<総説>

(受理:平成22年4月2日)

木材とプラスチックの複合化について
Composite of Wood and Plastic

伊藤 弘和*・高谷 政広**
Hirokazu ITO and Masahiro TAKATANI

1. はじめに

木材とプラスチックを複合化した素材をウッドプラスチックと呼ぶが、このウッドプラスチックは、熱硬化性樹脂と複合した含浸型ウッドプラスチックと熱可塑性樹脂と複合した混練型ウッドプラスチックに大別される。本総説では、近年デッキ材等のエクステリア用途を中心に拡大している混練型ウッドプラスチックについて述べる。混練型ウッドプラスチック（以降ウッドプラスチックと呼ぶ）は、カテゴリーとして、タルクや炭酸カルシウム等の無機フィラーを充填したフィラー充填プラスチックに分類されるが、一般的な無機フィラーに比べてフィラー充填率を高くできることが特徴の一つとなっている。実際、欧州中心に木粉充填率80%以上のマット成型製品実績が、自動車用途に用いられている。しかしながら、汎用的なウッドプラスチック用途では、充填率50%程度が中心である。一方、木粉は元来繊維系材料であるが、ウッドプラスチック用途において、この繊維特性はほとんど活かされていない。そこで、本総説では、冒頭でウッドプラスチックの概要を解説するが、主題は、ウッドプラスチックのさらなる可能性を秘めた特性である高充填、繊維特性を利用した新たなウッドプラスチックについて述べる。

2. ウッドプラスチックの概要

2.1 ウッドプラスチックの種類

ウッドプラスチックは、木粉の充填率で大きく3タイプ

木粉 充填率	25%	50%	75%	100%
	低充填	中充填	高充填	
ポイント	◆プラスチック ・意匠性付与 ・増量効果 ※この領域はWPC とあまり変わらない	◆中間 ＜対木材＞ ・耐久性向上 ＜対プラスチック＞ ・機械特性向上	◆木材 ・形状が自由 ・寸法安定 ・マテリアルリサイ クル	

図1 混練型ウッドプラスチックの分類

に分類される（図1）。充填率が10%前後のウッドプラスチックは、プラスチック製品に木質意匠感を付与するため木粉を添加しており、主に建築材料を中心に木目調のプラスチック製品として広く利用されている。充填率が50%前後のウッドプラスチックは、木質感の意匠付与効果もあるが、耐水性等の耐久性能が必要なエクステリアに代表される屋外の用途に利用されており、ウッドプラスチックに

伊藤 弘和

略歴：1989年岐阜大学農学研究科修士課程修了後、大阪セメント（現住友大阪セメント）にて機能性建築材料の開発、1998年よりヤマハリビングテックにて木質建材およびウッドプラスチックの開発に従事、現在に至る。

趣味：音楽

高谷 政広

略歴：京都大学大学院農学研究科林産工学専攻博士課程満期退学後、近畿大学農学部助手、講師、准教授を経て2009年より教授、現在に至る。

趣味：プロ野球

* ヤマハリビングテック (株) 事業企画推進部
静岡県浜松市西区西山町 1370 番地 〒432-8001
Yamaha Livingtec Co. Ltd
1370, Nishiyama-cho, Nishi-ku, Hamamatsu, Shizuoka
432-8001, Japan

** 近畿大学
奈良県奈良市中町 3327-204 〒631-8505
Kinki Univ.
3327-204, Naka-machi, Nara 631-8505, Japan

おいては、最も汎用なタイプである。また、充填率が70%を超えるウッドプラスチックは、自由な形状に成形できる効果を活かし、木材の代替として、注目を集めており、国内においても学術機関を中心に研究レベルでは進んでいるものの、まだ拡大的な実用化には至っていない¹⁾。

2.2 ウッドプラスチックの製法

冒頭にも述べたが、ウッドプラスチックはフィラー充填プラスチックのカテゴリーであるため、その製法もほとんど同じである。図2には、製法のフロー図を示す。木粉、プラスチック、混和剤等の原材料を所定の配合でプラスチックの溶融する温度で混合したものをコンパウンド（この工程をコンパウンド化）と言い、一般的にはハンドリング性からペレット形状に加工し、このコンパウンド化したペレットを押出成形や射出成型をして製品を得る。ここで、原料である木粉は一般的な無機フィラーに比べて吸水や吸湿しやすい素材であるため、乾燥工程が不可欠となる。乾燥が不十分な木粉を用いると、成形不良や凝集が生じ、製品性能に影響を及ぼすため、留意すべきである。

