

Title	製品系列統合化設計における最適性と最適化法に関する研究（第2報, モジュール組合せの最適化法）
Author(s)	藤田, 喜久雄; 坂口, 久仁
Citation	日本機械学会論文集 C編. 68(666) P.683-P.691
Issue Date	2002-02
Text Version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/11094/2940
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

製品系列統合化設計における最適性と最適化法に関する研究 (第 2 報 : モジュール組合せの最適化法)*

藤田 喜久雄*¹, 坂口 久仁*²

Optimization Methodologies for Product Variety Design (2nd Report: Optimization Method for Module Commonalization)*

Kikuo FUJITA*³ and Hisato SAKAGUCHI

*³ *Department of Computer-Controlled Mechanical Systems, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan*

This research discusses and develops the optimization methodologies for product variety design, which means the challenge to simultaneously design multiple products. Following the definition of three classes of optimization problem in the first report, this paper develops an optimization methodology for module combination under predefined module candidates for multiple products, which is the second class of product variety optimization. The situation of this design problem is widely recognized as commonalization in industrial practices. In this paper, by investigating the mapping structure among customer's, functional, and manufacturing viewpoints, module commonalization is recognized as module diversion, and the feasible conditions for diversion is modeled as diversion feasibility, diversion simultaneity, and capacity constraints. This leads the optimization formulation as a 0-1 integer programming problem in a systematically abstract form. Based on the pivot structure among 0-1 variables, an optimization technique is configured based on the simulated annealing technique. Finally it is applied to the simultaneous design problem of electronic circuits for television sets in order to ascertain the validity and effectiveness of the proposed modeling and optimization methodology.

Key Words : Product Variety Design, Design Optimization, Design Engineering, Module Commonalization, Simulated Annealing, Mass Customization, Combinatorial Optimization

1 緒言

今日の製品設計においては、コンセプトを共有する一連の製品群を総合的にとらえた優れた設計を行うことが求められつつある。これは、製品の背後にあるモジュールや部品を共通化することにより開発費や設備費をはじめとする各種の間接費の低減をはかるなどして、全体としての製品競争力を高めようとするものである⁽¹⁾。本研究は、このような「製品系列統合化設計」における状況に対して、複数の製品群(製品系列)を対象とした設計問題についての最適設計のための方法論を提案することを目的としている。第 1 報⁽²⁾においては、その内容をモジュールアーキテクチャ⁽³⁾のもとでのシステムの設計最適化という視点のもとで整理することにより、最適化問題の類型を 3 つのクラスとして定義した。また、Class I の設計問題における最適

性の状況を航空機のストレッチによる設計展開の事例を通じて具体的に示すことにより、製品系列統合化設計における最適設計の必要性和効果を明確にした。

本報では、第 1 報での類型化のうち Class II に相当する、特定のモジュールアーキテクチャのもとで事前に設計されたモジュール群を組み合わせることにより製品系列を構成する設計問題についての最適化法を提案する。この設計問題の状況は直接的には「モジュールの共通化」と称されるものに対応するが、本報では、その背後にある顧客ニーズ・物理機能・製造モジュールの間に存在する関係についての分析に従って、共通化についての数理的な性質をモジュールの代替と見ることにする。それに基づいて、0-1 整数変数による最適化問題の定式化を導き、それに潜むピボット構造に着目したシミュレーティッドアニーリング法による最適化計算法を構成する。さらに、テレビ受像機用の電子回路についての想定問題に対する適用事例を示して、最適化法の妥当性と有効性を検証する。

* 原稿受付 2001 年 5 月 23 日

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

*² 三菱電機(株) 姫路製作所 (〒 670-8677 姫路市千代田町 840)

