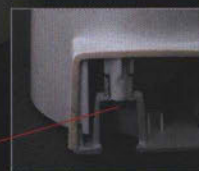


Techno Scope

リサイクル容易設計と 易解体固定技術

—形状記憶合金が拓く新たな可能性

我が国では循環型社会の形成を目指し、リサイクルや廃棄物対策、その他の地球環境対策に関わる法整備が進められてきた。一方、製品を製造するメーカーには、開発の時点から「環境に配慮した設計」の方針を盛り込み、リサイクルしやすい製品の設計や材料の選定が求められるようになり、こうした中で注目される技術の一つが易解体固定技術である。構造部材や締結部材の解体及び固定技術の開発はもとより、最近では形状記憶材料を活用した新しい解体固定技術への期待が高まっている。



形状記憶合金を使用した易解体ねじ(上)とコードレス電話器用充電器への適用例(下)、ワッシャー試作装置(左)
(資料提供:東海大学)

ものづくりの段階から目指す3R実現

「もったいない」2005年、ケニアのワンガリ・マータイ環境副大臣が日本を訪れたとき、この言葉に深い感銘を受けたという話は有名である。リデュース、リユース、リサイクルの3Rをわずか一語で表した「もったいない」という言葉との出会い。環境白書では、「もったいない」は単にモノを使い惜しむのではなく、そのモノの持つ本来の値打ちや役割に着目して、無駄にすることなく、それを活かしていくための言葉、と紹介されている。

日本では、循環型社会形成推進基本法(2000年施行)を始めとする各種リサイクル法の法整備などが、1990年代以降進められてきた。資源を有効に使い、無駄な排出物やエネルギーのロスを抑えるためには、ものづくりの段階から、3Rを配慮しなければならないということは、すでに日本の産業界での共通認識となっている。ものづくりにおいて3Rを推進する方策としては、例えば環境を配慮した製品設計を行い、素材の無害化、標準化を進めたり、使用済みの製品や部品を再利用したり、資源に戻す技術を開発することなどが挙げられる。

また、使用済み製品の高度分離・分解技術や、材料の分別技

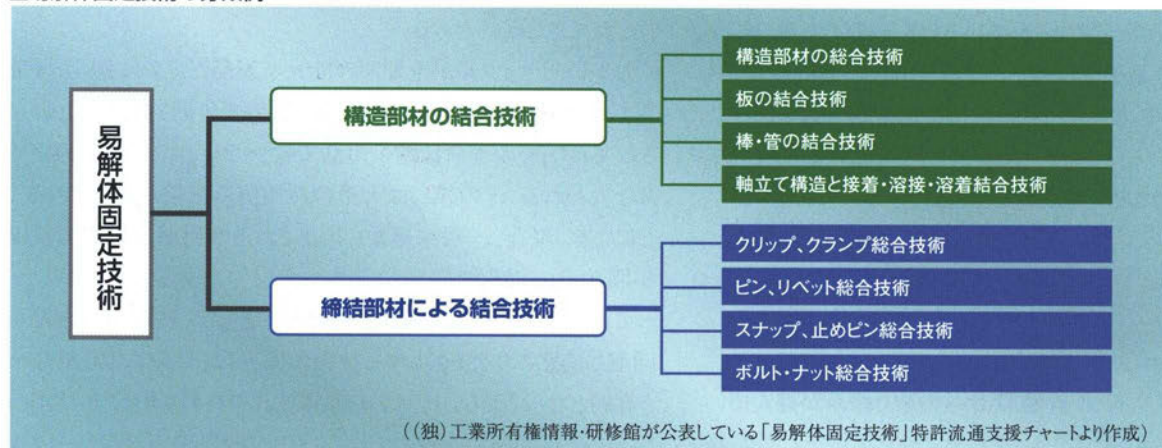
術も重要である。もともと製品には多種の素材が使われ、強度確保や使いやすさの向上を図るため、構造や成分は複雑になりやすい。この結果、リユースやリサイクルが困難になってしまう。現在の家電リサイクル法や自動車リサイクル法では、回収後の処理方法について詳細な規定がなく、安価な破碎処理が行われる場合が少なくない。回収した部品や材料がリユース、リサイクルされることは、資源・エネルギーの節約になるうえ、ひいては原材料のコスト削減につながる。

