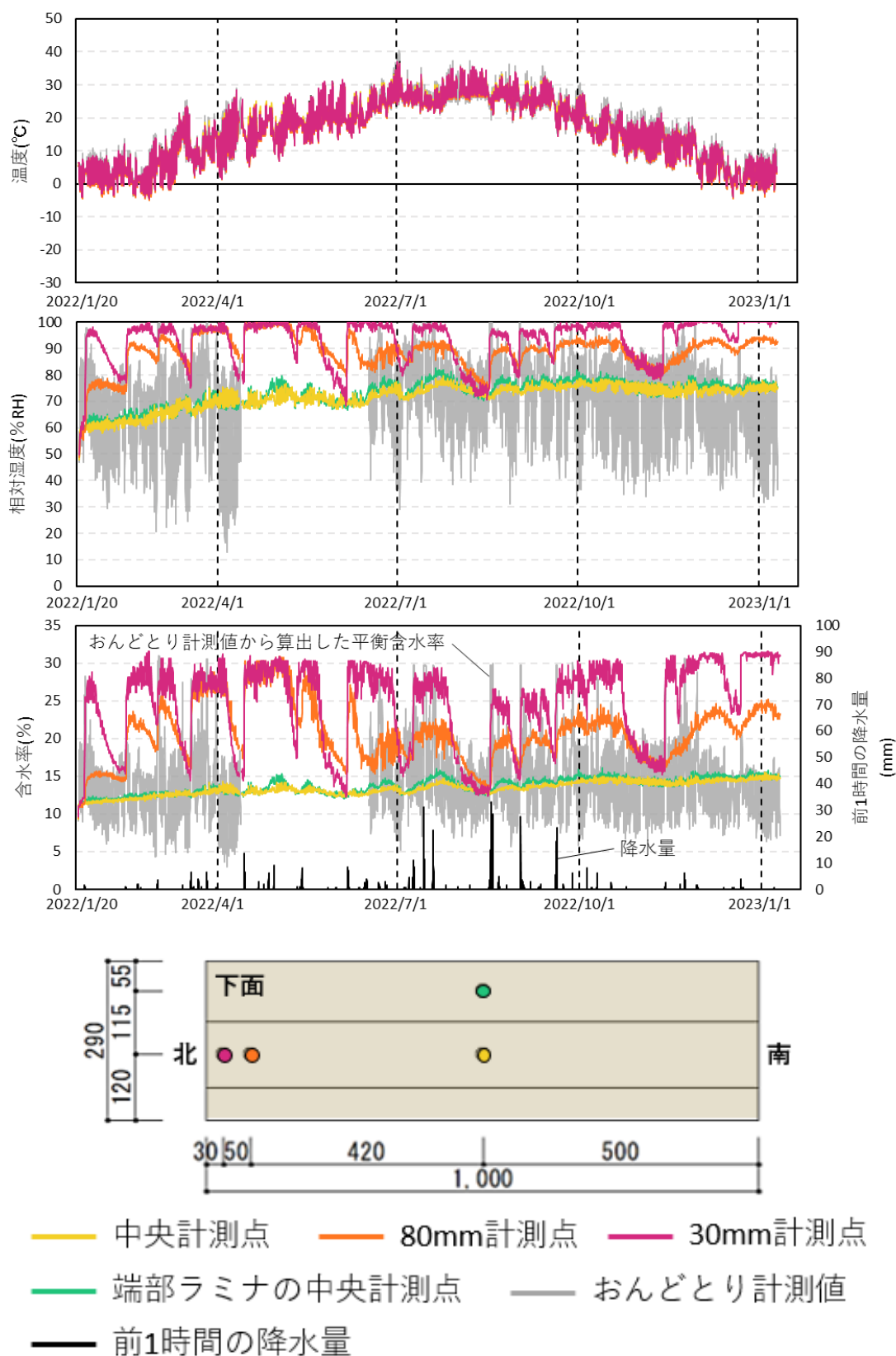


図 3.98 スギ無処理屋外平置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

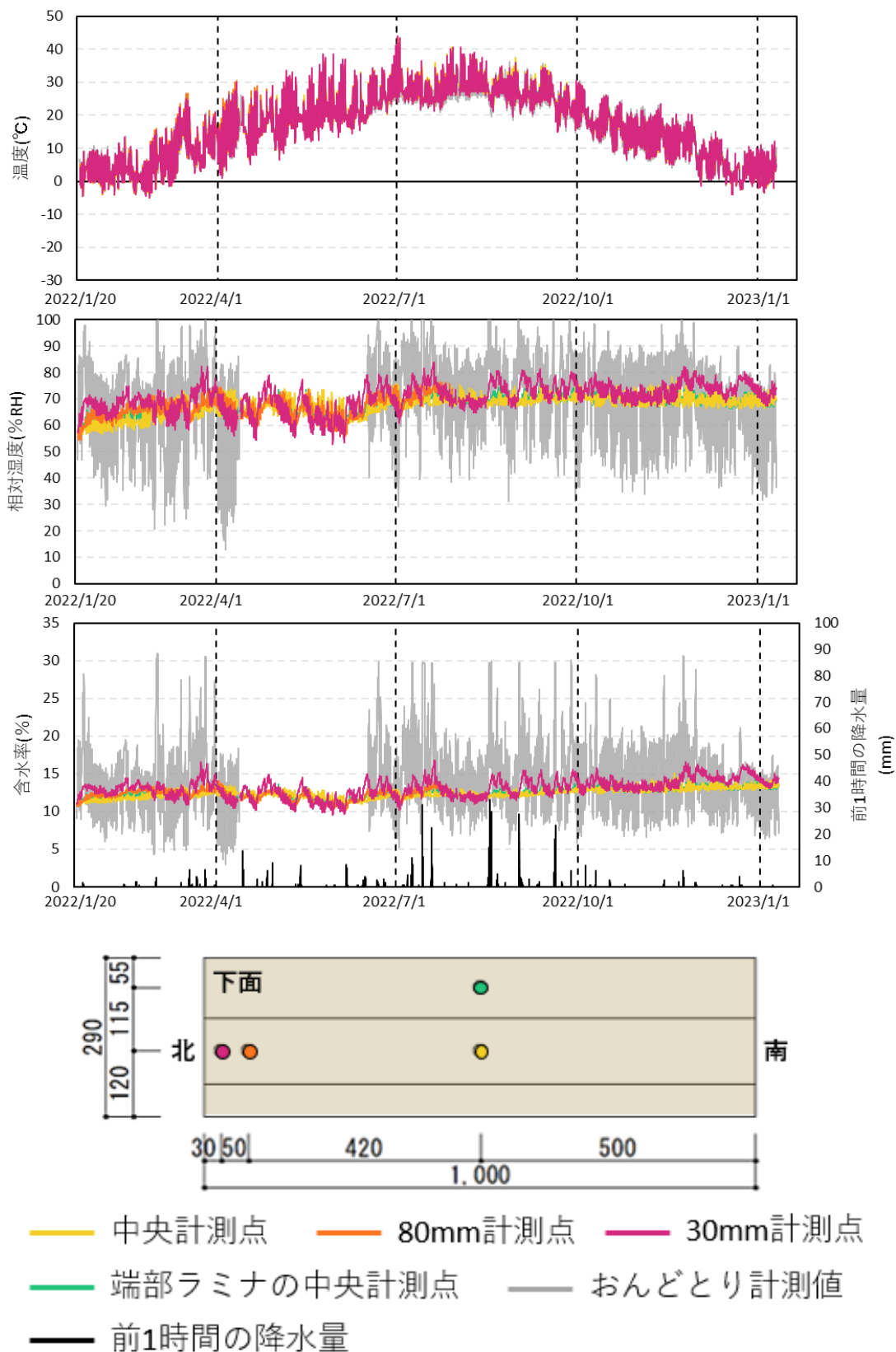


図 3.99 カラマツ無処理屋外平置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

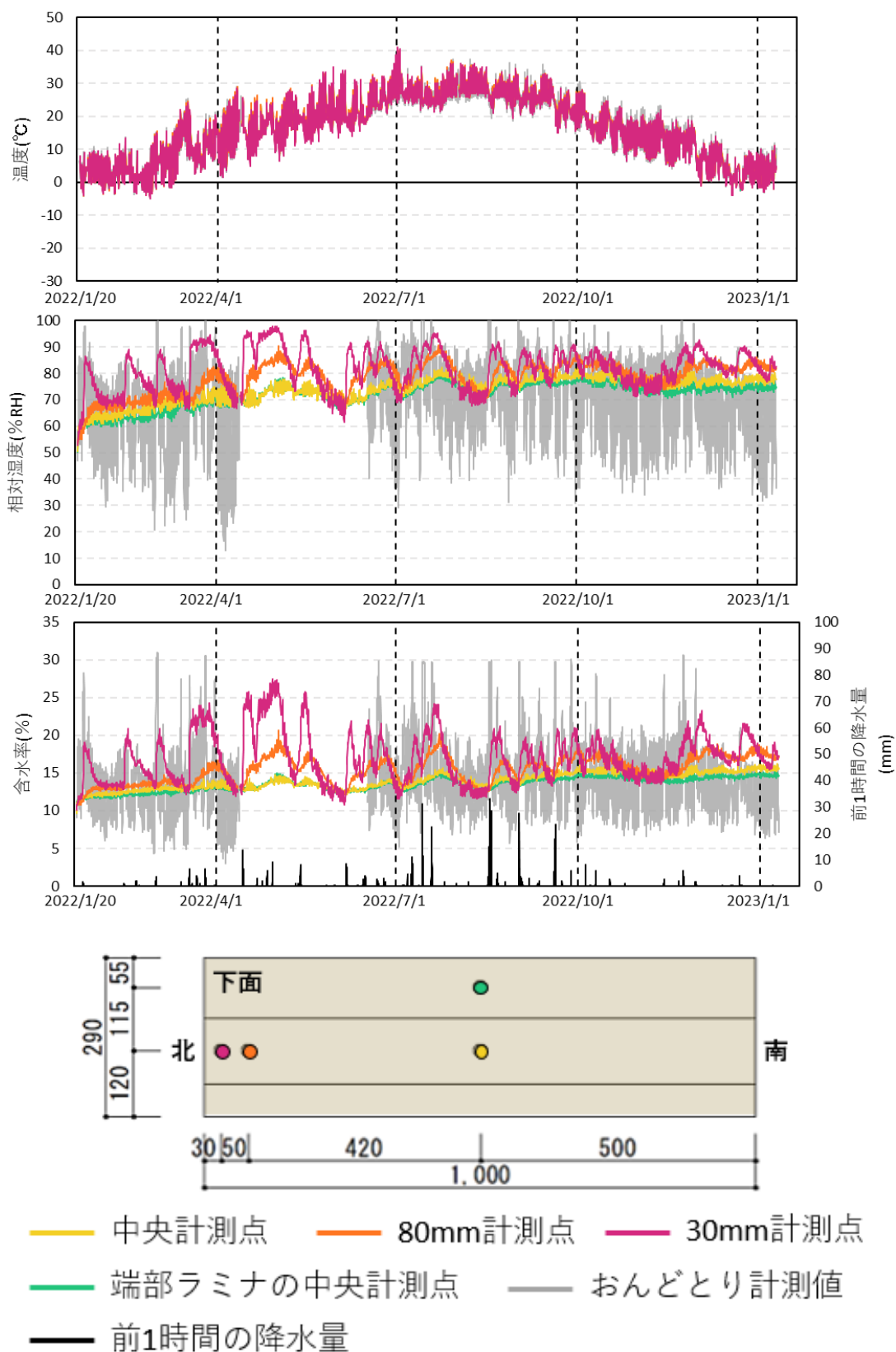


図 3.100 スギ4面処理屋外平置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

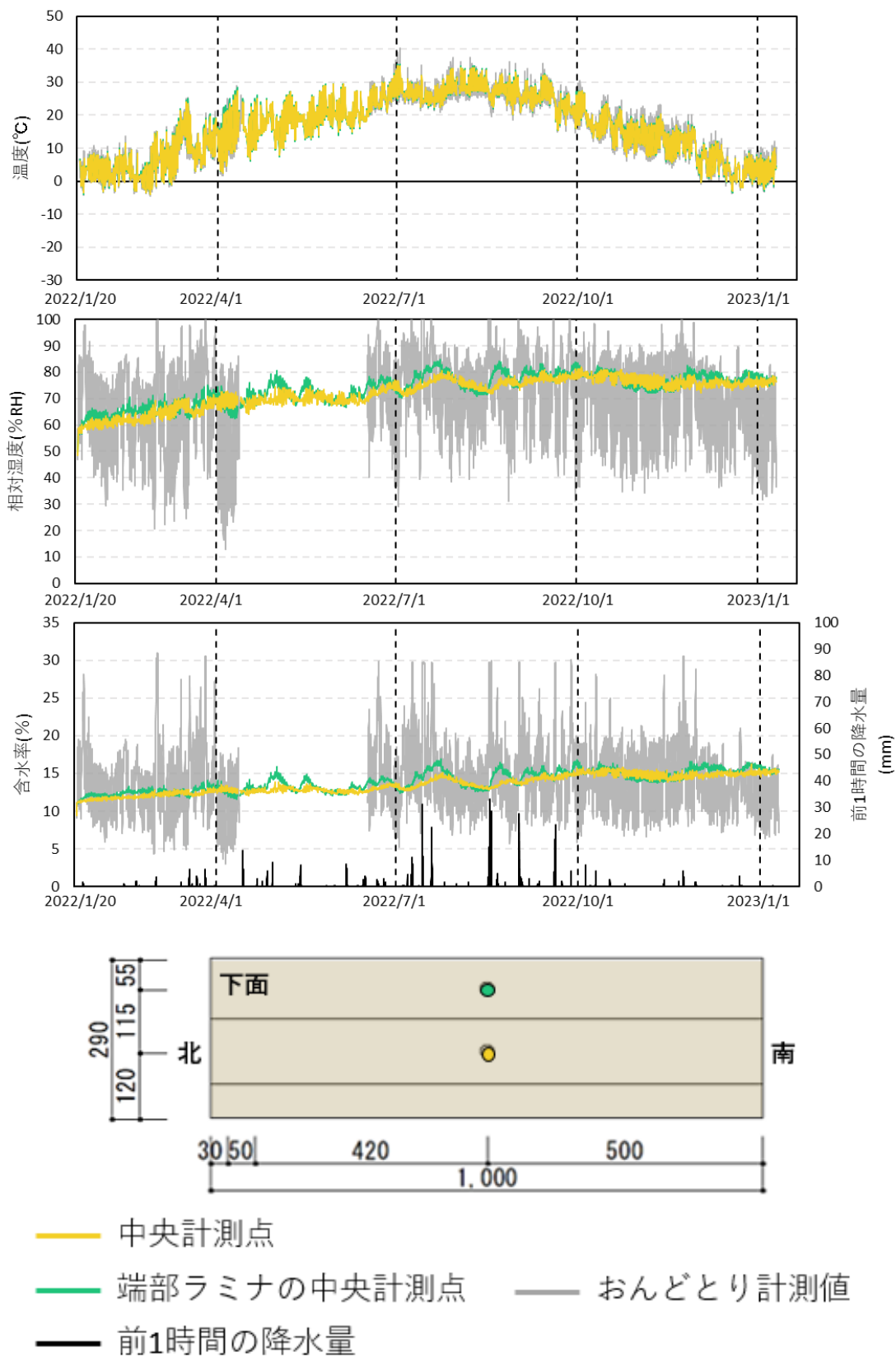


図 3.101 スギ6面処理屋外平置き試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

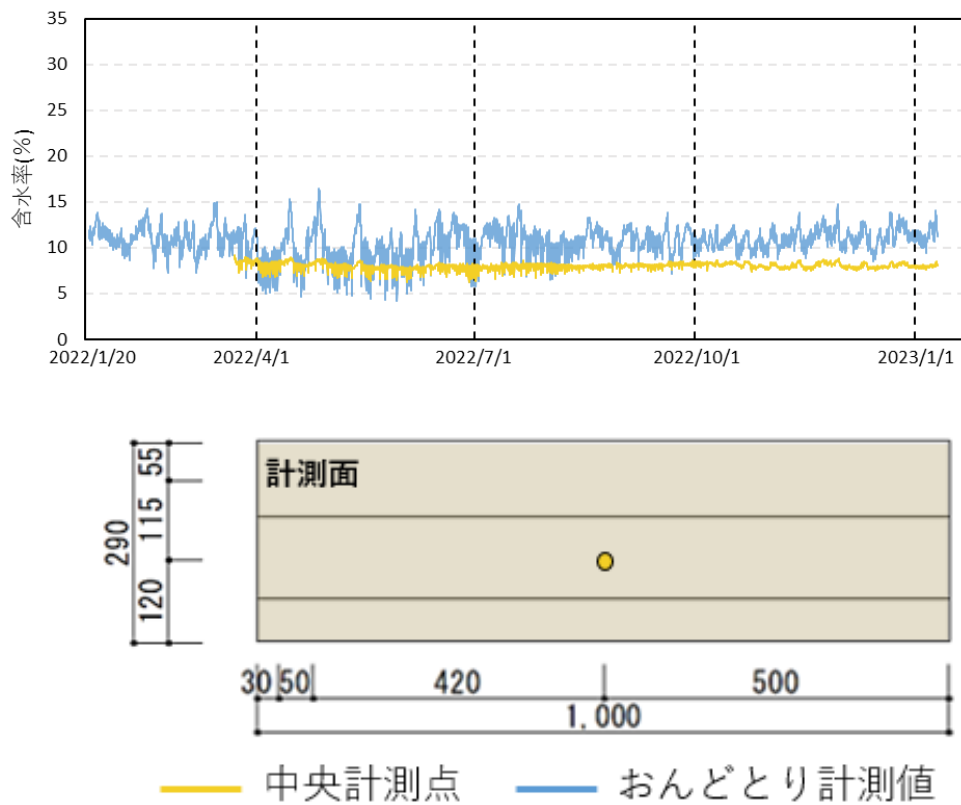


図 3.102 スギ無処理屋内試験体の計測値



### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

図 3.103 から図 3.106 に各試験体の中央計測点、端部ラミナの中央計測点、材端から 30mm 計測点、材端から 80mm 計測点の内部含水率の推移を示す。

スギ屋外試験体の中央計測点と端部ラミナの中央計測点は、計測開始時すべての試験体が 10%程度であったが、暴露開始から約 1 年経過した 2023 年 1 月の時点では約 15%となっており、緩やかに上昇を続けている。また、夏季（2022 年 7 月～9 月の間）の降水量の多い期間では降雨によって一時的に 15%まで上昇し、その後減少するなど、含水率の増減が見られた。これはインサイジングから雨水が浸入することが原因と考えている。薬剤処理の有無による含水率の違いは見られなかった。

カラマツ無処理屋外試験体の中央計測点と端部ラミナの中央計測点は、スギ試験体と比較して含水率の変動は小さかった。しかし、暴露開始時の含水率が 10%であったのに対し、暴露開始から 1 年では約 13%まで上昇しており、緩やかに含水率は増加している。

スギ無処理屋内試験体の中央計測点は季節に関係なく一定で約 7%で推移していた。しかし、図 3.95 よりデータ取り出し時の表面含水率は、全ての試験体で 8%以上であったため実際の内部含水率はもう少し高い値であった可能性がある。

材端から 30mm 計測点と材端から 80mm 計測点は、スギの試験体の薬剤処理の有無で比較すると、どちらの計測点の含水率変動も無処理屋外試験体に対し 4 面処理試験体の方が小さくなっていた。写真 3.34 に示すように試験体の設置場所は、無処理試験体は計測点のある北側にほかの試験体を置いてあるのに対し、4 面処理試験体は北側がフリーとなっている。設置条件としては 4 面処理の方が厳しく、得られた含水率変動とは逆の結果となった。しかしそれぞれの試験体のラミナを比較すると、写真 3.39 に示すように無処理試験体は温湿度センサのある層のラミナに辺材が多いのに対し、4 面処理試験体は心材が多くなっている。心材は心材化の際に壁孔が閉じ水分移動をしにくい<sup>3-10)</sup>ため、心材が多い 4 面処理試験体の含水率変動が小さかったのではないかと考えている。なお、今回の試験体は油性の薬剤を用いているが、薬剤によって水分流入を防止できるのかは不明である。

材端から 30mm 計測点と材端から 80mm 計測点を樹種で比較すると、カラマツ無処理試験体の方がスギ無処理試験体よりも変動が小さく、同じ無処理であっても樹種によってかなり含水率変動に差が生じることがわかった。なお写真 3.39 に示す通り、どちらの試験体も温湿度センサのある層のラミナは辺材が多い。

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

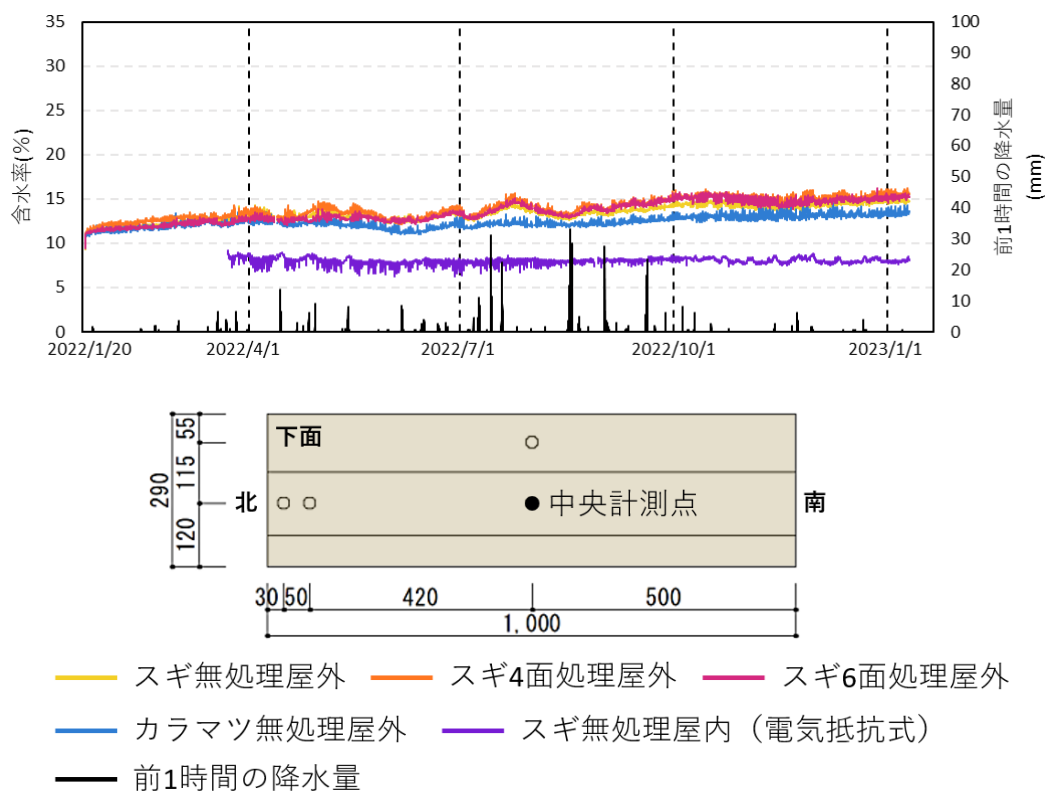


図 3.103 中央計測点内部含水率

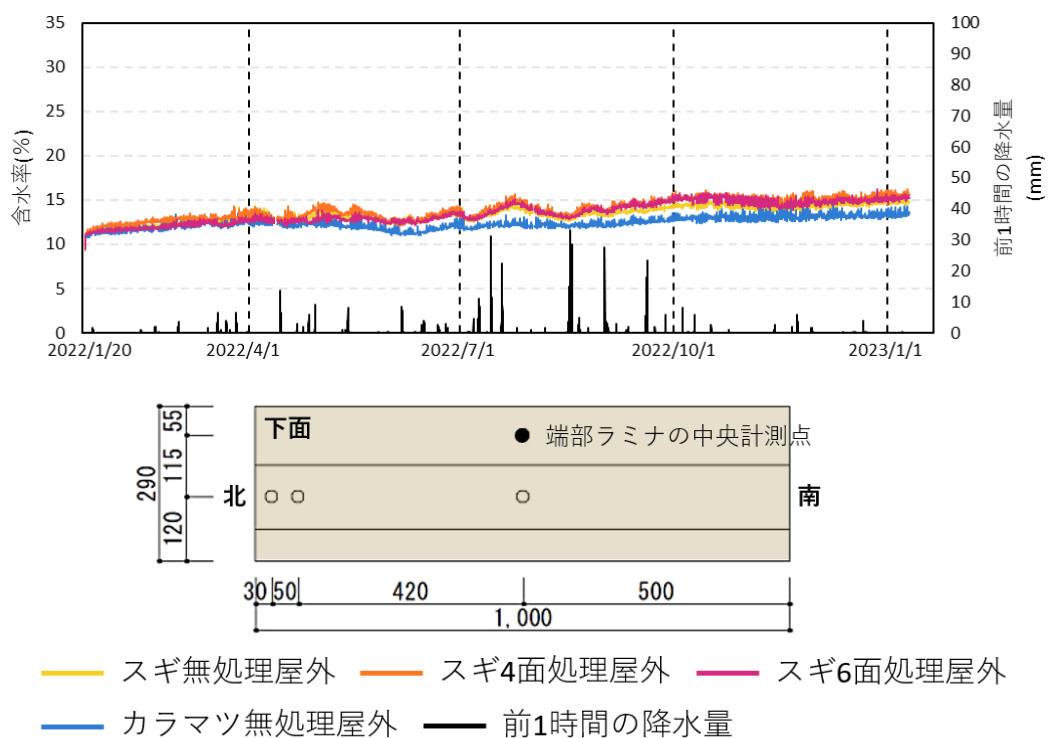


図 3.104 端部ラミナの中央計測点内部含水率

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

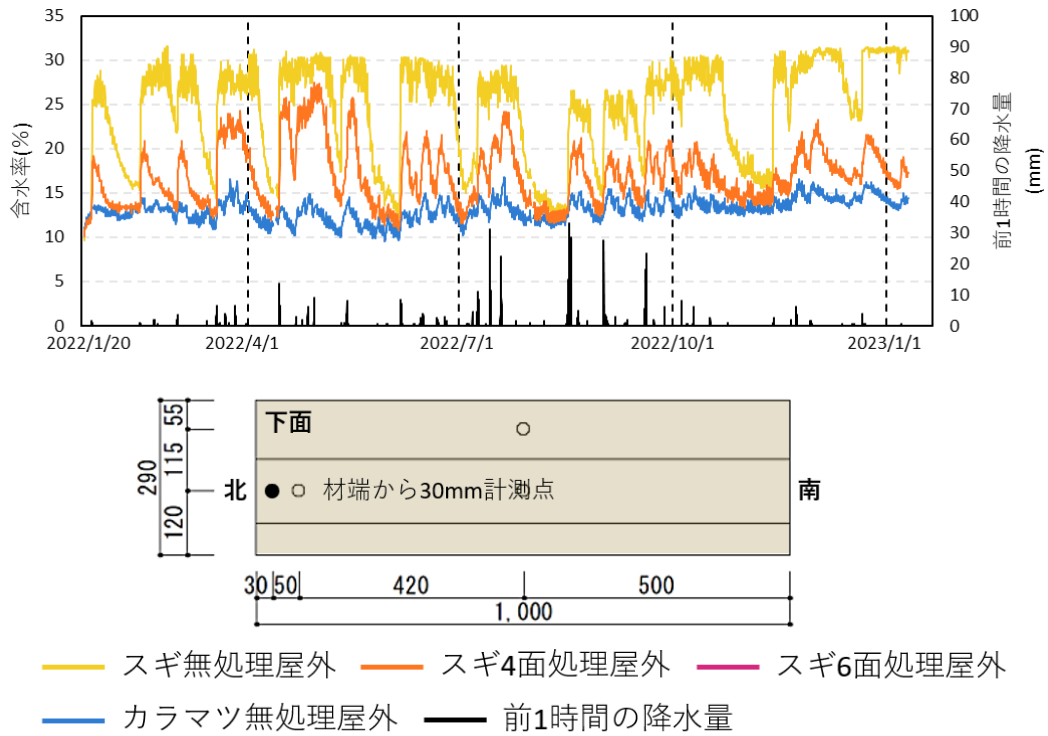


図 3.105 材端から 30mm 計測点内部含水率

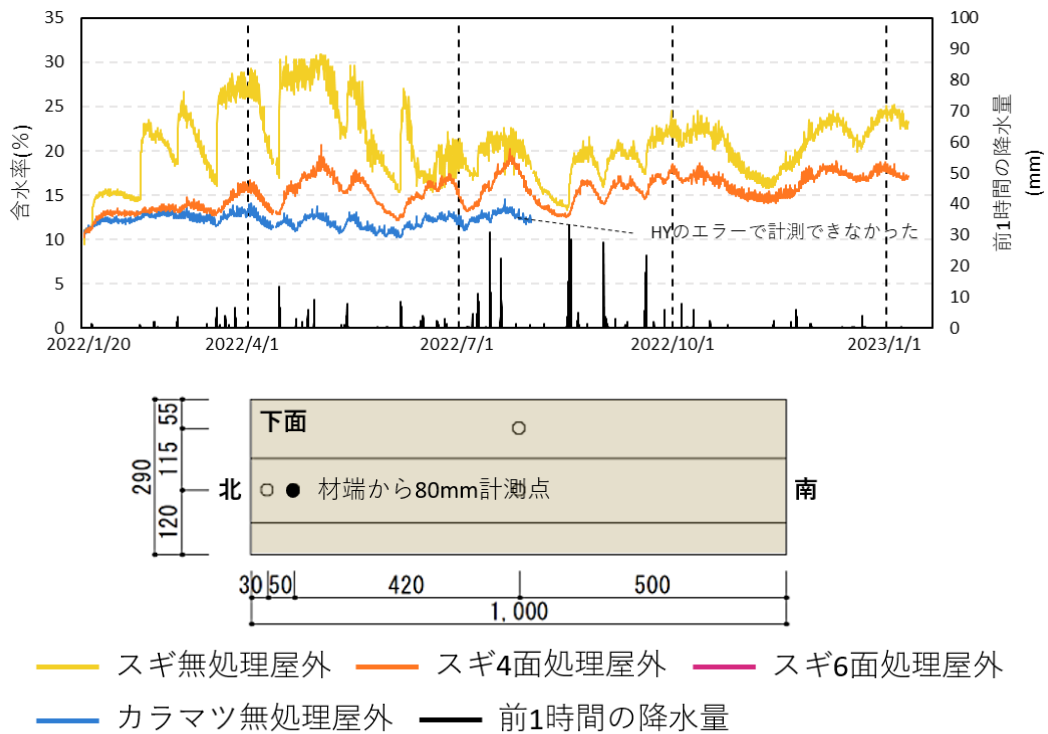


図 3.106 材端から 80mm 計測点内部含水率

#### 3.3.8. まとめ

暴露の条件（薬剤処理の処理面数、屋内外、樹種）と内部含水率変動との関係を得ることを目的とし、インサイジングがある無処理のスギ CLT、インサイジングがある無処理のカラマツ CLT、薬剤処理（深浸潤処理）を4面施したスギ CLT、薬剤処理（深浸潤処理）を6面施したスギ CLT の4種類の材料の暴露実験を東広島市でおこなった。

その結果、材端からの距離の異なる計測点で計測していた試験体では、材端からの距離によって含水率変動が異なり、距離が遠くなるほど変動が小さくなることがわかった。

中央計測点（材端から 500mm）は、スギ屋外試験体では初期含水率が 10%程度であったのに対し、暴露開始から1年経過した時点で 15%まで上昇しており、また降水量によっては一時的に 15%まで上昇するなど若干変動していることがわかった。一方、カラマツ試験体の中央計測点はほぼ一定だが、初期含水率 10%に対し1年経過含水率は 13%とこちらも緩やかに上昇を続けている。

端部から 30mm 計測点と 80mm 計測点を試験体条件ごとに比較すると、スギ無処理、スギ4面処理、カラマツ無処理の順に変動が小さくなっていることがわかった。スギ試験体の薬剤処理の有無によって含水率変動に違いが生じた理由としては、薬剤処理によるものではなく計測点のあったラミナが心材か辺材かの違いによるものではないかと考えている。

### 3.4. 大分での屋外暴露実験

#### 3.2.1. 計測の目的

大分で実施している屋外暴露実験では、暴露開始から1年以上経過していた5層5プライのヒノキ CLT、6層6プライのヒノキ CLT、の2種類の材料に関して、2章で検討した温湿度センサを用いた内部含水率計測方法で暴露中の含水率を計測している。また5層5プライのヒノキ CLT に関しては、屋内と屋外平置きの2条件で計測している。それ以外の種類の試験体は屋外平置きのみ計測している。

この結果から、暴露の条件（屋内外、CLT 構成）と内部含水率変動との関係を得ることを目的としている。さらに含水率を試験体の材端から 30, 80, 400mm 離れた3点で計測することで、材内部の繊維方向の含水率分布が外部環境によってどのように影響を受けるのかを明らかにする。

本節では、屋外暴露実験の概要とその結果を報告する。

3.4.2. 試験体概要

表 3.9 に試験体の概要を示す。試験体寸法は全て 480×1200mm (幅×長さ) のヒノキ CLT で、5層5プライ (S90-5-5)、と6層6プライ (S90-6-6) の2種類暴露している。図 3.107 に試験体図を示す。CLT 積層用の接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤 (API 接着剤) で、薬剤処理はおこなっていない。また計測開始前に1年以上暴露されていた。

表 3.9 試験体概要

種類	寸法 (厚さ×幅×長さmm)	規格	樹種	接着剤	薬剤処理の有無
CLT	150×480×1200	S90-5-5	ヒノキ	API	無処理
	180×480×1200	S90-6-6 (強軸)			
		S90-6-6 (弱軸)			

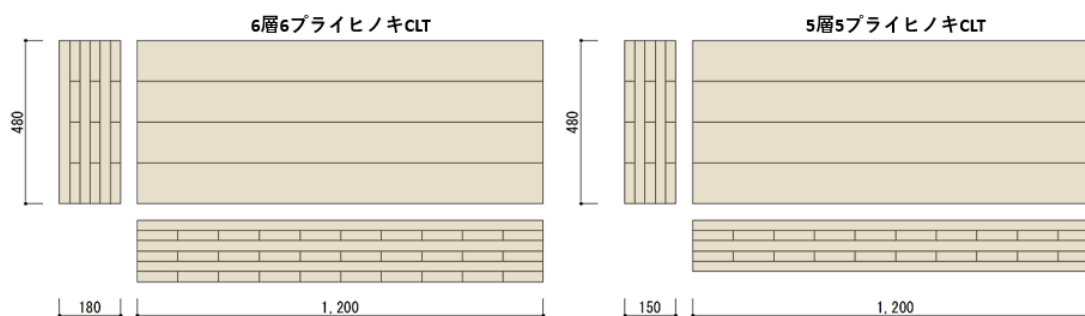


図 3.107 試験体図

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

#### 3.2.3. 暴露概要

写真 3.40 に暴露の様子を示す。試験体は大分県大分市大字且野原 700 番地の大分大学構内に設置している。計測開始日は 2021 年 12 月 20 日で、現在約 1 年経過している。5 層 5 プライ試験体は屋外平置きと屋内の 2 条件で計測している。6 層 6 プライ試験体は屋外平置きのみ計測している。また 6 層 6 プライは上面を強軸層とする試験体と、上面を弱軸層する試験体の 2 条件で計測している。各条件計測は 1 体ずつとした。

屋外平置き暴露は全て非接地型としている。地面の上に H 型鋼を置き、その上に試験体を設置し、雨水が試験体の上にとまりにくくするために、H 型鋼の高さを変えることで試験体を少し傾斜させている。



写真 3.40 暴露の様子

3.2.4. 計測概要

図 3.108 に計測点の位置を示す。計測している層は、設置したときに下面になる層を1層目として数える。温湿度センサはHYを用いて3時間間隔で計測した。温湿度センサを設置した後、計測穴からの水分流入を防ぐために、計測層以外をウレタンゴム棒と配管用パテ（AP-1000-I）を用いて塞いでいる。試験体を設置している場所の外部の温湿度は、屋外ではHYを用いて3時間間隔で、屋内では温湿度センサ（おんどとり）を用いて1時間間隔で計測している。温湿度センサのデータの取り出しは、2022年7月22日の1回おこなっている。

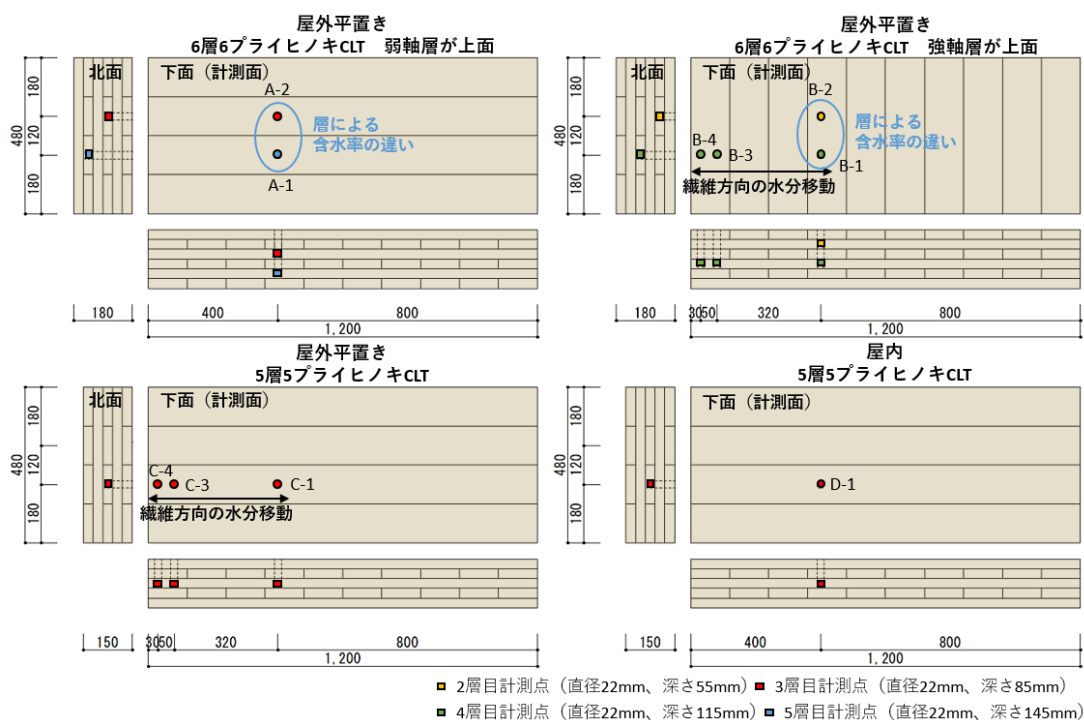


図 3.108 計測点の位置



### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

#### 3.2.5. 外部環境

表 3.10 に大分の屋外の気温と降水量の月別のデータを示す。気温は試験体設置場所でHYを使用して計測した値、降水量は気象庁のデータベース<sup>3-8)</sup>から得た値を用いている。

図 3.109 に屋外温湿度の日平均値の変動を示す。また図 3.110 に降水量の推移を示す。

表 3.10 大分の屋外気温と降水量の月別データ

	年	2022					
	月	1	2	3	4	5	6
月平均屋外気温	°C	4.2	4.1	11.0	15.1	19.0	23.3
月の降水量合計	mm	42	31.5	127.5	123.5	98	246
1時間降水量の最大	mm	3	3.5	13.5	15	7.5	16.5

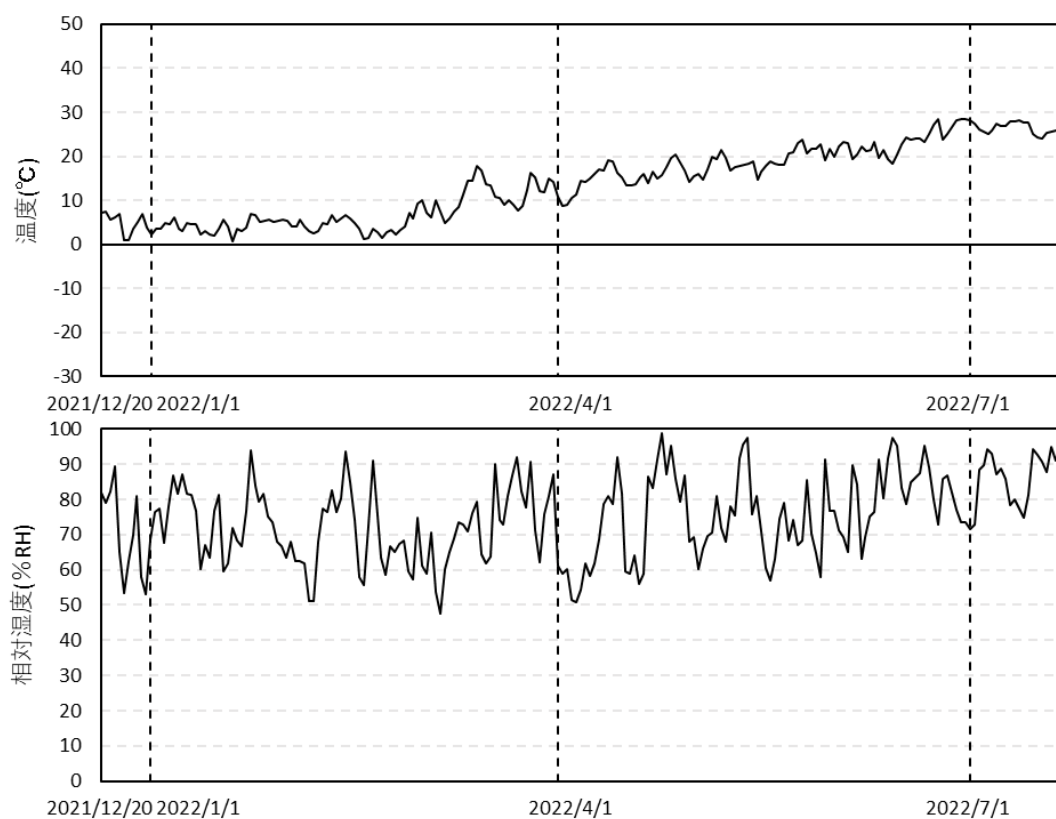


図 3.109 試験地の屋外温湿度の日平均値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

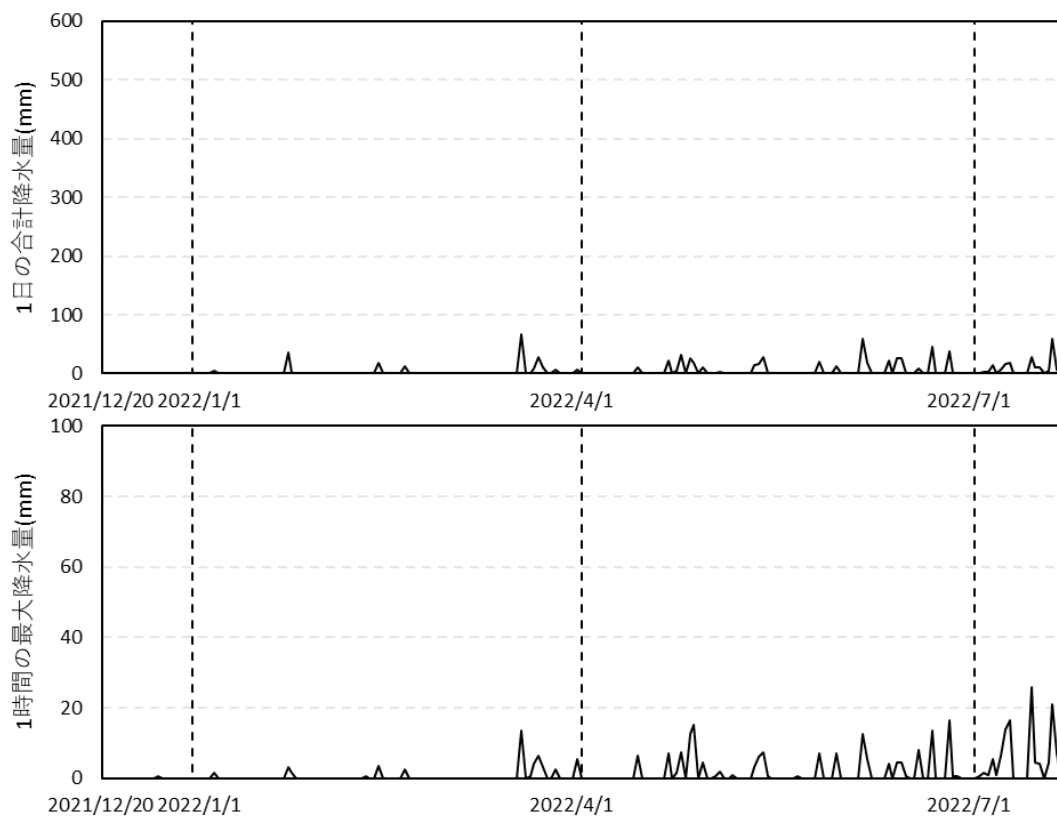


図 3.110 大分市の降水量推移

3.2.6. 試験体各面の様子

写真 3.41 から写真 3.43 に計測開始から約半年（2022年7月22日）の試験体各面の様子を示す。暴露開始から1年以上経過していることもあり、屋外試験体は全て試験体側面（写真、東西面と南北面）に幅3mm以上の割れが生じていた。特に接着層付近の割れがかなり進展していた。また屋外試験体北面にはカビが発生していた。

