



ロバスト設計ハンドブック

2025年 3月 28日 A改定
(2021年 5月 14日 制定)

宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

目次

1. 適用範囲	1
2. 適用文書	1
2.1 参考文書	1
2.2 用語の定義	2
3. ハンドブックの背景と狙い	3
4. ロバスト設計の定義	5
4.1 ロバストとは	5
4.2 ロバスト最適化の概念	5
4.3 製品開発におけるロバスト性確保の方法	10
5. 品質工学	12
5.1 品質工学とは	12
5.2 パラメータ設計の特徴	14
5.3 パラメータ設計の手順	17
5.4 パラメータ設計のロバスト性評価の考え方	23
5.4.1 動特性の分類と概要	23
5.4.2 静特性の分類と概要	26
5.5 ロバスト設計の実践例	28
5.5.1 テーマの背景	28
5.5.2 動特性による解析	29
5.5.3 静特性による解析	43
5.5.4 動特性と静特性の違いについて	48
5.5.5 補足：目的による信号の選択	49
6. セットベース設計	55
6.1 セットベース設計が求められる背景	55
6.2 ポイントベース設計の特徴	58
6.2.1 ポイントベース設計の由来と実際	58
6.2.2 設計の文脈（分析と総合）の観点	59
6.2.3 設計プロセスとしての1D（機能）設計と詳細設計の観点	60
6.2.4 製品開発プロセスにおける多視点性の観点	62
6.2.5 最適化の観点	63
6.3 セットベース設計の特徴	65
6.3.1 セットベース設計手法の由来（3種類の提案）	65
6.3.2 セットベース設計における設計の文脈	67

6.3.3	設計プロセスとしての 1D(機能)設計と詳細設計の観点	68
6.3.4	多視点性の観点	70
6.3.5	多目的満足化手法の観点	72
6.3.6	不確定性の表現の観点	73
6.4	選好度セットベース設計手法 (PSD 手法)	74
6.4.1	選好度セットベース設計手法 (PSD 手法)のアルゴリズム	74
6.4.2	セットベース設計におけるロバスト性の評価の考え方	89
6.5	セットベース設計の実践例	90
6.5.1	自動車の乗り心地設計への適用[32]	90

1. 適用範囲

ロバスト設計手法とは、製品の製作・試験における様々な誤差要因（材料のばらつき、製造のばらつき等）や製品の使用中に遭遇する外乱（遭遇環境や使用条件の変動）に対して、これらのノイズ（誤差）の影響を受けにくい頑強性（ロバスト性）を持つ製品パラメータを決定する手法である。

ロバスト設計技術の宇宙機開発への適用は、具体的な適用例が少なく、これからの技術分野であると考えられるので、本ハンドブックの適用に当たっては、ロバスト設計の専門家の支援を仰ぐことが推奨される。また基本的な定義は、「2.1 参考文書(2)~(6)、等」を参考にされたい。

本ハンドブックは、設計段階で効果が高いものについて記載している。製造段階、検査段階で有効なロバスト設計手法については、一般の書籍を参考にされたい。

NC版では品質工学について記載し、A改訂では、新たにセットベース設計について追記した。今後は他のロバスト設計手法についても追記する予定である。

2. 適用文書

なし

2.1 参考文書

- (1) JMR-004C 信頼性プログラム標準
- (2) ISO16336 Application of statistical and related methods to new technology and product development process - Robust parameter design (RPD)
- (3) JIS Z9061 ロバストパラメータ設計
- (4) 田口玄一 著、吉澤正孝 編、品質工学講座第1巻 “開発・設計段階の品質工学（品質工学講座）”、日本規格協会（1988/1/1）
- (5) 田口玄一 著、横山巽子 編：ベーシックオンライン品質工学、日本規格協会、2007
- (6) 田口玄一 著、山本省吾 編：品質工学講座第2巻、製造段階の品質工学、日本規格協会、1989
- (7) 森田泰弘：イプシロンロケットの初飛行と今後の展望、日本天文学会、「天文月報」、2015年4月
- (8) 武重伸秀：スカイアクティブ成功への道、2020年度品質工学会企業交流会、2020年9月4日
- (9) 草野 秀昭、近藤 勝彦、玉田 武司、大月 肇、高木 俊雄、紙で簡単に実験した冷却システムのパラメータ設計、品質工学会誌、1998年6巻4号 p. 59-64
https://www.jstage.jst.go.jp/article/qes/6/4/6_59/_article/-char/ja/

2.2 用語の定義

ロバスト設計に関する用語を以下に示す。なお、品質工学に関する用語については、「付録 B 品質工学用語集」を参照されたい。

- (1) システム ひとつ以上の明記された目的を達成するために組織された相互に作用する要素の組み合わせ。
注記：システムとは、それが提供する製品又はサービスとみなされることもある。
- (2) 製品 プロセスの結果。
注記：次に示す4つの一般的な製品分類がある。
－サービス(例えば、輸送)
－ソフトウェア(例えば、コンピュータプログラム、辞書)
－ハードウェア(例えばエンジン機械部品)
－素材製品(例「えば潤滑剤」)
- (3) 製品開発 製品に対する要求事項を、その製品に対するより詳細な事項に変換する一連のプロセス。
- (4) 技術開発 製品開発の前段階で、特定の製品を生み出すための新たな技術を生み出すためのプロセス。
- (5) 研究開発 技術開発の前段階で、広く汎用的な製品を対象として、基礎学問の研究や、目的に応じた応用研究の模索などを行い、技術的な基盤を確立するためのプロセス。
- (6) プロセス インプットを使用して意図した結果を生み出す、相互に関連する又は相互に作用する一連の活動。
- (7) 因子 ある結果を生ずるもととなる諸要素のひとつ。
注記：ロバストパラメータ設計(品質工学)で用いられる因子は、制御因子、ノイズ因子(誤差因子ともいう)、信号因子、標示因子などに分類される。
- (8) 設計変数 設計を決定する主要なパラメータ。
注記：各変数が連続量で定義される場合と離散量で定義される場合がある。
- (9) 設計 ある目的を具体化する作業。
注記：
1. 「設計」が動詞として用いられる場合は、システム又はシステム要素の、構成、システム要素、インタフェース及びその特性を定義することを意味する。
2. 「設計」が名詞として用いられる場合は、注記1のプロセスの結果を意味する。「設計」は、システム要素について、詳細な実装レベルの物理的構成、ふるまい、一時的で経時変化する関係、及びその他の属性を提供する。

