

## 論文 (Original article)

# 木材 - プラスチック複合材 (混練型 WPC) の耐候性に及ぼす木粉含有率と表層研削の影響

小林 正彦<sup>1)</sup> \*、片岡 厚<sup>1)</sup>、石川 敦子<sup>1)</sup>、松永 正弘<sup>1)</sup>、神林 徹<sup>1)</sup>、木口 実<sup>2)</sup>

### 要旨

木材 - プラスチック複合材 (混練型 WPC) (以下、WPC と略す) は、耐水性や耐朽性が比較的高いことから主にデッキ材等のエクステリア材料として利用されているが、長期間屋外で使用する間の変色や、デッキ材表面に粉がふくチョーキング現象の発生といった耐候性に関する問題への対策が求められている。そこで、WPC の屋外利用における変色とチョーキングの発生に及ぼす表面処理や WPC 中の木粉の質量割合 (木粉含有率) の影響を検討することを目的として、木粉含有率の異なる試験体を製造し、木質感を得るために表層を研削処理したものとそうでないもののそれぞれについて、6 か月間の屋外暴露試験を行った。その結果、変色に関しては、表層未研削の WPC における色差 (変色の大きさ) の値が研削した場合と比較して大きいこと、その変色傾向が、木粉含有率 30% を境にして大きく異なることが明らかになった。また、チョーキングに関しては、表層研削の WPC における発生度合が、未研削の WPC と比較して高いこと、また木粉含有率を高くするに従い、チョーキング発生度合が高くなることが明らかになった。以上の結果から、屋外で使用された WPC 表層の劣化挙動とそれに及ぼす木粉含有率、および表面処理の影響を考察するとともに、表層劣化のモデルを提案した。

キーワード：木材・プラスチック複合材 (WPC)、屋外暴露試験、光劣化、変色、チョーキング

### 1. 緒言

木粉と熱可塑性のプラスチックを原料として製造される木材 - プラスチック複合材 (混練型 WPC) (以下、WPC と略す) は、加熱により自由な成形加工が可能な材料である。また、木質廃棄物や未利用木材、プラスチック廃棄物を原料にできること、使用後には再成形してリサイクルできることから、環境適合材料として位置づけられている (Caulfield ら 2003, 岡本 2003, 高谷ら 2008)。WPC の原料のプラスチックには疎水性の高いオレフィン系プラスチックが用いられている場合が多く、そのため、高い耐水性、耐朽性を持つことが知られており (木口ら 2010a, 2010b)、わが国でも屋外デッキ材を中心に急速に使用量が增大している。しかし、長期に屋外で使用する間に、変色や、デッキ材表面に粉がふくチョーキング現象の発生といった耐候性に関する問題が散見されており、これらの問題に対する対策が求められている。

これまで WPC の屋外使用時の変色 (Kiguchi ら 2007, 木口ら 2012, Stark ら 2003, Lee ら 2012) や、チョーキングの発生に影響を与える因子 (Ebe ら 2015, Kiguchi ら 2011) に関して様々な研究が行われてきている。これらの研究は、実際に現在施工されている WPC の耐候性に関する問題の把握とその解決法の開発を目的としていることから、市販品やそれに近い条件

で製造された WPC を用いており、WPC 中の木粉の質量割合 (木粉含有率) が 50% 前後で、木質感を得るために WPC の表層を研削し、さらに色調を調整するために顔料などを添加している場合が多い。変色に関しては、屋外暴露試験やウェザーメータによる促進耐候性試験において、WPC の色調が比較的短期間のうちに変化することが知られており、屋外暴露試験では約 3 から 9 か月後までに、促進耐候性試験では約 100 時間後までに、変色の大きさを示す色差の値が急激に増加し、表面の色調が元の褐色から白色に変化することが報告されている (大島ら 2011, Kiguchi ら 2007, Lee ら 2012)。一方、チョーキングの発生については、屋外暴露試験の 12 か月後まで増加し続け、それ以降はほぼ平衡に達することが報告されている (木口ら 2012, Ebe ら 2015)。また、著者らは市販品に近い WPC を用いて、変色やチョーキングの発生に及ぼす表面処理の影響について検討し、WPC の表層を研削してから使用した場合には、未研削の場合と比較して色差が小さくなるが、チョーキングの発生量が増加することを報告した (Kiguchi ら 2011)。

近年、WPC の変色やチョーキングの抑制を目的とする検討がなされており、顔料や相溶化剤、紫外線吸収剤、光安定化剤などを添加することで、ある程度の抑制効果は得られているが (Kiguchi ら 2007, 木口ら

原稿受付：平成 28 年 9 月 29 日 原稿受理：平成 28 年 12 月 5 日

1) 森林総合研究所木材改質研究領域

2) 森林総合研究所研究ディレクター

\* 森林総合研究所木材改質研究領域 〒 305-8687 茨城県つくば市松の里 1

2009, Stark ら 2004, Muasher ら 2006)、必ずしも十分な効果が得られていない。問題を解決するうえで、変色やチョーキングの発生度合いに及ぼす表面処理や、主原料である木粉とプラスチックの配合割合の影響等の基礎的な知見を得ることは重要である。このため本研究では、添加剤を使用せず、木粉とプラスチック（ポリプロピレン：PP）のみを原料として木粉含有率が異なる WPC 試験体を製造し、表層を研削したものと未研削のそれぞれについて屋外暴露試験を行い、WPC の耐候性や劣化挙動に及ぼす研削処理や木粉含有率の影響を検討した。なお、実験にあたっては、色差やチョーキングの変化量が比較的大きい屋外暴露試験の初期（～6か月）における変化に着目し、顕微鏡観察、表面粗さ測定、FTIR 分析により、詳細な検討を行った。さらに、表層劣化のメカニズムについて考察し、WPC 表層を研削した場合と未研削の場合のそれぞれについての劣化モデルを提案した。

## 2. 実験方法

### 2.1 WPC の製造

スギ (Japanese cedar: *Cryptomeria japonica* D. Don) 木粉 (粒径 150  $\mu$  m 以下) とポリプロピレン (PP: プライムポリプロ E-200GP: (株) プライムポリマー製) を 180℃ で混練し、二軸平行押し出成形機を用い、木粉の質量割合 (木粉含有率) が 20%、30%、40%、50%、60% の 5 種類の WPC を製造した。なお、それぞれの密度は 0.95g/cm<sup>3</sup> (20%)、0.96 g/cm<sup>3</sup> (30%)、0.98g/cm<sup>3</sup> (40%)、1.04g/cm<sup>3</sup> (50%)、1.07g/cm<sup>3</sup> (60%) であった。5 種類の WPC のそれぞれに対し、表層を研削した試験体と未研削の試験体 (幅 20mm × 長さ 70mm × 厚さ 4mm) の 2 種類、計 10 種類の試験体を用意し、それぞれ 2 体ずつ屋外暴露試験に供した。なお、表層の研削は電動サンダーに P400 の粗さのサンドペ

ーパーを装着して、試験体の長さ方向に、表層の厚み約 0.3mm がほぼ均等に削り取られるまで行った。未研削の試験体の幅方向の算術平均粗さが約 2～3 $\mu$ m であったのに対し、表層を研削した試験体の幅方向の算術平均粗さは約 6～7 $\mu$ m であった。

