

サステイナブルな材料への取り組み ～持続可能な社会への実現に向けて～

栗本英一^{*1}

Approaches to Sustainable Materials ～ Working Towards a Sustainable Society ～

Hidekazu Kurimoto^{*1}

1. はじめに

近年、世界が異常気象に見舞われ、地球温暖化がその一因と考えられている。2015年に開催されたCOP21（気候変動枠組条約第21回締結国会議）では、世界全体の温室効果ガス排出量削減のための方針と長期目標を設定し、2019年のCOP25では、それを具現化する議論を実施してきた¹⁾。

温室効果ガスには7種類あると定義されているが、その代表的なものが二酸化炭素である。そのため地球の気温上昇を抑えるために、二酸化炭素の排出量をプラス・マイナス・ゼロにすることが「カーボンニュートラル」を指すことになる。

世界各国の取り組みをみると、EUでは自主的に二酸化炭素排出量取引制度を導入し、早くから2050年カーボンニュートラルを宣言した。世界で排出量が最大である中国は、2060年カーボンニュートラルを宣言し、アメリカは「グリーンニューディール政策」より2050年カーボンニュートラルに向けて取り組んでいる²⁾。

これに対して日本では、2020年10月に菅首相が発言した「2050年カーボンニュートラル宣言」はメディアを通じて瞬時に拡散され、いまでは環境用語でなく経済用語になってきた。

豊田合成では、2021年4月に、カーボンニュートラルに向けた中長期シナリオとして「2050年カーボンニュートラルを改めて宣言」「2030年Targets50&50（スコープ1と2を対象に2013年比CO₂排出量▲50%、再生エネルギー導入率50%）を打ち出した。2050年カーボンニュートラルに向けては、従来から取り組んできたスコープ1と2に加え、スコープ3までを対象にした取り組みを開始した。スコープ3の排出量は、多くの企業で最も大きな割合を占めるが、排出削減目標を設定する企業は、まだ極少数であり自動車業界の各社も模索中である。

図-1に豊田合成のスコープ別CO₂排出量を示す。中でもスコープ3の原材料の調達や製品・部品の外部委託生産（カテゴリ1）が最も多い。そのため、原材料メーカーや外部委託生産先のCO₂排出低減への取り組みが必要である。豊田合成は、これらを含めたCO₂排出量を低減するシナリオ策定が急務である。

Scope別CO₂排出量

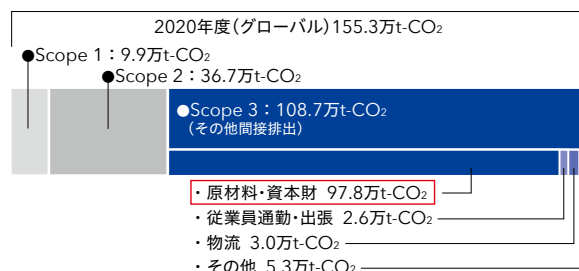


図-1 スコープ別CO₂排出量（2020年度）

今回は、スコープ3を対象に豊田合成主体で取り組む「サステイナブル材料」の考え方を、過去の開発事例を含めて報告する。

2. サステイナブル材料に向けた取り組み

サステイナブル材料の実現に向けて、豊田合成の当面の重点取り組みは以下の3つにまとめられる。1つ目は「省材料化」、2つ目は「廃棄物リサイクル」、3つ目は「バイオ材料の活用」である。これらは今までの取り組みにおいて、多くの知見と技術を蓄積しており、以下に詳細をまとめた。

2-1. 省材料化の取り組み

豊田合成は、燃費向上による地球温暖化対策のため長年、省材料化による軽量化・コンパクト化に取り組み量産してきた。図-2に豊田合成の自動車事業である機能(FC)部品、ウエザストリッ

*1 材料技術部

プ (WS) 製品, セーフティシステム (SS) 製品, 内外装 (IE) 部品が過去 20 年, 本技報で報告した軽量化の方策を示す. その方策は「薄肉化」「コンパクト化」「部品の削減」「低比重化」「発泡」が挙げられる.

