

## e-Rubber と “クルマ”

藤原武史<sup>\*1</sup>, 竹内宏充<sup>\*2</sup>

### e-Rubber and Future Vehicles

Takeshi Fujiwara<sup>\*1</sup>, Hiromitsu Takeuchi<sup>\*2</sup>

#### 要旨

豊田合成 “e-Rubber” は、超分子構造を活用して革新的な性能を示す人口筋肉（誘電アクチュエータ、誘電センサ）である。本稿では、多様な用途可能性のうち自動車分野での活用方法として、“ハプティクス、センシング、モーフィング” の3つの用途仮説をご紹介します。自動車技術のパラダイムシフトに対する有用性を、自動運転のユースケースを通して提案する。

#### Abstract

“e-Rubber” is a novel artificial muscle that exhibits innovative characteristics by employing a supramolecular network structure (slide ring material) at its core of dielectric elastomer actuators and dielectric elastomer sensors. Its versatility in the field of automotive technology is presented with three illustrative examples, haptics, sensing, and morphing. Applications are shown in autonomous driving vehicles, which need novel devices for enhancing human-machine interaction in order to ensure a safe and smooth transition of control, or to ensure comfort environment in the fully automated driving mode.

## 1. はじめに

100年に1度と云われる自動車産業の変革期にあってその破壊的技術潮流の頭文字をまとめた、所謂CASE（Connected, Autonomous, Shared, Electric Drive）への対応は、世界の自動車関係者に等しく与えられた創造的解決を要す課題、かつ機会である。

岐路を左右する技術要素が、何れも『クルマと電気電子との関わり』を所与とすることは、自動車以外の技術潮流から押し寄せた必然、不可逆の流れでもある。

クルマの役割も、従来の“モビリティやステイタス”より社会ネットワーク上のエッジデバイスへと重心が移行しつつあり、新しいクルマ像と、その新サービスを具現化するデバイスそのものの開発期待が日々成長している。

この大変革期にあって豊田合成のコアである高分子技術と電気電子の融合領域で生まれた『e-Rubber』は、豊田合成として次世代の“クルマを巡る産業”にどう対峙するか重要な解となり得るデバイスである。

本稿では、省エネを活かした次世代車の普及課題解決への貢献や、柔らかさを活かしヒトとクルマと社会を優しくつなぐデバイス化など、一部の例示を交え如何に将来のクルマの価値創造に貢献できるかの適用仮説と展望をご紹介します。

## 2. e-Rubber の拓く世界

### 2-1. e-Rubber とは

豊田合成の登録商標は“e-Rubber”だが、一般名詞で誘電エラストマアクチュエータ（DEA）、及び誘電エラストマセンサ（DES）というデバイス研究分野に属する。90年代初頭から、軽量高出力・低消費電力・形状自由度等の多くの魅力によりスタンフォード研（SRI）等を中心に研究熱が高まり、現在世界で開発競争が進行中の分野である。<sup>1)</sup>

DEA以外にも新世代系として多種のアクチュエータが存在する。駆動原理のヴァリエーションに富み、イオン系や熱、光に反応し駆動する等、学術的興味を引くものは多いが、中でもソフトな材質を用いたソフトアクチュエータは、その柔軟さと形状自由度からHMI（ヒューマンマシンイ

\*1 特機部 eR 事業開発室

\*2 特機部 eR 技術開発室

ンターフェース)として期待される。<sup>2), 3)</sup>

豊田合成は、前出の長所に加え、無音動作や発熱レス等の数多くの利点を見出す一方、永年培った材料コア技術を用いブレイクスルーを起こせることに着眼し、数ある新世代系ソフトデバイスの中から誘電エラストマ方式を選択、07年以來、東京大学・アドバンスト・ソフトマテリアルズ(株)と研究開発を進めてきた(図-1)。

