

紙を用いた繊維強化技術による プラスチックごみ問題解決への取り組み

Building a Solution to the Plastic Waste Problem With Paper Fibre Reinforcement Technology

原 英和*
Hidekazu Hara

〈概要〉

食品の包装などに用いられる複層フィルムはリサイクルされることなく、焼却、埋立処分されるか、もしくは流出しプラスチックごみ問題の元凶となっている。このような複層フィルムに対し、当社で開発した紙による繊維強化技術 (APFU™; Advanced Paper Fibre Upcycling Technology) を適用することで、高強度プラスチック材料へとアップサイクルすることに成功した。この材料を用いて、射出成形により当社製品やボールペンを、多層ブロー成形によりボトルを成形することができ、さらに3Dプリンタの材料に用いることも可能であった。またライフサイクルアセスメント計算により焼却に比べ温室効果ガスの排出量が大幅に抑えられることも確認した。プラスチックごみによる海洋汚染の防止ならびに気候変動の抑制に貢献するため、現在は本技術の実用化へ向け、日欧の企業、自治体、アライアンス団体と協働し、実証実験やフィージビリティスタディを進めている。

1. はじめに

1.1 プラスチックごみ問題

私たちの身の回りにはプラスチック製品があふれている。プラスチックは軽く、丈夫で、錆びず、腐らず、更に安価といった多くの優れた特長を有しており、今やプラスチックのない生活は想像することができない。実際、世界のプラスチック生産量は近年ますます増加しており、工業生産が始まった1950年から2020年までの累計生産量のうちの半分が直近15年間だけで生産されており、2020年の年間生産量は367 Mtonに達している¹⁾。生産されるプラスチック製品の中で最も多い約4割を占めるのは、食品やトイレタリー製品などの容器包装に代表される使い捨てプラスチック (Single-Use Plastic) である^{2), 3)}。特に食品用のプラスチック容器包装は、安全衛生性の維持、中身製品の品質の保持、輸送効率の高さなど優れた機能を有しフードロス削減にも大きく貢献している。

しかしこのような使い捨てプラスチック使用量の増大により、ごみもますます増加している。プラスチック容器包装ごみのうちリサイクルされているのはわずか14%にとどまり (2015年)²⁾、残りは、埋立、焼却によって処理されるか、もしくは流出している。これにより、温室効果ガス (GHG) の排出、海洋汚染、土壌・水質汚染などの環境問題が引き起こされており、中でもプラスチックごみの流出による海洋汚染は深刻である。プラスチックは通常自然環境においては完全に分解するのに

数百年かかると言われており、2050年までに海洋中に存在するプラスチックの量が魚の量を上回るという予測が出されるほどである⁴⁾。海洋に生息する動物がプラスチックの小片を餌と間違えて飲み込み、それを食する陸上動物や人間にも取り込まれ、海のみならず、陸上動物の生態系破壊も懸念されている。このようにプラスチック容器包装には大きなメリットが存在する一方で、発生する大量のごみが適切に処理されないことにより大きな問題を引き起こしている。

1.2 プラスチックごみを取り巻く状況

このようなプラスチックごみ問題に対し世界規模で政策や条例などを定める動きが活発化している。2018年の中国の廃プラスチックの禁輸、2019年のバーゼル条約改正 (2021年施行) に続き、東南アジアなど発展途上国各国も今後廃プラスチックを輸入禁止とする方針であり、廃プラスチックは排出地域での処理が求められるようになる。欧州では2018年に欧州プラスチック戦略が発表され、2021年にはプラスチック税が導入された。プラスチック税の課税対象はリサイクルされないプラスチック容器包装である。これらの動きから、今後引き続きプラスチック容器包装を使い続けるのであれば、そのリサイクルの重要性がますます高くなる。

1.3 プラスチック容器包装のリサイクル

プラスチック容器包装のリサイクル率が低い理由の一つは、その多くが複層フィルムであることにある。複層フィルムは化学的性質や融点異なる異種材料が積層されており、容易に分離できず、また、その構成は内容物によって多岐にわたる。そのことが材料としてのリサイクルを困難にしており (3.1で詳述する)、回収されても焼却もしくは埋立処分するしかなくなっ

