

# 屋根下地に使用された各種木質ボードの釘接合性能の劣化

関野 登\*・佐々木優花\*\*

Deterioration of nail-joint performance of several wood-based panels  
used for roof sheathing

Noboru SEKINO\* and Yuka SASAKI\*\*

## 1. はじめに

合板は住宅の構造用面材として多用されているが、近年では耐水性を高めたOSBやパーティクルボード (PB)、中密度繊維板 (MDF) などの木質ボードも構造用面材として徐々に使用され始めている。しかし、木質ボードの場合、構造用合板に比べて耐久性の根拠となる使用実績が少なく(1, 2)、それが用途拡大を阻む一因となっている。そこで、日本木材学会木質パネル研究会およびその前身である「木質ボード懇話会」では、日本木材加工技術協会木質ボード部会ならびに日本繊維板工業会の協力を得て、1991年に「木質パネル耐久性評価プロジェクト」を開始した(以下、第1次プロジェクト)。その主な内容は10年にわたる国内3地点の屋外暴露試験であり、2003年には合板、OSB、PB、MDFなどの強度劣化の特徴をはじめ、屋外暴露試験における各種の課題が整理された(3)。その成果をもとに、2004年には第2次の「木質パネル耐久性評価プロジェクト」が開始された。第2次では、耐水性の高い接着剤を用いた合板、OSB、PB、MDFを対象に、国内8地点での屋外暴露試験、各種の屋内暴露試験および促進劣化試験が実施されており、耐久性評価手法の提案が目指されている(4)。また、第1次では未実施であった釘接合部の耐久性能が検討されている。

本研究は上記の第2次プロジェクトにおける屋内暴露試験のうち、実験住宅の屋根下地(以下、野地板)として9年半使用された試験体を回収し、物性劣化の有無と程度を調査したもの

---

Received February 28, 2015

Accepted June 9, 2015

\* 岩手大学環境科学系

\*\* 岩手大学農学部共生環境課程

本研究の一部は、日本木材加工技術協会第32回年次大会(2014年10月, 秋田)において発表した。

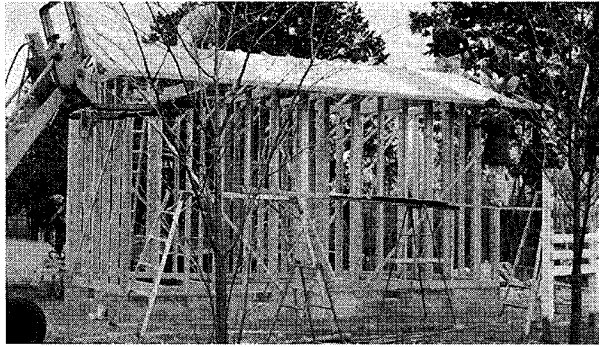


写真1 実験住宅の建設の様子



写真2 実験住宅への屋根下地（野地板）の施工

である。着目した主たる物性は、耐震性に関わる接合部の強度指標としての釘側面抵抗 (Lateral nail resistance; 以下, LNR), 釘頭貫通抵抗 (Nail head pull-through; 以下, NHPT) であるが, その関連物性である剥離強度および曲げ性能についても調べ, 合板, OSB, PB, MDFの物性劣化を比較した。さらに, NHPTの劣化に関わる因子を抽出して各因子の影響度合を調べる実験を行い, 9年半の実際使用で生じたNHPTの劣化要因について考察した。

## II. 野地板の性能劣化

### 1. 実験住宅の概要と実験方法

実験住宅は2003年12月に岩手県林業技術センター内に建設された。間口3間半(東西)×奥行1間半(南北)の平屋建てで在来軸組構造であり(写真1), 4寸勾配の垂木上に3×6尺サイズの合板および各種木質ボード(以下, 供試パネル)が野地板として供試された。供試条件を統一するため, 野地板の向きは通常とは異なりボード長手方向を垂木方向と一致させて釘着した(写真2)。使用した釘はN50で, 間隔150mmでネイルガン打ちした。屋根仕上げの仕様は, アスファルトルーフィング防水, カラー鉄板葺きとした。供試パネルの仕様と各種物性

表1 供試パネルの仕様と各種物性の初期値

種類 (略号)	原料 (樹種等)	接着剤	規格	比重	LNR (kN)	NHPT (kN)	IB (MPa)	MOE (GPa)	MOR (MPa)
OSB(A)	アスペン	PF	JAS 3級	0.64	2.09(⊥)	1.65	0.56	2.06(⊥)	18.3(⊥)
OSB(P)	パイン	PF	JAS 3級	0.67	2.00(⊥)	1.90	0.64	3.25(⊥)	27.4(⊥)
PB(PF)	解体材	PF	JIS 18P	0.76	1.74	1.68	0.83	3.60	20.3
PB(MDI)	解体材	MDI	JIS 18P	0.80	2.76	2.73	2.19	4.12	28.8
MDF	南洋材	MUF	JIS 30M	0.76	2.38	2.04	0.62	4.23	45.4
合板	北洋材(5ply)	PF	JAS 特類	0.64	2.37(⊥)	2.00	1.15	2.87(⊥)	35.8(⊥)

(注) 公称厚さ：OSB(P)のみ 11.5mm、他は全て 12mm、接着剤：PF はフェノール樹脂、MDI はイソシアネート樹脂、MUF はメラミン・ユリア樹脂。ホルムアルデヒド放散量区分は、MDF のみ F☆☆☆、他は F☆☆☆☆。LNR (縁距離：12 mm)、NHPT は N50 釘を使用、試験体数：NHPT のみ 20~44 体、他は 30 体 (⊥)：表層繊維と直交方向

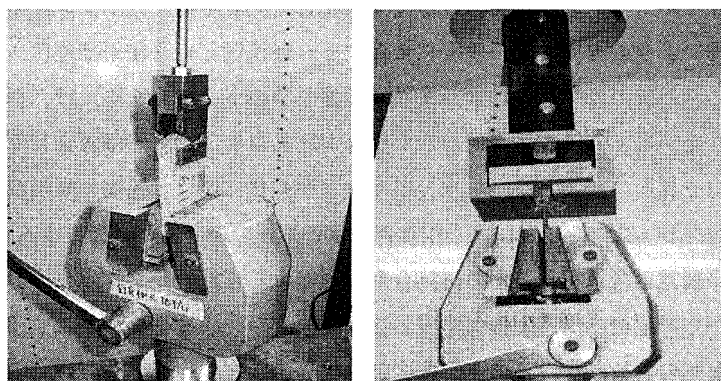


写真3 左：釘側面抵抗試験 (LNR)、右：釘頭貫通抵抗試験 (NHPT)

の初期値は表1のとおりである。

2013年6月に屋根の解体を行い、9年半使用された野地板を回収した。野地板の取り外しに際しては、釘周囲部を損傷させないように釘抜き道具 (バール等) は用いず、野地板を下面から木槌で叩き、釘と野地板を一緒に垂木から分離させた。続いて、野地板裏面の釘先端を金槌で丁寧に叩いて釘を引き抜いた。後述する試験体寸法に切断して養生 (20℃・60%RH, 1週間) した後、釘穴に再び釘を差し込み、ASTM D1037に準拠してLNRおよびNHPTを測定した (写真3)。LNRの試験体寸法は65mm×100mmで、野地板周囲の縁から釘までの距離 (縁距離) が12±1mmとなるものを対象とし、ボード1種につき6~9片を採取した。また、NHPTの試験体寸法は50mm×50mmであり、野地板中央の釘打ち部からボード1種につき19~25片を採取した。なお、荷重速度はLNRで6mm/分、NHPTで1.5mm/分とした。

一方、接着性能の劣化を調べるため、野地板の周囲端面を含む部分 (以下、端部) および周囲から10cm以上離れた位置 (以下、非端部) における剥離強度 (Internal bond strength; 以下、IB) をJIS A5908に準拠して求めた。IB試験体の寸法は50mm×50mmであり、供試パ