(元: 大阪大学大学院工学研究科)。

Email: fujita@mech.eng.osaka-u.ac.jp

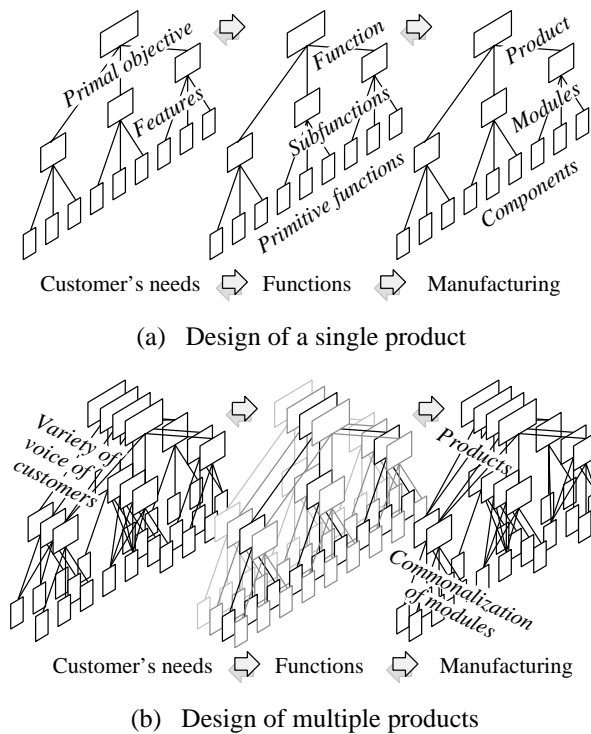


Fig. 1 Hierarchical views and their mapping

2 モジュールの共通化と製品系列統合化設計

2.1 製品設計におけるシステム構造 今日における製品はいわゆる道具とは異なり、何らかの意味において複雑なシステムとなっているが、複数の製品を同時に考慮し、それらの間で部品やモジュールを共有化できるようにするためには、それらのシステムとしての構造が重要である。これに関して、Ulrichは「アーキテクチャ」という概念を提示して、統合(Integrated)アーキテクチャに対するモジュール(Modular)アーキテクチャの有効性を論じている⁽³⁾。その主旨は、システムを構成するサブシステムや要素間の干渉をできるだけ排除してより明確なモジュール型の階層構造を導入できれば、設計作業が分散化により容易になるなどのほか、製品系列の設計においてもモジュールや部品の相互交換が比較的独立して行えるようになるなどの利点がある、というものである。

2.2 階層的視点における相互対応 品質機能展開(QFD)⁽⁴⁾に従えば、製品についての階層的な視点は、図1にも示すように、顧客ニーズ・物理機能・製造モジュールの各層において形成されており、それらが相互に関係づけられているものと考えることができる。図中(a)に対して、複数の製品を同時に考える製品系列の設計においては、それらに加えて、顧客ニーズの多様性への対応を考える必要があり、図中(b)に示すように、それに起因するもう一つの軸を全体に重

ね合わせて考慮する必要がある。

なお、図1の階層構造を考える場合にどのレベルでのシステム分割に着目するかについては任意性が存在するが、設計の計画段階においては適当な粒度のもと10個前後のモジュールを想定して全体の状況を俯瞰することが肝要であるとされている。

2.3 設計方法論における課題 図1に示した階層的な各構造と相互の対応関係を前提として製品系列の設計を考えれば、方法論における課題も明確になる。第一点としては、製品系列への要請は顧客ニーズの多様性にあることから、それを物理機能の多様性、製造モジュールの多様性へと翻訳する必要がある。次に、そのような多様性に対峙して、モジュールなどを共通化できるかどうかに関する基準を明確にする必要がある。これらを明確にすることができれば、設計空間における定義域が得られたことになり、さらに、製品系列全体の設計の優劣を評価するための指標を導入すれば、ある種の最適設計問題が構成できる。その上で、適切なアルゴリズムを組み合わせれば、合理的な設計方法論を構成することができる。

3 モジュールの代替による製品系列の展開

3.1 適切なアーキテクチャの必要性 モジュールアーキテクチャを前提として設計プロセスを考える場合、それそのものを決定する段階と、そのもとで具体的に実装すべきモジュールの内容や組合せを決定する段階とに分割することができる⁽¹⁾。製品系列における共通化を可能にするためには、まずは適切なモジュールアーキテクチャを導入することが前提になる。これに関して、例えば、Whitneyは、モジュール相互のインターフェースを統一することができれば、少数の部品を効果的に組み合わせることにより極めて多数の製品を構成できる可能性を示して、生産において加工よりも組立てに主眼を置くことの優位性を指摘している⁽⁵⁾。しかしながら、そのような内容は設計に先立つ企画や概念設計についての内容であり、最適設計における数理的な操作とは馴染みにくいものと考えられる。そこで、本報では、適切なアーキテクチャが与えられているものとして議論を進めることにする。

3.2 モジュール共通化の意味 適切なモジュールアーキテクチャが与えられれば、ある種のテンプレートが形成されることになる。何らかのテンプレートが図1に示す関係のもとで与えられているとすると、モジュールの共通化は製造モジュールに着目することにより、図2に示す状況として解釈することができる。すなわち、異なる製品の間で相互のインター

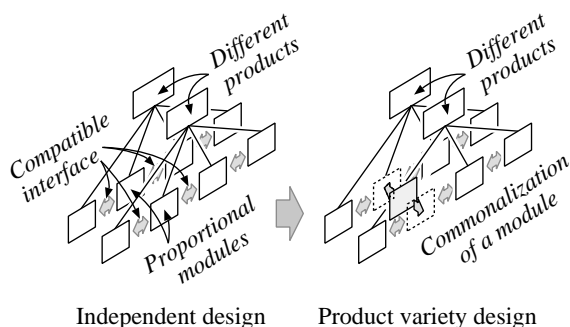


Fig. 2 Possibility of module diversion

フェースが統一されているもとで、モジュールの持つ機能の内容が一方に対して他方が余分な機能を持っていて、後者を前者に流用することができるなどの条件がそろえば、モジュールの代替、すなわち、共通化を行うことができる。

その際に満たすべき各種の条件は、数理的な立場から、以下の3種類の制約条件として整理できる。

代替可能性制約 … 特定のモジュールを代替した際に、その製品の要求機能を満足できるかどうかに関する制約。

代替同時性制約 … 物理機能についての連結関係により、あるモジュールを代替した場合に、他の特定のモジュールも同時に代替しなければならないという制約。

容量制約 … 製品を構成するすべてのモジュールの間でエネルギー等の需給関係がバランスするための制約。

3.3 モジュールの共通化における最適性 上記の制約条件のもとで共通化を進めた場合に、どこまでの共通化が最適解を導くかについては、各種の要因の間のトレードオフによって定まるはずである⁽²⁾。共通化によるメリットとしては、モジュール種類が減少したり、さらに量産効果が加速したりすることなどによるコストの低減が挙げられる。デメリットとしては、個別の製品に過剰な機能が付与されることによって必要な機能に対するモジュール単価が増加し、コストの増加をまねくことが挙げられる。それらの内容についての数理的なモデルを構成すれば、最適化計算における目的関数として用いることができる。

