スギ集成材の10年間屋外暴露の結果 (第1報)

せん断強度および木部破断率^{*1}柳川靖夫^{*2}

Results of Outdoor Exposure Test for Sugi Glulam I.

Shear strength and wood failure ratio^{*1}Yasuo YANAGAWA^{*2}

We manufactured 5-ply sugi glulams with laminations treated with wood preservatives (ACQ, AZP) or untreated controls using two adhesive resins (PRF, API) and exposed them under outdoor conditions for 10 years. Shear strength of ACQ treated glulams decreased with exposure duration regardless of application of exterior finish or type of adhesive resin. The decrease was larger for PRF bonded than API bonded glulams. The decrease of shear strength for AZP treated and untreated glulam was less than for ACQ treatment. Shear strength of glulams with exterior finish repainted periodically hardly decreased after 10 years of exposure. Shear strength of glulam without wood preservatives or exterior finish decreased because of wood decay. However, for analysis omitting decayed pieces, shear strength of those glulams hardly decreased. Shear strength of pieces obtained from the middle part of the width direction of glulam tend to show higher values than pieces from either outer sides.

Keywords: outdoor-exposure-test, bonding-durability, glulam, sugi, wood-preservative.

木材保存剤 (ACQ および AZP) で処理したラミナあるいは無処理ラミナを使用して、5 プライのスギ集成材を2種類の接着剤 (PRF および API) で作製し、10年間の屋外暴露試験により接着耐久性を調べた。ACQ で処理した集成材は、接着剤の種類および木材保護塗料の塗布方法にかかわらず、暴露年数とともにせん断強度は低下し、PRF を使用した集成材のせん断強度の低下は API を使用した集成材よりも大きかった。AZP で処理した集成材および無処理集成材では、せん断強度の低下は ACQ で処理した集成材よりも小さく、木材保護塗料を定期的に再塗布した集成材では、暴露10年後でもせん断強度はほとんど低下していなかった。木材保護塗料が無塗布で木材保存剤無処理の集成材では、木材腐朽のためせん断強度は低下したものの、腐朽した試験片を除いたせん断強度は暴露10年後でもほとんど低下していなかった。幅方向の中央部から採取した試験片は、両端部より採取した試験片よりも高いせん断強度を示した。

1. 緒 言

木質材料の接着耐久性や接着性能を評価する手法として、促進劣化試験および屋外暴露試験が実施さ

れている。この中、促進劣化試験は比較的短期間で結果が得られるため汎用されており、日本農林規格あるいは日本工業規格で各種木質材料の試験方法が規定されている。しかし、長期間の接着耐久性を調べるには促進劣化試験のみでは十分とは言えず、これを補う試験として屋外暴露試験が挙げられる¹⁻³⁾。屋外暴露試験は時間を要し、断面の大きな部材では十年単位にもおよぶ。そのため、集成材等の軸材料では実施例が少なく^{4,5)}、試験期間短縮のため小試験片を使用した屋外暴露試験も検討されている⁶⁻⁹⁾。本研究では、2種類の木材保存剤 (以下薬剤とする) でラミナを処理した後、2種類の接着剤を使用して

^{*1} Received March 1, 2013; accepted May 27, 2013.
本報の一部は第60回日本木材学会大会 (2011年3月、札幌) において発表した。

^{*2} 奈良県森林技術センター Nara Forest Research Institute, Takatori 635-0133, Japan

Corresponding author: Y. Yanagawa (yanagawa@naraforinsti.pref.nara.jp)

作製した集成材を10年間の屋外暴露試験および促進劣化試験に供した。本報では、屋外暴露試験での集成材の接着耐久性に影響を及ぼす因子として、接着剤の種類、木材保護塗料（以下保護塗料とする）の塗布方法、試験片の採取位置、および密度について調べた結果を報告する。