ネル1種につき端部で12~34片、非端部で12~40片を供試した。さらに、垂木間隔455mmの中央付近より曲げ試験体を採取し、JIS A5908に準拠して曲げ強度(MOR)および曲げ弾性率(MOE)を求めた。曲げ試験体の寸法は50×300mmで、スパン方向は垂木に垂直とし、供試パネル1種に付き20~40片を供試した。

また、野地板の含水率変化を推定するため、実験住宅の小屋裏(小屋束の高さ中央付近:3箇所)にデジタル温湿度計(エイアンドディ社製;AD-5696)を配置し、小屋裏の温湿度を2012年12月より2013年11月までの1年間、毎日1時間ごとに記録した。同様に、外気の温湿度を直射日光が当たらない北側の軒下(2箇所)で計測した。

## 2. 野地板に作用する劣化因子

一般に、合板や木質ボードの強度物性は、構成要素である単板、ストランド、小片、ファイバーの強度自体および要素間の接着強度に依存する。野地板という使用部位は、屋根材に被覆されているため紫外線の影響を受けず、また、雨漏り等のトラブルを除けば、極端な湿潤状態も生じない。したがって、構成要素である木質部が容易に劣化するとは考えにくい。しかし、接着剤の凝集力や界面の凝集力は、加水分解や含水率変化に伴う木質部の膨潤収縮の作用で低下する可能性がある。また、積雪による鉛直荷重は野地板の曲げ性能に影響する可能性があり、地震による水平荷重は野地板と垂木の釘接合部に影響する可能性がある。

以上の観点から野地板に作用する劣化因子を整理すると、冬季積雪による曲げ負荷、地震力による釘接合部への負荷、小屋裏の温湿度変動に伴う含水率変化(膨潤収縮力の接着部への作用)という3項目に加え、釘の熱伝導率が高いことが要因で生じる夏季の高温屋根面による釘近傍の局所加熱やその反対の冷却に伴う釘近傍の結露という計5項目が挙げられる。以下、各因子の影響度合いについて、収集データ等を用いて推察する。

### (1) 積雪荷重による曲げ負荷

積雪荷重の算出には屋根上の積雪量が必要であるが、当該実験住宅の屋根上積雪量は記録されなかった。そこで、2004~2013年における盛岡の最深積雪が27~76cmに分布したこと(5)を参考に、その中央値付近の50cmを実験住宅屋根上の最大垂直積雪深と扱う。積雪の面密度を深さ1cmあたり3kgf/m<sup>2</sup>とすると、屋根面にはm<sup>2</sup>あたり150kgfの荷重が作用する。また、建築基準法施行令86条には屋根形状係数とその算出方法が定められており、屋根勾配に応じて落雪による荷重軽減が考慮される。当該実験住宅の屋根勾配は22度であり、規定の算出式より屋根形状係数は0.92と算出される。前述の屋根上荷重に0.92を乗じると、屋根上にはm<sup>2</sup>あたり138kgfの荷重が作用する。この負荷で生じる野地板の曲げ応力を算出すると2.9MPaとなった。ただし、曲げスパンは45.5cm(垂木間隔)とし、安全側で評価するため等分布荷重ではなく中央集中荷重で算出した。表1に示すように供試材料の曲げ強度(MOR)は最小値でも18.3MPaであるため、積雪による曲げ応力は最大でもMORの16%となった。比例限度応力をMOR

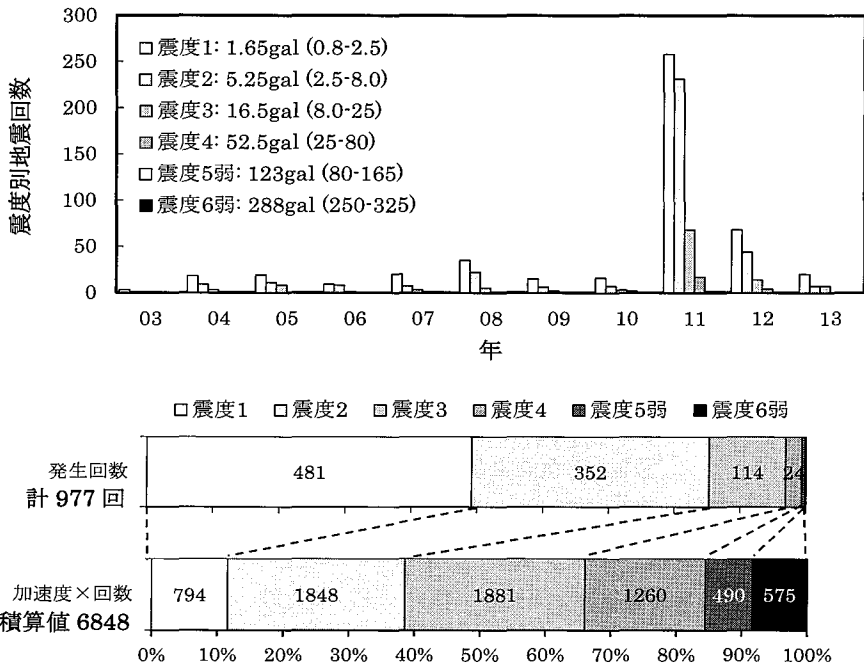


図1 野地板供試期間における地震発生回数(上)および地震加速度の積算値(下)

の約3割と比較的小さく見積もっても、積雪荷重は比例限度の1/2以下の応力となり、十分な安全な負荷レベルと推察される。

## (2) 地震力

野地板として供試された期間(2003年12月～2013年6月)における当該地点の地震発生回数を調べ(6)、震度階別に図1(上)に示した。供試8年目の2011年には震度6弱の地震を2回受けたが、実験住宅の外壁に目立つ損傷は認められなかった。これは実験住宅が無窓で出入口を除く外周部の全てが耐力壁であり、地震力や風圧力に対して極めて安全な構造のためと思われる。また、水平構面の主な耐力要素はMDF張りの天井と野地板で、耐力壁と同様に水平構面のせん断剛性も十分安全な設計となっている。事実、野地板回収時の観察では釘接合付近での損傷は認められず、地震力は数多くの釘接合部に分散し、巨視的損傷を伴わない低負荷レベルで作用したと考えられる。

釘接合部に作用する地震力の定量化は、実験住宅の耐震性に関する詳細が未検討のため現状では困難である。したがって、ここでは期間中の地震力の積算に関するデータ提示に留める。地震力は建物の自重と地震の加速度の積で定義されるため、地震力の積算に関する指標として期間中の加速度の積算値を求めた。図1(上)の凡例に震度階ごとの加速度の範囲および中央値を示すが、各震度階の発生回数に加速度中央値を乗じて積算したのが図1(下)である。震度5弱以上の発生は6回で全発生回数977に対して極めて少ないが、加速度積算値に占める割合は

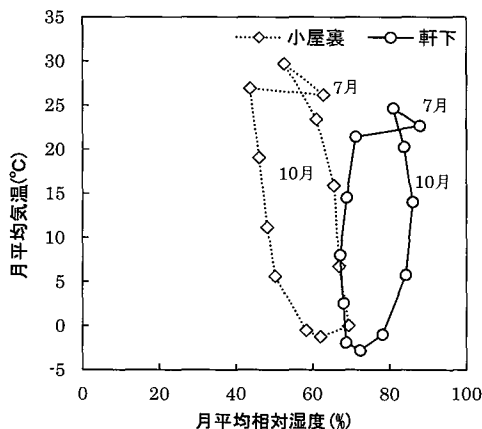


図2 外気および小屋裏の年間温湿度変動

15%にも及ぶことが分かる。

### (3) 温湿度変動による含水率変化

軒下の外気(軒下)および小屋裏空間の温湿度計測結果を図2に示す。ただし、プロットは温度、湿度ともに月平均値で示した。小屋裏の換気は、南北面それぞれにおいて軒桁と軒天との間に設けられた幅2 cm程度の金網張りスリットを経路としており、南または北からの通風による自然換気が主となる。切妻面には小屋裏換気口が設けておらず、換気量は比較的小さいと考えられる。図2より夏季の小屋裏温度は外気より5℃以上高いことが分かるが、これは換気量の少なさに起因すると考えられる。また、同図より小屋裏の湿度は外気より5~20%程度低いことが読み取れるが、要因としては外気より高温であることや小屋裏空間の木質表面による調湿効果が考えられる。

