

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3報, システム属性とモジュール組合せの同時最適化法）
Author(s)	藤田, 喜久雄; 吉田, 寛子
Citation	日本機械学会論文集 C編. 68(668) P. 1329-P. 1337
Issue Date	2002-04
Text Version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/11094/3406
DOI	
rights	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

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)*

藤田 喜久雄*¹, 吉田 寛子*²

Optimization Methodologies for Product Variety Design (3rd Report: Simultaneous Optimization Method for Module Attributes and Module Combination)*

Kikuo FUJITA*³ and Hiroko YOSHIDA

*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 succeeding reports, this paper proposes a simultaneous optimization method for both module combination and module attributes of multiple products, which is viewed as the third class of product variety optimization in the first report. While it is the most difficult one among the classes, it includes a hierarchical structure on the design optimality, which is composed of commonality and similarity pattern, similarity directions, module attributes, under a systematic understanding of product variety representation. Based on such structure, this paper configures an optimization method for both module combination and module attributes across multiple products. The optimization method hybridizes a genetic algorithm, a mixed-integer programming method with a branch-and-bound technique, and a constrained nonlinear programming method, i.e., a successive quadratic programming method. In its optimization process, the first optimizes the combinatorial pattern, the second optimizes the well-structured directions, and the third optimizes the continuous module attributes under the others. Finally it is applied to the simultaneous design problem of multiple airplanes to demonstrate its validity and effectiveness.

Key Words : Product Variety Design, Design Optimization, Design Engineering, Hybrid Genetic Algorithm, Mixed-Integer Programming

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つつある。これは、製品の背後にあるモジュールや部品などの共通化や共有化を進めて、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⁾では、その内容をモジュールアーキテクチャ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

して定義した上で、モジュールの属性についての最適設計を行う Class I の問題における最適性の状況を示した。第 2 報⁽³⁾では、モジュールの組合せについての最適設計を行う Class II の問題に対してシミュレティッドアニーリング法による最適化法を提案した。

本報では、第 1 報で示した類型化のなかでも Class III の問題、すなわち、モジュールの属性と組合せを同時に最適化する問題に対する最適化法を提案する。具体的には、まず、第 1 報⁽²⁾では組合せの総数を限定することにより列挙法によって扱った類似設計の問題が本来は Class III であることを踏まえた上で、その最適性にはある種の階層的な構造が潜んでいることを指摘する。続いて、その階層性に基づいて遺伝的アルゴリズム、分枝限定法、逐次 2 次計画法の 3 つをハイブリッド化することによる最適化法を提案する。最後に、航空機のストレッチによる設計展開についての最適設計の事例を示して、提案手法の有効性を検証するとともに、製品系列統合化設計における最適化の意義を明らかにする。

* 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 松下電器産業 (株) (〒 571-8502 門真市松葉町 2-7) (元: 大阪大学大学院工学研究科).

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

2 モジュール属性とモジュール組合せの同時最適化問題とその定式化

2.1 製品系列統合化設計と最適化 本研究⁽²⁾では、複数の製品を設計するに当たって、システムである製品が一連のモジュールから構成されており、各モジュールは一連の属性により表現されているものとしている。このとき、異なる製品の間でモジュールを共通化したり、あるいは、モジュールの属性を共通化したりした場合には製品開発コストの低減などの効果が期待できるが、その背後には余剰な機能が負荷されるなどのデメリットも存在する。製品系列の最適設計問題とは、両者のトレードオフの間における最適な共通化の程度を定めることにほかならない。

上記のモジュールと属性との関係に従えば、製品系列の最適設計問題は、モジュール間の共通性を定める部分と、何らかの共通性を前提とした場合に適切なモジュールの内容を定める部分とから構成されている。第1報⁽²⁾では、前者を与条件として後者を決定する問題を Class I、後者を前提として前者を決定する問題を Class II、両者の内容を同時に決定する問題を Class III とした。Class I と Class II との内容は相互に排他的であることから、Class III に対する最適化手法はいずれかの問題に対する手法を単純に拡張するのみでは構成することができず、別途、独自の構成が必要となる。

2.2 類似設計の枠組み 第1報⁽²⁾では、いわゆる類似設計に対して列挙法のもとで Class I に対する最適化を行うことにより、最適性についての状況を例示した。その事例が列挙法で取り扱った理由は共通性についてのパターンを少ない数に限定したことによるものであるが、パターンの総数が列挙法により取り扱える程度を越えるものであれば、Class III 問題としての取り扱いが必要となる。本研究では、第1報⁽²⁾でも取り上げた製品系列統合化設計の状況を Class III の具体例として想定する。その要点は以下のとおりである。

- P^1, P^2, \dots, P^{n_P} という n_P 種類の製品を考える。
- 各製品 P^i は n_M 個のモジュールから構成されており、それぞれを実装するスロットを M_1, M_2, \dots, M_{n_M} とする。
- 製品 P^i のスロット M_j に実装されるモジュールを m_j^i ($i = 1, 2, \dots, n_P; j = 1, 2, \dots, n_M$) とする。
- モジュール m_j^i の内容は属性変数のベクトル $x_j^i = [x_{j,1}^i, x_{j,2}^i, \dots, x_{j,n_j^A}^i]^T$ により表現される。スロット M_j に実装されるモジュールについての属性変数の総数は n_j^A とする。