図2 混練型ウッドプラスチックの製法フロー図

2.3 ウッドプラスチックの原料

原材料として用いる木粉は、一般的に100~300 μ m程度に粉碎して利用される。前述したが、含水率は重要な因子で、5%以下が望ましいとされている。また、国内においてウッドプラスチックに利用されている樹種は、スギ、ベイツガ、ヒノキ等が中心である。この理由は樹種の適性よりはむしろ、調達の容易さが事由となっている。

木粉は、230℃を超えると著しく変質するため、利用できるプラスチックは融点が200℃以下のオレフィン系プラスチック（ポリエチレン、ポリプロピレン等）、スチレン系プラスチック（ポリスチレンABS等）が一般的で、用途や目標とする性能に合わせて使用されている。しかしながら、短時間であれば変質も少ないので、融点が230℃を超えるプラスチックとの複合化事例もある²⁾。木粉が天然素材である観点から、植物由来のプラスチックとの複合化事例も多く^{3~5)}、期待できる素材であるが、エクステリア用途等建築材料中心の国内用途では、コスト的な課題がある。

木粉は親水性の素材であり、ウッドプラスチックに用いるプラスチックは疎水性であり、この両者は相溶性がない。通常のフィラー充填プラスチックにおいて相溶性のない素

図3 酸変性プラスチックによる木粉の改質

材の複合体は、機械的特性、耐久特性等の様々な特性において効果を発現しないことが周知であり、ウッドプラスチックも同じである。一般的な無機フィラーを用いたフィラー充填プラスチックの場合、無機フィラーにカップリング処理（疎水処理）を実施する。このカップリング処理は、ウッドプラスチックにおける木粉の処理にも有効な手法であるが^{6~9)}、木粉は無機フィラーに比べて見かけ密度が低くかさ高い点や親水基が無機素材に比べ密着してカップリング効率が低い点から、量産性が困難で、ウッドプラスチックでは、酸変性プラスチックを相溶化剤として利用していることが多い。酸変性プラスチックは、ベースプラスチックの一部をマレイン酸等で変性し親水性と疎水性の両極性を付与している。図3に示すように、木粉表面上の親水部分（OH基）に、酸変性部分（図では無水マレイン酸）がエステル結合¹⁰⁾あるいは吸着¹¹⁾し、木粉表面とプラスチックの相溶性を高くすることで改質する相溶化剤である^{12~17)}。

3. 繊維状木粉を用いた高充填ウッドプラスチック

繊維状の木粉（厳密には植物性粉末とすべきであるが以下木粉と呼ぶ）として天然素材では大麻、麻、ケナフ等、加工品ではパルプ等が挙げられ、これら素材でウッドプラスチック化すれば繊維補強効果が期待できる。さらにウッドプラスチックは高充填化が可能であり、繊維状素材が高充填のプラスチック製品として、従来にない新素材が提案できる。しかしながら、この実現には、繊維状木粉のコス