野地板下面の含水率は、小屋裏空間への吸放湿により変動する。また、上面付近では屋根面からの加熱や冷却によって下面付近よりも大きな温度変動が生じ、下面に比べて大きな含水率変動が生じる可能性がある。さらに、野地板は厚さに対して大面積となるため、端面付近と端面から離れた位置の含水率も異なり、端面付近では吸放湿の応答が速いため含水率変動も大きいと考えられる。このように野地板の含水率は、部位や周囲環境に影響されるため、定量化が難しい。

そこで本研究では、野地板の含水率変動を小屋裏の旬平均温湿度に対応する平衡含水率の変動範囲として扱った。供試パネルのうち、合板、OSB(A)、PB(PF)、MDFについては、仕様が類似するパネルに対して平衡含水率の算出式(7)が報告されており、その算出式を用いて含水率変動範囲を推定した。また、OSB(P)の含水率変動範囲はOSB(A)と同等と扱い、PB(MDI)では使用されているMDI接着剤の吸湿性がPF接着剤と比べて著しく低い(8)、PB(MDI)の含水率をPB(PF)の1割減(接着剤添加量約10%の影響を考慮)とした。算出された

表2 小屋裏温湿度から推定された野地板の含水率変化（年内変動の下限と上限）

種類	下限含水率 (%)	下限時の温湿度	上限含水率 (%)	上限時の温湿度
OSB (A)	5.3	27.7°C 36.8%RH	11.2	0.9°C 72.0%RH
OSB (P)	5.3		11.2	
PB (PF)	7.3		12.3	
PB (MDI)	6.6		11.1	
MDF	6.1		10.1	
合板	6.1		12.0	

含水率の変動範囲を表2に示す。供試パネル全体で見ると、含水率の下限は5.3～7.3%、上限は10.1～12.3%であり、年間の変動幅は5～6%程度となった。

(4) 屋根面の高温に伴う釘近傍の局所加熱

屋根表面は日射を受けると外気温よりも高温になるが、実験住宅の屋根解体時に野地板上面にアスファルトルーフィング（防水紙）の溶融跡が観察されたことから、夏季には相当な高温状態であったと推測される。そこで、実験住宅の屋根表面の温度を日射相当外気温（SAT：Sol-Air Temperature）を用いて推定した。SATは(1)式で算出され、外表面に当たる日射量を外気温の仮想上昇分に換算し、その値と外気温との和となる。

$$SAT = \frac{\text{日射吸収率} \times \text{日射量} (W/m^2)}{\text{外側表面熱伝達率} (W/m^2K)} + \text{外気温} (°C) \quad (1)$$

ここで、日射吸収率は実験住宅の屋根葺き材である鋼板の既報値0.9を用いた(9)。また、屋根面の熱伝達率は既報値17.5 W/m<sup>2</sup>Kを用いた(10)。

屋根面温度の推定は一日のうちの最高温度を対象とし、日射量を12時から13時までの盛岡における全天日射量 (MJ/m<sup>2</sup>) から算出してSATを求め、これを一日の最高温度とした。2012年12月から2013年11月までの一年間 (365日) で屋根面最高温度を推定し、その結果を図3に示した。なお、厳冬期 (12月～2月) で屋根上に積雪がある場合、実際の屋根面温度はSATの推定温度より低いと考えられるが、ここでは積雪の影響は無視した。図3では月毎に10°C刻みの頻度分布で示してあるが、屋根面温度が50°Cを超える日は3月から10月までに及び、70°Cを超える日は5月から8月に及ぶ。また、6月には80°Cを超える日数が4日と推定された。このような屋根面の高温状態は野地板の上面温度を上昇させるが、とりわけ熱伝導率の高い釘の近傍への影響が大きいと考えられる。釘頭から釘身に伝導した熱は釘近傍の木質部の含水率を低下させ、放冷時には含水率が回復する。このような含水率変動は木質部に膨潤収縮応力を発生させ、それが接着力に影響する可能性がある。

(5) 屋根面の冷却に伴う釘近傍の結露

前項で示した屋根高温による釘近傍の加熱と逆の現象として、冷却に伴う釘近傍での結露が

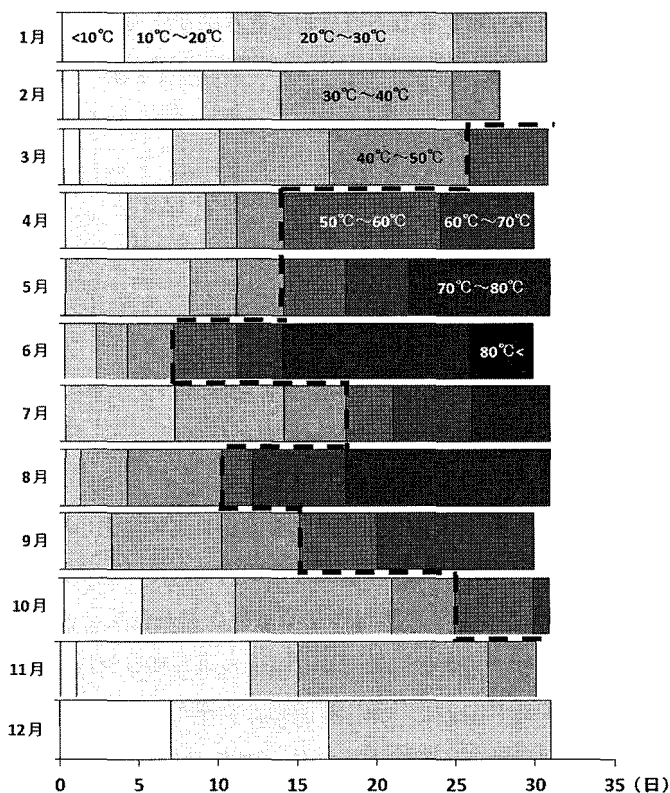


図3 屋根面の日最高温度の年内分布 (2012年12月~2013年11月)  
(注) 50°Cを境界として破線で区分

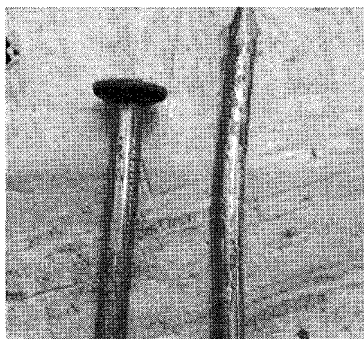


写真4 野地板回収時の釘のサビ

考えられる。野地板の熱伝導率が $0.15\text{W/mK}$ 程度であるのに対して、釘の熱伝導率は $80\text{W/mK}$ 程度で約500倍も熱を伝えやすい。外気および屋根面の温度が下がると、釘身の温度は釘近傍より早く下がるため、釘身表面での結露発生の可能性がある。事実、屋根解体時に野地板の釘には錆の発生が観察された(写真4)。釘身表面での結露発生は近傍の木部の含水率を上昇させ膨潤応力となるが、その後の乾燥では収縮応力となり、その反復が接着力に影響する可能性



