研 究 論 文

環境適合型製品設計への第3モジュール性測度の導入

鹿 野 昌 徳,*1 大 好 直,*2 高 橋 護*2

Introduction of the Third Modularity Measure to Environmental Conscious Products Design

Masanori KANO†, Tadashi OHYOSHI†† and Mamoru TAKAHASHI††

New introduction of the third modularity measure to the environmental conscious product design system collaborating with the conventional first-and second-modularity measure, enables the system to be reflected from the disassembly time of the products. The disassembly operation will be commonly carried out by hand with rotation of used appliances in disassembly process, and the loss time by the rotation makes the process efficiency worse. Then the introduction of the third modularity measure will be very important to evaluate the design in circulatory society promoting reuse of parts and recycle of materials by the way of disassembling.

For the illustration of the efficiency of the third modularity measure, the demonstrative experimental results of the disassembly time have been shown by making use of the trial on wooden boxes assembled by screws.

Key Words : Mechanical Design, Modular Structure, Modularity Measure, Reuse, Reduce, Disassembly

1. 緒 言

20世紀における工業製品の研究開発は，性能向上や採算性等に視点をおいて進められ，製品使用後の処理は無駄なコストとしか見なされなかった。そのため廃棄物処理場の問題などが顕在化し，技術者は資源の循環を適切にコントロールし，生活レベルを低下させること無く，より良い技術的方策を見出す努力をしなければならなくなった。製品を分解する目的は，消耗部品の交換や製品の長寿命化を図るためのメンテナンス，部品のリユース，リサイクルを行うための素材の分別など多様である。また製品の部品間の結合には，ネジ締結，半田付け，溶接，接着，スナップフィットなど様々であり，それぞれの分解工程も異なってくる。そのうちネジ締結は，締結費用も安くメンテナンスも容易であるため，機械や装置等に幅広く利用されており，ネジ締結による組み立て・分解についての研究が報告されている[(1)]。

本研究では，分解のために必要となる製品全体の回転の頻度に着目し，ネジで締結された単純な構造体を製品モデルとして，その内部に取り付けられた摘出部品を取り外すまでの分解時間を実測し，その結果から，製品の分解・解体のしやすさを考える。そこで定量的・相対的に評価することを可能にする「モジュール性測度」[(2)(3)(4)]に，製品の分解時間に影響する製品の回転頻度の条件を考慮した第3モジュール性測度の導入を試み，その効果を検証する。

2. モジュール性測度

循環型社会で推奨される製品設計は，本来の機能を損なうことなく，製品の生涯において環境に負担をかけずに資源循環させることである。これらの要求を満足させるための一つの方策として，製品のモジュール化が挙げられる。モジュールとは幾つかの部品要素のまとまりであり，ある役割を持たせるように設計した単位である。一般に工業製品はそれぞれの機能を持った数千・数万からなる複雑な部品の組み合わせとなるが，その場合はモジュールの中にモジュールを考える階層構造を導入することによって対応できる。例えば車のような多くの部品から構成される複雑な製品であっても，エンジンを一つのモジュールと見なすことにより，そのモジュールを単位として一括操作できることから非常に合理的になるので，役割に応じてどのような処理操作が必要となっているかを明らかにすることがモジュール設計の鍵となる。省エネルギーの視点からは，製作工程の種類，材料の種類，分解・解体・分別の方法，使用後の処理の方法など，各フェーズにおける操作数が少ないほど，モジュール構造とする長所が得られる。例えば機能上多くの部品からなる製品であっても，モジュールを構成する部品の素材が同一であれば，使用後の処理操作を等しく出来る場合があり，モジュールの内部まで分解・解体する必要が無くなる。このように属性が共通な部品をまとめてモジュール化できれば，使用部品の減少と同じ効果を得ることが出来る。そこで属性という概念を取り入れ整理して検討する。まず，モジュールの生成と構成法を説明し，構成法の良否を定量的に評価する方法を次に示す。

2. 1 第1モジュール性測度

製品を構成する部品（要素）の集合 $\{x_1, x_2 x \cdots x_m\}$ を s で表現する。そして，属性 k という観点から要素 x_i と要素 x_j が同一

平成15年8月25日受付；平成15年11月14日受理

＊秋田大学大学院鉱山学研究科
〒010-0085 秋田市手形学園町1－1
＊＊秋田大学工学資源学部 機械工学科
〒010-0085 秋田市手形学園町1－1
† Graduate School of Mining and Engineering, Akita University 1-1 Tegata-Gakuen-cho Akita-shi Akita, 010-8502
†† Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering and Resource Science 1-1 Tegata-Gakuen-cho Akita-shi Akita, 010-8502

