



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1報, 最適化問題の構造と様相）
Author(s)	藤田, 喜久雄
Citation	日本機械学会論文集 C編. 2002, 68(666), p. 675-682
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2985
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

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)*

藤田 喜久雄 *¹

Optimization Methodologies for Product Variety Design

(1st Report: Design Optimality across Multiple Products and its Situation)*

Kikuo FUJITA *²

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

This paper discusses product variety design under the viewpoint of design optimization paradigm. Product variety design means the simultaneous design of multiple products toward higher optimality beyond ordinary design methods for a single product. It is expected to be an excellent manufacturing strategy, since design optimization basis is expanded. The paper first shows the possibilities and difficulties of design optimization for multiple products under fixed product architecture. Such optimization demands to determine the contents of modules and their combinations under modular architecture. This indicates that product variety optimization includes three classes of optimization problems, attribute assignment, module combination and simultaneous design of both. The paper defines generic framework on the optimality as the prerequisite for developing optimization techniques for respective classes. Then, stretch-based aircraft design deployment, which is an example of the first class, is explored by means of enumeration and successive quadratic programming, after developing the mathematical model for the evaluation of total profit of a manufacturer through the entire production of all units of different models. Its numerical result demonstrates the necessity and effectiveness of optimization paradigm in product variety design.

Key Words : Product Variety Design, Design Optimization, Design Engineering, Product Family, Modular Architecture, Mathematical Modeling, Generic Frameworks

1 緒 言

今日の製品設計においては、個別の製品を対象として優れた設計を行うことのみならず、背景となるコンセプトなど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つた。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。しかしながら、それによる効果は概念的には自明であるものの、考慮すべき内容が広範になることやそれに対応するための組織上の問題も伴って、現状の設計における実践は経験的なレベルに留まっていると言わざるを得ない。

本研究は、上記の動向に対する合理的な設計の方法論を提供することを目的として、複数の製品群を対象とした設計問題における最適性の構造を分析した上で、いくつかの典型的な状況に対する最適設計のため

の方法論を提案しようとするものである。第1報においては、一連の製品群を対象として優れた設計を行おうとする状況を「製品系列統合化設計」と呼び、その際の設計タスクの構造を分析した成果⁽¹⁾を基盤としつつ、まず、システムの設計最適化という視点のもとで、数理計画法に基づいた最適設計が適用可能な設計の内容を明確にし、最適化問題の類型として3つのクラスを定義する。その上で、第1のクラス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と効果を明確にする。なお、第2報⁽²⁾では、第2のクラスである既存モジュールの共通化設計問題についての最適化法を、第3報⁽³⁾では、第3のクラスであるモジュール属性とモジュール組合せの同時設計問題についての最適化法を提案する。

2 製品系列の統合化設計への要請と背景

2.1 製品設計における視野の拡大 どのような設計が優れたものであるかを論じることは容易ではな

* 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).

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

い。これはそもそもその設計が元来は開放系における問題であることに対して、数理的な関係に基づいた何らかの合理性を求めようとすると、閉鎖系としての限定を行う必要があることにも関係しているが、設計に求められる視野は明らかに拡大してきている。例えば、旧来の最適設計においては単純な機能性能指標や質量などと直結したコスト指標を目的関数とした場合が多くたが、これは当時の一般的な設計における方針がそのような内容を目標としていたこととも関連しているはずである。これに対して、組立て性設計などの製造性設計⁽⁴⁾は製品を取り巻く経営環境と視野の拡大との相互作用によって出現してきた考え方であり、最近における対環境性設計も同様の状況展開のもとでその必要性が顕在化したものとして理解することもできる。一連の設計方法論における特徴は、特定の製品におけるライフサイクル、つまり製造・運用・廃棄などの全体を総合的に考えることによって、より総合的な視点から優れた設計を行おうとしている点にある。製品系列統合化設計の問題は、上記の観点に立てば、概念的には、個別製品のライフサイクルとは直交する方向に視野をさらに拡大しようとする、ポスト製造性設計として出現しつつある設計の課題として位置付けることもできる。モジュール設計⁽⁵⁾はこのような方向における一つの典型である。

2.2 設計対象の拡大による最適化における課題

複数の製品を設計対象とすることがシステムの設計最適化にもたらす数理的な変化は以下のように整理することができる。

まず、旧来からの設計最適化の枠組みを個別システム i に関する以下のある指標 j についての設計問題における最適解を求めようとするものであるとする⁽⁶⁾。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } \mathbf{x}_i \\ \text{that maximizes } f_j(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i) \\ \text{subject to } \mathbf{x}_i \in \text{Feasible}(\mathbf{p}_i) \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x}_i はシステム i の内容に対応する設計変数、 \mathbf{p}_i はシステム i の動作環境などに対応する設計パラメータ、 f_j は指標 j に対応する目的関数、 Feasible は実行可能領域である。なお、 f_j には上述のように例えば単純な機能性能指標や質量などと直結したコスト指標が相当する。