3.4 モジュールの共通化におけるロバスト性

一方、上記のトレードオフの程度が定まるためには、例えば、量産効果の程度を定めるためには、最終的な各製品毎の生産台数の予測値が必要になるなど、製品系列の最適性は設計段階では制御できない要因に

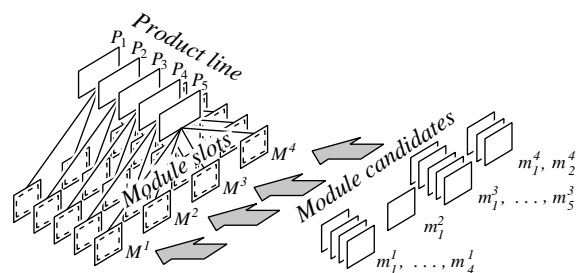


Fig. 3 Module selection for multiple products

も依存することになる。この状況はいわゆるロバスト設計⁽⁶⁾における状況とも通じるものである。しかしながら、ロバスト設計が対象としている不確定要因が、どちらかと言えば、不確定と言えどもある種の分布を想定できたり、その分布に従って多様な状況が実際に出現するものである一方で、製品系列に関わる不確定要因は、分布そのものが想定できなかつたり、具体化する状況は唯一であるなどの点で、性質が異なったものとなっている。このため、いわゆるリスクとしての対応が必要であるとも考えられる。なお、これに関して深くは論じないが、重要な検討課題である。

4 モジュール組合せによる製品系列の最適設計法

4.1 製品系列の数学的表現 前節に示したモジュールの共通化についての設計問題のための最適化法を一般性を伴って展開するにあたり、図3にも示すように、 I 個の製品 P_i ($i = 1, 2, \dots, I$) はそれぞれに J 個のモジュールスロット M^j ($j = 1, 2, \dots, J$) を有していて、それらに実装するモジュールを K^j 個のモジュール候補 m_k^j ($k = 1, 2, \dots, K^j$) のなかからそれぞれに選択し、それらの組合せによって製品系列の内容が確定するものとする。すなわち、以下の設計変数を導入する。

$$x_k^{j(i)} = \begin{cases} 1 & \dots & \text{モジュール } m_k^j \text{ を製品 } P_i \text{ の} \\ & & \text{スロット } M^j \text{ に実装するとき} \\ 0 & \dots & \text{モジュール } m_k^j \text{ を製品 } P_i \text{ の} \\ & & \text{スロット } M^j \text{ に実装しないとき} \end{cases} \quad (1)$$

$(i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K)$

ただし、 $K = \max_j K^j$ である。

このとき、あるスロットには一つのモジュールしか実装できないことから、上記の設計変数は以下の制約条件式を満足する必要がある。

$$\sum_{k=1}^K x_k^{j(i)} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J) \quad (2)$$

なお、二神らは部品の共通化問題において、上記から 1 つの次元を落した変数と制約を用いている⁽⁷⁾。

4.2 モジュールの共通化に関する制約の表現

3.2項で述べた各制約は、上記の 0-1 整数変数 $x_k^{j(i)}$ のもとで、以下のように記述することができる。

(1) 代替可能性制約 あるモジュール m_k^j が製品 P_i のスロット M^j に実装できるかどうかによって代替可能性制約を表すこととして、まず、 $x_k^{j(i)}$ と同様にして、以下の係数行列を定義する。

$$a_k^{j(i)} = \begin{cases} 1 & \cdots & \text{モジュール } m_k^j \text{ を製品 } P_i \text{ の} \\ & & \text{スロット } M^j \text{ に実装できるとき} \\ 0 & \cdots & \text{モジュール } m_k^j \text{ を製品 } P_i \text{ の} \\ & & \text{スロット } M^j \text{ に実装できないとき} \end{cases} \quad (3)$$

$(i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K)$

このとき、代替可能性制約は以下の等式により記述できる。

$$\sum_{k=1}^K a_k^{j(i)} x_k^{j(i)} = 1 \quad (4)$$

$(i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J)$

(2) 代替同時性制約 仮に、スロット M^{j_1} と M^{j_2} の間に代替同時性が存在し、 M^{j_1} に $m_{k_0}^{j_1}$ を実装した場合には、 M^{j_2} には $m_{k_1}^{j_2}, m_{k_2}^{j_2}, \dots, m_{k_v}^{j_2}$ のいずれかを実装しなければならない状況を考える。この制約条件は以下の等式により記述できる。

$$\left(1 - x_{k_0}^{j_1(i)}\right) = \prod_{k \in \{k_1, k_2, \dots, k_v\}} \left(1 - x_k^{j_2(i)}\right) \quad (5)$$

