

熱を使ってリサイクルについて考えてみよう

代表者 上遠野 巧、齋藤 香澄、牧野 綜太

所属 大島商船高等専門学校（浦田・山口研究室）

1. はじめに

ウミガメがクラゲと間違えてビニル袋を餌食して、消化不良を起こして死んだり、プラスチックストローが顔に刺さったりしている様子が報道等で取り上げられ、海洋プラスチックの問題について関心が高まりつつある。私たちの学校がある周防大島では牡蠣の養殖で有名な広島湾に面しており、その養殖いかだの材料である発泡スチロールや牡蠣パイプの漂着が問題となっている。これまで私たちの研究室では、リサイクル施設から離れた地域での減容化の需要を考え、発泡スチロールの減容化装置を開発し海岸清掃活動等で漂着した発泡スチロールの減容化について実績をあげることができた。そこで、本実験では発泡スチロール以外のプラスチックにも着目し、温度と変形の関係の検証を行った。さらにプラスチックの再資源化方法として油化に着目し、どこでも実験ができる卓上の小型油化装置の作成をした。廃プラスチックのリサイクル技術は既に確立されているため、本実験ではより多くの人に海洋プラスチックごみのリサイクルに関心をもってもらうことに重点を置き、誰にでもわかりやすいプラスチックゴミの分別実験と再資源化についてまとめた。

2. 各種プラスチック材料による減容化実験

プラスチックには様々な種類があり、リサイクルマークの表示はあるものの、一般人にとって分別は難しい。そこでプラスチック類の代表的な5種類を取り上げ、各種プラスチックの熱可塑性を利用して温度による変形の様子からそれぞれの特徴を見る実験を行った。今回使用する各種材料として、ポリエチレン（PE）は周辺地域で処理に困っている牡蠣パイプを、ポリプロピレン（PP）は私たちの生活の身近にあるペットボトルのキャップを、ポリスチレン（PS）は発泡スチロールのトレイを、ポリエチレンテレフタレート（PET）はペットボトルを、ポリ塩化ビニル（PVC）は通称塩ビ管と呼ばれているポリ塩化ビニルのパイプを使用することにした。

(1) 実験方法

図1のように鍋に天ぷら油を入れ、そこに各種プラスチック試験片を入れ、IH クッキングヒータを使って天ぷら油の温度を徐々に上げていき、各温度における減容率を調べた。試験片は様々な形をしているため、減容率は撮影した画像における見た目の面積変化から変化率とした。



図1 減容化実験

(2) 実験結果

各種プラスチックの温度変形の関係についてまとめる。

ポリプロピレン (PP): ペットボトルキャップの減容化

ポリプロピレン (PP) の減容化としてペットボトルキャップを使って実験した。減容化前の様子を図4に減容化後の様子を図5に示す。また、ペットボトルキャップの減容化率について表2に示す。



図5 減容化前：直径 3 cm、高さ 1.5 cm



図6 減容化後：直径 4 cm , 高さ 0.3 cm

表2 ペットボトルキャップの減容化率

温度	140	145	150	160	170	180
減容化率	100	95	90	80	50	27

本実験よりポリプロピレン (PP) は代表的なプラスチック 5 種類の中で温度による変形が始まる温度が 145 と一番高かった。このことによりポリプロピレンが熱に強いといえる。