以上により、製品 P^i の内容は属性変数ベクトル x_j^i を連結したベクトル $z^i = [x_1^{iT}, x_2^{iT}, \dots, x_{n_M}^{iT}]^T$ により表現でき、製品系列統合化設計問題における元来の設計変数は $[z^{1T}, z^{2T}, \dots, z^{n_P T}]^T$ として表現できる。

2.3 類似設計のパターン さらに、類似設計でのモジュール毎の類似性を以下のように定義する^{†1}。

独自モジュール設計: 異なる製品のあるスロットに全く異なるモジュールを導入する。すなわち、すべての属性変数を独立に決定することができる。

類似モジュール設計: 異なる製品のあるスロットに部分的に類似したモジュールを導入する。すなわち、一部の属性変数を相互に等しく拘束する一方で、その他の属性変数は独立に決定できる。

共通モジュール設計: 異なる製品のあるスロットに同一のモジュールを導入する。すなわち、すべての属性変数を相互に等しく拘束する。

加えて、類似モジュール設計を、そのモジュールのスケールを意味する特定の属性変数(以下では代表属性と呼ぶ)を増加させる一方で、その他の変数は同一に保つ設計に限定する^{†2}。代表属性を x_j^i のなかの $x_{j,1}^i$ とするとき、スロット M_j において製品 P^{i_1} から P^{i_2} へと類似モジュール設計を行う場合、すなわち、 $m_j^{i_1}$ から $m_j^{i_2}$ へとストレッチを行う場合、以下の制約条件を考える必要が生じる。

$$x_{j,1}^{i_2} > x_{j,1}^{i_1} \quad (1)$$

$$x_{j,k}^{i_2} = x_{j,k}^{i_1} \quad (k = 2, 3, \dots, n_j^A) \quad (2)$$

また、共通モジュール設計として P^{i_1} と P^{i_2} の2つの製品がスロット M_j において同一のモジュールを用いる場合には、以下の制約条件を考える必要が生じる。

$$x_{j,k}^{i_2} = x_{j,k}^{i_1} \quad (k = 1, 2, \dots, n_j^A) \quad (3)$$

2.4 システム制約 すべての製品はそれぞれの機能を実現するために一定の条件を満たす必要がある。個々の製品に対する要求仕様が異なることから、それらの内容は相互に異なったものとなる。すなわ

^{†1} 第1報⁽²⁾では、類似モジュール設計における基盤設計と展開設計を明示的に指定したが、本報では、どれが基盤設計になるかをも含めて設計を考える。

^{†2} このような設計は典型的には航空機設計におけるストレッチという状況に対応するものである。すべての製品についての類似モジュール設計において、この種の代表属性が明確に存在しているわけではないが、数理的な枠組みに基づいた最適設計を展開するためには、ここでの内容に相当する対象モデルを確立することが肝要である。一方、本論文では代表属性をモジュール毎に一変数に限定しているが、複数の代表属性によって表される類似モジュール設計を取り扱うためには、本論文での計画モデルを何らかの形で拡張する必要がある。

ち、各製品 P_i は以下の制約条件を満たす必要がある。

$$z^i \in \text{Feasible}(s^i) \quad (i = 1, 2, \dots, n_p) \quad (4)$$

ここで、 s^i は製品 P^i に与えられた要求仕様であり、 $\text{Feasible}(\cdot)$ は s^i のもとでの z^i の実行可能領域を表しているものとする。

2.5 総製造コストと期待利益についてのモデル

製品系列の統合化設計における最適性の指標としては、個別の製品についての指標ではなく、すべての製品のすべてのユニットの製造に関わる内容を評価する必要があることから、製造業者に期待される最終利益を想定する。その本来の内容は複雑なものであるが、ここでは、計画段階で何らかの評価を得ることを目的として、 z^i ($i = 1, 2, \dots, n_p$) で表される製品の内容に従う比較的単純なモデルを用いる⁽²⁾。その要旨は、まず、費用を設計・開発費、設備費、生産費に分割する。前2者については、製品やモジュールの内容と種類数に従って算出する。生産費は、さらに、材料費と加工費に分割し、後者については習熟効果を加味する。続いて、製品の性能に基づいて運用における効用から価格を算出し、一定の期間、生産と販売を続けた際の収支を利率を加味して計算することにより、最終的に期待される残存利益を求めるというものである。

2.6 設計パターンの相違に依存する部分 上記のモデルの具体的な内容については第1報⁽²⁾に示した通りであるので省略するが、Class III 問題のための最適化法を構成する関係上、2.3項に示した各設計パターンに依存する部分を抜き出して、以下に示しておく。

各コスト項目のうち、設計・開発費は各モジュールの質量に比例するものとし、類似設計の効果は対応する質量の差に比例するものとする。すなわち、製品 P^i の設計・開発費 C_D^i は次式で与えるものとする。

$$C_D^i(z^i) = \sum_{j=1}^{n_M} C_{D_j}^i(x_j^i) \quad (5)$$

$$C_{D_j}^i(x_j^i) = \begin{cases} \alpha_{D_j} W_j^i & \dots \text{独立設計の場合} \\ \left(\beta_{D_j} \frac{W_j^i - W_j^{iBase}}{W_j^{iBase}} + \gamma_{D_j} \right) C_{D_j}^{iBase} & \dots \text{拡張設計の場合} \\ 0 & \dots \text{共通化設計の場合} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 α_{D_j} , β_{D_j} , γ_{D_j} は製品やモジュールの種類により定まる係数である。 W_j^i は m_j^i の質量であり、その主要な属性をもとに見積もることができるものとする。

