

誰かに教えたくなる 科学技術の話 6

ターミネーターのような 自己修復技術



東京大学名誉教授 月尾 嘉男

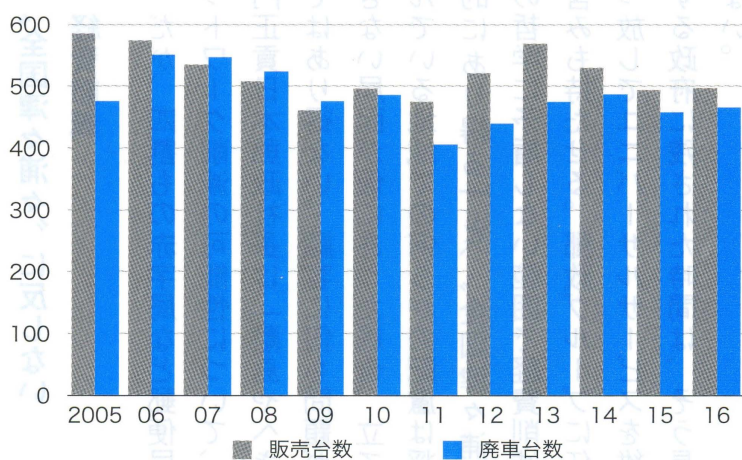
静物に自己修復技術を付与

人間には指先の切傷程度であれば数日で原状に回復する能力があり、骨折でも多少の補助をすれば時間は必要であるものの回復可能である。西洋医学の元祖とされる古代ギリシャの医師ヒポクラテスは、このような人間の能力を「自然こそが最良の医師」と表現している。東洋医学でも医術の基本は人間が生来保持している自然に治癒する能力を発揮させることとされている。

映画『ターミネーター』の主役には身体の一部を損傷しても再生する能力があるが、残念ながら現在の人間には欠如している。最近になり、iPS細胞を利用して人間の器官を再生する医療技術が研究されているが、まだ一般に利用できる段階には到達していない。ところが、両生動物イモリの手足は切断しても数日間再生するし、心臓の一部を切除しても再生するほどである。

これらは生物の能力であるが、人間が製造した**静物**は自己修復能力を具備していない。その結果、廃棄される静物が大量に発生する。一例として、日本で販売

図1 自動車の販売台数と廃車台数（日本：万台）

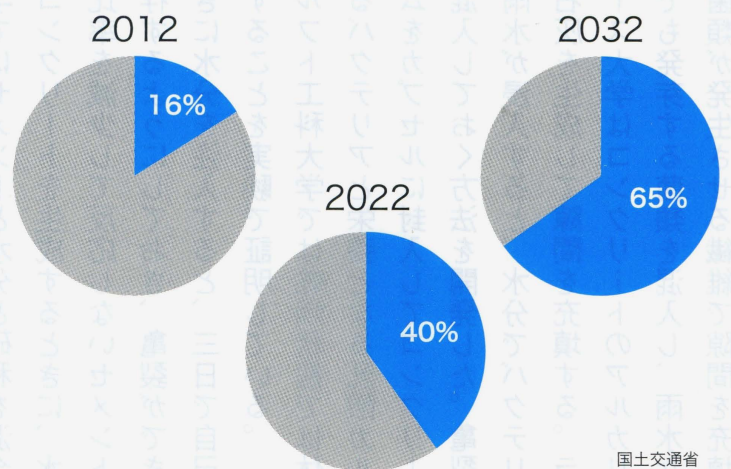


日本自動車販売協会連合会・自動車検査登録情報協会

される自動車は毎年約五百万台であるが、廃棄される台数も約四百五十万台になっている(図1)。このような廃棄される工業製品は回収して、一部は資源に再生されているが、視点によっては膨大なゴミを生産していることになる。

現代社会を維持している社会基盤についても同様の構造が存在する。日本では高度経済成長時代に全国で年間一千万以上の橋梁が建設されてきた。それらは時間

図2 50年経過の橋梁比率



国土交通省

とともに劣化するから、常時、補修を必要とするし、五十年後には更新が必要になる。二〇一二年には建設後五十年が経過した橋梁は全体の一六%であったが、二〇二二年には四〇%、二〇三二年には六五%に到達する(図2)。

