

異樹種積層材としての広葉樹の利用

本谷 由紀*¹ 中野 隆人*²

Utilization of Hardwood as Laminated Wood Composed of Different wood Species Laminas

Yuki MOTOTANI*¹ Takato NAKANO*²

Keywords: laminated wood, adhesive strength, softwood, hardwood
積層材, 接着力, 針葉樹, 広葉樹

1. はじめに

近年, バイオマス資源の有効利用に対する要請から, いわゆる低質材といわれる材であってもその活用が望まれるようになってきた。木材は, 無欠点材といわれるものも材質は不均一であり, 早材と晩材, 心材と辺材では材質は異なる。節の分布, 目切れなどは, 材質に影響を与える。これは, 木材が生物材料であることからくる不可避的なものである。しかし, 低質材と称されるものではこうした不均一さは異なる材質的問題を有している。

低質材の有効利用の観点から考えると, 欠点部を除去したうえで再び集成して材を形成する集成加工が最も適している。ここでは, 低質広葉樹の有効利用の面から, 異樹種積層材の部材としての利用を目指して試みられてきた異樹種積層材研究を概観し, さらに林産試験場で行った試験結果の概略を紹介する。ここでいう積層材は, 集成材と合板とを含むものである。

2. 集成化における問題

集成材は, 前述のように欠点部を除去した小さなラミナを利用するので, 最終製品の欠点が少なく, 自由度が比較的高いという利点があり, すでに広葉樹, 南洋材, 小径木に関する集成加工に関する様々な

試みが行われてきた¹⁻⁵⁾。以下においては, 集成化において問題が発生すると考えられる小径材に限定して述べることにする。

集成化は欠点が少なく自由度が高い反面, 製造工程が多く, 低い歩留まりが問題となる。中西³⁾は, スギ間伐材, 工場廃材の集成化における問題点を検討した。それによると, 集成加工においては一工程ごとに歩留まりは3~17%低下し, 縦継ぎの歩留まり低下は少ないが積層時の耳すり加工時の歩留まり低下が著しいとされている。その対策として, 積層時に側圧をかけることが有効であるとしている。縦継ぎにおいては, 節の存在に比べて縦継ぎジョイントの影響は比較的少ないとしている。これに関連して, 大日方らは⁴⁾は小径木の集成加工における歩留まり向上を図るために, 台形断面材の集成加工を試み, 歩留まりを向上できることを報告している。

集成材の性質を規定するものとして, 集成材構成要素であるラミナの性質, 接着性能, 耐久性能がある。広葉樹小径木の集成材の利用に関する報告は多い⁶⁻⁹⁾。ミズナラ小径材に関して, 年輪が粗く比重が高くなる傾向があり, その結果寸法安定性は低いが物理的性質が良好であること, 欠点部割合が高いため材料的安定性に乏しいことが報告されている⁶⁾。富田ら⁷⁾は15種の広葉樹小径材の材質と乾燥特性を

詳細に検討している。小径材では原木の曲がりにより製材歩留まりが低く乾燥工程の割れ発生が大きいものの、強度性能に関しては大径材と変わらない結果を得ている。錦織ら^{8,9)}による材質調査においても、富田らとほぼ同様の結果が得られており、材径が小さくなるほど歩留まりが減少するが強度性能は大径材と大きく変わらないことが明らかにされている。しかし同時に、乾燥時の曲がり、幅反り、ねじれが顕著になるなどの問題が指摘されている。

3. 異樹種積層材の接着性能

3.1. 接着性能に関わる因子

集成材は、ラミナを接着剤で積層し、これを裁断すれば製造できる。しかし、実用に供するには所定の強度と耐久性能を有することが求められる。集成材の強度と耐久性能に大きく関わるのはラミナの強度と接着性能である。

木材の接着性能は、材の強度、木材と接着剤との親和性、そして接着剤の強度の3種の因子に依存すると言われている。接着強度試験において、破壊形態から破壊要因の推定が可能である。木破率が高い場合、木部の強度不足からの破壊であるから木材強度が破壊因子であり、木材部と接着剤との界面からの破壊では親和性が破壊因子である。さらに、接着層での破壊では接着剤凝集破壊であるから接着剤の強度因子が破壊因子である。このように、接着性能には接着剤の凝集力に関わる抽出成分、界面の状態に関わる表面性状、そして木部破壊に係る比重などの因子が関与する。

同一樹種で構成された集成材と異樹種で構成されたそれとの接着性能へ及ぼす影響の違いは、主として構成樹種の比重差によって生じると考えられる。とりわけ、耐久性能への影響は大である。木材は、環境の変化に伴い含水率変動を生じる。それに伴い、材は膨潤収縮する。この変動に接着剤が追従できなければ、木材と接着剤との界面に生じるせん断応力が大きくなり接着強度に影響がでる。この影響は、接着剤の経時的材質変化と相まって大きくなる。椋代¹⁰⁾は、積層された木材の内部応力に関して、材の膨潤収縮に伴う材内応力分布が接着層のはくりや割れに

密接に関連していることを明らかにしている。集成材の耐久性能には、構成ラミナの性質だけでなく接着剤の性状、硬化過程、含水率分布が複雑に係る。

3.2. 常態および促進劣化処理後の接着性能

異樹種積層材の常態での接着性能と促進劣化処理後の接着性能について概観する。ここで言う促進劣化処理は、JAS規格およびそれに準じた処理である。

井村ら¹¹⁾は、ユリア樹脂接着剤(UF)とレゾルシノール樹脂接着剤(RF)とを用いて、異樹種積層材の接着性能を検討した。促進劣化処理後において、UFではカラマツ同士の積層材を除いてせん断強さ、木破率とも高い値を示し(第1表)、またRFにおいてもせん断強さで70%以上、木破率でも80%以上の保持率を示した(第2表)。彼らは5プライ構成の積層材についても検討しているが、同様に高い耐水性能を認めている(第3表)。井村らの報告では、常態では異樹種積層材の接着強度は同一樹種積層材と比べて異なるところはなく、JAS規格に適合した。しかし、高比重材と低比重材との組み合わせでは、低比重材のせん断強さに支配される傾向が認められ、耐水試験においてはスギ/ミズナラ(RF)とカラマツ/シラカンバ(UF)がJAS規格を満たさないとの結果が得られている。