### 2.2 屋外暴露試験

茨城県つくば市内の森林総合研究所・第二樹木園内屋外暴露試験場 (北緯 36 度 02 分, 東経 140 度 05 分) にて、2015 年 7 月から 6 か月間実施した。試験体は、南向き傾斜 45 度の条件で設置した。なお、Table 1 につくば市 (館野 (AMeDAS; 地点コード 47646)) における試験期間の月別の気象情報 (日平均降水量、日平均気温、日平均全天日射量) を示す。

### 2.3 変色の評価

屋外暴露期間 1 か月、2 か月、3 か月、6 か月での WPC の表面の測色を行った。測色には色差計 (NF333; 日本電色工業株式会社) を用い、JIS K 5600-4-6 に準じて、 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  を測定し、各パラメータの変化量 ( $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ ) から下記の式に従い、色差 ( $\Delta E^*ab$ ) を算出した。

$$\Delta E^*ab = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

測色は、各種 WPC 2 体のそれぞれで 2 か所で行い、その平均値で変色を評価した。

### 2.4 顕微鏡観察

屋外暴露前、および暴露期間 1 か月、6 か月での WPC の表面状態を観察するため、デジタルマイクロスコープ (VH-7000C; 株式会社キーエンス) を用い、顕微鏡写真を撮影した。レンズは VH-Z25 ズームレンズ

Table 1. つくば市における暴露試験期間における月ごとの気象情報  
Monthly weather data during the test period of outdoor exposure at Tsukuba.

|                           | 日平均降水量(mm)<br>daily average rainfall | 日平均気温(°C)<br>daily average temperature | 日平均全天日射量(MJ/m <sup>2</sup> )<br>daily average global solar radiation |
|---------------------------|--------------------------------------|--|--|
| 2015年7月<br>July 2015      | 6.2                                  | 25.4                                   | 17.1   |
| 2015年8月<br>August 2015    | 3.2                                  | 25.6                                   | 15.0   |
| 2015年9月<br>September 2015 | 12.0                                 | 21.6                                   | 11.6   |
| 2015年10月<br>October 2015  | 1.4                                  | 16.7                                   | 12.5   |
| 2015年11月<br>November 2015 | 5.0                                  | 12.5                                   | 7.6  |
| 2015年12月<br>December 2015 | 1.3                                  | 7.2                                    | 8.3  |
| 2016年1月<br>January 2016   | 2.7                                  | 3.9                                    | 9.7  |

を使用し、100倍の画像を得た。

## 2.5 チョーキングの発生度合の評価

チョーキングの発生度合は、著者らの開発したクロッキング試験 (Kiguchi ら 2011) に準じて評価した。前報 (Kiguchi ら 2011) では、顔料を含む WPC を用いており、チョーキング物質にも顔料が含まれていたため、白色綿布を用いたが、今回用いた試験体は顔料を含んでおらず、チョーキング物質が白色であるため、試験には黒色綿布を用いた (小林ら 2014)。各種 WPC の表面のそれぞれに黒色綿布を静置し、指により約 5kPa の圧力で試験体の幅方向に 20mm 擦った後、チョーキング物質の付着した黒色綿布の変色を上記の変色の評価 (2.3) と同様の方法で測色することにより、クロッキング試験を行った。測色により得られた色差を、チョーキング色差と定め、各種 WPC 2 体の平均値でチョーキング発生度合を評価した。なお、試験は暴露前、および屋外暴露期間 1 か月、2 か月、3 か月、6 か月にそれぞれの試験体の異なる部分 1 か所において行った。

## 2.6 表面粗さ測定

屋外暴露前、および暴露期間 1 か月、6 か月での WPC の表面粗さに関する知見を得るために、表面粗さ測定を行った。測定には、ダイヤモンド針 (先端半径  $\phi = 2.0\mu\text{m}$ 、開き角  $= 60^\circ$ 、測定荷重  $= 0.75\text{mN}$ ) を備えた、接触式サーフコーダ (SE3500; 株式会社小坂研究所) を使用した。評価長さを 10mm に設定し、走引速度は 1mm/s とした。JIS B 0601 に準じ、測定データの短波長、長波長成分を分離するためにカットオフ波長  $\lambda_c$  を 2.5 としてガウシアンフィルタ処理を行い、測定データから試験体のうねりを除去して種々の粗さパラメータを測定した。本研究における表面粗さは、同一試験体での測定値に大きなばらつきが認められなかったことから、各種 WPC 2 体の試験体の定位 1 か所を幅方向に測定を行い、算術平均粗さ (Ra 値) の平均値により評価した。

## 2.7 WPC 表面の赤外分光分析

屋外暴露前、および暴露期間 1 か月、6 か月での WPC 表面の主要な官能基の変化に関する知見を得るために、WPC 表面の赤外分光分析を行った。分析は、フーリエ変換赤外分光分析装置 (FT/IR-470 plus; 日本分光株式会社) と一回反射 ATR 装置 (PRO450-S; 日本分光株式会社) を組み合わせ、波数  $4000\text{--}550\text{ cm}^{-1}$  の範囲で行った。試料を ZnSe 結晶板の上に置き、直径 2mm の金属治具を用いて一定圧力で押し付け、密着した状態で、表面部分の赤外吸収スペクトルを測定した。測定条件は、積算回数 32 回、分解能  $4\text{ cm}^{-1}$  とした。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 屋外暴露試験による色の变化

Fig. 1 に、表層研削、未研削の様々な木粉含有率の WPC を屋外暴露した際の暴露期間と変色の大きさ (色差) の関係を示す。暴露期間を通じ、表層を研削した WPC (—: 実線) の色差は、未研削の場合 (---: 点線) と比較して小さかったが、木粉含有率を 20%、30%、40% と増加するに従って大きくなる傾向が認められた。また、木粉含有率 50% と 60% の変色の傾向は木粉含有率 40% の場合と類似しており、暴露期間 2 か月での色差は 10 程度であった。しかし、暴露期間を長くした際の色差の増加はわずかであり、最も色差が大きい木粉含有率が 60% の場合でも、暴露期間 6 か月での色差は 10 程度を維持した。一方、未研削の WPC は、暴露期間 1 か月で、木粉含有率 20% の場合は色差 10、木粉含有率 30% 以上の場合は色差 30 を超えるなど、短期間の間に研削の場合と比較して色差が大きく変化することが示された。また、木粉含有率 30% 以上の WPC に関しては、暴露期間に対する変色の傾向が類似しており、暴露期間 2 か月で色差の値がほぼ平衡に達することが明らかとなった。

### 3.2 屋外暴露試験体表面の顕微鏡観察

WPC の変色についてさらに詳細な知見を得るために、屋外暴露前後の WPC の表面の顕微鏡観察を行った。Fig. 2 に暴露前、暴露期間 1 か月、および 6 か月における、表層研削、未研削の様々な木粉含有率の WPC の表面を CCD 顕微鏡で観察した写真を示す。表層を研削した木粉含有率 20% の WPC の暴露前の写真では、研削による凹凸により光の散乱が生じ、表面に露出している透明なポリプロピレン (PP) が白色化しているのが観察された。他の表層未研削の試験体では、暴露開始後には光劣化による白色化が生じたことが見て取れるが、表層を研削した試験体では元々研削による白色化が見られたため、光劣化に伴う変化が不明瞭になったと考えられ、これが研削した WPC の色の変化が未研削の WPC と比較して、屋外暴露期間での色差の変化が小さかった (Fig. 1) 要因の一つであると考えられる。一方、光の散乱の影響が少ない表層未研削の WPC に着目すると、木粉含有率 20% の WPC においては、暴露期間 1 か月で、木粉の周辺が部分的に白色化しているのが観察され、木粉含有率 30%、および 60% の WPC においては、暴露期間 1 か月で PP を含め全体が白色化しているのが見て取れる。屋外で使用されている WPC の表面劣化は、表面の木材成分の光劣化による水溶性化と雨水による溶脱、同時に木材成分の一つであるリグニンから発生するラジカルによる PP の劣化が原因であることが報告されているが (木口 2010c, Morrell ら 2006)、暴露期間 1 か月では、木粉の含有量が少ない木粉含有率 20% の WPC では、木粉