- (10) 誤差 測定や理論的推定などで得られた近似値（測定値や推定値、計算値など）と真の値（と考えられるもの）との差。
- (11) 信号 システムの入出力関係において、意図した出力を得るために、使用者が意図的に変化させる入力変数。
注記：システムの運用及び作動に関する条件は、信号又はノイズに分類される。
- (12) ノイズ システムの機能を乱す変数。
注記：
1. システムの運用及び作動に関する条件は、信号又はノイズに分類される。
2. ノイズには、製品の外部で発生する外乱と、製品の内部で起きる内乱がある。
- (13) ばらつき 一様でなく、ふぞろいであること。
注記：ばらつきの例として、測定値等の数値が不規則に分布する状態が挙げられる。
- (14) 外乱 ノイズの一種で、製品の外部からくるばらつき要因。
注記：製品が、通常の稼働状態において、環境条件や使用条件の変化など、外部から受ける干渉が外乱である。
例えば、自動車の場合、強い風がもたらす空気力や走行路面の不規則さなどを、主な外乱の例として挙げる事ができる。
- (15) 内乱 ノイズの一種で、製品の内部でおきるばらつき要因。
注記：内乱の例として、劣化、疲労など製品の時間経過による内部定数の変化や、製造上のばらつきによる内部定数の違いがある。
また、外乱の結果として、内乱が生じることがある。
例えば、外乱である環境温度が高くなった場合に、製品内部の部品に生じる寸法変化や潤滑油の粘性変化、電気回路の抵抗値変化などを、外乱によって生じた内乱の例として挙げる事ができる。

3. ハンドブックの背景と狙い

従来、宇宙機設計の信頼性は、参考文書「2.1 (1) 信頼性プログラム標準」で記載されているとおり、製品開発に対して、プログラム管理方法を厳格に適用することにより作り込むことが求められている。一方、宇宙機システムに対する機能要求は複雑かつ高度化し、それに伴い従来のプログラム管理方法の実践のみによる設計信頼性確保は困難になりつつある。今後は、従来の信頼性管理、品質管理、コンフィギュレーション管理等のシステムズエンジニアリング管理技術だけでなく技術的な方法論によって信頼性を確保する必要がある。

システムの機能要求が複雑かつ高度化する傾向は自動車産業、航空機産業等他分野においても顕著である。これらの産業では、モデルベースデザインを取り入れて開発

の効率化を図るとともに、シミュレーション技術をさらに発展させロバスト設計を適用する動きが起こりつつある。

ロバスト設計ハンドブックは、自動車産業、精密機械、建設機械等の産業で適用されているロバスト設計に関する技術を宇宙分野に導入し、ロバスト性を向上させるための具体的な手法を提供するものである。本ハンドブックを利用することにより、**JAXA** 及び宇宙機メーカーの開発、設計にかかわるエンジニアが、宇宙機システム及び宇宙機に搭載される機器の構想設計、詳細設計の設計プロセスに適用することを目的としている。

4. ロバスト設計の定義

4.1 ロバストとは

「ロバスト」(robust)とは「(見るからに)強健な、(つくりの)がっしりした」との意味を持つ形容詞である。エンジニアリングの世界においては、「ロバスト性」(robustness)という用語は、「頑強性」、「頑健性」という類語と同様に、「ある系がストレスや環境の変化といった外部から系に入ってくるさまざまなノイズや劣化など内部要素の変化などの影響によって出力が変化することを阻止する内的な仕組み、又は性質」を指す言葉として用いられる。「ロバスト性」を持たせる設計を「ロバスト設計」といい、「ロバスト性」を最適化することを「ロバスト最適化」という。

なお、制御系設計で用いられる「ロバスト制御」は、制御対象の実際の特徴が、制御系設計の際想定したモデル(モデル誤差)と多少異なっても制御性を余り損なわない制御を指すものであり、基本概念はロバスト設計と同様であるが、ロバスト最適化には H^∞ 制御等の数学的な手法が採用され、最適性、安定性等は数学的に保証されている。基本的には、フィードバック制御系の設計以外の設計には適用できないため本書の対象外とする。むしろ、制御しやすい頑健性のある系を制御の前に設計する方法をロバスト設計とする。

4.2 ロバスト最適化の概念

ある製品の性能(応答 Y)が唯一の設計変数 X によって定義される場で、なおかつ図4.2-1で示す設計変数 X との関係を示す性能曲線で与えられた場合を考える。なお、図の失敗領域とは、応答 Y がこの領域に入ると、製品は失敗することを示している。

