木粉・プラスチック複合材(混練型 WPC)の耐久性 (1) 耐水性に及ぼす木粉含有率の影響*1

木口 実*2, 片岡 厚*2, 松永 浩史*2,
桃原 郁夫*2, 川元スミレ*2, 大友 祐晋*3

Durability of Woodflour-Plastic Composites (1)
Influence of woodflour content on water resistance

Makoto KIGUCHI*2, Yutaka KATAOKA*2, Hiroshi MATSUNAGA*2,
Ikuo MOMOHARA*2, Sumire KAWAMOTO*2, Yushin OHTOMO*3

Wood-Plastic Composites (WPC) with the woodflour contents from 26.5% to 55.8% were prepared using an industrial scale extruder, and their water resistances were evaluated. The moisture infiltration rate of the WPC was lower compared with solid wood. It required six to 20 months for WPC specimens to reach a constant mass soaking in water. Changes of mass and dimension in WPC were increased with increasing woodflour content, and the water-resistance rose remarkably at specimens having woodflour content less than 30%. The increase in mass continued even after one year test period under high humidity condition (90%RH). In a boiling test, only 16 hours were needed to reach the same mass increase as that of six-month water soaking test. The anisotropic dimensional change was seen at the swelling of WPC by tests of water soaking, high humidity condition and boiling.

Although the initial water resistance of WPC is very high, moisture infiltrates gradually during long-term exposure, and it may be possible for the moisture content to reach a level where decay could occur near the surface at the WPC.

Keywords : WPC, wood-flour content, water resistance, dimensional change, anisotropic swelling

木粉含有率26.5%から55.8%の木粉とポリプロピレンとの複合材(WPC)を, 実大装置を用いて押出成形により調製し, 耐水性を評価した。水中浸漬試験では, 水分浸透速度は木材素材と比較して非常に遅く, 恒量に達するまでに6ヶ月から20ヶ月を要した。質量および寸

*1 本研究の一部は, 第58回日本木材学会大会(つくば)2008.03において発表した。

*2 独立行政法人森林総合研究所

*3 エア・ウォーター株式会社

Corresponding author : M. Kiguchi (mkiguchi@ffpri.affrc.go.jp)

法変化は木粉含有率と共に大きくなる傾向が認められ、木粉含有率30%以下において耐水性能が著しく高くなった。高湿度下では、試験1年後でも質量の増加が見られた。煮沸試験では、16時間で水中浸漬試験6ヶ月程度の質量増加が得られた。また、WPCの水中浸漬、高湿度下、煮沸の各試験において寸法変化に異方性が見られた。

WPCは初期耐水性は高いが、長期間の湿潤状態においては水分が徐々に浸透し、表層部の木質部分は腐朽可能な含水率に達する可能性がある。

キーワード：混練型 WPC，木粉含有率，耐水性，寸法変化，膨潤異方性

1. はじめに

木粉と熱可塑性プラスチックを加熱下で混練し複合させた「木粉・プラスチック複合材（混練型 WPC；以下 WPC と略す）」は、廃棄物として出される木粉やプラスチックを原料にできることから環境調和型資材として注目されている^{1,2)}。WPCは、疎水性の高いオレフィン系プラスチックを使用しているため高い耐久性、耐水性、耐候性を持つと言われ^{2,3)}、屋外用デッキ材を中心に我が国でも急速に使用量が增大している^{4,5)}。しかし、屋外での使用においてチョーキングや変色の発生、腐朽による強度低下も懸念されはじめおり⁶⁾、一足早く実用化された北米では使用環境下において腐朽や大きな寸法変化が生じる事例が報告されている^{7,8)}。このため、新規な木質系エクステリア資材である WPC の耐水性や耐久性に関するデータの蓄積が必要である。

本研究では、屋外での使用環境下における WPC の耐水性を評価するために、木粉とポリプロピレン (PP) との含有割合を変えた数種の複合材を実大製造ラインを用いて押出成型により製造し、湿潤条件下での耐水性の評価を行った。

2. 実験方法

2.1 WPC の調製

混練型 WPC は、建築廃材より得られた針葉樹木粉 (60メッシュパス) とポリプロピレン (PP；食品容器工場からの製品廃材、メルトインデックス (MI) 2)，繊維強化材料、添加剤（マレイン酸変性 PP，顔料，滑剤等）を180～200℃で混練し、これをエア・ウォーター(株)の実大押出装置を用いて試験用デッキ材を調製した。木粉，PP，強化剤，添加剤の配合割合を表1に示す。木粉の含有率は、質量割合で26.5% (W27)，41.9% (W42)，47.4% (W47)，55.8% (W56) の4種類とした。