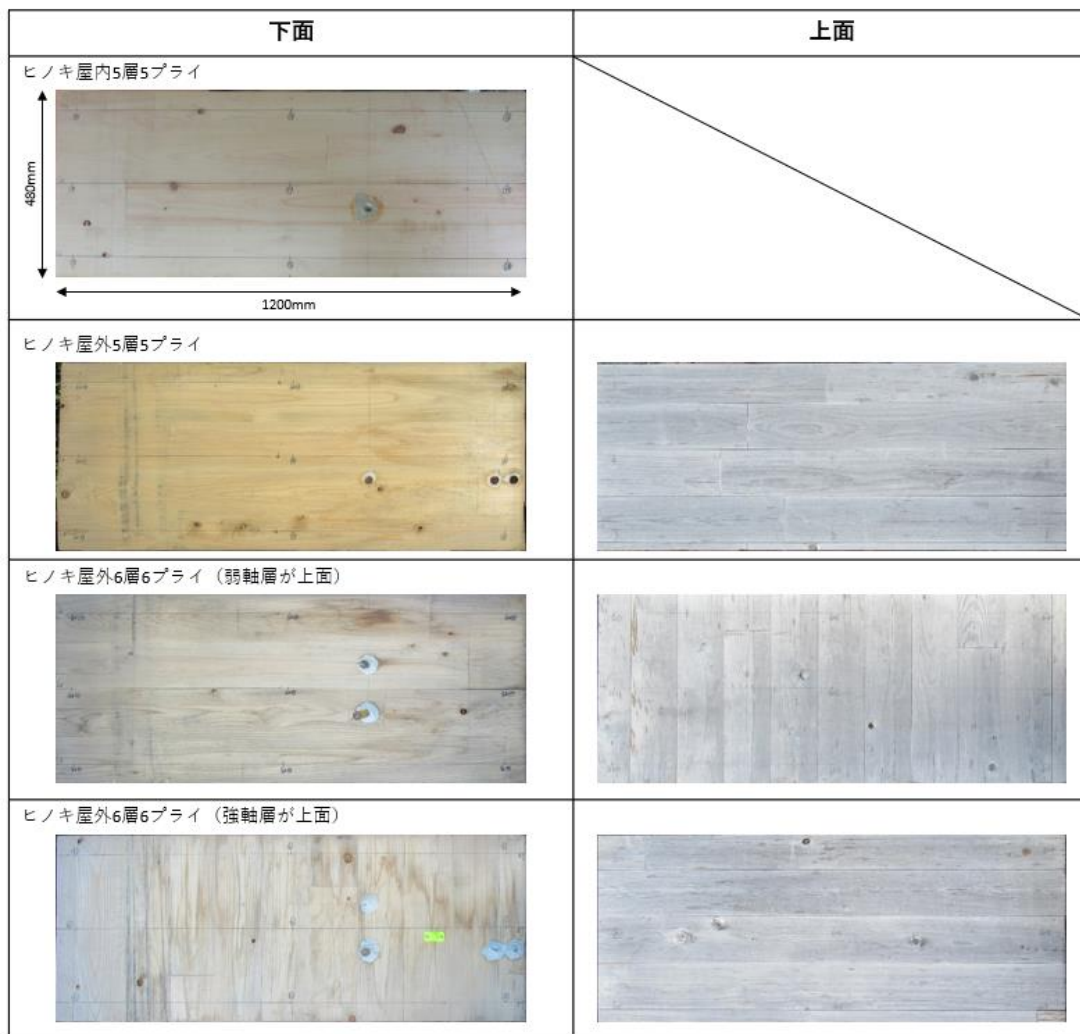


写真 3.41 試験体上下面の様子

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

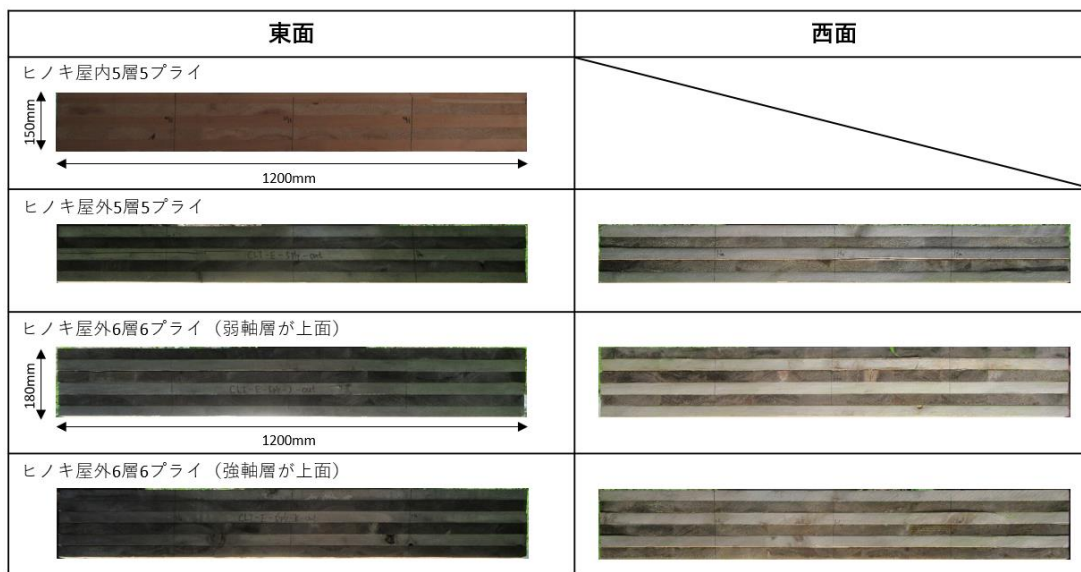


写真 3.42 試験体東西面の様子

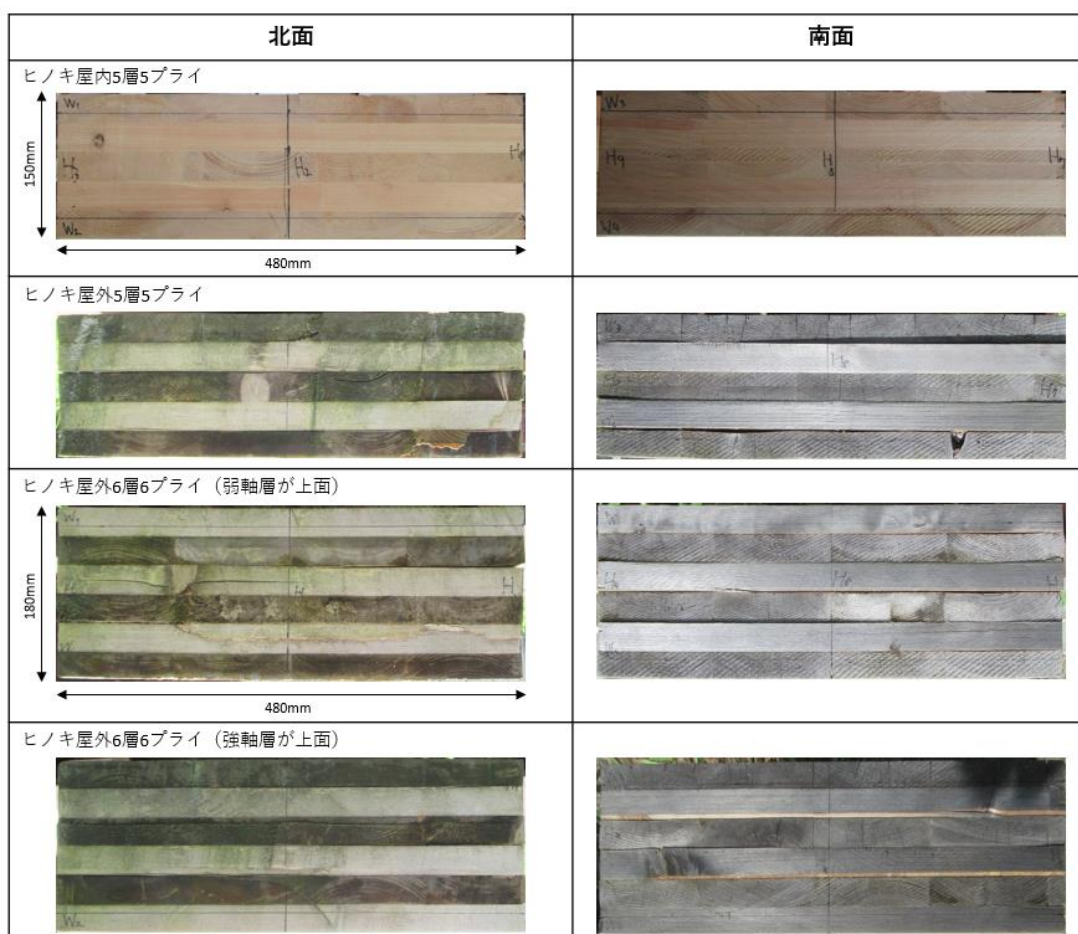


写真 3.43 試験体南北面の様子

#### 3.2.7. 計測結果

図 3.111 から図 3.114 にそれぞれの試験体の内部温湿度とそこから算出した内部含水率、及び屋外温湿度と1時間の降水量を示す。

屋外平置き6層6プライ CLT（強軸層が上面）と5層5プライ CLT で計測していた、材端から距離の近い計測点（30mm と 80mm）は、写真 3.43 に示すように試験体の割れが大きかったこともあり、相対湿度が長期間計測可能最大値以上となっている計測点が多かった。これは計測点まで通じる割れによって、雨水が計測部に付着し正確な計測値を計測できなかったためと考えている。そのため、2022年7月22日の計測以降は、材端に近い計測点の計測を中止した。計測点に水分が流入していたかどうかを確認するため、2022年7月22日の計測後、ヒノキ棒（直径20mm）を計測穴に埋めた。写真 3.44 に約2か月経過した2022年9月16日のヒノキ棒の様子を示す。材端から30mm計測点に入れていた棒が、湿っていたことを確認し、計測穴まで水分が流入していたことがわかった。本計測方法での計測では、計測穴まで通じる割れの発生によって計測値に影響を及ぼすことがわかった。

材端から400mmの距離の計測点は、計測点を設けた層によって差が生じていた。屋外平置き6層6プライ CLT では、3層目計測値（設置時上面になっていた層から4層目）に対して5層目計測値（設置時上面になっていた層から2層目）の方が内部相対湿度と内部含水率の1日の変動が大きくなっていった。しかし、5層目計測点は木材内部含水率としては変動速度が速すぎるため、CLT の目地の開きなどによって外部環境の影響を受けていたと考えられる。

図 3.115 に材端から400mmの距離の計測点の変動の小さかったものの結果を示す。今回の計測において屋外平置き試験体の中では、6層6プライ（弱軸上面）3層目計測点と6層6プライ（強軸上面）2層目計測点では内部含水率の変動が小さかった。しかし屋内計測点の内部含水率が12%程度であったのに対し、6層6プライ（弱軸上面）3層目計測点では14～18%、6層6プライ（強軸上面）2層目計測点では16～20%の間と、屋内試験体の含水率より高い状態で推移していた。また、設置時の上層からの距離に近い6層6プライ（強軸上面）2層目計測点の方が高い含水率で推移していた。

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

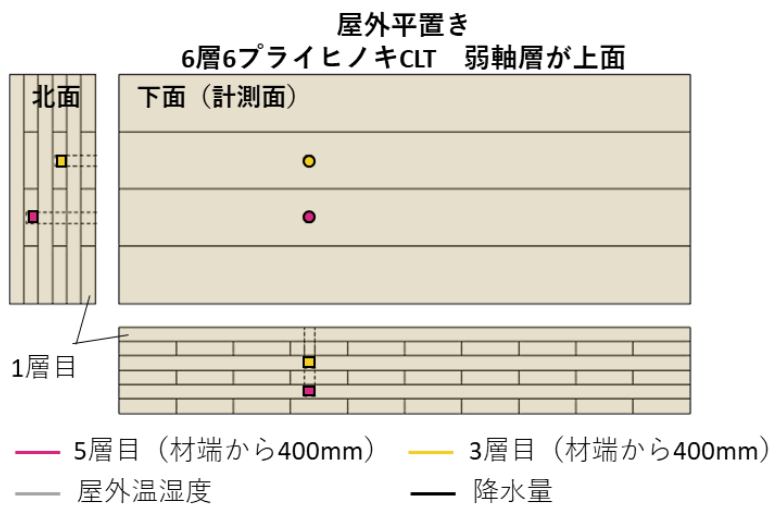
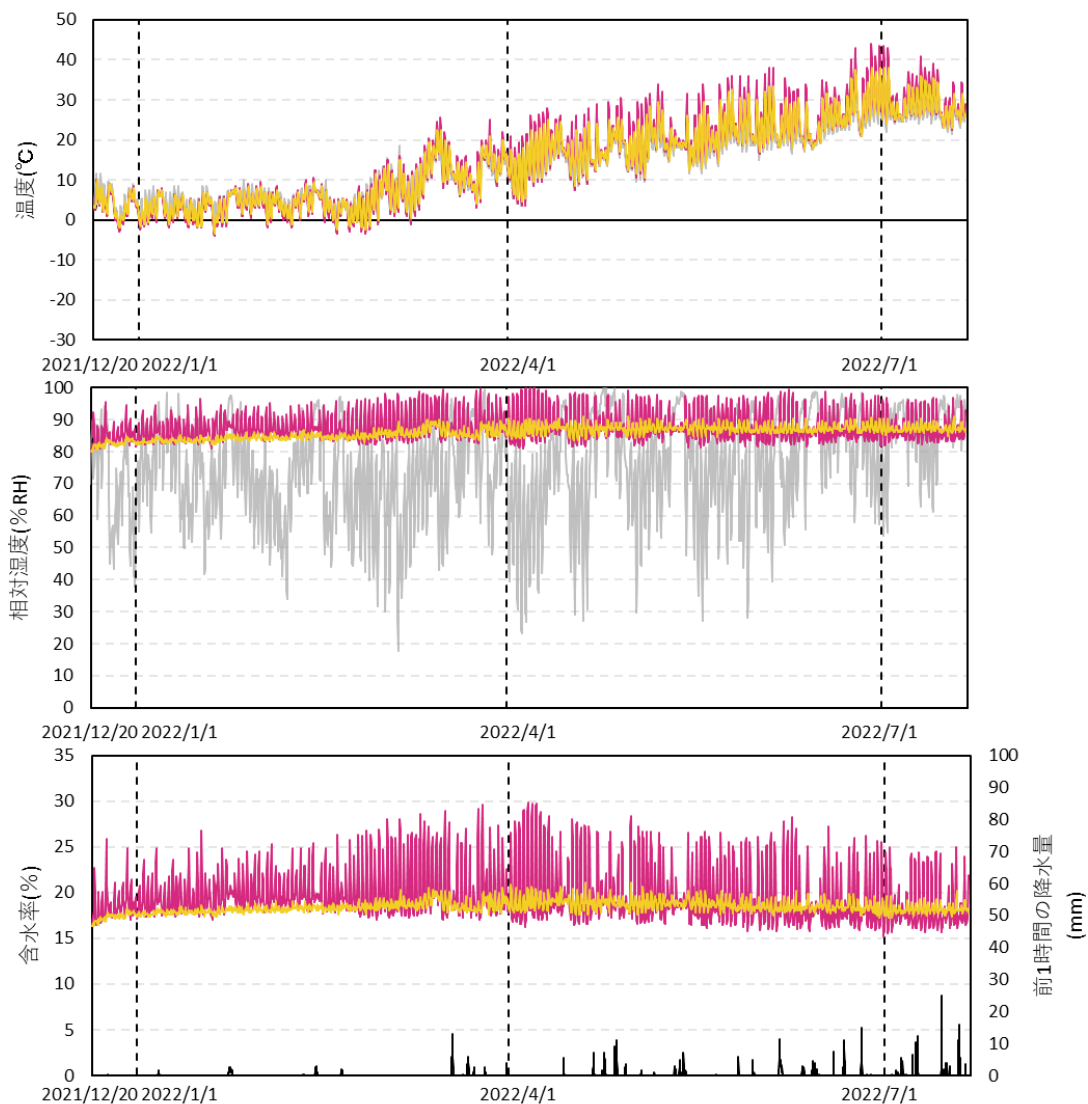


図 3.111 屋外平置き 6 層 6 プライ CLT (弱軸層が上面) 試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

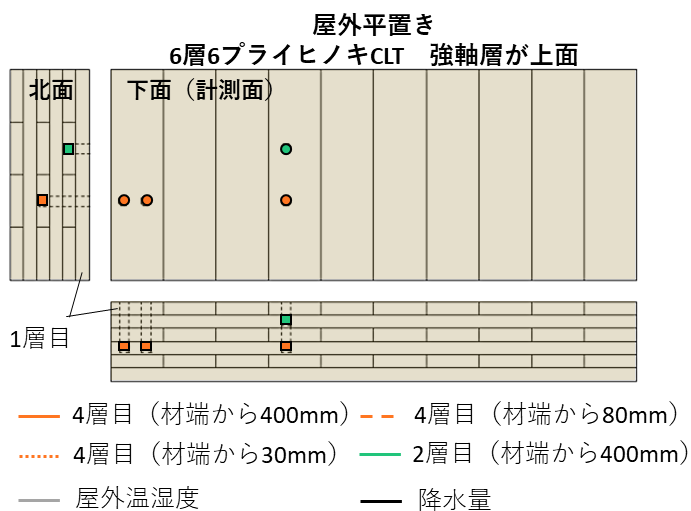
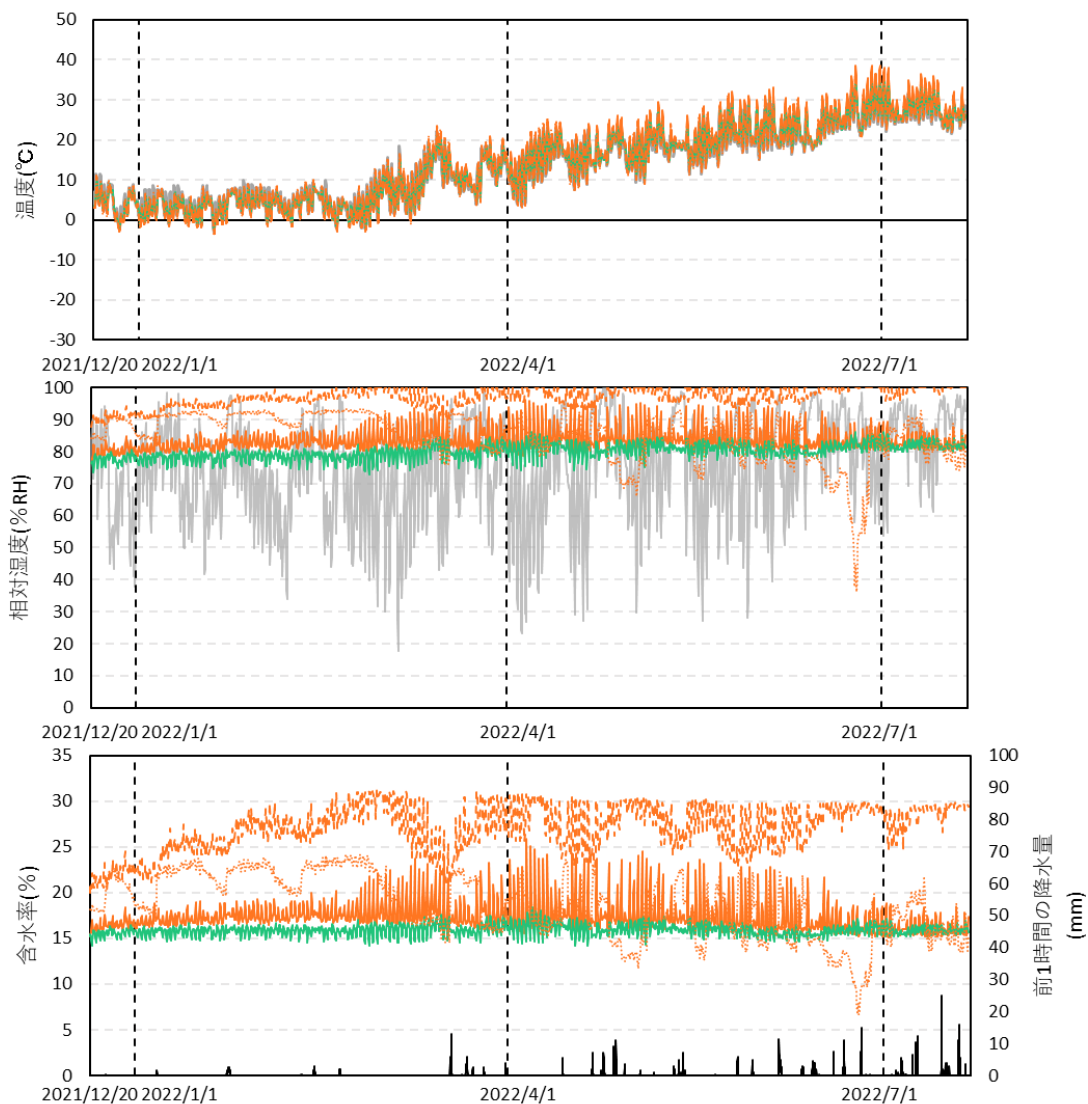


図 3.112 屋外平置き 6 層 6 プライ CLT (強軸層が上面) 試験体の計測値

第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

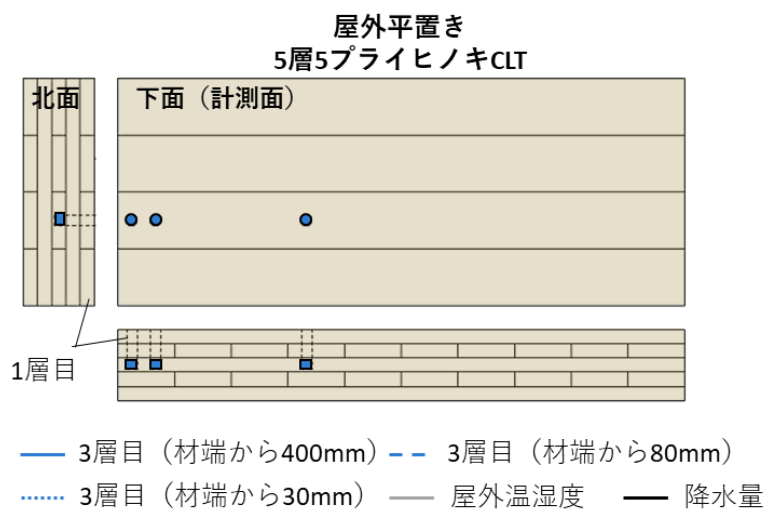
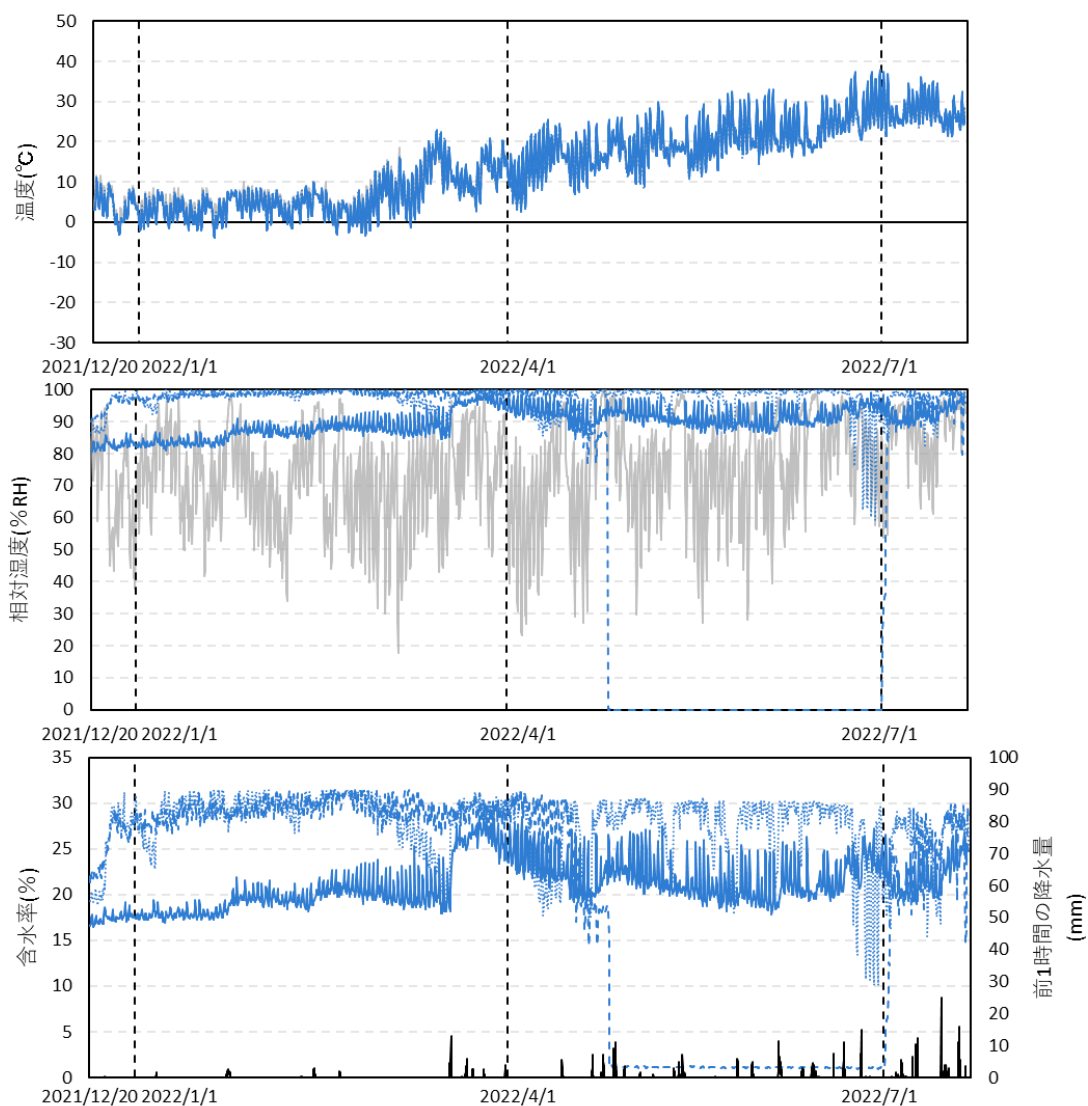


図 3.113 屋外平置き 5層5プライ CLT 試験体の計測値



### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

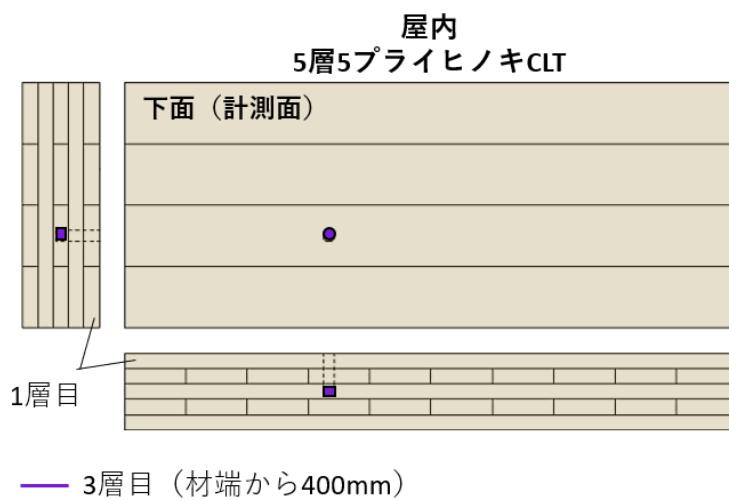
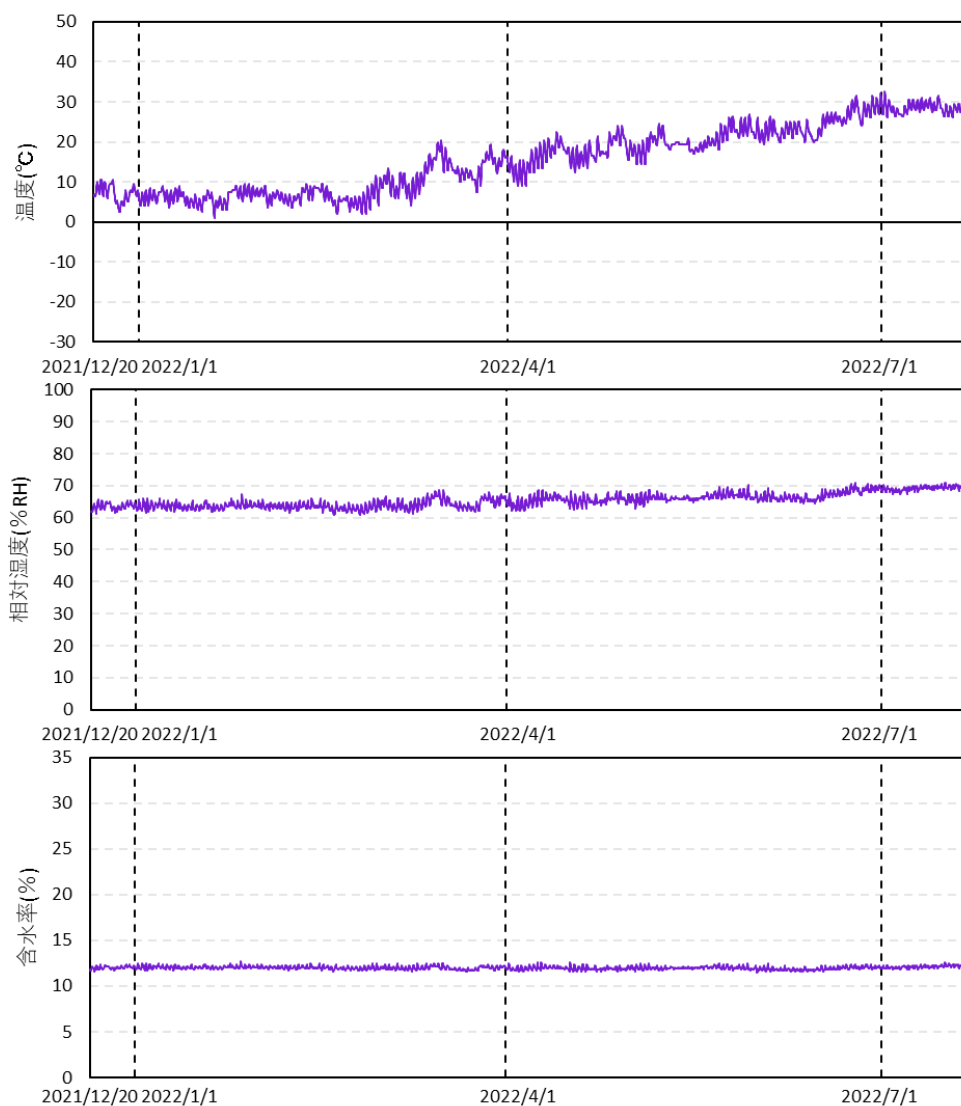


図 3.114 屋内5層5プライCLTの計測値



写真 3.44 計測を中止した計測点の様子 (2022年9月16日)

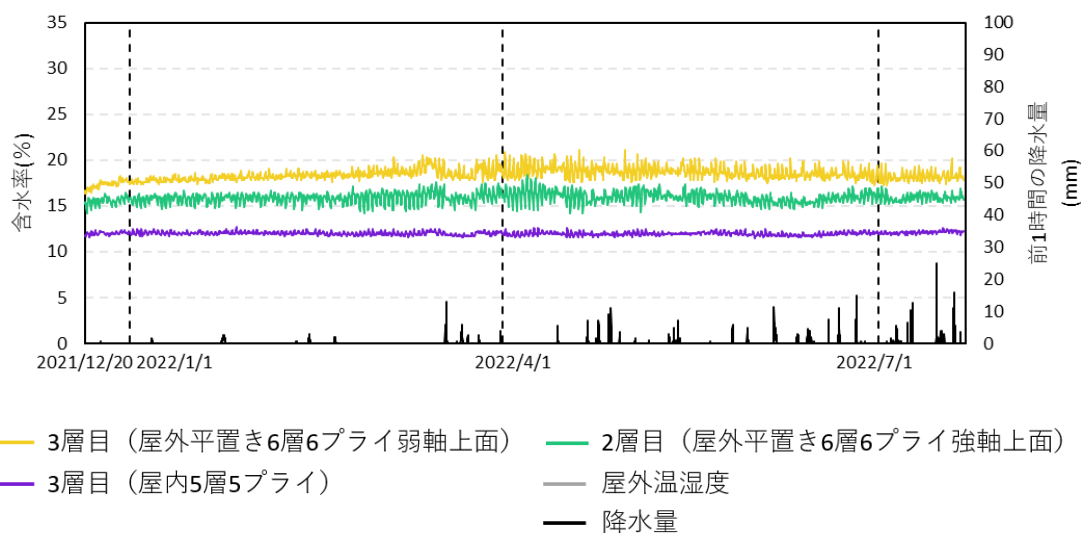


図 3.115 各試験体材端から400mm計測点の計測値 (変動が小さかったもの)

### 第3章 屋外暴露実験での内部含水率変動

#### 3.2.8. まとめ

暴露の条件（屋内外、CLT 構成）と内部含水率変動との関係を得ることを目的とし、暴露開始から1年以上経過していた5層5プライのヒノキ CLT、6層6プライのヒノキ CLT、の2種類の材料の暴露実験を大分市でおこなった。

その結果、暴露開始から1年以上経過しており幅の広い割れが多く、材端から距離の近い計測点や、材端から400mm離れていても設置時の上層からの距離が近い計測点は外部環境の影響を強く受ける結果となった。

外部環境の影響が小さかった計測点は、材端から400mmの距離で、6層6プライ（弱軸上面）3層目計測点では14～18%、6層6プライ（強軸上面）2層目計測点では16～20%の間と、屋内試験体の含水率（12%程度）より高い状態で推移していた。

### 3.5. 3章のまとめ

第3章では、Mass Timber の内、CLT と集成材の屋外暴露時の内部含水率変動を第2章で検討した温湿度センサを用いた含水率計測方法で計測した。

3.2 節の旭川と都城での屋外暴露実験では、無処理スギ CLT、無処理スギ集成材、薬剤処理スギ CLT の3種類の材料を屋内、屋外平置き、屋外縦置き、屋根付き平置き、屋根付き縦置きの5条件で暴露し、それぞれの条件の内部含水率変動を比較した。その結果全ての設置条件で、材端（計測している層のラミナの木口）からの距離によって含水率変動の大きさが異なり、材端からの距離が遠いほど含水率変動が小さくなることがわかった。また屋根付き試験体では、屋根なしの試験体よりも含水率変動が大幅に小さく、材端から 30mm の計測点であっても 25%を超えるような含水率は極端な大雨の日を除き計測されなかった。このことより屋外使用時に直接雨水が材料にかからないような設置方法であれば、木口付近であっても1年間の暴露で腐朽が懸念されるような高含水率状態になりにくいことがわかった。薬剤処理 CLT に関しては、冬季の割れによる無処理計測点の影響が少なかった都城試験体で比較すると、材端計測点と中央計測点のどちらも薬剤処理 CLT の変動の方が大きいことがわかった。これはインサイジング処理によって無処理よりも多く水分流入が起るためと考えられ、インサイジング処理を伴う薬剤処理は含水率的には不利に働くことが判明した。今後、この含水率状態で腐朽の発生を抑制できるかが検討項目である。

3.3 節の東広島での屋外暴露実験では、インサイジングがある無処理のスギ CLT、インサイジングがある無処理のカラマツ CLT、薬剤処理（深浸潤処理）を4面施したスギ CLT、薬剤処理（深浸潤処理）を6面施したスギ CLT の4種類の材料を屋外平置きで暴露し、それぞれの条件の内部含水率変動を比較した。その結果、材端から 30mm 計測点と 80mm 計測点を試験体条件ごとに比較すると、スギ無処理、スギ4面処理、カラマツ無処理の順に変動が小さくなっていることがわかった。スギ試験体の薬剤処理の有無によって含水率変動に違いが生じた理由としては、薬剤処理によるものではなく計測点のあったラミナの心材か辺材かの違いによるものではないかと考えている。

3.4 節の大分での屋外暴露実験では、暴露開始から1年以上経過していた5層5プライのヒノキ CLT、6層6プライのヒノキ CLT、の2種類の材料を屋外平置きで暴露し、それぞれの条件の内部含水率変動を比較した。暴露開始から1年以上経過していたこともあり、試験体全体に割れが多く、計測点内部まで雨水が侵入し正確な計測値を得られない計測点が多かった。外部環境の影響が小さかった計測点は、材端から 400mm の距離で、6層6プライ（弱軸上面）3層目計測点では 14~18%、6層6プライ（強軸上面）2層目計測点では 16~20%の間と、屋内試験体の含水率（12%程度）より高い状態で推移していた。暴露期間が長くなると材端から十分に距離が離れた計測点でも含水率が上昇することがわかった。

## 第 4 章

### 暴露 CLT ・ 集成材の強度試験

## 4. 暴露 CLT・集成材の強度試験

### 4.1. はじめに

Mass Timber は、構造用部材として数十年以上の供用期間を前提としており耐久性が必要とされている。この耐久性を左右する要因として接着耐久性が重視されている。集成材及び単板積層材 (LVL) では、屋内暴露供用期間中の接着せん断強度変化が報告されている<sup>4-1)</sup>。その結果から日本農林規格 (JAS) に遵守した材料を屋内で適切に使用する場合は、その性能に問題が生じないことが明らかになっている。

しかし、屋外環境や基礎付近で長期間使用される木質系材料は、風雨や日射、湿気などで接着剤と木材がともに劣化することが考えられる。屋外暴露での供用期間中の接着せん断強度変化に関して、集成材では柳川ら<sup>4-2)</sup>が報告している。一方、CLT では繊維方向の異なるラミナが積層接着されているため、各層の膨潤収縮が異なり、屋外環境下では接着層により多くのダメージが蓄積されている可能性が考えられる。そこで屋外暴露や促進劣化処理による強度変化に関して様々な検討がおこなわれている<sup>4-3)や4-4)</sup>。しかし現状の研究では、設置環境や場所のバリエーションが少ないため、より様々な屋外環境でのデータを蓄積する必要があると考える。

そこで本章では、屋外暴露環境での CLT 及び集成材の強度性能変化を明らかにするため、3.2 節で報告した暴露実験の試験体で強度試験 (全面圧縮試験・支圧試験・接着せん断試験) を実施したため、その結果を報告する。

## 4.2. 試験の概要

図 4.1 に今回実施した試験の種類を示す。本試験は 3.2 節で報告した、屋外暴露試験体から試験体を採材している。本章では、無処理 CLT と無処理集成材の暴露開始約 6 か月暴露時点で取り出した試験体から採材した強度試験体（以下、半年暴露試験体）の結果及び、約 1 年暴露時点で取り出した試験体から採材した強度試験体（以下、1 年暴露試験体）の結果を一部（集成材ブロックせん断試験体と CLT45° ブロックせん断試験体）示す。各試験体の暴露概要は 3.2.3 に示す通りで、屋内・屋外平置き・屋外縦置き・屋根付き平置き・屋根付き縦置きの各設置条件から 1 体ずつ暴露試験体を取り出して強度試験体を採材した。CLT 強度試験は接着せん断試験（CLT ブロックせん断試験体、CLT45° ブロックせん断試験体）、支圧試験（弱軸方向、強軸方向）、全面圧縮試験の 3 種類で、集成材強度試験体は接着せん断試験と支圧試験の 2 種類となっている。接着せん断試験は接着面積が 30mm×30mm の椅子型ブロックせん断試験を採用した。CLT のブロックせん断試験では、石原ら<sup>44)</sup>の研究で検討されているように、繊維方向に加力する層と繊維直交方向に加力する層を持つ試験体（以下、CLT ブロックせん断試験体）と 45° 方向に加力する試験体（以下、CLT45° ブロックせん断試験体）の 2 種類を実験した。

