

平成29年度 委託プロジェクト研究
「森林資源を最適利用するための技術開発」
最終年度報告書

13405278

伐採木材の高度利用技術の開発

研究実施期間	平成25年度～平成29年度（5年間）
代表機関	国立研究開発法人 森林研究・整備機構
研究開発責任者	軽部 正彦
共同研究機関	銘建工業株式会社、 山佐木材株式会社、 協同組合レングス
	岡山県農林水産総合センター森林研究所、 株式会社オーシカ
	地方独立行政法人北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場
	鳥取県林業試験場、 広島県立総合技術研究所林業技術センター
	国立大学法人宇都宮大学、 国立研究開発法人建築研究所
普及・実用化支援組織	
研究開発責任者 連絡先	TEL : 029-829-8307 FAX : 029-874-3720 E-mail : karube@ffpri.affrc.go.jp

I-1. 年次計画

研究課題	研究年度					担当研究機関・研究室	
	25	26	27	28	29	機関	研究室
1. 積層接着技術の高度化 (1) 21110 原料供給事情に対応したラミナ構成の最適化技術の開発		ひき板評価技術開発				銘建工業株式会社	
		追跡記録技術開発				山佐木材株式会社	
		ひき板構成最適化技術の開発				協同組合レングス 岡山県農林水産総合センター森林研究所	
(2) 21120 空隙充填性接着剤を用いた接着技術の開発	空隙充填性接着剤の特性評価					国立研究開発法人森林研究・整備機構	
		接着試験方法の検討				地方独立行政法人北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場 株式会社オーシカ	
(3) 21130 接着性能評価技術の高度化	ひき板の性質の影響の解明					国立研究開発法人森林研究・整備機構	
		ひき板の形状の影響の解明 評価方法の開発と高度化				鳥取県林業試験場 協同組合レングス	
2. 強度性能評価技術の開発 (1) 22110 基礎的物性の発現機構の解明	ひき板の性質の影響の解明					国立研究開発法人森林研究・整備機構	
		ひき板の形状の影響の解明					
			強度発現機構解明				
(2) 22120 床利用のための実大強度性能評価手法の開発	ひき板の性質の影響の解明					広島県立総合技術研究所 林業技術センター	
		ひき板の形状の影響の解明					
			実大強度性能評価手法開発				
(3) 22130 壁利用のための実大強度性能評価手法の開発	ひき板の性質の影響の解明					国立大学法人宇都宮大学	
		ひき板の形状の影響の解明				国立研究開発法人建築研究所	
			強度性能評価手法開発				
(4) 22140 自由な断面設計のためのシミュレーションによる強度推定技術の開発		シミュレーション技術開発				国立研究開発法人森林研究・整備機構	

I-2. 実施体制

研究項目	担当研究機関・研究室		研究担当者
	機関	研究室	
研究開発責任者	森林研究・整備機構	構造利用研究領域	◎ 軽部正彦
1. 積層接着技術の高度化 (1) 21110 原料供給事情に対応したラミナ構成の最適化技術の開発	森林研究・整備機構	企画部	○ 塔村真一郎
	銘建工業株式会社		△ 孕石剛志 中島洋 正木祥子 渡部博(H28. 4-) 村田忠 枝野明人 大原明伸 小玉泰義(-H29. 3) 後任者道場隆(H29. 4-) 野上英孝(H29. 4-)
	山佐木材株式会社 協同組合レングス 岡山県森林研究所		
(2) 21120 空隙充填性接着剤を用いた接着技術の開発	森林研究・整備機構	企画部	△ 塔村真一郎
	北海道立林産試験場	複合材料領域 複合材料領域 生産技術グループ 生産技術グループ 生産技術グループ	宮本康太 末定拓時(H29. 4-) 宮崎淳子 松本和茂(H26. 4-) 大橋義徳(H26. 4-) 前任者林誠二郎 (-H27. 3)後任者坂井茂俊(H27. 4-) 前任者濱井篤志 (-H27. 3)後任者尾崎章一(H27. 4-) 池田尊子
	株式会社オーシカ	中央研究所 中央研究所 中央研究所	
(3) 21130 接着性能評価技術の高度化	森林研究・整備機構	複合材料領域 複合材料領域 複合材料領域 複合材料領域 木材加工・特性領域 木材加工・特性領域	△ 平松靖 高麗秀昭 松原恵理 末吉修三 藤原健 山下香菜
	鳥取県林業試験場	木材改質領域 木材利用研究室 木材利用研究室	上川大輔 川上敬介 桐林真人 大原明伸
	協同組合レングス		
2. 強度性能評価技術の開発	森林研究・整備機構	複合材料領域	○ 渋沢龍也
(1) 22110 基礎的物性の発現機構の解明	森林研究・整備機構	複合材料領域 複合材料領域 構造利用領域 構造利用領域 構造利用領域	△ 渋沢龍也 新藤健太 長尾博文 杉本健一 宇京斉一郎

		構造利用領域 構造利用領域 構造利用領域 構造利用領域 木材加工・特性領域 構造利用領域 構造利用領域 構造利用領域	原田真樹 加藤英雄 井道裕史 青木謙治(-H26.3) 久保島吉貴 (H26.4-) 小木曾純子 (H26.4-H28.3) 野田康信(H26.4-) 小川敬多(H29.4-)
(2) 22120 床利用のための実大強度性能評価手法の開発	広島県立林業技術センター	林業研究部 林業研究部 林業研究部	△ 藤田和彦 野沢浩二 渡辺靖崇
(3) 22130 壁利用のための実大強度性能評価手法の開発	宇都宮大学 建築研究所	地域連携教育研究センター 構造研究グループ	△ 中島史郎 荒木康弘
(4) 22140 自由な断面設計のためのシミュレーションによる強度推定技術の開発	森林研究・整備機構	複合材料領域 構造利用領域	△ 宮武敦 軽部正彦

(注1) 研究開発責任者には◎、小課題責任者には○、実行課題責任者には△を付すこと。

中課題番号	13405278	研究期間	平成25～29年度
大課題名	森林資源を最適利用するための技術開発		
中課題名	伐採木材の高度利用技術の開発		
代表機関・研究開発責任者名	国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所・軽部正彦		

I-1. 研究目的

本研究は、森林の温室効果ガス吸収機能を向上させ、気候変動に対応した循環型食料生産等を確立することを目指し、伐採木材の高度利用技術を開発するものである。

森林の温室効果ガス吸収機能を向上させるためには、森林整備に加えて、伐採木材をマテリアル（材料）として大量に長期間利用することが重要である。伐採木材を大量に使用可能な用途としては大型建築物の構造材があり、そのような要求に応え得る材料として、主としてひき板の繊維方向を直角に積層した新たな構造用木質パネル（以下CLTとする）がある。CLTは欧州で開発された製品で、製品の構成材料となるひき板（ラミナ）を並列することで単層を構成し、その単層の繊維方向を、合板と同じように、直交させながら積層接着したものである。しかし、CLTは我が国ではまったく新しい材料であるため、現時点では日本農林規格（JAS）が整備されておらず、また、建築基準法関連法規に位置づけられていないため、建築物の構造材として使用することができないのが現状である。

このため、本研究では、

1. 積層接着技術の高度化
2. 強度性能評価技術の開発

により、CLTを効率的に製造する技術を開発し、JAS規格や建築基準法関連法規等により求められる性能を確保する技術を開発することを目標とする。

その結果、

1. 伐採木材を大量に使用したCLTの効率的な製造、
 2. CLTが大型木造建築物に使用可能となる規格や関連法規等の整備の推進、
- が期待される。

I-2. 研究結果

多様な原料ひき板（ラミナ）の有効利用に関して、ラミナを曲げヤング係数によって区分して構成の異なるCLTを製造する技術（異等級構成）、異なる樹種を組み合わせる技術（異樹種構成）、厚さの異なるラミナを組み合わせる技術（非等厚構成）、及びラミナ厚さと幅の比が異なるラミナを組み合わせる技術（可変断面構成）を開発し、大型CLTパネルを製造可能な量産ラインにおいても、それらの技術が適用可能であることを明らかにした。

CLTの強度性能に関して、基礎的物性としてCLTの利用上重要な面内曲げ、面外せん断、引張り、（短柱としての）圧縮の各種性能と製造因子の関係を明らかにし、それら各種性能のうち、CLTの品質管理に用いられる重要な性能である面外曲げ性能の強度発現機構を解明した。床利用のための実大強度性能評価手法を開発した。床利用の場合、面外方向の荷重に対して、外層と内層の強度性能の差による層内せん断破壊が起こりやすくなるため、ラミナの直交層の幅と厚さの比に留意する必要があることを明らかにした。壁利用のための実大強度性能評価手法を開発し、一定範囲のラミナ寸法について、建築基準法告示の面内せん断強度の算定式、座屈強度の算定式がラミナの①異等級構成、②異樹種構成、③非等厚構成、④可変断面構成のCLTにも適用可能であることを明らかにした。さらに、ラミナの強度特性からCLTの各種強度特性を推定するための理論の妥当性について検証を行い、適用可能な理論を明らかにした。

上記の原料ラミナのCLTにおける使用箇所を2次元バーコード（QRコード）を用いて追跡する技術を開発してデータベースを作成し、原料ラミナの曲げヤング係数からCLTの各種強度特性値を推定するソフトウェアを開発した。また、開発したソフトウェアにおいては、乱数を用いて生成した仮想ラミナを用いたシミュレーション計算によるCLTの強度特性値の推定も可能とした。

CLTの接着や寸法安定性に関して、空隙充填性を有する接着剤として1液型ポリウレタン接着剤（PUR）を開発し、その性能が、現在CLTの製造に使用されている他の接着剤と同等であること、性能評価手法はPURの特性や他の接着剤との同等性を評価できることを明らかにした。また、安定的な接着性能の発現には、接着層中には空隙無しもしくは可能な限り小さく少ないことが望ましいが、適正な接着条件であることを前提として、0.3mm以下の空隙であれば充填接着となっても十分な強度の確保が可能であることを明らかにした。CLTの接着性能は、樹種やラミナ構成の影響を受けず、JAS規格に定められた基準を満たすことが可能であることを明らかにした。接着性能に問題がある場合は、剝離試験によりその問題が顕在化することを明らかにした。CLTの寸法安定性については、スギ板の木材繊維直交方向の含水率変化1%あたりの平均収縮率が0.25%程度であるのに対して6分の1～4分の1程度の値であること、ラミナの構成によらず5層5プライCLTは寸法安定性に優れていることを明らかにした。CLTの反りについては、外層ラミナの繊維方向に対して直交方向の反りが大きくなること、外層ラミナの樹種、ヤング係数、厚さが影響を与えること、ラミナの幅と厚さの比（幅厚さ比）が大きいCLT試験体は幅厚さ比が小さいCLT試験体に比べ反り量が少ないことを明らかにした。また、実大寸法のCLT（2,000mm×3,000mm）を裏表同じ温湿度条件に長期間暴露して矢高を計測した結果、対角線方向で最大で1.5mmの反りが生じたが、CLTの施工およびそれを使った構造体の使用において問題になる水準にないと考えられた。実際の施工・使用の状況を考慮し、試験体の片面を透湿防水シートで被覆しても、その反り量に大きな差はないことを明らかにした。

I-3. 今後の課題

原料ラミナの有効利用を現実のものとするために、異なる樹種、異なる厚さ、そしてラミナ厚さと幅の比が異なる場合のラミナの諸性能を活かす技術を、森林資源の実態と対応させて、適

正なラミナの等級区分方法とその構成方法をさらに検討していくことが必要である。強度性能に関しては、工業的生産時の品質管理およびそれを使った建築物等の構造体の設計用数値の導出を可能とするためには、実際の森林資源の状況を見定めつつ、検討の対象をさらに広げ、データの蓄積を図る必要がある。強度推定に関しては解析精度の向上が必要である。

接着性能や寸法安定性に関しては、他の樹種についてのデータ収集が必要である。ラミナに加えて木質材料を原料としたCLTの製造が検討されることも考えられることから、木質材料を使用したCLTの接着性能や寸法安定性、反りについて今後検討していく必要があると考えられる。

中課題番号	13405278	研究期間	平成25～29年度
小課題番号	21110	研究期間	平成25～29年度
契約課題名	伐採木材の高度利用技術の開発		
中課題名	積層接着技術の高度化		
小課題名	原料供給事情に対応したラミナ構成の最適化技術の開発		
小課題代表研究機関・研究室・研究者名	銘建工業株式会社・孕石剛志		
共同研究機関・研究室・研究者名等	銘建工業株式会社・渡部博、 山佐木材株式会社・村田忠、 協同組合レングス・大原明伸、 岡山県農林水産総合センター森林研究所・ 道場隆、野上英孝		

1) 研究目的

構造用木質パネル（以下CLT）は、木材を大量に使用できる新しい木質材料として期待されているが、その期待に応えるためには、製造においては性質や径級が異なる原木から供給される様々な性質と形状を持つ原料ひき板を有効に利用すること、また、利用においては用途が想定される構造物の床材や壁材として要求される性能を確保することが求められる。しかしながら、CLTの諸性能にはひき板の性質や形状が大きな影響を与えること、また、床材と壁材では要求される性能が異なることが知られている。

そこで、本研究では変動する原木供給事情に対応しながら構造材料として要求される性能を確保するための最適ひき板（ラミナ）の構成を導き出す技術及び製造に用いた種々の原料ひき板の様々な情報を追跡し記録する技術を開発する。

2) 研究成果

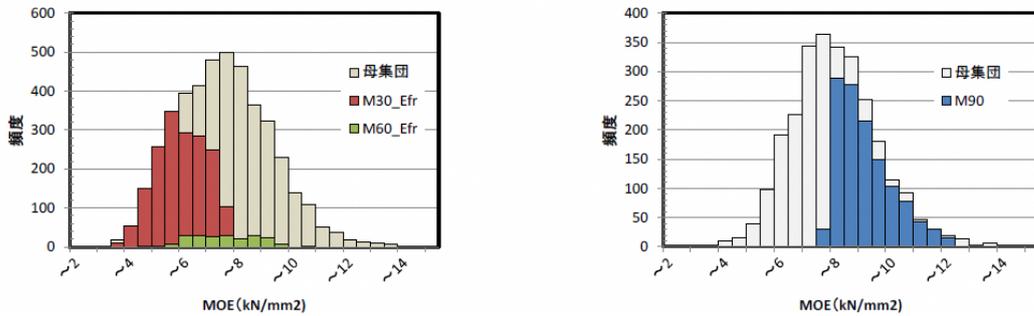
原料ひき板を曲げヤング係数によって区分し、ラミナを有効に組み合わせることで構成の異なるCLTを製造する技術、同様に異なる樹種を組み合わせる技術、厚さの異なるラミナを組み合わせる技術、そしてラミナ厚さと幅の比が異なる場合のCLTの諸性能を明らかにし、大きなCLTパネルの製造可能な量産ラインにおいても適用可能であることを確認することができた。

これらのデータを取りまとめることで、「2種以上のひき板を用いてCLTを製造する際の、適正なひき板の等級区分法とその構成方法を開発する。」という当初の目的を達成できた。

3) 成果活用における留意点

原料ひき板を曲げヤング係数によって区分し、それによりラミナを有効に組み合わせることで構成の異なるCLTを製造する技術は、異なる樹種、異なる厚さ、そしてラミナ厚さと幅の比が異なる場合のラミナおよびCLTの諸性能を活かす技術(①～④参照)と合わせて行うことが、重要である。

① 原料ひき板母集団から、曲げヤング係数によって必要なラミナを選別 (H25)

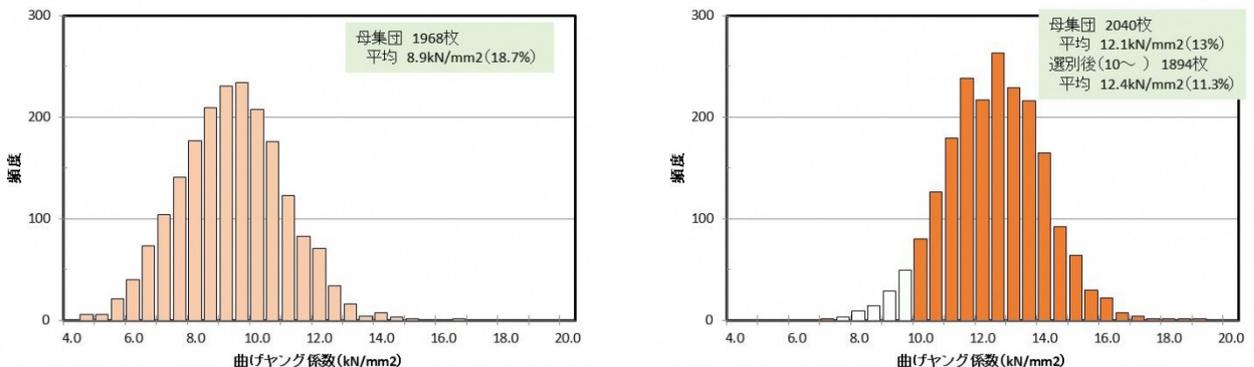


M30・M60ひき板採取母集団の曲げヤング係数分布 M90ひき板採取母集団の曲げヤング係数分布
図1 ひき板の曲げヤング係数分布

表1 M30・M60・M90 各選別ラミナの材質・強度性能

		曲げ				圧縮			引張り				選別MOE	
		密度 kg/m ³	Efr N/mm ²	MOR N/mm ²	含水率 %	密度 kg/m ³	OS N/mm ²	含水率 %	密度 kg/m ³	Efr N/mm ²	TS N/mm ²	含水率 %	母集団 kN/mm ²	選別ラミナ kN/mm ²
M30	平均値	400	5792	33.1	10.9%	398	28.8	11.7%	401	5885	24.0	13.0%	7.72	5.62
	最大値	498	8348	42.0	13.3%	463	36.9	13.8%	466	7564	35.8	14.7%	14.39	7.75
	最小値	303	3565	24.6	9.8%	359	23.7	10.3%	350	4680	16.4	11.5%	3.55	3.10
	標準偏差	44.2	1083	4.65	0.01	26.5	3.02	0.01	28.7	766	5.34	0.01	1.55	0.91
	変動係数	11.1%	18.7%	14.0%	7.8%	6.6%	10.5%	8.1%	7.2%	13.0%	22.3%	7.0%	20.1%	16.2%
M60	平均値	423	6933	39.1	9.7%	417	31.6	10.1%	417	7453	27.9	11.5%	7.17	7.17
	最大値	530	8587	50.8	11.3%	483	39.6	11.4%	464	9539	41.9	12.5%	13.88	10.43
	最小値	366	4924	25.6	8.7%	360	23.8	9.3%	359	5863	17.2	10.4%	2.99	4.38
	標準偏差	39.3	894	5.88	0.01	32.8	4.30	0.01	27.6	1058	6.31	0.00	1.72	1.13
	変動係数	9.3%	12.9%	15.1%	5.7%	7.9%	13.6%	5.9%	6.6%	14.2%	22.7%	4.0%	23.9%	15.7%
M90	平均値	432	8488	38.6	11.6%	430	35.2	11.1%	432	8645	26.1	12.0%	同上	8.76
	最大値	483	11207	56.2	12.9%	514	42.0	13.2%	509	12076	40.1	14.3%		11.91
	最小値	334	5924	28.2	10.6%	333	28.0	9.7%	351	7272	19.0	11.0%		7.42
	標準偏差	28.4	931	6.11	0.01	33.0	3.69	0.01	35.8	973.4	5.96	0.01		1.00
	変動係数	6.6%	11.0%	15.8%	5.2%	7.7%	10.5%	5.9%	8.3%	11.3%	22.8%	6.1%		11.4%