押出成型したデッキ材は、1,000（長さ）×145（幅）×30（厚さ）mm の中空形状であり、表層部のスキン層（プラスチックリッチな平滑層）をサンドペーパー（番手24番）を用いて研削した。デッキ材上部から20×20×6～7（厚さ）mm の試験片を調製した。この時、表層は研削面であるが、裏面は研削しないでそのままとした。試験片の絶乾密度は、1.15～1.23g/cm³であった。

2.2 耐水性試験

上記の20×20×6～7 mm（厚さ）の試験片を、
①20℃90%RH 調湿試験（2006年6月開始，最長

表1 試験に用いた WPC の試験片と木粉含有率

Table 1 Wood flour contents of WPC test samples used in this study

記号 symbol	木粉 wood flour (%)	PP polypropylene (%)	強化剤 reinforcement (%)	添加剤 additives (%)
W27	26.5	45.1	20.0	8.6
W42	41.9	35.6	15.7	6.8
W47	47.4	32.3	14.2	6.2
W56	55.8	27.1	12.0	5.2

1099日間), ②室温水中浸漬試験 (空調のある研究室, 最長1098日間), ③煮沸試験 (脱イオン水中2時間ずつ計16時間まで) を行い, 試験片の質量及び寸法変化 (押出方向, 幅方向, 厚さ方向) を経時的に測定した。寸法変化は, デジタルノギス (0.01mm) を用い, 絶乾時の寸法を基準とした膨潤率あるいは収縮率を計算した。また, 質量変化も同様に絶乾時の質量を基準として質量増加率及び質量減少率を計算し, 特に吸水, 吸湿による質量増加率は吸水率あるいは吸湿率とした。各試験は, 試験片5片の平均値とした。

また, 蛍光染料フルオレセインの0.1%水溶液を用いて, 木粉含有率55.8% (W56) のWPC試験片を2ヶ月間室温水中浸漬した後, 蛍光顕微鏡 (OLYMPUS 製 BX-RFA) により, 励起フィルター BP460-495nm, 吸収フィルター510IF の条件で観察し, WPC 中への水の浸透の可視化を試みた。この時の試験片の平均吸水率は11.8%であった。

3. 結果と考察

3.1 水中浸漬試験

図1から図4に, 室温下で最長1099日まで水中浸漬した時の質量変化率 (図1), 押出方向寸法変化率 (図2), 幅方向寸法変化率 (図3), 厚さ方向寸法変化率 (図4) を示す。図1をみると, W56, W47, W42においてほぼ恒量に達した169日後での質量増加率 (吸水率) はそれぞれ19.3%, 19.4%, 19.0%となり, 木材素材に比べて吸水による含水率の増加は低いといえる。木粉含有率40%以上の試験片では, 試験200日までに含水率は約20%とほぼ一定の値となった。一方, 木粉含有率26.5%のW27では600日付近まで吸水率の増加が見られたが, 583日後における質量増加率は8.7%と低く, 高い耐水性を示した。これは, 疎水性のポリプロピレンが木粉を包埋して複合材中への水の浸透を防いだことと, WPCの密度が $1.15 \sim 1.23 \text{g/cm}^3$ と高いために内部の空隙がほとんど無いたためと考えられる^{3,9)}。

図2から図4の寸法変化率を見ると, 押出, 幅, 厚さの3方向共に木粉含有率に比例して増加する傾向を示した。幅方向及び厚さ方向では, 質量増加率とほぼ同様の増加傾向が見られ, 押出方向で

図1 室温下水中浸漬試験によるWPCの質量変化率
記号) ◆: W56 (木粉含有率55.8%)

●: W47 (木粉含有率47.4%)

▲: W42 (木粉含有率41.9%)

■: W27 (木粉含有率26.5%)

Fig. 1 Mass change of WPC by water soaking test at room temperature

Symbol) ◆: W56 (Wood content 55.8%)

●: W47 (Wood content 47.4%)

▲: W42 (Wood content 41.9%)

■: W27 (Wood content 26.5%)