これに対して、一連の製品群、すなわち、複数のシステム $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ を対象とする製品系列についての設計最適化問題は、式(1)のもとでは直接的に

は、以下のように想定することができる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } \mathbf{z} = [\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_I^T]^T \\ \text{that maximizes} \\ F(f_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{p}_1), f_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{p}_1), \dots, f_J(\mathbf{x}_1, \mathbf{p}_1), \\ f_1(\mathbf{x}_2, \mathbf{p}_2), f_2(\mathbf{x}_2, \mathbf{p}_2), \dots, f_J(\mathbf{x}_2, \mathbf{p}_2), \\ \vdots \quad \vdots \quad \dots \quad \vdots \\ f_1(\mathbf{x}_I, \mathbf{p}_I), f_2(\mathbf{x}_I, \mathbf{p}_I), \dots, f_J(\mathbf{x}_I, \mathbf{p}_I)) \\ \text{subject to } \mathbf{x}_i \in \text{Feasible}(\mathbf{p}_i) \\ i = \{1, 2, \dots, I\} \end{array} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $F(\cdot)$ は何らかの製品系列に渡る総合的な指標であり、式(1)での $f_j(\cdot)$ に加えて開発費をはじめとする間接費についての指標 $f_i(\cdot)$ ($i = 1, 2, \dots, J; i \neq j$) を引数に含むことになる。

しかしながら、実際には式(2)の形式は妥当なものではない。製品系列の統合化設計は複数のシステム $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ における何らかの部分を共通化することによる間接費の削減効果などを期待したものであるため、共通性の表現として x_{i_1} と x_{i_2} の間でいくつかの変数について等式制約や不等式制約を課す必要があったり、それらの制約をどの変数の間に課すべきかということをそもそも決定する必要があったりする。

以上のことを踏まえれば、製品系列を統合的に考えた設計最適化を行うには、以下の内容を考える必要があることになる。

- 複数の製品間の共通性や類似性をどのように表現して最適化の対象とするのか。
- 総合的な最適性の指標をどのようにモデル化し、最適化計算の中でどのように用いるのか。
- 以上の2点によって拡大し困難になった最適化問題に対してどのような手段を用いれば、実用的かつ効率的に最適解を得ることができるのか。

3 製品系列の統合化設計における問題構造

具体的な設計最適化における課題について検討する前に、統合化設計そのものの問題構造を明らかにし、設計最適化の位置付けを明らかにしておく。

3.1 製品系列の表現における階層性 製品は言うまでもなくある種のシステムであることから、その表現において「システムとサブシステム」・「システム要素と属性」という関係をその基盤とすることができる。これらの関係は本来は階層的な再帰性をもつたものであるが、何らかの具体的な処理を行うためには特定のレベルに視点を定める必要がある。仮に、モジュールアーキテクチャ⁽⁷⁾のもとで特定の適切なレベルを設定した上で、製品・モジュール・属性という3

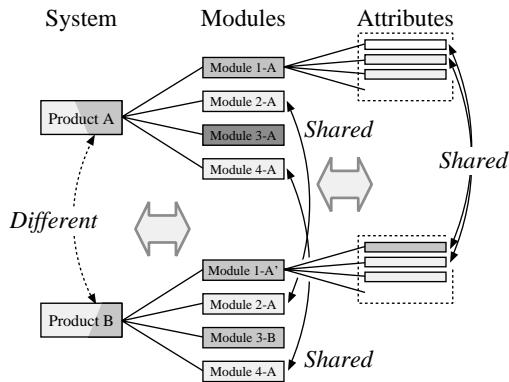


Fig. 1 System, modules and attributes

レベルによって表現できるものとすれば、製品系列の統合化設計は理解しやすい⁽¹⁾。つまり、その狙いは、図1にも示すように、異なる製品を構成する上で、あるモジュールに関しては共通のものを用いたり、また、異なるモジュールの間においても特定の属性要目を揃えてプロセスや部品などの共通化を達成したりすることによって、製品の競争力を向上させることができると期待できる点にある。

3.2 設計プロセスについてのタスク構造 図1の製品表現における階層性に着目すれば、製品系列を統合的に設計する際のタスクの内容は、設計目標を確立して多様な設計要求とそれらの間の相関性を分析する設計要求の分析タスク、システム構造⁽⁸⁾やアーキテクチャの選定⁽⁷⁾に関わるシステム構造のシンセシスタスク、幾何学的な属性などを制御するための離形として形態を定める形態のシンセシスタスク、それらのもとで具体的な製品群を確立する製品群の具体化タスクから成るプロセスとして構造化することができる⁽¹⁾。なお、最後のタスクは、さらに、属性値を具体化することによってシステムを構成するモジュールを確定するための属性値の具体化、実行可能なもののなかからモジュールの具体的な組合せを定めて個々の製品を具体化するためのモジュール組合せの選定の2つの局面に分解することもできる。

