環境調和型社会への技術 —易解体性と可逆的インターコネクション—

New Technology for Environmentally Concious Society
—Design for Disassembly and Reversible Interconnection

須賀 唯知*

1. はじめに

廃棄物の処理にはいうまでもなく、単純な廃棄からエネルギー回収、物質回収、部品の再利用といったリサイクルからリユースに至るいろいろなレベルが存在する。近未来の資源枯渇の問題と現実の廃棄場所の絶対的不足から、単純な廃棄はもはや許されない状況になりつつあり、現実にはゴミの減量とリサイクル・リユース量の増大を図る必要がでてきている。

このゴミの減量とリサイクルおよびリユース量の増大のためのキーテクノロジーの1つが、分解・解体を前提とした設計技術である。特にエレクトロニクス機器は多様な材料からなる多数の部品から構成されており、この解体・分解は今後、廃棄物処理の大きな要素になろうとしている。エネルギー回収や物質回収などのリサイクル面からは、これらの機器を素材毎にあらかじめ解体しておくことが低コスト化の条件であり、また処理における環境への負荷も小さい。複合材料のように分離しにくい材料はリサイクル面から不利であり、近年の環境調和型製品においては、同一機能であれば単一素材部品を使うことが推奨されている。

また、易解体性（解体のしやすさ）は特に部品のリユースにとっては絶対的条件である。シュレグによって対象そのものを壊して分解・解体を行うことももちろん可能であるが、部品を再利用するためには、最低限、再利用を前提とする部分については壊さないように分解・解体を進めることが必要であり、また鉛、水銀など有害

物質を含む基板や蛍光管などについては破砕処理の前に分解・解体を行うことが必須である。

従来の製品開発においては、解体を前提とした設計はほとんどなく、まず要求機能を満たすこと、組立工数などの製造コストを低減することのみが条件となっていた。そのため、現状の多くの製品は極めて分解しにくい構造となっている。しかしながら、廃棄物処理／リサイクルにおける社会的な低コスト化を考えると、分解性・解体性を考慮した設計は極めて重要になってくると考えられる。すなわち、環境調和型製品の最も重要な要件の1つが「易解体性設計 Design for Disassembly (DFD)」である。

2. 易解体性設計と易解体性評価

易解体性設計が現実に行われている例も存在する。たとえばレンズ付カメラである。これはカメラごと回収され、フィルムが取り出されたのち、本体は完全自動化ラインで解体され、レンズ、シャッター機構、フラッシュ部分などが再利用されるとともに、筐体のプラスチックは材料リサイクルされる。これらの解体・リサイクルを容易に行うために、接続はねじ類は一切使われず、スナップフィットと呼ばれる爪のみで部品間が接続されるとともに、爪も専用ロボットで解体しやすい構造になっている。また、解体も全て一方向から行えるように設計されている。

これに近い設計で身近な例としては、コピー機のトナーカセットがあげられる。これも回収され、リサイクル

* Dr. Tadatomo SUGA, Professor

東京大学 先端科学技術研究センター、SHM 理事／The Univ. of Tokyo, Research Center for Advanced Science & Technolgy.

されている。そのために、コピー機は少なくともトナーカセットは容易に外したり、組み立てたりできるように設計されている。これはメンテナンス・保全のための設計であり、解体性設計の一種と考えることもできる。

易解体性設計 DFD を行うためには、易解体性が何で決まっているか調べ、これを定量的に評価することが必要となる。このような解体性評価の研究が始められている。易解体性設計 DFD は、最終的には解体コストを低下させることが目的である。解体コストは解体するのに必要な時間に依存するので、この解体時間を解体性の評価パラメータとすることが行われている。具体的には、ねじやスナップフィットなどの接続部おのおのについて解体工程を分析し、解体に要する時間に応じて点数付けをし、これの総計をもって解体性の指標とする²⁾。解体性の指標は設計の時点で評価することが可能であるので、これを最小にするように設計改良を行うことで、易解体性設計 DFD を進めることができる。すでに、テレビ、クーラーなどの家電製品やコンピュータなどの製品開発へ適用され、設計者の負担を軽減するために、このような評価指標の計算を自動化し設計 CAD に組み込む試みも始まっている³⁾。

