製品系列展開における共通化・カスタマイゼーション・
ラインアップ調整による包括的な最適設計問題に関する研究*赤井 亮太^{*1}, 藤田 喜久雄^{*2}Research on Optimal Design Problem Throughout Commonalization,
Customization and Lineup Arrangement for Product Family DeploymentRyota AKAI^{*3} and Kikuo FUJITA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

This research discusses an optimal design problem for product family deployment under a wider perspective throughout commonalization, customization and lineup arrangement. In the discussion, commonalization is viewed as the operation that restricts the feasible region by fixing a set of design variables related to commonalized components or modules, customization is viewed as the operation that adjusts another set of design variables related to reserved freedom, and lineup arrangement toward individual customer's needs is possible within ones that are feasible under commonalization and customization. This paper defines the mathematical fundamentals of the design problem throughout these aspects under the viewpoint of optimal design paradigm. That is, the mathematical formulation is generally defined, its mathematical structure is revealed with a concept of active set strategy, and the modes of the optimal solution are explored toward developing any computational approach for effectively solving such complex design problems. Finally, a case study is demonstrated with a design problem of product family deployment of centrifugal compressors for illustrating the optimality in the throughout design.

Key Words: Product Platform and Family Design, Product Family Deployment, Optimal Design, Commonalization, Customization, Lineup Arrangement

1. 結 言

最適設計は、設計問題の数学的な定式化のもとで計算により有望な代替案を探索し、それらによって設計を支援する枠組みである⁽¹⁾。対象問題が複雑になったり、要求解の水準が高度になったりする場合には、その数理的な有意性に大きな効果が期待できる。一方、顧客要求の多様化や技術の高度化などのもと、製品系列の全体としての競争力をモジュールの共通化などを通じて高めることやそのための設計方法論が各方面で注目を集めている⁽²⁾⁽³⁾。それらの動向は、設計問題における最適性の視野を個々の製品についての局所的なものから一連の製品群についての大局的なものへと拡大するものであることから、上記の意味で最適設計に期待されるところも大きい⁽⁴⁾。しかしながら、その種の拡大は相対的なものであり、より広い視点に立てば、さらに優れた最適性を目指すことができる一方で、そ

の達成のためにはさらに系統的な方法論に基づくことも必要になる。

本研究では、上記のような製品系列展開についての問題意識のもとで、製品群の間で共通化するモジュールについての設計問題、それらのもとの個々の設計要求に適合するためのカスタマイゼーションについての設計問題、ラインアップ(品揃え)を調整する設計問題を包括的に扱う設計問題を取り上げ、その数学的な定式化の一般的な形式を導いた上で、最適性の背後にある問題の構造を明らかにする。また、遠心圧縮機の製品系列展開の例を引いて、包括的な設計問題とその最適性における構造を例示する。以上により、製品系列展開に関して、より優れた最適性の可能性とそれに向けた設計方法論の要件を論じる。

2. 製品系列展開の設計問題とその拡大における課題

2.1 製品系列展開の意義 製品系列展開は、何らかのコンセプトを共有する製品の間でそれらの部分(モジュール)を相互に共通のものにすることによって、より優れた製品群を展開しようとする考え方である⁽²⁾。

* 原稿受付 2009年11月24日。

^{*1} 正員、大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)。^{*2} 正員、フェロー、大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻。
E-mail: akai@syd.mech.eng.osaka-u.ac.jp

そのような展開には、モジュール化を通じて多品種展開に向けた柔軟性が確保できること、共通化を通じて間接費が製品間で共有されることにより総コストを削減できることなどへの期待が込められている。しかしながら、部分の共通化を過度に進めると、製品の多様性が失われるだけでなく、各製品に最適なモジュールを用いることができないために機能面での性能低下は避けられないことにもなる⁽⁵⁾。

2.2 最適設計への期待と課題 製品系列展開における最適設計への期待は、緒言でも述べたように、一義的には、設計の対象を個別の要求仕様から複数の要求仕様に広げることによって最適性の意味を拡大することにある。その際には、上述のように、設計代替解の優劣を評価するための指標が多様なものになることから、それらを包括する指標を何らかの形で導入するか、あるいは、それらの間のトレードオフ関係を多目的最適設計問題として処理することが求められる。また、操作すべき内容が拡大することから、設計空間を限なく探索することが難しい場合には、例えば、有望な代替案を列挙した上でそれらの評価を通じて優位な解を求めるなどの対応が必要となる。さらに、そもそもの要求仕様についても、個別の要求仕様ではなく複数の要求仕様を対象とすることに加えて、それらの要求仕様を既与の条件ではなく不確定なものとして扱う必要があることも想定される。すなわち、製品系列展開のための最適設計には、評価指標の多様化・代替案の探索範囲・要求仕様の多様性のそれぞれに対処することが求められていると言える。

