研究論文

示差走査熱量法および赤外分光分析法による 木材-プラスチック複合材料(混練型 WPC)の定量分析Ⅱ -PP/PE 混合物をプラスチック原料とする WPC への適用性-

小林 正彦^{*1}, 久保 智史^{*1}, 片岡 厚^{*1}, 石川 敦子^{*1},
松永 正弘^{*1}, 木口 実^{*1}, 大友 祐晋^{*2}

Quantification of wood and plastics in wood plastic composites (WPCs) by means of differential scanning calorimetry and infrared spectroscopy II- The applicability to WPCs containing a mixture of PP and PE as raw material-

Masahiko KOBAYASHI^{*1}, Satoshi KUBO^{*1}, Yutaka KATAOKA^{*1},
Atsuko ISHIKAWA^{*1}, Masahiro MATSUNAGA^{*1}, Makoto KIGUCHI^{*1},
Yushin OHTOMO^{*2}

Wood plastic composites (WPCs) have been gaining market share in the exterior materials such as decking because of their good durability. However, the durability of WPCs is much influenced by their ratio of wood flour to plastic. Therefore, simple methods for quantitative analysis of wood and plastics in WPCs are desired. In our previous study, it was possible to quantify the ratio of wood or plastics in the case of WPCs which consisted of wood and polypropylene (PP) with simple methods using DSC and FTIR-ATR. However, the recycled plastic which used as raw materials of WPCs often contains not only PP but also polyethylene (PE). Therefore, it is necessary to test the applicability of our analysis methods to WPCs which contains PE and PP. In this paper, we try to construct calibration curves to quantify the ratio of wood and PE by using DSC and FTIR-ATR analyses of WPCs which consisted of wood and PE. A combination of calibration curves obtained for wood and PP in the previous study and those acquired for wood and PE in the present study were applied to the quantitative analysis of the WPCs verification sample which was manufactured with a predetermined prescription using PP/PE mixture as plastic raw material. As a result, it was shown that the wood to plastic ratio in the verification sample could be calculated with a relatively good accuracy when FTIR-ATR method was used.

* 1 独立行政法人森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute

* 2 エア・ウォーター・エコロッカ株式会社

Air Water Ecoroca Inc.

Corresponding author : Masahiko Kobayashi (masa7355@ffpri.affrc.go.jp)

Keywords : Wood plastic composites (WPCs), Quantitative analysis, Differential scanning calorimeter (DSC), Fourier transform infrared spectrometry with attenuated total reflectance (FTIR-ATR)

WPC は屋外耐久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、その耐久性については木粉率の影響が大きいことから、WPC 製品中の木粉率やプラスチック率を簡便な手法で定量的に分析する技術が望まれている。前報で示差走査熱量分析 (DSC) 法と全反射法フーリエ変換赤外分光分析 (FTIR-ATR) 法により、木材とポリプロピレン (PP) を原料とする WPC において、木粉率と PP 率をそれぞれ簡便に定量できることを明らかにした。しかし、WPC 製品の主原料の一つである再生プラスチックは、PP とポリエチレン (PE) の混合物であることが多いため、PP のみならず PE を含む WPC についても上記の定量分析法の適用性を検証する必要がある。そこで本研究では、木材とポリエチレン (PE) を原料とする WPC を対象として、DSC 法と FTIR-ATR 法により、PE を定量するための検量線を作成した。さらにこの検量線と前報で得た PP 定量のための検量線を、検定用に製造した WPC (木粉および PP/PE 混合物等を原料とする配合既知の試料) に適用することにより、定量分析の精度を検討した。その結果、FTIR-ATR 法を用いた場合に、プラスチック原料が PP と PE の混合物である場合においても、PP 定量のための検量線と PE 定量のための検量線を併用することにより、WPC 中の木粉率やプラスチック率を比較的正確に定量できることが示された。

キーワード：混練型 WPC、定量分析、示差走査熱量 (DSC) 分析、全反射法フーリエ変換赤外分光分析 (FTIR-ATR)