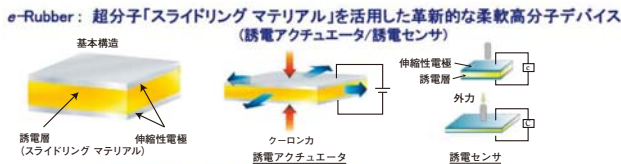


図-1 e-Rubberの動作原理

## 2-2. e-Rubber (超分子採用)による革新

通常のDEA材料には困難である一方、e-Rubberのブレイクスルーのポイントは、超分子構造の採用(図-2)による、低ヒステリシスロスと高耐久性にある。

DEA材料として一般的に使われるシリコンやアクリル等のエラストマー材料は、架橋鎖により主鎖と主鎖が結合し架橋点が固定であり、また、分子鎖のからみにより粘弾性を示す。この構造自体が材料の耐久性やヒステリシスロスに影響を及ぼすが、豊田合成はスライドリング材料を採用し課題を打破する性能を確認しており、実用耐久性を持ったDEAを世に送り出すことを可能とした。

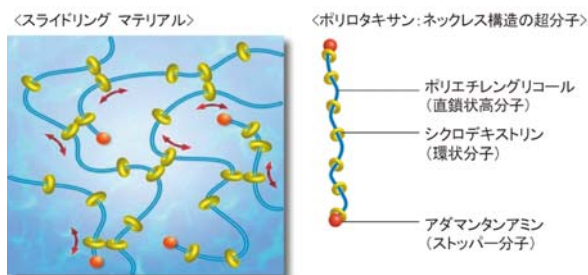


図-2 スライドリング材料(超分子構造)

## 3. クルマにおけるe-Rubberの用途可能性

### 3-1. 次世代化;電力消費の極小化

2017年に入りイギリス、フランスがガソリン・ディーゼル車両を2040年迄に販売禁止する旨を発表、世界最大市場の中国も追隨する動きを見せている。

禁止に至らずとも、EV優遇税制のインドでの導入等、世界で脱内燃機関の動きは進行している。現時点でのEVの販売シェアは、世界自動車販売の1%に満たぬ数十万台レベルだが、これら政策

シフトに対応し、直近のフランクフルトモーターショーではカーメーカー各社が挙って新エネルギー車の投入拡大と加速を発表し、将来の市場シフトは鮮明かつ決定的だ。

一方、2010年前後からEVの市販が本格化したのが、普及課題の一つに、“電池性能と価格”は依然大きい。<sup>4)</sup>

有限の車載電池容量から航続距離を稼ぎつつ、高度化する各種制御機器、補機類を含め、車両全体の軽量化とエネルギーマネジメントは正にグラムとワットの単位を切り詰めながら精緻化している。車載デバイス軽量化と消費電力低減ニーズの強さは言うまでもない。

これらは走行性能だけでなく、ライフサイクル視点での廃バッテリー量の削減を含めた小型化ニーズの側面もある。

自動運転では、AIはじめ複雑化する車載システム稼働自体に多大なエネルギーを要す。即ちシステムの電力消費削減は普及課題であり、処理を担う半導体業界においても電力低減開発が進行中である。<sup>5)</sup>

隊列走行や渋滞緩和、車性能やサイズのミニマル化など、自動運転の社会実装は、大きな効率化を果たすことで社会全体の電力低減に資する予測がある一方、従来移動に車を使わなかった層が新たに車を使い始めるとの予測もある。個車レベルでの電力消費の極小化は新ユーザ創出のポイントでもある。<sup>6)</sup>

### 3-2. e-Rubberの省エネ性能

e-Rubberは容量負荷であり電磁アクチュエータと異なり静止保持時には電力を殆ど消費しない。そのため、特にスタティックな用途において優れた省エネ性能を発揮できる。また使用法によってダイナミック用途でも高い省エネ性を示す例もある。

A社との共同開発実施中の新デバイスにおける、新旧アクチュエータの電力測定比較結果を紹介する(図-3)。



図-3 新旧デバイスの消費電力比較

このデバイスは、静電容量約280pFの電極面積でXY方向にそれぞれ配置したDEAで、ある部品を各20μm以上で周波数駆動させるものである。

比較対象は、現行市販品で使用されているボイスコイルモータである。

e-Rubber は印加電圧は高いが電流値は非常に低く省エネ効果の高さがお分かりいただける实例である。

### 3-3. 3種のデバイス案

前述の省エネ性能を前提としつつ、e-Rubber の特徴を活かしたクルマ向けデバイスとして3つの案①ハプティクス、②センシング、③モーフィングについて、本項にて活用分野をご紹介します。4項にて、自動運転車でのユースケース案を例示したい。