② 異樹種原料ひき板母集団から、曲げヤング係数によって有効活用できるラミナを選別 (H26)



M30スギひき板採取母集団の曲げヤング係数分布 M120ヒノキひき板採取母集団の曲げヤング係数分布
図2 ひき板の曲げヤング係数分布

表2 選別ラミナの材質・強度性能

ラミナ	曲げ				圧縮			引張り				
	密度	Efr	強さ	含水率	密度	強さ	含水率	密度	Efr	強さ	含水率	
スギ M30	平均	377.5	8.6	40.3	11.2%	382.8	31.1	10.4%	370.9	8.5	30.1	11.3%
	最大	425.9	12.2	58.5	15.9%	455.3	44.6	12.1%	417.0	12.0	43.4	13.1%
	最小	318.0	5.18	26.9	10.2%	329.9	25.64	9.7%	332.5	6.2	13.2	10.4%
	SD	25.48	1.78	7.01	0.01	30.78	3.69	0.01	22.25	1.49	7.40	0.01
	CV	6.8%	20.6%	17.4%	8.5%	8.0%	11.9%	5.2%	6.0%	17.5%	24.5%	5.5%
	n	35				33			32			
ヒノキ M120	平均	478.8	12.5	64.6	10.0%	479.4	43.8	9.3%	473.8	13.4	45.2	9.7%
	最大	545.7	15.2	79.1	11.4%	559.6	53.6	10.2%	517.1	16.8	65.0	11.0%
	最小	409.1	9.74	33.9	9.3%	418.0	37.13	8.7%	426.2	10.6	23.6	8.8%
	SD	32.58	1.39	8.27	0.00	35.38	3.69	0.00	26.79	1.58	12.84	0.00
	CV	6.8%	11.1%	12.8%	3.9%	7.4%	8.4%	3.4%	5.7%	11.8%	28.4%	5.0%
	n	39				32			31			

③ 厚さの異なる原料ひき板から、曲げヤング係数によってラミナ選別 (H27)

表3 選別ラミナの曲げヤング係数
(単位: GPa)

	外層用 (M60)	内層用 (M30)
平均値	7.41	5.04
標準偏差	0.68	0.66
最小値	6.00	3.01
最大値	9.01	5.99
変動係数	9.2%	13.0%
標本数	1000	1302

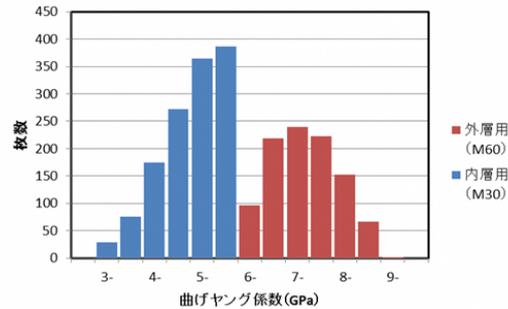


図3 ひき板の曲げヤング係数分布

④ 幅の異なる原料ひき板母集団から、曲げヤング係数によって有効活用できるようにラミナ選別 (H28)

表4 ラミナ幅別の曲げヤング係数分布と等級区分

ラミナ幅	62mm幅用				87.5mm幅用				112mm幅用			
	全体	使用	下位M30	上位M90	全体	使用	下位M30	上位M90	全体	使用	下位M30	上位M90
区分値 (kN/mm ²)	-	-	~8.32	8.33~	-	-	~8.19	8.20~	-	-	~8.19	8.20~
平均値 (kN/mm ²)	8.42	7.90	7.20	9.60	8.17	8.26	7.23	9.16	7.10	7.64	7.01	8.99
最小値 (kN/mm ²)	3.75	3.75	3.75	8.33	3.92	4.54	4.54	8.20	3.43	4.30	4.30	8.20
最大値 (kN/mm ²)	19.93	12.72	8.32	12.72	12.87	12.87	8.19	12.87	11.69	11.69	8.19	11.69
ラミナ数	1077	781	551	230	1663	1467	685	782	1333	795	540	255
変動係数	18.8%	17.5%	11.3%	9.7%	15.0%	14.7%	10.2%	8.1%	18.2%	15.6%	10.8%	7.9%

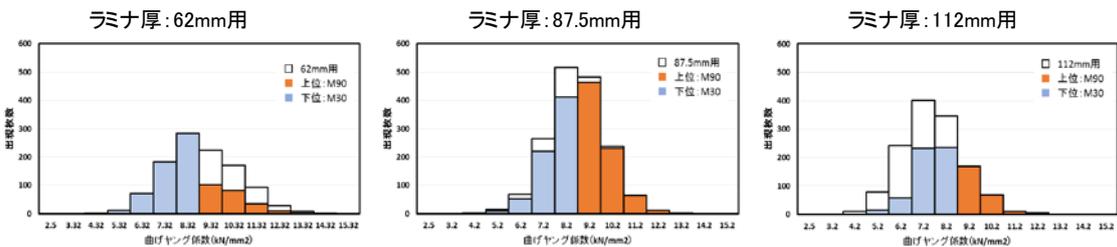


図4 ラミナ幅別の曲げヤング係数分布と等級区分

最終年度は、大きなCLTパネルの製造可能な量産ラインにおいてもこれらの技術が適用可能であることを確認したが、この際に製造側から次のような指摘があった（H29）。

- ・ 工場の製造設備には、あらかじめ想定されたラミナのサイズ等があり、その範囲外のラミナでCLTのような大きな部材を生産するには、各工程で格段の注意が必要である。
- ・ 特に幅の狭いラミナは、幅の広いラミナに比べて「軽い」「反り・曲がりし易い」ことから、ラミナ搬送ラインから脱落する、プレス堆積工程でラミナが平らに横並びしない、といった不具合が起りやすい。
- ・ 幅の狭いラミナは幅の広いラミナに比べて横に並ぶ枚数が多くなり、製造パネルの伸び（規定ラミナ幅×本数から算出されるパネルの想定長さに対して実寸法が長くなる）が大きい。
- ・ 幅の狭いラミナ、厚さの薄いラミナは、幅が広く厚いラミナに比べ、同じ体積、面積のCLT製造に必要なラミナ枚数が多くなるため、切削工程など、みかけの材長によって生産性が左右される工程では不利となる。

最後に、5カ年の事業で製造したCLTの製造仕様を表5に示す。

表5 CLT製造パネルの仕様の一覧表

年度	樹種	幅はぎ接合の有無	平行層		直交層		構成	寸法				数量	備考																
			ラミナ厚	ラミナ幅	ラミナ厚	ラミナ幅																							
H29	スギ	無	25	105	25	112	5層5ブライ	125	×	2100	×	8040	1	伐採1															
													1	伐採2															
													1	伐採3															
													2	伐採4,伐採5															
		有	25	112	25	112	5層5ブライ	125	×	4000	×	2000	1	①															
													1	②															
													1	③															
													1	④															
													2	⑤,⑦															
													1	⑥															
H28	スギ	無	25	87.5	25	112	5層5ブライ	125	×	2187.5	×	4030	3	D533-D535															
													4	D536-D539															
													3	D540-D542															
													1	D543															
													2	D544,D545															
													1	D546															
													有	25	112	25	112	3層3ブライ	75	×	2000	×	4012	1	D547				
																								1	Y反り1				
		有	25	112	25	112	5層5ブライ	125	×	4000	×	2000	1	Y反り2															
													1	Y反り2															
H27	スギ	有	20	102	25	102	3層3ブライ	125	×	2000	×	4000	1	Y001															
													1	Y002															
													1	Y003															
													2	Y004,Y005															
													2	Y006,Y007															
													1	Y008															
													1	Y009															
													2	Y010,Y012															
		無	25	102	25	102	5層5ブライ	125	×	2000	×	4000	×	2000	1	Y011													
															1	Y013													
															1	Y014													
															2	Y015,Y016													
															2	Y017,Y018													
															1	Y019													
															有	30	102	25	102	5層5ブライ	125	×	2000	×	4000	×	2000	2	A933,A934
																												1	A935
6	A936-A941																												
1	A942																												
1	A943																												
1	A944																												
3	A945-A947																												
1	A948																												
H26	ヒノキ/スギ	無	25	102	25	102	3層3ブライ	75	×	2040	×	6018	2	A933,A934															
							3層4ブライ	100	×	2040	×	6018	1	A935															
							5層5ブライ	125	×	2040	×	6018	6	A936-A941															
							5層7ブライ	175	×	2040	×	6018	1	A942															
							3層3ブライ	75	×	6018	×	2040	1	A943															
							3層4ブライ	100	×	6018	×	2040	1	A944															
							5層5ブライ	125	×	6018	×	2040	3	A945-A947															
							5層7ブライ	175	×	6018	×	2040	1	A948															
H25	スギ	無	25	102	25	102	5層5ブライ	125	×	2030	×	6010	6	A191-A196															
							7層7ブライ	175	×	2030	×	6010	3	A197-A199															
							×	×	2030	×	6010	1	A201																
							×	×	6010	×	2030	1	A202																
							×	×	2030	×	6010	1	A200																
							×	×	6010	×	2030	1	A203																

4) 今後の課題

今後の課題として、以下が挙げられる。

- 異なる樹種、異なる厚さ、そしてラミナ厚さと幅の比が異なる場合のラミナの諸性能を活かす技術を検討したが、実際の森林資源の実態を踏まえ、原木丸太からより高い価値を生むひき板の生産と活用の体系として、どのようにまとめて行くか。
- 開発したラミナを有効に組み合わせて構成の異なる CLT を製造する技術を、解明した CLT 板としての諸性能と合わせて、国内の森林資源の有効活用に向けてどのように組み合わせて CLT 製品としてまとめて行くか。
- 特に、2種以上の異なる形質を持つひき板を用いて CLT を製造する際に、ひき板の等級区分や積層、構成方法を最大限に活かす CLT の実用製造ラインの開発。
- 森林資源の有効活用につながる CLT 製造技術開発は、CLT が主に建築物等大型構造用の材料であることから日本農林規格と建築基準法等関連法規制との整合とそれぞれへの適合が重要であり、研究開発や技術・制度の検討において公的研究機関が果たすべき役割は大きい。

中課題番号	13405278	研究期間	平成25～29年度
小課題番号	21120	研究期間	平成25～29年度
契約課題名	伐採木材の高度利用技術の開発		
中課題名	積層接着技術の高度化		
小課題名	空隙充填性接着剤を用いた接着技術の開発		
小課題代表研究機関・研究室・研究者名	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・研究評価科・塔村真一郎		
共同研究機関・研究室・研究者名等	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・複合化研究室・宮本康太、未定拓時、北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場・宮崎淳子、松本和茂、大橋義徳、株式会社オーシカ・坂井茂俊、尾崎章一、池田尊子		

1) 研究目的

CLTでは、ひき板を直交積層するため、ひき板及び層間に空隙が生じやすくなり、集成材等に用いられている従来型接着剤では、接着性能が低下する可能性がある。これを解決するために、接着剤層が厚くなっても接着性能の低下が少ない空隙充填性を有する接着剤を用いることが必要である。空隙充填性接着剤としては1液型ポリウレタン接着剤が考えられるが、そのような新しい接着剤を構造用木質材料のJASに適用可能かどうか判断するための接着剤の評価方法も確立されていない。

そこで本小課題では、空隙充填性を有する接着剤を開発し、その接着剤の基礎物性評価を行うとともに耐熱性・耐クリープ性等の各種性能評価試験を行い、構造用途に使われるCLTのための接着剤の評価方法を確立する。

2) 研究成果

空隙充填性接着剤として、数種の1液型ポリウレタン樹脂接着剤（PUR）を開発し、既存の木質材料用接着剤との比較を通じて、接着剤の基礎物性、接着強さ、耐水・耐熱性、耐クリープ性能等を評価するとともに、空隙を有するCLT試験体を用いた実証試験を行った。その結果、適正な接着条件であることを前提として、0.3mm以下の空隙であれば充填可能であることが示唆された。しかしながら安定的な接着性能の発現には、空隙無しもしくは可能な限り小さい方が望ましいことが確認された。また、PURは一般にその樹脂の構造上、耐熱性や耐クリープ性が懸念されるものの、新規開発したPURは接着剤自体の性能評価では他の接着剤と同等の性能を示した。また、これらの検証に用いた評価手法は、PURの特性や他の接着剤との同等性を評価できることが明らかとなった。以下に成果の概要を示す。

空隙充填性接着剤として1液湿気硬化型ポリウレタン接着剤3種（PUR-1、PUR-2、PUR-3）を試作し、これらの基礎物性の評価を目的として接着剤の硬化挙動および熱的特性を測定

した。比較対象として、市販の1液湿気硬化型ポリウレタン接着剤(PUR-C)、主として集成材製造に使用される水性高分子-イソシアネート系接着剤(API)およびレゾルシノール系樹脂接着剤(PRF)を供試した。各接着剤の硬化挙動を比較するために、動的粘弾性測定装置を用いて硬化過程における力学的性質の経時変化を測定した。その結果、PUR-2、PUR-3のゲル化時間(接着剤の流動性が失われる時間で、硬化時間の指標とされている)は、PUR-Cと近いことが示された。また硬化した接着剤の力学的性質について、温度による影響を調べた結果、PUR-2およびPUR-3は、PUR-CやAPI、PRFと比較して耐熱性が低いことが示唆された(図1)。

これら基礎物性評価結果を基にして耐熱性を向上させたPURを試作し、木材間の空隙厚さの異なる場合の接着性能について、他の既存の接着剤と合わせて評価を行った。2種類の試作PUR(PUR-3、PUR-4(耐熱性向上型))、PRFおよびAPIの空隙充填性能を評価した。標準塗布量において数段階の空隙厚さを設定して試験片を調製し、非塗布面における接着剤転写率および圧縮せん断強さを測定した。その結果、PUR-3では転写率が他より高く、高い充填性能が確認された。一方、圧縮せん断強さを比較すると、転写率が高いものでも圧縮せん断強さは他と同程度であることなど、空隙厚さに対する空隙充填性能の特徴が明らかとなった(図2)。

試作PUR(PUR-3、PUR-4)および市販PUR(PUR-C)について、カバ材を接着した試験片による圧縮せん断試験を行い、温度環境を常温から高温まで変化させて圧縮せん断強さを測定することで、接着剤の耐熱性を評価した。その結果、空隙が0mmの場合は、中温度域(80~120℃)の範囲で、試作PURはPRFおよびAPIと異なる耐熱挙動を示したが、それ以上の高温度域ではほぼ同様の挙動を示した(図3)。また空隙が0.5mmある場合の試験体においては、全ての温度域で試作PURはPRFやAPIと耐熱特性が異なることが明らかとなった。

試作PUR(PUR-4)について長期荷重の負荷による変形挙動を調べるため、接着剤の耐クリープ性を評価した。構造材に用いられる木材用接着剤についての評価方法である欧州規格(EN15416-3)に準じてクリープ試験を行った。スプルー材(厚25×幅50×長さ600mm)2枚をPUR-4、API(いずれも評価試験体)、PRF(対照試験体)で積層接着した積層材を試験体とした。なお、接着層の厚さは 0.3 ± 0.1 mmとした。3等分点4点曲げ試験で、スパン中央で変形量を計測した。2つの温湿度条件(条件①: $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $85 \pm 5\% \text{RH}$ 7日間、条件②: $45 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $40 \pm 5\% \text{RH}$ 7日間)を繰り返し、26週間試験を行った。図4にPUR-4、APIで接着した評価用試験体およびPRFで接着した対照試験体における代表的なクリープ変形量の経時変化を示す。PUR-4およびAPI評価用試験体の変形量は、PRF対照試験体の変形量よりも大きく、PUR-4、APIで接着した積層材は、PRFで接着した積層材よりも耐クリープ性が低いことが示された。しかしながら、得られた変形量から算出された26週後の相対クリープ値の比の平均値 $R_c \text{ mean}(26 \text{ weeks})$ は、PUR-4で1.08となり、欧州の構造用PURの規格の基準値1.12以下となったことから、試作PURは欧州における構造用接着剤の耐クリープ性能の基準を満たす性能を有することが明らかになった。また、APIの $R_c \text{ mean}(26 \text{ weeks})$ は1.10で、PUR-4とほぼ同じであったことから、試作PURが現在CLTの製造に使用されているAPIと同程度の耐クリープ性を有することが明らかになった。また、ASTM D2559に規定されたクリープ試験結果においては、試作PURとPRF、APIとの間に差異は見られず、同程度の性能を示すことが明らかとなった。

試作PUR(PUR-5)、API、PRFを用いて、ラミナ間に空隙のあるスギCLTを製造してその接着性能を調べた。3層3プライ、 $90 \times 900 \times 900 \text{ mm}$ のスギCLTを製造した。外層はすべて30mm

厚のラミナを用い、内層には30mm厚ラミナと薄いラミナ（0.1mm、0.3mm、0.5mm切削を各1枚、以下それぞれ-0.1mm、-0.3mm、-0.5mmとする）を用いた。図5にラミナの厚さに対する剥離率を示す。ギャップなし、-0.1mmでは、いずれの接着剤でも剥離率は低く、剥離はわずかしか発生しなかった。PURを用いたCLTでは、-0.3mm、-0.5mmでも剥離率は低く、ギャップなしのAPI、PRFの剥離率と同等の値を示した。したがって、本課題で開発されたPURは高い空隙充填性を有することが明らかになり、CLTのような直交積層のためにラミナ間の空隙が解消されにくい材料の製造への適用性が示された。

表1 供試接着剤の概要

接着剤	記号	粘度(Pa・s)	備考
1液型ポリウレタン樹脂	PUR-1	150	試作 高粘度型
	PUR-2	42	試作
	PUR-3	17	試作 耐水性
	PUR-4	10	試作 耐熱性
	PUR-5	11	試作 高耐熱性
	PUR-C	24	市販 CLT用 (欧州製)
レゾルシノール系樹脂	PRF	7 (主剤)	市販 集成材・CLT用
水性高分子-イソシアネート系	API	18	市販 集成材・CLT用