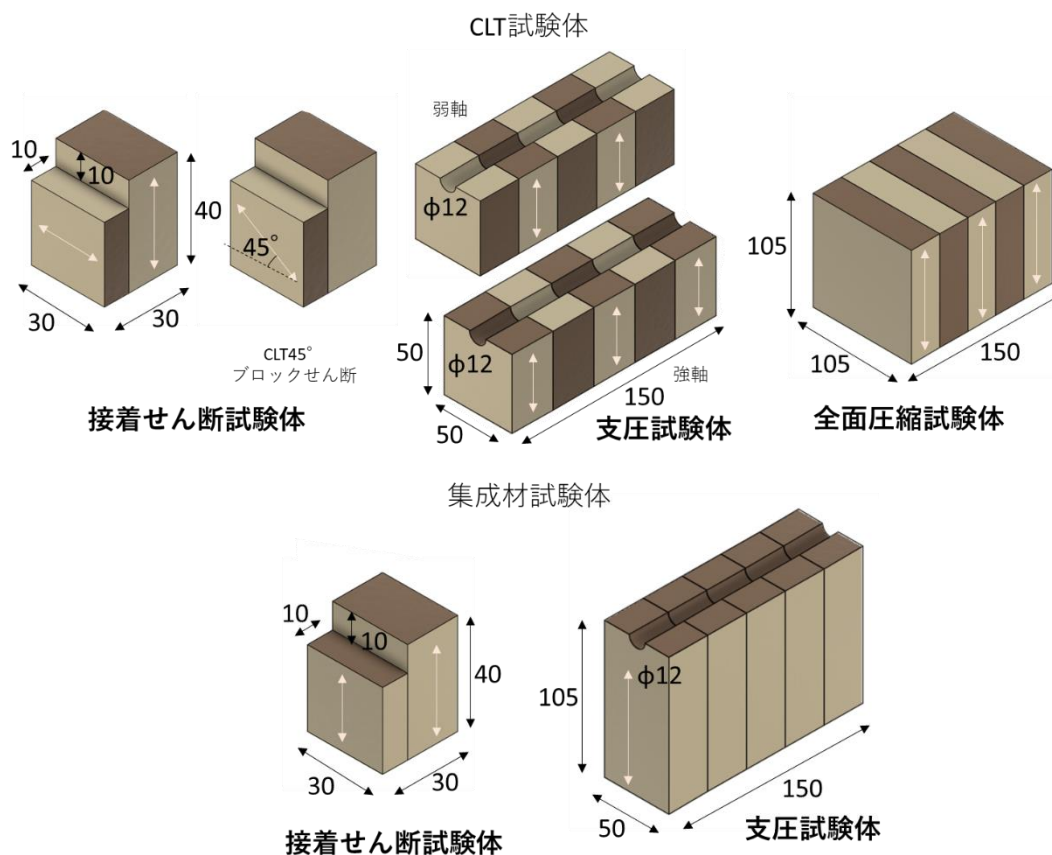


図 4.1 強度試験体

## 第4章 暴露 CLT・集成材の強度試験

### 【CLT 強度試験体の採材】

表 4.1 に各強度試験の試験体数を、図 4.2 に半年暴露試験体の設置条件ごとの強度試験体の採材位置を、図 4.3 に1年暴露試験体の設置条件ごとの強度試験体の採材位置を示す。CLT 強度試験体は、150×350×1000mm(厚さ×幅×長さ)の暴露試験体を150×105×105mmのブロック20体に切り分け、そのブロックから強度試験体を切り出した。設置時に試験体端部に位置していたブロックと中央付近に位置していたブロックとで比較できるように、強度試験の種類を割り振った。

表 4.1 各強度試験の試験体数

#### 半年暴露試験体

CLT	CLTブロックせん断			CLT45°ブロックせん断			支圧強軸方向			支圧弱軸方向			全面圧縮			
	中央	北/下	南/上	中央	北/下	南/上	50mm	150mm	200mm	0mm	50mm	150mm	中央	北/下	南/上	
旭川	屋内	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	1	1	1	
	屋外平置き	4	2	4	4	4	北2	北2	北2	北2	北2	北2	1	1	1	
	屋外縦置き	4	4	4	4	4	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	1	1	1	
	屋根付き平置き	4	4	4	4	4	北2	北2	北2	北2	北2	北2	1	1	1	
	屋根付き縦置き	4	4	4	4	4	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	1	1	1	
都城	屋内	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	1	1	1	
	屋外平置き	4	4	4	4	4	北2	北2	北2	北2	北2	北2	1	1	1	
	屋外縦置き	4	4	4	4	4	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	1	1	1	
	屋根付き平置き	4	4	4	4	4	北2	北2	北2	北2	北2	北2	1	1	1	
	屋根付き縦置き	4	4	4	4	4	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	1	1	1	
				計110			計111			計84			計84			計28

※全試験体終了

#### 1年暴露試験体

CLT	CLTブロックせん断				CLT45°ブロックせん断				支圧強軸方向			支圧弱軸方向			全面圧縮			
	中央	北/下	南/上	層違い	中央	北/下	南/上	層違い	50mm	150mm	200mm	0mm	50mm	150mm	中央	北/下	南/上	
旭川	屋内	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	屋外平置き	4	4	4	4	4	4	4	4	北2	北2	北2	北2	北2	北2	1	1	1
	屋外縦置き	4	4	4	4	4	4	4	4	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	1	1	1
	屋根付き平置き	4	4	4	4	4	4	4	4	北2	北2	北2	北2	北2	北2	1	1	1
	屋根付き縦置き	4	4	4	4	4	4	4	4	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	1	1	1
都城	屋内	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	屋外平置き	4	4	4	4	4	4	4	4	北2	北2	北2	北2	北2	北2	1	1	1
	屋外縦置き	4	4	4	4	4	4	4	4	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	1	1	1
	屋根付き平置き	4	4	4	4	4	4	4	4	北2	北2	北2	北2	北2	北2	1	1	1
	屋根付き縦置き	4	4	4	4	4	4	4	4	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	上2、下2	1	1	1
				計152				計152			計84			計84			計28	

※灰色に着色したセルは終了した試験体





図 4.2 半年暴露試験体の採材位置

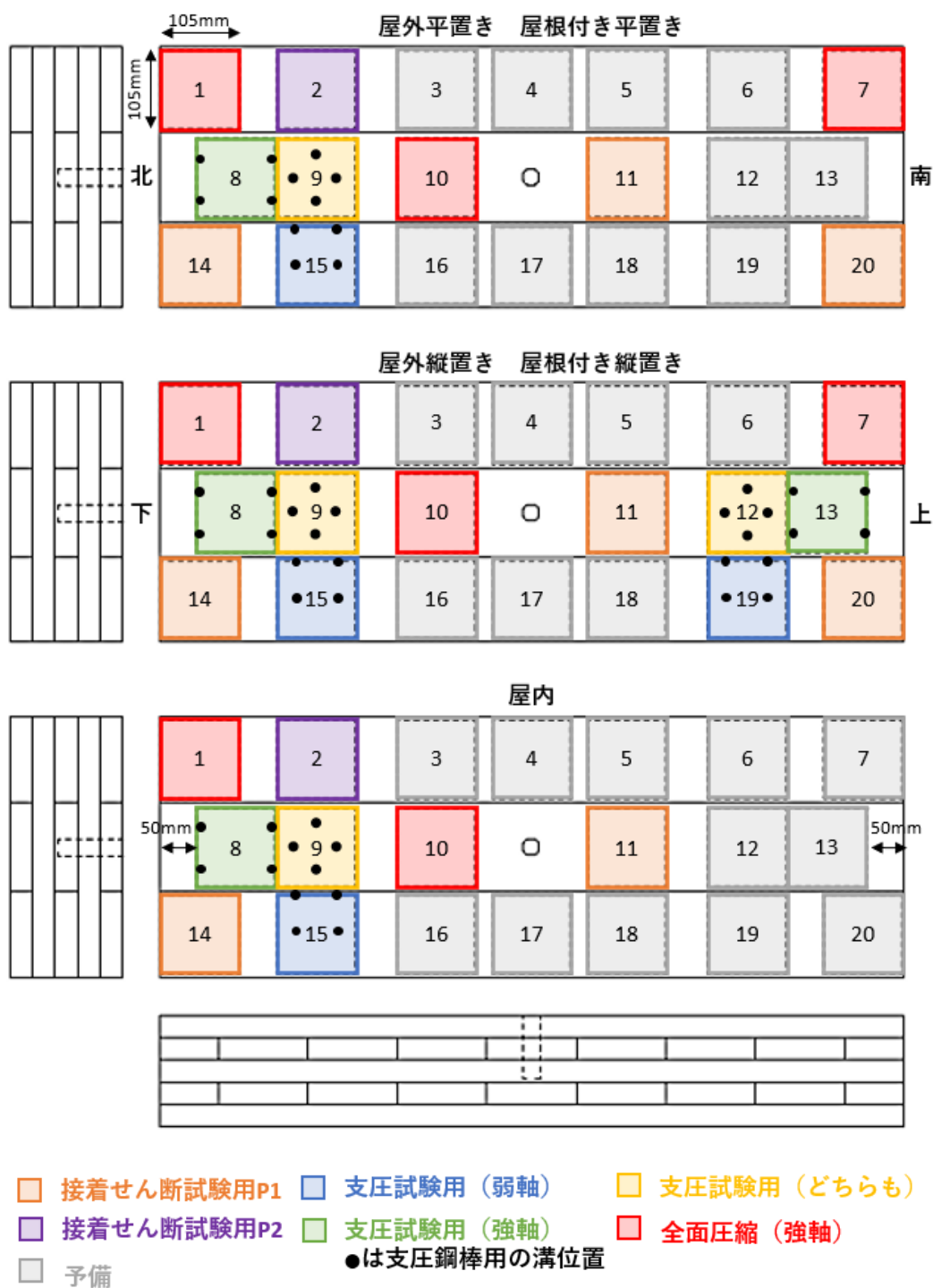


図 4.3 1年暴露試験体の採材位置

図 4.4 から図 4.8 に各試験のブロックからの採材方法を示す。図のブロックの向きと図 4.2 と図 4.3 の向きは一致している。

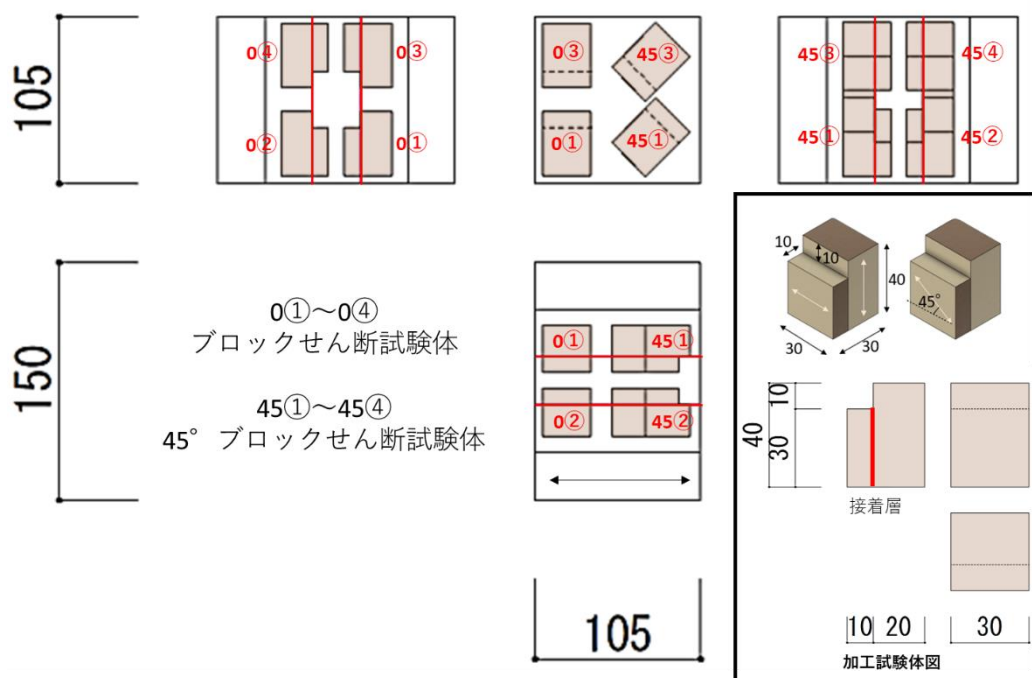


図 4.4 CLT 接着せん断の採材 (P1)

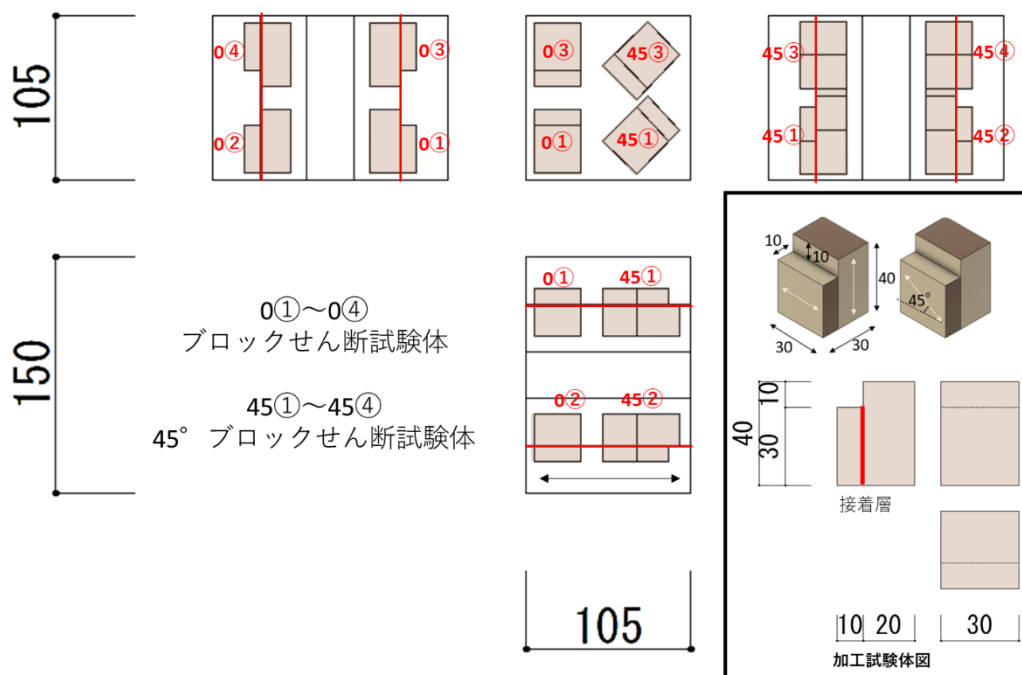


図 4.5 CLT 接着せん断の採材 (P2)

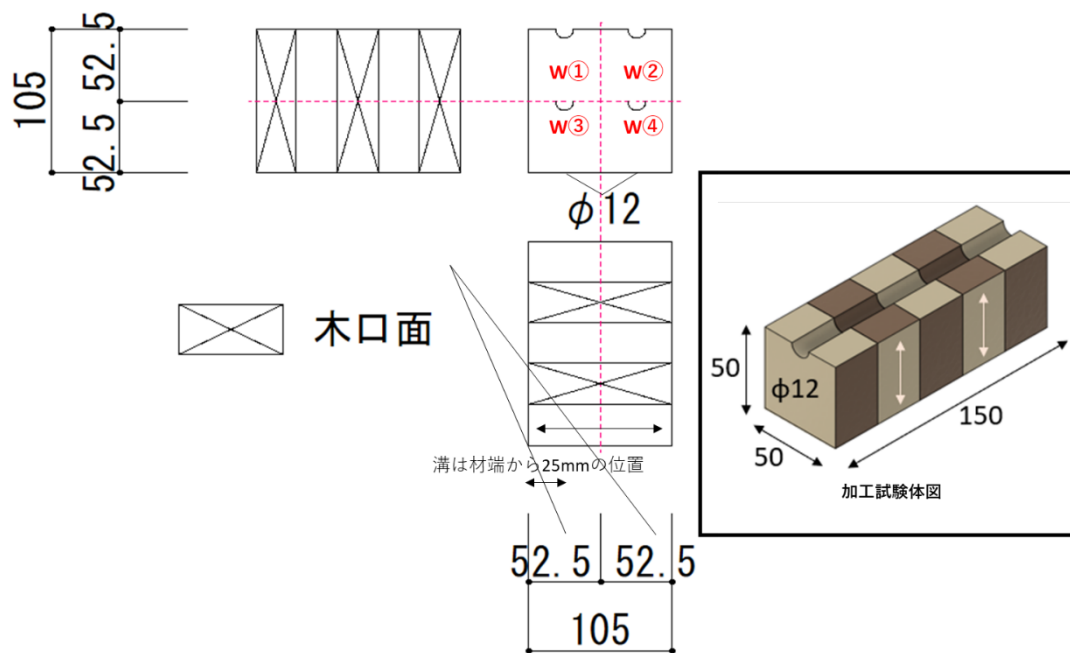


図 4.6 CLT 支圧試験（弱軸）の採材

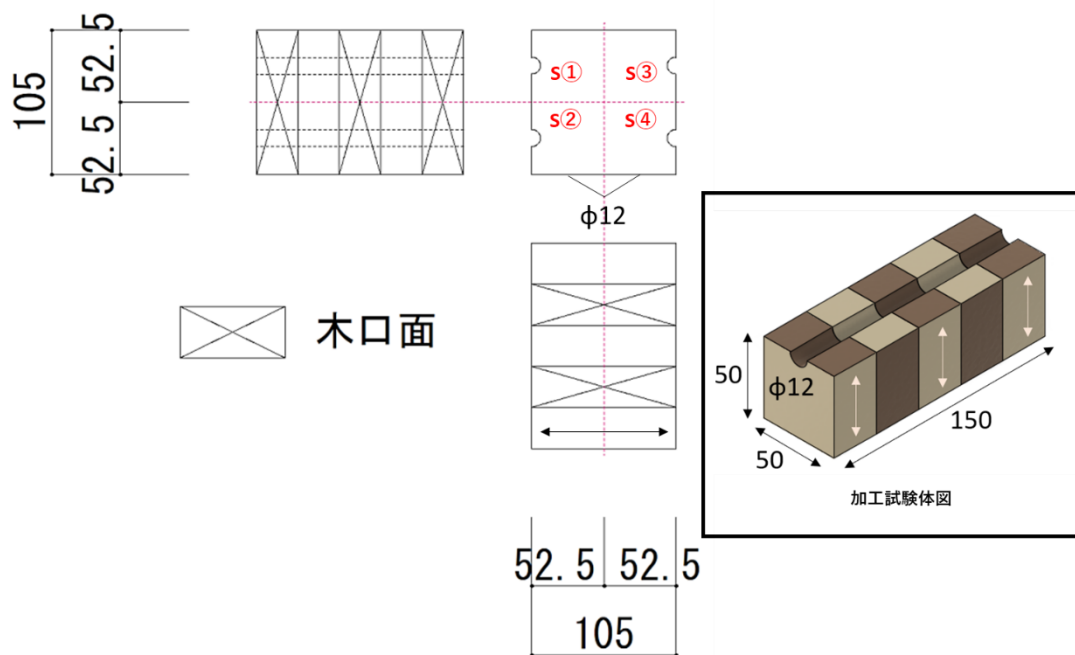


図 4.7 CLT 支圧試験（強軸）の採材

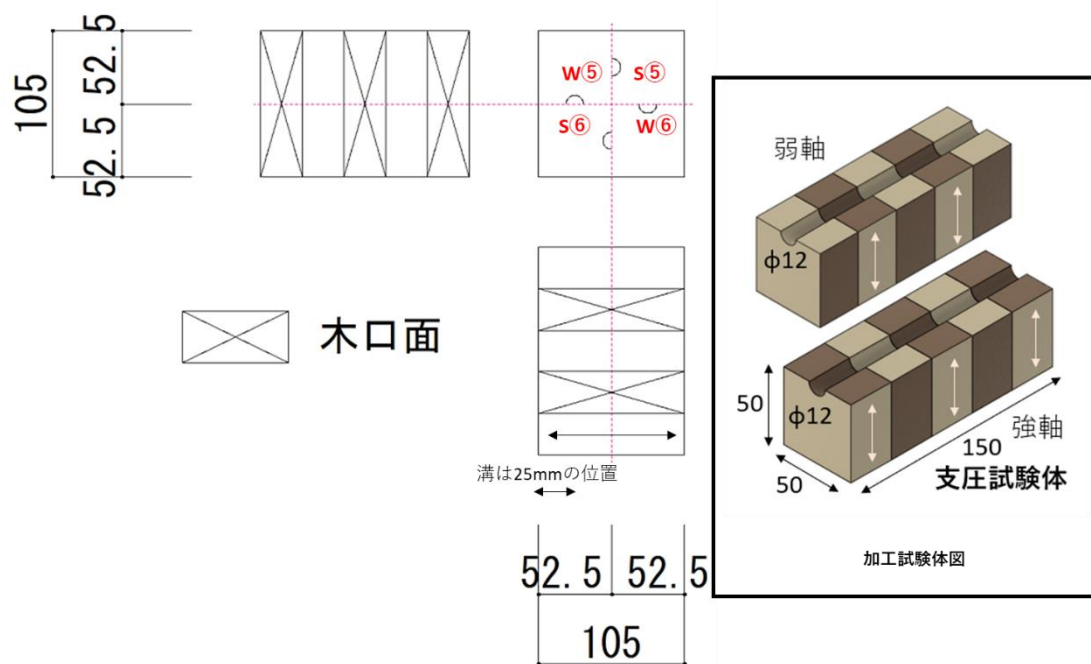


図 4.8 CLT 支圧試験（どちらも）の採材

## 第4章 暴露 CLT・集成材の強度試験

### 【集成材強度試験体の採材】

表 4.2 に各強度試験の試験体数を、図 4.9 に半年暴露試験体の設置条件ごとの強度試験体の採材位置を、図 4.10 に1年暴露試験体の設置条件ごとの強度試験体の採材位置を示す。集成材強度試験体は、150×105×985mm（厚さ×幅×長さ）の暴露試験体を150×105×105mmのブロック8体に切り分け、そのブロックから強度試験体を切り出した。設置時に試験体端部に位置していたブロックと中央付近に位置していたブロックとで比較できるように、強度試験の種類を割り振った。

表 4.2 各強度試験の試験体数

#### 半年暴露試験体

集成材		集成材ブロックせん断			支圧		
		中央	北/下	南/上	105mm	210mm	315mm
旭川	屋内	8		8	2	2	
	屋外平置き	8		8	南2	南2	
	屋外縦置き	8	8	8	上2	上2、下2	下2
	屋根付き平置き	8		8	南2	南2	
	屋根付き縦置き	8	8	8	上2	上2、下2	下2
都城	屋内	8		8	2	2	
	屋外平置き	8	8		北2	北2	
	屋外縦置き	8	8	8	下2	上2、下2	上2
	屋根付き平置き	8	8		北2	北2	
	屋根付き縦置き	8	8	8	下2	上2、下2	上2
			計192	計56			

※全試験体終了

#### 1年暴露試験体

集成材		集成材ブロックせん断			支圧	
		中央	北/下	南/上	105mm	210mm
旭川	屋内	8		8	2	2
	屋外平置き	8		8	北2	北2
	屋外縦置き	8	8	8	上2、下2	上2、下2
	屋根付き平置き	8		8	北2	北2
	屋根付き縦置き	8	8	8	上2、下2	上2、下2
都城	屋内	8		8	2	2
	屋外平置き	8		8	北2	北2
	屋外縦置き	8	8	8	上2、下2	上2、下2
	屋根付き平置き	8		8	北2	北2
	屋根付き縦置き	8	8	8	上2、下2	上2、下2
			計192	計56		

※灰色に着色したセルは終了した試験体

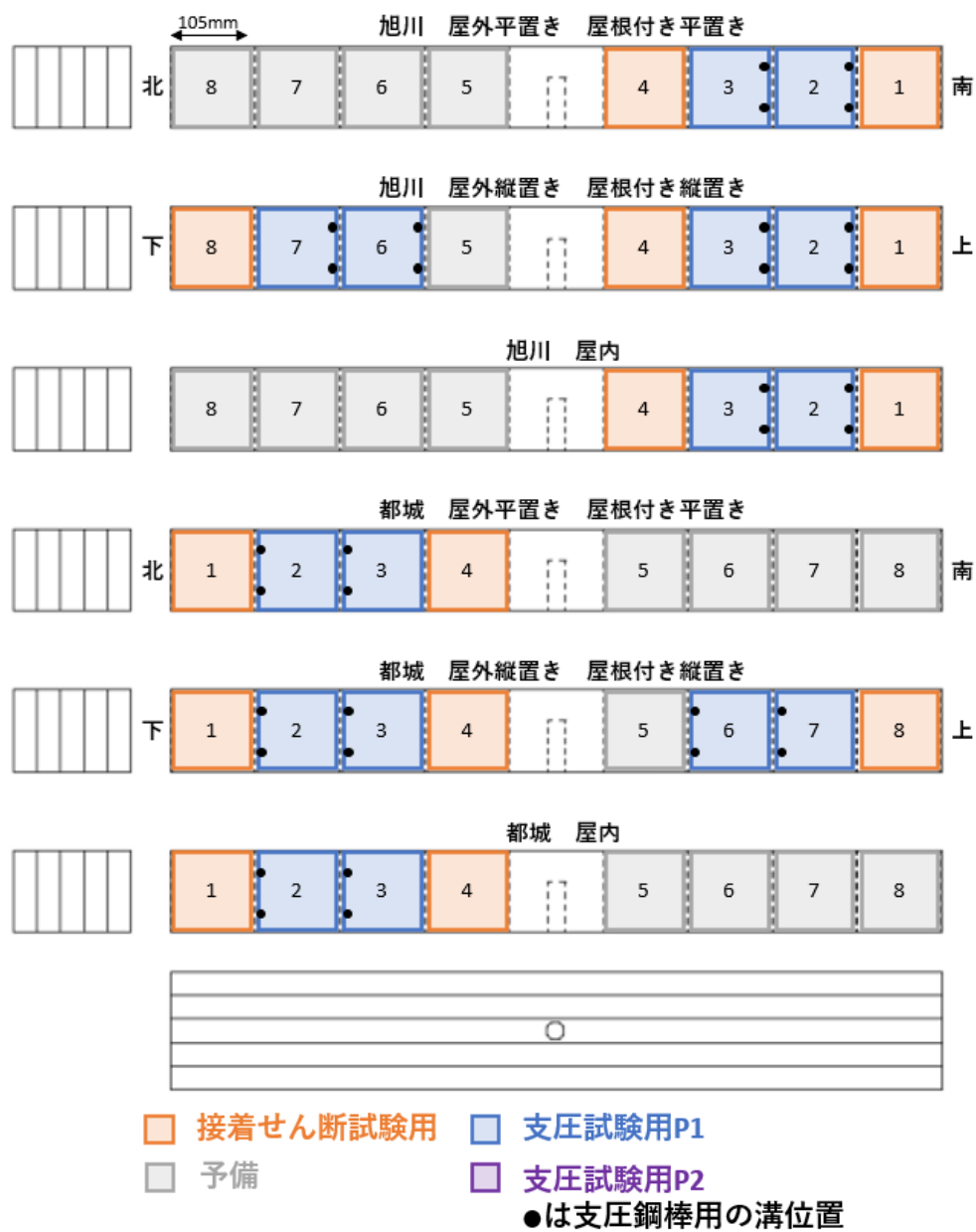


図 4.9 半年暴露試験体の採材位置

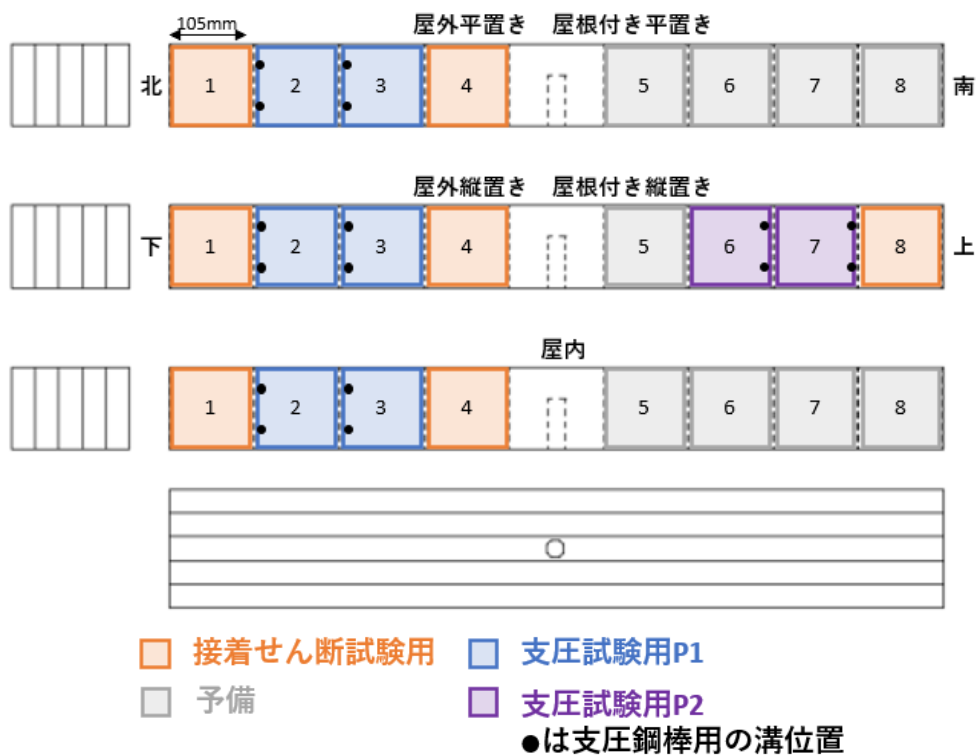


図 4.10 1年暴露試験体の採材位置



図 4.11 から図 4.13 に各試験のブロックからの採材方法を示す。図のブロックの向きと図 4.9 と図 4.10 の向きは一致している。

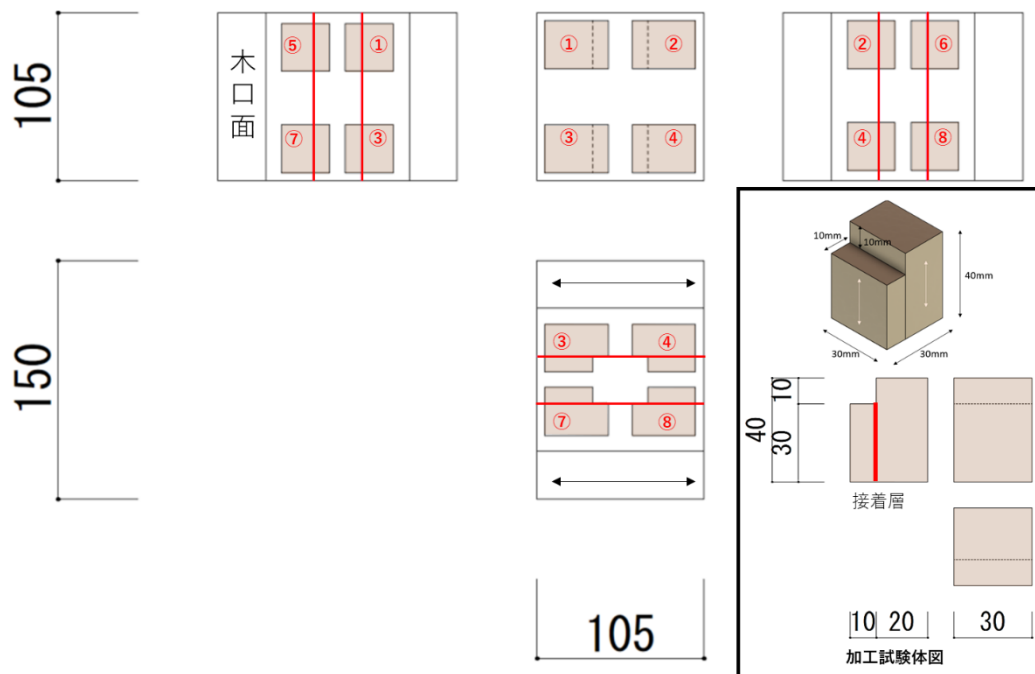


図 4.11 集成材接着せん断の採材

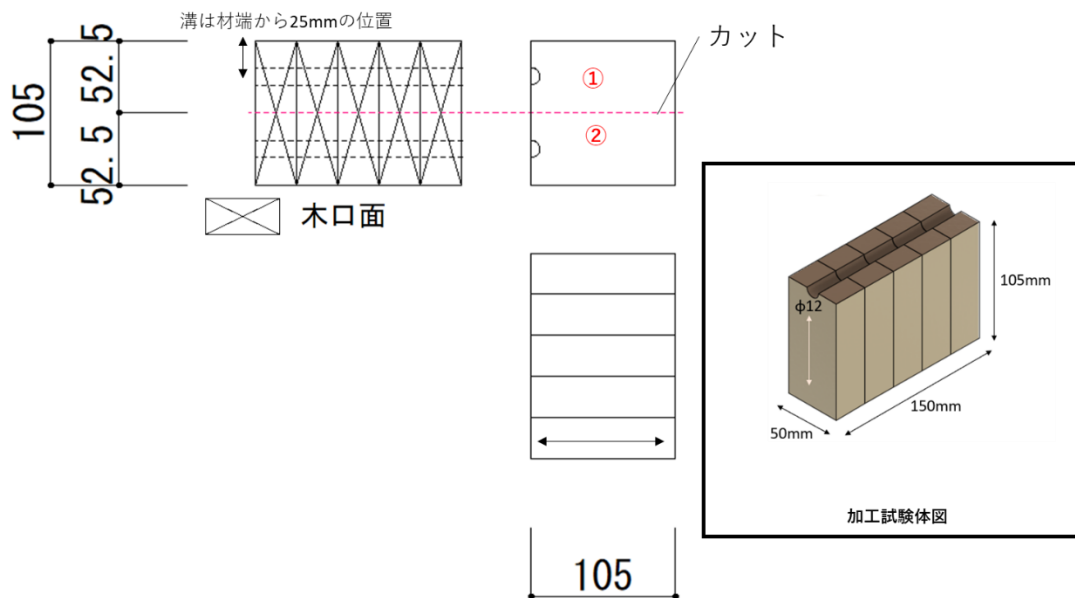


図 4.12 集成材支圧試験 (P1) の採材

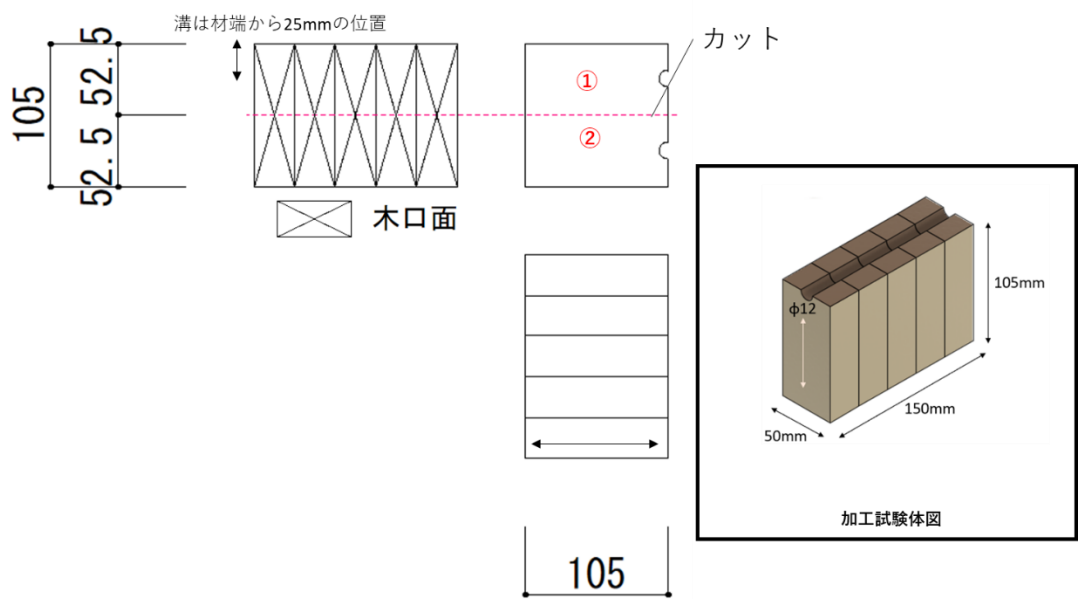


図 4.13 集成材支圧試験 (P2) の採材

### 4.3. 全面圧縮試験

#### 4.3.1. 試験概要

図 4.14 に試験体概要を示す。全面圧縮試験は、 $150 \times 105 \times 105\text{mm}$  の試験体を強軸方向に載荷した。写真 4.1 に試験体の載荷の様子を示す。計測は加力鉄板の変位を2点と、試験体中央  $40\text{mm}$  の標点間変位（ナイフエッジをもつ治具で計測）を2点、どちらも CDP25（東京測器研究所）で計測した。載荷は  $1000\text{kN}$  圧縮試験機（前川試験機製作所）で実施し、 $0.8P_{max}$  まで荷重が低下した時点で載荷を終了した。試験体数は28体（各暴露試験地14体ずつ）とした。試験体は暴露試験地で加工した後、試験前2週間同じ実験室内で静置した。

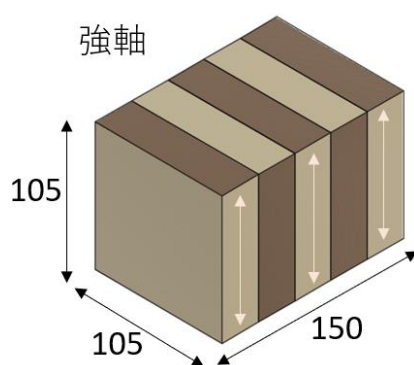


図 4.14 試験体概要



写真 4.1 載荷の様子

4.3.2. 破壊性状

写真 4.2 に半年暴露試験体の破壊性状を示す。約半数の試験体は試験体中央で破壊した。しかし、標点間距離変形の計測のために使用していた治具のエッジ付近で破壊する試験体や試験体中央にある節を避けるように破壊する試験体が、どちらの暴露試験地でも数体存在した。標点間距離の計測方法を以降の試験体では変更する必要があると考える。



写真 4.2 全面圧縮試験の破壊性状（半年暴露試験体）

4.3.3. 試験結果

【荷重変形関係】

図 4.15 に加力鉄板の変位（全体変形）の荷重変形関係を示す。また図 4.16 に標点間変形の荷重変形関係を示す。それぞれの変形は2点計測していた計測値の平均値としている。暴露試験地による差はほとんど見られなかった。全ての試験体で1mm程度変形した時点で最大荷重を迎えている。

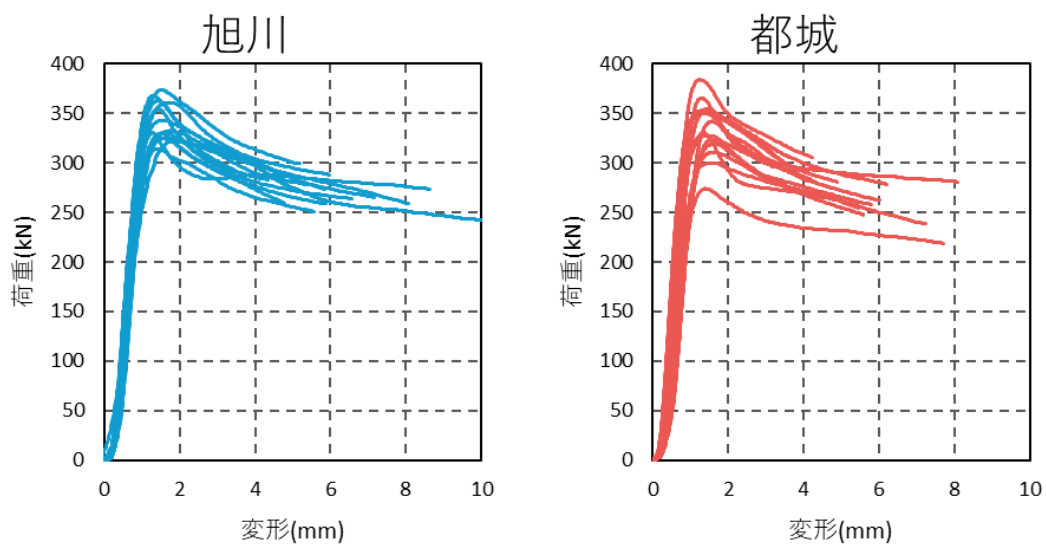


図 4.15 荷重変形関係（全体変形）

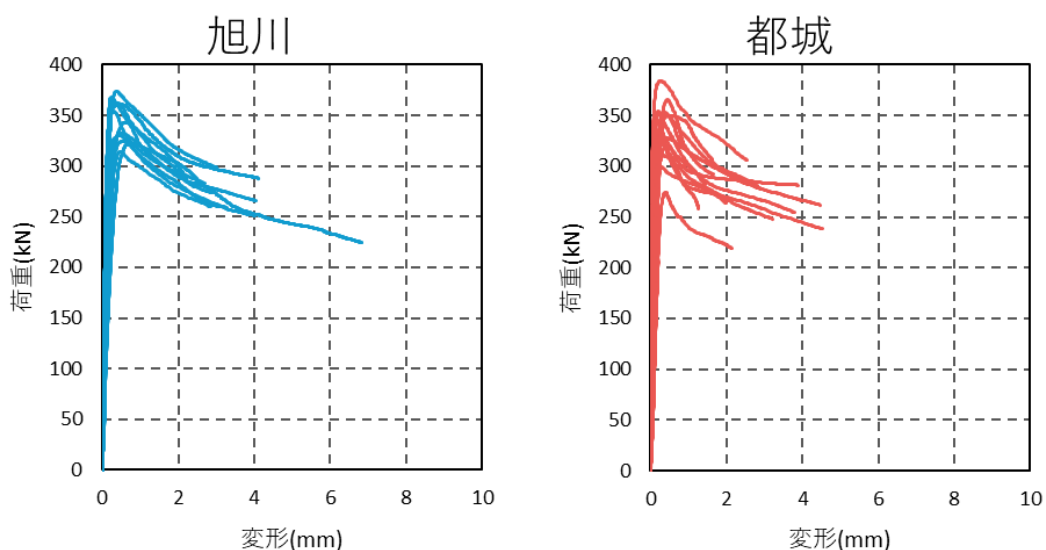


図 4.16 荷重変形関係（標点間変形）

【圧縮強度】

図 4.17 に全面圧縮試験の圧縮強度を示す。圧縮強度は式 4.1 に従って算出した。

半年暴露では設置条件及び試験体採材場所（中央か材端か）による圧縮強度の違いは生じなかった。

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{A} \quad (4.1)$$

$\sigma_{max}$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$P_{max}$  : 最大強度 (N)

A : 圧縮面積 (mm<sup>2</sup>) 試験前に計測した値

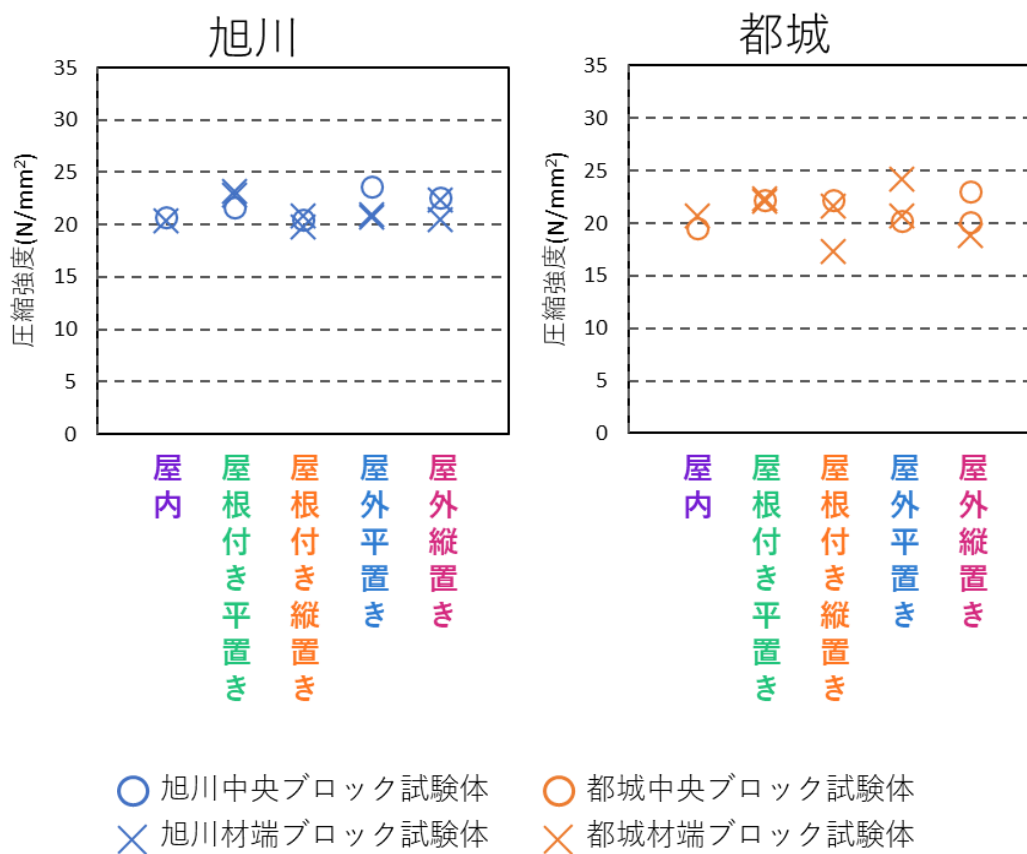


図 4.17 圧縮強度

また図 4.18 に破壊性状によってプロットした圧縮強度を示す。破壊性状の違いによる圧縮強度への影響は見られなかった。なお試験体の試験時の含水率は、旭川暴露試験体の平均が 11.1%、都城暴露試験体の平均が 11.8%で、試験前に同じ環境で養生していたが全体的に都城試験体の方がわずかに高い状態であった。