2.3 最適設計による方法論の研究動向 製品系列展開のための最適設計法については従来から様々なものが提案されており⁽³⁾、また、新たな展開も行われつつある⁽⁶⁾。それらの動向のうち、前節で挙げた各課題に関連するものは以下のように整理できる。

2.3.1 評価指標の多様化 個別製品の最適設計では何らかの性能指標や単体でのコスト指標が評価指標として用いられることが一般的であるが、製品系列展開では、複数の製品を対象とすることから、それらの項目を評価指標として用いることができない。このため、あくまでも単一指標による評価を目指す場合には、ある範囲で製品系列を展開する際の総コストやそのもとでの期待利益などを用いる必要がある⁽²⁾。しかし、設計段階においてそれらの内容を的確に評価することは容易ではないため、背後にある複数の指標についての総合評価のもとで戦略的に優れた選好解を選択する場合も多い。

上記のうち、多目的最適化による総合評価の手法と

して、例えば、Messac ら⁽⁷⁾は、市場に供給する製品群と共通化するモジュールをあらかじめ定めた上で、複数指標間でのトレードオフの関係に対して Physical Programming による目的関数の単一化を行うことによって効率的に有望な製品系列の設計解を導く方法を提案している。また、Fellini ら⁽⁸⁾は、複数の製品間で共通化を進めることによる各製品の性能劣化に着目し、製品系列の設計問題を多目的最適化問題として捉えた上で、そのパレート解集合を導くことによる製品系列の展開方策についての選定方法を提案している。

2.3.2 代替案の探索範囲 製品系列の展開は、前提となるアーキテクチャとしてのモジュール構造を特定したとしても、どのようなモジュール群を用意するのか、また、それらをどのように組み合わせるかなどについて、多様で複合的な自由度を伴っている⁽⁵⁾。この自由度に関しては、例えば、要求仕様を事前に特定でき、評価指標を単一化できる場合には、モジュールの組合せとモジュールの内容とを同時に最適化することは可能である⁽⁹⁾。しかしながら、例えば、前項での各方法⁽⁷⁾⁽⁸⁾にみられるように、より広い意味での評価指標のもとで多目的最適化を考えるために多様な代替解を求める必要があったり、あるいは、次項に示すように、そもそもの要求仕様に不確定性が伴ったりする状況の下では、最適化問題の構造が複雑になることから、最適化計算に先だって決定すべき内容を限定しておくことが不可欠となる。言い換えれば、どの部分を事前に限定してどの部分を計算で決定するかを割り振るための考え方が設計解の質を左右することになり、最適性の前提となる問題そのものの構造を踏まえた適切な方法論を構成しておくことが重要となる。

2.3.3 要求仕様の多様性 設計は狭義には既与の要求仕様を満たす解を求めることであるが、製品が市場において受け入れられるか、また、他社による同様の競合製品に対して優位性を確保できるかなどをも検討する場合、そもそもの要求仕様は不確定なものとなる。製品の市場での評価を考える設計に関しては、Hazelrigg が Decision-Based Design という考え方を提唱しており⁽¹⁰⁾、Wassenaar らはその考え方に基づいて離散型選択行動モデルにより顧客の選択行動を考慮した単一製品の設計問題を扱っている⁽¹¹⁾。また、Li らは市場環境を考慮した製品系列を最適設計するための方法論を、製品系列の設計問題を多目的最適化問題と捉えてパレート解集合を導いておいた上で、その解集合の中から市場モデルを用いて最も利益が期待できる製品系列を選択するものとして構築している⁽¹²⁾。これらについては、前項までの議論に照らし合わせると、

評価指標は拡大しているものの、代替案の探索範囲が限定されているということになる。

2.4 包括的な系列展開と設計方法論の要件 前節での議論を踏まえると、製品系列展開における最適性の意味を市場との関係などを含めて拡大する場合には、処理すべき内容も拡大し複雑化することになる。このことから、より優れた最適性を達成するためには、単純に各方面での手法を組み合わせるだけでは、得られる設計解の水準が限定的なものに留まってしまうことが想定される。この限界を克服するためには、当該の問題に潜んでいる構造を考慮し、探索空間の構造や評価指標間に想定されるトレードオフの関係などを前提とした最適設計方法論を構成することが求められる。