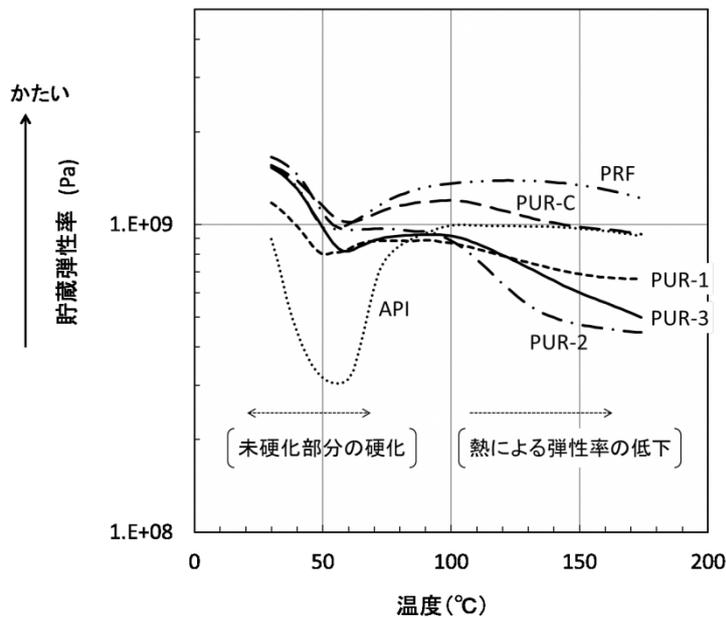


図1 室温で硬化した接着剤の硬化物における貯蔵弾性率の温度変化 (2°C/minで室温から180°Cまで昇温、窒素気流下、1Hzで測定)

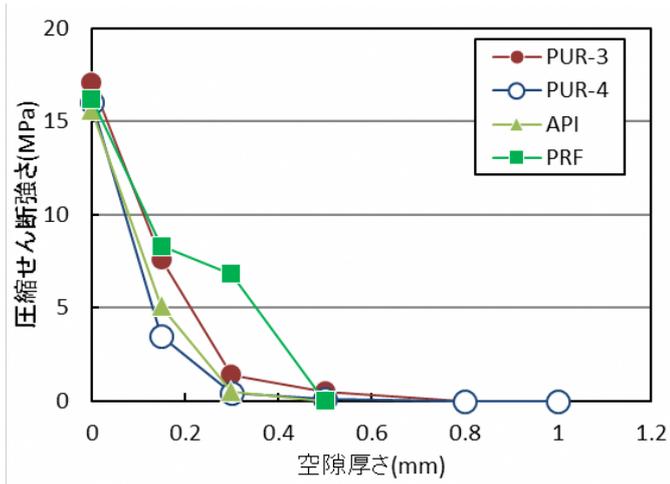


図2 各接着剤における空層厚さと圧縮せん断強さの関係

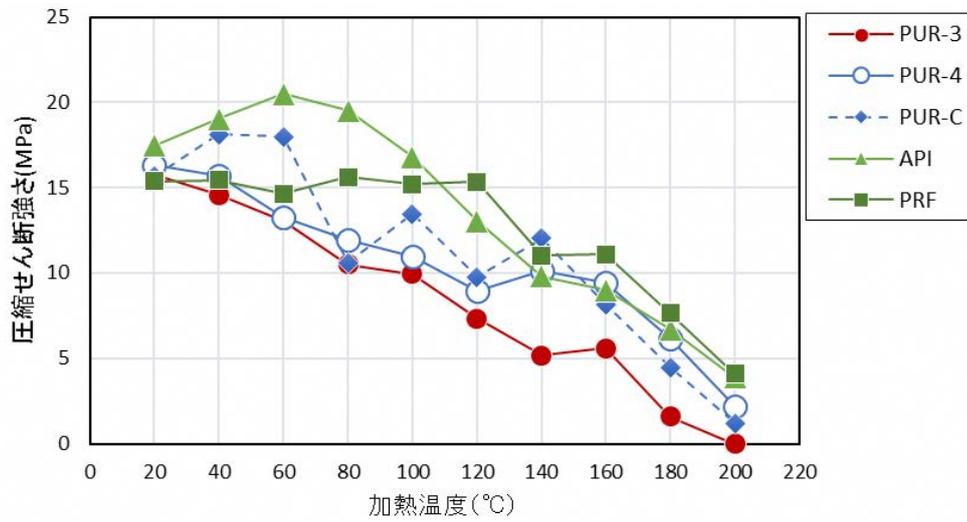


図3 各接着剤における温度と圧縮せん断強さの関係（空層無し）

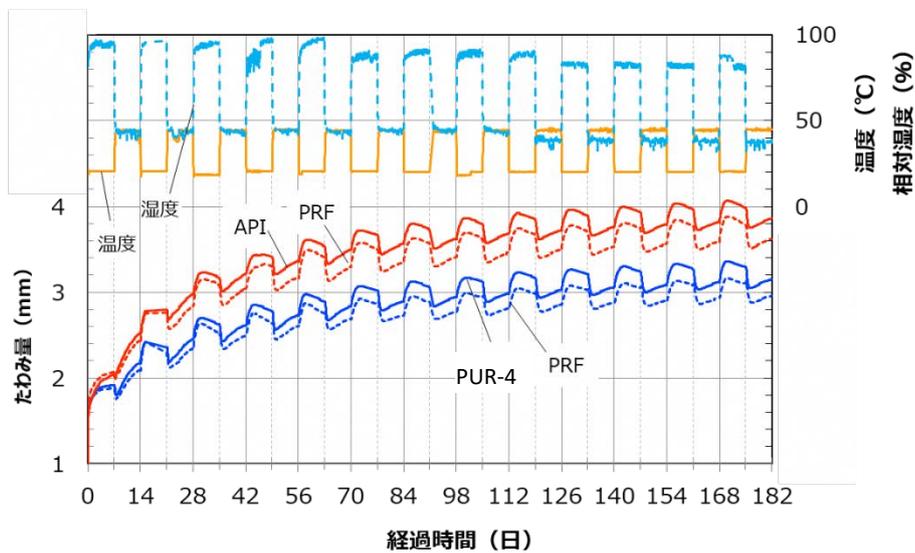


図4 EN15416-3によるクリープ変形量の経時変化

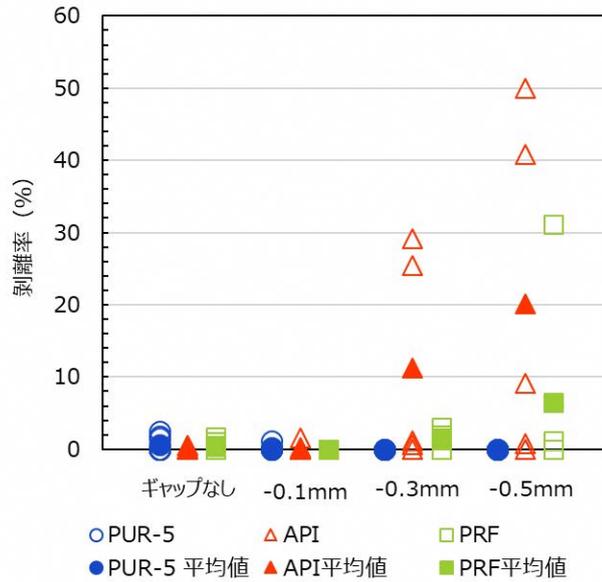


図5 内層に厚さの異なるラミナを用いたCLTの減圧加圧剥離試験の結果

3) 成果活用における留意点

本課題で得られた成果から、空隙充填性を有する1液型ポリウレタン樹脂接着剤（PUR）のCLTへの適用性が示されたが、安定的な接着性能を発現するには接着剤の性能や要件に加え、ラミナ厚さ等の管理が重要となる。また、PURは湿気硬化型であることから、実際のCLT製造においては製造場所の温湿度管理および被着材であるラミナの水分管理について他の接着剤以上に注意する必要がある。

4) 今後の課題

特になし。当初目標は達成された。

中課題番号	13405278	研究期間	平成25～29年度
小課題番号	21130	研究期間	平成25～29年度
契約課題名	伐採木材の高度利用技術の開発		
中課題名	積層接着技術の高度化		
小課題名	接着性能評価技術の高度化		
小課題代表研究機関・研究室・研究者名	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・積層接着研究室・平松靖		
共同研究機関・研究室・研究者名等	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・チーム長（新材料開発担当）高麗秀昭、組織材質研究室・藤原健、山下香菜、木材保存研究室・上川大輔、積層接着研究室・松原恵理、複合材料研究領域・末吉修三、秦野恭典、鳥取県林業試験場・木材利用研究室・川上敬介、桐林真人、協同組合レングス・大原明伸		

1) 研究目的

CLTのように新しい木材接着製品については信頼性（製品が与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たすことができる性質）を向上させることが普及へのカギとなる。CLTの接着層には、ひき板を直交積層することによる膨潤・収縮異方性の差によって、大きな応力が発生することが考えられる。しかし、この応力がCLTの寸法安定性や接着耐久性に与える影響を評価する手法は確立されていない。そこで、本小課題では、CLTの信頼性向上を図るために、寸法安定性、接着強さ、耐水性、耐熱性試験を実施して、その寸法変化及び接着性能を実験的に明らかにし、これらのデータを総合的に解析することで、寸法安定性及び接着性能に関する評価技術を高度化する。

2) 研究成果

①接着性能

スギ異等級構成、ヒノキースギ異樹種・異等級構成、スギ異等級・非等厚構成、スギ異等級・可変断面構成（小幅ラミナを使用）5層5プライCLTのそれぞれの大板から厚さは125mmのままで、75×75mmの接着性能試験体を採取し、初期状態での剝離を測定した後、水中浸せき剝離試験を4回繰り返した。また煮沸剝離試験を実施した。その結果、CLTの接着性能は、樹種やラミナ構成の影響を受けず、JAS規格に定められた基準を満たすことが可能であることがわかった。図1中のスギ異等級構成CLTについては、プレス装置から出てきた直後、すなわち接着剤が十分硬化する前にCLTを吊り下げて測定を行ったため、接着性能が低下したと考えられる。このように接着性能に問題がある場合は、剝離試験により顕在化すること、簡易

な水中浸せき剥離試験の繰り返し処理により、煮沸試験と同等の促進劣化が可能であると考えられた (図1)。

②寸法安定性

構成が異なる5層5プライ実大CLT (表1) から、強軸に平行及び弱軸に平行な長さが940mmで幅280mm、厚さ125mmの試験体をそれぞれ4体採取し、初期寸法及び質量を測定した。この初期寸法及び質量を寸法変化率及び質量変化率の基準として用いた。各2体を空調設備のない室内に、その他の各2体を恒温恒湿室 (気温20℃、相対湿度45%) に静置し、4週後及び8週経過後に試験体の長さ、厚さ及び質量をマイクロメータ及び電子天秤を用いて測定した。その後、恒温恒湿室内の4体を気温20℃、相対湿度75%の恒温恒湿室に移して4週経過後及び8週経過後に寸法及び質量の測定を行い、再び相対湿度45%の恒温恒湿室に移した。以後、8週ごとに相対湿度45%と75%の恒温恒湿室を移動させながら、4週ごとに寸法測定を行った。室内に静置した試験体についても4週ごとの測定を継続して行った。

スギ異等級構成CLT (Mx90) においては、相対湿度が上昇すると試験体の質量は増加し、相対湿度が低下すると試験体質量が減少した。それにもなると試験体の長さ及び厚さは膨潤または収縮した。試験体の質量変化率と寸法変化率の関係を、室内の試験体と恒温恒湿内の試験体とで比較すると、両者に明確な違いは見いだせなかった。そこで、室内の試験体と恒温恒湿室内の試験体での測定結果を合わせて、質量変化率と寸法変化率との関係を求めた (図2)。強軸方向の試験体の長さ y と厚さ x についてそれぞれ $y=0.04x$ ($r^2=0.92$)、 $y=0.25x+0.01$ ($r^2=0.97$) の回帰式を得た。また弱軸方向については、長さ y 及び厚さ x それぞれについて $y=0.06x$ ($r^2=0.95$)、 $y=0.28x+0.02$ ($r^2=0.98$) が得られた。

表層にヒノキを使用したヒノキスギ異樹種構成のCLT (Mx120) については、質量変化率と寸法変化率との関係から求めた質量変化1%あたりの寸法変化率は、強軸方向長さで0.03%、弱軸方向長さで0.04%と、スギ異等級構成CLT (0.04%~0.06%) とほぼ同程度で、寸法安定性が高いことが示唆された。厚さについては、強軸方向試験体で0.23%、弱軸方向試験体0.24%とほぼ両試験体で同程度の値を示した。

各層に幅はぎ接着を施した全層が25mm厚のラミナで構成された等厚構成CLTと同様に幅はぎ接着をした表層20mm厚、中層30mm厚、内層25mm厚のラミナで構成された非等厚構成CLTにおいて、質量変化率と寸法変化率との関係から求めた質量変化1%あたりの寸法変化率は、非等厚構成のCLT試験体では、強軸方向と弱軸方向の差が等厚構成のCLT試験体よりも小さい傾向にあった。

ラミナ幅が平行層87.5mm、直交層84mmで構成されたCLTでは、質量変化1%あたりの寸法変化率は、強軸方向0.04%、弱軸方向0.06%であった。

これら構成が異なる5種類のCLTを比較すると、質量変化率1%あたりの強軸方向の寸法変化率は構成によらず0.03~0.04%とほぼ一定であった。また、弱軸方向の寸法変化率は強軸方向に比べてわずかに大きい傾向にあり、0.04~0.07%の範囲にあった。いずれの構成においても、スギの板目方向の含水率変化1%あたりの平均収縮率が0.25%程度であるのに対して、6分の1~4分の1程度の値であることから、構成によらず5層5プライCLTは寸法安定性に優れていると言える。

③反り

③-1 柱状CLT試験体の反り試験

品質管理や施工に大きな影響を与える「反り」の特性を明らかにするため、ひき板の性質やラミナ構成の異なるCLT実大材から切り出した強軸方向と弱軸方向の試験体について、二室型環境試験器を用いて表裏を異なる温湿度条件に曝露して反りを発生させ、その経時変化を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 同じ長さの試験体では強軸方向に比べて弱軸方向の反りが大きい。
- (2) ヒノキ・スギ異樹種異等級CLT試験体はスギ異等級構成CLT試験体に比べ、反り量が少ない。
- (3) スギ非等厚構成CLT試験体はスギ等厚構成CLT試験体に比べ、弱軸方向試験体で反り量が少ない。
- (4) 幅はぎ接着がない場合、ラミナの幅と厚さの比（幅厚さ比）が大きいCLT試験体は、幅厚さ比が小さいCLT試験体に比べ反り量が少ない。

③-2 実大寸法CLT試験体の屋内暴露による反り試験

実際の施工環境下における実大材の反りの発生状況を把握するため、実大寸法のCLT（2,000mm×3,000mm）を作製し、協同組合レンダス工場内に設置し、裏表同じ温湿度条件に長期間暴露して矢高を計測した。その結果、対角線方向で最大で1.5mmの反りが生じたが、実際の建物に施工された場合においても問題になるレベルではないと考えられた。また、試験体の片面を透湿防水シートで被覆しても、その反り量に大きな変化は認められなかった。

3) 成果活用における留意点

CLTの接着性能については樹種、ラミナの等級、構成が異なっても十分な性能が得られることが明らかになったが、接着条件や硬化時間を考慮した製造を行うことが重要である。寸法安定性、反りについては一定の温湿度、気候条件での結果であることに留意しつつ、それらを基礎的なデータとしてCLTパネルの納まりや施工方法の検討時の参考とされたい。

4) 今後の課題

本プロジェクトでは対象としなかった国産材、特にカラマツのように乾燥時にねじれが生じるような樹種についてのデータ収集が必要である。また、ひき板に加えて木質材料を原料としたCLTの製造が検討されることも考えられることから、木質材料を使用したCLTの接着性能や寸法安定性、反りについて今後検討していく必要があると考えられる。

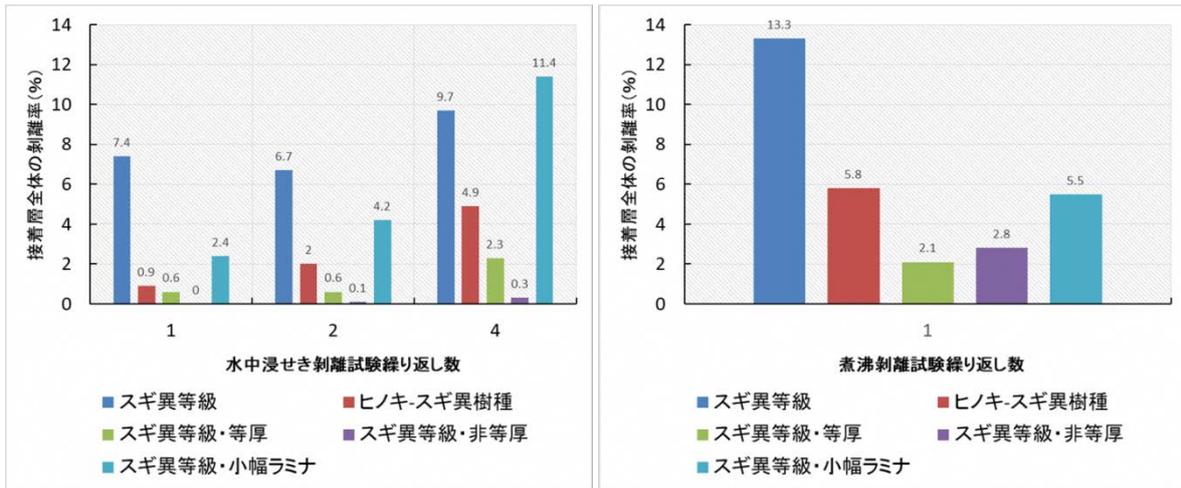


図1 各種構成のCLTの接着剥離試験結果

表1 試験体の構成及び特徴

記号	構成	各層のラミナの厚さ(mm)	特徴
DS13	異等級 等厚	25-25-25-25-25	全層スギ:MX90
DS14	異樹種 等厚	25-25-25-25-25	外層ヒノキ、内層スギ:Mx120
DS15-1	異等級 等厚	25-25-25-25-25	全層スギ:Mx60 幅はぎ接着
DS15-2	異等級 非等厚	20-30-25-30-20	全層スギ:Mx60 幅はぎ接着
DS16	小幅ラミナ* 等厚	25-25-25-25-25	全層スギ:Mx60

