

トレードオフ分析手法

Trade-off Analysis Method

黒岩 正

■ KUROIWA Tadashi

戦略的製品開発のためには、製品の機能、性能、コストなどの目標を的確に定め、それを実現する設計案を速やかに策定することが重要となる。シミュレーション技術の発達に加え、多目的最適化などに代表される最適化技術の進展によって、設計代替案や方式を比較検討するトレードオフ分析などを設計のより上流側で行うことが実用レベルになりつつある。この手法を製品開発・設計プロセスに適用した例を通じて、手法の有効性が確認された。

In order to promote strategic product development, it is important to establish a design proposal promptly after setting exact goals for a product's functions, performance, and cost. For this purpose, the trade-off analysis method, in which alternative designs or methods are weighed (trade-off analysis) at an earlier stage of design, is now reaching a practical level aided by developments in simulation technology and multi-objective optimization technology.

We have confirmed the effectiveness of the trade-off analysis method by applying it in a case study to an earlier stage of the product development and design processes.

1 まえがき

製品開発・設計の過程は、その進捗（しんちよく）に伴ってより詳細化、具体化されたものが対象となり、例えば方式や部品や材料を選定したり、配置や形状などの設計変数とその値を決定していく一連のプロセスとなる。その各局面では、それぞれの段階に応じた種々の設計条件の下で、新しい機能の実現、製品性能や品質の向上、コスト低減化などの目的を達成するために設計代替案の策定が行われる。ところが、これらの目的の間には、ある目的を良くするためには他のどれかの目的を悪くせざるをえないという競合関係（トレードオフ関係）が内在する場合がしばしばある。また、製品の機能が高度化、複雑化したり設計条件や設計仕様がより厳しくなるに従い、これらを満足する設計解を迅速に得ることが以前にも増して難しくなっている。

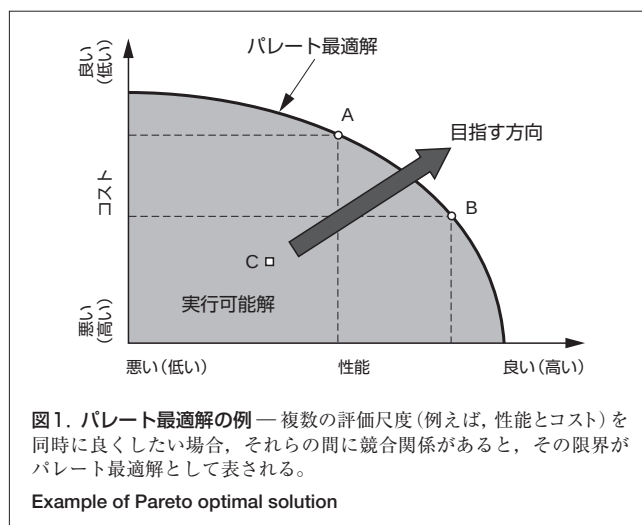
ここでは、このような設計問題を複数の目的（評価尺度）がある多目的意思決定問題⁽¹⁾としてとらえ、種々の制約条件下において複数の評価尺度に基づいて各設計代替案の良し悪しを多面的、総合的に比較検討（価値判断）して設計代替案を策定するトレードオフ分析手法の製品開発・設計への適用性について事例とともに示す。

2 トレードオフ分析による設計代替案の評価

2.1 設計代替案とパレート最適解

設計問題を多目的意思決定問題としてとらえるには、設計

条件や設計仕様のうち、特に最良化（数値計算上は、最大化又は最小化）すべきものを評価尺度として複数個選択し、残りは制約条件として考慮する。このとき、設計問題の解（設計代替案）は、設計変数がとりうる値の全領域（設計空間）内ですべての制約条件を満足する実行可能解のうち、ある評価尺度を良くするためには他のどれかの評価尺度を悪くせざるをえないというぎりぎりの競合関係（トレードオフ関係）を表すパレート最適解として求められる。図1に示す模式的な例では、評価尺度として製品の性能（高性能化）とコスト（低減化）を選択しており、性能を高く（良く）する場合にはコストが高く（悪く）なり、逆に、コストを低く抑える（良くする）