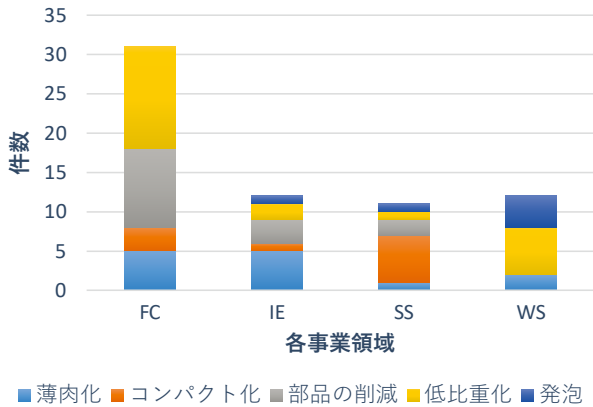
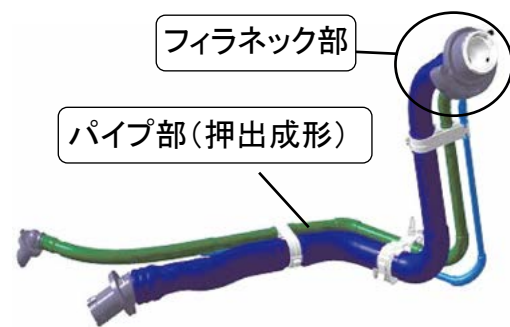


図-2 豊田合成の軽量化の取り組み

FC は従来の金属部品を樹脂への一体成形による「低比重化」や「部品の削減」, IE は設計・材料・成形のセットによる「薄肉化」「部品の削減」, SS はエアバッグの「コンパクト化」, WS はゴムから樹脂への「低比重化」や「発泡」が主な取り組みである. 代表事例として図-3 に FC 部品の樹脂フィラパイプを示す. フィラパイプとは給油ガンの挿入口から燃料タンクをつなぐ燃料給油用導管である. 豊田合成は, 均肉化に有利な押出成形により従来品と比較して 40% 以上の軽量化を実現した³⁾. これらの取り組みを基に, 今後も各事業領域の製品に適した方策で軽量化に取り組み, 省材料化を推進していく.



各部の機能

- 1) フィラネック部
給油ガンの挿入口/フューエルキャップとの気密保持
- 2) パイプ部
燃料給油用導管(燃料注入とタンク内ベーパー排出)

図-3 豊田合成の樹脂フィラパイプ

また豊田合成は, 2020 年から燃料電池自動車の新型 MIRAI 向けに高圧水素タンクを量産している. 高圧水素タンクは 3 層構造で樹脂ライナ,

その上に耐圧強度を確保する炭素繊維強化樹脂層, 表層はガラス繊維樹脂からなる (図-4).

今回, トヨタ自動車株式会社との共同開発において, 炭素繊維強化樹脂層の材料や生産方法などの工夫により, 耐圧強度を保ちつつ厚みを極小化して内容積を増やし, 水素の貯蔵効率を約 1 割高めることができた. 今後も燃料電池自動車の普及拡大に向け, 更なる高圧水素タンクの軽量化を材料・設計・工法の面から検討していく.