ここにおいて、決定論的な方法で応答 Y を最大化する最適解を導出すると、①の点が設計解として得られる。これは決定論的最適解と呼ばれる最適解である。

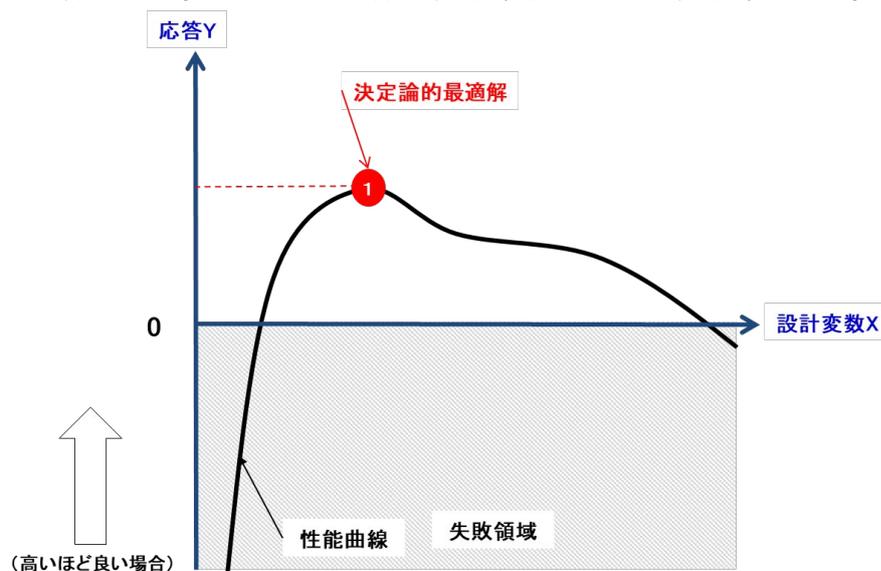


図 4.2-1 決定論的最適解の概念

しかし①の点が実際の設計で採用されることは稀である。その理由は、以下2点である。

- (1) 設計変数 X がばらつき ΔX を持つ。
- (2) 設計変数が X 以外に存在する場合
それぞれについて以下に示す。

(1) 設計変数 X がばらつき ΔX を持つ場合

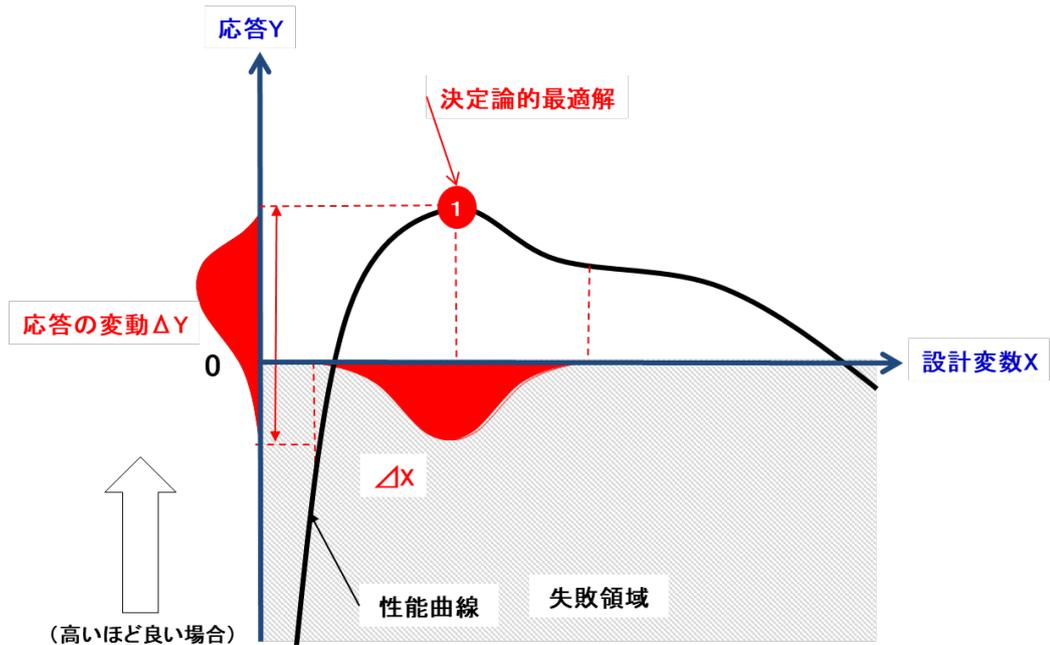


図 4.2-2 設計変数 X のばらつき ΔX とその応答 ΔY (決定論的最適解)

決定論的最適解では、最適な設計変数の組み合わせを厳密に与えた場合のみ、最適な応答 Y の最大値が保証される。しかし、実際の製品では、材料のバラつきや、規格品の利用により、設計変数 X のみが選択されることは稀であり、その結果、異なる値の範囲をとることになる。設計変数 X が図 4.2-2 の赤い釣鐘型の分布 ΔX の範囲で内乱によりばらつくと、性能曲線が示す設計変数 X と応答 Y の間の関数関係によって、応答 Y は図 4.2-2 の赤い釣鐘型の分布 ΔY の範囲でばらつくことになる。この図では ΔY のばらつきの範囲は大きく、場合によっては失敗領域に入る可能性があることが示されている。この場合、①の点は設計変数 X のばらつきに対してロバスト性を持った最適解とは言えない。

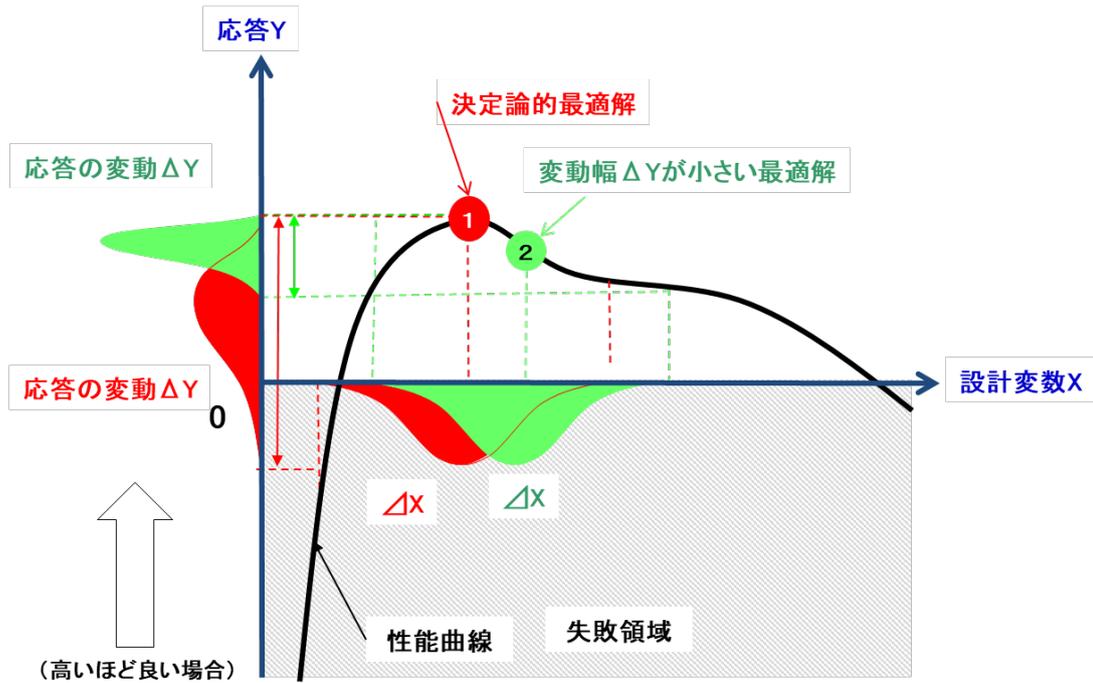


図 4.2-3 設計変数 X のばらつき ΔX とその応答 ΔY (ロバスト最適解の例 1)

次に、設計変数 X が①の点と同じばらつき範囲 ΔX を有するものとして、設計変数 X を②の点の値を最頻値とする範囲で設計解として選択した場合を考えると、図 4.2-3 で緑色の釣鐘型の分布 ΔX の範囲のばらつきに対して、応答 Y は図 4.2-2 で「より小さい応答の変動 ΔY 」を示す緑色の釣鐘型の分布 ΔY の範囲となる。これはロバスト性を考慮した最適解である。つまり、設計変数の中心を適切にすることによりばらつきを削減できたことを意味する。

決定論的最適解（設計変数 X を①の点が最頻値となるよう選択）に対する応答 Y に比べ、ロバスト性を考慮した最適解（設計変数 X を②の点が最頻値となるよう選択）に対する応答 Y は、応答の変動がより小さくなることで相対的に「ロバスト性」があるということができ、かつ応答 Y の最頻値は①の点を設計解として選択した場合よりも小さくなることから、②の点を設計解とした場合の方が、目標値に対して「より最適」な解を与えることになる。