場合には性能を下げる(悪くする)という競合関係が太線で示すパレート最適解として表されている。パレート最適解は、実行可能解の領域の境界(限界)の一部となる。

ここでは、パレート最適解をまず求め、次にそれを多面的、総合的に比較検討して最終的に設計代替案を策定するという典型的な場合について示す。

2.2 パレート最適解上でのトレードオフ分析

設計代替案がパレート最適解ではない実行可能解の領域に含まれている場合(例えば、図1の点C)、すべての評価尺度でその解よりも優れている解が存在し、限界となるのがパレート最適解となる(例えば、図1の点Aと点Bなど)。パレート最適解上の解どうしでは、評価尺度の最良化という観点での優劣はつけられない。通常は、このパレート最適解の中から意思決定者の価値判断に基づいて最終的な解を選択することが行われる。

2.3 パレート最適解の分析(広義のトレードオフ分析)

前節に示したトレードオフ分析のプロセスでは、各評価尺度は最良化すべき方向だけを考え、競合する他の評価尺度との間の優劣の関係が示されている。しかし、評価尺度の元となる製品の設計条件や設計仕様は、定量的に提示される場合が大半であり、その場合は各設計代替案における評価尺度の値がももとの設計条件や設計仕様に対してどこまで達成されているかという達成度を確認することが必須である。ここではこれらを含めてトレードオフ分析と呼ぶことにする。

2.4 パレート最適解の導出方法

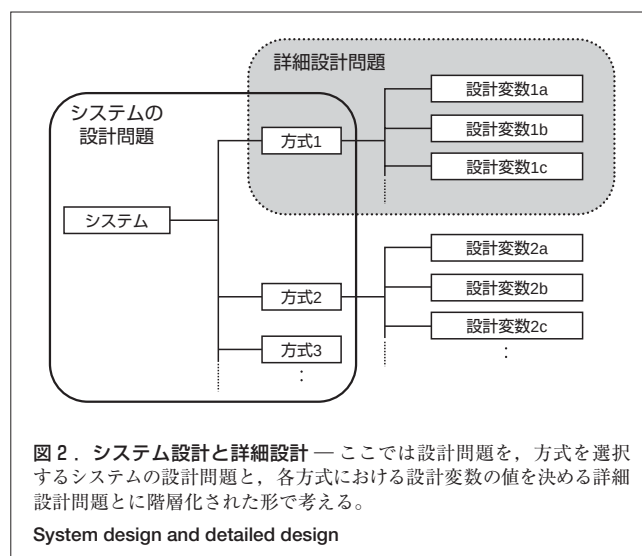
数値計算によってパレート最適解を求めることは、従来は多大な計算時間と手間とを必要としていたが、近年、遺伝的アルゴリズムなどの探索的な方法に基づいてパレート最適解を大域的に効率よく求める多目的最適化手法の開発が進み⁽²⁾、数値シミュレーションと組み合わせてトレードオフ分析などを行うことが実用レベルに達しつつある。

なお、設計条件を変えて実験などによって試行して評価尺度を計測した結果に対しては、評価尺度を相対比較することによって、試行した設計代替案の中でもっとも良いという意味での擬似的なパレート最適解を求めることができる。

3 設計プロセスにおけるトレードオフ分析

実際の製品設計の過程では、トレードオフ関係自体が未知という場合はまれで、トレードオフ関係を踏まえたうえで、限定された制約条件の下で設計目標を達成する設計代替案を策定するのをいかに支援するかが重要である。

製品の構成は一般に階層化した形で表され、各段階に応じて設計問題が設定される。図2に示す典型的な例では、方式を選択するシステムの設計問題と、各方式における設計変数の値を決める詳細設計問題とに階層化された形で考える。