上式における「拡張設計」は、 m_j^i が m_j^{iBase} (以下ではこれを「基盤設計」と呼ぶ) という別のモジュールからストレッチされた類似モジュール設計であることを

意味している。すなわち、 m_j^{iBase} の費用は式(6)の第1項で算出する一方、 m_j^i の費用は式(6)の第2項で算出する。また、「共通化設計」は m_j^i と m_j^{iBase} とが共通モジュール設計になっていて、 m_j^{iBase} の費用は式(6)の第1項で算出する一方、 m_j^i の費用は式(6)の第3項で算出する。

なお、設備費 C_F^i についても、質量 W_j^i ではなく、代表属性 $x_{j,1}^i$ をもとに計算を行うことを除くと、式(6)と同じ形式で算出できるものとしている。したがって、後述の箇所最適化計算法を構成するために式(6)を変形していくが、一連の操作は設備費 C_F^i についても同様に適用する必要がある。以下では、紙面の都合上、設備費についての変形操作を記述から省略する。

2.7 原問題の定式化 以上により、Class III の最適設計問題についての定式化は以下ようになる。

設計変数 … 各製品の各モジュールについて、独立設計・拡張設計・共通設計のいずれの方策を用いるかを組合せ的に表す「設計パターン」。全製品についての全属性変数 z^i ($i = 1, 2, \dots, n_p$)。

制約条件 … 式(4)で与えられる各製品についてのシステム制約。設計パターンに従って属性変数に付与される式(1), (2), (3)の各制約条件。

目的関数 … 2.5項で論じた製造者の最終期待利益。

以上の内容は、設計パターンが整数変数により表現できれば、混合整数非線形制約条件付最適化問題となるが、いずれにしても、組合せ最適化の問題となる。

3 同時最適化問題のための最適化法

3.1 最適性における階層性 Class III のための最適化法を構成するに当たって、設計空間における階層性に着目する。上述の定式化には類似性パターンについての組合せ的な部分とモジュール属性についての連続的な部分が含まれている。それらのうち、前者において、独自モジュール設計と共通モジュール設計には方向性はないが、類似モジュール設計には方向性が存在している。すなわち、 m_j^{i1} を拡張して m_j^{i2} とするのか、 m_j^{i2} を拡張して m_j^{i1} とするのか、を決定する必要があり、その内容に従って、式(1)における不等号の方向が定まるようになっている。そこで、組合せ的な部分を、各モジュールスロット毎のそもそもの類似性や共通性に関わる部分と、そのもとでの類似性についての方向性に関わる部分とに分けることにする。

以上を踏まえて、設計変数の空間を以下の3つの階層に分割して把握する。

- (i) 類似性パターン … 各モジュールスロット毎に各製品が独立であるか、類似であるか、共通である

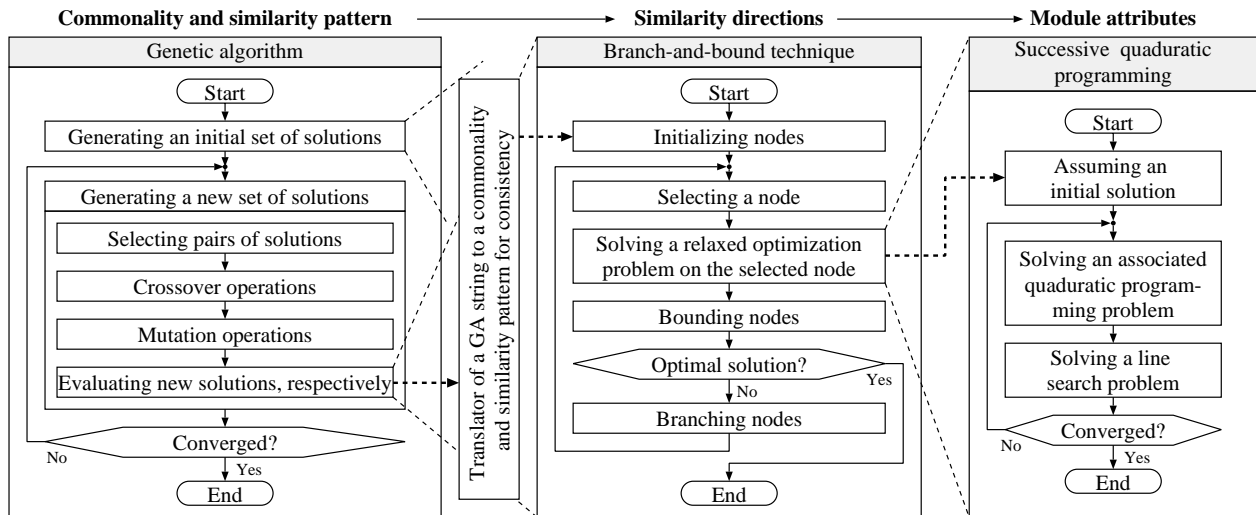


Fig. 1 Outline of optimization method

か、についてのパターン。

- (ii) 類似性方向 … (i) のパターンにより相互に類似であると定められたモジュールの間で、いずれが基盤設計であり、拡張設計であるかを表す方向。
- (iii) モジュール属性 … (i) のパターンと (ii) の方向により規定される部分連続空間における全製品の全モジュールについての属性変数。

