屋外暴露試験廃材を用いて作製した パーティクルボードの物性評価^{*1}

山内秀文^{*2}, 梅村研二^{*3}

Physical Properties of Particleboard Made from Wooden Waste after Outdoor Exposure Test^{*1}

Hidefumi YAMAUCHI^{*2} and Kenji UMEMURA^{*3}

The effects of reused wood materials obtained from outdoor-exposed plywood on the physical properties of particleboard were investigated. Larch plywood which was exposed on 5 cities (Asahikawa, Noshiro, Tsukuba, Maniwa and Miyakonojo) for 1, 3, 5 years were used as raw materials. Based on weight decrease and exposure period, the plywood was divided according to nine conditions. The plywood was soaked in water for 24 hours, and was cut into particles of 0.5 mm thickness by a knife-ring flaker in each condition. After conditioning the particles 11.8% moisture content, particleboards were made with polymeric diphenylmethane diisocyanate (P-MDI) as an adhesive. Bending properties, internal bond strength and thickness swelling after water immersion for 24 hours were evaluated according to JIS-A-5908. The surface color of the particleboards darkened as the exposure time of plywood increased. However, a difference in the mechanical properties between boards was scarcely recognized. Though there was no difference in the relationship between thickness swelling and water absorption in each condition, the water absorption decreased as the exposure period increased. The reused wood materials obtained from plywood exposed outdoors for 5 years have little adverse effect on the physical properties of the particleboard.

Keywords : wooden waste, outdoor exposure, particleboard, recycle.

屋外暴露試験を経た合板を原料にパーティクルボード (PB) を作製し、その物性を評価することで、廃材を木質材料に再利用した際の材料性能への影響を検討した。気象条件の異なる旭川市、能代市、つくば市、真庭市、都城市の5カ所で1, 3, 5年の屋外暴露を経たカラマツ構造用合板を、暴露に伴う重量減少の程度などから3水準に分け、それらを原料にPBを作製し、力学的性能や24時間吸水による厚さ変化などを評価した。屋外暴露された原料から得たPBは、未暴露の合板を原料にしたものに比べ、暴露年数の増加とともに表面色が暗色化するものの、力学的性能に大きな差は見られなかった。一方、吸水率と厚さ膨張率の関係には差が見られないものの、暴露年数の増加とともに吸水率が低下する傾向が見られた。いずれにしても、5年間の屋外暴露を経た合板をPBの原料としても、得られるボードの物性が大きく低下することはないことが確認された。

1. 緒 言

現在のパーティクルボード工業では、丸太やバージンチップなどの素材を原料として利用することは極めて希で、その多くが工場残材や建築解体材など廃材を原料としている。特に建築廃材パーティクルボード化については、最近もいくつかの研究がなされており、原料種類によるボード物性への影響¹⁾や、解体材特有の原料形状のボード物性への影響^{2, 3)}、

^{*1} Received June 2, 2010; accepted July 7, 2010.

^{*2} 秋田県立大学木材高度加工研究所 Institute of Wood Technology, Akita Pref. University, Noshiro 016-0876, Japan

^{*3} 京大生存圏研究所 Research Institute for Sustainable Humansphere, Kyoto University, Uji 611-0011, Japan

物性に及ぼす接着剤添加量や密度の影響⁴⁾などが検討されている。また、廃材を利用することによるホルムアルデヒド放散特性⁵⁾や種々の化学物質の混入⁶⁾などの環境的性能の検討もなされている。これらの研究の結果や、各工場による生産技術の工夫などにより、廃材は実生産の場でうまく使いこなされており、規格上でも十分な性能を保持するボードが供給されている。

一方で、原料廃材の劣化履歴と、そこから得られるパーティクルボードの物性との関係については、ほとんど検討された例がなく、必ずしも明らかではない。今後は、エネルギー利用などとの競合により、履歴が不明確で低質な廃材の利用がさらに増えていくことが予想され、この点についての知見を得ておくことは実用上重要であると考えられる。

(社)日本木材学会木質パネル研究会では、2004年度より「木質パネル第2次耐久性プロジェクト」の一環で、国内8カ所において種々の市販木質パネルの屋外暴露試験⁷⁾を行っており、途中経過が随時報告されてきた⁸⁻¹⁰⁾。この度、このプロジェクトにて日本各所で最大5年間屋外暴露され、物性評価を行った後の合板を入手し、これを原料としてパーティクルボードを作製・評価する機会を得た。原料廃材の劣化履歴がパーティクルボードの物性に及ぼす影響の一知見として、また、廃材利用とボード物性の実用上の問題点を確認する一助として、これを報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材料