トの問題や、生産性、流動性、凝集等、改善を要する技術的課題は多い。そこでここでは、繊維状木粉高充填ウッドプラスチックに関して、これら課題点も踏まえ特徴を述べる。

3.1 繊維状木粉の均一分散

繊維状木粉高充填ウッドプラスチックにおいて、繊維効果を発現するためには、繊維状木粉をプラスチックへ均一に分散させることが不可欠となる。また、繊維状木粉を高充填で均一分散した場合、繊維状木粉が近接していることから、繊維状木粉同士の相互作用を考慮しなければならない。図4には、繊維状木粉高充填ウッドプラスチックにおいて想定される繊維状木粉の2つの分散状態モデル図を示す。図4(1)は、繊維状木粉が凝集し、その凝集体が分散しているモデル、図4(2)は、繊維状木粉単体が均一に分散しているモデルである。図5には、繊維状木粉として繊維長300 μ mのセルロース繊維を用いポリプロピレンと複合化した場合について、図4に示す分散状態の異なるモデルに相当するコンパウンドのコーンレオメータによる粘弾性を示す。この評価手法は、プラスチックが完全に溶融している温度(210℃)で測定しているため、繊維状木粉相互間の相互作用が確認できる。繊維状木粉の充填量が増すと、相互作用は強くなると予想され、繊維状木粉が均一分散しているコンパウンド(モデル図; 図4(2))では、貯蔵弾性率、スリップに至る強度とも充填量の増加に伴い高くなっている(図5(2))。しかしながら、凝集が認められるコンパウンド(モデル図; 図4(1))では、充填量即ち繊維間相互作用と弾性率の相関関係は認められない(図5(1))。この相互作用には、繊維の絡み合いのような繊維間相互作用が含まれ、実際に繊維長の短い繊維状木粉を用いた場合はこの相互作用の寄与は小さい¹⁸⁾。この絡み合いによる相互作用は、繊維状木粉高充填ウッドプラスチックに特異に発現する現象であり、次項で絡み合いが及ぼす効果を解説する。

3.2 絡み合いによる相互作用の効果

コンパウンドの粘弾性評価結果で絡み合いによる相互作用により弾性率等が増加していることから、このコンパウンドを用いた成形体においても効果は持続すると期待できる。図6には、前述の繊維状木粉が均一分散しているコンパウンド(モデル図; 図4(2))を用いプレス成形した成形体の常態及び吸水曲げ強度を示す。常態の曲げ強度は、繊維状木粉の充填量が増加してもほとんど差がないのに対し、吸水曲げ強度では、充填率が増加するほど吸水による強度低下は顕著になる。ウッドプラスチックにおいて強度を保持している因子はプラスチック成分であり、繊維状木粉の充填量が増加するとプラスチックに依存する強度因子

図4 繊維状木粉高充填ウッドプラスチックにおける繊維状木粉の分散モデル

図5 分散状態の異なる繊維状木粉ウッドプラスチックコンパウンドの粘弾性

- (1) 繊維状木粉が凝集しているコンパウンド,
- (2) 繊維状木粉が均一に分散しているコンパウンド
- ; 繊維状木粉充填量 90%,
- ; 繊維状木粉充填量 80%,
- ▲; 繊維状木粉充填量 70%

図6 相互作用のある繊維状木粉高充填ウッドプラスチックの曲げ強度
■; 常態曲げ強度, □; 吸水曲げ強度

が減少する。また、前述する粘弾性の結果からも明らかのように、繊維状木粉充填量が高くなると絡み合いによる繊維同士の相互作用という新たな強度因子が発現する。したがって、常態の曲げ強度は、繊維状木粉が増加とともに、プラスチック成分から相互作用に強度因子がシフトする。一方、吸水常態での曲げ強度は、相互作用による強度因子が高くなるほど、強度低下が大きくなっている、即ち、相

図7 繊維状木粉高充填ウッドプラスチックの熱膨張

相互作用は、吸水により破壊されている。吸水により破壊される結果から、この絡み合いによる相互作用を保持している因子は水素結合であることが示唆される¹⁹⁾。言い換えれば、絡み合いによる相互作用は、補強効果はあるものの耐水を必要とする用途展開には課題があると言える。

一方、図7には、繊維状木粉が均一に分散している成形体において、絡み合いによる相互作用が発現する繊維状木粉（繊維長 300 μm）と相互作用の寄与が小さい短い繊維状木粉（繊維長 120 μm）を用いたプレス成形体の熱膨張を示す。絡み合いによる相互作用の発現が熱膨張の低下に効果的に働いている²⁰⁾。即ち、絡み合いは熱に安定であり、ウッドプラスチックの熱膨張抑制に利用できる技術である。