このとき、(i) での内容は最適分割問題、(ii) での内容は 0-1 整数計画問題、(iii) での内容は制約条件付非線形計画問題となっている。また、原問題からみた (ii) での各問題についてのそれ以下の内容、(ii) からみた (iii) での各内容は、それぞれに相互に重複のない部分問題となっている。

以上の階層性のもとで、本研究では、(i) 層の内容については、多数の組合せを含んでいるものの連続変数についての内容を排除できていることから、遺伝的アルゴリズム (GA)⁽⁴⁾ を用いる。(ii) 層の内容については、数理的には明確な定式化が可能であるものの、依然として組合せ最適化の問題であることから、分枝限定法⁽⁵⁾ を用いる。さらに、(iii) 層の内容については、連続変数についてのものであることから、逐次 2 次計画法 (SQP)⁽⁶⁾ を用いる。

3.2 最適化法の手順 図 1 は上記の構成に従って 3 つの方法をハイブリッド化した最適化法の手順を示したものである。まず、GA が類似性パターンについての解を探索する。その過程で新たに類似性パターンが生成されると、その原問題における最適性を類似性方向とモジュール属性を分枝限定法により定めることにより決定する。一方、分枝限定法における限定操作においては、各ノードについての緩和問題を SQP によ

り解くことによって得られる下界値を参照する。これらの GA と分枝限定法、分枝限定法と SQP との連携によって得られる最終的に GA において収束した解は、3 つの階層の間での部分問題の関係により、Class III 問題における最適解となる。

以下では、本方法の各部について説明する。

3.3 類似性パターンの表現 類似性パターンは GA により探索するが、まず、そのパターンを各スロット毎のパターンに分割して考える。パターンの最適化は上述のように分割問題となっているが、その意味するところは、共通モジュール設計として同一のモジュールを用いる製品のグループ、および、類似モジュール設計として共通の基盤設計のモジュールとそれに基づく拡張設計のモジュールとを用いる製品のグループを指す。この意味に従って、あるパターンを以下の手順により構成的に表現するようにする。

- (i) 特定の製品対の間での部分的な関係を、独自、類似、共通のいずれかとして暫定的に定義する。
- (ii) 暫定的な部分関係相互の整合性を調整して、全体としてのパターンを定義する。

ステップ (i) での部分関係は以下の変数により表現する。

$$\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = \begin{cases} 0 & \dots & m_j^{i_1} \text{ と } m_j^{i_2} \text{ は独自である。} \\ 1 & \dots & m_j^{i_1} \text{ と } m_j^{i_2} \text{ は類似である。} \\ 2 & \dots & m_j^{i_1} \text{ と } m_j^{i_2} \text{ は共通である。} \end{cases}$$

($i_1 = 1, 2, \dots, n_p$;
 $i_2 = i_1 + 1, i_1 + 2, \dots, n_p$; $j = 1, 2, \dots, n_M$) (7)

ここで、変数 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}$ の総数は $n_M n_p C_2$ となる。

上記の変数により定義されたパターンに対して、ステップ(ii)においては、以下の書き換え規則を、いずれの規則も当てはまらなくなるまで、繰り返して適用することにより、全体としての整合性を調整する。

- $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 2 \wedge \xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_3} = 2 \wedge \xi_j^{i_2 \leftrightarrow i_3} \neq 2$ ならば、 $\xi_j^{i_2 \leftrightarrow i_3} = 2$ とする。
- $\xi_j^{i_2 \leftrightarrow i_3} = 2 \wedge \xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 2 \wedge \xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_3} \neq 2$ ならば、 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_3} = 2$ とする。
- $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_3} = 2 \wedge \xi_j^{i_2 \leftrightarrow i_3} = 2 \wedge \xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} \neq 2$ ならば、 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 2$ とする。
- $\left((\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} \neq 0 \wedge \xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_3} = 1) \vee (\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 1 \wedge \xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_3} \neq 0) \right) \wedge \xi_j^{i_2 \leftrightarrow i_3} = 0$ ならば、 $\xi_j^{i_2 \leftrightarrow i_3} = 1$ とする。
- $\left((\xi_j^{i_2 \leftrightarrow i_3} \neq 0 \wedge \xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 1) \vee (\xi_j^{i_2 \leftrightarrow i_3} = 1 \wedge \xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} \neq 0) \right) \wedge \xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_3} = 0$ ならば、 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_3} = 1$ とする。
- $\left((\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_3} \neq 0 \wedge \xi_j^{i_2 \leftrightarrow i_3} = 1) \vee (\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_3} = 1 \wedge \xi_j^{i_2 \leftrightarrow i_3} \neq 0) \right) \wedge \xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 0$ ならば、 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 1$ とする。

ただし、 $i_1 < i_2 < i_3$ が成り立っているものとする。

以上の操作によりあるスロット M_j における類似性パターンは以下のように帰結される。

- 製品群 $P^{i_1}, P^{i_2}, \dots, P^{i_p}$ が共通のモジュールを用いる場合、 $\forall i_\alpha, i_\beta \in \{i_1, i_2, \dots, i_p\}, i_\alpha < i_\beta$ に対して、 $\xi_j^{i_\alpha \leftrightarrow i_\beta} = 2$ が成り立つ。
- 製品群 $P^{i_1}, P^{i_2}, \dots, P^{i_p}$ が類似モジュール設計を行う場合には、 $\forall i_\alpha, i_\beta \in \{i_1, i_2, \dots, i_p\}, i_\alpha < i_\beta$ に対して、 $\xi_j^{i_\alpha \leftrightarrow i_\beta} = 1$ が成り立つ。
- ある製品 P^{i_α} が独自のモジュールを用いる場合、 $\forall i_\beta; i_\alpha < i_\beta \leq n_p$ に対して $\xi_j^{i_\alpha \leftrightarrow i_\beta} = 0$ が、 $\forall i_\gamma; 1 \leq i_\gamma < i_\alpha$ に対して $\xi_j^{i_\gamma \leftrightarrow i_\alpha} = 0$ が成り立つ。