東野らは、異樹種積層材に関して幅広い検討を行った¹²⁻¹⁶⁾。

UFとRFを用いた異樹種積層材の接着性能が検討された結果は以下のとおりであった¹²⁾。広葉樹(ブナ、ナラ、マカンバ)の接着力は、UFで200~215kgf/cm²、RFで175~200kgf/cm²を示し、カラマツではUFで102kgf/cm²、RFで103kgf/cm²であった。これに対して、広葉樹(ブナ、ミズナラ、マカンバ)とカラマツの組み合わせでは、接着力は100~125kgf/cm²であり相対的にせん断強度が低いカラマツに影響されカラマツに近い接着力を示した。これは、カラマツ同一樹種積層の場合より高い値である。木破率は、同一樹種積層に比べて低い値であった。促進劣化処理条件は、UFを用いた場合60 温水3hr浸せき、RFを用いた場合煮沸4hr、60 乾燥の繰り返しである。促進劣化処理後の接着力強度は、カラマ

第1表 ユリア樹脂接着異樹種積層材の耐水試験後接着力(井村ら¹⁾)

	せん断強さ (kgf/cm ²)	木破率 (%)	保持率 (%)
シラカンバ/シラカンバ	125.2	86.6	74.4
/ポプラ	106.0	85.4	88.5
/カラマツ	74.9	42.8	74.9
/スギ	81.1	65.8	66.2
ポプラ/ポプラ	87.3	100.0	68.2
/カラマツ	76.4	85.3	75.0
/スギ	89.1	79.9	75.5
カラマツ/カラマツ	26.1	38.3	30.4
/スギ	62.5	94.1	61.8
スギ/スギ	92.1	96.6	76.2

注1): 耐水試験条件: JAS規格浸せきはくり試験を10回繰り返す

注2): 保持率: 常態での接着力に対する比を百分率で表したもの

第2表 レゾルシノール樹脂接着異樹種積層材の耐水試験後接着力(井村ら¹⁾)

	せん断強さ (kgf/cm ²)	木破率 (%)	保持率 (%)
シラカンバ/シラカンバ	115.9	85.0	76.7
/ポプラ	94.8	87.8	77.6
/カラマツ	88.6	92.8	84.3
/スギ	104.9	90.0	83.7
/ミズナラ	139.8	90.8	86.8
ポプラ/ポプラ	86.0	100.0	71.4
/カラマツ	89.6	91.5	78.0
/スギ	100.8	95.0	87.1
/ミズナラ	113.7	99.5	81.3
カラマツ/カラマツ	80.4	100.0	76.7
/スギ	83.5	89.1	86.1
/ミズナラ	94.7	92.9	79.6
スギ/スギ	95.5	81.6	89.5
/ミズナラ	105.6	78.7	85.0
ミズナラ/ミズナラ	150.1	98.3	72.2

注): 第1表を参照

第3表 レゾルシノール樹脂接着の5樹種積層材の耐水試験後接着力(井村ら¹⁾)

	せん断強さ (kgf/cm ²)	木破率 (%)	保持率 (%)
P/SU/K/SI/M	106.9	94.1	79.2
M/SU/P/K/SI	104.4	97.5	87.1
M/P/K/SU/SI	104.5	96.6	80.8

注1): 耐水試験条件: JAS規格煮沸はくり試験を10回繰り返す

注2): 保持率: 常態での接着力に対する比を百分率で表したもの

注3): P:ポプラ, SU:スギ, K:カラマツ, SI:シラカンバ, M:ミズナラ

ツ同一樹種接着の強度に近づく傾向が認められている。異樹種積層の場合の木破率は、同一樹種積層に比べてわずかに高い傾向があった。

広葉樹（アサダ、イタヤカエデ、ブナ、セン、カツラ）を用いた同一樹種と異樹種積層材との比較を試みた結果を第4表に示す¹³⁾。構成樹種の気乾比重差が大きいアサダ／カツラ、イタヤカエデ／カツラの組み合わせは、最も比重の低いカツラ同士を積層した場合より低い接着力を与え、先の広葉樹／カラマツの場合¹²⁾とは異なる結果である。促進劣化処理（煮沸4hr, 60℃乾燥繰り返し処理）の結果では、全体として45～63%の接着力保持率であったが、高比重材のアサダ、イタヤカエデ、ブナの同一樹種積層材とすべての異樹種積層材が45～51%の低い値を示した。カラマツと広葉樹9樹種を用いRFとUFで接着した異樹種積層材について検討した結果を第5表と第6表に示す。カラマツ、シナ、キハダ、トチ、ダケカンバの接着性能（RF）を第5表に、カラマツ、トチ、オニグルミ、ヤチダモを用いた異樹種積層材の接着性能（UF）を第6表に示す。いずれの組み合わせも構造用集成材製造基準のせん断強度を上回る結果を与えた。

針葉樹／広葉樹の組み合わせの異樹種積層材についても検討が試みられ

た（第7表）。先の報告と同様に、アカマツ同一樹種積層の場合に比べて接着強度は増大した。圧縮圧を10kgf/cm²から15～20kgf/cm²に増やすと、接着力は約5%増大した。促進劣化処理後の接着力の保持率は、アカマツ／アカマツ、アカマツ／広葉樹との組み合わせでそれぞれ44～56%、41～55%であった。