* : 平行層の幅 87.5 mm、直交層の幅 84.0mm

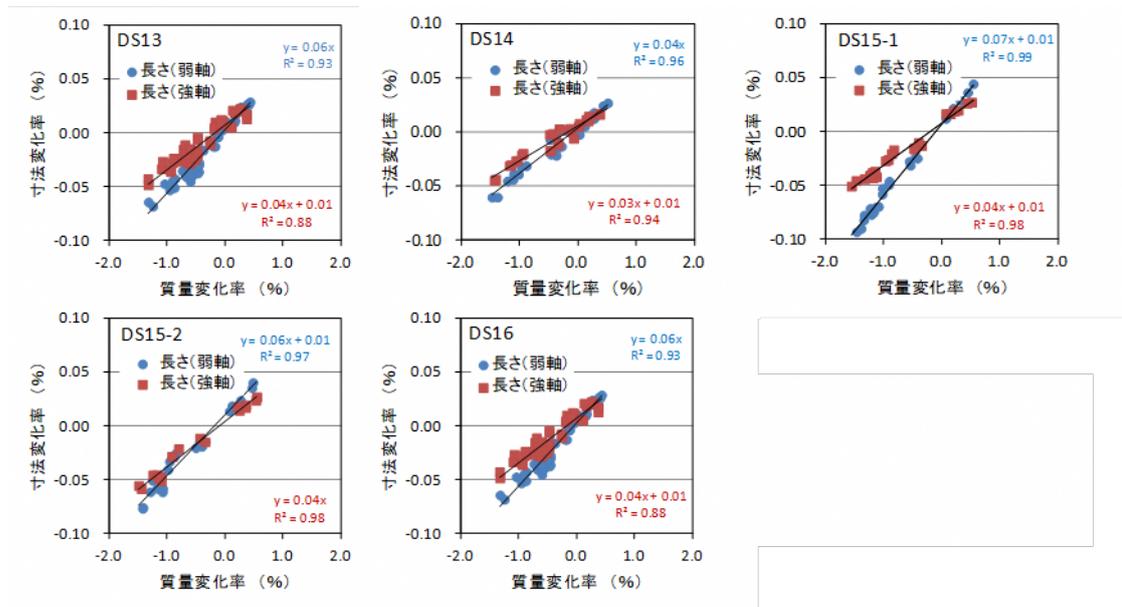


図2 試験体の質量変化率と試験体の弱軸方向長さ及び強軸方向長さの変化率との関係

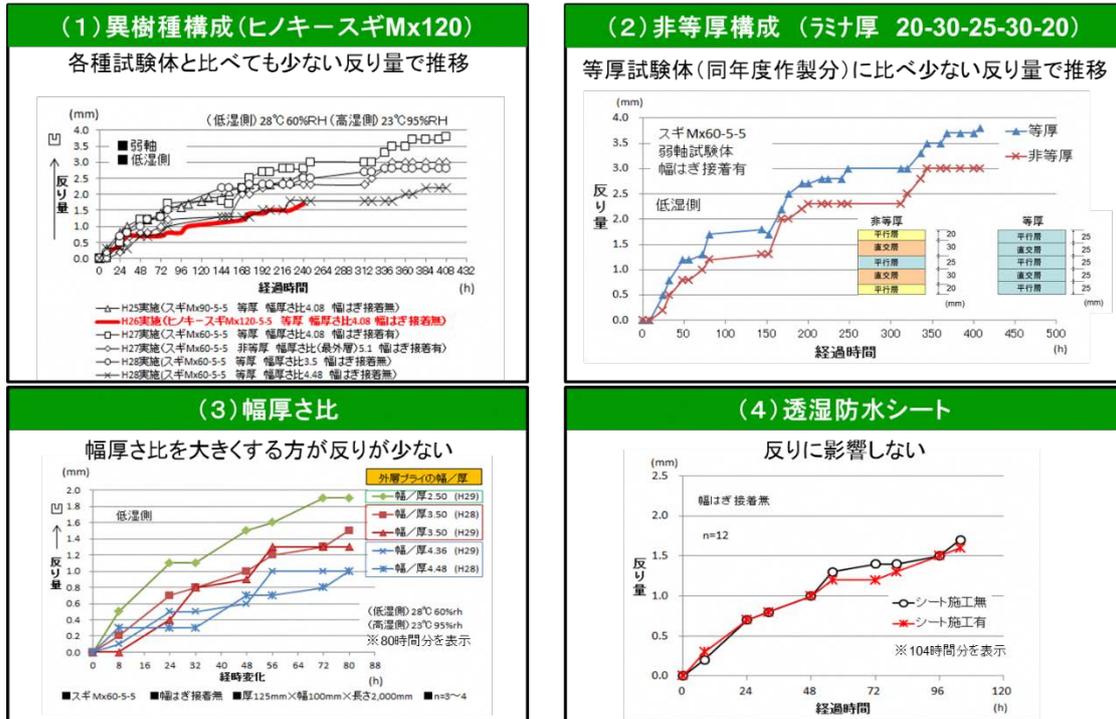


図3 二室型環境試験器を用いた柱状CLT試験体の反り試験結果

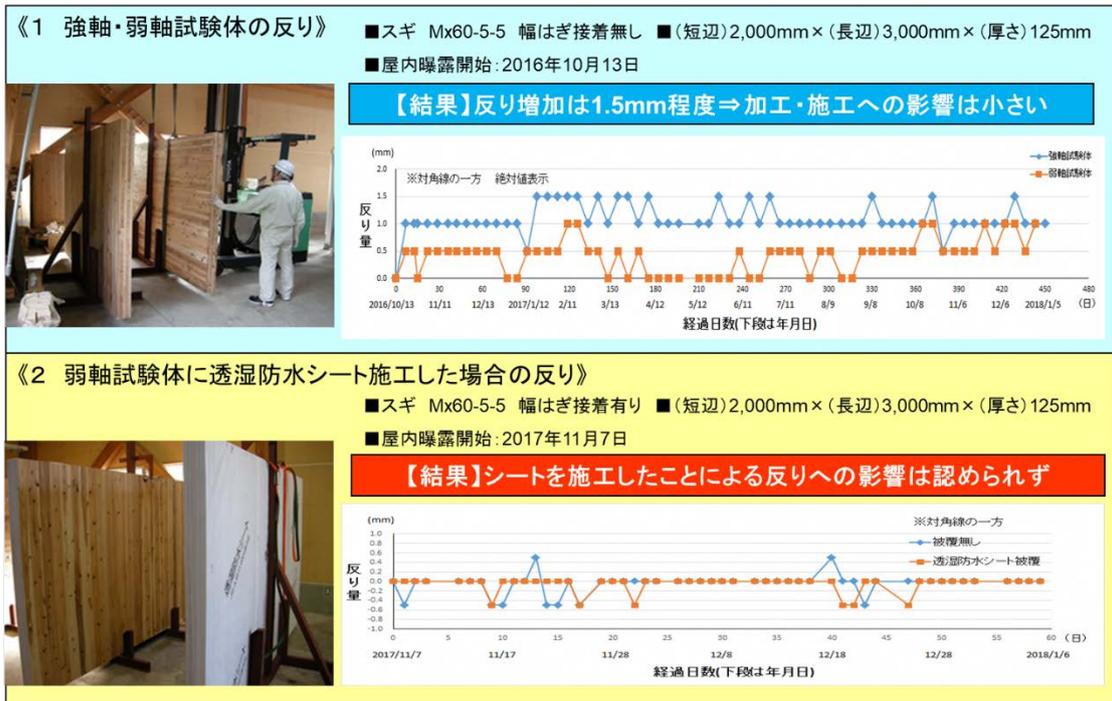


図4 実大寸法CLT試験体の屋内曝露による反り試験結果

中課題番号	13405278	研究期間	平成25～29年度
小課題番号	22110	研究期間	平成25～29年度
契約課題名	伐採木材の高度利用技術の開発		
中課題名	強度性能評価技術の開発		
小課題名	基礎的物性の発現機構の解明		
小課題代表研究機関・研究室・研究者名	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・複合材料研究領域・渋沢龍也		
共同研究機関・研究室・研究者名等	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・積層接着研究室・新藤健太、チーム長(強度性能評価担当)・長尾博文、チーム長(構造性能評価担当)杉本健一、木質構造居住環境研究室・宇京斉一郎、野田康信、材料接合研究室・原田真樹、加藤英雄、井道裕史、小川敬多、物性研究室・久保島吉貴		

1) 研究目的

ひき板を構成要素とする木質材料には集成材があるが、これはひき板の繊維方向を平行にして積層接着した軸状の材料であり、木質構造物の柱・梁材として使用される。柱・梁材に要求される性能は引張・圧縮・曲げ・層内せん断であり、集成材のこれらの性能については十分な研究蓄積が存在する。一方、CLTは面状の材料であり、木質構造物の床・壁・屋根材として利用することが可能であることから、引張・圧縮・曲げ・層内せん断に加え、面内せん断・めり込み等の強度性能が要求されが、CLTは新規の材料であることから、強度性能がどのような因子によって制御可能であるか、強度性能が発現する機構が解明されていない。そこで本小課題では、CLTの強度発現機構を解明するために、CLTを構成するひき板の性能を非破壊的に測定し、パネル内のひき板のジオメトリーを把握した試験体を用いて種々の性能値を測定することで、原料・製法に関する因子をパラメーター化(数値化)して性能値との関係を導出し、強度発現機構を解明する。

2) 研究成果

(面内曲げ) 直交層ラミナ幅と非破壊試験による曲げヤング係数、曲げ強度との関係を図1に示す。直交層ラミナの幅が曲げヤング係数に及ぼす影響は認められなかった。一方、直交層ラミナの幅が大きくなるほど、曲げ強度は低下する傾向が認められた。これは引張り強度とは逆の傾向である。試験中の直交層ラミナの材質、木取り、変形量、平行層と直交層との積層接着に対して直交層ラミナ幅が影響したと推察される。

(面外せん断) 水平せん断式ならびに大野式によるせん断加力を行い、その荷重と変位の関係を図2に示す。この時加圧板の幅は試験体厚と同一とし、加圧板間のせん断スパン

比はいずれも1.5とした。その結果、直交層のラミナ幅が大きくなるほどせん断強度も高くなる傾向が認められた。またラミナ幅が小さいと終局時の変位が大きくなる傾向が認められた。大野式せん断加力試験法に依る結果と比べて水平せん断式の方が1.63~1.37倍強度が高くなり、ラミナ幅が大きくなるほどその差は小さくなる結果になった。

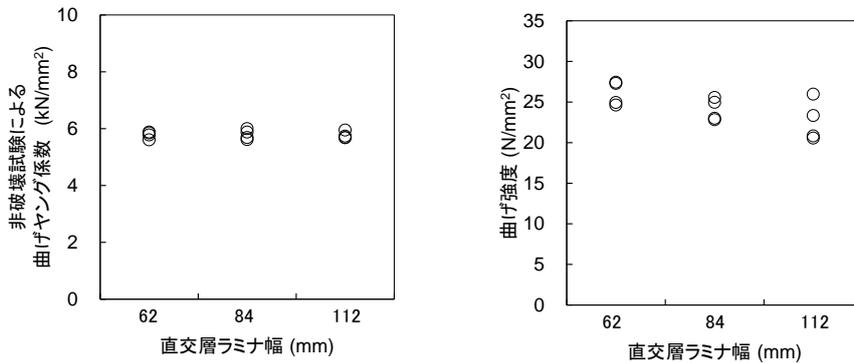


図1 直交層ラミナ幅と非破壊試験による面内方向の曲げヤング係数、曲げ強度との関係

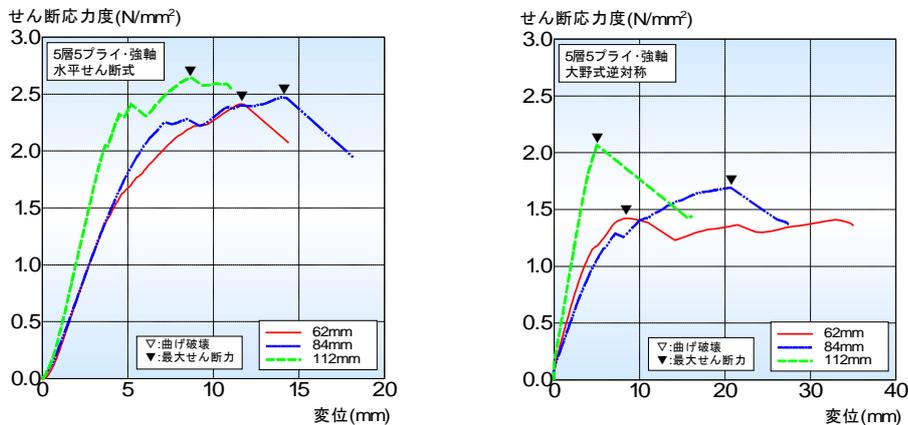


図2 水平せん断式(左)および大野式(右)における荷重と変位の関係

(引張り) 直交層ラミナ幅と引張りヤング係数、引張り強度との関係を図3に示す(ただし、H29年度試験体の平行層ラミナ幅は105mm、直交層ラミナ幅はそれぞれ62.5、87.5、112mm。H28年度試験体の平行層ラミナ幅は87.5mm、直交層ラミナ幅はそれぞれ62、84、112mm。図中ではH29年度の直交層ラミナ幅で示す)。直交層ラミナ幅の違いが引張りヤング係数に及ぼす影響は認められなかった。一方、H28年度の結果では直交層ラミナ幅が小さくなるほど引張り強度が低下する傾向があったが、H29年度の結果からはそのような傾向は認められなかった。

(短柱の) 圧縮性能) 直交層ラミナ幅と圧縮ヤング係数、圧縮強度との関係を図4に示す。直交層のラミナ幅が圧縮ヤング係数に及ぼす影響は認められなかった。圧縮強度は試験体長さが長い方が若干低い傾向が見られたが、同じ長さのものを比較した場合には、直交層ラミナの幅の影響は認められなかった。圧縮性能の測定結果を表1に示す。圧縮強度平均値は試験体長さの長い方が若干低い傾向を示し、強度平均値は内層ラミナの等級の低い方が低い傾向を示したが、いずれも有意差は無かった。ヤング係数への影響は確認されなかった。

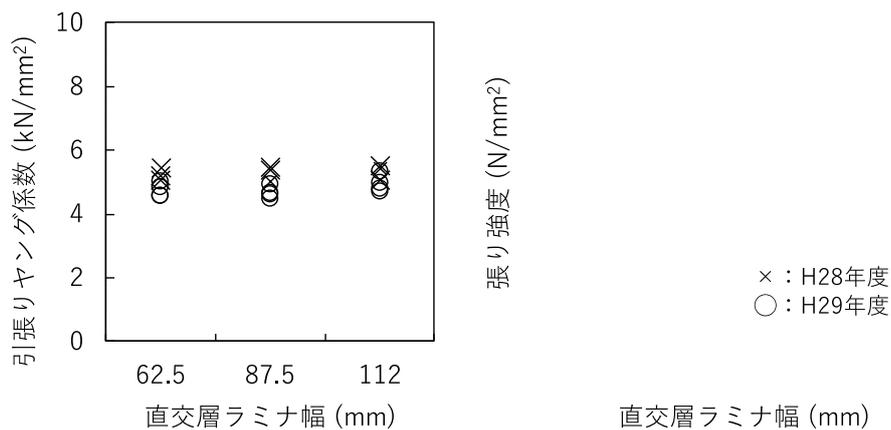


図3 引張り試験の結果

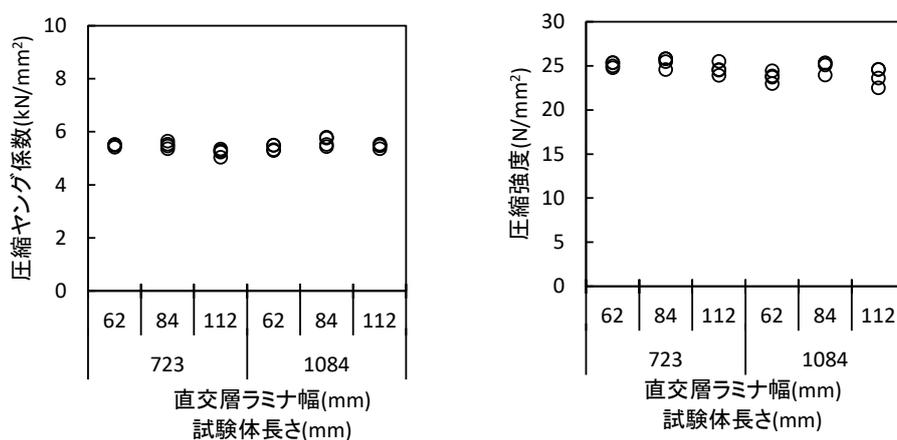


図4 直交層ラミナ幅と圧縮ヤング係数、圧縮強度の関係

表1 圧縮（短柱）試験結果一覧

内層ラミナ 試験長さ(mm)	圧縮強度 (N/mm ²)				圧縮ヤング係数 (kN/mm ²)			
	60b		30b		60b		30b	
	541	1084	541	1084	541	1084	541	1084
試験体 1	22.9	22.4	22.3	21.0	4.49	4.66	4.37	4.35
試験体 2	23.6	22.8	22.9	23.6	4.83	4.61	4.79	4.82
試験体 3	22.3	23.0	22.2	21.7	4.30	4.84	4.44	4.54
平均	22.9	22.7	22.4	22.1	4.54	4.70	4.53	4.57

(非破壊的予測) 曲げ変位に含まれるせん断変形の影響に関する近似式においてEb/Ea ≤ 1.2の場合にせん断変形の影響が少ないという実験結果に基づきヤング率とせん断弾性係数を近似式へ代入した。その結果、1つの振動モードから真のヤング率に近いヤング率を求めるための長さ/厚さ比の最小値 (1/h) minは強軸方向の3層3プライ以外は10前後であったが、強軸方向の3層3プライは25と顕著に大きかった(表2)。これは3層3プライでは強軸方向のラミナの割合がその他のラミナ構成よりも大きくかつ強軸方向のラミナが最外層に位置するためと考えられた。従って、それぞれの構成のCLTに対して、予め数値

のヤング率とせん断弾性係数を測定し、近似式を用いて適切な (1/h) minを算出しておくことが重要であると考えられた。

$$\frac{E_b}{E_a} = 1 + \frac{h^2}{12l^2} \left\{ F_1(m_n) + \frac{sE}{G} F_2(m_n) \right\}$$

l: 長さ、h: 厚さ、Eb/Ea: せん断の影響を考慮した/しないヤング率、
G: せん断弾性係数、s=1.18、F1(mm)=49.48、F2(mm)=12.30

以上より、CLTを建築物に使用する際に重要な引張り性能、短柱としての圧縮性能、面外曲げ性能とそれらに影響を及ぼすと予測される原料・製法に関する因子について検討した。引張り性能については直交層ラミナの幅は影響を及ぼさないこと、短柱としての圧縮性能については内層ラミナの強度等級は影響を及ぼさないことを明らかにした。面外曲げ性能については、曲げヤング係数にせん断弾性係数が影響を及ぼすことがわかったが、同一構成の試験体において予備的に曲げヤング係数とせん断弾性係数を測定してパラメータ化し、真の曲げヤング係数が測定可能となる長さ/厚さ比を算出しておくことで、曲げヤング係数を非破壊的に測定することが可能であることが明らかとなった。これにより、面外曲げ性能の強度発現機構が解明された。