変数の値を決める詳細設計問題とに階層化されている。なお、階層の上位と下位は相対的な関係を示す。別の視点として、設計代替案がももとの設計条件や設計仕様をどの程度達成しているかという点からの評価がある。ここでは、これらの観点から、製品設計の各プロセスにおけるトレードオフ分析について示す。

3.1 詳細設計問題におけるトレードオフ分析

詳細設計問題(図2の網掛けの部分)は、方式や構成や手段が同じで、設定された設計変数の値を決めるパラメータ最適化問題として表され、この解はパレート最適解として求められる。一般には、設計プロセスのより下流側で取り扱われることが多いが、複数の製品からなる製品系列を一つのパレート最適解として求めるというように上流側で適用される場合もありうる。パレート最適解が各評価尺度に対応する設計条件や設計仕様を満足していれば、この中から最終的な解を選択することが行われる(2.2節参照)。

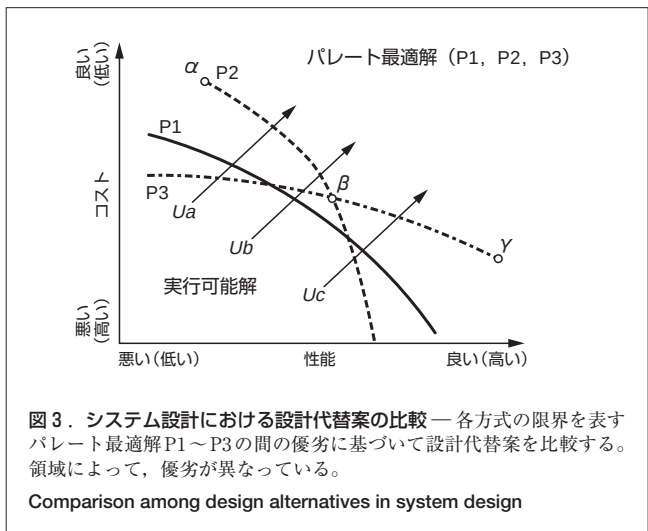
更に、パレート最適解の性質を調べることによって、設計問題についての知見を得る可能性が高まる。設計問題には、通常、多数の制約条件(設計条件や設計仕様の一部、物理的關係、接続関係や位置関係など)が存在するが、最適化問題の解が、ある制約条件に支配される場合があるので、どの制約条件がパレート最適解を支配しているかどうかを調べることは設計上のボトルネックを知る一つの方法となる。また、設計問題では、最終的には設計変数の値を決めることが求められるので、パレート最適解における設計変数と評価尺度との間の対応関係を把握することによって、設計指針が明らかになってくる。

3.2 システムの設計問題におけるトレードオフ分析

システムの設計問題(図2の太線内の部分)では、異なる方式や技術のものまで含めて比較検討するので、設計変数の定義自体が異なる場合も含まれる。ここでの設計代替案は

方式や技術となる。一般には、設計プロセスのより上流側で取り扱われることが多い。個々の方式や技術に対する下位の設計問題が最適化問題として表されたとすると、その限界がパレート最適解として表されるので、システムの設計問題の解は、下位の設計問題のパレート最適解（設計代替案）の集合の中から最適なものを選択することによって求められる。

