

動静脈融合した資源循環を実現する車のフレキシブル解体システムの開発

Development of a flexible dismantling system for ELVs that realize resource recycling circulation by collaborative development of Manufacturers & Dismantlers

奥田 英樹 Hideki OKUDA
 土橋 正臣 Masaomi DOBASHI
 山北 博士 Hiroshi YAMAKITA
 小口 一浩 Kazuhiro OGUCHI
 實松 敦 Atsushi JITSUMATSU

The trend of circular economy is rapidly expanding. In order to realize car-to-car resource circulation, it is necessary to set the mutual goal between manufacturers and dismantlers and to develop technology that ensure economic rationality. In this article, we propose one example of car-to-car resource circulation that synchronizing the value chain of manufacturing and dismantling. In addition, using standard dismantling tools and generation AI that incorporates knowledge of automobile components manufacturing, we report on the development status of the automatic generation system for the dismantling process and the flexible control system.

Key words :

Car to Car, Generation AI, The flexible flow system, Dismantling, ELV

1. デンソーの目指す動静脈融合の姿

近年、気候変動による自然災害の増加や経済活動への影響があり、地球温暖化を抑制するための取り組みが急務となっている。カーボンニュートラルの取り組みは、温室効果ガスの排出源をスコープ1、スコープ2、スコープ3に分類して行われるが、最も排出量の多いスコープ3に資する温室効果ガスの削減をサプライチェーン全体で削減することが求められている。リサイクル材利用はそれに大きく貢献すると言われており、デンソーではそのソリューションの具現化に取り組む。

環境意識の高まりを受けて欧州委員会は経済成長と資源消費をデカップリングさせた新たな経済政策であ

るサーキュラーエコノミーのコンセプトを提唱した。サーキュラーエコノミーとは、大量生産から大量消費を経てそのまま大量廃棄に至るような線形経済ではなく、資源や製品の質をできる限り落とさずに循環させることで、エネルギー消費や廃棄物発生等の環境負荷を最小化する持続可能な経済のことである。製品のライフサイクル全体で新たな経済活動を創出することによって資源価値を使い尽くし、資源消費を抑えつつ継続的な経済発展と温暖化の抑制を実現することを狙う。

欧州委員会は、この潮流を産業界に広めるべく自動車産業においても2023年7月に欧州ELV（使用済み自動車：End-of-Life Vehicles）規制案が発表され、車の資源循環への取り組みを義務付ける動きを提案し

た。従来からの要求項目である廃車から取出した部材のリサイクル率85%以上に加えて、早ければ2031年以降の新車に対して25%以上のリサイクル樹脂の利用に加え、そのうち25%はELV由来のリサイクル材の利用を求めることが提案されている。

現在のELV処理は手作業やニブラ重機を使ってマフラー、エンジンおよびその他の販売用中古部品を取出した後、素材を分別しないまま破碎するため、破碎によってできる粒状物質は種々の材料が入り混じった状態になっている。したがって、これを磁力、比重および光学機器で選別しても不純な状態で分別され、これらから再生される材料の純度の高さは望めず、実際にもダウンサイクルで利用されている。一方で、高純度なりサイクル材を得るためにはELVから素材ごとに部材を手作業で取り外すしかなく作業時間の長さゆえ経済合理性がなく、質と経済合理性を両立させるソリューションの提供が必要不可欠である。

そのような中で、ドイツで2023年1月から18企業・機関からなる「Car2Car コンソーシアム」が立ち上がり、新車の再生材使用量を現状の約30%から50%に増やすと同時に、リサイクル工程のコストを抑えることを目的に、廃車から素材を回収し新車に再利用する活動が始まった。具体的には、BMWグループのICE、PHEV、BEV、計500台のELVを用い、アルミニウム、鉄鋼、ガラス、銅、プラスチックを対象に、解体プロセスのロボット技術による部分的な高度自動化と、破碎後のプロセスの高度化（光学技術と人工知能（AI）を活用したリサイクル可能な素材の認識、分

別システムの導入）の実証を行うものである。

このように欧州においては、サーキュラーエコノミーに関する法制度の整備と、セクターを跨いだ動静脈連携により、あるべき姿の共通理解と活動体制の構築が両輪で動いており、デジュール戦略に抜かりがない。一方で、我が国の基幹産業である自動車産業においては、サーキュラーエコノミーの具体的な施策は欧州規制対応と廃棄物対応など一部にとどまり、その他の活動は手探り状態が続いている。また解体・リソーシング産業は、サーキュラーエコノミーの時流において極めて高い成長ポテンシャルがあるが、国内事業者においては高度機械化やデジタル化を含めたテクノロジー転換の遅れと、労働力不足・後継者問題・安心安全な労働環境の未整備といった問題点があり、将来に向けてこれらを解決した上で成長機会を創出することが課題である。我が国の動脈・静脈はこれまで異なる歩みを進めてきたため、商習慣・文化の隔たりが少なからず残っているが、動静脈が一体となり解決を図っていく必要がある。

