

CLT・LVL等の建築物への利用環境整備事業のうち  
CLT・LVL等を活用した建築物の低コスト化・検証等事業  
(9層9プライCLTの長期挙動データ等の収集・分析)

成果報告書

令和8年3月

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所  
一般社団法人 日本CLT協会  
地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 林産試験場  
株式会社 中央設計  
公益社団法人 日本木材加工技術協会

令和7年度林野庁補助事業  
「森林・林業・木材産業グリーン成長総合対策補助金等  
(CLT・LVL等の建築物への利用環境整備事業のうち、  
CLT・LVL等を活用した建築物の低コスト化・検証等事業)  
(9層9プライCLTの長期挙動データ等の収集・分析)」  
成果報告書

目次

1.	事業計画.....	1
1.1	目的.....	1
1.2	実施内容.....	2
1.3	事業実施体制.....	3
1.4	外部有識者委員会及び事業実施者.....	4
2.	CLTの曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証.....	5
2.1	ラミナの集材.....	5
2.2	CLTの曲げ性能に影響を及ぼす因子.....	6
3.	CLTの長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討.....	16
3.1	目的.....	16
3.2	長期荷重試験時の内部含水率モニタリング手法の開発と検証.....	16
3.3	日本各地の気象データによるCLT内部含水率の推定.....	34
3.4	長期荷重試験時の温湿度変動がCLTの面外曲げヤング係数に及ぼす影響.....	43
4.	決定した測定方法におけるCLTの長期挙動データの収集と解析.....	48
4.1	CLT原板の製造条件と試験体仕様.....	48
4.2	CLTの短期曲げ試験（R4報告書再掲修正版）.....	50
4.3	曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析.....	54
4.4	試験体の破断状況.....	62
4.5	短期曲げ試験と長期荷重試験結果の比較による破断時の変位に関する検討.....	64
5.	進行状況の管理.....	68
5.1	第1回検討委員会.....	68
5.2	現地検討会.....	77
5.3	第2回検討委員会.....	79
6.	事業成果の総括.....	86
7.	付録.....	87
7.1	試験体採材図（2.2.2 CLTの曲げ試験）.....	87
7.2	試験体の破断状況.....	91
7.3	令和4年度成果報告書2.1章・再掲.....	98

## 1. 事業計画

### 1.1 目的

戦後造成した人工林が本格的な利用期を迎える中、農林水産業・地域の活力創造プランに基づき、鉄筋コンクリート造や鉄骨造が主流となっている中層・大規模建築物等の分野における木質の新製品・新技術の開発を加速化し、新たな木材需要を創出していく必要がある。

現在、ひき板を構成要素とした「CLT：Cross Laminated Timber」が欧米を中心として実用化されている。CLTは、ひき板を並列することで単層を構成し、その単層の軸方向を直交させながら積層接着した大きな断面を持つ面状の集成加工材料であり、合板の構成要素を単板から製材に置き換えたもの、と考えると理解しやすい。CLTは、床・壁に使用することで、木材を多用する新しい木造建築構法を実現できることから、わが国でも木材資源の大きな需要先として期待を集めており、CLTを対象とした「直交集成板の日本農林規格」の制定、材料強度の告示（特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件（平成13年国土交通省告示第1024号、最終改正令和4年国土交通省告示第413号））の制定、さらには林野庁事業による普及促進により、その利用が本格化したところである。

しかしながら、CLTは新しい木質材料であるため、国内の研究開発はいまだ萌芽段階にあり、原料として利用可能な製材の品質や得られる製品の強度性能の水準、使用可能な接着剤の種類と接着性能の担保の方法など、解決すべき製造上の問題点が存在する。また、わが国では建築材料としての使用実績が少なく、一般的な構造計画手法が確立されていないため、製品の性能特性値・調整係数の導出や設計手法の確立など、解決すべき利用上の問題点が多い。特に、現在告示において9層9プライ構成のCLTについては、積層方向かつ強軸方向の長期に生ずる力に対する許容応力度を計算する場合の曲げ及びせん断の基準強度の適用対象外となっているため、当該構成の製法・性能に関する技術データの蓄積並びにその適正利用のために材料の強度・耐久・耐火性能など、幅広い検討が必要である。特に、建築物は長期間利用されるものであることから、耐用年数の間、確実に安全が確保されるよう、材料の長期挙動に関するデータの蓄積は必須である。さらに、長期挙動のデータ収集には、実際の使用時を想定した測定環境・条件を考案し、長期間にわたる測定・観察が必要であることから、他のデータ収集に先駆けて集中的に実施する必要がある。

本事業は、9層9プライ構成のCLTの長期挙動データを収集し、中層・大規模建築物の木造化に必須である長期性能の設計に資することでCLTの開発・普及を促進することを目的とするものである。今後、CLTの基礎的性質の解明や、製造方法・利用方法など、技術的な検討を進めることは、CLTの実用化を促進し、国内の木材資源の利用拡大につながるものと考えられる。

## 1.2 実施内容

本事業では、9層9プライ構成のCLTの曲げ性能について長期挙動データを収集する。具体的には以下5項目の事業を実施し、建物の設計に使用可能な特性値を導出する。

### ① CLTの曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証

CLTの製造条件として、目標とするJAS規格における等級や層構成、使用する樹種、ラミナの幅・厚さ・長さ、ラミナたて継ぎに使用するフィンガージョイントの仕様等、種々の因子が存在する。このような因子のうち、特に長期に生ずる力に対する曲げ性能に影響を及ぼしうるものを抽出し、9層9プライ構成のCLTの曲げ性能試験によって検証する。

### ② CLTの長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討

建築基準法の規定によると、建築物の基礎、主要構造物その他安全上、防火上又は衛生上重要として政令に定められている部分に使用する材料で、平成12年建設省告示第1446号に規定された建築材料は、同告示（別表第一）に定める日本工業規格（JIS）又は日本農林規格（JAS）に適合するか、又は同告示（別表第二）に定める技術基準（測定方法等）に適合するものとして、国土交通省大臣の認定を受けたものとしなければならない。CLTの長期変形挙動に関する測定方法等については、当該技術基準（測定方法等）に準じ、測定結果に影響を与える主要な因子である含水率挙動について検討し、収集したCLT長期挙動データの信頼性及び実用性を向上する。

### ③ 決定した測定方法におけるCLTの長期挙動データの収集

令和4年度に決定した荷重水準に相当する静荷重をスギ等の国産針葉樹材を用いた断面構成を有するCLT試験体に対して作用させ、荷重継続時間と変形量の関係を測定精度2%以下となるように電氣的に記録する。得られたデータは電磁的記録として保存し、共同提案者により共有・管理する。なお、データ収集には長期間を要するため、本事業では単年度で収集可能な範囲のデータ収集を実施する。

### ④ 収集したCLTの長期挙動データの解析

#### ア) 曲げ荷重下における長期挙動の解析

③により得られたCLTの荷重継続時間と曲げ変形量の関係より曲げ荷重下における長期挙動を定量的に表現する数値を導出する。導出する手法としては、「相対曲げ変形の逆数の常用対数」と「荷重継続時間の常用対数」との関係性を直線回帰し、当該直線上の荷重継続時間が50年に相当する曲げ変形比から曲げ変形量の予測を行う方法と荷重継続時間と相対曲げ変形量の関係をべき乗関数曲線で回帰し、当該曲線上の荷重継続時間が50年に相当する曲げ変形比から曲げ変形量の予測を行う方法の2つを用いる。さらに、得られた数値の可用性について確認する。

#### イ) 断面構成等CLTの製造因子が長期挙動に与える影響の分析

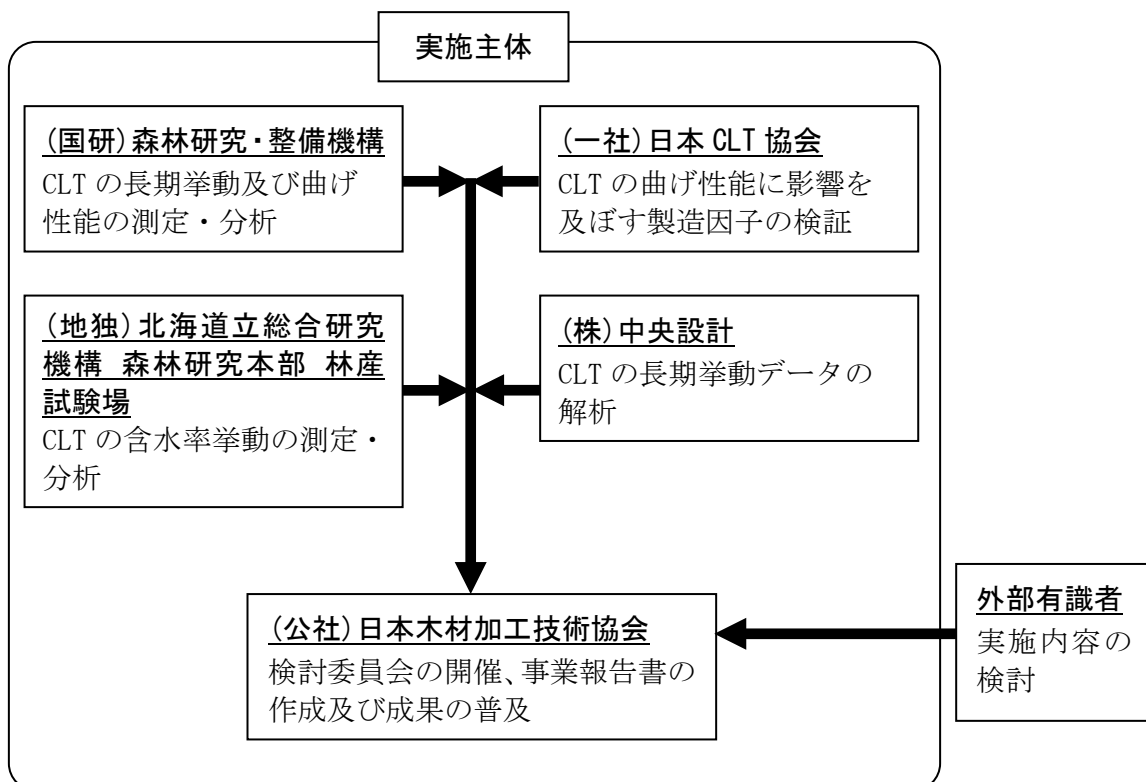
④ア)により求めたCLTの長期挙動の指標となる数値に、CLTの断面構成等の製造因子が与える影響について分析し、今後のCLTの製造方法にフィードバックする方法について検討する。

### ⑤ 委員会開催・運営及び成果の取りまとめ

本事業の円滑な進行のため、共同提案機関の構成員及び林野庁と協議の上選定した外部学識経験者 3 名以上で構成する委員会を公益社団法人日本木材加工技術協会に設置し、9 層 9 プライ構成の CLT の長期挙動に関する建築関係基準の整備に必要となる実験内容（試験方法、試験データの評価等）の検討を行う。計画に従って上記①～④の長期挙動データに掛かる実験を実施し、その結果を分析し、当該委員会における意見を踏まえ、建築関係基準の整備等に活用するデータとして国土交通省へ提供できるよう整理する。公益社団法人日本木材加工技術協会が当該委員会の招集・議事録の作成及び本提案の成果報告の取りまとめを行い、国土交通省や CLT の普及事業の実施者に情報提供を行うとともに、今後の長期挙動データの収集について助言を行う。

### 1.3 事業実施計画

本事業は次の体制で実施した。



## 1.4 外部有識者委員会及び事業実施者

### ■外部有識者委員

[委員長]	安村 基	静岡大学名誉教授
[委員]	河合 直人	工学院大学名誉教授
[委員]	青木 謙治	東京大学大学院農学生命科学研究科
[委員]	槌本 敬大	(国研)建築研究所
[委員]	秋山 信彦	(国研)建築研究所
[委員]	荒木 康弘	国土技術政策総合研究所
[委員]	小関 真琴	木質建材評価サービス
[オブザーバー]	久保 寿斗	国土交通省住宅局参事官(建築企画担当)付
[オブザーバー]	佐藤 秀憲	農林水産省 新事業・食品産業部食品製造課基準認証室
[オブザーバー]	川原 聡	林野庁 木材産業課木材製品技術室
[オブザーバー]	石崎 宣彦	林野庁 木材産業課木材製品技術室
[オブザーバー]	上田 萌香	林野庁 木材産業課木材製品技術室
[オブザーバー]	高橋 風鈴	林野庁 木材産業課木材製品技術室
[オブザーバー]	山内 一浩	(独)農林水産消費安全技術センター

### ■事業実施者

(国研) 森林研究・整備機構 森林総合研究所  
宮本康太、渋沢龍也、井道裕史、平松靖、宮武敦、河野幸喜

(一社) 日本 CLT 協会  
坂部芳平、西妻博康、原周平

(地独) 北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場  
朝倉靖弘、近藤佳秀、高山光子、須賀雅人

(株) 中央設計  
戸田淳二

(公社) 日本木材加工技術協会  
村田光司、原田寿郎

## 2. CLTの曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証

### 2.1 ラミナの集材

体系的な調査はなされていないが、近年、B種構成ラミナであるスギ M30B を揃えるのが困難になってきたと言われている。要因の一つとして、丸太の大径化の影響で、丸太の横断面に占める成熟材部が増え、スギラミナのヤング係数が全体的に上昇している可能性が考えられる。

このような状況を考慮し、曲げヤング係数の上限のないA種構成スギラミナと、上限のあるB種構成スギラミナを用いて、それぞれ Mx60 の CLT を製造し、CLT の曲げ性能にどの程度の違いがあるかを確認することを目的とした。表 2-1-1 と表 2-1-2 に直交集成板の日本農林規格 (JAS 3079) に示された A 種構成ラミナと B 種構成ラミナの基準値 (一部) を示す。

表 2-1-1 A 種構成ラミナの基準値

等級	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
	平均値	下限値
M60A	6.0	5.0
M30A	3.0	2.5

表 2-1-2 B 種構成ラミナの基準値

等級	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		
	平均値	下限値	上限値
M60B	6.0	5.0	9.0
M30B	3.0	2.5	6.0

スギラミナの集材地域はいずれも熊本県としたが、M30B のスギラミナは熊本県で集材した在庫ラミナも使用している。

図 2-1-1 に各等級で使用したラミナの枚数 (左) と比率 (右) を使用ラミナ、うちラミナ試験用別に示す。ラミナ試験用は 2.2.1 で実施した見かけの曲げヤング係数である。比率を見ると、M60A、M60B、M30B は使用ラミナとラミナ試験用の曲げヤング係数の出現範囲が概ね一致した。一方、M30A では、ラミナ試験用の曲げヤング係数の出現範囲が使用ラミナの中で高い位置にある傾向にあった。

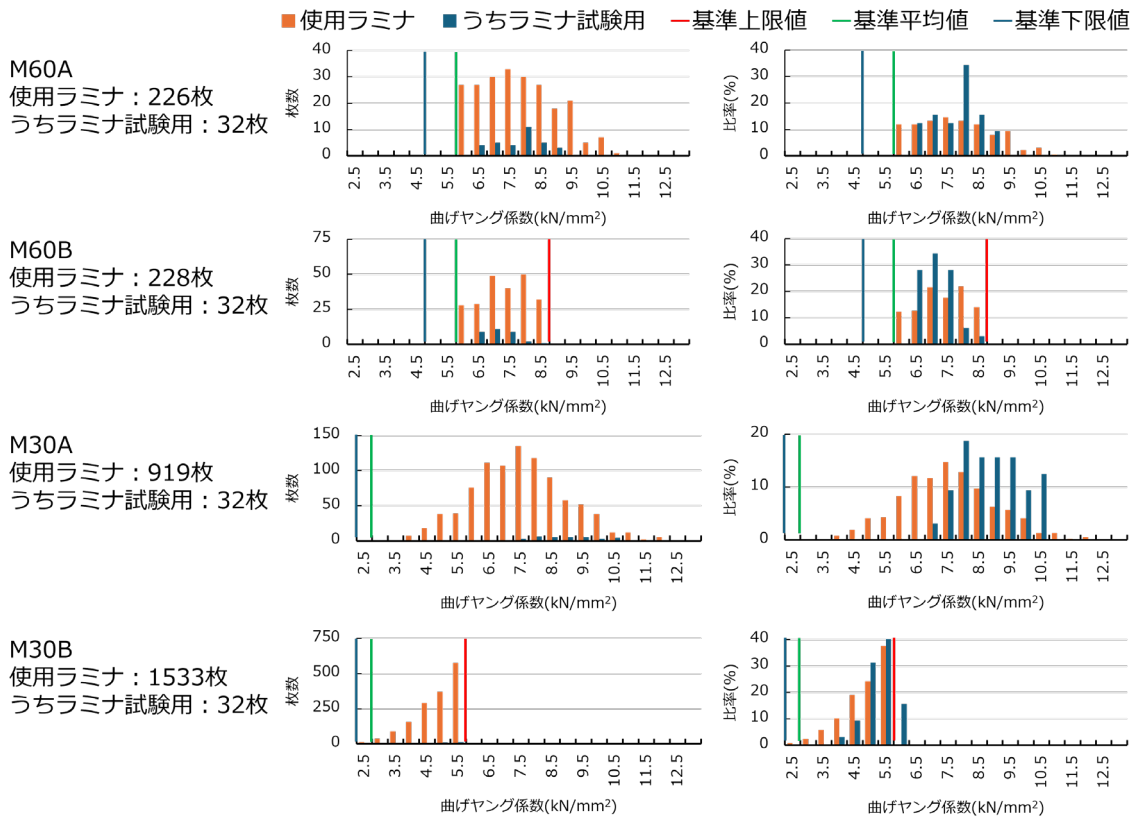


図 2-1-1 各等級で使用したラミナの枚数（左）と比率（右）

## 2.2 CLT の曲げ性能に影響を及ぼす因子

### 2.2.1 フィンガージョイントラミナの曲げ試験

図 2-1-1 のラミナ試験用のラミナから曲げ試験体を採取した。寸法は長さ 750mm×幅 122mm×厚さ 30mm であり、長さの中央に水平フィンガージョイントを施してある。試験体数は各グループとも 32 体である。曲げ試験に先立って縦振動法によるヤング係数を測定した。その後、JAS 3079 のラミナの曲げ C 試験に従い、フラットワイズ方向の曲げ試験を行った。CLT の引張側ラミナの配置に合わせて、木裏側から加力した。加力速度は 10mm/min とした。試験体長さ中央部に留めつけたアングルに変位計（東京測器研究所製 CDP-50）を設置して全たわみを測定した。荷重とたわみの関係から見かけの曲げヤング係数を求めるとともに、比例限度応力、曲げ強度を算出した。また、順位法により曲げ強度の 75%信頼水準における 5%下限値を算出した。試験の様子を図 2-2-1 に示すとともに、各グループの破壊形態の例を図 2-2-2～5 に示す。曲げ試験終了後、フィンガージョイントの両側の破壊していない部分から長さが約 20mm の含水率測定用試験体を 2 体採取し、全乾法により含水率を測定した。含水率は 2 体の含水率測定用試験体の平均値とした。曲げ試験結果の概要を表 2-2-1 に示す。

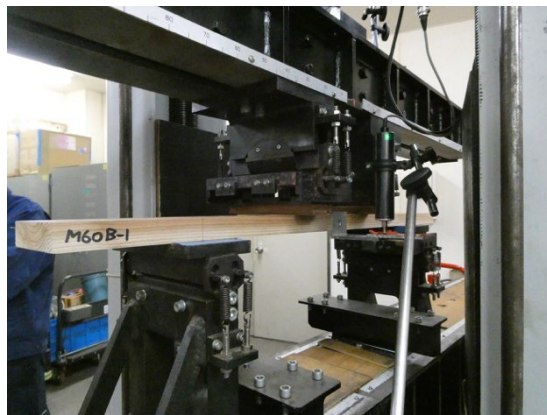


図 2-2-1 フィンガージョイントラミナの曲げ試験の様子

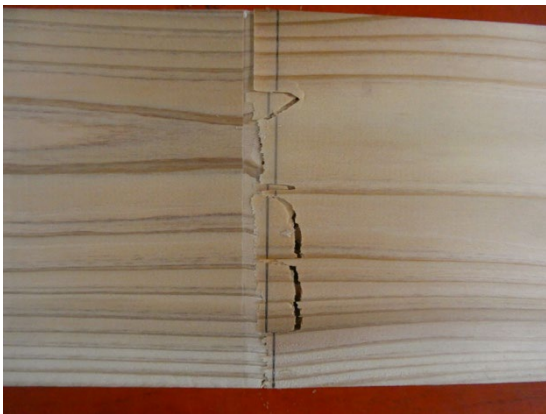


図 2-2-2 M60A の破壊形態の例

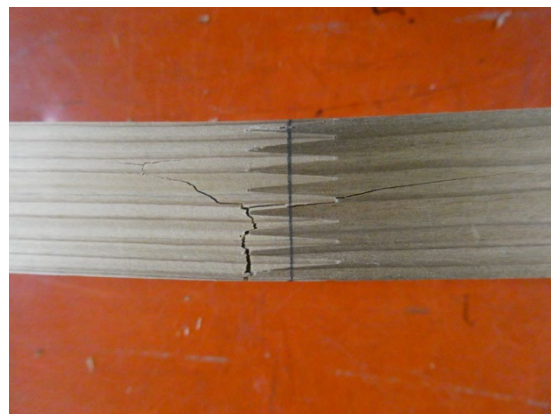


図 2-2-3 M30A の破壊形態の例

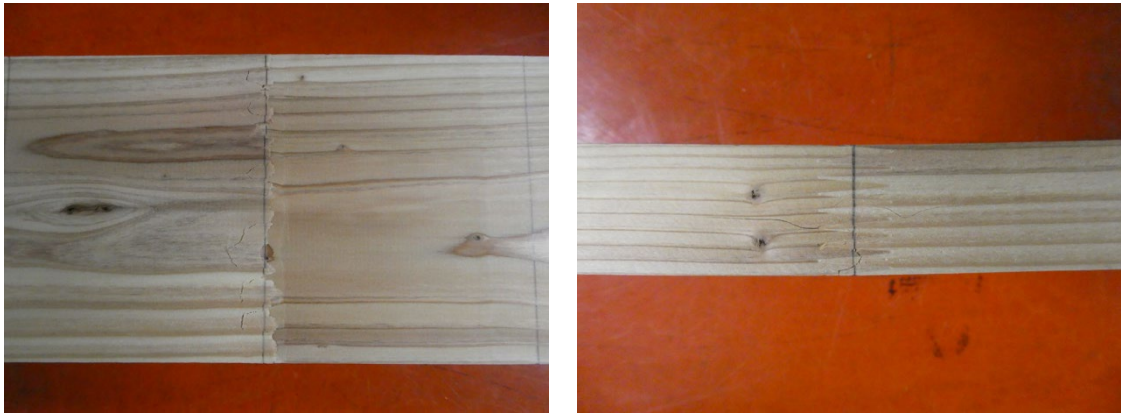


図 2-2-4 M60B の破壊形態の例

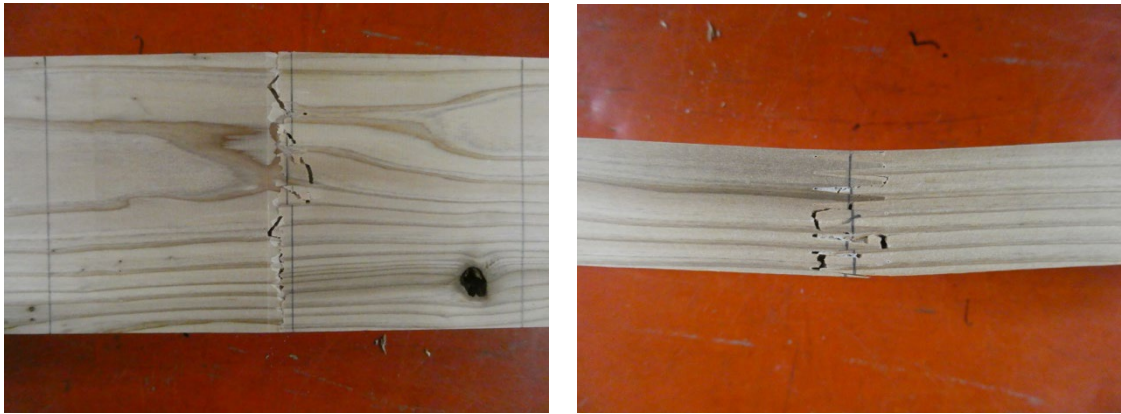


図 2-2-5 M30B の破壊形態の例

表 2-2-1 フィンガージョイントラミナの曲げ試験結果の概要

樹種	等級		密度	縦振動法の ヤング係数	含水率	見かけの曲げ ヤング係数	比例限度 応力	曲げ強度	曲げ強度 5%下限値 (順位法)
			(kg/m <sup>3</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )	(%)	(kN/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )
スギ	M60A	試験体数	32	32	32	32	32	32	31.6
		平均値	424	8.63	11.7	8.00	30.7	39.3	
		最小値	367	7.09	10.6	6.68	14.8	31.5	
		最大値	477	10.0	13.2	9.29	41.9	46.9	
		標準偏差	30.4	0.814	0.628	0.758	7.13	4.26	
		変動係数(%)	7.18	9.43	5.36	9.48	23.2	10.8	
スギ	M60B	試験体数	32	32	32	32	32	32	29.9
		平均値	413	7.99	11.5	7.41	31.1	37.3	
		最小値	360	6.75	10.3	6.51	17.5	29.8	
		最大値	446	9.13	13.0	8.73	41.8	44.1	
		標準偏差	19.2	0.509	0.645	0.535	6.67	3.70	
		変動係数(%)	4.65	6.37	5.59	7.23	21.4	9.92	
スギ	M30A	試験体数	32	32	32	32	32	32	33.4
		平均値	436	9.96	12.0	9.12	33.6	42.5	
		最小値	386	8.02	11.0	7.29	16.0	33.3	
		最大値	488	12.1	13.3	10.7	46.4	49.3	
		標準偏差	25.7	0.969	0.456	0.961	9.17	3.94	
		変動係数(%)	5.90	9.73	3.81	10.5	27.3	9.27	
スギ	M30B	試験体数	32	32	32	32	32	32	24.8
		平均値	384	5.92	12.3	5.54	22.7	32.4	
		最小値	326	4.80	11.1	4.33	14.6	24.5	
		最大値	440	6.56	14.4	6.28	29.6	40.2	
		標準偏差	25.9	0.426	0.784	0.436	3.83	3.90	
		変動係数(%)	6.74	7.20	6.39	7.86	16.9	12.0	

各等級における、密度、縦振動法によるヤング係数、見かけの曲げヤング係数、曲げ強度の箱ひげ図を図 2-2-6 に示す。箱は第 1 四分位数 (Q1) から第 3 四分位数 (Q3) を示し、中央線は中央値を示す。ひげは四分位範囲 (IQR) の 1.5 倍以内にある最大値および最小値を示し、これを超える値は外れ値として点で表示した。×印は平均値を示す。図は Excel の統計グラフ機能により作成した。

密度の平均値について、M60A と M60B は同程度であったが、M30A と M30B では M30A の方が高かった。縦振動法のヤング係数、見かけの曲げヤング係数、曲げ強度について、M30A > M60A > M60B > M30B の順で高かった。M30A が高かったのは、図 2-1-1 で示したように、ラミナ試験用の試験体の出現範囲が、ヤング係数の高い側に分布していたことが要因と考えられる。

図 2-2-7 にすべての試験体の曲げ強度に対する見かけの曲げヤング係数と密度の関係を示す。見かけの曲げヤング係数だけでなく、密度が大きいほど曲げ強度が大きい傾向にあった。

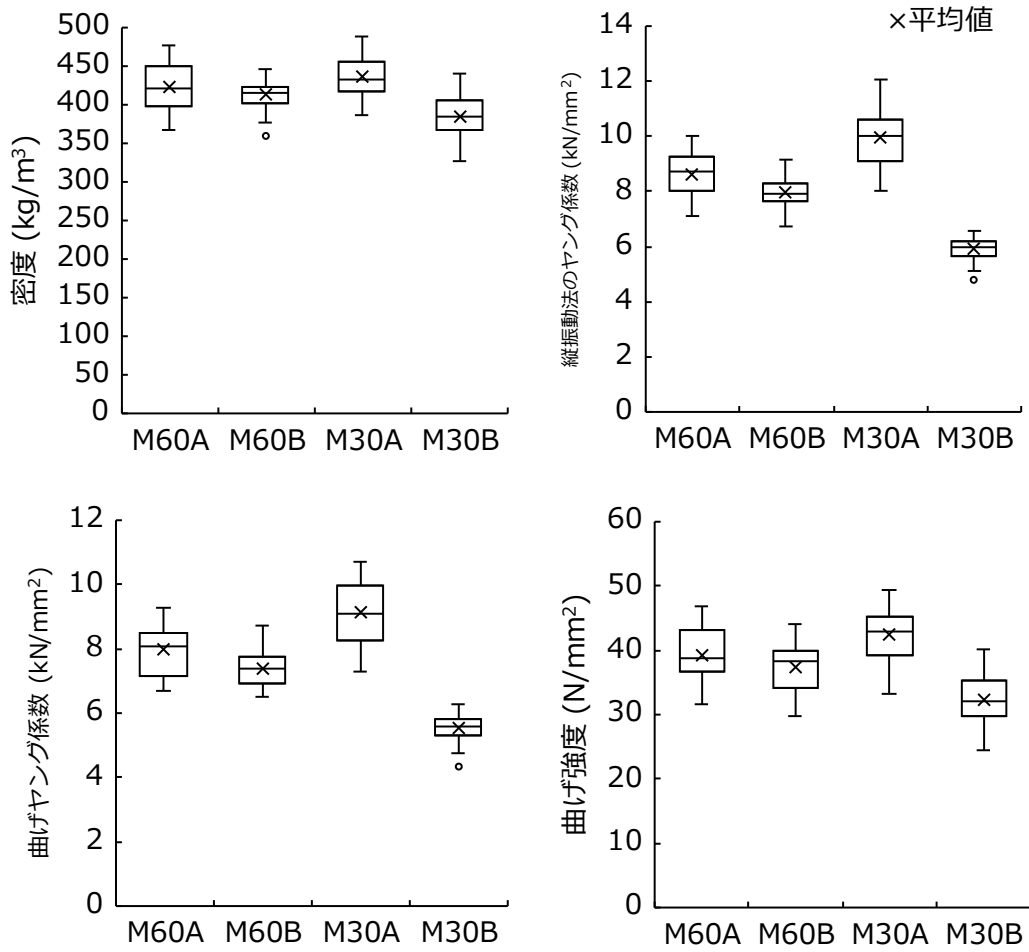


図 2-2-6 各等級の物性値

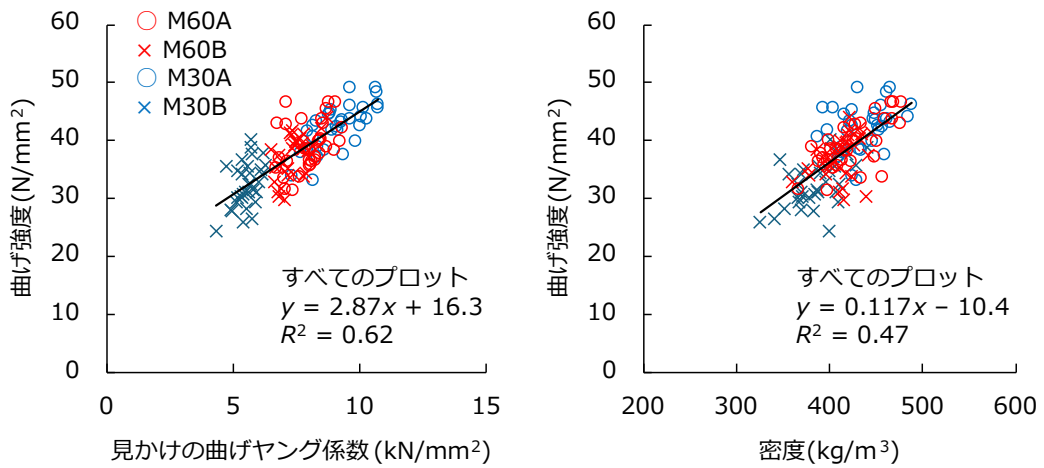


図 2-2-7 曲げ強度に対する見かけの曲げヤング係数と密度の関係

### 2.2.2 CLT の曲げ試験

CLT の曲げ試験体の構成、外層ラミナと内層ラミナの等級、寸法、試験体数を表 2-2-2 に示す。構成は 9 層 9 プライおよび 5 層 5 プライとし、外層はすべて強軸方向である。曲げ試験体の採材図は付録に示す。