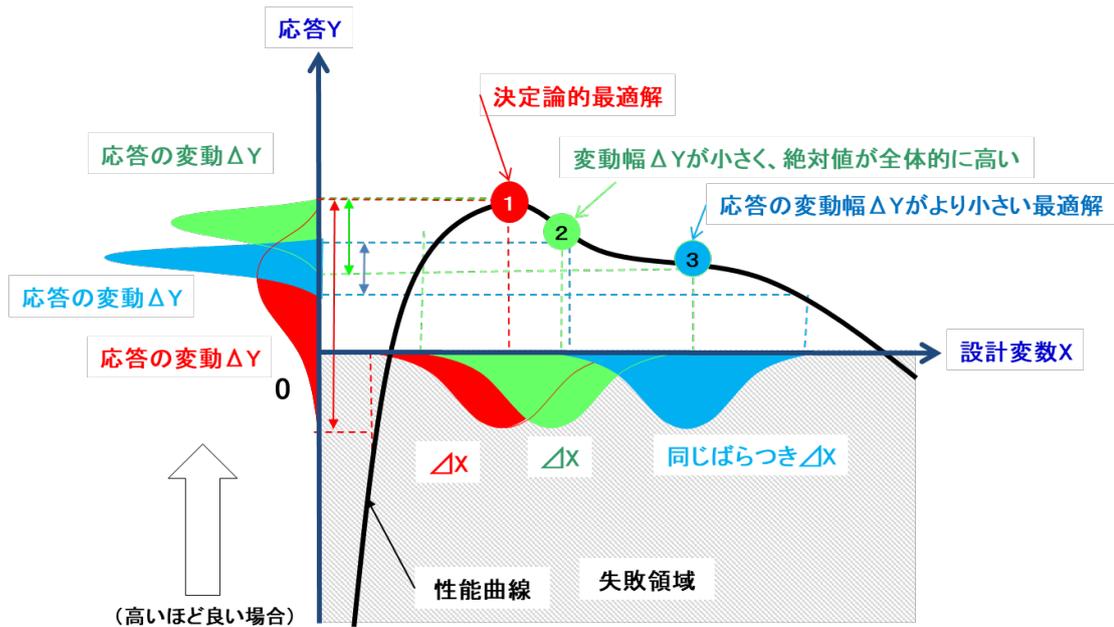


図 4.2-4 設計変数 X のばらつき ΔX とその応答 ΔY (ロバスト最適解の例 2)

また、実際の設計では、応答 Y の絶対値を良くしたい場合と、性能に余裕があるので応答 Y の変動を安定させたい場合と 2 通りある。図 4.2-4 の②③の点はいずれもロバスト最適解であるが、②と③の比較においては、②の方が応答 Y の絶対値を良くする目的での最適解であり、③の方は応答の変動幅を小さくする目的で選択した最適解の例である。

「ロバスト最適化」は、設計変数で発生するばらつきを予め想定して応答のばらつき範囲を含めて応答が最適化される設計変数 (図 4.2-4 の②③の点) を選択することであり、言い方を変えれば、出力の変動における有害な効果 (ばらつき) に対する有用な効果の比 (S/N 比と言われることが有る) を最適化することである。

(2) 設計変数が X 以外に存在する場合

実際の設計においては、ここまで述べたような、設計変数 X が一つである場合は極めて稀であり、多くの変数を同時に設計する必要がある。特に外乱は設計者にとって把握しづらい面があるため、注意して設計をする必要がある。この場合、図 4.2-5 のイメージ図に示すとおり、他の設計変数 N との関係で、性能曲線が大きく変化することになる。

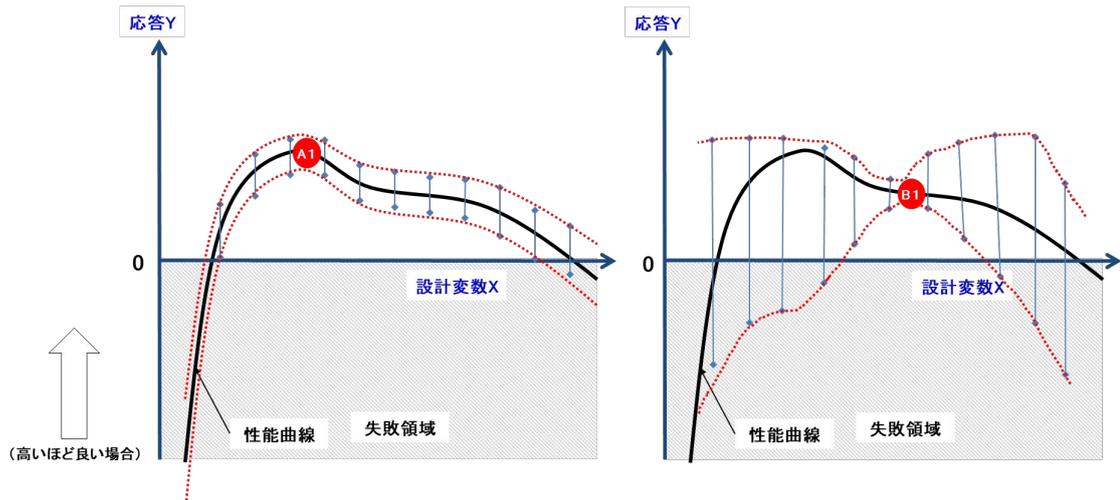


図 4.2-5 非線形解析におけるバラつきの概念

図 4.2-5 の左図は非線形性が弱い場合を示したものであり、 X 以外の設計変数が変化しても応答 Y のバラつきの量（上下 2 つの赤い点線の間の変化）は、 X の値に依らずほぼ均等に現れている。この場合であれば、バラつきの量が推定しやすいので、ロバスト最適解（左図では A1）の選択は比較的容易となる。

右図は非線形性が強い場合を示しており、応答 Y のバラつきの量（上下 2 つの赤い点線の間の変化）が X の値によって変化することが示されている。この場合においては B1 がロバスト最適解となるが、性能向上（この図では値が低いもの）とバラつきの低減を両立させるのは困難となり、ロバスト最適解の算出は極めて困難となる。

これらの非線形の挙動を示す技術開発において、ロバスト最適解を算出する方法については、現在も研究が進められている状況である。

4.3 製品開発におけるロバスト性確保の方法

一般に、製品を製造する／使用する際に、ノイズにより目的とする特性のばらつきが生じていることへの対応の仕方には、以下の①から④に示す4つのアプローチがある。実際の製品開発の場合においては、コストやスケジュールとのバランスを考慮して、適切な方法を選択することが重要となる。