$(i = 1, 2, \dots, I)$

(3) 容量制約 仮に、スロット $M^{j_{out}}$ に実装されるモジュールがその他のモジュールに何らかのエネルギーを供給しているとするとき、その需給関係から、以下の制約条件が満たされる必要がある。

$$\sum_{k=1}^K C_{ps}(m_k^{j_{out}}) x_k^{j_{out}(i)} \geq \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq j_{out}}}^J \sum_{k=1}^K C_{pd}(m_k^j) x_k^{j(i)} \quad (6)$$

$(i = 1, 2, \dots, I)$

ここで、 $C_{ps}(m_k^{j_{out}})$ はモジュール $m_k^{j_{out}}$ での最大供給量、 $C_{pd}(m_k^j)$ はモジュール m_k^j での需要量である。

4.3 設計変数の翻訳 式(1)の 0-1 変数 $x_k^{j(i)}$ は上記の各制約条件を記述する上では適当なものであるが、製品系列の内容を直接、表すものではないため、何らかの翻訳が必要となる。モジュール m_k^j を製造す

る必要があるどうかは次式によって算出できる。

$$y_k^j = \begin{cases} 1 & \cdots & \text{if } \sum_{i=1}^I x_k^{j(i)} \geq 1 \\ 0 & \cdots & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

$(j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K)$

このとき、 m_k^j が必要である場合には $y_k^j = 1$ 、そうでなければ $y_k^j = 0$ となる。

そのもとで、スロット M^j に実装するために製造されるモジュールの総種類数は次式により定まる。

$$\kappa^j = \sum_{k=1}^K y_k^j \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (8)$$

一方、モジュール m_k^j の総生産ユニット数は次式により与えられる。

$$U_k^j = \sum_{i=1}^I U^{(i)} x_k^{j(i)} \quad (9)$$

$(j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K)$

ここで、 $U^{(i)}$ は製品 P_i の総生産ユニット数である。

4.4 総製造コストモデル 3.3項で述べた最適性の指標として、本報では、製品系列を構成する全製品の全台数を生産する場合の総製造コストを考えることにする。製造コストについては、個別的には製造プロセスにおける特殊な事情をも加味する必要があるために特殊なモデルとなる場合もあり得るが、以下に示すモデルは製造コストについての基本的な要因を含んだものになっている。

総製造コストモデルの構成に当たって、まず、総コスト C_t は以下のように固定費 C_f と変動費 C_v に分類できるものとする。

$$C_t = C_f + C_v \quad (10)$$

(1) 固定費 設計開発費、設備費などの固定費 C_f は、ユニット数ではなく、製品やモジュールの種類数に関係するものとして、次式で与える。

$$C_f = C_f^0 + \sum_{i=1}^I C_f^{P(i)} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J C_{f_k}^{Mj} y_k^j \quad (11)$$

ここで、 C_f^0 は種類数に関係しない様々な固定費を総括したものに相当し、 $C_f^{P(i)}$ は製品種毎の固定費、 $C_{f_k}^{Mj}$ はモジュール種毎の固定費に相当するものとする。それらのうち、後二者は次式により定める。

$$C_f^{P(i)} = \alpha_f^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J N_k^j x_k^{j(i)} \quad (i = 1, 2, \dots, I) \quad (12)$$

$$C_{f_k}^{Mj} = \alpha_f^{Mj} N_k^j \quad (13)$$

$(j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K)$

ここで、 N_k^j はモジュール m_k^j に実装される基本素子の総数^{†1}であり、 α_f^p と $\alpha_f^{M^j}$ はそれをもとに上記の内容を算出するための係数である。

(2) 変動費 変動費 C_v については、次式のように、材料費 C_v^m 、モジュールへの加工費 C_v^p 、製品への組立て費 C_v^a から構成されるものとする。

$$C_v = C_v^m + C_v^p + C_v^a \quad (14)$$

材料費は全製品に実装されるモジュールの単位コストの総和として次式で与える。

$$C_v^m = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J c_{v_k}^{m_j} U_k^j \quad (15)$$

ここで、 $c_{v_k}^{m_j}$ は次式により計算されるモジュールの単位コストである。

$$c_{v_k}^{m_j} = \alpha_v^{m_j} N_k^j + \beta_v^{m_j} \quad (16)$$

($j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$)

なお、 $\alpha_v^{m_j}$ と $\beta_v^{m_j}$ はモジュールスロット M^j に依存した係数であり、モジュール間のインターフェース部分の材料費については、簡便のため、 $\beta_v^{m_j}$ に含まれるものとする。

加工費も同様に全製品に実装されるモジュールの単位コストの総和として次式で与える。

$$C_v^p = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^{U_k^j} c_{v_k}^{f_j} L^f(u) \quad (17)$$

ここで、 $c_{v_k}^{f_j}$ はモジュール m_k^j における最初の製造分についての加工費であり、モジュールスロット M^j に依存した係数 $\alpha_v^{f_j}$ のもとで次式により与えられるものとする。

$$c_{v_k}^{f_j} = \alpha_v^{f_j} N_k^j \quad (18)$$

($j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$)

一方、 $L^f(u)$ はモジュールの加工における習熟効果に対応する項であり、習熟係数 r_v^f のもとで、 $L^f(u) = u \frac{\ln r_v^f}{\ln 2}$ により計算されるものとする。

