

持続可能な社会における容器包装材の使い方

早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構 ナノプロセス研究所

加茂 徹

1. はじめに

我々が日常的に購入している商品は紙、プラスチック、金属、ガラス等の様々な素材の容器に入っている。これらの容器は単に中身を保護するだけでなく、陳列棚に数多く並ぶ類似品から消費者に商品を選んで貰うための宣伝媒体であり、各種の法律に基づいて中身や認証を示す表示板でもある。プラスチック容器は常温で食料品を長期間保存でき、しかも従来の缶や瓶等に比べて軽く丈夫で多様な印刷が可能であるため、食品用容器として大量に生産され、その結果、食事を作る度に台所では大量の廃プラスチックが排出されている。

プラスチックは 20 世紀後半の石油化学工業の勃興に伴って生産量が飛躍的に拡大し、2018 年には世界で年間 4 億 t が生産され¹、今後更に増大すると予想されている。一方、廃プラスチックは世界で年間 3 億 t が廃棄され、その 47% は容器包装類が占めている。不法に投棄された廃プラスチックの一部が河川を介して海洋に流出し、その総重量が 2050 年には魚類を越えると予想され²、廃プラスチックは国際的に最重要な環境問題の一つとして認識されるようになった。本稿ではプラスチック容器を中心に、炭素循環を原則とする持続可能な社会における容器包装類の使い方を検討する。

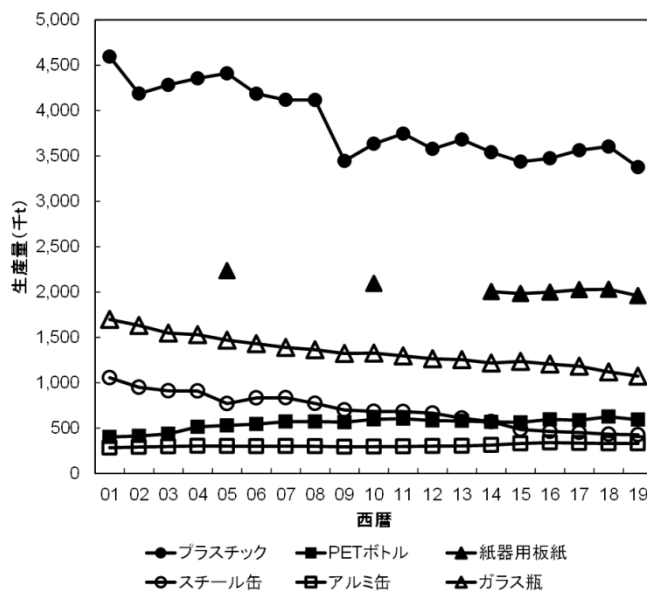


図1 各種容器の生産量

2. 容器包装産業の現状

容器包装産業の市場規模は容器類と関連機器を含めると総額6.1兆円(2019年)で、出荷総重量は約1900万t、重量基準で紙・紙板製品が66%、プラスチック製品が19%、金属製品が7%である³。特に段ボールの生産量は882万t⁴で全包装産業の約半分を占めている。

プラスチック製包装容器(PETボトルを除く)の生産量は2000年頃450万tであったが、経済の長期低迷、人口減少、容器の軽量化等によって2019年には340万tまで減少した(図1)⁵。