* 営業統括本部 ソーシャルデザイン統括部
欧州リサイクル事業推進チーム

ている。焼却時に発生する熱エネルギーを利用する“エネルギーリカバリー”をリサイクルと呼ぶかについては日本と欧州とで隔たりがあるが、温室効果ガス排出抑制のため化石燃料から再生可能エネルギーへの転換が叫ばれる中では、リサイクルと呼ぶのは難しくなるだろう。

一方近年、単一材料からなるPETボトルは、解重合(重合体を分解して単量体にすること)により原材料に戻し、それを再度重合してPETボトルへ再生するケミカルリサイクルの実用化が始まっている。異種材料からなる複層フィルムに対しても熱分解による油化、ガス化といったケミカルリサイクルが検討されているものの、技術開発の途上であり、その環境への影響についてもさらなるデータの蓄積が必要とされている^{5),6)}。

このようにプラスチックごみ問題を引き起こしている要因の一つは、複層フィルムのリサイクルが困難なことにある。

2. 紙(古紙)を用いた繊維強化技術

当社では紙によりプラスチックを繊維強化する技術を開発してきた⁷⁾。紙はセルロース繊維が絡み合っていてきている。紙とプラスチックを熔融混練すると、通常、紙はある程度粉砕されるものの、セルロース繊維同士が絡み合ったままプラスチック中に分散され異物のような状態で存在する。一方当社の技術では、ひとつのプロセスの中で紙をセルロース繊維にほぐしながら熔融混練し、セルロース繊維をプラスチック中に分散させ、セルロース繊維強化プラスチックを作製できる。古河電工ではこの技術をAPFU(Advanced Paper Fibre Upcycling Technology)と名付けている(図1)。APFUのプロセス概要を図2に示す。紙は新紙である必要はなく古紙を用いることもできる。さらに



UPCYCLING TECHNOLOGY

図1 APFU®のロゴマーク
APFU® logo.

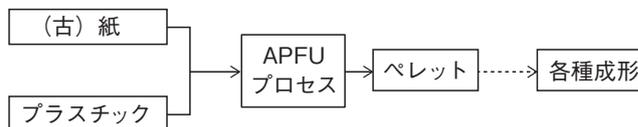


図2 紙による繊維強化技術(APFU)のプロセス概要
Process flow of the APFU.

酒類や野菜ジュースに使用されるアルミ付紙パックなどのアルミラミネート紙を用いることもできる。このようなラミネート紙は紙と分類されるものの、古紙リサイクルの過程においてポリエチレンフィルムを主成分とする残渣が発生するため、プラスチックごみの側面がある。

APFUにより低密度ポリエチレン(LDPE, ラミネートグレード)、高密度ポリエチレン(HDPE, 射出成形グレード)、ポリプロピレン(PP, ブロックポリプロピレン, 射出成形グレード)をそれぞれアルミラミネート紙(アルミ付紙パック)で強化した材料の引張強さを図3~図5に示す。試験片は射出成形により作製した。いずれも紙の添加量増加に伴って引張強さが上昇し、プラスチック単体の強度の2~3倍へと強化することがで

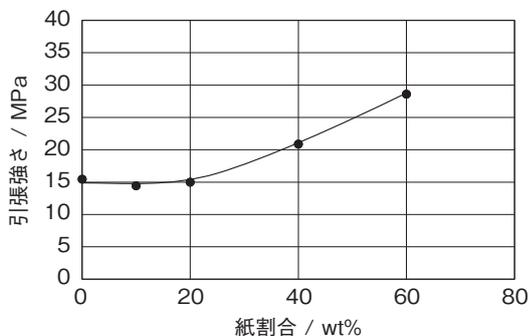


図3 アルミラミネート紙配合によるLDPEの引張強さ
Tensile strength of LDPE when reinforced with Al-laminated paper.

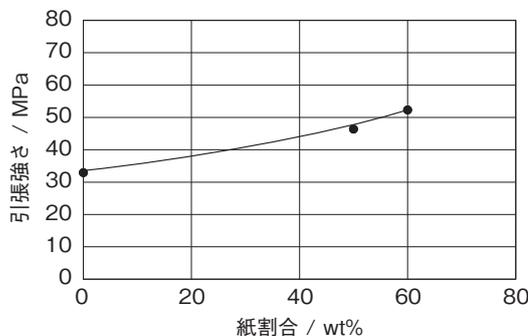


図5 アルミラミネート紙配合によるPPの引張強さ
Tensile strength of PP when reinforced with Al-laminated paper.