1. 緒言

「木材-プラスチック複合材料 (wood plastic composites : 混練型 WPC)」(以下 WPC と略す) は、熱可塑性を有しており様々な加工が可能であることに加え、建築解体廃材および間伐材等からなる未利用木材、再生プラスチックを原料にできることから、使用後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注目されている¹⁾。WPC は屋外耐久性が比較的高いことを活かして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。その耐水性や耐朽性については、木粉率の影響が大きい^{2, 3)}、WPC 製品中の木粉率、プラスチック率を簡便な手法で定量的に分析する技術の開発は、WPC をエクステリア材料として利用するうえで重要な課題となっている。

そこで前報⁴⁾では、スギ木粉とポリプロピレン (PP) を原料とする WPC を対象に、示差走査熱量 (DSC) 分析と全反射 (ATR) 法によるフー

リエ変換赤外分光分析 (FTIR) を用いて木粉率とプラスチック率を定量するための手法を明らかにした。一方、WPC 製品の原料となる再生プラスチックは、PP のみならず PP とポリエチレン (PE) の混合物であることが多いため、PE を含む WPC についてもこれらの定量分析法の適用性を検証する必要がある。

このため本稿では、前報⁴⁾で用いた PP に加え、PE を用いた WPC を製造し、DSC 法と FTIR-ATR 法による木粉および PE の定量分析のための検量線作成を試みた。さらにこれらの定量分析法の精度を検討するための試料として、木粉、プラスチック (PP と PE の混合物)、および添加剤の配合が既知の検定用 WPC を量産実機で試作し分析に供した。

2. 実験方法

2.1 試料

スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) 木粉 (100

メッシュパス)と高密度ポリエチレン(メルトフローレート(MFR):36g/10min)(PE:Aldrich Chemical Company, Inc.)を二軸押出機で押出成形した配合の異なる WPC 試料(PE 率:40%, 45%, 50%, 60%, 70%, 80%)を検量線作成用試料とした。押出条件は180℃, スクリューの回転速度を10rpmとし, 幅20mm, 厚さ4mmのT-ダイを用いて成形を行った。また, 検定用試料として, 木粉, プラスチック(PPとPEの混合物), 添加剤の質量百分率(木粉率, プラスチック率, 添加剤率)がそれぞれ47%, 34%, 19%の混練型 WPC を量産実機で試作した。ただし, 検定用試料のプラスチック原料は容器包装リサイクルプラスチックであるため, PPとPEの分率は不明である。製造した WPC サンプルは105℃オーブンで24時間乾燥し, シリカゲル入りのデシケーター中で24時間以上養生した後, 各種分析に供した。

2.2 DSC 分析

示差走査熱量(DSC)測定にはTAインスツルメンツ社製DSC-Q100を用い, 前報⁴⁾と同様, 窒素雰囲気下, 昇温速度および冷却速度10℃/minで25℃~220℃の範囲で行った。測定はWPC試料断面の薄切片を用い, それぞれ3回行った。結晶化度(Xc)は前報⁴⁾と同様の方法で算出した。なお, 結晶化度の算出にはPE完全結晶体の融解エンタルピー変化量の値293J/g⁵⁾を用いた。

木粉率, プラスチック率の定量に用いる検量線の作成にあたっては, ベースラインを50℃から200℃の間に引くことによりWPC試料の融解に伴う吸熱ピーク面積を求め, PEの融解エンタルピー変化量(ΔH_m)を算出した。同様に, 再結晶化に伴う発熱ピークの面積からPEの再結晶化エンタルピー変化量(ΔH_c)を算出した。3回の測定により得られた ΔH_m , および ΔH_c の平均値をPEの質量百分率(PE率)に対してプロットし, 最小二乗法により線形近似した。なお, 検定用WPCに関しては, 融解および再結晶化に伴う熱流ピークがそれぞれ2つずつ検出されたことから, ΔH_m は50℃から120℃の間と120℃から200℃の間, ΔH_c は50℃から103℃の間と103℃から200℃の間にそれぞれベースラインを引いて算出した。

2.3 FTIR-ATR 分析

フーリエ変換赤外分光分析装置(日本分光株式会社FT/IR-470 plus)とZnSe結晶板を備えた一回反射ATR装置(日本分光株式会社PRO450-S)を用い, 波数範囲4000~550cm⁻¹, 積算回数16回, 分解能4cm⁻¹の条件で測定を行い, スペクトルを得た。木粉率の異なるWPC試料および検定用試料の表面をサンドペーパー(P400)で研磨し, 研磨面をそれぞれ3箇所測定した。