視できれば $(x_i \sim x_j)_k$ と表現し，同値であると呼ぶ。さらに属性 k という観点から同値である要素の集合は s の部分集合 $V_k(x)$ を形成する。

例えば属性として材料（material）を選択すると，要素の同値関係 $(x_i \sim x_j)_{mat}$，その同値要素からなる集合は $V_{mat}(x)$ と表現する。この他に使用後の処理の観点，保守管理性の観点，価格価値の観点などから，いろいろな同値関係を定義することが出来る。実際には主要な幾つかの観点において，同値性を同時に満たすような要素の集合を抽出し，モジュールを構成する候補とする。一般には次のように $V_k(x)$ の積集合で考える。

$$V_i(x) \cap V_j(x) \cap V_k(x) \cap \cdots \tag{1}$$

説明のために一つの観点 k から製品構造を分割し，モジュール形成の可能性を探ってみる。1980年代頃より組織的解析法として知られているデザイン・ストラクチャ・マトリックス（DSM）法[5][6]を利用すると図1のようになる。欄外のアルファベットは部品名を表し，行も列も同一の正方行列である。各元の数値はその行の部品と列の部品の一致する程度や結合状態を示すことができる。製品の構成に従ってモジュールとして一つになりうる部品を行と列を入れ替えることにより，対角上に幾つかのブロックマトリックスになる。このブロックを構成する部品群（以下クラスターと記す）は一つのモジュールを構成する候補となる。このような操作を幾つかの観点からDSMで検討し，各クラスター間に共通して属する部品群（積集合）が多ければ多いほど，その製品はモジュール性が高いことになる。一般には共通部品は限定されるため少ない部品によるモジュール構造となるが，設計変更などにより部品属性をそろえてモジュール性を改善する検討の機会が得られる。各部品はそれぞれに役割が与えられているので，それを果たすため機能上から配置関係を考慮しなければならない。従って，同一属性を有する部品群をそのままモジュールとすることは出来ない。その場合はクラスターをそれぞれの機能に支障ないところまで分割し，新たにクラスターを再構成する必要がある。この再構成部品群を改めて $V_k(x)$ と表現する。このような準備をしてから，クラスター間属性適合率 m_p を次式で定義する。ただし記号｜　｜は集合に属する部品数であり，m_p の下付け添え字 p は，解析対象のクラスター番号を表す。

$$m_p = \frac{|V_i(x) \cap V_j(x)|}{|V_i(x) \cup V_j(x)|} \tag{2}$$

上式は同値関係演算子 $(\cdot \sim \cdot)_i$ と $(\cdot \sim \cdot)_j$ に対して得られるクラスターを基に与えられ，共に満足する部品の割合が多くなれば1に近づく。$V_k(x)$ の組み合わせによって様々な m_p 値が得られるので，製品の主要な属性適合率の総和をもって設計特性を評価することが出来る。そこで，次式で与えられる第1モジュール性測度を導入する。

$$M_1 = \frac{\sum_p w_p m_p}{\text{モジュール数}} \tag{3}$$

$$\sum_p w_p = 1 \tag{4}$$

ここで w_p は属性の価値判断によって重みをつけるパラメータである。使い方によっては，例えば部品の大きさや価格などのほか，毒性など環境へのインパクトがある場合の軽重を，このパラメータを介して配慮することが出来る。具体的には，製品ごとに固有なパラメータとなるはずであり，生産現場でのデータや，使用者からのフィードバック情報により，重み w_p を経験的に判断して付与する道を探ることになる。

2. 2　第2モジュール性測度

次に評価法の一貫性を図るため，部品の配置の観点からも第2モジュール性測度を導入して評価する必要がある。すなわち，製品を構成する部品はその機能を果たすため適切に配置する必要があり，そのような要請下では，同一クラスターに属する部品であっても，それを分割してモジュールを再構成しなければならない。そこでモジュール数が増える得失も評価しなければならない。これは分割しないですむモジュール内結合の割合によって考える。結合にはいろいろなレベルのものが考えられるので点数でランク付けを行い，例えば分離の対象とする必要が無ければ，後処理のために分解・解体・分離するための負担が軽減される割合を評価することが出来る。これは環境適合型製品の設計を行う上で非常に重要である。そこで，次のように第2モジュール性測度を導入する。

$$M_2 = \frac{\sum_i (J_i)^*}{\sum_i (J_i)^t} \tag{5}$$

$$J_i = D_i \times N_i \tag{6}$$

ここに，J_i：結合指数，D_i：分解指数，N_i：結合個所数，上付＊：モジュール内の量，上付 t：製品内全ての量を示す。また分解指数とは部品間の結合状態の難易度を数値化して表現したものであり，例えば溶接の時15，ボルトナット締めの時2，スナップフィットの時1，結合していない時0などのようにランク付けすることができる。