組立て費は、すべての製品について同一であるとの仮定のもと、次式により与える。

$$C_v^a = \sum_{u=1}^{U^p} c_v^a L^a(u) \quad (19)$$

ここで、 U^p は製品の全生産量であり、 $\sum_{i=1}^I U^{(i)}$ で与えられる。 c_v^a は最初の製品についての組立て費であり、 $L^a(u) = u \frac{\ln r_v^a}{\ln 2}$ は、 $L^f(u)$ と同様、組立てについての習熟効果を表す項である。

4.5 最適化問題の定式化 以上により、最適化問題の定式化は以下のように構成できる。

設計変数： 式(1)により定義される一連の0-1整数変数 $x_k^{j(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$)。

制約条件： 式(2)による設計変数間の無矛盾性についての制約、式(4)による代替可能性制約、式(5)による代替同時性制約、式(6)による容量制約。

目的関数： 式(10)で与えられる全製品の製造に関わるコスト。

4.6 最適化問題の性質 上記の最適化問題は、制約条件付き非線形0-1整数計画問題であって、大規模な組合せ最適化問題となることが想定される。その最適解を効率的に求めるには、対象問題の特殊な構造に着目した上で、何らかのメタヒューリスティクスによる方法を用いることが有効である。

定式化における特質の一つは、式(1)によって定義される一連の0-1整数変数 $x_k^{j(i)}$ の値を何らかの形で変更しようとする場合において、式(2)の制約条件を満たし続けるためには、値が0であるある変数の値を1に切り換えようとする際には、その製品のそのモジュールスロットについての値が1である別の変数の値を同時に0に切り換える必要があり、逆に、値が1であるある変数の値を0に切り換えようとする際には、その製品のそのモジュールスロットについての値が0である変数の中から一つを選んで、その値を同時に1に切り換える必要があるというものである。本報では、この性質をピボット構造と呼び、変数値の切り換え操作をピボット演算と呼ぶことにする。さらに、定式化の全内容のもとで設計解の実行可能性を維持し続けるためにはその他の制約条件についても考慮する必要があるが、それらのうち、式(4)による代替可能性制約と式(5)による代替同時性制約の数学的な内容は実行可能解を導くピボット演算の選択を直接的に指示するものとなっている。

以上の性質の意味するところは、ピボット演算は一連の設計変数の中で特定の2変数のみを変更するものであり、変更前と変更後の設計解は比較的似通ったものであることが期待できる。式(6)による容量制約以外の制約条件を確実に満たすようにピボット演算を行う方法が存在する、というものである。言い換えれ

^{†1} この部分を含めて各種の単価を素子数に係数を乗じる形式で与えている理由は、後述の適用事例が電子回路であることによるものである。この種の素子を見出すことはすべての設計問題において可能なものではないが、そのような場合には、単価そのものを定数として与えることにより、本報での定式化は構成可能であり、後述の最適化アルゴリズムも利用可能である。

ば、ピボット演算はある設計解に対して近傍における摂動解を与えるものであり、それによって実行可能な設計解を比較的高い確率で生成し続けることができるものの、それが結果的に目的関数を改善するかどうかについては事前には知ることができない、ということになる。これらの内容を踏まえれば、メタヒューリスティクスによる各種方法のなかでも、シミュレーティッドアニーリング法⁽⁸⁾⁽⁹⁾が、効率的な最適化アルゴリズムを構成する上での有効な手段であることができる。

4.7 シミュレーティッドアニーリング法による最適化アルゴリズム 以上の考え方に基づく最適化計算のアルゴリズムは以下ようになる。

(i) 各製品毎に共通化を考えない場合に物理機能に基づいて直ちに要求されるモジュールをそれぞれのスロットに実装することによって、製品系列の実行可能な設計解を想定する。その解における総製造コストを式(10)により計算して C とする。

(ii) シミュレーティッドアニーリング法における温度パラメータの初期値を T とする。

(iii) 暫定解を以下の手順により想定する。

(a) 0-1 変数 $x_k^{j(i)}$, ($i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$) の中から, $x_k^{j(i)} = 1$ と $\sum_{k=1}^{K_j} a_k^{j(i)} \geq 2$ という条件を満たし, さらに, 式(5)の左辺に現れない変数を一個, 任意に選んで, $x_{k_1}^{j_1(i)}$ とする。

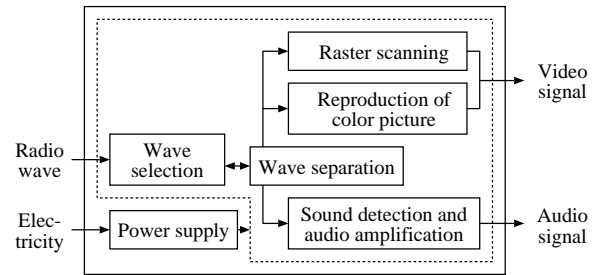
(b) 0-1 変数 $x_k^{j_1(i)}$, ($k = 1, 2, \dots, K$) の中から, $x_{k_1}^{j_1(i)} = 0, a_k^{j_1(i)} = 1, k \neq k_1$ という条件を満たす変数を一個, 任意に選んで, $x_{k_2}^{j_1(i)}$ とする。