表3 曲げ性能 (MOR, MOE) の試験結果

種類	N	比重	TC		MOR			MOE			
			(%)	Ave	±	std	残存率 (%)	Ave	±	std	残存率 (%)
OSB(A) (⊥)	40	0.626	3.1	19.2	±	3.7	105	1.98	±	0.34	96
OSB(P) (⊥)	40	0.692	1.5	26.9	±	4.4	98	3.37	±	0.41	104
PB(PF)	40	0.763	1.0	21.0	±	2.4	103	3.74	±	0.34	104
PB(MDI)	40	0.795	0.7	28.8	±	2.4	100	4.14	±	0.26	100
MDF	20	0.764	-0.1	47.8	±	2.7	105	4.53	±	0.18	107
合板 (⊥)	20	0.634	2.9	45.5	±	4.4	127	3.20	±	0.35	112

(注) MOR、MOE は試験時の厚さを用いて算出、N：試験体数、TC：初期厚さ基準の厚さ変化率

がある。さらに、結露水が釘近傍の接着剤の加水分解に影響する可能性がある。

### 3. 曲げ性能および接着強度の劣化

回収した野地板の曲げ試験結果を表3に示す。MOE、MORの平均値は、ともに暴露前の平均値との間に有意な差は認められず、曲げ性能の劣化は認められなかった。前節で述べたように積雪の曲げ負荷は比例限度荷重の1/2以下と小さく、この程度の荷重は曲げ性能に影響しないことが確認できる。また、含水率の変動は、含水率12%程度以下の領域で変動幅が5%程度であり、この程度の含水率変動では曲げ性能に影響を及ぼさないことが明らかとなった。さて、曲げ性能は野地板の表層付近の強度や弾性率に強く影響されるため、上記の結果は、少なくとも表層付近では物性劣化が生じなかった、と換言できる。なお、表中の厚さ変化率(TC)は、暴露前の厚さ(同一ロット製品)に対する回収後のサンプル厚さの変化率を示しており、数%以内の値であった。一般に、木質ボードの強度物性は厚さ増加に伴って劣化が進行し、たとえば国産の一般的なPBでは約10%のTCでMORが4割程度低下すると報告されている(11)。回収された野地板は、TCが小さかった点でも劣化段階に到達していないと言える。

次に、接着強度の劣化指標であるIBの測定結果を表4に掲げた。IB試験はパネル表面に垂直な剥離試験であり、厚さ方向における最弱部の接着強度が測定される。合板以外の供試パネルは、製法上の特徴として厚さ中央部は相対的に比重が低いいため表層部に比べて接着強度が低く、通常、IBは厚さ中央付近の接着強度として測定される。表4の結果を見ると、野地板の端部で測定されたIBは供試パネル6種類中4種類で有意な低下が認められた。最も低下したのはPB(PF)の25%低下(残存率75%)で、PB(MDI)の16%低下(残存率84%)が次に続き、他は1割程度の低下であった。一方、非端部で測定されたIBでは、供試パネル6種類中3種類での有意な低下が認められた。最も低下したのは合板で、23%の低下(残存率77%)、PB(PF)が21%の低下(残存率79%)で次に続き、他は1割未満の低下であった。合板を除く5種類のパネルでは、端部の方が非端部よりもIB低下は大きく、その要因としては端面からの吸放湿が含水率変動を助長したものと考えられる。

表4 剥離強度の試験結果

種類	部位	N	比重	TC (%)	IB (MPa)		残存率 (%)
					Ave	±std	
OSB (A)	端部	36	0.628	3.3	0.48	± 0.10	86**
	非端部	24	0.631	2.8	0.51	± 0.08	91
OSB (P)	端部	31	0.666	1.9	0.57	± 0.15	88
	非端部	24	0.668	2.0	0.62	± 0.13	97
PB (PF)	端部	32	0.748	0.7	0.63	± 0.10	75**
	非端部	24	0.752	0.4	0.66	± 0.06	79**
PB(MDI)	端部	34	0.802	1.1	1.83	± 0.32	84**
	非端部	24	0.793	0.2	2.00	± 0.22	91**
MDF	端部	12	0.765	-0.1	0.55	± 0.06	88*
	非端部	12	0.763	-0.5	0.62	± 0.08	100
合板	端部	12	0.640	0.3	1.03	± 0.16	90
	非端部	12	0.622	2.1	0.88	± 0.32	77*

(注) N、TC：表3と同様、\*：有意水準5%で初期値と有意差あり、\*\*：有意水準1%で初期値と有意差あり

表5 釘側面抵抗 (LNR) と釘頭貫通抵抗 (NHPT) の測定結果

種類	釘側面抵抗(L)						釘頭貫通抵抗				
	N	比重	TC (%)	LNR (kN)		残存率 (%)	N	比重	TC (%)	NHPT (kN)	
			Ave±std					Ave±std			
OSB(A)	12	0.619	6.0	1.79 ± 0.53	85	21	0.643	2.0	1.33 ± 0.27	80**	
OSB(P)	9	0.685	3.9	2.21 ± 0.62	111	25	0.678	3.9	1.41 ± 0.21	74**	
PB(PF)	8	0.752	2.4	1.32 ± 0.28	76**	23	0.756	0.8	1.41 ± 0.20	84**	
PB(MDI)	12	0.801	2.7	2.76 ± 0.39	100	25	0.799	0.6	2.27 ± 0.24	83**	
MDF	9	0.737	-0.9	2.63 ± 0.28	110**	19	0.769	-0.1	1.55 ± 0.18	76**	
合板	6	0.676	2.4	2.24 ± 0.36	95	21	0.637	1.6	1.88 ± 0.19	94**	

(注) N、TC：表3と同様、\*：有意水準5%で初期値と有意差あり、\*\*：有意水準1%で初期値と有意差あり

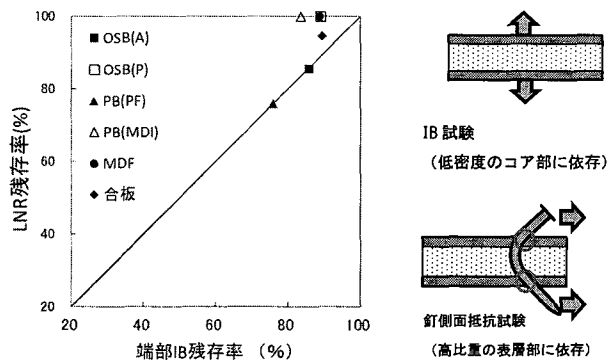


図4 端部IB低下とLNR低下の関係

4. 釘接合性能の劣化

LNR (釘側面抵抗) およびNHPT (釘頭貫通抵抗) の測定結果を表5に示す。まずLNRの残存率に着目すると、供試6パネルの中で有意な低下が認められたのはPB(PF)のみであった

(24%低下)。PB(PF)は、前述のとおり端部IBも25%低下しており、LNRの低下とIB低下との関係が示唆される。しかし、図4に示す端部IB残存率とLNR残存率との関係を見ると、PB(PF)とOSB(A)では両物性の残存率は同程度であるが、他のパネルではLNR残存率の方が高かった。この理由は以下のように推察できる。図4の模式図に示すように、釘側面抵抗試験において釘身はパネル表裏面の2面でせん断されると同時に曲げ変形を生じるため、LNRは表層部の釘身めり込み抵抗に依存する(12)。すなわち、接着力の最も小さい厚さ中央部で測定されたにIBの劣化よりも表層部の劣化の影響を受けやすいと言える。また、前項で曲げ性能の劣化が認められなかったことから、野地板端部における表層部も劣化が生じていない可能性があり、そのためLNRはIBに比べて高い残存率を示す場合があると考えられる。

続いて表5でNHPTの残存率に着目すると、6種類全ての供試パネルで有意な低下が認められた。低下率は6～26%の範囲(残存率74～94%)にあり、OSB(P)とMDFで低下が大きかった(残存率74～76%)。LNR、IB、MORに劣化が認められなかったパネルでもNHPTの劣化が認められたが、この理由は次のように推察できる。NHPTは釘頭がパネル厚さ全体を貫通する際に発生する最大抵抗であり、釘近傍のパネルの強度に大きく依存する。すなわち、釘近傍でパネルに局所的な強度劣化が生じていれば、NHPTは劣化することになる。ただし、釘近傍の局所的な劣化には様々な要因が考えられるため、個々の要因がNHPTに及ぼす影響については、次節において追加実験の結果を用いて考察する。