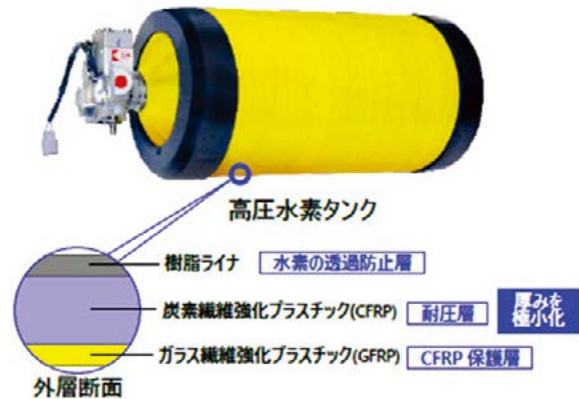


図-4 豊田合成の高圧水素タンク

2-2. 廃棄物リサイクルの取り組み

豊田合成は樹脂・ゴム材料を基盤として製品へ適用しており, 今後も物量の増加とともに生産時に発生する廃棄物は増えることが想定される. 今回, 樹脂・ゴム材料等のマテリアルリサイクルを推進する中で, 社会課題解決への貢献が大きく, 豊田合成ならではの取り組みを, 技術動向と併せて報告する.

- 1) 加硫ゴムの廃棄物
- 2) エアバッグ基布の端材
- 3) 高圧水素タンクの炭素繊維

1) 加硫ゴムの廃棄物⁴⁾

豊田合成の製品である工業用ゴム製品や自動車用タイヤなどの架橋ゴムは, 成形後も粉碎・溶融・再成形ができる熱可塑性の樹脂と異なり, ゴム弾性を発揮する三次元網目構造をもつ. そのため, 一般的に材料としてのリサイクル等が困難とされてきた. 廃タイヤなどのゴム廃棄物は, その半数以上が燃焼による熱エネルギーとして利用され, 材料としてリサイクルされる量は, 全体の廃棄量の約 17% である⁵⁾.

図-5 に従来の脱硫再生方法であるパン法を示す. 粗粉碎した廃ゴムに再生剤とオイルを添加し, 压力容器内で約 200℃ の水蒸気により加熱するバッチ式の処理であり, 約 5 時間の加熱処理の後, 更に精錬工程, ストレーナー処理工程などが必要となる.

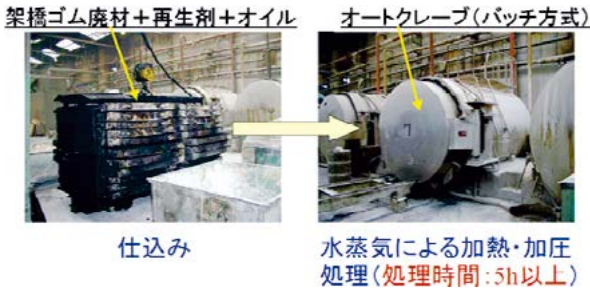


図-5 パン法によるゴムの再生工程

これに対して、株式会社豊田中央研究所、トヨタ自動車株式会社との協業により、汎用二軸押出機を応用した新たな架橋ゴムの脱硫再生技術を開発した。架橋ゴム中には、主にゴム分子(主鎖ポリマー)を形成するC-C結合、加硫により生成する架橋結合(硫黄加硫の場合はC-S結合、S-S結合)が存在する(表-1)。

表-1 架橋ゴムの分子間エネルギー

結合種 Bonding type	結合エネルギー Bonding Energy (kJ/mol)
C-C	370
C-S	310
S-S	270

本技術は、主鎖を形成するC-C結合に比べ、架橋結合点を形成しているC-S結合及びS-S結合の結合エネルギーが小さいことに着目し、架橋結合点だけを選択的に切断することに着想した。架橋点切断に適切なエネルギーを与える手段としては、汎用二軸押出機を活用し熱・剪断力・圧力・滞留時間を最適化にしてきた。