図2 室温下水中浸漬試験によるWPCの押出方向寸法変化率

記号) 図1に同じ

Fig. 2 Dimensional change in extrusion direction of WPC by water soaking test at room temperature

Symbol) The same as Fig. 1

は全ての試験片で1099日後でも増加傾向を示した。3方向の寸法変化率を比較すると, 通常の外用デッキで使用される木粉含有率に近いと考えられるW47では, 1099日後の押出方向, 幅方向,

図3 室温下水中浸漬試験によるWPCの幅方向寸法変化率

記号) 図1に同じ

Fig. 3 Dimensional change in width direction of WPC by water soaking test at room temperature

Symbol) The same as Fig. 1

厚さ方向の寸法変化率は、それぞれ1.1%, 5.0%, 11.6%となり、これは木材の3方向の寸法変化とほぼ同様という興味深い結果となった。この傾向は、他の木粉含有率を持つWPCでも同様の傾向を示した。押出成型によるWPCは、複合材中の木材繊維及び繊維強化剤が押出方向に配向するために異方性が発現すると考えられ、押出方向は木材の繊維方向となるため寸法変化が少ないと考えられる。しかし、幅方向及び厚さ方向は共に繊維

図4 室温下水中浸漬試験によるWPCの厚さ方向寸法変化率

記号) 図1に同じ

Fig. 4 Dimensional change in thickness direction of WPC by water soaking test at room temperature

Symbol) The same as Fig. 1

と直交方向の配列である。厚さ方向が幅方向の2倍も膨潤する理由としては、WPCへの水分の浸透が表層のみであり、幅方向と厚さ方向の膨潤部分がほぼ同じであるため、幅方向に比べて長さが短い厚さ方向が膨潤率として表すと相対的に大きくなるが考えられる。

3.2 煮沸試験

煮沸試験による質量変化率(吸水率)(図5)及び寸法変化の一例として幅方向の寸法変化率(図

図5 煮沸試験によるWPCの質量変化
記号) 図1に同じ

Fig. 5 Mass change of WPC by boiling test

Symbol) The same as Fig. 1

図6 煮沸試験によるWPCの幅方向寸法変化
記号) 図1に同じ

Fig. 6 Dimensional change in width of WPC by boiling test

Symbol) The same as Fig. 1

6)を示す。図5の質量変化では、試験8時間までは水中浸漬試験と同様にW27を除いて木粉含有率にかかわらず急激に増大したが、煮沸試験計16時間後では吸水による質量増加率は木粉含有率に比例して増加した。図6の幅方向寸法変化では、水中浸漬試験と同様に木粉含有率に比例して増大する傾向を示した。W47における煮沸時間16時間後の結果は、質量増加率では16.4%、押出方向寸法変化率1.1%、幅方向4.2%、厚さ方向11.0%となり、これは水中浸漬試験の1099日後の値に相当した。また、煮沸試験では試験16時間でもまだ数値が増加する傾向を示した。

以上の結果から、煮沸試験において水中浸漬試験とほぼ同様の吸水傾向が短時間で得られることから、耐水性評価のための促進試験として有効な方法と考えられる。今回の場合、質量増加率（吸水率）は煮沸試験16時間で水中浸漬試験により得られた恒量値とほぼ同程度の値が得られた。

3.3 高湿度環境調湿試験

高湿度環境での吸湿性を評価するために、室温20℃、相対湿度90%の恒温恒湿室に1098日間まで調湿した。図7に質量増加率（吸湿率）を示すが、吸湿率は木粉含有率に比例して大きくなる傾向を示し、W27を除いて試験600日付近ではほぼ一定の値となった。しかし、W27は1098日後でもまだ増加傾向が認められ、時間と共に徐々に吸湿していく特

図7 高湿度下調湿試験（20℃90%RH）による WPC の質量変化
記号）図1に同じ

Fig. 7 Mass change of WPC by high humidity conditioning test at 20°C 90% RH

Symbol) The same as Fig. 1

徴が見られた。図8に幅方向の寸法変化率（膨潤率）を示す。寸法変化も木粉含有率に比例して増大し、試験600日付近ではほぼ一定の値となった。W27は700日を越えた段階ではほぼ一定となった。W47における582日後の各方向の寸法変化を見ると、押出方向0.47%、幅方向2.57%、厚さ方向4.04%となり、高湿度環境においても膨潤率の比は、約1：5：10であった。

