ライフサイクル・シナリオと幾何情報に基づいた
モジュール化設計手法の提案*井上 洋一朗^{*1}, 外 池 恵 大^{*1}
福 重 真 一^{*2}, 梅 田 靖^{*2}Proposal of a Modular Design Method Based on
Life Cycle Scenario and Geometric InformationYoichiro INOUE^{*3}, Keita TONOIKE,
Shinichi FUKUSHIGE and Yasushi UMEDA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Osaka University,
2-1 Yamada-oka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

In order to minimize environmental loads and costs during a whole life cycle of a product, adequate life cycle design as well as product design is indispensable. In life cycle design, the anticipated life cycle of a product can be clarified by describing a life cycle scenario. Modular design is an important elemental technique to link life cycle design to appropriate product architecture, and improves, e. g., maintainability, upgradability, reusability, and recyclability by unifying components applicable to the same life cycle scenario. This paper proposes a modular design method based on various attributes related to a product life cycle scenario; e. g., while the modular structure for recycling is based on material kinds, the structure for reuse is based on lifetime of components. Furthermore, we define an evaluation index for evaluating derived modular structure from the viewpoint of resource efficiency. This paper also illustrates the prototype system that implements the proposed method and a case study of an ink-jet printer.

Key Words: Modular Design, Modeling, Design Engineering, Lifecycle Design, Lifecycle Scenario, Evaluation

1. は じ め に

地球環境問題解決のためには現在の大量生産・大量廃棄システムから脱却し、安定した循環型生産システムを構築する必要がある。そのためには製品の一生を設計するライフサイクル設計が重要である。

製品ライフサイクル設計においては、製品の適切なライフサイクル・シナリオを設定した上で、そのライフサイクル・シナリオの実現に適した製品構造を設計することが求められる⁽¹⁾。これまでモジュール化設計手法は生産性や組立性の向上を目的として様々な研究がなされてきたが⁽²⁾⁽³⁾、製品ライフサイクル設計においても、種々のライフサイクル・シナリオを製品構造に反映させ、アップグレード性、リユース性、リサイクル性など種々のライフサイクル・オプションへの適性を向上させる要素設計技術である。例えば、リサイクル性を向上させるシナリオに対しては、各部品の素材種に着目し、同一または混合してリサイクル可能な素材種ごとにモジュール化を行うことが考えられる。

また、部品の信頼性や寿命といった視点に基づいてモジュール化することで、メンテナンスやアップグレードの容易化や、それに伴う製品の長寿命化を実現することができる。

本研究では、設計者によって記述されたライフサイクル・シナリオに基づき、製品ライフサイクル全体にわたる様々な要求を満足させ、かつ幾何的にも整合性のあるモジュール構造を導く手法を提案する。さらに、導出されたモジュール構造を、製品ライフサイクル全体における資源の利用効率の観点から評価するための指標を導入し、ライフサイクル・シナリオに基づいたモジュール化の効果を明らかにする。

2. 先 行 研 究

機械設計におけるモジュール化については、古くから生産性や組立性の向上を目的とした様々な研究がなされてきた。例えば Kusiak らはコストとパフォーマンスの最適化を目指し、要素間の関連が強く、適合性の良いモジュール構造の導出手法を提案しており⁽²⁾、Gu らは部品間の機能的な相互関係の強弱を点数化し、モジュール間のインターフェイスの点数を最小にするモジュール構造を導く手法を提案している⁽³⁾。また、少ない部品数で多機能を実現することを目的として、

* 原稿受付 2009年1月15日。

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)。^{*2} 正員, 大阪大学大学院工学研究科。

E-mail: inoue@lce.mech.eng.osaka-u.ac.jp

製品系列におけるモジュールの共通化手法も多く研究されている。例えば、Salhie^らは構成部品の機能に注目し、製品系列における総部品数を最小化する手法を提案し⁽⁴⁾、Fujita はモジュール化により製品系列全体のコストを最小化する方法を提案している⁽⁵⁾。