#### 3-3-1. ハプティクス

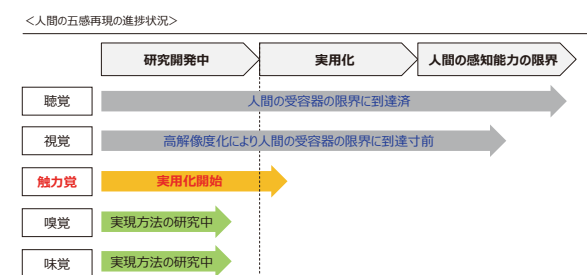
操作者に対して触覚上の、または力覚上のフィードバックを与えられるデバイスをハプティクスデバイスと呼ぶ。<sup>7)</sup>

従前よりバーチャルリアリティ (VR) やゲーム、または遠隔操作などの分野だけでなく、BMW、レクサス等の車両での活用技術としてお聞き及びの方も多いのではないかと思う。

これらは遠隔または仮想空間の対象物と自身の触力覚の受容器を通して対話/相互作用 (Interact) する技術であり、身近なものでは携帯電話のバイブレータなども単一信号発信子としてのハプティックデバイスに区分されよう。<sup>8)</sup>

現在は、こうしたモバイル機器を中心にハプティクスデバイス市場が形成されているが、豊田合成は e-Rubber を多用途で使えるハプティクスデバイスとして開発を進めている。

ヒトの五感再現に関し、聴覚はハイレゾ、視覚は 4k などの市販化により、人間の受容器能力の限界を満足するデバイスが利用可能となったが、聴覚・視覚での情報伝達をより強化/確実化できる触力覚デバイスに関しては、開発余地が大きい状態にある (図-4)。



■ 嗅覚・味覚は再現するための原理を含め研究途上で実用化に至っていない

図-4 ヒトの五感再現の進捗状況

特にヒトと機械のインタラクション (HMI) を道具を介し行う場合、触覚力覚により視聴覚の強化・補完ができることが背景にある。

e-Rubber は柔軟さと面接触を前提とし、広域/多彩な表現が可能なデバイスとして御期待をいただいている。

従来できなかった、対象物との新しいインタラクション性能を活かし、クルマとヒト双方の意思伝達を高度化し、安全・快適に貢献するデバイスである。

#### 3-3-2. センシング

IoT (モノのインターネット化) は、その接続対象をヒト (IoH) まで拡張し、データドリブン社会の根幹として生活のあらゆる場面に浸透する趨勢にある。

当該データを取得するためのセンサ実装数は、米国発の“トリリオン (1兆) センサプロジェクト”に見るような爆発的増加がほぼ確実視されている。<sup>9)</sup> センシング対象は常にヒトが中心となるが、次いで車や周辺機器がシームレスに監視され、連携する世界が想定されている。

e-Rubber は、優れた材料性能により極めて柔軟で高精度なセンシングが高ダイナミックレンジで得られることから、例として体重の分布や体表面振動を感知する圧力センサや、各関節の動きを捉えるためのストレッチセンサとしての高い性能を持っているが、契約上、本稿では開示できないことをご了承願いたい。

自動車分野での活用はセンサとハプティクスを併用した HMI としての活用が主体となろう。ヒトの状態 (センサ) を車に伝え、車の意図をヒトに伝える (ハプティクス) デバイスである。豊田合成の既存製品群としてハンドル、コンソールの機能拡張が具体案である。

交通事故の9割はヒューマンエラー (HE) に起因する。HE は発見の遅れ、判断の誤り、操作の誤りに分解され、発生プロセスは知覚・認知・判断・操作に分割できる。<sup>10)</sup>

センサとしてドライバの判断の誤りや操作の誤りに影響を与える健康状態や、道路環境に対するハンドル操作情報センサが覚知し、車載の DMS や ADAS に伝え、安全運行に導く仕組みである。<sup>11)</sup>