それ以外にも自己修復を必要とする分野がある。地球の約四百キロメートル上空を国際宇宙ステーションが周回しているが、この空間には人工衛星やロケットの残骸も多数周回している。宇宙ゴミと

名付けられる残骸はライフルの弾丸の約十倍の速度で移動しているから、微小な破片が衝突しても宇宙ステーションは破損するが、簡単に修繕できないため自己修復が研究されてきた。

実際、アメリカ航空宇宙局(NASA)は二枚の薄板の中間にポリマーを充填した素材を開発し、そこへ弾丸が衝突すると、そのエネルギーによって化学反応が発生し、一秒以下で貫通した場所を修復する実験を公開している。自己修復技術は人間社会に蓄積された膨大な施設の維持のためだけではなく、宇宙や深海という極限空間に進出する人類にとっても重要な技術になっている。

擦傷を自己修復する塗料

経済の視点からは、生産も廃棄も更新も産業になるが、次第に廃棄や更新の比率が増大してくると社会の重荷になってくる。そのような課題に対処するために研究されはじめているのが、生産された静物が自身で修復や更新をする**自己修復技術**である。イモリの手足ほどの水準の自己修復は要求しないまでも、人間の切傷や骨折程度には原状復帰できる素材や

装置の開発である。

すでに実用になっている分野は**塗装材料**である。筆者の経験では、日本人は自動車の車体の塗装の損傷に過度に敏感であり、接触事故の損傷を修理するのは納得できるが、洗車による擦傷や表面の切傷でも費用をかけて修復をする傾向にある。そのような事情に対処するために開発されてきたのが軽微な塗装の損傷程度であれば、塗料自体が自動で修復する素材である。

トヨタ自動車の「セルフリストアリングコート」や日産自動車の「スクラッチシールド」など名称は様々であるが、これらを塗装した車体は金属、ブラシによる擦傷程度であれば約三十分で原状に回復する。塗料を封入したナノ(十億分の一)メートル規模のカプセルを塗料と一体にして塗布しておく、衝撃によってカプセルから塗料が浸出して回復させる仕組みである。

コンクリートも自己修復

その延長にあるのが**コンクリート**の亀裂の自己修復技術である。コンクリートはセメントと砂利と水分を混合した素材

であるが、時間とともにセメントとの水和反応と蒸発によって水分が減少していくことによる乾燥収縮が発生し亀裂の原因になる。そのため前述したように、鉄筋コンクリートなどの橋梁が時間とともに脆弱になり、約五十年で更新を必要とする社会問題になる。

これまでも亀裂のできたコンクリートに雨水が浸透し、残存していたセメントとの水和反応によって亀裂が自然に修復されることが観察されている。そこで東京大学ではセメントと水分と砂利を混合してコンクリートを生成するときに、水分の比率を減少して反応しないセメントが残存するようにしておき、亀裂ができるときに水分を注入すると、三日で自己修復することを実験で証明している。

デルフト工科大学では乾燥状態では休眠するバクテリアと栄養となる乳酸カルシウムをカプセルに封入してコンクリートに混入しておく方法を開発した。亀裂から雨水が浸入すると、水分でバクテリアが石灰を生成して隙間を充填する。ラトガース大学はコンクリートのアルカリ環境でも発芽する菌類を混入し、雨水などで菌類が発生させる繊維で隙間を充填

する技術を研究している。

セラミックスも自己修復

セラミックスは狭義には陶器や磁器などを意味するが、広義には高温で燃結した物質である。陶器は破損したら接着しなければ原状に復帰しないが、生物の骨格のように、亀裂ができて自己修復するセラミックスが開発されている。現在の航空機用エンジンの素材はニッケル合金が主流であるが、これを自己修復セラミックスに交換すると軽量になるだけではなく、大幅に安価になる。

ジェットエンジンの前方には空気を吸入する直径二メートルにもなるセラミックス素材のファンが設置され、毎分数千回程で回転している。そのため亀裂ができることがあるが、約一〇〇〇℃で千時間程度かけて修復している。しかし横浜国立大学で開発されたアルミナと炭化珪素を素材とするセラミックスは一分程度で修復できるようになった。自動修復ではないが大変な進歩である。スマートフォンを落下して表面の強化ガラスが破損することは多々あるが、その対策として自動車の車体の表面を塗装

