

合成高分子と海洋プラスチックごみ

増田俊夫*

はじめに

人類は近現代には産業社会となり化石資源や豊かな物質の恩恵を享受してきた。このような社会の進化のおかげで、人口が増大し人の寿命も伸びてきた。その一方で、空気の汚染（酸性雨、ダイオキシンなど）、水の汚染（有機物質、水銀など）、土壌の汚染（重金属、放射性物質など）による環境問題が発生してきたが、人々はこれらの問題に対して可能な限り適切に対処してきた。

近年人類社会や経済のグローバル化に伴い、環境問題も地球的規模で見られるようになった。中でも、地球温暖化とプラスチックごみの問題が現在顕著になっている。プラスチック（合成樹脂）などの合成高分子は金属、セラミックスと並ぶ三大材料の一つとして20世紀中頃から急激に消費量が増大したが、そのごみが自然循環せず近年大きな問題となりだした。本小稿では合成高分子、海洋プラスチックごみ、循環型素材、環境にやさしいプラスチックなどについて眺めてみたい。

高分子科学とプラスチック

高分子は、大別すると天然高分子、合成高分子、生体高分子、無機高分子の4つに分かれる。その中で現在では、人間が作って使っている合成高分子が非常に大きな比重を占めるに至っている。

図1には高分子の科学と工業の歴史の概略を示す。人間は有史以前から、天然繊維などの天然高分子を使ってきた。高分子というものが認識され化学的に合成されだしたのは、1920年頃のことであり、まだ百年前後しか経過していない。20世紀後半には高分子科学が発展し、様々なプラスチックが生産され、金属に変わる材料としても応用されるようになった。しかし21世紀に入る頃から、高分子科学のフェーズは変化し、現在ではプラスチックごみの処理問題、高機能高分子の開発、生体高分子・医用高分子の開発などに焦点が変わってきている。

脱炭素化と並ぶ地球的規模の環境問題としてプラスチックごみ(プラごみ)の問題がある。表1は、世界のプラスチック生産量の経年変化を示したも

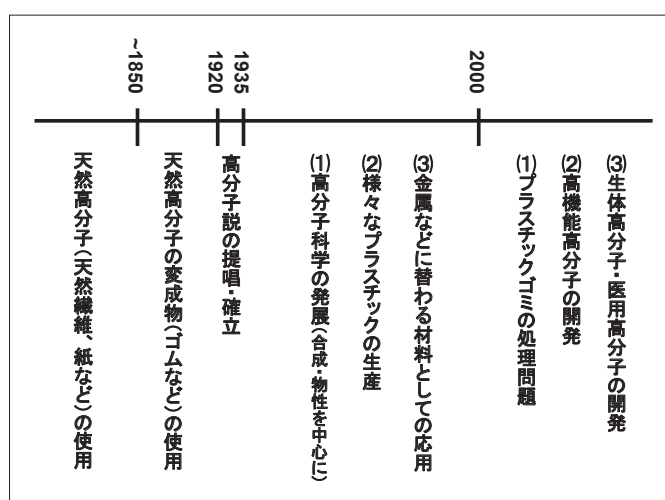


図1. 高分子の科学と工業の経年変化

*京都大学名誉教授

表 1. 世界のプラスチック生産量

西暦年	生産量 (単位100万トン)
1950	1.5
1964	15
1976	50
1989	100
2002	200
2022	400

のである¹⁾。プラスチックは第二次世界大戦後に本格的に生産されたが、1950年におけるプラスチックの生産量は150万トンで、まだ僅かであった。その後急激に増え続け、1989年には1億トン、2022年には4億トンに達している。現在の世界の人口は約80億人なので、一人当たりで換算すると50kg生産されていることになる。

図2に示すように、合成高分子は機能や用途の面からも著しい進化を遂げてきた。汎用高分子は価格が安く、使い捨てプラ、成形品、合成繊維などに使われている。高性能高分子は、耐熱性が高く、力学的にも丈夫なので、航空機、高強度繊維などに使われている。また、光・電子機能高分子はレンズ、レジスト材料など様々な分野で用いられている。最近では医用高分子も多数開発され、人工腎臓、眼内レンズなど身体の代替材料として活躍している。例えば、人工腎臓（血液透析装置）は2023年現在日本で34万人がその恩恵に預かっており、白内障治療のための眼内レンズの導入手術も2022年1年で150万件に達している。