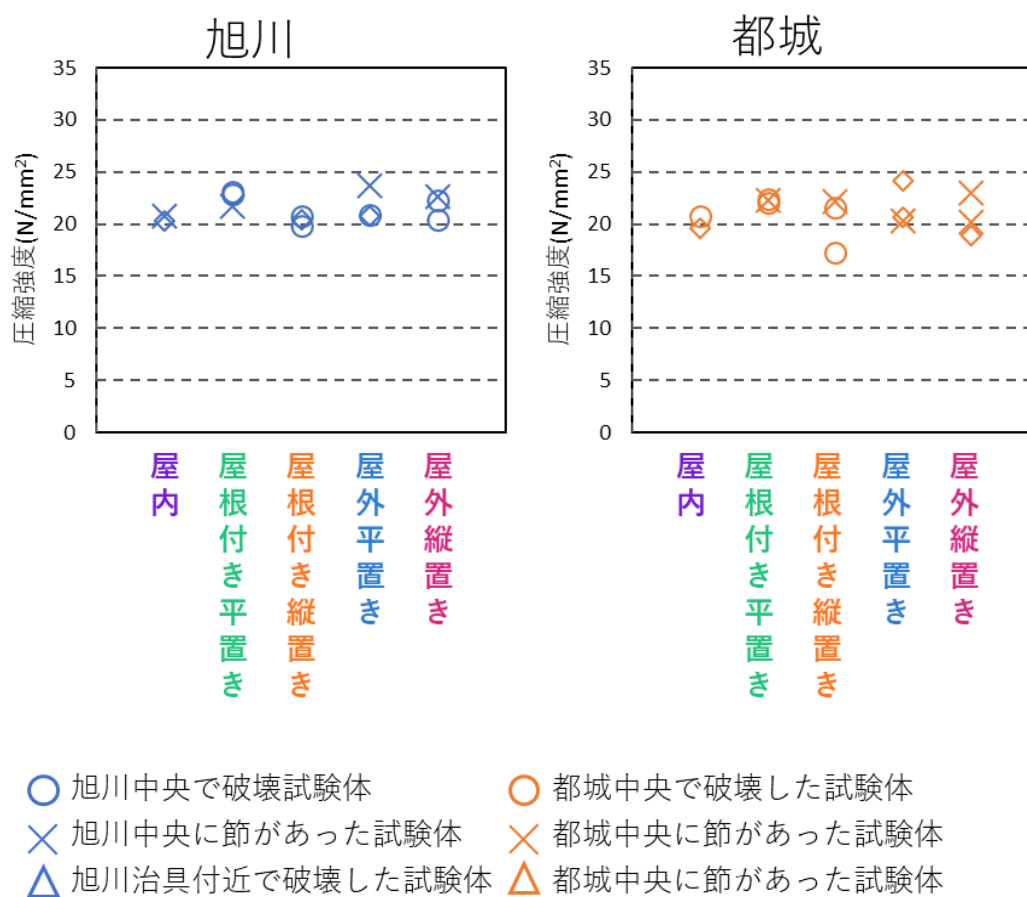


図 4.18 圧縮強度と破壊性状の関係

#### 4.4. 接着せん断試験

##### 4.4.1. 試験概要

図 4.19 に試験体概要を示す。接着せん断試験は、CLT ブロックせん断試験体と CLT45° ブロックせん断試験体、集成材ブロックせん断試験体の3種類、椅子型せん断試験用の治具に設置して実施した。写真 4.3 に試験体の荷重の様子を示す。計測は加力鉄板の変位（半年暴露試験体：1点、1年暴露試験体：2点）を CDP25（東京測器研究所）で計測した。荷重は50kN 万能試験機（INSTRON 4204）を用いて1mm/min で実施した。なお、CLT の試験体は繊維直交方向に加力していた層が多く変形し、うまく荷重をかけられなくなった試験体があったため、その場合には一度荷重が  $0.8P_{max}$  以下に低下した時点で 4mm/min に荷重速度を変更して実験を継続した。試験体は試験前に3週間以上 20°C65%の恒温恒湿器内で養生し、1日の重量変化がなくなったことを確認してから試験を実施した。

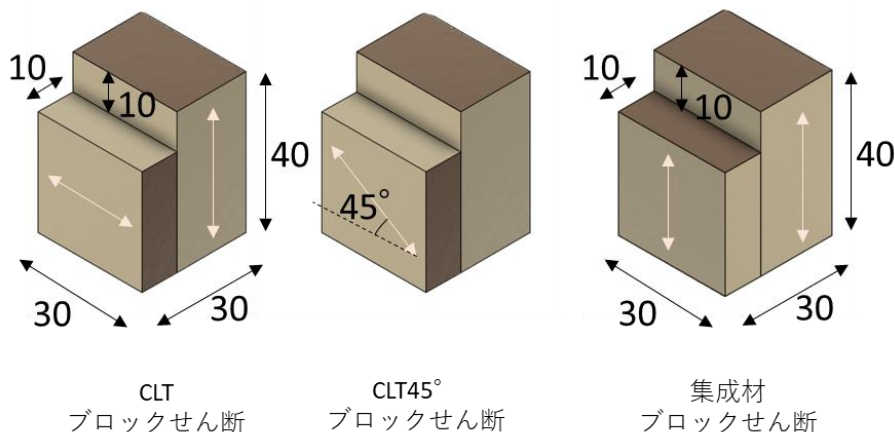
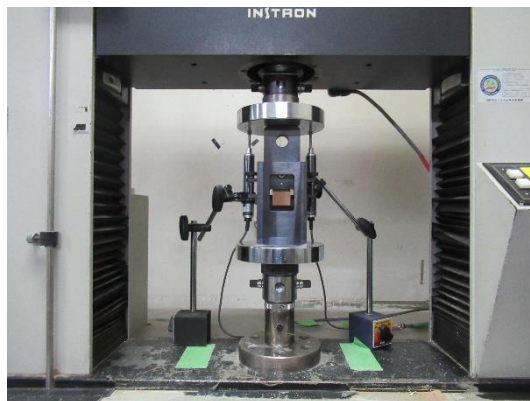


図 4.19 試験体概要



半年暴露試験体



1年暴露試験体

写真 4.3 荷重の様子



4.4.2. 破壊性状

写真 4.4 に接着せん断試験の破壊性状を示す。CLT ブロックせん断試験体は、繊維直交方向に加圧している層のめり込みにより、接着層付近を破壊させることができない試験体が多かった。一方で CLT45° ブロックせん断試験体は、目立っためり込みが生じず接着層付近で破壊した試験体が多かった。集成材ブロックせん断試験体では、ほとんどの試験体が接着層付近で破壊した。半年暴露試験体と1年暴露試験体（CLT45° ブロックせん断試験体と集成材ブロックせん断試験体）とでは、破壊性状に違いはなく、また暴露試験地による破壊性状の違いも見られなかった。

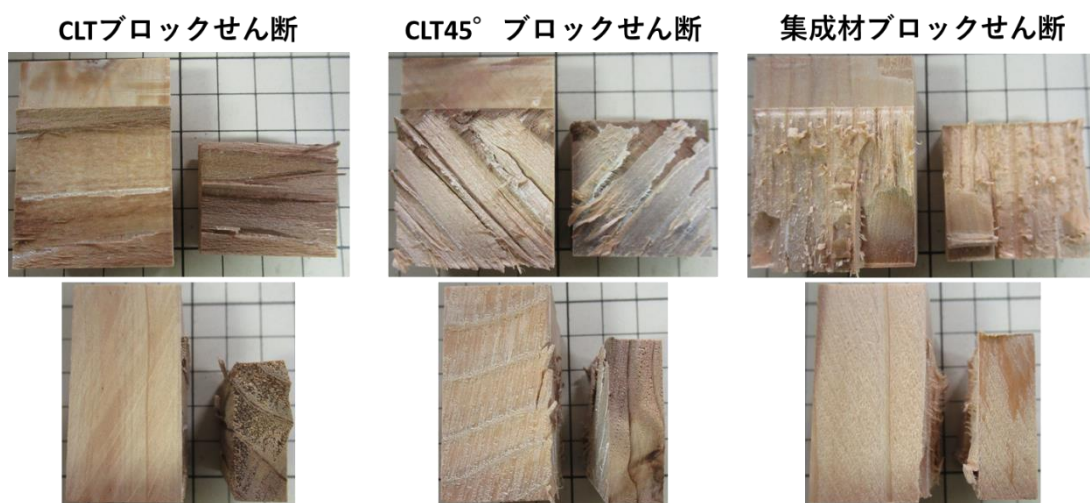


写真 4.4 接着せん断の破壊性状

### 4.4.3. 試験結果

#### 【荷重変形関係】

図 4.20 から図 4.25 に半年暴露試験体の荷重変形関係を、図 4.26 から図 4.29 に1年暴露試験体の荷重変形関係を示す。暴露期間及び暴露試験地による荷重変形関係の違いは見られなかった。CLTブロックせん断試験体は、破壊性状でも述べたように繊維直交方向に加力する層でめり込みが起こり、うまく荷重をかけることができなかった。CLT45° ブロックせん断試験体と集成材ブロックせん断試験体はおおむねうまく载荷を行えたが、接着層に節がある場合、最大荷重が極端に高くなったり、载荷直後に破壊したりした。そのため以降の結果では接着層に目視でわかる節があった試験体は除いて示す。