表2 ラミナ構成と真のヤング率を求めるための長さ/厚さ比

			E [GPa]	G [GPa]	l/hの最小値
3層3プライ	同一等級	強軸	8.3	0.08	25.46
		弱軸	0.67	0.44	5.40
5層5プライ	同一等級	強軸	4.22	0.27	10.73
		弱軸	1.34	0.25	7.28
5層5プライ	異等級	強軸	5.29	0.26	11.99
		弱軸	1.47	0.16	8.73
7層7プライ	同一等級	強軸	4.10	0.26	10.77
		弱軸	1.81	0.22	8.39

3) 成果活用における留意点

CLTの利用上重要な面内曲げ、面外せん断、引張り、(短柱としての)圧縮の各種性能と製造因子の関係を明らかとし、それら各種性能のうち、CLTの品質管理に用いられる重要な性能である面外曲げ性能の強度発現機構を解明したが、これらの手法を工業的生産における品質管理や設計用数値の導出に用いるためには、手法の適用範囲と妥当性を明確にし、法的位置付けを与える必要がある。

4) 今後の課題

本課題で確立した手法を工業的生産時の品質管理および設計用数値の導出に適用可能とするためには、検討の対象をさらに広げ、データの蓄積を図る必要がある。そのためには、本課題終了後も、引き続きデータ収集と検証を実施する必要がある。

中課題番号	13405278	研究期間	平成25～29年度
小課題番号	22120	研究期間	平成25～29年度
契約課題名	伐採木材の高度利用技術の開発		
中課題名	強度性能評価技術の開発		
小課題名	床利用のための実大強度性能評価手法の開発		
小課題代表研究機関・研究室・研究者名	広島県立総合技術研究所林業技術センター・林業研究部・藤田和彦		
共同研究機関・研究室・研究者名等	広島県立総合技術研究所林業技術センター・林業研究部・野沢浩二、渡辺靖崇		

1) 研究目的

CLTを木造建築物の床材として利用する場合、床材に要求される性能を統計的に保証する必要がある。これまで木質構造物では、要求される性能の統計的下限値を導出するため、実際の建物で使用される材料寸法の試験体を用いた多数の実験値を導出してきた。しかし、開発対象とするCLTは、大きな建築物を目標とした材料であり、実際の製品寸法による多数の実験を行うことは、事実上不可能である。そこで本小課題では、大規模建築物への利用を目標としたCLTを実際の製品寸法で多数実験を行わなくとも床としての強度評価を行えるようにするため、床材に要求される主要な性能である曲げ性能と長期使用時の性能変化に着目し、CLTの実大性能を予測可能であり、かつ簡便な評価手法を開発する。

2) 研究成果

① ひき板の強度等級が異なるCLTの実大強度性能評価

スギCLT試験体は、厚さ25mmのFJラミナ(最外層をM90及びM60)を交互に積層し、厚さ125mm×幅295mm×長さ2877mm、5層5プライ構成の表層の木材繊維方向が試験体の長さ方向となる試験体(以下強軸試験体)6体及び表層の木材繊維が試験体の長さ方向と直角する試験体(以下弱軸試験体)6体、厚さ175mm×幅295mm×長さ4027mm、7層7プライ構成の強軸及び弱軸試験体各6体を大板から採取した。積層に用いた接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂であり、幅はぎ接着はしていない。

短期面外曲げ試験の条件は3等分点2線荷重で、スパンを2625mm及び3675mm、モーメント一定区間長を875mm及び1225mmとした(写真1)。

面外曲げ試験の結果について表1及び図1に示す。5層5プライ強軸試験体では、最外層がM90とM60では、曲げ強度平均値はほとんど変わらなかったが、曲げヤング係数はM90のほうが高くなった。また、最外層M90強軸試験体の5層5プライと7層7プライでは、5層5プライの曲げ強度、曲げヤング係数平均値とも高くなった。また、弱軸試験体は強軸試験体より曲げ強度で40%程度、曲げヤング係数で30%低くなった。なお、強軸試験体では引張り側最

外層ラミナのFJが破壊し、弱軸試験体では引張り側から数えての2層内側のラミナのFJが破壊した。



写真1 面外曲げ試験状況

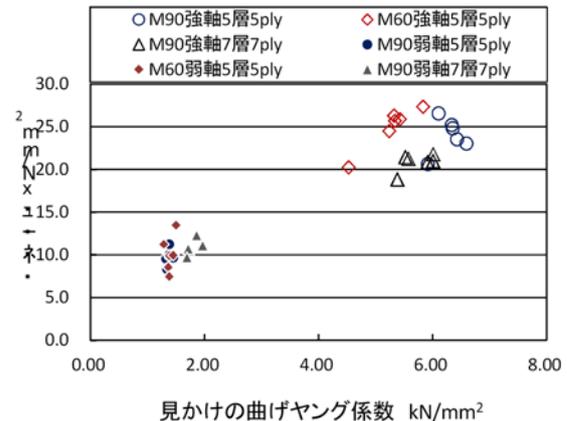


図1 曲げ強度と見かけの曲げヤング係数

また、非空調環境での最外層がM90の5層5プライ長期面外曲げ破壊試験（写真2）について、各試験体の設定荷重レベルと荷重継続時間の関係を図2に示す。強軸試験体の荷重レベル88%と86%の2体を除き、Madison Curveから想定した破壊時間よりも長くなった。強軸方向荷重継続時間係数は0.73であった。弱軸試験体についても荷重レベル94%の1体を除き、Madison Curveから想定した破壊時間よりも長くなった。弱軸方向荷重継続時間係数は0.80



写真2 長期荷重載荷試験状況

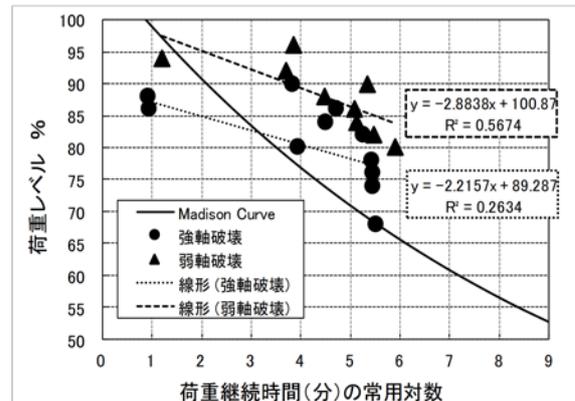


図2 荷重レベルと荷重継続時間

であった。

② ひき板の樹種構成が異なるCLTの実大強度性能評価

ヒノキM120を外側に、内側にスギM30を配置した試験体の仕様を次のように決定した。等級・構成はMx120-3層3プライ、Mx120-3層4プライ、Mx120-5層5プライ、Mx120-5層5プライとし、CLT短期面外曲げ試験を行った。強軸試験体では最外層ヒノキM120の強度性能が高いため、どの仕様でも層内せん断破壊が多かった。試験条件として厚さの21倍を標準として、15倍や18倍も行ったが、せん断破壊の影響で中央集中、4点曲げとも支点間距離が長い方が強度が大きかった。結果として曲げヤング係数は、3層3プライのほうが5層5プライよりも高かった。また、弱軸試験体はすべて曲げ破壊しており、積層数が少ないほうが強軸試験体の曲げ強度平均値や曲げヤング係数との差が大きかった（図3参照）。1軸及び3軸のひずみゲージにより、曲げ試験時の表面のひずみ量を測定した結果、強軸試験体のせん断力の

影響区間では、直交層のスギラミナにおいて、厚さ方向でのひずみの急勾配によって、せん断破壊が起こる可能性があるかと推測された。なお、接着層付近のラミナ間でのひずみ量の差はあまりなかった。

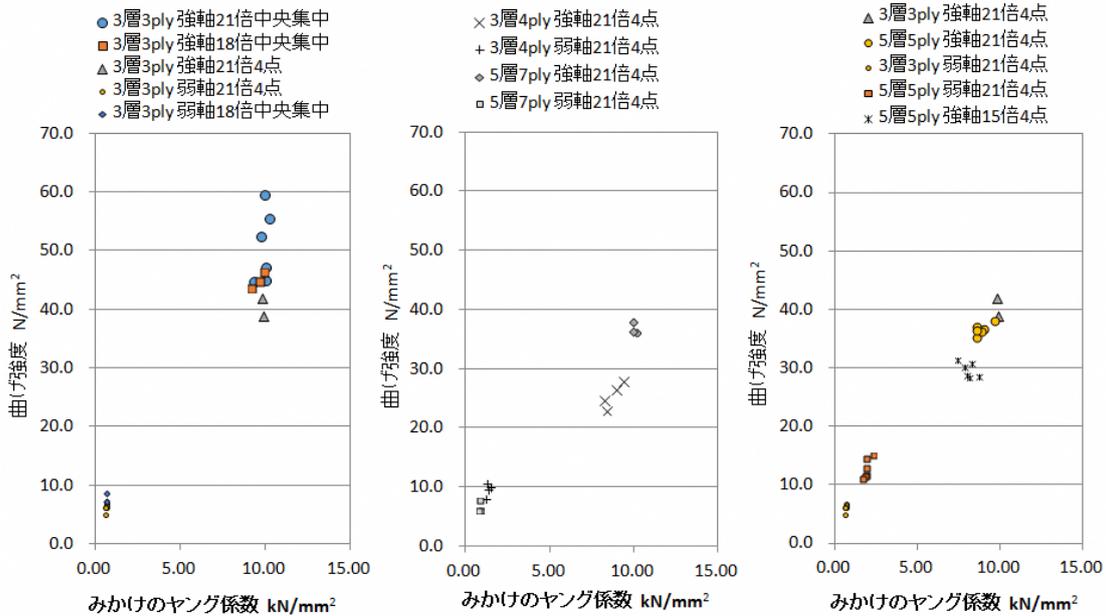


図3 短期面外曲げ試験による曲げ強度と曲げヤング係数の関係

また、非空調でのMx120-5層5プライ長期面外曲げ破壊試験結果について、荷重レベルと荷重継続時間の関係を図4に示す。強軸試験体の荷重レベルで84%を除いて、Madison Curveにおいて想定した破壊に至る時間よりも短くなったが、強軸方向荷重継続時間係数は計算上0.78となった。弱軸試験体の荷重レベルで86%を除いて、Madison Curveにおいて想定した破壊に至る時間よりも短くなったが、弱軸方向荷重継続時間係数は計算上0.68となった。

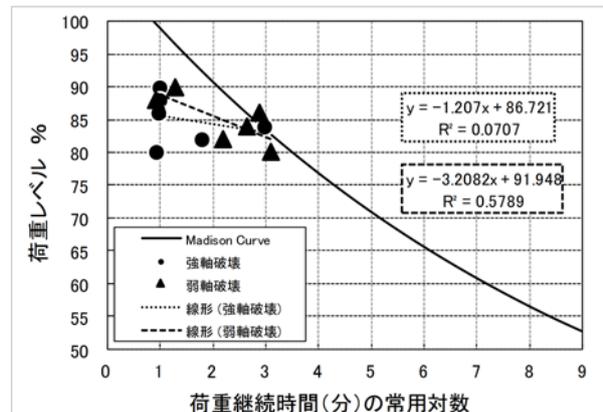


図4 荷重レベルと荷重継続時間

③ 平行層ひき板の厚さが異なるCLTの実大強度性能評価

供試体には、M30B (3.0kN/mm²以上6.0kN/mm²未満)とM60B (6.0kN/mm²以上9.0kN/mm²未満)に選別したラミナを使用し、強度等級をMx60-3層3プライ、Mx60-5層5プライ、ラミナ厚を直交層25mm、平行層20mm、25mm、30mmと変化させた仕様とした。なお、ラミナはすべて幅はぎ接着を行った。これら平行層厚の違う仕様のCLT短期面外曲げ試験を行った結果、Mx60-3層3プライの強軸では、平行層厚さが20mm、25mm、30mmの順に曲げヤング係数の平均値が高くなった。曲げ強度については、30mmがわずかに高かった。Mx60-5層5プライの強軸では、曲げヤング係数はMx60-3層3プライと同様の傾向であったが、曲げ強度はほとんど差がなかった。Mx60-5層5プライの弱軸は、平行層が25mmで、直交層の厚さが異なる。平行層

の厚さと直交層の厚さの割合が強軸と逆となり、曲げヤング係数はMx60-3層3プライ強軸と逆の傾向であった。曲げ強度は直交層が30mmの試験体が低めであった（図5参照）。破壊はすべて荷重点間の曲げ破壊であった。

層内せん断性能に関する試験方法については、支点上の試験体側面に、平行層間に変位計を水平方向に取り付け、水平変形量を測定する方法とした。その結果、ラミナ直交層の層内せん断による変形と考えられる変形が見られ、構造用集成材とは異なることが分かった。

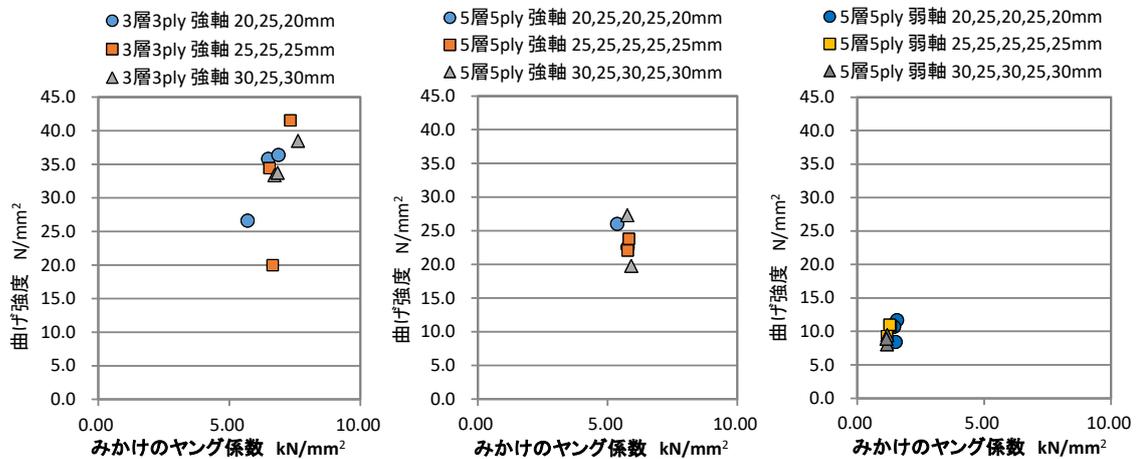


図5 短期面外曲げ試験による曲げ強度と曲げヤング係数の関係

また、非空調環境でのMx60-5層5プライ長期面外曲げ試験について、荷重レベルを33%として106日間行った。その結果、平行層20mm強軸試験体で、変形増大係数が告示法1.19、パワー則1.31、弱軸試験体で告示法1.32、パワー則1.49、平行層25mm強軸試験体で、変形増大係数が告示法1.17、パワー則1.31、弱軸試験体で告示法1.35、パワー則1.61、平行層30mm強軸試験体で、変形増大係数が告示法1.20、パワー則1.36、弱軸試験体で告示法1.34、パワー則1.53となり、強軸、弱軸ともラミナの厚さによる差はないと考えられた。

④ 直交層ひき板の幅・厚さ比の異なるCLTの実大強度性能評価

平行層が87.5mmで、直交層について、ひき板の幅と厚さの比を2.5倍（幅62mm）、3.36倍（幅84mm）及び4.5倍（幅112mm）にしたスギCLT5層5プライを製作して、短期面外曲げ試験を各3体実施し、面外曲げ強度性能、層内せん断強度、剛性及びひずみなどに関するデータを収集し、評価した。まず、3条件の面外曲げ試験結果について、図6に曲げ強度と見かけの曲げヤング係数の関係を示す。また、ほとんどが引張側外層フィンガージョイント部からの曲げ破壊であったが、ひき板の幅と厚さの比を2.5倍（幅62mm）とした1体のみせん断破壊をしたので、その破壊形態を写真3に示す。直交層ラミナ木口面にせん断の亀裂が入らず、接着面近くが木破を起こしているようであった。

次に、CLTの面外曲げにおける各層のラミナの変形及び破壊に至る経過を図7に示す。支点と荷重点の中間の側面に上から1層目、5層目に変位計を水平方向に取り付け、中間層平行層ラミナにターゲットをつけて、その変形量を測定した。この結果、ひき板の幅と厚さの比が小さくなるにしたがって、変形量が大きくなることが分かった。

また、非空調でのMx60-5層5プライ長期面外曲げ試験について、荷重レベルを33%として

行った。その結果、直交層のひき板の幅と厚さの比を2.5倍強軸試験体で、変形増大係数が告示法1.75、パワー則2.56、比が3.36倍強軸試験体で告示法1.72、パワー則2.84、比が4.5倍強軸試験体で、告示法1.65、パワー則2.65となり、告示法ではラミナ幅が広がるにつれて変形増大係数が小さくなる傾向を示したが、ほとんど差は無いと考えられた。

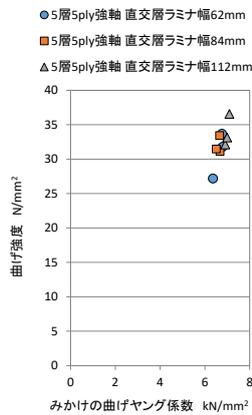


図6 曲げ強度とヤング係数の関係



写真3 ひき板の幅と厚さの比2.5倍のせん断破壊

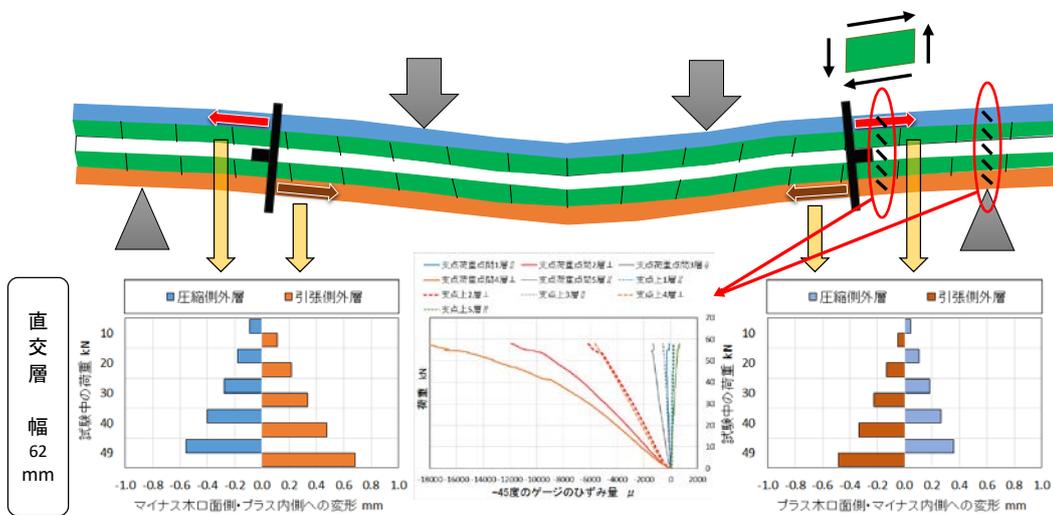


図7 短期面外曲げ試験におけるCLT側面のラミナ変形の例

⑤ 直交層ひき板の幅・厚さ比の異なるCLTの長期面外曲げ性能評価

CLTの面外曲げ及び層内せん断強度、剛性、ひずみなどに関して寸法効果を確認するため、長さ2875mm×幅300mm×厚さ125mmのスギ5層5プライMx60強軸（平行層105mmで直交層のラミナ幅は62.5mm、87.5mm、112mmの3条件）と、長さ4830mm×幅2100mm×厚さ210mmのスギ7層7プライMx60強軸（ラミナ幅はすべて105mm）のクリープ試験を行った。結果を表1に示す。5層5プライと7層7プライの40日間の変形増大係数を比較してみると、告示法評価では、5層5プライが1.11から1.19、7層7プライが1.11、パワー則評価では、5層5プライが1.24から1.41、7層7プライが1.28となった。評価方法による結果の違いはあったが、告示法、パワー則それぞれの評価法の中では、5層5プライと7層7プライの両者の差はほとんどないと考えられた。