2. 材料および方法

2.1 試料の作製および試験

Table 1 に作製した集成材の種類、作製条件および採取試験片数を示す。

集成材の作製に使用したスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) ラミナの調製、およびラミナへの薬剤処理は既報⁶⁾ のとおりである。薬剤には、銅・アルキルアンモニウム化合物系木材防腐剤（株コシイプレザービング製マイトレック ACQ、以下 ACQ とする）およびアゾール・プロピタンホス系木材防腐剤（株エス・ディー・エスパイオテック製 SB-150ME、以下 AZP とする）を使用した。薬剤処理後ラミナを乾燥し、集成材を作製した。接着剤には、フェノール・レゾルシノール樹脂接着剤（アイカ工業株 PR-10、以下 PRF とする）および水性高分子・イソシアネート樹脂接着剤（光洋産業株 KR-7800、以下 API とする）を使用した。なお、薬剤無処理のラミナを使用した集成材（以下無処理、Control とする）も同様に作製した。養生後に、ACQ 処理および AZP 処理は断面を110×110 mm、長さ1200 mm に調製し、Control は断面を105×105 mm に、長さを1000 mm に調製して屋外暴露試験に供した。各集成材は高さ1000 mm のステンレス製の枠上、長さ方向を南北とし接着層を水平として静置した。Table 1 に示すとおり、ACQ 処理および AZP 処理では、各接着剤で作製したそれぞれ8

体の集成材の中、3体は2～3年毎に保護塗料（株コシイプレザービング、ステンブーフ）を全面に塗布し（以下再塗布とする）、3体は暴露開始前のみ全面に塗布し（以下開始時塗布とする）、残る2体は塗布しなかった（以下無塗布とする）。Control では、各接着剤で作製したそれぞれ8体の中4体を再塗布、4体を無塗布とした。なお、全集成材とも両木口面のみは毎年保護塗料を塗布した。

暴露開始は1999年8月上旬で、暴露1, 3, 5, および10年後（以下1年等とする）に、Fig.1 に示すとおり各集成材の南側木口面からそれぞれ長さ220 mm の試験体を採取し、20℃、65% RH 雰囲気中に3ヶ月間静置した後ブロックせん断試験片を採取した。試験片を20℃、65% RH 雰囲気中で恒量に達す

Fig. 1. Preparation of block shear test pieces.

Table 1. Specifications of sugi glulams for outdoor exposure test and number of test piece.

Wood preservatives ^{a)}	ACQ			AZP			Control	
Adhesive resins ^{b)}	PRF, API							
Lamination number	5							
Dimension of cross section	110×110 mm						105×105 mm	
Density (g/cm ³)	0.32~0.51			0.31~0.49			0.31~0.50	
Aplication of exterior finish and number of glulams ^{c)}	Re 3	Start 3	Non 2	Re 3	Start 3	Non 2	Re 2	Non 2
0	48			48			24	
Number of test pieces ^{d)}	27	27	18	27	27	18	18	18
1, 3, 5	84	36	72	84	36	72	72	24
10	84	36	72	84	36	72	72	24

Notes: ^{a)}: ACQ: Ammoniacal copper quaternary ammonium compound, AZP: cyproconazole propetamphos, Control: untreated. ^{b)}: PRF: Phenol resorcinol, API: aqueous polymer isocyanate. ^{c)}: Re: Applied every few yaer, Start: applied at test start, Non: not applied. ^{d)}: 0, 1, 3, 5, 10: Duration years.

るまで静置した後、せん断強度を測定した。試験には東京衡機製造所製アムスラー型材料試験機を使用し、荷重速度を毎分9.8 kN以下とした。破壊後に木部破断率を測定し、目視で接着層が確認できない木部破断を深木部破断¹⁰⁾として深木部破断率を測定した。また、暴露前の集成材（以下0年とする）からも同様にブロックせん断試験片を調製し、試験を行った。なお、作製した集成材は5プライであったことから、測定対象の接着層数はTable 1に示した試験片数の4倍に相当する。

3. 結 果

Table 2に、屋外暴露後のせん断強度を示す。

3.1 接着剤とせん断強度

ACQ処理のラミナをPRFで接着して作製した集成材（以下ACQ-PRFとする）では、接着性能が低下することが報告^{7-9, 11)}されており、本研究でもせん断強度の低下が認められた。0年のせん断強度平均値に対する暴露後のせん断強度平均値の比率（以下対初期せん断強度比とする）は、10年後のACQ-PRFでは、再塗布は66%、開始時塗布は63%、無塗布は77%であった。一方、ACQ-APIでの10年後の対初期せん断強度比は、再塗布で86%、開始時塗布で85%、無塗布で83%であり、ACQ-PRFよりも低下は少なかった。そこで、10年後のせん断強度について、保護塗料の塗布方法別にPRFとAPIとの間で1元配置の分散分析を行った。なお、Controlでは、腐朽した木材を含む接着層は除外した。除外した接着層数は、PRFの再塗布は0、APIの再塗布は1、PRFの無塗布は14、APIの無塗布は45であった。Table 3に示すとおり、ACQ処理

