

3R に基づいたバンパのライフサイクル設計 3R-Based Life Cycle Design for Bumpers

新田 茂樹*1

Shigeki Nitta

築山 友美*4

Tomomi Tsukiyama

山田 武*2

Takeshi Yamada

坂尻 光一*5

Kouichi Sakajiri

相澤 誠*3

Makoto Aizawa

要約

持続可能な自動車製造業の実現に向け、自動車のライフサイクルにおける資源消費量、エネルギー使用量、環境負荷、コストを最小化する高度な循環型ライフサイクルシステムの構築が求められている。この実現のためには、Reduce, Reuse, Recycling (3R) に基づいたライフサイクル設計が必要である。

現在、廃車後の自動車の樹脂部品は Automobile Shredder Residue (自動車シュレツダダスト、以下 ASR) として大部分は燃焼して熱回収されている。マツダは、樹脂部品の中で質量が最も大きく、比較的解体しやすいバンパに注目し、1990 年代よりライフサイクル設計を進めている。2011 年 8 月に開始した世界初の廃車バンパから新車バンパへのリサイクルは、その成果の一端である。

本稿は、ライフサイクルで環境と資源節減に貢献する 3R に基づいたバンパのライフサイクル設計についてマツダの取り組みを紹介する。

Summary

To foster a sustainable automobile manufacturing industry, it is necessary to build an advanced recycling-oriented life cycle system that minimizes resource and energy consumptions, environmental burdens and costs. To that end, it is required to develop a product life cycle design based on 3R (Reduce, Reuse, Recycling).

Under the current system, most of the plastic automobile parts from End of Life Vehicle (ELV) are burned in the form of ASR (Automobile Shredder Residues) for energy recovery. Since the 1990s, Mazda has focused on life cycle design of bumpers because they are larger in mass and easier to dismantle than any other plastic parts. The world's first material recycling of ELV bumpers into new car bumpers, which Mazda started in August 2011, is an indication of such life cycle design.

This paper introduces Mazda's activity concerning the 3R design of bumpers that contributes to environmental protection and resource conservation.

1. はじめに

マツダは、サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言の下、さまざまな領域において地球温暖化防止など環境保全活動を行っている。その中で、限りある資源を有効に活用するため徹底した再資源化と廃棄物削減に取り組んでいる。

その取り組みの一つとして、新車のリサイクル性を向上させるため、1990 年代より解体・分解容易な車両の設計、解体技術の研究や、リサイクルしやすい樹脂

材料の採用を行ってきた。

例えば、バンパでは解体時に短時間に一体で取り外せる構造を追求してきている。2008 年発売の 2 代目アクセラからは、バンパ下部の締結部分に、強く引くと外れやすくなる構造を採用し、バンパ開口部には取り外す際にバンパが破断せずに一体で外せるよう補強している。インストルメントパネルでは、取り付け部を離脱させやすい構造とすることで、解体時に容易に外れるよう工夫している。ハーネスのアース端子は、

*1 技術企画部
Technology Planning Dept.
*4 技術研究所
Technical Research Center

*2, 3 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.
*5 カスタマーサービスビジネス企画部
Customer Service Business Development Dept.

取り外す際に端子部がちぎれ、ハーネスが残りにくい構造にしている。

また、ASR 重量の多くを占める樹脂においても、リサイクルしやすい材料を採用している。例えば、AT シフトノブにはオレフィン系熱可塑性エラストマー (TPO) を採用し、ダッシュインシュレータは、遮音材を同素材の熱可塑性フェルトに統一している。

