

バイオマス粉体を複合化した 海洋生分解性プラスチック

三宅 仁 アイ-コンポロジー（株） 代表取締役

1 はじめに

2020年10月菅首相が所信表明演説で、「2050年までに日本は温暖化ガスを実質ゼロにする」と宣言した。これに先立つこと8年、2012年ヨーロッパ委員会ECでは、「2050年CO₂排出ゼロを目標に「バイオエコノミー社会」実現のため各国に開発指令」を出していた。2015年のパリ協定の温暖化防止もこの流れのひとつである。日本も欧州に遅れること8年で世界の温暖化ガス排出目標に追いついたことになる。

海に目を転じると、世界中で海洋プラスチックごみ問題やマイクロプラスチックへの懸念が大きく取り上げられるようになった。しかも海中や海底には目に晒されない大量のプラごみが堆積され、これらは500年以上残ってしまうという。

プラスチックはこの60年間で私達の暮らしになくてはならないものになったが、焼却すればCO₂を大量に発生し、海では汚染の元凶となり悪物のレッテルを貼られてしまうことは残念でならない。

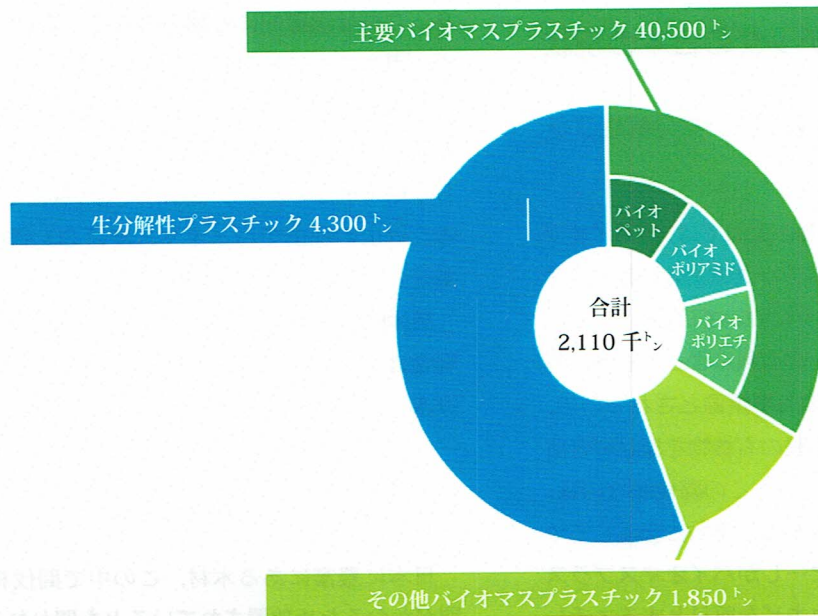
この大気と海的环境課題を打開するひとつの方策としてバイオマスポリマーと生分解性ポリマーがある。しかしこの両方において多くの誤解もあることも事実であることから、筆者なりの意見を交えた総論の解説と新開発の海洋生分解性バイオマス複合プラスチックについて述べる。