3. 易解体性設計の課題

逆に易解体性設計 DFD の難しさも存在する。すなわち、分解・解体をどこまでやるのか、何のためにやるのか（有害物質の分別か、材料リサイクルのためか、部品のリユースのためか）、誰がやるのか（専門業者か、廃棄物処理業者か）、どのような方法を使うのか（自動化ラインか、人手によるのか）、などによって分解・解体のコストは全く異なり、これを確定しないと真の分解・解体コストを評価できないからである。

これは、いわゆる製品ライフサイクルの静脈側、すなわち、廃棄・リサイクルの社会的システムが不備であることが最大の原因である。その意味で現状で DFD を適用しやすい例は、メンテナンス・保全のように分解の目的、方法がはっきりしている場合や、レンズ付フィルムのように、製品のライフサイクルが半年程度で非常に短く、しかも、完全に閉ループでコントロールできる場合に限られてくる。

したがって、多様な製品が混在して処理されたり、製品のライフサイクルが長いものについては、設計時点で何らかの廃棄物処理のシナリオを想定せざるを得ない。この時の処理のコストをどう評価し、これを誰が負担するかという、現在の社会が循環型社会へと発展していくためのハードルを越えない限り、この問題の真の解決は

ない。

とはいっても、どのようなシナリオに基づいても、易解体性を考慮した設計は部品点数の削減、ユニット化、モジュール化など従来の製品開発における設計思想とは全く矛盾せず、むしろ従来の設計の基準においてもコスト低減につながる設計技術であることも認識され始めている。また、分解・解体のシナリオ、戦略が決まっている場合には、これに依存しない解体性の評価指標（解体エネルギー、解体エントロピー）による評価が提案されている⁴⁾。この場合、分解・解体工程の情報をどうやって設計側から最終作業員へ伝えるかがポイントとなる。

4. 解体性の定量的評価

評価指標として、解体エネルギーおよび解体エントロピーを使った一般的な解体性の評価手法を紹介しよう⁴⁾。

この手法では、その機器固有の解体性を評価することを主眼とし、実際の解体コストは解体性評価指標に重みを付けることにより間接的に求めることにする。解体方法や解体に使用する工具、動力、作業の習熟度などの戦略的要素はこれらの重みによって表現し、その機器固有のディスアセンブリ性を解体エネルギーと解体エントロピーで表現するわけである。

解体エネルギーは接続手法の違いによるディスアセンブリ性を表現するパラメータである。すなわち、機械的接続については、1)ねじ：締め付けトルクに依存したエネルギー、2)ピン・コネクタ：すべり摩擦に起因したエネルギー、3)スナップフィット：変形に要する弾性エネルギーを評価し、化学的接続については、1)接着：ピール剥離に要する変形分離エネルギー、2)はんだ：変形破壊に要するエネルギーないしは加熱溶融エネルギー、などを接続点ごとに評価し、積算する。これによってディスアセンブリに要する正味のエネルギーが算出される。実際のディスアセンブリコストは、これにツール（機械的、熱的、化学的エネルギー）のコストを考慮した重みを付けることで個別に評価する。

解体エントロピーは、接続手法の多様性に関連したディスアセンブリ性を表現する。1種類のためのねじだけで接続しているものと、いくつものねじや接着やピンなどを混在して接続しているものとは、解体性は明らかに前者のほうが優れている。また、ねじやピンの挿入方向やスナップフィットの解除方向にしても、全て同じ方向であればツールのアクセスも容易であり、ディスアセンブリ性に優れている。はんだ付けも、SMTの片面のみであれば分離も比較的容易だが、両面 SMT に挿入部品が混載していると分解は難しくなる。そこで解体エント

ロピーの算出においては、接続点を接続手法で分類し、さらに接続点の分解方向で分類する。この接続の解体エントロピー S_i は、

$$S_i = \sum_k \left[\ln \left(\frac{N_{ik}!}{\prod_i n_{ij}!} \right) + \sum_j \ln \left(\frac{n_{ij}!}{\prod_j n_{ij}!} \right) \right] \quad (1)$$