「木質パネル第2次耐久性プロジェクト」⁷⁾にて屋外暴露を行っている8カ所から、実験に必要な量の廃材を入手できた北海道旭川市、秋田県能代市、茨城県つくば市、岡山県真庭市、宮崎県都城市の5カ所を選び、そこに1, 3, 5年の屋外暴露を経た5層および3層の市販カラマツ構造用合板をパーティクル原料に用いることとした。各地点の気象条件をTable 1に示す。表の値は、屋外暴露を開始時点(2004年)から5年間の平均値である。

事前の物性試験の結果から、これらの合板の曲げヤング係数(MOE)を見ると、つくばで1年間暴露された3層合板以外の全ての合板で暴露前に比べ有意(真庭の1年目が有意水準5%, その他は有意水準1%)な低下が見られた。このときの低下はMOEで最大約60%に達する¹¹⁾。これらの合板について暴露年数と重量減少率の関係から最小二乗法にて回帰直線をプロットした(Fig. 1)。このときの回

Table 1. Climatic condition of the outdoor-exposure test locations.

	Annual mean air temp. (°C)	Annual precipitation (mm)	Annual hour of sunlight (h)
Asahikawa	7.2	946	1598
Noshiro	11.5	1470	1444
Tsukuba	14.3	1396	1981
Maniwa	14.1	1385	1538
Miyakonojyo	17.0	2566	1989

Note: Source from the climatic data of the Japan Meteorological Agency. Annual values were averaged values of 2004 to 2009.

Fig. 1. Relationship between outdoor exposure year and weight loss of plywood.

帰直線の傾きから重量減少率/暴露年数(重量減少速度)を求め、その各地点毎の有意差を t 検定にて求めたものがTable 2である。この結果および暴露地点の気象条件を加味し、1年目の重量減少が大きく気象条件が突出して過酷な都城は単独で用いることとし、5・3層の合板ともに重量減少速度に有意

Table 2. Results of statistical tests of the significant difference between each site in weight-loss/year ratio by the t -test.

plywood, 5ply	Nosi.	Tsuku.	Mani.	Miya.
Asa.	*	*	—	—
Nosi.		—	*	*
Tsuku.			*	*
Mani.				—
plywood, 3ply	Nosi.	Tsuku.	Mani.	Miya.
Asa.	—	—	—	*
Nosi.		—	—	*
Tsuku.			*	*
Mani.				—

Note: Asa.; Asahikawa, Nosi.; Noshiro, Tsuku.; Tsukuba, Mani.; Maniwa, Miya.; Miyakonojyo, *: significance at 5% level.

差がない旭川と真庭、能代と筑波を混合して用いることとした。従って、暴露年数（3条件）と劣化条件（3条件）で選り分けた合計9条件について以下の実験を行った。比較対照として、これらとは別に、暴露前の初期物性測定に用いた後、屋内環境にて保管されていた同様の合板を原料に用いた条件についても実験を行った。

2.2 パーティクルの調製

原料合板はあらかじめ約50 mm 角に切り分けた。これを水中に24時間浸せきして吸水させた後、刃出し0.5 mm のリングフレーカー（Pallmann 社製・PZ-8）にてパーティクル化した。切削後のパーティクルは、60℃の恒温機にて乾燥させ、含水率を定量した後に密封してボード作製に備えた。

2.3 ボードの作製

各条件毎に350 mm 角・厚さ13 mm のボードを目標全乾密度 0.635 g/cm^3 および 0.665 g/cm^3 で2枚作製した。パーティクルの含水率が11.8%となるように、あらかじめ不足分の水を噴霧塗布した後、接着剤を噴霧塗布した。接着剤には市販のポリメリックMDI（水中自己乳化型、以下MDI）を用い、添加量はボード全乾重量の10%とした。手撒きフォーミングにてマットを形成し、160℃のホットプレスにて、初期圧力3 MPa・6分間の条件で圧縮した。プレス後のボードは、両面から均一に吸湿するようにホルダーに立てた状態で室内に72時間放置後、両面をベルトサンダーにて研磨し、厚さ約12 mm のボードとした。作製したボードは20℃・65% RH 下で4週間養生した。

2.4 表面色の測定と性能試験方法

養生後のボードの表面色を、分光色彩計（Gardner 社製・color-guide 45°/0°）を用い、明度（ L^* ）および色相・彩度を示す a^* 、 b^* の値を測定した。測定は、各ボード表面から9カ所を無作為に選んで行い、それらを平均した値をそのボードの色値とした。