車とヒトのインタラクションが高度化し、車の運行が多数のセンサの情報に依存する時代には、より一層精緻な状態把握ができるセンサが肝要となる。

ヘルスケアの現場では、バイタルやストレッチセンサ活用が始まっているが、正確さと信頼性、消費電力や形状自由度等が課題であり開発の参考としている。<sup>12)</sup>

### 3-3-3. モーフィング

“クルマがロボットに変形する”日本発のアニメをご存知だろうか。この“連続的に形状を変化させる技術”は決して空想世界の開発ではなく、主に航空機分野での研究開発の歴史は長い。機体重量増を伴わず翼の形状を変化させ、飛行性能の高度化を目指す技術が“モーフィング”である。<sup>13)</sup>

軍用と民間で、その開発目的は異なる部分があるようだが、エアロダイナミクス性能の向上や飛行性能の高度化、安定性に貢献する技術であり、将来クルマが空を飛ぶ時代になれば必要となるが、それ以前にクルマに貢献できる分野は多いと考える。<sup>14)</sup>

エラストマー材料は、その粘弾性と形状変形の自由度が固有の特徴であり、モーフィング分野では翼や空力特性向上のための流体制御構造などで検討されている。<sup>15), 16)</sup>

モーフィング技術は、必ずしも流体や翼に代表される外装形状に留まらず、内装におけるアダプティブな形状変化やクルマからヒトへの働きかけ等、車室内での新たな生活スタイルを豊富にするデバイスとしての可能性を持っている（**図-5**）。



図-5 e-Rubber モーフィング例

## 4. 自動運転車でのユースケース考察

### 4-1. 前提認識

#### 4-1-1. 乗り手の変化を中心に

次世代車開発は、産業を越えて学際的、協調的に進み、2020年代前半にもレベル4以上の導入が期待されるようになったが、デバイス提案にあたり、導入時期に併せた“乗り手”側の変化、特に日本の人口動態に着目しておきたい。

日本の高齢化と少子化、生産労働人口比率の低下は世界に例を見ないスピードで進行している。また平均寿命の延長と出生数減少や未婚率上昇、

離婚率の上昇も相俟って、2035年時点では中高年、とくに65歳以降の世帯が全世帯の4割まで増加、その7割がひとり暮らしか高齢夫婦のみ世帯へと変貌する。<sup>17)</sup>

団塊世代が全て75歳以上となる『2024年』は、車の使用や消費にかかる大きな変局点であろう。

車や家事をシェアする最小単位とし機能してきた“世帯”について、その構成員や年齢分布が大きく変わることを意味しており、取りも直さず車の役割と位置付けも変化を余儀なくされると考えるからだ。

まずは車を所有するのか共有するのか、自分が運転するか乗せて貰うのか、に始まり、使う頻度や使い方にも変化がある。デバイス側から見れば、シェアリング対応や、ドライバ支援の重点も、年齢層に合わせたヴァリエーション対応が必要であろう。

極論すれば、自動運転が市場投入される時期の人口動態を考えれば、最先端ガジェットを使いこなす若者というより、例えば独居の高齢女性、といったターゲットユーザ層の車を巡る便益にどうお応えするかが、開発課題としてはより重要かもしれない。

年齢を重ねても衣食住に関する毎日の買い物、仲間との交流など、車を使いたい基本的な動機に変化はない。デバイス側が、如何にユーザの変化に寄り添って変容し、ユーザに車を必需品だと位置付けていただけるかが、重要課題である。

将来仮に現在の所有から共有、シェアリングやオンデマンド配車が優勢な時代にシフトしたとしても、車載デバイスとしては、ユーザに高度制御を意識させないユーザフレンドリーなHMIを作り、また車のデータ接続先のサービスプロバイダに対し、有益なデータを知覚し、速やかに届けるかが優劣のポイントだろう。

『柔らかく繊細なセンシングと触圧覚ハプティクスによる判り易さ、柔らかなモーフィングで受け止める安心感』のあるe-Rubberならではの特徴を追究しつつ、これら変化へ対応していきたい。

### 4-2. ユースケースI（自動運転 レベル2, 3）

以降、e-Rubberの自動運転での活用仮説を列挙するが、自動運転レベルとシステムについてはSAEが16年に定めたSAEJ3016の定義に基づく（**表-1**）。

表 1 自動運転レベル (内閣官房資料より引用)