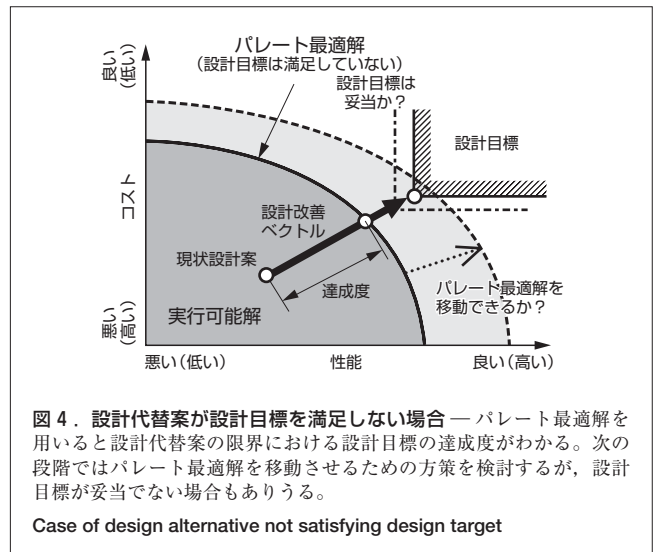
図3に、システム設計における設計代替案の比較例を示す。この例では、3個のパレート最適解P1, P2, P3が示されているが、領域によって、すべての評価尺度を良くする設計改善方向に対する優劣が異なっている。このような場合、全体を包絡するパレート最適解（図3における $\alpha \sim \beta \sim \gamma$ を結ぶ曲線）を求める方法もあるが、各方式や技術が好適となる範囲を知るという意味では、いくつかの領域における各方式や技術の優劣を定量的に把握するのがよい。例えば、現状設計点や初期設計点を始点とし、理想とする設計目標点を終点とするベクトルを考え、このベクトルと各パレート最適解の交点からベクトルの始点までの距離で評価することができる。また、ベクトルの始点や終点を変更することによって、異なった領域での評価が行える（図3におけるベクトル Ua, Ub, Uc ）。



3.3 設計代替案の設計目標に対する達成度

製品設計の途中では、策定した設計代替案が設計目標を満足しないこともある。このようなとき、設計代替案が設計目標に対してわずかに未達なのか大幅に未達なのかというような達成度を把握しておくことが重要となる。また、何らかの方策によって評価尺度の改善を図ったことによる効果を検証するときも同様である。ここでは、更に3.2節に示したパレート最適解どうしの比較の場合にも適用可能な形での評価指標の例を示す。

パレート最適解は実行可能領域の境界（限界）を表す（2.1節）ので、ここでは設計代替案の評価値が最大となるパレー



ト最適解上で考える。図4は評価尺度の空間におけるパレート最適解に、設計目標の領域を書き加えたものである（この例では、パレート最適解は設計目標を満足していない）。このとき、現状設計案（初期設計案などでもよい）に対応する点を始点とし、設計目標の点を終点とするベクトル（ここでは、設計改善ベクトルと呼ぶ）を考え、このベクトルと各パレート最適解の交点（又は、それに近いパレート最適解上の点から降ろした垂線の足）からベクトルの始点までの距離をベクトルの長さで割った比率を、現状設計と設計目標に対する設計代替案（パレート最適解）の達成度として表す。達成度が1以上で設計目標達成、達成度が0と1の間は設計改善だが設計目標未達成となる。

3.4 設計代替案の改善可能性の検討

策定した設計代替案を限界であるパレート最適解まで移動させても設計目標を満足しないということは、与えられた設計問題に対し、設定した設計空間において設計解がないことを意味する。

このような場合に設計代替案の改善を図るためには、制約条件の緩和（パレート最適解を支配している制約条件があり、かつ、何らかの合理的な理由によってその条件を緩和できる場合には、パレート最適解自体を改善できる可能性がある）や、設計空間の拡張（設計変数の範囲を拡張したり、今まで定数と考えていたものを新たな設計変数とする場合など）などの方法を試みるが行われる。これは、図2において、ある詳細設計問題を解くために、いったんシステムの設計問題に立ち返って考えているとも言える。

4 適用事例

ここでは、あるプラントの設計プロセスの一部に適用した例を示す⁽³⁾。評価尺度の最良化の方向は、小型化、高出力

化、及び高効率化とし、システム的な観点から全体の特性の改善を図ることを目的としている。大域的にパレート最適解を求める多目的遺伝的アルゴリズム⁽⁴⁾に制約条件の処理を付加し、数値シミュレーションに基づいて多目的最適化計算を行って得られたパレート最適解を図5に示す。各座標値は、初期設計案での値で無次元化している。