① ノイズを許容する

ノイズの影響が小さい場合は、無視することが可能である。許容できない場合には、以下②から④の対策が取られることとなる。

② ノイズを制御する

ノイズ（システム設計と製造上のばらつきによって生じる内部定数の違い）を発見し、除去や制御を行う方法である。これは、古くからの品質管理の中心的な方法である。

製品の製造時の条件変動、材料ばらつきなどに対してはこの方法がとれる。対応としては、加工精度を上げる、品質の高い材料を使う、機械でなく人が仕上げる、さらに熟練者が仕上げる、などが挙げられる。これらを行うためには、過去の製造実績を集計し、誤差を減らすためのノウハウを明確にする必要がある。しかし、問題を発見してからの対処方法になりがちなので、未然防止策としては限界がある。また、基本的にコストがかかる上、ノイズの制御がうまく機能しなかった場合には、製品の信頼性に悪影響を及ぼす。

また、製品の使用時に生じるノイズの制御としては、製品を使用する環境条件／使用条件を限定することで、製品に作用する外乱の影響を制御(抑制)し、不具合を出にくくすることが挙げられる。この場合、製品を使用できる条件が限定されることから、製品のアベイラビリティ(可用性)が低くなり、製品の信頼性に悪影響を及ぼす。

③ ノイズの影響を補正する

ノイズそのものには手を打たず、出力の目標値からの偏差を知って、目標値に合せるように調整・修正する方法である。

製品の製造時に生じるノイズの影響補正としては、不良をはじく、品質検査を厳しくする、といった方法が挙げられる。これらの対応は、製品の品質を上げているわけではなく品質が悪いものを出さないという処理であり、不良品の廃棄や検査工数などにより、やはりコストはかさむ。また、検査自体に不良があった場合には、製品の信頼性に悪影響を及ぼすため、注意が必要である。

製品の使用時のシステムが遭遇する環境や使用条件の変動等の外乱に対する影響の補正の例としては、システム出力が要求を満足するように「フィードバック制御」によって出力へ現れる外乱の影響を抑制するケースを挙げることができる。フィードバック制御系では、想定される外乱に起因する系の特性変動はマージンとして設計に織り込まれる。一方、系の特性変動が想定を超え制御量が要求を満足できない場合（使用中に発生するノイズの影響補正が適切に機能しない場合）には、製品の機能／性能及び信頼性に悪影響を及ぼす場合がある。さらに制御対象のモデルが非線形、複雑でモデル誤差の性能への影響が単純に評価できないようなシステムでは、そもそも、想定された外乱に対してもフィードバックでノイズが補正できるかが担保されない場合がある。

④ ノイズの影響を最小化する(ロバスト設計手法の適用)

ノイズは制御できないという前提に立ち、ノイズがあったとしても、その影響が出にくい設計を行う。ロバスト設計の概念で示した様に、自ら設定できる設計変数の中心値を適切に選択することにより、ノイズの影響を減衰させる設計法、等の方法により対策を取る。

②と③のように、ノイズの制御や補正は、製造に入った後や使用中の対応であり、製造・検査品質のばらつき／システム出力の要求未達は、製品の信頼性に直接的な影響を及ぼす。④のロバスト設計は言葉の通り、製造前である設計段階でしかるべき手を打つという原則であり、製造への負担とコストも減らすことが可能となる上に、製品の信頼性向上にもつながることから、宇宙機の開発プロセスにおいても、ロバスト設計手法を応用した開発の拡大が望まれる。

5. 品質工学

5.1 品質工学とは

品質工学とは、田口玄一（たぐちげんいち、1924年1月1日～2012年6月2日）が考案した企業などの製品やシステムを研究、技術開発から生産、販売・サービス、運用における全体に適用できる汎用技術の体系である。品質工学の目的は、ばらつかなさの改善による品質とコストの両方を早い開発段階から改善し、生産性を向上させることにある。その中で中心的な設計法がパラメータ設計と呼ばれるロバスト設計手法がある。品質工学の中のいくつかの手法は、アメリカでは"タグチメソッド"と呼ばれており、1980年代のアメリカの技術開発の停滞を打ち破るのに大きく貢献したと言われている。1997年には、田口玄一はアメリカの自動車工業界への貢献が認められ、自動車殿堂入りを果たした。

品質工学の中での中核的技術は、大きく以下の3つ領域で構成されている。それぞれにおいては現在も研究が進められており、多くの書籍が出版されている。

本ハンドブックは、設計段階で利用できるロバスト設計取り上げるものであることから、(1)②のパラメータ設計を対象として、その概要と使い方について解説する。

(1) オフライン品質工学

システムの設計を対象にした品質工学で、製品やシステムが開発される前の技術開発や具体的製品が企画された後の製品開発や設計、さらには製造工程などの生産システムを最適化するための考え方や手法が含まれている。その中の共通する設計プロセスを以下に示す。

① システム選択

使用者や顧客の価値を決める機能とデザインを決めるシステムを社会的損失の削減の観点から、それをつくりあげる技術手段を選択する行為である。技術者が顧客の立場に立ち、顧客が欲しい機能を満足するシステムをたくさん考案することが大切である。

② パラメータ設計(本ハンドブックの対象)

選択したシステムに与えられた機能のばらつかなさ（ここではその性質を機能性と呼んでいる）の評価を中心に、システムを構成する設計変数（パラメータ）の中心値を決定する設計方法である。機能のばらつきにくさをSN比という評価尺度を採用し、実験計画法の手法を利用して設計対象全体のばらつきかなさ、つまりロバスト性を向上させるための考え方と手法で構成されている。

設計変数である設計パラメータを、ノイズ変数（品質工学ではノイズ因子）と設計者が自由に定数として設定すべき設計因子（品質工学では制御因子と呼ぶ）と、ユーザが目的を自由にかえるための操作変数（品質工学では信号因子と呼ぶ）に分けて扱う点に特徴がある。ノイズ因子に対して目的とする特性のばらつきを少なくし、しかも信号因子で目的とする特性を意図どおりに変えるように、制御因子の中心値を決定する設計方法であり、その設計結果を実際使用するさまざまな変化条件の中でも再現することを担保するという考え方のもとに構成されている。

③ 許容差設計

許容差設計は、通常パラメータ設計が行われた後に行う手法である。パラメータ設計で制御因子の中心値が決定されるが、実際には、設計中心値だけで生産することが

できない。システムを製造するときや、決めた値が使用時間の経過とともに、内部変化をするのが普通である。このような内乱により、制御因子の中心値が変化することにより目的とする特性がばらつくことになり、つまり品質が悪くなる。制御因子をばらつきのない状態にするには、製造の精度を向上させるか、劣化や摩耗をしないものを選択する必要がある、この場合、コストがあがるのが一般的である。