で定義される。ここに N_{ik} はサブアセンブリ k の総接続点数、 n_i は接続手法 i による接続点の数、 n_{ij} は接続 i に属する接続点の j 方向 ($\pm x, \pm y, \pm z$ 方向それぞれについて $j = \pm 1, \pm 2, \pm 3$) の数である。第1項は接続の種類の多様性に関する項であり、第2項は解体作業の方向の多様性に関する項である。むろんこの定義は熱力学的なエントロピーとは関係がなく、多様性を表現する指標に過ぎない。ただし、場合の数の対数表現によって加算的なパラメータによって多様性が扱えること、解体エネルギーと同様、機械的接続と化学的接合が同時に扱えること、などの利点がある。

解体エントロピーによれば、当然のことながら接続手法が少ないほど、また分解方向が少ないほど解体エントロピーは小さくなる。単一のねじで一方からのみ接続されているもの、片面はんだ付けのみの SMT などは、解体エントロピー 0 である。また、この定義からも明らかのように、接続点はサブアセンブリに分割したほうがエントロピーは低下する。また、実際のディスアセンブリコストは経験的に算出された重みを、各項に乗じて算出する。

ある種のアセンブリは、接続を使わずに部品間の拘束のみで成り立っている。このような場合、部品の接続の解体エネルギーは 0 であり、また接続の解体エントロピーも 0 であり、解体の難易度はむしろ、部品を拘束から外すために必要な部品の移動経路に関係する。そこで、自由度が拘束された部品間については分離するまでの移動経路（解体経路）をそれぞれの方向ごとに調べ、その場合の数を算出することにする。

たとえば、箱の中の積み木は逆さにすれば全て解体するのに対し、寄せ木細工のパズルでは解体経路は多く、各方向に解体経路も向いているために解体は困難になる。このような場合のディスアセンブリ性を解体経路の多様性で表現し、その場合の数の対数表現を解体経路に関するエントロピーと呼ぶ。

$$S_p = \ln \left(\frac{N_p!}{\prod_j n_{pj}!} \right) \quad (2)$$

ここに N_p は解体経路の総数、 n_{pj} は方向 j の解体経路の数である。極端な例として、全ての接続の種類も、また解体方向も全く異なる場合、その場合の数は $N!$ であるから、接続の解体エントロピーの最大値は $\sum_k \ln N_{ik}!$ であり、また解体経路のエントロピーの最大値は $\ln N_p!$ である。

与えられる。

逆に全ての接続方法が同じで一方に外れる場合、部品間に拘束がなく、解体経路が 1 の場合は、これらの解体エントロピーは 0 となる。

提案したディスアセンブリパラメータの意味を明らかにするために、市場で入手可能なパソコンを I~VI の 6 種を用意し、問題を簡略化するため、機械的な接続（ねじ、スナップフィット、コネクタ）のみの解体実験を行った。従来の評価指標である解体時間などのパラメータと解体エネルギー、解体エントロピーの定量的評価パラメータの比較を Fig.1~Fig.3 に示す。詳細は論文にゆずるが、実解体時間はねじの解体エネルギーと、解体時間差はスナップフィットの解体エネルギーと、解体エントロピーは部品点数と明瞭な相関関係があることが明らかとなった。

Fig.1 Comparison of disassembly time of the PC's.

Fig.2 Comparison of disassembly energies for snap-fit and for screw.

Fig. 3 Comparison of disassembly entropies for interconnection and for disassembly path.

5. 接合と可逆的インターコネクション

分解・解体というと前述の例のように、ねじやスナップフィットなどの機械的締結を前提とする場合が多い。しかし、多くの機器では、接続の機能を実現するために、接着やはんだ付けなどの直接接合が多用されている。特に、エレクトロニクス機器においては、LSIの電極－基板間の接続やパッケージリードと基板間の接続、部品と

基板の接続、さらには基板相互の接続など、接続は階層構造を取り、しかも電氣的接続と機械的締結の両者を満足させるため、拡散接合やはんだ付けなどの冶金的な接合手法が多く使われている。