第4章 暴露 CLT・集成材の強度試験

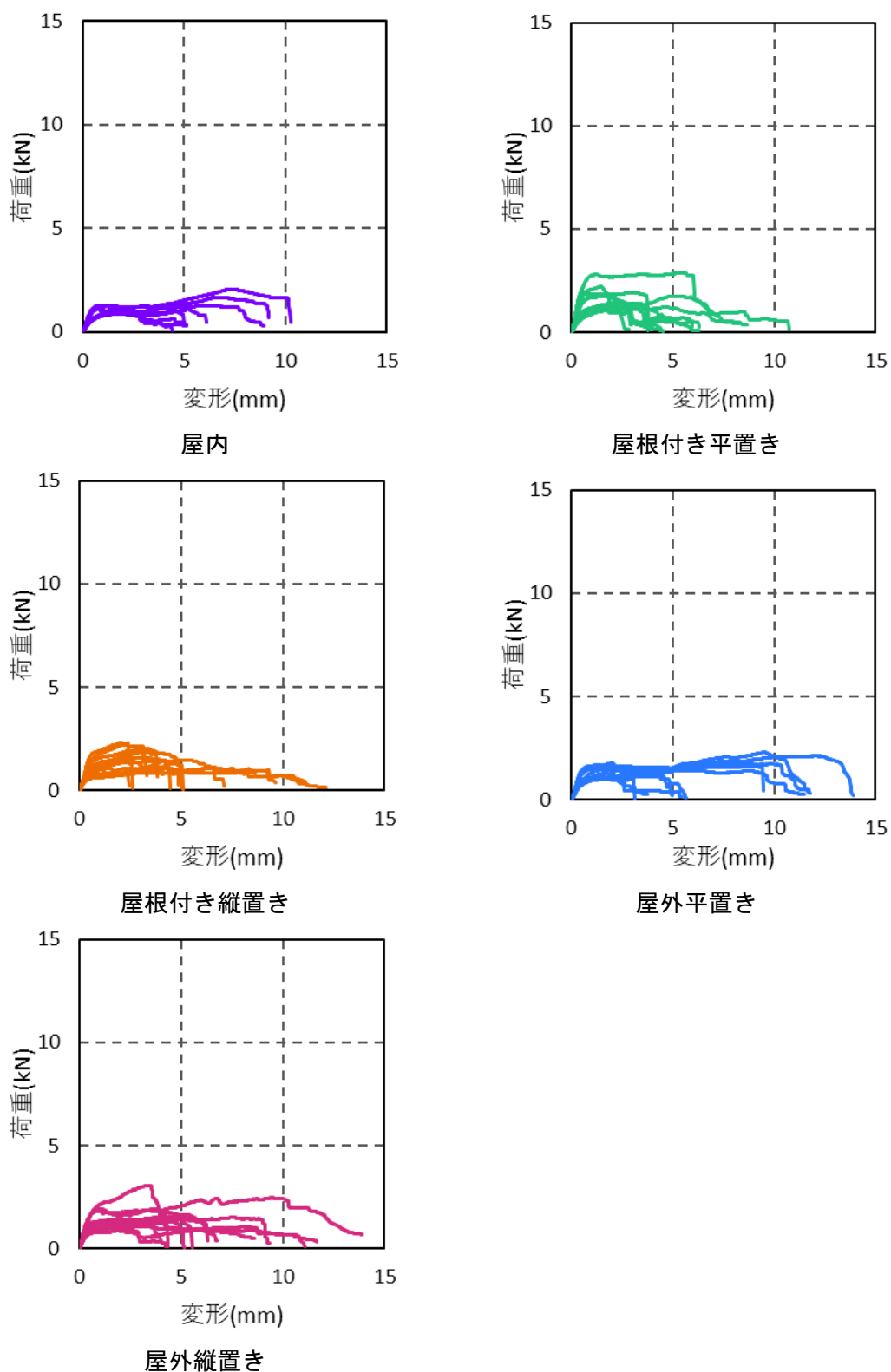


図 4.20 旭川半年暴露 CLT ブロックせん断試験体の荷重変形関係

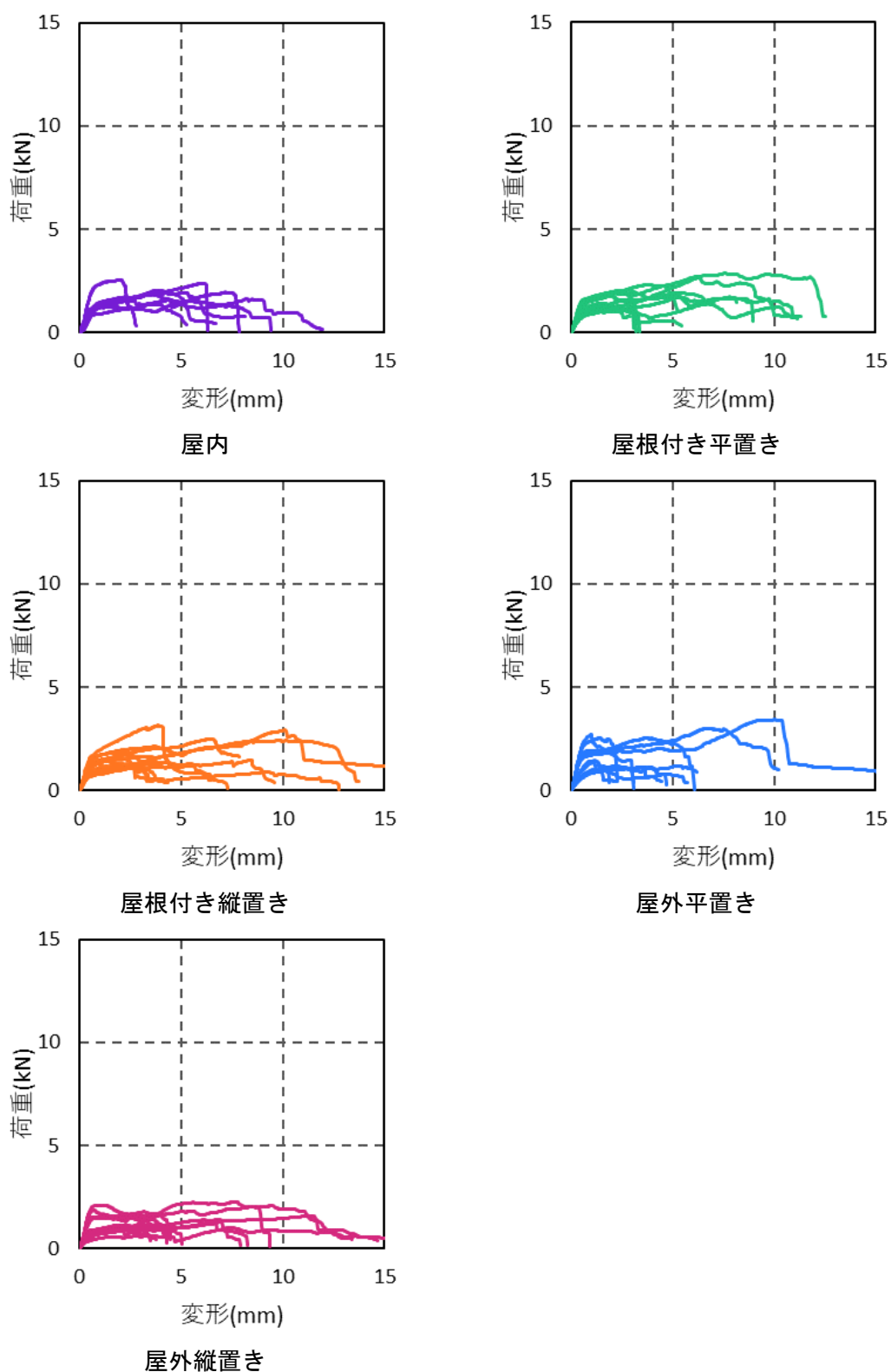


図 4.21 都城半年暴露 CLT ブロックせん断試験体の荷重変形関係

第4章 暴露 CLT・集成材の強度試験

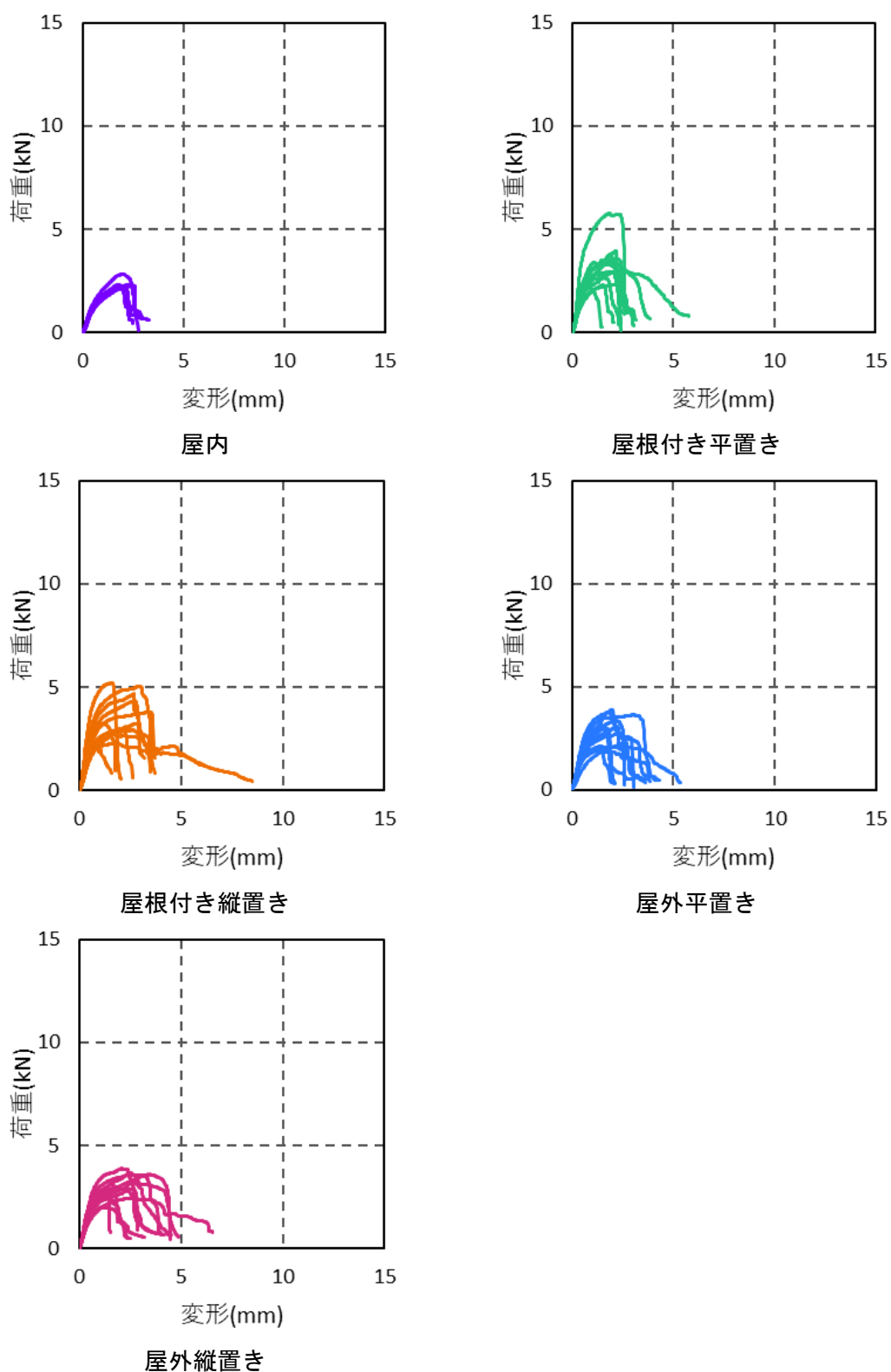


図 4.22 旭川半年暴露 CLT45° 接着せん断試験体の荷重変形関係

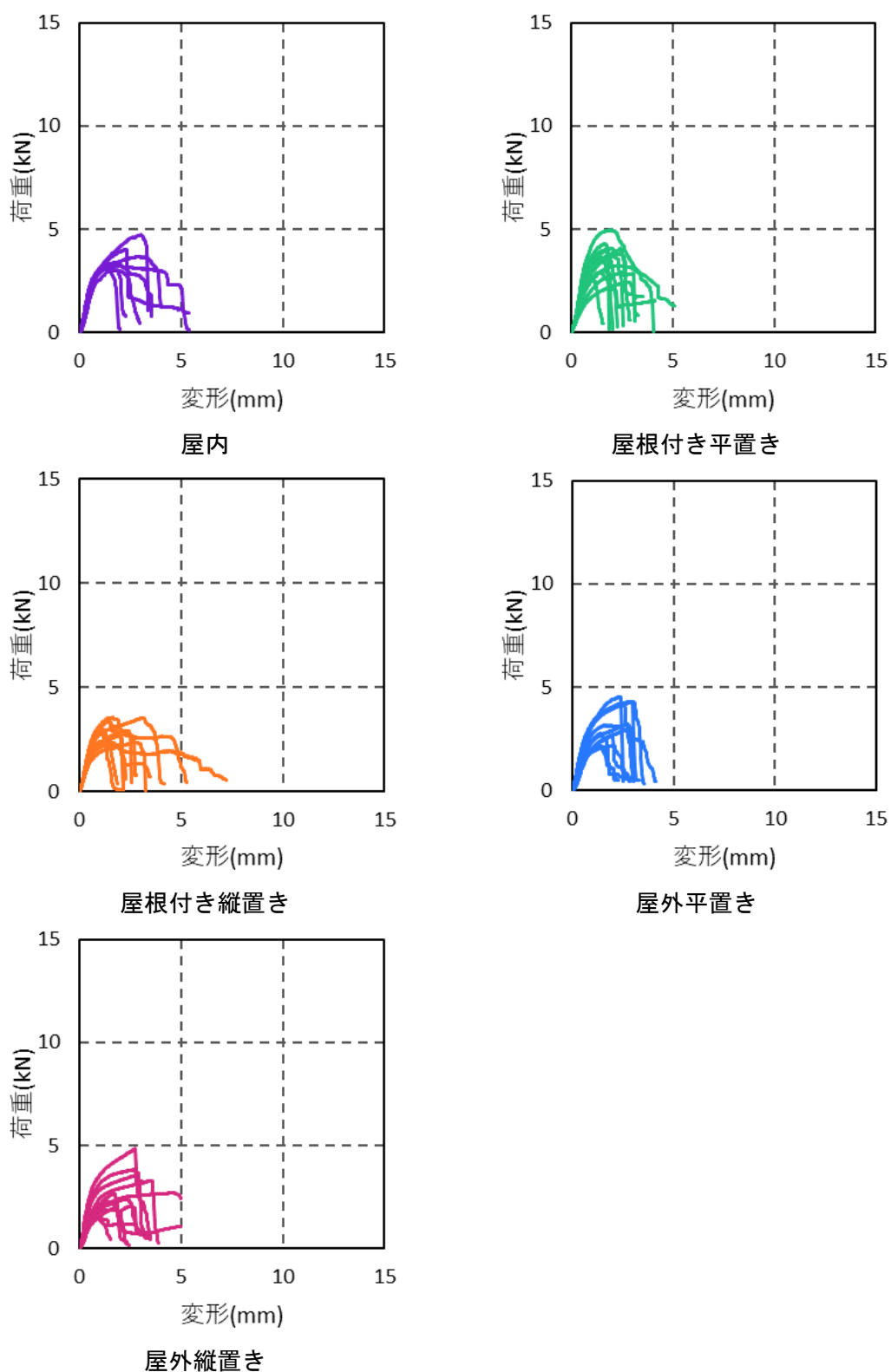


図 4.23 都城半年暴露 CLT45° 接着せん断試験体の荷重変形関係

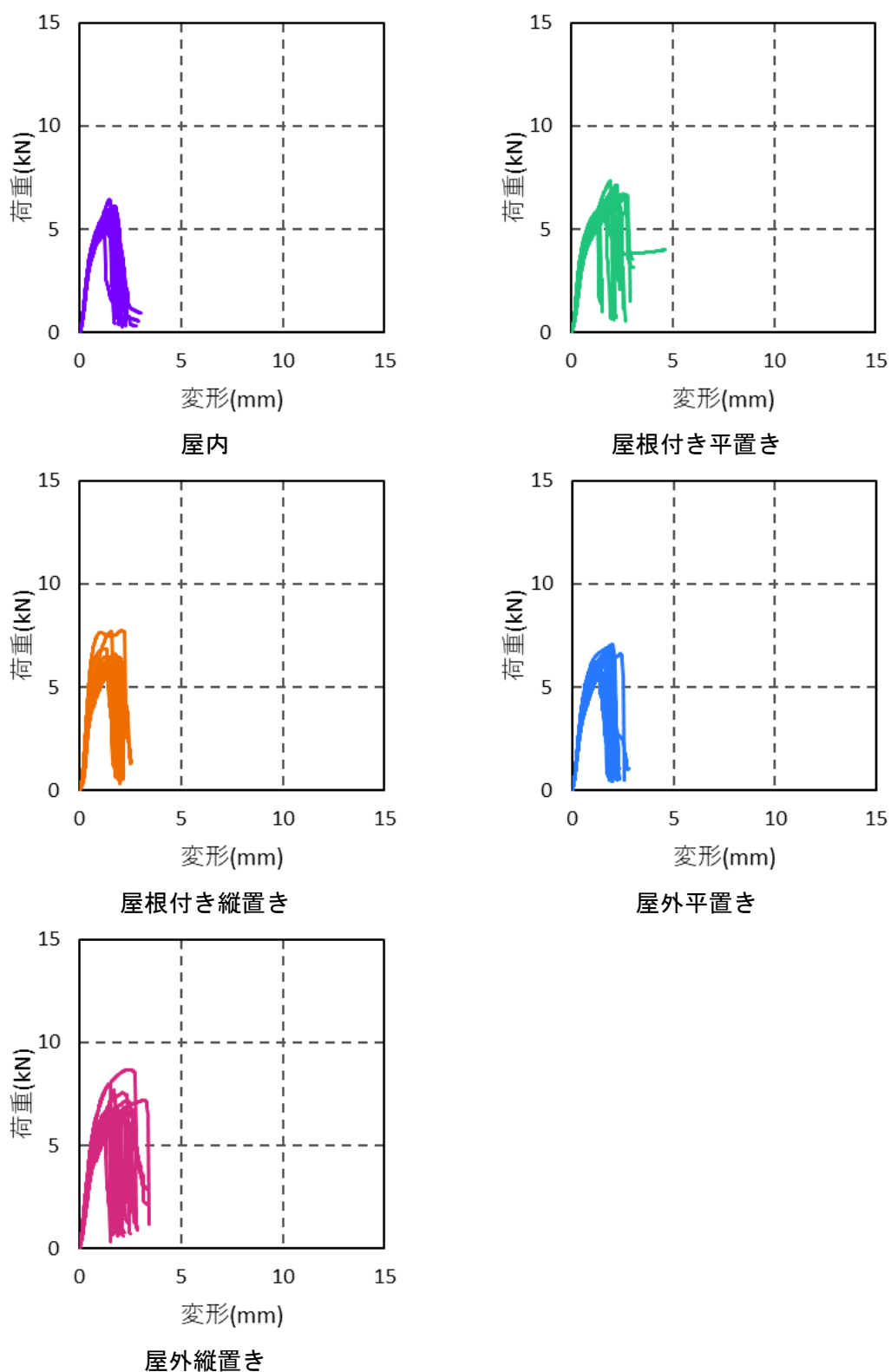


図 4.24 旭川半年暴露集成材ブロックせん断試験体の荷重変形関係

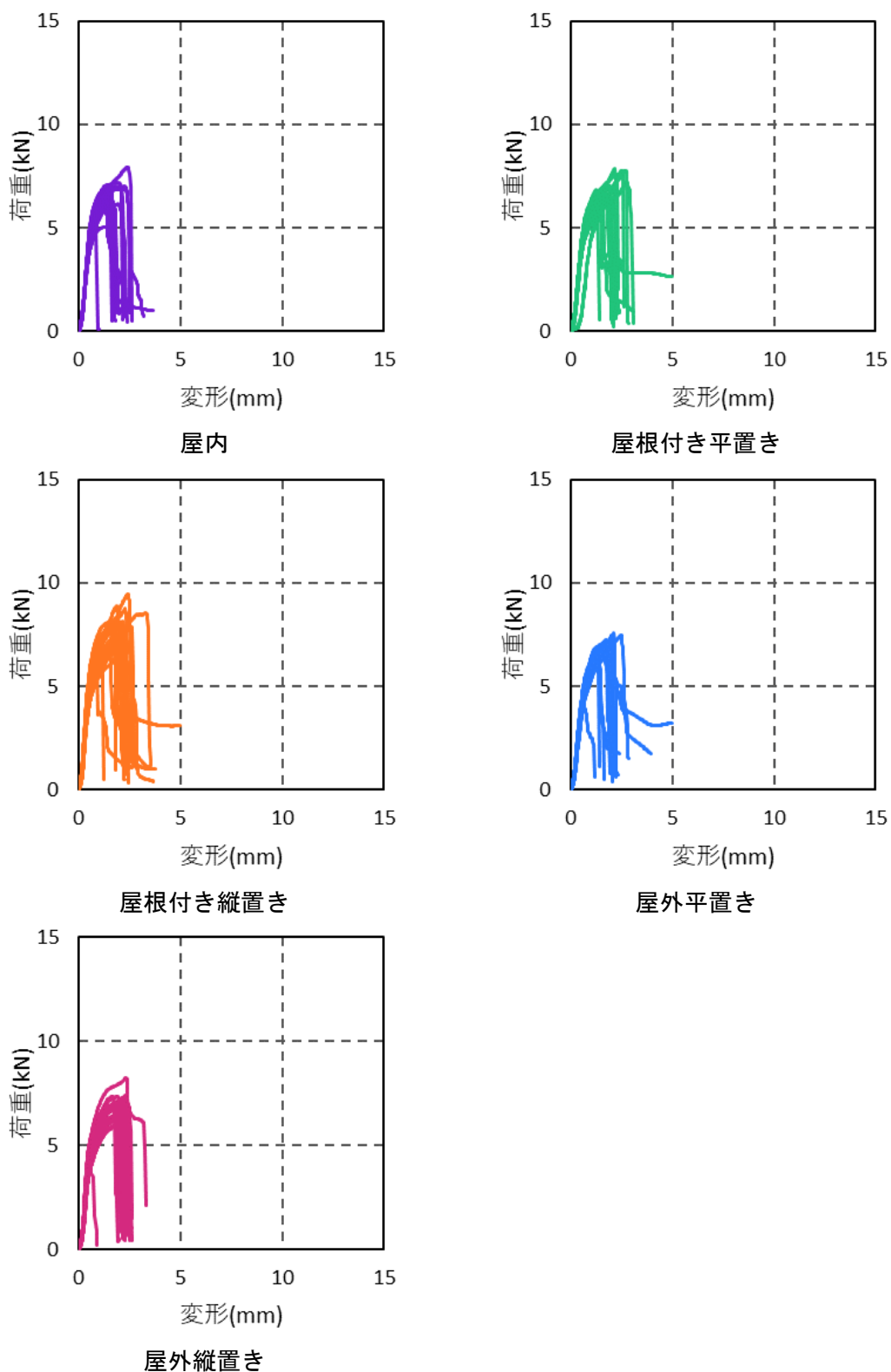


図 4.25 都城半年暴露集成材ブロックせん断試験体の荷重変形関係



第4章 暴露 CLT・集成材の強度試験

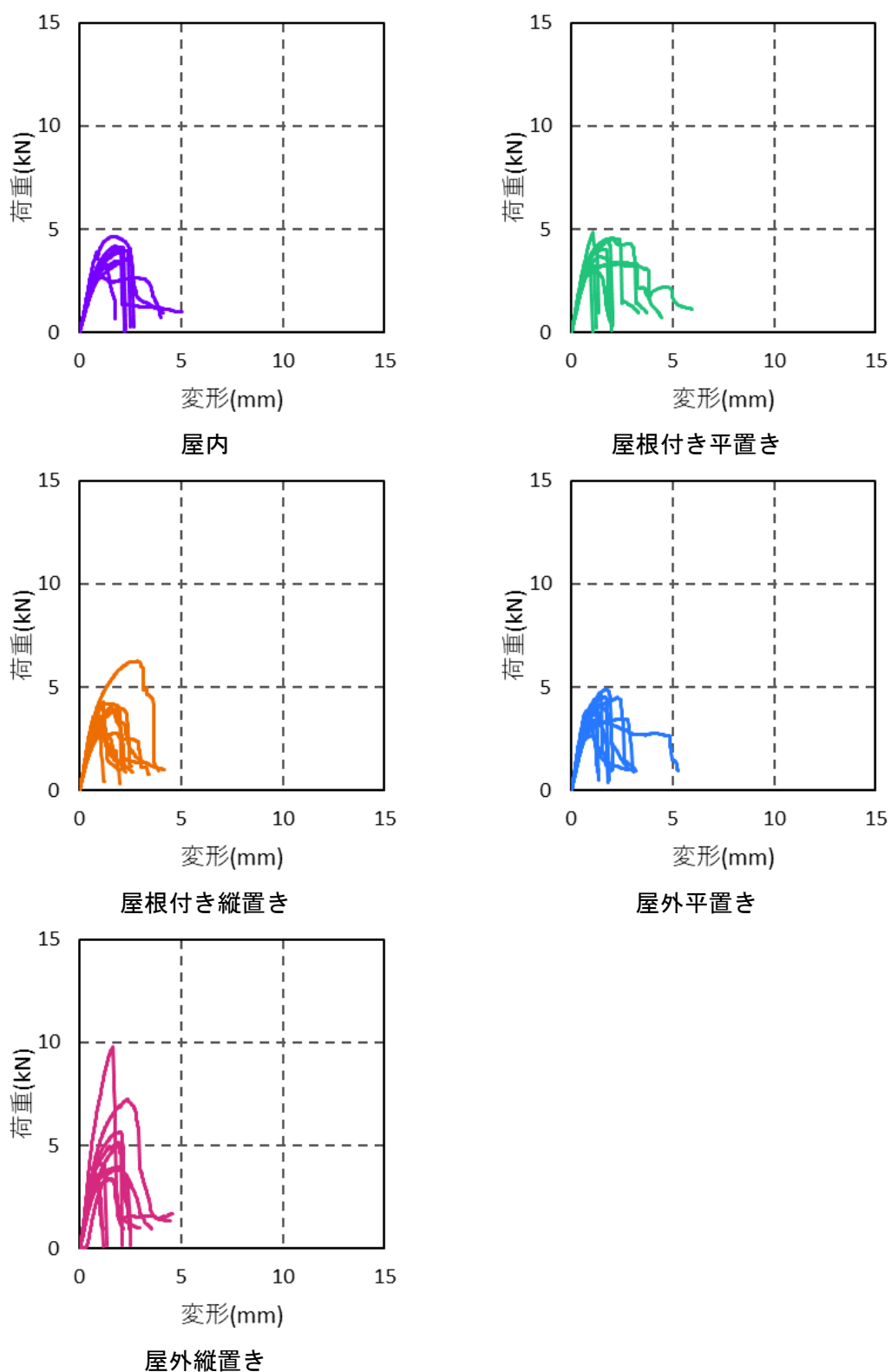


図 4.26 旭川1年暴露 CLT45° ブロックせん断試験体の荷重変形関係

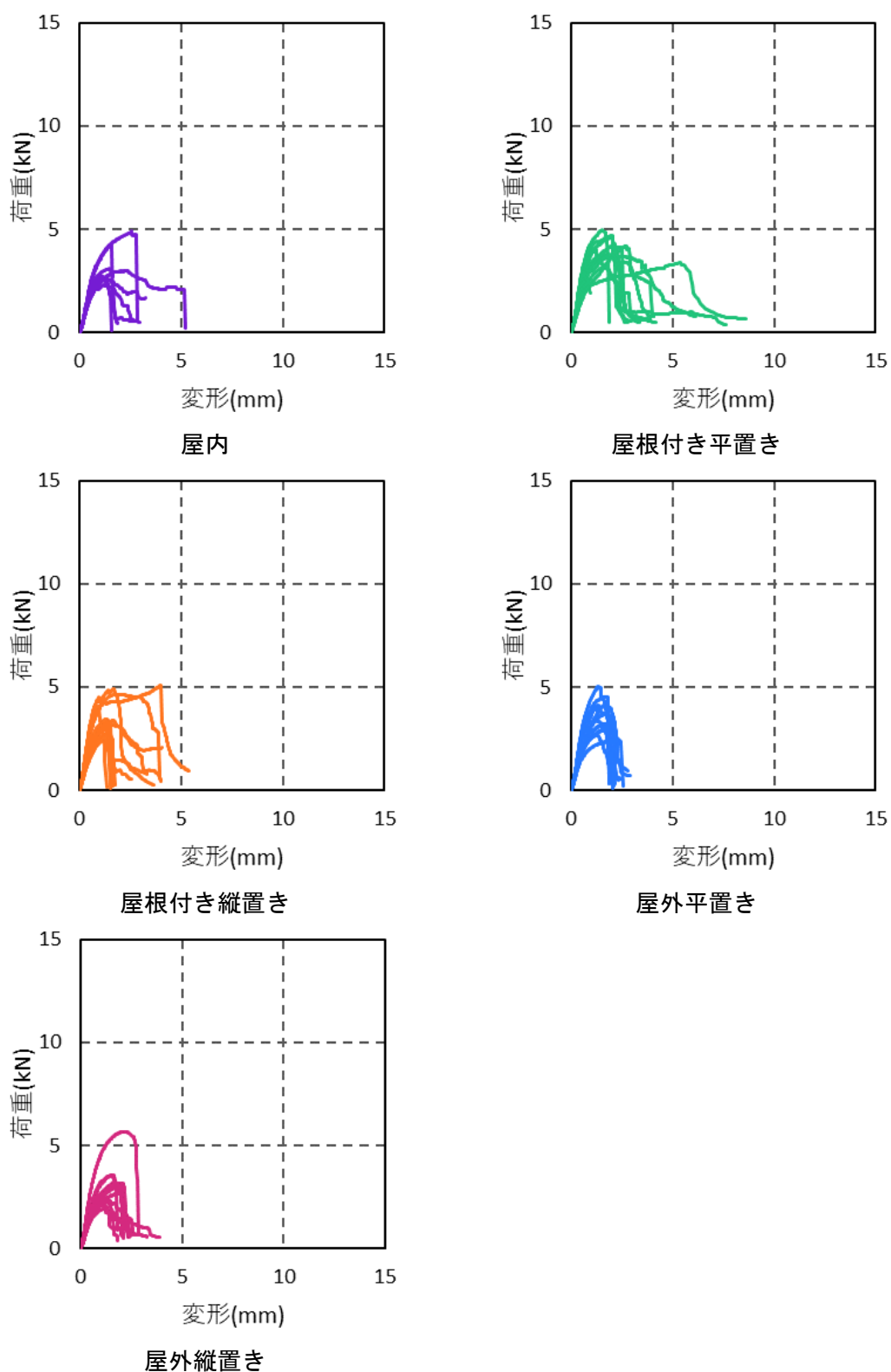


図 4.27 都城1年暴露 CLT45° ブロックせん断試験体の荷重変形関係

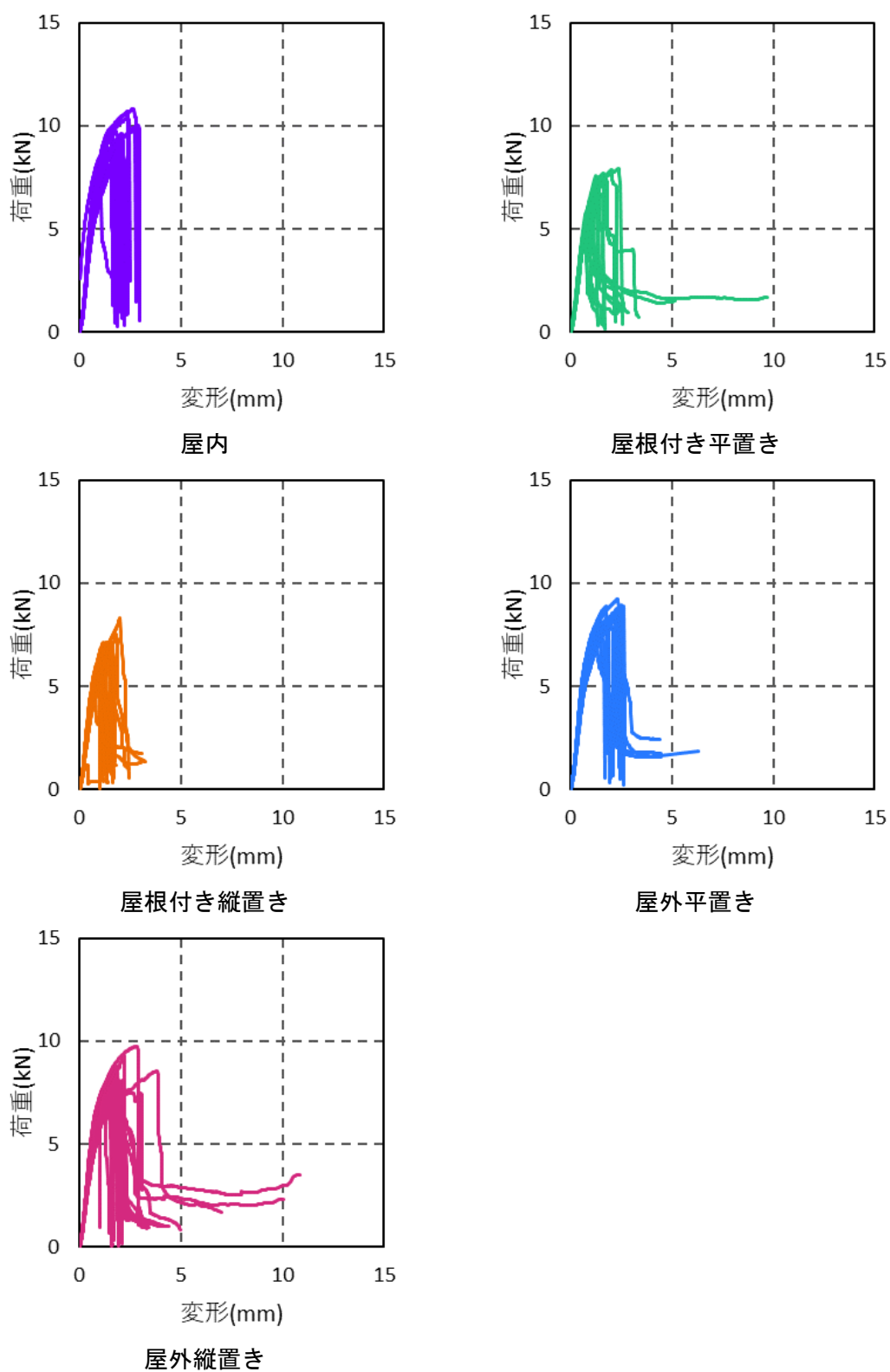


図 4.28 旭川1年暴露集成材ブロックせん断試験体の荷重変形関係

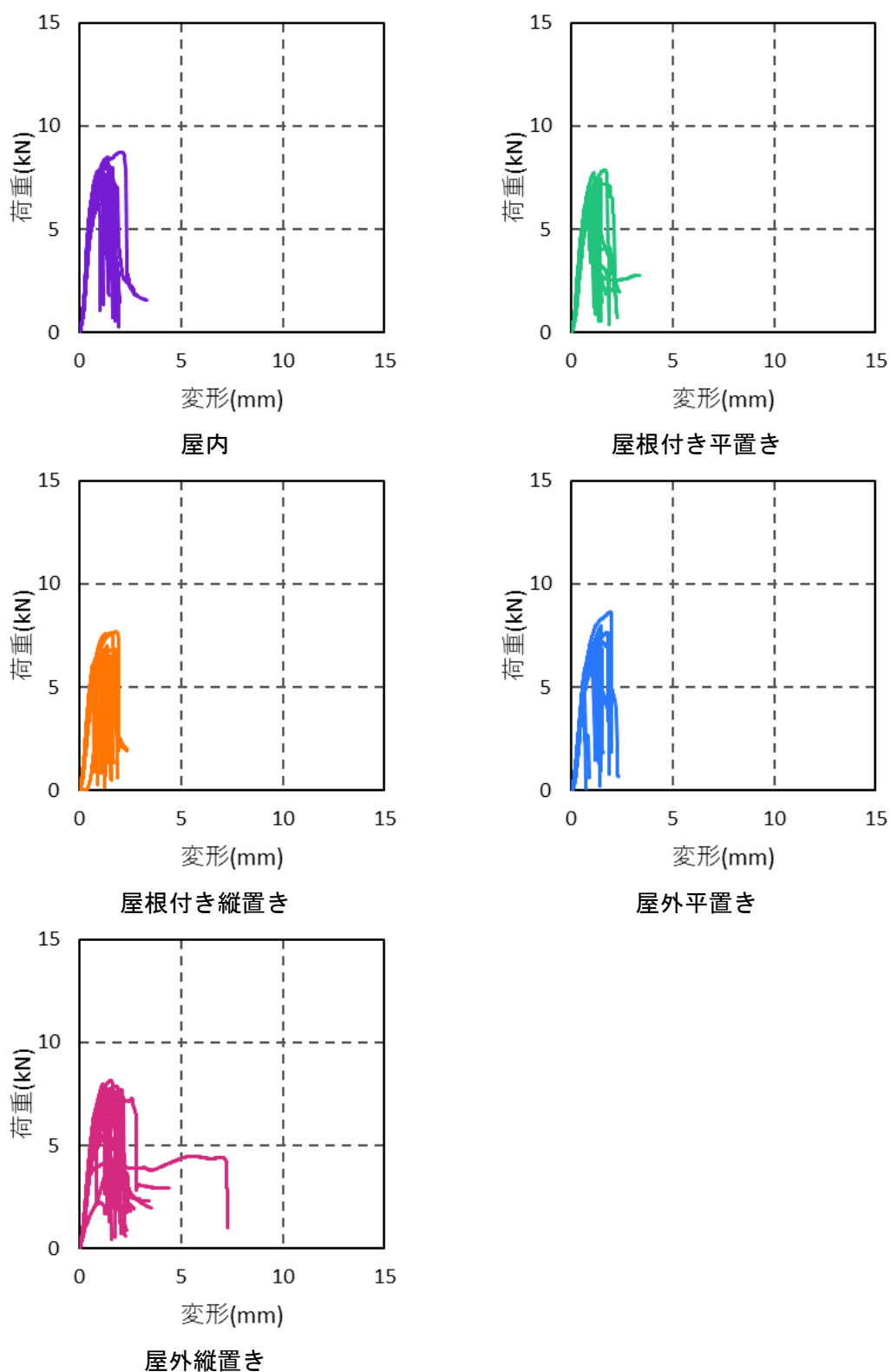


図 4.29 都城1年暴露集成材ブロックせん断試験体の荷重変形関係

### 【接着せん断強度】

図 4.30 に旭川暴露試験体の接着せん断強度を、図 4.31 に都城暴露試験体の接着せん断強度を示す。接着せん断強度は、最大荷重（CLT ブロックせん断試験体は最初に荷重低下が起こる前の最大荷重）を試験時に計測した接着面積で除した値とした。

全ての種類の試験体で、設置場所や設置時の方角による接着せん断強度への影響は見られなかった。また1年暴露試験体の実験をおこなっている、CLT45° ブロックせん断試験体と集成材ブロックせん断試験体では、半年暴露と1年暴露とで明確な差は生じておらず、1年暴露では接着強度に大きな影響を及ぼさないことがわかった。

旭川暴露試験体では、屋内に設置していた半年暴露試験体の接着せん断強度は屋外に設置していたものよりも低くなっていたため、旭川の冬季の過乾燥環境で接着性能に影響を及ぼすことが懸念されていたが、1年暴露試験体では屋内設置試験体も屋外設置試験体と同等もしくはそれ以上の強度を示した。そのため、半年暴露試験体用に採材した屋内試験体は材料自体の強度が低く、このような結果になったのではないかと考えられる。

第4章 暴露 CLT・集成材の強度試験

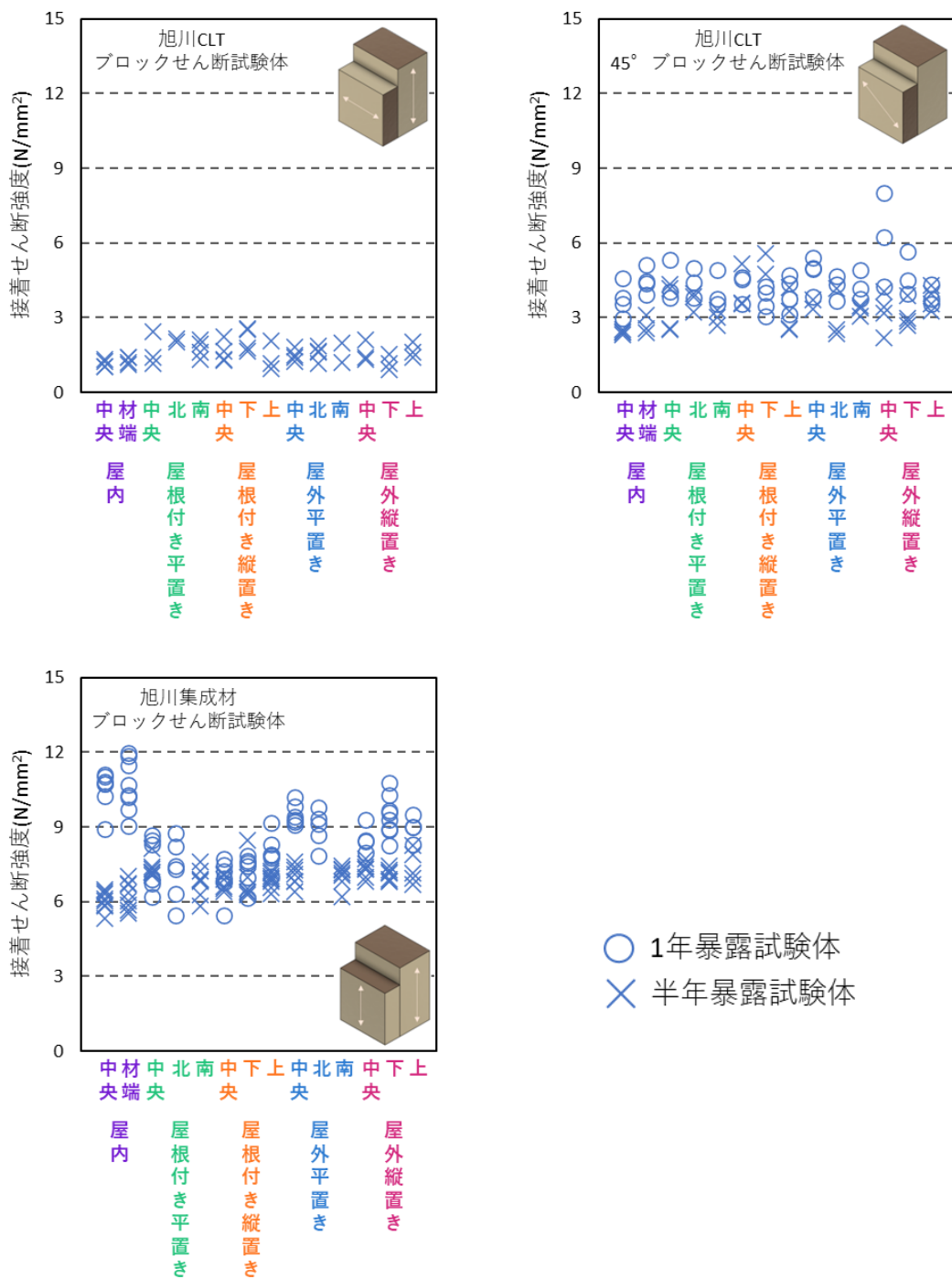


図 4.30 旭川暴露試験体の接着せん断強度

第4章 暴露 CLT・集成材の強度試験

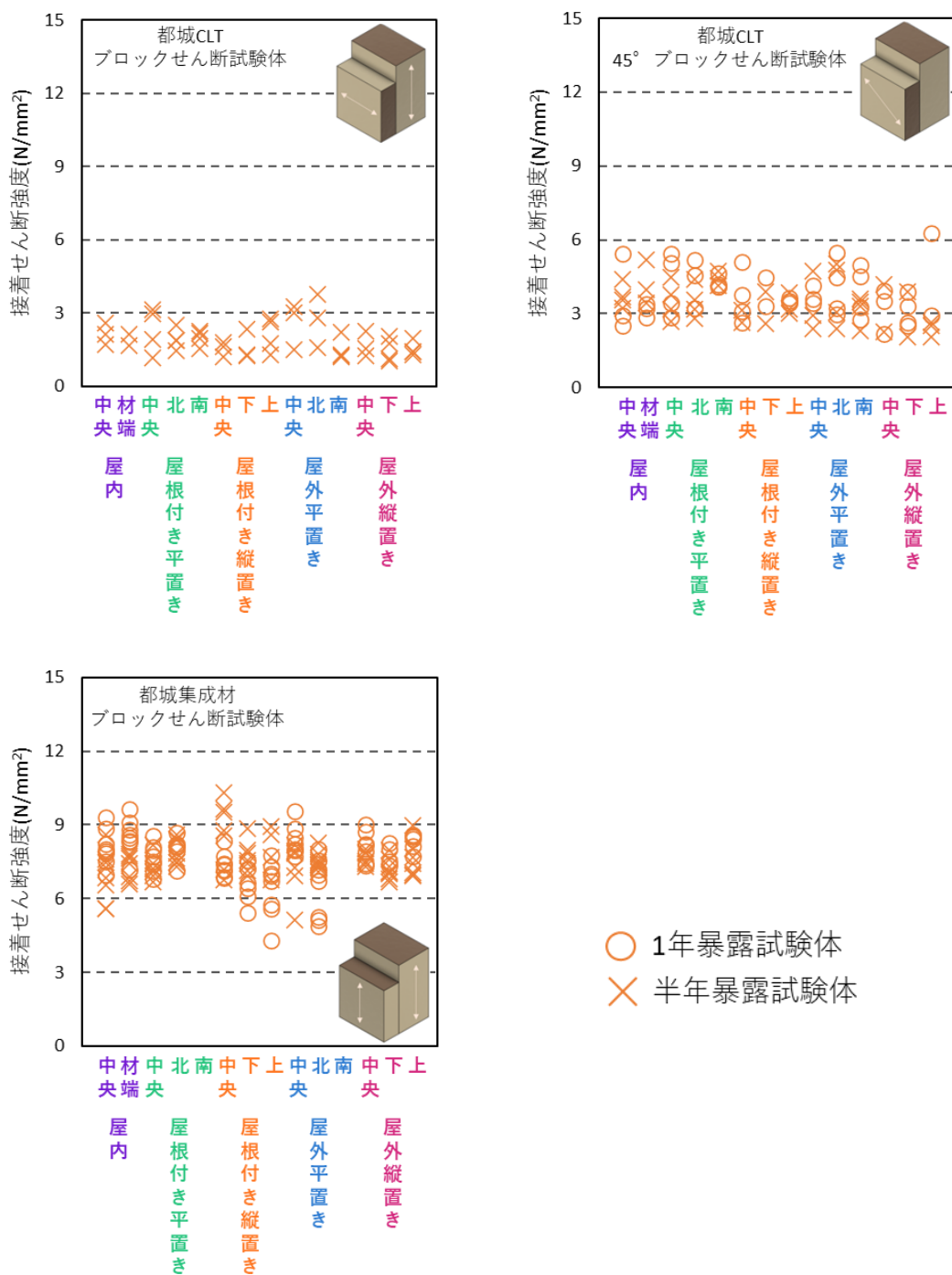


図 4.31 都城暴露試験体の接着せん断強度

## 4.5. 支圧試験

### 4.5.1. 試験概要

図 4.32 に試験体概要を示す。支圧試験は、CLT が強軸方向に荷重する試験体と弱軸方向に荷重する試験体、集成材が繊維方向に荷重する試験体の計 3 種類とし、CLT 試験体のせいが 50mm、集成材試験体のせいが 105mm となっている。全ての試験体で支圧鋼棒はφ12mm のものを使用し、試験体にも φ12mm の半円形の溝をルーターで加工した。写真 4.5 に試験体の荷重の様子を示す。計測は加力鉄板の変位を 1 点、CDP25（東京測器研究所）で計測した。荷重は 1000kN 圧縮試験機（前川試験機製作所）で実施し、CLT 試験体は荷重が急激に上昇し始めた時点で、集成材試験体は 0.8 $P_{max}$  まで荷重が低下した時点で試験を終了した。試験体は暴露試験地で加工した後、試験前 2 週間同じ実験室内で静置した。

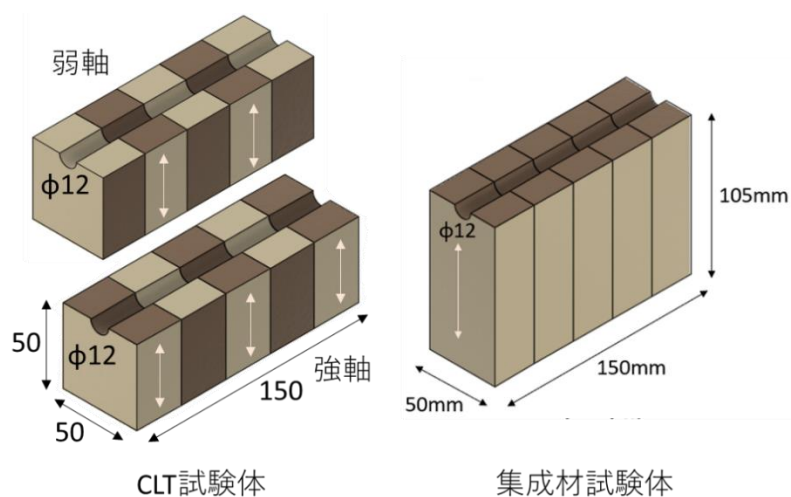


図 4.32 試験体概要



CLT



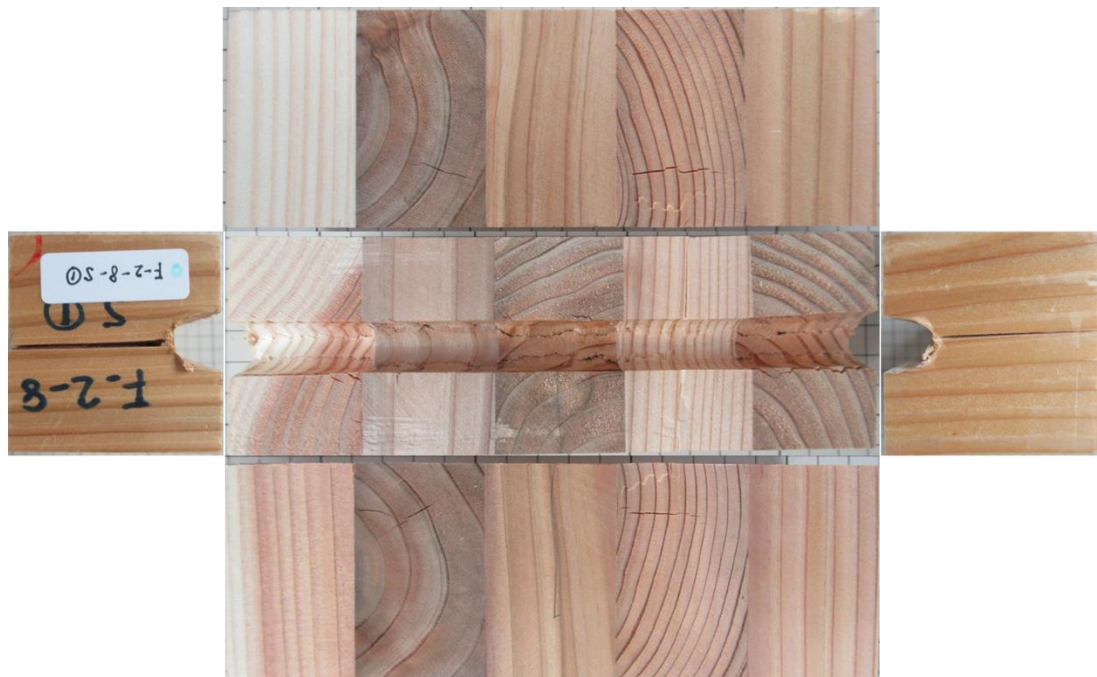
集成材

写真 4.5 荷重の様子

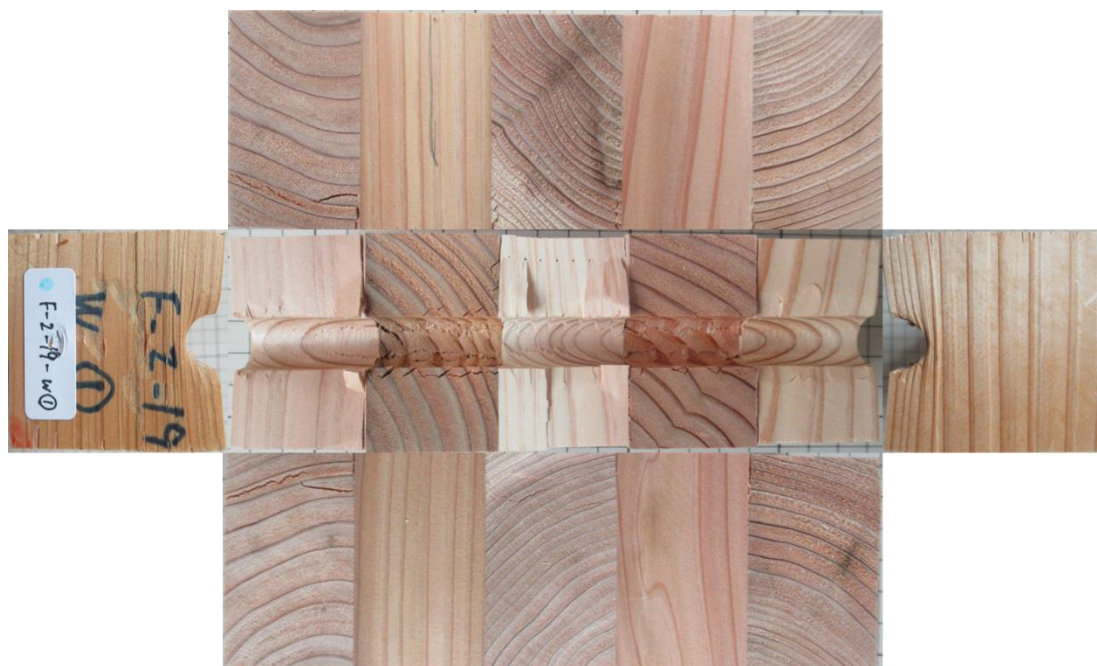


4.5.2. 破壊性状

写真 4.6 に CLT 試験体の破壊性状を、写真 4.7 に集成材試験体の破壊性状を示す。暴露試験地による破壊性状の違いは見られなかったので旭川試験体のみ示す。



CLT 試験体 (強軸)



CLT 試験体 (弱軸)

写真 4.6 CLT 試験体の破壊性状



写真 4.7 集成材試験体の破壊性状

強軸方向加力 CLT 試験体は最外層が繊維方向に割れ始めた時点で荷重がほぼ横ばいになった。また CLT 試験体はどちらの载荷方向でも载荷終了付近になると繊維直交方向に加力している層の側面に割れが生じた。

集成材試験体は繊維方向の割れが生じ、割れが進むとともに荷重が低下した。

4.5.3. 試験結果

【荷重変形関係】

図 4.33 に強軸方向加力 CLT 試験体の荷重変形関係を、図 4.34 に弱軸方向加力 CLT 試験体の荷重変形関係を、図 4.35 に集成材試験体の荷重変形関係を示す。CLT 試験体は荷重上昇を開始するまでの変形を示す。また、全ての試験体で試験開始時にがたが生じていたため、 $0.1P_{max}$  と  $0.4P_{max}$  の傾きを用いて除去したものを示す。

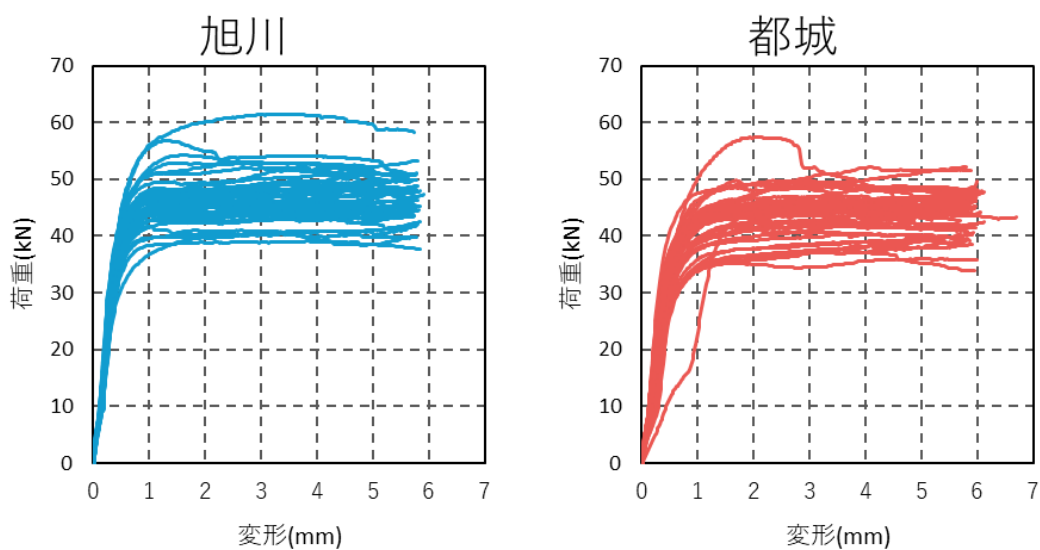


図 4.33 CLT 試験体（強軸）の荷重変形関係

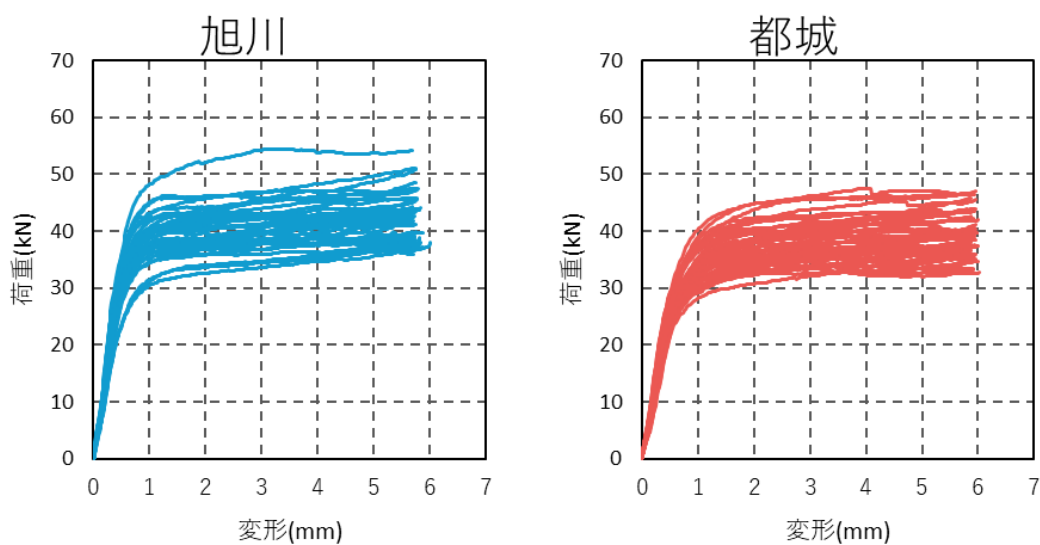


図 4.34 CLT 試験体（弱軸）の荷重変形関係

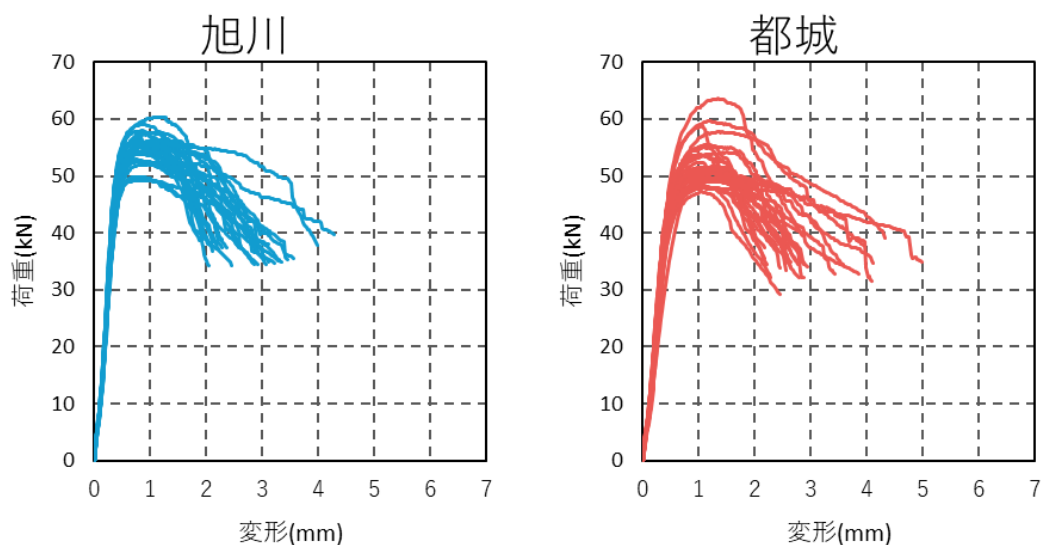


図 4.35 集成材試験体の荷重変形関係

強軸方向加力 CLT 試験体はほとんどの試験体で繊維方向の割れが生じてから荷重がほぼ横ばいに推移した。弱軸方向加力 CLT 試験体は外部に目視できる割れがない状態で降伏し、ほぼ横ばいに推移した。集成材試験体は繊維方向の割れが生じた後、割れが進みながら荷重が低下した。全ての種類の試験体で約 1mm 変形した時点で降伏した。

都城強軸 CLT で 1 体、載荷開始にうまく荷重をかけられなかった試験体があった。以降の検討ではこの試験体 (E-2-8-S②) と支圧鋼棒の溝に節があった試験体の結果を除いて示す。写真 4.8 に支圧鋼棒の溝に節があった試験体の写真を示す。

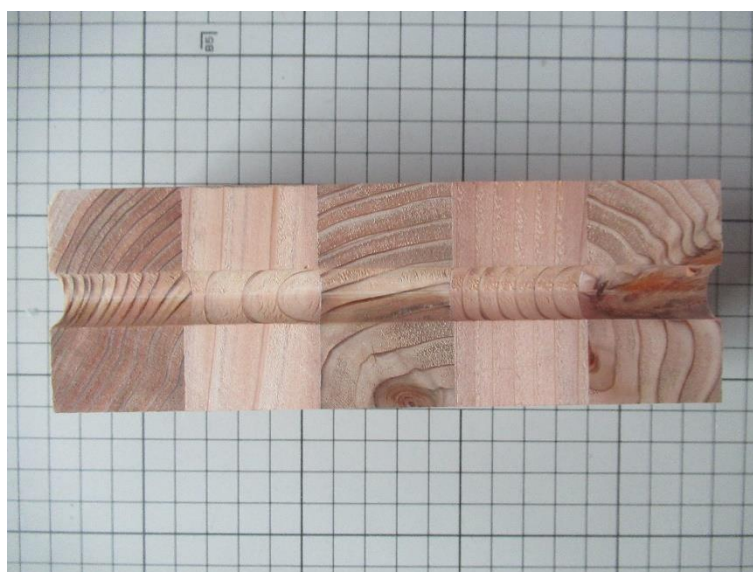


写真 4.8 支圧鋼棒の溝に節があった試験体 (A-2-8-S④)

### 【支圧強度と初期剛性】

図 4.36 から図 4.38 に試験体種類ごとの支圧強度を示す。また図 4.39 から図 4.41 に試験体種類ごとの初期剛性を示す。支圧強度は 6mm 変形時までの最大耐力を $P_{max}$ としたときの  $0.1P_{max}$ と  $0.4P_{max}$ の傾きで 5%offset 法を適用した降伏耐力を、支圧鋼棒の投影面積 $A$ で除した値とした。初期剛性は 6mm 変形時までの最大耐力を $P_{max}$ としたときの  $0.1P_{max}$ と  $0.4P_{max}$ の傾きとした。またグラフのプロットの大きさは、材端から支圧鋼棒を配した場所までの距離を示す。

支圧強度は、CLT 強軸方向、CLT 弱軸方向、集成材の全ての種類で設置条件による強度の違いは見られなかった。また支圧鋼棒の材端からの距離に関しても、明確な関係は見られなかった。初期剛性に関しても同様で、設置条件や支圧鋼棒の材端からの距離と初期剛性との間に明確な関係性はなかった。しかし、都城 CLT 強軸方向の初期剛性のみ、ほかの種類の試験体よりばらつきが大きい結果となった。理由はわからない。

このことより、約半年間の暴露であればどの環境でも支圧強度と初期剛性に明確な低下は生じないことがわかった。

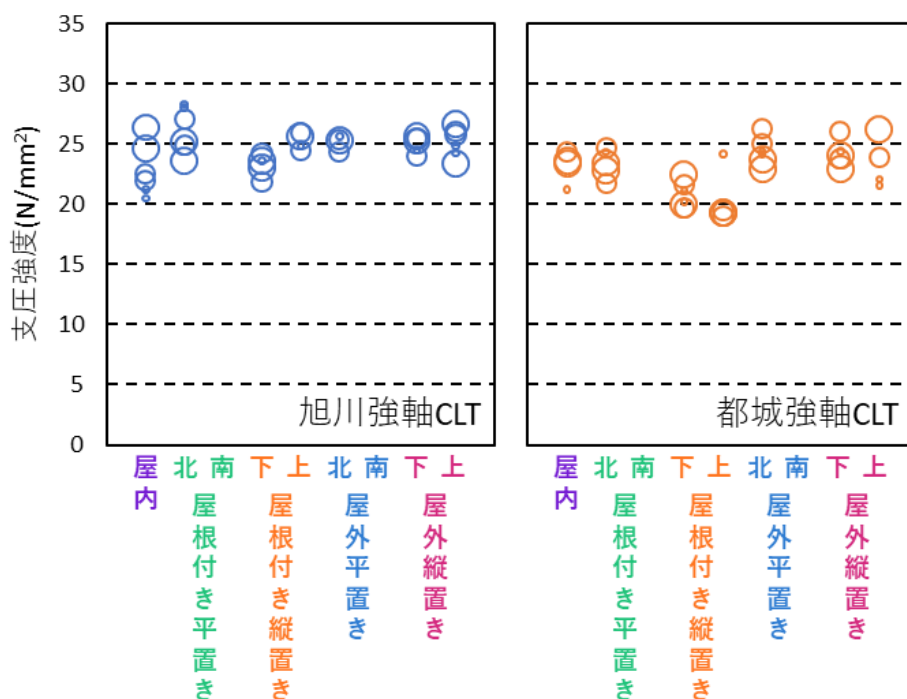


図 4.36 CLT 強軸試験体の支圧強度

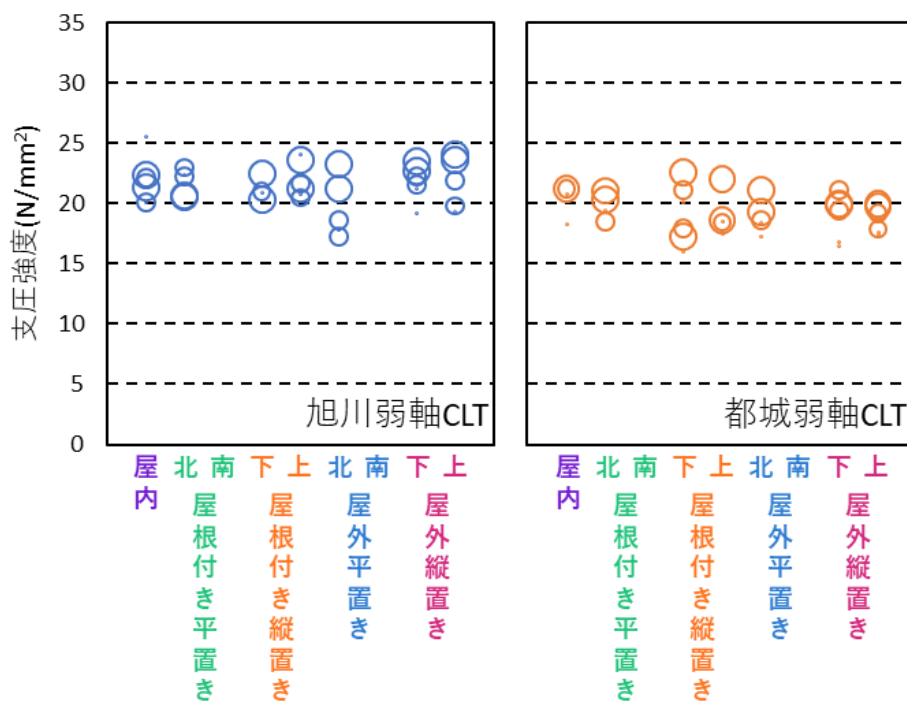


図 4.37 CLT 弱軸試験体の支圧強度

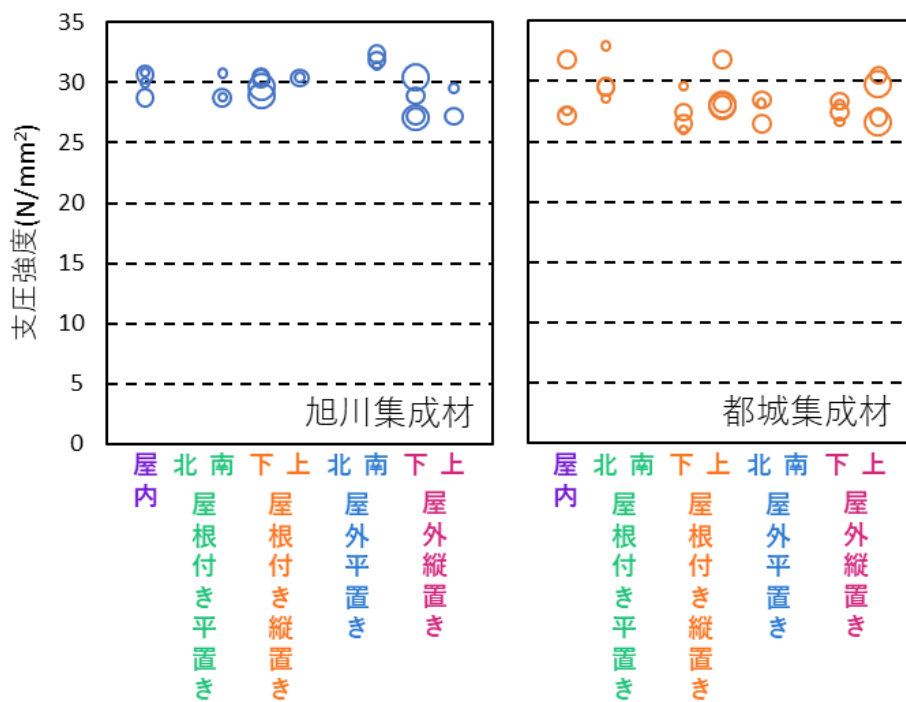


図 4.38 集成材試験体の支圧強度

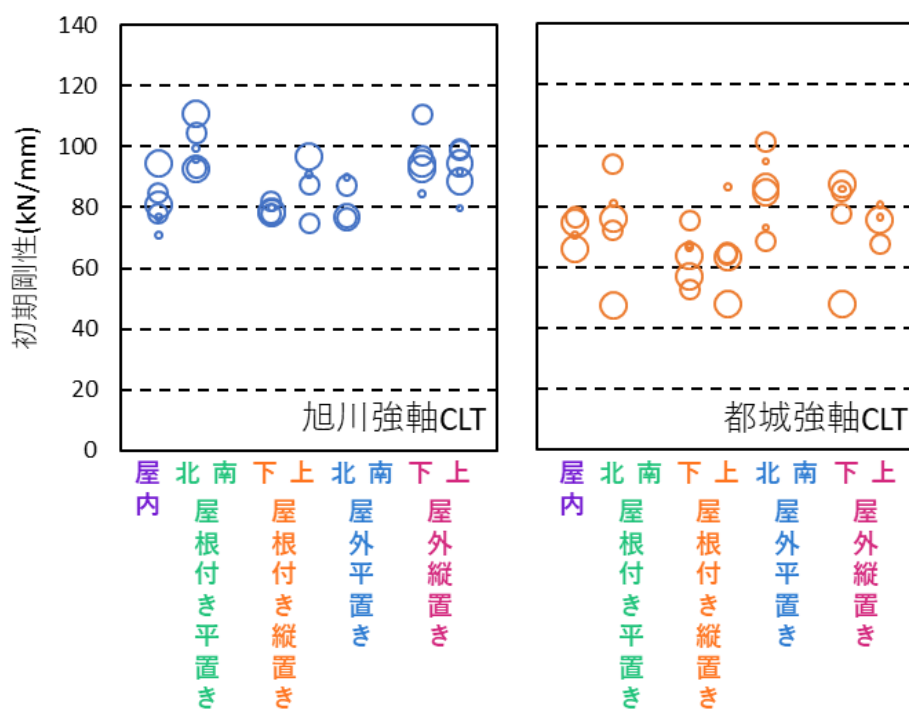


図 4.39 CLT 強軸試験体の初期剛性

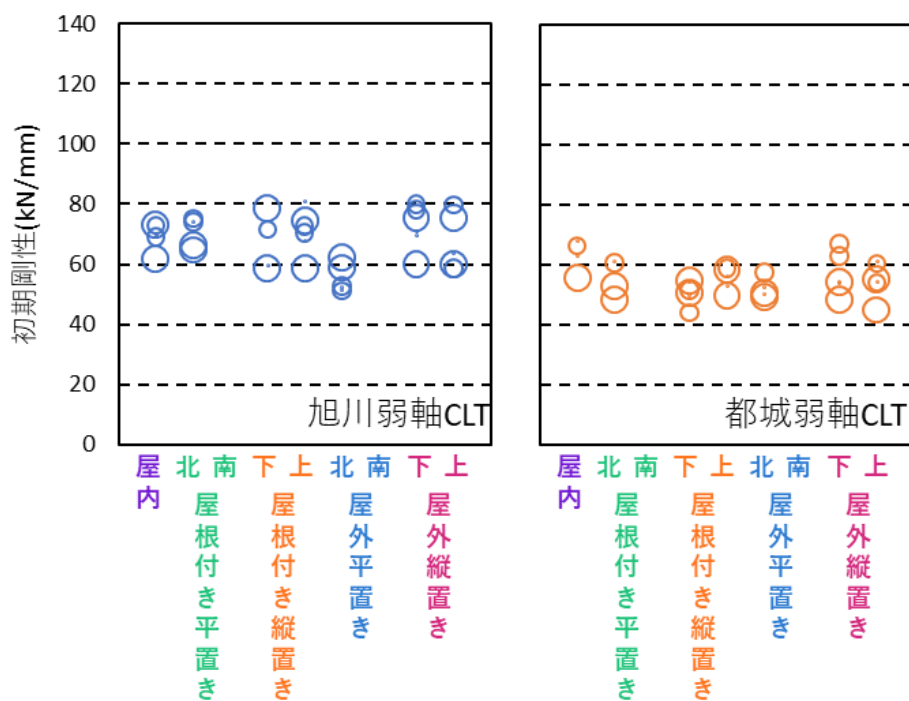


図 4.40 CLT 弱軸試験体の初期剛性



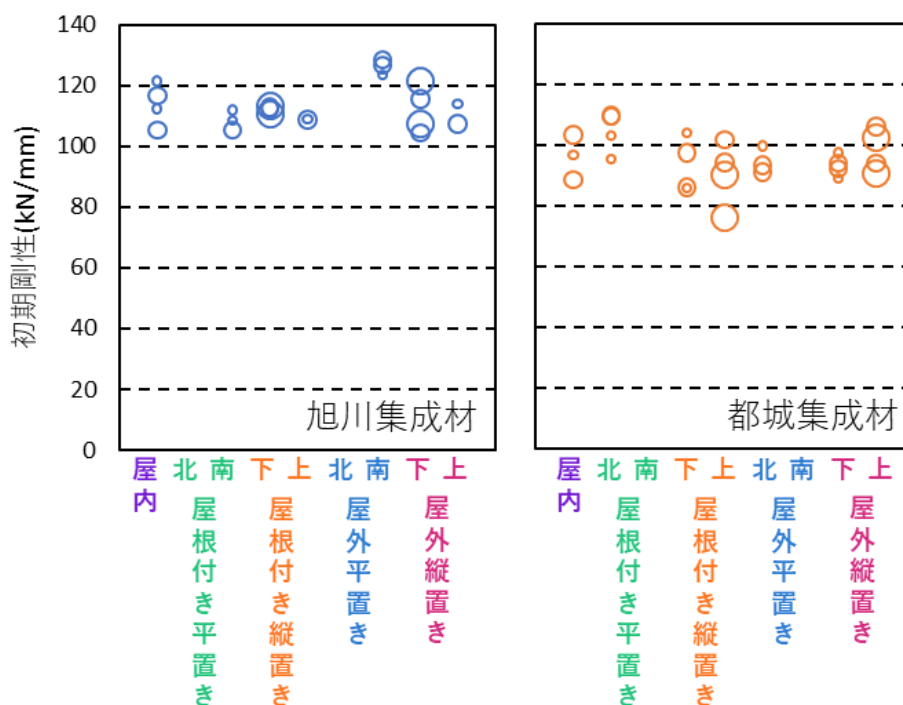


図 4.41 集成材試験体の初期剛性

また表 4.3 から表 4.5 に設置条件ごとの材端からの距離を考慮していない支圧強度と初期剛性の平均値及び下限値、屋内試験体の結果に対する比率を示す。支圧強度の下限値は信頼水準 75%の 95%下側許容限界値、初期剛性の下限値は信頼水準 75%の 50%下側許容限界値としている。平均値、下限値どちらで見ても、屋内試験体から明確な低下が生じている設置条件は少ない。