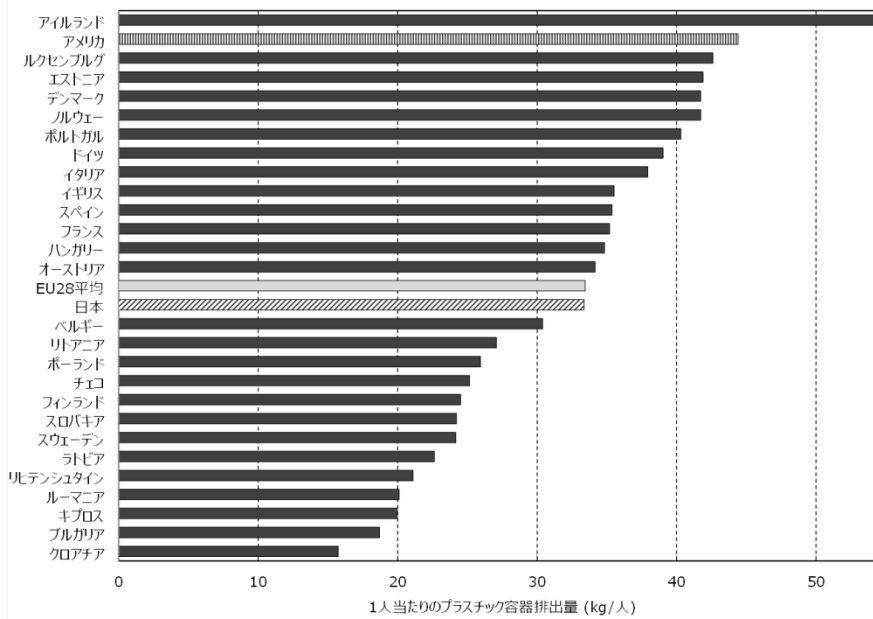


図2 一人当たりのプラスチック容器の排出量(2018)

日本の一人当たりのプラスチック容器の排出量は、33.4 kg/人でアメリカより少なく、EUの主要な工業国とほぼ同程度である(図2)⁶。PETボトルは軽量で丈夫、中身が見えて蓋が閉められるために年々市場規模

を増大させ2019年には年間生産量が59万tに達した。紙器用板紙の生産量は2015年頃までは漸減していたが、紙がカーボンニュートラルな素材であることが見直され増加に転じた。金属缶類では当初丈夫なスチール缶が多かったが、軽量なアルミ缶が年々増加している。ビール瓶等のガラス容器は循環利用することによって環境負荷が低下することは以前から知られているが、重く壊れ易いため消費者から敬遠され、出荷量は減少している⁷。

2001年に完全施行された容器包装リサイクル法は、EPR(拡大生産者責任)に基づき容器包装類を製造および利用する特定事業者から生産量に応じて委託費を徴収し、無駄な容器類の削減、容器包装類の環境配慮設計やリサイクルの促進等を目指した画期的な制度であった。しかし製造者とリサイクル業者間との連携が乏しく、容器包装材の生産量の抑制やリサイクルし易い容器の開発等はほとんど実施されなかった。PETボトルは軽量化されたが、利用量が増大したために全体として環境負荷の低減は不十分である。また入札制度が複雑で新規のリサイクル業者の参入が事実上阻害され、寡占の弊害でリサイクル費用は依然高い。