特別な場合として M_2 の最大値が1となり，この時DSM上では全ての結合を示す要素が一つの対角ブロック内に含まれ，製品は単一モジュールそのものとなり，使用後に分解・解体の必要は無くなる。現実的には単一モジュールの製品にはならないので，$0 < M_2 < 1$ の値である。

最後に，製品レベルの評価を行うために，二つのモジュール性測度から評価を行うとすると次のようになる。

$$M = \alpha M_1 + (1-\alpha) M_2 \tag{7}$$

ここで α は，二つの測度の軽重をつけて評価するためのパラ

	A	B	C	D	E	F
A		1	3	4	4	…
B	1		3	4	4	…
C	3	3		1	4	…
D	4	4	1		4	…
E	4	4	4	4		…
F	…	…	…	…	…	

Figure 1　Design structure matrix representation of property coincidence among the components

メータである。

3. 実　験

3. 1　模擬試験体

基礎となる知見を見出すための実験となるように，図2のような外箱と内箱からなる簡単な構造を採用し，それぞれの部品の寸法を表1に示す。内箱内に交換やリサイクルとなる部品を模擬した取り出し部品Dを接続する（以下対象部品と記す）。内箱は外箱の内壁A，B，Cのいずれに結合されていてもよしとする。この試験体の材料として，加工しやすい木材を使用し，木材の締結方法はさら木ネジ（3.1×25）を用いた。外箱と内箱を以下のような結合の仕方や分解手順を六通りに変化させて実験を行う。

- Case 1（図3）：ネジ締結試験体の基本構造となる。まず外箱の上蓋を取り外すために，①のネジ8本を除去する。上蓋を取り出すと対象部品が見えるので，対象部品を結合している②のネジ2本を除去し，対象部品を取り出す。
- Case 2（図4）：Case 1を裏面から分解する工程である。まず試験体を裏返し，外箱の底蓋の①のネジ8本を除去する。次に，対象部品を取り出すために，再び裏返して②のネジ2本を除去し，対象部品を取り出す。
- Case 3（図5）：Case 1の内箱に上蓋を取り付けた例である。外箱の上蓋を取り外すために，①のネジ8本を除去する。次に内箱の上蓋を取り外すために，②のネジ2本除去する。そして最後に対象部品を取り出す（③のネジ2本除去）。

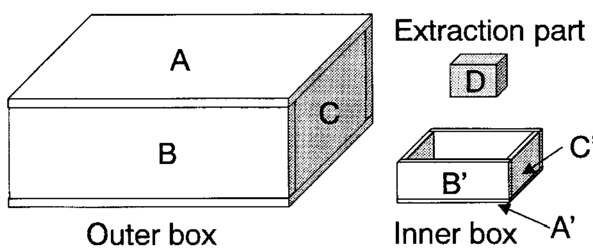

Figure 2　Configuration of test object

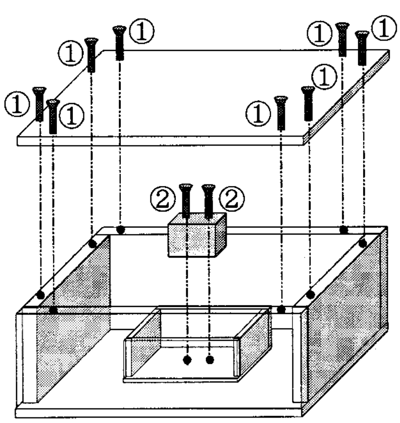

Figure 3　Exploded view of case 1

Table 1　The test object of parts size（mm）

	Length	Height	Width
A	220	180	14
B	220	70	10
C	160	70	10
A'	100	58	9
B'	100	45	9
C'	40	45	9
D	40	18	18