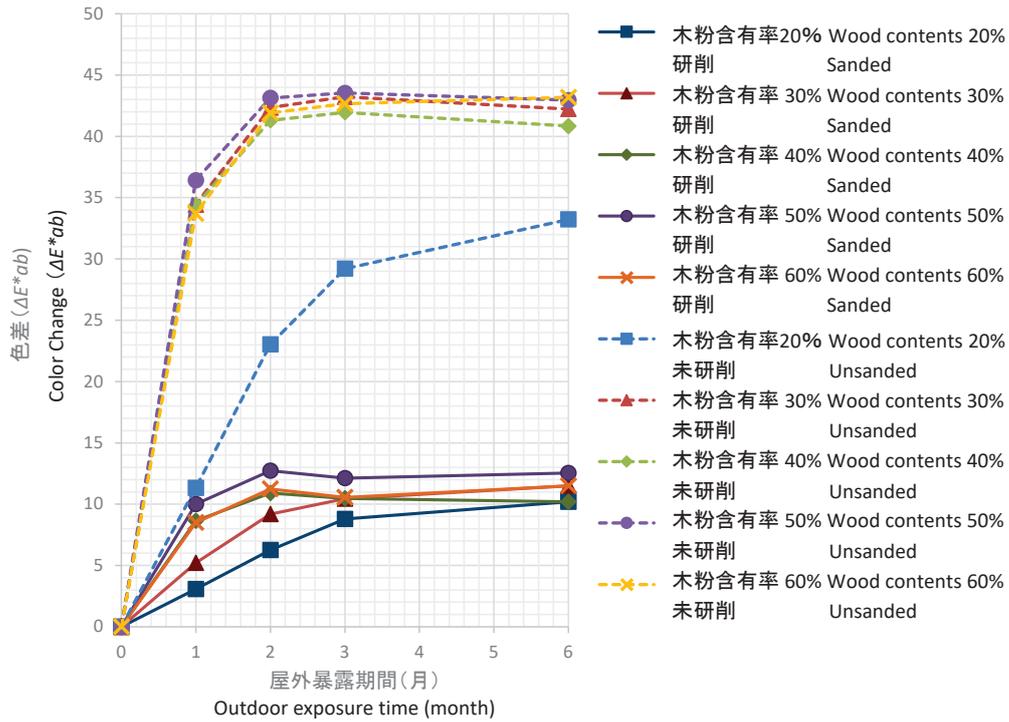


Fig. 1. 表面性状の異なる（研削・未研削）様々な木粉含有率（20% -60%）のWPCの屋外暴露試験における暴露試験期間と色差の関係  
 Discoloration of WPCs with various wood contents (20%-60%) having different surface characteristics (sanded and unsanded) exposed to outdoor for 6 months.

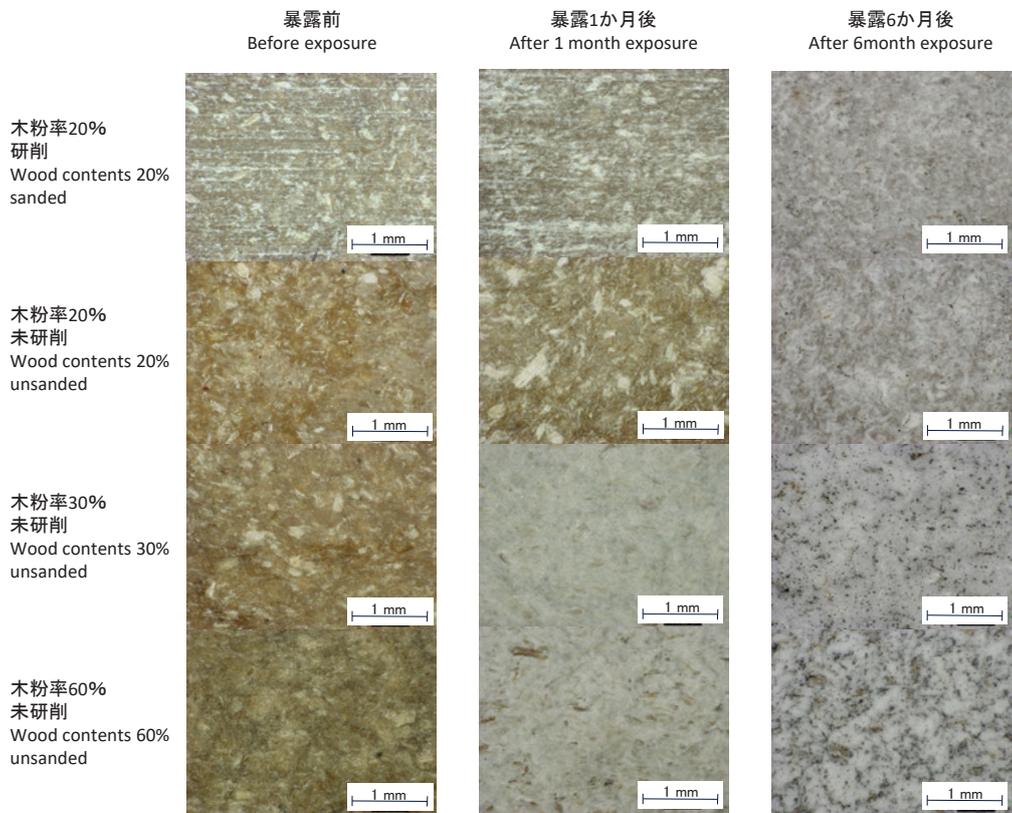


Fig. 2. 表面性状の異なる（研削・未研削）様々な木粉含有率（20% -60%）のWPCの屋外暴露試験における表面変化  
 Visual appearances of WPCs with various wood contents (20%-60%) having different surface characteristics (sanded and unsanded) as function of outdoor exposure time.