では保護塗料の塗布方法にかかわらず、1%以下の水準で有意差が認められた。せん断強度平均値を比較すると、いずれもAPI>PRFであった。これは、促進劣化試験⁸⁾および小試験片を使用した屋外暴露試験⁹⁾で得られた結果と一致している。したがって、実大集成材の屋外暴露試験でも、ACQ処理が接着耐久性に及ぼす影響は、PRFよりAPIの方が小さいと考えられる。

AZP処理によるせん断強度低下はACQ処理ほど顕著ではなく、接着剤間で比較すると、Table 3のとおり開始時塗布および無塗布で有意な差が認められ、平均値を比較すると、いずれもAPI>PRFであった。Controlでは、接着剤間で有意な差は認められなかった。

APIは湿潤状態で接着強度が低下するため¹²⁾、PRFよりも接着耐久性は低いとされている。しかし、本研究ではAPIはPRFと同等以上の接着耐久性を示した。この理由として、まず、APIは薬剤

Table 3. Results of analysis of variance between adhesive resins.

Exterior finish ^{a)}	Wood preservatives ^{b)}		
	ACQ	AZP	Control
Re	API**	—	—
Start	API**	API**	NA
Non	API**	API**	—

Note: Analysis between PRF and API shows the higher value based on comparison of average strength. For controls glue layers with decayed wood are omitted. **: significant at 1% level, —: not significant, NA: not analyzed.

^{a), b)}: See Table 1.

Table 2. Shear strength of sugi glulams after outdoor exposure.

(N/mm²)

Duration years	0	1	3	5	10	0	1	3	5	10
Specimen ^{a)}	PRF/Re					API/Re				
ACQ	9.2(1.9)	8.9(2.1)	8.7(2.1)	7.7(2.4)	6.1(3.1)	9.0(1.7)	9.0(1.5)	8.9(1.4)	8.7(1.2)	7.7(1.5)
AZP	9.2(1.4)	8.8(2.0)	9.3(1.7)	9.6(2.3)	9.0(2.8)	8.8(1.3)	8.3(2.2)	8.7(1.4)	9.2(1.5)	9.2(1.5)
Control	9.2(1.5)	9.3(1.4)	9.7(1.4)	10.2(1.6)	9.4(1.5)	8.2(1.3)	8.5(1.5)	9.2(1.8)	9.3(2.0)	8.3(2.1)
Specimen	PRF/Start					API/Start				
ACQ	8.6(1.4)	8.0(2.0)	7.3(1.7)	6.5(2.3)	5.4(2.8)	8.5(1.5)	8.5(1.4)	8.2(1.7)	8.5(1.2)	7.2(1.6)
AZP	9.3(1.1)	8.7(1.4)	8.5(1.3)	8.6(1.9)	8.7(1.6)	8.7(1.4)	8.9(1.4)	8.8(1.6)	8.9(1.7)	9.4(1.8)
Specimen	PRF/Non					API/Non				
ACQ	7.5(1.5)	8.3(1.0)	7.3(1.3)	6.1(1.5)	5.8(2.3)	8.1(1.3)	7.8(1.5)	7.3(1.6)	7.1(1.5)	6.7(1.8)
AZP	8.4(1.7)	7.8(1.0)	7.8(1.0)	8.2(1.1)	8.3(1.6)	8.4(1.3)	7.5(1.7)	8.1(1.1)	8.1(1.1)	8.7(1.4)
Control(all) ^{b)}	9.2(1.1)	9.6(0.8)	9.2(1.6)	9.3(1.5)	8.7(2.2)	8.2(1.3)	7.9(2.3)	8.5(1.3)	8.7(2.3)	8.3(2.1)
Control(sound) ^{c)}	—	—	—	—	9.2(1.6)	—	—	—	—	9.3(1.6)

Notes: All are averaged values, and values in parentheses are standard deviation. ^{a)}: See Table 1. ^{b)}: All test pieces. ^{c)}: Glue layers with decayed wood are omitted.