本稿では、これらの中から特に注力しているバンパのライフサイクル設計について紹介する。

2. ライフサイクル設計に関する要件

資源効率利用設計には、ライフサイクルをベースとしたシナリオ (以下ライフサイクルシナリオ) が重要であり、このシナリオと整合させた製品の構造や形状を設計することが不可欠である⁽¹⁾。廃車の場合、製品の回収後に、事前解体によって部品を回収リユース、リサイクルするシナリオと、シュレッダによる粉碎後の ASR から、素材を分別することによってリサイクルを行うシナリオなどが考えられ、そのシナリオによって製品設計の要件は異なる。例えば、前者の場合は解体容易性の設計が重要になり、後者の場合は粉碎・分別に適した材料を使用することが重要になる。このシナリオは国や製品とその部品によって異なり、また乗用車の平均ライフサイクルは約 13 年であることから、設計時点で決定することは難しい。そのため、さまざまなシナリオを想定して、設計に織り込む必要がある⁽²⁾。

Fig. 1 に、資源効率のヒエラルキーを示す。このヒエラルキーは一般的な環境影響の程度によって階層化されており、上層ほど優先すべきとしている。最も優先すべき事項は、使用量を減らすリデュースである。続いて優先事項は、部品をそのまま再使用するリユース、少し修理して再使用するリファービッシュ、一部の部品を新品と交換して再利用するリマニファクチャー、材料としてのリサイクルの順となる。また、熱回収が、廃棄よりも優先すべきであるとされている^{(3), (4)}。

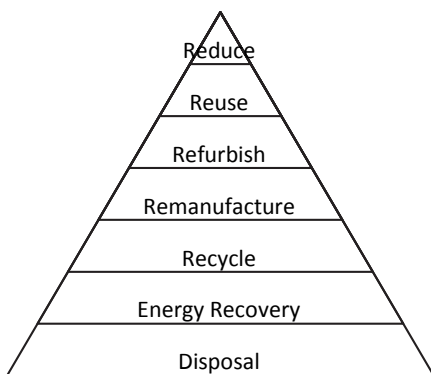


Fig. 1 Hierarchy of 3R (Drawn Based on Erik Sundin, et al.⁽³⁾)

このヒエラルキーを製品のライフサイクルの中で示したのが Fig. 2 である。リデュースは、設計、資源供給、製造などさまざまなライフサイクルステージで可能であるが、本稿では設計時に軽量化等によって行うものを示している。

マツダは、1990 年代からバンパを事前解体によって部品を回収し、リユース、材料リサイクルするシナリオに基づく要件により、ライフサイクル設計を行ってきた。この要件は、バンパを含む ASR から素材を分別するシナリオにも整合するものと考えている。バンパのライフサイクル設計のリデュース、リユース、リサイクルそれぞれの視点で説明する。

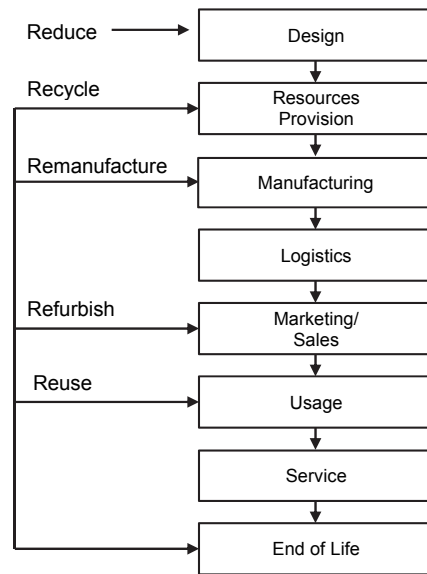


Fig. 2 Product Life Cycle (Drawn Based on Lee Hui Mien, et al.⁽⁵⁾)

3. リデュース設計：省資源・省エネルギー

リデュースとは、環境負荷や廃棄物の発生を抑制するために無駄・非効率的・必要以上の消費・生産を抑制あるいは行わないことである。

(1) バンパの機能

バンパの機能は、外観デザイン、燃費向上、安全性の大きく分けて 3 つがある。外観デザインとして、バンパはまさしく車の“顔”の一部であり、優れた形状や色が求められる。燃費向上には、バンパの形状による空力性能改善や開口部からの冷却性能向上が求められる。また、安全性には、軽衝突時に歩行者を保護し、機能部品 (ランプ類やウォッシュタンクなど) を保護する機能が求められる。これらの機能と両立できるようなライフサイクルを考慮した設計をすることが重要である。