(c) $x_{k_1}^{j_1(i)} = 0$ および $x_{k_2}^{j_1(i)} = 1$ とするピボット演算を行い, さらに, j_1 が式(5)の右辺に現れる変数である場合には, 代替同時性に基づいて左辺に現れる変数の値を調整する。

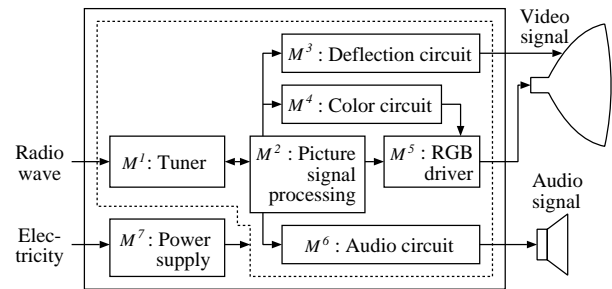
(d) 以上により想定される解が式(6)の容量制約を満足するかどうかを調べる。満足している場合には暫定解とする。そうでない場合には, ステップ(iii-a)に戻る。

暫定解における総製造コストを式(10)により計算して \tilde{C} とする。

(iv) $\Delta C = \tilde{C} - C$ のもとで, $\Delta C < 0$ であれば, 暫定解を新しい解として受け入れ, \tilde{C} を C の新しい値とする。 $\Delta C \geq 0$ であれば, $p = \exp(-\frac{\Delta C}{T})$ なる確率のもとで, 暫定解を新しい解として受け入れ



(a) Function structure



(b) Module structure

Fig. 4 Modules of TV receiver circuits

る。

(v) ステップ(iii)から(iv)の処理を一定の回数, 繰り返したのであれば, ステップ(vi)へ行く。そうでなければ, ステップ(iii)に戻る。

(vi) 温度更新係数 α を掛けることにより, 温度パラメータ T の値を減少させる。

(vii) 解が収束したと判断できる場合には, 手続きを終了する。そうでなければ, ステップ(iii)に戻る。

以上のなかで, ステップ(iii-a)と(iii-b)における条件は式(2)と(4)の制約条件を満足することを保証するためのものであり, ステップ(iii-a)における条件は, ステップ(iii-c)での操作に連動して, 式(5)の代替同時性制約を満足することを保証するためのものである。

5 テレビ受像回路の最適製品系列展開事例

以上の内容に対する具体的な事例として, テレビ受像回路についての想定問題を考える。

5.1 テレビ受像回路とその構造 受像回路⁽¹⁰⁾はテレビの主要な構成要素であることから, その内容は, 外部ケースの色や形状などを除いて, テレビに求められる多様な仕様のほとんどと何らかの対応関係を持っている。具体的な顧客ニーズは画面サイズ, 画質, 音質, 電源電圧などに渡って, 多様性を有している一方, その機能構造やモジュール構造は図4のようになっている。顧客ニーズ・物理機能・製造モジュールの間には図1に相当する明瞭な対応関係を想定する

Table 1 Product variety of television sets

Feature index	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
Picture size	14	21	36	14	21	36
Picture quality	Gd	Br	Bt	Nl	Gd	Br
Audio level	Lw	Mm	Hh	Lw	Mm	Mm
Power supply voltage	100V	100V	100V	Multi	Multi	100V

Nl: Normal, Gd: Good, Br: Better, Bt: Best
Lw: Low, Mm: Medium, Hh: High

ことができる。なお、このような関係は電子回路の性質によるものであるが、機械システムにおいても同様の構造を形成できれば、製品系列の展開が容易なることを示唆している。

5.2 設計条件 具体的な設計事例として、表 1 に示す仕様 (顧客ニーズにおける項目に対応する) の P_1, P_2, \dots, P_6 の製品をそれぞれ 24,000 台ずつ生産する場合を考える。これに対して、図 4 (b) の各モジュールスロットに実装可能なモジュールの内容として、 M^1 のチューナ回路については 1 種類のみを考える。 M^2 の画像信号処理回路については画質のグレードに対応した 4 種類のみを考える。 M^3 の偏向回路については画面のサイズに対応した 3 種類のみを考える。 M^4 のカラー回路については、 M^2 のうち最低グレードのものと組み合わせて用いるものその他のグレードと組み合わせて用いるものとの 2 種類を考える。 M^5 の RGB 駆動回路については 1 種類のみを考える。 M^6 の音声回路については各グレードに対応した 3 種類のみを考える。 M^7 の電源回路については、電圧に関する 2 種類と出力容量に関する 4 種類を想定し、両者の組合せにより合計 8 種類のみを考える。

以上の内容に対して、式 (3) の係数行列は、例えば、モジュールスロット M^2 に関して以下のように定義することができる。

$$[a_k^2]^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

また、 M^2 と M^4 との間の代替同時性も、式 (5) に従って、以下のように記述することができる。

$$x_1^{4(i)} = x_1^{2(i)} \quad (i = 1, 2, \dots, I) \quad (21)$$

$$(1 - x_2^{4(i)}) = (1 - x_2^{2(i)}) (1 - x_3^{2(i)}) (1 - x_4^{2(i)}) \quad (i = 1, 2, \dots, I) \quad (22)$$