ELVの回収から再資源化に至る「リソーシングプロセス」の“あるべき姿”を描き、再生材を生み出す解体・リソーシング産業から再生材のユーザーである製造業に至る各関係者からの共感を得ながら、共に動静脈融合バリューチェーンの構築と変革を目指す技術開発実証と社会実装に向けた活動を行うこととした。

我々は、持続可能な自動車産業のためには、Car-to-Carの資源循環が必要不可欠であり、その“あるべき姿”を以下のように考えた（Fig.1）。



Fig.1 DENSO vision of collaborative development of Manufacturers & Dismantlers

- ① ELV から部品・材料を自動で精緻に取り出す事により、高信頼・高純度な再生材を増やし、解体・リソーシング産業の売上を最大化する。そのために、解体技術の形式知化、解体後の分離技術の確立、解体順序の形式知化を確立する。高度化された精緻自動解体システムを静脈現場に実装することにより、よりホワイトな働き方、さらには子供たちの憧れる職場の実現を目指す。
- ② 一連のプロセスを標準化・統一化することで、均質な再生材を多量に供給することを可能にするとともに、再資源化される再生材を規格化することにより再生材ユーザーである製造業が安心して使えるようにする。これらの需給情報をデジタルプラットフォームでつなぎ、トレサビリティによる価値向上、需給マッチによる在庫レスと資源の使い切りを目指し、動静脈が融合された Car-to-Car 資源循環の実現を目指す。

2. ありたい姿を実現するための課題

自動車産業ではグローバルで年間約150車種のニューモデル車両がリリースされ、10～20年の時を経てELVとなる。すなわち、時間差はあるもののリソーシング産業においても、毎年150程度の新しい車両モデルに対して1種類ずつ解体工程を作成する必要がある。

車両1台には約3万点もの部品が存在し、このバリエーションの多さが精緻解体で高信頼・高純度のリサイクル材の原料となる単一素材の部材を、経済合理性ある形で分解することを非常に難しくしている。これまでのデンソーでは、大量生産・大量消費というこれまでの市場構造を背景に、製造する製品タイプを絞ったうえで短タクト・高稼働・低労務費な低コスト・高品質を実現させる自動化ラインを構築してきた。しかしながら、現在のリソーシング産業において分解対象となるELVは車種がランダムに発生するため、多種・ランダム流動に強みを持たせた新たなシステムが求められる。

本稿ではフレキシビリティある産業用ロボットを用いてこのシステムを実現させるべく、「複数車種に柔軟に対応できる解体プログラム生成 AI 開発」と「多

種流動を可能にしつつ設備負荷率を高められるシステム開発」の課題解決に取り組んでいる。

3. 複数車種に柔軟に対応できる解体プログラム生成 AI 開発

現在の生成 AI は、発生状況およびアクションを学習データとして保有しており、ある問題を解く場合には、その場の状況と求められるアクションの両方を考慮して最も成功確率が高い解を既存のライブラリから抽出する。そのため ELV の分解工程の生成 AI なるものを構築した場合、締結部の外観からそれを解除するために適したツールを抽出することになる。そのため、ある部位の締結解除のために、例えばボルトを外す状況に出くわした場合、それが固定されたナットにねじ締めされているのかフリーの状態のナットに固定されているのか判断できず、後者の場合は軸が回転して分解ができないような状況が発生しうる。今回は、このような状況においても高い成功確率で ELV の分解ができる生成 AI の開発に取り組むこととした。

当社では、約75年の自動車部品生産を通じて、自動車部品の締結部構造に関する有効な手法およびそのパターンが多く蓄えられていること、またそれらの部品の製造や品質保証を通じて各種の加工技術およびその長所・短所（すなわち、分解しにくさ・し易さのヒント）に関してのノウハウの蓄積がある。従来の生成 AI の構築の過程で作られるデータベースに加えて、設計・製造ノウハウを元に構築したデータベースを組み合わせることで、広く適用可能かつ成功率の高い ELV 分解の生成 AI を開発する。

最新の生成 AI の研究によると、生成／拡散モデルを始めとするマルチモーダル技術（例：GPT-4, GEMINI など）により、公知情報と設計情報の両方から製造物一般の「単に構成を表す製品図面」と「解体動作の情報」と「解体動作の実行工程」の関連度を学習し、未知形状に対しても解体動作を自動推定することが可能になりつつある。結果として、「部品の設計要件」と「対応する解体動作」と「解体動作の実行工程」の組合せをデータベースとして静的に設定することなく、未知の車種に対する解体動作を計画するこ