### Ⅲ. 釘頭貫通抵抗(NHPT)の劣化要因に関する考察

#### 1. 劣化要因の整理

NHPTの初期値測定において、釘は万能試験機を用いて試験片(5cm×5cm)の中央に垂直に打ち込まれ、釘頭めり込みはほとんど生じていなかった。また、試験片裏面の釘身周囲の損傷(以下、“花咲き”と呼ぶ:写真5)を極力抑えるため、直径6mmの孔を設けた金属板ジグ上に試験体を置き、その孔に釘先端が挿入されるように釘打ちされた。これに対して野地板は、ネイルガンを用いて垂木上に釘打ちされており、花咲きの程度や釘頭めり込みの程度も初期値測定の状態とは異なる可能性がある。さらに、野地板としての供試、屋根の解体および試験体作製時の状況を考慮すると、野地板のNHPTの劣化要因は、時系列的に下記の3区分、内容として計6項目に整理できる。

- ①野地板施工時の要因:花咲き、釘頭めり込み
- ②供試中の要因:釘近傍の含水率変化による接着劣化(乾熱・結露)
- ③解体後の要因:野地板引き剥がし時の損傷、再度の釘打ち

上記の要因のうち、③の野地板の引き剥がし時の損傷は、その可能性を否定できないが、前述のように損傷を回避した丁寧な解体を行っており、本節での検証対象からは除外した。また、

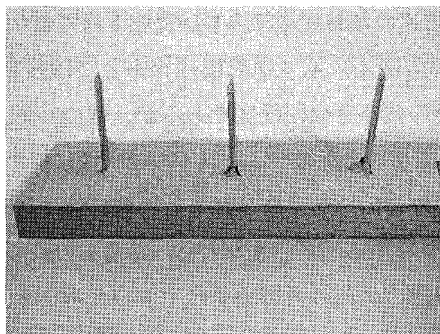


写真5 釘打ち条件による裏面損傷（花咲き）の相違  
 (注) 左から条件A, C, Bの例

②のうち結露による接着劣化は再現実験が困難なため今後の課題とし、これら2項目を除いた4項目について、検証実験を行ってNHPTへの影響の程度を調べた。

## 2. 裏面損傷（花咲き）の影響

パネル裏面の花咲きの大小は、釘打ち道具やパネル下面に接する受け材の材質で異なると考えられる。ここでは下記の3条件で花咲きの程度（直径）とNHPTを測定し、NHPTに及ぼす花咲きの影響（写真5参照）を調べた。

条件A：受け材を金属製（直径6mmの釘孔あり）とし、万能試験機で釘打ち

条件B：受け材を発泡系断熱材（フェノールフォーム）とし、金槌による手打ち

条件C：受け材を木材（スギ板目面）とし、ネイルガン打ち

条件AはNHPTの初期値測定と同条件であり花咲きの程度は最も小さく、条件Bは受け材の剛性が低いため花咲きの程度が最も大きく、条件Cは両者の間で、かつ、野地板の釘打ち条件に最も近い、という設定である。野地板と同一ロットの供試パネルで、通常室内で約10年保管された尺角（30cm×30cm）パネル1枚から幅5cmの短冊状試験体を採取し、幅中央部に約5cm間隔で条件を変えて連続的にN50釘を打った。ただし、条件CはPB(MDI)とMDFの2種類を対象とし、条件A, Bでは全6種類を対象とした。1条件の繰り返し数は10であり、釘打ちに際してはパネル表層への釘頭めり込みが生じないように留意した。釘打ち後に花咲きの直径（楕円の場合は長径）を、ノギスを用いて0.1mm精度で測定し、続いて前節と同様の試験方法でNHPTを測定した。

測定結果を表6に示す。花咲き直径 $\phi$ の平均値は、条件Aが6～7mm程度であるのに対し、条件Bでは9～12mmと1.4～1.7倍に増加し、いずれの供試パネルでも有意な差が認められた。しかし、条件AからBへの花咲き直径の増加（裏面損傷の増大）によってNHPTが有意に低下したパネルはMDFと合板のみで、その低下率は6～9%であった。一方、条件Cは検討対象がPB(MDI)とMDFの2種類と少ないが、花咲きの直径 $\phi$ は条件Aの1.1～1.2倍であり裏面損傷の程

表6 NHPTに及ぼす裏面損傷（花咲き直径）の影響（N=10）

種類	条件A		条件B		条件AとBの比較		条件C		条件AとCの比較	
	$\phi_A$	NHPT : $N_A$	$\phi_B$	NHPT : $N_B$	$\phi_B$	$N_B$	$\phi_C$	NHPT : $N_C$	$\phi_C$	$N_C$
	Ave $\pm$ std (mm)	Ave $\pm$ std (kN)	Ave $\pm$ std (mm)	Ave $\pm$ std (kN)	$\phi_A$	$N_A$	(mm)	(kN)	$\phi_A$	$N_A$
OSB(A)	6.3 $\pm$ 1.2	1.51 $\pm$ 0.32	9.8" $\pm$ 1.6	1.53 $\pm$ 0.30	1.6	1.01				
OSB(P)	6.8 $\pm$ 0.7	1.86 $\pm$ 0.46	9.4" $\pm$ 1.1	1.87 $\pm$ 0.38	1.4	1.01				
PB(PF)	6.6 $\pm$ 0.5	1.47 $\pm$ 0.11	11.5" $\pm$ 2.2	1.41 $\pm$ 0.10	1.7	0.94				
PB(MDI)	6.6 $\pm$ 0.6	2.59 $\pm$ 0.14	9.5" $\pm$ 1.0	2.52 $\pm$ 0.17	1.4	0.98	7.2 $\pm$ 0.6	2.57 $\pm$ 0.2	1.1	0.99
MDF	6.3 $\pm$ 0.2	1.99 $\pm$ 0.11	10.3" $\pm$ 1.2	1.86" $\pm$ 0.09	1.6	0.94	7.7 $\pm$ 0.0	1.92 $\pm$ 0.1	1.2	0.96
合板	7.2 $\pm$ 0.4	2.20 $\pm$ 0.21	11.1" $\pm$ 1.5	2.01" $\pm$ 0.12	1.5	0.91				

(注) \*, \*\*: それぞれ有意水準 5%、1% で条件Aとの間に平均値の有意差あり

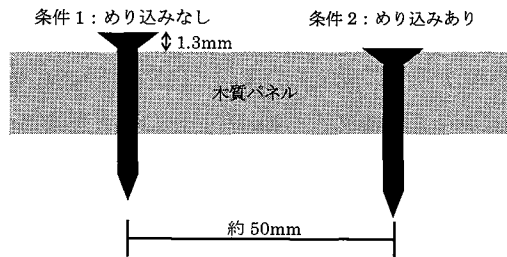


図5 釘頭めり込み試験体の模式図

度は小さく、条件Aとの間でNHPTに有意差は認められなかった。これらの結果を総合すると、ネイルガンによる野地板の釘打ち時に発生する花咲きの程度は初期値測定時と大差はないと推測され、NHPTには影響しなかったと考えられる。

### 3. 釘頭めり込みの影響

野地板と同一ロットの供試パネルで、通常室内で約10年保管された尺角（30cm×30cm）パネル各1枚から幅5cmの短冊状試験体を採取した。試験体の幅中央部に約5cm間隔でネイルガンを用いてCN50釘を打った。その際、図5に示すように釘頭の上端が釘頭厚さ（1.3mm）だけパネル上面から浮き上がった状態を“条件1：めり込みなし”，釘頭の上端がパネル表面とフラットになる状態を“条件2めり込みあり”とし、ネイルガンの圧力調整により条件1と条件2の釘打ちを各10回行った。なお、パネル面内の密度のばらつきによるNHPTへの影響を極力排除するため、条件1と条件2は試験体上に交互に繰り返し、また、裏面の花咲きを低減させるためパネル下面には前述の条件Cを採用した。釘打ち後に釘頭めり込み量（図5：条件1の状態を基準）を、ノギスを用いて0.1mm精度で測定し、続いて前節と同様の試験方法でNHPTを測定した。