ポリエチレン（PE）：牡蛎パイプの減容化

ポリエチレン（PE）の減容化として牡蛎パイプを使って実験した。減容化前の様子を図2に減容化後の様子を図3に示す。また、牡蛎パイプの減容化率について表1に示す。



図2 減容化前：長さ 10 cm

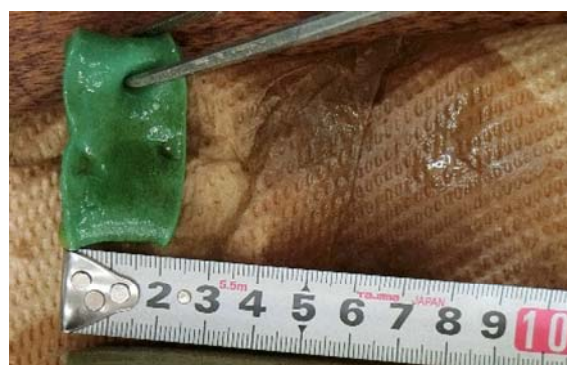


図3 減容化後：長さ 2 cm

表1 牡蛎パイプの減容化率

温度	120	125	130	135	140	145	150	160	170	180
減容化率	100	100	90	85	80	75	75	70	60	60

本実験よりポリエチレン（PE）は130 あたりから急激に変形し始め、曲がりながら長さが小さくなった。減容化したが、横幅(径)が大きくなり、パイプの厚みが増した。

ポリスチレン：PS（発泡スチロールトレイ）

ポリスチレン（PS）の減容化として発泡スチロールトレイを使って実験した。減容化前の様子を図7に減容化後の様子を図8に示す。また、発泡スチロールトレイの減容化率について表3に示す。



図7 減容化前：一辺 12 cm



図8 減容化後：一辺 7 cm

表3 発泡スチロールトレイの減容化率

温度	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
減容化率	100	100	95	90	80	70	65	60	50	50

本実験よりポリスチレン（PS）は 90 を超えたあたりから、大きく変形し始めた。120 あたりでそれ以上の変形は見られなかったが、投入時の形は平面だったのがまるまった。

ポリエチレンテレフタレート：PET（ペットボトル）

ポリエチレンテレフタレート（PET）の減容化としてペットボトルを使って実験した。減容化前の様子を図 9 に減容化後の様子を図 10 に示す。また、ペットボトルの減容化率について表 4 に示す。



図 9 実験前：24 cm



図 10 実験前：18 cm

表 4 ペットボトルの減容化率

温度	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	160	170	180
減容化率	100	100	95	93	90	85	83	80	75	70	65	55	50	48

本実験よりポリエチレンテレフタレート（PET）は 110 と早い段階から、他に比べてゆっくりと変形した。小さくなるに従って硬くなり、底と口の部分が白く濁った色に変色した。

ポリ塩化ビニル：PVC（塩ビ管）

ポリ塩化ビニル（PVC）の減容化として塩ビ管を使って実験した。減容化前の様子を図 11 に減容化後の様子を図 12 に示す。また、塩ビ管の減容化率について表 5 に示す。



図 11 実験前：10.5 cm

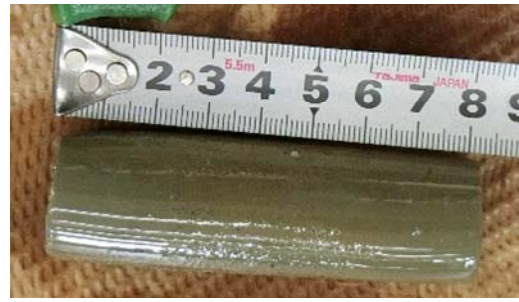


図 12 実験後：8 cm

表 5 塩ビ管の減容化率

温度	130	135	140	145	150	160	170	180
減容化率	100	100	95	95	90	90	85	85

本実験よりポリ塩化ビニル（PVC）は 140 と高温でゆっくりと減容化しはじめ、変化が小さかった。他の材料は実験中浮いていたが塩ビ管は沈んでいた。熱を加えたことにより若干軟らかくなったが他の材料に比べると、最初との差が小さかった。