南洋材の異樹種積層材についても検討されている^{17,18)}。山岸ら¹⁷⁾は南洋材16樹種の異樹種積層材の接着性能を検討し、樹種構成の特性が接着性能に及ぼす影響

第4表 レゾルシノール樹脂接着剤で積層した小径異樹種積層材の接着性能 [1] (東野ら¹³⁾)

		気乾比重	常態		劣化促進後	
			接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)	接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)
アサダ	アサダ	0.77	225	34	115	69
	ブナ	0.67	221	70	96	75
	イタヤカエデ	0.77	233	31	118	62
	カツラ	0.50	158	89	84	91
ブナ	セン	0.58	170	93	89	71
	ブナ	0.67	199	93	100	85
	イタヤカエデ	0.77	205	80	99	87
	カツラ	0.50	175	87	98	76
イタヤカエデ	セン	0.58	182	89	95	80
	イタヤカエデ	0.77	241	50	108	51
	カツラ	0.50	142	81	89	73
カツラ	セン	0.58	176	95	85	90
	カツラ	0.50	172	95	96	87
セン	セン	0.58	170	99	92	80
	セン	0.58	173	93	92	80

注)：促進劣化処理：煮沸4hr → 60℃乾燥の繰り返し

第5表 レゾルシノール樹脂接着剤で積層した小径異樹種積層材の接着性能 [2] (東野ら¹⁴⁾)

		気乾比重	常態		劣化促進後		
			接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)	接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)	接着力保持率(%)
カラマツ	カラマツ	0.48	104.4	92	67.0	70	66
	シナ	0.39	95.6	75	51.5	62	53
	キハダ	0.46	116.7	88	61.7	76	52
	トチ	0.54	120.8	80	65.9	72	54
	ダケカンバ	0.69	119.3	76	69.1	69	48
ダケカンバ	シナ	0.39	110.6	74	61.3	82	55
	キハダ	0.46	123.2	93	78.0	85	63
	トチ	0.54	130.8	71	70.6	74	53
キハダ	シナ	0.39	105.8	89	61.5	70	58
	トチ	0.54	115.8	91	74.1	91	63
シナ	シナ	0.39	111.5	90	60.5	82	54

注)：促進劣化処理：煮沸4hr → 60℃乾燥の繰り返し

第6表 ユリア樹脂接着剤で積層した小径材の異樹種積層材の接着性能 (東野ら¹⁵⁾)

		気乾比重	常態		劣化促進後		
			接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)	接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)	接着力保持率(%)
カラマツ	カラマツ	0.51	96.7	86	75.7	84	78
	ヤチダモ	0.74	130.9	85	86.8	58	66
	オニグルミ	0.53	144.2	80	88.6	50	61
	トチ	0.53	117.7	95	80.1	73	68
ヤチダモ	ヤチダモ	0.74	191.0	93	88.4	69	46
	オニグルミ	0.53	134.7	92	85.4	65	63
	トチ	0.53	113.9	95	73.8	84	65
オニグルミ	オニグルミ	0.53	101.5	90	67.3	84	66
	トチ	0.53	123.0	85	67.2	71	55
トチ	トチ	0.53	118.0	95	69.4	95	59

注)：促進劣化処理：60℃温水中で3hr浸せき

第7表 レゾルシノール樹脂接着剤で積層したアカマツと異樹種との積層材の接着性能 (東野¹⁶⁾)

アカマツとの 組み合わせ樹種	比重差	常態		促進劣化後		
		接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)	接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)	接着力 保持率(%)
[圧縮圧力 10kgf/cm ²]						
アカマツ	0.00	107.5	91	49.6	82	46
カラマツ	0.03	114.6	93	50.6	73	44
シナノキ	0.05	100.2	82	45.2	78	45
ホオノキ	0.04	109.2	77	61.6	83	56
キハダ	0.03	123.0	88	57.7	84	47
カツラ	0.08	120.1	81	56.8	85	44
オニグルミ	0.07	119.7	82	56.6	89	47
トチノキ	0.11	103.4	64	55.6	61	54
センノキ	0.13	106.0	82	49.9	84	47
ダケカンバ	0.23	127.9	78	56.1	79	44
アカンバ	0.23	138.9	82	62.5	79	45
ヤチダモ	0.26	122.0	72	54.0	70	44
ブナ	0.29	121.4	90	51.4	68	46
ミズナラ	0.33	118.5	85	58.2	68	49
イタヤカエデ	0.28	125.4	58	63.0	82	50
アサダ	0.33	138.2	75	61.9	78	45
[圧縮圧力 15kgf/cm ²]						
アカマツ	0.00	122.7	83	54.1	79	44
カラマツ	0.04	115.8	83	53.2	71	46
シナノキ	0.08	105.5	92	49.1	78	47
ホオノキ	0.01	116.0	79	63.9	68	55
キハダ	0.05	130.2	79	57.3	86	44
カツラ	0.01	122.9	78	63.0	71	51
オニグルミ	0.07	124.3	70	63.5	82	51
トチノキ	0.07	125.4	78	60.6	72	48
センノキ	0.13	125.4	82	57.0	88	45
ダケカンバ	0.22	129.5	74	54.7	73	42
マカンバ	0.19	117.0	78	64.7	69	55
ヤチダモ	0.26	130.6	79	54.0	84	41
ブナ	0.31	126.2	55	55.9	88	44
ミズナラ	0.32	122.8	66	63.1	81	51
[圧縮圧力 20kgf/cm ²]						
イタヤカエデ	0.24	136.2	64	63.1	73	46
アサダ	0.29	120.3	91	55.5	75	46