色測定後、ボード1枚あたりから、JIS-5908に準じた曲げ（4体）、はく離（6体）、24時間吸水厚さ膨張率（6体）の試験片を切り出した。試験片は20℃・65% RH 下で恒量になるまで養生した後、各試験に供した。これらの測定値については、コントロールと各条件および各条件間において、「各条件間に有意な差はない」という仮説の下で分散分析を行い、有意差の有無を確認した。

3. 結果と考察

3.1 曲げ性能

作製したパーティクルボードの気乾密度と曲げ性

能の関係を Fig. 2 に示す。図から、再生ボードの曲げ性能は、測定範囲において密度と比較的良好な相関を持つが、一方で暴露条件による分布の差は明確でない。Fig. 2 で密度に対する MOE と曲げ強さ（MOR）の分布はよく似た傾向を示すことから、MOE と MOR の関係にプロットし直したものが Fig. 3 である。図の直線は、コントロールの測定値について、最小二乗法にて得た回帰直線である。図から MOE と MOR は高い相関を示す。このとき、旭川・真庭の1年目で MOE に対し MOR がやや低い値を取る傾向が見られるものの、コントロールの MOE が4.5 GPa 付近の値ではほぼ同じ値が観察されており、条件による差を図のみによって明確に判断できなかった。そこで、曲げ性能について、コントロールと各条件間で分散分析を行った。結果を Table 3 に示す。都城で5年の暴露を経た合板は、曲げ性能が暴露前の60%程度まで低下していた¹¹⁾

Fig. 2. Relationship between air-dried densities and bending properties of particleboards.

Note: C; no exposure, M; Miyakononojo, NT; Noshiro and Tsukuba mixture, AM; Asahikawa and Maniwa mixture, each followed number indicating exposure year.

Fig. 3. Relationship between modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) in bending.

Note: Caption see Fig. 2.

Table 3. Results of statistical tests of the significant difference between condition without damage and each exposure condition in bending properties by the analysis of variance.

a) <MOR>				<MOE>			
Exposure year	Miya.	Nosi./Tsuki.	Asa./Mani.	Miya.	Nosi./Tsuki.	Asa./Mani.	
1	—	—	—	—	—	—	
3	—	—	*	—	—	**	
5	—	—	—	—	—	—	
b) <MOR/Dens.>				<MOE/Dens.>			
Exposure year	Miya.	Nosi./Tsuki.	Asa./Mani.	Miya.	Nosi./Tsuki.	Asa./Mani.	
1	—	—	*	—	—	—	
3	*	—	*	**	—	**	
5	—	*	—	—	*	*	

Note: Miya.; Miyakonojyo, Nosi./Tsuki.; Noshiro and Tsukuba mixture, Asa./Mani.; Asahikawa and Maniwa mixture, **; significance at 1% level, *; significance at 5% level.

が、それを原料として作られたPBの曲げ性能は、未暴露の合板を原料にして作製したもののそれとの間に有意な差は見られなかった。検討した条件では、旭川・真庭の3年目のみコントロールに対して有意差が検出されたが、この原因としては、この条件で作製した2枚のボードの密度が他の条件に比べ近接していたために、比較的大きな密度変動を与えた他のパネルに比べ統計処理上で差が大きく検出されたことが考えられる。このときの曲げ性能が、同じ暴露地の1年目と5年目、他の2つの暴露地の3年目の結果との間で有意な差が見られなかったこともこれを裏付けている。

Fig. 2 でみられたように、曲げ性能値は密度の影響を受けため、密度の影響を排除するために比曲げ性能で比較したものが Fig. 4, Table 3 の b) である。Fig. 3 で比曲げ性能、特に比ヤング率の平均値はコントロールに比べやや低くなる傾向が見られる。また、暴露1年目ではコントロールと有意差が見られないことや比較暴露条件が緩やかな能代・つくば

では5年目になって初めて有意差が検出されるようになるなど、暴露条件が曲げ性能に影響を及ぼす可能性が示唆されるが、一方で、屋外暴露後に原料（合板）状態で平均9%の重量減少が見られる都城・5年目の合板を用いて作製したボードでは有意な差が見られない。また、有意差は検出されたものの、比曲げ性能低下は平均値で最大でも10%以下と小さいことから、本実験で検討した屋外暴露処理条件と同程度の劣化を受けた材料を原料に用いても、ばらつきを考慮すればパーティクルボードの曲げ性能に実用上はほとんど影響がないことが明らかになった。これは、屋外暴露による材質劣化が表面のごく限られた範囲に止まっており、パーティクル化の過程で表面劣化の影響がほとんどなくなるためと考えられる。

3.2 はく離強さ

暴露年数とはく離性能の関係を Fig. 5 に示す。また、分散分析の結果を Table 4 に示す。比はく離強さを見ると、都城の1年目、旭川・真庭の2年目で低くなる傾向が見られるが、一方で、これらの条件のいずれも、5年目の値ではコントロールと有意な差は見られなくなること、Fig. 5 の比はく離性能で

Fig. 4. Relationships between outdoor exposure year and MOE/density or MOR/density.