3.3 繊維状木粉高充填ウッドプラスチックの流動性

繊維状木粉高充填ウッドプラスチックを成形するにあたり、流動性は大きなポイントとなる。ウッドプラスチックにおいて、これはフィラー充填プラスチック一般に共通するが、プラスチック成分は流動に寄与しており、プラスチック成分の少ない繊維状木粉高充填ウッドプラスチックで流動性が低いことは明らかである。図8には、繊維状木粉を用いてコンパウンド化した場合のスクリー1回転あたりの単位吐出量を示す。繊維状木粉充填量が高くなるほど単位吐出量即ち生産性が低くなっている。これは、プラスチック成分が少なくなることによる流動性の低下もあるが、繊維状木粉は繊維間に空隙を多く巻き込み見掛け密度が小さくなっていることが要因となっている。コンパウンドの生産性においてこの点は大きな課題となるが、一旦コンパウンド化すれば減溶化されるため、繊維状木粉の見掛け密度は無視できる。図9には、繊維状木粉高充填ウッドプラスチックコンパウンドのMFR (Melt Flow Rate)を示す。MFRはプラスチックの流動性を測定する汎用な試験方法 (JIS K 7210) であるが、繊維状木粉高充填ウッドプラスチックは流動性が低いため、ここでは試験条件を変更して測定している (ダイス径 6mm, 荷重 100N)。繊維状木粉充填量が高くなると流動性は低くなっており、表1に示す成形圧力も高くなり、生産性が低くなっている結果と一致する。しかしながら、前述した繊維間相互作用を有するコンパウンドにおいては、チキソトロピー性が発現し、流動性が変化する可能性がある²¹⁾。図10には、相互作用が発現

図8 繊維状木粉高充填ウッドプラスチックコンパウンドの生産性

図9 繊維状木粉高充填ウッドプラスチックコンパウンドのMFR

表1 繊維状木粉充填量と成形圧力

繊維状木粉 充填量 (%)	押出成形圧 (MPa)	射出成型圧 (MPa)
70	4.8	21.5
80	6.1	28.8

図10 相互作用の異なる繊維状木粉高充填ウッドプラスチックコンパウンドを用いた押出成形の生産性
 ■相互作用の寄与が小さいコンパウンド (繊維状木粉繊維長 120 μm), □相互作用の寄与が大きいコンパウンド (繊維状木粉繊維長 300 μm)

しているコンパウンド (モデル図; 図4(2)) と発現していないコンパウンド (モデル図; 図4(1)) で、押出成形を実施し、その成形速度を変化させたときの単位吐出量を比較している。相互作用が発現していないコンパウンド (モデル図; 図4(1)) は成形速度が増加しても単位吐出量に変化がないが、相互作用が発現しているコンパウンド (モデル図; 図4(2)) では、単位吐出量が増加する。これ

は、成形速度が増加し、コンパウンドにかかるせん断力が高くなることで、繊維状木粉が配向し流動性が変化したことを示している。このチキソトロピー性の利用は元来流動性が低い繊維状木粉高充填ウッドプラスチックにおいて、活用できる技術である。

4. 繊維状木粉高充填ウッドプラスチック実用化に向けた技術動向

前項で述べてきた通り、繊維状木粉高充填ウッドプラスチックは、従来のプラスチック素材や木材にはない様々な特性を有している反面、実用化するためには、生産性、凝集、耐水性、コスト等改善しなければならない課題もある。そこで、以下には、これらの対策となる新しい技術をいくつか紹介する。

4.1 新たなコンパウンド化手法

繊維状木粉を高充填でプラスチックと複合化する場合、繊維状木粉の凝集は最も懸念されるマイナス因子である。また、生じた強固な凝集物を再分散することはほとんど不可能である。このため、コンパウンド工程は最も重要な工程となる。コンパウンド工程において凝集を防止するためには、繊維状木粉を十分乾燥させ、ゆっくりプラスチックとコンパウンド化すれば実現できる。しかしながら、コスト面から見ると、これは採用できない手法である。そこで、この凝集を逆手に取った新たなコンパウンド手法が提案されている²²⁾。図11に、工程図を示す。この手法のポイントは、繊維状木粉とプラスチックを2回コンパウンド化することにある。1回目のコンパウンド化では、繊維状木粉を乾燥せず、一旦凝集させる。この際に、ほとんど圧力をかけずコンパウンド化するので、生じる凝集物は強固な凝集ではなく、粉碎により容易に解砕できる。この粉碎物を再度コンパウンド化することにより均一に繊維状木粉が分散したコンパウンドとなる。一方、2回コンパウンド化することで工程が増加し、生産性の低下が懸念されるが、1回目のコンパウンド工程は、高い分散性や混練性を要求されずさらに圧力をかけないので、通常のコンパウンド設備の2倍以上の処理条件で稼働でき、2回目のコンパウンド