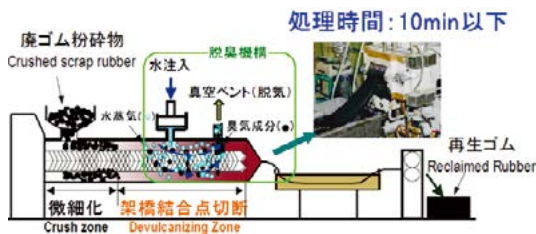


図-6 豊田合成のゴム再生工程の概要

図-6に豊田合成のゴム再生工程を示す。まず、予め粗粉碎した廃ゴムを、適切な温度に設定された押出機に投入する。投入されたゴム粉は、押出機の微細化ゾーンで更に微粉化され、圧縮過程を経て擬似熔融状態となり、そのまま高温下で剪断エネルギーを与え続けることにより、硫黄架橋点の開裂反応が起こる。この時の温度・剪断条件を最適に保つことで、ゴム分子主鎖を切断することなく硫黄架橋点のみを選択的に切断し、初期のゴム特性とほぼ同等の力学特性を得ることが確認できた(図-7)。

更に本技術では、反応中に水を強制注入し、脱硫過程で発生する臭気成分を水に溶解させ、真空ベントより脱気させることで、再生ゴム特有の臭気を同時に除去することも可能にした。

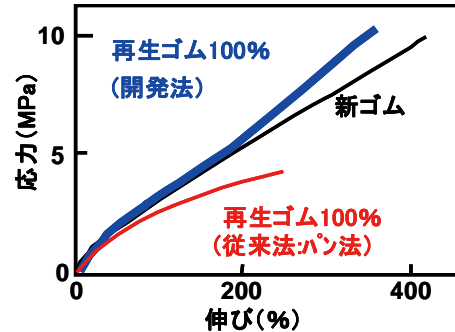


図-7 再生ゴムの応力-ひずみ線図

本技術は、豊田合成の森町工場にて20年以上前から量産化し、近年は金属インサート入り製品の脱硫再生ゴム等へ適用拡大してきた。従来のパン法に比べて自動化、省人化・省スペース化、労働者の安全性の向上、作業負荷も軽減されている。また、再生処理時間は従来パン法の5時間以上に対して、本技術では10分以下に短縮され、生産性は飛躍的に向上した。その成果が社会的にも認められ、日本ゴム協会優秀論文賞(2000年)、高分子学会賞(2003年)、中部科学技術センター顕彰・振興賞(2006年)、GSC賞(2009年)を3社で受賞している。今後は自社工程内廃材の100%活用だけでなく、市場から回収したゴム製品の活用に向けて、更なる高品位な脱硫再生ゴムの開発を進めていく。

2) エアバッグ基布の端材

エアバッグには、主にナイロン66が原糸に使用され、これを織布、後加工を施したものがエアバッグ基布である。ナイロン66が使われる理由は、インフレーターからの高温ガスなどの耐熱性、強度保持であるが、一部ではポリエステルも使用されている⁶⁾。コートの有無は、エアバッグの展開速度に合わせ使用部位別で設定しており、コート剤は一般的にシリコン樹脂が使用されている。表-2に示すように豊田合成のエアバッグ基布の端材は購入量に対して1割程度であり、その処理に取り組んできた。