図5では、パレート最適解における評価尺度と設計変数や制約条件の評価値との間の対応関係を把握しやすくするために、ある制約条件の評価値によってパレート最適解上の各点(丸印)に色をつけて表示している。図5の右上側(評価尺度の最良化の方向)ほど前記制約条件の評価値が大きくなっており、この制約条件が設計上のボトルネックとなっている可能性があることがわかる。

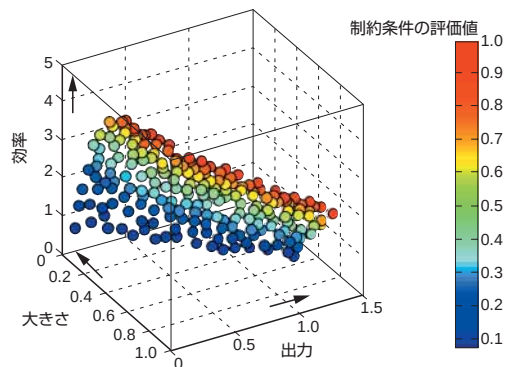


図5. 分類表示されたパレート最適解の例 — 評価尺度の空間と設計空間を関連付けて認識することによって、解の性質や設計問題の特徴を知る手がかりを得ることができる場合がある。

Example of classified Pareto optimal solution

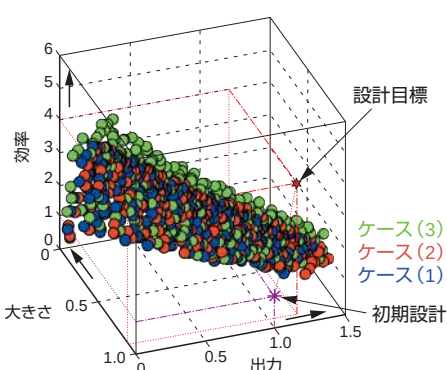


図6. パレート最適解の改善可能性の検討例 — パレート最適解どうしの比較と設計目標に対する改善度を求めた結果を示す。

Example of investigation of possibilities for improving Pareto optimal solution

更にパレート最適解の改善を図るべく、前記の制約条件の緩和と、サブシステムの特性改善を見込んだ場合(設計空間の拡張に相当)を検討した結果を図6に示す。ここでの設計目標は暫定的に設定した。図6においてケース(1)は図5と同じ初期設計に対するパレート最適解、ケース(2)は制約条件を緩和した場合、ケース(3)はサブシステムを改善した場合で、数値は設計目標に対する達成度を示す。初期設計に対するパレート最適解ケース(1)に対して、ケース(3)はケース(2)の倍近い改善効果があることがわかった。

5 あとがき

ここでは、製品開発・設計プロセスにおいて、設計目的間に内在するトレードオフ関係を踏まえたうえで、より厳しくなる設計条件や設計仕様を満足する設計代替案を策定することを支援するために、数値シミュレーションに基づくトレードオフ分析手法が適用できる可能性を示した。

シミュレーションが大規模化したり複雑化した場合には計算時間が過大となり、その低減化(数値シミュレーションの簡略化や多目的最適化アルゴリズムの改良など)が必要である。より本質的には、対象とする問題のモデリングを支援する手法やシステムの開発が重要と考える。

文 献

- (1) 中山弘隆, ほか. 多目的計画法の理論と応用. 東京, コロナ社, 1994, 232p.
- (2) K. Deb. Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2002, 518p.
- (3) 黒岩 正, ほか. “多目的最適化の製品開発上流段階への適用”. 日本機械学会 第13回設計工学・システム部門講演会講演論文集. 2003, p.106 - 107.
- (4) 渡邊真也, ほか. “近傍培養型遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化”. 数理モデル化と応用. 情報処理学会論文誌. 43, SIG10, 2002, p.183 - 198.



黒岩 正 KUROIWA Tadashi

研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主務。
メカトロ機器のシミュレーション, 設計支援システムの
研究開発に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会会員。
Mechanical Systems Lab.