プラスチックはどのような用途に使われている

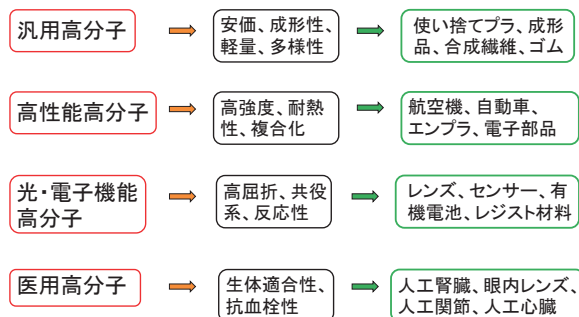


図 2. 合成高分子材料の進化

表 2. 世界におけるプラスチックの用途

用途	割合 (%)
使い捨てプラ	36
土木・建築資材	16
合成繊維	14
日常生活用品	10
輸送資材	7
電気・電子材料	4
工業素材	1
その他	12
合計	100

のだろうか。最も多く使われているのは、使い捨てプラスチック（使い捨てプラ）で、全体の36%を占めている²⁾（表2）。その他、土木建築資材、合成繊維、日常生活用品などとして多く使われている。使い捨てプラは英語ではsingle-use plasticと呼ばれ、その用途はレジ袋、発泡スチロール、簡易食品容器、ストロー、PETボトルなどである。使い捨てプラは放棄ごみになりやすく、現在では多くの国で使用が規制または禁止されているが、日本と米国では他国と比べて規制が緩く、4R (reuse, recycle, reduce, refuse) が遅れている。

海洋プラスチックごみとマイクロプラスチック

2024年にNatureに発表された論文が2020年時点でのプラごみ汚染の世界ランキングを示している³⁾。この論文によると2020年に世界で約2億5千万トンのプラごみが発生し、このうち5千万トンが環境中に廃棄されたという。国別ではインドが930万トンで最多であり、中国は2018年プラごみの輸入を禁止したこともあり280万トンで以前より改善されている。

次に海洋プラスチックごみ（海洋プラごみ）について考えてみる。J.R. Jambeckらが2015年にScienceに発表した論文は、扱われているデータは2010年と少し古いですが、世界の海洋プラごみについての著名な論文である⁴⁾。海洋プラごみを最も多く出したのは中国で、インドネシア、フィリピン、ベトナムなど東南アジア諸国がそれに続く。2010年の世界のプラスチック生産量は2億

6500万トンで、海洋プラスチック総量の間値は800万トンであった。したがって、全プラスチックのうち海洋プラスチックになった割合は、 $8 \div 265 \times 100$ で3%程度と推定される。

E. MacArthur 財団が2016年のDavos会議において、「2050年には海中におけるプラスチックごみの量が魚の量より多くなる」という衝撃的な報告をした⁵⁾。表3は、そのデータを要約したものである。上述のJambeckらの論文に基づいて、プラスチック生産量に対する海洋プラスチックの割合(B/A)は常に3%と仮定した。同様に、累計プラスチック生産量に対する累計海洋プラスチックの割合(D/C)も常に3%と仮定して、BやDを算出した。そしてこれまでのデータの外挿から、2050年における累計プラスチック生産量は330億トンと推計した。したがって累計海洋プラスチックはその3%で10億トンとなる。一方、海洋中の魚の全重量は常に8億トンと仮定する。その結果、2050年には海洋プラスチックと魚の重量比は10:8となり、海洋プラスチックの方が多くなるという結論が導かれる。