注) : 促進劣化処理 : 煮沸 5hr → 60℃・18hr 乾燥

を明らかにした。異樹種積層材の接着力は、構成樹種の比重差が大きくなるほど低下割合が大きくなる傾向が認められた。報告では、全体的にみて比重差は基準材からみて±0.12以内に収めることが望ましいと結論づけている。さらに、比重差だけでなく組み合わせの適否もあり、注意を払う必要があることを指摘している。第8表は、UFに関する接着力の低下およびはくり率が40%以上の組み合わせを示し、

第9表はRFに関する接着力の低下が20%以上の組み合わせを示したものである。唐沢¹⁸⁾は、広葉樹(ドリアン) / 針葉樹(ベイツガ) 混用合板の接着性能について検討している。それによると、常態、促進劣化処理後、木破率に関して、RFとメラミン・ユリア樹脂接着剤(MUF)のいずれを用いた積層材も構成樹種の違いによる有異差は認められないとしている。しかし、MUFを用いた場合、屋外暴露後の接着

第8表 ユリア樹脂接着剤を用いた南洋材異樹種積層材に関する低接着耐久性能の組み合わせ (山岸ら¹⁷⁾)

樹種の組み合わせ	比重差	接着力の低下率 (%)
カプール/ターミナリア	-0.06	82
カロフィルム/ジョンコン	-0.17	77
セプタ/マトア	-0.27	74
ナトー/ジョンコン	-0.05	71
レッドメランチ/パロサピス	0.09	70
レッドメランチ/カプール	0.14	70
ターミナリア/ゲロンガン	-0.10	69
カプール/ジョンコン	-0.26	65
パロサピス/カプール	0.05	55
レッドメランチ/メルサワ	0.05	54
ターミナリア/メルサワ	-0.03	52
ホワイトトラワン/カプール	0.24	49
カプール/メラピ	-0.32	47
カロフィルム/デルニア	0.08	43
セプタ/レッドメランチ	0.05	42
レッドメランチ/ホワイトトラワン	-0.10	41

	比重差	接着層のはくり率 (%)
ターミナリア/ジョンコン	-0.20	88
カプール/ジョンコン	-0.26	85
パロサピス/メルサワ	-0.04	79
カロフィルム/ジョンコン	-0.17	75
レッドメランチ/カプール	0.14	62
ターミナリア/メルサワ	-0.03	61
パロサピス/カプール	0.05	59
レッドメランチ/パロサピス	0.09	44
レッドメランチ/メルサワ	0.05	42
パロサピス/ホワイトトラワン	-0.19	42
パロサピス/マンガシノロ	-0.12	41

注1): 耐久性能試験: 室温水浸せき 6hr → 40 ± 2℃の乾燥 48hr を 6 回繰り返す

注2): 低下率: 常態での接着力に対する割合

注3): 比重差: 組み合わせの左側が基準材 (3 プライの中央の材), 負符号は基準材から見て低比重側にあることを示す

力に構成樹種のベイツガの劣化の影響が現れ, 表裏単板接着層での破断が多くなる傾向が認められた (第10表)。

以上述べてきた報告の事例からわかるように, 異樹種積層材と同一樹種積層材との接着性能の違いは, 主に構成樹種の比重差によるものである。しかし, 山岸ら¹⁷⁾が指摘しているように, 比重差以外の要因による組み合わせの適否を考慮することも必要である。これは, 井村ら¹¹⁾が述べているようにカラマツとRFとの親和性など木材と接着剤との親和性の差異が関係していると考えられる。したがって接着剤と樹種との組み合わせの適否も接着性能に影響するものと

考えられる。異樹種積層材では, 接着性能に及ぼす影響の中で比重差が主な因子であり, 加えて樹種特性がこれに関わっていると考えられる。

4. 異樹種積層材の接着性能に及ぼす膨潤収縮の影響

前述のように, 異樹種積層材は同一樹種積層材と比較し比重差による影響という新たな因子による影響が生じる。その結果, 木材の膨潤収縮により接着層に複雑なせん断応力を生じる。このことは, 異樹種積層材の接着性能が接着剤の性状にも強く依存することを示唆する。先の多くの報告では, 接着力の低下機構を含めこうしたことについて触れていない。

第9表 レゾルシノール樹脂接着剤を用いた南洋材異樹種積層材に関する低接着耐久性能の組み合わせ（山岸ら¹⁷⁾）

樹種の組み合わせ	比重差	接着力の低下率 (%)
ホワイトトラワン/マトラ	0.32	41
レッドメランチ/レッドラワン	-0.14	40
カプール/マトア	-0.07	37
メラピ/マトア	0.40	29
レッドメランチ/ホワイトトラワン	-0.10	28
レッドメランチ/ゲロンガン	-0.03	27
ホワイトトラワン/パロサピス	0.19	26
カプール/ターミナリア	-0.06	26
ターミナリア/メラピ	-0.26	24
レッドメランチ/サトー	-0.07	21
カプール/メラピ	-0.32	21
ホワイトトラワン/レッドラワン	-0.04	20
レッドメランチ/マトア	0.22	20

注1)：耐久性能試験：煮沸4 hr → 60 ± 3℃乾燥20hrを4回繰り返す

注2)：低下率：常態での接着力に対する割合

注3)：比重差：組み合わせの左側が基準材（3プライの中央の材），負符号は基準材から見て低比重側にあることを示す

第10表 フェノール樹脂接着剤（PF）とメラミン・ユリア樹脂接着剤（MUF）を用いた広葉樹/針葉樹異樹種積層板の接着性能（唐沢¹⁸⁾）

接着剤	樹種構成	常態		促進劣化後		
		接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)	接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)	接着力保持率 (%)
PF	H/H/H	17.9	90	屋外暴露0年		
				14.9	95	83
				13.8	95	75
	H/S/H	18.4	95	屋外暴露2年		
				13.6	75	64
				15.3	95	84
S/S/S	21.2	80	屋外暴露0年			
			11.1	100	76	
			9.1	95	78	
MUF	H/H/H	16.6	100	屋外暴露0年		
				8.7	60	52
				8.6	90	68
	H/S/H	12.6	100	屋外暴露2年		
				9.8	85	75
				6.0	35	48
S/S/S	13.1	100	屋外暴露0年			
			5.3	20	49	
			7.5	35	64	