測定結果を表7に示す。条件1の釘頭めり込み量は0.1mm以下であり、めり込みなしの条件として許容範囲であった。条件2のめり込み量は、パネル密度その他の影響を受けて0.5～1.4

表7 NHPTに及ぼす釘頭めり込みの影響 (N=10)

種類	条件1 (めり込みなし)						条件2 (めり込みあり)						NHPT 比率 $\frac{N_2}{N_1}$
	めり込み量			NHPT:N <sub>1</sub>			めり込み量			NHPT:N <sub>2</sub>			
	Ave	±	std	Ave	±	std	Ave	±	std	Ave	±	std	
OSB(A)	0.1	±	0.2	1.67	±	0.36	1.1	±	0.5	1.51	±	0.35	0.90
OSB(P)	0.1	±	0.1	1.78	±	0.38	1.4	±	0.9	1.51	±	0.27	0.85
PB(PF)	0.0	±	0.1	1.53	±	0.14	1.0	±	0.6	1.40*	±	0.10	0.92
PB(MDI)	0.0	±	0.0	2.70	±	0.21	0.5	±	0.2	2.49*	±	0.17	0.92
MDF	0.1	±	0.1	1.92	±	0.07	0.9	±	0.5	1.82**	±	0.06	0.95
合板	0.1	±	0.1	2.03	±	0.36	1.3	±	0.4	2.16	±	0.30	1.06

(注) \*, \*\*: それぞれ有意水準 5%、1% で条件 1 との間に平均値の有意差あり

mmの範囲に分布した。めり込み量が一樣でないためパネル間の比較は難しいが、それぞれの釘頭めり込みによってNHPTが有意に低下したのは、PB(PF)、PB(MDI)、MDFの3種類で、低下率は5～8%の範囲にあった。めり込み量が相対的に大きなOSBや合板においてNHPTが有意に低下しなかったのは、測定値のばらつきが主要因と考えられるが、単板やストランドという大型要素で構成されるため、釘頭めり込みに対する横圧縮変形の許容量が小片や繊維に比べて大きく、それが接着部への影響を軽減させたと考えられる。これに対し、PBやMDFといった木質ボードでは表層の高密度部分が機械的強度を担っているため、1mm程度の釘頭めり込みによる表層部破壊はNHPTの有意な低下を招くことが明らかとなった。

一方、野地板として9年半使用したPB(PF)、PB(MDI)、MDFにおけるNHPTの低下率は、前述のようにそれぞれ16%、17%、29%であった。本項で測定された釘頭めり込みによるNHPTの低下率は、それぞれ8.4%、7.8%、5.2%であるため、野地板の施工時に発生した可能性のある釘頭めり込みの影響は、全体の影響の半分以下と推測される。

#### 4. 乾熱の影響

釘は鉄製で熱伝導率が大きいため、屋根面の高温状態(図3)によって釘の温度が上昇し、釘近傍でパネルの含水率低下が生じると考えられる。乾燥状態の熱の影響なので、ここでは“乾熱”と称す。温度が下がれば含水率は復元するが、乾熱による含水率変動は木質部に膨潤収縮応力を発生させ、それが接着力に影響する可能性がある。そこで本項では、9年半の野地板使用期間における釘の熱履歴を推定し、アレニウスの反応速度論に準拠した経験則である“10℃2倍則”を用いて乾熱による劣化外力を試算した。続いて、その劣化外力を加熱繰り返し試験により実験室的に再現し、NHPTに及ぼす乾熱の影響を調べた。

##### (1) 劣化外力の試算

乾熱による劣化外力の試算には釘頭の温度 $T_0$ を知る必要がある。そこで、図6に示すように屋根断面の各層の熱伝導率と厚さより熱抵抗を求め、屋根面温度 $T_1$ (一日の最高温度: SAT)と小屋裏温度 $T_2$ (同日に計測された最高温度)を用いて、熱抵抗の按分により $T_0$ を算出した。

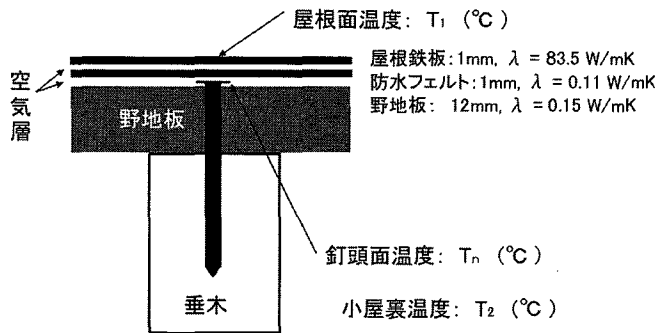


図6 実験住宅の屋根断面と材料の熱伝導率

表8 釘頭温度の最高到達温度の年間分布

温度範囲 (°C)	年間日数 (d)		劣化係数 F
	T <sub>n,max</sub>	T <sub>n,min</sub>	
40 ≤ T <sub>n</sub> < 50	50	52	0.125
50 ≤ T <sub>n</sub> < 60	36	38	0.25
60 ≤ T <sub>n</sub> < 70	34	34	0.5
70 ≤ T <sub>n</sub> < 80	31	0	1

ただし、屋根断面における釘頭より上部には二つの空気層（屋根鉄板と防水フェルトの間、防水フェルトと釘頭の間）の存在が考えられるが、空気層の厚さや平面分布などの状態は不明である。そこで二つの空気層の合計の熱抵抗として、最大 ( $50 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$ ) と最小（熱抵抗ゼロ）の2条件を設定した。熱抵抗が最大の場合はT<sub>n</sub>が最小値 (T<sub>n,min</sub>) となり、熱抵抗が最小の場合はT<sub>n</sub>が最大値 (T<sub>n,max</sub>) となる。2012年12月から2013年11月までの365日のT<sub>1</sub>とT<sub>2</sub>を用いてT<sub>n,min</sub>とT<sub>n,max</sub>を算出し、結果を10℃刻みの温度帯の年間日数dとして表8に示した。T<sub>n,max</sub>の設定ではT<sub>n</sub>が70℃以上となる年間日数dは31日で、T<sub>n,min</sub>の設定では0日となった。

表8において最も高い温度帯の中央値である75℃を基準として、この乾熱による劣化の作用を劣化係数F=1.0とし、年間を通じての乾熱による劣化外力Pを次式で定義した。

$$P = \sum (F \times d) \times \text{使用年数} \quad (9.5)$$

表8に示すように70℃未満の温度帯における劣化係数Fは、アレニウスの反応速度論に準拠した経験則である“10℃2倍則”により、順次半減した値を採用した。この方法でPを算出すると、T<sub>n,max</sub>の設定ではP=601、T<sub>n,min</sub>の設定ではP=314となった。この結果より、少なくともP=600程度までの劣化外力を実験室的に再現し、NHPTへの影響を調べる必要があることが分かった。

## (2) 加熱繰り返し試験

野地板と同一ロットのMDFで、約10年間室内保管された寸法90mm×50mmの試験体を用いた。試験体6個を1グループとして平均比重が等しくなるように6グループを準備し、1試験