表-2 エアバッグ基布端材の主な活用先

基布	コート	端材の活用先
ナイロン66	なし	・エンジンカバー ・内装部品 ・フェンダーライナー
	あり	社外へ有価物
ポリエステル		

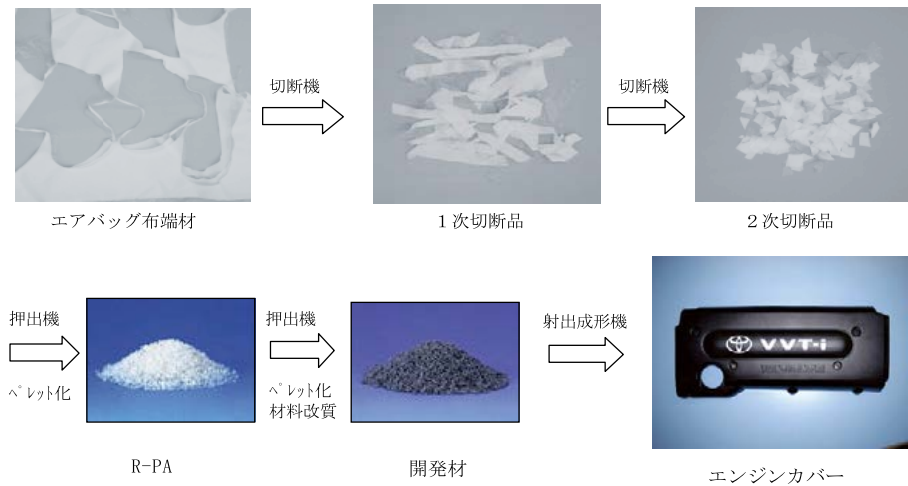


図-8 エンジンカバーの製造フロー

図-8 にエアバッグ布端材を活用したエンジンカバーの製造フローを示す。エアバッグ基布に使用されるナイロン66原糸は高分子量で、かつ結晶性が高く、結晶化速度が速い材料であるため、射出性を配合で改良して量産化した⁷⁾。

また豊田合成はSDGs経営の取り組みとして、材料調達から廃棄までの一連の生産活動における環境負荷の低減に注力している。その中で図-9に示すように、エアバッグ基布の端材を加工したエコバッグなどをオリジナルブランド「Re-S(リーズ)」として商品化した。



図-9 Re-S商品のエコバッグ

今後、豊田合成のSS事業拡大とともに、有価物で処理したコート有の基布を社内で活用していく。活用の方法は、コート有の基布をそのままリサイクルする、もしくはコートを分離してリサイクルすることである。

コート有の基布をリサイクルする取り組みとし

て、コート端材を起毛加工して吸音材などに活用する処方がある。また基布と同じ成分であるナイロン樹脂コート等により、分離することなくリサイクルが可能である基布も開発されている。

コートを分離する方法として、基材のナイロンやシリコンコートを溶解分離する方法があるが、ナイロンの分子量低下や廃液処理等の課題が残る。今後、基布そのものの再利用を含め、再資源化に向けて技術・適用開発を進めていく。

3) 高圧水素タンクの炭素繊維

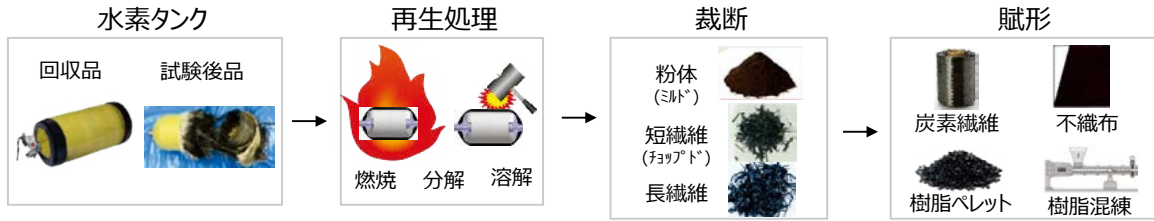
前項でも述べたが、豊田合成は電動化製品の取り組みの一つとして、燃料電池自動車（以下FCVと示す）の新型MIRAI向けに高圧水素タンクを量産している。

FCVは電気自動車とともにゼロエミッション車であるが、普及に向けては水素ステーション数などの多くの課題が残っている。その一つは廃車への対応である。FCVが搭載する高圧水素タンクには公式に定められた寿命「充填可能期限15年」があり、炭素繊維が大量に使用される水素タンクは、そのリサイクル方法が課題として顕在化しつつある。

炭素繊維強化樹脂は航空機、自動車の車体への用途拡大とともに、リサイクル技術の開発も盛んに行われてきた。表-3に示すように熱分解法・溶解法・流體法・電解法・触媒分解法等がある⁸⁾。