2 バイオプラスチックの世界の動き

2.1 生産量と内訳

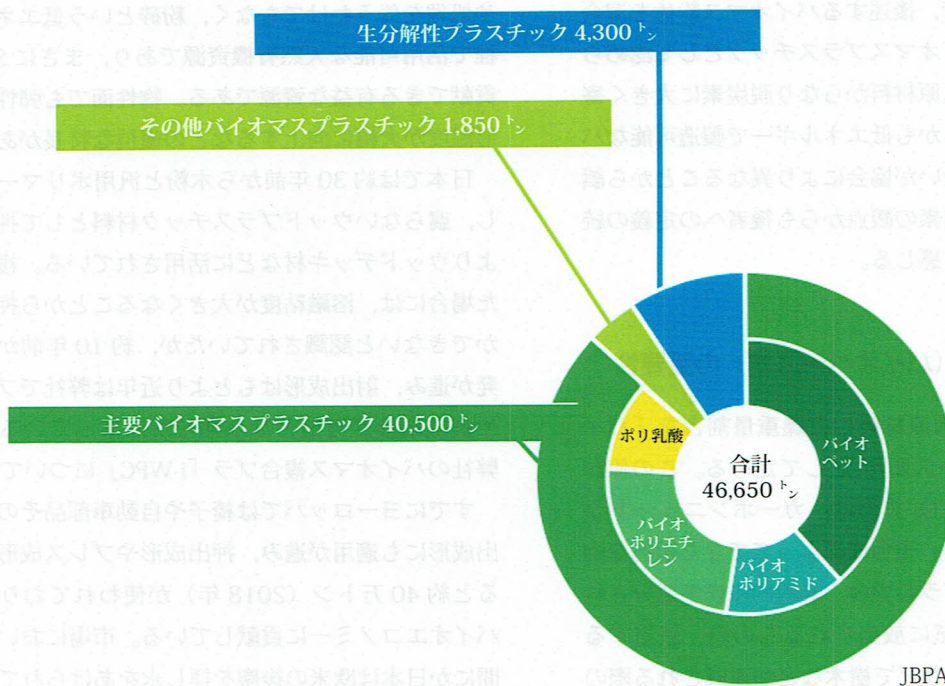
図1に世界のバイオマスプラと生分解性プラの生産能力の円グラフを、図2に日本のバイオマスプラと生分解性プラの出荷量推計の円グラフを示す（環境省資料、日本バイオプラスチック協会まとめ、2019年）。世界の生産量は211万トン、対して日本の出荷量は4.7万トンで世界のわずか2.2%にすぎない。また生分解性プラに目を転じると、世界の生分解性プラの生産量は117万トン（生産量全体の55%）、対して日本の出荷量はわずか430トン（出荷量全体の9%）であり圧倒的に少ないのである。さらにほぼ全てが日本国内の製造ではなく輸入である。このシャビリーな数字が日本の環境調和プラスチックの現状であり、逆を言うところの分野の材料は今後成長が期待できるとも言える。

バイオマスプラの種類として、バイオPET・バイオPA・バイオPEの生産・出荷が多いのは共通しているが、欧米ではグローバル企業のコカコーラ、ネスレ、ダノンなどでは既に100%バイオ由来のPETボトルの開発が進み（日本で使用されているバイオPETのバイオ由来度は20～30%）、ブランドメーカーほど環境意識が高い。また中国では既にバイオマスポリマーや生分解性ポリマーの生産が始まっている。日本ではこの1・2年でやっとSDGsが根付こうとしている段階であり、周回遅れ環境後進国と言われる所以である。



環境省資料，JBPA まとめより抜粋

図1 世界のバイオプラスチック生産能力



環境省資料，JBPA まとめより抜粋

図2 日本のバイオプラスチック出荷量推計

3 バイオマスプラスチックの日本の現状

3.1 バイオプラ、バイオマスプラ、生分解性プラの違い

日本バイオプラスチック協会の定義では、「バイオプラスチック=バイオマスプラスチック+生分解性プラスチック」とされる。生分解性プラについては後述するが、まずバイオマスプラの「マス」の有無によって意味が異なる。バイオマスは生物由来の有機資源とされるので、バイオマスプラは植物や動物由来の有機物を原材料とするプラスチックということになる。この際複雑なのは、当該協会においてはバイオマスから化学的に合成してきたモノマーを重合したポリマーしかバイオマスプラスチックと認めていない。サトウキビを原料とするエチレンモノマーを重合したバイオポリエチレンがその代表である。

一方、日本有機資源協会では、CO₂削減を目的としてバイオマスを活用したすべての環境商品をバイオマス商品と定義している。後述するバイオマス粉体を混合した複合化プラもバイオマスプラスチックとして認められる。同じバイオマス原材料からなり脱炭素に大きく寄与でき、高物性で、しかも低エネルギーで製造可能なバイオマス複合プラの扱いが協会により異なることから誤解が生じている。脱炭素の観点からも後者への定義の統一変更があってもよいと感じる。