(2) 新しいバンパ材料開発^{(6), (7)}

マツダは、車両の軽量化を実現する自動車部品用の樹脂材料を、日本ポリプロ(株)と共同で開発した。バ

ンパとしての開発目標は、従来の部品コストと同等以下で、20%の軽量化を達成することとした。20%軽量化のためには、現状の平均板厚 2.5mm を 20%削減して 2.0mm にする必要がある。

薄肉化によって低下した剛性を補うため、材料としての開発目標は、曲げ弾性率を従来材に対して 50%向上の 2300MPa とした。剛性は板厚の 3 乗に比例することから 50%の曲げ弾性率向上では剛性は 24%不足するが、不足分については、構造と板厚配分の最適化によって達成することとした。また、薄肉化によって成形性が悪化することを防ぐため、成形時の樹脂の流れやすさの指標であるメルトフローレート（以下 MFR）は 25%上げ、40g/10min とすることを目標とした。

従来のバンパ材は、ベースとなるポリプロピレン（以下 PP）にゴム、そして充填材としてタルクを配合した、いわゆる 3 元系の材料である。剛性を向上させるにはタルクの配合量を増やし、PP の分子量を上げればよい。しかし、それでは成形性や耐衝撃性が低下してしまう。これに対して開発材は、高分子量の PP と、低分子量の 2 種類の PP にそれぞれ役割を分担させた。高分子量 PP で剛性を向上し、低下した成形性を低分子量 PP の添加で補って、剛性と成形性を両立した。

また、開発材は剛性向上のために増加したタルクの影響による耐衝撃性の低下を補うために従来中程度であったゴムの分子量を上げることにより耐衝撃性を向上させた。しかし、塗装の密着性を確保するには、成形品表面に出るゴムの面積が外表面に存在する比率（以下表層ゴム分率）を一定以上に確保する必要があるが、高分子量のゴムは球状になろうとする性質が強く、表層ゴム分率を確保できない。そこで表層にゴムが出るように、球状になりにくい分子量が低いゴムを別に添加した。

従来、中程度の分子量を持つゴムを使用していたものを、高分子量のゴムで耐衝撃性を向上させ、低下する塗装密着性を、低分子量のゴムで補うことで、耐衝撃性と塗装性を両立した。

射出成形用材料は特性が異なるものを混ぜた場合に、層分離を起こし、層間剥離することがあり、安易な多成分化は危険である。開発材料にあっても各組成の分子量と配合量を調整しながらテストピースでの確認はもちろん、実際のバンパを成形して性能確認を繰り返し、最適化を行い目標を達成した。

(3) バンパの形状

薄肉にすると冷却しやすい反面、早く充填してやらないと樹脂の粘度が上がり、流れが途中で止まってしまう。射出成形では、樹脂の注入口であるゲートの位置や、樹脂の流れの乱れなどをコンピュータによるシ

ミュレーションで予測し、事前に形状等の最適化を行う。薄肉にすると流れる距離が短くなりゲートのレイアウトが困難となる。材料物性だけで解決できないものはゲートの位置や形状などに変更を繰り返し、最適な形状を探り出した。また、キャラクターライン（折れ）のある形状とすることで剛性が保たれる。

(4) 薄肉化、軽量化、省エネルギー化

実際に開発材を用いて板厚 2.0mm で成形したバンパの性能を評価した結果、剛性、耐衝撃性といった必要機能を全て満足することを確認し、目標とした 20%の軽量化を達成することができた。また、部品をより薄肉で製造できるため、材料使用量の大幅な削減が可能となった。