- Case 4（図6）：Case 1の内箱を裏返して，外箱に接続されており（Case 3の内箱の底蓋が無い場合），対象部品は外箱の底蓋に結合されている状態である。まず，外箱の①のネジ8本を除去し上蓋をはずす。次に内箱の上蓋を取り外すために，②のネジ2本除去する。最後に③のネジ2本除去し対象部品を取り外す。
- Case 5（図7）：Case 1の内箱を外箱の側面（図2のB面）に接続した例である。内箱を取り出すために，外箱の上蓋の①のネジ2本，底蓋の②のネジ2本を除去する。次に外箱の側面の③のネジ2本を除去し，取り外す。内箱と側面を分け

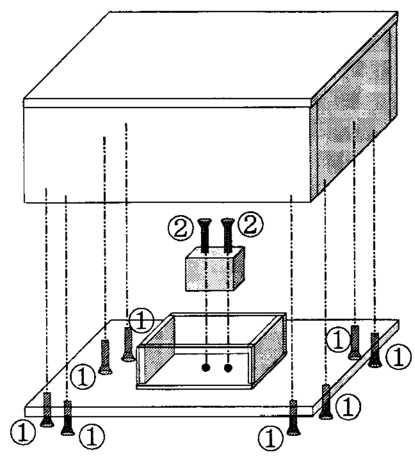

Figure 4　Exploded view of case 2

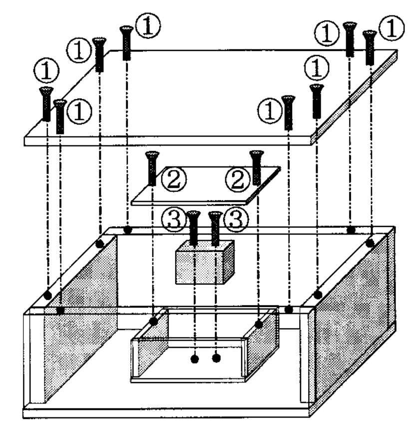

Figure 5　Exploded view of case 3

るために④のネジ4本を除去する。最後に⑤のネジ2本除去し対象部品を取り外す。

・Case 6（図8）：Case 5とは違う側面（図2のC面）に内箱を接続させた例。分解手順はまず，外箱の側面を取り外すために，外箱の上蓋の①のネジ2本，底蓋の②のネジ2本，さらに側面（手前）の③のネジと側面（奥）の④のネジそれぞれ1本を除去する。次に外箱の側面と内箱を分けるために，⑤ネジ4本を取る。最後に対象部品を取り出すために，⑥のネジ2本を除去する。

3. 2　分解実験

分解実験は，高さ75センチの作業台に試験体，電動ドライバー，ネジを入れる箱を置いておく。電動ドライバーを手に取り，ネジを1個除去するごとに箱に移し，内箱内に接続された対象部品を取り出し，電動ドライバーを置くまでの時間を測定する。実験で使用した電動ドライバーは，質量900g，最大トルク3.0 Nm，回転数540rpmの一般的な電動ドライバーを使用した。解体・分離する順序を定めて行い，この作業を研究室の健康な男女四名で椅子に座り1人4回ずつ行った。また，作業は行うほどに習熟効果が発生し，解体時間は短縮するので実際に測定を行う前に，多数のネジの除去作業を行うことで，作業の習熟度による作業時間の変化をなくすように努めた。