処理の影響がPRFよりも小さいことが挙げられる。また、暴露後に採取した試験片の含水率は15%前後であったため、暴露中の含水率増加は小さかったと推測され、このこともAPIの接着性能の低下が進行しなかった一因と考えられる。

3.2 木材保護塗料とせん断強度

Table 4に、保護塗料の塗布方法間でせん断強度について実施した、ノンパラメトリック多重比較であるSteel-Dwass分析（以下SD分析とする）の結果を、接着剤別および薬剤処理別に示す。なお、Controlは、3.1と同様に腐朽した木材を含む接着層は除外した。

ACQ-PRFでは、塗布方法間で有意な差は認められなかった。AZP-PRFでは、再塗布と無塗布との間で1%の水準で、Control-PRFでは、再塗布と無塗布との間で5%の水準で、それぞれ有意な差が認められた。これに対し、APIを使用した集成材では、AZPの再塗布-開始時塗布を除いて、1%または5%の水準で有意な差が認められた。この結果は、ACQ-PRFのようにせん断強度の低下が大きい条件では、保護塗料を定期的に塗布してもせん断強度の低下を防ぐには不十分であることを示唆している。しかし、保護塗料の塗布効果には注目される。例えば、Control-PRFでは、Table 2に示すとおり、10年後の再塗布でのせん断強度平均値は9.4 N/mm²であった。一方、無塗布の全試験片平均値は8.7 N/mm²であり、腐朽した木材を含む接着層を除くと平均値は9.2 N/mm²であった。したがって、Control-PRFの再塗布と無塗布全試験片との間のせん断強度の差は、木材腐朽に起因するものと考えられる。外観上も、Controlの再塗布では10年後でもほとんど腐朽は見られなかったのに対し、無塗布ではすべ

ての試験体で腐朽が見られた。そのため、薬剤で処理されていない場合は、保護塗料を定期的に塗布する効果は大きいと思われる。

3.3 試験片採取位置とせん断強度

Table 5に、SD分析により試験片採取位置間でせん断強度を比較した結果を、再塗布と無塗布について薬剤別に示す。Controlの無塗布では腐朽した木材を含む接着層を除外し、その数は、PRFの最塗布は0、APIの再塗布は西面の1、PRFの無塗布は東面が6、中間が2、西面が6であり、APIの無塗布は東面が20、西面が25であった。

薬剤の種類にかかわらず、APIの再塗布では、試験片採取位置の間でせん断強度に差は認められなかった。これは、3.1で記したとおり、APIは薬剤の影響が小さいこと、および劣化条件が緩やかであったことに加え、3.2で記したとおり保護塗料の塗布により、両側面、すなわち東面および西面でのせん断強度の低下が抑止されたためと推測される。一方、APIの無塗布では有意な差が認められた。ACQ-APIでは中央と西面および東面と西面との比較で、AZP-APIでは東面と中央および中央と西面との比較で、Control-APIでは中央と西面との比較で、それぞれ有意な差が認められ、せん断強度平均値はいずれも中央の方が高かった。Control-APIで差が認められた組み合わせが1条件にとどまったのは、SD分析に際し腐朽した試験片を除外したためと考えられる。

3.4 密度とせん断強度

同一の試験条件で、せん断強度についてノンパラ

Table 4. Results of Steel-Dwass analysis for exterior finish application.

Adhesive ^{a)}	Compared Factors ^{b)}		Wood preservatives ^{c)}		
			ACQ	AZP	Control
PRF	Re	Start	—	—	NA
	Re	Non	—	**>	*>
	Start	Non	—	—	NA
API	Re	Start	**>	—	NA
	Re	Non	**>	**>	**>
	Start	Non	*>	**>	NA

Notes: For controls glue layers with decayed wood are omitted. **, NA: See Table 3, *: significant at 5% level. Sign of inequality reveal the comparison of average shear strength between compared factors.

^{a-c)}: See Table 1.

Table 5. Results of Steel-Dwass analysis for location of test piece after 10 years exposure.