表 2-2-2 CLT の曲げ試験体の構成、ラミナの等級、寸法、試験体数

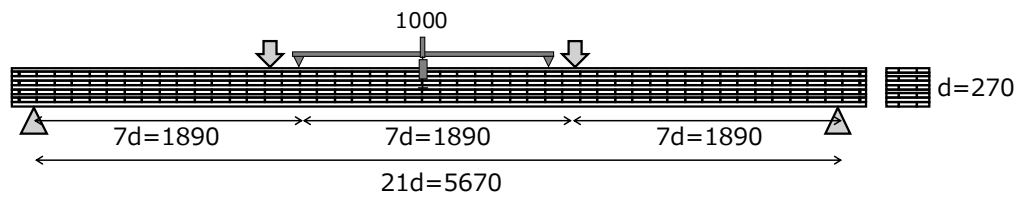
通しNo.	構成	等級	外層ラミナ	内層ラミナ	厚さ×幅×長さmm	試験体数
MB1	9層9プライ強軸	Mx60A	スギM60A	スギM30A	270×300×5990	8
MB2	9層9プライ強軸	Mx60B	スギM60B	スギM30B	270×300×5990	8
MB3	5層5プライ強軸	Mx60A	スギM60A	スギM30A	150×300×3450	8
MB4	5層5プライ強軸	Mx60B	スギM60B	スギM30B	150×300×3450	8

曲げ試験に先立ち、縦振動法のヤング係数、面外方向の曲げたわみ振動法のヤング係数、TGH 法のヤング係数、TGH 法のせん断弾性係数を測定した。TGH 法の周波数測定の様子を図 2-2-8 に示す。その後、CLT の JAS の曲げ試験方法に従って、スパンを材せいの 21 倍とした 3 等分点 4 点荷重とした面外方向の曲げ試験を行った。曲げ試験の模式図を図 2-2-9 に示すとともに試験の様子を図 2-2-10 に示す。最大容量が 1000kN の実大木材強度試験機（前川試験機製作所製 SAH-100-SS）により載荷した。クロスヘッド速度はいずれも 12mm/min とした。試験体の側面中央部に変位計（東京測器研究所製 SDP-200D）を設置し試験体の全たわみを測定するとともに、試験体の上部材面圧縮面上に変位計（東京測器研究所製 CDP-10）を取り付けた袴型治具を載せ、荷重点間における曲げたわみを測定した。試験終了後、全たわみから求めた見かけの曲げヤング係数、荷重点間のたわみから求めた真の曲げヤング係数、曲げ強度を算出した。また、破壊部近傍から長さが約 30mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。



図 2-2-8 TGH 法の周波数測定の様子

## 9層9プライ



## 5層5プライ

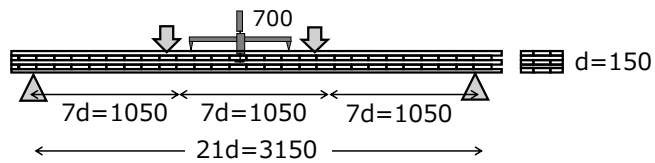


図 2-2-9 曲げ試験の模式図



図 2-2-10 CLT の曲げ試験の様子（左：9層9プライ、右：5層5プライ）

非破壊試験および曲げ試験の結果の概要を表 2-2-3 に示す。また、破壊の様子を図 2-2-11～14 に示す。破壊はいずれも荷重点内のフィンガージョイントによるものが多く、その他、節によるものがあった。

表 2-2-3 非破壊試験および曲げ試験結果の概要

グループ	No.	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	縦振動法の ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げたわみ 振動法の ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	TGH法の ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	TGH法の せん断 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	見かけの 曲げ ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	真の曲げ ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )
MB1	試験体数	8	8	8	8	8	8	8	8	8
構成:9L9P Mx60A	平均値	409	11.3	5.06	5.40	5.83	0.218	5.35	5.96	20.2
外層:スギM60A	最小値	405	10.9	4.66	4.88	5.27	0.212	5.06	5.56	17.5
内層:スギM30A	最大値	413	11.6	5.27	5.75	6.11	0.225	5.65	6.44	22.8
	標準偏差	2.95	0.207	0.221	0.304	0.304	0.004	0.233	0.369	2.13
	変動係数(%)	0.720	1.83	4.37	5.64	5.22	2.00	4.35	6.19	10.5
MB2	試験体数	8	8	8	8	8	8	8	8	8
構成:9L9P Mx60B	平均値	395	11.9	4.07	5.07	5.34	0.229	4.85	5.31	17.1
外層:スギM60B	最小値	392	11.5	3.78	4.74	4.98	0.224	4.45	4.74	14.9
内層:スギM30B	最大値	399	12.4	4.23	5.29	5.57	0.239	5.16	5.86	19.6
	標準偏差	3.10	0.352	0.138	0.179	0.180	0.005	0.254	0.371	1.64
	変動係数(%)	0.784	2.96	3.39	3.52	3.38	1.99	5.24	6.98	9.55
MB3	試験体数	8	8	8	8	8	8	8	8	8
構成:5L5P Mx60A	平均値	420	11.0	5.43	6.58	6.97	0.248	6.43	7.24	28.1
外層:スギM60A	最小値	410	10.7	5.13	6.32	6.63	0.221	5.76	6.56	23.5
内層:スギM30A	最大値	436	11.2	5.87	7.46	7.94	0.268	7.22	8.19	32.9
	標準偏差	8.93	0.188	0.262	0.373	0.410	0.017	0.398	0.485	3.63
	変動係数(%)	2.13	1.70	4.83	5.67	5.88	6.98	6.19	6.69	12.9
MB4	試験体数	8	8	8	8	8	8	7	7	8
構成:5L5P Mx60B	平均値	409	12.0	4.67	6.24	6.58	0.230	6.01	6.95	24.9
外層:スギM60B	最小値	397	11.5	4.40	5.81	6.19	0.218	5.88	6.68	21.1
内層:スギM30B	最大値	420	12.5	5.04	6.72	7.09	0.240	6.10	7.18	30.6
	標準偏差	8.29	0.395	0.264	0.330	0.347	0.007	0.0967	0.189	3.43
	変動係数(%)	2.03	3.28	5.66	5.29	5.28	2.96	1.61	2.72	13.8

注：試験装置の不具合により5層5プライのMx60Bで1体欠損しているものがある。



図 2-2-11 MB1 9L9P Mx60A の破壊の様子



図 2-2-12 MB2 9L9P Mx60B の破壊の様子



図 2-2-13 MB3 5L5P Mx60A の破壊の様子



図 2-2-14 MB3 5L5P Mx60B の破壊の様子

曲げヤング係数の測定値および平均値を層構成ごとに図 2-2-15 に示す。t 検定の結果、9 層 9 プライ、5 層 5 プライともに、Mx60A と Mx60B では有意水準 5% で Mx60A の方が曲げヤング係数の平均値は大きいという結果となった。曲げ強度の測定値、平均値、基準強度を層構成ごとに図 2-2-16 に示す。t 検定の結果、9 層 9 プライでは、有意水準

5%で Mx60A の方が曲げ強度の平均値は大きいという結果となったが、5層5プライドでは有意差は認められなかった。5層5プライの曲げ強度のばらつきが比較的大きかったことが要因の一つと考えられる。基準強度に対しては、すべての試験体で大きく上回っていた。

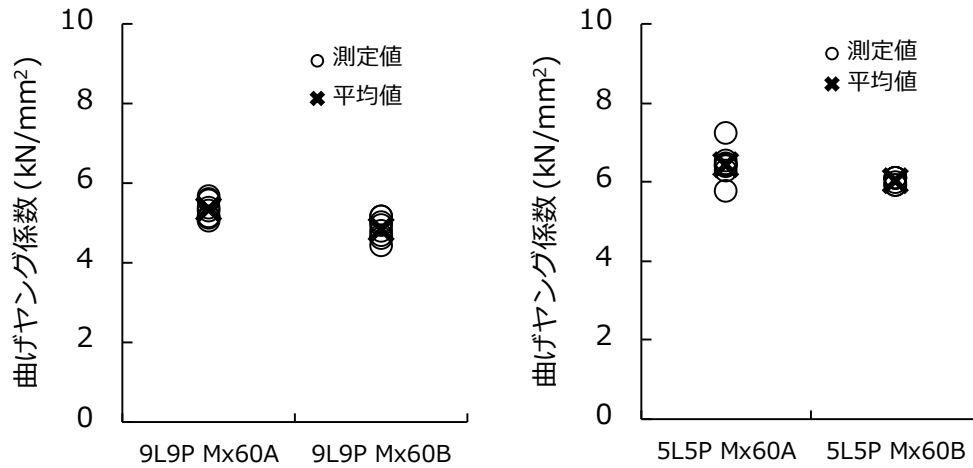


図 2-2-15 等級と曲げヤング係数の関係

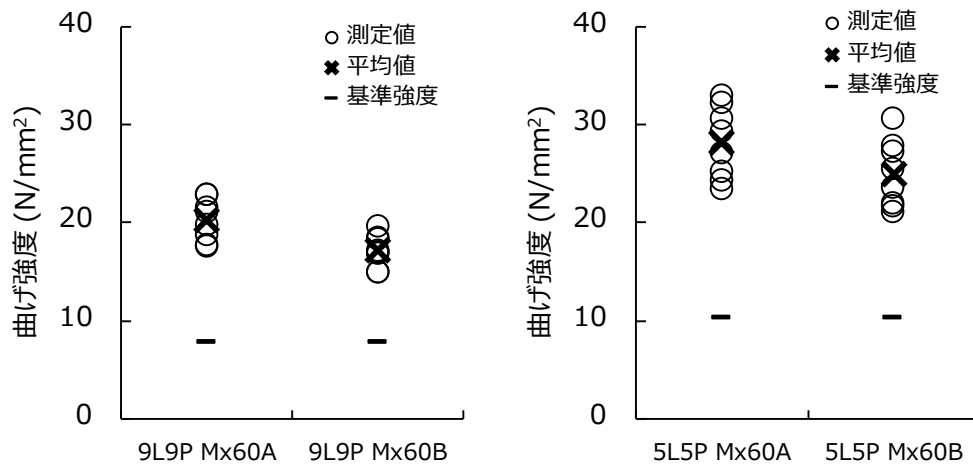


図 2-2-16 等級と曲げ強度の関係

### 3. CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討

#### 3.1 目的

木材の強度特性は含水率の影響を受けることが知られており、試験体含水率の変動は強度的性能の評価における主要な影響因子の一つである。CLT の長期荷重試験においては、測定値の安定性および妥当性を検討するために、試験期間中に材料内部で生じる含水率変化を把握することが重要である。そこで、令和 6 年度までの事業では、試験中の含水率挙動の把握および本事業の測定手法の妥当性確認を目的として、以下の項目について評価を行ってきた。

- 1) 9 層 CLT 試験体の長期シミュレーション
- 2) ラミナ間に隙間が連続する場合の吸湿による含水率の変動
- 3) 長期荷重試験時の内部含水率モニタリング手法の開発と検証
- 4) 含水率変動が CLT の強度性能に与える影響

令和 7 年度はこのうち 3) と 4) について検討を進め、測定手法の整理と試験中の温湿度変化が強度性能に与える影響の推定を行った。

#### 3.2 長期荷重試験時の内部含水率モニタリング手法の開発と検証

##### 1) 内部含水率の長期モニタリング装置の概要

木材の含水率計には様々な手法があるが、現場にて容易に使用できる含水率計には電気抵抗式と高周波式がある。このうち電気抵抗式含水率計は、木材の含水率に応じて電気抵抗が変化する性質を利用し、被測定木材に測定端子についた針を打ち込み針間の電気抵抗を測定することで含水率を測定するものである。本事業では、令和 6 年に引き続き、電気抵抗式含水率計によって CLT 内部の含水率を測定する手法を検討した。

森林総合研究所の CLT 長期荷重試験棟に設置された長さ 3m の含水率測定試験体（長期荷重試験体の半分の長さ）に内部含水率測定用のプローブを設置し、多点型の含水率記録装置を取り付けて長期モニタリングを行うシステムを構築した。2mm 径のステンレス針に電工用の熱収縮チューブを用いて両端部以外を絶縁した(図 3-2-1)。これに導線を接続して測定用のプローブを作成し(図 3-2-2)、目的とする場所に先端が来るように CLT に打ち込んだ。穴開け施工においては、充電式ドリル（(株)日立工機：DS14DBL）にドリルガイド（神沢鉄工(株)：K-802-2）を取り付けて材面に対して垂直な穿孔および任意の穿孔深さが得られるようにした（図 3-2-3、3-2-4）。また、プローブが測定目標位置において、先端が 7mm 木材に浸入するように先孔深さと打ち込み量を管理した（図 3-2-5）。なお、プローブ間の距離は 15mm とした。浸入深さ、プローブ間距離は市販の電気抵抗式含水率計（kett 社：MT-900）のプローブを参考にした。なお、プローブの挿入時には 2 液性のエポキシ接着剤をプローブ側面に塗布して、先孔との間の隙間を埋めると共に、打ち込み後に再度上部からエポキシ樹脂接着剤を施工部分に充填し、プロー

ブの固定と先孔からの水分の移動を防止した（図 3-2-6）。また、長期荷重試験用の試験体は材長が 6m であるが、材長方向中央の 3m の部分は材長方向の水分移動については中立層となり水分の移動がない断湿面と見なせる。このことから、長さが半分の含水率測定試験体においては、片側の端部をアルミテープで防湿して長期荷重試験体の材長方向中央部の断湿面を模した（図 3-2-7）。

プローブから伸びる導線に電気抵抗式多点型含水率記録計（コーナー札幌：KNS-LOG）を接続し、含水率を一定間隔で経時的に記録し（図 3-2-8、3-2-9）、近傍の温湿度を温湿度ロガー（T&D：TR-72wf）で測定した（図 3-2-10）。なお、試験体の含水率測定位置は図 3-2-11 に示す。

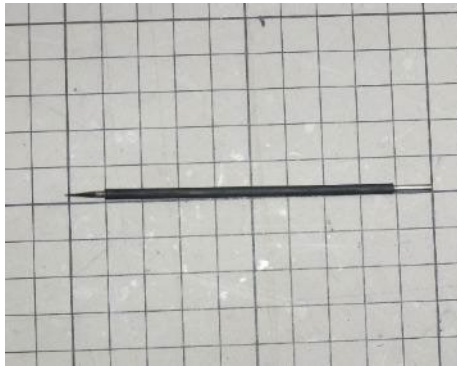


図 3-2-1 測定プローブの例  
（直径 2mm のステンレス針の側部を熱収縮チューブで絶縁被覆）



図 3-2-2 測定プローブへのリード線の接続



図 3-2-3 先孔切削用ドリルとドリルガイド（孔深の設定が可能）



図 3-2-4 先孔切削作業の状況

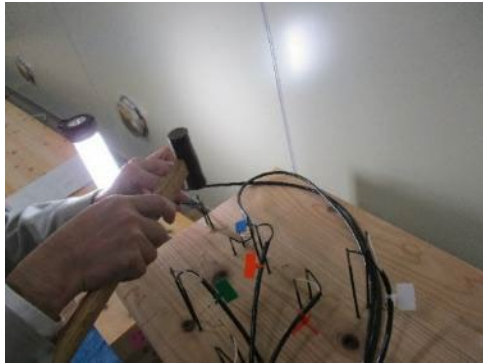


図 3-2-5 ハンマーによるプローブの打ち込み



図 3-2-6 プローブの固定状況  
(エポキシ接着剤充填)

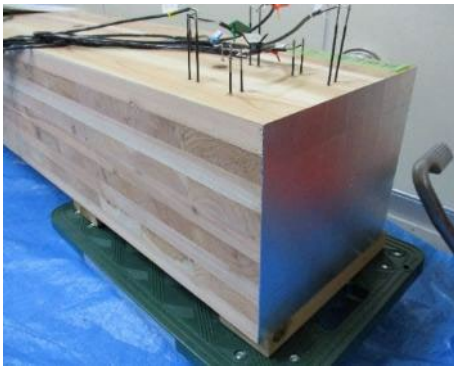


図 3-2-7 プローブの設置状況と  
アルミテープによる断湿状況



図 3-2-8 設置完了状態の様子  
(プローブ保護カバー取り付け後)



図 3-2-9 使用した含水率記録計  
(コーナー札幌 : KNS-LOG)



図 3-2-10 温湿度の測定状況  
(T&D : TR-72wf)

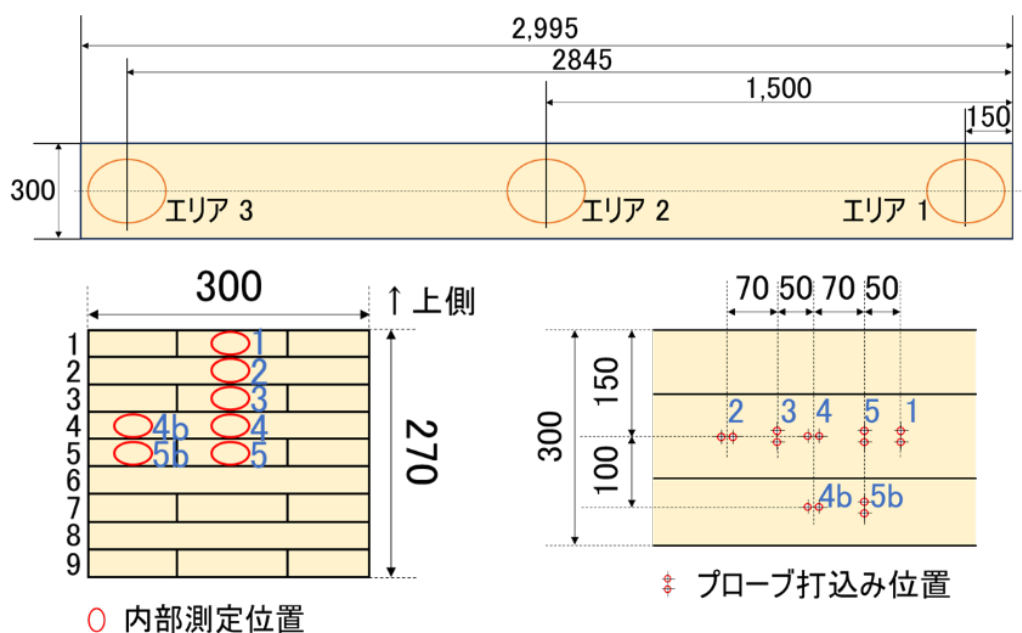


図 3-2-11 含水率の内部測定位置（森林総合研究所設置試験体）

※各測定エリアの 4h, 5h は予備測定点である。

なお、測定エリア 2 の予備測定点は 5h のみとした。

## 2) 内部含水率の長期モニタリング手法の測定条件が測定値に及ぼす影響

前項の針状の測定用プローブと電気抵抗式含水率計を用いた内部含水率の測定手法について、令和 6 年に引き続き、測定条件が測定値に及ぼす影響を検証した。令和 6 年度は、長期モニタリング試験の含水率測定値が表層と中心部で差が見られたことから、プローブの木材への挿入深さの違いによる測定値への影響を検討した。CLT 用スギラミナから採取した幅 100mm×厚さ 30mm×長さ 50mm のブロックを積み重ね、1～5 層および 9 層の CLT を模した状態でプローブを設置し（図 3-2-12）、20℃65%RH の恒温恒湿器内に静置し、電気抵抗式含水率計（KNS-LOG）と接続して含水率を測定した。なお、比較のために MT-900 による測定も実施した。その結果、層数の違いにより測定値はほぼ変化しなかったことから、プローブの挿入深さによって測定値は影響を受けないと考えられた（図 3-2-13）。令和 7 年度は、プローブ端子の間隔およびプローブと含水率計の接続ケーブルの長さについて、測定値への影響を検討した。

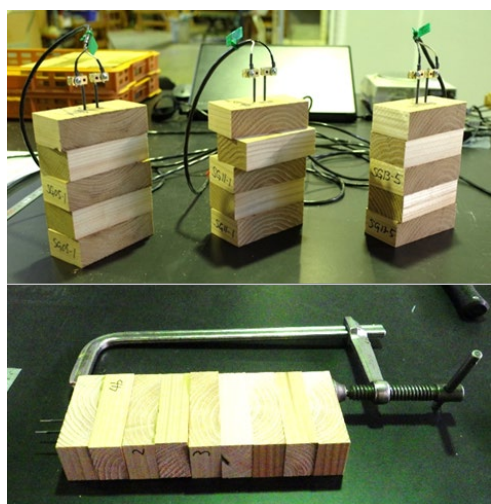


図 3-2-12 5層（上）および9層（下）を模した状態の試験体

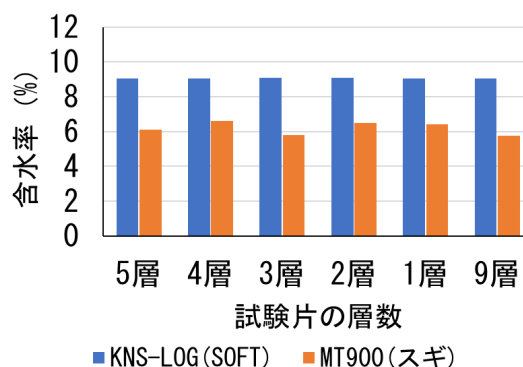


図 3-2-13 試験片の層数と含水率測定値

(a) プローブ端子の間隔の違いが測定値に及ぼす影響の検討

長期モニタリング試験では、プローブ端子を 15mm 間隔で材面から垂直に打込んで施工しているが、CLT 内部で節などの影響により打込み方向が変わり、プローブ先端が測定位置で 15mm 間隔にならない場合が想定される。また今後、本手法を CLT 等の内部含水率の測定に活用する場合、15mm 間隔で施工することが困難な場合も想定されるため、端子間隔の違いの測定値への影響を検討した。試験体として、CLT 用スギラミナを 20℃ の恒温恒湿器内で飽和塩を用いて 5 条件 (54%RH、65%RH、75%RH、84%RH、97%RH) で調湿したものを、各条件 5 体ずつ準備した。プローブ端子の間隔は 15mm から 60mm まで 15mm 間隔で 4 条件とし、試験体に 15mm 間隔で測定点を設け (図 3-2-14)、片方のプローブ端子は一番端の測定点に固定とし、もう 1 本の端子を 15mm から 60mm の測定点に順に打込み、その都度、KNS-LOG と MT-900 に接続して測定した (図 3-2-15)。プローブに

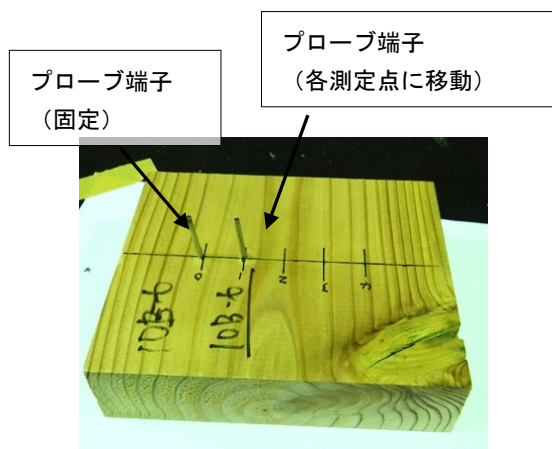


図 3-2-14 端子間隔 15mm の試験体

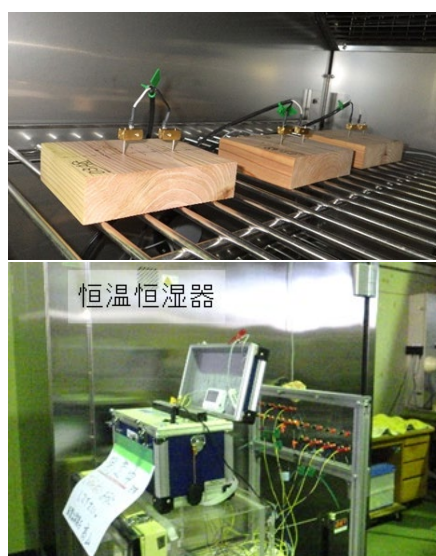


図 3-2-15 KNS-LOG による測定

は 30mm のステンレス針を用いた。測定は、試験体を調湿時の温湿度に設定した恒温恒湿器内に静置した状態で行い、KNS-LOG については測定間隔 1 時間で数日間測定し、測定開始直後の測定値の変動が大きい期間を除いた測定期間の平均値を含水率測定値として用いた。MT-900 は手動で複数回の測定を行い、計測値が安定した時点での数値を用いた。

図 3-2-16 に、試験体の調湿温湿度ごとの端子間隔と含水率測定値の関係を試験体 5 体の平均値で示す。また、図 3-2-17 に試験体ごとの端子間隔 15mm と 60mm の測定値の差を試験体 5 体の平均値で示す(エラーバー：標準偏差)。KNS-LOG の測定値は、端子間隔が増加するほど測定値がやや低下する傾向が見られ、MT-900 では、高湿度条件の測定値で、端子間隔が増加するほど測定値が低下する傾向が見られた。端子間隔 15mm と 60mm の測定値の差は、調湿条件 54%RH~84%RH では 0.5%以下であったが、97%RH では KNS-LOG で平均 0.6%、MT-900 で平均 1.3%とやや大きく、測定値間のばらつきも大きかった。このため、97%RH 程度の高湿度条件では、端子間隔の違いにより測定値が変わる可能性が考えられた。そこで、97%RH の測定値について分散分析を行った結果、KNS-LOG、MT-900 とともに、端子間隔 4 条件の間で有意差は見られなかった(表 3-2-1)。以上の結果から、プローブ端子の間隔が広いほど測定値が減少する傾向は見られたが、15mm~60mm 程度の範囲では、プローブ端子の間隔が異なっても測定値にほぼ影響は無いと考えられた。

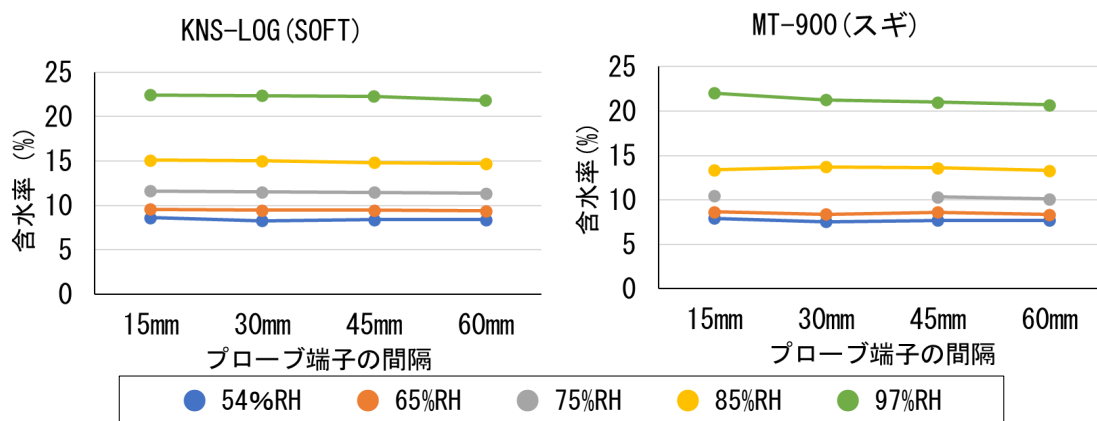


図 3-2-16 端子の間隔と含水率測定値の関係 (試験体 5 体の平均値)

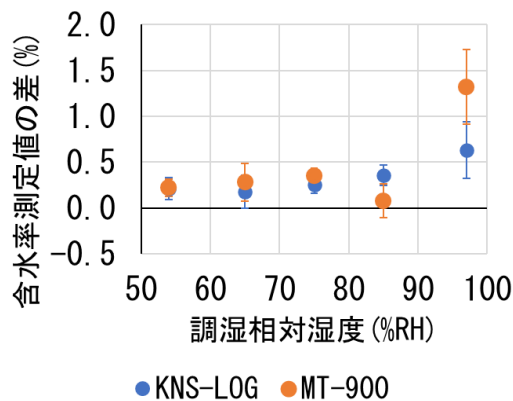


図 3-2-17 端子間隔 15mm と 60mm の測定値の差 (平均値、エラーバーは標準偏差)

表 3-2-1 97%RH における端子間隔 4 条件間の分散分析結果 ( $\alpha = 0.05$ )

分散分析: 一元配置  
: KNS-LOG

グループ	データ個数	合計	平均	分散
15mm	5	112.3	22.5	0.220
30mm	5	111.8	22.4	0.523
45mm	5	111.4	22.3	0.300
60mm	5	109.1	21.8	0.165

分散分析表: KNS-LOG

変動要因	変動	自由度	分散	観測された分散比	P-値	F境界値
グループ間	1.172	3	0.391	1.293	0.311	3.239
グループ内	4.834	16	0.302			
合計	6.007	19				

分散分析: 一元配置  
MT-900

グループ	データ個数	合計	平均	分散
15mm	5	110.1	22.0	0.662
30mm	5	106.4	21.3	0.722
45mm	5	105.0	21.0	0.540
60mm	5	103.5	20.7	0.495

分散分析表: MT-900

変動要因	変動	自由度	分散	観測された分散比	P-値	F境界値
グループ間	4.794	3	1.598	2.642	0.085	3.239
グループ内	9.676	16	0.605			
合計	14.47	19				

### (b) ケーブル長さが測定値に与える影響の検討

木材、プローブ、ケーブル、含水率計で構成される含水率を測定する回路内には電気抵抗だけでなく、容量負荷や誘導負荷が存在している。これらの中でプローブと含水率計を結ぶケーブルは、2本の被覆電線が近接していることから、電線間に漏れ電流が生じるほかケーブルが巻かれているか、伸ばされているかなどの設置状況によってもプローブの電気特性が変化することが考えられる。漏れ電流はごくわずかであって通常の使用では問題とならないが、含水率が低い木材の電気抵抗値は極めて大きく、漏れ電流の影響が無視できない可能性が生じたため、以下の検討を行った。

9層9プライ CLT から切り出した幅 300mm×高さ 270mm×長さ 30mm の試験体の表層(第1層)の3枚のラミナを試験体とし、各ラミナのプローブ打込面中央付近に繊維に直交する方向に 15mm 間隔で 10mm 深さまでプローブを打込み供試した。

試験体は 20°C65%RH の恒温恒湿器内に静置し、同じ長さのケーブルを取り付けて KNS-LOG で含水率を測定した。1時間間隔 24 時間の測定後、ケーブル長さを変更して測定を繰り返した。なお、ケーブル長さは 1.5m、2.5m、4.5m、10m の 4 水準とした。

図 3-2-18 にケーブル長さが KNS-LOG の測定値に及ぼす影響を示す。ケーブル長さが 4m を超えるあたりから測定値が高くなり始め、10m で明確な差が見られた。1.5m、2.5m、

4.5m、10m の 4 群について一次元分散分析をしたところ、P=値が 0.0004 となり有意水準 0.05 で有意差があり、1.5m、2.5m、4.5m の 3 群について一次元分散分析をしたところ、P=値が 0.37 となり有意水準 0.05 で有意差が無かった。

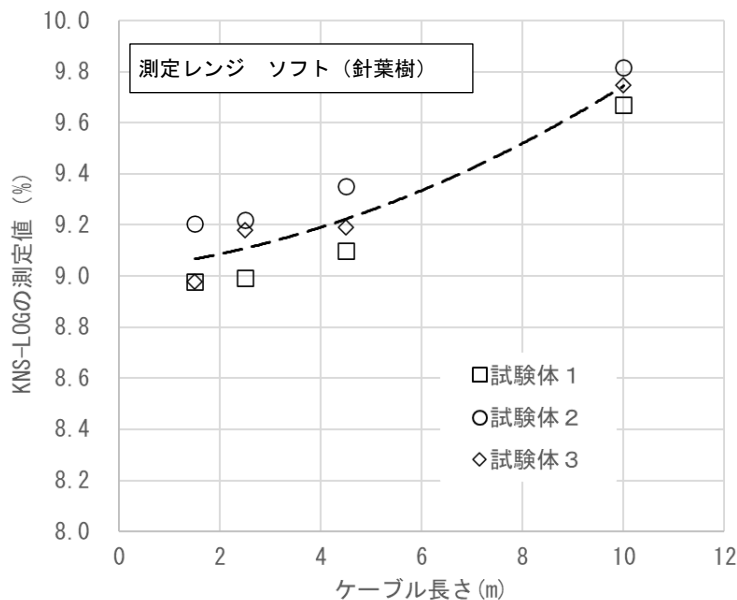


図 3-2-18 KNS-LOG の測定値に及ぼすケーブル長さの影響  
点線は、ケーブル長さごとの平均値から求めた傾向を示す。

ケーブルの設置状態で測定値が変化する可能性を検討するため、長さの異なるケーブル先端を開放して端部間の電気抵抗値を無限大とし、ケーブルを直線的に設置した場合と巻き取って設置した場合で測定値に差が出るか検討した (図 3-2-19)。

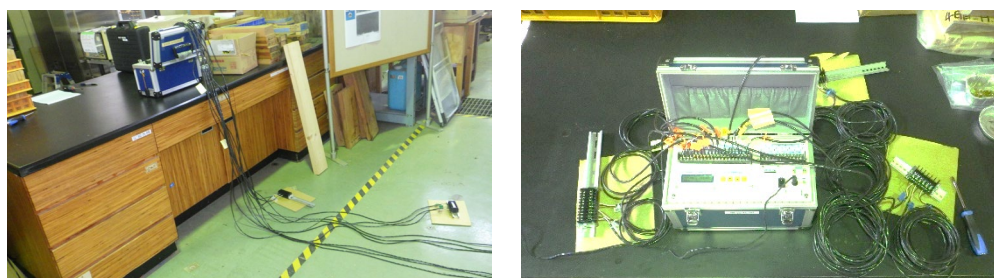


図 3-2-19 含水率計による先端を開放したケーブルの測定  
左：直線的な設置 右：巻き取った設置

図 3-2-20 に先端が開放されたケーブルの長さを変えて含水率計で計測した結果を示す。先端を解放した場合でも、ケーブルの電線間の漏れ電流の発生により擬似的に含水率が示されているが、ケーブルの設置状態による差はほとんど無い。このことからケーブルを巻いた状態でも測定値が変化する恐れは少ないと考えられた。