製造工程においては、薄肉化により成形時の冷却時間を短縮したことに加え、CAE 解析技術の活用により樹脂材料の流動性を最適化することで、従来は約 60 秒かかっていたバンパの成形時間を、半分の 30 秒に縮めた。これにより、製造時の消費エネルギーを大幅に削減することができた。

(5) 低コスト化

日本国内で製造される PP は、インラインコンパウンドといわれ、樹脂の重合プラントでペレットといわれる状態に造粒される。この方法は、別に造粒工程を持たないためコスト的に有利である。一方重合プラントは巨大で、基材となる PP 以外の成分を多種、大量に添加するとプラント自体の生産性が低下し、経済的に成立しない。本開発では材料メーカーとの密接な共同開発を通じて、材料の 5 成分系を経済的に生産可能な組成バランスを探し出した。射出成形は、樹脂を溶かし（可塑化）、型内に充填し（射出）、固める（冷却）という本質的な工程と、型を開いて成形品を取り出す、といった付随的な工程に分類される。このうち可塑化時間と射出時間は材料の量が 20%減らせたことにより短縮した。薄肉化による時間短縮の効果が更に大きいのは冷却工程で、冷却時間は板厚の 2 乗に比例し、20%の板厚削減の効果で 46%削減できる計算となる。今回、実成形においても冷却時間はほぼ半減できた。更に付随的な工程も見直すことで、バンパ 1 本あたりの成形サイクルを 60sec から 30sec に削減した。また、材料のコストアップなく材料使用量も 20%削減したことで、バンパの製造コストも削減でき、低コスト化につながった。

(6) 新型車への適用

本開発材を CX-5 のバンパに採用した（Fig. 3）。前後バンパで目標の 2.0mm 板厚を実現し、重量も従来から 20%低減してフロントとリヤを合わせて 7.5kg から 6.0kg へ重量を低減した。CX-5 以降の新型車に順次展開している。

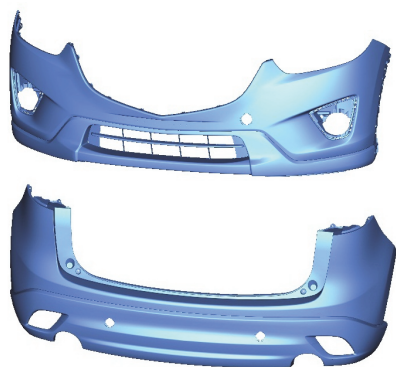


Fig. 3 Bumpers of Mazda CX-5⁽⁸⁾
(Upper: Front, Lower: Rear)

4. リユース、リマニファクチャリング適合設計

本稿においてリユースとは、廃車部品をそのまま再利用することである。また、リマニファクチャリングとは、部品を補修・修理をして再利用することであり、リビルディングといわれることもある。エンジン、トランスミッション、スタータ、ボンネット、ドアなどさまざまな廃車部品が自動車解体事業者などによってリユース、リマニファクチャリングが行われている⁽⁹⁾。

リユース、リマニファクチャリングに適合する設計とは、当該部品の解体作業を考慮することである。ロルフ シュタインヒルパー（2000）は、解体作業を容易にするための設計チェックリストを示した。このチェックリストには部品の接合の位置、取り外し方法、アクセスなど 7 項目を、3 レベル（理想的、許容できる、対策が必要）で評価するようになっている。また、リユース、リマニファクチャリングを考慮した設計が、製品の組み立て作業の効率化に役に立つことが頻りにあり、組み立て作業時間が 5 分短縮されると解体作業時間では 10 分の短縮が見込まれるとしている⁽⁹⁾。

金城産業（株）の協力のもとアクセラの前モデルであるファミリアのリヤバンパの解体実験を行ったのが Fig. 4~6 である。ファミリアのリヤバンパ解体には、トランクルーム内に締結してあるリヤバンパ固定ボルトを脱着する必要がある。そのためには、まずトランクルーム内のマットを除き、次にエンドプレートのトリムを外し、その上でボルトを脱着する作業が必要である。これは、ロルフ シュタインヒルパー（2000）のチェックリスト“接合の位置”において見えない、カバーがかかっている、隠れているので対策が必要と評価されるものである。