SAE レベル0	人間の運転者が、全てを行う。
SAE レベル1	車両の自動化システムが、人間の運転者をときどき支援し、いくつかの運転タスクを実施することができる。
SAE レベル2	車両の自動化システムが、いくつかの運転タスクを事実上実施することができる一方、人間の運転者は、運転環境を監視し、また、残りの部分の運転タスクを実施し続けることになる。
SAE レベル3	自動化システムは、いくつかの運転タスクを事実上実施するとともに、運転環境がある場合に監視する一方、人間の運転者は、自動化システムが要請した場合に、制御を取り戻す準備をしておかなければならない。
SAE レベル4	自動化システムは、運転タスクを実施し、運転環境を監視することができる。人間は、制御を取り戻す必要はないが、自動化システムは、ある環境・条件下のみで運転することができる。
SAE レベル5	自動化システムは、人間の運転者が運転できる全ての条件下において、全ての運転タスクを実施することができる。

自動運転は HE による事故防止や渋滞解消をもたらしたり、乗車中のドライバーに運転外活動の自由度を与える一方、自動運転レベル 2 から 3 の限界領域に於いてはシステム (ADS) からドライバーへ運転タスクが受け渡されることが前提である。

タスクの安全な引渡しには、ドライバー・ADS・それ以外の周辺車を含む環境を調和させることが必要となるが、そもそもシステムがどのような状態で、どこまでどのように自動化した上で引き渡そうとしているかを含め、短時間で正確な意思伝達には非常に高度な“車とヒト”のコミュニケーション成立が必要だ。<sup>18), 19), 20)</sup>

システムから見て、ドライバーは運転が渡せる意識レベルにあるか (覚醒度)、他の事に気をとられていないか (集中度) を確かめつつ、周囲の状況や引渡しに至る迄の運行の流れを相互確認し合ったうえで引き渡し、といった具合である。

以上は主にドライバー監視のセンシングが担う部分だが、高度なコミュニケーションを成立させるための研究分野としてヒューマンシステムインタラクション (HSI) が存在し、e-Rubber はセンサ以外にハプティクス、モーフィングで貢献したいと考えている。

自動運転においてインタラクション不全が関係する課題の領域として、システムへの過信・不信、システムへの過度の依存、モード認識喪失やオートメーションサプライズ等の不具合がある。

これら HMI デザイン上の課題と対応に関しては、2015 年安全環境研究所講演会に於いて稲垣先生が明晰にご指摘されており、

- ・機械と状況認識を共有できる手がかり
- ・機械の判断の根拠が分かる手がかり

- ・機械の意図が分かる手がかり
- ・機械の能力限界を知る手がかり
- ・機械の作動状態が分かる手がかり

が理想の HMI 仕様を開発する道標となる。<sup>21), 22)</sup>

“e-Rubber HMI” 構想としては、ヒトの知覚と認識プロセスに関するインタラクションのチャンネルを受容器、また体の部位としても増やすことで、上述の「手がかり」を豊富にするデバイスとしての活用可能性も検討したい。

#### 4-3. ユースケース II (レベル 4, 5)

レベル 4 以降において、まずは内装分野で車室内で自由になった乗員が如何に快適に乗車時間を過ごせるかが開発ポイントの一つだ。<sup>23)</sup>

車内での映画や音楽鑑賞を楽しむために静粛性を追求する防音・吸音材の開発等が各材料メーカーで開始されている。e-Rubber は省エネと無音動作で貢献するのは勿論、Connected により得られる情報を用い、車室にエンタメスペースとしての性格を与えることもできる可能性がある。<sup>24), 25)</sup>

外装に関してはモーフィングがポイントである。自動運転の導入で、車の過剰な性能は削がれ、必要最低限のサイズまでダウンサイズする予測がある。ロボット映画のように考えるなら、乗員数ごとに車幅が変化する構造でもよいし、駐車スペースが最小になるように、降車後は垂直投影面積が極小となる形状変化をしてもよい。