海洋プラスチックは最近毎年約1100万トン増加していると推定され、サイズによって図3のように分類される。「マイクロプラスチック」(MP)という言葉はR.C. Thompsonらが2004年に初めて使用したもので⁶⁾、サイズが5mm以下の海洋プラスチックを言い、近年海洋汚染物質として注目されている。使い捨てプラスチックが海洋中で細片化してできた二次マイクロプラスチックとタイヤの摩耗物や

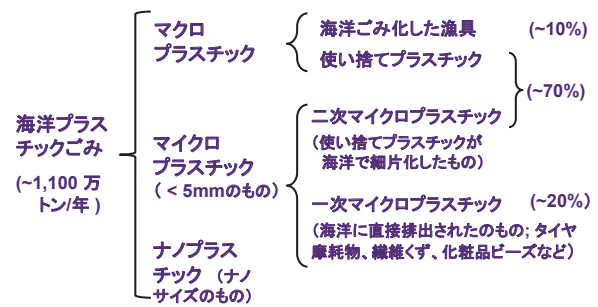


図3. 海洋プラスチックごみの分類

繊維クズなど元々サイズの小さい、海洋に流出したプラスチックである一次マイクロプラスチックに分けられる。海洋プラスチックの種類と割合は、海洋ごみ化した漁具(約10%)、二次マイクロプラスチックを含む使い捨てプラスチック(約70%)、一次マイクロプラスチック(約20%)と推定される⁷⁾。

MPは、海中の微生物、大小様々な魚、そして海鳥によって食物と間違えて摂取される。最終的には、人間が魚を食べることによってマイクロプラスチックを摂取することが現実問題となりつつある⁸⁾。

MPは最近大気中でも検出されている⁹⁾。大気中のMPは輸送、拡散、沈着により移動し、移動しやすさはMPのサイズ、形状、長さによって影響を受けながら、至る所に広がる。空気中に浮遊するMPの吸入と経口摂取により体内に侵入し、その後様々な臓器や組織に移行し、蓄積する可能性がある。MPの毒性は、その物理的特性(サイズ、形状、長さ)、化学組成(添加剤の有無やポリマーの種類)、濃度、老化の度合いなどに依存する。

地球表面におけるプラスチックの増加を考えると、プラスチックを地球の歴史においてかつて見られなかった化学的性質を持つ新興の地質物質として捉える必要がある¹⁰⁾。プラスチックを地球上の天然有機物質と比較すると、炭素量は匹敵する可能性があり、地球化学者は分析においてプラスチックを考慮すべきであることを示唆している。プラスチックの出現は、地球の元素循環に対する人類の大きな影響並びに人新世(anthropocene)の到来を意味している。

表3. 海洋プラスチックごみと魚の量との比較

西暦年	2014	2050
プラスチック生産量(億トン)(A)	3.1	11
海洋プラスチック(億トン)(B)	0.09	0.33
累計プラスチック生産量(億トン)(C)	50	330
累計海洋プラスチック(億トン)(D)	1.5	10
海洋中の魚の全重量(億トン)	8	8
プラスチック:魚	1.5:8	10:8

注) B/A=D/C=3%と仮定

「プラごみ条約」作成のための第5回政府間交渉会合（INC-5）が2024年11,12月に韓国釜山で開催された。この会議では、EUなどの規制案に対して産油国である中東、ロシアなどはプラスチック生産の規制を設けないことを主張した。結局合意は見送られ、今後交渉再開を模索するという結論になった。この会議は2025年8月5～15日にジュネーブで再開されたが（INC-5.2）、やはり合意には至らなかった。

プラスチックと循環型素材

プラスチック（より一般的には合成高分子）は、我々の生活を便利で豊かなものにしてきているが、化石資源を原料としていることとプラごみ問題の観点から課題も含んでいる。一方、循環型素材は、持続可能素材や再生可能素材とほぼ同義で使われ、例としては天然素材、バイオ由来素材、リサイクル素材、アニマルフリーな（ビーガン）素材、フェアトレードの素材などを含む。因みに循環型素材は、2015年国連総会で採択され2030年までに達成すべき「持続可能な開発目標（SDGs）」の中の12番目の項目「つくる責任、つかう責任」とも深く関係している。ここでは、合成高分子と循環型素材の相互関係、後者による代替可能性などについて考えてみる。