Adhesive/ Exterior finish ^{a)}	Compared locations ^{b)}		Wood preservatives ^{c)}		
			ACQ	AZP	Control
PRF/Re	East	Middle	*<	*<	*<
	East	West	*>	—	—
	Middle	West	**>	**>	—
API/Re	East	Middle	—	—	—
	East	West	—	—	—
	Middle	West	—	—	—
PRF/Non	East	Middle	**<	**<	**<
	East	West	—	—	—
	Middle	West	—	*>	*>
API/Non	East	Middle	—	**<	—
	East	West	**>	—	—
	Middle	West	*>	*>	*>

Notes: Same as Table 4. ^{a), c)}: See Table 1. ^{b)}: See Fig. 1.

メトリック比較であるクラスカル・ウォリス検定を実施した結果、暴露前では、すべての試験条件で5%以下の水準で密度間のせん断強度に有意な差が認められ、平均値を比較すると、いずれも高密度集成材>低密度集成材、であった。暴露後もほとんどの試験条件で同様の差が認められた。小試験片を使用した屋外暴露試験および促進劣化試験では、当初は高密度>低密度であったせん断強度は、劣化後には低密度>高密度に変化したことを報告した^{8,9)}。この原因として、膨潤・収縮に伴う変形は高密度試験片ほど大きいと、接着層に生じた応力は高密度の方が低密度よりも大きく、そのため、高密度の試験片ほどせん断強度の低下が大きかったものと推測した。しかし、実大集成材ではこのような結果は得られなかった。これは、屋外暴露試験における実大集成材の含水率変化は、促進劣化試験におけるブロックせん断試験片よりもはるかに小さく、寸法変化により接着層に生じた応力も密度にかかわらず小さかったため、暴露後のせん断強度も、高密度集成材>低密度集成材であったと推測される。

3.5 木部破断率および深木部破断率

Table 6 に木部破断率を、Table 7 に深木部破断率を示す。なお、Control は3.1と同様に腐朽した木材を含む接着層は除外した。

10年での木部破断率平均値は78~93%であり、保護塗料の塗布方法にかかわらず、顕著な低下は認められなかった。しかし、せん断強度の低下が大きかった ACQ-PRF の木部破断率平均値は、保護塗料の塗布方法にかかわらず AZP-PRF および Control-PRF よりも低かった。このことは、木材と接着剤

Table 6. Wood failure ratio of sugi glulams after outdoor exposure. (%)

Duration years	0	1	5	10	0	1	5	10
Specimen ^{a)}	PRF/Re ^{b)}				API/Re			
ACQ	98	96	86	80	100	100	87	89
AZP	99	97	93	92	100	100	82	82
Control	99	99	86	93	100	100	84	90
Specimen	PRF/Start				API/Start			
ACQ	98	99	83	82	100	100	84	86
AZP	97	98	92	87	100	100	87	78
Specimen	PRF/Non				API/Non			
ACQ	99	98	83	83	100	100	72	91
AZP	98	97	91	89	100	100	83	84
Control	99	99	88	93	100	100	79	90

Notes: All are averaged values, for controls glue layers with decayed wood are omitted. ^{a), b)}: See Table 1.

Table 7. Deep wood failure ratio of sugi glulams after outdoor exposure. (%)

Duration years	0	1	5	10	0	1	5	10
Specimen ^{a)}	PRF/Re ^{b)}				API/Re			
ACQ	77	67	34	32	59	55	54	48
AZP	69	59	47	53	52	53	41	49
Cont.	73	71	47	51	56	61	53	57
Specimen	PRF/Start				API/Start			
ACQ	63	64	33	36	63	54	40	46
AZP	66	66	47	54	58	53	52	45
Specimen	PRF/Non				API/Non			
ACQ	64	63	26	34	52	54	33	45
AZP	64	61	36	52	64	61	23	36
Cont.	73	60	40	57	56	53	57	57

Notes: Same as Table 6.