とができるようになった。（c.f. Publication - TR2024-033 | Mitsubishi Electric Research Laboratories）

しかしながら、OSS（Open Source Software）として公開されている生成／拡散モデルを用い、未知の車種の解体動作を計画する場合、ハルシネーションの発生や想定外の事象の発生などにより実行不可能な解体動作がプログラムに含まれる可能性がある（Major research into “hallucinating” generative models advances reliability of artificial intelligence | University of Oxford）。ここに、ハルシネーションの発生確率を軽減するために、先に述べた締結構造パターンや製造ノウハウに基づくデータベースを併用する。

開発中の解体プログラム生成 AI は、予め設計・製造ノウハウを学習済みであるため、当初設定していた動作が解体途中で失敗することが分かった時点で締結を極力ダメージなく解除する方法以外に、製造ノウハウデータベースから適用可能な代替方法を探索し、代替案を提案する。分解方法の選択肢が多く存在することは、例えば分解工数を低減することを優先させるような状況においても解体が成功する工法を提案することができるため、様々な目的に応じた活用が見込まれるなどのメリットが期待できる。この AI システムの構成を Fig. 2 に示すとともに、解体動作計画生成のステップを下記する。

- Step1. 解体失敗時の部品の状態を観測（観測部で実行）
- Step2. 観測された状態から発生要因を推定し、観測された状態を発生要因毎に分類（処理部で実行）
- Step3. 分類された状態の再発を引き起こさない解体位置を推定（処理部で実行）
- Step4. 解体位置に対し、解体を実行可能な代替動作を

- 自動選択（処理部で実行）
- Step5. 代替動作と整合するように後段の動作および実行順を変更（処理部で実行）

データベース部に記述した「設計・製造ナレッジデータベース部」が設計・製造ノウハウのデータベース部、「公知動作データベース部」が学習データを蓄積するデータベース部である。この両方から目的に応じた最適な解体計画を生成する。

4. 多種流動を可能にしつつ設備負荷率を高められるシステム開発

従来の自動化ラインは限られた製品を効率よく短タクトで大量に生産することを目的としており、製品設計段階からデータムやロボットハンドのチェックポイントを共通化するなど、自動化し易い前提条件を構築したうえで生産ラインを工程設計していくことが王道である。しかしながら今回、対象とするELVは複数の製造会社で設計・製造され、その数は2500車種を超え、1台の車両は約30,000点の部品にのぼる。

この膨大なバリエーションの対象を限られた工程で分解できる分解ラインを構築することが命題であり、そのためには徹底的な標準化がポイントとなる。車種は複数あるが、ICV・HEV・BEVの各カテゴリ内では部品レイアウトは似通っている。もちろん部品の製造会社は多数あり、車種ごとに異なるが要求特性を満足させるためには、円筒型・直方体型など形状は似通ったものになる。これらの特徴を活かして、分解工程順を標準化する。例えば車両からフロントクロスメンバー、エンジンおよび補機類をひと塊で取り外すと各

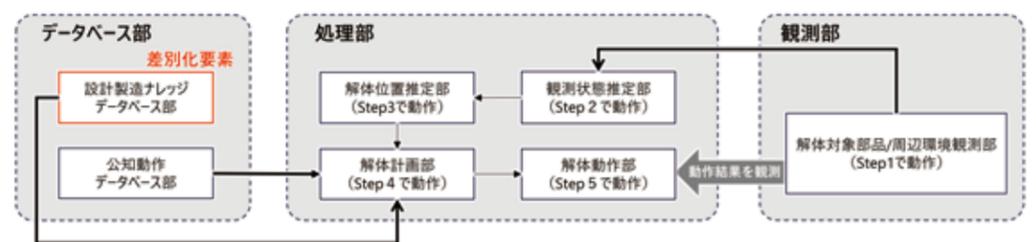


Fig. 2 Diagram of an autonomous dismantling system capable of generating dismantling plans for multiple vehicle types

部品の配置はおおよそ同じであり (Fig. 3), その後の分解工程は標準化できる。更に, ここから取り外される補機類のスタータ, オルタネータおよびコンプレッサの主要部品は製造会社にかかわらず, 円筒型であり, その径のサイズ差を吸収するハンドを採用することでハンドリングツールおよび工程が標準化される。

上記のような標準化によりバリエーションを極限まで減らした標準ツールを準備し, 更に投資効率を高めた分解流動制御を検討する。解体ラインはランダム流動を余儀なくされる為, 流れてくる車種に適用した標準ツールへと段取りしながら分解をしていくことになる。すべての標準ツールを設備に搭載し, ロボットが標準ツールを持ち替える仕様が一般的であるが, 分解をしている時に仕事をしていない標準ツールが存在す