以上から、KNS-LOG を用いた測定ではケーブル長は 4m 以下とすることが推奨されるが、ケーブルの設置状態は伸ばした状態でも巻いた状態でも問題は無いと考えられた。

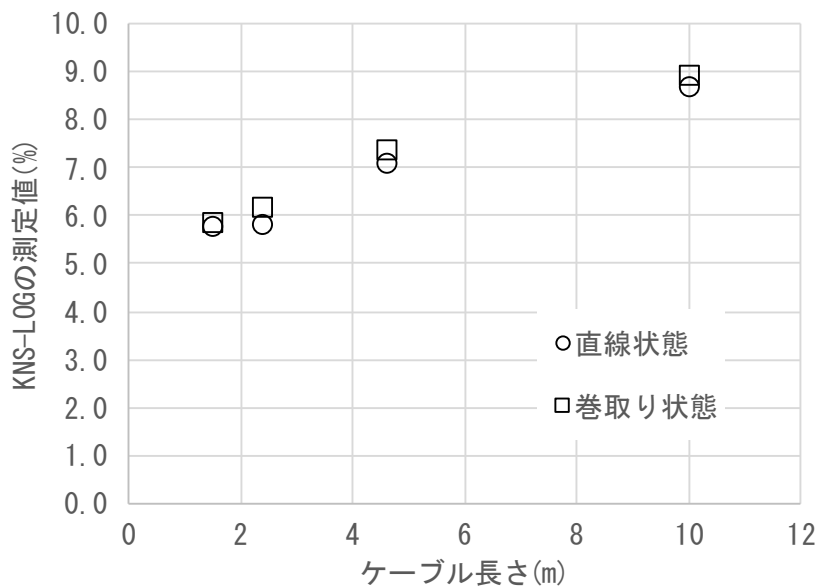


図 3-2-20 先端を開放したケーブルの長さ と含水率計の測定値の関係  
測定レンジ SOFT（すべてのケーブルを接続し同時に計測した）

(c) 含水率計測定値の全乾法との比較による検証

令和 6 年度は、9 層 9 プライ CLT を裁断した小試験体に測定プローブを挿入し、KNS-LOG を用いて含水率を測定した後に、全乾法による含水率との比較と検証を行い、KNS-LOG の校正直線を算出した。令和 7 年度は、令和 6 年度の試験において試験体数が少なかった 20℃65%RH の温湿度条件における含水率測定試験を追加で行い、校正直線の精度の向上を図った。試験体には 9 層 9 プライの CLT を長さ 30mm に裁断した強軸方向にエンドマッチしたもの（幅 300×高さ 270×長さ（強軸方向）30mm）2 体を用い、20℃65%RH の恒温恒湿器内で重量が一定になるまで調湿した。令和 6 年度と同様の方法で 1 層、3 層、5 層にプローブを施工した試験体（図 3-2-21）を 20℃65%RH の恒温恒湿器内に静置し、KNS-LOG と接続して含水率を 1 時間ごとに数日間測定した。測定終了後、プローブ先端部のラミナを切り出し、全乾法で含水率を求めた。

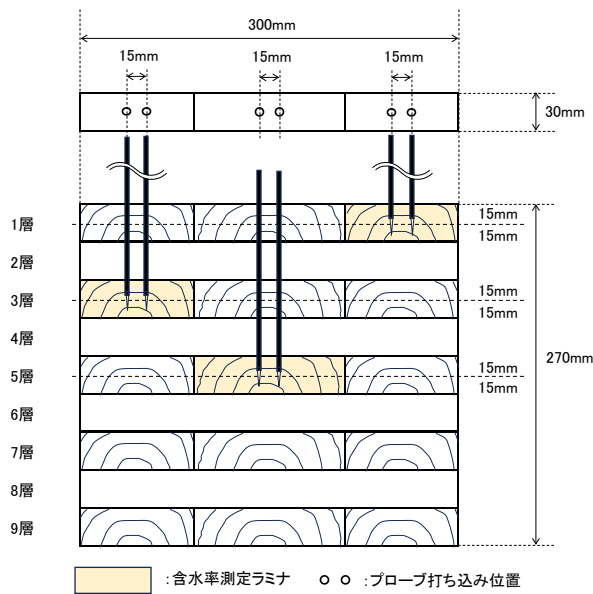


図 3-2-21 試験体の概要

KNS-LOG の測定値と全乾法による測定値との関係を、令和 6 年度の結果と合わせて図 3-2-22 左図に示す。KNS-LOG の測定値は測定期間の平均値を製造企業により提供されている温度補正式（式 3-1）で補正をした値を用いている。KNS-LOG による測定値と全乾法との間に高い相関がみられた。さらに、プローブ端子間隔の検討における測定値を追加し、含水率 10～15% の範囲のデータを補完したところ、より高い相関が見られた（3-2-22 右図）。そこで、図 3-2-22 右図の一次回帰式である  $y=0.8142x+2.9818$  を KNS-LOG 測定値の校正直線として使用することとした。

※) KNS-LOG 測定値の温度補正式

$$\Delta u = -(0.0025u_{kns} + 0.08) \cdot \Delta t \quad (3-1)$$

ここで、 $\Delta u$  : 含水率測定値の補正值、 $u_{kns}$  : 含水率計測定値、  
 $\Delta t$  : 20℃と測定時の温度の差 ( $t-20$ )

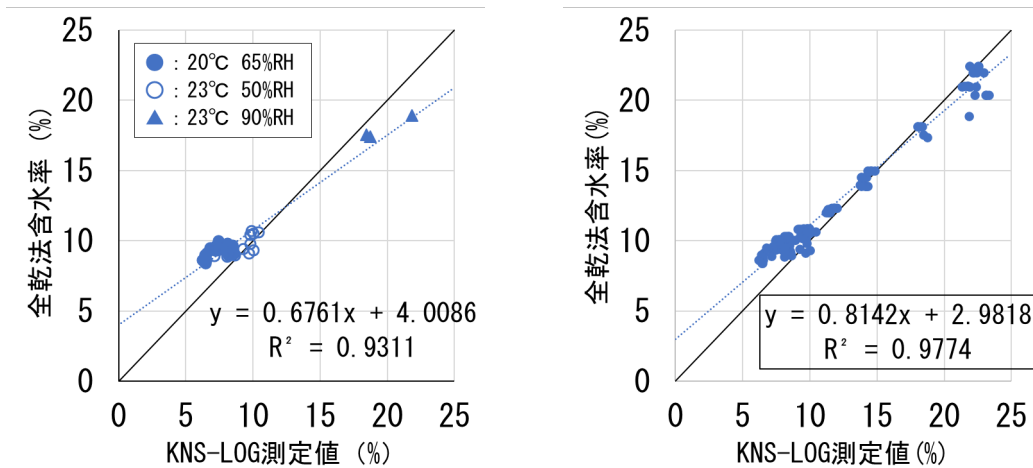


図 3-2-22 KNS-LOG と全乾法による含水率測定値の関係  
 (左：小試験体の測定結果、右：端子間隔検討試験の結果を追加した図)

### 3) 実大 CLT の含水率測定試験

前項までの測定条件の検証結果をふまえ、屋内環境下における CLT 内部の含水率変動を測定した。試験体には、林産試験場の試験棟内に約 3 年間保管していた、長期荷重試験体を半分の長ささに切断した 9 層 9 プライの CLT (幅 300mm×積層厚さ 270mm×長さ 3m) を使用した。これは森林総合研究所の長期荷重試験棟内の含水率測定試験体の強軸方向にエンドマッチしたものである。含水率の測定位置は含水率測定試験体と同様とした (図 3-2-23)。測定位置にドリルガイドを使用して試験体表面から垂直に先孔を開け、プローブを打込んだ。プローブに KNS-LOG を最大長さ 3m の導線ケーブルで接続し、1 時間間隔で 2025 年 6 月～7 月の 3 週間において含水率を測定した (図 3-2-24)。また、測定期間中の試験体周囲の温湿度を温湿度ロガー (エスペック社：RS14) で記録した。測定終了後、CLT を解体し (図 3-2-25)、プローブ先端のラミナを切り出して (図 3-2-26) 全乾法で含水率を求めた。

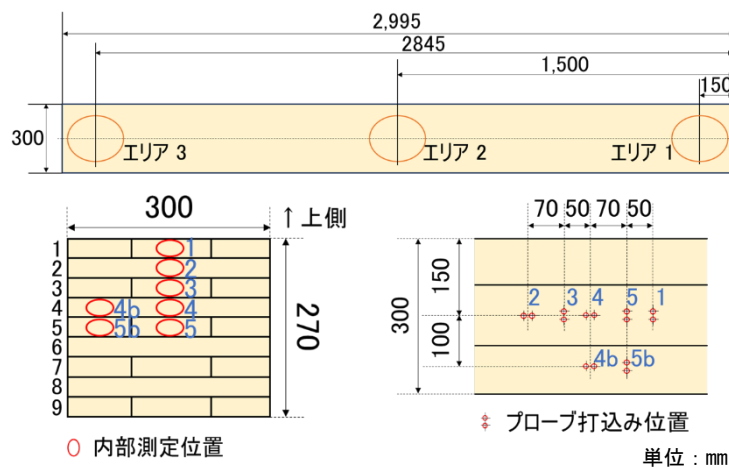


図 3-2-23 含水率の測定位置 (林産試験場)

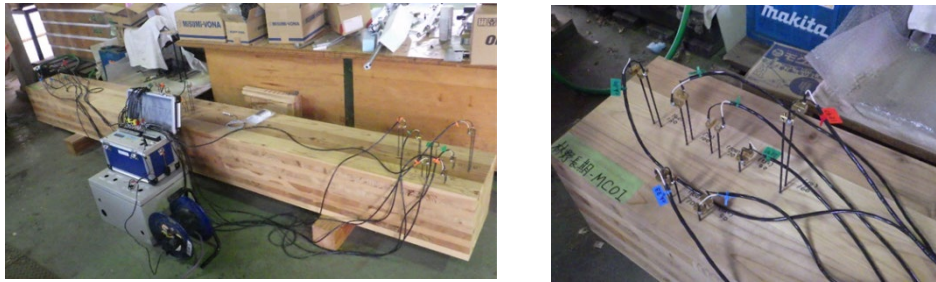


図 3-2-24 含水率の測定風景

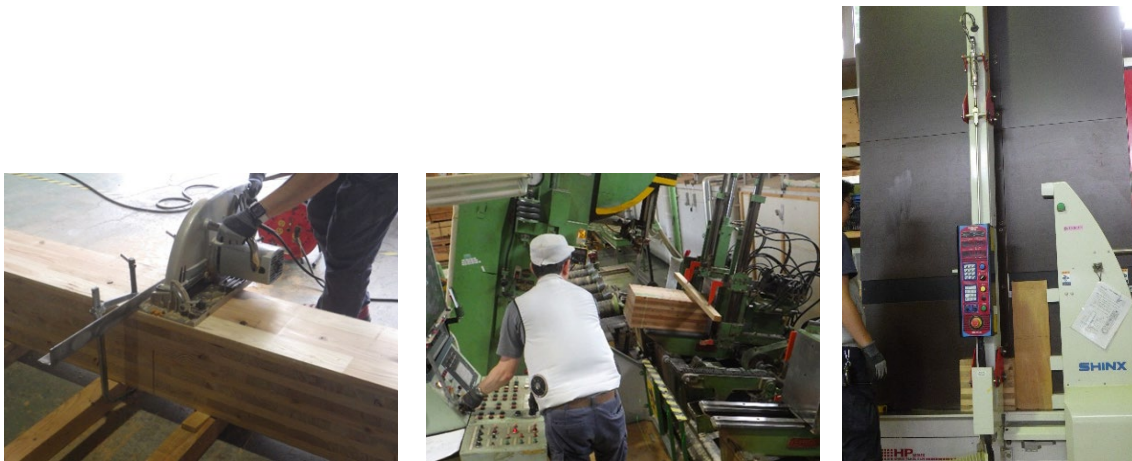


図 3-2-25 実大 CLT の解体の状況（左：丸鋸で分割、中：帯鋸盤で板に鋸断、右：パネルソーで試験片に小割）



図 3-2-26 含水率測定用試験片の採取例

測定期間中の温湿度の推移を図 3-2-27 に、例として測定エリア 2（試験体の長さ方向中央部）の含水率測定結果を図 3-2-28 に示す。測定値は前項の温度補正式と校正直線で補正した値である。図中の気候値平衡含水率は、温湿度の測定値から齋藤らが示し

た近似式<sup>1,2)</sup> (Kollmann による実測値に基づき作成された温度・相対湿度と平衡含水率の関係式(EMC<sub>1</sub>)) (式 3-2) を用いて算出した値を 24 時間移動平均値で示している。

$$EMC_1 = (a + bx + cx^2 + dy + ey^2 + fy^3) / (1 + gx + hy + iy^2 + jy^3) \quad (3-2)$$

x : 温度 (°C) (1 ≤ x ≤ 90)、y : 相対湿度 (%RH) (5 ≤ y ≤ 99.5)

係数 : a = 1.33、b = -8.27 × 10<sup>-3</sup>、c = -6.40 × 10<sup>-5</sup>、d = 1.10 × 10<sup>-1</sup>、e = -2.28 × 10<sup>-3</sup>

f = 1.47 × 10<sup>-5</sup>、g = -1.16 × 10<sup>-5</sup>、h = -2.42 × 10<sup>-2</sup>

i = 2.54 × 10<sup>-4</sup>、j = -9.85 × 10<sup>-7</sup>

内部含水率の変動幅は、平行層、直交層ともに気候値平衡含水率に比べ小さく、気候値平衡含水率よりやや遅れて変化する傾向が見られた。また表層(1層)に比べ、内層の平行層(3層、5層)の含水率変動はごくわずかであったが、直交層(2層、4層)は表層と同等に変動した。直交層は木口面と測定点が近いため、表層と同様に外気の影響を受けやすかったと考えられる。測定エリア 1、3 でも同様な傾向であった。

各測定点の KNS-LOG による測定値と全乾法で求めた含水率との関係を図 3-2-29 に、両者の差を表 3-2-2 に示す。KNS-LOG の値は、温度および校正直線で補正した測定値の測定終了前 12 時間の平均値である。両者の差の絶対値は平均 0.6%、最大 1.5%、標準偏差 0.574 で、概ね 1% 以下であった。試験体の解体作業の過程で含水率がいくらか変化することも考えられることから、実際の屋内環境下においても本手法により測定部位の含水率を測定できていると考えられる。

これらの結果から、実際の環境下においても、本測定手法により内部含水率の変動を測定できていることが確認できた。

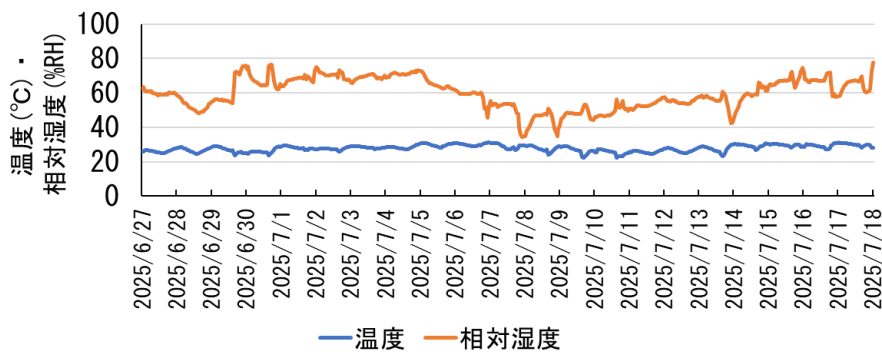


図 3-2-27 測定期間の温湿度の推移

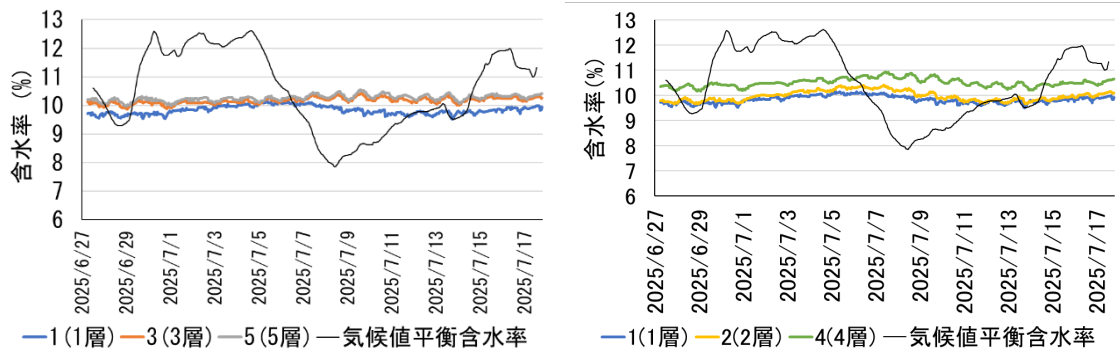


図 3-2-28 実大 CLT の内部含水率測定結果  
(右図：平行層、左図：表層と直交層)

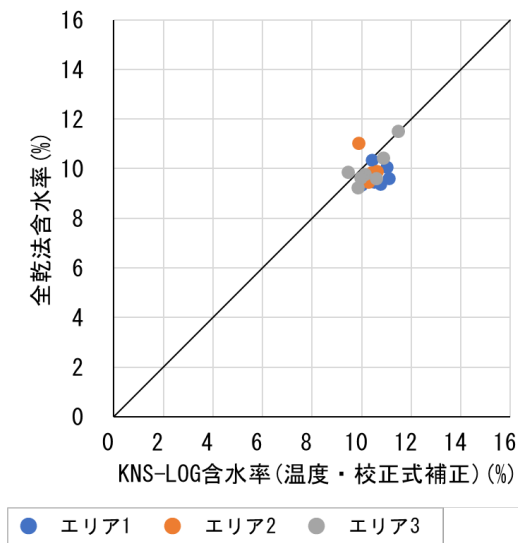


表 3-2-2 KNS-LOG と全乾法の  
測定値の差

	測定値の差	測定値の差の絶対値
平均	0.5	0.6
最小	-1.1	0.0
最大	1.5	1.5
標準偏差	0.576	0.576

図 3-2-29 KNS-LOG による測定値と全乾法との関係

#### 4) 長期荷重試験室内の含水率測定試験体の内部含水率変動の検討

森林総合研究所の長期荷重試験室内において含水率試験体を2023年2月に設置し、試験体内部の含水率変動を測定した結果、約3年間の測定期間経過後も試験体内で含水率測定値に差があり、表層と中心層の測定値では最大1%程度の差が発生していた。これが、測定誤差によるものか、試験体内部の含水率が平衡状態になっていないためか、ラミナごとの平衡含水率等の個体差によるものかが不明であった。この問題を解決するために、測定値に与える影響や校正方法を検討したが、依然として材内の含水率差は発生していた。そこで、令和7年度は、試験体を解体して材内の含水率分布を全乾法で測定し、含水率計(KNS-LOG)の測定値を検証した。2025年11月26日に森林総合研究所で丸鋸を用いて試験体を長さ方向に4分割し、梱包用ラップを巻き、ビニール袋に入れて梱包し、林産試験場へ運送した。なお、解体に先立ち、試験体の含水率を解体の前日から解体前までKNS-LOGで測定した(図3-2-30)。12月3日に林産試験場で、図3-2-31に示すように、測定エリアごとに、プローブ打込み位置の中間で、帯鋸を使用して5枚の板に裁断し、パネルソーと横切り機でラミナごとに分割してすぐに重量を測定した。試験片数は各エリアにつき135個(5枚×27個)である。試験片を長期荷重試験室内の温湿度環境と同じ20℃65%RHの恒温恒湿器内で重量が一定になるまで調湿し、重量を測定した。その後105℃の乾燥機で乾燥して全乾重量を測定し、試験片採取直後の含水率と20℃65%RHの平衡含水率を算出した。



図3-2-30 含水率試験体の解体作業

(左：解体前の含水率測定、中：丸鋸による分割、右：分割後すぐに梱包用ラップで断湿)

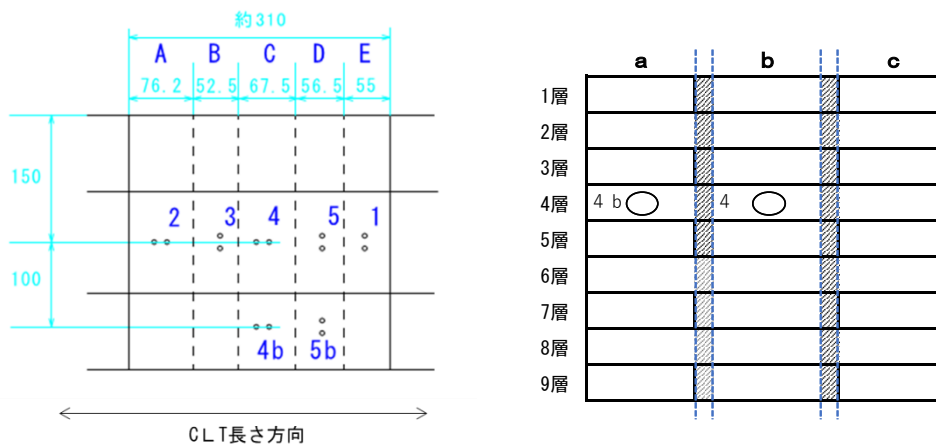


図3-2-31 測定エリアの帯鋸の鋸断位置(左図点線)と板Cのラミナ毎の分割図(右図)

KNS-LOG による解体前の含水率測定値と全乾法で求めた試験片採取直後の測定値(以後、「全乾法による含水率」とする)との関係を図 3-2-32 に、両者の差を表 3-2-3 に示す。KNS-LOG の測定値は温度補正式と校正直線で補正した測定値の測定期間をとおした平均値である。両者の差の絶対値は平均 0.5%、最大 1.1%、標準偏差 0.417 で、概ね 1%未満の差であった。

例として測定エリア 2 の試験片ごとの 20°C65%RH における平衡含水率を図 3-2-33 に示す。凡例のアルファベットの大文字は図 3-2-31 左図の 5 分割した板の記号を、小文字は同図の右図のラミナの列の記号を示している。20°C65%RH の平衡含水率は試験片によって異なり、最小値 10.2% (B-c9 層) から最大値 13.1% (E-a9 層) まで 2.9%の開きがあった(標準偏差 0.50)。また、表層側のラミナで比較的高めになる傾向が見られた。図 3-2-34 に KNS-LOG による含水率測定位置(プローブ先端のラミナ)の試験片について、全乾法による含水率と 20°C65%RH の平衡含水率を示す。全乾法による含水率は 20°C65%RH の平衡含水率とほぼ同じ値であり、その差は平均 0.0%、最大 0.1%、標準偏差 0.06 であった。これらの結果から、ラミナの平衡含水率は、個々のラミナで異なり、含水率測定試験体における KNS-LOG の含水率測定値の試験体内の差は、ラミナごとに平衡含水率自体が異なることによると考えられた。平衡含水率の違いは組織構造の違いや乾燥履歴の違いなどによると考えられる。さらに、全試験片について全乾法による含水率と 20°C65%RH の平衡含水率との関係を図 3-2-35 および表 3-2-4 に示す。両者の相関は高く ( $r=0.99$ )、その差は平均 0.0%、最大 0.3%、標準偏差 0.08 で、全乾法による含水率は、ほぼ 20°C65%RH の平衡含水率と同じ値であった。このことから、長期荷重試験室内の含水率測定試験体の内部含水率は、試験体内で値に差はあるが、概ね試験室内の温湿度と平衡状態に達していたと考えられた。

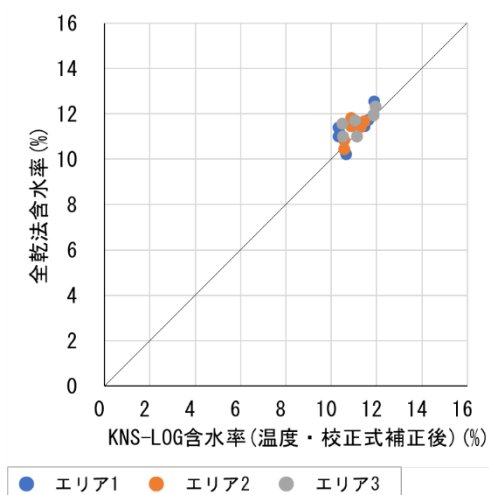


表 3-2-3 KNS-LOG と全乾法の測定値の差

	測定値の差	測定値の差の絶対値
平均	0.4	0.5
最小	-0.4	0.0
最大	1.1	1.1
標準偏差	0.417	0.417

図 3-2-32 KNS-LOG による測定値と全乾法との関係

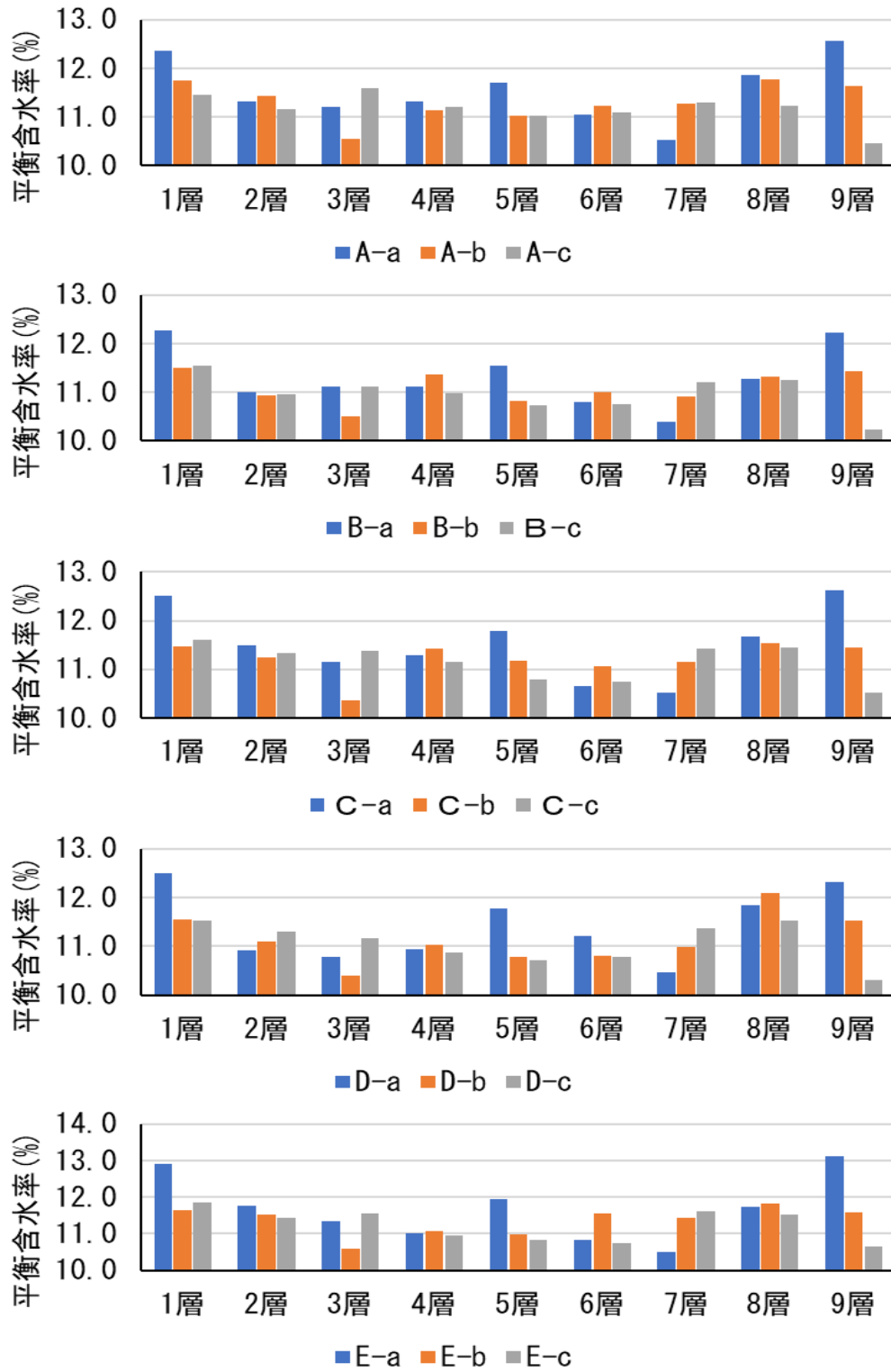


図 3-2-33 測定エリア 2 の試験片ごとの 20°C65%RH における平衡含水率

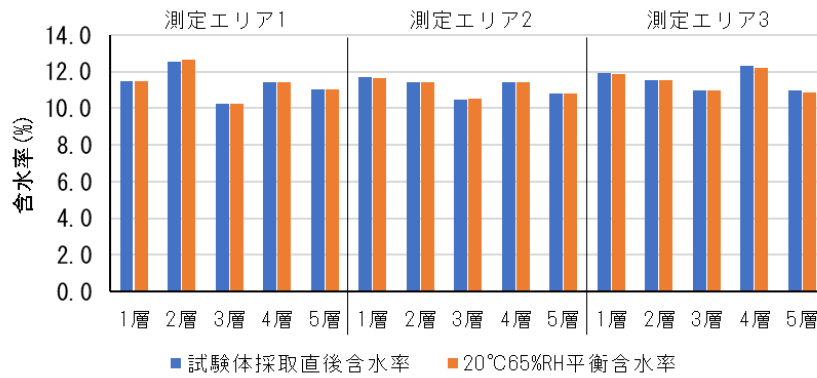


図 3-2-34 含水率測定位置の採取直後の含水率と 20°C65%RH の平衡含水率の比較

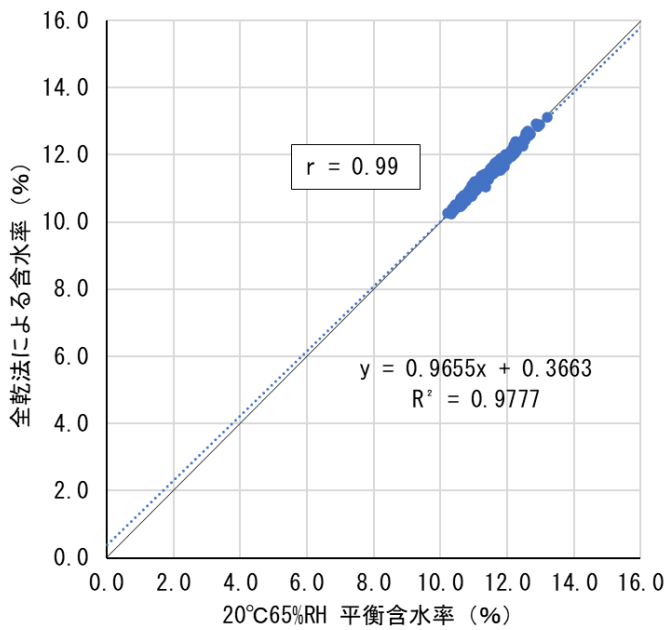


表 3-2-4 採取直後の含水率と 20°C65%RH の平衡含水率との比較

	全乾法による含水率	20°C65%RH 平衡含水率
平均値	11.5	11.5
最小値	10.2	10.2
最大値	13.2	13.1
標準偏差	0.514	0.502

図 3-2-35 全試験片の採取直後の全乾法による含水率と 20°C65%RH の平衡含水率の比較

### 3.3 日本各地の気象データによる CLT 内部含水率の推定

木材・木質材料の含水率は周囲の温湿度に応じて変化し、強度や寸法安定性などの性能に影響を及ぼす。齋藤ら<sup>1,2)</sup>は全国各地の気象データを用いて平衡含水率（気候値平衡含水率）を推定し、寺澤ら<sup>3)</sup>などの既報実測値と比較した。その結果、1981～1995年のデータに基づく全国 842 地点の平均値は従来どおり約 15 % であったが、都市部では気温上昇と相対湿度低下により含水率が低下傾向を示したとした。齋藤らの報告以降、日本の気候は急激に変化し、近年の夏季には「災害級」とも称される高温が観測されている。こうした気候変動が木材・木質材料の含水率に及ぼす影響を把握することは、木造建築物の性能確保の観点から重要である。しかし、CLT などの大断面材では周囲温湿度の変動が内部含水率へ与える影響を評価するには長期試験が不可欠であり、測定事例の蓄積は容易ではない。さらに、環境条件によって内部含水率は大きく左右される。そこで我々は、コンピュータシミュレーションによって CLT 内部の水分移動を解析し、近年の気候変動が内部含水率に及ぼす影響を検討することを考えた。