注1)：H：ドリアン，S：ベイツガ

そこで、次に林産試験場において木材の有効利用を目的として取り組まれた広葉樹/針葉樹積層材の接着性能に関する報告をもとに、異樹種積層材の接着性能とそれに影響する要因について述べることにする¹⁹⁾。供試材は針葉樹としてトドマツとカラマツ、広葉樹としてミズナラ、マカンバ、カツラを用いた。

4.1. 常態性能と耐水性能

第11表に、RFと水性ビニルウレタン（API）で接

着した同一樹種積層材と異樹種積層材の常態での接着性能を示した。同一樹種積層材では、ミズナラを除いていずれの接着剤を用いた場合も木材の比重に依存した傾向を示した。ミズナラの接着力の低下の要因は、針葉樹接着の条件で接着剤を調製したことによる。すなわち、接着剤の低粘度が原因であると考えられる。異樹種積層材では、構成樹種の同一樹種積層材で得られる接着力の中間の接着力であった。これは、山岸ら¹⁷⁾が報告しているように比重差に比

第11表 レゾルシノール樹脂接着剤と水性ビニルウレタン樹脂接着剤を用いた異樹種積層材の常態におけるせん断強度(本谷ら¹⁹⁾)

樹種構成	レゾルシノール		水性ビニルウレタン	
	接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)	接着力 (kgf/cm ²)	木破率 (%)
ミズナラ/ミズナラ	106	0	141	40
マカンバ/マカンバ	161	40	160	50
カツラ/カツラ	144	100	128	100
トドマツ/トドマツ	86	100	89	100
カラマツ/カラマツ	115	70	100	80
トドマツ/ミズナラ	90	80	101	100
〃 /マカンバ	95	100	99	100
〃 /カツラ	96	100	98	100
カラマツ/ミズナラ	99	10	130	80
〃 /マカンバ	107	90	133	80
〃 /カツラ	110	70	105	90

第12表 JAS規格による異樹種積層材のはくり試験結果(本谷ら¹⁹⁾)

樹種構成	レゾルシノール		水性ビニルウレタン	
	はくり率 (%)			
	浸せきはくり	煮沸はくり	浸せきはくり	煮沸はくり
ミズナラ/ミズナラ	45.0	8.5	0.0	97.8
マカンバ/マカンバ	4.5	0.0	0.0	59.8
カツラ/カツラ	0.0	0.0	0.0	58.5
トドマツ/トドマツ	0.0	0.0	0.0	1.5
カラマツ/カラマツ	0.0	0.0	0.0	31.3
トドマツ/ミズナラ	4.5	0.0	0.0	19.5
〃 /マカンバ	0.0	0.0	0.0	52.3
〃 /カツラ	0.0	0.0	0.0	4.3
カラマツ/ミズナラ	34.0	0.0	0.0	55.0
〃 /マカンバ	6.0	0.0	0.0	41.3
〃 /カツラ	2.3	0.0	0.0	23.3

注) : 浸せきはくり : 6 hr 浸せき→40℃・18hr 乾燥

煮沸はくり : 5 hr 煮沸→60℃・18hr 乾燥→1 hr 冷水浸せき

例して接着力が増大することに対応する。しかし、RFで接着したカラマツでは構成樹種の同一樹種積層材で得られる接着力より低い値を示した。これは、カラマツ同士の積層材の接着力が大きいことによる。これは、井村ら¹¹⁾の結果と類似の傾向である。山岸ら¹⁷⁾は南洋材の混用において構成樹種の組み合わせには適否があることを報告しているが、東野らもまた同様の傾向を指摘している¹⁴⁾。こうした結果は、異樹種積層材の常態接着性能が比重差だけでなく樹種成分にも依存することを示唆している。

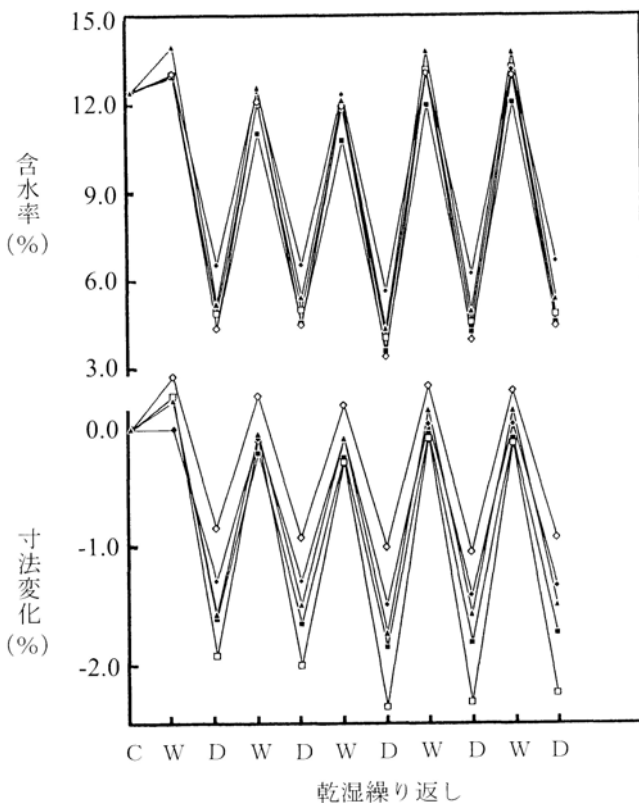
異樹種積層材の接着特性は、先に述べたように比重差が引き起こす複雑な膨潤収縮に影響される。言い替えば、同一樹種に比べて水分の影響を受けや