木粉率, プラスチック率の定量に用いる検量線の作成にあたっては, 木粉由来の吸収バンドとPE由来の吸収バンドの高さ比(木粉/PE吸収バンド高さ比)を求め, 木粉とPEの質量比(木粉/PE質量比)に対してプロットし, 最小二乗法により線形近似した。FTIR-ATR分析においては, 試料とZnSe結晶板の押し付け強さや試料の硬さ・形状によって両者の密着面積が変化しやすく, 吸収バンドの強度解析に影響を及ぼすことがある。そのような影響を避けるため本稿では前報⁴⁾と同様, 木材由来の吸収バンドとPE由来の吸収バンドをそれぞれ単独で評価せず, 両者の吸収バンド高さ比を求めることとした。なお, 木粉由来の吸収バンドとして1033cm⁻¹の吸収⁶⁾と1509cm⁻¹の吸収⁷⁾を選択し, それぞれ, 1184~919cm⁻¹間と1528~1492cm⁻¹間にベースラインを引くことによりバンド高さを求めた。PE由来の吸収バンドとしては717cm⁻¹の吸収を選択し, 736~708cm⁻¹間にベースラインを引くことによりバンド高さを求めた。

3. 結果および考察

3.1 DSC 法による検量線の作成

木粉とPPのみを用いて製造したWPCについては, 前報⁴⁾におけるDSC分析により融解に伴うエンタルピー変化量(ΔH_m)および再結晶化に伴うエンタルピー変化量(ΔH_c)とPP率の間にそれぞれ高い相関が認められており, 前者から回帰式(1), 後者から回帰式(2)が得られている。

$$y = 1.119x - 1.572 \quad (1)$$

$$y = 1.207x - 7.726 \quad (2)$$

本研究では新たに木粉とPEのみを用いて製造したWPCについて同様に検量線の作成を行った。図1, 図2に, 木粉とPEの配合が異なるWPC

図1 様々なPE率で製造したWPCのDSC昇温曲線
Figure 1 DSC heating curves for WPCs with various PE contents.

凡例 WPC中のPE率(%) :

(a) : 40, (b) : 45, (c) : 50, (d) : 60, (e) : 70, (f) : 80

Legend PE contents in WPCs (%) :

(a) : 40, (b) : 45, (c) : 50, (d) : 60, (e) : 70, (f) : 80

図2 様々なPE率で製造したWPCのDSC降温曲線
Figure 2 DSC cooling curves for WPCs with various PE contents.

凡例 WPC中のPE率(%) :

(a) : 40, (b) : 45, (c) : 50, (d) : 60, (e) : 70, (f) : 80

Legend PE contents in WPCs (%) :

(a) : 40, (b) : 45, (c) : 50, (d) : 60, (e) : 70, (f) : 80

表1 PEの熱特性に及ぼす木粉率の影響

Table 1 Effect of wood contents on thermal properties of PE

WPC中のPE率 PE contents of WPCs (%)	WPC中の木粉率 Wood contents of WPCs (%)	融解エンタルピー変化量 ΔH_m (J/g)	融解に伴う熱流ピーク温度 T_m peak (°C)	結晶化エンタルピー変化量 ΔH_c (J/g)	結晶化度 X_c (%)	結晶化に伴う熱流ピーク温度 T_c peak (°C)
40	60	102.7	133.2	100.1	87.24	116.6
45	55	122.0	132.6	115.8	87.92	116.9
50	50	142.2	133.4	128.7	88.76	116.1
60	40	159.6	132.8	155.5	88.15	117.3
70	30	180.7	131.5	179.7	88.13	118.3
80	20	205.1	130.9	203.8	85.70	118.3

試料を分析し得られたDSC曲線を示す。図1は加熱工程におけるPEの融解に伴う吸熱ピークの変化、図2は冷却工程におけるPEの再結晶化に伴う発熱ピークの変化を示している。前報⁴⁾におけるPPを用いた場合と同様、PE率の増加、すなわち木粉率の減少に伴い、融解に伴う吸熱ピークおよび再結晶に伴う発熱ピークの増大が認められた。表1にPEの熱特性に及ぼす木粉率の影響をまとめた。前報⁴⁾におけるPPの場合と比較して、融解および結晶化に伴うエンタルピー変化量

