オイルバスを利用した発泡ポリスチロール廃棄物の 脱塩・減容化特性*

川 原 秀 夫** 山 口 伸 弥** 三 原 伊 文**

Attempts to Desalt and Shrink Foaming Polystyrene Waste by Using Oil Bath

By Hideo Kawahara, Shinya Yamaguchi and Yoshinori Mihara

Recovered thermoplastic plastics are generally recycled into plastic oil after being re-polymerized and pyrolyzed. However, foaming polystyrene drifting in the ocean or off the coast contains salt that adhered while drifting in the ocean for a long period of time because seawater can enter the inside of foaming polystyrene from damaged or cracked parts. This salt content generates hydrochloric acid gas during combustion and corrodes combustion equipment and piping when polystyrene expanded with seawater is reused as thermal decomposition oil or solid fuel. Therefore, these recycled products cannot be used due to salt contained in the material.

From the cost-saving perspective, we have proposed the development of a desalination and volume reduction device for foaming polystyrene. In this research, we investigated how much foamed polystyrene could be desalted and reduced in size by using oil bath. This attempt was intended to obtain necessary design data to develop a practical device. As a result, we could specify the optimum temperature for volume reduction and confirmed that salt concentrations in the samples were greatly reduced after foaming polystyrene that had drifted in seawater was reduced.

1. はじめに

日本の海岸に一年間に漂着するゴミの量は 70 万トンにも達すると推定されている¹⁾。特に、冬場には北西風の季節風により、日本海側の海岸には大量のゴミが漂着する。中でも、対馬などの離島の海岸では、砂浜が全く見えなくなるほど大量のごみで埋まってしまうところも見られる。海岸に漂着するゴミの多くは生活用品であるが、それ以外にも漁業系の廃棄物や医療系・工業系の廃棄物もたくさん漂着する。最近では、海を渡って流れてくる外国からの漂着ゴミ（主に発泡ポリスチロール）が増えてきている。図1は長崎県「対馬」の海岸に漂着したゴミの状態を示す。発泡スチロールの原料であるポリスチレンは、樹脂生産量 9.8% の代表的なプラスチック樹脂で、プラスチック製品に

再生するマテリアル・リサイクル等に 35%、焼却による熱などを利用したサーマル・リサイクルに 23%、合計 58%とプラスチック樹脂の中で最もリサイクルが進んだ樹脂である。しかしこの数値は、主に陸上で使用される魚箱、農産箱、緩衝材、断熱材等であり、海上で大量に使用されている大型の発泡スチロール製フロートについては、輸送コストが高く、付着生物、塩分、水分、汚れの除去などの一次処理の必要から、同じリサイクルシステムでは対応できないのが現状であ

図1 海岸に漂着したゴミ

*原稿受付 平成 29 年 6 月 20 日.

**正会員 大島商船高等専門学校 (山口県大島郡周防大島町小松 1091-1) .

る。一般に、回収された熱可塑性プラスチックは、再ポリマー化されて再び製品となって流通しているものや、熱分解してプラスチック油へと再利用されている¹⁾。

しかしながら、海洋を漂流していたり、海岸に漂着した発泡ポリスチレンは、長期間にわたり海洋上を漂流している間に塩分が付着し、また、損傷や亀裂した箇所から内部に海水が浸入している。

この塩分は、これら発泡ポリスチレンを熱分解してプラスチック油として供する場合や固形燃料として使用する場合に、燃焼中に塩酸ガスを発生させて燃焼装置や配管を腐食させるために、熱分解油について塩分含有量に規制が設けられている。そのため、海から回収された発泡ポリスチレンから熱分解油や固形燃料を得ても塩分を含むために実際に使用することはできない²⁾⁶⁾。

我々は、コスト低減を図った発泡ポリスチロールの脱塩・減容化装置を提案している⁷⁾。本研究では実用装置を製作するための必要な設計データを得るため、オイルバスを利用した廃油による発泡ポリスチロールの脱塩・減容化特性について調査を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置および実験方法