#### 1) 過去 30 年の気候値含水率の全国変動

過去 30 年間における気候変動と、それに伴う木材の気候値平衡含水率の変動傾向を解析した。寺澤らが 1971 年に実測を行った全国 68 地点<sup>3)</sup>を解析対象とした。解析期間は 1996 年から 2025 年までとし、2025 年は 6 月までの観測値を用いた。気象条件としては、気象庁アメダスの各地点における日別平均気温・相対湿度データを気象庁 Web サイトから手動で取得し、月平均値を算出した。得られた温湿度データから木材気候値平衡含水率を推定するために、齋藤らが示した近似式  $EMC_1^{1,2)}$  (式 3-2) を適用し、月次で算出後、年平均値を求めた。

地方区分は齋藤らの表<sup>2)</sup>を参考に、北海道から九州までの 7 地域とした。対象期間は 5 年ごとの検討期間に分けて考察を行った。平均気温の推移を図 3-3-1 に示す。なお、以降の議論・各図のプロットは、過去の報告の測定年および各検討期間の中央年（検討期間）で示す。気温は北海道において、最初の検討期間である 1998 年期（1996-2000）を基準とすると、2003 年期（2001-2005）に 0.5℃の上昇が見られたが、その他の地域では 2013 年期（2011-2015）までは±0.1～0.2℃の範囲で上下していた。しかしながら、その後全国的に気温の上昇が見られ、もっとも最近の 2023 年期（2021-2025）においては北海道で+1.1℃、その他の地域でも+0.4～+0.9℃（平均+0.7℃）の大きな上昇が見られた。また、平均相対湿度の変化を図 3-3-2 に示す。2003 年期までは全国的に低下したが、その後上昇に転じた。2023 年期では関東・中部を除き、1998 年期よりも多湿となっており、九州で最大+1.3%、全国平均で+0.5%の増加を示している。さらに、全検討期間の最小値と最大値の差は九州で 5.4%、全国平均で 2.5%であった。対象期間中の気候値平衡含水率の平均変動と、過去の報告値<sup>1~3)</sup>を図 3-3-3 に示す。本解析でも齋藤らの報告<sup>2)</sup>よりさらに含水率が低下した地点が確認されたが、2013 年期以降は多くの地域で上昇に転じた。木材の平衡含水率は一般に温度上昇で低下し、相対湿度上昇で増

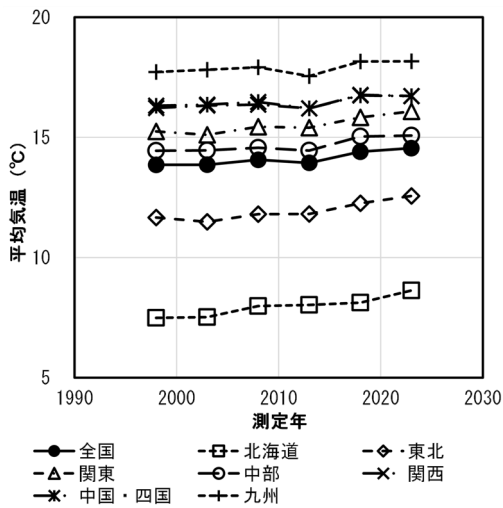


図 3-3-1 平均気温の変動傾向

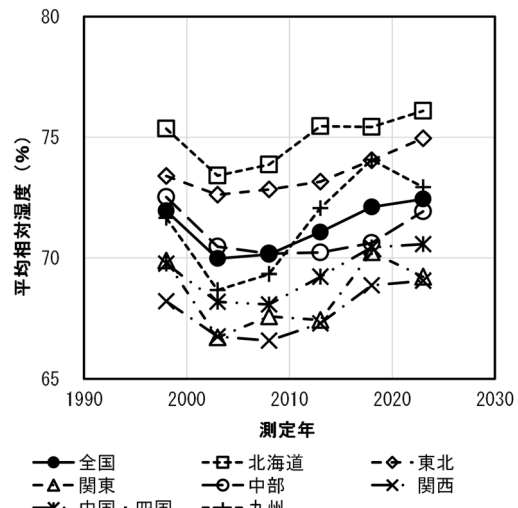


図 3-3-2 平均湿度の変動傾向

加する。2008 年期（2006-2010）までは温湿度がともに低下したため含水率が下がったが、その後は湿度上昇による増加分が温度上昇による減少分を上回ったと考えられる。齋藤らの近似式 ( $EMC_1$ ) によれば、 $15^{\circ}\text{C} \cdot 70\%RH$  付近では温度 $+1^{\circ}\text{C}$ で $-0.05\%$ 、湿度 $+1\%$ で $+0.23\%$ 変動するため、湿度の寄与が大きいことが分かる。気候変動の議論では温度変化に注目しがちだが、これらの結果は相対湿度の影響も軽視できない点を示している。解析期間（1996-2025）内での気候値平衡含水率の差は、最大  $1.4\%$ （九州地方）となった。なお、ここで得られた気候値平衡含水率は日別・時間別変動を考慮していないこと、建築物等の CLT 含水率を直接示すものではないことに注意が必要である。

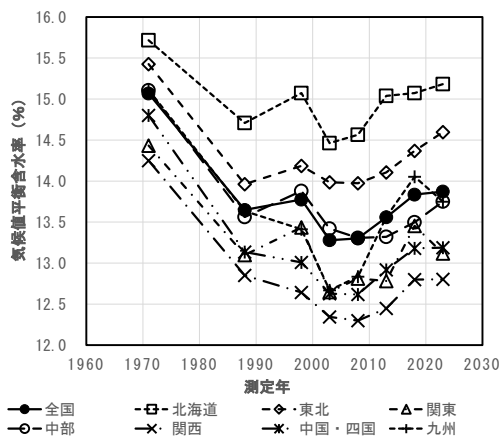


図 3-3-3 気候値平衡含水率の変動傾向

注) 1971 年は寺澤ら<sup>3)</sup>、1988 年は齋藤ら<sup>1,2)</sup>による

表 3-3-1 全国の気候値平衡含水率の推移（北海道-関東）

地域		1971	1981-1995	1996	2001	2006	2011	2016	2021
		寺澤	齋藤	-2000	-2005	-2010	-2015	-2020	-2025
北海道	稚内	15.1	14.9	15.3	14.5	15.6	15.1	14.8	15.6
	旭川	16.2	15.2	15.4	14.9	14.9	15.1	15.6	15.6
	羽幌	16.5	14.9	14.8	13.7	13.9	14.9	15.6	15.5
	留萌	15.7	14.8	15.7	15.4	14.9	15.5	15.7	15.4
	札幌	15.1	13.6	13.6	12.8	12.9	13.0	12.9	13.4
	小樽	14.2	13.6	13.9	13.2	13.2	14.1	14.7	14.7
	網走	16.1	15.1	15.1	13.9	13.9	14.9	14.1	14.2
	根室	16.5	15.7	16.4	16.6	15.4	17.1	16.6	17.0
	釧路	17.0	15.4	15.6	15.4	15.4	15.9	16.2	15.9
	帯広	15.5	14.2	14.4	13.8	14.0	14.1	14.0	14.3
	室蘭	15.0	15.0	15.8	15.5	16.9	16.1	15.9	15.7
函館	15.7	14.1	14.9	14.0	13.7	14.6	14.8	14.9	
東北	青森	16.4	14.3	14.8	14.2	14.4	14.8	14.5	15.1
	八戸	15.3	14.1	14.6	14.6	14.3	14.6	14.7	15.0
	秋田	15.6	13.7	13.8	13.7	13.9	13.8	14.3	14.5
	盛岡	15.0	14.3	14.4	14.2	13.9	14.4	14.7	15.3
	石巻	16.0	14.8	14.5	14.3	14.2	14.6	15.6	15.3
	仙台	15.0	13.5	13.8	13.5	13.9	13.4	13.5	13.6
	山形	15.7	14.3	14.7	14.5	14.4	14.1	14.3	14.6
	福島	14.4	12.7	13.0	12.9	12.9	13.0	13.4	13.3
関東	水戸	15.6	14.4	14.8	13.8	13.8	14.0	13.8	13.5
	宇都宮	15.2	13.4	13.8	12.5	13.3	12.6	13.4	13.4
	前橋	13.0	12.2	12.0	11.3	11.2	11.2	11.8	11.5
	東京	13.5	11.7	11.6	10.8	11.0	11.5	13.3	12.9
	銚子	15.1	14.1	15.3	15.7	15.4	15.0	15.5	14.8
	横浜	14.2	12.8	13.0	11.8	12.1	12.5	12.9	12.6

表 3-3-2 全国の気候値平衡含水率の推移（中部-九州）

地域	1971	1981-1995	1996	2001	2006	2011	2016	2021	
	寺澤	齋藤	-2000	-2005	-2010	-2015	-2020	-2025	
中部	長野	15.0	14.3	14.1	13.2	13.7	13.9	14.4	14.5
	軽井沢	17.3	16.5	16.1	16.8	17.1	16.2	17.7	17.2
	松本	14.1	13.4	13.0	12.6	12.4	12.5	12.4	12.3
	甲府	14.3	12.3	12.4	11.5	11.7	11.5	11.6	12.3
	静岡	14.0	12.6	13.4	12.5	13.0	12.4	12.7	13.0
	浜松	13.8	12.5	13.2	12.8	12.9	13.0	12.6	13.0
	名古屋	14.9	12.4	12.9	12.1	11.5	12.1	11.9	12.6
	高山	16.0	14.6	15.7	16.7	14.2	15.1	15.4	15.6
	岐阜	14.6	12.4	13.0	12.0	11.8	12.0	11.8	11.8
	津	14.6	12.8	12.9	12.1	12.9	12.4	11.6	12.5
	尾鷲	15.1	12.8	14.4	13.8	13.4	13.4	13.7	14.2
	新潟	15.2	13.4	13.9	13.1	13.1	13.5	14.2	14.5
	富山	16.2	15.4	14.9	14.7	15.6	14.4	15.0	14.7
	金沢	15.1	13.6	13.7	13.3	12.6	13.2	12.7	13.2
福井	16.3	14.4	14.7	14.2	14.4	14.5	14.5	15.0	
敦賀	15.2	13.6	13.8	13.3	12.9	13.0	13.5	13.7	
関西	彦根	15.9	14.1	13.9	14.0	14.0	13.7	14.1	14.4
	京都	14.2	12.4	12.4	11.7	11.5	12.1	12.2	12.2
	大坂	13.8	12.0	11.7	11.5	11.4	11.7	11.9	11.9
	姫路	14.6	13.6	13.5	13.4	13.0	13.3	14.0	13.5
	神戸	13.0	12.6	12.2	11.8	12.2	11.8	12.1	12.1
	和歌山	14.0	12.4	12.2	11.8	11.6	12.1	12.5	12.7
中国・四国	岡山	14.6	12.6	12.1	12.2	12.0	12.1	13.2	13.3
	広島	14.6	13.0	12.7	12.8	12.1	12.2	11.4	11.1
	呉	13.8	12.6	12.6	12.3	12.0	12.4	12.9	12.5
	松江	16.0	15.0	14.5	13.8	14.1	14.7	14.8	14.5
	米子	15.6	14.1	14.0	13.5	13.7	13.8	13.6	13.7
	鳥取	15.2	13.8	14.0	13.6	13.8	13.9	14.1	14.4
	徳島	14.6	12.4	12.6	12.0	12.0	12.5	13.1	13.2
	高松	15.2	12.8	12.5	12.0	11.9	12.2	12.6	12.7
	松山	14.2	12.6	12.4	12.0	11.9	12.3	12.7	12.9
	高知	14.8	12.6	12.8	12.4	12.8	13.0	13.2	13.3
	下関	14.2	13.0	12.9	12.5	12.4	12.9	13.4	13.4
九州	福岡	14.9	12.8	12.5	11.9	11.9	12.7	12.9	12.6
	佐賀	14.9	13.5	13.0	12.5	12.2	13.1	13.2	13.0
	大分	15.1	13.5	13.2	12.2	12.3	12.8	13.4	13.4
	長崎	14.2	13.7	13.3	12.5	12.5	13.6	14.2	13.2
	熊本	14.9	13.3	13.1	12.2	12.7	13.1	13.6	12.8
	人吉	16.2	15.6	15.3	14.5	14.5	15.1	16.3	16.2
	宮崎	15.4	13.7	13.7	13.2	13.7	14.3	14.6	14.4
	鹿児島	15.7	12.9	12.8	12.2	12.3	13.5	13.6	13.6
	名瀬	14.7	13.7	13.9	12.9	13.3	13.9	14.6	14.5

## 2) シミュレーションによる CLT 内部の含水率変動の推定

一次元の熱・水分同時移動を扱うシミュレーションソフト WUFI PRO 7.1.0 を用いて、近年の気象変動データを元に CLT 部材の含水率挙動を推定した。解析対象は 5 層 5 プライの CLT を想定し、材料物性については、WUFI PRO に収録されているライブラリ内の「Stora Enso CLT」のパラメータを採用した。ただし、平衡含水率曲線はライブラリ値をそのまま用いず、EMC<sub>1</sub> から作成した曲線に置き換えることで、3.3 の 1) での気候値含水率との関係を揃えた。シミュレーションの概要および使用したその他の代表的な物性値を図 3-3-4 および表 3-3-3 に示す。

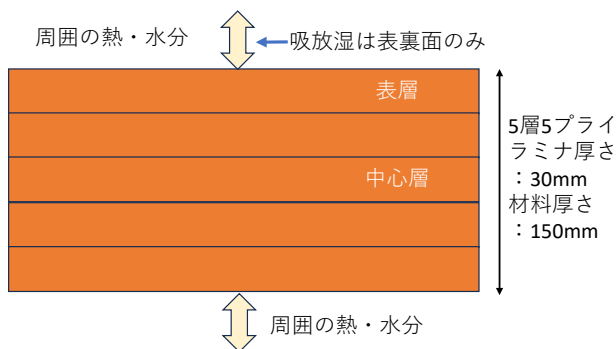


図 3-3-4 シミュレーションモデルの概要

表 3-3-3 シミュレーションの物性値

密度	kg/m <sup>3</sup>	410
空隙率	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.74
水蒸気拡散抵抗係数	—	500
比熱	J/ (kg·K)	1300
熱伝導率	W/ (m·K)	0.098
各層の初期含水率	%	12

外界条件には、アメダス観測地の札幌・東京・宮崎の気候データを用い、日射および雨水の影響は受けない設定、すなわち日射・降雨の影響を除外した気候条件として取り扱った。温湿度入力データは、①標準年 EA 気象データ 1995 年版 (対象年 1981~1995 年、以下「1995 標準年」)、②同 2010 年版 (対象年 2001~2010 年、以下「2010 標準年」)、③2024 年のアメダス観測値の 3 種類を用い、過去の標準年データと直近観測データを比較することにした。計算期間は二通り設定した。第一に、各年の 1 月 1 日から 12 月 31 日までの 1 年間を対象とする解析を行い、年間を通じた応答を把握した。第二に、同一の年間気象データを 5 サイクル繰り返して計算し、初期条件の影響を減じながら、部材状態が平衡状態に近づく過程を検討した。

検討の結果を表 3-3-4、および東京における各温湿度入力データ別の内部含水率の経時変化を図 3-3-5~7 に示す。地点差としては、全層平均含水率は概ね宮崎が最も高く、札幌がそれに続き、東京は標準年条件では最も低い傾向を示した。5 サイクル目の全層平均でみると、札幌は 12.6~13.5%、東京は 11.7~13.8%、宮崎は 13.9~15.0%であった。年次差では、いずれの地点でも 2024 年が高含水側となり、とりわけ東京での増加が大きい。全層平均(5 サイクル目)で 2010 標準年から 2024 年へは、札幌で約+0.9%、東京で約+2.1%、宮崎で約+1.1%の上昇が見られた。

層別にみると、表層は外界変動の影響を直接受けるため季節変動が大きく、S.D. も中心層より大きい。一方、中心層は変動が拡散過程で平滑化され、特に 5 サイクル目では S.D. が 0.1~0.3 程度まで小さくなる条件が多い。また、1 年間計算と 5 サイクル目を比較すると、平均含水率は多くの条件で上昇し、上昇幅は中心層で大きい。例えば宮崎

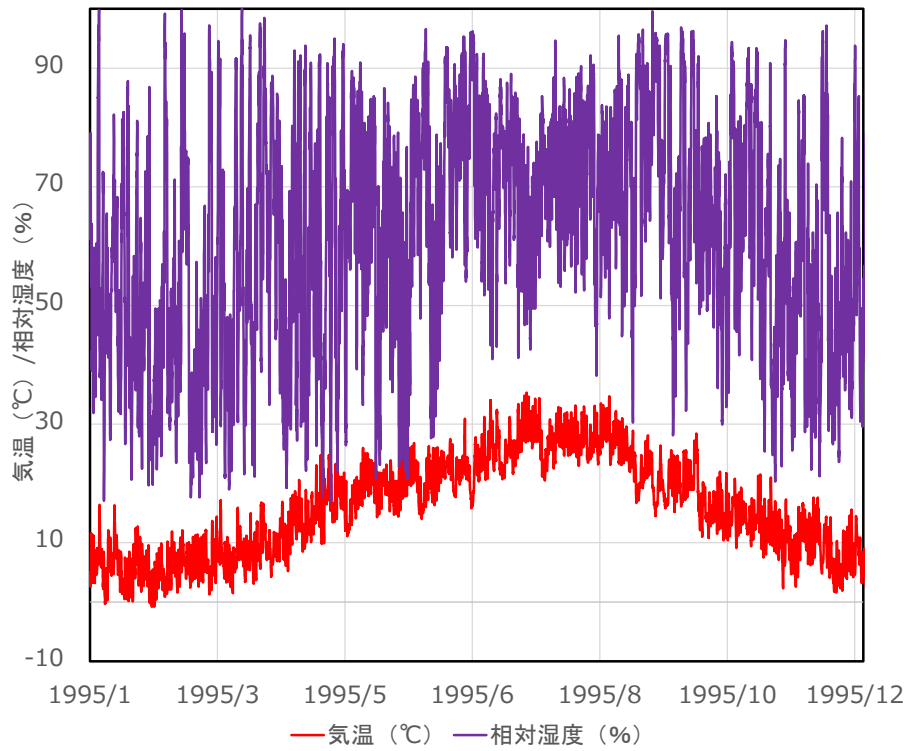
中心層では 1995/2010 標準年で+1.4%、2024 年で+2.0%の増加が見られた。初期含水率を 12%に設定しているため、湿潤側の気候条件では内部が十分に平衡に達する前に 1 年が終了し、繰り返し計算により内部が徐々に「その気候が規定する周期定常値」へ近づいた結果と解釈できる。逆に東京 2010 標準年のように、表層や全層平均で僅かな低下が生じるケースは、初期 12%がその気候の周期定常値よりやや高く、乾燥方向へ収束した可能性を示す。

シミュレーションにおいても、2024 年の含水率が高くなる傾向が確認された。また、年間変動も東京・宮崎では大きくなる傾向があった。1995 年時に CLT は存在しないが、含水率が 30 年という期間では気候変化により変化する可能性が示唆された。製品トラブル防止のための製造時の含水率調整等のためには、今後も気象変化に注視していく必要がある。

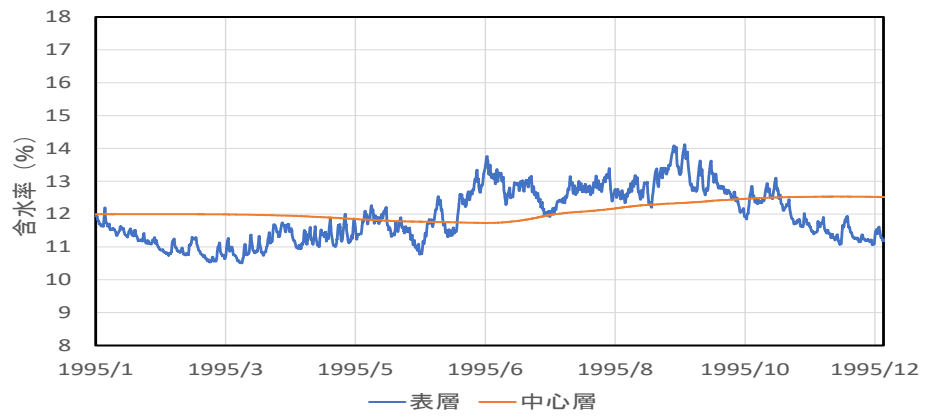
表 3-3-4 シミュレーションによる含水率の推定

地点	対象層	対象年	含水率 (%)			
			1年間		5サイクル目	
			平均	S.D.	平均	S.D.
札幌	表層	1995標準年	12.7	0.5	13.1	0.4
		2010標準年	12.3	0.5	12.5	0.5
		2024	12.9	0.7	13.4	0.5
	中心層	1995標準年	12.3	0.3	13.2	0.1
		2010標準年	12.2	0.2	12.7	0.1
		2024	12.4	0.4	13.6	0.1
	全層平均	1995標準年	12.5	0.4	13.2	0.2
		2010標準年	12.3	0.4	12.6	0.3
		2024	12.7	0.5	13.5	0.3
東京	表層	1995標準年	12.1	1.1	12.1	1.1
		2010標準年	11.6	0.7	11.5	0.8
		2024	13.1	1.2	13.6	1.1
	中心層	1995標準年	12.2	0.4	12.6	0.3
		2010標準年	11.9	0.2	11.9	0.2
		2024	12.6	0.7	14.0	0.3
	全層平均	1995標準年	12.0	0.5	12.2	0.5
		2010標準年	11.8	0.4	11.7	0.5
		2024	12.9	1.0	13.8	0.6
宮崎	表層	1995標準年	13.3	0.8	13.8	0.6
		2010標準年	13.3	1.0	13.8	0.8
		2024	14.2	1.2	15.0	0.9
	中心層	1995標準年	12.7	0.7	14.1	0.2
		2010標準年	12.7	0.7	14.1	0.2
		2024	13.1	0.9	15.1	0.1
	全層平均	1995標準年	13.0	0.7	13.9	0.4
		2010標準年	13.0	0.8	13.9	0.5
		2024	13.7	1.0	15.0	0.5

気温・相対湿度



① 1年間シミュレーション



② 5サイクルシミュレーション

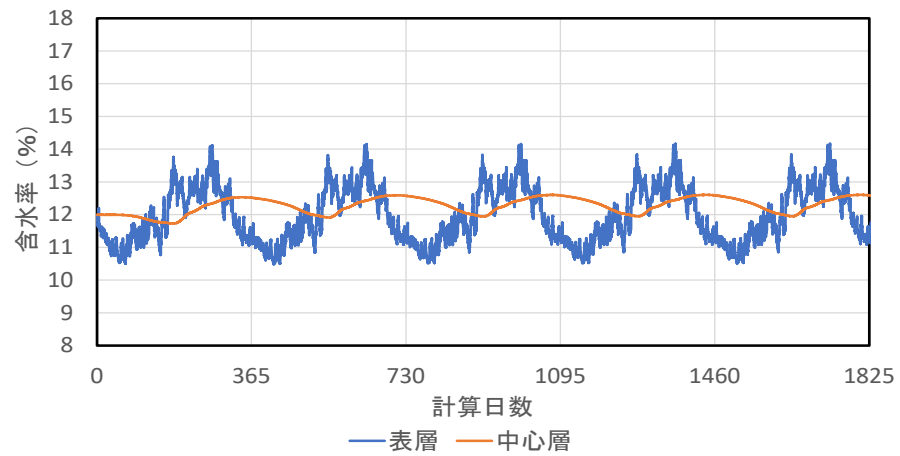
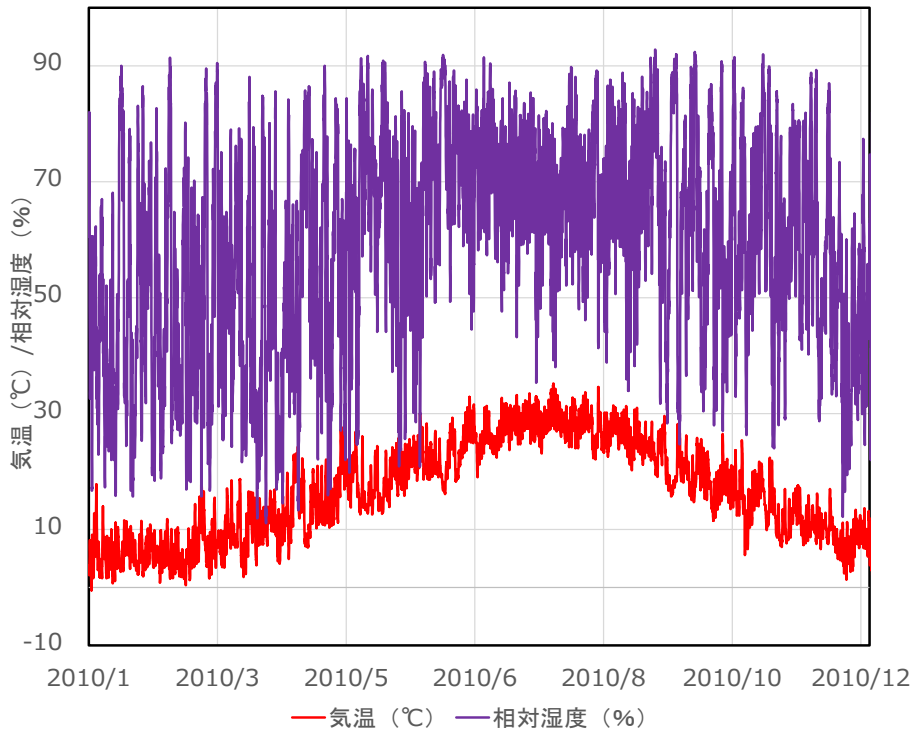
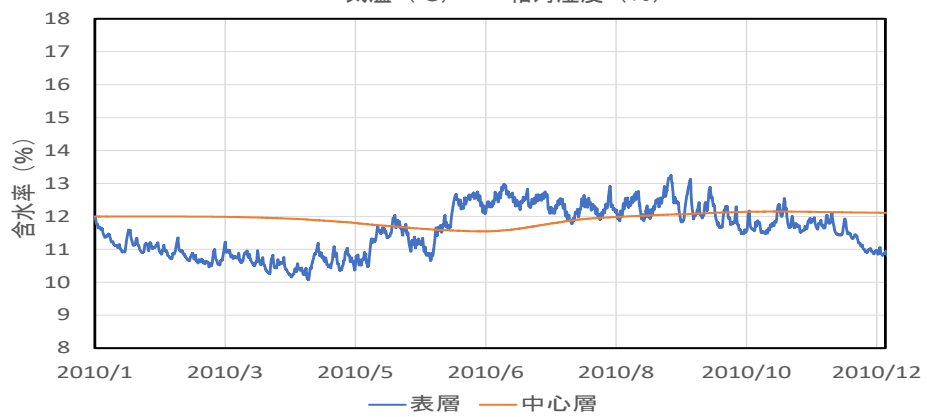


図 3-3-5 CLT 内部含水率の経時変化のシミュレーション (東京-1995 年標準年)

気温・相対湿度



① 1年間シミュレーション



② 5サイクルシミュレーション

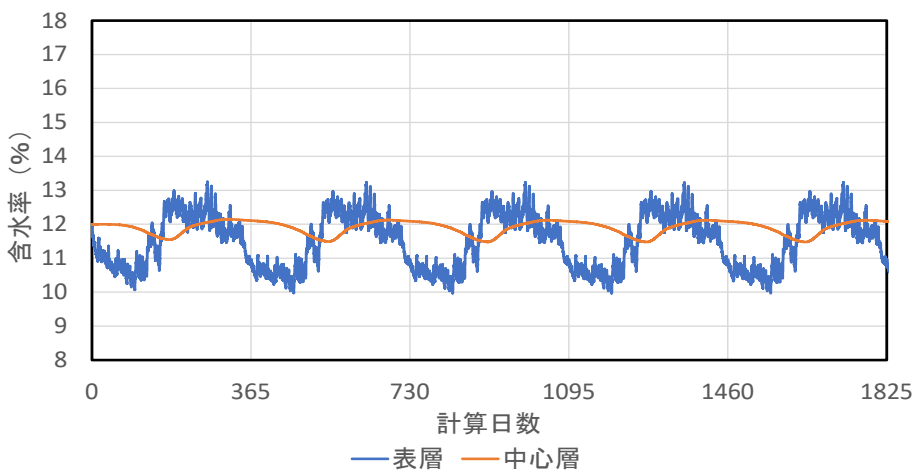


図 3-3-6 CLT 内部含水率の経時変化のシミュレーション (東京-2010 年標準年)

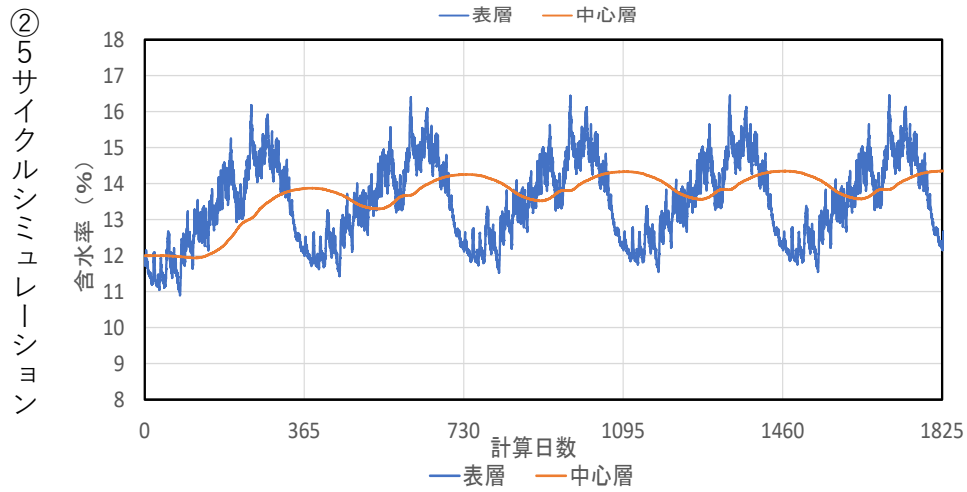
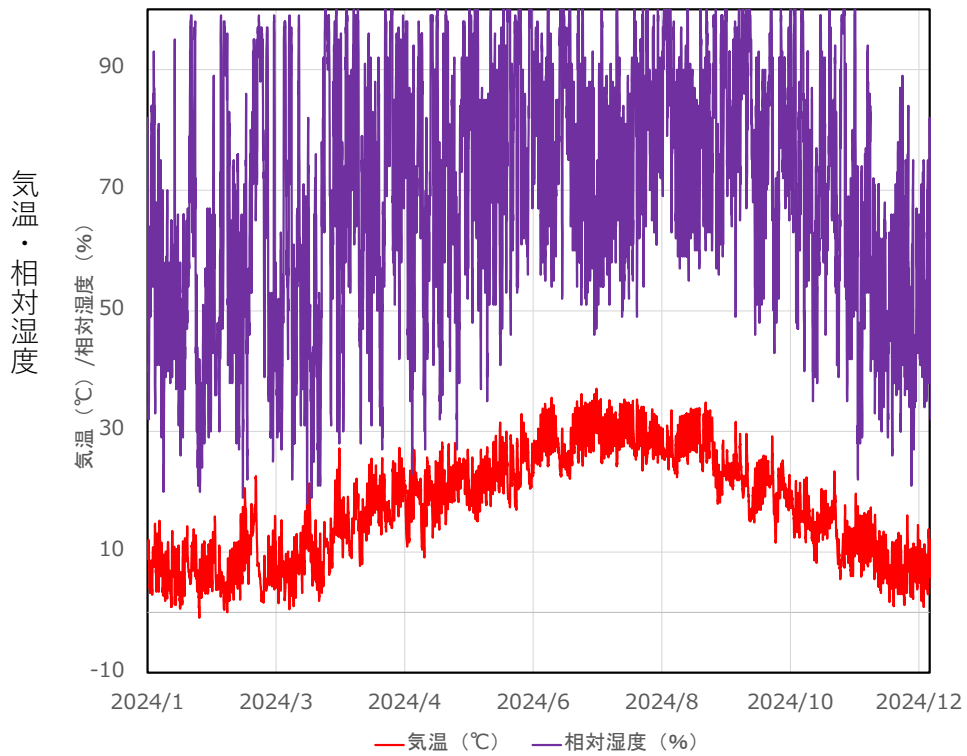


図 3-3-7 CLT 内部含水率の経時変化のシミュレーション (東京-2024 年)

### 3.4 長期荷重試験時の温湿度変動が CLT の面外曲げヤング係数に及ぼす影響

本事業における長期荷重試験は 20℃65%RH の恒温恒湿室内にて実施されており、安定的な環境下での試験と言える。しかしながら、設置時の試験体の含水率が 20℃65%RH の平衡含水率と異なる場合には、内部含水率は室内の温湿度に係る平衡含水率に向かって変化する。また、長期の測定においては、空調装置の運転状況等によって室内の温湿度が変動をすることが考えられる。このため、令和 5 年度から令和 7 年度にかけて長期荷重試験室内に設置された試験体の内部含水率の測定を実施したが、得られた含水率変動が CLT の強度物性にどのような影響を与えるかを検討する必要がある。