表-3 国内の炭素繊維リサイクル技術

技術分類	熱分解法	常圧溶解法	超臨界流體法	亜臨界流體法	電解法	触媒分解法
樹脂の種類	樹脂全て	エステル系	エステル系	エステル系	樹脂全て	樹脂全て
回収物	炭素繊維 ガス	炭素繊維 樹脂分解物	炭素繊維 硬化前熱硬化性樹脂	炭素繊維 樹脂分解物	炭素繊維	炭素繊維
温度	500℃	100～200℃	250～300℃	300～400℃	酸アルカリ 電解温度	400～450℃
圧力	常圧	常圧	5～10MPa	1～4MPa	常圧	常圧
前処理	なし	なし	粉碎	なし	チップ粉碎	なし
規模	2000トン/年	12トン/年	ラボスケール	ラボスケール	ラボスケール	ラボスケール



図－10 高圧水素タンクのリサイクル概要

ただし実用化を考慮すると、現段階では熱分解法と溶解法が有望と考えられている。特に熱分解法は各社が高精度・高効率を狙いに独自の技術を保有している。

図－10に示すように、豊田合成も熱分解法等で検討中である。適用製品の対象は、水素タンクだけでなく他製品も企画中である。適用の考え方は、炭素繊維の特性を活用することであり、新規事業も視野にいれて取り組んでいきたい。

2-3. バイオ材料の活用

バイオ材料は、過去から材料製造における石油依存度低減や、カーボンニュートラルといった観点から、自動車業界でも高分子材料向けに検討・量産化を実施してきた。事例として、トヨタ自動車株式会社が2009年に販売したSAIは、室内の表面積の約60%の部材で植物由来樹脂を使用した。今後、採用車種を拡大するとともに採用部位も拡大する見込みである⁹⁾。

豊田合成も表－4に示すように、バイオ材料を活用して製品化を実施してきた。その材料の活用の考え方は、機能を付与することである。

表－4 バイオ材料を活用した豊田合成の主な製品

バイオ材料の種類	機能	適用製品	
ポリマー	ナイロン11(ひまし油)	低吸水性、耐寒性	フューエルチューブ
	ナイロン610(ひまし油)	低吸水性、寸法安定性	ウォーターパイプ
	ポリカーボネイト(トウモロコシ油)	良外観	オーナメント、レジスター
オイル	菜種油、亜麻仁油	耐候性(ゴムの可塑剤)	CVJブーツ
ファイラー	コルク	シール性	ガスケット

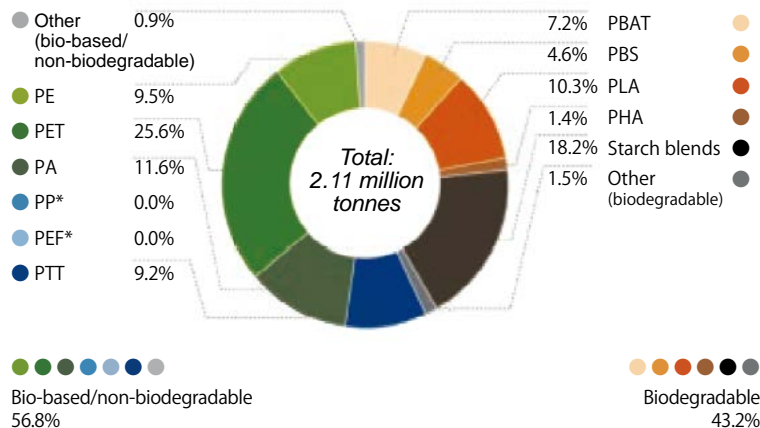
また表－5に示すように次世代に向けてバイオ材料の課題を解決する技術を蓄積してきた。天然ゴムやポリ乳酸は代表的なバイオ材料であり、脱石油由来材料としての基盤的な取り組みである。