以上の内容において、第2段階のシステム構造と第3段階の形態に関するタスク群は製品群の多様性を拡大するための可能性を探求するものである一方、第4段階における製品群の具体化は製品系列を確定するために具体的な製品を確認して定めるものとなっている。これは、前者のタスクが組合せ論的には実現可能であるけれども採用されないモジュール組合せなどの仮想的な内容を含んでおり、それらが最終タスクで排除されることを意味している。

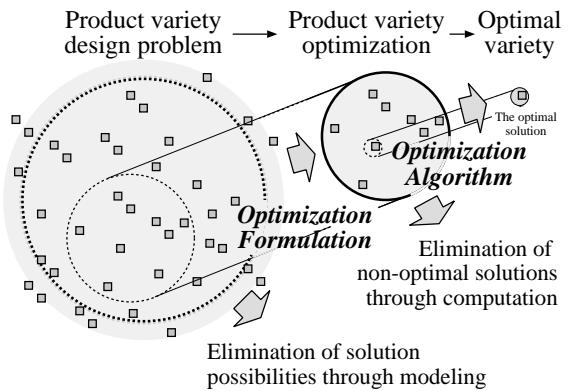


Fig. 2 The role of optimization

3.3 設計最適化の位置付け 図2は前項の内容を設計最適化の視点のもとで解釈したものである。何らかの設計最適化を行う場合、まず、対象システムの数理的なモデルを確立した上で、モデルの規定する実行可能領域のなかで想定した目的関数の値を最大(最小)にする解を何らかの数理計画法の手段によって得ることになる。この状況は製品系列の統合化設計においても成り立つものである。つまり、上述のタスク構造のうち、第1段階から第3段階までの内容は設計最適化の前提となるモデルを確定するためのものであり、また、第4段階の内容こそが設計最適化が担うべき内容であるとができる。したがって、最終的に得られる製品系列についての設計結果が優れたものであるためには、単に最適化を行うのみでは不十分であって、システム構造や形態についての設計タスクを通じて探索領域を適切に絞り込んでおくことが前提となる。手段である数理計画法の視点に基づけば、何らかの設計最適化を行うには、何らかの手段に適合する範囲にまで設計内容を事前に絞り込んでおくことが不可欠であるとも言える。後者の視点は、前節で述べた実用的かつ効率的な最適化法を確立し利用するという課題と照し合せた場合には、特に重要である。

4 製品系列の統合化設計と最適化

4.1 問題の定義領域とクラス 前節に示したタスク構造や設計最適化の位置付けを踏まえれば、最適化の対象となる内容は「各モジュールの内容」と「モジュールの組合せ」との2つから構成されていることになる。数理計画法の立場からみれば、前者は、属性値の決定であり、一般的にはそのものは制約条件付きの非線形最適化問題となることが期待できる。一方、後者そのものは単独ではいわゆる組合せ最適化問題となるはずである。これらの決定内容とそれぞれに適合

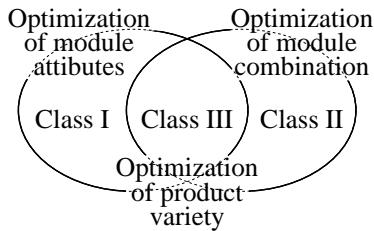


Fig. 3 Classification of product variety optimization problems

する最適化計算のための手段との対応関係を踏まえれば、図3にも示すように、製品系列の統合化設計における最適化問題は以下の3つのクラスに類別することができます。

Class I … あらかじめ定められたモジュール組合せのもとで、一連の属性値を決定する。

Class II … あらかじめ内容が定められたモジュールのもとで、それらの組合せを決定する。

Class III … モジュールの属性とモジュールの組合せとを同時に決定する。

以上の類別は具体的な設計最適化のための手段を構成する上での基準として重要である。

一方、設計最適化の位置付けを踏まえれば、個別の設計問題がどのクラスに当てはまるかという視点も重要である。例えば、規格の標準化が進むなどにより機能レベルが事前に決定されているような製品の場合には、製品を構成するモジュールそれぞれの内容レベルも事前に定まっていることが想定できることから、Class II の問題として扱える可能性が高い。一方、機能レベルにより製品の良し悪しが特徴づけられる技術主導による製品種類の少ないシステムの場合には、列挙法と組合せて Class I の問題として扱える可能性があることになる。つまり、Class III に対する方法は全体を包括することができるものの、個別的には Class I や Class II による設計最適化の展開も同様に重要である。