令和 6 年度は小型 CLT 試験体による含水率と動的ヤング係数の関係をラミナの動的ヤング係数の含水率依存性の実測値から平行層理論によって推定する手法の検討を行ったが、令和 7 年度は、長期化荷重試験室に設置した実大の CLT 試験体の内部含水率変動が、面外曲げヤング係数に与える影響を平行層理論によって推定した。

平行層理論による含水率変動時の面外曲げヤング係数の推定モデルを以下に示す。CLT 断面は、厚さ方向に積層されたラミナ層の集合体としてモデル化し、各層が完全に接着され、層間すべりは生じないものと仮定した。なお、せん断変形の影響は考慮していない。CLT 全体の面外曲げヤング係数は、平行層理論に基づき、各層の曲げヤング係数と断面二次モーメント寄与を用いて算定した。

各ラミナ層  $i$  の面外曲げヤング係数  $E_i$  と断面二次モーメント寄与  $Q_i$  に基づき、CLT 全体の面外曲げヤング係数  $E_{eq}$  は次式で表されるものとした。

$$E_{eq} = \frac{\sum_i E_i Q_i}{I_0} \quad (3-3)$$

ここで、

$Q_i = I_i + A_i z_i^2$  : 各層の断面二次モーメント寄与

$I_0 = \sum_i Q_i$  : 幾何学的断面二次モーメント

$z_i$  : 断面中立軸から各層中心までの距離

強軸方向の面外曲げを対象とするため、強軸方向層のみを有効とし弱軸方向層の寄与は無視し、各層の繊維方向に応じて有効係数  $k_i$  を次のように設定した。

繊維方向が曲げ応力方向と平行な層（強軸）:  $k_i = 1.0$

直交層（弱軸）:  $k_i = 0.0$

これにより、 $E_{eq}$  は次式で表される。

$$E_{eq} = \frac{\sum_i (k_i E_i) Q_i}{I_0} \quad (3-4)$$

また、各ラミナ層の面外曲げヤング係数は、含水率変化に対して線形に変化すると仮定した。基準含水率を 12% とし、含水率 1% 当たりの相対変化率  $\alpha_d$  を導入することで、基

準含水率における面外曲げヤング係数は次式で示される。

$$E_{d, i}(u_i) = E_{i, \text{ref}}[1 + \alpha_d(u_i - u_{\text{ref}})]$$

ここで、

$u_i$  : 層  $i$  の含水率 [%]

$u_{\text{ref}}$  : 基準含水率 (12%)

$E_{i, \text{ref}}$  : 基準含水率における動的ヤング係数

$\alpha_d$  : 含水率 1%当たりの相対変化率

(3-5)

令和 6 年度に測定した 60 体のラミナ試験体について 3 水準の含水率条件で測定した動的ヤング係数のデータ (図 3-4-1) を用いて、試験体ごとに正規化した回帰分析により含水率依存性を推定した。本検討では、面外曲げヤング係数と動的ヤング係数の相対変化率が同様であると仮定し、 $\alpha_d \doteq -0.01 / \%$  とした。

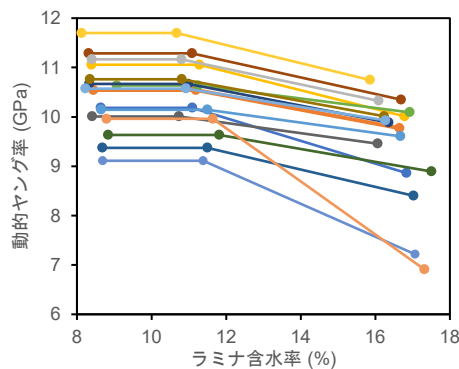


図 3-4-1 ラミナ含水率と動的ヤング率の関係

算出に当たり、CLT 断面内の含水率分布は層ごとに一様であると仮定し、各層の含水率は測定含水率であると見なすことで、層間の含水率分布に対応する瞬間的な CLT の面外曲げヤング係数を得ることとした。

以上の仮定に基づき、CLT の面外曲げヤング係数は次式で算出される。

$$E_{\text{eq}}(t) = \frac{\sum_i k_i E_{i, \text{ref}}[1 + \alpha_d(u_i(t) - u_{\text{ref}})]Q_i}{I_0} \quad (3-6)$$

本式をスプレッドシートに組み込み、各層の含水率の経時変化から面外曲げヤング係数を算出した。なお、想定する CLT は 9 層 9 プライの Mx60 とし、算出にあたり表層の面外曲げヤング係数は 6GPa、内層の面外曲げヤング係数は 3GPa を与えた。

CLT の内部含水率には、森林総合研究所内の長期荷重試験室内に設置された含水率測定試験体 (スギ 9 層 9 プライ) の各層の測定エリア 3 箇所 (図 3-2-11) の平均値を用いた。対象測定期間としては、2023 年 2 月 10 日の試験体設置開始後から 1 年間とした。また、含水率変動は 5 層目を中心に対称で変動していると仮定し、6 層～9 層の含水率

には4～1層の含水率をそれぞれ用いた。なお、含水率については、測定値を温度補正および校正直線による補正を行って使用した。

図3-4-2に試験室内の温湿度、図3-4-3に試験体の内部含水率変動を示す。本測定期間では、試験温湿度である20°C65%RH付近に温湿度が概ね維持されているが、一時的に機械の点検や荷重試験体交換時の空調機停止等による温湿度変化が発生した。内部含水率は概ね一定であったが、第3層のように試験初期の1ヵ月程度の期間に含水率が変化して平衡状態に収束する傾向も見られた。また、空調機の停止等による温湿度の急激な短期的変動によって内部含水率が影響を受けていることが判る。

図3-4-4に算出された面外曲げヤング係数 $E_{eq}$ の経時変化を示す。また、図3-4-5に初期値に対する経過時間 $t$ における変化率(%) $[(E_{eq}(t)-E_{eq}(0))/E_{eq}(0) \times 100]$ を示す。内部含水率の変動によって $E_{eq}$ も変化するが、荷重試験中の変化は第3層の含水率変動が見られた初期期間においても、初期値に対する変化率は最大0.3%程度であった。長期荷重試験体の測定時には、測定器への設置後に約一ヶ月間の養生期間を設けていることもあり、初期の含水率変動が材料強度性能に影響を与える影響は小さいと考えられた。また、試験装置停止や入れ替え時の温湿度変化によるヤング係数の変動も、初期値に比べて最大で1%弱であった。

図3-4-6に本事業実施期間中の2023年2月から2025年11月までの長期荷重試験室内の温湿度変動を示す。図3-4-2に見られたような比較的大きな温湿度変化は、2023年12月以降は発生しておらず、試験体の含水率変動も小さいと考えられる。これらのことから、本事業全体における温湿度変動が材料強度性能に与える影響は総じて小さく、安定した測定が行われていると考えられた。

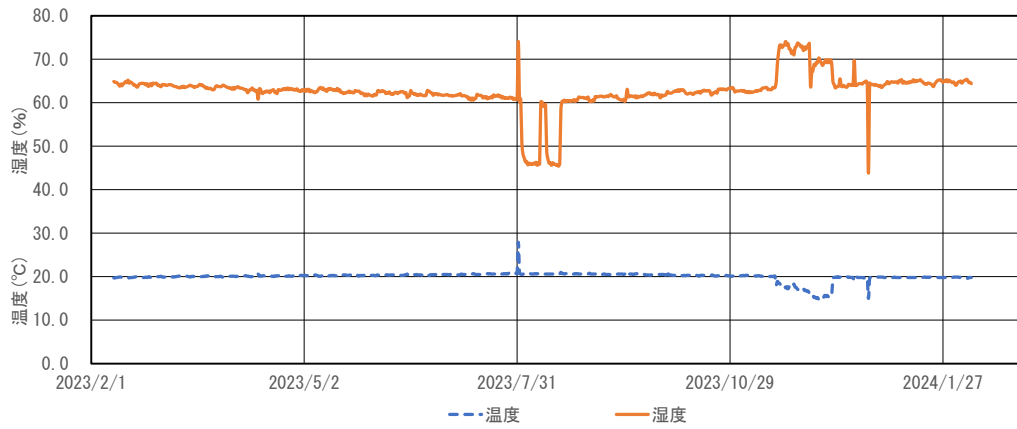


図 3-4-2 長期荷重試験室内の温湿度変化（2023 年 2 月-2024 年 2 月）

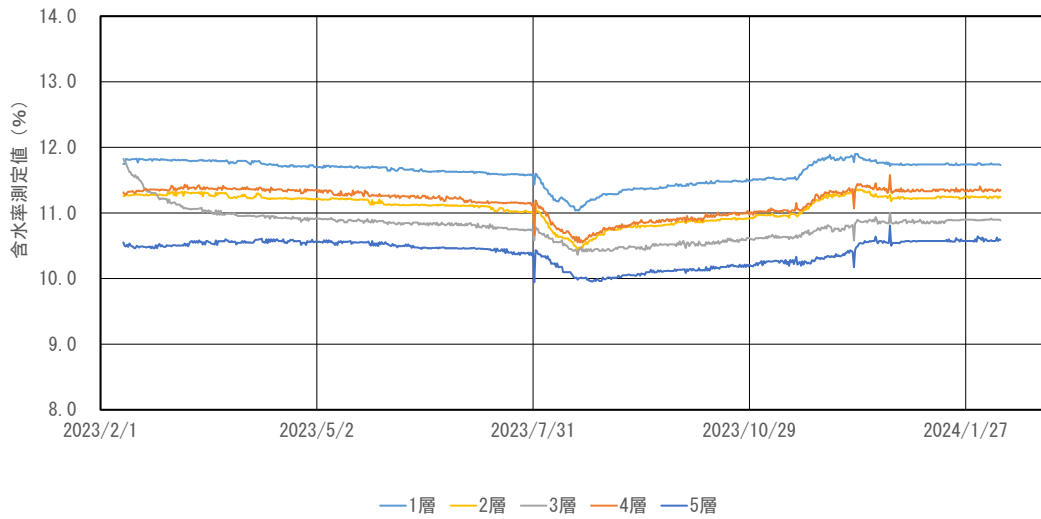


図 3-4-3 内部含水率の経時変化

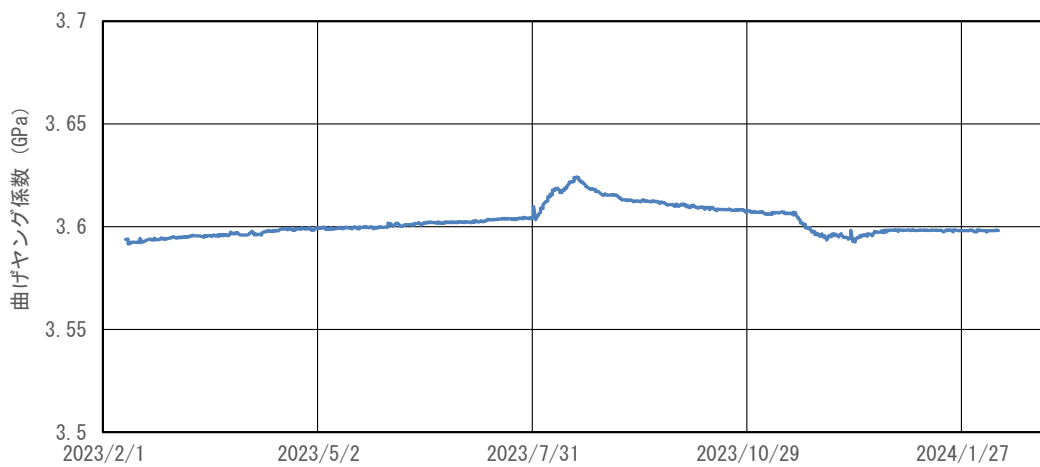


図 3-4-4 面外曲げヤング係数  $E_{eq}$  の経時変化

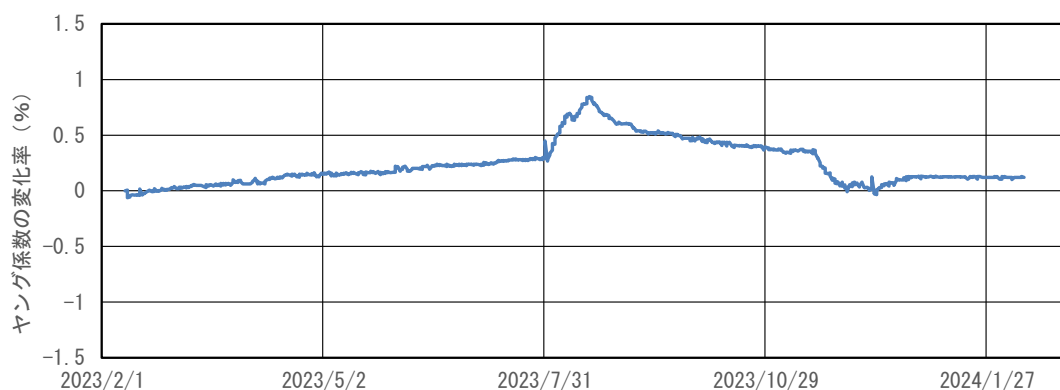


図 3-4-5 面外曲げヤング係数  $E_{eq}$  の変化率

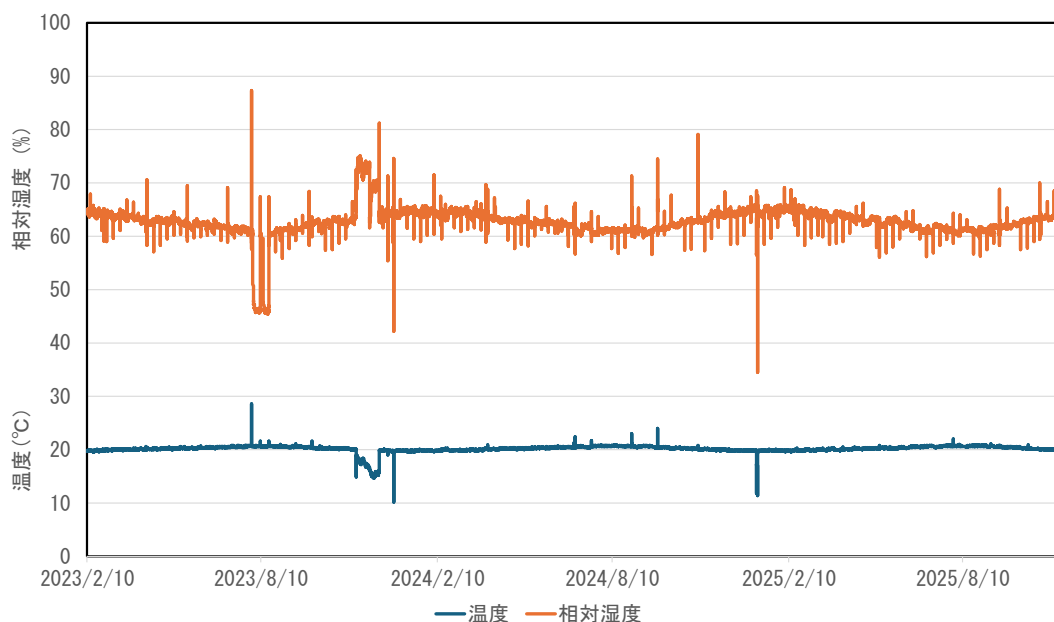


図 3-4-6 長期荷重試験室内の温湿度変化 (2023 年 2 月-2025 年 11 月)

【参考文献】

- 1) 齋藤周逸、信田 聡：日本の気候値平衡含水率. 木材学会誌 62(5)、182-189 (2016)
- 2) 齋藤周逸、信田 聡：日本各地における木材の気候値平衡含水率. 森林総合研究所研究報告 16(3)、163-211 (2017)
- 3) 寺澤 眞、鷺見博史：わが国の木製品の適正含水率について. 木材工業 25(7)、97-303 (1971)

#### 4 決定した測定方法における CLT の長期挙動データの収集と解析

##### 4.1 CLT 原板の製造条件と試験体仕様

長期挙動データ収集に使用した 9 層 9 プライ CLT 試験体の製造条件と仕様ならびに試験体採材位置については、R4 年度報告書にて検討経緯も併せて詳細に掲載したが、本報告書においても改めて概要を下記にまとめる。表 4-1-1 に CLT 原板の製造条件を、表 4-1-2 に初期ならびに長期試験の試験方法及び試験体サイズを示す。また、図 4-1-1 に 9 層 9 プライ CLT 原板における各試験の試験体の採材位置を示す。なお、予備試験用試験体としていた 4 体のうち 2 体は、曲げクリープ破壊試験の追試験に供した（詳細は 4.3.1）。

表 4-1-1 CLT 原板の製造条件

構成	9 層 9 プライ
樹種	スギ
等級	Mx60B
接着剤	水性高分子－ イソシアネート系樹脂
ラミナ厚さ(mm)	30
ラミナ幅(mm)	122
フィンガー ジョイント	水平
試験体厚さ(mm)	270

表 4-1-2 静的曲げ試験及び曲げクリープ破壊試験の  
試験方法及び試験体サイズ

共通条件	加力方法	3 等分点 4 点加力
	試験体長さ(mm)	5,990(約 22.2t*)
	試験体幅(mm)	300
	支点間距離(mm)	5,670(21t)
	荷重点間距離(mm)	1,890(7t)
初期 (静的曲げ試験)	試験体数	16
	平均最大荷重(kN)	62.21
長期 (曲げクリープ 破壊試験)	応力比	66～94% (2%括約) 計 15 水準
	試験体数	2 体/1 水準

\*t：試験体厚さ

原板No.1		寸法：270×2,806×12,030(mm)	
		300	600
300	初期01	含水率1	
600	66-1	初期02	
900	72-1	94-2	
1200	初期03	88-2	
1500	78-1	初期04	
1800	84-1	82-2	
2100	予備1→90-3	76-2	
原板No.2		寸法：270×2,806×12,030(mm)	
		300	600
300	90-1	70-2	
600	初期05	92-2	
900	68-1	初期06	
1200	74-1	86-2	
1500	初期07	80-2	
1800	80-1	初期08	
2100	86-1	予備2→94-3	
原板No.3		寸法：270×2,806×12,030(mm)	
		300	600
300	予備3	74-2	
600	92-1	68-2	
900	初期09	90-2	
1200	70-1	初期10	
1500	76-1	84-2	
1800	初期11	78-2	
2100	82-1	初期12	
原板No.4		寸法：270×2,074×12,030(mm)	
		300	600
300	初期13	72-2	
600		含水率2	
900	88-1	66-2	
1200	初期15	予備4	
1500	94-1	初期16	

図 4-1-1 9 層 9 プライ CLT 原板における試験体の採材位置

注) 各試験における試験体サイズと数量

試験項目	試験体サイズ(mm)	試験体数
初期試験（静的曲げ試験）	5,990×300×270	16
長期挙動（曲げクリープ破壊試験）	5,990×300×270	30
含水率挙動の評価	2,995×300×270	2
	300×300×270	16
予備	5,990×300×270	4

## 4.2 CLTの短期曲げ試験 (R4 報告書再掲修正版)

R4 報告書に記載した CLT の見かけの曲げヤング係数、真の曲げヤング係数、比例限度応力、曲げ強度の数値に誤りがあったため、内容を修正して再掲する。

### (1) 供試体と試験方法

9層9プライの Mx60B 16体を供試体とした。試験体寸法は長さが5990mm、幅が300mm、厚さ(材せい)が270mmである。短期曲げ試験に先立ち、密度、縦振動法のヤング係数、面外および面内における曲げたわみ振動法、TGH法のヤング係数、TGH法のせん断弾性係数を測定した。

直交集成板の JAS の曲げ試験に従い、スパンを材せい  $h$  の 21 倍とした 3 等分点 4 点曲げ方式により短期曲げ試験を行った。試験の模式図を図 4-2-1 に示すとともに試験の様子を写真 4-2-1~2 に示す。最大容量が 1000kN の実大木材強度試験機(前川試験機製作所製 SAH-100-SS)により荷重レンジを 100kN として載荷した。クロスヘッド速度は 15mm/min とした。試験体の側面中央部に変位計(東京測器研究所製 SDP-200E)を設置し試験体の全たわみを測定するとともに、試験体の上部材面圧縮面上に変位計(東京測器研究所製 CDP-10)を取り付けた袴型治具(スパン 1000mm)を載せ、荷重点間における曲げたわみを測定した。試験終了後、全たわみから求めた見かけの曲げヤング係数、荷重点間のたわみから求めた真の曲げヤング係数、比例限度応力、曲げ強度を算出した。また、破壊部近傍から長さが約 30mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。

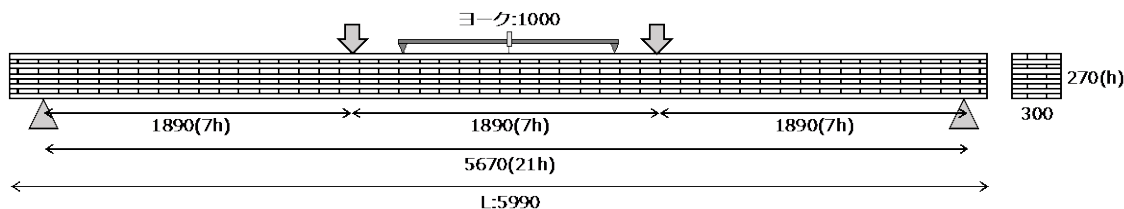


図 4-2-1 CLT の短期曲げ試験の模式図



写真 4-2-1~2 CLT の短期曲げ試験の様子

### (2) 結果

短期曲げ試験の結果を表 4-2-1 に示すとともに、破壊形態の例を写真 4-2-3~6 に示す。いずれの試験体も引張り側の FJ が起点となり破壊した。

表 4-2-1 短期曲げ試験の結果

等級 記号	試験体 番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	縦振動法 ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
Mx60-9-9	1	359	10.2	4.04
Mx60-9-9	2	359	10.2	4.36
Mx60-9-9	3	355	10.8	4.03
Mx60-9-9	4	360	10.1	3.96
Mx60-9-9	5	365	10.4	4.08
Mx60-9-9	6	360	10.4	3.77
Mx60-9-9	7	366	10.7	3.80
Mx60-9-9	8	366	11.1	3.97
Mx60-9-9	9	372	10.6	4.10
Mx60-9-9	10	370	11.4	3.90
Mx60-9-9	11	376	11.1	3.93
Mx60-9-9	12	359	11.3	4.01
Mx60-9-9	13	366	10.9	3.97
Mx60-9-9	14	372	10.3	4.07
Mx60-9-9	15	366	10.8	3.74
Mx60-9-9	16	357	10.9	3.96
平均		364	10.7	3.98
変動係数(%)		1.67	3.71	3.71

等級 記号	試験体 番号	曲げたわみ振動法	TGH法	TGH法	曲げたわみ振動法	TGH法	TGH法
		ヤング係数 (面内) (kN/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (面内) (kN/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 (面内) (kN/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (面外) (kN/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (面外) (kN/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 (面外) (kN/mm <sup>2</sup> )
Mx60-9-9	1	3.94	4.20	0.649	5.00	5.51	0.220
Mx60-9-9	2	4.08	4.45	0.722	5.54	6.17	0.225
Mx60-9-9	3	3.63	3.92	0.726	4.93	5.46	0.230
Mx60-9-9	4	3.68	4.00	0.691	5.01	5.60	0.224
Mx60-9-9	5	3.60	3.87	0.730	5.25	5.77	0.246
Mx60-9-9	6	3.42	3.67	0.701	4.51	5.15	0.225
Mx60-9-9	7	3.48	3.78	0.753	4.58	5.07	0.245
Mx60-9-9	8	3.61	3.91	0.706	4.75	5.22	0.226
Mx60-9-9	9	4.23	4.47	0.659	5.18	5.73	0.226
Mx60-9-9	10	3.64	3.94	0.812	4.78	5.24	0.254
Mx60-9-9	11	3.85	4.01	0.706	4.70	5.16	0.241
Mx60-9-9	12	3.55	3.81	0.709	4.67	5.09	0.237
Mx60-9-9	13	3.74	3.96	0.694	4.74	5.24	0.230
Mx60-9-9	14	4.09	4.29	0.701	5.00	5.56	0.232
Mx60-9-9	15	3.22	3.54	0.848	4.58	5.11	0.231
Mx60-9-9	16	3.65	4.02	0.711	5.31	5.93	0.226
平均		3.71	3.99	0.720	4.91	5.44	0.232
変動係数(%)		7.20	6.45	6.97	6.03	6.13	4.12

等級 記号	試験体 番号	見かけの	真の	比例限度	曲げ強度
		曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	応力 (N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )
Mx60-9-9	1	5.07	5.93	10.9	16.2
Mx60-9-9	2	5.19	5.60	15.5	15.5
Mx60-9-9	3	4.92	5.45	10.5	15.3
Mx60-9-9	4	4.74	5.24	15.8	15.8
Mx60-9-9	5	5.38	6.05	11.4	17.5
Mx60-9-9	6	4.50	4.97	9.31	14.5
Mx60-9-9	7	4.53	4.73	12.0	14.9
Mx60-9-9	8	4.70	5.14	11.9	15.5
Mx60-9-9	9	4.89	5.56	8.44	14.9
Mx60-9-9	10	4.59	4.97	15.7	17.3
Mx60-9-9	11	4.55	4.78	10.7	16.4
Mx60-9-9	12	4.92	5.81	10.0	18.3
Mx60-9-9	13	4.59	5.07	14.6	14.6
Mx60-9-9	14	4.54	4.92	16.1	16.8
Mx60-9-9	15	4.57	5.10	9.07	16.0
Mx60-9-9	16	4.88	5.22	15.0	16.0
平均		4.79	5.28	12.3	16.0
変動係数(%)		5.52	7.70	21.9	6.81



写真 4-2-3~4 破壊形態の例 (Mx60-9-9\_2)



写真 4-2-5~6 破壊形態の例 (Mx60-9-9\_7)

見かけの曲げヤング係数と曲げ強度の平均値と 5% 下限値を JAS 基準値と比較したものを表 4-2-2 に示す。見かけの曲げヤング係数について、いずれの特性値も JAS 基準値を上回っていた。

表 4-2-2 見かけの曲げヤング係数と曲げ強度の JAS 基準値との比較

	見かけの曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度(N/mm <sup>2</sup> )
平均値	4.79 JAS 基準値 : 3.2	16.0
5% 下限値 (正規分布)	4.26 JAS 基準値 : 2.6	13.8 JAS 基準値 : 7.9

曲げ強度の累積度数分布を図 4-2-2 に示す。また、平成 13 年 6 月 12 日国土交通省告示第 1024 号第 3 九号ハに記載された方法と同じ方法（等価断面法）により、曲げヤング係数と曲げ強度の平均値を推定した。推定値の算出に用いた入力値と推定結果をそれ

それぞれ表 4-2-3～4 に示す。図 4-2-2 には推定値と実測値も合わせて示してある。推定の結果、曲げヤング係数は実測値の方が推定値より 1 割程度大きいのが概ね推定できていた。一方、曲げ強度は実測値の方が推定値より 34%程度大きい結果となった。この原因は現在のところ明らかでない。

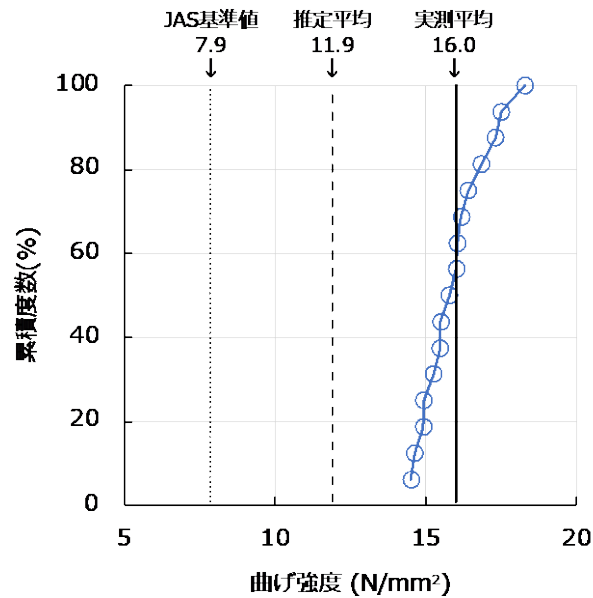


図 4-2-2 曲げ強度の累積度数分布

表 4-2-3 等価断面法での実測による入力値（平均値）

外層平行層	内層平行層	直交層	外層
曲げヤング係数 M60B (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング係数 M30B (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 M60B (N/mm <sup>2</sup> )
7.42	5.23	0	29.2

表 4-2-4 等価断面法による CLT の推定値と実測値との比較（平均値）

実測	推定	実測/推定	実測	推定	実測/推定
曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング係数	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度
4.79	4.41	1.09	16.0	11.9	1.34

## 4.3 曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析

### 4.3.1 試験方法

スギ9層9プライ CLT の長期荷重試験として曲げクリープ破壊試験を実施した。試験体サイズ及び試験条件の詳細は、本報告書付録に掲載の通りである。また、4.2章で述べたように、短期曲げ試験による最大荷重平均値 62.21kN、標準偏差 4.23kN、変動係数 6.80%が得られた。長期荷重試験の応力比は 66~94%の範囲で、2%括約で計 15 水準設定した。この最大荷重平均値と応力比の積により、各試験体の適用する試験荷重を算出した。試験体数は 1 水準あたり 2 体とした。試験は応力比の高い方から、各応力比 1 体ずつ順に行うこととした。試験開始前に試験体の寸法、重量及び含水率を測定した。

本事業では、令和 4~6 年度に実施した応力比 86~94%の各 2 体、76~84%の各 2 体及び 66~74%の各 1 体に加えて、66~74%の各 1 体（繰返し 2 体目）及び令和 6 年度の試験において加力途中で破壊した 90 及び 94%の追加試験各 1 体について、長期荷重試験（曲げクリープ破壊試験）を実施した。図 4-3-1 に曲げクリープ破壊試験の様子を示す。試験機及び試験体の置かれた試験環境の温湿度条件は 20℃、65%RH である。試験室に搬入前の試験体の保管環境の温湿度条件は成り行きであったため、試験体の試験機設置後から曲げクリープ破壊試験の実施まで約 1 か月間を養生期間として設定し、その間、試験体は試験機に静置された。

表 4-3-1 に試験体の諸元と試験条件を過年度実施分も併せて示す。試験体の密度の平均値は 367kg/m<sup>3</sup>、変動係数は 1.81%であった（加力途中で破壊した試験体も含む）。当該試験装置は、重錘の重量をてこにより 50 倍に増幅して加力する仕組みである。重錘の最小重量は 1.0kg であることから、算出された試験荷重に最も近くなる重錘の重量を選択した。選択した重錘重量から算出した実際の試験荷重と短期曲げ破壊試験から得られた最大荷重平均値との比を実応力比とした。



図 4-3-1 曲げクリープ破壊試験の様子

表 4-3-1 長期挙動試験の試験体諸元と試験条件

試験順	応力比 (%)	試験体 No.	繰返し	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	試験荷重 (kN)*	実応力比 (%)	実施年度
1	94	MB4-DOL94-1	1	366.7	12.0	58.48	93.7	R4
	92	MB3-DOL92-1	1	373.5	12.5	57.23	92.2	
	90	MB2-DOL90-1	1	366.0	11.5	55.99	89.8	
	88	MB4-DOL88-1	1	371.7	11.0	54.75	88.2	
	86	MB2-DOL86-1	1	368.5	11.0	53.50	85.9	
2	84	MB1-DOL84-1	1	356.2	11.3	52.26	84.3	R5
	82	MB3-DOL82-1	1	369.6	9.8	51.01	81.9	
	80	MB2-DOL80-1	1	370.5	10.8	49.77	80.3	
	78	MB1-DOL78-1	1	353.1	10.3	48.52	78.0	
	76	MB3-DOL76-1	1	371.5	9.5	47.28	75.6	
3	84	MB3-DOL84-2	2	367.5	7.8	52.26	84.3	R6
	82	MB1-DOL82-2	2	364.2	7.5	51.01	81.9	
	80	MB2-DOL80-2	2	360.5	7.5	49.77	80.3	
	78	MB3-DOL78-2	2	372.0	9.3	48.52	78.0	
	76	MB1-DOL76-2	2	359.1	7.8	47.28	75.6	
4	74	MB2-DOL74-1	1	372.5	11.0	46.04	74.0	R6
	72	MB1-DOL72-1	1	360.4	10.0	44.79	71.7	
	70	MB3-DOL70-1	1	382.5	9.0	43.55	70.1	
	68	MB2-DOL68-1	1	365.4	12.0	42.30	67.7	
	66	MB1-DOL66-1	1	357.1	12.5	41.06	66.2	
5	94	MB1-DOL94-2	2	362.4	10.8	58.48	93.7	R7
	92	MB2-DOL92-2	2	368.6	9.0	57.23	92.2	
	90	MB3-DOL90-2	2	374.7	10.3	55.99	89.8	
	88	MB1-DOL88-2	2	358.9	9.8	54.75	88.2	
	86	MB2-DOL86-2	2	365.2	12.3	53.50	85.9	
6	74	MB3-DOL74-2	2	365.8	10.3	46.04	74.0	R7
	72	MB4-DOL72-2	2	371.3	10.5	44.79	71.7	
	70	MB2-DOL70-2	2	364.0	10.0	43.55	70.1	
	68	MB3-DOL68-2	2	376.2	9.8	42.30	67.7	
	66	MB4-DOL66-2	2	374.4	10.0	41.06	66.2	
7	94	MB2-DOL94-3	3	360.5	11.3	58.48	93.7	R7
	90	MB1-DOL90-3	3	357.7	10.3	55.99	89.8	