図2は実験装置の概観図を示す。使用したオイルバスは直径200mm、高さ150mmの耐熱容器である。廃油の量は容器の底から110mmの高さまで挿入し、温度は投げ込みヒーターを使って140、150、160、170、180、200℃になるように温度調節を行っている。試料である発泡ポリスチロールの大きさはφ100mmの球体である。廃油による減容過程における温度変化を測定するため、直径1mmのシース型熱電対(K型)を試料の中心部、廃油の表層部(底面から100mm)、中層部(底面から50mm)、下層部(底面から10mm)に設置し、減容過程における温度変化をデータレコーダにて採取した。

図2 実験装置

また、試料の減容変化を捉えるためデジタルビデオカメラをオイルバス上面及び側面に設置して、その様子をリアルタイムで撮影した。

次に試料表面に付着している塩分濃度の測定は以下の手順にしたがって行う。

- ① 蒸留水 24cc を準備する。
- ② 清浄なガーゼに①の蒸留水を浸し、測定面(20×20cm)の表面をこのガーゼで拭いとる。
- ③ 拭いとしたガーゼを①の蒸留水の中で濯ぎ、蒸留水の方へ塩分を移す。
- ④ ②～③を5回繰り返す。
- ⑤ 採取した塩分を含んだ水の中の塩分濃度を塩素検知管(光明理化学工業(株)201SA)で測定する。

塩素イオン濃度(ppm)と塩分(mg/m²)の関係式は式(1)で表される。

$$N = C \times L \times \frac{NaCl}{Cl} \times \frac{1}{M} \quad (1)$$

ここで、

N : 塩分量 (mg/m²)

L : 蒸留水量 (L)

C : 塩素イオン濃度 (ppm)

$NaCl$: 塩化ナトリウムの分子量 (58.5)

Cl : 塩素の原子量 (35.5)

M : 塩分採取面積 (m²)

蒸留水量 0.024L (24mL)、採取面積 0.04/m²および塩化ナトリウムの分子量、塩素の原子量をそれぞれ式(1)に代入すると、

$$N = C \times 0.024 \times \frac{58.5}{35.5} \times \frac{1}{0.04} \cong C \quad (2)$$

したがって、塩素検知管で求めた塩素イオン濃度(ppm)は塩分量(mg/m²)に等しいことになる。本実験では、廃油の設定温度毎に塩分濃度の変化を減容化前後で測定を行った。

2.2 試料

試料のサイズは、上述したようにφ100mmの球形発泡ポリスチロールである。人工海水を飽和した模擬発泡ポリスチロール廃棄物試料の作製は、以下の手順で行う。

- ① 市販されている球形発泡ポリスチロールは、定温乾燥器(ヤマト科学・DVS402)により303K±1Kの雰囲気中で乾燥させる。そして密閉容器にて常温まで冷却する。
- ② 精製水約50kgと海水の素(ジェックス社製・ドライタイプ)約1.8kgで調製した人工海水に、常温の試料を約30分間浸漬して海水を飽和させる。
- ③ 海水を飽和させた試料は、人工海水から取り出

し、屋内で自然乾燥する。これを、今後模擬廃棄物と称す。

オイルバス内の廃油温度は、140℃から 180℃までは 10℃ずつ上昇させた 5 個の温度条件、さらにこれから 20℃上げた 200℃の合計 6 個の温度条件で実験を行った。なお、初期条件として模擬廃棄物はオイルバス内の廃油表面に外力を加えないで付着させた状態で実験を開始した。

3. 実験結果

3.1 減容プロセス

図 3 は、廃油の初期設定温度 140℃の状態における模擬廃棄物が減容化している様子、時間変化を示す。実験開始直後から模擬廃棄物が廃油に付着している底面部から微細な気泡が出現し、時間の経過と共に激しくなり、模擬廃棄物の大きさも急激に減少している。その後、ある時間が経過すると先ほどまで慌ただしく出ている気泡が減少し、それに合わせて減容化速度も低下していることが確認された。減容化速度がほぼ停止した模擬廃棄物の表面は、目の粗い多孔質状態を形成している。この減容化プロセスは、他の初期設定温度においても減容化速度には違いがあるが、ほぼ同様な変化傾向を示した。