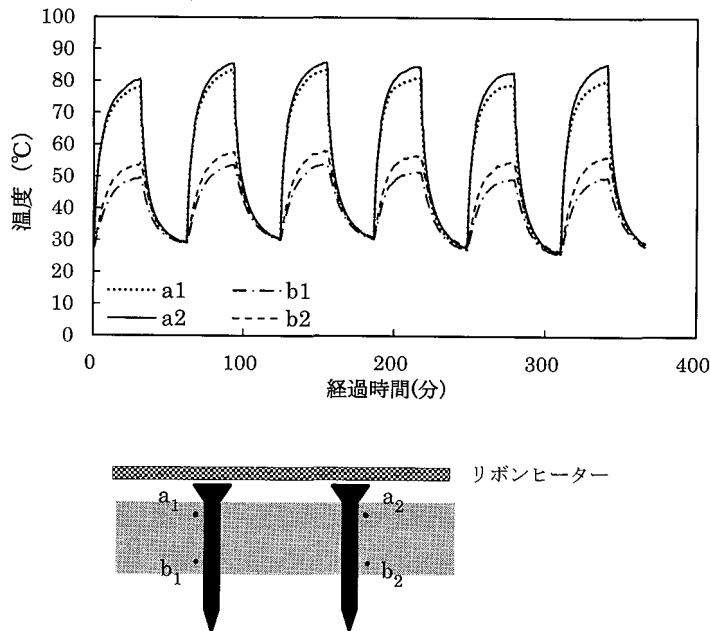


図7 釘頭繰り返し加熱試験の温度履歴の一例(上)および試験体断面の模式図(下)

体に付き2本の釘(N50)を前述の条件Aの方法で打った。図7(下)に示すように試験体の釘頭部にリボンヒーター(アズワン社製:JK-1,100ボルト仕様)を接触させ、定電圧装置により釘頭温度が85°C程度になるよう電圧を調整した。図7(上)は釘頭直下( $a_1$ ,  $a_2$ )と試験体裏面の釘身近傍( $b_1$ ,  $b_2$ )の温度を熱電対で計測した結果であり、釘近傍の温度は釘頭付近で85°C程度までの昇温、試験体裏面で50°C程度までの昇温が繰り返された(30分加熱と30分放冷で1サイクル)。各サイクルにおける最高到達温度が約85°Cであったため、前項の劣化係数は $F=2.0$ とし、温度の継続時間は考慮せず1サイクルの劣化強度を $P=2$ と仮定した。試験体に与える加熱繰り返しサイクルは、50( $P=100$ ), 100( $P=200$ ), 200( $P=400$ ), 400( $P=800$ )の4条件とし、それぞれに1グループの試験体( $N=12$ )を当て、対照(非加熱)として2グループの試験体( $N=24$ )を当てた。

加熱繰り返し試験は25°Cの恒温室内(写真6)で行い、所定のサイクル終了後、含水率が10%程度に回復するまで養生してからNHPT試験に供した。また、加熱による接着力への影響を調べるため、NHPT試験終了後に400サイクルおよび対照(非加熱)の試験体からIB試験体(50mm×50mm,中央に釘頭貫通の破壊部を含む)を採取し、IBを測定した。

### (3) NHPTおよびIBへの影響

試験結果を表9に示すが、劣化外力を $P=800$ まで付与してもNHPTに有意な低下は認められなかった。含水率10%程度を起点として加熱繰り返しを受けると、釘近傍の木質部は含水率10%以下の低含水率の領域で変動を生じるが、本実験の結果より、このような含水率変動は



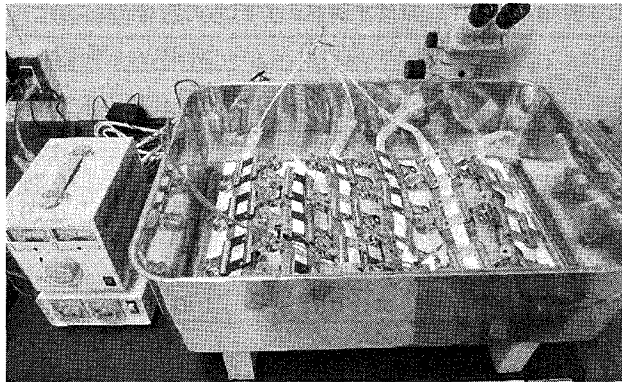


写真6 加熱繰り返し試験の様子

表9 加熱繰り返し試験結果の一覧

サイクル数	劣化外力 <i>P</i>	NHPT			N	IB			
		Ave	±	std		Ave	±	std	N
0(対照)	0	1.90	±	0.12	24	0.50	±	0.08	12
50	100	1.92	±	0.18	12				
100	200	1.90	±	0.15	12				
200	400	1.91	±	0.17	12				
400	800	1.86	±	0.12	12	0.45	±	0.07	12

NHPTに影響を与えるような木質部の劣化や接着結合点の劣化を引き起こさないことが明らかとなった。IB試験の結果を見ても、400サイクル後のIB平均値は加熱前に比べて1割程度低い値を示したが、統計的に有意な低下ではなかった。以上の結果より、野地板の実際使用環境におけるNHPT劣化の因子として、乾熱の影響は無視できる程度と推測される。

### 5. 再度の釘打ちの影響

野地板のNHPTは、引き抜かれた釘穴に再び釘を打ち込んでから測定されたが、この操作がNHPTに影響を与えるか否かを調べた。試験体には実験住宅から回収した野地板（6種類のパネル）の残部を用い、恒温恒湿室（20℃60%RH）で養生後、幅5cm×長さ30cmに裁断して供試した。釘打ちはCN50釘を用いたネイルガン打ちとし、幅中央部に約5cm間隔に釘打ちした（受け材は前述のフェノールフォームを使用）。続いて、パネル裏面から釘先端を叩いて釘頭を浮かせ、釘を垂直に引き抜き、再度、その釘穴に金槌で釘打ちした。この操作は釘1本飛ばしで行い、一度目の釘打ちおよび再度の釘打ちを各10体準備して、前述と同様の方法でNHPTを求めた。

表10に結果を示すが、一度目と再度の釘打ちの間でNHPTの平均値に統計的な有意差は認められなかった。したがって、前節で言及した野地板のNHPTの低下において、実験操作上不可

表10 NHPTに及ぼす再度の釘打ちの影響 (N=10)

種類	NHPT (一度目)		NHPT (再度)	
	Ave	± std (kN)	Ave	± std (kN)
OSB(A)	1.68	± 0.38	1.79	± 0.34
OSB(P)	1.75	± 0.30	1.79	± 0.38
PB(PF)	1.45	± 0.09	1.45	± 0.10
PB(MDI)	2.51	± 0.29	2.49	± 0.15
MDF	1.70	± 0.12	1.73	± 0.16
合板	2.05	± 0.12	1.95	± 0.16

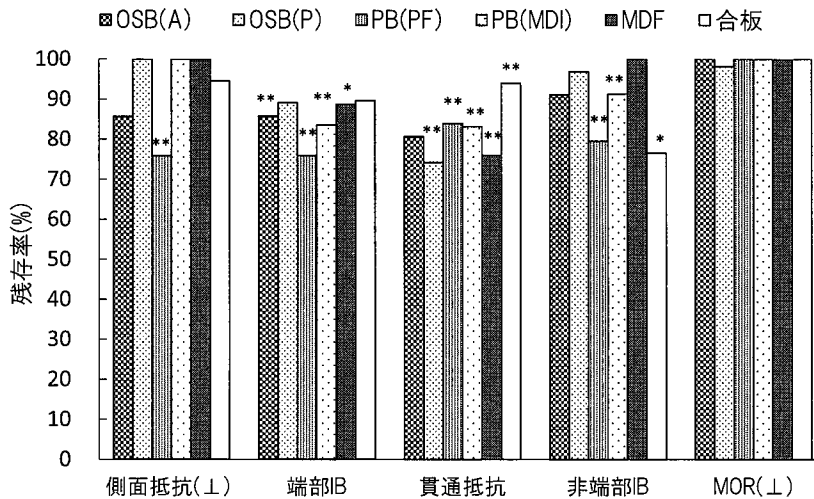


図8 野地板9年半使用後の物性劣化の一覧

(注) \*, \*\*: それぞれ有意水準5%、1%で暴露前との間に平均値の有意差あり

避であった再度の釘打ちは影響しなかったと考えられる。ただし、この検証試験における一度目と再度の釘打ちの時間差は半日程度であり、実際使用との条件とは異なる。すなわち、9年半の使用期間中に釘周囲の小片に劣化が生じていたとすれば、再釘打ちによる釘穴損傷の可能性もあり、その程度によってはNHPTに劣化が生じる可能性もあり得る。

