

# 形状記憶材料を利用した製品の 自動解体システムに関する基礎的検討

Auto-Disassembly System Using Shape Memory Materials

酒井 宏 祐\*<sup>1</sup>    谷川 雅 信\*<sup>2</sup>    安田 剛 郎\*<sup>2</sup>    岡田 英 夫\*<sup>3</sup>  
Koyu Sakai    Masanobu Tanigawa    Takeo Yasuda    Hideo Okada

## 要 旨

製品のリサイクルコストを低減する方法の一つとして、製品解体工程の自動化が挙げられる。我々は、自動製品解体システムの一形態として加熱解体システムを提案し、加熱することにより締結を解除する形状記憶材料製締結部品を開発した。更に、それら締結部品により組立てられた易解体製品（試作品）を電気炉で加熱し、短時間で解体できることを確認した。

本稿では、上記取り組みについて紹介するとともに、技術的課題について述べる。

Automation of product-disassembly process is one of the method of reducing the recycling cost of products. So, we proposed that heat-disassembly system is a promising form of auto-disassembly system and developed the fasteners made from shape memory materials which were unfastened by heating. Furthermore, we tested a few prototypes assembled by these fasteners and established the disassembling system by heating in a short time. In this paper, we will present our works and technical issues.

## まえがき

我が国では、2001年4月1日より特定家庭用機器再商品化法（家電リサイクル法）が施行され、家電4品目（テレビ、エアコン、冷蔵庫、洗濯機）のリサイクルが義務付けられた。この法律の施行に伴い、各家電メーカーは新規リサイクル工場を設立するなどして対応してきたが、将来的には前記4品目以外の製品についてもリサイクルが義務付けられ、家電メーカーの負担はさらに大きくなるものと予想される。

現在、廃家電製品は図1に示すような工程を経てリサイクルされている。中でも、解体工程は手作業で行われおり、リサイクルコストを増大させる大きな要因となっている。このため、リサイクルコストの低減には解体工程の自動化が有効だと言える。

そこで我々は、加熱による製品の自動解体システムを提案し、そのシステムを実現するための基礎的検討を行った。

なお、この研究は経済産業省の外郭団体である

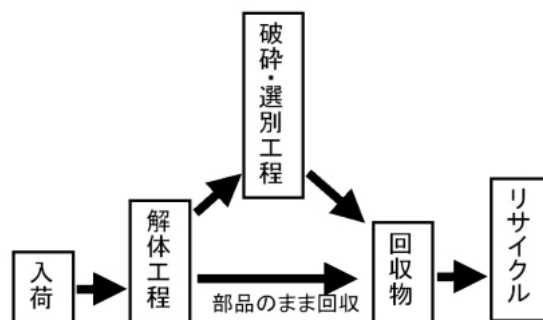


図1 現在のリサイクル工程  
Fig. 1 Present recycling process.

（財）製造科学技術センターの委託研究テーマとして NEC トーキョー株式会社と共同で取組んだものである。

## 1. 加熱解体システム

図2に我々が提案する自動解体システムを示す。コンベアに載せられた廃家電製品は加熱装置内を通過

\*<sup>1</sup> A1234 プロジェクトチーム    \*<sup>2</sup> 環境安全本部 環境技術開発部

\*<sup>3</sup> 生産技術開発推進本部 生産技術開発センター 生産システム技術開発Bグループ

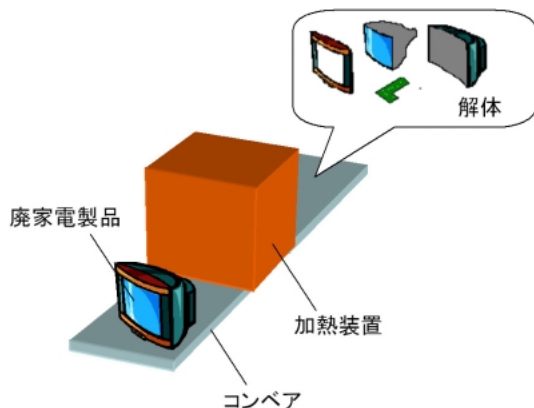


図2 自動解体システム  
Fig. 2 Auto-disassembly system.

し、部品同士の締結が解除された状態が出てくるというものである。このような解体システムによれば、一度に複数の製品を無人で解体することが可能であり、製品の解体コストを大幅に削減することができるものと考えられる。

## 2. 形状記憶材料性易解体締結部品の開発および易解体製品の試作

前述の加熱解体システムを実現するためには、加熱すると締結を解除する締結部品を開発する必要がある。部品の締結方法にはいくつかの方法があるが、現状においては金属ネジとスナップフィット(一般に樹脂製部品に一体成形されている)を併用した締結構造が多く用いられている。そこで我々は、加熱すると締結を解除するように変形する形状記憶合金製易解体ネジと形状記憶樹脂製易解体スナップフィット締結部品を開発し、さらに、開発した締結部品により組み立てた易解体製品を試作した。