周辺のPPのみが光劣化の影響を受けているのに対し、木粉含有率30%以上のWPCでは、表面のPP全体を光劣化させるのに十分な量のラジカルが発生し、WPC表面の変色を速めた可能性が考えられる。

### 3.3 屋外暴露試験によるチョーキングの発生度合い

Fig. 3に表層研削、未研削の様々な木粉含有率のWPCを屋外暴露した際の暴露期間とチョーキングの発生度合いを示すチョーキング色差との関係を示す。表層を研削したWPC(—:実線)に関しては、暴露期間3か月までに、木粉含有率20%のWPCはチョーキング色差が10を超え、木粉含有率30%以上のWPCは20を超えるなど木粉含有率の異なるすべてのWPCにおいてチョーキングが発生することが示された。これは、研削により平滑面と比べて外力の影響を受けやすい凸部が生じるのに加え、太陽光に暴露される表面積が増大するため、暴露期間1か月から光劣化の影響を受け、表層が崩壊しやすい状態となり、クロッキング試験により擦り取られやすくなることが考えられる。また、木粉含有率が増加するに従って、チョーキング色差が高くなる傾向が認められた。木粉含有率の高いWPCほど、木粉由来のラジカル発生量が多く、物理的に崩壊しやすい状態になることが考えられる。また、暴露期間を長くするに従い、チョーキング色差も高くなる傾向が認められたが、木粉含有率が30%以上のWPCに関しては、暴露期間3か月から6か月までのチョーキング色差の変化が小さいことが判明した。これ

に対し、表層未研削のWPC(---:点線)に関しては、暴露期間1か月までは木粉含有率の違いに寄らず、チョーキング色差が低く抑えられていた。しかし、暴露期間2か月以降、木粉含有率30%以上のWPCは木粉含有率が高いほどチョーキング色差が大きくなる傾向が見られ、さらに、暴露期間3か月以降は、それまでチョーキングの発生度合いが低水準に抑えられていた木粉含有率20%のWPCを含め、木粉含有率の異なるすべての試験体においてチョーキング色差が増加傾向を示した。

### 3.4 屋外暴露試験によるWPC表面の表面粗さの変化

光劣化によるWPCの表層の崩壊に関する知見を得るために、表面粗さ測定を行った。Fig. 4に表層研削、未研削の様々な木粉含有率のWPCの表面粗さ測定の結果を示す。表層を研削したWPC(—:実線)については、木粉含有率20%のWPCの表面粗さの変化は小さかったが、木粉含有率30%、60%のWPCにおいては、表面粗さが減少する傾向が認められた。その傾向は木粉含有率が高い60%のWPCにおいて比較的大きく、Fig. 3でチョーキングの発生が平衡に達する暴露期間3か月から6か月の間に減少している傾向が見られた。これは、研削により平滑面と比べて外力の影響を受けやすい凸部が生じるのに加え、太陽光に暴露される表面積が増大することにより光劣化の影響を強く受けることから、凸部が脆くなって剥落しやすくなり、その結果として、チョーキングが発生することを

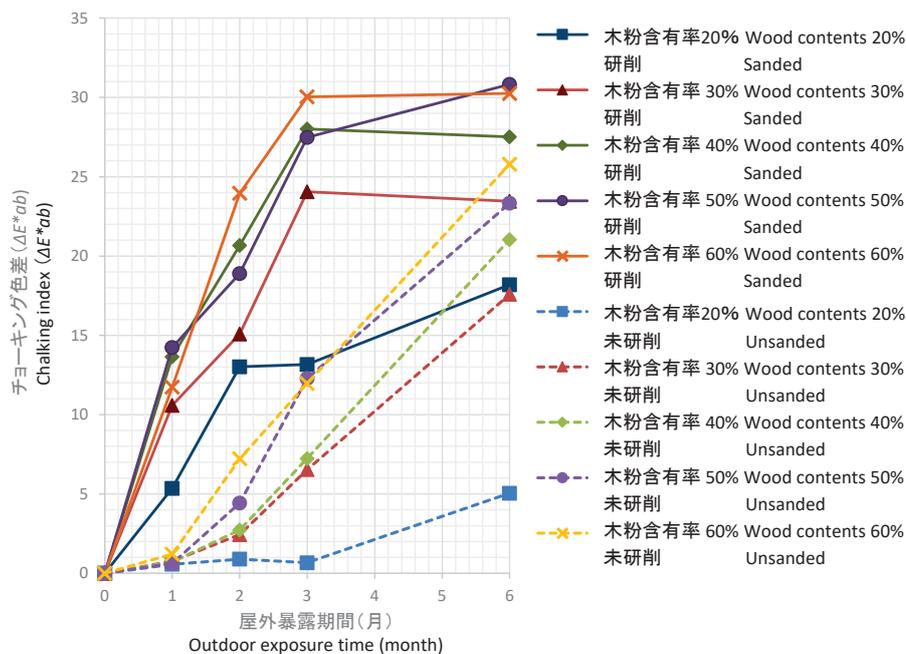
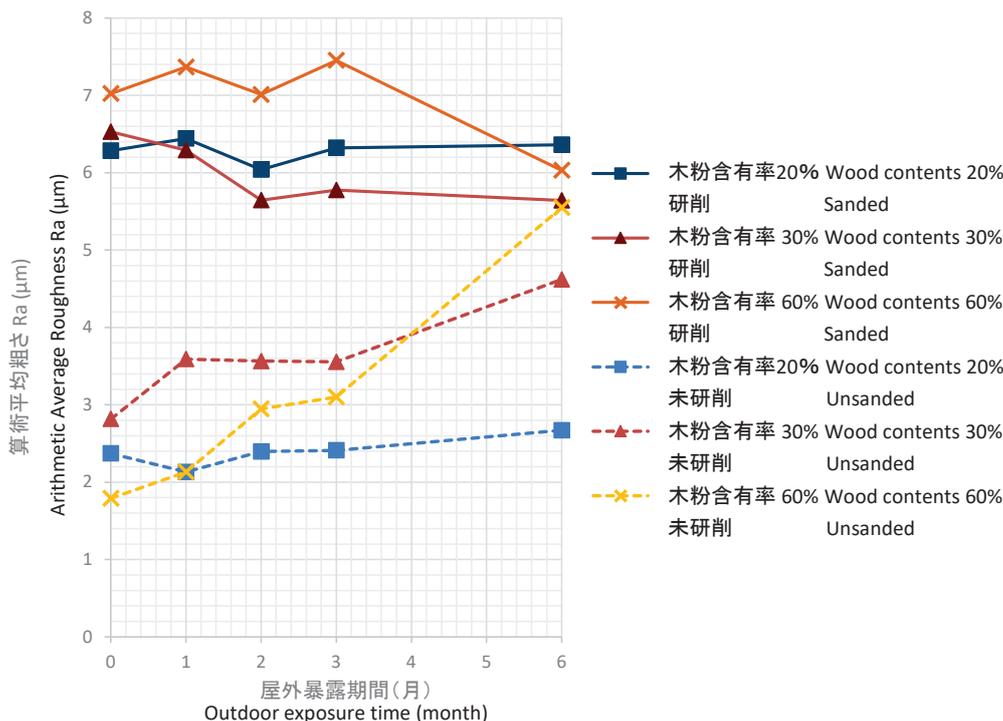


Fig. 3. 表面性状の異なる(研削・未研削)様々な木粉含有率(20%-60%)のWPCの屋外暴露試験における暴露試験期間とチョーキング発生度合いとの関係  
Degrees of chalking for WPCs with various wood contents (20%-60%) having different surface characteristics (sanded and unsanded) exposed to outdoor for 6 months.