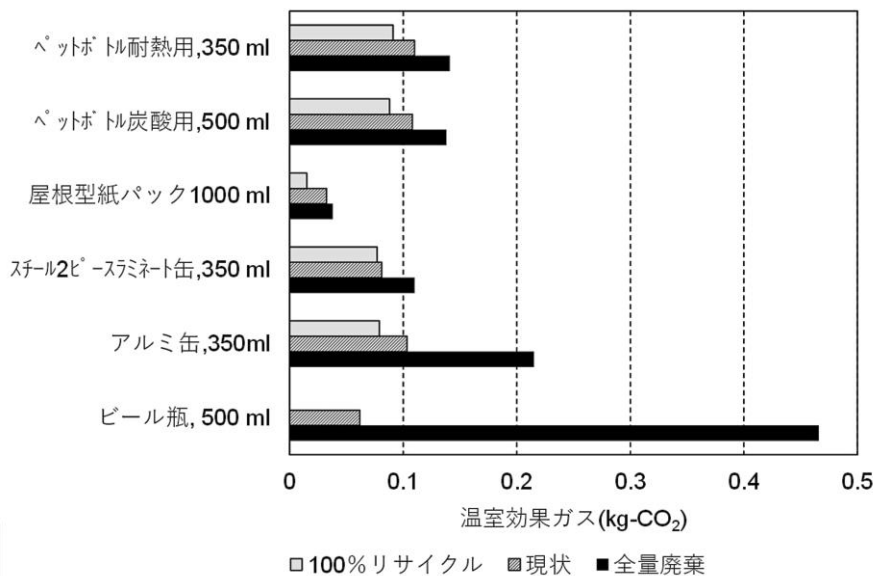
3, 各種飲料容器の環境負荷

プラスチックは炭素や水素等の汎用元素からなる有機化合物であり、その物性は化学構造や純度に由来する。原油からナフサを経て多くのプラスチックが製造されるが、投入されたエネルギーは内部に蓄積されておらず、金属をリサイクルする場合のエネルギー的優位性はない。プラスチックの化学構造と純度をそのまま利用するマテリアルリサイクルはプラスチックの特長を最も活かした手法である。しかし異種のプラスチック等が混入すると物性は著しく低下し、プラスチックのリサイクルを困難にしている。日本では飲料ボト

ルを無色透明な PET に限定し、ボトル本体への印刷を禁止したため、消費者から回収される使用済み PET ボトルは廃プラスチックとしては例外的に高純度で高品質である。生産に伴う二酸化炭素排出量は、回収率が増えるに従って低下し、容量による顕著な差は認められなかった（図 3）⁸。

食品容器に使用されている紙は全てバージン材で、紙器用板紙は 178 万 t（2019 年）使用されているが、飲料用紙容器（紙パック）を除いて大部分がエネルギー回収されている。家庭から排出される紙製容器包装材は 75 万 t あるが、容器包装リサイクル法に基づいて回収・再資源化される量は 1.9 万 t に過ぎない⁹。使用済み紙パックの回収率は 32% で、回収量の 75% がトイレットペーパー等の原料に、残りはエネルギー回収されている¹⁰。屋根型紙パック 1000 ml を製造する際の二酸化炭素の排出量に対し、内部のラミネートに使用されている低密度ポリエチレンの寄与が比較的大きい。

鉄やアルミニウム等の金属の原料となる鉱石は熱力学的に安定な酸化物で、精錬の際にエネルギーを加えて還元しスチール缶やアルミ缶として利用している。使用済みの金属缶の大部分は還元金属であり、金属缶を鉱石から新たに製造するよりはリサイクルした方がエネルギー的にも経済的にも圧倒的に有利で、回収率はスチール缶が 93%、アルミ缶が 94% と非常に高い。使用済みスチール缶の多くは建設用の筋金などへカスケード利用され、再度スチール缶へ利用される割合は小さい¹¹。イーザーオープンエンドの普及に伴い、より小さい力で開けることができるアルミニウム製のフタがスチール缶でも利用されている。リサイクルの際にアルミニウム製のフタは酸化してエネルギー源として利用されているが、素材としては有効利用されていない。アルミ缶を新しくボーキサイトから製造よりもリサイクルした方がわずか 3% 程度のエネルギーで済むので¹²、使用済み製品の回収率を高めることによって環境負荷を大幅に低減化することができる。



ビール瓶は原料を高温で熔解させるために、製造時に発生する二酸化炭素の排出量は大きい。しかし丈夫で洗浄することが比較的容易であり、回収率が 100% に近く何度も繰り返し利用できるために二酸化炭素の排出量は非常に小さい。

図 3 各種飲料容器の製造における二酸化炭素排出量

4, プラスチックリサイクルの特徴

4.1 マテリアルリサイクル

工業製品には多種類のプラスチックが使用されており、容器包装リサイクル法で回収された廃プラスチックからマテリアルリサイクルで再生されたプラスチックの品質は低く、パレットや植木鉢程度に利用されているものが多い。これまでは主に比重差等を利用して選別されてきたが、最近では各種の光学センサーを備えた選別機も広く普及してきた。今後、深層学習を備えた AI や、電子透かし等の情報技術を用いた選別機が普及すると不純物の混入割合が低下し、より高度なリサイクル製品が製造できると期待されている。またプラスチックの物性は分子構造だけでなく、結晶やラメラ等の高次構造も重要な役割を果たしていることが知られており、ペレット化や金型成型する際の剪断速度を制御することによって分子間の絡み合いを制御して物性を回復させる手法なども検討されている（図4）¹³。