また試験体の含水率は図 4.42 から図 4.44 に示すように、試験地や設置条件によって大きな差はなかった。

表 4.3 CLT 強軸試験体の平均値と下限値

旭川CLT強軸		試験体数	支圧強度平均値		初期剛性平均値		支圧強度下限値		初期剛性下限値	
		体	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm	比率	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm	比率
屋内	-	6	22.86	1.00	81.01	1.00	17.64	1.00	78.63	1.00
屋根付き平置き	北	6	26.17	1.15	99.37	1.23	21.74	1.23	97.24	1.24
	南	0	-	-	-	-	-	-	-	-
屋根付き縦置き	下	5	23.27	1.02	79.32	0.98	21.12	1.20	78.79	1.00
	上	4	25.22	1.10	87.51	1.08	23.33	1.32	83.91	1.07
屋外平置き	北	4	25.14	1.10	82.73	1.02	23.69	1.34	80.08	1.02
	南	0	-	-	-	-	-	-	-	-
屋外縦置き	下	5	24.98	1.09	95.92	1.18	23.25	1.32	92.79	1.18
	上	6	25.16	1.10	92.04	1.14	22.31	1.26	89.88	1.14

都城CLT強軸		試験体数	支圧強度平均値		初期剛性平均値		支圧強度下限値		初期剛性下限値	
		体	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm	比率	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm	比率
屋内	-	4	23.16	1.00	71.77	1.00	19.57	1.00	69.99	1.00
屋根付き平置き	北	5	23.40	1.01	74.09	1.03	20.50	1.05	68.46	0.98
	南	0	-	-	-	-	-	-	-	-
屋根付き縦置き	下	6	20.85	0.90	63.80	0.89	18.31	0.94	61.42	0.88
	上	5	20.22	0.87	65.25	0.91	14.75	0.75	60.70	0.87
屋外平置き	北	6	24.41	1.05	84.74	1.18	21.78	1.11	81.04	1.16
	南	0	-	-	-	-	-	-	-	-
屋外縦置き	下	5	24.21	1.05	76.69	1.07	21.40	1.09	71.23	1.02
	上	4	23.45	1.01	75.01	1.05	17.76	0.91	72.94	1.04

表 4.4 CLT 弱軸試験体の平均値と下限値

旭川CLT弱軸		試験体数	支圧強度平均値		初期剛性平均値		支圧強度下限値		初期剛性下限値	
		体	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm	比率	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm	比率
屋内	-	6	21.94	1.00	69.32	1.00	17.22	1.00	68.11	1.00
屋根付き平置き	北	5	21.75	0.99	70.90	1.02	19.02	1.10	69.28	1.02
	南	0	-	-	-	-	-	-	-	-
屋根付き縦置き	下	4	21.16	0.96	67.10	0.97	18.70	1.09	63.38	0.93
	上	6	21.98	1.00	70.90	1.02	18.49	1.07	68.70	1.01
屋外平置き	北	6	19.33	0.88	54.83	0.79	13.79	0.80	53.43	0.78
	南	0	-	-	-	-	-	-	-	-
屋外縦置き	下	6	21.74	0.99	72.34	1.04	18.34	1.07	70.21	1.03
	上	5	21.75	0.99	67.47	0.97	16.43	0.95	64.34	0.94

都城CLT弱軸		試験体数	支圧強度平均値		初期剛性平均値		支圧強度下限値		初期剛性下限値	
		体	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm	比率	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm	比率
屋内	-	4	20.35	1.00	63.15	1.00	16.53	1.00	61.06	1.00
屋根付き平置き	北	4	19.82	0.97	55.79	0.88	16.88	1.02	53.44	0.88
	南	0	-	-	-	-	-	-	-	-
屋根付き縦置き	下	6	19.16	0.94	50.83	0.80	13.35	0.81	49.69	0.81
	上	5	19.01	0.93	55.20	0.87	14.74	0.89	53.96	0.88
屋外平置き	北	5	18.95	0.93	52.05	0.82	15.49	0.94	50.97	0.83
	南	0	-	-	-	-	-	-	-	-
屋外縦置き	下	6	18.95	0.93	56.87	0.90	14.59	0.88	54.85	0.90
	上	6	18.63	0.92	54.97	0.87	15.97	0.97	53.26	0.87

表 4.5 集成材試験体の平均値と下限値

旭川集成材		試験体数	支圧強度平均値		初期剛性平均値		支圧強度下限値		初期剛性下限値	
			体	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm	比率	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm
屋内	-	4	30.06	1.00	113.90	1.00	27.44	1.00	111.27	1.00
屋根付き平置き	北	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	南	3	29.42	0.98	108.57	0.95	25.76	0.94	107.03	0.96
屋根付き縦置き	下	4	29.86	0.99	112.17	0.98	27.91	1.02	111.72	1.00
	上	2	30.42	1.01	108.92	0.96	-	-	-	-
屋外平置き	北	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	南	3	31.88	1.06	126.16	1.11	30.34	1.11	124.96	1.12
屋外縦置き	下	4	28.41	0.95	112.09	0.98	24.13	0.88	109.12	0.98
	上	2	28.37	0.94	110.72	0.97	-	-	-	-

都城集成材		試験体数	支圧強度平均値		初期剛性平均値		支圧強度下限値		初期剛性下限値	
			体	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm	比率	N/mm <sup>2</sup>	比率	kN/mm
屋内	-	3	28.84	1.00	96.19	1.00	20.64	1.00	92.70	1.00
屋根付き平置き	北	4	30.15	1.05	104.34	1.08	25.02	1.21	101.76	1.10
	南	0	-	-	-	-	-	-	-	-
屋根付き縦置き	下	4	27.38	0.95	93.26	0.97	23.06	1.12	89.83	0.97
	上	4	28.98	1.00	90.51	0.94	23.97	1.16	86.38	0.93
屋外平置き	北	3	27.70	0.96	94.66	0.98	24.25	1.18	92.54	1.00
	南	0	-	-	-	-	-	-	-	-
屋外縦置き	下	4	27.63	0.96	93.11	0.97	25.61	1.24	91.76	0.99
	上	4	28.48	0.99	98.18	1.02	23.27	1.13	95.42	1.03

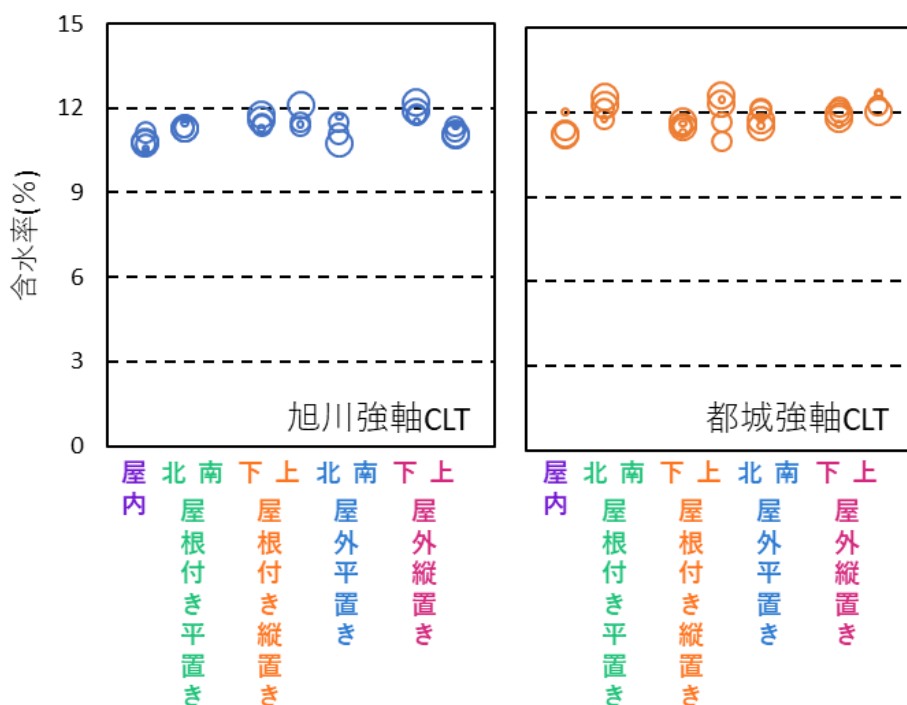


図 4.42 CLT 強軸試験体の含水率

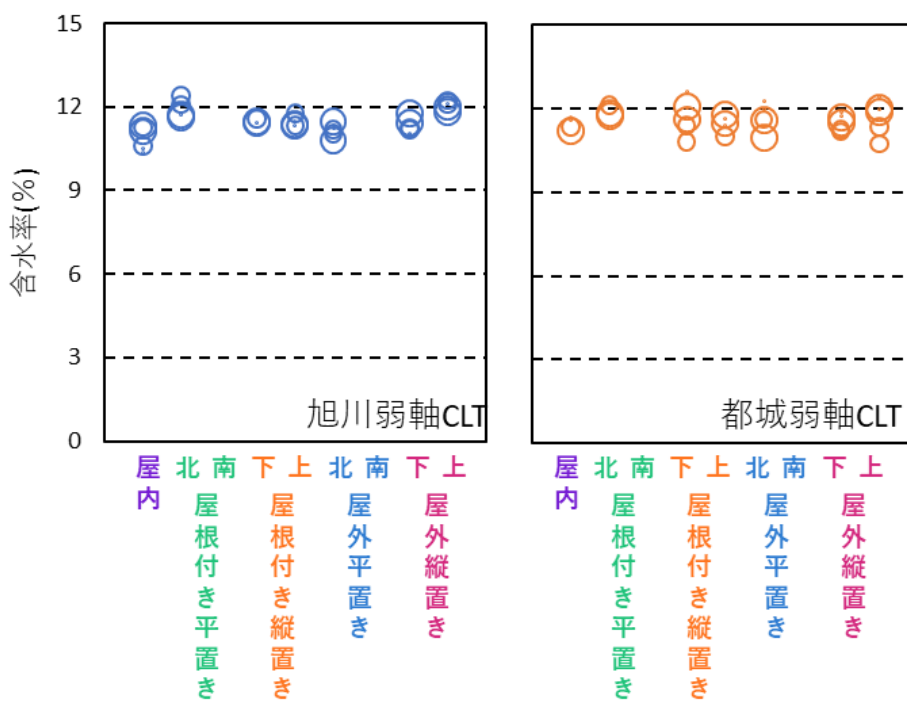


図 4.43 CLT 弱軸試験体の含水率

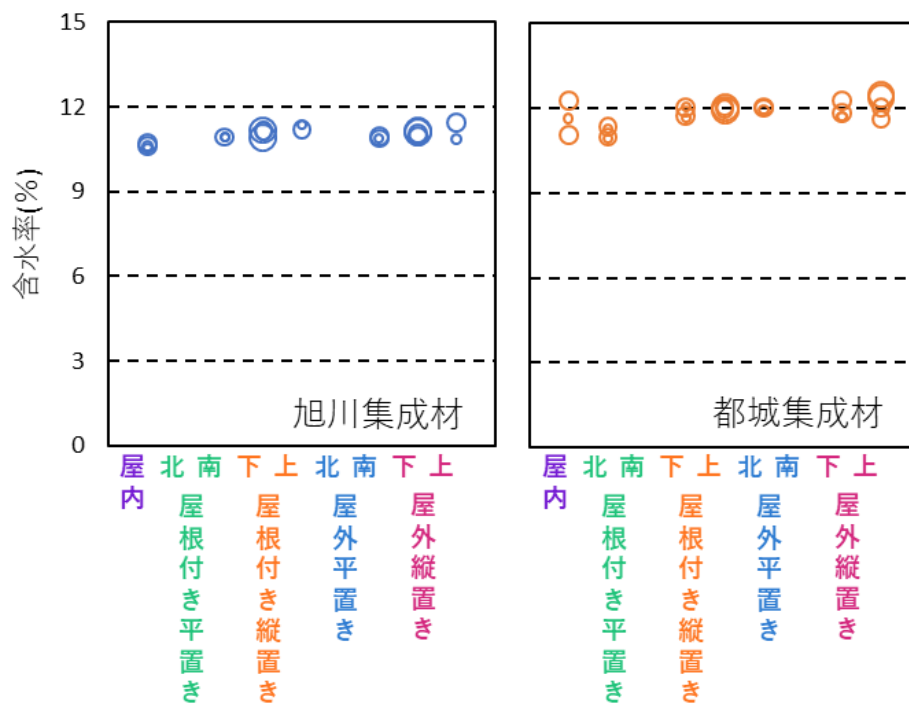


図 4.44 集成材試験体の含水率

### 4.6. 4章のまとめ

第4章では、屋外暴露環境での CLT 及び集成材の強度性能変化を明らかにするため、3.2 節で報告した暴露実験の試験体（暴露開始から半年暴露試験体と、1 年暴露試験体）で強度試験（全面圧縮試験・支圧試験・接着せん断試験）を実施した。

その結果、全面圧縮試験、支圧試験、接着せん断試験の全てで、半年暴露試験体の設置条件による強度低下は見られなかった。また接着せん断試験の CLT45° ブロックせん断試験体と集成材ブロックせん断試験体では、1 年暴露試験体の実験も実施したが、こちらも半年暴露試験体の結果に対する明確な強度低下はなく、1 年間の暴露であれば CLT、集成材の接着性能に大きな影響を及ぼさないことがわかった。

## 第 5 章

### CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

## 5. CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

### 5.1. 実験の目的

近年、木とコンクリートの複合構造の検討が進められている。中でも床板に CLT を用いた Timber-Concrete Composite 床（以下、TCC 床）はコンクリート打設時の木部への水分移動が懸念されている。木部への水分移動を防止するため、一般的にはコンクリート-CLT 間に養生シートが用いられるが、養生シートは施工性の低下などデメリットがあり、養生シートを用いない場合の水分移動を把握することで、施工性の良い TCC が実現可能となる。池田ら<sup>5-1)</sup>は TCC 床の養生シート有無による水分移動の影響を検討しており、養生シートがない場合でもその水分流入は小さいとしている。本研究ではより実大に近いサイズの TCC 床試験体で CLT 内部のコンクリート打設前後の含水率を計測した。

また、養生シートの無い TCC でせん断抵抗にシアキーを用いた場合には、木口とコンクリートが直接接する場所が生まれる。このような明確に含水率上昇が見込まれる場所には適切な防水処理を施す必要がある。そこでシアキー及びつぎ合わせの接合部分（以下、接合部）を有する試験体に 3 種類の防水処理を施した場合の、コンクリート打設前後の CLT 内部含水率変動を計測した。



## 5.2. 試験体概要

図 5.1 に各試験体の試験体図を示す。試験体 1 は 1m×1m の CLT (S60-5-7) 板上にコンクリート (Fc24、普通コンクリート) を施工、試験体 2 は CLT 中心に実際の施工と同じようにシアキーの機能を持たせるために大きく切り欠きを設けた状態に加えて接合部を含ませるために材料を中央部で分離した上でコンクリートを施工した。加えて、試験体 2 はコンクリートと接触する木端面とシアキーの底部に当たる板目面に防水処理を施しており、本試験体では含浸塗料 (バトン#501) 1 回塗りの部分、塗膜塗料 (ニューブリード) 1 回塗りの部分、ブチルテープ貼の部分の 3 種類とした。両試験体とも CLT 外周部にはブチルテープを貼った。コンクリートは 2022 年 1 月 7 日に打設し、その後養生を開始し、2022 年 11 月 16 日までのデータであり、一部の計測点では現在も継続的に計測をしている。写真 5.1 に試験体写真を、表 5.1 にコンクリートの詳細を示す。

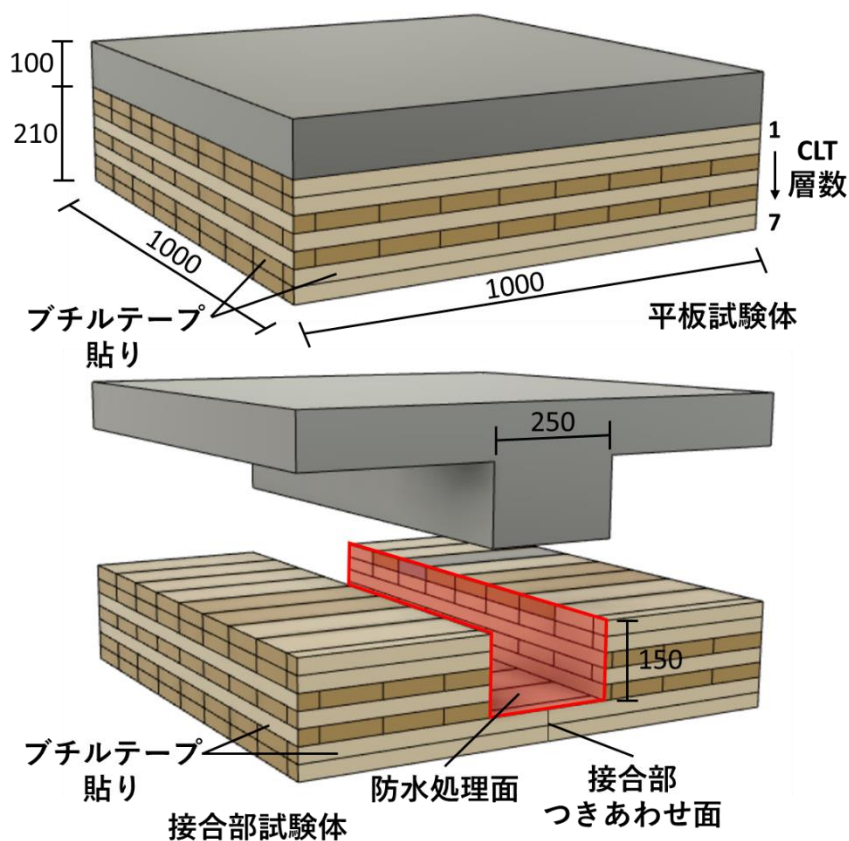


図 5.1 試験体図

試験体 1



試験体 2



(上：防水処理の様子、下：2022 年 1 月 20 日)

写真 5.1 試験体写真

表 5.1 コンクリートの詳細

種類		普通
呼び強度	$\text{N/mm}^2$	24
スランプ	cm	18
粗骨材最大寸法	mm	20
セメント種類		N
水セメント比	%	57
細骨材率	%	50

### 5.3. 計測概要

図 5.2 に試験体 1 の温湿度センサ配置図、図 5.3 に試験体 2 の温湿度センサ配置図を示す。CLT 内部の含水率計測は、2 章で検討した材内部温湿度から平衡含水率曲線を用いて計測する方法で計測している。本計測方法は、木材の内部温湿度よりも高い値を示すことが、2.3 節の実験で明らかになっているが、本実験で計測されていた内部含水率が 2.3 節の実験で検討できた含水率範囲よりも高い値を示していたため、本章の実験では計測した内部含水率の補正をせず、計測値そのまま比較している。

温湿度センサは HY を用いた。φ 22mm の穴を設置深さに合わせて施工し、その中に HY の計測部に空間を確保できるカバーを付けて設置、その後 HY を設置している層以外はウレタンゴム棒と配管用パテ (AP-1000-I) を用いて栓をした。計測穴は表面の CLT 幅はぎ部と重ならないようにしている。HY の計測間隔は 2021 年 12 月 30 日から 2022 年 1 月 20 日までは 1 時間、それ以降は 3 時間としている。写真 5.2 に計測の様子を示す。また試験体外部の温湿度を温湿度センサ (おんどとり : TR-72wb-s) で 1 時間ごとに計測した。

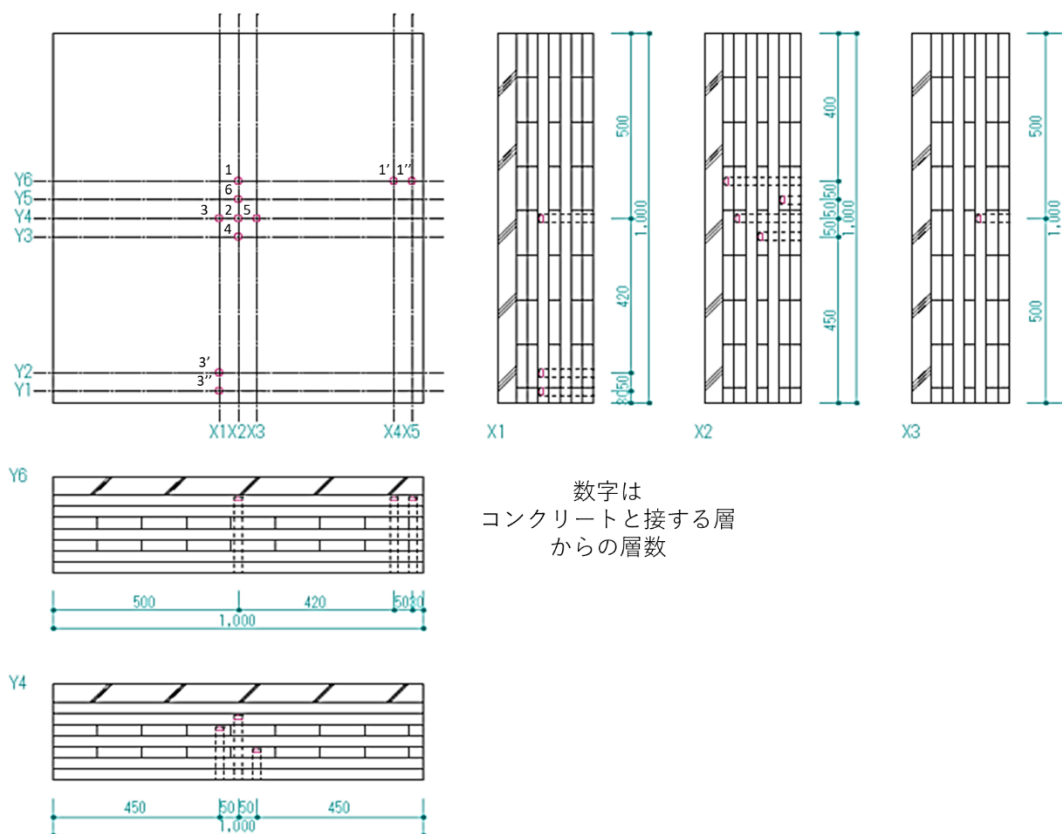


図 5.2 試験体 1 の温湿度センサ配置図 (平板試験体)

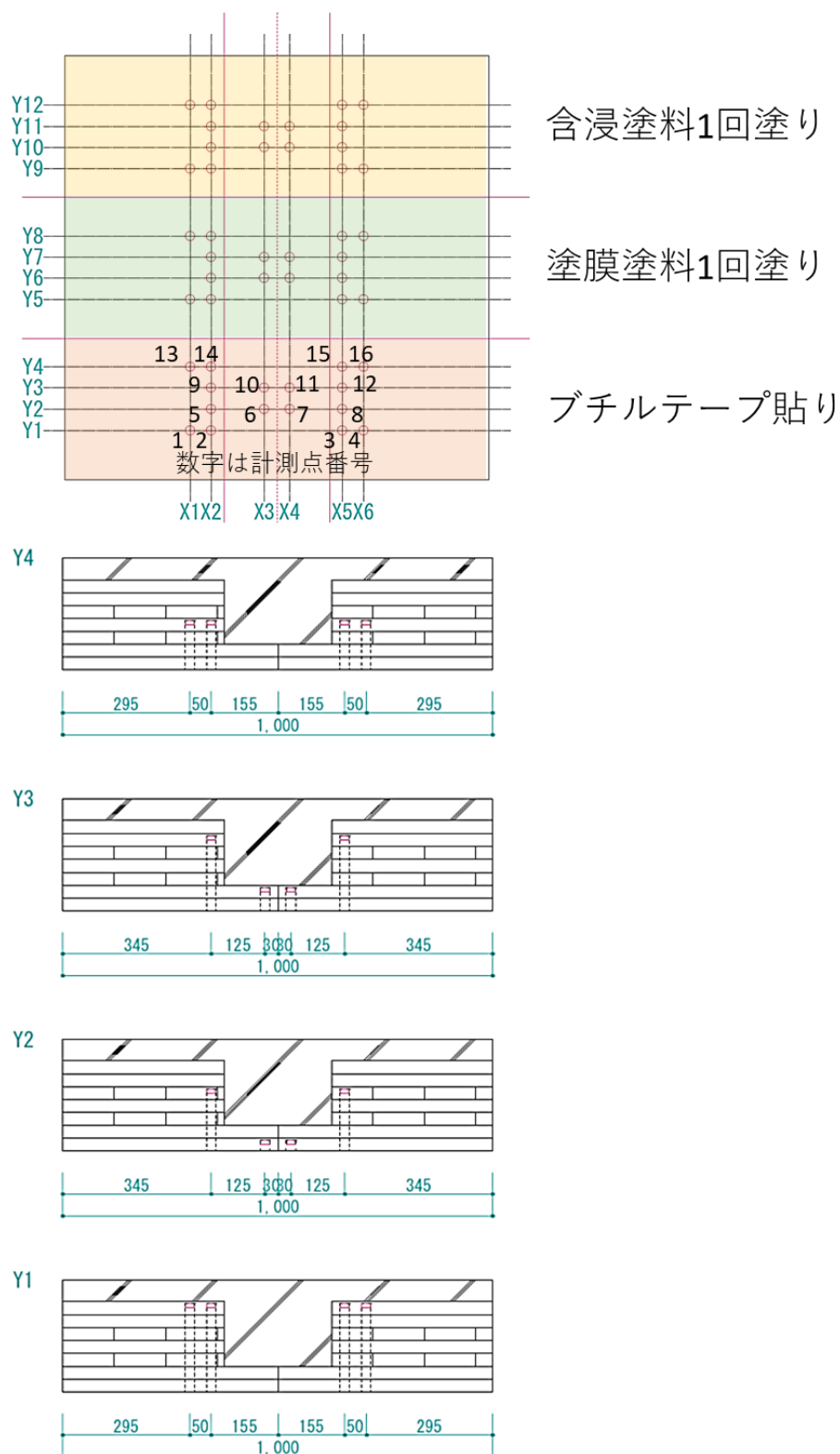


図 5.3 試験体 2 の温湿度センサ配置図



試験体 1



試験体 2

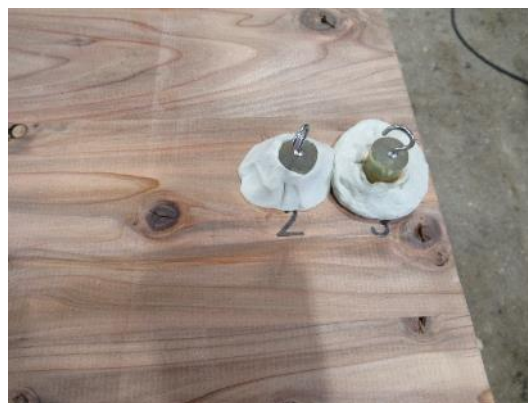


写真 5.2 計測の様子

#### 5.4. 計測結果

2021 年 12 月 30 日から 2022 年 11 月 16 日までの約 1 年間の HY で計測した温湿度と式 2.1 を用いて算出した CLT 内部の含水率、またそれぞれの図の計測位置を示す。コンクリートの打設日（2022 年 1 月 7 日）を黒色の実線で、コンクリート打設から 28 日後をオレンジ色の実線で加えている。なお含水率のグラフに関しては、グラフを見やすくするため 10%～25%の範囲で表示している。図 5.4 に CLT の層数を示す。以降ではコンクリートに接する層を 1 層目として結果を述べる。また計測値に関して、温湿度センサのデータ取り出しをおこなった期間のデータは除外している。試験体 2 はシアキー部に対して対称となるように計測点を配していたが、両計測点の値はほぼ同様であった。例として、図 5.5 に各処理共に変動の大きかった計測点 2, 3 の結果を示す。以降の結果では片側のみの結果を示す。

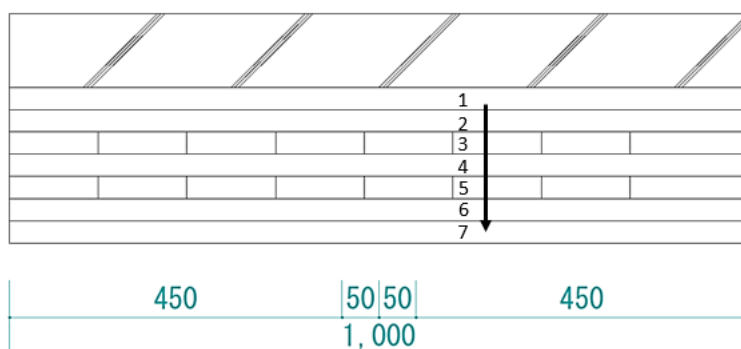


図 5.4 CLT の層数

## 第5章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

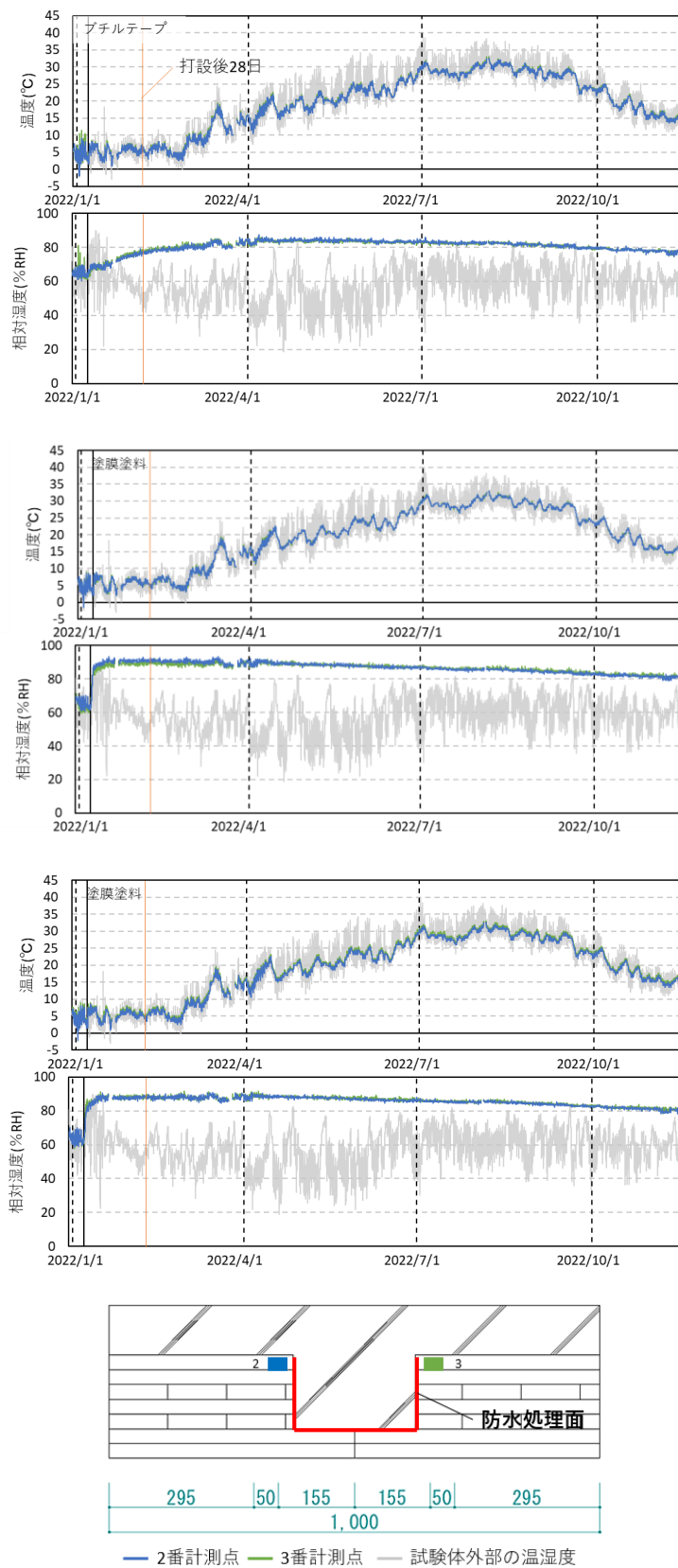


図 5.5 各処理計測点 2, 3 の結果

#### 5.4.1. 試験体1（平板試験体）結果

図 5.6 に試験体 1 の中央計測点各層の計測値を、図 5.7 に 1 層目の木口からの距離が異なる計測点の計測値を、図 5.8 に 3 層目の木口からの距離が異なる計測点の計測値の推移を示す。また表 5.2 に各層の含水率計測値を示す。

各層の計測値について、温度は層による違いは見られなかったが、外気温に対して CLT 内部の計測値の方が 1 日の変動が少なくなっている。相対湿度及び含水率は、コンクリート打設後、コンクリートに接している 1 層目の計測値が約 3 か月間上昇を続け、その後減少し続けている。また打設から 1 か月後より 2 層目の計測値も上昇を開始し、2022 年 6 月からは緩やかに減少し続けている。3 層目以下の計測値はほぼ横ばいで推移している。しかし、コンクリート打設後 5 か月後からは 3、4 層目はそれ以下の層と比べて若干高い値を推移している。初期含水率と各層の最大含水率との差は、1 層目が 6.31%、2 層目が 3.74%であり、1、2 層目に関しては防水処理がない場合には明確に含水率上昇があることが判明した。また現在の含水率と初期含水率との差は、1 層目が 1.87%、2 層目が 1.95%まで減少している。この含水率が初期含水率まで減少するのか、このまま約 2%高い状態を続けるのか今後の計測で明らかにしていきたい。

1 層目の木口からの距離の異なる計測点の温度は、木口からの距離が近い計測点の方が 1 日の変動が若干大きい。相対湿度と含水率は、コンクリート打設後木口から 30mm と 80mm の計測点が中央計測点よりも急に上昇したが、3 か月経過後にはほぼ同じ含水率となり、その後は計測点による違いはなくすべての計測点が減少を続けている。

3 層目の木口からの距離の異なる計測点の温度は、1 層目の時と同様に木口からの距離が近い計測点の方が 1 日の変動が大きい。それに対し相対湿度と含水率は木口からの距離に関係なくすべての計測点がほぼ横ばいで推移している。

表 5.2 各層の含水率計測値

		1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	6層目
初期含水率	$M_0$	11.91	11.52	11.31	11.42	11.45	11.54
全期間最大	$M_{max}$	18.22	15.64	13.50	13.27	13.00	12.62
28日経過含水率	$M_{28}$	14.26	12.48	11.69	11.69	11.73	11.82
最終含水率	$M_{314}$	13.78	13.85	12.82	12.97	12.53	11.82
初期含水率との差	$M_{max}-M_0$	6.31	3.74	1.59	1.36	1.09	0.71
	$M_{28}-M_0$	2.35	0.57	-0.22	-0.22	-0.18	-0.09
	$M_{314}-M_0$	1.87	1.95	0.91	1.07	0.62	-0.09

※初期含水率はコンクリート打設日（2022/1/7）の含水率、最終含水率は 2022/11/16 の含水率である。



第 5 章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

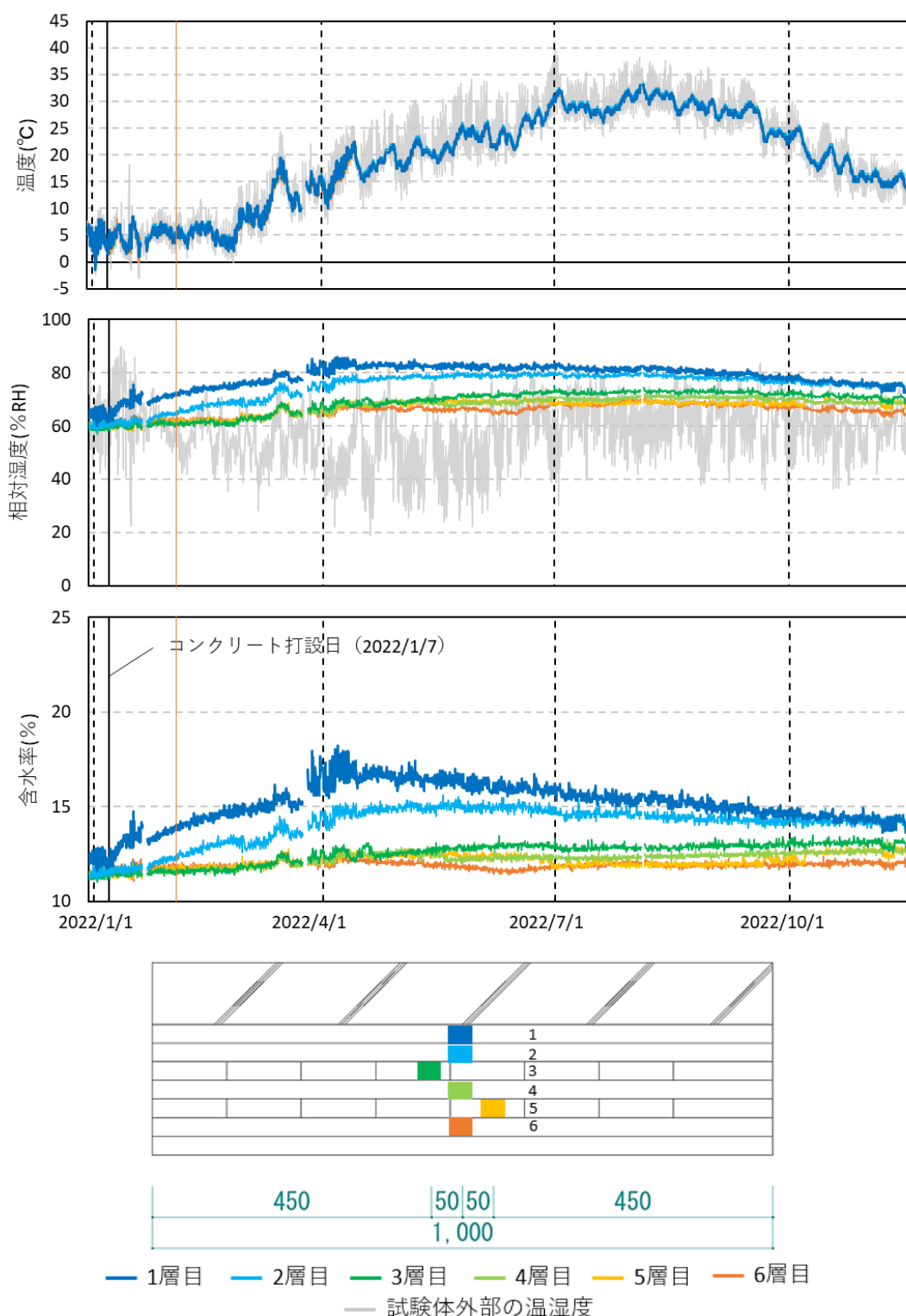


図 5.6 試験体 1 の各層中央計測値

第5章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

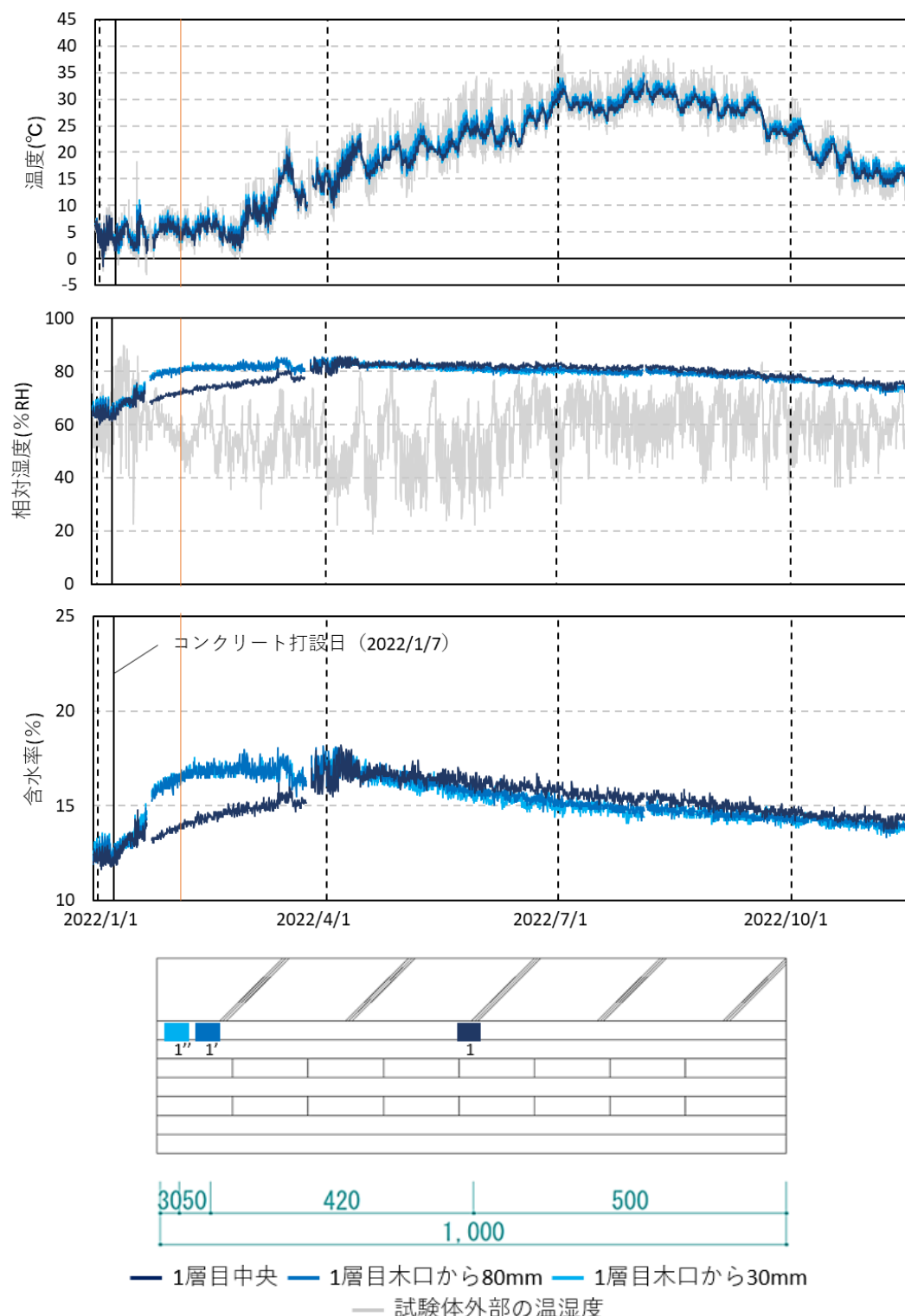


図 5.7 試験体 1 の 1 層目計測値

第 5 章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

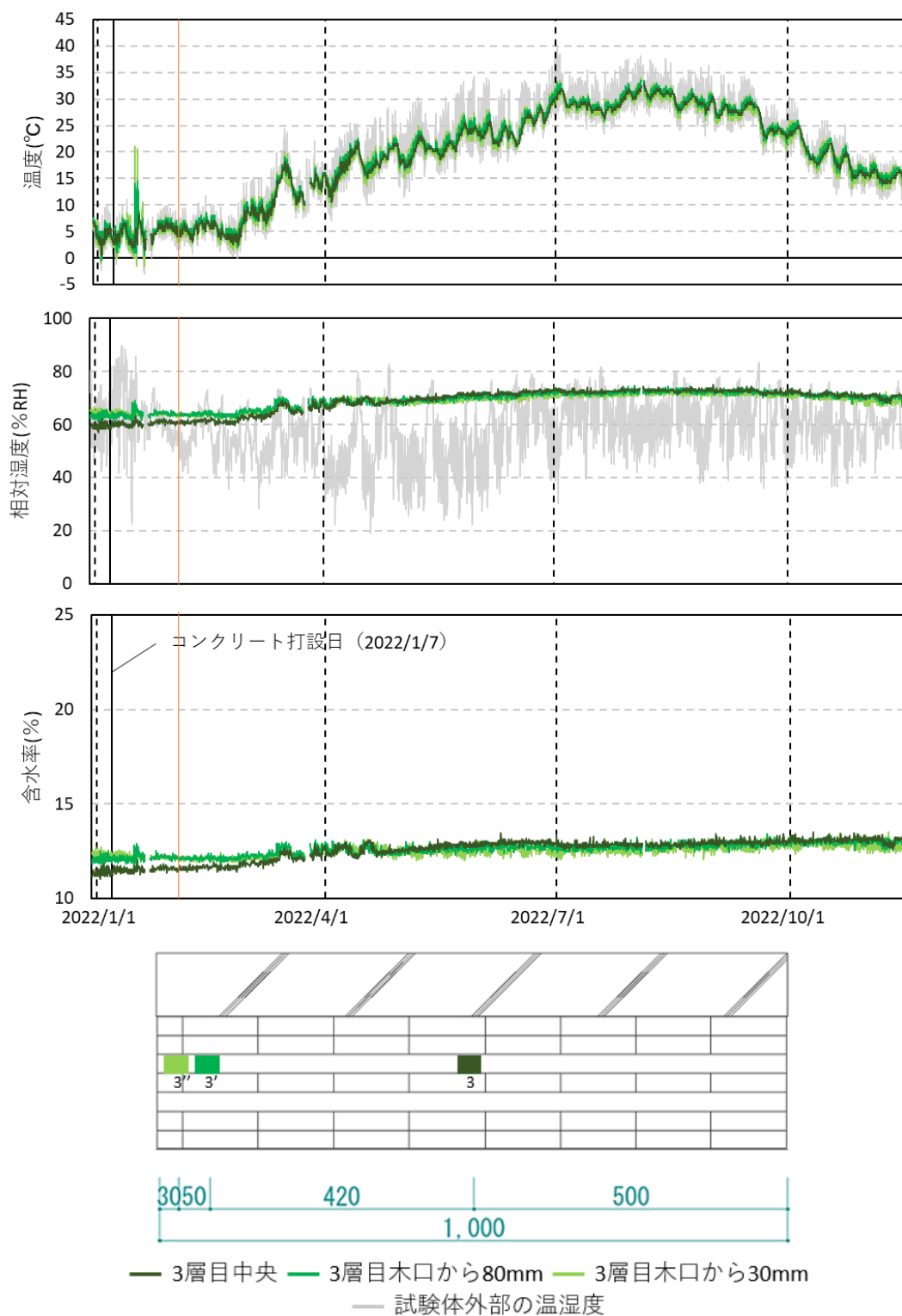


図 5.8 試験体 1 の 3 層目計測値

5.4.2. 試験体 2 (接合部試験体) ブチルテープ処理部分の結果

図 5.9 に試験体 2 ブチルテープ処理部分の 1~4 層計測値の結果、図 5.10 に試験体 1 の 1 層目と試験体 2 ブチルテープ処理部分 1 の 1 層目の含水率計測値の比較、図 5.11 に試験体 2 ブチルテープ処理部分の 1 層目と 6 層目計測値の結果を示す。また表 5.3 に各層の含水率計測値を示す。