する素材と同様の素材で被覆して、擦傷程度は保護できる製品はすでに使用されている。しかし昨年、カリフォルニア大学が開発した材料は最初の約五十倍に膨張するポリマー材料で、破片を接触しておくと、二十四時間程度で再度一体とすることが可能である。

破損したガラスは破片同士を加熱溶融しないと一体にならないが、昨年、東京大学が開発したガラスはポリエーテルチオ尿素で作製され、破片同士を常温で数時間接触させておくだけで復元し、強度も以前と同等という性能である。ガラスの自己修復としては世界最初である。これまで破損すれば厄介なゴミにしかならなかった材料が自己修復できることは資源問題の解決にも貢献する。

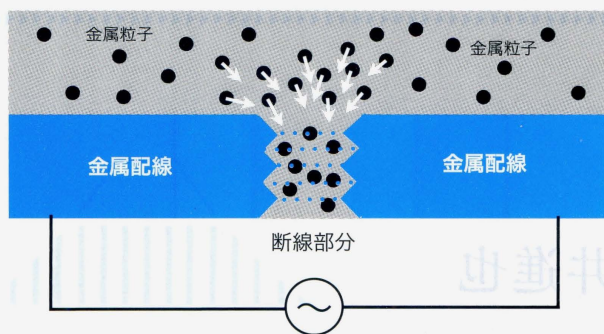
複雑な回路を自己修復

銅線で配線をしていた大昔の電気機器では配線の交換や接続箇所の修理で機器を再生していたが、現在の**集積回路**は極微な機器であり、人手による修復はできず集積回路全体を交換している。その解決として、正常な状態では使用しない冗長な回路を用意しておき、集積回路の内

部で断線が発生した場合には冗長な回路に切換えるという方法で自己修復を実現してきた。

イリノイ大学は液体金属を封入した直径十マイクロメートル（一メートルの十万分の一）程度のカプセルを集積回路の配線部分に多数埋設し、断線が発生した場合にはカプセルが破断して液体金属が断線部分に流入して回路が接続される技術を開発している。カリフォルニア工科大学では一円玉大の集積回路が自身で状態を監視し、異常があれば自己修復をする集積回路を開発している。

図3 断線の自己修復技術（早稲田大学）



早稲田大学理工学術院で開発された断線修復技術は金属の配線の上にナノメートル（一メートルの十億分の一）単位の金属粒子を混入した溶液を塗布しておく。金属の配線に亀裂が発生した場合に、その部分に電圧を付加すると断線した配線の両側に電界が発生し、電界トランプ現象によって断線した隙間に金属粒子が集中して配線が接続されるという原理である(図3)。

自己修復静物の実現

ここまでの事例のように、素材や素子の段階では自己修復技術の開発が進展していることが理解できる。課題はそれらを集合した装置の自己修復である。第一段階として、**ロボットの指先の自己回復**技術がブリュッセル自由大学で開発された。特殊な合成ゴムで成形された指先を刃物で損傷し、 80°C で四十分間加熱してから 25°C で二十四時間冷却すると、以前の状態で復元する技術である。

スタンフォード大学ではポリマー素材にニッケル原子を混入し、素材が外力により変形するとニッケル原子の相互距離が変化するために電気抵抗が変化する現

象を利用し、この素材を切断してから十分間接触させておくと完全に修復することを証明している。この現象は何度でも再現できるので、人間の皮膚と同様の自己修復可能な人工皮膚が実現でき、義手や義肢に利用可能である。

このような素材ではなく**ロボット全体**を自己修復する研究も進展している。第一段階として、フランスの国立研究機関インリアが開発した六足歩行ロボットは一足が故障すると、五足で歩行する方法を試行錯誤し、数十秒で一万数千の歩行形式から最適に歩行できる方法を発見する。当初の状態に完全に復帰するわけではないが、歩行するという目的は達成できるようになる。

しかし、イモリをはじめとする生物に匹敵する自己修復可能な人工生物は現在のところ映画や劇画の世界でしか存在しないが、今回紹介した急速に研究が進展している自己修復可能な素材と人工知能が合流すれば、天然の生物に匹敵するロボットの出現も予測できる。それは人類の未来にとって心配でもあるが、人間とは何物かを思考する契機にもなるはずである。