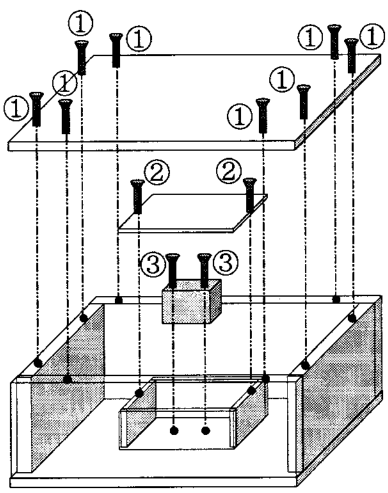

Figure 6　Exploded view of case 4

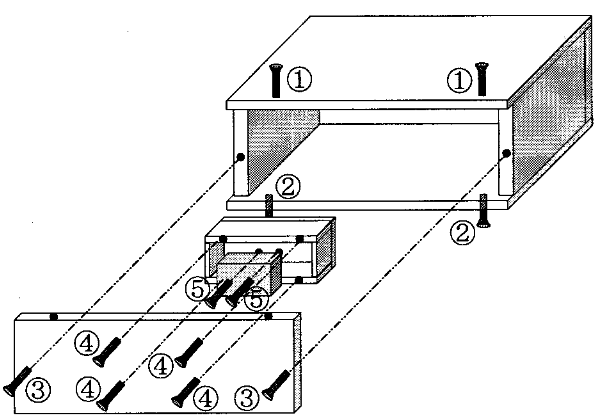

Figure 7　Exploded view of case 5

Table 2　Material of parts and post life intent of case 1

Component	Material	Post life intent
a	Steel	Recycle
b	Steel	Recycle
c	Steel	Recycle
d	Steel	Recycle
e	Steel	Recycle
f	Steel	Recycle
g	Steel	Recycle
h	Steel	Recycle
i	Steel	Recycle
j	Steel	Recycle
k	Steel	Recycle
l	Rubber	Recycle

Case 1からCase 6までの分解時間を測定し，ネジの結合解除にかかる時間の分布を元に回帰直線を引き，仮にその傾きを「ネジ1個を除去するのにかかる時間」とした。

3. 3　モジュール性測度の算出例

例として，Case 1のモジュール性測度を算出する。Case 1の試験体は図9のように分解することができ，12個の部品から構成されている。材料属性として，摘出部品1をゴムとし，それ以外の部品は鉄とし，後処理属性は全てリサイクルされるものとした（表2）。試験体の材料は，木材で構成されているが，実際に使用される製品を想定して，材料属性をゴムと鉄とした。第1モジュール性測度を求めるために，まずクラスター間属性適合率を算出する。材料属性，後処理属性の二つの属性から，以下の二つの部分集合ができる。

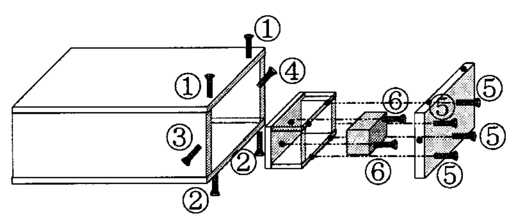

Figure 8　Exploded view of case 6

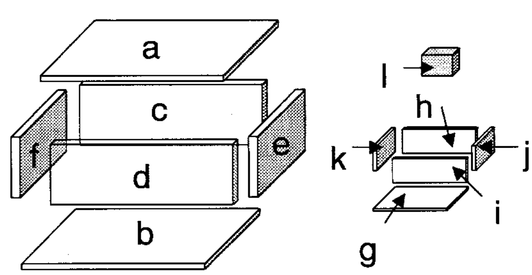

Figure 9　Exploded view of case 1

$V_{Steel} = \{a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k\}$
$V_{Rubber} = \{l\}$
$V_{Recycle} = \{a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k,l\}$

次に，それぞれの部分集合の積集合を取ると，二つのクラスターができる。

$V_{Steel} \cap V_{Recycle} = \{a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k\}$
$V_{Rubber} \cap V_{Recycle} = \{l\}$

よって，11/12と1/12の二つのクラスター間属性適合率が算出される。Case 1は図３のように分解することができるので，モジュール数は３となる。式（3）より第１モジュール性測度を算出すると，以下のようになる。

$$M_1 = \frac{1}{3}\left(\frac{11}{12} + \frac{1}{12}\right) = 0.333$$

ここでは便宜上，重みは考えず均等とした。

次に部品要素間の結合が同一モジュール内にある割合を示す第２モジュール性測度 M_2 を調べる。図10のようにDSMで表現すれば，太い実線の四角がモジュールを構成する部品関係，黒塗りの部分が結合している部品を示している。記入した数値は対応する部品間の結合指数で，ここではネジの分解指数を１とした。例えば，部品aと部品cはネジ２本で結合されているので，1×2＝2とした。これにより，式（5）を用いて第２モジュール性測度を求めると以下のようになる。

$$M_2 = \frac{20}{30} = 0.667$$

最後に，製品レベルのモジュール性測度は，αを0.5として（M_1とM_2の平均値）評価すれば，次のようになる。

$$M = \frac{1}{2}(0.333 + 0.667) = 0.500$$

3. 4 実験結果

表３はそれぞれのCaseの部品数，対象部品を取り出すまでのネジの除去数，モジュール数，モジュール性測度を示す。ここで便宜上全てのCaseにおいて，ネジの分解指数は１とし，材料属性は取り外す対象部品をゴム，それ以外の部品は鉄とした。また，後処理属性は全てリサイクルされるとして，モジュール性測度を算出した。図11から図16にそれぞれのCaseの四人の作業者の平均した回帰直線を表しており，グラフ内の数式は近似曲線の数式である。それぞれのネジに電動ドライバーをかけた時点，最後のネジを箱に移して電動ドライバーを置いた時点での時間をプロットしてある。