これらの問題を解決するため、製品の適切な解体・分別技術が必要となり、メーカー側にはリサイクル容易設計の開発が求められる。その中の1つに易解体固定技術がある。

(独)工業所有権情報・研修館が公表している「易解体固定技術」特許流通支援チャートによれば、「易解体固定技術とは構造部材、板、棒・管などを締結部材であるクリップ、クランプ、スナップ、止めピン、ピン・リベット、ボルト・ナットなどによる結合要素を用いた解体、分解などが容易にできる固定技術」であり、電子機器、自動車、産業機器、住宅設備などに導入されている、とされている。

用途別にみると、電子機器、自動車などの廃棄物などをリサイクルする際の易解体固定技術では、板の結合技術や、ボルト・ナット、クリップ、クランプの結合技術が多く採用されている。すでに易解

■易解体固定技術の分類例



体固定技術が用いられている分野としては、電子機器のプリント基板、ワイヤの着脱固定、可動部品の固定、筐体や部品の組み立て固定、自動車のワイヤーハーネスによる固定、バンパー、内装材や部品の着脱固定、ロック機構など、住宅機器のパネル、ブラケットなどの固定、医療機器、各種産業機器の部品固定などが挙げられている。

自動車が進むリサイクル容易設計

自動車業界は、以前から使用済み自動車のリサイクルや廃棄物処理に積極的に取り組んできた経緯がある。(社)自動車工業会は、再生資源利用促進法(1991年施行)に基づいて、1994年に製品設計段階における事前評価ガイドラインを策定し、それ以降、自動車メーカーはガイドラインを元に、リサイクル容易設計を取り入れるようになっている。また自動車リサイクル法(2005年本格施行)では、自動車メーカー及び輸入業者にフロン、エアバッグ、シュレッターダストの引き取りとリサイクル・適正処理を義務付けている。

多くの部品や材料で構成されている使用済み自動車から材料をリサイクルするためには、開発時から解体、リサイクルを考慮しないと、再資源化率が上がらないだけでなく、経済的にリサイクルを行うことができなくなってしまう。

自動車のリサイクル容易設計の項目例としては、締結点数の削減、構成部品の一体化などによる部品点数の削減、材料の統合などが挙げられる。例えば、2003年発売のトヨタ・ラウムでは、効率的な取り外しポイントを明示する「解体性向上マーク」をドアトリムなどの大型部品に表示したり、樹脂部品のリサイクル材使用などを採用している。

また、自動車に使用される銅の約半分が使用されているワイヤーハーネスは解体が困難な部品であるが、易解体性を考慮したワイヤー

ハーネスの開発が各社で進められている。これまでワイヤーハーネスはフックなどで引っ張って回収されていたが、ワイヤーハーネスのアース端子はボルトで車体に強固に固定されており、作業は困難だった。一例として、アース端子の圧着部構造を二重にし、車両振動時と

■易解体性を持つワイヤーハーネスの開発例

自動車のワイヤーハーネスにおいて、使用時は十分な耐久性を持ち、リサイクル時は易破壊性を持つアース端子が開発された。このアース端子では、車両振動時と解体時の応力集中部位を別々に分けた設計とし、解体時にはさまざまな角度からの応力に対して、引張方向に依存することなくほぼ一定の荷重で解体できる。



アース端子の取り付け状態

●車両振動時と解体時におけるアース端子の応力分布解析



●アース端子の解体時のようす



(資料提供:住友電気工業(株))

解体時の応力集中部位を分けることにより、耐久性と解体時の易破壊性を両立した製品が開発されている(住友電気工業(株)、住友電装(株)、(株)オートネットワーク技術研究所の共同開発)。

このほかリサイクルを考慮した材料選択も重要なテーマとなっており、樹脂材料の統一、リサイクルが容易な熱可塑性樹脂やポリオレフィン樹脂の採用などが進められている。

家電製品で注目される易解体固定技術

自動車とともに、リサイクル容易設計への取り組みが進んでいるのが家電製品である。家電リサイクル法(2001年施行)では、廃家電4品目(エアコン、ブラウン管テレビ、冷蔵庫・冷凍庫、洗濯機。冷凍庫は04年より追加された)についてのリサイクルが義務付けられており、小売業者や自治体を経由して収集された使用済み家電製品は、再商品化工場で解体、資源リサイクルがなされる。製造業者は対象品目の部品・材料をリサイクルする義務があり、リサイクル率は50~60%以上と定められている。最近では、液晶・PDPテレビなどをリサイクルの対象に追加する検討が進められている。普及台数が急速に増加している液晶・PDPテレビには、液晶物質など特殊な材料も含まれており、大型であるため自治体による