日本では、2023年度約1.5億トンの石油を消費し、約50%を動力源に、約30%を熱源に、そして残りの20%を化学原料（そのうち約10%はプラスチックの生産）に使用している。

世界における最近の合成高分子と他の素材の消費量を比較してみると表4のようになる。合成繊維と天然繊維の消費量を比べると前者が後者の2倍近いことが分かる。合成繊維の大部分はポリエステルであり、天然繊維の過半は木綿である。繊維ごとに性質や機能が異なり、合成繊維を極端に減らすことは困難である。合成ゴムと天然ゴムを比較すると量的には前者の方が多く、両者では製法も用途も異なる。プラスチック一般についても従来からの素材である鉄、木材、紙などと匹敵す

表4. 世界の合成高分子と他の素材の消費量（2022）

合成高分子		他の素材	
合成繊維	6200 万トン	天然繊維	3300 万トン
〔ポリエステル	5400 万トン〕	〔木綿	2500 万トン〕
〔その他	800 万トン〕	〔羊毛	120 万トン〕
		〔その他	680 万トン〕
合成ゴム	1500 万トン	天然ゴム	1300 万トン
プラスチック	4 億トン	鉄	19 億トン
		木材	10 億トン
		紙	4 億トン

る量が使われていることが分かる。因みに、重量ではプラスチックより鉄の方がたくさん使われているが、体積では逆転することは注目に値する（プラスチック4億m³ vs 鉄2.4億m³）。

使い捨てプラなどの汎用高分子は紙、木材、その他の循環型素材にある程度置き換えることができるが、光・電子機能高分子や医用高分子などいわゆる機能性高分子を循環型素材に置き換えるのは困難である。したがって、合成高分子特に機能性高分子は、プラごみ問題が起こらないよう使用後の処理に注意し、また量の削減に努力して使用するべきであろう。

環境にやさしいプラスチック

環境にやさしいプラスチックとして、生分解性プラスチック（biodegradable plastic）とバイオマスプラスチック（bio-based plastic）がある。後者はバイオ由来プラスチックとも呼ばれることがある。生分解性プラスチックとバイオマスプラスチックをまとめてバイオプラスチックという人もいるが、前者は性質に後者は由来に基づく命名であり、これらをまとめてバイオプラスチックと呼ぶのは専門用語の立場からは好ましくない。

生分解性ポリマー（生分解性プラスチック）は、たとえプラごみになっても自然の中で分解し、環境に優しいポリマーであることを示している¹¹⁾。一方、バイオマスポリマー（バイオマスプラスチック）は、大気中のCO₂から光合成で得られる天然の循環型素材由来であれば、廃棄処理されてCO₂が発生してもカーボンニュートラルである。

表 5. 生分解性ポリマーとバイオマスポリマー

	非生分解性 (特性)	生分解性 (特性)
石油由来 (原料)	従来ポリマー (石油から合成されるほとんどのポリマー) 例、ポリエチレン ポリプロピレン、 ポリスチレン	生分解性ポリマー (地中または海中で分解するポリマー) 例、ポリ(ε-カプロラクトン) ポリビニルアルコール ポリエチレングリコール
バイオ由来 (原料)	非生分解性バイオマスポリマー (バイオマス由来であるが生分解しないポリマー) 例、バイオ-ポリエチレン バイオ-PET	生分解性バイオマスポリマー (生分解性を有するバイオ由来のポリマー) 例、ポリラクチド ポリ(3-ヒドロキシブチレート) 酢酸セルロース、キトサン

表5に示したように、環境の観点から我々の用いている高分子を、石油由来で非生分解性の従来ポリマー、石油由来の生分解性ポリマー、非生分解性バイオマスポリマー、そして生分解性バイオマスポリマーの4種類に分けることができる。石油由来の従来ポリマーの大部分は非生分解性である。その代表的なものはポリエチレン、ポリスチレンなどの炭化水素系ポリマーである。