**Fig. 4.** 表面性状の異なる（研削・未研削）様々な木粉含有率（20%、30%、60%）の屋外暴露試験における暴露試験期間と表面粗さ（算術平均粗さ）との関係  
**Surface roughness of WPCs with various wood contents (20%, 30%, and 60%) having different surface characteristics (sanded and unsanded) exposed to outdoor for 6 months.**

示唆している。また、木粉含有率 20% の WPC において、チョーキングが発生しているにもかかわらず、粗さの変化が小さいという結果が得られたが、この原因としては、クロッキング試験では、綿布によりチョーキング物質を物理的に擦り取っているのに対し、粗さ測定を行っている部位はクロッキング試験の影響を受けておらず、光劣化を受け脆くなっており、クロッキング試験では擦り取られるが、屋外暴露の過程で剥落することのない部分が残っているためであると考えられる。

一方、未研削の WPC (---: 点線) においては、木粉含有率 20% の WPC の表面粗さは、暴露期間 6 か月間の間にほとんど変化しなかったが、木粉含有率 30% と 60% の WPC の表面粗さは、暴露期間を長くするに従い、増加する傾向が見られた。特に、木粉含有率 60% の WPC は暴露期間 1 か月から徐々に粗さが大きくなり、暴露期間 6 か月では表層を研削した WPC とほぼ同様の値を示した。未研削の場合には表層が徐々に光劣化を受けて表層が劣化し、徐々に凹凸が生じ、表層が崩壊しやすい状態に変化する傾向にあることが考えられる。また、木粉含有率 20% の WPC に関しては、表層を研削した WPC と同様に、光劣化による粗さの変化がほとんど認められなかったことから、木粉含有率が 30% を境に表層の粗面化または平滑化の傾向が異なることが考えられる。これは、3.2 で考察したが、

木粉含有率 20% の WPC は木粉の含有量が少ないため、暴露による木粉からのラジカル発生量が少なく、光劣化の影響が WPC 表面全体に及んでおらず、研削の有無にかかわらず、表層の崩壊が抑えられていることが原因であると考えられる。しかし研削 WPC では暴露期間 1 か月、未研削 WPC では暴露期間 6 か月でチョーキングの発生が認められることから、木粉含有率が 20% の WPC であっても、表面は光劣化の影響を受けて表層が崩壊しやすい状態になることが推察される。

### 3.5 屋外暴露試験による WPC 表面の主要官能基の変化

Fig. 5 に表層を研削した様々な木粉含有率の WPC の暴露前の試験体表面の赤外吸収スペクトルを示す。なお、同図のスペクトルは PP の CH<sup>3</sup> 結合に起因する 1374 cm<sup>-1</sup> の吸収ピーク (McDonald ら 1961) の高さをそろえて標準化しているため、WPC の木粉含有率が 20%、30%、60% と増加するに従い、木粉の主成分であるセルロース、ヘミセルロースのもつ C-O-C 結合に起因する 1030 cm<sup>-1</sup> (片岡ら 2000) やリグニンの芳香核に起因する 1500 cm<sup>-1</sup> の吸収ピーク (Faix 1991) が増大しているのが見取れる。

Fig. 6 に Fig. 5 と同一の試験体の暴露期間 1 か月での表面の赤外吸収スペクトルを示す。この図においても PP 由来の 1374 cm<sup>-1</sup> の吸収ピークの高さをそろえて標準化していることから、木粉由来の 1030 cm<sup>-1</sup> の

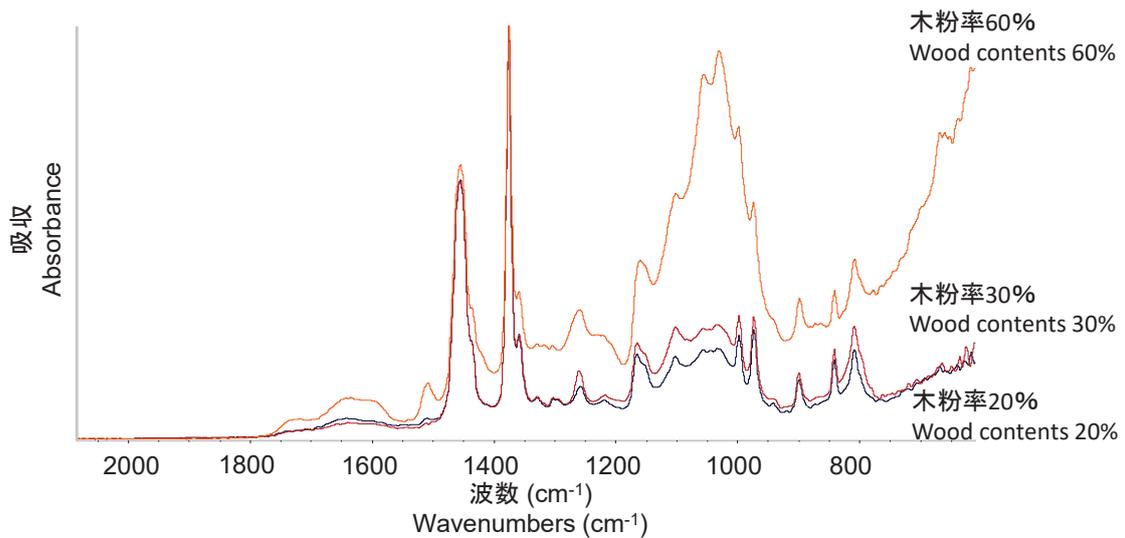


Fig. 5. 屋外暴露前の表層を研削した様々な木粉含有率（20%、30%、60%）のWPC表面の赤外吸収スペクトル  
IR spectra of sanded WPCs with various wood contents (20%, 30%, and 60%) before outdoor exposure.

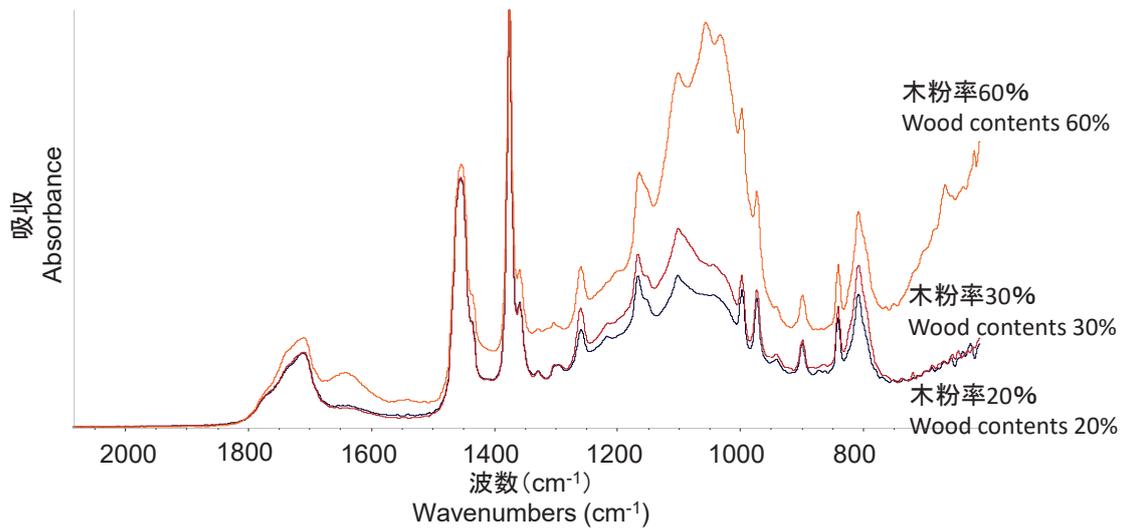


Fig. 6. 暴露期間1か月での表層を研削した様々な木粉含有率（20%、30%、60%）のWPC表面の赤外吸収スペクトル  
IR spectra of sanded WPCs with various wood contents (20%, 30%, and 60%) after 1 month outdoor exposure.