そこで、2 代目アクセラのリヤバンパは、トランクルーム内からのバンパ締結を止め、全て車両の外側からの締結としている。これにより、リヤバンパ解体のための作業時間が改善され、リユース、リマニファクチャリングが容易化される。



Fig. 4 Dismantlement Test 1 of Rear Bumper of Mazda Familia (Remove Trunk Mat)



Fig. 5 Dismantlement Test 2 of Rear Bumper of Mazda Familia (Remove Endplate Trim)



Fig. 6 Dismantlement Test 3 of Rear Bumper of Mazda Familia (Removed Fastening Bolts)

5. リサイクル容易設計

リサイクルとは、製品化したものを再資源化し、新たな製品の原料として利用することである。1992 年にマツダでは「リサイクル設計ガイドライン」を制定し、リサイクルしやすい材料/構造を推進している。これは、解体しやすい構造、リサイクルしやすい材料、分別の容易化、再生材の利用からなっている。対象部品はバンパ、インストルメントパネルを含む樹脂部品、その他である。このうちバンパについて述べる。

(1) 解体しやすい構造

マテリアルリサイクルのために車体からバンパを取

り外す作業では、リユース、リマニファクチャリングの解体とは異なり、バンパが破壊されても効率良く解体できることが必要である。また、解体シナリオとしては、解体事業者の既存の設備/道具で汎用性の高い方法が求められる。解体事業者の通常設備であるホイストによる上方への引き上げでの取り外しが最も主流になると予測し、フック位置や外れやすさを検証した。

効率的にバンパが解体できるように、2代目アクセラの開発段階で、ヤマコー（株）の協力を得て、バンパをホイストで引き上げる解体実験を行った。フックをかける位置によって、バンパが破断して車体に残ってしまうケース（Fig. 7）や、締結が強いために車体が浮き上がってバンパを取り外せないケースもあった。



Fig. 7 Broken Bumper

そこで、車体が浮き上がらず容易に取り外せるように、車体との締結穴に薄肉構造を採用して締結部が破断しやすくし、部分的な破断を避けるために力がかかる部分には補強構造を取り入れ一体で解体できるようにした（Fig. 8）。この構造を取り入れたバンパにて解体業者で実験したところ、バンパはちぎれずに一体で取り外せ、効率的に解体できるとがわかった（Fig. 9）。この構造を2代目アクセラに採用し、以降の新型車に順次採用を拡大している。

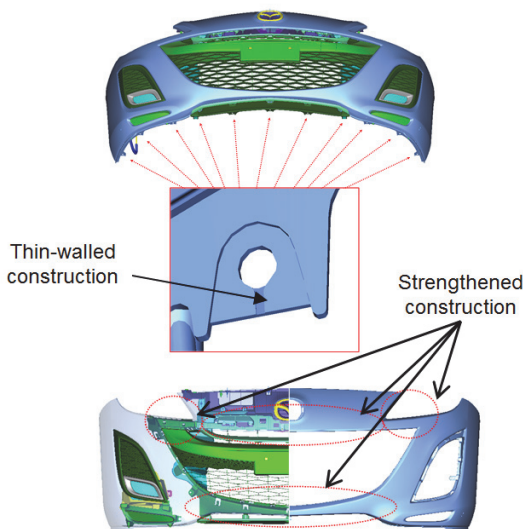


Fig. 8 Thin-Walled and Strengthened Construction in Fastenings



Fig. 9 Dismantlement Test of Bumper Designed for Recycling

(2) リサイクルしやすい材料

「リサイクル設計ガイドライン」制定前にはウレタンなどリサイクルしにくい材料がバンパに使われることもあった。「リサイクル設計ガイドライン」により、バンパには、リサイクルしやすい材料としてポリプロピレンを採用し、更にバンパフェースと同じ材料で、ラジエータグリルやロアメッシュ等の構成部品を成形している。そのため、リサイクルの際にそれぞれの構成部品を外さなくとも、分別することなくまとめて粉碎できる。