	a	l	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
a		0	0	2	2	2	2	0	0	0	0	0
l	0		0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
b	0	0		2	2	2	2	2	0	0	0	0
c	2	0	2			1	1	0	0	0	0	0
d	2	0	2			1	1	0	0	0	0	0
e	2	0	2	1	1		0	0		0	0	0
f	2	0	2	1	1	0		0	0	0	0	0
g	0	2	2	0	0	0	0		0	0	1	1
h	0	0	0	0	0	0	0	0		0	1	1
i	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	1
j	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1		0
k	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	

Figure 10 Design structure matrix of case 1

Table 3 Disassembly date of each case

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
The number of parts	12	12	13	12	12	12
The number of removed screws	10	10	12	12	12	12
The number of module	3	3	4	4	4	4
The slope of a line	2.983	4.031	3.35	3.353	4.549	4.821
The modularity measure	0.5	0.5	0.438	0.425	0.438	0.438

Case 1とCase 2の分解時間を比較すると，どちらも同じ構造であり，モジュール数，モジュール性測度，ネジの除去数も同じである。ネジ一個除去するのにかかる時間（回帰直線の傾き）をみると，Case 1では約３秒であるのに対し，Case 2では約４秒である。対象部品を取り出すまでの時間は，Case 1では約34秒，Case 2では約45秒となる。このように同じ構造であるのにかかわらず分解時間に差が生じてくるのは，Case 1

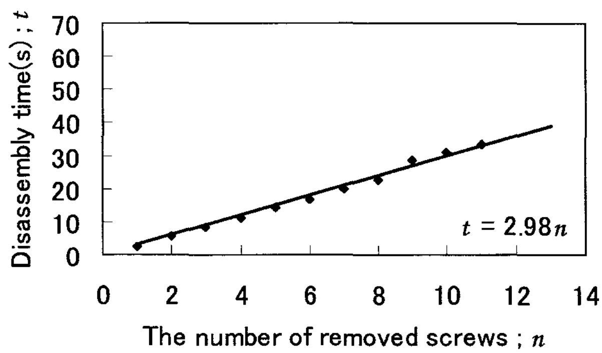

Figure 11 Disassembly time of case 1

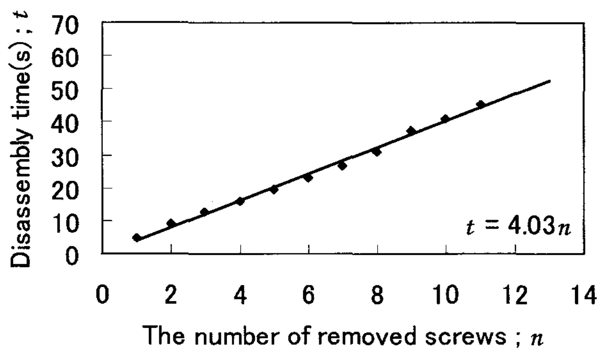

Figure 12 Disassembly time of case 2

では一方向のみの分解であるが，Case 2では最初に裏返してから分解し，さらに裏返して対象部品を取り出さないといけないためである。

Case 3とCase 4を比較する。モジュール性測度はそれぞれ $M=0.438$，$M=0.425$である。この二つのCaseの違いは，内箱の底蓋の有無である。この内箱の底蓋の有無でM値は変化する。しかし分解の工程は同じで，ネジの除去数も同じである。よって，分解時間にはほとんど差が生じていないことが分かる。

Case 5とCase 6を比較する。モジュール性測度，部品数，モジュール数，解体するためのネジの除去数はいずれも同じである。しかし分解時間を比較すると差が生じている。これもCase 1とCase 2を比較したときと同様に対象部品を取り出す際に，試験体を回転した回数によるものと思われる。Case 5では①のネジを除去し，裏返して②のネジを除去する。さらに側面の③のネジと④のネジを除去するため試験体を回転させる。Case 6は①のネジを除去した後，裏返して②のネジを除去し、さらに回転させて③のネジ，また回転させて④のネジを除去する。最後に側面の⑤のネジを除去するために回転させて対象部品を取り出す。このようにCase 5では，対象部品を取り出すために試験体の回転動作が2回必要であるのに対し，Case 6では4回の回転動作で対象部品を取り出す。このことにより分解時間に差が生じてきている。