3.2 バイオマス度（バイオベース度）の重要性

使用したバイオマス原材料の乾燥重量割合を「バイオマス度（バイオベース度）」として定める。この値が大きいほど燃焼時のCO₂排出は、カーボンニュートラルによって抑制される。光合成によってできた植物を由来とするバイオマスプラの場合、最終的に燃焼処分された際にCO₂は一端大気に放出されるものの、該当するCO₂は時が過ぎて森林などで樹木などが育成される際の光合成で再び植物に固定化される循環サイクルに組み込まれる。従ってこの分のCO₂は、プラスマイナスゼロとカウントされ大気中に増加するCO₂は実質ゼロとな

る。これは国際的にも認められているロジックであり、カーボンニュートラルの典型である。

石油石炭などの化石資源の場合、排出されたCO₂は循環して石油石炭として地中深く固定化されるまでおそらく億年単位を要するため、大気に放出されたままになる。以上の理由でバイオマス度はCO₂排出削減、脱炭素社会にとって大きな指標となる。

具体的なプラスチックのバイオマス度は、ポリ乳酸の場合はほぼ99%、バイオポリエチレンの場合は84～96%、ポリブチレンサクシネートは49%である。

3.3 バイオマス複合プラスチック

日本に豊富にある木材、この中で間伐材は搬送に手間がかかるため放置されているとも聞かれる。この価値の低い材料を粉末にしてポリマーに練り込むことでバイオマス高価値資源として活用できる。間伐材以外にも竹材やわら材そのほかの植物粉もバイオマス資源になり得る。これらバイオマス複合プラスチックは特に化学反応や処理を伴うわけでもなく、粉碎という低エネルギー工程で活用可能な天然有機資源であり、まさにSDGsにも貢献できる有益な資源である。物性面でも弾性率や熱変形温度が大幅に向上するなどの優位な特長がある。

日本では約30年前から木粉と汎用ポリマーを複合化し、腐らないウッドプラスチック材料として押出成形によりウッドデッキ材などに活用されている。複合材にした場合には、熔融粘度が大きくなることから押出成形しできないと認識されていたが、約10年前から研究開発が進み、射出成形はもとより近年は弊社でブロー成形や真空成形が可能となり期待が高まっている。図3に弊社のバイオマス複合プラ「i-WPC」について示す。

すでにヨーロッパでは椅子や自動車部品そのほかの射出成形にも適用が進み、押出成形やプレス成形を合わせると約40万トン（2018年）が使われており、まさにバイオエコノミーに貢献している。市場においていつの間にか日本は欧米の後塵を拝し水をあけられている状況になった。尚、一昨年のドイツのバイオ複合材会議では弊社のブロー成形品や真空成形品は驚きをもって評価された。この「バイオマス複合プラスチック」は「バイオ



図3 バイオマス複合プラスチック [i-WPC]

マスプラスチックの大きなカテゴリー」と言うべきものだが、日本の古いカテゴリー神話の中で宙ぶらりんの存在となっているのはたいへん残念である。

4 生分解性プラスチック

4.1 生分解のメカニズム

生分解はバクテリアや菌類などによって分子レベルにまで分解されることを言うが、プラスチックのような有機物の生分解では二酸化炭素 CO_2 と水 H_2O にまで分解される。生分解性プラスチックと言われるポリマーは一部のものを除きほぼ全てが主鎖にエステル基を持つポリマーである。

世界で年間3億トン以上生産される多くのポリエチレン、ポリプロピレン、PETなどの汎用プラスチックは生分解しない樹脂に分類され、これが現在問題となっている海洋プラごみや農業プラごみの大きな原因である。注意点として、今日でも酸分解（オキシ分解）型の添加剤を「生分解剤」と称し使用されるようだが、これはポリマー鎖を酸分解で分断し細かくしているだけで大量