(3) 分別の容易化

樹脂部品には一目で材料がわかるように、材料記号が記載されており、バンパはポリプロピレン製で、>PP<のマークが入っている。

(4) 再生材料の利用

使用済み部品の回収・リサイクルでは、系列販社から回収した損傷バンパから新車バンパへのリサイクルを業界に先駆けて推進してきた。更に、この損傷バンパのリサイクルで培った技術を廃車バンパに応用し新車バンパの材料としてリサイクルすることを可能にした。Table 1 に、マツダのバンパリサイクル活動を示す。

Table 1 Mazda Technology Development and Implementation on Bumper Recycling

Year	Contents
1992	Recycling damaged bumper to undercover was commenced.
2001	Recycling damaged bumper to bumper reinforcement was commenced.
2002	Recycling damaged bumper to grained bumper surface was commenced.
2003	A technology to recycle damaged bumper to smooth bumper surface was developed.
2005	Continued recycling damaged bumper to smooth bumper surface was commenced.

1992 年販売会社を通じて市場損傷バンパを回収し、アンダカバーなどへの再生利用を開始した。2001 年、機械式の塗膜除去技術を活用し、市場損傷バンパリサイクル材を新材と同等レベルの強度に高め、バンパ補強用部品への再利用を開始した。2002 年、塗膜除去条件を最適化し、塗膜除去率を 98.5%まで向上させ、同年 7 月からボンゴフレンディのシボ面バンパへの再生利用を開始した。2003 年、(株)サタケと共同で光学選別技術を組み合わせた新しい塗膜除去技術を開発し、リサイクル材の塗膜除去率を 99.85%へと高め、強度・品質とも高い要件が求められる通常の塗装バンパへの再生利用が可能な技術を確認した (Fig. 10)⁽¹⁰⁾、⁽¹¹⁾。2005 年、それまでの技術確立を基に、市場損傷バンパを新車のバンパ材料として継続的に再利用することを開始した。

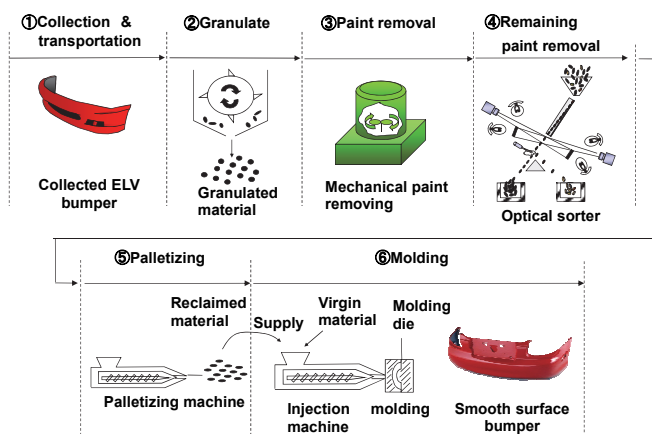


Fig. 10 Bumper Recycling Process⁽¹²⁾

(5) 世界初の廃車バンパの新車バンパへのマテリアルリサイクル

再生材料利用のための技術開発がベースとし、1990 年代から進めたりサイクルしやすい設計を織り込んだバンパを採用した廃車が増加してきたタイミングをとらえて、廃車バンパの新車バンパへのマテリアルリサイクルを 2011 年 8 月より世界で初めて広島地区で実施した⁽¹²⁾、⁽¹³⁾。廃車バンパから新車バンパへのサプライおよびリサイクルチェーンを示したのが、Fig. 11 である。