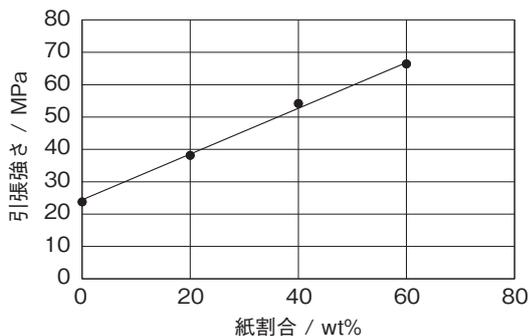


図4 アルミラミネート紙配合によるHDPEの引張強さ
Tensile strength of HDPE when reinforced with Al-laminated paper.

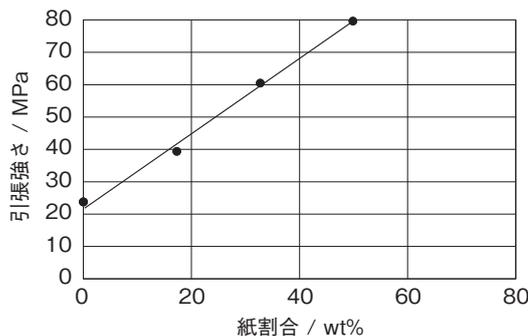


図6 オフィスペーパー配合によるHDPEの引張強さ
Tensile strength of HDPE when reinforced with office paper.

きる。このときアルミニウム箔は細かく破碎されプラスチック中に分散されて存在する。また、アルミラミネート紙の代わりにオフィスペーパーを用いてHDPEを強化するとさらに強度が上昇する。これはオフィスペーパーにはアルミラミネート紙のようにLDPEやアルミニウム箔が含まれていないことによる。その引張強さを図6に示す。引張強さは最大でおよそ80 MPaに達し、これはガラス繊維強化樹脂に匹敵するレベルである。

このように、古河電工で開発したAPFU、紙による繊維強化技術はいずれのポリオレフィンも高強度化が可能である。

3. APFUによる複層フィルムのリサイクル

3.1 複層フィルムと材料リサイクルの難しさ

複層フィルムは一般に、LDPEもしくはPPといったポリオレフィンを主成分とし、PETやポリアミド(PA)、エチレンービニルアルコール共重合体(EVOH)、アルミニウム(Al)箔、紙といった異種材料が積層された構成である。これをフィルム用の材料としてリサイクルするためには、主成分以外のPETやPAといった異物を完全に除去することが必要となるが、これが困難である。また除去したPET等が残渣となり、結局プラスチックごみが残る。一方、ある程度の厚みを持つ成形体の材料としてリサイクルするには強度が不足する。これは、フィルム用のポリオレフィンには強度が低いものが多く、さらに異種材料が異物として含まれることによる。このような理由により複層フィルムを材料としてリサイクルするのが困難になっている。

3.2 APFUの複層フィルムへの適用

我々は、APFUを複層フィルムに適用して高強度化することができれば、複層フィルムを成形体用の材料としてリサイクルできると考えた。そこで種々の複層フィルムをアルミラミネート紙により繊維強化した材料を作製し、その引張強さを評価した。前項同様評価は射出成形した試験片により行った。表1に今回用いた各複層フィルムの用途とその構成(分析およびメーカー情報からの推定)を、図7に評価結果を示す。複層フィルムに添加したアルミラミネート紙の割合は、フィルムに含まれ

るポリオレフィンの割合も勘案しながら決定したため、それぞれ異なっている。図7からわかるようにいずれの構成の複層フィルムもAPFUによる高強度化が可能であった。なおこのとき、セルロース繊維の分解を抑制するためおよそ200℃を超えない範囲で混練、成形を行った。そのため評価用の試験片には、PETやPAといった融点の高いプラスチックが異物として含まれている。それにも関わらず高強度化が妨げられることはなかった。