図 3 模擬廃棄物の減容プロセス

3.2 減容化率と温度変化

次に模擬廃棄物の減容化率と模擬廃棄物内部の温度変化について検討した。

図 4 は、廃油の初期設定温度 140℃の状態において、図 3 に示した模擬廃棄物の減容化している動画データから画像処理ソフトにより算出した減容化率 (V/V_0) の時間変化を示す。ここで、 V_0 は試料の初期体積値、 V は試料の瞬時体積値を示す。図に示すように実験開始直後の減容速度は遅く、約 10sec 後から急激に減容化速度が速くなっている。これは図 3 に示した気泡放出の状態に対応している。この速度勾配は約 200sec 継続し、その後緩やかな速度に転じ、減容化が停止する。

図 4 減容化率の時間変化 (廃油の初期設定温度 140℃)

図 5 は、廃油の初期設定温度 140℃の状態における模擬廃棄物の中心部及びオイルバス内の廃油の高さ (底面から 10mm, 50mm, 100mm の位置) 方向の温度の時間変化を示す。廃油温度は実験開前から高さ方向で温度差があり、実験開始直後から模擬廃棄物に熱輸送が生じるため、全体的に緩やかに低下している。廃油の温度低下は模擬廃棄物が接触している表面付近が大きい。

図 5 模擬廃棄物内部及び廃油温度の時間変化 (廃油の初期設定温度 140℃)

一方、模擬廃棄物中心部の温度は実験開始後、約 50sec 付近まで 25℃一定の値を示していたが、その後急激に温度が上昇し、オイルバス底面から 50mm の位置の廃油温度と温度平衡している。

図 6 は、廃油の初期設定温度 160℃の状態における減容化率 (V/V_0) の時間変化を示す。廃油初期設定温度を上げると、図に示すように急激に減容化していることが確認できる。図 4 で示した廃油初期設定温度 140℃に比べて、 $V/V_0=0.2$ になるまでの時間が約 1/4 に短縮されており、廃油初期設定温度は減容化速度に大きく影響していることがわかった。

図 6 減容化率の時間変化 (廃油の初期設定温度 160℃)

図 7 は、廃油の初期設定温度 160℃の状態における模擬廃棄物の中心部及びオイルバス内の廃油の高さ (底面から 10mm, 50mm, 100mm の位置) 方向の温度の時間変化を示す。廃油の温度は、実験開始前において高さ方向で温度差はほぼ無く、実験開始後においても図 5 で示した廃油の初期設定温度 140℃に比べて、大きな温度低下は見られない。また模擬廃棄物中心部の温度は、実験開始後約 20 秒で急激な温度上昇が始まり、約 50 秒後には廃油温度と温度平衡している。

図 7 模擬廃棄物内部及び廃油温度の時間変化
(廃油の初期設定温度 160℃)

図 8 は、各々の廃油の初期設定温度における減容化率の時間変化を示す。図に示すように廃油の初期設定温度を増加させていくと、減容化速度が大きくなることからわかる。特に減容化率 $V/V_0=0.2$ で比較すると、廃油初期設定温度を 140℃から 150℃に増加させると、減容化に要する時間が約 1/2 に短縮され、160℃になると図 6 で示したように減容化に要する時間が約 1/4 になる。さらに廃油初期設定温度を上げていくと、減容化に要する時間は短縮されていくが、その変化は小さくなっている。

以上のことから、廃油の初期設定温度は減容化率に大きく影響するが、廃油初期設定温度 160℃以上になるとその時間短縮に大きな差が現れないことから、本実験条件の範囲では、廃油初期設定温度は 160℃が最適であると思われる。

図 8 各々の廃油の初期設定温度における減容化率の時間変化

3.2 塩分濃度

図 9 は、廃油初期設定温度を変化させた場合における減容化前後の模擬廃棄物表面の塩分濃度の変化を示す。模擬廃棄物表面の塩分濃度は、廃油初期設定温度の違いによって多少のばらつきがあるが、500mg/m²