これらの結果から，ネジを除去するときの方向，つまり対象部品を取り外すときに，試験体の回転動作の回数により分解時間に大きく影響していることが分かる。

4.　第3モジュール性測度の導入

Case 1からCase 6までのそれぞれの分解時間とモジュール性測度の関係を比較すると，モジュール性測度の値が高いほど，ネジ1個除去する時間つまり分解時間が早いということに

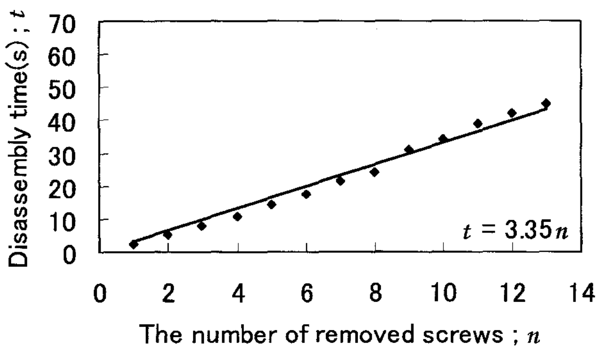

Figure 13　Disassembly time of case 3

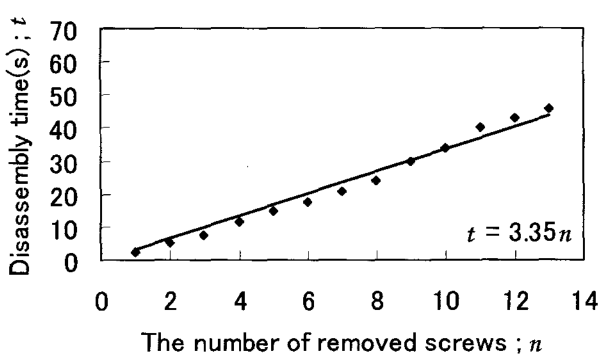

Figure 14　Disassembly time of case 4

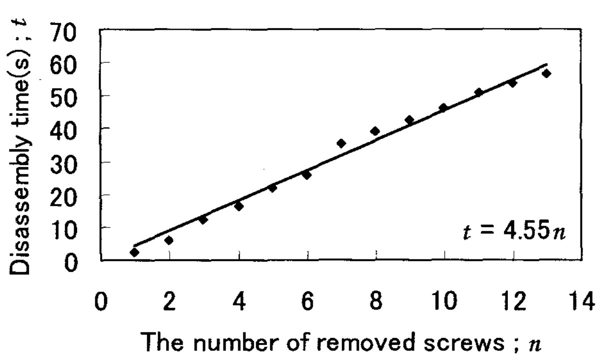

Figure 15　Disassembly time of case 5

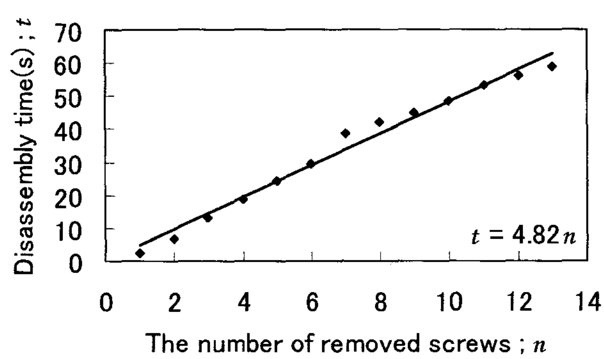

Figure 16　Disassembly time of case 6

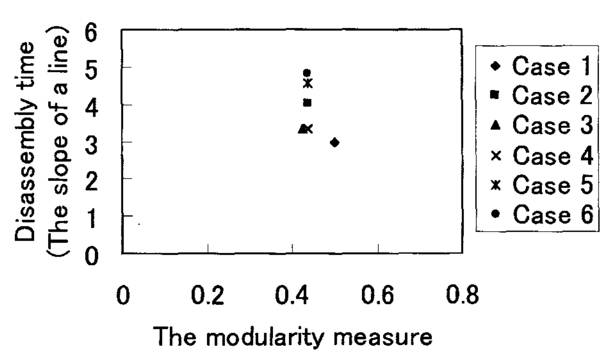

Figure 17　The modularity measure and disassembly time
(Before introduction of the third modularity measure)