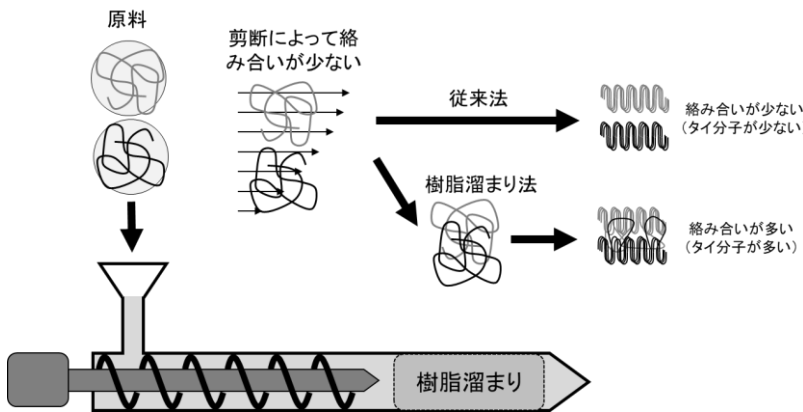


図4 樹脂溜まりを用いた物性修復技術

4.2 ケミカルリサイクル

マテリアルリサイクルでは原料の品質が製品に大きく影響するため、全ての廃プラスチックから高品質なリサイクル製品を製造することはできない。一方、エネルギー回収では二酸化炭素の発生を伴うため、廃プラスチックを化学原料へ転換させるケミカルリサイクルに再び世界の注目が集まっている。ケミカルリサイクルはループの小さい順にモノマーリサイクル、化学原料化、ガス化の3つに大別される。

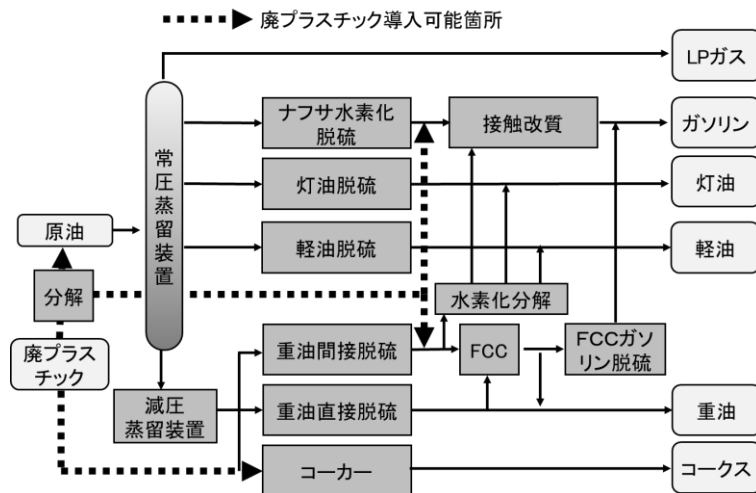


図5 石油精製プロセスの概要

モノマーリサイクルはポリスチレンやポリメタクリル酸等に対して検討されており、反応中間体が安定で連鎖移動反応が起こり難い化学構造を有

していることが重要である。また実用化するためには高収率で高選択性を有する分解技術だけでなく、高品質な原料の購入元と恒常的な需要先の確保が重要な課題となっている。

石油から製造されたプラスチックを原油相当の液体生成物へ分解する油化は、1970年代以降多くの研究が行われたが、経済性が低く、これまで長期間運転された商業プラントは無い。石炭に重量比1%の廃プラスチックを混合して熱分解させるコークス炉化学原料化法は日本で開発され、現在操業している世界最大のケミカルリサイクルプラントである。減価償却が完了した既存の大型施設を利用し、ガス状・液状・固体の生成物を全て有効利用できるために経済性が高い。同様に既存の大型施設を利用する方法として、廃プラスチックをいったん分解し、得られた液体生成物を石油精製・石油化学施設で化学原料へ転換する技術の実用化が世界中で検討されている（図5）¹⁴。