3.3 紙により繊維強化された材料の成形

紙で繊維強化された材料は射出成形をはじめとした各種成形法により成形することができる。成形品の例を図8～図13に示す。それぞれの成形品の成形方法および用いた原材料は図の説明の括弧内に記した。射出成形の例として、グリーントラフ®(図8)やエフレックス®用部品であるベルマウス(図9)といった自社製品に加え、ボールペン(図10)やペントレイ(図11)がある。またそれ以外に椅子や事務機の配線カバーを作り当社オフィスで使用している。他に多層ブロー成形によるボトル(図12)、3Dプリンタによる成形体(図13)などがあり、様々な成形に適用することに成功している。

以上のようにAPFUはこれまでリサイクルすることが困難であった複層フィルムを高強度材料へと再生し、機械的強度が要求される部品や構造材へとリサイクルすることを可能とする技術である。

表1 評価に用いた複層フィルムの用途とその構成
Applications and compositions of the multilayer films used for the evaluation.

フィルムの用途	構成(推定)
ハンドソープ詰め替え	LLDPE/Al/PA
柔軟剤詰め替え	LLDPE/VMPET/PA
チョコレート菓子	PET/VMCPP
ポテトチップス	PP/PE/VMPET/PE/PP
冷凍食品	OPP/VMCPP

LLDPE:直鎖状低密度ポリエチレン, VMPET:アルミ蒸着PET, VMCPP:アルミ蒸着無延伸PP, OPP:二軸延伸PP

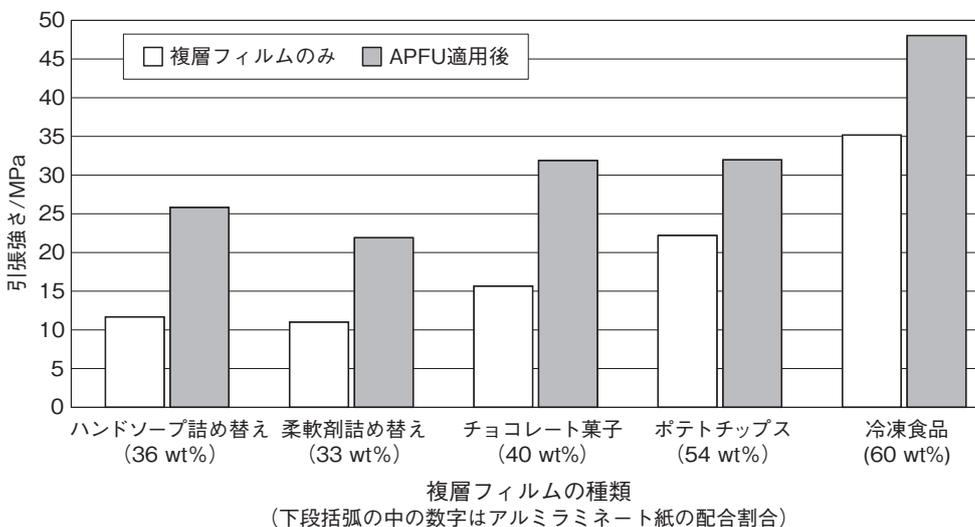


図7 APFU適用前後の複層フィルムの引張強さ
Tensile strength of multilayer plastic films with and without APFU.



図8 グリーントラフ (射出成形; アルミ付紙パックおよびポリアル (アルミ付紙パックからパルプを分離回収した後の残渣))
Green Trough (Injection Molded; Poly-Al and beverage carton. Poly-Al is the residue from the recycling process of beverage cartons).



図9 ベルマウス (射出成形; アルミ付紙パックおよび古河電工にて発生する複層フィルム)
Bell mouth (Injection Molded; Multilayer film waste from Furukawa Electric and beverage cartons).



図10 ボールペン (射出成形; アルミ付紙パックおよび古河電工にて発生する複層フィルム) 協力: 株式会社泰誠
Ball point pen (Injection Molded; Multilayer film waste from Furukawa Electric and beverage cartons).



図11 ペントレイ (射出成形; チョコレート菓子用複層フィルムと紙箱)
Pen tray (Injection Molded; Multilayer film waste from chocolate confectionery and paper box).



図12 複層ボトル (多層ブロー成形; 外装にアルミ付紙パックおよび古河電工にて発生する複層フィルムを使用, 内装はポリエチレン) 協力: 株式会社平和化学工業所
Multilayer bottle (Blow Molded; Outer layer is made from multilayer film waste from Furukawa Electric and beverage cartons. Inner layer is made of PE).