3.4 パターンの遺伝的アルゴリズムによる最適化

GA は $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}$ 、 $(i_1 = 1, 2, \dots, n_p; i_2 = i_1 + 1, i_1 + 2, \dots, n_p; j = 1, 2, \dots, n_M)$ として表現される類似性パターンの最適化を担う。GA ではビット列や重複のない記号の列を設計解の表現に用いることが多いが、 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}$ は3進数となっている。これをビット列による表現に転換するために、各 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}$ に対して、 $\widehat{\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}} \in \{0, 1, 2, 3\}$ なる2ビット変数を導入する。その上で、以下の $\widehat{\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}}$ から $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}$ への翻訳規則を導入する。 $\widehat{\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}} = 0$ であれば、 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 0$ とする。 $\widehat{\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}} = 1$ あるいは $\widehat{\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}} = 2$ であれば、 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 1$ とする。 $\widehat{\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}} = 3$ であれば、 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 2$ とする。以上により、類似性パターンは、スロット M_j ($j = 1, 2, \dots, n_M$) 毎に $\widehat{\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}}$ ($i_1 = 1, 2, \dots, n_p; i_2 = i_1 + 1, i_1 + 2, \dots, n_p$) を順に並べて連結して $\vec{\xi}_j$ とし、さら

に、それらをスロットの順に連結して $\vec{\Xi}$ とすることにより、 $2 n_M n_p C_2$ ビットの変数として操作できる。

なお、類似モジュール設計の可能性を前もって排除できる場合には、 $\forall i_1, i_2$ について $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} \neq 1$ が成り立つ。これは、本来、2ビットではなく1ビットで表現できるものであり、1ビットで表現した方がGAにおける設計解表現を短くできることから、 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}$ の定義を以下のように変更する。 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 0$ は $m_j^{i_1}$ と $m_j^{i_2}$ がそれぞれに独自モジュール設計であることを意味し、 $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2} = 1$ は $m_j^{i_1}$ と $m_j^{i_2}$ が共通モジュール設計であることを意味するものとし、 $\widehat{\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}}$ から $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}$ への翻訳規則を用いないものとする。

以上の $\vec{\Xi}$ による設計解表現に対していわゆる Simple-GA⁽⁴⁾ を適用する。その際の遺伝的操作には、ビット列における隣接関係が重要な意味を伴わないことから、一様交叉を用い、突然変異としてはビット反転を用いる。さらに、最適化性能を向上させるために、線形スケールリング、 σ -切捨て、期待値戦略、エリート保存戦略を用いる。

3.5 類似性方向とモジュール属性に関する部分問題

GA において類似性パターンを固定した場合、そのもとの部分問題の定式化は以下ようになる。

設計変数 … 各モジュールスロットにおいて類似モジュール設計を行うとされている製品間での類似性方向・全製品についての全属性変数。

制約条件 … 各製品についてのシステム制約。与えられる類似性パターンに従って定まる式(1)、(2)、(3)の各制約条件。ただし、式(1)における不等式の方向は事前には固定されていない。

目的変数 … 2.5項で論じた製造者の最終期待利益。

なお、その計算内容は式(6)などにおける類似性方向による項の選択に依存している。

この定式化に含まれる組合せは類似性方向に関するものだけであり、それは一連の製品の中でどの製品のモジュールを基盤設計とするかを決定することに他ならない。すなわち、製品群 $P^{i_1}, P^{i_2}, \dots, P^{i_n}$ がスロット M_j において類似モジュール設計を行うものとされているとし、基盤設計となるモジュールを $i_{Base} \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ と書くとき、方向の決定問題は以下のように数学的に表すことができる。まず、式(1)の不等式の方向は以下のように確定できる。

$$x_{j,1}^i > x_{j,1}^{i_{Base}} \quad \text{for } \forall i \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\}, i \neq i_{Base} \quad (8)$$

次に、式(6)などにおける項の選択は以下のように確

定できる．

$$C_{D_j}^i(x_j^i) = \begin{cases} \alpha_{D_j} W_j^i & \text{for } i = i_{Base} \\ \left(\beta_{D_j} \frac{W_j^i - W_j^{i_{Base}}}{W_j^{i_{Base}}} + \gamma_{D_j} \right) C_{D_j}^{i_{Base}} & \text{for } \forall i \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\}, i \neq i_{Base} \end{cases} \quad (9)$$

式(8), (9) などにおける代替性を排除するために, モジュール群 $m_j^i, i \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ に対して, 以下の0-1 整数変数を導入する．

$$\delta_j^i = \begin{cases} 1 & \text{for } i = i_{Base} \\ 0 & \text{for } \forall i \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\}, i \neq i_{Base} \end{cases} \quad (10)$$

なお, これらの変数の間には以下の制約条件を課す．

$$\sum_{i \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\}} \delta_j^i = 1 \quad (11)$$