表－5 バイオ材料を活用した豊田合成の主な取り組み

バイオ材料の種類	要素技術と狙い	特許(査定)	
ポリマー	天然ゴム	水添技術による高耐候性化	・特開 2010-248388 ・WO2011/108660
	ポリ乳酸	エラストマー混合技術による軟質化	・特開 2004-35691 ・特開 2005-81585 ・特開 2008-81585
ファイラー	セルロースナノファイバー	相溶化技術による高剛性化	・特開 2019-183123 ・特開 2019-178195

特にセルロースナノファイバー(以下CNFと示す)は、木材などの植物を原料とし、低比重で高い強度や弾性率を持つ素材として、各国で精力的な開発が進められている。豊田合成も環境省ナノセルロースプロモーション事業に参画し、CNFを活用した製品化の推進のために、車の内装部品の成果を報告した¹⁰⁾。詳細は本誌の「バイオファイラーを活用した材料開発」¹¹⁾を参照されたい。

今後、バイオ材料の需要が増加することは明瞭であり、課題は供給能力である。世界の樹脂生産量3億6千万t/年(2018年)に対して、バイオ樹脂は211万t/年であり、全体の0.6%にすぎない(図－11)¹²⁾。今後、バイオ樹脂の生産能力は2023年に262万t/年まで増加する予測¹³⁾であるが、



図－11 世界のバイオ樹脂生産能力(2018年)

根本的な解決には至っていない。豊田合成は「原料」「供給」「コスト」「機能」「リサイクル性」「環境・社会面」を含めた活用について、戦略を練る必要がある。

3. おわりに

サステイナブルな材料は、決して短期間で実現できる容易な目標ではない。素原料の合成・製品製造・物流・車の組み立て・走行から廃車までのLCAの観点において、業界の垣根を越えての取り組み・仕組みの議論、技術開発の連携が必要である。

豊田合成は2050年のカーボンニュートラルの実現に向けて「事業に関わる全ての製品を持続可能な材料にする」ことを宣言し、この大きな課題を自分たちの活動にしっかりと結び付け、努力を怠らず邁進していきたい。

参考文献

- 1) 一般財団法人エネルギー総合工学研究所, 図解でわかるカーボンリサイクル, 技術評論社 (2020) p2
- 2) 夫馬賢治, 超入門カーボンニュートラル, 講談社 + a 新書 (2021) p175-186
- 3) 三品啓司, 豊田合成技報, 58, 12 (2016)
- 4) 福田政仁, 豊田合成技報, 52, 13 (2010)
- 5) 一般社団法人日本自動車タイヤ協会, 2020年廃タイヤ(使用済みタイヤ)リサイクル状況 (2021.4.23)
https://www.jatma.or.jp/environment/pdf/recycle_report2021.pdf (閲覧日 2021.11.8)
- 6) 日本化学繊維協会, ナイロン(エアバッグ用途), 化学繊維を知ろう
https://www.jcfa.gr.jp/about_kasen/katsuyaku/07.html (閲覧日 2021.11.8)

- 7) 中川博之ら, 豊田合成技報, 46(2), 59(2004)
- 8) 金升将征ら, 三菱重工技報, 55(2), 1(2018)
- 9) トヨタ自動車株式会社, 自動車用内装部品へエコプラスチックの採用拡大, (2008.12.17)
<https://global.toyota.jp/detail/1328763>
(閲覧日 2021.11.8)
- 10) 環境省, CNFの成果品と可能性自動車部品, ナノセルロースプロモーション
<https://cnf-ncp.net/deliverable2.html>
(閲覧日 2021.11.8)
- 11) 内田均ら, 豊田合成技報, 63, 32 (2021)
- 12) 環境省, バイオプラスチック導入ロードマップ,
http://www.env.go.jp/recycle/post_58.html
(閲覧日 2021.11.8)
- 13) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センター (TSC) バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて
<https://www.nedo.go.jp/content/100899114.pdf> (閲覧日 2021.11.8)

著 者



栗本英一