図13 花瓶 (3Dプリンティング; 外装にアルミ付紙パックおよび古河電工にて発生する複層フィルムを使用) 協力: エス.ラボ株式会社
Vase (3D-Printed; Multilayer film waste from Furukawa Electric and beverage cartons).

4. LCA計算による温室効果ガス排出削減貢献量の見積

ここまでAPFUにより、複層フィルムを高強度化材料としてリサイクル可能であることを示した。次に、本技術により複層フィルムをリサイクルすることの温室効果ガス (GHG; Greenhouse Gas) 排出量削減効果について、LCA計算(ライフサイクルアセスメント計算)を行った。

ここでは成形例で示したボールペンを具体例にとり、ボールペンの軸の材料として複層フィルムを紙により強化したりサイクル材料を用いた場合(第一のシステム)と、複層フィルムは焼却処分し、代わりにボールペン軸の材料にバージンPPを用いた場合(第二のシステム)とを比較した(図14)。より具体的には、菓子工場でPET/CPPの複層フィルムおよび紙箱がロス材として排出されるものとし、排出された複層フィルムと紙箱からAPFUによりリサイクル材料を製造し、その材料を用いてボールペンを製造する場合を第一のシステム(図14上)とし、複層フィルムを焼却処分、紙箱はパルプとしてリサイクルした上でボールペンの軸部をバージンPPで製造する場合を第二のシステム(図14下)とし、両者を比較した。

このとき必要な材料の体積、ボールペンの機能、寿命は両材料で同等とし、また、ボールペン成形、使用におけるGHG排出量も両材料で同等とした。また、複層フィルムのリサイクルは量産工程として運転していないため、リサイクル工程において排出されるGHG量は試作運転からの推算値を用いた。また使用後のボールペンは単純焼却されるものとした。その結果、複層フィルムをリサイクルして用いることで、ボールペン200本あたり(複層フィルムと紙箱からなる繊維強化リサイクル材料1kg相当)、GHG排出抑制貢献量として2.5 CO₂-ekgが見込まれる結果が得られた(なお、計算に用いた各原単位はIDEA ver.3.1による)。本LCA計算の詳細については個別に問い合わせいただきたい。

このように、APFUにより従来焼却処分されていた複層フィルムを高強度化材料としてリサイクルし、バージンプラスチックを代替すればGHGの大幅な削減に貢献できる可能性がある。

5. 社外との取り組み

古河電工ではAPFUという新しい技術により複層フィルムをリサイクル可能にすることで、プラスチックごみ問題の解決に寄与できると考えている。しかし、当社のみでこれを実現することは困難であり、プラスチック容器包装のメーカー、それを使った食品など商品のメーカー、その商品を販売する小売業者、私たち消費者、ごみを回収する自治体、リサイクル材メーカー、プラスチック製品メーカー、といったリサイクルバリューチェーン上の企業や団体との協働による社会的イノベーションが必須である。

そのためにはまずは本技術の価値を一人でも多くの方に知ってもらうことが重要と考えている。これに対し、欧州展示会への出展や、CLOMA (Clean Ocean Material Alliance)、CEFLEX (The Circular Economy for Flexible Packaging)への加入などを通じた情報発信およびパートナー企業を募る活動を行っており、また自治体や業界団体等とAPFUによる使い捨てプラスチックのリサイクル事例づくりを進めている。

例えばライオン株式会社と行なった取り組みでは、強度の低いハミガキチューブ端材を、同じくライオン株式会社にて発生する紙ごみで強化し、ボールペン(軸部の材料)としてリサイクルした。本ボールペンは2021年12月に開催されたエコプロ2021にて展示するなど活用いただいている。また、ゼロ・ウェイスト宣言をしている徳島県上勝町およびきせきれい株式会社とSDGsパートナーシップアライアンスを締結し、同町で発生するプラスチックごみのマテリアルリサイクルへ向けた活動を行っている。