以上により, 式(8) は以下のように書き直すことができる．

$$x_{j,1}^{i_\alpha} + \Delta_j (1 - \delta_j^{i_\beta}) \geq x_{j,1}^{i_\beta} \quad (12)$$

for $\forall i_\alpha \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\},$
 $\forall i_\beta \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\}, i_\alpha \neq i_\beta$

ただし, Δ_j は十分大きな正の定数である．なお, この Δ_j は, 式(8) の制約条件を満足することを保証できる程度に大きい必要があるが, 余りにも大きい場合には後述の連続緩和問題の性質により分枝限定操作が非効率的になるため, 適度に小さい数である必要もある．その程度は個別の事例における各モジュールの内容に依存するが, $x_{j,1}^i$ に予期される最小値を $\underline{x}_{j,1}^i$, その最大値を $\overline{x}_{j,1}^i$ とする場合には, $\overline{x}_{j,1}^i - \underline{x}_{j,1}^i$ を若干, 上回る程度に Δ_j を定めることができる．

また, 式(9)などは以下のように書き直すことができる．

$$C_{D_j}^i(x_j^i) = \alpha_{D_j} W_j^i \delta_j^i + \sum_{\substack{k \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\} \\ k \neq i}} \left(\beta_{D_j} \frac{W_j^i - W_j^k}{W_j^k} + \gamma_{D_j} \right) \alpha_{D_j} W_j^k \delta_j^k$$

for $\forall i \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ (13)

最終的に, 部分問題は以下のように書き直すことができる．

設計変数 … 類似モジュール設計を行う部分についての式(10)により定義される類似性方向についての0-1 整数変数．全製品についての全属性変数．

制約条件 … 各製品についてのシステム制約．与えられた類似性パターンに従って定まる式(12), (2), (3)の各制約条件．0-1 整数変数 δ_j^i についての $\delta_j^i \in \{0, 1\}$ という条件と式(11)の制約条件．目的変数 … 2.5項で論じた製造者の最終期待利益．なお, その計算において類似設計のモジュールに関する部分については, 式(6)などに代えて, 式(13)などを用いる．

3.6 部分問題のための分枝限定法 分枝限定法における限定操作での緩和問題として前項で導いた部分問題に対する連続緩和問題を用いる．すなわち, 式(10)についての制約条件である $\delta_j^i \in \{0, 1\}$ を $0 \leq \delta_j^i \leq 1$ で置き換える．この連続緩和問題は連続空間における制約条件付非線形最適化問題であることから, 前述のようにSQPを用いて解く．

一方, 分枝限定法において枝の選択戦略はその性能を左右する重要な因子である．ここでは, すべての整数変数が0-1変数であることから探索木が2分木になっていることに着目し, 深さ優先戦略を用いる．さらに, ある変数 δ_j^i について, $\delta_j^i = 0$ か $\delta_j^i = 1$ かを選択する場合には, $\delta_j^i = 1$ に相当する枝を優先することにする．これは, 式(11)のもとでは, $\delta_j^i = 1$ を定めれば, 他の変数 $\forall \tilde{i} \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\}, \tilde{i} \neq i$ を $\delta_j^{\tilde{i}} = 0$ とし固定できることに着目したことによるものである．

4 航空機設計における最適化計算の事例

4.1 ストレッチによる航空機設計 第1報⁽²⁾では座席数を同一とする2種類の航空機を同時に設計する問題を事例として取り上げたが, 本報では同様の内容について5種類の航空機を同時に設計する問題をClass III問題の一例として取り上げる．民間輸送機においては, 投資額が膨大であることもあって, 製品系列を念頭に置いた設計が行われることが一般的であり, 例えば, Boeing 777では当初から, 基盤設計を異なる座席数に対して胴体を延伸したり, 長距離飛行に対してエンジンを入れ換えたりする計画が立案されている⁽⁷⁾．なお, 航空機設計についてのモデルやそれに含まれる各種の係数の値は第1報⁽²⁾と同一のものを用いるものとした．すなわち, モデルはTorenbeek⁽⁹⁾やRaymer⁽⁸⁾による基本設計のためのものを用い, 各係数値については, 例えば, 式(6)におけるものは $\alpha_{D_j} = 1.6 \times 10^7$ [¥/kg], $\beta_{D_j} = 0.5$, $\gamma_{D_j} = 0.1$, $\alpha_{F_j} = 1.6 \times 10^9$ [¥/m] (ただし, エンジンについては $\alpha_{F_j} = 1.6 \times 10^6$ [¥/kgf] とする) とした．そのほかの係数については, 本報では, 紙面の都合上, 省略する．