許容差設計は、ばらつきの大きさを顧客の損失として品質評価し、コストと品質による総合損失を最小にするように、制御因子のばらつき範囲を決定する方法である。

方法としては、まず、ばらつきの尺度である出力特性の分散を、実験計画法を用いて求める。続いて、分散を顧客損失に変換するための損失関数という関数を用いて顧客の損失を計算する。そして、制御因子のばらつきを改善するための許容差を厳しくしたり緩やかにしたりして、コストと損失関数でばらつきによる損失を計算し、総合的な損失を見積もり、ばらつきの許容量である許容差を決定する。ここで得られた許容差は、製造段階や部品購入段階での管理や取引条件の限度を決めることになる。なお、本ハンドブックでは許容差設計は対象外とするが、興味がある方は「2.1 参考文献(4)(5)」を一読されたい。

④ 許容差(安全率)の決め方、

許容差設計ができない場合において許容差の決定は、単独の制御因子のパラメータの許容差を、損失関数を用いて決めることができる。許容差を経済的に決定するために、損失関数を用いて総合損失から臨界許容差をきめることができる。品質による損失から、許容差のみでなく、品質による損失とコストの面から社会損失を最小にするように、安全装置や安全システムなどの付加機能の設計にも適用ができる。なお、本ハンドブックでは、許容差の決め方については対象外とするが、興味がある方は「2.1 参考文献(4)(5)」を一読されたい。

以上のようにオフラインの品質工学では、システムが選択されたあとの設計を、ノイズを中心とした機能のばらつきを最小にする、すなわち品質による損失を最小にするよう、制御因子の中心値の決定を最優先して設計する。多くの場合は、制御因子の中心値を変えることは、コストがかからない場合が多いので、まず品質による損失を最小化してから、制御因子の許容差をコストと品質による損失を最小化するように許容差を決定する総合的な設計方法で構成されている。外乱に対して、ばらつきを減少できないときには、システムは製品が壊れないように、防御的な安全装置や安全率を高める安全設計をおこなうことになる。

(2) オンライン品質工学

製品やシステムは、設計された仕様に従って、材料、部品、ユニット等が加工され組立され製品となるが、製造段階においては、それぞれが設計された設計変数の許容差内に収まるように管理される必要がある。

オンライン品質工学は製造段階で行われる製造工程の管理のシステム設計のために用いられる考え方と手法の体系である。製造段階でも管理を緩める、すなわちコストをかけないで生産しようとする、得られる機能や性能がばらつくこととなる。結果として許容差を超えた製品が市場や後工程で使われることになり、ばらつきにより品質問題が後から生じることになる。そのような品質問題をださないためには、生産工程で品質を管理する(許容差内に管理をする)必要がある。そのためには管理コストがかかる。管理コストと生産後に生じる品質による損失の総合損失を最小にしておくこ

とが必要である。つまり、コストと損失の損益分岐点を求め管理システムを最適化することが要求される。

オンライン品質工学はそれらの管理システムの最適化の方法で構成されている。具体的には、生産内での検査の決定と検査方式の最適化、さらに検査が不要な場合でも、工程を定期的に監視しなければならない。そのための監視システムとしての工程診断システムの設計、あるいは、品質監視し、そのずれ量を補正するための調整をするフィードバック工程制御システムの最適化などの方法が含まれる。また、付随して計測器の校正や工具などの交換周期などの設計も要求される。さらには、設備の保全システムの最適化など品質と管理コストの総合損失からシステムを最適化する方法がある。製造に関わるすべての要素を損失関数とコストをもとに最適化する方法で構成されている。このハンドブックでは、オンラインの品質工学は対象外とするが、興味がある方は「2.1 参考文書(5), (6)」を参照されたい。

(3) マハラノビスタグチシステム(MTS)

さまざまなデータをまとめて判断をするときに、目的機能にデータを集約して判断するという機能特性を作るための方法の体系である。通常、多次元（多項目）で得られるデータを総合して1つの尺度を作るための総合化した計測法の体系である。例えば、医者が多く数の検査データから、診断をするように、システムの状態のモニターデータから、故障や異常あるいは正常に動いているかどうかの診断機能の尺度を作ることや、人の顔を認識するように様々なパターンを認識するための計測尺度をつくる場合に適用する。MTSは、多次元で複雑なデータを総合して予測や診断あるいはパターン認識という、人の知能活動を補佐するため情報処理システムを一つの処理機能と考えて、その機能性として尺度をばらつきにくさで評価する方法を提供する。最終的には、ばらつきにくさをSN比で評価し、よりコストの少ない量の情報で情報処理システムの機能性を向上させることが狙いである。JAXAではイプシロンロケットの自立診断に利用された実績がある「2.1 参考文書 (7)」。

5.2 パラメータ設計の特徴

一般的にパラメータ設計の概念は難解であると言われることがある。ここでは、5.3 章以降を理解するための、パラメータ設計の特徴を整理する。

まずパラメータ設計を理解するために、以下の4つのキーワードを理解しておくのが良い。それは以下である。

- (1) 機能（機能性、基本機能、目的機能）
- (2) SN比
- (3) ノイズ因子（誤差因子）
- (4) 直交表

それらは、価値工学、電子工学、通信工学、品質管理や統計学の分野で使われている用語と似ているが、パラメータ設計では、それぞれの用語の概念を多くの専門領域にも適用できるように、概念を広げ汎用性がある用語として定義をし直している。したがって、品質工学に独特な面があるが、一度、概念を理解できれば、多くの領域に適用できる。以下にそれぞれのキーワードを解説する。

(1) 機能：

機能とは一般的にものごとの働きを示す言葉である。ある新しい材料の強度評価（また強度の向上）をすることがしばしばある。それは設計者が判断するものであり、その材料の強度に機能を与えていることになる。機能を考えることが難しいと思われるときは「エネルギーの変換」に着目して機能を考えると良い場合が多い。例えば、材料の変化の場合は、「曲げに加わる外力のエネルギー」に対して「変形」との関係性を考え、機能は「変形に耐えること」となる。外部応力に対して変形が少なく、大きい応力に耐えることが、機能を発揮していると考えるのである。そのように考えることが基本機能として取り扱うことである。なお上記は例であり、同じ材料であっても、解決したい課題や目的によって機能の考え方は変わるので、注意が必要である。

(2) SN比：

材料を例にとると、その応力と歪は、作り方や加工の仕方により一定とは限らない。つまり応力—歪の関係がばらつくのである。パラメータ設計は、その応力に対する変形のばらつきという悪さの尺度でなく、良さの尺度としてばらつかなさで評価する。そのために、SN比という尺度で評価する。パラメータ設計に利用できるSN比の評価式は本ハンドブックの付録Aに記載があるので参考にされたい。なお、電気通信の分野のSN比とは異なっているが、電気通信のSN比は、入力電力に応じた出力の大きさを「信号の大きさS」で、出力電力がノイズにより乱れる量を「ノイズの効果N」ととらえるが、パラメータ設計では、同じように、信号として材料に対して加える応力と歪の大きさを信号の大きさSと考え、ノイズ要因による応力と歪の応答のばらつきをNとしてSN比で表すのである。このSN比を用いてトータルとしてのロバスト性の尺度とするのである。電気通信の場合と同じように比をとることにより、基準化し、設計の相互比較をしようとするものである。単位はdb（電気通信の場合はdB）を用いる。