原料を1000℃以上の高温で水蒸気等と反応させるガス化は、廃プラスチックに限らず石炭・重質油・バイオマス・紙・ゴム等ほぼ全ての有機物を処理することが可能である。一方、合成ガスから目的とする化学原料を得るための合成プロセスの収率は低く、多くの研究開発が進められている。最近、新規に発見された菌を用いて合成ガスからエタノールを直接製造するプロセスが開発され、日本でも実証化研究が行われている。

4.3 エネルギー回収

エネルギー回収は低品位な有機系廃棄物を最終的に有効利用するため、必要不可欠な技術である。日本では廃プラスチックの約67%がエネルギー回収されているが、この割合は環境保全に熱心なドイツやスウェーデンとほぼ等しい（図6）¹⁵。日本のごみ発電プラントの規模は小さく、その発電効率の平均値は13%程度に過ぎず¹⁶、排熱もほとんど有効利用

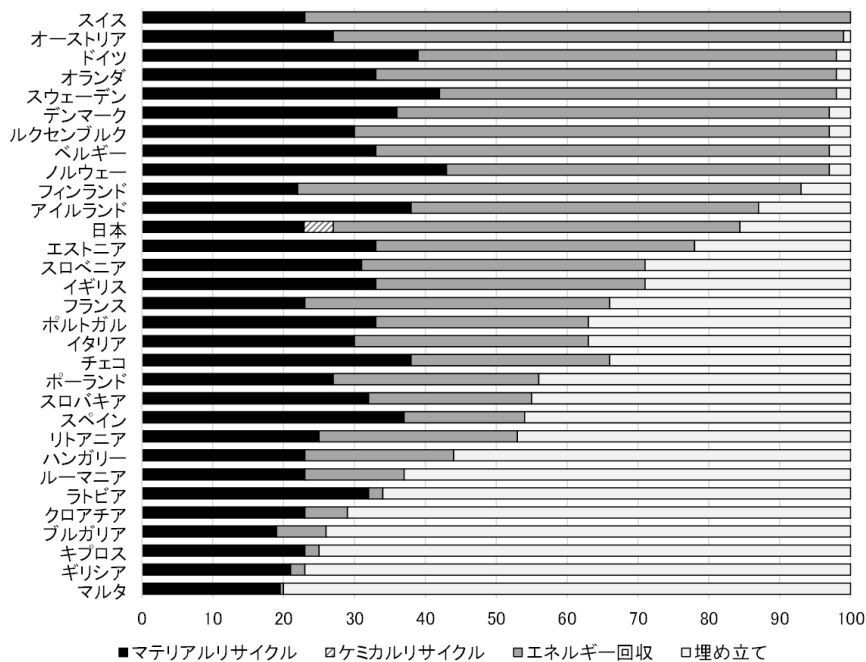


図6 廃プラスチックのリサイクル・エネルギー回収・埋立の割合 (2016年)

されていない。一方、EUのゴミ処理施設の規模が大きいために発電効率が高く、また排熱を地域の暖房に利用しているために総合的なエネルギー利用効率は高い。日本の気候に適し、経済的でエネルギーの有効利用効率を飛躍的に高めるための革新的な技術の開発が期待されている。

5. 炭素循環を前提した資源循環社会の実現への課題

これまでは石油等の化石資源がエネルギー源として大量に利用されていたため、廃有機素材をエネルギー回収に利用すれば省資源として一定の評価が認められてきた。また燃焼の際に発生した二酸化炭素は、植物あるいは海洋等の自然の作用に依存して固定化していたため、エネルギー回収は他のリサイクル方法に比べて経済的とみなされてきた。しかし炭素循環社会では、エネルギー回収の際に発生した二酸化炭素を我々自身で再び固定し再資源化させることが求められており（図7）、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルの重要性が相対的に増すと考えられている。