はいずれも大きく、結晶化に伴うエンタルピー変化量から算出した結晶化度(86~89%)はPPの場合(48~56%)よりも高かった。また、PE率が増加するに従って再結晶化に伴う熱流ピーク温度が上昇する傾向が見られた。結晶化度に関しては、本研究でプラスチック原料として分岐の少ない高密度PEを用いていることから、PPと比較して結晶化度が高かったものと考えられる。また、熱流ピーク温度に関しては、PEが結晶化する際に木粉が核形成剤として働くことなどが知られて

おり^{8,9)}、本研究においても木粉がPEの結晶化挙動に影響していると考えられるが、これに関しては今後の検討課題である。図3は、これらの結果から得られた検量線である。PEを用いた場合もPPと同様、融解および再結晶化に伴うエンタルピー変化量とPE率との間には高い相関が認められ、前者から回帰式(3)、後者から回帰式(4)が得られた。

$$y = 2.377x + 15.090 \quad (3)$$

$$y = 2.470x + 4.600 \quad (4)$$

3.2 FTIR-ATR 法による検量線の作成

前報⁴⁾で、木粉とPPのみを用いて製造したWPCについて木粉/PP吸収バンド高さ比と木粉/PP質量比の関係を示す検量線が得られている。木材由来の吸収バンドとして、主として多糖類の持つC-O-C結合の対称伸縮振動に起因する 1033cm^{-1} を選択した場合、およびリグニンの芳香核の骨格振動に起因する 1509cm^{-1} を選択した場合ともに木粉/PP吸収バンド高さ比と木粉/PP質量比の間には高い相関が認められ前者から回帰

図3 WPC中のPE率とPEの結晶化および融解に伴うエンタルピー変化量との関係

Figure 3 Correlation between PE contents in WPCs and enthalpy change derived from crystallization or melting of PE.

記号 ◆ : 結晶化, □ : 融解
Symbol ◆ : crystallization, □ : melting

図4 様々な木粉率で製造したWPCのIRスペクトル

Figure 4 Infrared spectra of WPCs with various wood contents.

凡例 木粉率 A : 60%, B : 55%, C : 50%, D : 40%, E : 30%, F : 20%

Legend Wood contents in WPCs : A : 60%, B : 55%, C : 50%, D : 40%, E : 30%, F : 20%

図5 WPC中の木粉/PE質量比とIR吸収バンド高さ比(1033cm⁻¹/717cm⁻¹)との関係

Figure 5 Correlation between wood to PE ratio and the band height ratio (1033cm⁻¹/717cm⁻¹).

注 括弧の中の数字は木粉率を示す

Note The figures in parentheses are wood contents in WPCs.

式(5)が、後者から回帰式(6)が得られている。

$$y = 0.624x - 0.013 \quad (5)$$

$$y = 0.056x - 0.002 \quad (6)$$

本研究では新たに、木粉とPEのみを用いて製造したWPCについて同様に検量線の作成を行った。図4は木材/PE比の異なるWPCのFTIRによる測定結果を示している。PE由来の特徴的な吸収バンドとして、CH₂結合の変角振動に起因する717cm⁻¹付近の吸収バンドを選択した¹⁰⁻¹²⁾。なお、1450cm⁻¹にCH₃結合の変角振動に起因する吸収バンドが認められるが、この吸収バンドはPP由来の吸収バンドと重なり、PP、PE混合系ではそれぞれの定量が不可能であることから本研究では選択しなかった。図5、6は木粉とPEのみを用いて製造したWPCについて得た検量線である。木材由来の吸収バンドとして、1033cm⁻¹を選択した場合(図5)と1509cm⁻¹を選択した場合(図6)、共に木粉/PE吸収バンド高さ比と木粉/PE質量比の間には高い相関が認められ、前者から回帰式(7)が、後者から回帰式(8)が得られた。

$$y = 1.636x - 0.102 \quad (7)$$

$$y = 0.173x - 0.001 \quad (8)$$

図6 WPC中の木粉/PE質量比とIR吸収バンド高さ比(1509cm⁻¹/717cm⁻¹)との関係

Figure 6 Correlation between wood to PE ratio and the band height ratio (1509cm⁻¹/717cm⁻¹).

注 括弧の中の数字は木粉率を示す

Note The figures in parentheses are wood contents in WPCs.