Note: Control; no exposure, Miya.; Miyakonojyo, Nosi./Tsuku.; Noshiro and Tsukuba mixture, Asa./Mani.; Asahikawa and Maniwa mixture.

Fig. 5. Effect of outdoor exposure year on internal bond strength.

Note: Caption see Fig. 2 and Fig. 4.

Table 4. Results of statistical tests of the significant difference between condition without damage and each exposure condition in internal-bond strength by the analysis of variance.

〈IB〉				〈IB/Dens.〉			
Exposure year	Miya.	Nosi./Tsuku.	Asa./Mani.	Exposure year	Miya.	Nosi./Tsuku.	Asa./Mani.
1	**	—	*	1	**	—	*
3	—	—	**	3	—	—	**
5	—	—	—	5	—	—	—

〈IB〉				〈IB/Dens.〉			
Exposure year	Miya. vs Nosi./Tsuku.	Miya. vs Asa./Mani.	Nosi./Tsuku. vs Asa./Mani.	Exposure year	Miya. vs Nosi./Tsuku.	Miya. vs Asa./Mani.	Nosi./Tsuku. vs Asa./Mani.
1	*	—	—	1年目	*	—	—
3	—	*	*	3年目	—	—	*
5	—	—	—	5年目	—	—	—

〈IB〉				〈IB/Dens.〉			
Exposure city	1year vs 3year	1year vs 5year	3year vs 5year	Exposure city	1year vs 3year	1year vs 5year	3year vs 5year
Miya.	—	—	—	Miya.	—	—	—
Nosi./Tsuku.	—	—	—	Nosi./Tsuku.	—	—	—
Asa./Mani.	—	—	*	Asa./Mani.	—	—	*

Notes: Miya.; Miyakonojyo, Nosi./Tsuku.; Nshiro and Tsukuba mixture, Asa./Mani.; Asahikawa and Maniwa mixture., **: significance at 1% level, *: significance at 5% level.

最も低下が著しい都城の1年目の結果は3・5年目との間に有意な差は見られないこと、はく離性能の変動係数が大きいことなどから、はく離性能は原料の屋外暴露によって大きな影響は受けないと考えられる。また、本実験のボードには、原料の合板の接着層が存在するため、これがはく離性能に影響する可能性があるが、合板状態ではく離試験では多くの試験体で残存率70%以上¹⁰⁾と高い値を示すこと、合板時のはく離強度残存率が33%¹²⁾と極端に低い値を示すつくばの5年目を含む能代・つくばの5年目ボードで有意な性能低下が見られないことから、耐久性の高い接着剤が使われる構造用合板を原料とする限り、本実験の屋外暴露程度の劣化条件ではこの影響はほとんどないと考えられた。

3.3 吸水寸法変化

24時間の水中浸せきによる吸水率と吸水厚さ膨張率の関係をFig. 6に、暴露年数と厚さ変化・吸水率の関係をFig. 7に示した。Fig. 6の回帰直線はコントロールの測定値を用い、原点を通る直線となるように算出したものであるが、図のように他のプロットも概ねこの回帰線の周りに分布しており、吸水率と吸水厚さの関係には暴露期間による顕著な差は見られなかった。一方で、Fig. 7を見ると、暴露期間が長くなるに従って、また、暴露条件が厳しくなるに従って、吸水率が低下していき、これに伴って厚さ膨張率も低下する傾向が見られる。これは、長期

Fig. 6. Relationships between water absorption and thickness swelling after water immersion for 24 hours.

Note: Caption see Fig. 2.

の屋外暴露により親水性の成分が低分子化、流出していくことによるものと考えられる。このことは、屋外暴露のような条件下に晒された合板等を原料としても、パーティクルボードの厚さ方向の寸法安定性に影響しないか、あるいは逆に性能が改善する可能性があることを示唆している。

3.4 ボードの表面色

供試した合板の表面色は、屋外暴露によって灰色化する¹⁰⁾など、大きな色変化が見られる。また、

Fig. 7. Effect of outdoor exposure year on water absorption and thickness swelling after water immersion for 24 hours.