また、近年はライフサイクル設計の観点からモジュール化を行う手法がいくつか提案されている。例えば、Seliger^らはリユース性やメンテナンス性、サプライチェーンなどを考慮したモジュール化設計手法を提案し⁽⁶⁾、Koga^らはプラットフォームモジュールや共用モジュールをベースとした製品ファミリ設計手法を提案している⁽⁷⁾。また、島袋^らは自己組織化マップ(SOM)を用いてライフサイクル・オプションや素材種などにより部品のクラス分けを行い、その後、同一クラス内で接続関係のある部品同士をモジュール化する手法を提案している⁽⁸⁾。

著者^らは更に製品の幾何形状に着目することで、属性値に基づいた部品のクラス分けの後、幾何的な制約の元でクラス内の部品同士をモジュール化する手法を提案したが⁽⁹⁾、部品間の接続関係やクラス分けが制約となり、ライフサイクル・シナリオを直接反映したモジュール構造を導出することができないという問題があった。本報で提案する手法では、空間的に近く、かつ同一のライフサイクル・オプションを適用することのできる部品同士であればモジュール化の候補とすることで、対象とする製品の元々の部品接続関係による制約を受けずに設計者が策定したライフサイクル・シナリオに柔軟に対応しうるモジュール構造を導く。

また、これまでモジュール構造の評価方法として、分解性や組立性を指標としたものがいくつか提案されているが⁽²⁾⁽³⁾、製品ライフサイクル全体における組立・分解性向上の効果は、その製品のライフサイクル・シナリオに大きく依存する。例えば、メンテナンス・シナリオが適用された製品に対しては、メンテナンスの対象となる部品がモジュール化され、これを取り出すための分解性設計がなされているかどうかが重要となる。そこで本研究では、製品ライフサイクル全体におけるモジュール化の効果を、ライフサイクル・シナリオに基づいて評価する。

3. モジュール化設計の方法

3.1 本手法のアプローチ 本報で提案する手法は、モジュール化による製品構造の設計改善を主な目的とする。本手法の入力は対象製品の幾何モデルとし、モデルの各部品に対しては、属性値情報(素材種、物理寿命、価値寿命)が与えられているものとする。

また、モジュール化に先立ち、あらかじめ設計者によって製品のライフサイクル・シナリオが策定され、更に製品モデルの主要な部品に対して、部品ごとのライフサイクル・オプションが与えられているものとする。このライフサイクル・シナリオの策定と主要部品の選択には著者^らが提案するライフサイクル・シナリオ記述支援システム⁽¹⁰⁾を用いることとする。本手法は、この主要部品を各モジュールの核として、同じライフサイクル・オプションが適用可能な属性値を持つ部品同士を同じモジュールとしていき、新しいモジュール構造を導く。このとき、モジュールの構成部品が空間的に互いに密に集まり、幾何的に独立性の高いモジュール構造が構築されるようにする。更に、幾何情報を用いて、モジュール内部にモジュール外の部品が含まれ互いに分離できなくなるなどの実現困難なモジュールの生成を回避する。また、導出されたモジュール構造のライフサイクル全体における環境性を評価するための指標として「資源効率」を定義する。

以下、ライフサイクル・シナリオに基づいたモジュール化の方法および導出したモジュール構造の評価方法について詳細を述べる。

3.2 ライフサイクル・シナリオ 本研究では設計者によってあらかじめ設定された製品のライフサイクル・シナリオをリユース、リサイクル、アップグレード、メンテナンスといったライフサイクル・オプションの組み合わせとして表現し、これらライフサイクル・オプションが設定された部品を「主要部品」と呼ぶ。

モジュール化に際しては、ライフサイクル・オプションごとに考慮すべき部品の属性も異なってくる。例えば、閉ループリサイクルを行うモジュールに対しては、モジュールを構成するすべての部品の素材種と色が主要部品と同一でなければならない。