本研究では、上記の必要性についての一例として、あらかじめ想定されているアーキテクチャのもとで、製品間で一定のモジュール群を共通的に用いつつ、個々の要求仕様に対して共通モジュール以外の部分をそれぞれに調整する製品系列展開を取り上げ、また、製品系列と市場との関係を製品を展開できる要求仕様の範囲を調整することに対応させて、包括的な製品系列展開における最適性を論じることを目的とする。

3. 製品系列展開の包括的な設計とその数理モデル

3.1 製品系列展開の包括的な設計 本研究では、前章での議論のもとで、具体的には製品系列展開についての以下のような問題を取り上げる。

- (i) アーキテクチャとしてのモジュール構造が定まってい、製品のうち、製品系列で共通に使用する部分、すなわち**共通化**する部分(共通部分)と、個々の要求仕様に合わせて調整する、すなわち**カスタマイゼーション**を行う部分(個別部分)との区分が明らかになっている。
- (ii) 製品系列と市場との関係については、まず、より広い要求仕様に対応できる**ラインナップ調整**の可能性を確保しておくことが重要である。
- (iii) それらのもとで、個々の製品の競争力は、性能水準を高めることとコストを低減することとのバランスにより定まる。

なお、(i)での個別部分は最終的には個々の要求仕様が具体的に提示された段階で確定されることから、(ii)と(iii)の内容は未知の要求仕様に対して共通部分を確定させる段階で評価する必要がある。このため、2.3.1項の意味において、様々な評価指標を統合した単一指標を設定することはできず、多目的最適化としての取り扱いが必須となる。一方、2.3.2項の意味で、共通部分の探索範囲を限定したのでは、そもそもの2.3.3項

の意味における(ii)の要求仕様の可能性を十分に確保することにはならない。このため、共通部分の内容そのものを最適設計によって定めることが必要となる。

3.2 個別要求仕様に対する設計問題の数理モデル

製品系列展開の包括的な設計を論じるにあたり、まず、ある製品の設計問題を以下のように記述する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } \mathbf{x}_i^* \\ \text{that maximizes } f(\mathbf{x}_i^*) \\ \text{subject to } \mathbf{x}_i^* \in \text{Feasible}(\cdot) \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_i^*$ はある製品の内容を表す設計変数であり、要求仕様や使用環境などのすべての内容を含んでいる。目的関数である $f(\cdot)$ は性能指標などの何らかの最大化すべき項目、 $\text{Feasible}(\cdot)$ は設計空間 $\mathbf{x}_i^*$ についての実行可能領域を示している。

さらに、製品がある要求仕様に対して設計される場合について、式(1)を以下のように書き換える。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } \mathbf{x}_i \\ \text{that maximizes } f(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i) \\ \text{subject to } \mathbf{x}_i \in \text{Feasible}(\mathbf{p}_i) \end{array} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{p}_i$ は与えられた要求仕様である。また、 $\mathbf{x}_i$ は製品の内容のうち設計により操作できる変数である。そのため、 $\{\mathbf{x}_i\} \subset \{\mathbf{x}_i^*\}$ 、 $\{\mathbf{p}_i\} \subset \{\mathbf{x}_i^*\}$ 、 $\{\mathbf{x}_i\} \cap \{\mathbf{p}_i\} = \emptyset$ なる関係が成立する。なお、 $\text{Feasible}(\mathbf{p}_i)$ は $\text{Feasible}(\cdot)$ の $\mathbf{p}_i$ によって制限された部分空間を表す。

3.3 包括的な設計問題の数理モデルに向けた準備

次に、前節のモデルのもとで、3.1節で列挙した各事項に対応するための数理モデルについて考える。

(i)の共通化とカスタマイゼーションについては、設計変数 $\mathbf{x}_i$ を共通部分についての設計変数 $\mathbf{x}_i^c$ と個別部分についての設計変数 $\mathbf{x}_i^i$ に分割する。このとき、 $\{\mathbf{x}_i^c\} \cup \{\mathbf{x}_i^i\} = \{\mathbf{x}_i\}$ 、 $\{\mathbf{x}_i^c\} \cap \{\mathbf{x}_i^i\} = \emptyset$ が成り立つ。