のマイクロプラスチック生成を進めるものとして、ヨーロッパをはじめ多くの地域では生分解とは認めていない。

生分解には2段の過程がある。図4にマンガチックな説明図を示す。第1段でまずポリマー鎖はバクテリアが出す酵素が触媒となって加水分解反応により細かく

1) 加水分解

ポリマーは超長い分子だが、バクテリアが出す酵素によりエステル結合が切れることで寸断される



2) バクテリア分解

細くなった部分をバクテリアが食べて【水】と【二酸化炭素】に分解して無くなる

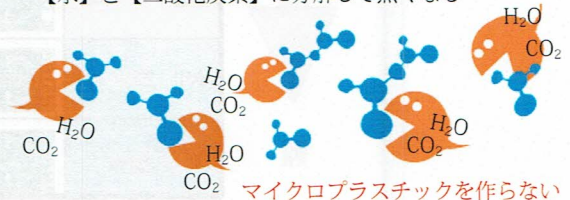


図4 生分解のメカニズム

分断される。第2段では、バクテリアは大きな分子は吸収できないが、加水分解で細くなった分子はエサとして食べられることができるようになり、バクテリアの栄養源となって最終的にCO₂とH₂Oに分解し排出される。植物由来ポリマーの場合はこの時発生するCO₂はカーボンニュートラルとして温暖化ガスに該当しない。

4.2 誤解1・・・バイオマスプラ≠生分解性プラ

「バイオマスプラスチックは生分解性である」と誤解される場合がよくみられるが、両者は全く意味が異なることを強調したい。バイオマスプラは原材料がバイオマ

スであるという由来を示すが、生分解性プラは生分解するという機能を示すものである。バイオマス由来のバイオPEは石油由来PEと同様に生分解性を持たないため、バイオPE製のレジ袋を間違ってもポイ捨てしてはいけない。また稀な例であるが、反対にポリカプロラクトンは石油由来プラであるが生分解性を持つ。図5にバイオマスプラと生分解プラの分類について筆者なりにまとめてみた。

4.3 誤解2・・・生分解性には環境グレードがある

生分解性プラと言われるポリマーは、置かれる環境状況によって生分解の難易度の幅がある。図6に5段階でその例を示す。生分解性を分類したISO国際標準規格はまだ制定がされておらず現在は民間機関による認証規格がある。最も有名なベルギーのTÜV Austriaでは独自規格を定めている。それによると業務用コンポスト分解機で高温高湿でやっとな生分解する「OK compost」、欧州で普及している家庭用コンポスターで生分解できる「HOME, OK compost」、土壌で生分解できるもの「SOIL, OK biodegradable」、湖や河川の淡水で生分解するもの「WATER, OK biodegradable」、そして海水で生分解するもの「MARINE, OK biodegradable」に分類される。よく似たマークだがじっくり見ると違いが分かる。

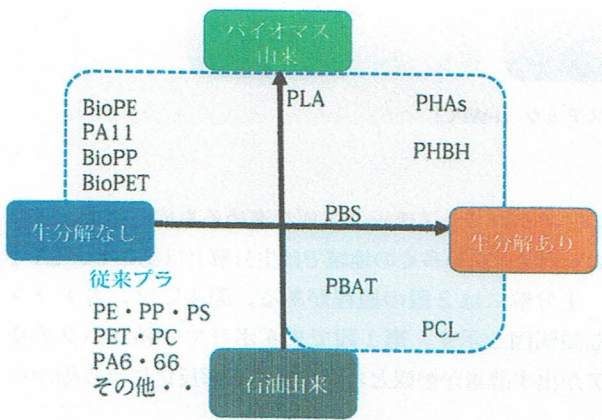


図5 バイオプラスチックの分類

環境	TÜV 認証マーク ベルギー	認証 市販品	文献等
業務用高温 コンポスト施設		PLA	種類多い ↑
家庭用 常温 コンポスト		PBS PBAT	
土壌 畑や庭		PBSA	
水中 淡水			
海洋 海水		PHAs	少ない PCL・PA4