温度は全ての計測点においてコンクリート打設前後の計測値の違いは見られなかった。

相対湿度と含水率に関して、1~4 層目では 1, 2 層目で含水率上昇が見られた。1 層目に関して、平板試験体である試験体 1 の 1 層目計測点を比較すると、ほぼ同様に推移しており、ブチルテープ処理部の含水率上昇はシアキー部からではなく上部板目面からの水分移動によるものではないか考えている。3, 4 層目の含水率上昇は見られず、ブチルテープはシアキー側面からの水分流入に対して効果があることがわかった。また 1 層目と 6 層目を比較すると、板目面からの水分流入があったと考えている 1 層目の含水率上昇に対して 6 層目はほとんど含水率上昇が見られなかった。このことから、ブチルテープ処理はシアキー底部及びつき合わせ接合部からの水分流入に対しても効果があることがわかった。

表 5.3 試験体 2 ブチルテープ処理部分各層の含水率計測値

		ブチルテープ処理部分					
		1層目	2層目	3層目	4層目	6層目	7層目
初期含水率	$M_0$	12.13	11.96	12.10	11.67	11.59	11.82
全期間最大	$M_{max}$	18.96	15.83	14.60	14.40	13.12	13.01
28日経過含水率	$M_{28}$	15.14	12.89	13.19	12.74	12.18	11.95
最終含水率	$M_{314}$	14.45	14.42	13.60	13.65	12.55	11.84
初期含水率との差	$M_{max}-M_0$	6.82	3.86	2.51	2.73	1.52	1.20
	$M_{28}-M_0$	3.00	0.92	1.09	1.07	0.59	0.14
	$M_{314}-M_0$	2.31	2.46	1.50	1.98	0.95	0.03

第5章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

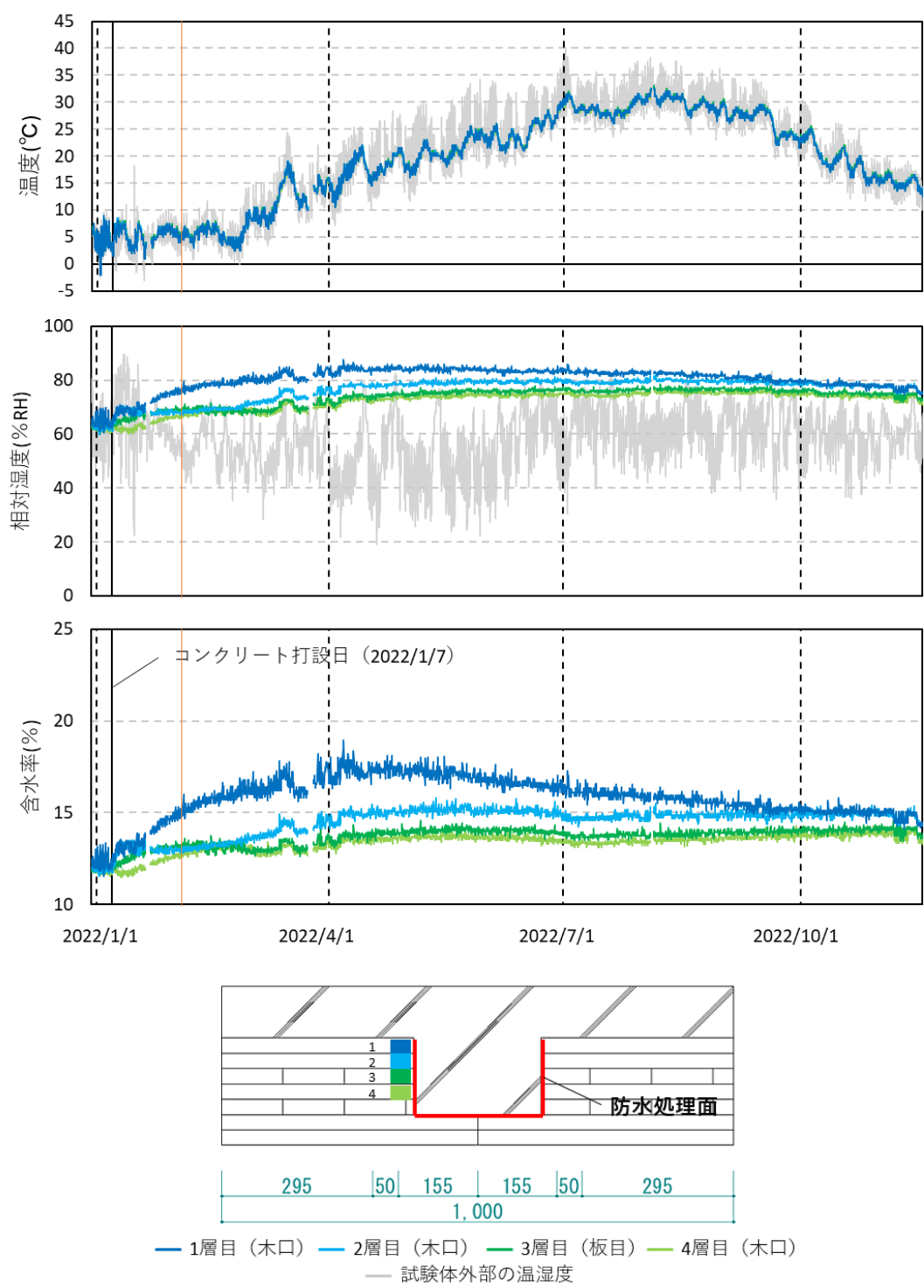


図 5.9 試験体 2 プチルテープ処理部分 1~4 層目の計測値

第5章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

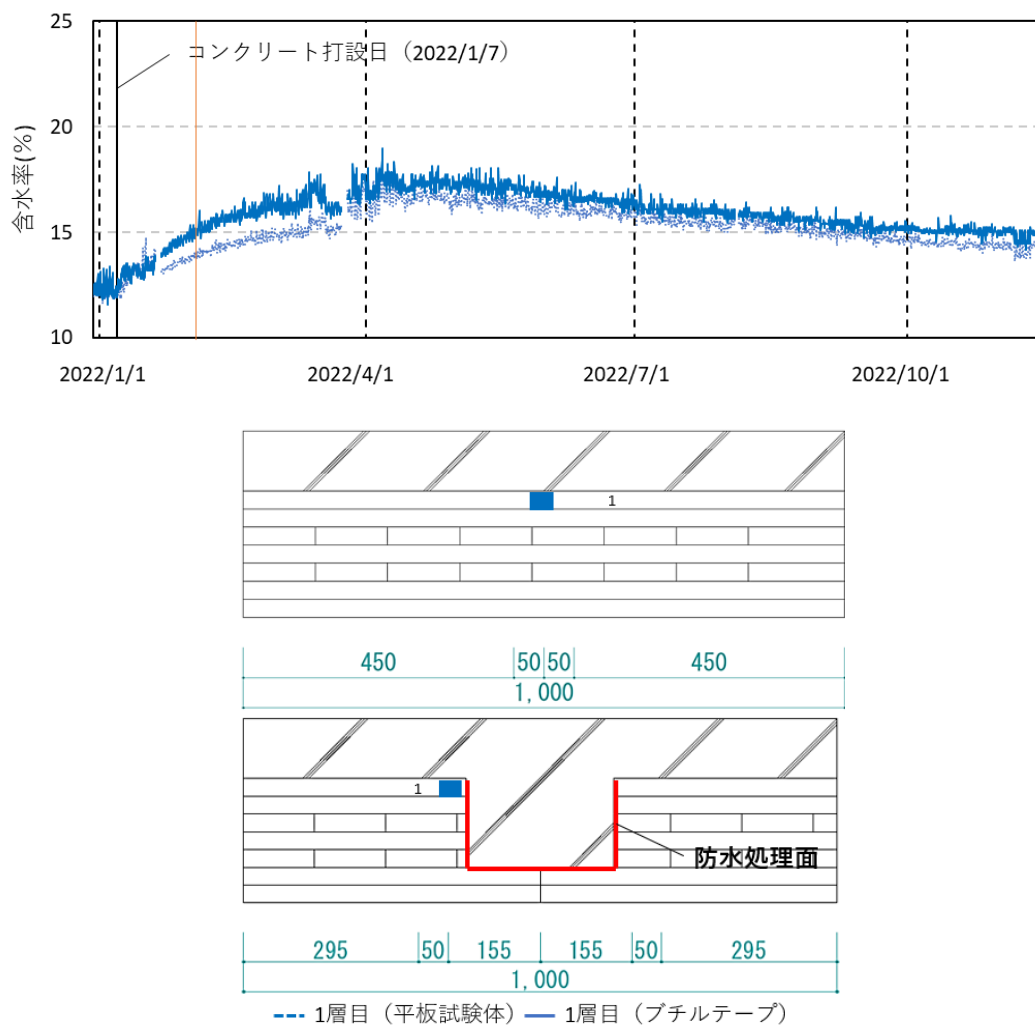


図 5.10 試験体 1 の 1 層目と試験体 2 ブチルテープ処理 1 層目の比較

第5章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

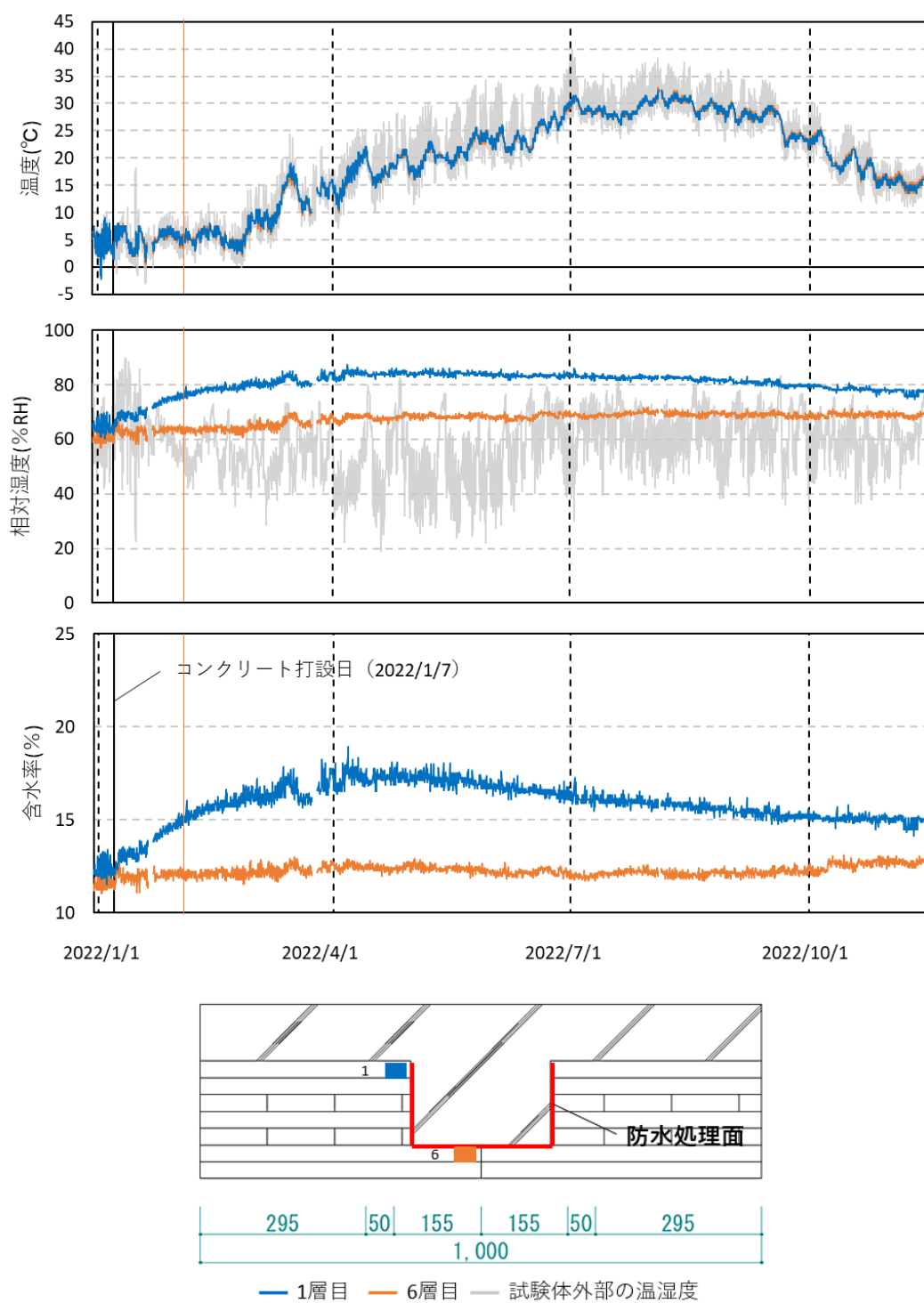


図 5.11 試験体 2 ブチルテープ処理部分の 1 層目と 6 層目の計測値

5.4.3. 試験体 2 (接合部試験体) 塗膜塗料処理部分の結果

図 5.12 に試験体 2 塗膜塗料処理部分の 1~4 層目計測値の結果、図 5.13 に試験体 2 塗膜塗料処理部分の 1 層目と 6 層目計測値の結果を示す。また表 5.4 に各層の含水率計測値を示す。

温度は全ての計測点においてコンクリート打設前後の計測値の違いは見られなかった。

相対湿度と含水率に関して、1,2 層目はコンクリート打設大幅に含水率が上昇したのち約 3 か月間横ばいに推移し、その後緩やかに減少を続けている。1,2 層目と同じようにシアキーに木口が接している 4 層目では、コンクリート打設後 1,2 層目よりも急激に含水率が上昇し上昇後すぐに減少を開始、その後 11 月 16 日時点まで減少を続けている。この推移の違いは表層からの距離の違いによるものではないかと考えている。これに対しシアキーに板目面で接している 3 層目では、コンクリート打設後含水率は 6%ほど上昇し、その後ほぼ横ばいに推移している。木口が接している 4 層目ほど急激な含水率上昇は見られなかったが、板目面で接している場合でも含水率上昇があることがわかった。6 層目計測点はコンクリート打設後 5%を超えるような含水率上昇は見られなかった。このことから、1 回塗りの塗膜塗料はシアキー側面からの水分流入には効果が小さいが、シアキー底部及びつき合わせ接合部からの水分流入に対しては一定の効果があることがわかった。

表 5.4 試験体 2 塗膜塗料処理部分の各層含水率計測値

		塗膜塗料処理部分					
		1層目	2層目	3層目	4層目	6層目	7層目
初期含水率	$M_0$	12.15	12.08	11.82	12.14	11.63	12.23
全期間最大	$M_{max}$	23.92	19.70	18.10	23.42	15.53	13.74
28日経過含水率	$M_{28}$	22.17	18.81	16.69	18.55	13.85	12.40
最終含水率	$M_{314}$	15.82	15.40	15.31	14.65	12.93	12.17
初期含水率との差	$M_{max}-M_0$	11.77	7.63	6.28	11.29	3.90	1.51
	$M_{28}-M_0$	10.02	6.73	4.88	6.42	2.22	0.17
	$M_{314}-M_0$	3.67	3.32	3.49	2.52	1.30	-0.06



第 5 章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

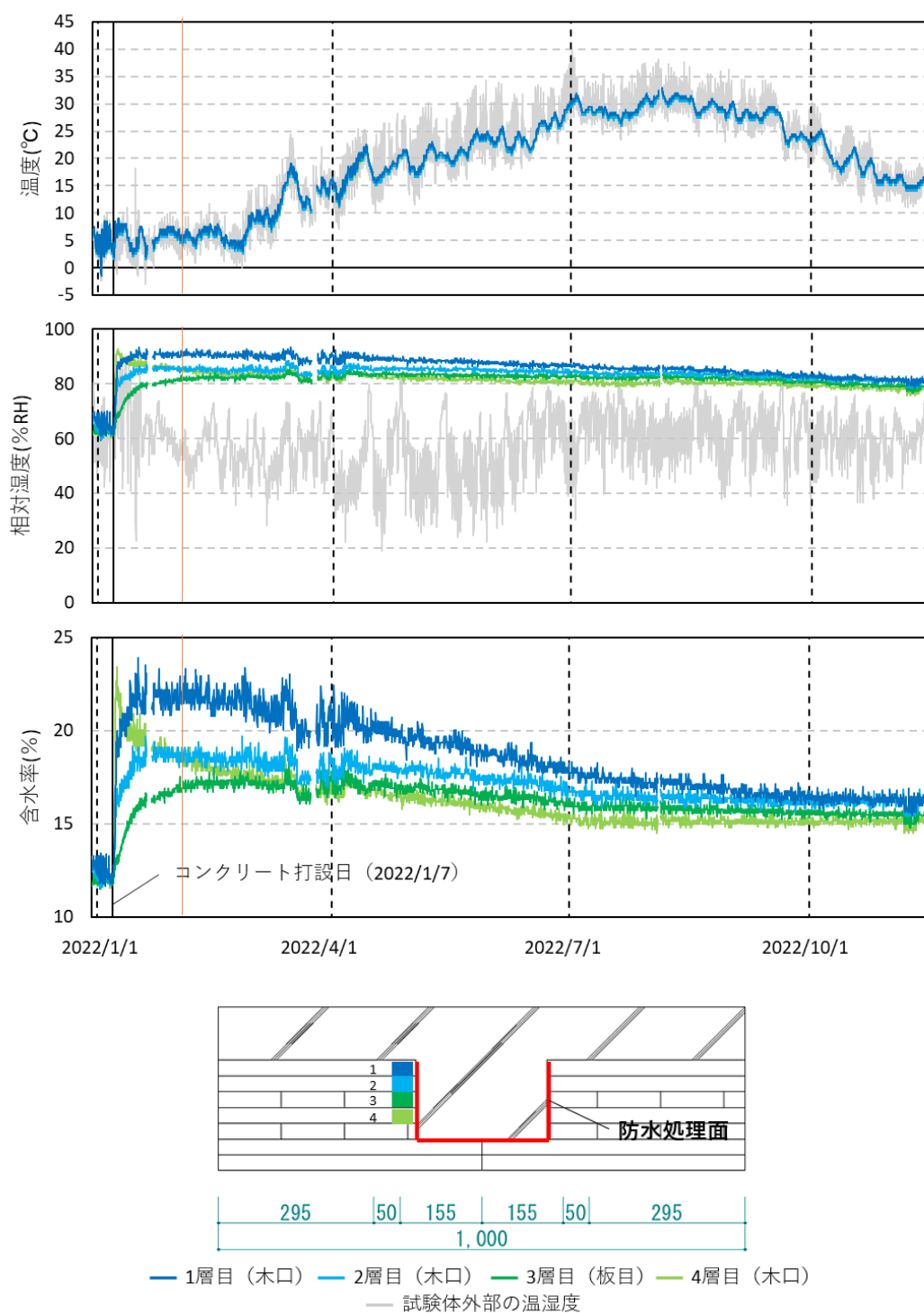


図 5.12 試験体 2 塗膜塗料処理部分 1~4 層目の計測値

第 5 章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

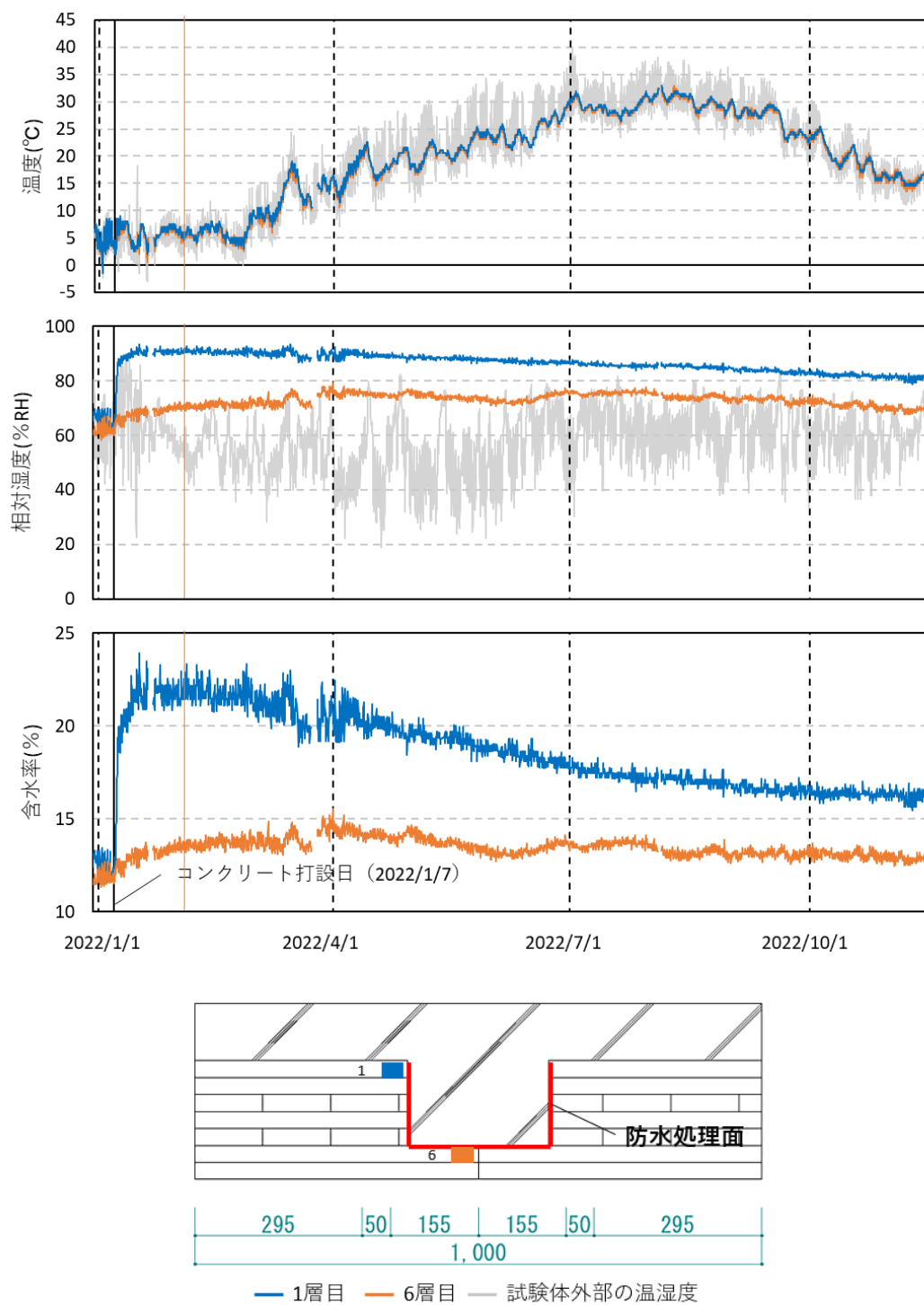


図 5.13 試験体 2 塗膜塗料処理部分の 1 層目と 6 層目の計測値

5.4.4. 試験体 2 (接合部試験体) 含浸塗料処理部分の結果

図 5.14 に試験体 2 塗膜塗料処理部分の 1~4 層計測値の結果、図 5.15 に試験体 2 塗膜塗料処理部分の 1 層目と 6 層目計測値の結果を示す。また表 5.5 に各層の含水率計測値を示す。

温度は全ての計測点においてコンクリート打設前後の計測値の違いは見られなかった。

相対湿度と含水率に関して、シアキーと木口が接している 1, 2, 4 層目はコンクリート打設後含水率が上昇、その後約 3 か月間は横ばいで推移し緩やかに減少を続けている。コンクリートからの距離が近いほど計測値の上昇幅が大きかった。一方でシアキーと板目面で接している 3 層目はコンクリート打設後 1, 2, 4 層目と同じように推移したが、含水率上昇は 1, 2, 4 層目よりは小さかった。6 層目はコンクリート打設後 1 層目と同じように含水率が上昇し、約 2 か月間横ばいで推移したが、その後 1 層目よりも急激に含水率が減少を続けている。このことから、1 回塗りの含浸塗料はシアキー側面からの水分流入とシアキー底部及びつき合わせ接合部からの水分流入に対して効果が小さいことがわかった。

表 5.5 試験体 2 含浸塗料処理部分の各層含水率計測値

		含浸塗料処理部分					
		1層目	2層目	3層目	4層目	6層目	7層目
初期含水率	$M_0$	12.27	12.17	12.08	12.15	11.25	11.98
全期間最大	$M_{max}$	21.57	19.53	18.14	18.43	23.56	17.43
28日経過含水率	$M_{28}$	20.26	17.95	20.42	17.48	21.77	13.35
最終含水率	$M_{314}$	15.64	14.80	15.54	13.91	13.50	12.24
初期含水率との差	$M_{max}-M_0$	9.30	7.36	6.06	6.28	12.31	5.45
	$M_{28}-M_0$	7.99	5.77	8.34	5.32	10.52	1.36
	$M_{314}-M_0$	3.37	2.63	3.47	1.75	2.26	0.26

第 5 章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

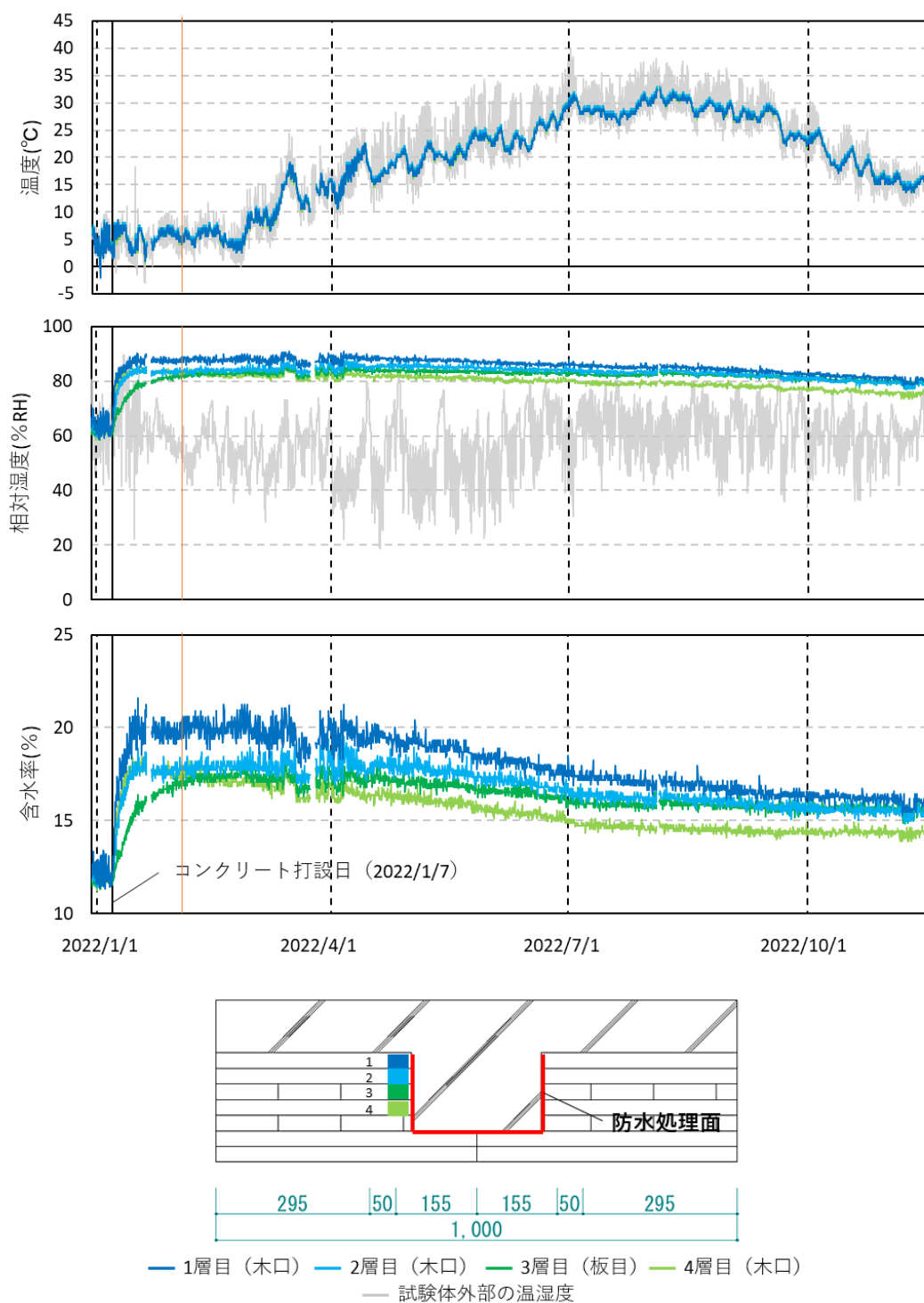


図 5.14 試験体 2 含浸塗料処理部分 1~4 層目の計測値

第 5 章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

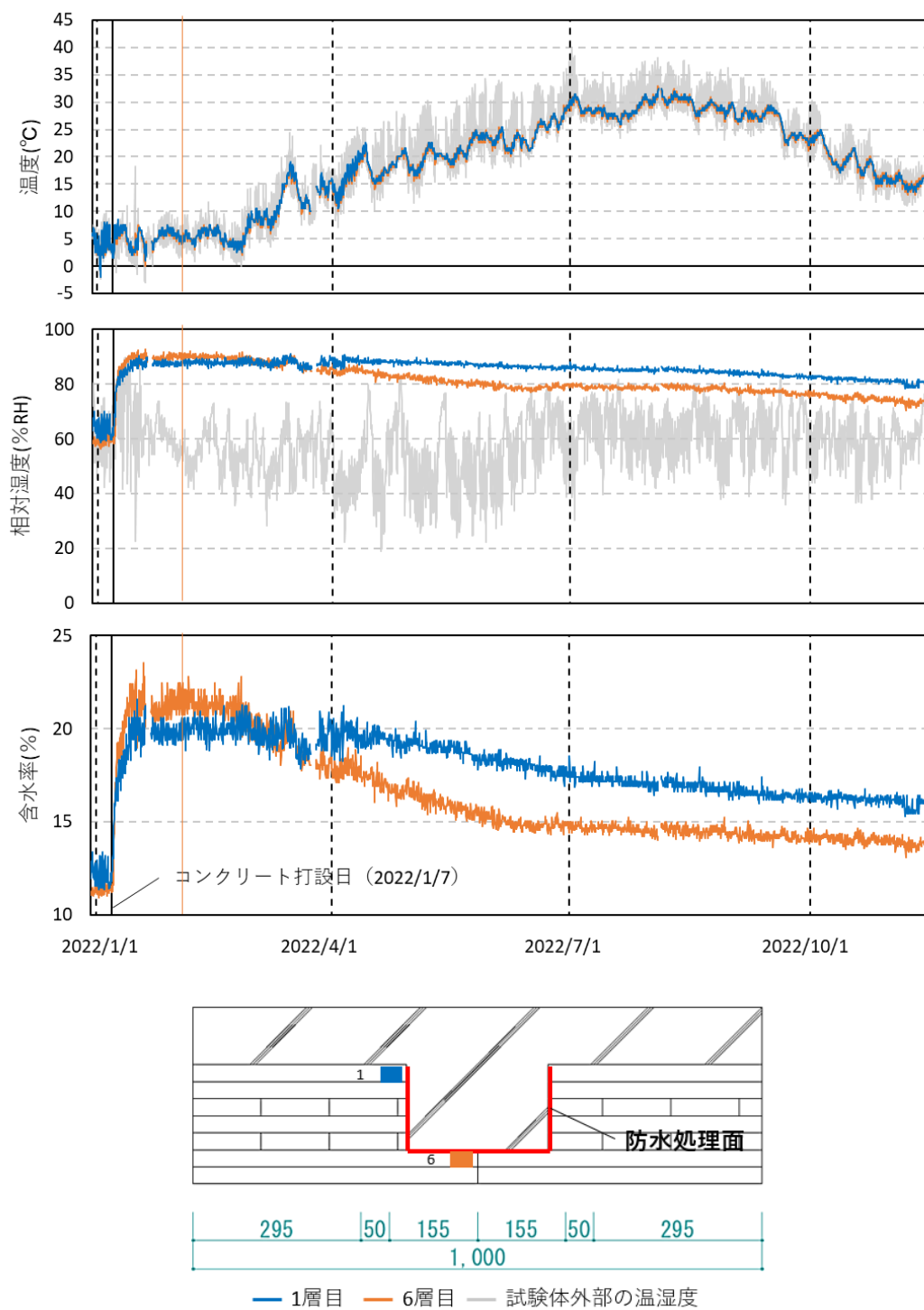


図 5.15 試験体 2 含浸塗料処理部分の 1 層目と 6 層目の計測値

5.4.5. 各防水処理の比較

図 5.16 に各防水処理での最大含水率を示す。比較として試験体 1 での同じ層の最大含水率も併せて示している。プチルテープ処理の 1, 2, 6 層目は全て、試験体 1 と最大含水率がほぼ同じであった。塗膜塗料と含浸塗料の 1, 2 層目は、どちらも試験体 1 の同じ層よりも 5%ほど高く、含浸塗料の方が塗膜塗料よりも 1 層目の含水率上昇は小さかったが、2 層目は塗料による違いは見られなかった。含浸塗料の 6 層目は、含浸塗料の他の層よりも最大含水率が高く、一方で塗膜塗料の 6 層目は試験体 1 の 6 層目の最大含水率よりも 3%ほどの上昇にとどまっていた。

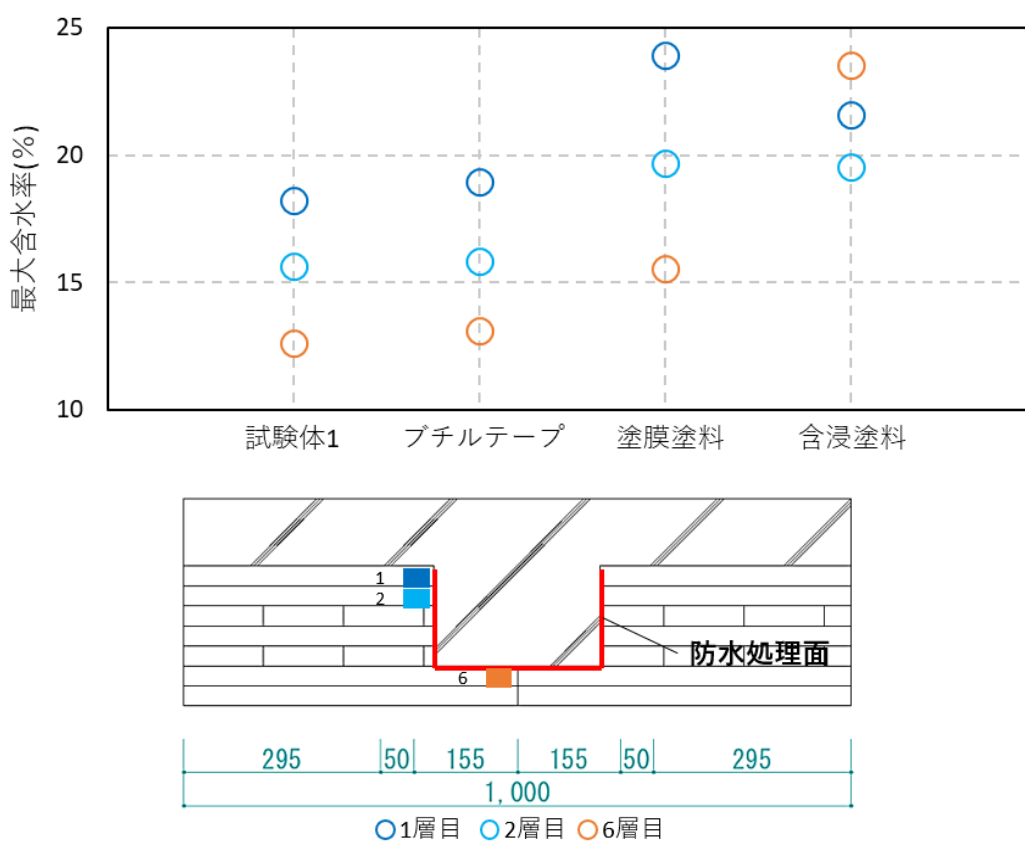


図 5.16 各防水処理の最大含水率の比較

### 5.5. TCC 打設後の外部気温に関する確認試験

試験体 1 の計測において、コンクリート打設後約 3 か月後に試験体の外部気温が上昇し、それに伴い CLT 内部温度も上昇した。その際、CLT 内部の相対湿度も同様に上昇していたのだが、本来であれば水分量が一定で温度のみ上昇した場合相対湿度は減少するはずである。図 5.17 にこの現象が起きていた期間（計測開始から 2022 年 4 月 1 日まで）の試験体 1 の中央計測点の推移を示す。この現象の要因として、以下の 2 つの仮定を建て、それを明らかにするために小試験体での検討をおこなうこととした。