表1 試験体寸法の違いによる長期面外曲げ性能評価結果 (40日間)

試験体寸法	直交層幅と厚さの比	評価方法	測定位置	δ_{1min}	傾きN	切片logA	A	δ_{50year}	K_{50year}	R	R^2	$\delta_{50year}/\delta_{1min}$
4830 × 2100 × 210mm	3.5	告示法	中心 (短辺1/2長辺1/2)	17.4	-0.0073	0.0097	1.023	19.3	0.903	-0.901	0.812	1.11
		パワー則		17.4	0.241	-1.10	0.0787	22.2	0.784	0.978	0.957	1.28
2875 × 300 × 125mm	2.5	告示法	側面中心 (長辺1/2)	6.06	-0.0032	-0.0203	0.955	6.71	0.908	-0.333	0.372	1.11
		パワー則		6.00	0.115	-0.689	0.341	7.48	0.802	0.864	0.747	1.25
	3.5	告示法		6.20	-0.0080	0.0062	1.014	7.01	0.886	-0.891	0.795	1.13
		パワー則		6.20	0.181	-1.18	0.069	7.68	0.809	0.938	0.880	1.24
	4.5	告示法		5.64	-0.0104	0.0028	1.006	6.71	0.844	-0.820	0.675	1.19
		パワー則		5.64	0.231	-1.44	0.045	8.00	0.736	0.868	0.757	1.41

また、CLTの実大性能を予測可能であり、かつ簡便な評価手法については、短期及び長期試験のデータから、横軸に経過時間の常用対数を、縦軸に長期中央変形量と短期最大荷重時変形量の比（以下、変形量比）を当てはめたパワー則評価のグラフを作成した（図8）。5年間にわたる長期面外荷重試験の標準的な試験体のデータをパワー則で評価して、プロットしたものであるが、参考として、短期面外曲げ試験時では弾性域のまま破壊すると仮定して、Madison Curveを示した。図8から、変形量比により経過時間ごとに試験体の変形が大きくなっていく状況が分かりやすくなった。変形量比が大きい試験体は、Madison Curveから想定される経過時間に到達せずに破壊したものもあったが、それを越えた後に破壊する場合もあり、おおむね6か月で破壊に至ると考えられた。変形量比が小さい試験体は変形が少しずつ増加することにはなるが破壊には至らない。変形量比が0.3程度の試験体で夏に試験開始したものは変形が大きくなる傾向があるものの、秋に入ってからでは変形が進みにくくなっており、100年から250年程度の破壊時間が予想される。

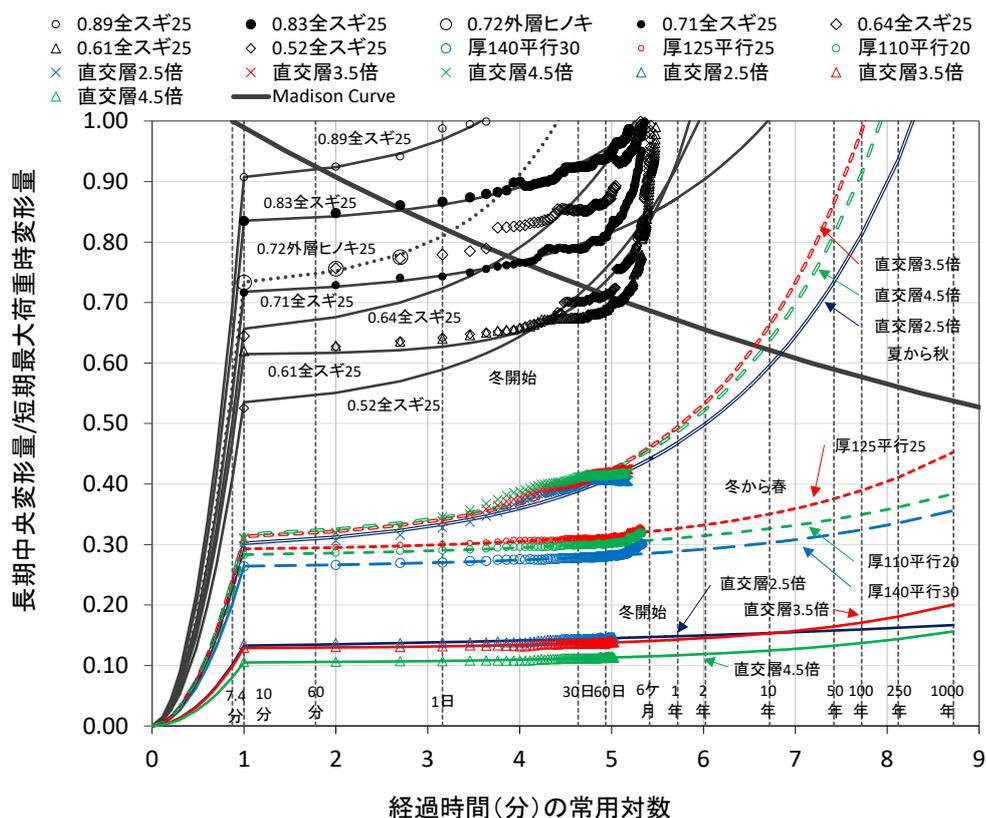


図8 変形量比と経過時間の関係及びパワー則による変形量比の推定

3) 成果活用における留意点

床利用のための実大強度性能評価手法の開発を行ったが、面外方向の荷重に対して、外層と内層の強度性能の差による層内せん断破壊が起こりやすくなるため、ラミナの直交層の幅と厚さの比に留意する必要がある。また、CLTの仕様ごとに、少なくとも一度は短期や長期の面外曲げ試験を行い、破壊に至るまでの時間の確認や、長期たわみ量を確認することが重要である。

4) 今後の課題

供試体が大きく、また試験装置の占有時間が長くなるため、長期載荷試験では非空調の環境で試験を行う場合があるが、季節変動が地域ごとに異なるため、試験体に湿度変化を与えない工夫をする必要がある。

中課題番号	13405278	研究期間	平成25～29年度
小課題番号	22130	研究期間	平成25～29年度
契約課題名	伐採木材の高度利用技術の開発		
中課題名	強度性能評価技術の開発		
小課題名	壁利用のための実大強度性能評価手法の開発		
小課題代表研究機関・研究室・研究者名	国立大学法人宇都宮大学・地域デザイン科学部・中島史郎		
共同研究機関・研究室・研究者名等	国立研究開発法人建築研究所・構造研究グループ・荒木康弘		

1) 研究目的

CLTを木造建築物の耐力壁等の鉛直構面として利用する場合、構造設計を行うのに必要な材料の各種特性値が必要である。CLTは今後、様々なひき板構成にて製造されることが想定されるが、各仕様のCLTについてその材料特性値は示されていない。そこで本小課題では、CLTを木造建築物の耐力壁等の鉛直構面として利用するにあたって必要となる各種強度特性値のうち、面内せん断強度・剛性、並びに、鉛直荷重に対する座屈強度等を明らかにする。また、各種特性値を簡便に評価するための方法を開発する。

2) 研究成果

①面内せん断強度・剛性

実大のスギ異等級構成のCLTについて、面内せん断強度・弾性係数に関する知見を実験により収集した。せん断強度は外層ラミナの木材繊維方向が加力方向と垂直の場合と平行の場合でほぼ等しく、せん断破壊時荷重を全断面有効と考えて応力算出した値は、約3(N/mm²)であるという知見を得た(図1、表1)。

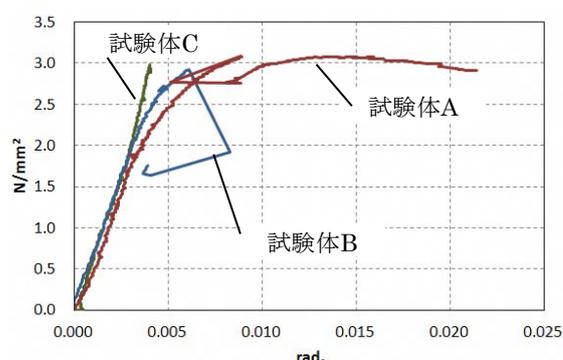


図1 面内せん断試験の荷重変位曲線

表1 試験体の寸法と形状、試験結果 (パネル厚:150mm)

試験体	試験体寸法		せん断寸法		外層繊維方向と加力方向	最大荷重 (kN)	最大せん断応力度* (N/mm ²)	備考
	幅 (mm)	高さ (mm)	幅 (mm)	高さ (mm)				
A	2000	1796	816	612	直交	298	2.92	
B	2000	1796	816	612	平行	314	3.08	
C	2010	1796	1224	612	直交	456	2.98	破壊まで加力していない

*最大荷重をくびれ部分の断面積 (幅×150mm) で除した値

実大のヒノキスギ異樹種構成のCLT (Mx120) について、面内せん断強度・弾性係数に関する知見を実験により収集し、面内せん断強度とせん断弾性係数は、外層ラミナの繊維方向が加力方向と垂直の場合が 3.0～3.5 N/mm² および 350～500 N/mm²、外層ラミナの繊維方向が加力方向と平行の場合が 2.3～2.8 N/mm² および 400～600 N/mm² であるという知見を得た。(図2、表2)

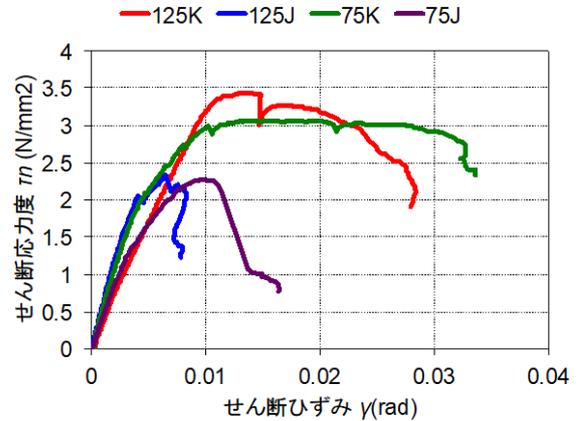


図2 せん断応力度-せん断ひずみ関係

表2 面内せん断試験に供した試験体の寸法と形状 (パネル寸法は1800mm×1800 mm)

試験体名	せん断面の大きさ			外層の繊維方向と加力方向	最大せん断応力度* (N/mm ²)	せん断弾性係数** (N/mm ²)
	幅 (mm)	高さ (mm)	厚さ (mm)			
125K	600	600	125	直交	3.44	348
125J	600	600	125	平行	2.33	599
75K	600	600	75	直交	3.07	428
75J	600	600	75	平行	2.78	475

*最大荷重をくびれ部分の断面積 (幅×パネル厚) で除した値

**最大荷重の10%と40%の荷重間のせん断剛性をくびれ部分の断面積で除した値

スギ異等級・非等厚構成 CLT を対象として面内せん断試験を行い、スギ異等級・等厚5層5プライ CLT のデータと比較した結果、幅はぎ接着によって、せん断剛性は1割程度増加するという知見を得た。また、せん断強度についても同様に増加する傾向を確認したが、一部の試験体では部分的に曲げ破壊が生じていた。せん断強度・剛性に関するラミナ厚さの違いによる影響は、明確には見られないことを確認した。(表3、写真1、図3)

表3 試験体仕様

	層数	パネル厚 (mm)	ラミナ厚 (mm)	ラミナ幅 (mm)	最外層のラミナ方向	強度区分	樹種
130K	5層5プライ	130	奇数層:30 偶数層:20	105mm	鉛直	M60A	スギ
130J					水平		
120K		120	奇数層:20 偶数層:30		鉛直		
120J					水平		



写真1 実験後の破壊の様子（表面）

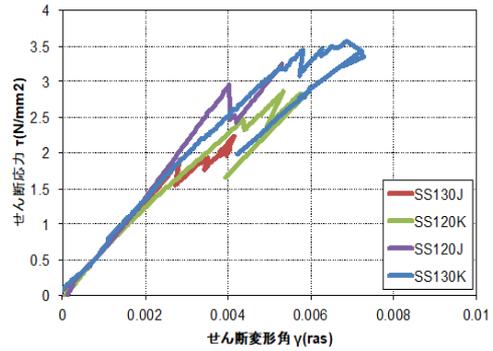


図3 せん断変形角せん断応力度関係

可変断面構成スギCLTの面内せん断試験を行い、幅広試験体の方が幅狭試験体より1.5倍程度、最大せん断応力度は大きい結果となることを確認した。この傾向は、計算値による面内せん断性能についても同様であった。これより、非等厚構成CLTの試験方法は従来の試験方法と同様で問題ないという知見を得た（表4、写真2、図4）。

表4 試験体仕様、せん断性能、破壊モード

試験体名	樹種	層構成	外層のラミナ方向	ラミナ [mm]			最大せん断応力度 τ_{max} [N/mm ²]	比例限度せん断応力度 τ_{limit} [N/mm ²]	せん断弾性係数 G [N/mm ²]	破壊モード
				厚さ	幅	比				
スギ5層5プライ強軸ラミナ幅狭	スギ	5層5プライ	鉛直（強軸）	25	62	2.48	2.66	1.57	540	III
スギ5層5プライ弱軸ラミナ幅狭			水平（弱軸）							
スギ5層5プライ強軸ラミナ幅広			112	4.48	鉛直（強軸）	3.68	2.29	667	I	
スギ5層5プライ弱軸ラミナ幅広					水平（弱軸）					3.38



写真2 実験後の破壊の様子
（スギ5層5プライ弱軸ラミナ幅広）

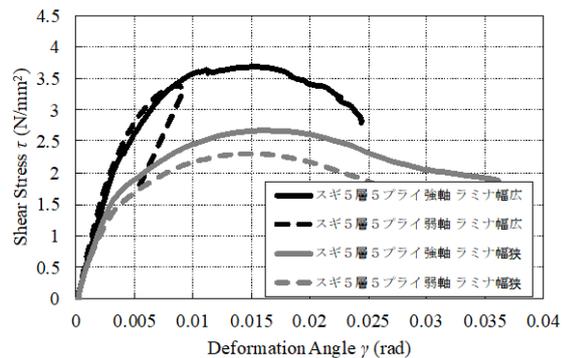
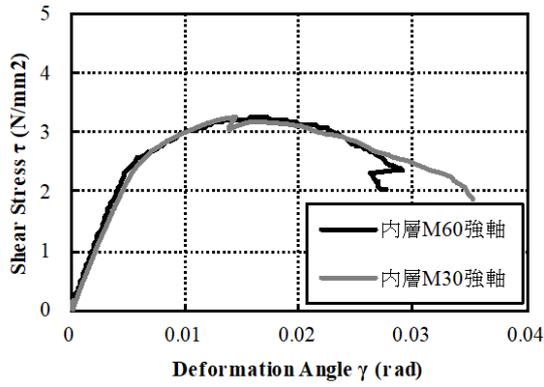
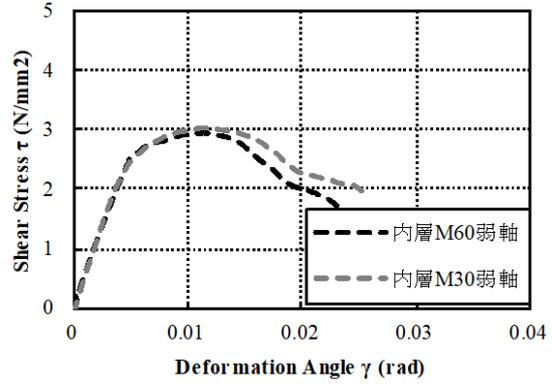


図4 せん断変形角せん断応力度関係

面内せん断強度と剛性に及ぼす寸法効果の影響を確認するための試験を行い、外層ラミナの繊維方向が加力方向に対して垂直、水平ともに、内層ラミナの強度の違いせん断強度および面内剛性に与える影響はほとんど見られないことを確認した。また、告示式は実験結果を安全側に評価していることを確認した（図5、表5）。



(a) 強軸



(b) 弱軸

図5 せん断応力度変形角関係

表5 試験体仕様および試験結果

試験体名	樹種	層構成	外層 繊維 方向	ラミナ 厚 [mm]	奇数層 ラミナ幅 [mm]	偶数層 ラミナ幅 [mm]	τ_{max} [N/mm ²]	T_{max} 告示式 [N/mm ²]	G [N/mm ²]	破壊 モード
内層M30強軸	スギ Mx90	5層 5プライ	鉛直	25	105	87.5	3.27	2.03	470	I
内層M60強軸							3.25	2.03	510	I
内層M30弱軸			水平				3.04	1.98	588	III
内層M60弱軸							2.97	1.98	560	III

②座屈強度

実大のスギ異等級構成のCLTについて、座屈強度に関する知見を実験により収集し、細長比 $\lambda=75$ と $\lambda=34$ の場合のCLT座屈強度を明らかにした(写真3、図6、7、表6)。



写真3 座屈試験の様子

(解説) 左：細長比75の試験体、右：細長比34の試験体。加力は試験体に厚さ方向に対して1/3偏心した位置に荷重が作用するように行い、支持点はピンとした。荷重速度は1mm/minとした。