図6 生分解性の難易度

バクテリアが極めて少ない海水で生分解する5番目の「MARINE」は、最も困難な環境で生分解するいわばオールマイティグレードと言えるがたいへん種類が少ない。ちなみに生分解性プラの代表と言われるポリ乳酸PLAは、最も低位の「OK compost」生分解性しか持たず業務用の専用分解機でしか生分解しないので、生分解が進まない畑、川、海には間違っても出してはいけない。有識者の間ではPLAは生分解性がかなり劣る樹脂と認識されているのも事実である¹⁾。

4.4 海水で生分解可能なポリマー

前項で述べた最も生分解が困難な海水で生分解性する樹脂の代表的なものとして、ポリヒドロキシアルカノエート類PHAsがある。この種のポリマーの歴史は古く、1926年にフランスのLemoigneによってポリヒドロキシブタン酸PHBが発見された²⁾。その後第一次の生分解性プラ開発ブームで1981年に英国のICI社により発明され特許出願された。ICIはバイオボールという商品名で事業展開したものの、その後米国モンサント社に技術譲渡された。その後いくつかの企業を経て規模を縮小していると聞く。PHAsは化学合成ではなくある種類のバクテリアが植物油や糖類をエサにして自身の体内に樹脂を作り貯め込んで生成するもので³⁾、これを集めて人間が利用するというまさに「養殖プラスチック」と言えよう。

この種のポリマーは海水中でバクテリアによる生分解性を持つが、生物生産の難しさもあり実用化は容易でないとされる。中でも日本のカネカが製造するポリヒドロキシブチレート-ヘキサノエートコポリマーPHBHは有名であるが、そのほかアメリカ、イタリア、中国でもPHAsを生産している。

そのほか、化学合成のポリカプロラクトンも海水での生分解性を示すことがよく知られている⁴⁾。ほかにも非上市品を含め幾つかのポリマーが報告されている。

いずれも石油系汎用ポリマーと比べて少量生産のため価格は高価であるものの、今後その特異的特長である生分解性に着目されれば生産量増加と共に使いやすい価格に収れんすることが期待できる。

5 海洋生分解性バイオマス複合プラスチック「Biofade™, ビオフェイド」

5.1 原理と手法

アイコンポロジーは「成形性の優れた先進バイオマス複合材、i-WPC」を製造販売している。これは木粉を代表とするバイオマス粉30～55%を含むポリプロピレン複合材で、射出成形をはじめ中空成形や真空成形も可能な複合材料である。弾性率はバイオマス粉濃度が増すほど上がり(51%で2.6倍)、熱変形温度も30℃上昇するなどの特長がある。

この技術を基に海水で生分解可能なポリマーを用いて応用したのが「Biofade™」である。木粉などのバイオマス粉体自体は天然物であり自然界の海洋で生分解されるものである。その価格は比較的安価であるためバイオマス粉体のコンテンツが増すほどその製造コストが低減されることの期待、そして複合界面が増えることでの生分解性促進効果、さらに複合材自体の弾性率や熱変形温度などの機械物性の改善、なによりもバイオマス度をアップさせられる環境調和材料としての特長を持つ。

バイオマス粉体は非可食性の未利用バイオマスの使用が好ましい。日本は国土の3分の2が森林であり豊富にある森林には実に年間800万トンもの間伐材・未利用木材があると言われるが、有価物としてごく一部でも里に持ち帰りができれば貴重な材料資源として活用できる。また稲わらや麦わらも未利用バイオマスとして活用できる。Biofade™は主に間伐材や端材の木粉を使用するが、i-WPCではもみ殻・そば殻、針葉樹の葉でも試作した経験がある。日本各地の未利用バイオマスを地域で活用した町おこしも可能でSDGsにも役立つだろう。