Table 2 Optimization result

Module slot	Module cand.	N_k^j	$C_{pd}(m_k^j)$ $C_{ps}(m_k^j)$	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	Number of kinds
M^1	m_1^1	45	5	●	●	●	●	●	●	1
M^2	m_1^2	45	3					●		4 → 2
	m_2^2	50	4	●			○	●		
	m_3^2	55	7			●			●	
	m_4^2	60	8		○	●			○	
M^3	m_1^3	140	30	●				●		3 → 2
	m_2^3	155	80	○	●		○	●		
	m_3^3	170	140			●			●	
M^4	m_1^4	105	3					●		2 → 1
	m_2^4	115	5	●	●	●	○	●	●	
M^5	m_1^5	35	5	●	●	●	●	●	●	1
M^6	m_1^6	40	10	●				●		3 → 2
	m_2^6	45	20	○	●		○	●	●	
	m_3^6	50	60			●				
M^7	m_1^7	45	60	●						5 → 2
	m_2^7	50	120							
	m_3^7	55	180			●				
	m_4^7	60	240		○	●			●	
	m_5^7	50	60					●		
	m_6^7	55	120	○			○	●		
	m_7^7	60	180							
	m_8^7	65	240							

●: No diversion ○: Optimal diversion

総製造コストモデルにおける各係数は $C_f^0 = 10,000,000$ [¥]; $\alpha_f^p = 3,000$ [¥]; すべての j について $\alpha_f^{M^j} = 9,000$ [¥]; $\alpha_v^{m^j} = 0.65$ [¥]; $\beta_v^{m^j} = 5$ [¥]; $\alpha_v^{f^j} = 1.5$ [¥]; $r_v^f = 0.95$; $c_v^a = 10$ [¥]; $r_v^a = 0.95$ を想定する。また、各モジュール m_k^j の基本素子数 N_k^j とエネルギー需要量 $C_{pd}(m_k^j)$ あるいは最大供給量 $C_{ps}(m_k^j)$ [VA] は表 2 の中に示すように想定する。

5.3 最適設計結果 表 2 は前項の条件のもとでの最適設計の結果をも示している。表中、‘●’は共通化を考えない場合のモジュールの選択、‘○’は共通化によって製品系列全体で最適な共通化 (代替) を行った場合のモジュールの選択である (したがって●は代替の行われなかったモジュールに対応する)。また、表 3 は両者におけるコストの内容を比較を示している。この最適化によって材料費などは増加するものの、モジュールの種類数に依存したコストがそれ以上に減少しており、結果として総コストが 2.7% 低減されている。その背景にあるモジュール代替のパターンは、表 2 にも示すように、モジュールスロット M^7 などでは非常に込み入っていて予測不可能であることから、最適化計算には合理的な効果があるものと考え

Table 3 Comparison of contents of total cost

Cost items				No diversion	→	Optimal diversion
Cost on production volume	Module material cost	C_v^m	[Yen]	51,762,000.	↗	53,088,000.
	Module fabrication cost	C_v^f	[Yen]	51,484,037.	→	51,226,054.
	Product assembly cost	C_v^a	[Yen]	645,703.	→	645,703.
	Partial sum	C_v	[Yen]	103,891,740.	↗	104,959,756.
Cost on the number of kinds	Cost depended on the number of product kinds	$\sum_{i=1}^I C_f^{P(i)}$	[Yen]	8,985,000.	↗	9,240,000.
	Cost depended on the number of module kinds	$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J C_f^{M^j, y_k}$	[Yen]	12,375,000.	↘	7,560,000.
	Partial sum	—	[Yen]	21,360,000.	↘	16,800,000.
Hidden fixed cost			C_f^0	[Yen]	→	10,000,000.
Total cost			C_t	[Yen]	↘	131,759,756.

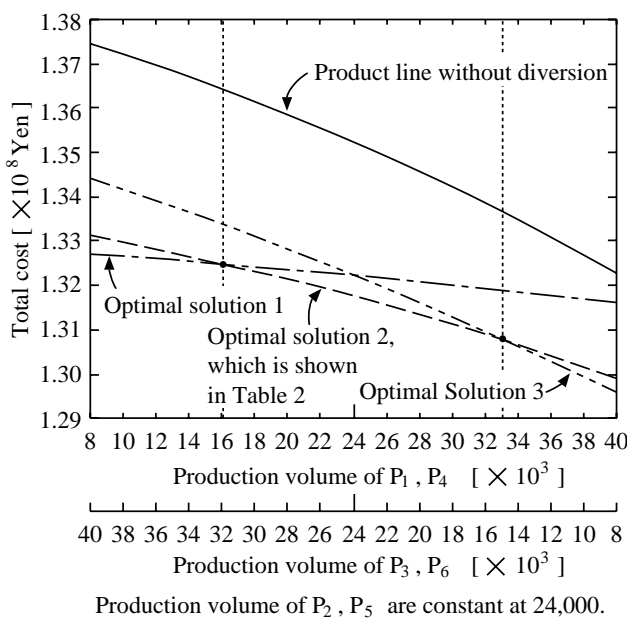


Fig. 5 Relationships between demand patterns and optimal diversion

られる。

さらに、3.4項で述べた設計解のロバスト性についての一例を示すために、各製品の生産量の差によって、最適な共通化方策がどのような影響を受けるかについての検討を行った。図5は、表1の条件のもと製品毎の生産台数分布が図中に示すパターンに従って変化した場合に、表2に示した解がどの範囲まで最適であり続けるかを示したものである。図にも示すように、一定の範囲ではロバストな最適性を示しているものの、その外側では別の代替パターンが最適解となっている。この計算事例からもわかるように、製品系列の設計においては、単純に想定した条件のもとでの最適な設計を求めるのみならず、そのロバスト性につい