との界面（以下界面とする）の劣化が進行したことを示唆している。これに対し ACQ-API での木部破断率平均値は、保護塗料の塗布方法にかかわらず、AZP-API あるいは Control-API とほぼ同等またはそれ以上であった。せん断強度と同様に木部破断率でも、ACQ 処理の影響は API より PRF で大きかった。

深木部破断率については、接着層界面が劣化すると界面付近での破壊が増加するため深木部破断率は低下し、一方、木材が劣化すると深木部破断率は増加すると予想される。したがって、木材腐朽が発生し難い ACQ 処理および AZP 処理での深木部破断率は、主に界面の劣化を反映すると考えられ、Control では、界面の劣化および木材の劣化の影響を受けると考えられる。せん断強度の低下が大きかった ACQ-PRF に注目すると、5 年以降は保護塗料の塗布方法にかかわらず、AZP-PRF および Control-PRF よりも低い値を示した。この結果は、ACQ-PRF では界面の劣化が進行したことを示唆している。一方、ACQ-API での深木部破断率は、10 年後で Control-API よりも低い値であったものの、AZP-API と近似した値を示した。この結果は木部破断率とほぼ同じで、API を使用した集成材での木材と接着剤との界面の劣化は、PRF を使用した集成材よりも小さかったと推測される。Control の深木部破断率は、PRF の再塗布および無塗布では、0 年で約70%であったのが50%前後に低下した。一方、API では暴露期間にかかわらず50~60%であった。これらの結果より、屋外暴露により界面は劣化するものの、集成材内部の木材は劣化していないと思われる。

4. 結 論

ラミナに薬剤を注入して作製したスギ集成材を10年間の屋外暴露試験に供し、接着剤の種類、木材保護塗料の塗布、試験片採取位置、および集成材密度が接着耐久性に及ぼす影響を調べた。ACQで処理した集成材の接着耐久性はAZP処理および無処理の集成材よりも低く、せん断強度および木部破断率は低下し、木材保護塗料を塗布しても顕著に改善されることはなかった。AZP処理では接着耐久性の低下は小さく、また、木材保護塗料の塗布効果が認められた。薬剤無処理では、木材腐朽によりせん断強度平均値は低下したものの、腐朽した試験片を除外するとせん断強度は低下しておらず、また、木材保護塗料の塗布効果は顕著で、塗布により接着強度の低下および木材腐朽が抑止された。密度が高い集成材は、暴露前および暴露後とも密度の低い集成材より高いせん断強度を示した。

文 献

- 1) Voik, C. B.: "Wood Handbook", F.P.L., USA, 2010, pp. 9-22.
- 2) 鈴木滋彦: "木材接着の科学", 作野友康, 高谷政広, 梅村研二, 藤井一郎編, 海青社, 大津, 2010, pp. 117-119.
- 3) 田村靖夫: "日本木材学会研究分科会報告書 木材の科学と利用技術 1. 接着耐久性", 1989, pp. 4-21.
- 4) Selbo, M. L.: Long term effect of preservatives on gluelines in laminated beams. *Forest Prod. J.* **17**(5), 23-32 (1967).
- 5) 菅野養作, 森屋和美: エゾマツ集成材の耐候性. 木材工業, **38**(11), 530-533 (1983).
- 6) 満名香織, 和田 博: 屋外ばくろ試験による集成材の接着耐候性評価 (第1報). 奈良県森技セ研究報告 **32**, 83-87 (2003).
- 7) 柳川靖夫, 宮崎裕子, 和田 博: 屋外ばくろ試験による集成材の接着耐候性評価 (第4報). 奈良県森技セ研究報告 **36**, 19-25 (2007).
- 8) 柳川靖夫, 増田勝則: 促進劣化試験および屋外暴露試験で評価した木材保存剤処理集成材の接着耐久性 (第1報) 促進劣化試験で評価した接着耐久性. 木材学会誌 **57**(4), 211-222 (2011).
- 9) 柳川靖夫, 増田勝則: 促進劣化試験および屋外暴露試験で評価した木材保存剤処理集成材の接着耐久性 (第2報) 屋外暴露試験で評価した接着耐久性および促進劣化試験との関係. 木材学会誌 **57**(5), 265-275 (2011).
- 10) Jerrold, E. W.: Evaluation of a method for testing adhesive-preservation compatibility. *Forest Prod. J.* **36**(1), 27-32 (1986).
- 11) 宮崎淳子, 中野隆人, 平林 靖, 岸野正典: 接着性能に及ぼす防腐薬剤の影響. 木材学会誌 **45**(1), 34-41 (1999).
- 12) 滝 欽二: 水性高分子-イソシアネート系接着剤(1). 木材工業 **41**(8), 359-364 (1986).