これらの結果から、同法による定量分析がPEを含むWPCに対しても有効であることが示された。

3.3 量産実機で試作した検定用WPCの木粉率、プラスチック率の定量

PPとPEの混合物をプラスチック原料とする配合が既知の検定用WPC(木粉率47%、プラスチック率(PP率+PE率)34%、添加剤率19%)をDSC分析とFTIR-ATR分析に供し、回帰式(1)~(8)を用いて木粉率とプラスチック率を算出した。

図7は検定用WPCのDSC分析の結果を示している。この結果から、PP、PEそれぞれの融解に伴う熱流ピークが162℃、110℃に、再結晶化に伴う熱流ピークが116℃、95℃に独立して検出されることが明らかとなり、PPとPEそれぞれの定量分析が可能であることが示された。まず融解に伴う吸熱ピークに着目すると検定用WPCのPPとPEのピーク面積から算出したΔH_mはそれぞれ27.2J/g、6.65J/gであった。これらの値を回帰式(1)、(3)にそれぞれあてはめて算出したPP率は25.7%、PE率は2.2%であった。これらの結果から木粉/PP/PEの質量比は1.00/0.35/0.022と

なり，木粉/プラスチックの質量比は1.00/0.37となる。検定用 WPC の添加剤率が19%であることを考慮し，残りの81%を上記の木粉/プラスチックの比で配分すると，木粉率は59.2%，プラスチック率は21.8%と算出された。同様の方法で再結晶化に伴う発熱ピークに着目し，PP と PE の ΔH_c の値29.3J/g, 5.37J/g を回帰式(2), (4)にそれぞれあてはめて木粉率，プラスチック率を算出すると，それぞれ56.0%，25.0%となった。これらは検定用 WPC の配合（木粉率47%，プラスチック率34%）と比較するといずれも10%程度のずれを生じることが明らかとなった。

図8は検定用 WPC の FTIR-ATR 分析の結果を示している。PE 由来の吸収バンドとして PP 由来の吸収バンド (1374cm^{-1})^{13, 14)} と重ならず，それぞれ独立した吸収バンドを用いたことにより，プラスチック原料が PP と PE の混合物であっても PP と PE それぞれの定量分析が可能であった。木粉由来の吸収バンドとして 1033cm^{-1} を選択した場合には，木粉/PP 吸収バンド高さ比の

図7 検定用 WPC の DSC 曲線

Figure 7 DSC cooling and heating curves for the verification WPC.

注 木粉率47%，プラスチック率（PP 率+PE 率）34%，添加剤率：19%

Note Wood contents : 47%, Plastic (PP+PE) contents : 34%, Additives contents : 19%

図8 検定用 WPC の IR スペクトル

Figure 8 Infrared spectra of WPCs with various wood/PE ratios.

注 木粉率47%，プラスチック率（PP 率+PE 率）34%，添加剤率：19%

Note Wood contents : 47%, Plastic (PP+PE) contents : 34%, Additives contents : 19%

平均値が1.31, 木粉/PE 吸収バンド高さ比の平均値が7.00であった。これらの値を回帰式(5), (7)にあてはめて得られた木粉/PP の質量比 (2.12/1.00), 木粉/PE の質量比 (4.34/1.00) から, 木粉/PP/PE の質量比は1.00/0.48/0.25 (木粉/プラスチック質量比=1.00/0.73) と算出された。添加剤率が19%であることを考慮すると, 木粉率とプラスチック率はそれぞれ46.8%, 34.2%と算出された。これらは, 検定用試料の配合 (木粉47%, プラスチック34%) に近い値であった。一方木材由来の吸収バンドとして1509 cm^{-1} を選択した場合には, 木粉/PP 吸収バンド高さ比が1.68, 木粉/PE 吸収バンド高さ比が2.87であった。これらの値を回帰式(6), (8)にあてはめ, 同様の手法で木粉/PP/PE の質量比を求めると1.00/0.62/0.38 (木粉/プラスチック質量比=1.00/1.00) と算出された。木粉率とプラスチック率を算出するとそれぞれ, 40.6%, 40.4%と算出された。これらは, 検定用試料の配合と約6%ずれることが判明した。これは, 吸収バンド高さ比を計算する際に, 1509 cm^{-1} の吸収バンド高さがPP およびPE 由来の吸収バンド高さと比較し, 極端に低いことが原因で誤差が生じた可能性が考えられる。加えて, 隣接している1470 cm^{-1} の吸収バンドの影響を受けている可能性も考えられる。