は必ずしもなっていないこと分かる（図17）。これは今まで考えてきた「モジュール性測度」の理論は，部品要素の属性選択や配置選択による得失の反映できる評価法であり，製品を分解するときの分解時間を考慮していない。ここで「分解・解体しやすければ，分解時間が早い」という仮定する。実験結果より，試験体の回転動作の回数を考慮した第3モジュール性測度の導入を試み，以下のように定義する。

$$M_3 = 1 - \frac{\text{回転動作の回数}}{\text{ネジ除去数}} \tag{8}$$

また，第3モジュール性測度を導入することにより，式（7）の製品レベルのモジュール性測度を以下のように再定義する。

$$M = \alpha M_1 + \beta M_2 + \gamma M_3 \tag{9}$$

ここでα，β，γは三つの測度の軽重をつけて評価するためのパラメータで生産現場の経験値として定められるものであり，その総和は1とする。

式（3）（5）（8）（9）を用いて，それぞれのCaseのモジュール性測度を算出すると以下のようになる。ここで便宜上，α，β，γは1/3とする。

Case 1：$M = 0.667$
Case 2：$M = 0.6$
Case 3：$M = 0.625$
Case 4：$M = 0.617$
Case 5：$M = 0.569$
Case 6：$M = 0.514$

それぞれのCaseのモジュール性測度の値と分解時間を比較すると，モジュール性測度の値が高いほど，分解時間が早くなることが分かる（図18）。この結果より，分解するときの製品の回転動作数を考慮した第3モジュール性測度を導入することにより，分解時間とモジュール性測度の関係を明らかにすることが出来た。従来のM_1とM_2のみによる評価では分解時の作業条件が考慮されていなかったが，より現場向きの値評価法に改善された。

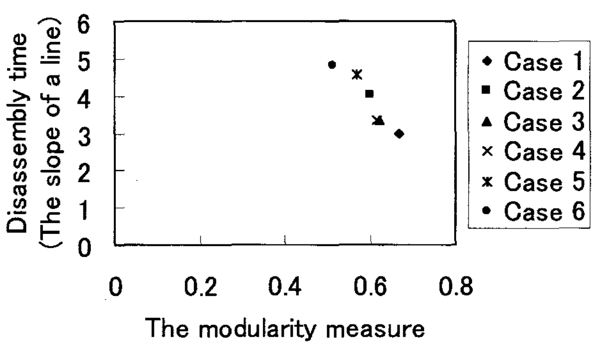

Figure 18　The modularity measure and disassembly time (After introduction of the third modularity measure)

5. 結　言

模擬試験体を用いて，試験体内に接続されている交換やリサイクルの対象となる部品を想定した摘出部品を取り出す分解実験を行い，分解時間を測定した。その結果，分解時間に影響する因子として，ネジを除去するときの回転動作が大きく影響しており，製品を回転させる回数が多いほど分解時間は遅くなる。また，製品を分解する際の回転動作の回数をモジュール性測度に導入することにより，分解時間を考慮したモジュール性測度へ発展することができ，分解時間が早ければモジュール性測度の値が高くなることを示した。

本実験では単純な構造の試験体を用いて分解実験を行い，回転動作を考慮した第3モジュール性測度を導入したが，実際の製品は数千・数万からなる部品で構成されており，分解時間を遅らせる要因として，ネジの種類や長さ，作業姿勢，工具の種類などが考えられる。今後は実際の製品を分解することにより，それらの様々な要因を第3モジュール性測度に導入し，分解条件を総合した測度へ開発・発展させていくことが必要であると思われる。

参考文献

1) 近藤康雄，内藤雅文ら，ネジ締結体の組立・分解性に関する研究，日本機械学会第9回環境工学総合シンポジウム'99講演論文集，(1999)，151-154
2) 鹿野昌徳，大好直，環境調和型製品設計のためのモジュール性測度のついて，日本素材物性学会第11回年次会講演要旨集，(2001)，58-61
3) 大好直，モジュール性評価方法，モジュール性評価プログラム，特開 2002-222220，(2002)
4) 鹿野昌徳，大好直，環境適合型製品設計のためのモジュール性測度，日本機械学会論文集（C編），(2003)，69-685，2476－2481
5) 例えば Eppinger, S.らのグループによる，http://wweb.mit.edu/dsm/
6) Newcomb, P.J., ほか2名, Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle, *Trans. ASME. J. Mech. Design*, (1998), 120-3, 483-490