(ii)のラインナップ調整については、まず、ある要求仕様に対して製品を構成可能かどうかを表す変数を以下のように導入する。

$$\delta(\hat{\mathbf{x}}_i, \mathbf{p}) = \begin{cases} 1 \dots \exists (\{\mathbf{x}_i\} - \{\hat{\mathbf{x}}_i\}); \mathbf{x}_i \in \text{Feasible}(\mathbf{p}_i) \\ 0 \dots \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{x}}_i$ は $\mathbf{x}_i$ の部分空間であり、変数 $\delta(\hat{\mathbf{x}}_i, \mathbf{p})$ は $\mathbf{x}_i$ の部分変数である $\hat{\mathbf{x}}_i$ を特定の値に固定した場合に $\{\mathbf{x}_i\} - \{\hat{\mathbf{x}}_i\}$ を調整することによって実行可能解を構成できる場合には1、できない場合には0となる。

ラインナップ調整の優劣は、要求仕様 $\mathbf{p}$ の分布する範囲 R に対して製品を供給することが求められている状況の下で、次式により上記の変数を用いて評価でき

るものとする。

$$\max_{\{x\}-\{x^0\}} \int_R \delta(x^0, p) dp \quad (4)$$

なお、変数 x^0 は $\{x^0\} \subset \{x_i\}$ であり、共通化を全く考えない場合には $x^0 = \phi$ となる。

さらに、(iii) の評価指標のうち、性能水準については、まず、式(1)の $f(x_i^*)$ および式(2)の $f(x_i, p_i)$ がそれに対応するとする。また、要求仕様の範囲 R のうち、その部分空間 $\hat{R}$ で製品が提供可能であるとする。このとき、提供可能な製品群における性能の最低水準は次式により評価できることになる。

$$\min_{p \in \hat{R}} \max_x f(x, p) \quad (5)$$

また、コストについては、3.1 節で示した問題設定の下では、設計計画段階では製品の生産量などが未確定のままであり、コストの具体的な内容は評価できない。一方、製品系列展開におけるコスト面での効果は、2.1 節で述べたように、間接費の低減にあり、その主な要因は共通化による設計開発費や設備費の低減にある⁽⁵⁾。そこで、本研究では、コスト低減の程度が製品系列展開のために何種類の共通部分を用いるかによって、すなわち、 x_i^c の個数によって評価できるものとする。

3.4 単一共通部分のもとでの包括的な設計問題の定式化 まず、準備として、ある要求仕様 p を与えて、ある共通部分 x^c のもとで、個別部分 x^s を最適に調整することにより製品を提供する場合を考える。その定式化は以下になる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } x^s \\ \text{that maximizes } f(x^c, x^s, p) \\ \text{subject to } (x^c, x^s) \in \text{Feasible}(p) \\ \text{under the given } p, x^c \end{array} \right\} \quad (6)$$

一方、ある要求仕様 p に対して、後ほど、個別部分 x^s の内容を式(6)により最適に調整できることを前提として、共通部分 x^c を設計する問題は以下のように定式化できる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } x^c \\ \text{that maximizes } \max_{x^s} f(x^c, x^s, p) \\ \text{under the given } p \end{array} \right\} \quad (7)$$

ただし、目的関数の $\max_{x^s} f(x^c, x^s, p)$ の部分については、 $(x^c, x^s) \in \text{Feasible}(p)$ なる制約条件を考慮する必要があることから、

$$\max_{x^s} \tilde{f}(x^c, x^s, p) = \begin{cases} \text{式(6)が実行可能である場合には、その最適値} \\ \text{そうでなければ、十分小さな値} \end{cases} \quad (8)$$

を定義して、式(7)の $\max_{x^s} f(\cdot)$ を $\max_{x^s} \tilde{f}(\cdot)$ に差し替える。なお、上記の十分小さな値については後述する。

以上の内容を前提として、一連の要求仕様の範囲 $p \in R$ に対してある共通部分 x^c を設計する問題について、前節の式(4)と式(5)で定義した評価指標のもとで、以下の多目的最適化問題を導くことができる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } x^c \\ \text{that maximizes } \int_R \delta(x^c, p) dp \\ \text{and maximizes } \min_{p \in R} \left\{ \max_{x^s} \tilde{f}(x^c, x^s, p) \right\} \\ \text{under the given } R \end{array} \right\} \quad (9)$$

なお、目的関数の第1項は、式(4)に準じて、ある x^c のもとで R における p に対して製品を提供できる範囲の面積に対応しており、ラインアップ調整が可能な範囲の大小を意味することになる。また、第2項は、式(5)に準じて、ある x^c とある要求仕様 p のもとで x^s を調整することによって製品が提供可能である場合について、それらの中で性能指標が最悪となる場合のその値に対応している。なお、式(8)での十分小さな値については、式(9)においては、目的関数の第1項により実行不可能な解が排除されることが期待できるため、目的関数の第2項の値に影響を及ぼさない程度の値、すなわち、事前に想定できる性能仕様の最低値よりも幾分小さな値として定めることができる。