#### IV. まとめ

本研究では構造用の木質ボードの耐久性データ整備の一環として、実験住宅の野地板として9年半使用された試験体を回収し、釘接合性能（釘側面抵抗と釘頭貫通抵抗）およびその関連物性としての曲げ性能や剥離強度について、劣化の有無と程度を調べた。まず、野地板の強度劣化因子として、冬季積雪による曲げ負荷、地震力の釘接合部への影響度合、温湿度変動による含水率変化、屋根面の高温に伴う釘近傍の局所加熱の程度が調べられた。その結果、積雪に

よる負荷は曲げ比例限度荷重の1/2以下で十分安全な負荷レベルであること、実験住宅の耐力壁および水平構面の構成内容を考慮すると、野地板の釘接合部には局所的に大きな地震力が作用したとは考え難いこと、野地板の含水率の年間変動幅は5～6%程度（下限：5.3～7.3%、上限：10.1～12.3%）であること、夏季には80℃を超える屋根面の高温状態が釘の熱伝導で釘近傍を劣化させる可能性があること、などが示された。

野地板の各種物性の残存率の一覧を図8に示す。曲げ強度(MOR)に劣化は認められず、これは野地板の表層付近で接着劣化が生じていないことを示唆する。一方、剥離強度(IB)の残存率は厚さ中央部の接着劣化を示すが、野地板の端部を含む場合（端部IB）は供試パネル6種類中4種類で有意な低下（残存率75～88%）が、端部を含まない場合（非端部IB）は6種類中3種類で有意な低下（残存率77～91%）が認められた。2種類のPBは、端部IB、非端部IBともに有意に低下しており、他のパネルに比べて劣る傾向にあった。釘側面抵抗（LNR）において有意な低下が認められたのは、供試パネル6種類中1種類のみ（PB(PF)：残存率76%）であり、LNRはIBの影響よりも表層強度の影響を受けやすいことが示唆された。

一方、釘頭貫通抵抗(NHPT)は供試パネル6種類すべてで有意な低下（残存率74～94%）が認められた。そこで、NHPTの劣化要因として、野地板施工時のネイルガン使用によるパネル裏面損傷（花咲き）、釘頭めり込み、屋根面からの熱伝導による乾熱、再度の釘打ちを取り上げ、検証実験を行って各因子のNHPTへの影響度合を調べた。その結果、NHPTを有意に低下させた因子は、釘頭めり込みのみであった。ただし、その低下率は野地板として9年半使用したNHPTの低下率の半分以下であった。したがって、野地板のNHPTの低下には、劣化要因には挙げたが検証実験を行っていない釘身近傍での結露発生が影響した可能性がある（写真4に示した釘錆からの推測）。

さて、今回の実験結果において、一部を除きLNRに劣化が認められなかったことは大変興味深い。なぜなら、木質ボード張りの耐力壁や水平構面が地震力を受けるとき、釘から伝達される荷重はボード外周部ほど大きく、耐力はNHPTよりもLNRに依存する傾向があるため(13)、NHPTに多少の劣化が生じてLNRが劣化しなければ耐震性にはほとんど影響しないと考えられるからである。今回の実験結果は、今後、木質パネル第2次耐久性プロジェクトの他の屋内暴露試験の結果と統合され、各種木質パネルの耐用年数の推定に活用される予定である。

## 謝 辞

本研究は日本木材学会木質パネル研究会「木質パネル第2次耐久性プロジェクト」ならびに平成25年度江間忠研究助成「国産木質パネルの利用促進に向けた接着耐久性評価技術の開発」（研究代表者：関野 登）の一部として行った。関係諸氏のご協力で厚く御礼申し上げます。特に、実験住宅の建設および屋根解体にご協力いただいた岩手県林業技術センター（当時在職）

の東野 正氏, 谷内博規氏, 大橋一雄氏, 中嶋 康氏, 阿部一成氏に対し, 厚く御礼申し上げます。

## 引用文献

- (1) 日本住宅・木材技術センター (1984) 床用パーティクルボードの手引き, その品質と性能. 昭和59年3月, p70-79.
- (2) 鈴木滋彦 (2001) 木質ボード類の耐久性能評価. 木材工業56: 7-12.
- (3) 関野 登 (2003) 木質ボードの屋内外暴露試験. 木材工業58: 298-304.
- (4) Noboru SEKINO (2012) How durable are wood-based mat-formed panels? Bond durability evaluated by the weathering intensity under outdoor exposure. BIOCAMP2012 Workshop-The 21<sup>st</sup> Wood Based Panel Symposium, Nov. 27, Shizuoka, Japan, p63-72, ISBN978-4-88962-004-7
- (5) 気象庁Webページ, 過去の気象データ検索  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- (6) 気象庁Webページ, 地震データベース検索  
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>
- (7) 関野登, 末松充彦, 高麗秀昭, 安井悦也 (1999) 木質パネルの吸脱湿等温線の測定および実用環境下での含水率変化の推定. 木材学会誌45: 237-243.
- (8) Noboru Sekino and Nobuhiro Asakura (1993) Humidity Control Efficiency of Low-Density Particleboards for Interior Walls II. Measurement of EMC and calculation of moisture capacities. Mokuzaigakkaishi, 39: 1146-1151.
- (9) 安積弘高, 小南和也, 小早川香, 川谷翔二 (2010) GBRC: 35(4), 28-35.
- (10) 木村建一 (2009) “建築設備基礎”, 国際人間環境研究所, 299-300.
- (11) 関野 登, 大熊幹章 (1987) 構造用パーティクルボードの耐久性能. 木材学会誌33: 120-126.
- (12) 関野 登, 清野光咲 (2015) パーティクルボードの釘側面抵抗に及ぼす試験方法の影響. 木材学会誌61: 40-47.
- (13) 関野 登, 内田信平, 中嶋 康 (2014) パーティクルボード張り由来軸組床構面および桁上水平構面のせん断耐力, 木材学会誌60: 328-335.

## Summary

In order to assess the mechanical durability of wood-based panels, roof sheathing panels

that had been used in a model house for nine and a half years were collected and investigated for deterioration of lateral nail resistance (LNR), nail head pull-through resistance (NHPT), internal bond strength (IB), bending strength (MOR), and bending stiffness (MOE). The roof sheathing panels used are an aspen oriented strand board (OSB(A)), a Scots pine oriented strand board (OSB(P)), a phenol-formaldehyde resin bonded particleboard (PB(PF)), a methylene diphenyl diisocyanate resin bonded particleboard (PB(MDI)), a melamine-urea-formaldehyde resin bonded medium density fiberboard, and a structural plywood. The panel moisture content through the year ranged from around 6 to 11%, which was estimated based on the equilibrium moisture contents of each panel and the attic temperature and humidity. Due to such arid conditions, there was no significant deterioration of MOR or MOE in any of the panels. There was some deterioration in IB, however, except in OSB(P) and PB(PF) which showed the largest IB reduction of 21 to 25%. In connection with this decrease in IB, the LNR of PB(PF) exhibited a statistically significant reduction of 24%, while other panels showed no significant reduction in LNR. In contrast, the NHPT of all the panels was statistically significantly reduced by 6 to 26% according to the panel type. The factors that affect NHPT were investigated by conducting some additional tests in terms of panel upper surface damage caused by nail-head pressing, panel lower surface damage caused by nailing, repeated heating of nails caused by high temperatures in excess of 80 °C on the roof surface especially in summer, and so on. From the test results it was found that part of the reduction in NHPT was explicable by the damage to the upper panel surface below the nail head, and the rest could be potentially explained by dew condensation on the nail shanks, which affects bond strength between panel elements surrounding nail shanks.