4.2 製品系列におけるコスト構造 具体的な最適化のための方法を検討するに先立って、製品系列を統合的に設計することの伴っている最適性の意味、つまり、式(2)における目的関数の典型的な内容を検討しておく。前述のように、製品系列における共通化によるメリットは主に間接費の低減によるものである。このことから、一つの視点として、製品系列の全体についての製造コストを最適性についての指標として考えることとし、以下のコスト分類を想定する。

生産量に依存する費用 … 個々の製品を製造するための材料費・加工費・組立て費などに代表され

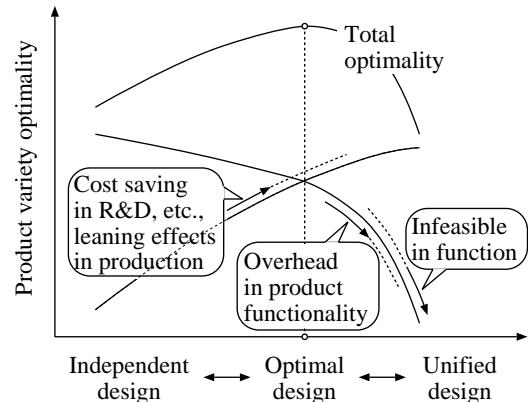


Fig. 4 Tradeoffs in product variety

る、製品やモジュールの生産量に依存する費用。基本的には生産量に比例するが、製造工程における習熟効果などをも加味する必要がある。製品やモジュールの種類数に依存する費用 … 製品やモジュールの設計開発費、各種の設備費などに代表される、製品やモジュールの種類の数に依存する費用。詳細を考えるには、サプライチェーンにおける在庫量などをも含める必要はある。その他の固定費 … 以上の2つの種別からは外れる各種の費用。コストの絶対レベルを推定する場合にはこの種別は重要ではあるが、製品系列の統合化設計におけるメリット・デメリットを論じる上で影響は少ないものと考えられる。

なお、これらのうち、第2の内容は従来からの個別製品についてのコスト構造⁽⁹⁾においては固定費に分類されていたものである。

4.3 最適性の背後にあるトレードオフ 前項の内容を踏まえれば、製品間で共通化を進めれば進めるほど、第2のコストを低減することができ、最適性は向上していくということになる。その一方では、共通化を進めれば進めるほど、特定の設計変数についての製品相互の制約条件が付与されていくことになり、式(1)の意味における実行可能領域が対応して狭められていいくことになる。このことは個別性能指標などに対応する $f_j(x_i, p_i)$ の悪化に直結するものであり、極端な場合には実行可能領域そのものがなくなってしまう場合も想定することができる。

図4は上記の状況を模式的に示したものである。図の横軸は共通化の度合いに対応し、左端は製品系列を全く考慮しない個別設計に相当し、右端は共通化を徹底的に進めて単一の製品をすべてのニーズに対応させる場合に相当する。縦軸は最適性についての何らか

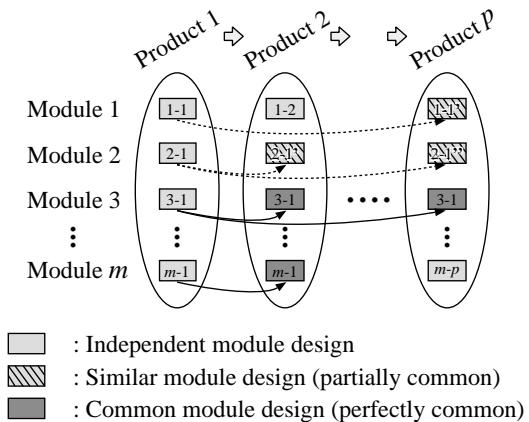


Fig. 5 Independent, similar and common module designs in stretch-based design deployment

の指標である。つまり、共通化によるメリットとデメリットの間にはトレードオフの関係が存在しており、設計最適化の役割はトレードオフのもとでの最適な共通化の度合いを数理的に求めようとすることがあるとすることができる。

5 Class I 問題のための最適設計法

本節では、ここまで内容に対する具体的な状況を例示する準備として、列挙法と Class I の問題に対する最適化計算とを組み合わせることにより、類似設計による製品系列の設計問題を取り扱うための方法を示す。

5.1 類似設計による製品系列の展開 類似設計は、ある基盤製品のもとで、特定モジュールの内容についてのサイズを変更することによって、類似の製品を効率的に展開しようとするものである。このような設計は設計開発コストの低減につながることから、規模の大きな技術システムの設計に導入される場合があり、航空機のストレッチ⁽¹⁰⁾は典型である。