石油由来の生分解性ポリマーの例は少数で、ポリ(ε-カプロラクトン)、ポリビニルアルコール、ポリエチレングリコールなどがある。微生物分解や加水分解を受けるためには、水溶性で官能基を有するものが多い。一方、非生分解性バイオマスポリマーとしてはバイオ-ポリエチレンやバイオ-PETなどが知られている。これらは原料がバイオマスであるというだけで、石油由来のポリエチレンやPETと基本的に同じものであり、製造工程が多段階でメリットは少ない。

表5右下の欄の、生分解性バイオマスポリマーは大別すると2種類あり、天然低分子経由のポリマーと天然高分子の反応または処理により得られるポリマーとに分かれる。前者の例としては、ポリラクチド、ポリグリコリド、ポリ(3-ヒドロキシブチレート)などがある。これらのポリマーは高価格や煩雑な合成がやや難点である。後者の例としては、酢酸セルロース、セルロースナノファイバー、キトサン、ポリペプチドなどがある¹²⁾。

典型的な生分解性バイオマスポリマーであるポ

表 6. 典型的な生分解性バイオマスポリマー

	ポリラクチド類	ポリ(3-ヒドロキシブチレート)類
構造式	$\left(\text{O}-\underset{\text{CH}_3}{\underset{\text{O}}{\text{C}}}-\text{C} \right)_n$	$\left(\text{O}-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{O}}{\text{C}} \right)_n$
原料	とうもろこし	植物油
合成法	糖発酵による乳酸合成 + 化学合成(開環重合)	微生物発酵(Alcaligenes eutrophus)
世界での生産量(2019年)	~30万トン	~4万トン

リラクチド類とポリ(3-ヒドロキシブチレート)類の特性等を表6に示した。これらのポリマーは共に脂肪族ポリエステルである。ポリラクチドはとうもろこしなどから発酵法により乳酸を合成し、ラクチドに変換してから開環重合により得られる。一方、ポリ(3-ヒドロキシブチレート)は植物油などを栄養源として微生物発酵により合成される。バイオマスポリマーの生産量は合計で2,3百万トン程度で合成高分子全体の1%に満たないが、今後徐々に増加していくことが期待される。

おわりに

本小稿は次のようにまとめられる。

20世紀前半に高分子の概念が確立され、20世紀後半には化石資源を用いてプラスチックなどの合成高分子が大量に合成されるようになった。プラスチックは我々の生活を豊かにしてきた。このような化石資源の利便性に偏った大量のプラスチック類の利用に対して、海洋プラスチックごみなどの問題が起こり、最近では環境の観点から使用量を減らしたり循環型素材をより多く用いる必要に迫られている。生分解性プラスチックやバイオマスプラスチックの研究と実用化も徐々に進展している。今後循環型素材への円滑な移行が求められている。

付記：本小稿は、「近畿化学工業界」2025年9月号 pp 4-10に掲載された記事の転載許可を得たのち、後半部を一部修正してまとめたものである。

文献

- 1) Statista Japan, 2024-07-01 / Conversio Market & Strategy; Nova-Institute; Plastics Europe, 2023.
- 2) UN Environment Programme, 2018, Single-use plastics, p 4.
- 3) J. W. Cottom et al., *Nature*, **2024**, *633*, 101.
- 4) J. R. Jambeck et al., *Science*, **2015**, *347*, 768.
- 5) D.E. MacArthur, D. Waughray, M. R. Stuchtey, "The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics," World Economic Forum, 2016.
- 6) R.C. Thompson et al., *Science*, **2004**, *304*, 838.
- 7) 例えば, 保坂直紀, 「海洋プラスチック」, 角川新書, 2020.
- 8) 例えば, A.J. Nihart et al., *Nature Med.*, **2024**, *31*, 1114.
- 9) A.P.A. Lopez et al., *RSC Adv.*, **2023**, *13*, 7468.
- 10) A. Stubbins et al., *Science*, **2021**, *373*, 51.
- 11) 例えば, 岩田忠久, 繊維学会誌, **2019**, *75*, P-532.
- 12) 例えば, 宇山浩, 科学と工業, **2025**, *99*, 210.