① 温湿度センサの特性

② 外気温の上昇によるセメントの水和反応促進によるもの

⇒外気温の上昇に伴いセメントの水和反応が進み、より多くの水分が CLT に流入したことで相対湿度の上昇が起きた。

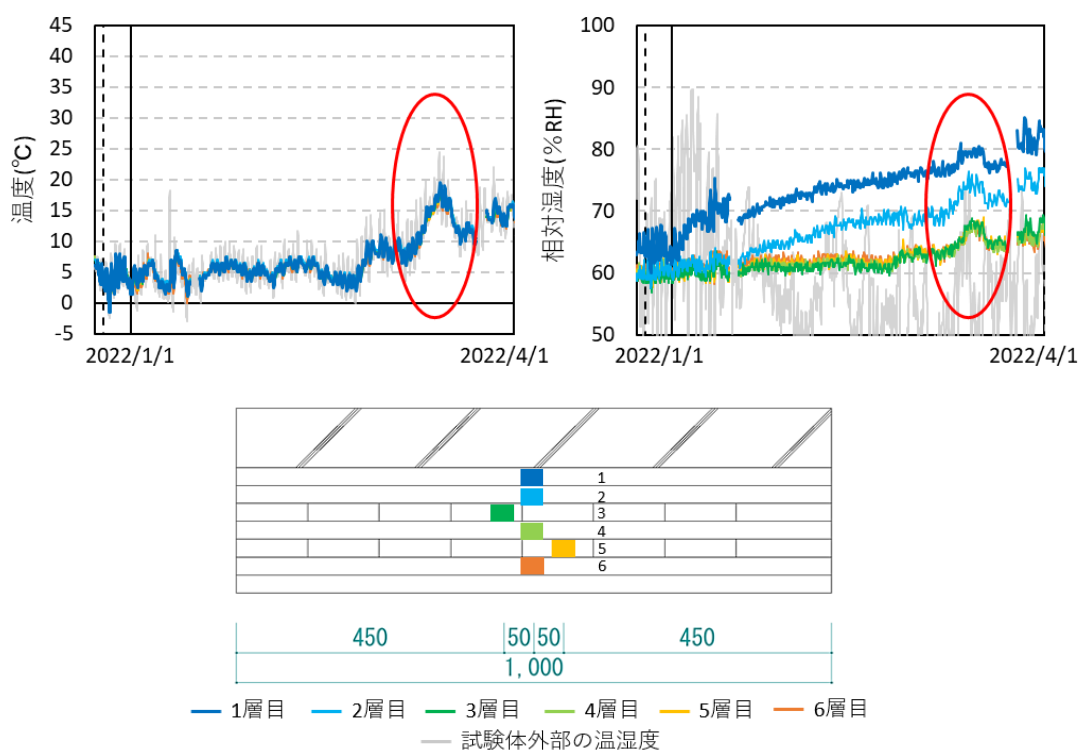


図 5.17 試験体 1 の温湿度計測値

5.5.1. 試験体概要

図 5.18 に試験体概要を、図 5.19 に養生のスケジュールを示す。200×200mm の 5 層 5 プライ CLT の上に厚さ 100mm のコンクリートを打設した試験体を 3 体計測した。試験体のコンクリートと CLT の界面には防水処理は施さず、CLT 側面は外部からの水分流入を防ぐためブチルテープを貼った。計測は、CLT のコンクリートに接する層を 1 層目としたときの 1, 2, 3 層目に温湿度センサ (HY) を埋め込んでおこなった。コンクリートの構成は試験体 1 と同じものを使用しており、打設日は 2022 年 11 月 28 日である。試験体の養生は、コンクリート打設後 1 か月間は室温状態とし、その後試験体 A はそのまま室温状態を継続し、試験体 B は 20°C のインキュベータ内に設置、試験体 C は 40°C のインキュベータ内に設置し、養生時の温度による含水率上昇の影響を確認することとした。写真 5.3 に試験体の写真を示す。温湿度センサの計測は、2022 年 11 月 22 日より開始し 1 時間間隔で計測をおこなっている。

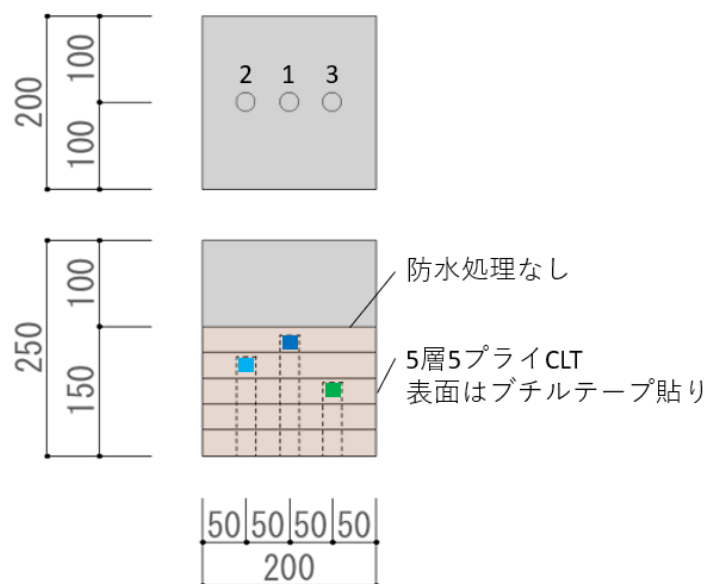


図 5.18 試験体概要



第5章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

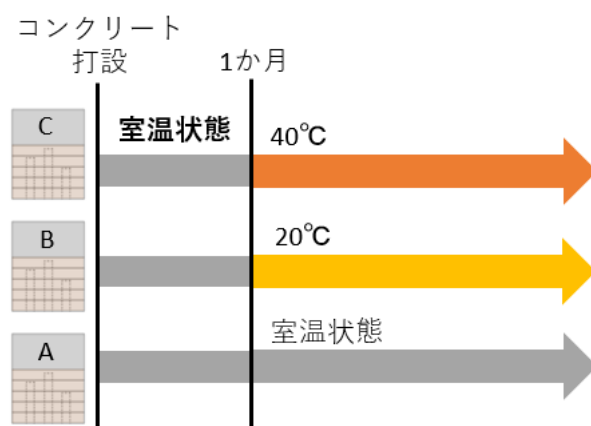


図 5.19 養生スケジュール



コンクリート打設前



コンクリート打設後

写真 5.3 試験体写真

### 5.5.2. 計測結果

図 5.20 から図 5.22 に 2022 年 11 月 28 日から 2023 年 1 月 30 日までの試験体ごとの内部温湿度と、そこから算出した内部含水率を示す。打設前約 1 週間と打設後約 2 か月、そして試験体 B と C の温度調節を開始してから約 1 か月のデータとなっており、図中赤点線でコンクリート打設日（2022 年 11 月 28 日午前 9 時）、黒点線で試験体 B と C の温度調節を開始した日（2022 年 12 月 28 日正午）を示している。

相対湿度と含水率は全ての試験体で、コンクリート打設後 1 層目が上昇した。また 2 層目はコンクリート打設から緩やかに上昇を続けている。3 層目はコンクリート打設前後でほとんど変動はない。

温度調節を開始したタイミングで試験体 B と C の相対湿度は 1～3 層すべての計測点で急激な上昇が見られた。しかし試験体 B の 1 層目は急激な上昇の後、温度調節前の相対湿度まで減少しているが、試験体 C の 1 層目は温度調節前の相対湿度よりも低い値まで減少していた。また、2 層目と 3 層目は上昇したままの状態で推移している。

図 5.23 に層ごとの含水率を示す。1 層目の各試験体を比較すると、コンクリート打設前後の含水率変動は、試験体 B のみ急激に上昇しその後徐々に減少している。しかし試験体 A と C は試験体 B ほど急激な含水率上昇は見られず約 1 か月間上昇を続けていた。これはコンクリート打設時に試験体 B のみ計測穴まで水分が流入したためと考えている。同じ CLT・コンクリートでも計測する場所によって含水率の変動が異なることがわかった。

1 層目の温度調節開始前後の含水率変動は、試験体 B と C のどちらも一時的に 26.5%まで上昇していたがその後急激に減少していた。また相対湿度と同様に試験体 B は温度調節前の含水率までの減少だったが、試験体 C は温度調節前よりも低い値まで減少していた。

この急激な相対湿度変動が 5.5.1 で述べた仮定②であった場合、試験体 C のような外部温度変動前よりも低い相対湿度になることや、2、3 層目まで同じように相対湿度が上昇することは考えにくい。また、このような急激な相対湿度の変動は第 2 章で実施した 2.3 の実験の内、温湿度を一度に変動させる乾湿繰り返し環境での計測でも起こっていた。そのため、この相対湿度の急激な変動は温湿度センサの特性によるものだと考える。

第5章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

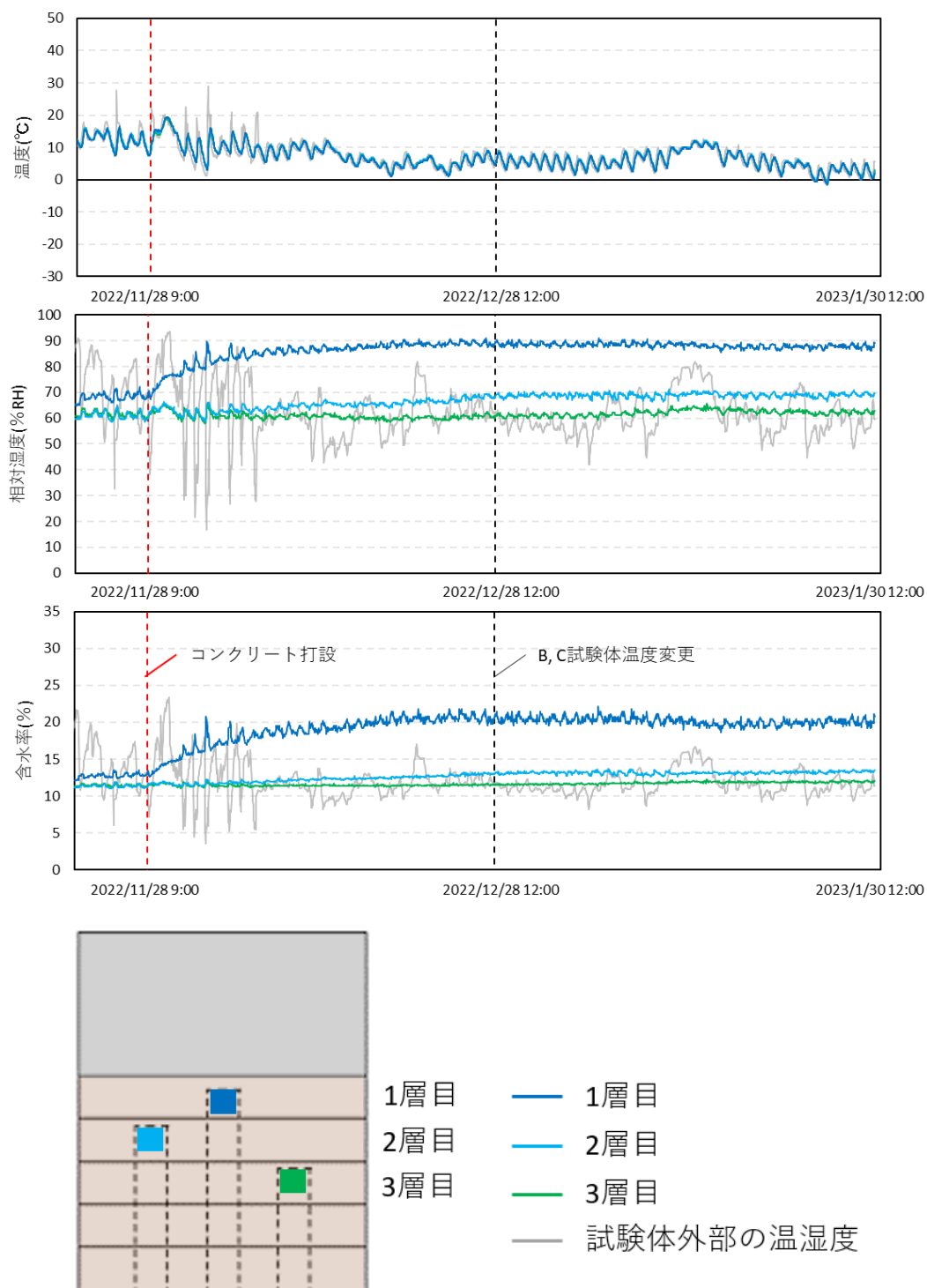


図 5.20 試験体 A の結果 (温湿度調整なし)

第5章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

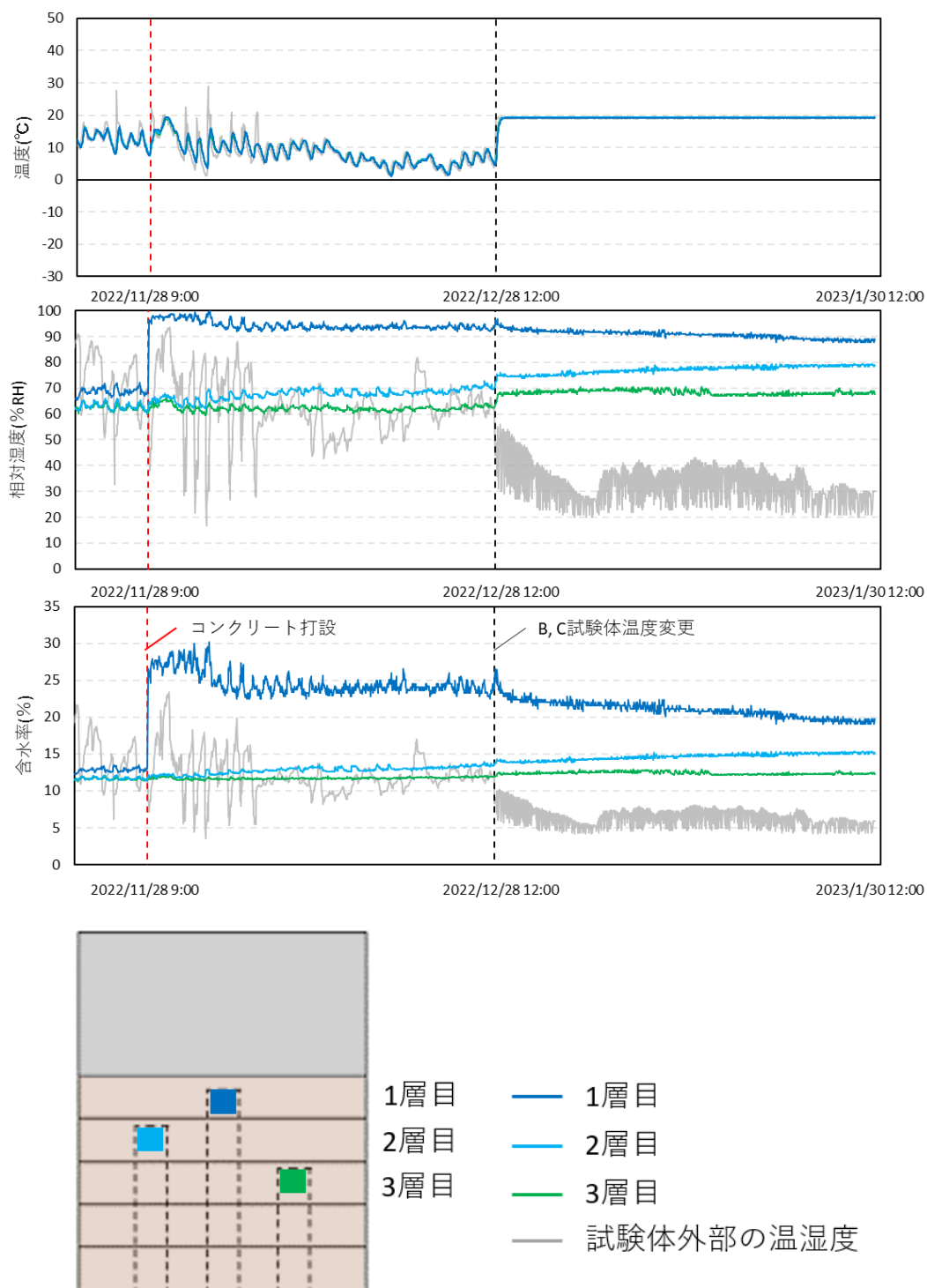


図 5.21 試験体 B の結果 (20°C温度調整)

第 5 章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

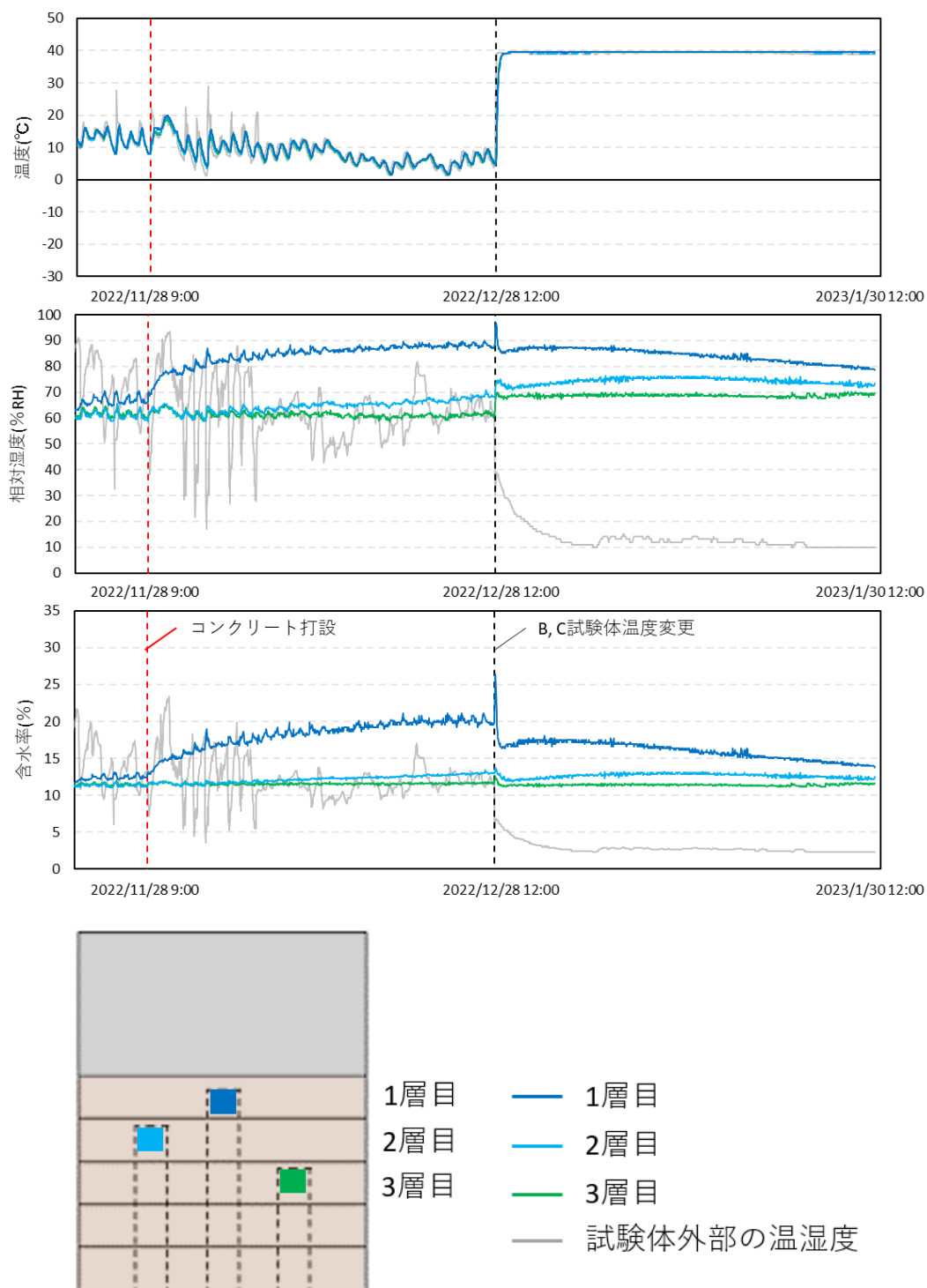


図 5.22 試験体 C の結果 (40°C温度調整)

第5章 CLT-RC 複合床の打設前後の含水率変動

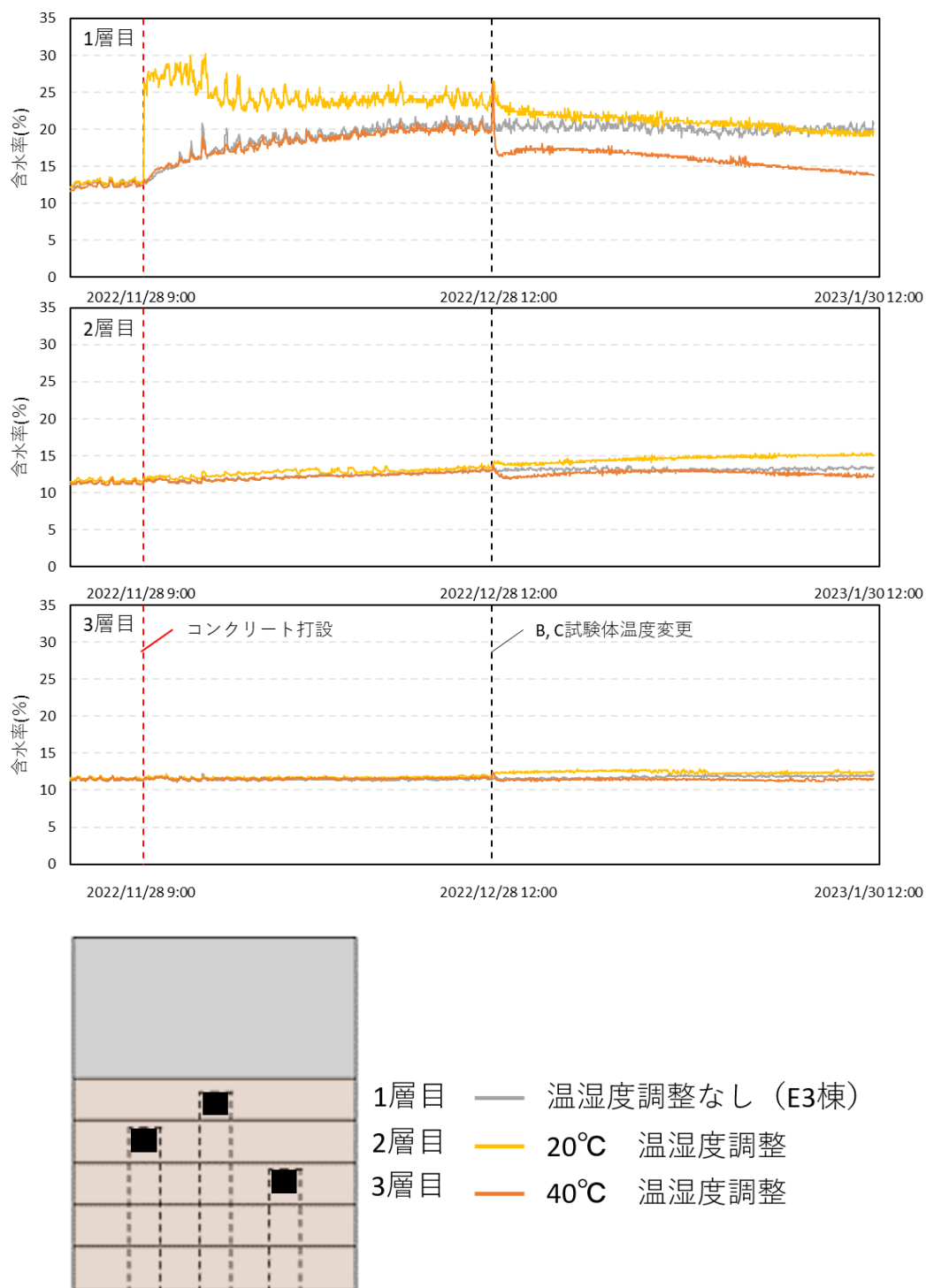


図 5.23 試験体の層ごとの含水率

### 5.6. 5 章のまとめ

第 5 章では、CLT を用いた CLT-RC 複合床のコンクリート打設前後の含水率変動を平板試験体とシアキー及びつき合わせの接合部を模した部分を持つ接合部試験体の 2 つについて計測した。また、急激な外部気温上昇に伴う相対湿度の上昇について確認のための実験をおこなった。

平板試験体の計測では、コンクリート打設後に 1,2 層目で明確な含水率上昇が見られた。初期含水率と各層の最大含水率との差は、1 層目が 6.31%、2 層目が 3.74% であった。また現在の含水率と初期含水率との差は、1 層目が 1.87%、2 層目が 1.95% まで減少している。この含水率が初期含水率まで減少するのか、このまま約 2% 高い状態を続けるのか今後の計測で明らかにしていきたい。

接合部試験体では、その木端面及びシアキー底部に異なる 3 種類の防水処理方法を施した。その結果、塗料処理の塗布回数が 1 回の場合は木口面からの水分流入に対してはブチルテープが、CLT 継手部分からの水分流入に対してはブチルテープと塗膜塗料が効果的であることがわかった。

外部気温に関する確認実験では、温度調節を行った試験体の全ての層で外部温度上昇に伴う内部相対湿度の急激な上昇が確認された。また、2,3 層目の計測値は、外部温度の上昇による上昇分が戻ることなくそのまま変動を続けることがわかった。外部温度の急激な変動に伴う相対湿度の変動は、センサの特性によるもので、この変動は無視しても問題ないと考える。





第 6 章  
おわりに

## 6. おわりに

近年環境問題等の観点から、中大規模建築物への木材の利用が促進されている。建築物の規模・用途の変化は、要求性能の高度化につながっており、小規模な住宅に比べてより高い水密性や防耐火性能が必要な建築物が増加している。木質系材料は他構造材に比べ、含水率による機械的性能の変化率が大きいことが知られており、含水率と膨潤収縮や強度特性の関係に関して、様々な研究がおこなわれてきた。木質構造物の適切な耐久設計には、躯体内部含水率の把握が必要である。しかし、中大規模建築物で用いられている Mass Timber では、大断面であるために内部の含水率の計測が困難である他、躯体内部のどの範囲、かつどの程度含水率上昇があるのか知見が少ない。

そこで本研究では Mass Timber 内部の含水率変動を明らかにすることを目的とし、Mass Timber 内部の含水率変動を計測する方法の検討と、本方法を用いた CLT・集成材内部含水率計測値から含水率変動と設置条件との関係を明らかにする研究をおこなった。

第2章では、大断面をもつ Mass Timber の内部含水率を計測するため、温湿度センサを用いた含水率計測方法について検討した。この含水率計測方法は、木材内部に埋め込んだ温湿度センサの計測値を計測点の周囲を平衡状態と仮定し、平衡含水率曲線を適用することで、木材内部の局所的な含水率の推移を計測できるのではないかと考えたものである。

内部含水率計測値の検討として、異なる樹種、試験体寸法の製材内の含水率を計測し、計測した内部含水率と全乾法含水率との比較をした。その結果、3日間の吸湿環境では、高含水率になるほど本計測方法の内部含水率が全乾法含水率よりも高い安全側の値を示すことがわかり、今回の実験で検討した樹種の中ではスギが最もその傾向が顕著であった。また、吸・放湿環境の同時刻の内部含水率と全乾法含水率の関係から、試験体寸法ごとの内部含水率補正式を得た。さらに、3日間の放湿環境、1日間隔での乾湿繰り返し環境、氷点下(-5℃)環境では、内部含水率と全乾法含水率とが樹種に関わらずほぼ一致することがわかった。試験体寸法に関しては、吸・放湿環境での3日経過時の含水率変動を試験体寸法ごとに比較したところ、試験体寸法が小さくなるほど含水率変動が大きいことがわかり、本計測方法で繊維方向の含水率分布が計測可能であることが示唆された。

また、スギ CLT で内部含水率を計測した実験では、今回の実験の間隔(最小 50mm)で同じラミナの繊維方向に計測点を増やすことは問題ないことがわかった。これらの結果より、現状、本計測方法を実建物で使用する際には内部含水率が高含水率(繊維飽和点に到達しているかどうか)になっているかどうかの検知を目的として用いることは可能であることがわかった。

第3章では、Mass Timber の内 CLT と集成材内部の屋外暴露時の含水率変動を第2章で検討した温湿度センサを用いた含水率計測方法で計測した。

## 第6章 おわりに

最も試験体数の多い旭川と都城での屋外暴露実験では、無処理スギ CLT、無処理スギ集成材、薬剤処理スギ CLT の3種類の材料を屋内、屋外平置き、屋外縦置き、屋根付き平置き、屋根付き縦置きの5条件で暴露し、それぞれの条件の内部含水率変動を比較した。その結果全ての設置条件で、材端（計測している層のラミナの木口）からの距離によって含水率変動の大きさが異なり、材端からの距離が遠いほど含水率変動が小さくなることがわかった。また屋根付き試験体では、屋根なしの試験体よりも含水率変動が大幅に小さく、材端から30mmの計測点であっても25%を超えるような含水率は極端な大雨の日を除き計測されなかった。このことより屋外使用時に直接雨水が材料にかからないような設置方法であれば、木口付近であっても1年間の暴露で腐朽が懸念されるような高い含水率状態になりにくいことがわかった。

薬剤処理 CLT に関しては、冬季の割れによる無処理計測点の影響が少なかった都城試験体で比較すると、材端計測点と中央計測点のどちらも薬剤処理 CLT の変動の方が大きいことがわかった。これはインサイジング処理によって無処理よりも多く水分流入が起こるためと考えられ、インサイジング処理を伴う薬剤処理は含水率的には不利に働くことが判明した。今後、この含水率状態で腐朽の発生を抑制できるかが検討項目である。

第4章では、屋外暴露環境での CLT 及び集成材の強度性能変化を明らかにするため、第3章で報告した暴露実験の試験体（暴露開始から半年暴露試験体と、1年暴露試験体）で強度試験（全面圧縮試験・支圧試験・接着せん断試験）を実施した。

その結果、全面圧縮試験、支圧試験、接着せん断試験の全てで、半年暴露試験体の設置条件や設置時の方角による強度低下は見られなかった。また接着せん断試験の CLT45° ブロックせん断試験体と集成材ブロックせん断試験体では、1年暴露試験体の試験も実施したが、こちらも半年暴露試験体の結果に対する明確な強度低下はなく、1年間の暴露であれば CLT、集成材の接着性能に大きな影響を及ぼさないことがわかった。

第5章では、CLT を用いた CLT-RC 複合床のコンクリート打設前後の含水率変動を平板試験体とシアキー及びつぎ合わせの接合部を模した部分を持つ接合部試験体の2つについて計測した。また、急激な外部気温上昇に伴う相対湿度の上昇について確認のための実験をおこなった。

平板試験体の計測では、コンクリート打設後に1,2層目で明確な含水率上昇が見られた。初期含水率と各層の最大含水率との差は、1層目が6.31%、2層目が3.74%であった。また現在の含水率と初期含水率との差は、1層目が1.87%、2層目が1.95%まで減少している。この含水率が初期含水率まで減少するのか、このまま約2%高い状態を続けるのか今後の計測で明らかにしていきたい。

接合部試験体では、その木端面及びシアキー底部に異なる3種類の防水処理方法を施した。その結果、塗料処理の塗布回数が1回の場合は木口面からの水分流入に対してはブチル

## 第6章 おわりに

テープが、CLT 継手部分からの水分流入に対してはブチルテープと塗膜塗料が効果的であることがわかった。

外部気温に関する確認実験では、温度調節を行った試験体の全ての層で外部温度上昇に伴う内部相対湿度の急激な上昇が確認された。また、2,3層目の計測値は、外部温度の上昇による上昇分が戻ることなくそのまま変動を続けることがわかった。内部相対湿度の急激な上昇は使用している温湿度センサのものによると考えられる。

本研究では上記に述べた実験によって、以下のことがわかった。

- ① 温湿度センサを用いた内部含水率計測方法は現状、材内部任意の場所が高含水率（繊維飽和点付近）に達しているかどうかの検知に使用可能であること。
- ② 屋外環境での CLT と集成材の内部含水率に関して、内部含水率の変動は木口からの距離によって概ね決定し、木口から約 500mm 離れると設置条件や季節を問わずほとんど変動しないこと。また CLT-RC 複合床平板試験体のコンクリート打設前後の含水率変動の結果より、板目面からの水分流入は僅かであること。
- ③ 屋外環境での CLT と集成材の内部含水率に関して、1年程度の暴露で材面に直接雨水が掛からない条件であれば、木口付近であっても腐朽の発生の恐れがある高含水率状態にはなりにくいこと。

最後に、これらの結果から本研究で検討した計測方法で実建物内部の含水率をモニタリングするために今後検討が必要な項目を述べる。

### 計測方法に関する検討事項

#### ○本計測方法で内部含水率と定義する範囲の決定

2.3節の実験で、内部含水率と全乾法含水率との関係について検討したが、本計測方法で内部含水率と定義する範囲の決定には至らなかった。今後はより高含水率（今回の実験で検討できなかった、20%以上の含水率）での全乾法含水率と内部含水率との関係を明らかにすることで、内部含水率補正式の精度を高めることができる。また、試験体サイズに関しても、より小さい寸法での実験が可能であれば、全乾法含水率と内部含水率との差が小さくなる可能性があると考えられる。

#### ○氷点下での計測に関するより詳細な検討

2.3節の実験で、氷点下環境での計測可否について検討したが、氷点下で相対湿度を変動させた場合は実験できなかった。また、 $-5^{\circ}\text{C}$ 以下の計測もできなかったため計測可否を判断するためにより詳細な検討が必要と考える。

#### ○温湿度センサの埋め込み方の検討

## 第6章 おわりに

2.4節と2.5節の実験で温湿度センサの埋め込み方を検討した。計測穴にセンサを設置し、ウレタンゴム棒とパテを用いて穴を塞ぐ方法で検討したが、この方法では木材自体の水分移動を阻害している恐れがある。そこで、内部に完全に温湿度センサを埋め込む方法について検討が必要と考える。

### ○より詳細な計測に対応可能かの検討

高含水率になった時の全乾法含水率との差が、その後の計測に影響しないか、ヒステリシスの考慮が可能か、センサによる計測値の差がどの程度なのかなど、高含水率部材の検知のみでなく、部材内部の含水率変動を詳細に計測する場合には1,2%の含水率のずれを補正できるようなより詳細な検討が必要ではないかと考える。

### 屋外暴露実験に関する検討事項

本研究では、第3章の屋外暴露実験の結果を設置条件による計測値の違いを述べるまでとなったが、より長期間のデータが蓄積されれば、降水量や降雪量といった気象データと含水率変動との関係を明らかにすることができるのではないかと考えている。また、薬剤処理試験体は、含水率に関してインサイジング処理が不利に働くことがわかったが、今後この含水率状態で腐朽等の生物劣化が生じないかの計測を継続する必要がある。

### 屋外暴露試験体の強度特性に関する検討事項

本研究では第4章で、半年暴露した試験体の強度試験を実施し、半年暴露では試験体の強度に大きな影響を及ぼさないことがわかったが、この試験も今後のデータ蓄積が大切であると考ええる。

### 温湿度センサに関する検討事項

本計測方法を用いて高含水率部材の検知を行うには、センサ自体の改良も必要と考える。特に、実建物にセンサを埋め込むにはより小型で、かつ遠隔でデータ回収（もしくは高含水率時にアラートを発する）が可能な温湿度センサが開発されれば、一般的に含水率のモニタリングを普及させることができると考える。

## 謝辭

## 謝辞

この研究を修士論文として形にすることができたのは、ひとえに、広島大学先進理工系科学研究科准教授の森拓郎先生の丁寧かつ熱心なご指導のおかげです。深く感謝申し上げます。また、本研究は、それぞれ実験で大変多くの方にご助力いただきました。

第2章の内部含水率計測方法の実験では、広島大学先進理工系科学研究科准教授の寺本篤史先生から温湿度計測方法に関する助言を頂きました。大分大学工学部准教授の田中圭先生には、合同ゼミでご指導を賜り、HY計測用のキャップの製作もしていただきました。毎回急なお願いにも関わらず製作していただき、本当に有難うございました。合同ゼミでは大阪公立大学准教授の石山央樹先生にもご指導賜りました。また、名古屋大学大学院生命農学研究科教授の山崎真理子先生からはヒノキ試験体を頂戴しました。スギCLT試験体は銘建工業株式会社様から頂戴しました。厚く感謝を申し上げます。

第3章及び第4章の実験では、試験体を設置させていただいた北海道立総合研究機構林産試験場の宮内輝久様、大橋義徳様、伊佐治信一様、高梨隆也様をはじめとする皆様と、宮崎県木材利用技術センターの中谷誠様、笹山様をはじめとする皆様には、暴露試験体の管理や計測のための準備、強度試験体の採材など、多岐にわたって大変お世話になりました。また、薬剤処理CLTの製作の際には、株式会社サイエンスの須貝与志明様、及び茂山知巳様にご助力いただきました。ここに深く感謝いたします。

第5章の実験では、銘建工業株式会社木質構造事業部の車田慎介様、及び谷口翼様に実験計画を、株式会社櫻本工務店の皆様に試験体の施工をご協力いただきました。誠に有難うございました。

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（A）（一般）21H04584 代表者：森拓郎）の補助を受け実施しました。

そして、学部時よりたくさんのアドバイスとお力添えをいただきました建築構造力学研究室の先輩、一緒に実験や計測を行いました同研究室の皆様にも深く感謝いたします。

最後に、今まで私を育ててくれた両親に感謝します。

2023年2月 有木彩乃

## 参考文献



## 参考文献

### 第 1 章

- 1-1) 脱炭素ポータル : [https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon\\_neutral/about/](https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/)  
(参照日 2023 年 1 月 24 日)
- 1-2) 農林水産省:脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律, 2010 年法律第 36 号
- 1-3) 林野庁 スギ・ヒノキ林に関するデータ :  
[https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin\\_riyou/kafun/data.html](https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/kafun/data.html)  
(参照日 2023 年 1 月 24 日)
- 1-4) 一般法人日本 CLT 協会利用例集 (建築) : <https://clta.jp/case/>  
(参照日 2023 年 1 月 24 日)
- 1-5) 国土交通省大臣官房長官室:木材を利用した官庁施設の適切な保全に資する整備のための留意事項 (本編) . 平成 29 年 7 月
- 1-6) 日本木材防腐工業組合 : 中高層木造への CLT を利用する場合の保存処理の必要性とその耐久性評価に関する調査研究報告書, 令和元年度林野庁補助事業
- 1-7) 中島正夫 : 中大規模木造建築物の耐久設計と維持保全, 森北出版, pp.5-6, 2022
- 1-8) 浅野猪久夫編 : 木材の事典初版第 9 刷, 朝倉書店, pp.121, 1999
- 1-9) 槌本敬大、他 2 名 : マッシュブ・ティンバー用パネル部材の寸法安定性の検証(2)~2 年目の挙動を踏まえた評価~, 第 69 回日本木材学会大会(函館)研究発表要旨集, H14-08-1715, 2019
- 1-10) 中島正夫 : 中大規模木造建築物の耐久設計と維持保全, 森北出版, pp.40, 2022
- 1-11) 中島史郎 : 温湿度変動下における直交集成板の挙動が CLT パネル工法建物の構造性能に及ぼす影響, 一般財団法人大成学術財団 2018 年度助成研究梗概書, 2018
- 1-12) 石丸優、他 2 名編 : 木材科学講座 3 木材の物理, 海青社, pp.133, 2017
- 1-13) 桃原郁夫 : 木材腐朽のメカニズムとその防止, 木材保存 Vol.42-3, pp.132-137, 2016
- 1-14) 吉田孝久、他 1 名 : 木材住宅部材の含水率調査, 長野県林業総合センター研究報告, 7 号, pp.88-92, 1993
- 1-15) 寺床勝也、他 4 名 : 木造住宅部材の含水率分布に関する研究, 鹿児島大学教育学部研究紀要. 自然科学編, 55 巻, pp.25-33, 2004
- 1-16) Steven Kordziel、他 4 名 : Structure Moisture Monitoring of 8-Story Mass Timber Building in the Pacific Northwest, J. Archit. Eng., 2019, 25(4):04019019
- 1-17) Lars Olsson : CLT construction without weather protection requires extensive moisture control, Journal of Building Physics, 2021, Vol.45(1), pp.5-35
- 1-18) 一般社団法人 中大規模木造プレカット技術協会 : 郊外型店舗コスト比較資料・2 階建て事務所コスト比較資料・小規模店舗コスト比較, 2018~2021

- 1-19) 国土交通省 大臣官房官庁営繕部 整備課 木材利用推進室：公共建築物における木材の利用の取組に関する事例集（令和2年版），pp.253-260, 令和2年7月
- 1-20) 一般財団法人日本木材総合情報センター：木造住宅の木材使用量調査事業報告書，平成24年度林野庁補正予算原木需給情報システム開発事業, pp.6, 平成26年1月

## 第2章

- 2-1) 黒塚ひとみ、他2名：乾湿繰り返しによるCLTの内部含水率変化と寸法変化，日本建築学会中国支部研究報告集（42），pp.187-190, 2019
- 2-2) Franz F.P. Kollmann, Wilfred A. Cote, Jr., Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.189, 1968
- 2-3) 齋藤周逸，信田聡：日本の気候値平衡含水率，木材学会誌 Vol.62 No.5, pp.182-189, 2016

## 第3章

- 3-1) 関野登：屋外暴露による各種木質ボードの材質劣化の特徴，岩手大学農学部演習林報告第29号, pp.39-54, 1998
- 3-2) 池田正行、他1名：屋外暴露による各種木質ボードの材質劣化の特徴，静岡大学農学部演習林報告第23号, pp.25-36, 1999
- 3-3) 木口実、他8名：地域別暴露による木材保護着色塗料の耐候性評価，木材保存 Vol.22-3, pp.17-25, 1996
- 3-4) 柳川靖夫：スギ集成材の10年間屋外暴露の結果（第1報）せん断強度および木部破断率，木材学会誌 Vol.59 No.5, pp.255-260, 2013
- 3-5) 日本木材防腐工業組合：中高層木造へのCLTを利用する場合の保存処理の必要性とその耐久性評価に関する調査研究報告書，令和元年度林野庁補助事業
- 3-6) 片岡厚：木材の気象劣化と表面保護-気象劣化のメカニズム-, 木材保存 Vol.43-2, pp.58-68, 2017
- 3-7) 黒塚ひとみ：湿度変化に伴うCLTの含水率変化と寸法変化，広島大学令和2年度修士論文, 2021
- 3-8) 国土交通省 気象庁：過去の気象データ・ダウンロード  
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>
- 3-9) 宮内輝久、他11名：深浸潤処理を用いたCLTの保存処理方法に関する検討，林産試験場報第549号, pp.30-35, 2021
- 3-10) 石丸優、他2名編：木材科学講座3 木材の物理，海青社, pp.14-15, 2017

## 第4章

- 4-1) 柳川靖夫：屋外環境下等で使用される木質軸材料の接着耐久性，日本接着学会誌 Vol.48 No.4, pp.137-143, 2012

- 4-2) 柳川靖夫、他 1 名：促進劣化試験および屋外曝露試験で評価した木材保存処理集成材の接着耐久性（第 2 報）屋外曝露試験で評価した接着耐久性および促進劣化試験との関係，木材学会誌 Vol.57 No.5, pp.265-275, 2011
- 4-3) 宮本康太、他 4 名：促進劣化試験および屋外曝露試験における剥離の測定による CLT の接着性能の評価，木材工業 74 巻 3 号, pp.104-019, 2019
- 4-4) 石原亘、他 6 名：ねじり試験およびブロックせん断試験による CLT の接着強度の評価，木材学会誌 Vol.67 No.2, pp.100-108, 2021

## 第 5 章

- 5-1) 池田将和、他 4 名：木-コンクリート複合床におけるコンクリート打設時の水分移動が構成部材に与える影響，日本加工技術協会第 37 回年次大会講演要旨集, pp.95-96, 2019