3.4 蛍光染料による水分浸透状態の可視化

蛍光染料であるフルオレセイン水溶液を用いることによって、水分が浸透した箇所が蛍光により黄緑色に発光することを利用して、WPC中への水分の浸透状況を観察した。図9に、蛍光染料水溶液中に浸漬させたW56試験片（吸水率11.8%）のスキン層及び研削層における水分の浸透状況を示す。研削面もスキン層面もどちらも水分は表層から0.1mm程度の深さまでの木粉部分にしか浸透していないことがわかる。図10にコーナー部から断面部の写真を示す。断面付近では、水が表面部分より内部に浸透しているが、それでも0.5mm程度であった。一方、コーナー部分には比較的水が浸透しやすいことが観察された。

W56の木粉含有率が55.8%と比較的高い試験片においても水分は表面部分にしか浸透しないという結果は、耐水性試験でみられたように、WPCは短期間の水分の接触では水は複合材中にほとん

図8 高湿度下調湿試験（20℃90%RH）による WPC の幅方向寸法変化率
記号）図2に同じ

Fig. 8 Dimensional change in width of WPC by high humidity conditioning test at 20°C 90% RH

Symbol) The same as Fig. 1

図9 蛍光染料水溶液浸漬後のスキン層（左）及び研削層（右）断面写真

Fig. 9 Photos of skin layer (left) and sanded layer (right) sections after soaking test by fluorescence dyestuff solution

図10 蛍光染料水溶液浸漬後のコーナー部から断面部の写真

Fig.10 Photo of corner and vertical section after soaking test by fluorescence dyestuff solution

ど浸透しないという結果を説明できる⁹⁾。これは、encapsulationと呼ばれる疎水性のプラスチックが木粉を包埋するカプセル化、及び複合材自体の密度が1.1~1.2程度と高く試験片中の空隙がほとんど無いためと考えられる³⁾。しかし、2.5年間程度の長期間の水中浸漬試験あるいは湿潤試験において水分が複合材内部に徐々に浸透することが明らかとなり、WPCの耐水性を評価するには長期の試験あるいは、温水浸漬等の促進試験が必要といえる¹⁰⁾。このことは、耐朽性試験にも言えることであろう。

謝辞

本研究は、農林水産省受託研究「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発 IV バイオマス

のマテリアル利用技術の開発」及び科研費基盤B (No.17380109) により行った。

文献

- 1) Eder, A. : Worldwide Market Report on "Wood-Plastic Composites" Advance Revised Edition 2006, Competence Center for Wood Composites and Wood Chemistry (Wood K plus) (2006).
- 2) 岡本忠：木材とプラスチックとの複合体開発の現状－木質材料の押出成形－, 木材学会誌, **49**, 401-407 (2003).
- 3) Caulfield, D.F., Clemons, C., Jacobson, R. E., Rowell, R.M : 13 Wood Thermoplastic Composites, "Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites" edited by Rowell, R.M., Taylor & Francis, 2004, pp 365-378.
- 4) 木口実：木材・プラスチック複合材 (WPC) の現状と問題点, 接着の技術, **27** (1), 49-55 (2007).
- 5) 金井徹：エクステリア市場の現状と木製エクステリア, 木材保存, **35**, 96-101 (2009).
- 6) Kiguchi, M., Kataoka, Y., Matsunaga, H., Yamamoto, K., Evans P.D. : Surface Deterioration of Wood-Flour Polypropylene Composites by Weathering Trials, *Journal of Wood Science*, **53**, 234-238 (2007).
- 7) Morris, P.I., Cooper, P. : Recycled Plastic/Wood Composite Lumber Attacked by Fungi, *Forest Products Journal*, **48** (1), 86-88 (1998).
- 8) Mankowski, M., Morrell, J.J. : Patterns of Fungal Attack in Wood-Plastic Composites Following Exposure in A Soil Block Test, *Wood and Fiber Science*, **32**, 340-345 (2000).
- 9) Weihong, W., Morrell, J.J. : Moisture Relations in Wood Plastic Composites and Effects of

- Moisture Cycling on WPC Properties, In : Proceeding, 7th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium, 233-237 (2004).
- 10) Defoirdt, N., Gardin, S., den Bulcke, J. V., Acker, J. V. : Moisture dynamics of WPC and the impact on fungal testing, *International Biodeterioration & Biodegradation*, **64**, 65-72 (2010).
(2009.11.24受付)
(2010. 1.12受理)