3.3 モジュール化 モジュール化に際しては著者^らの提案する「モジュール密度」をモジュールを構成する部品間の空間的な近さ、モジュールの幾何的な緻密さを表す指標として用いる⁽⁹⁾。モジュールに含まれる二つの部品同士をこれら部品の3次元凸包によって接続し、この凸包領域の和集合が単連結領域となるように構成したものをモジュールの近似形状としたとき、モジュール密度はこの近似形状の体積に対する部品体積の占める割合として定義される。例えば、図1の左に示すような4つの部品に対しては6つの凸包が生成できるが、これら凸包の組み合わせによって作られた単連結領域によってモジュールの形状が近似的に表されモジュール構造の候補となる。図1の右は、4

Fig.1 Convex hulls and approximate modular structure

つの部品から2つのモジュールを生成する場合の近似モジュール形状の候補を表している。本研究では、モジュールの幾何的独立性や構成部品間の接続性といった観点から、モジュール密度が大きく、構成部品が互いに密に連結されているモジュール構造をこれら候補の中から優先的に選択する。

ただし、モジュール化の制約条件として、モジュールを構成する全ての部品はそのモジュールに含まれる主要部品と同一のライフサイクル・オプションを適用可能な属性値を持つこととする。主要部品に設定されたライフサイクル・オプション毎の満たすべき属性値の条件は表1のようにまとめられる。例えば、リユースモジュールに対しては、全ての構成部品の価値寿命と物理寿命が相対的に長いことが条件となる。この条件により、各モジュールはライフサイクルにおける同じ循環経路をたどることが可能となる。

更に本手法では、幾何情報を用いて「包含関係」の検出を行い、この関係が内部に発生しないことをモジュール構造の制約条件とする。包含関係とは、複数の部品をモジュール化することでモジュール外の部品が内部に拘束され分離不可能になる状態であり、このようなモジュール化は回避すべきである。この制約条件に対しては、各部品に対し1方向以上の分解経路を確保することで包含関係を回避する。例えば図2では部品A, B, Cをモジュール化すると部品Dがどの方向にも取り出すことができず分離不可能となるためこのようなモジュール化は行わない。

以上の制約条件を満たしつつ、かつ各モジュールのモジュール密度の総和が最大となるようにモジュール化が行われる。

3.4 モジュール構造の評価 ライフサイクル・シナリオに基づいてモジュール化を行うことで、ライフサイクルにおける同一の循環経路をたどり得る部品同士がモジュール化され、結果として製品に投入された資源の循環性が高まる。本研究では導出されたモジュール構造の環境性の評価指標としてこの資源の再利

Table 1 LCOP component attribute constraints

LCOP	Attribute constraints for constitutive components
Closed-loop recycling	Same material and color
Cascade recycling	Same material
Thermal recycling	Combustible material
Maintenance	Similar physical lifetime Physical lifetime shorter than value lifetime
Reuse	Longer physical and value lifetimes
Upgrading	Similar value lifetime Value lifetime shorter than physical lifetime

Fig. 2 An example of inclusion relationship

用効率を採用し、環境効率の factor $4^{(11)}$ をベースとした「資源効率」 RE を次のように定義する。

$$RE = \frac{LT}{\sum_i MR_i} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$MR_i = \sum_j^{M^i} w_j R_j^i \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで N は製品を構成するモジュール数であり、 M^i はモジュール i を構成する素材の種類数である。 R_j^i は資源 j の1製品、1製品寿命当たり資源投入量であり、 w_j はその環境負荷係数である。式(2)によって算出される MR_i はモジュール i に投入される資源の環境負荷の総和である。また LT は製品の使用期間であり、これは構成部品の内、最も寿命の短い部品の一一致するものとする。

すなわち、式(1)の分母は製品に投入される資源を起因とする環境負荷の総和であり、分子は投入された資源が製品として利用された時間である。

ここで、比較のために製品の使用後に部品を回収せず全て廃棄するというシナリオを設定し、これを基本シナリオとする。この基本シナリオにおけるモジュール i の環境負荷の総和を $\overline{MR_i}$ とすると、このモジュール i がリユースされた場合の環境負荷 MR_i は以下の式(3)によって計算される。

$$MR_i = (1 - CR_i \cdot UR_i) \overline{MR_i} \dots\dots\dots (3)$$

式(3)の CR_i はモジュール i の回収率を表し、 UR_i はモジュール i のリユース率を表す。すなわち、式(3)はリユースにより再利用された資源量を投入資源量から差し引くことでリユースの効果を資源効率に反映させることを表す。