(3) 各種プラスチック減容化実験のまとめ

各種プラスチック材料の減容化率について図 13 にまとめる。

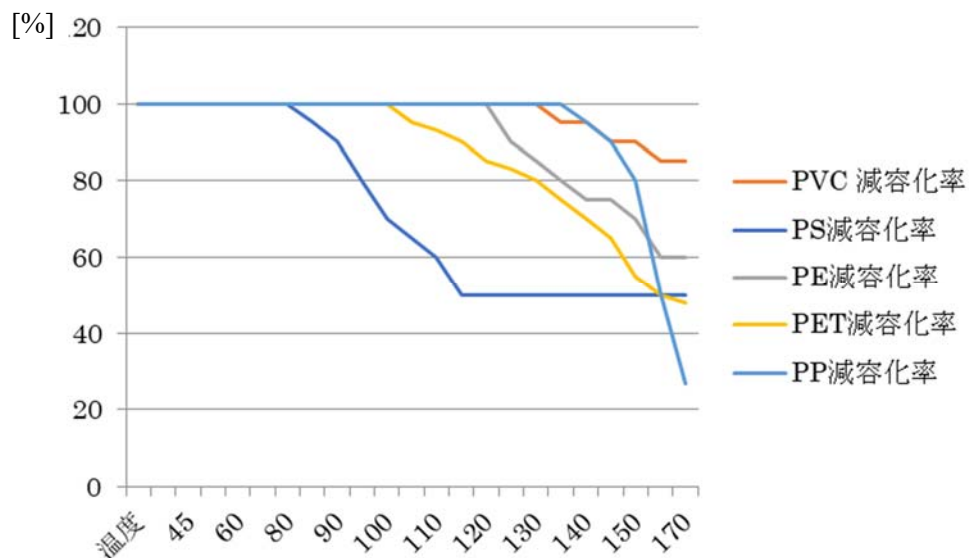


図 13 各種プラスチックの減容化率 []

本実験結果よりポリスチレン（PS）が最も熱に弱く、次にポリエチレンテレフタレート（PET）、ポリエチレン（PE）という順になった。PET や PVC のように変化が緩やかなものもあれば、PP のように変化が急なものもあった。変形し始める温度に注目して考えると、食品容器の中でも電子レ

ンジの使用が可能なものとそうでないものがあるのは、プラスチック材料の耐熱温度によるものであることがよくわかる実験であった。また、ペットボトルも 110 から変形するため、冬季の暖かいものを飲む際にペットボトル容器ごと温めるのに問題があるという事が感じられた。

3. 各種プラスチック材料による油化実験

プラスチックの油化は技術的には完成されているが大型のものが多い。本実験では多くの人たちの前で実験できるように小型油化装置を作成し、各種プラスチックについて油化実験を行う。

(1) 小型油化装置の作成

プラスチックを油化するためには高分子状態のプラスチックを低分子状態に戻すために高温に加熱する必要がある。油化工程では発火、爆発の恐れがあるため、私たちは簡単で、安全かつ安定して油化できるように工芸用の小型電気炉を用いて油化装置の作成をおこなった。小型油化装置に使用した電気炉の仕様について表 6 に記す。プラスチック材料の反応炉は蓋つきのステンレス缶に湾曲させた銅パイプを接続して作成した。加熱されたプラスチック材料は蒸気となり、銅パイプを通して水の入ったビーカーで置換され、水面に油化した油が浮きそれを回収する。この際、銅パイプ先端を水につけるとヘッド圧がかかり蒸気が放出されないため、水面から少しだけ離しておいた。図 14 に作成した小型油化装置の外観を示す。

表 6 小型電気炉の仕様

製造会社	日陶科学株式会社
製品名称	Ami (アミー) 型 (半自動式)
サイズ	φ 240×270(H)mm
炉内サイズ	φ 110 × 95mm
重量	2.1kg
最高使用温度	900
消費電力	AC-100V 600W
温度計	デジタル温度調節計 P.I.D 制御方式 (ON-OFF 制御)



図 14 小型油化装置の外観

(2) 油化実験

油化のしやすいプラスチック材料としてポリプロピレン（PP）、ポリエチレン（PE）、ポリスチレン（PS）があり、主に炭素と水素のみで構成されている材料である。塩化ビニル(PVC)やポリエチレンテレフタレート（PET）には塩素や窒素、酸素などが含まれている場合は油化しにくい。そのため本実験ではポリプロピレン、ポリエチレン、ポリスチレンの3種類について油化実験を行った。それぞれの材料は私たちの生活に身近なものや、地域で対処したいと考えているプラスチック材料として、ポリプロピレンはペットボトルのキャップを、ポリエチレンは牡蠣パイプを、ポリスチレンは発泡スチロールを利用して実験を行った。今回実験を行うプラスチック材料の反応温度は400 前後であるため、設定温度を 350 からスタートして反応状況に応じて温度を高くしていった。それぞれのプラスチック材料の実験結果について次にまとめる。

ポリプロピレン（PP）：ペットボトルキャップの油化

ポリプロピレンの油化にはペットボトルキャップを使用して実験を行った。図 15 にペットボトルキャップ（PP）の油化の様子を、表 7 に油化の状態についてまとめる。



(1) 加熱前



(2) 反応物（蒸気）



(3) 反応物（油）



(4) 反応物の燃焼状態

図 15 ペットボトルキャップ（PP）油化の様子

表 7 ペットボトルキャップ（PP）の油化の状態

投入量	40 g
設定温度	550
反応時間	20 分
油化油量	40 g
反応物の様子	固めのグリース状
反応物の匂い	非常に強いガソリン臭い
反応物の燃焼	グリース状のものが溶けて燃える