全ての算出結果を表2にまとめた。DSC 分析

と FTIR-ATR 分析により得られた検量線からそれぞれ算出した PP 率には大きな違いは認められなかった。一方, PE 率については分析方法の違いにより大きく異なることが示された。この原因に関しては, FTIR-ATR 分析が木材およびプラスチックの成分濃度に比例する吸収バンド高さの比を定量的指標に用いているのに対し, DSC 分析においてはプラスチックのみの融解, 再結晶化の際の熱流変化量から熱流ピーク面積を求め, 定量的指標として用いていることから, DSC による定量分析結果が, プラスチックの分子構造や結晶状態の変化の影響を受けた可能性が考えられる。PE には低密度 PE, 高密度 PE, 直鎖状低密度 PE 等, 様々な分子構造のものが市販されており, 一般には分岐の多い低密度 PE が分岐の少ない高密度 PE と比較して結晶性が低いことから, DSC 分析における熱流ピーク面積が小さくなることが知られている¹⁵⁾。一方, PP に関しては, PE などと共重合したタイプも一部市場に流通しているが, PE と比較して分子構造の多様性が低いため, 今回の DSC 分析には大きな影響が見られなかったと考えられる。一般に, リサイクルプラスチックは様々な分子構造を含んでいる可能性があることから, これを原料とする WPC の木粉率およびプラスチック率の定量分析を行う際には, 本稿の分析結果のように, プラスチックの分

表2 検量線から算出した検定用 WPC の木粉率およびプラスチック率

Table 2 Wood and plastic contents in the verification WPCs calculated by using calibration curves.

	木粉率 Wood flour contents (%)	プラスチック率 Plastic contents (%)	PP 率 PP contents (%)	PE 率 PE contents (%)
配合 prescription	47	34	—	—
DSC ΔH_m	59.2	21.8	20.5	1.3
DSC ΔH_c	56.0	25.0	24.8	0.2
IR1033	46.8	34.2	22.7	11.5
IR1509	40.6	40.4	25.1	15.3

DSC ΔH_m : ΔH_m 測定から得られた検量線(1), (3)を用いた場合

DSC ΔH_c : ΔH_c 測定から得られた検量線(2), (4)を用いた場合

IR1033 : 木材由来の吸収バンドとして1033 cm^{-1} を選択した場合の検量線(5), (7)を用いた場合

IR1509 : 木材由来の吸収バンドとして1509 cm^{-1} を選択した場合の検量線(6), (8)を用いた場合

DSC ΔH_m : Values calculated by using calibration curves (1), (3) from ΔH_m values.

DSC ΔH_c : Values calculated by using calibration curves (2), (4) from ΔH_c values.

IR1033 : Values calculated by using calibration curves (5), (7) when 1033 cm^{-1} was chosen as the IR band of wood.

IR1509 : Values calculated by using calibration curves (6), (8) when 1509 cm^{-1} was chosen as the IR band of wood.

子構造の影響を受けにくい FTIR-ATR 法のほうが良好な結果を示す場合があると考えられる。

その他、DSC 分析に影響を及ぼす要因として、添加剤の影響が考えられる。例えば、WPC に無水マレイン酸系相溶化剤を添加することにより WPC 中の PE 分子鎖が拘束され、DSC 分析に影響を及ぼすことが予想される¹⁶⁾。今後、DSC 法による分析精度を高めるためには、様々なプラスチック原料を用いた WPC 試料に対して本稿の定量分析法を適用し、PP、PE の様々な分子構造や各種添加剤の存在が検量線の精度に及ぼす影響を比較、解析するなどにより、市販の多様なプラスチック原料に対応するための知見を集積する必要がある。