以下に、開発した易解体性締結部品、および易解体製品について説明する。

### 2.1 形状記憶合金製易解体ネジの開発

#### 2.1.1 ネジの材料(形状記憶合金)

表1に主な形状記憶合金(以下、SMA: Shape Memory Alloy)の機械的特性を示す。SMAにはTi-Ni系、Fe系、およびCu系がある。材料コストや加工性から判断するとFe系やCu系の合金が優れている。しかし、永久変形が残らない(回復可能なひずみ範囲内では)という理由から、Ti-Ni系合金が利用されることが多い。また、Ti-Ni系は耐食性にも優れており、リユースが容易だと考えられる。以上の様な理由から、Ti-Ni系SMAをネジ材料として採用した。

表1 形状記憶合金の機械的特性<sup>1)</sup>

Table 1 Mechanical characteristics of SMA.

材料	引張り強さ (MPa)	変態温度 (℃)	回復可能なひずみ (%)	加工性	材料コスト
Ti-Ni系	700~1100	max.100	max.8%	難	高
Cu系 (Cu-Al-Mn)	280	max.120	max.8% (永久変形あり)	容易	中
Fe系 (Fe-Mn-Si)	680~1000	130~185	2.5~4.5% (永久変形あり)	容易	低

#### 2.1.2 開発した易解体ネジ

単純に考えると、ネジ山が消えてしまえばネジの締結は解除される。実際、三菱重工業株式会社では加熱するとネジ山が無くなる形状記憶樹脂製易解体ネジが開発されている(図4)。しかし、Ti-Ni系SMAにはネジ山自体を無くしてしまう程の形状回復能力が無い(表1, 2)。そこで我々は、出来るだけ小さい変形でネジ締結を解除できる変形パターンの検討・試作を繰り返し、図3に示す易解体ネジを開発した。

このネジは、ネジ部とネジ頭部が別体で、ネジの頭部のみがSMA製である。加熱するとネジ頭部が形状回復し、ネジ部から分離できる構造になっている。このような構造の場合、ネジ部は従来の金属ネジと同素材で作製することができるため強度を確保することが可能であり、加えて、SMAの使用量が少ないため材料コストも低い。

なお、以上に紹介したSMAネジはNECトーキン株式会社との共同開発によるものである。

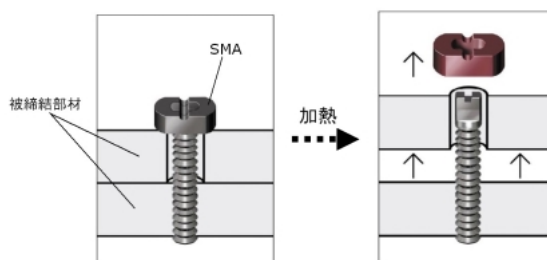


図3 開発した形状記憶合金ネジ  
Fig. 3 SMA screws we developed.

表2 ネジ山を無くすためのひずみ

Table 2 Strain for losing screw threads.

ネジの呼び	山の径 d (mm)	谷の径 d1 (mm)	ひずみ (d-d1)/d (%)
M3	3	2.459	18
M4	4	3.242	19
M5	5	4.134	19.3

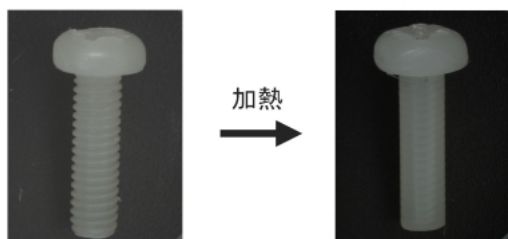


図4 形状記憶樹脂製易解体ネジ（三菱重工の開発）  
Fig. 4 Easy-release screw made of shape memory polymer.  
(Developed by Mitsubishi Heavy Industries, LTD.)

## 2・2 形状記憶樹脂製易解体スナップフィットの開発

### 2・2・1 スナップフィットの材料（形状記憶樹脂）

易解体スナップフィットの材料として採用した形状記憶樹脂（以下、SMP：Shape Memory Polymer）は三菱重工業株式会社製SMPである。このSMPはポリウレタンの一種で、結晶の融点以上まで加熱して流動状態にした後冷却すると、内部応力がゼロになるような新しい結晶が成長するという性質を持っている。この性質が、形状記憶のメカニズムである。表3に使用したSMPの機械的性質を示す。

表3 形状記憶樹脂の機械的特性  
Table 3 Mechanical characteristics of SMP.