近い将来、有機材料は主に植物等のバイオマスから製造されると考えられている。しかしバイオマス資源は食料生産と競合する場合が多く、例え非可食性の植物を原料としても土地、水、リン等のミネラル類を食料生産と奪い合うことになる。また一見荒地であっても既存の生態系が存在しており、生物多様性への配慮も不可欠である。生分解性プラスチックはこれまで畑の土壤中で分解することを想定して開発されており、海洋等の低温で細菌密度が低い環境でも分解する素材は極めて限られている。また市民にプラスチックを投棄しても良いと誤解を与え、モラルハザードを引き起こす可能性があり、実用化では十分な配慮が必要である。

紙の原料となるパルプ材は輸入と国産がおよそ2：1で、広葉樹はベトナムやチリから、紙製容器包装材の原料となる針葉樹は米国やオーストラリアから輸入されており、これらの国々の森林面積は若干ではあるが植林等によって増加している¹⁷。また国内のパルプ原料は製材残材や人工林からのものが多く、現時点で製紙産業の炭素循環は適正に管理されていると言える。ただし、人工林は自然の森林に比べて生物多様性に対する配慮が不十分で、人工林を安易に増やすことができないと考えられている¹⁸。

使用済みの紙やプラスチックをエネルギー回収した際に発生する二酸化炭素を固定化する手法として、植物以外に触媒等を用いてギ酸やメタノール等に転換する研究（CCUS: Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）が進められている。熱力学的に安定な

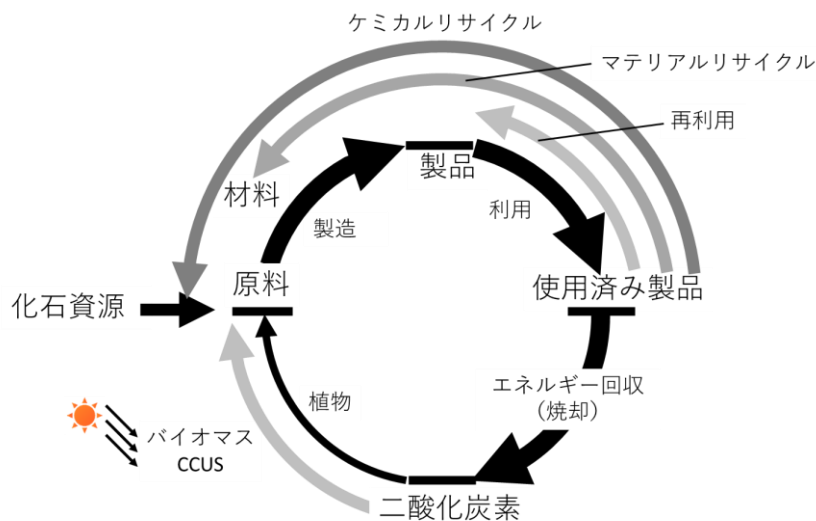


図7 炭素循環に基づく有機資源の循環利用

CO₂ を有機資源に転換するためには多くのエネルギーが必要であるが、太陽電池や風力発電あるいは地熱回収に適した土地は限られており、その建設・維持管理・廃棄に必要な経費も考慮しなければならない。



6. 持続可能や社会における容器包装材の使い方

1 世帯当たりの構成人数が減少し高齢化が進む日本では、少量多品種販売の傾向は今後さらに増加すると予想される。個別の需要に対応すると共にプラスチック容器の使用量を削減するため、量り売りの復活が試みられているが、衛生管理上の理由で実用化は一部の商品に限られると考えられる。現在、賞味期限を延ばして食品ロスを削減するためバリア性の高い多層材が使用されているが、これらの材料には多種類のプラスチック、ラミネート材、接着剤、インクが使用されており、リサイクルすることは非常に困難である。これらの問題を解決するにはバリア性が高くしかも循環利用できる素材を開発すると共に、地産地消を促進し多層材に頼らない流通システムを構築することが重要である。