Note: Caption see Fig. 4.

今回用いた各条件の合板をパーティクル化した状態でも、各条件間でパーティクルの色調に差があることが観察されたため、これらが成形後のボードの表面色に及ぼす影響を測定した。各条件のボードの表面色を、色差計を用いて $L^* \cdot a^* \cdot b^*$ 法にて測定した結果を Fig. 8 に示す。図から、暴露年数が長くなるにつれて、明度を示す L^* 値は低下する傾向が見られるが、一方で色相・彩度を表す a^* , b^* 値はほとんど変化しないことがわかる。この傾向は、暴露条件が比較的緩いと思われる能代・つくばで初期の明度の低下がやや遅れるものの、場所による大きな差は見られない。目視による観察でも、特に5年の屋外暴露を経た原料を用いたボードでは、その表面色が暗色化していることが観察された。このことは、再生パーティクルボードを化粧張りの下地に用いるような用途では問題になる可能性があると考えられた。

Fig. 8. Change of surface color of recycled board in this study by the time-dependent change of raw material.

4. ま と め

最大5年間の屋外暴露試験を経た構造用合板を原料に、実験室にて再生パーティクルボード (R-PB) を製造し、その物性を未暴露の合板から得たコントロールボードのそれと比較することで、原料となる合板の屋外暴露条件がR-PBの物性に及ぼす影響を検討した。結果を以下に示す。

1. 原料の屋外暴露期間が長くなると、R-PBの表面色調が暗色化する。
2. R-PBの曲げ性能低下は、最大でも未暴露のものを原料とした場合の10%以下である。
3. 構造用合板を原料にする場合には、原料の屋外暴露条件は、R-PBのはく離性能にはあまり影響しない。
4. R-PBの吸水率と厚さ膨張率の関係は、未暴露を原料とするものとはほぼ同様となる。このとき、原料の屋外暴露条件が厳しくなると、R-PBの吸水性は低下する傾向が見られた。

以上の結果から、5年間の屋外暴露によって、原料となる構造用合板の状態では最大で重量減少約9%、曲げ性能で約60%の低下が見られたが、これと同程度の劣化条件で、構造用合板をパーティクルボード原料として再生する場合、得られるパーティクルボードは劣化処理を受けていない合板を原料にしたものに比べ再生後の材料の表面色がやや暗色化する可能性はあるものの、その物性に大きな低下はないと考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、(社)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」参加の各位から、試料提供や実験に関する助言等について多大なる協力をいただいた。ここに深甚の謝意を表す。また、本研究の一部は、科学研究費補助金(課題番号21380108)により行った。

文 献

- 1) 藤元嘉安, 金出美砂, 又木義博: 第49回日本木材学会大会研究発表要旨集, 東京, 1999, p. 277.
- 2) 渋沢達也, 辻田一寛, 秦野恭典: 木材工業 60 (9), 445-450 (2005).
- 3) 鈴木滋彦, 成島雅人: 第57回日本木材学会大会研究発表要旨集, 広島, 2007, p. 124.
- 4) 鈴木滋彦, 森伊珠美, 小島陽一: 第59回日本木材学会大会研究発表要旨集, 松本, 2009, p. 131.
- 5) Oemirker, C., Çolakoğlu, G.: *Holz als Roh-*

- und Werkstoff* 65(6), 483-484 (2007).
- 6) 浅利美鈴, 高月 紘, 酒井伸一: 廃棄物学会論文誌 15(2), 139-148 (2004).
 - 7) 高麗秀昭, 関野 登: 木材工業 60(5), 229-232 (2005).
 - 8) 小島陽一, 西田忠弘, 鈴木滋彦: 第58回日本木材学会大会研究発表要旨集, 宮崎, 2008, p. 44.
 - 9) 下田智也, 小島陽一, 鈴木滋彦: 第60回日本木材学会大会研究発表要旨集, 宮崎, 2010, p. 135.
 - 10) 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中間報告書(その6), 第18回木質ボード部会シンポジウム「激動する今を生き抜く! 木質ボード」要旨集, 129-133 (2009).
 - 11) 藤元嘉安, 森田秀樹, 松本明弘: 木質パネル第2次耐久性プロジェクト中間報告書(その6), 第18回木質ボード部会シンポジウム「激動する今を生き抜く! 木質ボード」要旨集, 129-133 (2009).
 - 12) 高麗秀昭, 凌 楠: 木質パネル第2次耐久性プロジェクト中間報告書(その6), 第18回木質ボード部会シンポジウム「激動する今を生き抜く! 木質ボード」要旨集, 114-118 (2009).