#### 4.3.2 試験結果及び荷重継続時間にかかる調整係数の導出

図 4-3-2～8 に、本事業で実施した曲げクリープ破壊試験における最終破断までの変形量の経時変化を応力比ごとに示す。図の掲載順は表 4-3-1 と合わせた。なお、応力比 68%の試験体については、試験実施の都合から、237 日を経過した段階で破壊に至る前に試験を終了した。また応力比 90%及び 94%の試験体については、令和 6 年度の試験に

において加力途中に破壊した応力比水準の追試験であり、予備試験体を割り当てた。

加力開始後、設定荷重に達した時点の変形量は、66～74%のシリーズではおよそ 60～70mm、90 及び 94%のシリーズでは 80mm 前後となり、応力比が高くなるほど変形量は大きくなる傾向がみられた。設定荷重に達した後、変形量は時間の経過に伴って微増した。いずれの試験体も引張側の最外層のラミナのフィンガージョイントが外れるもしくは破断することが最初の破断検出となった。その後、所定の荷重まで再度加力しても荷重を維持することができた試験体については、試験を継続した。図中で変形が急激に進行している箇所は、再加力の影響に起因するものである。特に応力比 74%、72%については、2 回目の再加力時に変形量が増大した。破断箇所やフィンガージョイント部の隙間の進展等は目視では明確には分からず、再加力によって生じる変形の大小の原因をたどるのは困難であった。最終的な破断時の変形量と応力比の関係については、再加力時の変形増大に影響を受けるため、一意の傾向はみられなかった。

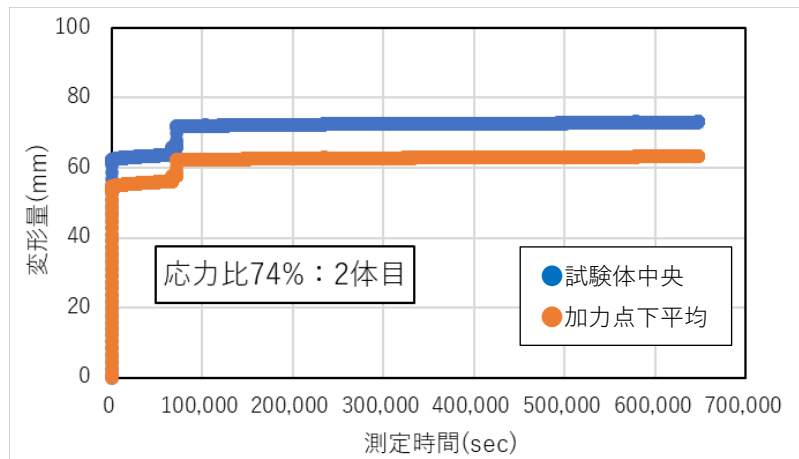


図 4-3-2 スギ 9 層 9 プライ CLT の応力比 74%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (2 体目)

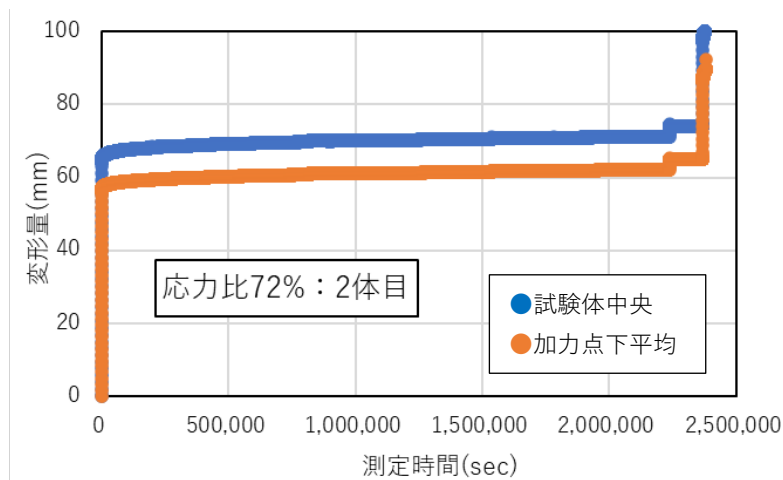


図 4-3-3 スギ 9 層 9 プライ CLT の応力比 72%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (2 体目)

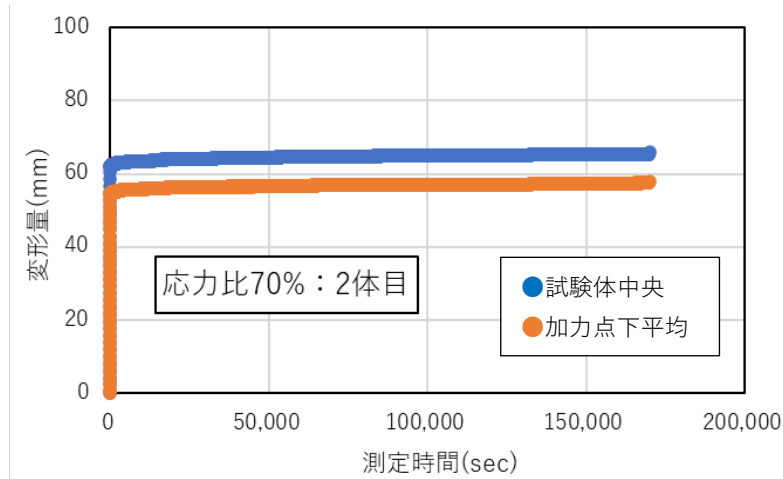


図 4-3-4 スギ 9 層 9 プライ CLT の応力比 70% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (2 体目)

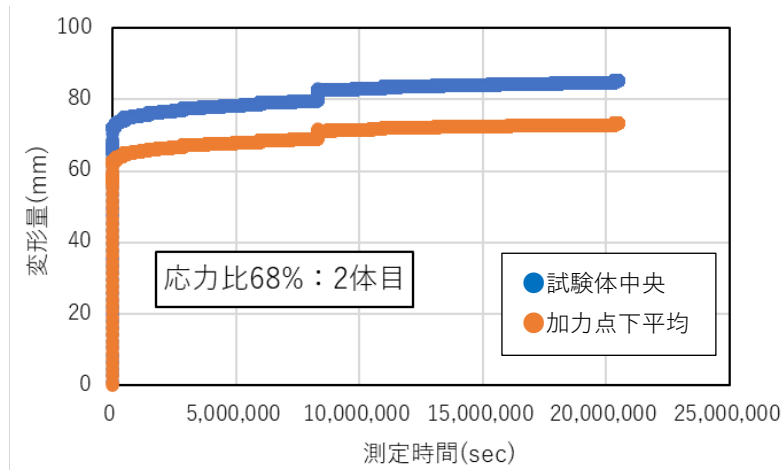


図 4-3-5 スギ 9 層 9 プライ CLT の応力比 68% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (2 体目)

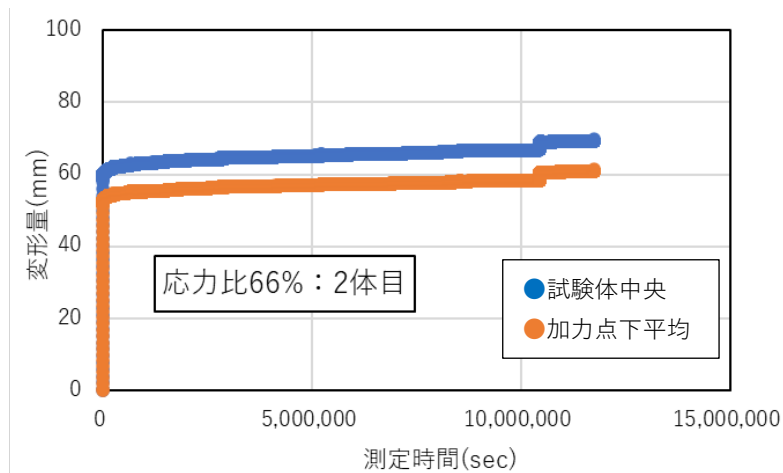


図 4-3-6 スギ 9 層 9 プライ CLT の応力比 66% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (2 体目)

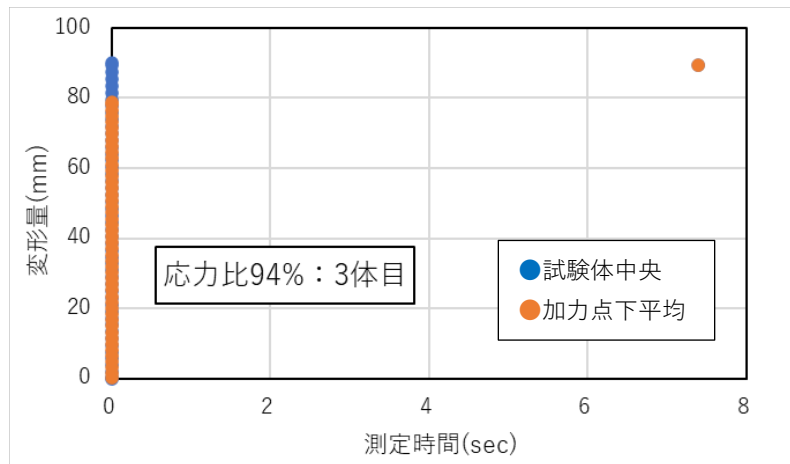


図 4-3-7 スギ 9 層 9 プライ CLT の応力比 94% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (3 体目)

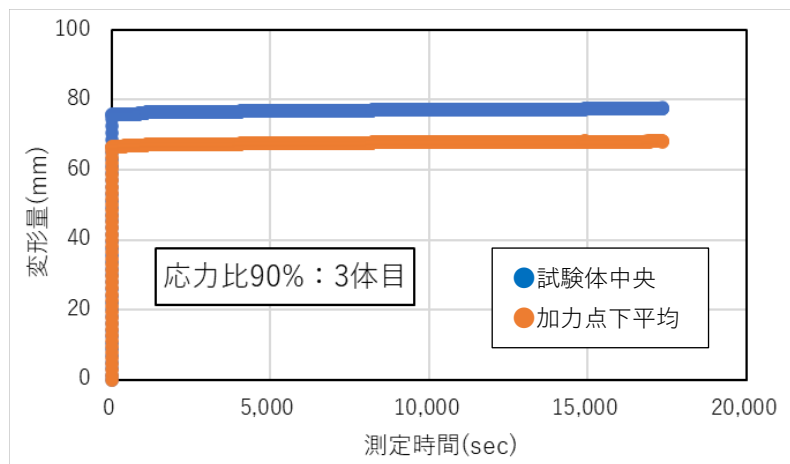


図 4-3-8 スギ 9 層 9 プライ CLT の応力比 90% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (3 体目)

次に破壊時間と応力比の関係について、令和 4~6 年度の結果と合わせて検討する。得られたデータの取り扱いに関して、平成 12 年建設省告示第 1446 号(建築物の基礎、主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件)によると、木質材料が長期荷重下において、破壊荷重が低下する現象を荷重継続時間に掛かる調整係数により定量的に評価することとされている。

まず、前述の実験方法で得られた破壊時間に対して応力比をプロットし、対数回帰する。すなわち、

$$SL = c - d \times \log_{10} t$$

を求め、

$$K_2 = c - d \times \log_{10} 26,280,000 = c - 7.42d$$

ここに、 $SL$  : 応力比 (%)

$c$ : 回帰直線の切片

$d$ : 回帰係数

$t$ : 時間(分)

$K_2$ : 荷重継続時間に掛かる調整係数

$t=26,280,000$ (分)とは、50年間に相当するため、上式で求める  $K_2$ とは、50年後に破壊する応力比を意味する。

さらにこれまでに得られたデータのうち、前述のように加力途中で破壊した応力比90%及び94%の2体目の取り扱いによって評価結果が変わりうるため、いずれも対象試験体数30体とする下記の3通りの取り扱い方法にて、荷重継続時間にかかる調整係数の導出を試みた。

- a) 加力途中で破壊した試験体の応力比を破壊時の応力比として全試験体の測定結果を回帰する(追試験の結果は含まない)。
- b) 加力途中で破壊した試験体の応力比を設定した応力比として全試験体の測定結果を回帰する(追試験の結果は含まない)。
- a) 同じ応力比で追試験を行った試験体の測定結果を含めて全試験体の測定結果を回帰する(加力途中で破壊した試験体は含まない)。

図4-3-9~11に上式で求めた破壊時間と応力比の回帰直線をa)~c)それぞれについて示す。

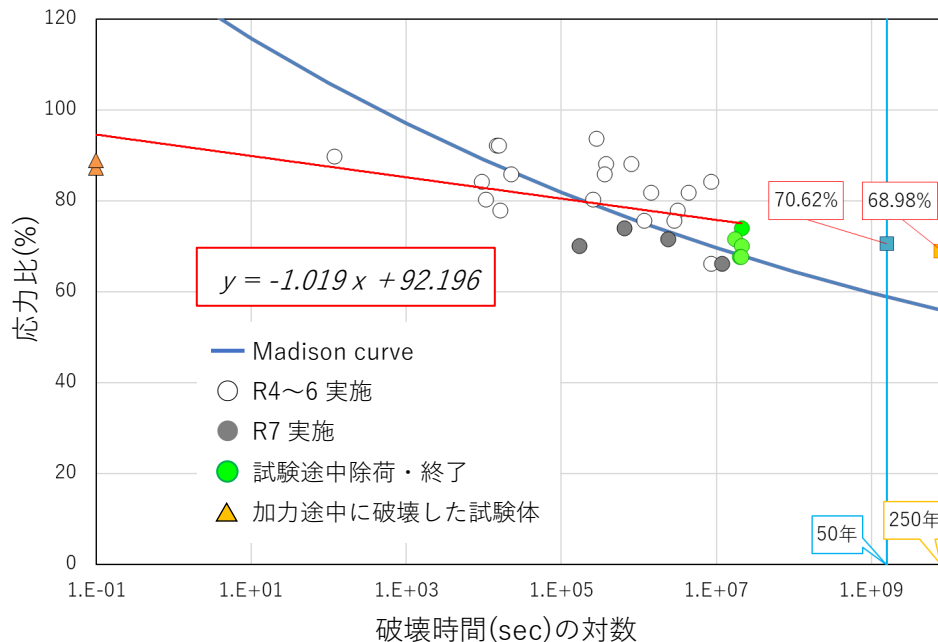


図4-3-9 スギ9層9プライ CLT の曲げクリープ破壊試験による破壊時間と応力比の関係

a) 加力途中で破壊した試験体の応力比を破壊時の応力比として全試験体の測定結果を回帰する場合(追試験の結果は含まない)。

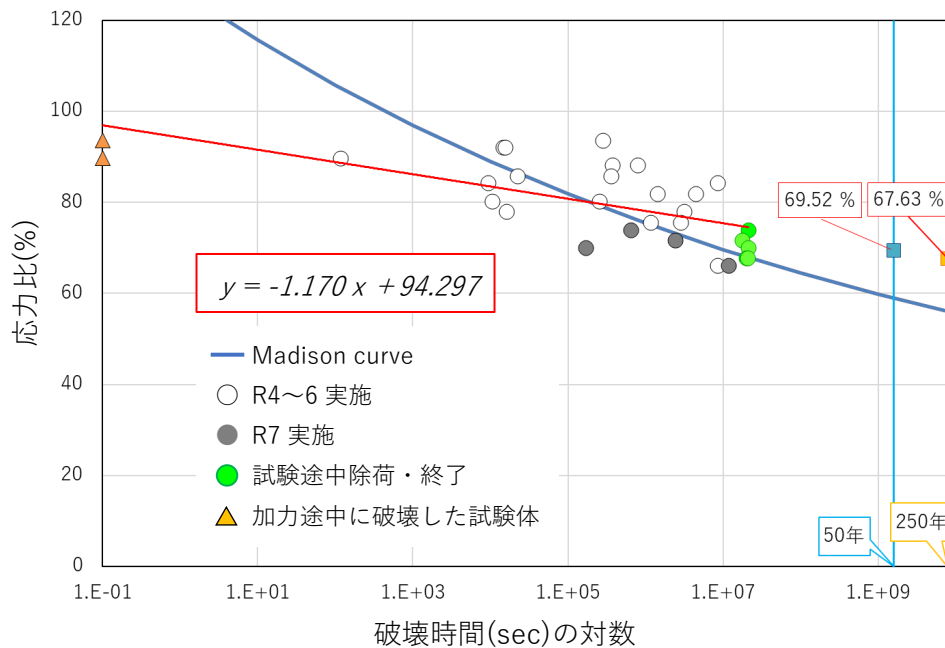


図 4-3-10 スギ9層9プライ CLT の曲げクリープ破壊試験による破壊時間と応力比の関係

b) 加力途中に破壊した試験体の応力比を設定した応力比として全試験体の測定結果を回帰する場合（追試験の結果は含まない）。

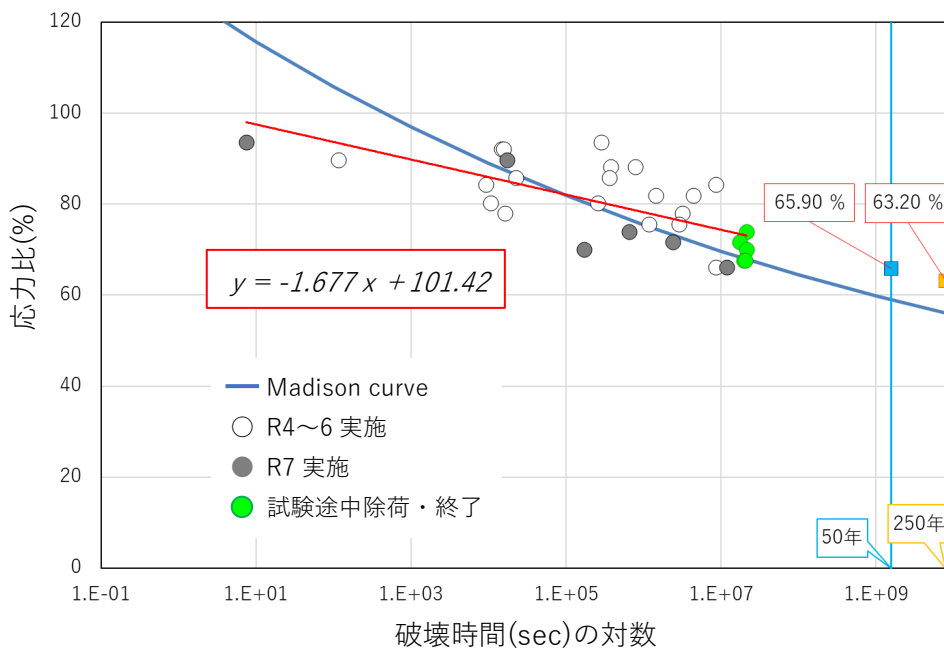


図 4-3-11 スギ9層9プライ CLT の曲げクリープ破壊試験による破壊時間と応力比の関係

c) 同じ応力比で追試験を行った試験体の測定結果を含めて全試験体の測定結果を回帰する場合（加力途中に破壊した試験体は含まない）。

これらの結果から、スギ9層9プライ CLT の荷重継続時間 50 年に相当する応力比は上記3つの算出方法で以下の通りとなった。

a)の場合：70.62%、b)の場合：69.52%、c)の場合：65.90%

算出された荷重継続時間に掛かる調整係数は加力早期に破壊した試験体は含まず、追試験にて設定応力比で破壊時間を記録した試験体を含めた計30体の試験結果c)による数値がもっとも低く安全側の数値となったが、7層7プライ CLT と同様に、製材の調整係数とされる55%と同等以上の数値となった。

#### 4.4 試験体の破断状況

応力比74%の破断状況を以下に示す。その他の応力比の破断状況は付録に掲載した。



写真 4-4-1 D0L-74-2 破壊全体状況



写真 4-4-2 D0L-74-2 破断状況①

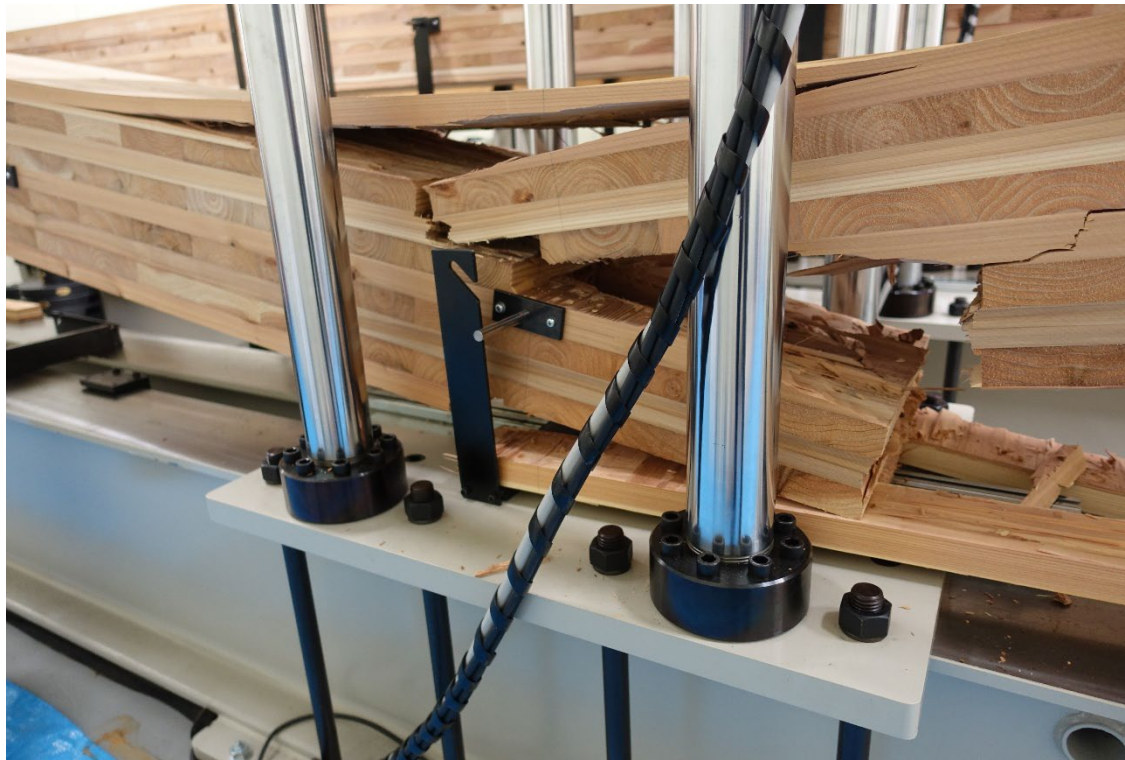


写真 4-4-3 D0L-74-2 破断状況②



写真 4-4-4 D0L-74-2 引張側フィンガージョイント部分の破断

#### 4.5 短期曲げ試験と長期荷重試験結果の比較による破断時の変位に関する検討

16体の短期曲げ試験により最大荷重が得られ、これらの荷重変形関係から中央部変位による見かけの傾きを算出した。表4-5-1に短期曲げ試験結果を、図4-5-1に16体の荷重変形関係と中央部変位による見かけの傾きの平均値（図中の赤太線）を示す。

表 4-5-1 短期曲げ試験結果（16体）

-	最大荷重	見かけの傾き（中央部変位）
平均値	62.21 kN	0.739 kN/mm
標準偏差	4.23 kN	0.039 kN/mm
変動係数	6.80 %	5.40 %

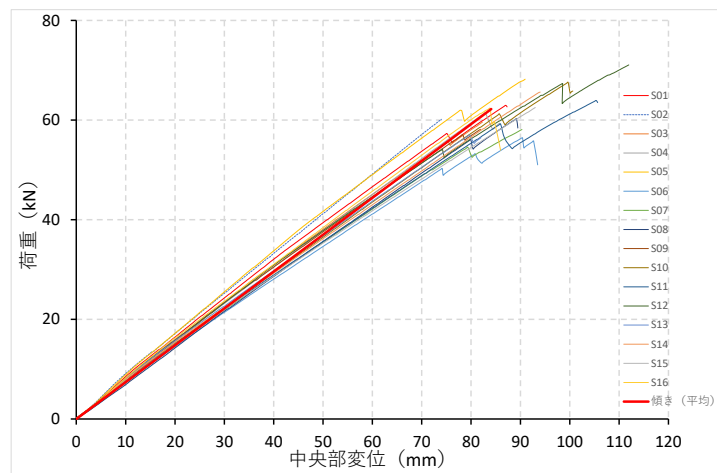


図 4-5-1 短期曲げ試験の荷重変形関係と中央部変位による見かけの傾き（平均値）

長期荷重の応力比は66～94%の範囲で2%括約し計15水準設け、短期曲げ試験による最大荷重の平均値と応力比の積により、各試験体に適用する試験荷重を定めている。短期荷重と比較する長期荷重の応力比は66～94%までの試験体とした。

表 4-5-2 長期荷重試験（応力比66～94%）の試験荷重

応力比 (%)	試験体No.	試験荷重 (kN)	実応力比 (%)
94	MB4-DOL94-1	58.48	93.73
92	MB3-DOL92-1	57.23	92.16
90	MB2-DOL90-1	55.99	89.79
88	MB4-DOL88-1	54.75	88.22
86	MB2-DOL86-1	53.50	85.85
84	MB1-DOL84-1	52.26	84.28
82	MB3-DOL82-1	51.01	81.92
80	MB2-DOL80-1	49.77	80.34

応力比 (%)	試験体No.	試験荷重 (kN)	実応力比 (%)
78	MB1-DOL78-1	48.52	77.98
76	MB3-DOL76-1	47.28	75.61
74	MB2-DOL74-1	46.04	74.04
72	MB1-DOL72-1	44.79	71.68
70	MB3-DOL70-1	43.55	70.10
68	MB2-DOL68-1	42.30	67.74
66	MB1-DOL66-1	41.06	66.16

図 4-5-2 に応力比 80~94%、図 4-5-3 に応力比 66~78%の長期荷重試験の荷重-変形関係を示す。所定の試験荷重に向け荷重を増加させていくと、短期曲げ試験と同様に荷重-変位関係は直線性を保つ。所定の試験荷重に到達すると時間経過に伴い、部分的な破壊を繰り返しながら変位が増加し、やがて破断に至る。図中赤太線は短期曲げ試験の中央部変位による見かけの傾き（平均値）を示している。表 4-5-3 に長期荷重試験の破壊時間と破断時の中央部変位を示す。

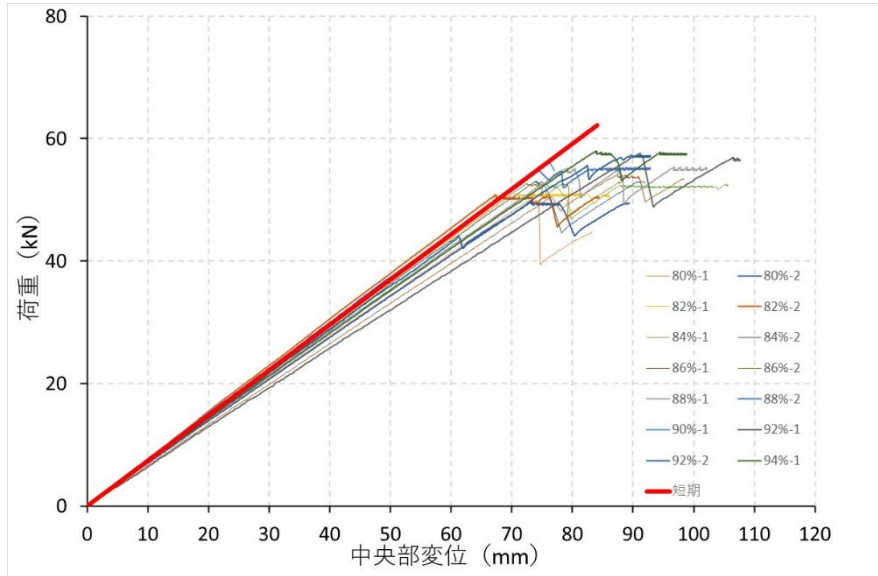


図 4-5-2 長期荷重試験の荷重変形関係（応力比 80~94%）

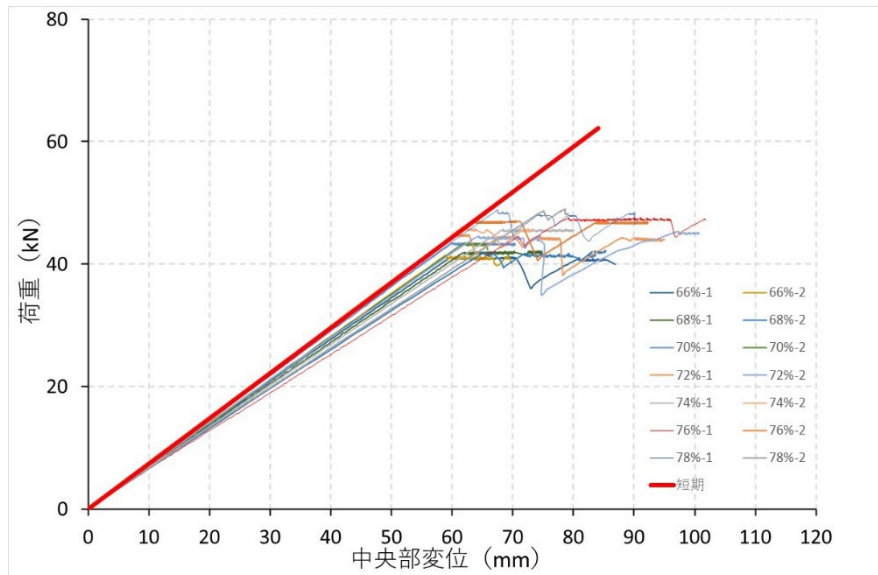


図 4-5-3 長期荷重試験の荷重変形関係（応力比 66~78%）

表 4-5-3 長期荷重試験の破壊時間と破断時の中央部変位

試験体No.	応力比 (%)	破壊時間 (YDHMS)	破壊時間 (sec)	試験荷重 (kN)	破断時中央部変位 (mm)
MB4-DOL94-1	94	3日6時間7分30秒	281,250	58.48	98.82
MB3-DOL92-1	92	4時間3分15秒	14,596	57.23	107.60
MB2-DOL92-2		4時間17分35秒	15,455		92.84
MB2-DOL90-1	90	1分56秒	116	55.99	77.00
MB4-DOL88-1	88	9日1時間55分29秒	784,530	54.75	102.14
MB1-DOL88-2		4日7時間35分5秒	372,906		118.46
MB2-DOL86-1	86	6時間14分3秒	22,444	53.50	98.38
MB2-DOL86-2		4日3時間57分53秒	359,874		89.50
MB1-DOL84-1	84	98日15時間34分	8,523,240	52.26	108.74
MB3-DOL84-2		2時間34分13秒	9,254		91.94
MB3-DOL82-1	82	50日17時間57分40秒	4,384,660	51.01	86.30
MB1-DOL82-2		16日14時間24分48秒	1,434,289		84.40
MB2-DOL80-1	80	2時間56分2秒	10,563	49.77	83.28
MB2-DOL80-2		2日22時間36分2秒	254,162		89.36
MB1-DOL78-1	78	36日6時間25分47秒	3,133,547	48.52	90.12
MB3-DOL78-2		4時間30分41秒	16,242		79.16
MB3-DOL76-1	76	32日23時間52分1秒	2,850,722	47.28	101.68
MB3-DOL76-2		13日11時間12分16秒	1,163,536		92.28
MB2-DOL74-1	74	243日16時間2分30秒	21052950.5	46.04	80.02
MB3-DOL74-2		7日11時間56分3秒	647763.2		73.12
MB1-DOL72-1	72	201日2時間52分13秒	17376733	44.79	94.90
MB4-DOL72-2		27日13時間59分57秒	2383197.6		93.44
MB3-DOL70-1	70	243日16時間6分22秒	21053182.7	43.55	70.38
MB2-DOL70-2		1日23時間10分28秒	169828		65.88
MB2-DOL68-1	68	228日21時間45分30秒	19777530.5	42.30	74.78
MB3-DOL68-2		237日8時間15分29秒	20506529.4		85.18
MB1-DOL66-1	66	98日1時間54分57秒	8474097.8	41.06	86.84
MB4-DOL66-2		135日23時間10分2秒	11747402.2		69.84