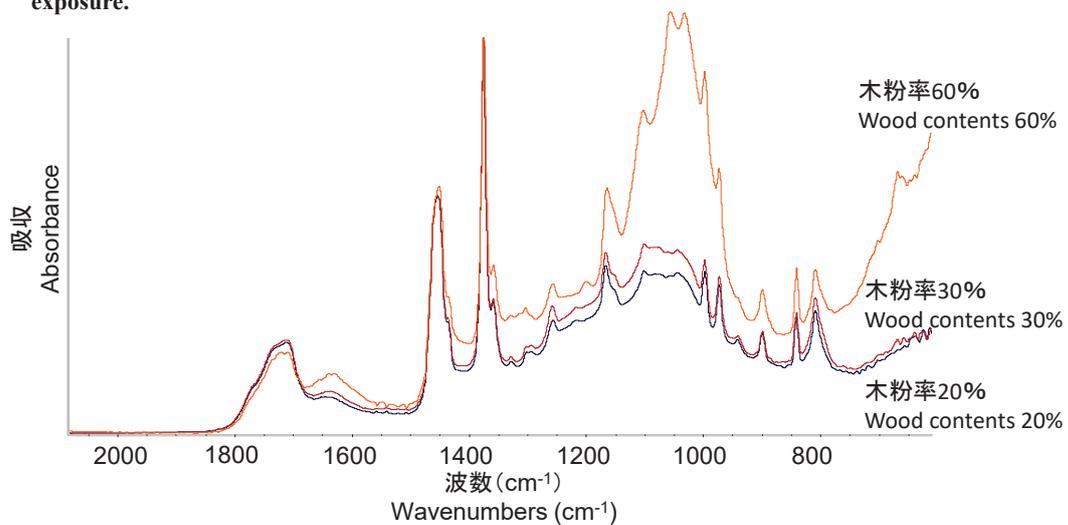


Fig. 7. 暴露期間6か月での表層を研削した様々な木粉含有率（20%、30%、60%）のWPC表面の赤外吸収スペクトル  
IR spectra of sanded WPCs with various wood contents (20%, 30%, and 60%) after 6 months outdoor exposure.

吸収ピークは、暴露前と同様に木粉含有率が増加するに従って増大している。リグニンの芳香核に起因する  $1500\text{ cm}^{-1}$  の吸収ピークは暴露期間 1 か月で、すでに消失している。リグニンは光酸化の影響を受けやすく、芳香族の開裂により C=O 結合をもつカルボキシル基を生じることが知られている (Faix 1991, Nemeth 1994)。また、PP は光酸化反応により C=O 結合をもつメチルケトン残基を生じることが知られている (Shiono 1978)。分析の結果からもリグニンと PP の光酸化反応により生じる C=O 結合に起因する吸収ピークの重なる  $1720\text{ cm}^{-1}$  の吸収ピークの増大が認められた。また、木粉含有率の異なるすべての WPC において、 $1110\text{ cm}^{-1}$  の吸収ピークの増大が認められるが、これは、PP の光酸化反応により生じたメチルケトン残基における C-C-C 結合に起因するものと推察さ

れる (Silverstein 1963)。

Fig. 7 に Fig. 5 と同一の試験体の暴露期間 6 か月での表面の赤外吸収スペクトルを示す。暴露期間 6 か月では、暴露期間 1 か月と比較し、 $1720\text{ cm}^{-1}$  の吸収ピークが増大しており、暴露期間を長くすることで木粉、PP の光劣化が進行していることが示唆されたが、それ以外の明瞭な変化は認められなかった。

Fig. 8 に様々な木粉含有率の表層未研削の WPC の暴露前の試験体の表面の赤外吸収スペクトルを示す。表層を研削した WPC (Fig. 5) とほぼ同一の結果が得られた。このことから、研削では表面の主要官能基は変化しないことが確認された。

Fig. 9 に Fig. 8 と同一の試験体の暴露期間 1 か月での表面の赤外吸収スペクトルを示す。表層未研削の WPC においては、Fig. 6 に示した表層を研削した場合

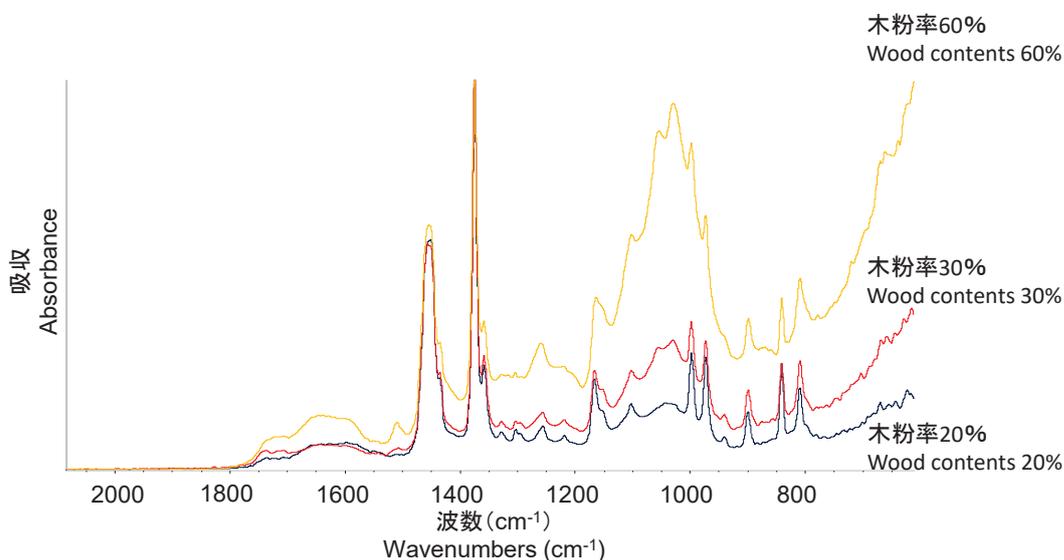


Fig. 8. 屋外暴露前の表層未研削の様々な木粉含有率 (20%、30%、60%) の WPC 表面の赤外吸収スペクトル  
IR spectra of unsanded WPCs with various wood contents (20%, 30%, and 60%) before outdoor exposure.

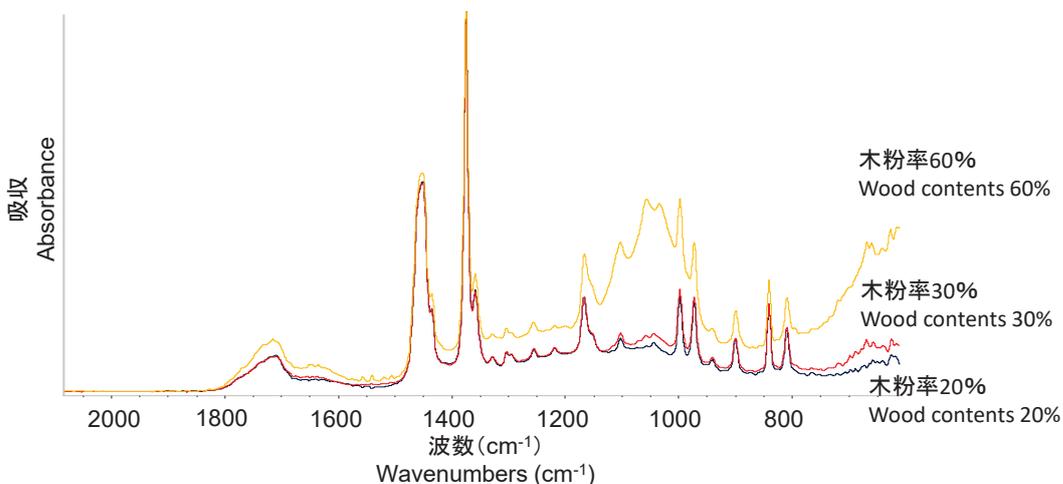


Fig. 9. 暴露期間 1 か月での表層未研削の様々な木粉含有率 (20%、30%、60%) の WPC 表面の赤外吸収スペクトル  
IR spectra of unsanded WPCs with various wood contents (20%, 30%, and 60%) after 1 month outdoor exposure.