素材	ポリウレタン
比重	1.0~1.3
引張り強さ(MPa)	450~700
変態温度(℃)	-40~120
回復可能なひずみ	100%

※三菱重工業(株)提供の技術資料から集成

### 2・2・2 開発したスナップフィット締結部品

図5に我々の開発したSMPスナップフィット締結部品の一例を示す。

一般的なスナップフィットは、一方の部品に成形された凸部（爪状の場合が多い）が、もう一方の部品に成形された凹部（穴の場合もある）に係合する締結構造である。それらの凹凸部は被締結部品に一体成形されていることが多いが、部品自体を形状記憶樹脂製にするとコストや強度が問題となる。ここでは、単体の締結部品（例えばネジのような）としてスナップフィット締結部品を開発した。

スナップフィット締結部品の製造工程は以下に示す通りである。

工程1) 射出成形により母材を成形する。

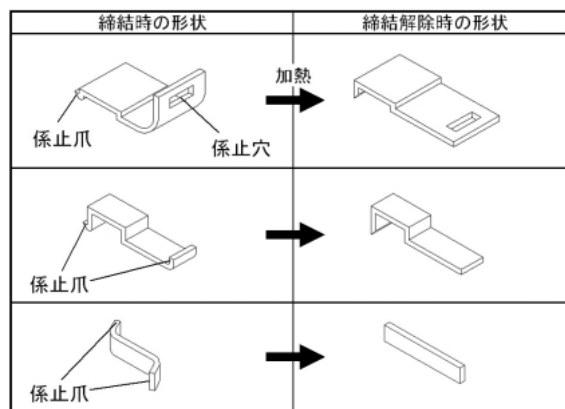


図5 開発したスナップフィット  
Fig. 5 Snap-fit parts we developed.

工程2) 上記母材を加熱し軟化させた状態で曲げを加え係止部を成形する

工程3) 切削加工により形状を整える。

以上の工程で製作されたスナップフィットを加熱すると、係止部が曲げ成形前のフラットな状態に戻るので締結を解除することができる。

なお、ここで紹介したスナップフィットは次章で紹介する液晶テレビに取付けることを想定し設計したものである。

### 2・3 易解体製品の試作

これまでに紹介した形状記憶材料製接合部品により各部品が締結された易解体製品を試作した。ここでは、試作の一例として液晶テレビを紹介する。

図6に試作した液晶テレビを示す。ベースに使用したのは当社製液晶テレビAQUOS（LC13B）である。AQUOSは大まかに分けると筐体、スタンド、回路基板、LCDユニット、回路基板ホルダ（回路基板を搭載し固定するための部材）の5種類の部品群から構成されている。

以上の各部品同士を、開発した易解体性締結部品で締結した。なお、前筐体および基板ホルダにはSMPスナップフィットを取り付けられるように加工を加えた。表4に各締結部品の採用箇所を示す。

## 3. 加熱解体実験

以上に紹介した易解体製品を加熱解体する実験を行った。なお、この実験は開発した締結部品の機能確認（設計通り形状回復し、締結を解除することができるか確認）のために行ったものである。このため、締結部品の形状回復温度は低く設定した。

実験の結果、全ての締結部品が設計通り形状回復することを確認できたが、PSなど耐熱性の低い材料の



図6 易解体製品（液晶テレビ）  
Fig. 6 Prototype of Easy-release product (LCD TV).

表4 易解体締結部品取り付け箇所  
Table 4 Adoption parts of easy-release fasteners.

締結箇所	締結部品
スタンド-後筐体	SMAネジ
前筐体-後筐体	SMAネジ+SMPスナップフィット
回復基板-基板ホルダ	SMAネジ+SMPスナップフィット
後筐体-LCDユニット	SMAネジ
LCDユニット-基板ホルダ	SMAネジ

表5 加熱解体実験の条件  
Tble 5 Conditions of heat-disassembly experiment.

加熱装置	コンベア付き電気炉 (東京瓦斯電炉TBC-420)
加熱装置の設定温度(℃)	100
加熱時間(min.)	8
締結部品の形状回復温度(℃)	60



炉内を通る液晶テレビ



解体された液晶テレビ

図7 解体された易解体製品（液晶テレビ）  
Fig. 7 Disassembled easy-release product (LCD TV).

部品に熱による変形が発生し、解体を阻害することがあった。

表5に実験条件を、図7に加熱中および解体された易解体製品（液晶テレビ）を示す。

#### 4. 今後の検討項目

以上に我々が行った取組みについて紹介してきたが、これらは加熱解体システムを実現するための基礎的なものである。以下に、今後検討すべき課題を示す。

- (1) 締結部品の形状回復温度の最適化
  - ・製品が置かれる可能性のある各状況下の温度調査（真夏の車内温度など）
  - ・各電子部品の耐熱温度調査（電子部品のリユースを想定）
- (2) 加熱方法の最適化

- ・効率の良い加熱方法の検討（締結部のみを選択的に加熱する方法など）
- ・大型製品の加熱方法
- (3) 解体システムの最適化
  - ・解体と部品の分離・回収を同時に行えるシステムの検討など
  - ・ICタグとの組み合わせによる解体システムの効率化

#### 謝辞

最後に、本研究開発を行うにあたり、ご指導ならびにご協力頂きました NEC トーキン株式会社、三菱重工業株式会社の関係者各位に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 谷川雅信, 鏡優, 形状記憶合金ねじの開発, KEC情報No.185, (社)関西電子工業振興センター(2003).

(2004年1月23日受理)