図5は類似設計の状況を示したものである。つまり、システム構造と形態を共有する製品系列において、まず、基盤設計である Product 1 を想定した上で、その m 個からなる各モジュールをそれぞれに以下のうちのいずれかの方策に基づいて展開することにより、拡張設計を Product 2 から Product p へと展開して、製品系列を構成しようとするものである。

独自 (Independent) モジュール設計：異なるものを導入する。

類似 (Similar) モジュール設計：部分的に類似したものを構成する。

共通 (Common) モジュール設計：そのまま流用する。以上のうち、共通モジュール設計の効果は自明である

が、類似モジュール設計の内容と効果は説明を要する。ここでの類似モジュール設計とは、例えば、航空機の場合には、胴体の断面形状を保持したまま長さ(以下では、これに相当する属性を代表属性と呼ぶことにする)を拡大するような設計を指すものであり、共通モジュール設計に対応した効果を機能や性能(航空機における胴体の場合には、座席の数の増加)をより高いレベルで維持しながら達成することができる。

この製品系列の統合化設計問題に対する定式化を導出するために、以下の状況を想定する。

- 一連の製品系列 P^i ($i = 1, 2, \dots, p$) は、基盤設計である P^1 に対してモジュール毎に様々な設計方策を導入することにより展開される。
- 製品 P^i は m 個のモジュール M_j ($j = 1, 2, \dots, m$) から構成されており、各モジュールの内容は属性 $x_{j,k}^i$ ($k = 1, 2, \dots, k_j$) によって表される。以下では、 $x_j^i = [x_{j,1}^i, x_{j,2}^i, \dots, x_{j,k_j}^i]^T$ と表す。また、 $x_{j,1}^i$ は代表属性であるとする。
- モジュール $M_j^{i_1}$ と $M_j^{i_2}$ との類似モジュール設計における相互の類似性は代表属性 $x_{j,1}^i$ の増分により表現できる。
- 製品 P^i の性能はそれを構成する各モジュールの属性によって定まる。

5.2 総利益に基づく評価モデル 最適設計を行うには4.2項の内容に対応する数学的なモデルを導入して、目的関数とする必要がある。本研究では、製造者における当該製品系列の生産終了時における最終利益を以下に示す単純化モデルで表して目的関数とする。

5.2.1 設計・開発費 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。このとき、製品 P^i の設計・開発費 C_D^i は次のように表される。

$$C_D^i = \sum_{j=1}^m C_{D,j}^i \quad (3)$$

$$C_{D,j}^i = \begin{cases} \alpha_{D,j} W_j^i & \cdots \text{独立モジュール設計} \\ \left(\beta_{D,j} \frac{W_j^i - W_j^1}{W_j^1} + \gamma_{D,j} \right) C_{D,j}^1 & \cdots \text{類似モジュール設計} \\ 0 & \cdots \text{共通モジュール設計} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 W_j^i は製品 P^i のモジュール M_j の質量であり、 x_j^i から見積もることができる。 $\alpha_{D,j}$, $\beta_{D,j}$, $\gamma_{D,j}$ は製品やモジュールの種類により定まる係数である。

5.2.2 設備費 設備費も基本的には設計・開発費と同様であるとするが、質量ではなく代表属性により定まるものとする。このとき、製品 P^i の設備費 C_F^i

は次のように表される。

$$C_F^i = \sum_{j=1}^m C_F^j \quad (5)$$

$$C_F^j = \begin{cases} \alpha_{F,j} x_{j,1}^i & \dots \text{独立モジュール設計} \\ \left(\beta_{F,j} \frac{x_{j,1}^i - x_{j,1}^1}{x_{j,1}^1} + \gamma_{F,j} \right) C_F^1 & \dots \text{類似モジュール設計} \\ 0 & \dots \text{共通モジュール設計} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $\alpha_{F,j}$, $\beta_{F,j}$, $\gamma_{F,j}$ は、製品やモジュールの種類によって定まる係数である。

5.2.3 生産費 生産費は材料費 c_m と加工費 c_p から構成されるものとし、生産数が増加することによる習熟によって生産効率が向上する習熟効果を加味する。単一の製品を生産する場合の習熟効果は、 ℓ 番目のユニットの加工費 $c_p(\ell)$ を $c_p(1) \cdot \ell^{\frac{\ln r}{\ln 2}}$ としてモデル化することができ、習熟係数 r は航空機設計の場合には 0.75 ~ 0.85 であるとされている⁽¹¹⁾。