ポリマーはPHAsをはじめいくつかの生分解性ポリマーをブレンドすることで、成形に適した物性変化の検討を行っている。まだ詳細には述べられないが色々な可能性を検討中である。複合材にすることでポリマーやフィラーを多種多様に変化させることができるのはたいへん奥の深いことであり、バイオマス複合プラスチックの可能性が広げられる。図7参照。

混合の方法は従来の加熱式混練機が使用できるが、粉体とポリマーの混合は先人たちのノウハウを踏襲しなが

ら独自の工夫が必要である。本稿ではあえて列記しないことにする。

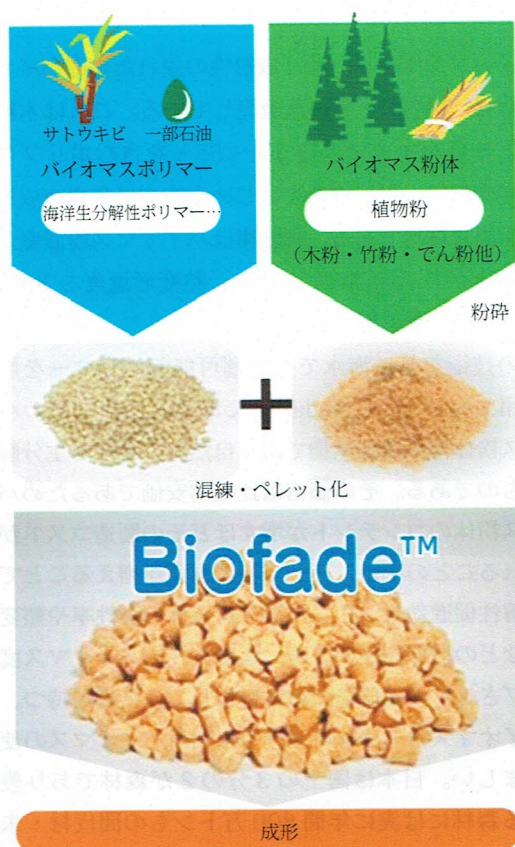


図7 バイオマス複合生分解性プラ「Biofade™」

5.2 生分解度と海水での実地試験

5.2.1 生分解度

生分解度の試験は、(一財)化学物質評価研究機構(CERI)に委託した。試験は、ASTM D6691を参考に実施し、酸素消費量に基づき試験サンプルの生分解度を求めた。木粉40%添加系の複合材開発品を細かい粒子に加工し、試験サンプルとした。試験には博多港の海水を使用し、試験温度は30℃とした。得られた平均生分解度を図8に示す。