(3) ノイズ因子：

モノ作りにおいては、いつどんな時も安定的に再現性良く同様の結果が得られることが望ましい。しかし、現実的には設計者が制御できない要因（例：測定機器の差、計測誤差、材料のバラつき、季節差など）に悩まされることになる。通常は制御不能な要因を取り除いて精密な応答をしらべ、制御できない要因については、設計者のノウハウでうまく取捨選択して取り込むことが行われる。しかし、パラメータ設計では意図的に制御不能な要因を取り入れ、その中で制御不能な要因の効果を減少させるように最適化を図る点に特徴がある。この意図的に取り入れる制御不能な要因を総称してノイズと呼ぶ。実際システムが使われる場合、それこそさまざまなノイズが想定される。無限に近いノイズがあるのが普通であり、市場に出す前にはそれが分かっている。そこで、ノイズを想定し、その中から代表的なノイズを選定し、パラメータ設計に取り込むのである。そのように選択したものをノイズ因子と呼んでいる。（品質工学の書籍ではノイズ因子を誤差因子と呼んでいるものがある）

その一方で、一般的に設計者が操作し、その設計変数の値を自由に決めることができる因子のことを、制御因子という。パラメータ設計で、これらの制御因子により、信号因子の効果を増幅させ、それをノイズ因子により乱れないかを調べるために、それぞれを組み合わせた網羅的な計算を行い、安定して機能を発揮できる最適設計解を算出する手法である。

(4) 直交表：

前述した制御因子とのノイズ因子の網羅的な探索作業は、組み合わせ数が膨大にな

るので、できるだけ少ない数で行う必要がある。また、ノイズ因子の影響を最小限とする制御因子を探し出し、最適解を算出する必要がある。それを実現するために、パラメータ設計では直交表という数値の表を用いて、それを可能としている。直交表とは、イギリスの統計学者の R.フィッシャー（1890～1962）によって考案されたものであり、計算の組み合わせを削減するとともに、任意の 2 因子（列）についてその水準のすべての組み合わせが同数回ずつ現れる様に作られた表である。これをパラメータ設計に利用することで、網羅性を担保しつつ計算回数の削減が可能であり、また、複数の制御因子の組み合わせの数が揃っていることで制御因子の相互の比較検証が容易となり、得られた最適設計解の精度が向上させる狙いがある。

5.3 パラメータ設計の手順

実際にパラメータ設計を行うにあたり、推奨される手順を図 5.3-1 に示す。

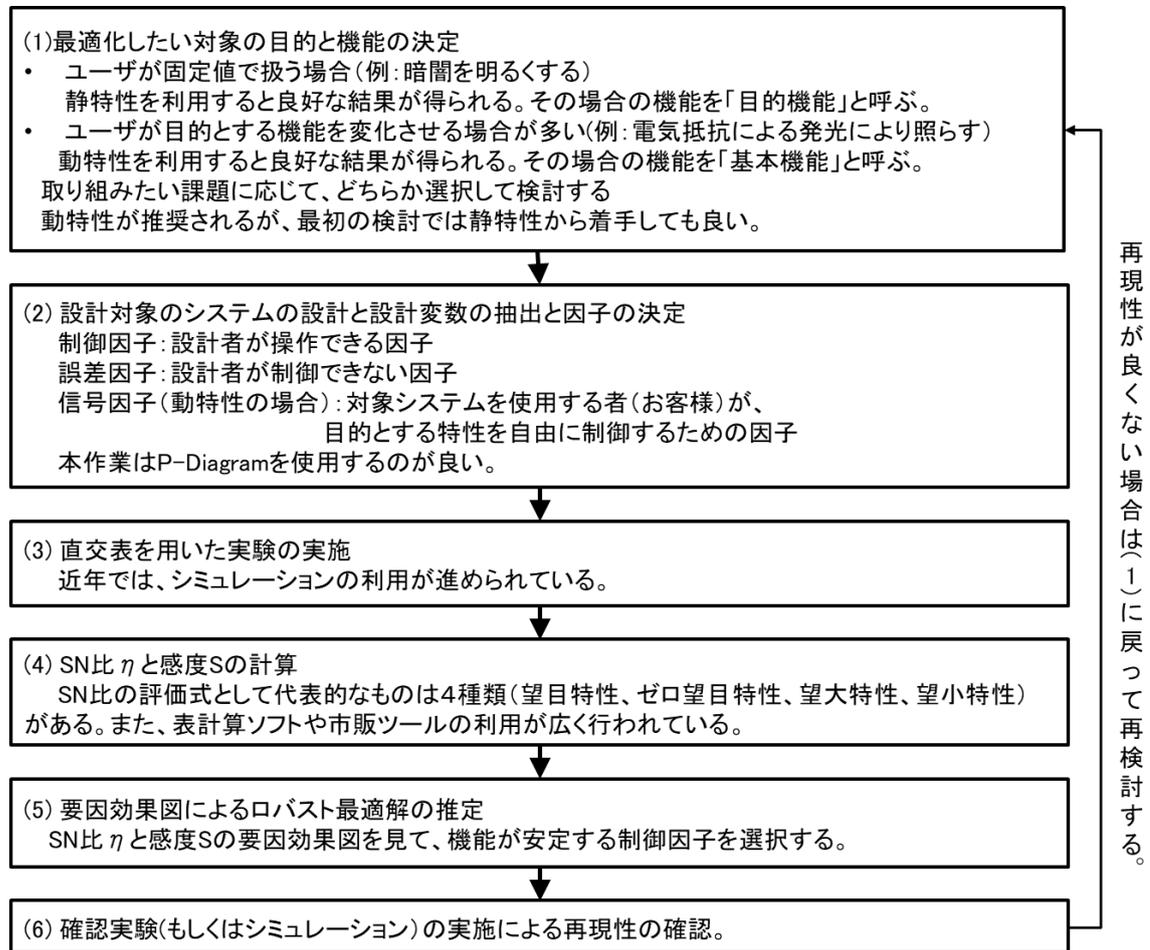


図 5.3-1 品質工学（パラメータ設計）の手順とポイント

以下に、個々の詳細について解説する。

(1) 最適化したい対象を考え、対象の目的と機能(目的機能、基本機能)を決める

パラメータ設計では、目的を達成するための対象に必要な働きを明らかにしたものを、目的機能と呼んでいる。これに対して、基本機能は、目的機能を達成するための技術的手段による働きである。