回収が難しい、など従来の方法ではリサイクルが難しいことが指摘されてきた経緯がある。

しかし、リサイクルが重要なのは大型製品だけではない。携帯電話器やデスクトップ型パソコンは、世界で年間1億台以上販売されており、その寿命は携帯電話で約1~2年、パソコンは約4~5年といわれる。その後には大量の使用済み家電が排出されることになる。現在、一般家庭から排出される使用済み家電の量は年間60万tに及んでいる。

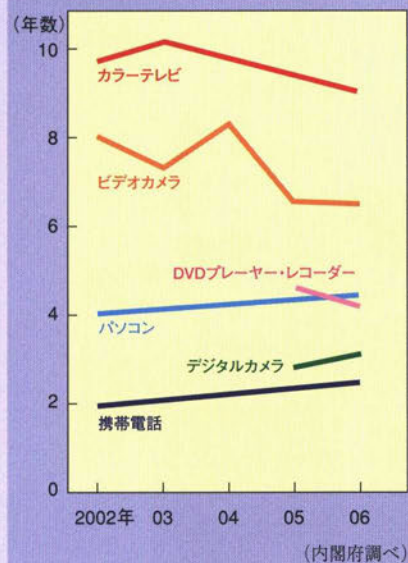
このような状況から、家電メーカーにとって、使用済み部品を回収し適正にリサイクルする技術の開発は、早急に取り組むべき課題となっており、リサイクル容易設計や材料リサイクル技術の開発への取り組みが進んでいる。そして設計の点からリサイクルに貢献するのが易解体固定技術である。

従来開発されてきた易解体固定技術は、主に締結具の形状の改良によって進められてきた。しかし最近では、加熱によって形状が変化するという特性を持つ形状記憶材料(金属、プラスチックなど)を用いる方法が注目されている。この方法によれば、従来の設計を大きく変更しなくても解体しやすい、多数の締結箇所を一括して解体することができる、などの効果が期待できる。

例として、形状記憶合金を使用した易解体ねじが開発されている(東海大学、(株)ユニオン精密、シャープ(株)、NECトーキン

■耐久消費財の使用年数

携帯電話、デジタルカメラの使用年数は非常に短い。使用年数が長いとされていたカラーテレビやビデオカメラなどは、年々使用年数の低下が見られる。



■易解体ねじによるリサイクルシステム

●易解体ねじの解体の順序

ねじの頭部は筐体のねじ穴より小さく作られている。組み立て時は、ねじはワッシャを介して筐体に固定されているが、加熱によりワッシャの径はねじの頭部より大きく広がり、自発的に解体する。



●易解体ねじを用いた解体工程

ベルトコンベア上に使用済み家電を載せ、ライン上の電気炉と冷却室を通過することにより解体を行う。短時間で大きく変形する形状記憶合金ワッシャの特徴を生かし、効率のよい解体が可能となる。易解体ねじ使用における解体を手作業と比較した場合、費用換算では約3分の1から10分の1以下、CO₂換算では約2分の1に低減できると試算されている。



(資料提供:東海大学工学部教授・吉田一也氏)

(株)の4社の共同開発)*。この易解体ねじは、C形状に加工された形状記憶合金ワッシャとねじを組み合わせたものである。加熱することによってある温度に達すると、ワッシャの内径が広がり、これに伴って締結が外れる。自発的に解体ができるため、ドライバーなどを使用する必要はない。

このねじを用いた使用済み家電製品は、シンプルな工程で解体が可能となる。使用済み家電製品をコンベアに載せ、電気炉の中を通過させながら加熱すると、形状記憶合金ワッシャが開き、解体された状態で出てくることになる。

すでにコードレス電話器用充電器に採用された実績があるが、今後は携帯電子機器や液晶ディスプレイなどへの採用が期待される。

形状記憶特性を生かした易解体ねじの開発

形状記憶合金は、長年にわたりすでに多くの研究が行われてきた材料である。1964年に米国で形状記憶効果を示すNi-Ti合金が発見されたことに端を発し、1970～80年代にかけて新しい合金開発が盛んに行われた。