と同様に、暴露期間1か月で木粉とPPが光劣化の影響を受けていることが示された。表層を研削したWPCとの大きな違いは、木材由来の $1030\text{ cm}^{-1}$ の吸収ピーク高さに比べ、PP由来の $1374\text{ cm}^{-1}$ の吸収ピークが増大していることであり、この傾向は木粉含有率の高い、木粉含有率60% WPCにおいて顕著であった。これは、Fig. 10に図示したモデルのように、表層未研削のWPCでは、暴露初期に表面に露出していた木粉のみが表層から剥落し、PPの連続層がWPC表面に露出した可能性を示唆している。Starkらは、主原料に高密度ポリエチレンを用い、木粉含有率を50%として製造したWPCの促進耐候性試験において、3000時間の試験後に木粉のみがWPC表面から剥落することを報告している（Starkら2007）。一方で、表層を研削した場合には、平滑面と比べて外力の影響を受けやすい凸部が生じるのに加え、太陽光に暴露される表面積が増大することにより光劣化の影響を強く受けることから、表層から低分子化したPPと木粉が同時に剥落し易く、剥落したのちに新たなPPと木粉の複合層が露出することが考えられる。このため、Fig. 6、Fig. 7に示したように暴露期間1か月と6か月の間で、WPC表面の主要官能基に変化が認められなかった可能性が考えられる。これは、Fig. 3に示した、チョーキング発生度合いが表層未研削のWPCと比較して高いという結果や、Fig. 4に示した、暴露期間が長くなるにしたがって表面粗さが減少傾向にあるという結果と矛盾しない。

Fig. 11にFig. 8と同一の試験体の暴露期間6か月で

の表層の赤外吸収スペクトルを示す。暴露期間1か月の試験体の分析結果と比較すると木材由来のピークが増大することが判明した。これは、Fig. 4に示した表面粗さ測定の結果において暴露期間が長くなるに従い、表面粗さが徐々に増加していることから、表層未研削のWPCにおいてもFig. 10に示したように、暴露期間6か月では表層の光劣化が進み、PPの連続層が崩壊して粗面化するとともに、研削したWPCと同様にPPと木粉の複合層が露出したためと推察される。

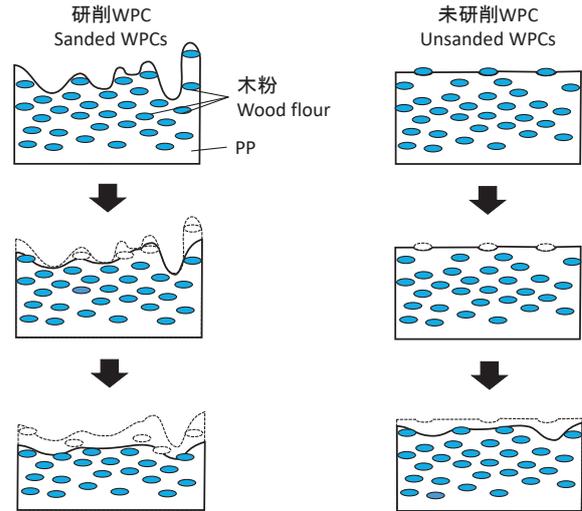


Fig. 10. 屋外暴露試験期間中のWPCの表層劣化のモデル図  
Supposed surface decomposition model of WPCs during 6 months outdoor exposure.

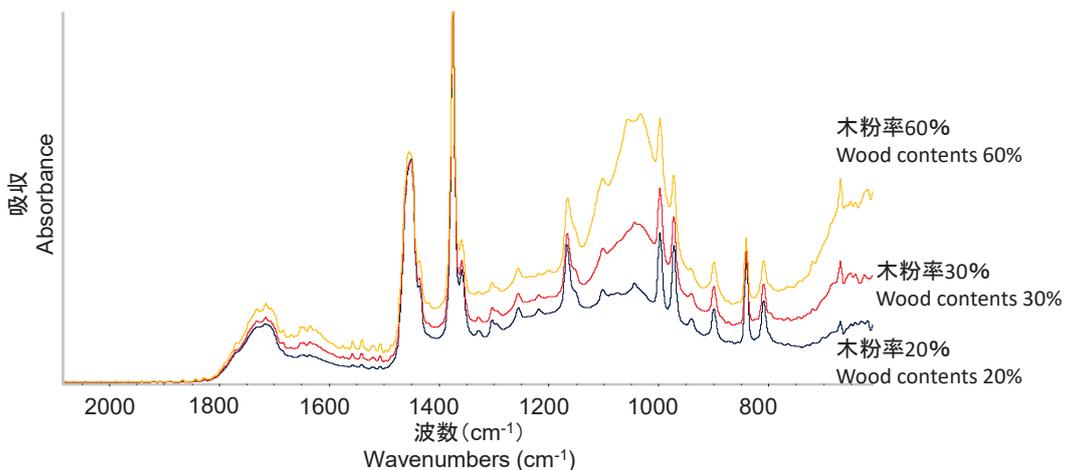


Fig. 11. 暴露期間6か月での表層未研削の様々な木粉含有率（20%、30%、60%）のWPC表面の赤外吸収スペクトル  
IR spectra of unsanded WPCs with various wood contents (20%, 30%, and 60%) after 6 months outdoor exposure.

#### 4. 結論

WPCの屋外利用における初期の変色とチョーキングの発生度合いを詳細に検討することを目的として、木粉含有率の異なるWPCを製造し、表層を研削したものと未研削のそれぞれについて屋外暴露試験を行った。その結果として、変色に関しては、表層未研削のWPCが表層研削のWPCと比較して変色が大きくなるという結果が得られた。この原因の一つとしては、表層の研削による凹凸により光の散乱が生じてPPが白色化し、光劣化による白色化の影響が不明瞭となった可能性が考えられる。また、表層未研削のWPCにおいて、木粉含有率30%を境に変色の傾向が異なるという結果が得られたが、この原因としては、木粉含有率を高めることによりリグニンからのラジカル発生量が増加し、木粉含有率30%以上では表層のPP全体を光劣化させるのに十分な量のラジカルが発生し、WPC表面の変色を速めた可能性が考えられる。一方、チョーキング発生度合いに関しては、表層を研削したWPCが未研削のWPCと比較し、暴露初期のチョーキング発生度合いが高いことが判明した。これは、表層を研削したWPCにおいて、研削によって生じた凸部が光劣化を受けて脆くなり、チョーキング物質として剥落しやすくなったことが原因であると考えられる。また、木粉含有率を高くするに従いチョーキング発生度合いが高くなるという結果が得られたが、この原因については、木粉含有率の増加に伴って木粉からのラジカル発生量が増加し、PPの劣化を促進した可能性が考えられる。

WPCの変色が木粉含有率30%を境に傾向が異なることや、木粉含有率を高くするに従いチョーキング発生度合いが高くなることが判明し、その原因が木粉からのラジカル発生量の違いによるものであると考えられることから、今後は、ESR（電子スピン共鳴）分析などによる木粉含有率の違いによるラジカル発生量の定量と、発生したラジカルがどの程度PPの光劣化に寄与するののかについて検討を行う必要がある。また、WPCの表層の研削が変色、およびチョーキング発生度合いに大きな影響を及ぼすことが示されたことから、今後は、研削条件を変えるなどの手法により、WPCの表面性状と変色、およびチョーキング発生度合いとの関係についてさらに詳細な検討を行う必要がある。

#### 謝辞

本研究はJSPS科研費26450243の助成を受けたものです。

#### 引用文献

Caulfield, D. F., Clemons, C., Jacobson, R. E., Rowell, R. M. (2003) 13 Wood Thermoplastic Composites, "Handbook of Wood Chemistry and Woos Composites"

, Taylor & Francis, 365-378.