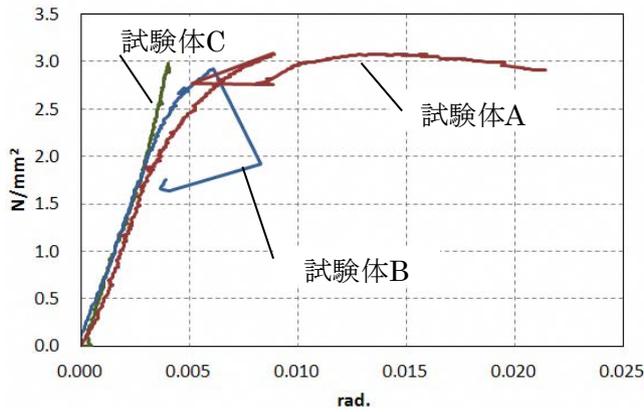


図6 面内せん断試験の荷重変位曲線
 (解説) 試験体Aについて変位が戻っているのは、加力途中で1回除荷したためである。

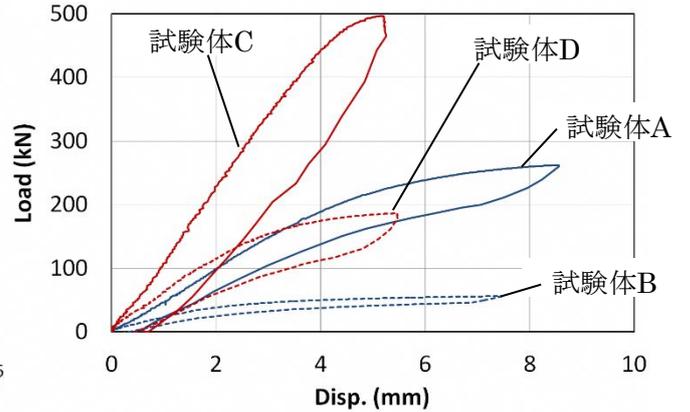


図7 座屈試験の荷重変位曲線
 (解説) 同図に示す荷重変位曲線は、典型的な曲線を事例として示したものである。

表6 座屈試験の結果

試験体条件		座屈強度					
		強軸方向			弱軸方向		
		平均値 N/mm ²	標準偏差 N/mm ²	変動係数 %	平均値 N/mm ²	標準偏差 N/mm ²	変動係数 %
細長比	λ=75	7.19	0.15	2.1	1.67	0.088	5.3
	λ=34	13.3	0.25	1.9	4.85	0.31	6.4

実大のヒノキスギ異樹種構成のCLT(Mx120)について、座屈強度に関する知見を実験により収集し、一部の例外はあったものの長柱の座屈耐力は、強軸方向についてはオイラーの座屈荷重式を用いて概ね算定することが可能であるという知見を得た。また、弱軸方向については、実験値がオイラーの座屈荷重式を用いて算定した値の約2倍になっていたが、その原因として、最外層のラミナ（圧縮側）が座屈に対して抵抗していたことが考えられる（写真4、5、表7）。



写真4 曲げ試験の様子



写真5 座屈試験の様子
 (解説) 左：強軸方向加力
 右：弱軸方向加力

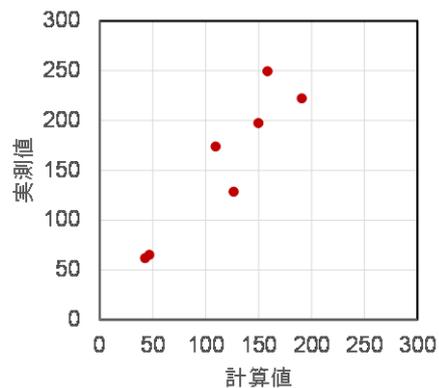
表7 座屈試験の結果

試験体名	試験体寸法			細長比	曲げ弾性係数 (kN/mm ²)	外層の 繊維方向と 加力方向	座屈耐力 (kN)
	幅 (mm)	長さ (mm)	厚さ (mm)				
3-3-s	296	2493	75	95.8	11.10	平行 (強軸)	329
3-3-w	296	2493	75	345.4	0.60	直交 (弱軸)	21
3-4-s	296	2890	100	75.7	9.76	平行 (強軸)	335
3-4-w	296	2890	100	200.2	1.33	直交 (弱軸)	84
5-5-s	296	2999	125	72.3	9.58	平行 (強軸)	552
5-5-w	296	2999	125	115.3	2.14	直交 (弱軸)	207
5-5-s	296	1084	125	26.1	5.60	平行 (強軸)	552
5-5-w	296	1084	125	41.7	1.73	直交 (弱軸)	207
5-7-s	296	3035	175	52.8	9.90	平行 (強軸)	927
5-7-w	296	3035	175	116.6	1.06	直交 (弱軸)	541

スギ異等級・非等厚構成 CLT (奇数層と偶数層でラミナの厚さが異なり、かつ幅はぎ接着された CLT) を対象として座屈試験を行い、実験を行った。いずれの層構成についても計算値が実測値よりも低い値となることを確認した。詳細に見ると、5つの仕様については実測値と計算値は概ね同じとなったが、2つの仕様については実測値と計算値が大きく異なり、実測値と計算値が異なる要因の解明が課題として残った。このように仕様によっては、実測値と計算値が異なったが、ラミナ厚が異なる直交集成板についても概ねオイラーの座屈荷重式を適用して、安全側を判断し得る座屈荷重を求めることができるという知見を得た (図 8)。



座屈試験の様子



実測値と計算値の比較

図8 座屈試験の様子と実験値と計算値の比較

スギ可変断面構成 CLT の座屈試験を行い、有効細長比が約 117 の試験体の座屈荷重は、192~220 kN の範囲にあり、明確な傾向は認められなかったものの直交層のラミナ幅が大きいほど座屈荷重が幾分高くなる傾向にあることを確認した。たわみ振動法にて測定した曲げ弾性係数を用いて求めた座屈荷重は、約 209~237 kN と測定よりもやや高く算出されたが、概ね一致することを確認した。一方、告示の方法により求めた座屈荷重は、177 kN 前後となり安全側の評価となることがわかった (表 8、図 9、写真 6)。

表8 座屈荷重の測定値と計算値

試験体名称	直交ラミナ幅	座屈荷重				座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
		測定値 (kN)	平均値 (kN)	標準偏差 (kN)	変動係数 (%)		
D555 U-CB-1-11	60mm	205.2	205.0	2.65	1.29	220.6	178.9
D534 U-CB-2-12	60mm	207.6				222.1	176.5
D535 U-CB-3-13	60mm	202.3	205.0	2.65	1.29	226.7	177.8
D536 U-CB-1-21	80mm	192.2	204.8	10.95	5.35	209.2	178.6
D537 U-CB-2-22	80mm	210.6				231.6	177.1
D538 U-CB-3-23	80mm	211.7	204.8	10.95	5.35	236.7	177.2
D540 U-CB-1-31	110mm	200.8	213.2	10.78	5.05	225.5	176.7
D541 U-CB-2-32	110mm	220.3				230.2	176.2
D542 U-CB-3-33	110mm	218.5	213.2	10.78	5.05	232.4	176.8

(注)座屈荷重計算値①は、オイラーの座屈荷重式によって求めた座屈荷重の値

(注)座屈荷重計算値②は、告示の方法により求めた座屈荷重の値

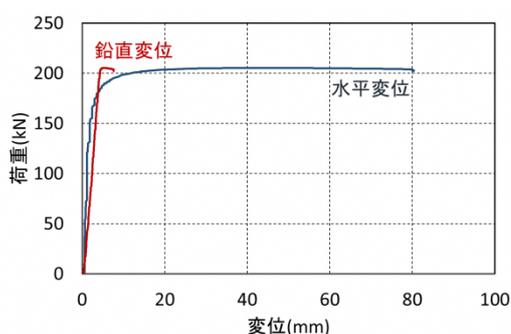


図9 荷重変位曲線の一例 (D534 U-CB-2-12)



写真6 座屈試験の様子

座屈荷重の評価に及ぼす寸法効果を確認するための試験を行い、スギラミナを用いて内層をM30 およびM60 としたMx90のCLT、いずれも有効細長比110について、外層ラミナの繊維方向を加力方向に対して平行とする強軸方向については、座屈強度は内層をM30とした試験体と内層をM60とした試験体の座屈強度に大きな違いが生じないことを確認した。有効細長比が110のときには、弾性座屈をするため、最中央層のラミナの弾性係数・圧縮強度は座屈に対して大きく寄与しないため、ラミナの強度等級の違いが顕著に現れないという知見を得た(表9、図10)。

表9 試験結果一覧

試験体No.	加力 方向	厚さ	幅	長さ	細長比	Pmax	Pcb	σ_{max}	σ_{cb}	$\sigma_{cbAve.}$
		(mm)	(mm)	(mm)		(kN)	(kN)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
S-B1-60b-C110-1	強軸 方向	125	300	3969	110	173.7	181.8	4.63	4.85	4.58
S-B1-60b-C110-2						154.8	166.7	4.13	4.45	
S-B1-60b-C110-3						155.5	166.7	4.15	4.45	
S-B2-30b-C110-1						183.8	192.3	4.90	5.13	5.16
S-B2-30b-C110-2						183.4	188.7	4.89	5.03	
S-B2-30b-C110-3						194.0	200.0	5.17	5.33	

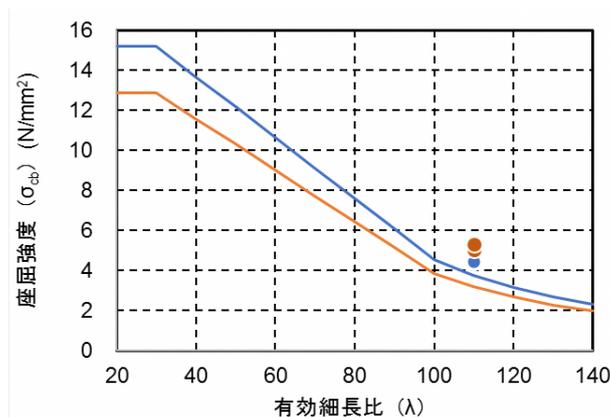


図10 告示式により求まる座屈強度の計算値と実験値により得られた座屈強度の比較

3) 成果活用における留意点

- ・面内せん断：一定範囲のラミナ寸法について、建築基準法告示の面内せん断強度算定式が①異等級構成、②異樹種構成、③非等厚構成、④可変断面構成のCLTにも適用可能であることを確認した点に注意が必要である。
- ・座屈：一定範囲のラミナ寸法について、建築基準法告示の座屈強度の算定式が①異等級構成、②異樹種構成、③非等厚構成、④可変断面構成のCLTにも適用可能であることを確認した点に注意が必要である。

4) 今後の課題

- ・面内せん断：建築基準法告示の面内せん断強度算定式が、①異等級構成、②異樹種構成、③非等厚構成、④可変断面構成のCLTにも適用可能であることを確認した。今後は、これらのパラメーターの複数が組み合わせられたCLTにも告示式が適用可能か、検討が必要である。また、告示式の簡略化が必要と考えられる。
- ・座屈：建築基準法告示の座屈強度の算定式が、①異等級構成、②異樹種構成、③非等厚構成、④可変断面構成のCLTにも適用可能であることを確認した。ただし、CLTについて、建築基準法告示の座屈強度の算定式において用いられている「(弾性係数) = (圧縮強度) × 300」との弾性係数と圧縮強度の関係が、全ての層構成、強度等級、樹種に適合するかどうか未確認であるとともに、個々の木材によっても上記の関係は異なるものと考えられる。座屈荷重を求める方法については、原点に立ち返り、曲げ弾性係数から直接座屈強度を算定する方法を検討し、提案する必要がある。

中課題番号	13405278	研究期間	平成25～29年度
小課題番号	22140	研究期間	平成25～29年度
契約課題名	伐採木材の高度利用技術の開発		
中課題名	強度性能評価技術の開発		
小課題名	自由な断面設計のためのシミュレーションによる強度推定技術の開発		
小課題代表研究機関・研究室・研究者名	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・複合材料研究領域・チーム長・宮武敦		
共同研究機関・研究室・研究者名等	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・構造利用研究領域・軽部正彦		

1) 研究目的

小課題21110で明らかになるスギひき板の材質・強度性能分布に基づいて、小課題21110、21130、22110、22120、22130と協議して試験体の仕様を決定する。決定した試験体の強度性能を、既往の研究成果に基づく手法を用いて推定する。

製品の強度性能を評価する小課題22110、22120、22130の成果に基づいて、既往の推定手法による異等級構成CLTの強度性能の推定精度を検証し、必要な改良を行ってCLT強度推定シミュレーション手法を提案する。

2) 研究成果

①CLT強度推定シミュレーション手法の検証

課題22110及び22120で得られたCLTの諸強度性能を小課題21110で明らかになったラミナの強度データに基づいて推定する手法について検討した。推定対象はCLTの面外および面内方向の曲げ強度と曲げヤング係数、圧縮強度および引張強度とその弾性係数とした。

CLTの強度推定に用いる理論としては、面外方向の曲げ強度については「せん断解析理論」及び「平行層理論」、面内方向の曲げ強度、圧縮強度および引張り強度については「平行層理論」を対象とした。また、面外方向の曲げヤング係数については「機械的接合梁理論」及び「平行層理論」、面内方向の曲げ、圧縮および引張りの弾性係数については「平行層理論」とした。

それぞれの理論を用いてラミナの平均値からCLT試験体の平均値を推定するとともに強度試験で得られた平均値と比較することで、理論の妥当性の検証を行った。

ラミナの曲げヤング係数および弾性係数については連続式グレーディングマシンで測定した曲げヤング係数、縦振動法で得た繊維方向の弾性係数を用い、必要に応じて繊維直交方向の弾性係数はその1/30、せん断弾性係数のうちLR面、LT面は1/16、RT面は1/160とした。各種強度については、サンプリング抽出して行ったラミナ試験で得られた数値を用いた。サンプリング試料の弾性係数が母集団のそれと異なる際には、ラミナ試験で

得られた弾性係数と強度の関係を用いて調整した。

課題22110及び22120で強度性能試験の対象としてきたひき板の強度等級、樹種、断面寸法とこれらの組合せをまとめて表1に示す。ひき板の樹種：強度等級は、スギ：M90、M60、M30、ヒノキ：M120、ラミナの断面寸法は厚さ：20mm、25mm、30mm、幅：62mm、87.5mm、102mm、105mm、112mm、ラミナの幅厚さ比：2.48、3.4、3.5、4.08、4.2、4.5、5.1となった。また、ラミナ構成は、3層3プライ、5層5プライ、5層7プライ、7層7プライとなった。表2に各種強度性能に対する推定理論の適用の妥当性についてまとめて示す。

表1 強度性能試験体の仕様

年度	層構成 幅はぎ接着の有無	ラミナ	樹種：等級	断面寸法 (mm) (幅厚さ比)
H25	5層5プライ 7層7プライ 幅はぎ接着なし	外層用	スギ：M90 スギ：M60	25×105 (4.08)
		内層用	スギ：M30	
H26	3層3プライ 5層5プライ 5層7プライ 7層7プライ 幅はぎ接着なし	外層用	ヒノキ：M120	25×102 (4.08)
		内層用	スギ：M30	
H27	3層3プライ 5層5プライ 幅はぎ接着あり	外層用	スギ：M60	20×102 (5.1) 25×102 (4.08) 30×102 (3.4)
		内層用	スギ：M30	25×102 (4.08) 30×102 (3.4) 平行層のみ
H28	3層3プライ 5層5プライ 幅はぎ接着なし	外層用	スギ：M90	25×62 (2.48) 25×87.5 (3.5)
		内層用	スギ：M30	25×112 (4.5)
H29	5層5プライ 幅はぎ接着なし	外層用	スギ：M60	25×105 (4.2) 平行層
		内層用	スギ：M30	25×105 (4.2) 平行層 25×62 (2.48) 直交層 25×87.5 (3.5) 直交層 25×112 (4.5) 直交層

表2 各種強度性能に対する推定理論の適用の妥当性検証結果

強度種類	性能	推定理論	H25	H26	H27	H28	H29
			異等級	異樹種	異厚	異幅厚さ比	異幅厚さ比
面外曲げ	ヤング係数	せん断解析	○	○	△	○	○
		平行層	×	×	○	×	△
	強度	機械接合梁	○	○	△	△	△
		平行層	×	×	○改良	○改良	←○
面内曲げ	ヤング係数	平行層	△	△	○改良	←○	←○
	強度	平行層	△	△	○改良	←○	←○
圧縮	ヤング係数	平行層	○	○	○	○	○
	強度	平行層	△	△	○	○	○
引張り	ヤング係数	平行層	○	○	○	○	○
	強度	平行層	△	△	△	△	○

【面外方向の曲げヤング係数】

せん断解析理論の推定精度が良い。その際、繊維直交方向の弾性係数は繊維方向の曲げヤング係数 E_m の1/30、せん断弾性係数のうちLR面、LT面は E_m の1/16、RT面は E_m の1/160とした。代入する特性値としては連続式グレーディングマシンで測定した曲げヤング係数を用いるのが良い。

【面外方向の曲げ強度】

機械的接合梁理論による推定値は、若干危険側の推定値となる傾向はあるが妥当性は平行層理論より高いと考えられる。ただし、機械的接合梁理論による計算は荷重条件や支持条件のパラメーターを含んでおり実建物の構造計算としてより有効な側面がある。一方、平行層理論による推定は危険側の推定となるが、せん断弾性係数による解析を加味することでその推定精度は向上した。ラミナ試験用に抽出した試験体群から得られた曲げヤング係数の分布と試験体採取用パネル製造時にグレーディングマシンで測定した曲げヤング係数の分布が異なる場合には、両者の曲げヤング係数の差で生じると考えられる曲げ強度の差を回帰分析により考慮して用いた方が良い。

【面内方向の曲げヤング係数】

平行層理論による推定は若干危険側の推定となるが、面内せん断弾性係数を考慮することでその精度が向上した。

【面内方向の曲げ強度】

平行層理論による推定は危険側となる。曲げ破壊時の変形量にせん断による付加たわみを考慮すること、代入するラミナ強度特性値には縦使い方向の曲げ強度を用いること、さらにラミナの縦使い方向の曲げ試験時の厚さとCLTの面内曲げ試験時の厚さの違いによる曲げ強度の違いを寸法調整係数により調整することが必要である。寸法調整係数には、構造用集成材で用いられている（ラミナ厚さ/CLT厚さ）^(1/9)を適用しても問題ないと考えられた。

【圧縮弾性係数】

平行層理論による推定は妥当である。

【圧縮強度】

平行層理論による推定は安全側ではあるが精度は低い。直交層ラミナの弾性係数考慮することで精度が向上する。

【引張り弾性係数】

平行層理論による推定は妥当である。

【引張り強度】

平行層理論による推定は若干危険側の推定となる傾向があった。ラミナ試験でたて継ぎ部以外の評価と解析を加える必要がある。

②ラミナ追跡システムの構築

原料ラミナの曲げヤング係数や密度を測定した後、節などの欠点除去切断位置を指定し使用する区間に個体ラミナ識別のための2次元バーコード（QRコード）を貼付した。また、原料ラミナ内の使用箇所始点と終点の位置情報をQRコードによる特製規定を用いて記録した。指定位置で切断されたラミナは、フィンガージョイント（以下FJ）製造ラインでたて継ぎして所定長さのFJラミナとなるが、この識別を行うための識別番号用のQRコードを木口面に貼付するとともにFJラミナに使用された個体ラミナ識別番号とたて継