すい。第12表は、JAS規格に従った浸せきはくりと煮沸はくり試験結果を示したものである。RFで接着した試片は、ミズナラを用いた条件を除く同一樹種積層材、異樹種積層材に関して、浸せき試験、煮沸試験ともに高い耐水性能を示した。ミズナラの低い接着性能の原因は先に述べたとおりである。他方、APIは本試験に用いた仕様が造作用であったことから高い耐水性能を有しないが、浸せき試験では十分な耐水性能を有した。以上の結果は、針葉樹と広葉樹の水浸透性の違いと膨潤圧の比重依存性が関与していることを示唆する。しかし、全般的には異樹種積層材と同一樹種積層材の耐水性能は、JAS規格に基づいて比較する限り両者に大きな違いはないと結

論づけられた。

4.2. 乾湿繰り返し処理の影響

前述のように、同一樹種積層材と異樹種積層材との耐水性能はJAS規格に基づいた試験では、著しい違いは認められなかった。しかし、基材である木材に乾湿繰り返し処理の履歴を与えた場合には接着層により厳しいダメージが与えられるはずである。これに関連して、Riverら²⁰⁾はUFで接着した木材の破壊機構を調べる目的で種々の劣化履歴に関する実験を行い、減圧乾燥/水浸せきの繰り返し処理が最も大きな影響を与えることを報告している。異樹種積層材は構成樹種の比重差があるので、水分変動に伴う材の膨潤収縮による接着層/木材界面への影響が同一樹種積層材と異なると予想される。そこで、乾湿繰り返し



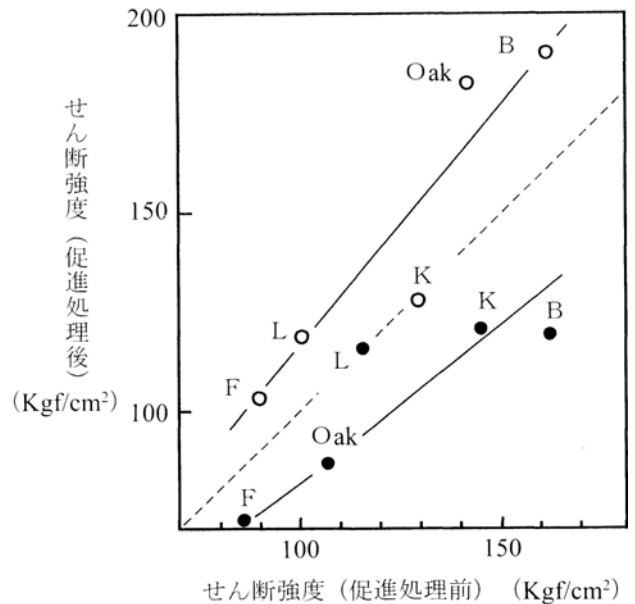
第1図 レゾルシノール樹脂接着剤を用いた積層材の乾湿繰り返し処理にともなう含水率と半径方向の寸法変化(本谷ら¹⁹⁾)

注: 含水率, 半径方向の寸法変化の割合, ■: ミズナラ, □: マカンバ, ◆: カツラ, ◇: トドマツ, ▲: カラマツ, C: 関係湿度65%で調湿, W: 関係湿度93%, 20℃で5~7日間調湿, D: 30℃1日減圧乾燥

し処理による接着性能への影響を異樹種積層材と同一樹種積層材について比較検討した。

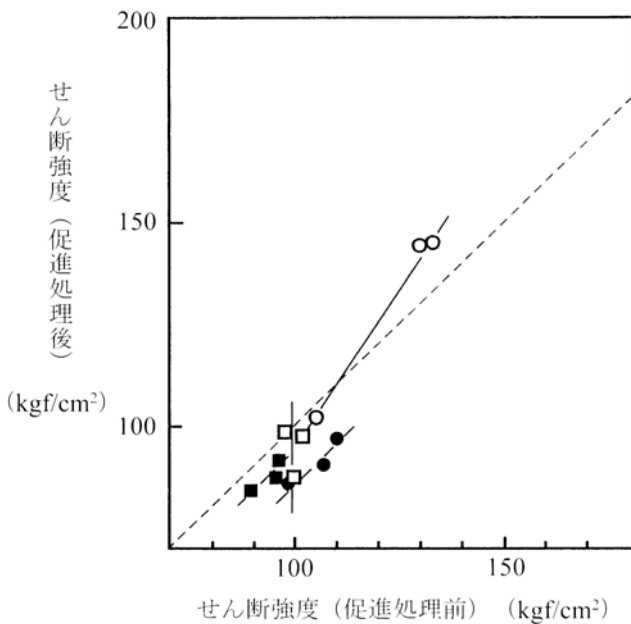
本実験では、Riverら²⁰⁾とは異なり実際の使用条件により近い乾湿繰り返し履歴を与えた。第1図は、RFで接着した同一樹種積層材の乾湿繰り返しに伴う含水率変化と半径方向の寸法変化である。含水率の変動幅は、約8%で樹種による差異はほとんど認められないのに対し、寸法変化幅は明らかな比重依存性を示した。寸法変化幅はマカンバが最も大きくトドマツが最も小さかった。これは、乾湿繰り返し処理を施された異樹種積層材では接着層に対する応力がより複雑になることを示唆する。APIで接着した積層材も傾向は同じであった。