ここで長期荷重試験の荷重-変位関係を図 4-5-4 に示すバイリニアモデルで表し、長期荷重試験における破断時の中央部変位を算定する検討式を仮定した。

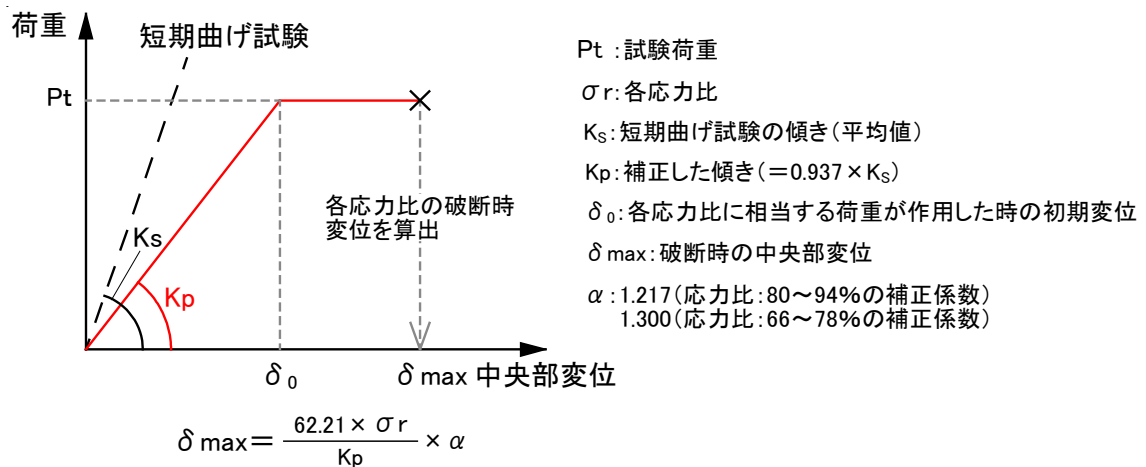


図 4-5-4 各応力比の破断時中央部変位算定モデルと検討式

破断時中央部変位の実験値と検討式による算定値を比較したものを表 4-5-4 に示す。2025 年度に追加した実験値と算定値の関係をみると(図 4-5-5)、破断時の中央部変位を概ね捉えていることがわかる。検討式では応力比から破断時の中央部変位を簡易的に求めることができる特徴がある。今後、現在測定中の実験値に対して検討式の有効性について、さらに検討を重ねていく必要がある。

表 4-5-4 実験値と算定値

試験体No.	破壊時間 (sec)	実験値	算定値
		破断時 中央部変位 (mm)	検討式 破断時中央部変位 (mm)
MB4-DOL94-1	281,250	98.82	102.66 (3.73)
MB3-DOL92-1	14,596	107.60	100.47 (7.09)
MB2-DOL92-2	15,455	92.84	100.47 (7.59)
MB2-DOL90-1	116	77.00	98.29 (21.65)
MB4-DOL88-1	784,530	102.14	96.10 (6.27)
MB1-DOL88-2	372,906	118.46	96.10 (23.26)
MB2-DOL86-1	22,444	98.38	93.92 (4.74)
MB2-DOL86-2	359,874	89.50	93.92 (4.7)
MB1-DOL84-1	8,523,240	108.74	91.74 (18.53)
MB3-DOL84-2	9,254	91.94	91.74 (0.22)
MB3-DOL82-1	4,384,660	86.30	89.55 (3.63)
MB1-DOL82-2	1,434,289	84.40	89.55 (5.75)
MB2-DOL80-1	10,563	83.28	87.37 (4.67)
MB2-DOL80-2	254,162	89.36	87.37 (2.27)
MB1-DOL78-1	3,133,547	90.12	90.99 (0.95)
MB3-DOL78-2	16,242	79.16	90.99 (13)
MB3-DOL76-1	2,850,722	101.68	88.66 (14.68)
MB3-DOL76-2	1,163,536	92.28	88.66 (4.08)
MB2-DOL74-1	21052950.5	80.02	86.33 (7.3)
MB3-DOL74-2	647782.3	73.12	86.33 (15.29)
MB1-DOL72-1	17376733	94.90	83.99 (12.98)
MB4-DOL72-2	2383197.6	93.44	83.99 (11.24)
MB3-DOL70-1	21053182.7	70.38	81.66 (13.81)
MB2-DOL70-2	169828	65.88	81.66 (19.32)
MB2-DOL68-1	19777530.5	74.78	79.33 (5.73)
MB3-DOL68-2	20506529.4	85.18	79.33 (7.37)
MB1-DOL66-1	8474097.8	86.84	76.99 (12.78)
MB4-DOL66-2	11747402.2	69.84	76.99 (9.29)

( ) 内は実験値と算定値の誤差(%)を表している。

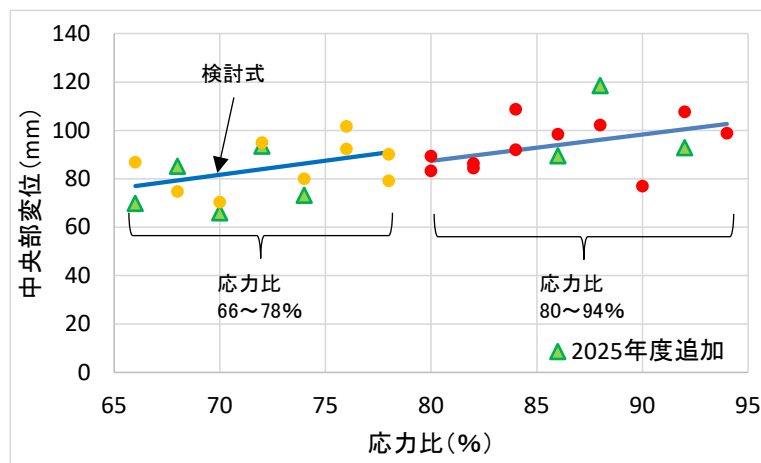


図 4-5-5 実験値と算定値の関係

## 5. 進行状況の管理

### 5.1 第1回検討委員会

開催日時：令和7年7月14日（月） 15:00～17:00

開催場所：文京区区民会議室 5階会議室A（文京区春日1-16-21）（対面・web併催）

出席者（敬称略）：

外部有識者委員（対面出席）

委員長 安村 基 （静岡大学名誉教授）

委員 荒木 康弘 （国土技術政策総合研究所）

委員 小関 真琴 （木質建材評価サービス）

外部有識者委員（web出席）

委員 青木 謙治 （東京大学大学院農学生命科学研究科）

委員 河合 直人 （工学院大学名誉教授）

オブザーバー（対面出席）

川原 聡 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

石崎 宜彦 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

高橋 風鈴 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

上田 萌香 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

オブザーバー（Web出席）

久保 寿斗 （国土交通省住宅局参事官（建築企画担当）付）

佐藤 秀憲 （農林水産省新事業・食品産業部食品製造課基準認証室）

事業実施者

（国研）森林研究・整備機構 森林総合研究所

宮本 康太、渋沢 龍也、井道 裕史、河野 幸喜（対面出席）

平松 靖、宮武 敦（web出席）

（一社）日本CLT協会

坂部 芳平、西妻 博康（web出席）

（地独）北海道立総合研究機構 林産試験場

朝倉 靖弘（対面出席）

（株）中央設計

戸田 淳二（web出席）

（公社）日本木材加工技術協会

村田 光司、原田 寿郎（対面出席）

関係者

渡部 博、布施 美月（銘建工業（株））（対面出席）

資料：

資料1 出席者名簿

資料 2-1	事業概要
資料 2-2	事業スケジュール
資料 3-1	曲げ性能試験
資料 3-2	CLT 内部含水率の長期挙動の検討
資料 3-3	長期挙動試験の進捗及び実施計画
資料 3-4	長期挙動試験における破壊状況報告及び破壊時の変位に関する検討

議事：

1. 挨拶

宮本主査ならびに川原室長より挨拶があった。

2. 委員紹介

3. 事業内容について

(1) 事業計画の概要

宮本主査：本事業の目的は、9層9プライ構成のCLT長期挙動データを収集し、中層・大規模建築物の木造化に必須である長期性能の設計に資することでCLTの開発・普及を促進することである。事業内容は、①曲げ性能に係る製造因子の影響等を収集する、②CLTの長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討、③長期挙動データの収集、④長期挙動データの解析、⑤委員会の開催・運営及び成果の取りまとめである。実行体制については、実施主体が森林総合研究所、CLT協会、北海道立総合研究機構林産試験場、中央設計、日本木材加工技術協会で、外部有識者に内容について意見を頂くという体制で実施する。スケジュールは、検討委員会の開催が第1回（本日）、現地検討会（検討中）、第2回（2月）、製造試験と曲げ試験は本検討委員会の意見を反映して実施する。長期試験は継続実施中でその後解析を行う計画であり、含水率試験も同様である。報告書のとりまとめは年明けから実施する。

(2) 曲げ性能試験の実実施計画

井道室長：昨年度は、①外層のラミナの樹種の違い（スギとヒノキ）による強度性能の評価、②内層のラミナ等級の違いによる強度性能の評価を行った。その結果、曲げ強度は、①外層ラミナ（M90B）がヒノキでもスギでも基準強度を超え、ヒノキのほうがどの構成でもスギの場合と比較して高く、ラミナの曲げ試験結果に沿った結果であり、②内層のラミナがスギM60B、スギM30Bでもあまり変わらなかった。今年度は、丸太の大径化に伴いスギラミナのヤング係数が全体的に上がっていることを考慮し、曲げヤング係数の上限のないA種構成ラミナと、上限のあるB種構成ラミナでそれぞれMx60の9層9プライCLT、5層5プライCLTを製造し、CLTの曲げ強度に違いがあるか確認する。

安村委員長：ラミナの性能から製品の性能を推定して比較したとのことだが、製品 1 体ずつについて使っているラミナから算出しているのか、何か統計的なものから算出しているのか。

井道室長：ラミナを 30 体ほど試験し、その平均値を使ったものから、CLT の平均値と下限値を推定している。

小関委員：計算するときには評価断面と平行層理論を使って計算しているということか。実際に基準とするラミナの強度はヤング係数、平均値は実測値か。

井道室長：そのとおり。

荒木委員：B 種の方は、平均、下限、上限があって、正規分布になるのか分からないが、A 種の方は、平均と下限値があって、上限は定めないということで、分布はどんな感じになるのか。

井道室長：分布は、その時にどう取るかということに依る。例えば、M30B の他に M60B を取るとしたら、M30B の上の方は、M60B して使われるので切られることがあるので、その都度、変わると思う。

安村委員長：分布が正規分布にならないと大分違う形が出てくるのでは。

井道室長：正規分布から切ったような感じになるから、違う。

安村委員長：そういう使い方によっても、本当は分布があるが、正規分布でやっていくということ。

小関委員：等級区分機の値をカットしたとしても、実際に曲げ試験をすると、それでカットが出るかという別である。

井道室長：そうである。等級区分機の記載の下限値と実際のヤング係数は多少違う。

渋沢主任研究員：そのラミナの素性が大径化に伴ってだんだん変わってきているということは、例えば、先ほどの下限値を計算するときの低減係数とかも、実は考え直していくのかと思うと、意外と面倒だ。

小関委員：0.75 という数字は、集成材で使っている値か。

井道室長：そうである。ラミナの性能も集成材と同じものだったので、それを全部踏襲している。

小関委員：例えば、0.9 とか 1 点いくつとか、色々係数が出てくる。それがよいかどうか。集成材の引張強度でも、曲げの 0.6 掛けして、積算根拠で 1.1 とか。言い出したらきりが無い。

### (3) 含水率挙動試験の実施計画

朝倉研究主幹：昨年度まで、①CLT の接着層が含水率変動に与える影響、②内部含水率の測定方法の検討、③長期荷重試験における含水率の長期測定、④CLT の動的ヤング率の含水率分布からの推定を実施してきている。①JIS のカップ法で、湿気の通しやすさを試験した結果、透湿抵抗が CLT の接着層のある場合で接着層のない場合の 4 倍弱であった。雰囲気 を 20℃65%RH から 85%RH に変化させた 2 次元シミュレーションの結果では、接着層があると水分の移動が除外され、含水率が低いまま移行した。

②ステンレス製の針を CLT に穴をあけて打ち込み、先にリード線を付けて、電気抵抗式の含水率計で含水率を測定する装置を開発した。測定結果に影響を与える因子の値の補正ができた。③森林総研の CLT クリープ試験棟に静置した CLT の内部含水率は、概ね安定した状況であった。④小型の CLT 試験体を 23℃50%RH から 90%RH に吸湿させて非平衡状態でヤング率を測定した結果と平衡状態でヤング率を測定した結果から平行層理論を用いて含水率からヤング率を推定した結果、推定値と実測値はほぼ一致した。本年度の計画は、①森林総合研究所の長期測定試験体を分割し、含水率を全乾法で確認するとともに、内部含水率の測定に与える諸条件を整理する。②9層9プライ CLT を吸湿条件の湿度条件におき、内部含水率の変動を測定してシミュレーションと組み合わせて安定に要する時間を整理し、長期測定試験体の内部含水率から動的ヤング率の変動を平行層理論で推定し、全国数か所の気候における CLT の年間含水率変動をシミュレーションで推定する。

安村委員長：CLT は乾燥しているが、環境の中で CLT 内部の含水率が高くなると問題があるかどうかを目指しているのか。

朝倉研究主幹：どれぐらい影響を与えているのかを把握しようというのが当初目的で、試験の期間中に含水率がどのくらい変動しているかを確認している。

安村委員長：問題としては、含水率が変わることにより、割れが生じたり、スタビリティが変化したりという可能性を考えているのか。

朝倉研究主幹：今回はそこまで考えていない。

安村委員長：今回は9層9プライだが、厚くなってくるとその影響が出やすいので行ったのか。今まで、そういうことはなかったのか。

朝倉研究主幹：5層5プライでも含水率測定を行ったが、内部の方は測っていなかった。

安村委員長：9層9プライになるとだいたい床に使うもので、シビアな環境変化にならないと思う。例えば、現しの場合など、現実には考えられるのか。

朝倉研究主幹：シミュレーションの手法を活用することにより、そのようなことも予測可能と思う。

安村委員長：製造において、9層9プライを床以外で、環境がシビアになるところに使うことはあるのか。

渡部氏：メインは壁だと思う。

安村委員長：用途が増えるといろいろと使ってもらえる。壁にしても大架構にしても必要なことと思うが、環境自体がだいぶ違うと思う。

渋谷主任研究員：例えば、中層、高層の建物の低層階のようなもので有効断面を増やしたい場合に、9層みみたいなものを使えるようにということ。その場合、1階の地際のような場所だと水分がある可能性があり、そういう使用場所で、通常の接着製品を木造で使うときのような仕様環境ごとの含水率調整が必要か、CLT くらい大きいと要らないのかを調べたということである。シミュレーションで繊維方向によって水分が

通りやすいところと通りにくいところで、含水率が上がる場所と上がらないところがある。

安村委員長：直交層は木口面が出ているということか。

朝倉研究主幹：これは横にした断面図で、2層目が横で1層目が縦である。

安村委員長：横はグラウンドしていないか。

朝倉研究主幹：していない。

小関委員：実際に大きな断面、CLT だとか集成材は、含水率 1%に対してヤング係数が 2 も 3 も動くのか、そういう知見を得たのは非常に重要な実験だと思う。

#### (4) 長期挙動試験の進捗・実施計画

宮本主査：こちらは過年度からの進捗の報告となる。応力比の水準は 66～94%の 2%括約で、各応力比につき試験体数は 2 体、応力比の高いほうから試験体数 1 体で順番に試験し、繰り返した。曲げクリープ破壊試験による破壊時間と応力比の関係を示すが、終了したもの、継続中のものが含まれている。最終的に 30 点のプロットとなる予定。本年度は、①応力比 66% (2 体目) を継続測定し、②加力途中に破断した応力比 94%、90%、それぞれ 1 体について予備試験体を用いて再試験を実施する。

安村委員長：綺麗に Madison curve になっていると思ってみているが、2%変えるというのは、だんだん増やしていくということなのか、別の試験体でやるということなのか。

宮本主査：別の試験体である。

安村委員長：ここは、ある程度壊れずにずっと残っているということか。

宮本主査：その通り。

渋谷主任研究員：指示通りの試験方法では、応力レベルが 3 以上、それぞれの応力レベルに対して 10 体という決め方になっているが、同じ Y の数値に対して破断時間 X のバラツキが生じるということで、これを直線回帰するのは数学的に間違っている。1 応力レベルで 1 体測ったのと相関係数があまり変わらないと思う。3 応力水準以上ということで、実はここでは応力制限を増やし、繰り返し数を小さくして 30 回というようなやり方をしている。その方が多分、データとしては一貫性というのが上がってくると思う。

安村委員長：荷重比を設定するときスタティックな試験の平均値を 100 にしたのか。

宮本主査：16 体の曲げ試験の結果の最大荷重の平均値である。

渋谷主任研究員：基礎的試験体も、現場の中から飛び飛びに取って、その周りにこの応力比の試験体がバラっと存在するような形で、一応、サイドマッチと言ってもラミナが違ってしまいますので、何とも言えないが、同じ現場から満遍なく取るような形で実験を行っている。

青木委員：2 体が途中で破断したということだが、これまで 7 層 7 プライとかで、どのくらいの割合で、途中で破断したというのがあったのか。

渋谷主任研究員：7 層 7 プライは 4 体である。

青木委員：30 体中の 4 体、その時は、予備試験体で追加の試験はしたのか。

渋沢主任研究員：予備試験体があったので行った。

青木委員：その評価の時は、やり直した分を入れて、途中破断した分は除いたのか。その辺の評価方法が前と今回とで変わるのか気になった。

渋沢主任研究員：全部含める、含めないなどいくつか計算したが、最終的に一番妥当だと、その段階で先生方に判断頂いたのは、加力途中で破断したものは抜く、やり直したものについては、加力途中で破断していなければ入れるというような形が最も適切と考えられた。そのような形で算出した数値を国土交通省に報告したと思う。

青木委員：最終的に 30 体までいなくても、それはやむを得ないという、そういう判断か。今回は取りあえず今のところ 2 体なので、それを追加して、目標としては 30 体を満たせればよいということか。

宮本主査：予備試験体は 4 体あるので、そのうち 2 体でこの 2 条件を実施し、その結果次第と考えている。

安村委員長：途中で壊れてしまった場合、7 層 7 プライ、9 層 9 プライも含めて、何か原因がありそうだなということが分からないが、とにかく壊れたということか。

宮本主査：はっきりとは分からない。最初の破断のきっかけはフィンガージョイントだが、試験後に見ると判断が難しいが、その部分の開きが早かったようにも見える。ただそれが直接、最終的な破断の原因になるかというのは、見極めがたい。ばらつきの範囲内で、応力比の高い範囲では、初期試験 16 体の平均値に対してのばらつきもあるので、その中に含まれる次元なのかもしれない。

安村委員長：16 体のスタティックな試験のばらつきと、ラミナのフィンガージョイントは後ほど効いてくると思うが、その辺りのばらつきというのは、どうなのか。

宮本主査：今回のスタティックの試験も、割とばらつきは少なかった。

安村委員長：それは既製品のか。ラミナの話か。

宮本主査：マザーボードのことである。

安村委員長：製品になってしまった場合のばらつきと、ラミナ自体のばらつきというのは、違うのか。

渋沢主任研究員：恐らく、理屈からいうと違う。少なくとも 3 本ぐらい入っているので、そうすると平均化されると考えると、ラミナのばらつきよりは狭くなるだろう。多分、製材ベースの木質材料の中では、すごくばらつきが少ないと思う。

宮本主査：加力点間にフィンガージョイントが入るように試験をしている。それも一つの理由である。

小関委員：Madison curve とうのは、いわゆる応力比は誤差がなく、横軸の破壊時間に誤差が生じてその残差が最小になるように Madison curve の係数をフィットさせるのに最小二乗法を使うということか。

渋沢主任研究員：そうだ。

安村委員長：時間がログか。

渋沢主任研究員：一番早く壊れた1点、または最も長い期間の1点のデータに引きずられる可能性はある。手前の方の1点がすごく効果が出てしまう可能性もあると思う。特に傾きだけが問題になるので、そうすると、比較的応力比が少なくて早く壊れるのがあると直線が寝る形になる。

小関委員：対数軸だから、グラフの左ではなく右側のデータに引きずられるのか。

渋沢主任研究員：そうだ。ただ、横軸は対数なので、引っ張るほど右に進むには何年という長さになる。左側だと何秒でも右にずれることになるから、そのままこれで直線回帰すると、早く壊れたものから効き目が出る感じだと思う。

戸田社長：試験体の破断状況だが、応力比66%の一例では、左上の方で試験体下端のフィンガージョイントの破断、右の写真では層内せん断破壊が起きていた。長期荷重試験だが、まず、所定の試験荷重に向けて荷重を増加させ、荷重変位関係は直線性を保ちながら、所定の試験荷重まで到達し、それ以降、時間経過に伴い部分的な破壊を繰り返しながら変位が増加していき、最終的に破断に至る。短期曲げ試験で得られた見かけの傾きを補正し、各応力比に相当する荷重が作用し、初期変位 $\delta_0$ に到達後は、その荷重を維持したまま直線的に変位して破断に至るモデル、いわゆるバイリニアモデルで仮定をした。実験値と検討式による算定値を比較した結果、検討式によって実験値を適切に表現できることを確認した。検討式では、各応力比における最大変位を簡易に算出できるため、事前に破壊に至る変位を把握できる利点がある。今後実施される長期荷重試験において、本検討式により実験値を適切に捉えられるかについて、検討を重ねる必要がある。

安村委員長：長期荷重試験時には変位が、ずっと時間がかかっても動いている。一般的には、ある程度収まってきているのか、どこかから急に上がるという、どれぐらいの変位のところで、塑性域に行くというところが分かればよいということか。

渋沢主任研究員：そうである。クリープ限度みたいな範囲の問題だ。

安村委員長：今の実験方法はISO、ENである。しかしASTMは、遅れを見ているというような感じで、どこから上がっていくかという、そんなに多く壊さなくても、その限界の荷重が分かればよい。ISOも二つ入れていたと思う。

井道室長：ISOの評価方法がASTMになっていた。

安村委員長：この研究としてはENでいいだろうが、ASTMだったらどうなるか。これを見ていると、ひずみが、ある域に達したらもう行ってしまったというところが分かるのではないかという気がする。

渋沢主任研究員：CLTの場合、塑性域があまりなく壊れるのでどこで動いているか難しいと思う。低いものの方が、破断するときの変形が進んで壊れているように見える。ということは、もう少し本当は低いところで、ずっと進んでいく点が本当は隠れていて見えていないのかもしれない。

安村委員長：これを見ると、降伏点はどうなのかと思う。

渋沢主任研究員：この傾きを補正するときのモデルを、比例限荷重から先は降伏してしまつて前の方に出るようになってきているが、材料単体の試験としては、そこも変位が増えながら荷重が伸びていくようなバイリニアなのかなという気がするが、CLT ではそういう傾向には今のところ見えてこない。

青木委員： $\delta_{\max}$  イコールの式があるが、この中の補正した傾きの 0.937 は、今回のこの 9 層 9 プライの試験体ではこうだったということか。樹種が変わったり、層構成が変わったりすると、この辺が変わってくる可能性があるということか。 $\alpha$  も、今のところ実験でこういう傾向があるというぐらいだと思うので、その辺が、もうちょっと理論的に出せる見通しはあるか。

戸田社長：そうだ。実験の係数としてとらえてもらえればいい。理論的なところというところはあったが、応力比をどこで切るかとすごく悩み、まず、80%で切るのが、今回新たなチャレンジと考えている。どのぐらい理論的に証明できるかについては、少し検討を重ねていきたい。

青木委員：短期曲げ試験の傾きと長期試験の傾きが違うという前提にあるが、この目標とする荷重を載荷するまで、この長期試験はどのぐらい時間をかけているのか。

宮本主査：試験体によって違ってしまう時もあるが、およそ、毎分 5mm とか 10mm である。

青木委員：ということは、変位が真横にスライドし始めるところぐらいが目標荷重に到達するところだと思うので、大体中央変位が 60mm ぐらいまでは、荷重を載荷していくと一気に初期たわみとしていくということか。そうすると、10 分以上かけて加力しているというイメージか。

宮本主査：そうである。これと別に、最初の初期の傾きだけを取る 1/10 ぐらいの荷重をかけるような、最初の傾きだけで取るような実験をしている。最初に、榎本委員が指摘した、その傾きから何か予測できるのではということで、これは、1/10 というところと 600kg 位で、あっという間になってしまうので、2mm 位で恐る恐る押している。

青木委員：短期の試験でも破壊するまでにはそれなりに時間がかかっているもので、この長期の荷重をかけ切るまでの時間と短期で壊れるまでの時間はそんなに変わらないのではと思っていて、そんなにスピードの差があるのか。剛性の傾きが、戸田さんの結果だと必ず短期の方が剛性が高く長期が低いというグラフになっているが、そんなに差があるんだろうか。0.937 だからあまり差がないということなのかもしれないが。

井道室長：短期の方がゆっくりかけたので、傾きがもうちょっと寝ると思っていたが、長期の方がどっちかというところとゆっくりかける。短期は 5 分で壊す程度だった。ゆっくりかけた方が傾きが寝るというのは何となく分かるので、その影響が 5 分、10 分で、ここまで出るのかなという気がしなくもない。

青木委員：やっぱり短期の方が短い。分かった。差が出てきた理由が何となく分かってきた。

荒木委員：各 CLT のヤングは測っているか。

宮本主査：長期試験用の試験体は算出していない。

荒木委員：応力比の 70%位までは、同じようにかけている状態だから、その差が出るとしたら、荷重速度とヤングの関係では。

渋沢主任研究員：80%前後で分けているのは、多分 80%より下の方は単純にもう弾性域の変形がかかっていて止まる感じだが、80%より超えている試験体は、物によっては塑性変形が入っているだろうということで二つに分けていると思う。そうすると、何となく傾向はそうなのかなというところではあるが、確かに、調整係数みたいなものの数値の意味がまだよく分からないと思う。実際に使用しているとき、どれぐらいの変形に行ったら危ないということがもし全部分かれば、使い方での注意ができるかと検討しているところだが、なかなかちゃんとした回答を出すのは難しい。

小関委員：資料 3-3 の図に関して、Madison curve の推定、例えば、大体、応力比が 60%だと破壊時間は 50 年程度という見方でよいか。いわゆる基準強度の曲げ強さ 1/3 程度は十分担保できるという見方でよいか。

渋沢主任研究員：ここでわかるのは、長期の低減が 1.1/2、55%をクリアするということである。現状で、たぶんこれを回帰すると少し上に行くので、1.1/2 はクリアできる。

小関委員：現在実施している応力比 66%自体も重要になるという考え方でよろしいか。これが終わればもう少し整理するというか。

渋沢主任研究員：そうである。これが本来の Madison curve 上で壊れるとすると数十年になるので、できなからう。状態を見ながら、どこかでストップさせなければならぬと思う。7層7プライの時も1体壊れないものがあり、2年ぐらい継続したが、壊れそうになく、途中で止めた。これも様子を見ながらだ。7層7プライはもっとばらばらだったが、それと比べると現時点では良好だ。積載の仕方とかが精度を上げていること、7層7プライと異なり中立軸付近に長軸ラミナがあり、それが破壊に影響を及ぼすこともあると思われる。積層効果が現れているとも考えられる。

#### (5) その他

宮本主査より現地検討会の実施に向けてご意見いただきたいとの発言があった。その後、オブザーバーから一言ずつ挨拶があった。最後に、安村委員長が「もう大分進んできて頼もしく思う。実験結果も出てきているので、色々なことを細かく見ていって、例えば、集成材と CLT というのは何が違うのか、それは直交層があると違ってくる、あるいは曲げなのか引張なのかで影響が出てくるだろう。そういう細かいところにも注目してまとめてほしい。」と総括した。

以上で検討会は終了した。

## 5.2 現地検討会

開催日時：令和7年11月21日（金） 13:30～16:30

場所：株式会社サイプレス・スナダヤ

東予インダストリアルパーク工場及び本社工場（愛媛県西条市）

出席者（敬称略）

外部有識者委員

- 委員 河合 直人 （工学院大学名誉教授）
- 委員 青木 謙治 （東京大学大学院農学生命科学研究科）
- 委員 槌本 敬大 （建築研究所）
- 委員 小関 真琴 （木質建材評価サービス）

オブザーバー

上田 萌香 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

事業実施者

（国研）森林研究・整備機構 森林総合研究所

宮本 康太、井道 裕史

（公社）日本木材加工技術協会

村田 光司

議事：

### (1) CLT 製造工場等現地見学

株式会社サイプレス・スナダヤの砂田社長の案内の下、CLT 及び集成材の製造工程を現地見学した。原木土場、ラミナの加工及び選別、たて継ぎ及び積層接着、仕上げ加工等の工程に沿って、砂田社長より説明いただくとともに随時質疑を行いながら見学を行った。

### (2) 質疑及び意見交換

見学全体を通じた製造工程に関する内容や、CLT の利用拡大に向けた課題、現状及び今後の展開等について、質疑と意見交換を行った。

### (3) その他

本事業の今後の予定として、2月中旬に第2回検討委員会を開催すること、報告書原稿の提出締め切りは追って設定することなどを決定した。

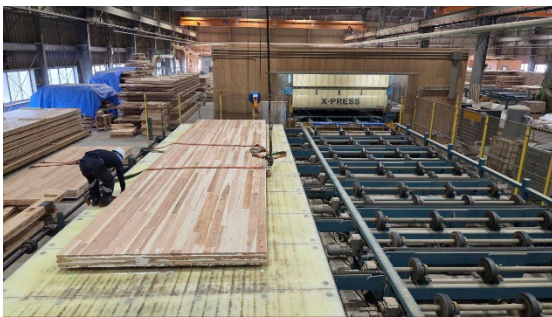


写真 5-2-1 現地検討会の様子

### 5.3 第2回検討委員会

開催日時：令和8年2月12日（木） 13:15～15:15

開催場所：林友ビル・中会議室（東京都文京区後楽1-7-12）（対面・web併催）

出席者（敬称略）：

外部有識者委員（対面出席）

委員 河合 直人（工学院大学名誉教授）

委員 槌本 敬大（建築研究所）

外部有識者委員（web出席）

委員 荒木 康弘（国土技術政策総合研究所）

委員 小関 真琴（木質建材評価サービス）

オブザーバー（web出席）

石崎 宜彦（林野庁木材産業課木材製品技術室）

高橋 風鈴（林野庁木材産業課木材製品技術室）

上田 萌香（林野庁木材産業課木材製品技術室）

久保 寿斗（国土交通省住宅局参事官（建築企画担当）付）

田村 堯大（農林水産省新事業・食品産業部食品製造課基準認証室）

事業実施者

（国研）森林研究・整備機構 森林総合研究所

宮本 康太、渋沢 龍也、井道 裕史、河野 幸喜、伊神裕司（対面出席）

平松 靖、宮武 敦（web出席）

（一社）日本CLT協会

坂部 芳平、西妻 博康、原周平（web出席）

（地独）北海道立総合研究機構 林産試験場

朝倉 靖弘（web出席）

（株）中央設計

戸田 淳二（対面出席）

（公社）日本木材加工技術協会

村田 光司、原田 寿郎（対面出席）

関係者

渡部 博、布施 美月（銘建工業（株））（対面出席）

資料：

資料 1 議事録（案）（第1回検討委員会、現地検討会）

資料 2 令和7年度成果報告書目次（案）

資料 3 CLTの曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証

資料 4 CLTの長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討

資料 5 CLTの長期挙動データの収集

資料 6 試験体の破断状況と破断時の変位に関する検討

議事：

1. 開会

出席者紹介の後、森林総研・伊神ディレクターより挨拶があった。

2. 前回議事録（案）確認

前回検討会（現地検討会）の議事録案を確認した。

3. 今年度成果について

(1) 報告書目次（案）について

宮本主査：例年と同様の構成で、第1章事業計画、第2章 CLT の曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証、第3章 CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討、第4章 CLT の長期挙動データの収集と解析、第5章委員会のまとめ、第6章総括、第7章付録である。

(2) CLT の曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証

井道室長：今年度は A 種構成の Mx60A の CLT と B 種構成の Mx60B の CLT を製造して、曲げ性能の違いについて検証した。M60A では、実際使用したラミナは基準平均値を全て超えていた。M60B では、平均と上限の間に大体入っており、比率も使用したラミナとラミナ試験体のラミナが同じような分布であった。M30A では、平均値が左の方にあるが、それより大分高いラミナを使用しており、また、全体に使用したラミナに比べたら、ラミナ試験体として使用したラミナの分布の方が高いところにあった。M30B では、上限を超えているのもあるが、大体基準値内に入っていた。ラミナ試験体でのラミナの曲げ試験では、フィンガーの根元から破断するというものばかりだった。各等級と密度との関係では、M60 も M30 も A の方が若干高いようであった。縦振動法のヤング係数では、M30A が大きく、M30A のラミナの分布が高いところがあったことが影響している。曲げ強度に関しては、M60A、M60B を比べると、M60A の方が大きく、M30A と M30B を比べると、M30A の方が大きく、これらは当然の結果であるが、一方で M60A より M30A の方が大きいという結果だった。ラミナ曲げ強度に対する見かけの曲げヤング係数と密度の関係では、それぞれの等級で見ると、それほど相関はないが、ヤング係数の幅を大きく取ると、曲げ強度との相関も高めとなることや、密度との相関もそれなりにあるということが分った。CLT の曲げ試験では、製造した試験体が 9 層 9 プライの強軸の A 種構成と B 種構成、それぞれ 8 体、5 層 5 プライ試験体の強軸で A 種構成、B 種構成、それぞれ 8 体について JAS の曲げ試験を行った。破壊は、フィンガージョイント部で、特にフィンガーが抜けるということもなく、根元から壊れた。9 層 9 プライの Mx60A と Mx60B のヤング係数では、Mx60A の方が高く有意差があった。5 層 5 プライのヤング係数では、Mx60A の方はばらつきがあるが、それでも有意差がみられる程度には違った。9 層 9 プライの曲げ強度は、こちららもばらつきは同程度で、Mx60A と Mx60B で有意差があった。5 層 5 プライは曲げ強