位置をQRコードによる特制定規を用いて記録した。ひき板の積層接着工程の調板の段階では、FJラミナ識別番号の投入順を記録するとともに、積層接着後のCLTパネルの側面にあるQRコードも記録し、CLT内のFJラミナ位置を記録した。

③データベース構築

原料ラミナの曲げヤング係数や密度情報をCLT内の位置情報と合致させるため、4年度分の試験体に関するこれらデータのデータベース化を行った。

このデータベースを用いて、原料ラミナからCLTパネルに至るまでの間の追跡したデータ数を表3に示す。4年間で製造したCLTパネル63体に対して、原料ラミナ12,513枚、たて継ぎ前の切断ラミナ59,691枚、フィンガージョイントによるたて継ぎラミナ12,402枚を追跡したことがわかった。CLTパネル製造に用いられたラミナのうち材質データが追跡できたものの枚数の比率を捕捉率とすると、それぞれ82%、83%、97%となり、CLTパネルに近いほど高かった。

表3 ラミナの材質追跡システム構築における対象データ数とその捕捉率

データ数	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	合計
CLTパネル	13	16	19	15	63
プライ	69	76	89	73	307
FJラミナ	3,059	3,146	2,844	3,353	12,402
切断ラミナ	15,226	18,989	11,283	14,193	59,691
元ラミナ	3,281	3,888	2,300	3,044	12,513
備考	強度等級 スギ異等級	強度等級 ヒノキ・スギ	ラミナ厚さ 平行層 20, 25, 30mm	ラミナ厚さ幅 比直交層 2.5t, 3.5t, 4.5t	
データ捕捉率	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	合計
CLTパネル	100%	100%	100%	100%	100%
プライ	100%	100%	100%	100%	100%
FJラミナ	90%	100%	100%	99%	97%
切断ラミナ	68%	90%	83%	84%	83%
元ラミナ	66%	89%	82%	83%	82%

④強度推定用ソフトウェアの開発

データベース化した原料ラミナの曲げヤング係数とサンプリングして実施した強度試験に基づくラミナの強度特性値を用いて、パネル、あるいはパネルの特定の範囲の強度性能をこれまで検証してきた強度評価手法により推定するソフトを試作した。またCLTとしての強度推定のアルゴリズムは同じながら、乱数を用いて生成した仮想ラミナを用いたモンテカルロ法によるシミュレーション計算を行えるようにもした。

本ソフトをこれまで製造してきたCLTパネルを対象としたデータベースに適用する際の適用範囲を表4に示す。一方、仮想ラミナを用いた強度シミュレーションの適用範囲は、強度推定法を実大強度試験により検証した範囲内とすべきであるが、実験的な検証や試行を可能とするため、その範囲を拡げてある。表4に適用範囲上の留意点をまとめて示す。

図1は、仮想ラミナを用いたシミュレーションによりパネル内の曲げヤング係数の分布を計算して示した例である。

表4 強度推定ソフトの適用範囲に関する留意点

パラメーター	データベース利用	仮想ラミナによるシミュレーション
ラミナ強度等級	M30、M60、M90、M120	平均・変動係数を設定し、プライ毎に上限・下限を設定可。
樹種	スギ、ヒノキ（外層のみ）	具体的に樹種による設定はない。曲げヤング係数・弾性係数で代用。
ラミナ厚さ	20mm、25mm、30mm	自由に設定可、左欄の範囲を超える場合は確認必要。また、非対称構成にも対応可であるが確認必要
ラミナ幅	62.5mm、75mm、105mm、112mm	自由に設定可、左欄の範囲を超える場合は確認必要
ラミナ幅厚さ比	2.5、3.5、4.5	自由に設定可、左欄の範囲を超える場合は確認必要
ラミナ長さ	300mm～2000mm	平均値と変動係数を設定可
層構成	3層3プライ、3層4プライ、5層5プライ、5層7プライ、7層7プライ	JAS構成に対応可、左欄以外の9層9プライについては確認必要

[仮想データ] 厚さ:125 幅:2040 長さ:4090 プライ数:5 180220122448

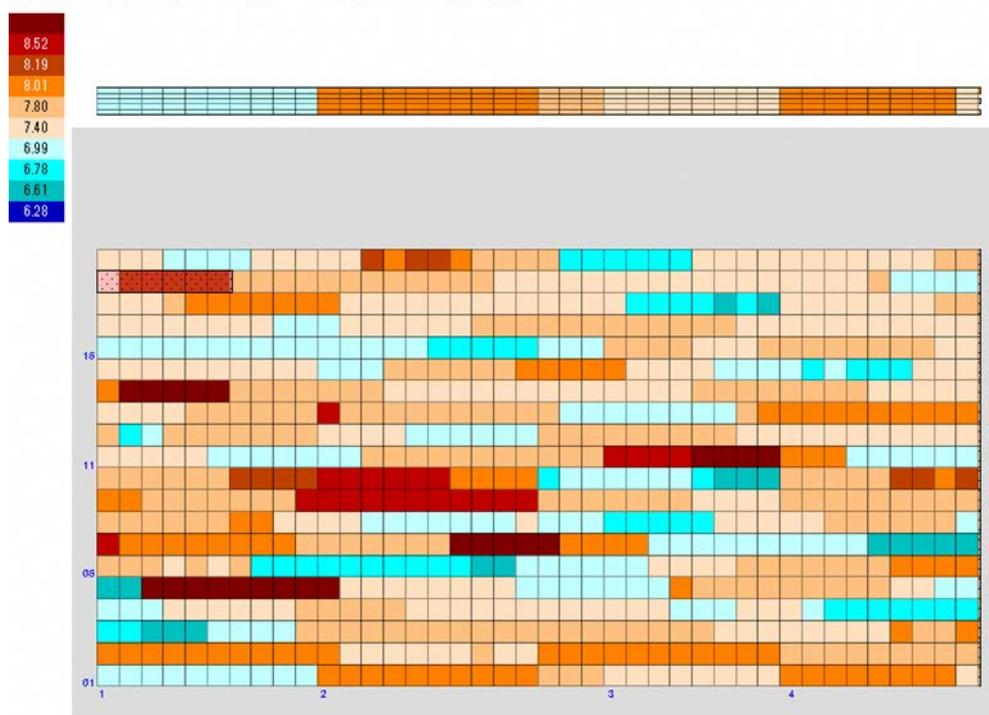


図1 仮想ラミナを用いたシミュレーションによるCLTパネル内の曲げヤング係数分布評価の例

3) 成果活用における留意点

ラミナ幅厚さ比が直交層挙動の影響を介して強度性能与える影響についてその現象把握と解析は引き続き必要であるが、本プロジェクトで対象とした試験および解析の範囲では考慮する必要がないと考えられる。

4) 今後の課題

4年度分の試験体に関するデータベースを活用することで、これまでの研究成果の解析精度を向上させることが可能である。また、それに伴うソフトの改良が必要になる可能性がある。

V これまでの研究実施期間における研究成果(論文発表、特許他)【一般公表可】

課題番号 13405278

成果等の集計数

課題番号	学術論文		学会等発表(口頭またはポスター)		出版図書	国内特許権等		国際特許権等		報道件数	普及しうる成果	発表会の主催(シンポジウム・セミナー等)	アウトリーチ活動
	和文	欧文	国内	国際		出願	取得	出願	取得				
13405278	1	0	28	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0

注1)学術論文数は直接本事業の成果を掲載したものに限定してカウントすること。

(1)学術論文

区分: ①原著論文、②その他論文

整理番号	区分	機関名	タイトル	著者	掲載誌	巻(号)	掲載ページ	発行年	発行月
1	①	鳥取県林業試験場	CLTの強軸・弱軸方向における反り特性	川上敬介、桐林真人、平松靖、宮本康太、山下香菜、藤原健、宮武敦	木材工業	71 (1)	14-19	2016	1

注1)和文、欧文の順で記載。発行年は発行年月(西暦年以下同じ)とする。

注2)区分①の原著論文(受理されたものに限る)は、謝辞等に本事業予算の支援を受けたことが明記されていること。また、論文は直接本事業の成果を掲載したものに限定して記載すること。

注3)機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

(2)学会等発表(口頭またはポスター)

整理番号	タイトル	発表者名	機関名	学会等名	発行年	発行月
1	CLTの反り特性(第1報) 二室型環境試験機を用いた強軸・弱軸方向試験体の反りの経時変化	川上敬介、桐林真人、平松靖、山下香菜、藤原健、宮本康太、塔村真一郎	鳥取県林業試験場	日本木材学会	2014	3
2	二次元バーコードを使った部材追跡の試み その2 CLT製造の場合	軽部正彦、宮武敦、宇京斉一郎	森林総合研究所	日本木材学会	2014	3
3	クロス・ラミネイティド・ティンバー(CLT)の製造と性能評価 その11 強度性能推定手法の検討	宮武敦、洪沢龍也、平松靖、杉本健一、井道裕史、長尾博文、藤田和彦、中島史郎	森林総合研究所	日本木材学会	2014	3
4	CLTの反り特性(第2報) 温湿度の日変化が強軸・弱軸方向試験体の反りに及ぼす影響	桐林真人、川上敬介	鳥取県林業試験場	日本木材学会中国・四国支部	2014	9
5	スギを用いたCLTの面外せん断性能	新藤健太、宇京斉一郎、宮武敦、平松靖、軽部正彦	森林総合研究所	日本建築学会	2014	9
6	In-plane shear test of full scale cross laminated timber panels	Araki Y、Nakajima S、Yamaguchi Y、Nakagawa T、Miyatake A and Yasumura M	建築研究所	World Conference on Timber Engineering	2014	8
7	国産材を用いたCLTの力学特性 その4 クロス・ラミネーテッド・ティンバー(CLT)の座屈性状	中島史郎、宮武敦、洪沢龍也、新藤健太、孕石剛志、中島洋	建築研究所	日本木材学会	2014	3
8	クロス・ラミネイティド・ティンバー(CLT)の座屈性状	中島史郎、宮武敦、洪沢龍也、新藤健太、荒木康弘、孕石剛志	建築研究所	日本建築学会	2014	8

9	CLTの曲げ、縦圧縮、縦引張り強度性能推定の検討	宮武敦、中島史郎、藤田和彦、小玉泰義、洪沢龍也、杉本健一、平松靖、長尾博文、軽部正彦、宇京齊一郎、新藤健太、井道裕史、加藤英雄、原田真樹	森林総合研究所	日本建築学会	2014	8
10	木質構造材料用接着剤の空隙充填性能の評価	宮本康太、塔村真一郎、林誠二郎、濱井篤志、池田尊子	森林総合研究所	日本木材学会	2015	3
11	1 液型ポリウレタン接着剤の動的粘弾性 —硬化過程の動的粘弾性の変化と硬化物の熱的性質について—	宮崎淳子、塔村真一郎、宮本康太	北海道立総合研究機構 林産試験場	日本木材学会	2015	3
12	CLT(Cross laminated timber)の試作と接着性能の評価(4) —試験片採取位置の影響—	宮本康太、塔村真一郎、宮武敦、井上明生、平松靖、新藤健太	森林総合研究所	日本木材加工技術協会	2015	9
13	CLTの面外せん断強度性能 その2 デジタル画像相関法を用いたひずみ分布観察について	宇京齊一郎、新藤健太、宮武敦、軽部正彦、藤田和彦	森林総合研究所	日本建築学会	2015	8
14	CLTの面外方向の曲げ性能 その1 層構成とラミナ等級の影響	藤田和彦、野沢浩二、洪沢龍也、宮本康太、宮武敦、新藤健太、長尾博文、加藤英雄、井道裕史、宇京齊一郎、孕石剛志	広島県立総合技術研究所林業技術センター	日本建築学会	2015	8
15	CLTの反り特性(第3報) 異樹種異等級で構成された強軸・弱軸方向試験体の反りの経時変化	川上敬介、桐林真人、平松靖、宮武敦	鳥取県林業試験場	日本木材学会	2015	3

16	スギ異等級構成CLTの強軸・弱軸方向の寸法変化	藤原健、山下香 菜、平松靖、新藤 健太、宮武敦	森林総合研究所	日本木材学会	2015	3
17	簡便なモデルによるCLTの弾性係数の推定	久保島吉貴、平 松靖、渋沢龍也、 宮武敦	森林総合研究所	日本木材学会	2015	3
18	スギ材を用いたクロス・ラミネイティド・ティンバー (CLT) の荷 重継続時間調整係数	藤田和彦、野沢 浩二、石井利典、 渋沢龍也、宮武 敦、長尾博文、加 藤英雄、中島史 郎、孕石剛志	広島県立総合技術研究所林 業技術センター	日本木材学会	2015	3
19	二次元バーコードを使った部材追跡の試み その3 CLT ラミ ナ追跡における改良	軽部正彦、宮武 敦、宇京斉一郎	森林総合研究所	日本木材学会	2015	3
20	CLTの圧縮性能(短柱)に層構成とラミナ等級が与える影響	野田康信、井道 裕史、杉本健一、 小木曾純子、大 橋義徳、高梨隆 也、松本和茂、玉 置教司、宮武 敦	森林総合研究所	日本建築学会	2015	8
21	Evaluation of the shear strength of cross-laminated timber under out-of-plane loading	S.Ukyo, K.Shindo, A.Miyatake	森林総合研究所	World Conference on Timber Engineering	2016	8
22	Short-column compressive strength properties of representative Japanese cross-laminated timber	野田康信、井道 裕史、杉本健一、 軽部正彦、小木 曾純子、宮武敦	森林総合研究所	World Conference on Timber Engineering	2016	8
23	CLTの面外せん断性能 その2 ラミナ厚さを変動させた場合の影響	新藤健太、宮武 敦、宇京斉一郎、 平松 靖	森林総合研究所	日本建築学会	2016	8
24	木質構造材料用接着剤の耐熱性能の評価	宮本康太、塔村 真一郎、宮崎淳 子、林誠二郎、濱 井篤志、池田尊 子	森林総合研究所	日本木材学会	2016	3

25	CLTの反り特性(第4報) 異等厚のラミナで構成された強軸・弱軸方向試験体の反りの経時変化	川上敬介、桐林真人、平松靖、宮武敦	鳥取県林業試験場	日本木材学会	2016	3
26	二次元バーコードを使った部材追跡の試み その4 FJ前後のラミナ比較	軽部正彦、宮武敦、小木曾純子	森林総合研究所	日本木材学会	2016	3
27	直交集成板(CLT)の面外方向加力におけるせん断耐力評価 －CLT断面の応力分布解析	宇京斉一郎、新藤健太、宮武敦	森林総合研究所	日本木材学会	2017	3
28	一液型ポリウレタン接着剤および水性高分子-イソシアネート系接着剤のクリープ性能	宮崎淳子、松本和茂、大橋義徳、塔村真一郎、宮本康太、濱井篤志、池田尊子	北海道立総合研究機構 林産試験場	日本木材学会	2017	3
29	CLT(Cross laminated timber)の試作と接着性能の評価(5)－ 屋外暴露試験5年目の接着性能－	宮本康太、塔村真一郎、宮武敦、平松靖、新藤健太	森林総合研究所	日本木材加工技術協会	2017	9
30	CLTの反り特性(第5報) ラミナの幅・厚さ比の違いが弱軸方向試験体の反りに及ぼす影響	川上敬介、桐林真人、平松靖、宮武敦	鳥取県林業試験場	日本木材学会	2018	3
31	構成が異なる5層5プライCLTにおける寸法変化	藤原健、山下香菜、平松靖、新藤健太、宮武敦	森林総合研究所	日本木材学会	2018	3

注1)機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

(3) 出版図書

区分：①出版著書、②雑誌(注)(1)学術論文に記載したものを除く、重複記載をしない。)、③年報、④広報誌、⑤その他

整理番号	区分	著書名(タイトル)	著者名	機関名	出版社	発行年	発行月
1	②	森林と林業 研究情報「直交集成板(CLT)の強度評価の現場から」	宇京斉一郎、新藤健太、宮武敦	森林総合研究所	一般社団法人日本林業協会	2016	12
1	③	平成26年度業務報告	川上敬介	鳥取県林業試験場	鳥取県林業試験場	2015	7
1	③	平成27年度業務報告	川上敬介	鳥取県林業試験場	鳥取県林業試験場	2016	7
1	③	平成28年度業務報告	川上敬介	鳥取県林業試験場	鳥取県林業試験場	2017	7
1	③	平成29年度業務報告	川上敬介	鳥取県林業試験場	鳥取県林業試験場	2018	11

注1) 機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

注2) 複数機関ある場合は著者名の順番と合わせる。

(4) 国内特許権等

整理番号	特許権等の名称	発明者	権利者(出願人等)	機関名	特許権等の種類	番号	出願年月日	取得年月日

注1) 「特許権等の種類」には、特許権、実用新案権、意匠権、回路配置利用権及び品種登録を記載する。

注2) 複数の機関による共同出願の場合は、主となる出願人の下に行を追加し、共同出願人の情報を記載する。

(5) 国際特許権等

整理番号	特許権等の名称	発明者	権利者(出願人等)	機関名	特許権等の種類	番号	出願年月日	取得年月日	出願国

注1) 複数の機関による共同出願の場合は、主となる出願人の下に行を追加し、共同出願人の情報を記載する。

(6)報道等

区分:①プレスリリース、②新聞記事、③テレビ放映、④その他

区分	記事等の名称	掲載紙・放送社名等	掲載年	掲載月	掲載日	機関名	備考

注1)機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

(7)普及に移しうる成果

区分:①普及に移されたもの、製品化して普及できるもの、②普及のめどがたったもの、製品化して普及のめどがたったもの、③主要成果として外部評価を受けたもの

区分	成果の名称	機関名	普及(製品化) 年月	主な利用場面	普及状況

注1)区分は複数可。

注2)機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

(8)発表会の主催の状況

(シンポジウム・セミナー等を記載する。)

整理番号	発表会の名称	年月日	開催場所	参加者数	機関名	備考

注1)機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

(9)アウトリーチ活動の状況

当事業の研究課題におけるアウトリーチ活動の内容は以下のとおり。

区分:①一般市民向けのシンポジウム、講演会及び公開講座、サイエンスカフェ等、②展示会及びフェアへの出展、大学及び研究所等の一般公開への参画、

③その他(子供向け出前授業等)

整理番号	区分	アウトリーチ活動	年月日	開催場所	参加者数	主な参加者	機関名	備考

注1)機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。