以上の内容を踏まえて、製品 P^i の ℓ^i 番目のユニットの生産費 $c_P^i(\ell^i)$ は、他の製品 P^1 が ℓ^1 ユニット生産された後の状況について、以下のように表す。

$$c_P^i(\ell^i) = c_m^i + c_p^i(\ell^i) \quad (7)$$

このうち、材料費 c_m^i は、それぞれのモジュールの質量から、モジュール M_j の単位質量あたりの材料費 ϑ_j を用いて、次のように表す。

$$c_m^i = \sum_{j=1}^m \vartheta_j W_j^i \quad (8)$$

製品 P^i の ℓ^i 番目のユニットの加工費 $c_p^i(\ell^i)$ は、各モジュール毎のその時点での累積生産数 ℓ_j^i により次のように表す。

$$c_p^i(\ell^i) = \sum_{j=1}^m \kappa_j W_j^i u(\ell_j^i) \quad (9)$$

$$u(\ell_j^i) = \left(\ell_j^i + \sum_{t=1, t \neq i}^p \zeta_{j,t} \ell_j^t \right)^{\frac{\ln r}{\ln 2}} \quad (10)$$

ここで、 κ_j は製品モジュール毎の単位加工費である。 $\zeta_{j,t}$ はモジュール M_j^t の生産によるモジュール M_j^i の生産における習熟効果への寄与率であり、独立設計の場合は 0、共通設計の場合は 1 となり、類似設計の場合には、類似するモジュール相互の間での習熟の効果を考えて、0 と 1 の間のある値を取るものとする。

5.2.4 製品の性能と価格 製品の性能は全モジュールの全属性 $x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i$ によって定まるものである。性能は運用における効率を定めることから、

性能を単位運用あたりの費用 $\lambda^i(x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i)$ として数量化する。さらに、製品 P^i の価格 C_S^i については、製品を運用する側の視点に立てば、効用とのバランスによって定まっている必要があることから、投資に対して一定割合の利益を期待しているものとして、一年あたりの収支に関する次式の関係を想定する。

$$Pr \frac{C_S^i}{T_y} = (\mu^i - \lambda^i) T_o - R C_S^i \quad (11)$$

ここで、 Pr は初期費である製品の価格に対する利益率であり、 μ^i は単位運用によって得られる収入、 T_o は一年間の運用回数、 T_y は製品の運用年数である。 R は資本回収係数であり、利子率 ρ のもとで $R = \frac{\rho (1+\rho)^{T_y}}{(1+\rho)^{T_y} - 1}$ として与えられる。

以上の関係により製品 P^i の価格は次式で与えられる。

$$C_S^i = \frac{(\mu^i - \lambda^i) T_o}{\frac{Pr}{T_y} + R} \quad (12)$$

5.2.5 製造者利益 製造者の利益を算出するにあたり、さらに、以下の仮定を導入する。

- 設計・開発費と設備費のすべては生産を開始する直前の時点で積算されるものに対応する。
- 複数の製品を生産する際、全生産期間を通じて異なる製品が一定の比率で生産される(特定の製品を先行生産するなどることは行わない)。
- 以上のモデルに含まれる各種の係数は生産の全期間を通じて不变である。
- 生産台数についての総和演算は、式(10)などの都合上、積分計算に置き換えることができる。

これらによって、まず、生産を開始するまでの費用は次式により与えられる。

$$C_I = \sum_{i=1}^p (C_D^i + C_F^i) \quad (13)$$

さらに、製品 P^i の総生産台数を N^i ($i = 1, \dots, p$)、生産期間を T_p としたときの、生産開始から y 年を経過した時点での収支バランス $C_B(y)$ は、以下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} C_B(0) &= -C_I \\ C_B(y) &= C_B(y-1) (1+\rho) \\ &\quad - \sum_{i=1}^p \frac{N^i}{T_p} \int_0^1 c_P^i(\ell^i(t)) dt + \sum_{i=1}^p \frac{N^i}{T_p} C_S^i \end{aligned} \right\} (y = 1, \dots, T_p) \quad (14)$$

ここで、 $\ell^i(t)$ は、すべての i に対して、 $\ell^i(t) = \frac{N^i}{T_p} (y-1+t)$ として与えられる。

5.3 最適化問題の定式化と解法 以上の最適化問題に対して、特定の設計方策パターンを想定すれば、そのもとでの一連のモジュール属性についての最適化問題は以下のように定式化することができる。

設計変数 … すべての製品についてのすべてのモジュールのすべての属性変数であり、 x_j^i ($i = 1, \dots, p; j = 1, \dots, m$) として表すことができる。

制約条件 … すべての製品に関するシステム制約に加えて、製品間の共通性を表現するために属性変数間で、以下のように等式制約を導入する必要がある。

独立モジュール設計については考慮すべき制約はない。類似モジュール設計においては、製品 P^1 と製品 P^i のモジュール M_j について、 $x_{j,k}^i = x_{j,k}^1$ ($k = 2, \dots, k_j; i \neq 1$) なる等式制約を与える。共通モジュール設計においては、 $x_{j,k}^i = x_{j,k}^1$ ($k = 1, \dots, k_j; i \neq 1$) なる等式制約を与える。