本実験ではビーカーの表面には液体状の油ではなくグリース状の反応物質が得られた。これに火を近づけるとよく燃えた。これはパラフィン質の高分子で、液体状の燃料油にするためにはさらに精製する必要があることが調べると分かった。

ポリエチレン (PE) : 牡蛎パイプの油化

ポリエチレンの油化には牡蛎パイプを使用して実験を行った。図 16 に牡蛎パイプ (PE) の油化の様子を、表 8 に状態についてまとめる。



(1) 加熱前



(2) 反応物 (初期段階)



(3) 反応物 (蒸気)



(4) 反応物 (油)



(5) 反応物 (グリース状の油)



(6) 反応物の燃焼状態

図 16 牡蛎パイプ (PE) の油化の様子

表 8 牡蛎パイプ (PE) の油化の状態

投入量	90 g
設定温度	575
反応時間	18 分
油化油量	90 g
反応物の様子	比較的柔らかいグリース状
反応物の匂い	非常に強いガソリン臭
反応物の燃焼	よく燃える

牡蛎パイプは他の二種類と比べて変わった放出の仕方をした。最初にグリース状の物と青色を含む油を放出し、次には黒っぽい油を、最終的にはグリース状の反応物質をしばらく放出した。

他の2種に比べて、反応開始までに高い温度と長い時間を要した。ビーカーの表面にはペットボトルキャップ（PP）に比べて比較的柔らかいグリース状の反応物質が得られた。これに火を近づけるとペットボトルキャップ（PP）と同様によく燃えた。

ポリスチレン（PS）：発泡スチロールの油化

ポリスチレンの油化には発泡スチロールを減容化して固めたものを使用して実験を行った。図17に発泡スチロール（PS）の油化の様子を、表9に状態についてまとめる。

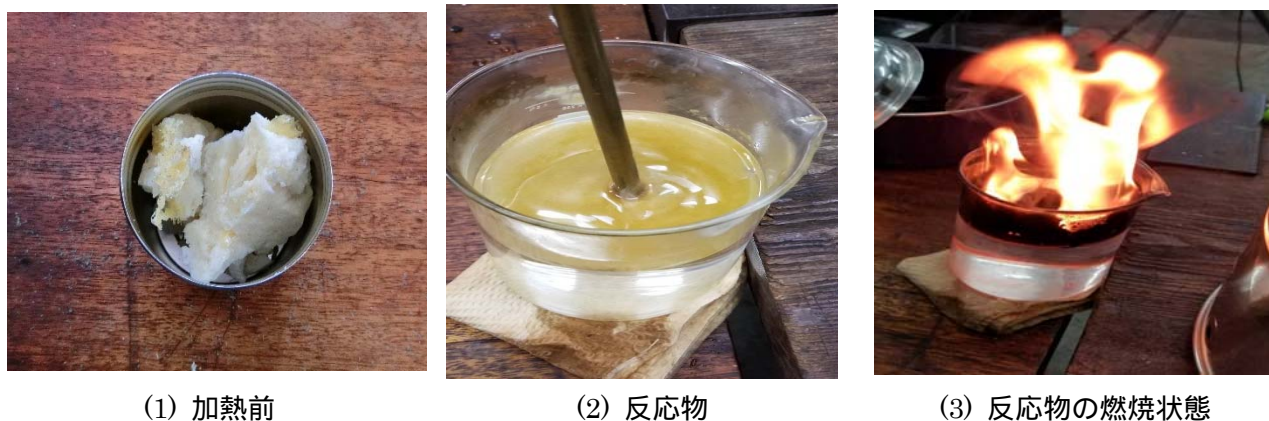


図17 発泡スチロール（PS）の油化の様子

表9 発泡スチロール（PS）の油化の状態

投入量	30g
設定温度	500
反応時間	15 分
油化油量	17.6g
反応物の様子	黄色に着色された液体
反応物の匂い	比較的少ないガソリン臭
反応物の燃焼	よく燃えた

ビーカーの表面にはペットボトルキャップ（PP）や牡蛎パイプ（PE）のときと違い液体状の反応物質が得られた。これに火を近づけると上記同様によく燃えた。発泡スチロール（PS）が一番理想的な油化となった。