3.5 複数の共通部分のもとでの包括的な設計問題の定式化 次に、ある共通部分 x^c ではなく、 J 種類の共通部分 x_j^c ($j=1, \dots, J$) を用いる場合について、前節のような包括的な最適設計問題を考える。この問題は、式(9)を拡張することによって、以下の多目的最適化問題として定式化される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } [x_1^{cT}, x_2^{cT}, \dots, x_J^{cT}]^T \\ \text{that maximizes } \int_R \left\{ 1 - \prod_{j=1}^J (1 - \delta(x_j^c, p)) \right\} dp \\ \text{and maximizes } \min_{p \in R} \left[\max_{j=1, \dots, J} \left\{ \max_{x^s} \tilde{f}(x_j^c, x^s, p) \right\} \right] \\ \text{under the given } R \end{array} \right\} \quad (10)$$

ここで、目的関数の第1項については、式(9)のそれに対して、いずれかの共通部分のもとで製品が提供可能であるかどうかを判定する関係式が加えられている。また、第2項については、式(9)のそれに対して、個々の要求仕様に対して最も優れた性能で製品を提供できる共通部分を選択する問題が加えられている。

以上の定式化により、3.1 節で述べた問題設定に対して、共通化とカスタマイゼーションを考えながら、ラインアップ調整と性能水準についての数理モデルを

Fig. 1 The whole design space viewed under lineup arrangement p , commonalization x^c and customization x^s

構成することができる。残るコストに関する評価については、3.3節でも述べたように、共通部分の種類数 J によるものとする。それを受けて、本研究では、異なる種類数を想定しながら式(10)の多目的最適化問題を処理した上で、その上位にある共通部分の種類数の最小化をも含めた3つの指標を伴う多目的最適化問題を考えることにより設計を進めることを想定する。なお、共通部分の種類を増やせば、コスト面では劣化するものの、異なる要求仕様の部分領域に対して個々の共通部分が対応するようにによって、式(4)と式(5)による評価指標は向上することが期待できる。

4. 包括的な設計問題における構造とその最適性

4.1 最適設計における構造分析 式(10)のように定式化される製品系列展開の包括的な設計問題は、多目的最適化問題であり、また、ミニ・マックス構造が入り組んだ複雑な形式を伴っている。このため、有効な最適化計算法を構成することが容易でないのみならず、どのような因果関係のもとに最適解が存在しているかが必ずしも明確ではない。これらのため、何らかの最適設計方法論を論じるためには、まず、対象問題に潜んでいる探索空間の構造やそのもとの評価指標におけるトレードオフの典型的な関係などを把握しておくことが重要である。また、具体的な設計問題に対して何らかの最適化計算法を構成する場合においても、それらの構造や関係が重要な知見となることが期待できる。そこで、本章では、有効制約の考え方 (Active

Fig. 2 Partial design spaces sliced with a commonalization and a specification

Set Strategy)⁽¹⁾を踏まえつつ、式(10)による最適設計問題が p , x^s , x^c の3組の変数ベクトルによって規定されていることに着目して分析を行う。なお、以下では、各変数ベクトルをラインアップ変数・個別調整変数・共通化変数と称する。

4.2 設計空間の様相とラインアップ調整の可能性

式(10)での p , x^s , x^c はそれぞれ多次元であり、場合によっては不連続変数を含んでいることもあるが、議論のために、図1のように、それぞれを一次元の連続変数に縮約した場合を考える。その場合、式(1)で $x_i^* \in \text{Feasible}(\cdot)$ により定義される実行可能領域は図中の灰色の部分に相当するものとする。このとき、例えば、製品を提供できるラインアップの範囲は実行可能領域によって (p_{e-}, p_{e+}) として限定される。ここで、 p_{e-} と p_{e+} は実行可能領域のラインアップ変数 p 軸に沿った両端の値であり、それぞれは $p_{e-} = \min_x p$ subject to $\delta(\phi, p) = 1$, $p_{e+} = \max_x p$ subject to $\delta(\phi, p) = 1$ により導出される。

4.3 共通化とカスタマイゼーションの数理的意味

上記のような空間に対して、共通化を行うことは設計空間上で x^c をある値に固定することに対応する。すなわち、図1で共通化変数を x_j^c に固定した場合、全体としての実行可能領域 $\{x_i^* \in \text{Feasible}(\cdot)\}$ は $\{(x^s, p) \in \text{Feasible}(x_j^c)\}$ に限定される。このとき、共通部分 x_j^c のもとで対応できるラインアップの範囲は図中では (p_{j-}, p_{j+}) に狭まる。