また何より、高齢者が乗り易い状態にまで身がかがめるバリアフリー変化や、移乗に必要な手助けをする支援など、新たなユーザを車に迎えるための仕掛けのアイデアは無限に拡張することができる。以上の例示アイデアの実現には、デバイス開発は勿論、クルマや“クルマを巡る産業全体”との協調的な開発が必要であり、鋭意デバイス開発し、早期のご提案を進めていきたい。

## 5. まとめ

以上、e-Rubber のクルマにおける 3 つの活用方法をご提案させていただいた。DEA としての可能性の広さに加え、超分子活用によりヒステリシスロスのない材料を得たことで様々な可能性とメリットを持つデバイスの可能性をご理解いただければ幸甚である。

## 参考文献

## &lt;DEA 全般&gt;

- 1) Carpi et al., 2007, 'Dielectric Elastomers as electromechanical Transducers
- 2) 奥崎, 2017, '電場駆動型ソフトアクチュエータ', 高分子 66 巻 7 月号
- 3) *Proceedings, 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation*

## &lt;省エネ&gt;

- 4) 日本経済新聞, 'EV 時代 本当に来るの?' 2017 年 9 月 11 日夕刊 2 面
- 5) Intel Newsroom, 'Data is the new oil in the future of automated Driving <https://newsroom.intel.com/editorials/krzanich-the-future-of-automated-driving/>
- 6) Wadud et al., (Leeds Univ.), 2017 'Self-Driving Cars Will They Reduce Energy Use?'

## &lt;ハプティクス&gt;

- 7) 東京大学 工学系研究科 精密工学専攻 HP <http://am.t.u-tokyo.ac.jp/research.html>
- 8) プロイレル (JTEKT), 2014, Haptics as a Key technology in Man-Machine Interface

## &lt;センシング&gt;

- 9) 神永ら, 2015, トリリオン・センサのもたらす変革: 研究開発から産業創出へ システム制御情報学会誌 59 (11), 400-405, 2015
- 10) 森ら (交通事故総合分析センタ), 2007, ヒューマンエラー抑制の観点からみた 安全な道路・沿道環境のあり方に関する研究
- 11) 中川ら (Denso): 2016, '自動車運転における体調管理
- 12) Servati, 2017, *Novel Flexible Wearable Sensor Materials and Signal Processing for Vital Sign and Human Activity Monitoring, Sensors 2017*

## &lt;モーフィング&gt;

- 13) 玉山 (JAXA): モーフィングに関する動向, ながれ 28 (2009) 277-284
- 14) Peel, et al., (Texas A&M Univ.), 2015, 'Development of a Simple Morphing Wing Using Elastomeric Composites as Skins and Actuators

- 15) Murugen et al., (Swansea Univ.), 2011, 'Optimal design of elastomer composites for Morphing Skins', ASME 2011
- 16) Thill, et al., (Bristol Univ.), 2008: 'Morphing Skins', *The aeronautical Journal Mar. 2008*

## &lt;人口動態: 乗り手の変化&gt;

- 17) 河合, 2017 '未来の年表 人口減少日本でこれから起きること'

## &lt;自動運転・レベル 2, 3 &gt;

- 18) 産総研: 2017, 自動走行システムの実現に向けた HMI 等のヒューマンファクタに関する調査検討
- 19) JARI: 2016, '高度自動運転における権限委譲方法の基礎的検討 (第 1 報)
- 20) 内閣府: 2017, 戦略的イノベーションプログラム (SIP) 自動走行システム研究開発計画
- 21) 稲垣, 2015, '人と自動走行システムが織り成す光と影の交錯模様 - 課題解決に向けたデザインの視点, 交通安全環境研究所講演会, 2015 年 7 月 3 日
- 22) Mok et al., (Stanford Univ.) ; *Understanding Driver-Automated Vehicle Interactions Through Wizard of Oz Design Improvisation*

## &lt;自動運転・レベル 4, 5 &gt;

- 23) Wadud, et al., 'Help pr hindrance? The Travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles, *Transportation Research Part A (2016) 1-18*
- 24) 日本経済新聞, '静かな車内で映画・音楽' 2017 年 9 月 4 日朝刊 7 面
- 25) Center for Sustainable systems (Univ. of Michigan) 2016 "Autonomous Vehicles Factsheet", Pub., No. CSS16-18

著 者

藤原武史

竹内宏充