- Ebe K., Sekino N. (2015) Surface deterioration of wood plastic composites under outdoor exposure. *J Wood Sci*, 61, 143-150.
- Faix O. (1991) Classification of Lignins from Different Botanical Origins by FT-IR Spectroscopy. *Holzforchung*, 45, 21-27.
- 片岡 厚 (2000) 木材の組織構造を区別した赤外分光分析—顕微FT-IRの有用性と応用例—. *木材保存*, 26, 255 - 265.
- Kiguchi M., Katoka Y., Matsunaga H. Yamamoto K., Evans P. D. (2007) Surface deterioration of wood-flower polypropylene composites by weathering trials. *J Wood Sci*, 53, 234-238.
- 木口 実 (2009) 木質バイオマスのマテリアル利用技術—木材・プラスチック複合材の高性能化—. *森林と林業*. 日本林業協会, 14-15.
- 木口 実, 片岡 厚, 松永 浩史, 桃原 郁夫, 川元 スミレ, 大友 祐晋 (2010a) 木材・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. *木材保存*, 36, 52-58.
- 木口 実, 片岡 厚, 松永 浩史, 桃原 郁夫, 川元 スミレ, 小林 正彦, 大友 祐晋 (2010b) 木材・プラスチック複合材（混練型WPC）の耐久性（2）土中埋設試験による耐朽性評価. *木材保存*, 36, 150-157.
- 木口 実 (2010c) 木材・プラスチック複合材（混練型WPC）の耐久性と耐候性. *塗装工学*, 45, 223-230.
- Kiguchi M., Katoka Y., Kobayashi M., Kawamoto S., Matsunaga H., Ohtomo Y. (2011) Decreasing the incidence of chalking of weathered wood flour polypropylene composites by UVA and HALS. *Proceedings of International wood fibre polymer composites symposium*, 5, 1-10.
- 木口 実, 小林 正彦 (2012) 木材・プラスチック複合材（混練型WPC）の性能と技術動向. *木材工業*, 67, 50-55.
- 小林 正彦, 木口 実, 片岡 厚, 石川 敦子, 川元 スミレ, 松永 正弘 (2014) 混練型WPCの耐候性に及ぼす加溶媒分解木材の添加効果. *木材保存*, 40(1), 8-16.
- Lee C.H., Hung K.C., Chen Y.L., Wu T.L., Chien Y.C., Wu J.H (2012) Effects of polymeric matrix on accelerated UV weathering properties of wood-plastic composites. *Holzforchung*, 66, 981-987.
- Muasher M., Sain M. (2006) The efficacy of photostabilizers on the color change of wood filled plastic composites. *Polym Degrad Stab*, 91, 1156-1165.
- McDonald M.P., Ward I.M. (1961) The assignment of the infra-red absorption bands and the measurement of

- tacticity in polypropylene. *Polymer*, 2, 341 – 355.
- Morrell J. J. (2006) Durability of wood-plastic composites. *Wood Design Focus*, 16, 7-10.
- Nemeth, K., Faix, O. (1994) Beobachtung der Photodegradation des Holzes durch quantitative DRIFT-Spektroskopie, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 52, 261 – 266.
- 大島 明, 古田 裕三 (2011) 木材・プラスチック再生複合材の長期耐久性に関する研究. 日本建築学会大会学術梗概集, 1203-1204.
- 岡本 忠 (2003) 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.
- Shiono T., Niki E., Kamiya Y. (1978) Oxidative degradation of Polymers (Part 4) Photooxidation of Isotactic Polypropylene powder. *J. Japan Petrol. Inst*, 21, 63-67.
- Silverstein R., Bassler G., Morrill T. (1963) ( 荒木 峻, 益子 洋一郎, 山本 修訳, 1983) 有機化合物のスペクトルによる同定法 第4版, 東京化学同人, 115pp.
- Stark N.M., Matuana L.M. (2003) Ultraviolet Weathering of Photostabilized Wood-Flour-Filled High-Density Polyethylene Composites. *J Appl Polym Sci*, 90, 2609-2617.
- Stark N.M., Matuana N.M. (2004) Surface Chemistry and Mechanical Property Changes of Wood-Flour/High-Density-Polyethylene Composites after Accelerated Weathering. *J Appl Polym Sci*, 94, 2263-2273.
- Stark N.M., Matuana L.M. (2007) Characterization of weathered wood-plastic composite surfaces using FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS. *J Polym Degrad Stab*, 92, 1883-1890.
- 高谷 政広, 岡本 忠 (2008) セルロース系材料における基礎と応用 4. 木質プラスチック複合体. *材料*, 57, 415-420.

## Influence of wood contents and surface sanding on weathering properties of wood plastic composites (WPCs) in outdoor exposure test

Masahiko KOBAYASHI<sup>1)\*</sup>, Yutaka KATAOKA<sup>1)</sup>, Atsuko ISHIKAWA<sup>1)</sup>,  
Masahiro MATSUNAGA<sup>1)</sup>, Toru KANBAYASHI<sup>1)</sup> and Makoto KIGUCHI<sup>2)</sup>

### Abstract

Wood plastic composites (WPCs) have been gaining market share in the exterior materials such as decking because of their good water and decay resisting properties. However, the problem of weathering properties, such as discoloration and chalking (formation of fine powder on the surface of WPCs) that often occur during the long term outdoor use, still remains to be solved. In this study, WPCs specimens with various wood contents were manufactured and half of them were subjected to sanding treatment to form a wood-like appearance. They were then exposed to outdoor weathering for 6 months to examine the effects of sanding process and wood content on the extent of discoloration and chalking of WPCs. It was shown that discolorations of sanded WPCs were greater than that of unsanded ones throughout the exposure. The discoloration behavior of WPCs with more than 30% of wood contents was clearly different from that with 20% of wood content. The amount of chalking products for sanded WPCs was higher than that for the unsanded ones, and the degree of chalking increased as wood contents increased. Possible causes of these behaviors were discussed and a surface degradation model of WPCs in outdoor exposure were proposed.

**Key words :** Wood plastic composites (WPCs), outdoor exposure test, photodegradation, discolorations, chalking

---

Received 29 September 2016, Accepted 5 December 2016

1) Department of Wood Improvement, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Principal Research Director, FFPRI

\* Department of Wood Improvement, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: masa7355@ffpri.affrc.go.jp