次に、製品群の間で共有する共通部分 x_j^c を設計しながら、あわせて要求仕様 p_i に対する製品 P_i を設計する場合を考える(図2)。このとき、 p_i は少なくとも $p_{e-} < p_i < p_{e+}$ を満たしている必要がある。一方、製

Fig. 3 A set of partial design spaces under a set of commonalization for lineup arrangement

品 P_i は、要求仕様 p_i を満たすように設計変数 x_i^c と x_i^s を決めることにより設計されるが、共通部分を用いることから x_i^c の内容は x_j^c として決定されるため、製品 P_i は残る個別部分についての設計変数 x_i^s を調整することによって設計される。個別部分 x_i^s を要求仕様 p_i を満たすように共通部分 x_j^c のもとで最適に設計する場合、その実行可能領域は $x^c = x_j^c$ と、 $p = p_i$ によって限定されるため、 p_i を満たすように x_i^c と x_i^s の全体を最適に設計する場合に比べて探索できる領域が狭くなる。そのため、共通部分を用いたときの性能指標の値は用いないときのそれより劣化することになる。

4.4 共通部分の設計とラインアップ調整の関係

ある共通部分のもとでは対応できる要求仕様の範囲が狭まるため、一種類の共通部分では想定している要求仕様の範囲 R の広い部分を網羅できないことがある。その場合には、図3のように複数の共通部分を導入することによって、それを補うことができる。すなわち、例えば、共通部分 x_1^c のもとで可能なラインアップ調整の範囲は要求仕様の範囲 (p_{1-}, p_{1+}) であり、共通部分 x_2^c のもとでのそれは範囲 (p_{2-}, p_{2+}) である場合、両者を合わせることによって、要求仕様の範囲 (p_{2-}, p_{1+}) に対応することができるようになる。このように、数種類の共通部分を用いることによって、対応できるラインアップの範囲を拡大することができる。その背後では、共通部分の種類数の増加はコスト増加につながることから、ラインアップの調整範囲の拡大とコストの低減はトレードオフの関係にあると言える。そのため、最適設計ではこのトレードオフを掌

Fig. 4 Optimality of lineup arrangement under commonalization without customization

握することが求められる。

4.5 包括的な設計問題の最適性 製品系列展開

の包括的な設計における最適性を論じる準備として、複数の製品 P_j ($j = 1, \dots, J$) をそのまま、すなわち、製品の全体が共通部分でありカスタマイゼーションを行わずに展開して、ある要求仕様の範囲に対応する場合について最適性の様相を考察する。図4は2種類の製品を展開する場合の様子を例示したものであり、カスタマイゼーションを行わないことを個別部分の内容 x^s が共通部分の内容 x^c に従属して決定されているものとして理解した上で、 x_1^c と x_1^{s*} によって定義される製品と、 x_2^c と x_2^{s*} によって定義される製品が導入されている状況を示している。図中では、まず、カスタマイゼーションを行わないことに対応して x_1^{s*} と x_2^{s*} が固定されていることから、対応できる要求仕様の範囲は、共通部分 x_1^c と x_2^c のもとでカスタマイゼーションを行う場合にラインアップ調整が行える全体の実行可能領域 (p_{2-}, p_{1+}) と比べて、より狭い範囲に限定されることになっている。一方、それぞれの製品が要求仕様を満たす範囲で達成する性能指標の値が p - f 面に投影されている。

次に、上記とは異なりカスタマイゼーションを行う場合、すなわち、共通部分とは独立に個別部分を決定できる場合における最適性の様相を考察する。図5は、図4の場合と同様、2種類の共通部分を導入することを前提としつつ、個別部分 x^s を各要求仕様ごとに最適に設計できる様子を例示している。その場合、このカスタマイゼーションによる自由度が加わることによって、 x^s が固定されているときには対応できなかった要求仕様であっても、 x^s を調整することで対応可能とな

Fig. 5 Optimality of lineup arrangement through commonalization and customization

る範囲が存在する。つまり、カスタマイゼーションを導入することにより対応できるラインアップ調整の範囲を広げることができる。また、各要求仕様に対して個別部分を最適に設計できることから、達成できる性能指標の水準は一点鎖線から実線へと向上する。