環境負荷を低減させるためには容器の循環利用が効果的であり、デザイン性の高い軽量で丈夫な容器を用い、個別集配を行う LOOP 商品が注目されている。このシステムを更に効率化するには街をコンパクト化し、自動運転の電気集配車を実用化させることも重要である。

炭素循環を原則とした社会では、有機素材は主にバイオマスから生産され、木材から製造されるパルプを原料とする紙容器は先駆的な例と見なすことができる。人工林を設ける土地は通常食料生産とは競合しない場合が多く、生物多様性に十分配慮すれば木材は有望なバイオマス資源と考えられる。現在、木材のセルロースだけが素材資源として活用され、ヘミセルロースやリグニンはエネルギー資源として主に利用されているが、今後はこれらの成分も素材資源として有効利用することが重要である。食料生産の際に排出される有機廃棄物、食品残渣、海洋で栽培される藻類等も有望な有機素材資源であり、今後の実用化研究が期待される。

2015 年に国連が採択した SDGs では、単に二酸化炭素の排出量を削減するだけでなく、省資源、省エネルギー、環境保全、生物多様性、人権等多様な価値の重要性が示されている。容器包装に関しても同様で、従来の価格や品質だけでなく、ライフサイクル全体を通じての環境負荷の低減や、幅広いエシカルな価値観で評価される商品の実用化が求められている。

¹ Roland Geyer, Jenna R. Jambeck, Kara Lavender Law, Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science Advances*, 3(7), e1700782, 2017.

² NEW PLASTICS ECONOMY, “RETHINKING THE FUTURE OF PLASTICS”, 2016, Ellen MacArthur Foundation.

³ 日本包装技術協会 <https://www.jpi.or.jp/toukei/2020.html> 2021 年 9 月 13 日.

⁴ 日本製紙連合会 <https://www.jpa.gr.jp/states/paper/index.html>, 2021 年 9 月 18 日.

⁵ プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況、プラスチック循環利用協会 2020 年 12 月.



-
- 6 eurostat, <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>, 2021年9月18日.
 - 7 ガラスびん3R促進協議会, <https://www.glass-3r.jp/data/index.html>, 2021年9月18日.
 - 8 平成16年度 容器包装ライフ・サイクル・アセスメントに関わる調査事業報告書、飲料容器を対象としてLCA調査、平成17年3月、政策科学研究所.
 - 9 日本容器包装リサイクル協会,
<https://www.jcpa.or.jp/recycle/recycling/tabid/427/index.php#link-target03>, 2021年9月18日.
 - 10 全国牛乳容器環境協議会, <http://www.yokankyo.jp/recycle/recycle.html>, 2021年9月18日.
 - 11 スチール缶リサイクル協会, <http://steelcan.jp/recycle/route.html>, 2021年9月18日.
 - 12 アルミ缶リサイクル協会, <http://www.alumi-can.or.jp/publics/index/24/>, 2021年9月18日.
 - 13 八尾滋, 環境研究総合推進費、成果報告書 2014~2017年、3K143013 高性能・高耐久性リサイクルプラスチック創製のための再生技術に関する基礎研究.
 - 14 プラスチックのケミカルリサイクルとその技術開発 (下)、ARCレポート、2020年
 - 15日本の廃棄物処理 平成29年度版 環境省環境再生・資源循環局 廃棄物適正処理推進課 平成31年3月
 - 16日本の廃棄物処理 平成29年度版 環境省環境再生・資源循環局 廃棄物適正処理推進課 平成31年3月
 - 17 世界森林資源評価(FRA)2020 メインレポート
 - 18 WWF JAPAN <https://www.wwf.or.jp/activities/basicinfo/1382.html>, 2021年9月18日.