度のばらつきが大きく、積層数が減った影響なのか、9層9プライと異なり、ばらつきが大きいことにより平均値に有意差はなかった。基準強度に対しては大きく上回っていた。

河合委員：M30Aのラミナ試験用が高い方に偏っているのは、何か意図したのか？

井道室長：特段意図はしておらず、偶然である。

榎本委員：強軸が強度を引っ張るのはわかるが、30Aは直交層だから関係ないのではないか。どの弾性係数も、ラミナがどの試験体の何枚目に入っているという追跡をしているか？壊す設定というのは基本的に行わないので、接合部で壊れることはあっても、接合部は弾性係数ではなくて密度に依存している。

井道室長：30Aは内層にも使っている。ラミナがどの試験体の何枚目に入っているかは追っていない。今回のラミナは密度が高い。

河合委員：通常、接合部の設計は鋼材側を破壊させようということが多いので、木材側が強くなることで問題が生じることは稀である。

榎本委員：スギの品種によって密度やヤング係数が違うが。

渋沢主任研究員：同じ密度でも性能が違ふとなりかねないので、ヤング係数なりで選別しておく必要がある。

### (3) CLTの長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討

朝倉研究主幹：今年度は、長期荷重試験時の内部含水率のモニタリング手法の開発と検証ということで、長期荷重試験室にある試験体の含水率がどうなっているかを追跡して測定し、また含水率変動がCLTの強度性能、特にヤング係数に与える影響を検討した。プローブ間隔について、15mm（標準状態）から60mmまで離しても、基本的にはほとんど測定に影響がなかった。実大試験体を分割し、最終的に小さな試験体にして全乾法で含水率を求めたところ、含水率測定装置の値とほぼ一致し、含水率測定装置の有効性が認められた。CLT内部の含水率に差が出ているのは、そもそもその部位の木材の平衡含水率が違うことによることが分かった。シミュレーションによる含水率の推計をしたところ、表層は外の温湿度の変化に反応して細かく振れているが、中心はそれに比べてゆっくり移動した。含水率は、冬に高くて夏に下がって、冬、若干上がっていくということがあっている。平行層理論によるヤング率の推定では、含水率を変化させたときの9層9プライCLTのヤング率への影響を試算した。ヤング率の変化を初期に対する変化率で見ると、温湿度の変化により含水率が変化するが、一番含水率の変化が大きかったときでもヤング率の変化率が1%ぐらいで収まった。一部のラミナの含水率が変化しているときでも、ヤング率はほぼ一定で変化してないということであり、今回の長期荷重試験については、ほぼ安定した試験ができていると考えられる。

河合委員：含水率の計測は幅はぎ接着がない状態のものか。

朝倉研究主幹：幅はぎ接着がない試験である。

榎本委員：図5の下のグラフで、数値が下がってきているのは何層目のラミナか。

朝倉研究主幹：3層目である。測定値は層の順番には並んでいない。この理由は、部位によってそもそも平衡含水率は違うことと結論づけた。

植本委員：湿度が上がると含水率が下がっているが。また、図9のXYプロットと図10の棒グラフは、同じデータだと思ってよいか。

朝倉研究主幹：御指摘のとおり。理由はよくわからない。図10は全乾含水率である。

(会議後の補足：図5に対する指摘を踏まえてデータの再確認と修正を行った。)

渋谷主任研究員：電気的な測定方法と全乾法の数値は、この20°C65%RHの調湿環境下ではまあまあ一致しているだろう。測定の上は妥当であった。平衡含水率の変化を見るとき、湿度の影響はよく見るが、実は温度の影響もあって、そこが拾えているということがこの測定の中では面白かったところと思う。

小関委員：実用上、20°C65%RHのときの平衡含水率と含水率1%のときの変化率でヤング係数なり強度を補正しており、CLTの場合も集成材と同様に、平衡含水率12%で含水率1%の変化率で1%と1.5%でよろしいか。

朝倉研究主幹：先行研究の他の材種もそれぐらいで収まっていたので、今回はこれを採用してみた。

渋谷主任研究員：今回の結果からは何とも言えないが、含水率変化幅が思いの外CLTは少なかった。平衡含水率1%当たりの弾性係数の変化率も出したが、非常に小さいというところで、これも品質管理上、見込むべきかは細かい議論が必要と思う。

小関委員：非常に難しいことは分かっている。相関のばらつきはあるということも重々承知して、今回改めて数値を見させてもらった。

渡部氏：エアコンなどにより過乾燥気味で使用される場合、どうしても割れだとか隙が出てくるが、曲げ強度などに影響があるのか。

渋谷主任研究員：確かに弾性係数に与える影響と強度に与える影響は違うと思う。シミュレーションのようなものでないと、実大材のCLTの含水率調整をして、含水率の幅を例えば2%変えようとする、大変な時間がかかるので実験はし難いが、例えば2層とか3層くらいの小さいものを調湿して、せん断性能に違いがあるかというような実験はできると思う。今後そういった検討の余地があると思う。

#### (4) CLTの長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討

宮本主査：スギ9層9プライCLT試験体の仕様について、既往の長期挙動試験と基本的には同じ構成だが、生産の実態としては、ラミナ幅が以前は105mmだったのが122mmになっているということが以前とは違う。フィンガージョイントも、以前は垂直だったのが、水平であるのが異なる点である。生産の都合上、試験体の長さが6mになり、厚さに対して23tまでは届かないが、曲げスパンの距離21tを確保し、余長は短い影響ないだろうとみなした。今年度は、応力比の低い5水準の試験と高い2水準の再試験を行った。挙動としては、設定荷重に達した後、変形量が微増していくような傾向がこれまでと同様であった。一度破断を検出しても、まだ荷重に耐えられるというものは再加力をして試験を継続した。設定荷重に達する前の加力途中で破断し

た試験体を2体分に対して、なかったことにするのか、あったものとして考えるかというところを検証した。すなわち、a)加力途中に破壊した試験体の応力比を破壊時の応力比として全試験体の測定結果を回帰する（追試験の結果は含まない）、b)加力途中に破壊した試験体の応力比を設定した応力比として全試験体の測定結果を回帰する（追試験の結果は含まない）、c)同じ応力比で追試験を行った試験体の測定結果を含めて全試験体の測定結果を回帰する（加力途中に破壊した試験体は含まない）の3方法で検証した。荷重継続時間にかかる調整係数は、a)で50年70.62%、250年68.98%、b)で50年69.52%、250年67.63%、c)で50年65.90%、250年63.20%となり、c)が一番安全側の数値であった。最終的な結論としては、スギ9層9プライCLTについても、7層7プライCLTと同様、かつ製材の調整係数とされる55%と同等以上というのが今回のまとめである。

河合委員：貴重なデータで求めた回帰式で、7層7プライと同じぐらいの調整係数で、a)、b)、c)、いずれにしても、それほど大きな違いがなく、c)が安全側の調整係数で、それを使った場合でも、十分製材の調整係数を上回っている。

榎本委員：30体を終了したということは7層7プライと同じ試験体数が終わったということで、基準強度を求める方向か。問題はなさそうだ。7層7プライよりやっぱり下がる。直交層の割合が増えれば増えるほど下がっていくはずだ。

宮本主査：7層と9層とでは、両者の中立軸が強軸か弱軸かという違いがあり、そこを直接比較するのは難しいところもあると思う。7層のときのデータを比較で示しているが、この数値だけを見てもそうだと思う。7層と今回の9層とで、この最後の表で見ると数%違うようだが、高い応力比のデータにどうしても引っ張られている。

榎本委員：正しく推定できてなかったデータは取り除いて回帰するっていうのは理に適っているようで、それで安全側になるというような同じ処理を7層7プライもやって、5層5プライもやって比べて、プロットをまず並べて見ていきたい感じはする。11層も試験をやりませんか。

渋沢主任研究員：11層はJAS上ないので。層数が多くなっていくと直交層の影響が大きくなっていくが、中立軸のところは弱軸なのか強軸なのかで2つに分けられるかもしれないが、そこは分からない。初期の応力レベルを決めるときも同じ構成なので、中立軸のところは弱軸の応力に対する全てを決めていて全体的に低いのかもしれないが、ここは何とも言えない。

榎本委員：11層以上、9層を超える断面にニーズがなければ、あまり気にしなくてよいが、そのうち誰かが試験をしたいとなる可能性がある。JASで特別認証のようなものがあるし、インセンティブとしたりとか。そのときに基準強度はないというのか、もう外挿して、これ以上幾ら増やしても、55を下回らないというのか、そういうことを考えないといけないと思った。今ここで結論を出すしかない。

渋沢主任研究員：現状のJASの仕分けだと、ラミナ厚30mmが基準で、製品厚は500mmまでしかないなので、多層のものはそのままでは作れない。だから、ラミナを薄くし

て、層数を増やしていくしかない。今、別途非等厚ラミナ CLT の検討が進んでいるが、薄いラミナに対する要求があれば、11層も出てくる。

樋本委員：非等厚は長期応力度があるのか。

渋沢主任研究員：ない。強度もまだである。

#### (5) 試験体の破断状況と破断時の変位に関する検討

戸田社長：試験体の破断状況は、試験体の下端の方でフィンガージョイントが破断し、有効断面が、断面積が小さくなり、より変形が進み、塑性変形して壊れるのが代表的な壊れ方であった。16体の短期曲げ試験結果、荷重－変位の関係において、平均の傾きと最大荷重いずれも変動係数5%程度で、あまりばらつきが生じていなかった。短期曲げ試験結果を基に、長期の荷重試験について、破断時の変位を予測できないかというところを検討した。所定の応力比に向けて試験荷重を増加していくと、直線性を保ちながら増加していき、所定の応力比に達すると、そこから水平方向にグラフは伸び、時間経過に伴って細かい破壊を繰り返しながら変位が増加し、結果的に破断に至る。この挙動を基に、長期荷重試験の荷重－変位関係をバイリニアモデルで表し、長期荷重試験における破断時の中央部変位を算定する検討式の仮定をした。今年度に追加した実験値と算定値を比較すると、概ね捉えられていることが確認された。検討式では、応力比が分かると、破断時の中央部変位が簡易的に求められるという利点はあるが、完全な一致をするのは難しいという印象を得ている。

河合委員：4枚目のスライドの $\delta_0$ は、実験値を使うということか。

戸田社長：補正した傾きである。短期曲げ試験の傾きを利用する。

河合委員：補正した傾きは、短期の曲げ試験の傾きに一律0.937を掛けた値か。

戸田社長：そうである。

樋本委員：この式によって強度が予測できるのか。変形が閾値に達したら壊れるという論理に基づいているわけだ。

戸田社長：そうである。

渋沢主任研究員：CLTに限らず、とにかくDOLの試験をしないと破壊が予測できないというのは、もう少しどうにかできないかということで、検討してみた。応力比を純粋な弾性変形の範囲にあるだろうものと、実は少し塑性変形が入っているだろう応力レベルの2つに分けてみたら、傾向が明らかにならないかと考えたが、なかなか難しかった。

樋本委員：破壊理論で、応力で破壊するのか、変形で破壊するのかというところから詰める必要がある。応力なのか、変形なのか、これは答えが出ないらしい。

小関委員：今回出てきた係数とか式は、あくまでも9層9プライのデータだけ使った結果か。7層7プライではどうかとも出てくると思うが。

戸田社長：そうである。7層7プライについては課題と考えている。

#### 4. その他

宮本主査より事務連絡があった。

#### 5. 閉会

河合委員より、「9層9プライの基準強度は、設計の側からすると少しでも早くという声が出ている状況である。本日の資料を拝見すると、それに向けてかなり十分なデータが蓄積されてきたようだ。関連して、様々な含水率等の情報もあり、このような資料をまとめてもらえれば、少しでも早く9層9プライが実際の現場で使われるようになる。それがまたCLTの利用拡大につながっていくと思うので、報告書作成まで日があまりないようだが、よろしく願います。」と総括をいただいた。

国土交通省久保係長が、「今年度2回目ということだが、9層9プライは過去から必要性を訴えられていることもあり、早期の基準化に向けた技術資料のまとめということも必要になってくると思っている。本事業は大変注目の高い事業だとこちらも把握しているので、今後ともぜひ活発な議論をよろしく願います。」と述べた。

林野庁石崎課長補佐が、「この9層9プライの強度データの収集について、収集とデータの整理、解析、4年間の長い間、大変お疲れさまでした。今年度で一定の成果が出たということで、今後、基準強度の関係については、また国土交通省等とも相談しながら、基準化に向けて進めていければと思っている。引き続きよろしく願います。」と述べた。

最後に、宮本主査が関係各位に謝意を表して、第2回検討会は終了した。

## 6. 事業成果の総括

本事業では、現在、許容応力度の対象となっていない CLT (直交集成板) の 9 層 9 プライ構成強軸方向の曲げに関する長期性能を測定し、許容応力度の対象となっている他の層構成 CLT と同様の算出方法適用の可否を検討するため、曲げ性能を対象とした長期挙動データの収集を行っている。以下、得られた成果と残された課題について総括する。

CLT の曲げ性能に影響を及ぼす製造因子としてラミナの等級区分方法を採り上げ、スギの外層ラミナ M60A・B、内層ラミナ M30A・B の曲げ性能及びそれらを用いた 5 層 5 プライ・9 層 9 プライの Mx60A・B 等級 CLT の曲げ性能を比較した。その結果、ラミナの曲げ性能は M30A>M60A>M60B>M30B の順となり、密度が高いほど曲げ性能が高い傾向を示した。CLT の曲げヤング係数は、5 層 5 プライ、9 層 9 プライともに Mx60A の方が有意に高いものの、曲げ強さは、9 層 9 プライのみ Mx60A の方が有意に高かった。各仕様の CLT の曲げ性能は基準強度と比較すると十分高く安全側であったが、ラミナ性能の違いにより CLT の性能も異なる点に注意が必要である。

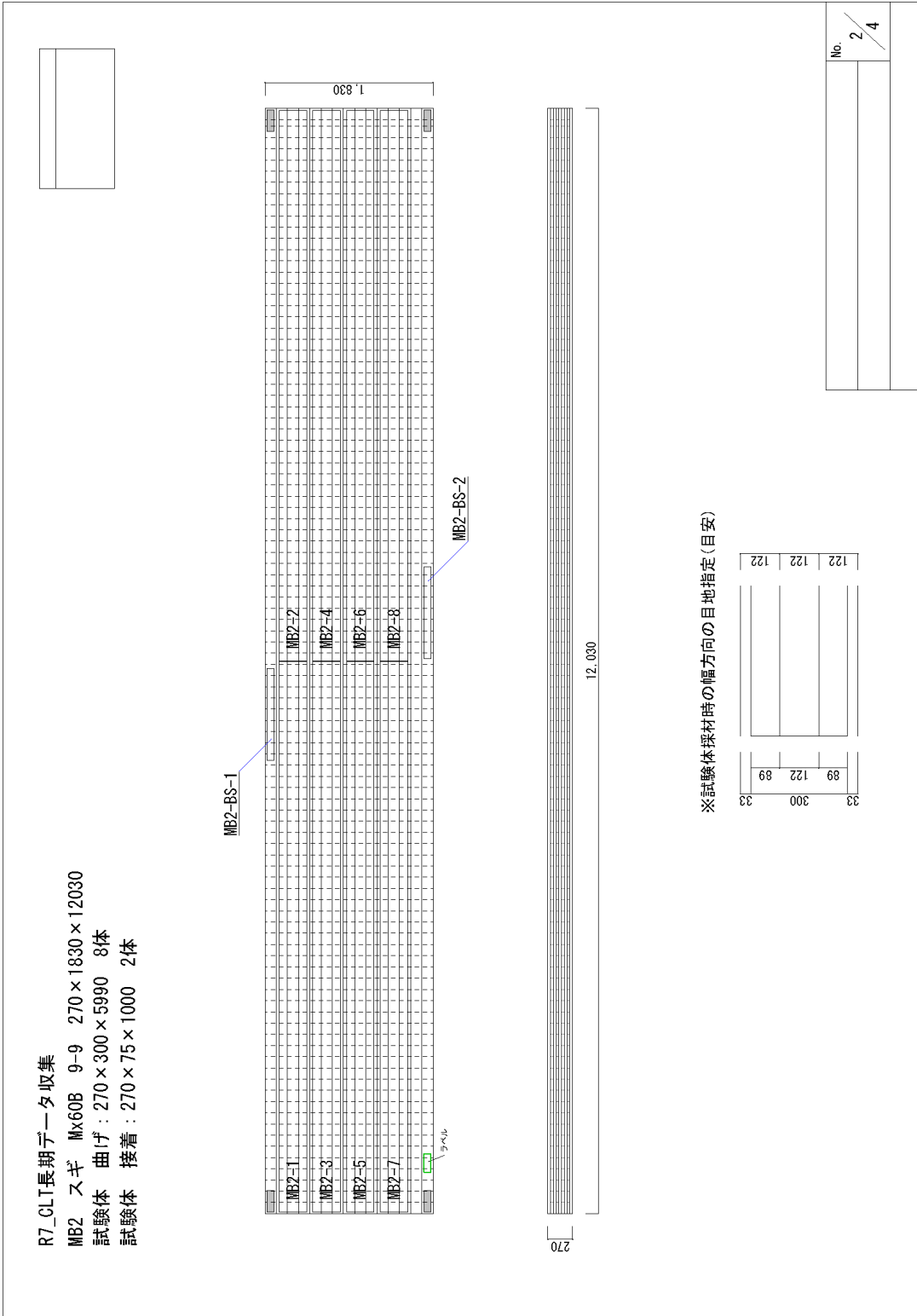
CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性について、今年度は、長期荷重試験時の内部含水率モニタリング手法の開発と検証、含水率変動が CLT の強度性能に与える影響の 2 つの項目について検討した。本事業で考案した CLT 内部の含水率を長期モニタリングする手法の実証実験では、プローブ端子の間隔が測定に与える影響は小さく、適切な測定が可能であることを明らかにした。さらに、全乾法による測定結果との相関を求め、これまでより精度の高い校正直線を得た。実大 CLT の含水率測定においては、表層及び繊維方向長の短い直交層は同様の含水率変化を示すこと、ラミナごとに平衡含水率は異なるものの、最大 6 ヶ月程度の長期試験期間中に試験体内部の含水率は平衡に達していたと判断されることを明らかにした。また、日本各地の気象データから CLT 内部の含水率を推定したところ、全国で想定される平衡含水率は過去 30 年間で減少から増加をたどる変化をしており、温度だけでなく相対湿度の影響も勘案する必要があることが分かった。これらの含水率変動が曲げヤング係数に与える影響をモデル実験により推定したところ、その影響は大きくなく、実用上は考慮する必要はないと考えられた。

曲げ荷重下における長期挙動データの収集について、破壊荷重の 66%~94%の 2%括約の各応力レベル 2 体ずつに再加力分 2 体を加えた合計 32 体を供試した結果、加力途中で破断した試験体を除いて検討する方法がもっとも安全側であり、製材同等の荷重継続時間調整係数が得られた。さらに、試験体の破断状況の検討と合わせ、破断時の変形量の推定を行った。その結果、バイリニアモデルにより破断時変形量を概ね再現できることから、変形量に着目したクリープ限界から破断を予測できる可能性が示唆された。

なお、本事業成果については外部有識者委員会において国土交通省、農林水産省及び林野庁のオブザーバーご臨席の下、審議・承認をいただいている。関係各位に衷心より謝意を表す。また、CLT 長期挙動データの導出事業は、平成 25 年度から実施されているが、当初より多年にわたり外部有識者委員会委員長を務めていただいた安村基静岡大学名誉教授がご逝去された。ここに謹んで哀悼の意を表するとともに感謝申し上げたい。



(2) MB2 9層9プライ スギ Mx60B



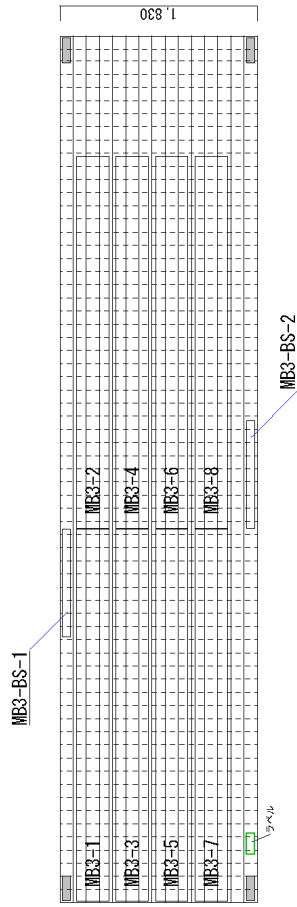
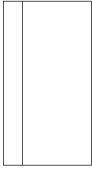
(3) MB3 5層5プライ スギ Mx60A

R7\_CLT長期データ収集

MB3 スギ Mx60A 5-5 150×1830×8040

試験体 曲げ : 150×300×3450 8体

試験体 接着 : 150×75×1000 2体



※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)

33	89	122	89	33
33	300	122	122	122

No.	3 / 4
-----	-------

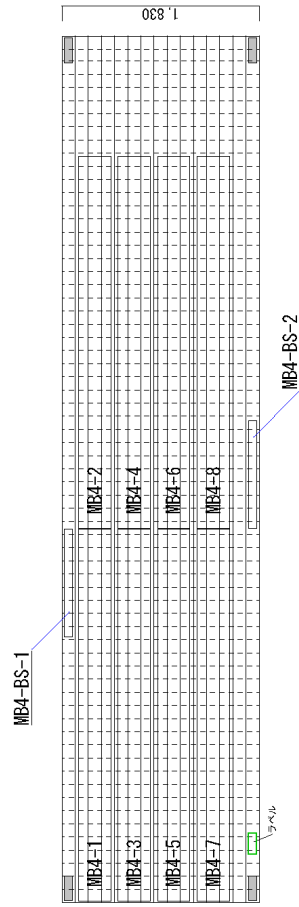
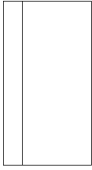
(4) MB4 5層5プライ スギ Mx60B

R7\_CLT長期データ収集

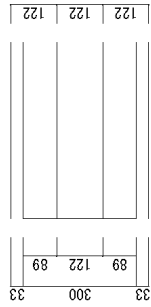
MB4 スギ Mx60B 5-5 150×1830×8040

試験体 曲げ : 150×300×3450 8体

試験体 接着 : 150×75×1000 2体



※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)



No.	4 / 4
-----	-------

## 7.2 試験体の破断状況

(1) 応力比 74%



写真 7-2-1 DOL-74-2 破壊状況



写真 7-2-2 DOL-74-2 引張側フィンガージョイント部破断①



写真 7-2-3 DOL-74-2 引張側フィンガージョイント部破断②

(2) 応力比 72%



写真 7-2-4 DOL-72-2 破壊状況



写真 7-2-5 DOL-72-2 引張側フィンガージョイント部破断①



写真 7-2-6 DOL-72-2 引張側フィンガージョイント部破断②

(3) 応力比 70%



写真 7-2-7 DOL-70-2 破壊状況①



写真 7-2-8 DOL-70-2 破壊状況②



写真 7-2-9 DOL-70-2 引張側フィンガージョイント部破断

(4) 応力比 68% (破壊後に除荷すると変形が回復し、FJ 部分で僅かに隙間)



写真 7-2-10 DOL-68-2 破壊状況 (変形回復)



写真 7-2-11 DOL-68-2 引張側フィンガージョイント部破断①



写真 7-2-12 DOL-68-2 引張側フィンガージョイント部破断②

(5) 応力比 66%



写真 7-2-13 DOL-66-2 破壊状況①



写真 7-2-14 DOL-66-2 破壊状況②

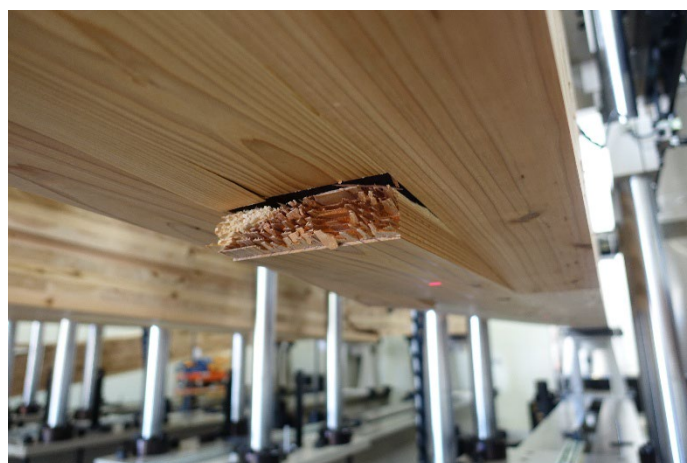


写真 7-2-15 DOL-66-2 引張側フィンガージョイント部破断

(6) 追加試験 応力比 94%



写真 7-2-16 DOL-94-3 破壊状況①



写真 7-2-17 DOL-94-3 破壊状況②



写真 7-2-18 DOL-94-3 引張側フィンガージョイント部破断

(7) 追加試験 応力比 90%



写真 7-2-19 DOL-90-3 破壊状況①



写真 7-2-20 DOL-90-3 破壊状況②



写真 7-2-21 DOL-90-3 引張側フィンガージョイント部破断

### 7.3 令和4年度成果報告書 2.1章・再掲

#### 2.1 CLTの長期挙動に影響を及ぼす製造因子の抽出

##### 2.1.1 CLT 原板の製造条件と試験体仕様の決定

9層9プライ CLT の長期挙動測定に供する試験体原板の製造条件の検討にあたり、既往の5層5プライ CLT ならびに7層7プライ CLT の長期挙動測定での試験体の製造条件を参照して決定した。表2-1-1に9層9プライ CLT 試験体の仕様及び既往の試験体仕様との比較を示す。本事業で得られた成果を5層5プライ CLT ならびに7層7プライ CLT で既に得られている結果と比較可能とするため、既往の製造条件と可能な限り揃えることとした。結果として、ラミナ幅とフィンガージョイントのみ既往の仕様と異なるものとなったが、現行の生産状況を踏まえて選択した。併せて、CLT 原板を効率的に製造するため、初期試験及び長期挙動試験に供する試験体の仕様と試験条件を検討した(表2-1-1)。その結果、試験体長さは、原板からの採材効率を考慮して約6m(試験体厚さtの約22.2倍)を設定した。既往の試験体の試験体長さ(23t)よりもやや短い設定であるが、支点間距離及び荷重点距離はそれぞれ21t、7tと既往と同様であることから、試験結果への影響は極めて少ないとみなした。

以上の検討から製造する9層9プライ CLT 原板は、下記のサイズと枚数に決定した。

- ・長さ12,030mm×幅2,806mm×厚さ270mm、計3枚
- ・長さ12,030mm×幅2,074mm×厚さ270mm、計1枚

表2-1-1 9層9プライ CLT 試験体の仕様及び既往の試験体仕様との比較

		以前の事業(H25～)		本事業	
CLT 原板の 製造条件		構成	5層5プライ	7層7プライ	9層9プライ
		樹種	スギ		スギ
		等級	Mx60B		Mx60B
		接着剤	水性高分子－ イソシアネート系樹脂		水性高分子－ イソシアネート系樹脂
		ラミナ厚さ(mm)	30		30
		ラミナ幅(mm)	105		122
		フィンガージョイント	垂直		水平
		試験体厚さ(mm)	150	210	270
試験 方法・ 試験体 サイズ	共通条件	加力方法	3等分点4点加力		3等分点4点加力
		試験体長さ(mm)	3,450(23t)	4,830(23t)	5,990(約22.2t)
		試験体幅(mm)	300		300
		支点間距離(mm)	3,150(21t)	4,410(21t)	5,670(21t)
		荷重点間距離(mm)	1,050(7t)	1,470(7t)	1,890(7t)
	初期 (静的曲げ試験)	試験体数	16		16
		平均最大荷重(kN)	42.5	68.9	本事業で測定
	長期 (曲げクリープ 破壊試験)	応力比	66～94% (2%括約) 計15水準		66～94% (2%括約) 計15水準
		試験体数	2体/1水準		2体/1水準

t：試験体厚さ

## 2.1.2 ラミナの集材

2.1.1 で決定した9層9プライ CLT 原板を製造するため、M60B 及び M30B のラミナを集材した。M60B については、鳥取県を産地とする1ロットから使用する全てのラミナ計750枚を得た。M30B については、高知県、熊本県及び鳥取県を産地とする各ロットから抽出し、計2,265枚を得た。表2-1-2にM60B 及び M30B ラミナの抽出の詳細を示す。表2-1-3にM30B ラミナについて、産地及びロット別に抽出の詳細を示す。また付録にM60B 及び M30B ラミナの曲げヤング係数についての分布図を示す。

表 2-1-2 M60B 及び M30B ラミナの抽出詳細

曲げヤング 係数(GPa)	M60B				M30B			
	母集団		実際の使用		母集団		実際の使用	
	枚数	比率(%)	枚数	比率(%)	枚数	比率(%)	枚数	比率(%)
30 未満	0	0	0	0	0	0	0	0
30 以上	0	0	0	0	13	0.04	13	0.57
35 以上	0	0	0	0	60	0.17	60	2.65
40 以上	2	0.09	0	0	124	0.34	124	5.47
45 以上	4	0.17	0	0	319	0.89	319	14.08
50 以上	5	0.22	0	0	620	1.72	620	27.37
55 以上	14	0.61	0	0	1,129	3.14	1,129	49.85
60 以上	34	1.47	34	4.53	1,980	5.5	0	0
65 以上	54	2.33	54	7.2	2,763	7.68	0	0
70 以上	93	4.02	93	12.4	3,464	9.62	0	0
75 以上	165	7.13	165	22	3,968	11.02	0	0
80 以上	183	7.91	183	24.4	4,088	11.36	0	0
85 以上	221	9.55	221	29.47	3,881	10.78	0	0
90 以上	234	10.12	0	0	3,422	9.51	0	0
95 以上	283	12.24	0	0	3,050	8.47	0	0
100 以上	223	9.64	0	0	2,252	6.26	0	0
105 以上	234	10.12	0	0	1,760	4.89	0	0
110 以上	178	7.7	0	0	1,188	3.3	0	0
115 以上	119	5.14	0	0	758	2.11	0	0
120 以上	110	4.76	0	0	501	1.39	0	0
125 以上	66	2.85	0	0	294	0.82	0	0
130 以上	41	1.77	0	0	181	0.5	0	0
135 以上	22	0.95	0	0	94	0.26	0	0
140 以上	20	0.86	0	0	48	0.13	0	0
145 以上	3	0.13	0	0	14	0.04	0	0
150 以上	2	0.09	0	0	9	0.03	0	0
155 以上	3	0.13	0	0	5	0.01	0	0
160 以上	0	0	0	0	1	0	0	0
165 以上	0	0	0	0	1	0	0	0
170 以上	0	0	0	0	0	0	0	0
175 以上	0	0	0	0	0	0	0	0
180 以上	0	0	0	0	0	0	0	0
NG	0	0	0	0	4	0.01	0	0
計	2,313	100	750	100	35,991	100	2,265	100

表 2-1-3 M30B ラミナの産地及びロットごとの抽出詳細

産地	ロット No.	枚数	M30B の枚数	M30B の出現割合 (%)
高知県	1	4,077	263	7
	2	1,812	79	4
	3	2,264	217	10
	4	3,607	391	11
	5	3,493	172	5
	6	3,000	58	2
	7	5,861	231	4
鳥取県	1	2,313	25	1
熊本県	1	2,267	100	4
	2	2,201	121	6
	3	2,439	334	14
	4	2,657	274	10
計		35,991	2,265	6

### 2.1.3 試験体の採材位置

製造後の 9 層 9 プライ CLT 原板から、長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討のための含水率挙動に関する試験（3 章）、長期挙動データ導出のための荷重水準の決定のための静的曲げ試験（4.1 章）及び長期挙動データの収集のための曲げクリープ破壊試験（4.2 章）に用いる試験体をそれぞれ採取した。試験内容の詳細は各章に記載する。表 2-1-4 にそれぞれの試験体サイズと数量を示す。また、図 2-1-1 に原板からの各試験体の採材位置の概要を示す。初期試験に供する試験体は、各原板から 4 体ずつとした。長期挙動試験に供する試験体は、一つの原板の中で同じ荷重水準の無い配置とした。詳細な採材図は付録に記載する。

表 2-1-4 試験体サイズと数量

試験項目	試験体サイズ(mm)	試験体数
初期試験（静的曲げ試験）	5,990 × 300 × 270	16
長期挙動（曲げクリープ破壊試験）	5,990 × 300 × 270	30
含水率挙動の評価	2,995 × 300 × 270	2
	300 × 300 × 270	16
予備	5,990 × 300 × 270	4