この他、プラスチックごみや地球の気候変動に対する問題意識が高い欧州企業と現地でのAPFUによる複層フィルムリサイクルのフェージビリティスタディを進めている。

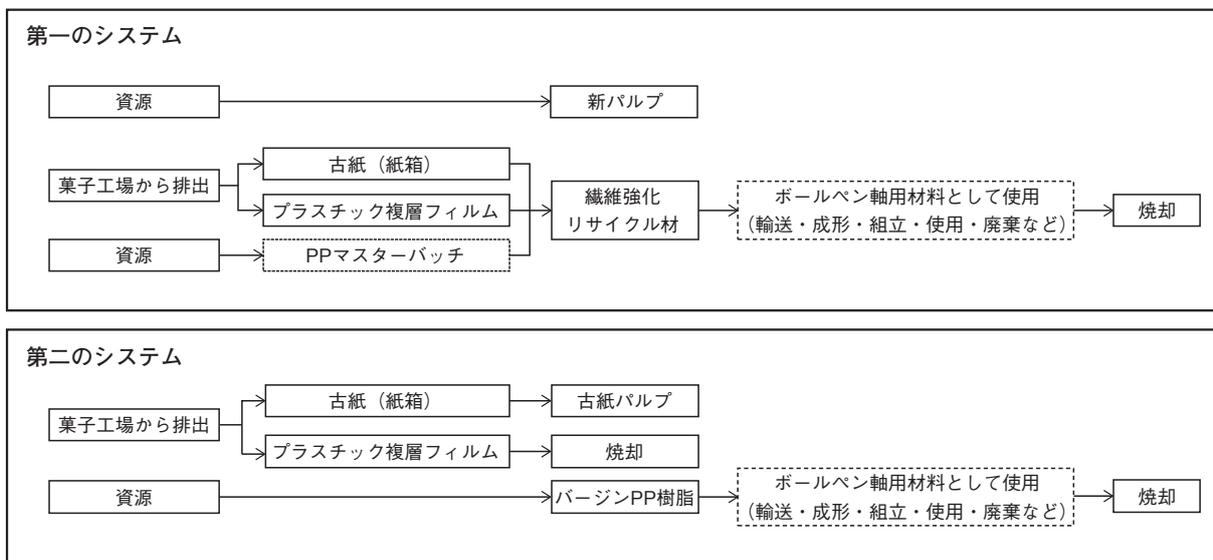


図14 第一のシステムと第二のシステムのシステム境界図(なお破線は今回の計算から除外したもの)
System boundaries of system No.1 and No.2.

6. おわりに

紙による繊維強化技術 (APFU) を適用することで複層フィルムを材料としてリサイクルでき、そのリサイクル材料によりバージンプラスチックを代替することで、GHG排出量削減が可能であることをLCA計算により確認した。

古河電工では、APFUは複層フィルムのリサイクルを可能にし、プラスチックごみ問題の解決に貢献できる技術であると考えている。そのため古河電工ではAPFUを技術ライセンスとして積極的に供与したいと考えており、WIPO GREEN (国連の知財機関 (WIPO) が運営する環境技術に特化したマッチングプラットフォーム) へ登録するとともに、パートナーとなる企業を募っている。

前項で述べたことの繰り返しになるが、これまで焼却するか埋立処理するかしかなかった複層フィルムが材料としてリサイクルされる社会を実現するためには、各ステークホルダーとの協働が欠かせない。古河電工では、引き続きパートナー企業を募り、共にプラスチックごみ問題の解決に向けて進んでいきたいと考えている。

参考文献

- 1) Statista > Chemicals & Resources > Plastic & Rubber > Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2020 (参照日 2021年12月20日).
<https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>
- 2) United Nations Environment Programme "SINGLE-USE PLASTICS: A Roadmap for Sustainability" (2018).
- 3) PLASTICS EUROPE "Plastics - the Facts 2021: An analysis of European plastics production, demand and waste data" (2021).
- 4) WORLD ECONOMIC FORUM "The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics" (2016).
- 5) ZERO WASTE EUROPE "Understanding the Environmental Impacts of Chemical Recycling: Ten concerns with existing life cycle assessments" (2020).
- 6) Camila Távora de Mello Soares, Monica Ek, Emma Östmark, Mikael Gällstedt, Sigbritt Karlsson: "Recycling of multi-material multilayer plastic packaging: Current trends and future scenarios", Resources, Conservation and Recycling, 176, (2022) 105905.
- 7) 原英和, 池内正人, 藪中健太郎 "紙を利用した繊維強化によるプラスチックのリサイクル技術", プラスチックスエージ 11 (2019) 80.