(3) 油化実験考察、改善点

加熱温度による放出される反応物質の違い

PET キャップを油化成功した時よりも低い温度（350 ）で加熱を続けた際、図 18 のようにさらさらとした粉状の物を放出し、油化は失敗となった。この粉状の物は火が点かず、触ると手の温度で溶けてさらさらとした油になった。また、牡蛎パイプでも途中は油状の物が放出されたが、最後はグリース状の物が放出されたことから、温度により反応物質は変わるのではないかと考えられる。もしそうであれば、理想としている油の状態で放出させ続けることも可能ではないかと考えられる。



図 18 低温加熱時の様子

油化装置反応炉の改善

本実験の反応炉は、回し閉め式のステンレス缶に穴をあけ、ナットで固定した。しかし、この方式では密封が完全ではなく加熱中のガス漏れを確認した。また、実験終了後は膨張しているためか、ふたが固く締まっており、それに加えて皮手袋が滑るため非常に開けづらくなっていた。そのため、完全な密封と脱着を簡単にする機構の必要性が考えられる。

油化装置の改良

今回の油化装置では銅パイプの詰まりやガス漏れ、発火など様々な不具合、事故等が発生し、また温度の偏差が大きかったため精錬度も低い。そのため、今回の反省点を踏まえて安全で精錬度の高い油化装置への改良を行いたい。

また、それに加えて加工技術や高い費用を要さない、簡単に再現のできるような油化装置の開発も行いたい。今回使用した減容化装置は、不要となった油と鍋を使用し、熱源には IH ヒーターやストーブの排熱を利用した。つまり、減容化装置はリユース材料と自由な熱源で再現ができ、将来的には油化装置もこのような簡単に作成のできる装置としたい。

4. おわりに

本実験により得られた、各種プラスチックの加熱時の特徴について表1にまとめる。

表10 各種プラスチックの加熱時の特徴

材質記号	材質名	リサイクル 識別記号	海水、油に	形 態	特 長	減容化実験結果	油化実験結果
PE	ポリエチレン	 HDPE LDPE (食品用) (食品用)	浮く	菓子袋、 チューブ	柔らかい、 透明、明色 	約40%減容	できる
PP	ポリプロピレン	 PP	浮く	容器、チューブ、キャップ	厚いフィルム、半透明 凹ませた時、戻るのが遅い	約60%減容	できる
PS	ポリスチレン	 PS	浮く	食品容器(惣菜、生菓子)	バリバリ音、最も硬い、 凹ますとすぐに戻る(白線が残る)	約50%減容	できる
PET ボトル	本体(ボトル) (ポリエチレンテレフタレート)	 PET	沈む	飲料容器 液体容器	硬い、 押すと変形するが音をたてて戻る	約50%減容	できない
	キャップ (ポリプロピレン)	 PP	浮く		変形するが 壊れない 	約60%減容(PP)	できる
PVC	塩化ビニル	 PVC	沈む	容器、箱 パイプ	引っ張るのに力がいる	約15%減容	できない
リサイクル対象外の プラスチック		 PP, M, PET	今回の実験で、様々なプラスチック製品を見てきたが、ほとんどの商品にはリサイクル対象外のマークが付いていた。				

本実験から以下のことがわかった。

熱変形温度によるプラスチックの特徴をまとめることができた。

小型電気炉を用いて油化装置を作成することができた。

精製精度として問題は残るが、卓上小型油化装置を作成できた。

今後、触媒の効果や反応温度を細かく調べるにより精製度の高い油化装置を作成したい。

以上のことから熱によるプラスチック変形や油化実験を通して、身の回りのプラスチックについて考えてもらえるきっかけになってもらいたいと考える。また、今回の実験により海洋漂着プラスチックごみをオイルバス方式で減容化及び塩分の除去を行い、油化までの流れを確立することができた。改善点は残るが、海洋環境問題解決に向けて前進できたと思う。これからも、海洋漂着プラスチックごみの油化による、環境問題解決に力を入れていきたい。

謝辞

本実験を行うに当たり、実験費用の助成していただいた株式会社八光電機のみなさま。ご指導ご助言をしていただいた浦田先生、山口先生、砂田技官、にこの場をお借りして御礼申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 早稲田大学本庄高等学院 実験開発班「魅了する実験2」(株)すばる舎リンクージ
- [2] (一社)プラスチック循環利用協会「プラスチックリサイクルの基礎知識 2018」