図 9 減容化前後における模擬廃棄物表面の塩分濃度の変化

以上の値を示している。減容化後、模擬廃棄物表面の塩分濃度を測定した結果、いずれの廃油初期設定温度においても塩分濃度が 100mg/m^2 以下に抑えられており、これらの結果は、発泡ポリスチレンを熱分解してプラスチック油として使用する場合の熱分解油の塩分含有量の規制値 100ppm を下回っていることが確認された。

4. まとめ

本研究で発泡ポリスチロールの減容化装置を製作するための必要な設計データを得るため、オイルバスを利用した廃油を利用した発泡ポリスチロールの脱塩・減容化特性について調査を行い、以下のような知見を得た。

- 1) 減容過程における模擬廃棄物と廃油との接触界面付近において、激しい気泡が発生するが、この現象は一定ではなく、時間の経過に伴って変化する。
- 2) 減容過程におけるオイルバスの廃油の温度は、廃油の設定温度が低い場合には表層部の温度が減容過程の間、約 10°C 低下するが、設定温度の上昇に伴い温度低下率は小さくなる。またその影響は中層部、低層部ではさらに小さくなる。さらに減容過程における模擬廃棄物の中心温度は、設定温度が高くなるにつれて中心部の温度上昇が速くなる。
- 3) 廃油設定温度の上昇に伴い、模擬廃棄物の容積変化率は大きくなるが、 160°C 以上になるとその影響が次第に小さくなる。
- 4) 廃油を利用した減容化プロセスにおいて減容化と同時に脱塩処理が行われ、模擬廃棄物表面の塩分濃度は実験条件範囲の廃油設定温度においても 100mg/m^2 以下に抑えられる。

参考文献

- 1) (社) プラスチック処理促進協会: プラ再資源化フロー図 (2007 年) プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況 (2008) http://www2.pwmi.or.jp/siryo/flow_index.htm (参照日 2011 年 5 月 15 日)
- 2) 福島正明, 他, 使用済みプラスチック製容器包装油化リサイクルにおける脱塩素技術の開発, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol.22, No.3, 178-189, 2011
- 3) H. Tachibana and K. Wakai, Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics, 678 - 708, J. Scheirs and W. Kaminsky (Ed.), John Wiley and Sons, Ltd. (2006)
- 4) Y. Sakata, M. A. Uddin, K. Koizumi and K. Murata, Thermal Degradation of Polyethylene Mixed with Poly (vinyl chloride) and Poly (ethyleneterephthalate), Polymer Degradation and Stability, Vol. 53, 111 - 117 (1996)
- 5) 塩谷 操, 若井慶治, 福島正明: 廃プラ油化プラントの 運転実績と今後の課題, プラスチック化学リサイクル 研究会 (FSRJ) 第 9 回 討論会, 26 - 27 (2006)
- 6) 日本工業規格: 廃プラスチック熱分解油 —— ボイラ用 燃料及びディーゼル発電機用燃料, TS Z 0025 : 2004 (2004)
- 7) 特開 2016-050263 : 漂着発砲ポリスチレンの減容化方法及びその装置, 川原秀夫・山口伸弥・三原伊文・生駒信康

著者紹介

- 川原 秀夫
- ・日本マリンエンジニアリング学会 正会員
 - ・1968 年生。
 - ・大島商船高等専門学校商船学科
 - ・山口大学大学院理工学研究科 博士 (工学)
 - ・燃焼工学
- 山口 伸弥
- ・日本マリンエンジニアリング学会 正会員
 - ・1980 年生。
 - ・大島商船高等専門学校商船学科
 - ・東京水産大学水産学部
 - ・船用機関学

- 三原 伊文
- ・日本マリンエンジニアリング学会 正会員
 - ・1947 年生。
 - ・元大島商船高等専門学校商船学科
 - ・神戸大学大学院 博士 (工学)
 - ・船用機関学