モジュール i がリサイクルされる場合は式(3)の UR_i をモジュール i のリサイクル率 RR_i に変更し、同様に MR_i を計算する。なお、閉ループリサイクル、カスケード・リサイクル、サーマルリサイクルといったリサイクルの種類による資源効率への効果の違いはリサイクル率 RR_i の違いとして反映される。

またメンテナンス、アップグレードがなされる場合は、モジュールの交換により投入資源量が増加するため、 MR_i は次の式によって計算される。

$$MR_i = (1 + RN_i) \overline{MR_i} \dots\dots\dots (4)$$

メンテナンス、アップグレードモジュールは製品使用期間 LT において RN_i 回交換されるものとする。ただし、メンテナンスやアップグレードシナリオでは、製品の構成部品の中で寿命が相対的に短い部品同士がモジュール化されるため、物理寿命が短いものをメンテナンスモジュール、価値寿命が短いものをアップグレードモジュールとして交換することにより製品全体の寿命が延長される。よって、メンテナンスやアップグレードモジュールに含まれる部品は寿命を LT の計算から除かれる。

以上が各ライフサイクル・オプションに対する RE の計算方法であり、複数のライフサイクル・オプションの組み合わせから成るシナリオに対してはこれらの式を組み合わせる。

4. 例 題

本手法をインクジェットプリンタ(部品数 164)に適用し、提案手法の有効性を検証した。図 3 に示す製品幾何モデルを入力とし、次に示す 3 種類のライフサイクル・シナリオに基づきそれぞれモジュール化を行った。

- I. 基本シナリオ
- II. リサイクルシナリオ
- III. メンテナンス、リユース、リサイクル複合シナリオ

シナリオ I は全部品を廃棄するためモジュール化は行わない。このシナリオの資源効率は 2.34 であった。

図 4(a)にシナリオ II で選択した主要部品、(b)にモジュール化の結果を示す。このシナリオでは筐体や金属板など体積の大きい部品を主要部品として選択

Fig. 3 Inkjet printer model

し、プラスチック部品はサーマルリサイクル、金属部品は閉ループリサイクルを設定した。このシナリオにより、筐体や排紙部、駆動部を中心としたサーマルリサイクルモジュール、本体部を中心とした閉ループリサイクルモジュールが導出された。また、このシナリオの資源効率は 2.501 であった。

図 5(a)にシナリオ III で選択した主要部品、(b)にモジュール化の結果を示す。このシナリオではシナリオ II で選んだりサイクルを行う主要部品に加え、ゴムなどの寿命の短い部品をメンテナンス、寿命が長く再利用可能なモータをリユースのための主要部品として選定した。このシナリオにより筐体を主要部品としたサーマルリサイクルモジュール、駆動部などのメンテナンスモジュール、モータや基盤を中心としたリユースモジュールが導出され、このシナリオの資源効率は 5.027 であった。

5. 考 察

本手法では、部品属性値に基づいて同一のライフサイクル・オプションが適用できる部品同士をモジュール化している。またモジュール化の際、モジュール密度による評価により幾何的にまとまりのある部品同士が優先的に選択されモジュール化されている。その例として、導出されたモジュール、及び、選択されたシナリオを図 6 に示す。図 6(a)のモジュールはライフサイクル・オプションとして閉ループリサイクルが設定されており、素材種が鉄である部品で構成されている。(b)のモジュールはメンテナンスが設定されており、物理寿命が低い部品で構成されている。(c)のモジュールはリユースが設定されており、物理寿命、価値寿命ともに近い部品で構成されている。このように設定したライフサイクル・シナリオに適したモジュール構造を導くことができた。

またモジュール化の際に幾何情報を用いて包含関係を検出しこれを回避している。ここで本手法の有効性を確かめるためにこの包含関係の制約をなくし、モジ

Fig. 4 Main components and derived modular structure in recycling scenario

Fig. 5 Main components and derived modular structure in recycling, reuse and maintenance scenario