図11 コンパウンド手法のフロー図比較

は1/3程度に減溶化されているので、通常手法の3倍近い生産性を確保できる。結果的に生産性は従来手法より高くなっている。

4.2 経済性のある繊維状木粉

繊維状木粉には大麻、ケナフ等々あるが、コスト的な面で利用範囲に限界がある。ここで、国内で安価に調達できる繊維状木粉として、MDF 粉碎物が挙げられる。MDF は、建築材料に広く利用されているボードであるが、定尺サイズであるため、廃材が発生し、この廃材を粉碎すれば容易に繊維状木粉が得られる。しかしながら、MDF は、接着剤を含有しており、ウッドプラスチック化においてこの接着剤由来の気化成分が成形性等へ影響を及ぼし、従来技術では実用化できない。逆にいえば、気化成分をコンパウンド化時点で除去すれば、繊維状木粉として利用できる。例えば、前述したコンパウンド手法において、2回コンパウンド化により加熱工程で気化成分を除去しウッドプラスチック化した場合、繊維状木粉であるMDF 粉末の繊維効果が発現し、成形体の曲げ強度は20%以上向上する²³⁾。このようにMDF 廃材は、気化成分の問題を改善すれば、繊維補強効果を有する優れた繊維状木粉であり、かつ安価に調達できる材料であるため、国内におけるウッドプラスチック用繊維状木粉の一つとなり得る。さらに、マテリアル利用方法が少ないMDF 廃材のカスケード型利用法として提案できる用途である。

4.3 流動性の向上

繊維状木粉が高充填のウッドプラスチックにおいて、流動性が低い点は前述した。この改善方法として球状素材を添加して、この球状効果（ベアリング効果）により流動性を改善する手法がある²⁴⁾。図12には球状素材として50 μ m程度の球状シリカであるフライアッシュを繊維状木粉高充填ウッドプラスチックに添加した時のMFR（流動性）変化を示す。フライアッシュ添加量の増加とともに、ベアリング効果により流動性が改善されている。さらに、ここでは詳細を省略するが、耐水性も改善されている。これは、フライアッシュの添加により成形体が緻密化され、吸水性が低くなったためである。フライアッシュは、石炭火力発

図12 フライアッシュ添加量とMFR

電所において石炭を燃焼した際の焼却灰で、比較的安価に調達できることから、ウッドプラスチックの添加材としては、実用性がある。

5. 環境素材としてのウッドプラスチック

バイオマス素材は、国内に豊富にある資源であるにもかかわらず、この有効利用が拡大していないのは周知である。この理由の一つとして、収集等のコスト面や、アウトプットである有効利用法の付加価値用途が少ない点が挙げられる。この点、ウッドプラスチックは、付加価値型素材である。加えて、通常 100~300 μm の木粉として利用するため、バイオマスのカスケード型利用法として、サーマル利用に至る前に新たなマテリアル利用の階層を付与することが可能となる。前述した MDF 廃材利用もこの一例である。近年、国内の森林活用として、自治体を中心に検討されている間伐材の有効利用に対しても、ウッドプラスチック用途は、サーマル利用が中心であるチップサイズ以下のバイオマスに付加価値型ビジネスを提案でき、採算性のある森林循環型モデル構築に貢献できる。実際既に、様々な行政施策において、ウッドプラスチックは、具現化事例として挙げられている。また、ウッドプラスチック素材は、それ自体プラスチック同様マテリアルリサイクルできる。現状では、製造ラインにおいて、端材等の工程内リサイクルは実施しているものの、市販に流通しているウッドプラスチックを回収してマテリアルリサイクルしている事例はほとんどない。これは、汎用のプラスチックに比べ市場流通量が少ない点や、ライフサイクルが長い用途が中心である等の事由によるが、環境に対する国民意識の高まりから、近未来的には、マテリアルリサイクルできる点は、大きな利点になる。一方、木粉を繊維化し、高充填化することで、繊維間相互作用と言う従来のフィラー充填プラスチックにはない特性が発現している。この高充填領域におけるプラスチックの役割は、強度メンバーよりはむしろ成形するための流動性付与の位置付けが強く、機能面で利用範囲に制約のある容器リサイクルプラスチックの活用も可能となる。