形状記憶合金の第1の特徴は形状記憶特性である。通常の金属材料は、外部応力により弾性領域を超えて変形を加えると、応力を除いても永久変形分が残る。これに対し、形状記憶特性を持っている金属材料では、弾性領域を超えて変形を加えると塑性変形するが、変態温度以上に加熱するとひずみが消え元の形状に戻る。

第2の特性は超弾性である。変態温度以上で弾性領域を超えて変形ひずみを加えても、外部応力を除くと変形ひずみが消え元の形状に戻る。

現在実用化されている形状記憶合金のほとんどはNi-Ti合金であり、日本でも、女性用下着やメガネフレーム、携帯電話アンテナ、医療用材料などとして実用化されているが、その多くは形状記憶合金の超弾性を生かした用途である。

例として挙げた形状記憶合金ワッシャの材料もNi-Ti合金である。製作では、Ni-Ti合金を引抜きによって線材加工してから、記憶させる形状に加工する一次曲げ加工を行う。これを電気炉で、変態温度より高い温度に加熱し、形状を記憶させる。そして、再曲げ加工によって製品形状とする。

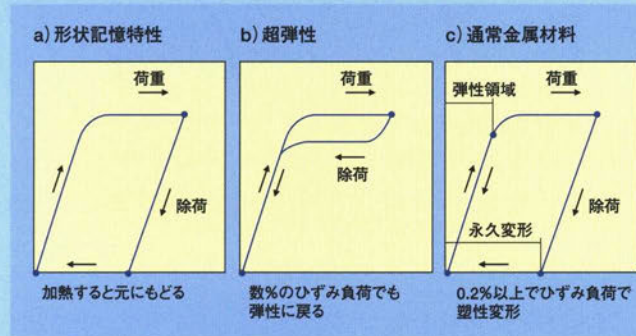
製品を加熱した後、記憶させた形状に回復する温度(回復温度)を決定付ける条件としては、再曲げ加工(加工量が大きいと回復温度が高くなる)、熱処理温度(熱処理温度が高いと回復温度が高くなる)などがある。

さらに重要なのが、成分組成による回復温度への影響である。Ni-Ti合金の基本的な組成はNi50%、Ti50%であるが、組成がわずか0.1%でも異なると回復温度が大きく上下する。したがって解体させたい温度と形状記憶合金の回復温度がわずかに違ってしまふと、形状記憶特性をまったく発揮しないということが起こる可能性がある。そのため、成分を精密に調整することが重要となる。

このような点を踏まえて、最適な解体(回復)温度の設定が検討された。実際の家電製品を想定すると、輸送時の船舶や車両

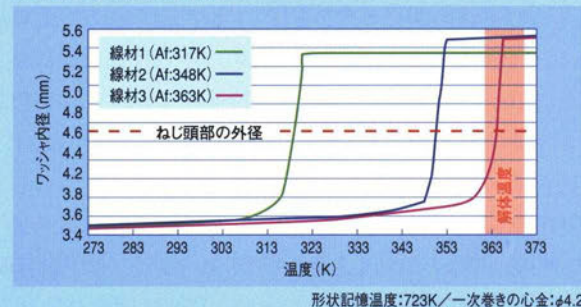
■形状記憶合金ワッシャによる易解体ねじ

●形状記憶合金と通常の金属材料の応力-ひずみ線図の比較

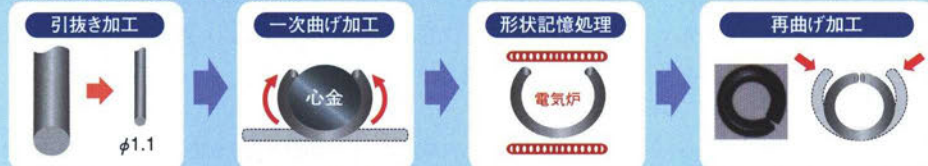


●変態温度(Af)が異なるワッシャ内径の開き

製品の内径から記憶した内径へと変位する温度の幅は、変態温度にかかわらず、上下5K程度しかない。



●形状記憶合金ワッシャの製作工程



(資料提供:東海大学工学部教授・吉田一也氏)