第2図に同一樹種積層材に関する乾湿繰り返し処理の影響を示す。図は、乾湿繰り返し処理前の接着力(横軸)と処理後の接着力(縦軸)との関係を表している。乾湿繰り返し処理で変化が生じなかった場合は、図中の破線の位置にプロットされる。使用した2つの接着剤とも左下がり傾向を示し、常態せん断強度が低いほど劣化せん断強度が低くなる傾向を示した。



第2図 同一樹種積層材乾湿繰り返し処理による接着力の変化(本谷ら¹⁹⁾)

注: 乾湿繰り返し処理後の接着力, 横軸: 乾湿繰り返し処理前の接着力, ○: 水性ビニルウレタン, ●: レゾルシノール, Oak: ミズナラ, B: マカンバ, K: カツラ, L: カラマツ, F: トドマツ



第3図 異樹種積層材乾湿繰り返し処理による接着力の変化(本谷ら¹⁹⁾)

注:乾湿繰り返し処理後の接着力, 横軸:乾湿繰り返し処理前の接着力, ○:カラマツ/広葉樹(水性ビニルウレタン), □:トドマツ/広葉樹(水性ビニルウレタン), ●:カラマツ/広葉樹(レゾルシノール), ■:トドマツ/広葉樹(レゾルシノール)

しかし、乾湿繰り返し処理の影響は接着剤の種類によって明らかに異なった。RFは処理によって強度が低下するのに対してAPIは増大した。異樹種積層材の結果を第3図に示す。異樹種積層材は、針葉樹側にトドマツを用いた条件を除き、同一樹種同様に左下がりの傾向が認められた。APIを用いた積層材のプロットは、第2図に示した同一樹種積層材の結果と比較して、破線により近い。このことは異樹種積層材では乾湿繰り返し処理の影響が同一樹種積層材と比較して大きいことを示す。とりわけ、針葉樹側にトドマツを用いた異樹種積層材ではプロットが破線の下方に位置する。

第2図と第3図に示した乾湿繰り返し処理の影響に関して、接着剤の性質と構成樹種に基づき考えてみる。APIで接着した積層材の乾湿繰り返し処理に伴う強度増大の原因を検討するために、乾湿繰り返し処理と同じ期間一定条件(20°C, 65%RH)下に静置した積層材のせん断強度を測定したが強度変化は認められなかった。このことから、強度増大は乾湿繰り返し処理によるものであると推定される。原因と

して考えられるのは、乾湿繰り返し処理中での水分の消失である。APIの十分な硬化には水分除去が必要であることが知られている²¹⁻²³⁾。本実験においては、乾湿繰り返し処理工程での真空乾燥処理によって水分が十分に除去されたために顕著に硬化進行した結果、強度が増大したと推察された。常圧調湿試料と真空乾燥試料の粘弾性測定からも、このことが裏付けられた。

4.3. 接着力低下の機構

乾湿繰り返し処理は、木材の膨潤収縮を引き起こし、これが接着層に影響を与える。接着剤の側から考えると、乾湿繰り返し処理の接着強度への影響は接着剤の柔軟性に依存することを意味する。これに関連しては、Ebeweleらの詳細な報告がある²⁴⁻²⁶⁾。彼らは、種々の化学修飾を施したUFの構造決定を行うとともに²⁴⁾、接着強度を検討し、接着剤の構造と真空乾燥/水浸せき処理の影響との関係を明らかにしている^{25, 26)}。報告によれば、真空乾燥/水浸せき処理の10サイクル処理は70°C, 80%RH40日間の処理より接着層にダメージを与えた。真空乾燥/水浸せきサイクルの増大に伴い接着強度は低下し、低下の程度は接着剤の構造に依存した。真空乾燥/水浸せき処理に対する安定した接着性能とは、接着剤の化学修飾に用いた試薬自体が柔らかさを有すること、さらには化学修飾の反応速度が遅いため分子鎖がランダム網目構造を形成し内部応力を発生しない構造形態をとるために分子鎖の易動性が高くなることであると指摘している。彼らが用いた化学修飾試薬は多くがヘキサメチレンジアミンや、ビスヘキサメチレントリアミン等メチレン基が長く連なった構造を有し、これらで架橋された尿素樹脂接着剤分子鎖はある程度の柔軟性を有すると考えられる。

RFとAPIとの粘弾性挙動の実験結果の比較¹⁹⁾から前者が後者に比べて、相対的に剛直な接着層を形成することがわかった。これを考慮すると、乾湿繰り返し処理の影響がAPIよりRFに対して顕著であったことは、以下のように説明できる。処理による接着層へのダメージは、乾湿繰り返しに伴う木材の膨潤収縮に接着剤が追従できるか否かに依存する。RFは室温では硬い性質を有するため木材の膨潤収縮に追従で

きず亀裂を生じる。これが乾湿サイクルの進行とともに発達し接着強度が低下する。他方、APIは柔軟性があり室温においても木材の膨潤収縮に追従でき接着層への影響が少ない。その結果、APIで接着した積層材はRFで積層した場合に比べて乾湿繰り返しでのダメージが少なかったと考えられる。

両者への影響の違いは、以上のように接着剤の性質に基づいて一応説明できる。しかし、第2図と第3図を比較すると、APIで接着した異樹種積層材は同一樹種積層材に比べプロットが下降し、破線寄りとなり、RFで接着した異樹種積層材は同一樹種積層材に比べプロットが上昇し、破線寄りとなる。つまり、第2図と第3図の結果は、異樹種積層材と同一樹種積層材への乾湿繰り返しによる影響が、両接着剤で異なることを示唆する。これは、乾湿繰り返しの影響が単に膨潤収縮という基材の動きに対する接着剤の追従の問題だけではないことを示している。異樹種積層材においては、積層した2種の木材の膨潤速度が異なるために接着層と木材界面に発生する応力の方向が同一樹種とは異なり、複雑な応力を発生すると考えられる。さらには、水分自体の影響も加味する必要があるかもしれない。異樹種積層材のそれぞれの樹種と接着剤との界面においては、構成樹種の水分拡散係数が異なるため含水率が同じではないと考えられるからである。こうしたことは本実験だけでは確定できないが、異樹種積層材では乾湿繰り返しの伴う膨潤収縮への接着剤の追従の問題と構成木材の水に対する性質との複合的な性質が接着層へのダメージに関与しているものと考えられる。