5. まとめ

本総説では、一般的なウッドプラスチックの特性から、ウッドプラスチック素材でしか実現できない繊維状素材高充填化技術を中心に紹介したが、ウッドプラスチックはこれ以外にも様々な拡張性を有した素材である。しかしながら、新規素材であるが故に、実用化するためにはクリアしなければならない課題点が多いことも事実で、既存のプラスチックや木材に比べればその普及率は小さい。ウッドプ

ラスチックの普及拡大に向けた取り組みは、国内外で様々な研究がなされており、今回紹介した繊維状木粉高充填ウッドプラスチックもその一つである。最後に、接着剤分野におけるフィラー充填技術は、ウッドプラスチックにおいて参考にできる研究事例が多く、同様に、ウッドプラスチックの研究事例も接着剤分野で活かすことができれば、双方の技術の相乗的な発展に寄与することが期待できる。

文 献

- 1) 日本木材加工技術協会木材・プラスチック複合材部会編，“ウッドプラスチックのしおり”，日本木材加工技術協会関西支部，6 (2005)。
- 2) A. A. Klyosov, “Wood-Plastic Composites”, John Wiley & Sone, 62 (2007)。
- 3) K. Ikeda, M. Takatani, K. Sakamoto, T. Okamoto, *Holzforchung*, **62**, 154 (2008)。
- 4) S. Lee, S. Wang, Y. Teramoto, *J. Applied Polymer Sci.*, **108**, 870 (2008)。
- 5) V. P. Cyras, S. Iannace, J. M. Kenny, *Polymer Composites*, **22**, 104 (2001)。
- 6) F. M. B. Coutinho, T. H. S. Costa, D. L. Carvalho, *J. Applied Polymer Sci.*, **65**, 1227 (1997)。
- 7) H. Isamil, L. Megal, *Polymer Plastics Technology and Engineering*, **40**, 463 (2001)。
- 8) H. P. S. A. Khalil, H. Ismail, *Polymer Testing*, **20**, 65 (2001)。
- 9) H. Ismail, H. P. S. A. Khalil, *Polymer Testing*, **20**, 33 (2001)。
- 10) M. Kazayawako, J. J. Balatinecz, R. T. Woodhams, *J. Applied Polymer Sci.*, **66**, 1163 (1997)。
- 11) J. Simonsen, R. Jacobsen, R. Rowell, *J. Applied Polymer Sci.*, **68**, 1567 (1998)。
- 12) C. Xiaoya, G. Qipeng, M. Yongli, *J. Applied Polymer Sci.*, **69**, 1891 (1998)。
- 13) A. K. Bledzki, O. Faruk, M. Huque, *Polymer Plastics Technology and Engineering*, **41**, 435 (2002)。
- 14) A. K. Rana, B. C. Mitra, A. N. Banerjee, *J. Applied Polymer Sci.*, **7**, 531 (1999)。
- 15) H. D. Rozman, G. B. Penng, *J. Applied Polymer Sci.*, **70**, 2647 (1998)。
- 16) W. Qiu, T. Endo, T. Hirotsu, *J. Applied Polymer Sci.*, **10**, 4 (2006)。
- 17) W. Qiu, F. Zhang, T. Endo, T. Hirotsu, *Polymer Composites*, **26**, 3830 (2005)。
- 18) H. Ito, R. Kumari, M. Takatani, T. Okamoto, *Polymer Eng. Sci.*, **48**, 168 (2008)。
- 19) H. Ito, H. Hattori, I. Fujiyoshi, R. Kumari, M. Uchiyama, T. Okamoto, M. Takatani, *Proceeding of the 2nd International Cellulose Conference 2007*, 66 (2007)。
- 20) H. Ito, H. Hattori, T. Okamoto, M. Takatani, *J. Wood Chemical Technology*, in press (2009)。
- 21) 伊藤弘和，服部英広，岡本忠，高谷政広，*材料*，**58**, 292 (2009)。
- 22) 特許第 3892019 号。
- 23) 伊藤弘和，服部英広，岡本忠，高谷政広，*木材工業*，**64**, 268 (2009)。
- 24) H. Ito, H. Hattori, T. Okamoto, M. Takatani, *J. wood chemical Technology*, in press (2009)。