試験開始から28日(4週間)後の生分解度は約36%を示した。試験サンプルは木粉40%が含まれるが、木粉自体は天然物で生分解することは明らかなが、セル

ロース成分は早く生分解するもののリグニン成分は遅れて生分解されているので、すべてが生分解するのにはまだ時間がかかるものと推察される。

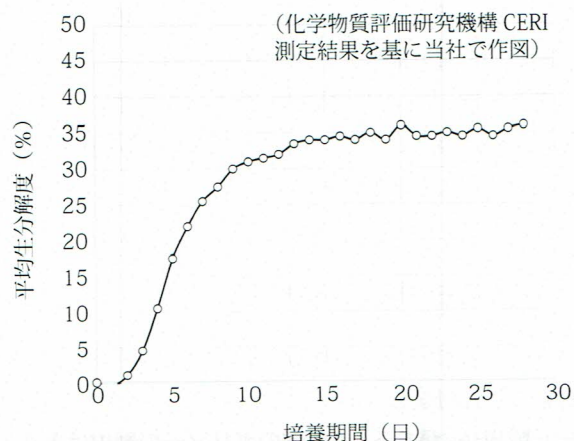


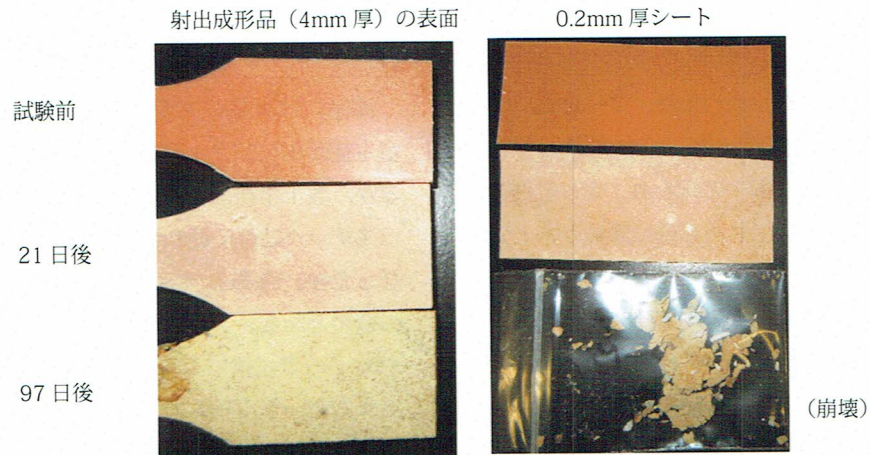
図8 Biofade™の生分解度

参考までに、カネカの公表資料によると PHBH は 28 日後で約 23% の生分解度であった。もちろん全く同じ条件ではなく横並びの試験ではないため直接比較はできないが、数値上は Biofade™ の生分解度が上回っていた。

5.2.2 海水実地試験

海洋環境活動を行っている NPO 気候危機対策ネットワークの協力を得て、実際の海での検証を行った。物性測定用の射出成形ダンベルやそのほか射出成形品と共に約 0.2mm 厚のプレス成形シートも同時に海に沈めた。横須賀の内湾と葉山沖に、サンプル個々を柔軟素材ネットで保護したものを金網かごに入れて沈めたが、台風の海波や海流で行方不明になったものもあり予定通りにはいかなかったものの、いくつかの貴重なサンプルが得られた。

代表的なサンプル写真を図9に示す。写真は横須賀湾の21日後と96日後のものであるが、21日後には明らかに成形体表面が白色化しスキン層の樹脂が生分解により浸食されている様子が分かる。さらに96日後では表面からやや深く浸食され表面の木粉がボロボロになっている状況が分かる。97日後ダンベルでの曲げ試験では曲げ強さにおいて初期の77%程度を保持していた。



生分解により表面の樹脂が徐々に浸食されている。木粉は遅れて分解する

図9 Biofade™の海水中生分解試験（横須賀）

0.2mm 厚のシートにおいては、21 日後にダンベルと同様生分解の浸食による白化が見られ、96 日後においては既にバラバラに崩壊寸前であった。つまり約 100 日後でシート両面から 0.1mm 程度生分解が進んだことが分かる。また写真には示さないが、木粉 20% 添加品の場合も 40% 添加品とほぼ同様にシートは崩壊となっていた

成形品の場合は厚みがある分、生分解が進行しても内部まで完全に崩壊するにはまだ多くの日数がかかることが分かったが、2 年 3 年耐久性が必要な用途によっては生分解が進み過ぎることも逆に問題かもしれない。これらについてはアイデアをもとに今後さらに検討を進める予定である。

5.3 バイオマス度

表 1 に木粉 20% 添加の Biofade™ の物性表を示す。この場合のバイオマス度（バイオベース度）は 87% であった。バイオマスフィラーの添加率や生分解性ポリマーの選択配合によって数値は変わるが 80% 以上は確保できそうである。もちろん木粉量増量によりバイオマス度は上昇するが、衝撃強度のような機械物性が低下する傾向は免れない。