目的関数 … 式(14)において $C_B(T_p)$ として表される製造者における最終的な収支。

以上は、制約条件付き非線形計画問題となるものの、適当なアルゴリズムにより解くことのできるものであり、後述の事例では逐次2次計画法を用いる。

なお、この最適化問題は Class I の典型となっている。つまり、設計方策のパターンの総数が比較的少数であれば、それらを列挙した上で、それぞれについて上記の最適化問題を解き、それらの中から最適なものを選定すれば、製品系列統合化設計問題の最適解を得ることができる。

6 航空機のストレッチによる設計展開への適用例

以上の内容に対する具体例として航空機のストレッチによる系列展開についての設計事例を示す。

6.1 航空機のモジュール性と設計方策パターン

航空機には様々なレベルのモジュール性を見い出すことができるが、ここでは、図6のような胴体・主翼・尾翼・エンジンの4つの部分からなるモジュール構成を考える。なお、垂直尾翼と水平尾翼について同じ設計方策を用いるものとする。また、主翼は胴体の下部に付けられており、尾翼はT字型で、2つのエンジンが胴体の後部に取り付けられるものとする。類似モジュール設計に関しては、胴体は断面形状を保持したまま主翼を保持する部分の前後をストレッチすることができるものとする。例えば、乗客数が増加すれば、増加分を一列の座席数で割り座席のピッチを掛けた長さのストレッチが必要であるとする。主翼についても、アスペクト比や後退角を保ったまま、翼の先端

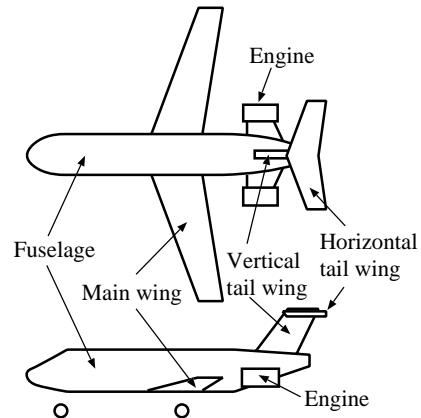


Fig. 6 Module structure of aircraft

と付根を部分的に延伸することにより、ストレッチが可能である。また、尾翼部に関しても同様のストレッチが可能である。エンジンについては、別途開発されることが一般的であり、類似モジュール設計の考え方を当てはめることはできず、共通のものを用いるか、独自のものを用いるかの選択が可能であるものとする。

6.2 航空機についての設計モデル 前節の数学モデルを航空機の系列設計に展開するにあたり、制約条件となるシステム性能に関しては、Torenbeek⁽¹²⁾やRaymer⁽¹¹⁾による基本設計のためのモデルを用いる。総利益に基づく評価モデルに関しては、単位運用あたりの費用 λ^i には燃費率が相当し、これに乗員費や保守費などが加わる。単位運用による収入 μ^i は単位運行距離あたりの旅客運賃や航続距離などから定めることができるものとする。

6.3 運用条件の広がりと最適性 具体的な事例として、運用条件の相違が最適な設計方策に及ぼす影響について検討することにする。すなわち、90人の乗客と2000kmの航続距離に対する基盤設計 P^1 に対して、90人の乗客と2000kmを越えるある航続距離に対する展開設計 P^2 を導入する状況を考える。各機体毎の生産台数 N^i はそれぞれ200台、生産期間 T_p は15年とする。この場合、最適化計算においては、乗客数が等しいことから胴体は共通モジュール設計に固定できるため、合計18のパターンを列挙する必要がある。数理モデルにおける各係数は、 $\alpha_{Dj} = 1.6 \times 10^7$ [¥/kg], $\beta_{Dj} = 0.5$, $\gamma_{Dj} = 0.1$, $\alpha_{Fj} = 1.6 \times 10^9$ [¥/m] (ただし、エンジンについては $\alpha_{Fj} = 1.6 \times 10^6$ [¥/kgf] とする), $\beta_{Fj} = 0.5$, $\gamma_{Fj} = 0.1$, $\vartheta_j = 8.0 \times 10^4$ [¥/kg] とし、加工費については、すべての j について $\kappa_j = 2.8 \times 10^5$ [¥/kg]、習熟効果については $r = 0.85$ とし、すべての類似モジュール設計において $\zeta_{j_{i_1, i_2}} = 0.5$ ($i_1 \neq i_2$) とす