4. 結論

簡便な手法で WPC 中の木材およびプラスチックを定量することを目的として、DSC 法、FTIR-ATR 法による定量分析を試みた。前報⁴⁾で得られた PP を用いた WPC の DSC および FTIR-ATR の分析結果に加え、本研究により得られた PE を用いた WPC の分析結果から、木材と PP または PE の混合物においても WPC 中の木粉率およびプラスチック率を定量できることが示唆された。そこで、この分析法が、プラスチック原料として PP と PE 混合物を用いた場合にも適用できるか否かを検証するため、検定用 WPC の分析を行った。その結果、プラスチック原料が PP と PE 混合物であっても、添加剤の配合割合が既知の場合には、FTIR-ATR を用いた定量分析により WPC 中の木粉率やプラスチック率を比較的正確に定量できることが示された。一方、DSC 分析において実際の配合割合とずれが生じたが、その原因として、例えば、プラスチックの分子構造の違いによる影響などが考えられる。したがって、DSC 法による分析精度を高めるには、様々な分子構造のプラスチックと木粉、および添加剤を様々な割合で配合した WPC 試料に対して定量分析を行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金（基盤(C)、課題番号：26450243）によって実施した。

引用文献

- 1) 木口実, 小林正彦: 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 (2012).
- 2) 木口実, 片岡厚, 松永浩史, 桃原郁夫, 川元スミレ, 大友祐晋: 木粉・プラスチック複合材 (混練型 WPC) の耐久性(1)耐水性の及ぼす木粉含有率の影響, 木材保存, **36**, 52-58 (2010).
- 3) 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: 木粉・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 (2010).
- 4) 小林正彦, 久保智史, 木口実, 片岡厚, 松永正弘, 川元スミレ, 大友祐晋: 示差走査熱量法および赤外分光分析法による木材-プラスチック複合材料 (混練型 WPC) の定量分析, 木材保存, **39**, 7-15 (2013).
- 5) Adhikary, K.B., Pang S., Staiger M.P.: Effects of the Accelerated Freeze-Thaw Cycling on Physical and Mechanical Properties of Wood Flour-recycled Thermoplastic Composites, *Polymer Composites*, **30**, 185-194 (2010).
- 6) Harrington K.J., Higgins H.G., Michell A.J.: Infrared spectra of *Eucalyptus regnans* F. Muell. and *Pinus radiata* D. Don, *Holzforschung*, **18**, 108-113 (1964).
- 7) Faix O.: Classification of lignin from different botanical origins by FT-IR spectroscopy, *Holzforschung*, **45**, 21-27 (1991).
- 8) Lei Y., Wu Q., Clemons C.M., Yao F., Xu Y.J.: Influence of nanoclay on properties of HDPE/wood composites, *Journal of Applied Polymer Science*, **106**, 3958-3966 (2007).
- 9) Lafia-Araga R.A., Hassan A., Yahya R., Rahman N.A., Hornsby P.R., Heidarian J.: Thermal and mechanical properties of treated and untreated Red Balau (*Shorea dipterocarpaceae*)/LDPE composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **31**, 215-224 (2012).
- 10) Krimm, S., Liang, C.Y., Sutherland, G.B.B.M.: Infrared Spectra of High Polymers. 2. Polyethylene, *Journal of Chemical Physics*, **25**, 549-562 (1956).
- 11) Luongo, J.P.: Infrared Study of Oxygenated Groups Formed in Polyethylene during Oxidation, *Journal of Polymer Science*, **42**, 139-150 (1960).
- 12) Mourad A.H.I., Akkad R.O., Soliman A.A., Madkour T.M.: Characterisation of thermally treated and untreated polyethylene-polypro-

- pylene blends using DSC, TGA and IR techniques, *Plastics, Rubber and Composites*, **38**, 265-278 (2009).
- 13) Luongo J.P. : Infrared study of polypropylene, *Journal of Applied Polymer Science*, **3**, 302-309 (1960).
- 14) M.P. McDonald M.P., Ward I.M. : The assignment of the infra-red absorption bands and the measurement of tacticity in polypropylene, *Polymer*, **2**, 341-355 (1961).
- 15) 田中克史, 小山清人, 長原直司, 太田隆, 篠原正之 : 低密度ポリエチレン/高密度ポリエチレンブレンド系優待の伸張流動, 繊維学会誌, **48**, 521-526 (1992).
- 16) Sewada K., Maiti S.N. : Crystallization and Melting Behaviour of HDPE in HDPE/Teak Wood Flour Composites and Their Correlation with Mechanical Properties, *Journal of Applied Polymer Science*, **118**, 2264-2275 (2010)
(2014.7.22受付)