*この研究は、科学技術振興機構(JST)の「独創的シーズ展開事業 大学発ベンチャー創出推進」の2005年度テーマに採択されている。

の中では高温にさらされる場合があるが、その際にねじが外れてしまえば、固定の役目を果たさなくなる。また筐体などに使用される一部の樹脂材料は解体工程で100℃以上に熱すると変形する場合があります、易解体ねじが機能しなくなるおそれがある。このような条件を考慮し、形状記憶合金ワッシャの回復温度は95～100℃と、上下わずか5℃で確実に開くように設定された。

ちなみに、開発された易解体ねじの締結力は、M2.6ねじの場合ワッシャの抜け荷重は平均850Nであり、十分な締結力を発揮することが確認されている。

価格面で優位な鉄系形状記憶合金

すぐれた特性を発揮するNi-Ti合金だが、材料が高価、加工性が悪いなどの理由から、価格が高く、実用化の上での大きなネックとなっている。いくつかの形状記憶合金の中で、価格の点から期待されるのは鉄系形状記憶合金である。

鉄系形状記憶合金の価格は、Ni-Ti系形状記憶合金に比べ10分の1程度にできるといわれる。しかし形状記憶特性においては、変態点が高温、回復する速度が遅く、回復ひずみの割合が小さいなどの欠点があり、加熱により一度形状が回復した後は、冷却しても形状が変化しない性質（一方向性）を持つ。

鉄系形状記憶合金としては、約25年前にFe-Mn-Si系合金が発明されている。しかしこの合金の形状記憶特性は、Ni-Ti系形状記憶合金に比べ著しく劣っていた。それを改善するための方法として「トレーニング」という加工熱処理法が考案されている。これは室温で応力誘起マルテンサイト変態による数%の変形を加えた後、約600℃まで加熱し逆変態させるといった熱処理を数回以上繰り返すものであるが、コストがかかるなどの理由から、トレーニングをしなくても済む方法の開発が求められていた。一例として、従来のFe-Mn-Si系合金に微量のNbとCを添加し、熱処理前に温間加工することにより、一度の加熱で形状記憶特性の大幅向上が可能になったという研究成果が、(独)物質・材料研究機構から発表されている(連携記事参照)。

現在、鉄系形状記憶合金の用途としては、加熱による施工作業時間の削減などの効果を生かして、クレーンレール用継目板、鋼管用継手などがある。現在までのところ、易解体固定技術としての実用化の例はないが、大型機械や構造物などの部品で大型の製品である場合や、危険箇所での解体作業、本体が鉄鋼材料である場合の締結部材などには、適用の可能性があるのではないかと期待されている。

形状記憶合金は、以前からスマートマテリアルとしての用途展開が期待されてきた。最近のように、リサイクル容易設計や易解体

■Fe-Mn-Si系形状記憶合金の開発例

●クレーンレール用継目板



運転時の振動の原因となるレール間のすき間を、形状記憶合金の収縮によりなくす。非熟練工でも短時間で確実な施工が可能となる。

●曲線鋼管用継手

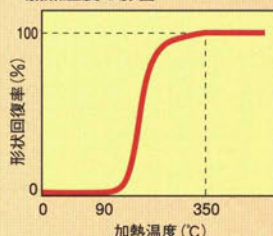


誘導加熱装置を使用し約5分加熱することにより、短時間での鋼管接続が可能である。継手部の引張強度は母管部の70～95%を確保している。

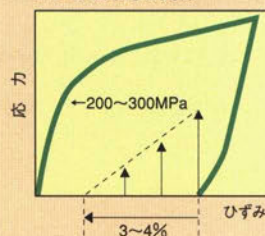
●Fe-Mn-Si系形状記憶合金の基本特性

引張強度	686～1275MPa	動作温度	90～350℃
降伏強度	200～300MPa	形状回復ひずみ	2.5～4.0%
伸び	20～40%	形状回復応力	147～196MPa

●形状回復に対する加熱温度の影響



●形状回復過程で発生するひずみと応力の関係



(資料提供: 淡路マテリア(株))

固定技術という社会的ニーズが注目されるようになったことは、形状記憶合金にとって活躍のフィールドを広げる大きなチャンスである。数多くの材料が持つ独自の特性、可能性を認識しつつ、社会や用途分野のニーズをとらえていくことにより、新しいマッチングのチャンスが広がっていくのではないだろうか。

●取材協力 東海大学工学部教授・吉田一也氏、(独)物質・材料研究機構、淡路マテリア(株)

●文 杉山香里