るため投資効率が低くなってしまふ。つまり, 必要最低限の標準ツールを準備し最大効率で稼働させることが重要である。そのためには, 納入される車種情報から各分解設備に搭載すべき最適な標準ツールを選択し, 供給させる必要がある。これを前章で述べた解体プログラム自動生成システムが可能とさせる。まず解体ラインへ納入された車の解体プログラムはクラウド上へ保存され, 解体計画として整理される。この解体計画により, これから各分解設備が分解する車種情報が分かっている為, 車種毎に適した標準ツールを予め準備し必要なタイミングで供給し組み変えながら, フレキシブルに流動をさせることが可能である。ツールと設備が無駄なく動き続けることで, 経済合理性を高めた解体システムとなる (Fig. 4)。

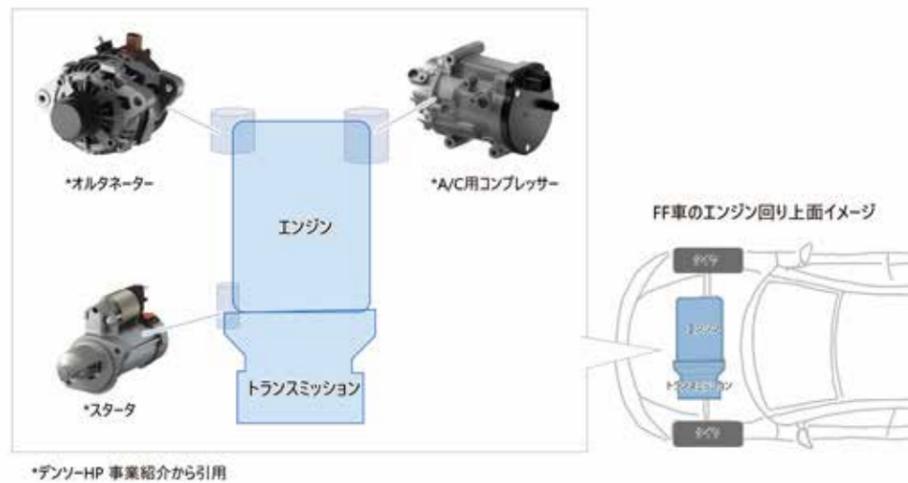


Fig. 3 Layout of parts around the engine ⁷⁾

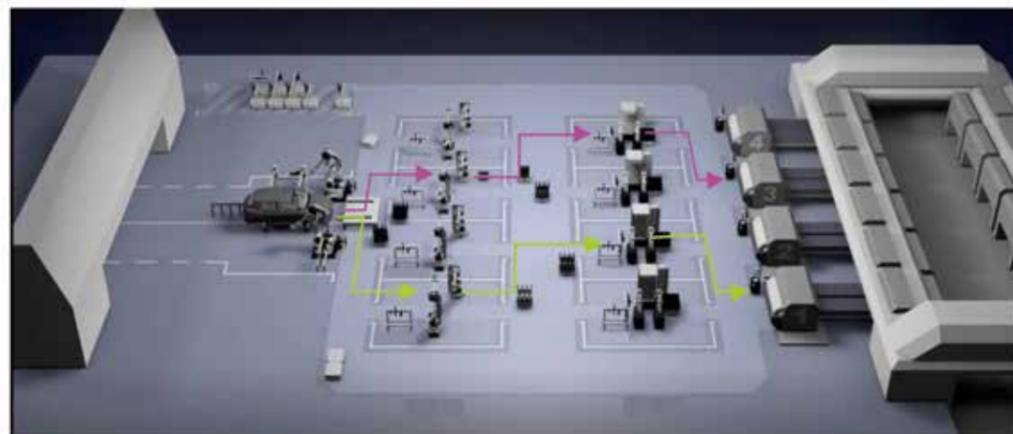


Fig. 4 Image of a flexible flow system using a standard dismantling module

5. おわりに

本論文では, 我々が目指す動静脈融合の姿に向けた仮説と取り組み内容について述べた。今後, 実稼働に向けて引き続き技術と経済合理性の検証を行っていく。

著者



奥田 英樹

おくだ ひでき

社会イノベーション事業開発統括部
CE 事業開発部 博士 (医学)
(東京女子医科大学)
ロボットと AI を活用した解体システム
開発に従事



土橋 正臣

どばし まさおみ

社会イノベーション事業開発統括部
CE 事業開発部
ロボットと AI を活用した解体システム
開発に従事



山北 博士

やまきた ひろし

社会イノベーション事業開発統括部
CE 事業開発部
ロボットと AI を活用した解体システム
開発に従事



小口 一浩

おぐち かずひろ

社会イノベーション事業開発統括部
CE 事業開発部
ロボットと AI を活用した解体システム
開発に従事



實松 敦

じつまつ あつし

社会イノベーション事業開発統括部
CE 事業開発部
ロボットと AI を活用した解体システム
開発に従事