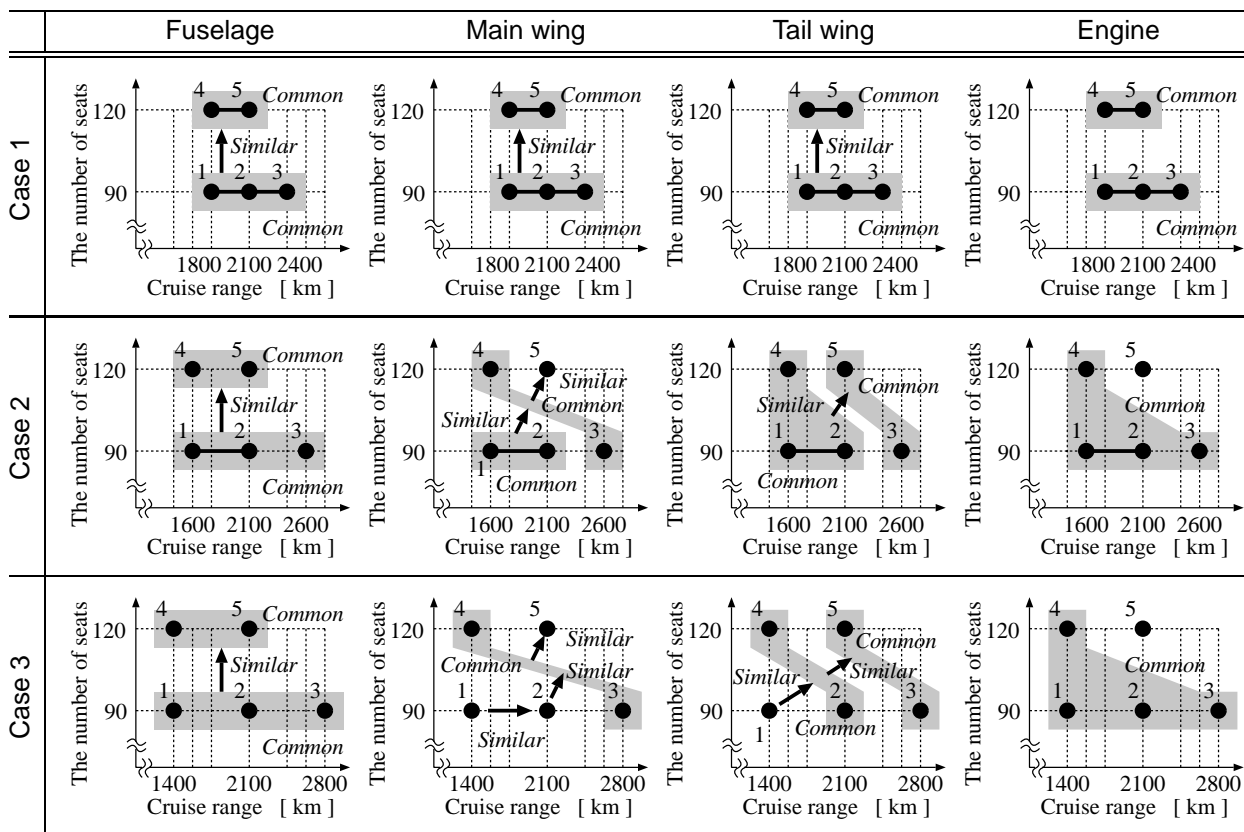


Fig. 2 Design conditions and optimal design patterns

4.2 最適化計算例 製品系列統合化設計における最適化の意義を明らかにするために、図2中にも示すように、異なる設計要求に対して5種類の航空機を設計する3つの場合を比較する。各ケースにおいて、各航空機の要求仕様は、航続距離が1400, 1600, 1800, 2100, 2400, 2600, 2800 [km]のいずれかであり、座席数は90, 120 [人]のいずれかであるものとし、それらを台形状に配置する。3つのケース相互の違いは航続距離の相違の程度が順に大きくなっている点にある。なお、各航空機の生産台数は200, 生産期間は15 [年]とする。

図2中の各区画は、各ケースにおける最適化結果における、胴体・主翼・尾翼・エンジンの各モジュールスロット毎の航空機間での類似性パターンを示したものである。各区画における点は P^1, P^2, P^3, P^4, P^5 の各航空機を表しており、灰色の影で結ばれている航空機はそのスロットにおいて同一のモジュール設計を共有していることを示している。矢印は根元から先に向かってストレッチを行う類似モジュール設計が行われることを表している。また、太い線で連結された点は、すべてのモジュールが同一のものとなって、航空機そのものが同一になることを示している。最適化計算の結

果、ケース1では P^1 と P^2 と P^3 が同一に、 P^4 と P^5 が同一になって、全体として2種類の航空機で済ませる方が経済的であることが判明している。これに対して、ケース2では P^1 と P^2 が同一のものとなるものの、4種類の航空機が必要であることが導かれている。さらに、ケース3では5種類の航空機が必要であることが導かれている。以上の傾向は後者の方が要求仕様の相違が大ききことによるものであるが、具体的な相違の内容は各モジュール毎の類似性パターンが相互影響のもとでバランスした結果であり、最適化計算によらなければ判明しないものである。

表1は、上記のなかでもケース2の要求仕様について、各航空機を独自に設計した場合と統合化設計を行った場合とを比較したものである。 P^5 のエンジンを除くすべてのモジュールのサイズが統合化設計により拡大する一方で、設計・開発費と設備費は大幅に低減することができており、加えて、生産における習熟効果が共通化や類似化によって加速されており、最終的な期待利益もマイナスからプラスに転じている。以上の内容は、本計算事例のために想定したデータに依存するものではあるが、最適化計算によって各種項目間のトレードオフを評価して最適な製品系列を設計で