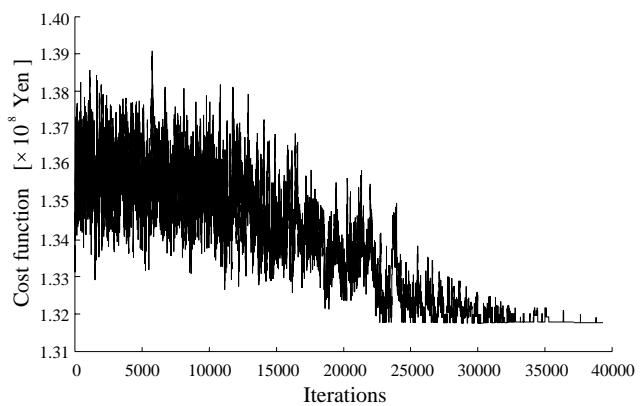


Fig. 6 Convergence history of simulated annealing

ても留意する必要があることになっている。

5.4 最適化計算の効率 上記の6種類の製品についての設計問題の大きさは、設計変数 $x_k^{j(i)}$ のサイズで見れば $2^{6 \cdot 7 \cdot 8} \cong 1.4 \times 10^{101}$ となっているが、スロット毎の候補数に従った、より本質的な組合せの総数においても $(1 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 8)^6 \cong 3.7 \times 10^{16}$ となっていて、本問題は大規模な組合せ最適化の問題であると言える。これに対してシミュレーテッドアニーリング法を適用するに当たっては、初期温度を $T = 2 \times 10^6$ 、各温度毎の繰返し数を 200、温度更新係数を $\alpha = 0.98$ 、終了条件を 20 回の温度更新に渡って解が更新されない場合とした。図6はその際に目的関数が収束していく状況の一例を示したものであり、シミュレーテッドアニーリングにおける一般的な収束傾向と同様の状況を示している。また、様々な乱数の種のもとで最適化計算の試行を繰り返してみたところ、表2に示した最適解には収束しない場合もごく稀にみられるものの、概ね、図6と同様の過程を経て最適解を得ることができることが確認できた。なお、計算時間は Sun Ultra 5

Workstation (270MHz UltraSPARC-III) において 11 秒である。以上のことから、本報で提案した最適化計算の方法は Class II 問題に対する方法論として有効なものであると考えられる。

6 結 言

本報は、製品系列についての設計の中でも、一定のモジュール構造のもとでモジュールの代替により共通化を進める Class II の問題を取り上げ、その問題を構成する因子を論じた上で、数理的な取り扱いが可能な部分を明らかにした。さらに、その定式化とシミュレーティッドアニメーション法による最適化法を構成した。また、テレビ受像回路における想定問題に適用して、それらの妥当性と有効性を論じた。

なお、第3報⁽¹¹⁾では、Class III の問題に対する最適化法を提案する。

文 献

- (1) 藤田・石井, “製品系列統合化設計とそのタスク構造,” 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 65, No. 629, (1999), pp. 416-423.
- (2) 藤田, “製品系列統合化設計における最適性と最適化法に関する研究(第1報:最適化問題の構造と様相),” 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 68, No. 666, (2002), (論文番号 01-0667).
- (3) Ulrich, K., “The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm,” *Research Policy*, Vol. 24, (1995), pp. 419-440.
- (4) Clausing, D., *Total Quality Development — A Step-By-Step Guide to World-Class Concurrent Engineering*, (1994), ASME Press.
- (5) Whitney, D. E., “Nippondenso Co. Ltd.: A Case Study of Strategic Product Design,” *Engineered in Japan* (Liker, J. K., Ettl, J. E. and Campbell, J. C., editors), pp. 115-151, (1995), Oxford University Press.
- (6) Fowlkes, W. Y. and Creveling, C. M., *Engineering Methods for Robust Product Design — Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*, (1995), Addison Wesley.
- (7) 二神・福永・平田・藤越, “製品群の構成部品に関する最適化問題とその緩和問題,” 日本応用数学会論文誌, Vol. 8, No. 3, (1998), pp. 355-372.
- (8) Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., C. D. and Vecchi, M. P., “Optimization by Simulated Annealing,” *Science*, Vol. 220, No. 4598, (1983), pp. 671-680.
- (9) 藤田・赤木・島崎, “矩形双対グラフを用いた最適区画配置手法に関する研究,” 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 60, No. 579, (1994), pp. 3662-3669.
- (10) Grob, B., *Basic Television — Principles and Servicing, Fourth Edition* (1975), McGraw-Hill.
- (11) 藤田・吉田, “製品系列統合化設計における最適性と最適化法に関する研究(第3報:システム属性とモジュール組合せの同時最適化法),” 日本機械学会論文集 C 編, (投稿中:論文番号 01-0669).