4.6 多目的最適性とトレードオフ 3.5節で示した多目的最適化問題と照らし合わせた場合、一連の状況は以下のように総括できる。

共通部分の種類数を増加させると、それに伴ってコストは増えることになるが、要求仕様に対して対応できるラインアップ調整の範囲は拡大する。一方、そのような範囲、例えば、 (p_{2-}, p_{1+}) を拡大しておくためには、共通部分の内容、例えば、 x_1^c, x_2^c を適切に設計しておくことが前提になる。

また、性能指標の最悪値に関して、 p 平面の要求仕様と f 軸の性能指標との関係式を p - f 面に投影して切り出した場合、それは共通部分の種類数に応じて並立する。それらは図5のように重なっており、一般には、性能指標の最悪値はそれらの関係式の個々の境界あるいは相互の交差する点に現れることになる。このため、最悪値を改善するためには、共通部分の種類数を増加させ、それらの内容を適切に設計することが必要となる。その際には、前述のように、コストは増加するが、ラインアップ調整の範囲は拡大することになる。

以上を総合すると、共通部分の設計では、共通部分の種類数、それらの設計による実行可能領域の限定、個別部分のカスタマイゼーション設計による性能値の向上可能性の三つの要因のトレードオフ関係を考えることが求められる。

Fig. 6 Schematic of centrifugal compressors

4.7 最適設計方法論の要件 前節の内容は、少なくとも、個別部分 x^s の操作により性能水準を向上できること、共通部分 x^c の数の調整や内容の操作により広範な要求仕様 p に対応できるラインアップ調整の可能性を拡大できることなどが複雑に絡み合っていることを示している。このため、包括的な意味で優れた製品系列展開を行うためには、ただ単に何らかの計算スキームによって望ましい解を導き出すのではなく、設計者の大局的な見地からの戦略的な判断を合理的に支援することを念頭に置き、共通化・カスタマイゼーション・ラインアップ調整の間に潜んでいる様々な要因の因果関係を数理的な手段で明確に浮かび上がらせた上で、包括的な問題に対する典型的な代替案を提示することが重要であると考えられる。

5. 例題による検証

本章では、遠心圧縮機の製品系列展開についての簡略化した問題を取り上げて、前章での内容を例証する。

5.1 遠心圧縮機 図6は対象とする遠心圧縮機のシステム構成を示したものである。その要求仕様 p は吐出圧力 P_{out} と吸入流量 Q_{in} により規定され、性能はインペラ効率⁽¹⁴⁾により評価できるものとする。それらのうち、羽根車の形状がインペラ効率に直接的な影響を及ぼす一方で、ギアボックスのサイズは性能への寄与度が比較的小さくまた装置全体のフレームの寸法や冷却器など周辺機器の取付位置を支配していて、間接費への影響が相対的に大きい。これらのことから、式(10)における共通部分の設計変数 x_j^c には、ギアボックスとフレームに影響を与える部分であるギアボックスの増速比と羽根車の外径と入口幅を、個別部分の設計変数 x^s には羽根車の内径、出口幅、入口角、出口角を対応させる。

5.2 最適化計算法と計算条件 式(10)の最適化問題はミニ・マックス構造を多重に含んだ複雑なもの

(a) Selection map of common subsystem for customization

(b) Contour plot of performance distribution

Fig. 7 Performance distribution with one common subsystem

であるだけでなく、要求仕様の分布範囲 R が連続空間となっていることから、そのまま最適解を求めることは容易ではない。そこで、 R を有限個の代表点の集合で置き換える簡略化を行い、2つの目的関数は適当な重み付けによって単一化した上で、全体としての最適化についてはミニ・マックス構造はそのまま計算することとして遺伝的アルゴリズムを適用し、最も内部にある式(6)に相当する最適化問題については逐次2次計画法を用いて、最適化計算を行う。なお、その詳細は別報⁽¹³⁾の中で論じる。一方、計算条件としては、要求仕様の想定範囲 R を吐出圧力 P_{out} を $0.14 \sim 0.26$ [MPa]、吸入流量 Q_{in} を $4.0 \sim 20.0$ [m^3/s] として定め、その範囲に400点を格子状に配置する。また、共通部分の種類数 J は $J = 1, 2, 3$ の3つの場合を考える。

5.3 計算結果とその検討 共通部分の種類数がそれぞれの場合に製品を提供できる要求仕様の範囲と対応する性能指標の程度を図7、図8、図9に示す。1種類の共通部分のもとで製品系列を展開した場合には、図7のように、製品を実現できる要求仕様の範囲の42%に留まっている。これに対して、共通部分を2種類に増やした場合には、図8のように、その範囲が79%に広がるものの、実現不可能な領域が各角の部分