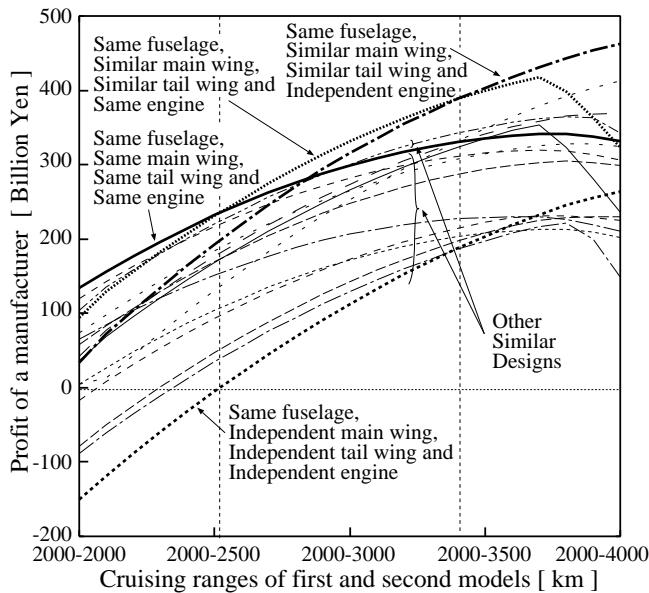


Fig. 7 Optimality versus variety range

る。また、製造者の最終利益については $Pr = 0.1$ と $\rho = 0.03$ を想定する。なお、一連の係数の値は最適設計の状況を示すために一例として定めたものである。

図7は最適設計の結果である。横軸は2つの機体の間での航続距離の違いを、縦軸は最終利益を表している。設計方策の最適性は図4に示した状況が具体的に現れたものであり、相違の小さい方から、単一の機体で十分対応できる範囲、同じエンジンを用いて主翼と尾翼をストレッチする類似設計が最適となる領域、異なるエンジンを用いて主翼と尾翼をストレッチする類似設計が最適となる領域、が続いている。2つの類似設計の領域が現れることは長い航続距離による質量の増加がより強力なエンジンを必要とすることによるものであり、また、これら以外の類似設計が最適とならないことも、性能やコストを考えれば合理的な結果を導いている。一方、図に示した範囲よりも航続距離の差が大きくなれば、やがては完全な独自設計が必要となることも傾向として現れている。

以上の内容は一般的な最適設計の方法論で処理可能なものであるものの、図7に現れた状況は製品系列の統合化設計に対して数理計画法に基づく最適設計の方法論を導入することの意義を明らかにするものであり、Class II や Class III に対する方法論の必要性を示唆するものもある。

7 結 言

本研究では、製品系列統合化設計問題に対する最適設計の方法論を構築する前提として、統合化設計問題

に潜む最適性の構造と問題の類型について論じた。さらに、類型の中でも比較的簡単な Class I の問題について最適設計法をもとにして、航空機のストレッチによる系列展開についての最適設計を行った。それにより製品系列統合化設計における最適化の必要性と意義を明確にした。

なお、製品系列のための最適設計法に関しては、文献⁽¹³⁾を初めとして、様々な研究が行われつつあるが、どちらかと言えばいずれも個別的であると言わざるを得ず、本研究における類型化に基づいた視点は極めて特徴的なものであると考えている。

最後に、航空機の設計事例におけるプログラミングと計算は、石川真央、米田 哲 両君(当時、大阪大学大学院学生)によるものである。記して謝意を表する。

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・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), (論文番号 01-0668).
- (3) 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).
- (4) 特集: 作りやすい設計、壊しやすい設計, 日本機械学会誌, Vol. 101, No. 954, (1998), pp. 348-389.
- (5) 特集: モジュール化設計・生産技術, 精密工学会誌, Vol. 66, No. 7, (2000), pp. 1009-1042.
- (6) Papalambros, P. Y. and Wilde, D. J., *The Principles of Optimal Design (Second Edition)*, (2000), Cambridge University Press.
- (7) Ulrich, K., “The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm,” *Research Policy*, Vol. 24, (1995), pp. 419-440.
- (8) Pahl, G. and Beitz, W., *Engineering Design (Second Edition)*, (Translated by Wallace, K. et al.), (1996), Springer.
- (9) Ulrich, K. T. and Eppinger, S. D., *Product Design and Development*, (1995), McGraw-Hill.
- (10) 赤木, 設計工学(上), (1991), コロナ社, pp. 120-122.
- (11) Raymer, D. P., *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, (1989), AIAA.
- (12) Torenbeek, E., *Synthesis of Subsonic Airplane Design*, (1976), Delft University Press.
- (13) Gonzalez-Zugasti, J. P. and Otto, K. N., “Modular Platform-Based Product Family Design,” *Proceedings of the 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Paper No. DETC2000/DAC-14238, (2000).