4.4. 接着層の観察

ミズナラの材面にRFを塗布し、真空乾燥処理を行った面の状態を調べた¹⁹⁾。道管に対し、平行と垂直に接着面にクラックが走っているのが観察された。APIでは、真空乾燥処理後もこうしたクラックは生じず、表面状態に変化はなかった。このクラックは塗布直後には認められなかったが、時間の経過とともに明瞭になった。Riverら²⁰⁾は、真空乾燥/水浸せきサイクル下での尿素樹脂接着剤の硬化過程での割れに関して、木材の繊維に垂直方向のクラック発生を指摘している。この原因として、基材である木材

の動きが繊維方向に少ないために接着剤の収縮応力の影響がこの方向に最も大きいことを挙げている。

電子顕微鏡観察による接着剤の変化から、先に述べた乾湿繰り返しの影響が接着剤の性質に依存するとの考察が支持された。すなわち、APIでは認められなかったクラックがRFでは硬化過程から発生し、これが乾湿繰り返し処理で成長したと推察された。

5. おわりに

広葉樹の有効利用という観点から、これまでの報告をもとに異樹種積層材の性質と問題点を検討してきた。本稿で参考にした報告は文献検索の結果をもとにしている。その数は限られたものであるが、これまでの試験研究結果を概観することはできるものとする。

異樹種積層材での問題点は、本文中で触れたように積層樹種の性質の違いとりわけ比重差によるものが大きい。膨潤収縮という木材に不可避な性質が、接着層に複雑な影響を与えるからである。しかし、積層樹種の組み合わせによっては原因が明かではないものもある。これまでの試験研究の結果は、組み合わせの適否と限界とを十分把握したうえで適正な用途に用いることが大切であることをものがたっている。今後の異樹種積層材のデータ蓄積と特性把握が、より以上の広葉樹の用途拡大への道を開くものと考えられる。

文 献

- 1) 児玉泰義：島根県立工業技術センター研究報告，第21号，47-49(1984)。
- 2) 上田友彦，永井隆，日向正昭，坂田良二：長野県工業試験場報告書，p.1(1980)。
- 3) 中西棋周：木材工業，34(2)，59-62(1979)。
- 4) 大日方秀夫，太田豊，大工原伍郎，吉田健二，永井隆，島田享久，徳武道雄，上田友彦，植木芳茂，坂田良二：長野県工業試験場報告書，1-9(1976)。
- 5) 辻直幸，岸久雄，斎藤猛，中山伸吾：三重県工業技術センター研究報告，No.19，58-61(1995)。
- 6) 上田友彦：長野県工試研究報告，No.4，29-33(1984)。

- 7) 富田守泰, 野原正人, 香川紘一郎, 杉山正典 : 岐阜県林業センター研究報告, No. 14, 18-41 (1985).
- 8) 錦織 勇, 安井 昭 : 島根林技研報, No. 40, 61-67 (1989).
- 9) 錦織 勇, 安井 昭 : 島根林技研報, No. 41, 59-65 (1990).
- 10) 椋代純輔 : 林業試験場研究報告, No. 211, 1-70 (1968).
- 11) 井村純夫, 森屋和美, 峯村伸哉 : 林産試験場月報, No. 373, 11-17 (1983).
- 12) 東野 正, 中野正志 : 岩手県林業試験場成果報告, No. 15, 87-93 (1982).
- 13) 東野 正, 中野正志 : 岩手県林業試験場成果報告, No. 16, 29-36 (1983).
- 14) 東野 正, 中野正志 : 岩手県林業試験場成果報告, No. 17, 53-61 (1984).
- 15) 東野 正, 中野正志 : 岩手県林業試験場成果報告, No. 18, 77-82 (1985).
- 16) 東野 正, 中野正志 : 岩手県林業試験場成果報告, No. 19, 47-53 (1986).
- 17) 山岸祥恭, 本間芳博 : 木材工業, 27 (11), 542-546 (1972).
- 18) 唐沢仁志 : 木材工業, 42 (2), 70-72 (1987).
- 19) 本谷由紀, 中野隆人, 長谷川祐, 平林 靖 : 木材学会誌, 42, 140-148 (1996).
- 20) B. H. River, R. O. Ebewele, G. E. Myers : *Holz als Roh- und Werkstoff*, 52, 179-184 (1994).
- 21) 滝 欽二, 倉知直人 : 木材工業, 43 (8), 364-368 (1988).
- 22) 滝 欽二, 水町 浩, 山岸祥恭 : 木材学会誌, 24, 237-242 (1978).
- 23) 滝 欽二, 水町 浩, 山岸祥恭 : 木材学会誌, 25, 216-224 (1979).
- 24) R. O. Ebewele, G. E. Myers, B. H. River, J. A. Koutsky : *J. Appl. Polym. Sci.*, 47, 2997-3012 (1991).
- 25) R. O. Ebewele, B. H. River, G. E. Myers, J. A. Koutsky : *J. Appl. Polym. Sci.*, 43, 1483-1490 (1991).
- 26) R. O. Ebewele, B. H. River, G. E. Myers : *J. Appl. Polym. Sci.*, 43, 229-245 (1993).

— *1 : 元 性能部 接着塗装科—

— *2 : 性能部 接着塗装科—

(原稿受理 : 1997年5月1日)