バイオマス度は材料を焼却処分した場合のカーボンニュートラルに直接関係する数値であるが、十分な脱炭素性能が得られる可能性を示唆している。今後の基材ポリマー開発にも大いに期待したい。

表 1 Biofade™ の物性表

試験項目	試験方法	単位	Poly propylene	Biofade™（開発品）
比重	JIS K-7112	—	0.91	1.2 ~ 1.3
曲げ試験	弾性率 曲げ強度	JIS K-7171	MPa	4900
			MPa	41
シャルピー衝撃試験	JIS K-7111	KJ/m ²	3.3	2.3
熱変形温度	JIS K-7191 (0.45Mpa)	℃	100	125
バイオマス度	—	%	0	> 87

※本資料に記載されたデータは、特定条件下で得られた測定値の代表例であり、用途・製品の物性値を保証するものではありません。

※バイオマス度は成分比から算出した計算値であり実測値ではありません。

5.4 成形性

一般的に生分解性ポリマーは汎用ポリマーと比べて成形がしにくいという固定観念がある。成形性は結晶化温度や結晶化速度が大きな因子と言われ、ポリ乳酸や PHBH そのほかの樹脂においても成形性に難点があることが知られる。

今回得られた Biofade™ は、かなり改善できていた。図 10 は成形品の一例であるが、いずれも容易かつ生産性よく射出成形が可能であった。射出成形専門家によれば問題なく成形は可能とのことであった。これは添加された木粉による結晶化促進効果があるかもしれない。今回は比較的小さなスプーンや歯ブラシの成形であったが、さらに大型の成形体も可能であろう。



図 10 Biofade™ の射出成形例

5.5 物性

表 1 に木粉 20% 添加の Biofade™ の機械物性を示す。ポリプロピレンとの比較を示したが、曲げ弾性率は 3.6 倍、曲げ強度も PP よりも高かった。衝撃強度は木粉複合の負の効果もあり低下する。これをカバーするには厚みを増すのが手っ取り早いものの補強フィラー添加やポリマーブレンドも考えられる。熱変形温度は PP よりも 25℃ 上回り短期間の耐熱性は PP よりもよさそうだが、長期間ではポリマー自体の加水分解が懸念される。

6 おわりに

海岸には大量のプラスチックが打ち上げられ、地元の児童生徒がボランティアで拾い集めるという活動がみられるが、数十年前はこのような光景は見られなかった。プラスチックは軽く便利で生活になくてはならないものになったが、今あるプラスチックは数 100 年先まで存在し負の遺産となる。

陸上のゴミ捨て場がやがて風雨で川に流れ海に流出するというルートは、3R で防がなくてはならないが、海のプラスチックの 46% を占めると言われる漁業ゴミはどうするのか、漁網、フロート・浮き玉、釣具、養殖具など国際的な取り組みが必要とを感じるが、可能であればプラスチックを生分解プラスチックに転換するという手段も併用してはどうか。

海洋生分解性プラスチックは海のプラスチック問題に役立てるためにさらに検討が進む領域であろうが、反面現在は商業化された生分解性ポリマーの希少性から材料コストの問題が最も大きい。この課題はポリマーメーカーサイドにお任せするしかないが、中小企業ができる複合化技術のブラッシュアップは今後も必要になるはずである。

謝辞

本研究に関して、東京都立産業技術研究センターの森様、海洋環境活動家の武本様、ファイン（株）の清水様、映画の狩野様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 岩田忠久, 生分解性プラスチックの現状と展望, マテリアルライフ学会誌, 32 (2), 27 (2020)
- 2) 日本化学会編, 持続可能な社会を作るバイオプラスチック, 45 (2020)
- 3) シーエムシー出版, 生分解性プラスチックの環境配慮設計指針, 71 (2019), 柘植丈治, 他
- 4) 26 生分解性プラスチックの適正使用のための分解菌使用のための分解菌データベース作成に関する研究報告書 2014-16, 中山敦好, 他