Table 1 Optimization result for Case 2

	Totally independent design					Optimized design				
	p^1	p^2	p^3	p^4	p^5	p^1	p^2	p^3	p^4	p^5
Width of main wing [m]	22.24	23.88	26.09	25.51	27.52	25.58	25.58	27.18	27.18	28.60
Width of horizontal tail wing [m]	7.76	8.30	9.32	8.97	9.71	9.08	9.08	9.98	9.08	9.98
Height of vertical tail wing [m]	3.41	3.85	4.84	3.97	4.61	4.22	4.22	5.06	4.22	5.06
Engine power [kgf]	5,564	6,257	6,934	7,323	8,201	7,269	7,269	7,269	7,269	8,139
Length of fuselage [m]	27.47	27.47	27.47	30.93	30.93	27.47	27.47	27.47	30.93	30.93
Design and development cost [$\times 10^6$ 円]	147,897	159,277	172,358	194,297	209,193	169,992	12,250	19,246	39,618	
Facility cost [$\times 10^6$ 円]	106,304	111,608	119,439	122,739	129,557	117,788	10,199	7,164	21,115	
Material cost per unit [$\times 10^6$ 円]	1,600	1,728	1,860	2,106	2,271	1,787	1,823	1,917	2,120	2,276
Process cost for the first unit (without learning effect) [$\times 10^6$ 円]	2,588	2,787	3,016	3,400	3,661	2,975	2,981	3,160	3,487	3,709
Process cost for the last unit in the 1st year [$\times 10^6$ 円]	1,423	1,532	1,658	1,869	2,013	1,193	1,195	1,273	1,418	1,609
Process cost for the last unit in the 5th year [$\times 10^6$ 円]	969	1,043	1,129	1,272	1,370	812	814	867	965	1,096
Process cost for the last unit in the 10th year [$\times 10^6$ 円]	823	886	959	1,081	1,163	690	691	736	820	930
Process cost for the last unit in the 15th year [$\times 10^6$ 円]	748	805	871	982	1,058	627	628	669	745	846
Total process cost per model [$\times 10^6$ 円]	515,306	555,930	599,483	677,720	730,369	521,156	528,685	558,183	618,675	676,027
Total manufacturing cost [$\times 10^6$ 円]			4,551,478					3,300,099		
Price per unit [$\times 10^6$ 円]	2,923	3,904	4,811	4,148	5,544	2,860	3,900	4,793	4,195	5,584
Total profit (objective) [$\times 10^9$ 円]			-865.45					1,037.62		

きることを示している。

4.3 最適化計算の性能 Class III の問題は組合せ問題であるが、上記の問題に含まれる組合せは $4 \cdot {}_5C_2 = 40$ 個の $\xi_j^{i_1 \leftrightarrow i_2}$ により表すことができ、GA で操作するビット列の長さは 70 となる ($2 \cdot 4 \cdot {}_5C_2 = 80$ とはならず、4 つのモジュールのうち、エンジンについては類似モジュール設計を考えないため、 $2 \cdot 3 \cdot {}_5C_2 + 1 \cdot 1 \cdot {}_5C_2 = 70$ となる)。これに対する GA の適用に当っては、個体群のサイズを 100、交叉確率を 0.6、個体毎の突然変異確率を 0.10、世代数を 100 とした。図 3 は、前項に示した最適化計算のうち、ケース 1 における計算過程の様子を示したものであり、横軸は世代数、縦軸は目的関数の各世代における最善値・平均値・最悪値を示している。最適解は 44 世代で見つかり、100 世代の計算に要する時間は Sun Ultra 10 Workstation (440MHz UltraSPARC-IIi) でおよそ 14.5 時間である。図の状況は GA における適切な探索過程における傾向に対応するものであることから、本研究で構成した最適化法により適切な最適解を見つけることができているものと推察することができる。

5 結 言

本報では、製品系列についての設計の中でも、モジュール属性とモジュール属性とを同時に決定する Class III の問題を取り上げ、最適性についての階層関係に基づいて遺伝的アルゴリズムと分枝限定法と逐次 2 次計画法とをハイブリッド化した最適化計算法を提

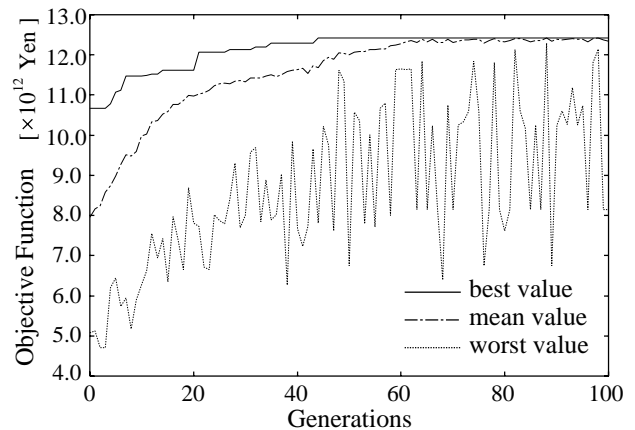


Fig. 3 Optimization history

案した。また、航空機のストレッチによる製品系列の事例に適用して、その妥当性と有効性を検証した。

一連の研究⁽²⁾⁽³⁾は、製品系列についての最適設計問題の中でも、最も基本的な 3 つの類型に対する方法論を提案したものである。今後は、これらの成果を基盤としつつ、より実際的な設計問題に向けての方法論を構築していく予定である。

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), pp. 675-682.
- (3) 藤田・坂口, “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),” 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 68, No. 666, (2002), pp. 683-691.
- (4) Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, (1989), Addison-Wesley.
- (5) 茨木・福島, *FORTRAN77 最適化プログラミング*, (1991), 岩波書店, pp. 395-452.
- (6) 文献(5)の pp. 167-207.
- (7) Sabbagh, K, *Twenty First Century Jet – The Making and Marketing of The Boeing 777*, (1996), Scribner.
- (8) Raymer, D. P., *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, (1989), AIAA.
- (9) Torenbeek, E., *Synthesis of Subsonic Airplane Design*, (1976), Delft University Press.