Fig. 6 Examples of derived modules

ジュール化を行ったところ図7に示すようなモジュールが導出された。この図に示すモジュールは内部に点線で囲んだモジュール外の部品を含んでいるため、モジュールを分解しなければこれらの部品を分離することが出来ない。このような実現困難なモジュール構造を包含関係の検出により回避できることが確認できた。

さらに本研究で提案した資源効率による評価を各シナリオに対し行った結果、シナリオIの資源効率に対し各シナリオの資源効率はシナリオIIが1.07倍、シナリオIVが2.15倍とともに上昇した。特にシナリオIIに比べシナリオIIIの資源効率が大きく向上した理由として、リサイクルに比べメンテナンスの資源効率に与える効果が大きいことがあげられる。シナリオIIIで

Fig. 7 Inclusion relationship

はメンテナンスモジュールが構成されることにより、製品全体の使用期間が大きく延長され、資源が有効活用される。またシナリオIIIのように、リサイクルやメンテナンスなど、複数のライフサイクル・オプション

を組み合わせることによってシナリオ II のようにリサイクル・オプションのみから成るシナリオに基づいたモジュール構造よりも、資源の再利用における循環経路の選択肢が広まり、それぞれの部品の属性値に応じたモジュールが生成され、資源効率も大きく向上している。

6. 結 論

本研究では、製品のライフサイクル・シナリオを反映し、かつ幾何的整合性を有するモジュール構造を導出する手法を提案した。また、製品ライフサイクル全体を通じたモジュール構造の環境性評価を、資源効率に基づいて行う方法を提案した。

今後の課題として、評価結果に基づき具体的な設計変更箇所を幾何モデル上で提案できるような設計支援システムの開発が挙げられる。

文 献

- (1) Alting, L. and Jorgensen, J., The life cycle concept as a basis for sustainable industrial production, *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 1 (1993), pp. 163-166.
- (2) Huang, C.-C. and Kusiak, A., Modularity in Design of Products and Systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A, Systems and Humans*, Vol. 28, No. 1 (1998), pp. 66-77.
- (3) Gu, P., Hashemian, M. and Sosale, S., An integrated modular design methodology for life-cycle engineering, *Annals of the CIRP*, Vol. 46 (1997), pp. 71-74.
- (4) Salhieh, S. M., A methodology to redesign heterogeneous product portfolios as homogeneous product families, *Computer-Aided Design*, Vol. 39 (2007), pp. 1065-1074.
- (5) Fujita, K., Product variety optimization under modular architecture, *Computer-Aided Design*, Vol. 34, Issue 12 (2002), pp. 953-965.
- (6) Seliger, G., Weinert, N. and Zettl, M., Module configurator for the development of products for ease of remanufacturing, *Proceedings of LCE2007, The 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, (2007-6), pp. 45-52.
- (7) Koga, T., Namba, T., Aoyama, K. and Saito, G., A Design Method of Platform Module Structure Considering Product Lifecycle Scenario, *Nihon Kikai Gakkai Sekkei Kogaku, The 16th Shisutemu Bumon Koenkai Koen Ronbunshu*, (2006-11), pp. 63-66.
- (8) Shimabukuro, A., Umeda, Y. and Kondo, S., Development of Modular Design Method for Inverse Manufacturing, *2005 4th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, (2005-12), pp. 177-183.
- (9) Fukushige, S., Tonoike, K., Umeda, Y. and Kondoh, S., Proposal of a Modular Design Methodology for Product life Cycle Design, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 75, No. 6 (2009), pp. 725-730.
- (10) Suesada, R. et al., Development of Description Support System for Life Cycle Scenario, *In Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (CD-ROM)*, (2007-6).
- (11) Kimura, F., Kato, S., Hata, T. and Masuda, T., Product Modularization for Parts Reuse in Inverse Manufacturing, *Annals of the CIRP*, Vol. 50, No. 1 (2001), pp. 89-92.