(a) Selection map of common subsystem for customization

(b) Contour plot of performance distribution

Fig. 8 Performance distribution with two common subsystems

に残る。また、図7に示した1種類の場合と比べると、上部に現れていた共通部分によるラインアップは右上に移動し、左下には別の共通部分によるラインアップが展開されているように解釈することができる。さらに、共通部分を3種類に増やした場合には、図9のように、製品を実現できる範囲は90%にまで達する。その一方で、他の場合と同様に、左下の角の部分に実現不可能な領域が残っている。図8に示した2種類の場合と比較すると、2種類の場合には実行不可能となっていた左上の部分に対応する製品群を展開可能な共通部分が新たに導入され、それに伴って、左中央の部分に対応していた共通部分が、2種類の場合では実行不可能であった右下の部分に対応するように調整されているものと解釈することができる。一連の結果によって、共通部分の設計、ラインアップ調整の広がり、各製品が達成する性能水準は相互に依存しており、それらの関係を把握しながら最適設計を進めていく必要があることを確認できる。

(a) Selection map of common subsystem for customization

(b) Contour plot of performance distribution

Fig. 9 Performance distribution with three common subsystems

6. 結 言

本研究では、製品系列展開に関わる設計問題の中でも、共通化・カスタマイゼーション・ラインアップ調整を通じた包括的な設計問題を取り上げて、その数理的な定式化を導き、設計空間の構造や最適性の様相を分析し、簡略化した事例を引いてそれらの状況を例証した。一連の考察により、包括的な設計問題では、設計者の戦略的な判断を支援できる代替案を提示できる最適設計方法論が必要であり、その具体化にあたっては各問題に固有のトレードオフなどの具体的な状況を踏まえることが重要であることが明らかになった。今後は、それらの知見に基づきながら、具体的な問題に対する実用的な最適設計方法論を構築していくことが必要であると考えている。

文 献

(1) Papalambros, P. Y. and Wilde, D. J., *Principles of Optimal Design – Modeling and Computation –*, (Second Edition), (2000), Cambridge University Press.

(2) Fujita, K., Ishii, K., Product Variety Design and its Task Structuring, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Ser. C*, Vol. 65, No. 629, (1999), pp. 416-423.

(3) Simpson, T. W., Siddique, Z., and Jiao, J., (ed.), *Product Platform and Product Family Design: Methods and Applications*, (2005), Springer.

(4) Fujita, K., Model-Based Optimal Design of Complicated Design Problems such as Product Variety Design, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 109, No. 1050, (2006-5), pp. 389-391.

(5) Fujita, K., Optimization Methodologies for Product Variety Design (1st Report: Design Optimality across Multiple Products and its Situation), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Ser. C*, Vol. 68, No. 666, (2002), pp. 675-682.

(6) Jiao, J., Simpson, T. W., and Siddique, Z., Product Family Design and Platform-Based Product Development: A state-of-the-art review, *Journal of Intelligent Manufacturing* Vol. 18, No. 1, (2007), pp. 5-29.

(7) Messac, A., Martinez, M. P., and Simpson, T. W., Effective Product Family Design Using Physical Programming, *Engineering Optimization*, Vol. 124, No. 3, (2002), pp. 245-261.

(8) Fellini, R., Kokkolaras, M., Papalambros, P. Y., and Perez-Duarte, A., Platform Selection Under Performance Bounds in Optimal Design of Product Families, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 127, No. 4, (2005), pp. 524-535.

(9) Fujita, K. and Yoshida, H., Optimization Methodologies for Product Variety Design (3rd Report: Simultaneous Optimization Method for Module Attributes and Module Combination), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Ser. C*, Vol. 68, No. 668, (2002), pp. 1329-1337.

(10) Hazelrigg, G.A., A Framework for Decision-Based Engineering Design, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 120, No. 4, (1998), pp.653-658.

(11) Wassenaar, H. J., and Chen, W., An Approach to Decision-Based Design with Discrete Choice Analysis for Demand Modeling, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 125, No. 3, (2003), pp. 490-497.

(12) Li, H., and Azarm, S., An Approach for Product Line Design Selection under Uncertainty and Competition, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 124, No. 3, (2002), pp.385-392.

(13) Akai, R. and Fujita, K., Optimal Design of Product Family Deployment by Anticipatory Platforms Design and Scale-based Customization, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Ser. C*, (submitted).

(14) Namai, T. and Inoue, M., *Turbo Fan and Compressor* (in Japanese), (1988), Corona Publishing.