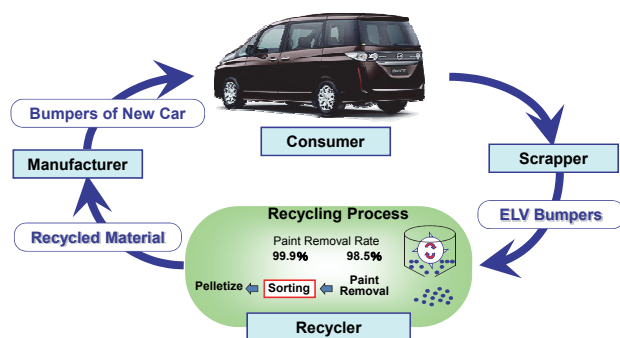


Fig. 11 Bumper Supply and Recycle Chains⁽¹³⁾

6. まとめ

マツダは 1990 年代から取り組んできたバンパのリサイクルシナリオ、ライフサイクル設計を紹介した。今後もライフサイクルの全てのフェーズで、お客様の満足と地球環境や資源効率を両立させる活動を行っていく。

参考文献

- (1) 福重真一, 松浦剛, 國井英輔, 梅田靖: ライフサイクルシナリオに基づく製品設計のための統合支援環境の提案, 精密工学会誌, 78巻, 2号, pp.143-148 (2012)
- (2) 中野隆裕, 新田茂樹, 伊東加奈子: 自動車のリサイクル設計, 自動車技術, Vol.66, No.11 (2012)
- (3) Erik Sundin and Hui Mien Lee: In what way is re-manufacturing good for the environment?, Proceedings of EcoDesign 2011 International Symposium. Dec. 2011
- (4) 環境省 (2013), 循環型社会形成推進基本計画, p.41, 平成25年5月
- (5) Lee Hui Mien, Lu Wen Feng; Gay, R.; Kheng Leng (2005), : An Integrated Manufacturing and Product Services System (IMPSS) Concept for Sustainable Product Development, Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2005. Eco Design 2005. Fourth International Symposium on Dec. 2005
- (6) 朝野千明, 藤和久, 原正雄, 大西正明: バンパ用高剛性ポリプロピレン材料の開発, マツダ技報, No.30, pp.191-194 (2012)
- (7) 朝野千明, 藤和久, 原正雄, 大西正明, 古田和広: 第63回自動車技術会賞 技術開発賞受賞 超薄肉軽量バンパの開発, 自動車技術, Vol.67, No.6, pp.4-5 (2013)
- (8) マツダ(株): マツダ, 車両の軽量化を実現する自動車部品用樹脂材料を開発, ニュースリリース, 2012年02月, <http://www.mazda.co.jp/corporate/publicity/release/2012/201202/120209a.html>
- (9) ロルフ シュタインヒルパー: リマニファクチャリング, FRANK Sprachen, 2000年7月
- (10) 森脇健二, 藤和久: プラスチックバンパの塗膜除去技術の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集No.99-03, pp.17-20 (2003)
- (11) 森脇健二, 藤和久, 田中宣隆, 中村浩一郎, 相澤誠: バンパの塗膜除去技術の開発, マツダ技報, No.23, pp.125-129 (2005)
- (12) 新田茂樹, 伊東加奈子, 森脇健二, 古田和広, 松田裕之, 田中宣隆, 山崎和重, 小出朋之: 世界初の廃車バンパから新車バンパへのマテリアルリサイクル, マツ

ダ技報, No30, pp.229-233 (2012)

- (13) Nitta.S., Ito.K. : A Study on Innovation of Material Recycles: World's First Implementation to Use ELV Bumper Materials for New Car Bumpers, SAE Technical Paper No.2013-01-0831 , doi:10.4271/2013-01-0831, April 2013

■著者■



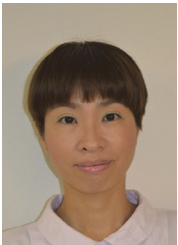
新田 茂樹



山田 武



相澤 誠



築山 友美