パーソナルな情報通信機器などエレクトロニクスの最先端ではこれらの接続部は微細になり、また高密度になり、従来の接合手法ですら対応しにくい状況になってきている。まして環境を配慮した分離・分解が可能な接続は課題としても認識されていない。ただし、はんだは鉛を含有していることから、その基板の処理におけるはんだの除去は大きな課題となっており、鉛フリーのはんだの開発も急ピッチで進められている。また、製造工程において不良部品を交換するリワークは、製造コスト低減の課題であり、その意味では接続部の分離は現実の課題となっている。

問題は、接合手法に対してこのような分離手法が従来体系的に研究されてこなかった点にある。すなわち、いまだに技術的に解決されていない大きな課題、科学的にも探求されていない課題は、「異種の物質を自由に接合し、これを必要に応じて自由に分離する技術」である。環境調和型のモノづくりのイノベーションを目指す技術として、これを「可逆的インターコネクション」と称している。Fig. 4に可逆的インターコネクションの概念を

Fig. 4 Concept of the reversible interconnection.

模式的に示す。

これまでの接続技術では主に接合することのみに重点が置かれてきた。拡散接合・ロウ付け、マイクロソルダリングなどいずれの手法も、加熱加圧することによって接合界面に拡散・反応を生じさせ、接合するという原理に基づいている。したがって、これを分離することは難しく、分離しようとする実質、接合部を再溶融するか、破壊するしか手はなく、ミクロに見れば決して可逆的に分離できる技術ではなかった。

常温接合では接合面をイオン衝撃等により活性化して、その表面の活性を結合に利用する。その結果、接合は常温で、しかも一瞬に、また無加圧で可能となる。本来金属は活性な物質であり、これが安定に存在するのは表面に酸化物などの吸着層が存在しているからである。これを強制的に取り除けば、活性な表面が現れ、他の物質とそのまま安定な結合を作る。そもそも従来の加熱による接手法も、とどのつまりは、この表面層の除去を化学的な反応によって行っていると言い換えることもできる。常温接合では、この表面層の除去をイオンないしは中性原子ビームの照射によって実現する。この手法の実現により、異なる熱膨張係数の材料からなる部品間でも深刻な内部歪の残留なしにアセンブリが可能となる。

いったんこのような形で理想的な界面が形成されれば、今度はこの界面で理想的に分離する可能性も生まれる。分離には、1)水素ラジカルやハイドロキシル基などによる界面結合の分離、2)水素吸蔵金属の微粉化による母材からの剝離、3)界面反応による反応層の形成、熱ひずみの発生、4)単分子有機接着膜の形成、などの手法を提案している⁵⁾。

可逆的インターコネクションとは大げさな言い回しで

あるが、その実は、従来の接続の基礎研究が接合にのみ目を奪われていることへの反省と、分離という現象を原子レベルで積極的にコントロールすることでこれを新たな界面のプロセッシングにすべきであるというメッセージであり、また、実装の世界では、リペア/リワークとして既に大きな技術的課題となっている問題そのものであることはいうまでもない。

なお、本稿は文献6)を加筆修正したものであることを付記する。

文 献

- 1) 深野 彰:「写ルンです」のリユース・リサイクルシステム、第1回エレクトロニクスにおける環境技術シンポジウム論文集、(1996) 157.
- 2) 弘重雄三、大橋敏二郎:分解性評価法、同上、(1996) 129.
- 3) 藤本 淳:エレクトロニクス製品におけるエコロジーの視点、応用物理、64、7 (1996) 686.
- 4) T. Suga, K. Saneshige, J. Fujimoto: Quantitative Disassembly Evaluation, Proc. Int. Symp. on Electronics and the Environment (1996) 19~24.
- 5) 京極好孝、楊柳、細田直江、須賀唯知:「界面制御による可逆的インターコネクション、日本溶接学会第2回シンポジウム」、エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術 Mate'96、(1996) 233~236.
- 6) 須賀唯知:易解体性と可逆的インターコネクション、日刊工業新聞 (1996年7月24日付)

〔執筆者紹介〕

須賀唯知 (すが ただとも) 当協会会員、理事
1975年、東京大学・工学部精密機械工学科卒業。1979年、マックスプランク金属研究所研究員。1992年、東京大学教授。現在、同先端科学技術研究センター・微小製造科学分野担当。理博 (PhD)、回路実装学会、日本金属学会、応用物理学会、他会員。