例えば、照明を考えてみる。暗闇を明るくするというのが目的機能である。明るくするためにはさまざまな手段がある。ろうそくで明るくするなら、ロウの燃焼により光により明るくするというのが基本機能である。白熱電球なら、電子をフィラメント中に流したときに生まれる電気抵抗による発光により照らす。などが基本機能である。このように手段が変わると基本機能が変わる。

また、パラメータ設計の機能の考え方として大きく2つある。ユーザが操作して目的とする特性を、ユーザが一定の値として固定する使い方をする場合と、ユーザがレ

ベルを切り替える使い方を想定する場合との2通りである。前者を静特性と呼び、後者は動特性と呼ぶ。

例を挙げれば車のハンドルを回転させて車輪の角度を変えたり、アクセルを踏んでエンジンの出力を変えるなどが動特性である。一方、車のサイズや、ハンドルの外径などは一度きめると固定されるものがある。これらは静特性である。

一般的には、目的特性を変える動特性で技術開発を行い、設計時に目的値を固定する場合には、目的値を変える信号因子で目標決定するのが望ましい。これらは目的機能にも基本機能にも両方とも動特性と静特性があるが、基本機能の多くは動特性にすることが殆どである。

動特性では、この目的とする特性を変える因子を信号因子と呼んで、通常 M という記号を割り当てる。そして先ほど例示した照明の場合は、「電気抵抗による発光により照らす」ような目的特性を結果とし、 y で示す。 y は実際には計測される特性であるか、計算で設計する場合は、計算結果として得られる変数となる。

パラメータ設計では、信号因子 M と出力との関係を単純な比例式 $y = \beta M$ を理想として定義する。設計上の機能は図 5.3-2 基本機能の概念図の左図のように乱れるが、右図のように線形になることを設計上の理想と考える。これはパラメータ設計における、対象を機能特性に忠実にしかもシンプルに捉えるための考え方であり、現象を単純な一次式で表現し、 M と y の間のばらつきが少ない評価をすることで、設計対象の機能に迫る狙いがある。

なお、検討の初期段階で、設計後の調整が不要で、目標値を固定したいとする機能なら静特性を用いることで、ロバスト設計の検討が可能である。しかし、検討を進めるうちにユーザの操作に対する検討が必要となった場合には、動特性の検討を行うことが推奨される。

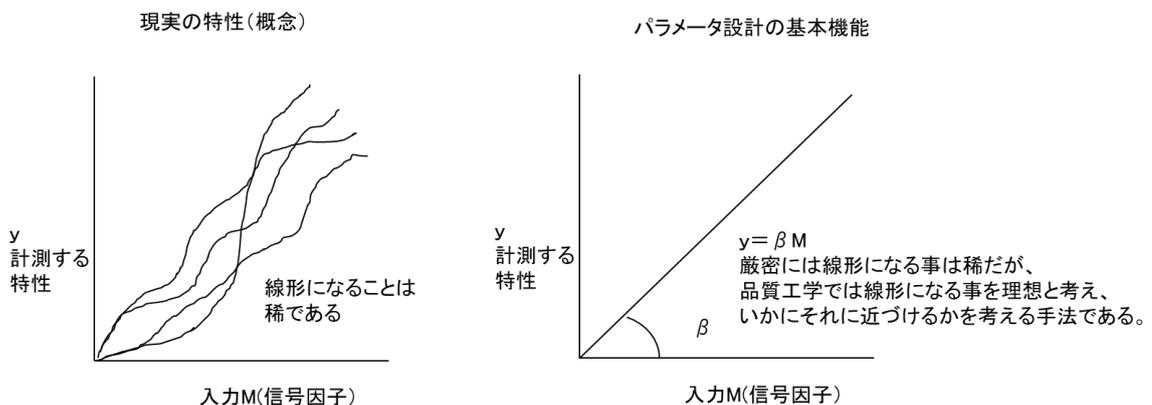


図 5.3-2 基本機能の概念図

(2) 制御因子と誤差因子を決める

機能の定義が終わったら、その機能性を評価するためのノイズ因子と、設計するための制御因子を抽出する。設計者が自由に決定できる因子を制御因子としてとりあげ、自由に操作できない値をノイズ因子として取り上げる。ノイズ因子としては、対象に加えられる様々な因子で、製造にかかる条件、環境や使用条件、等である場合が多い。

ここでは、できるだけ先入観を排除して、多くの制御因子、ノイズ因子を洗い出すことが重要である。因子の洗い出しにおいては、図 5.3-3 の P-Diagram を用いることが推奨されており、これにより、出力、信号因子、ノイズ因子、制御因子について、整理がしやすく網羅的に抽出できる。ノイズ因子を網羅的に抽出すると多くのノイズ因子が取り上げられることになるので、そのうち代表的なものを選択する。数が多い場合は、ノイズ因子の調合という方法が利用できるが、本ハンドブックでは割愛する。詳しくは、「2.1 (5)」を参照のこと。

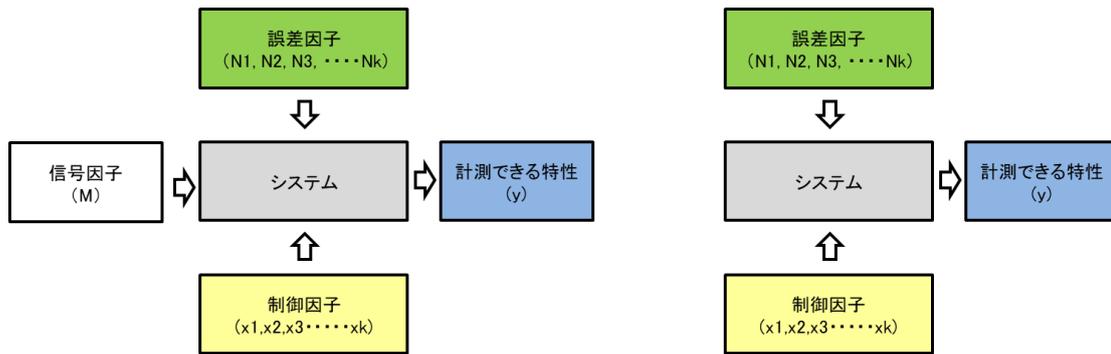


図 5.3-3 P-Diagram による因子の整理（左：動特性、右：静特性）

(3) 直交表を用いた実験(もしくは解析)を行う。

制御因子と誤差因子の組み合わせを、直交表を用いて作成する。

製造業では、これまでは L_9 、 L_{18} 、 L_{36} という 3 水準系（混合系）の直交表が利用されており、多くの成功事例が報告されている。代表的な例として表 5.3-1 に L_{18} 直交表を示す。ここで、作業を効率化させるために、ノイズ因子については、2 水準系の直交表の L_4 、 L_8 、 L_{16} や 3 水準系の L_9 などの小さい直交表が利用される場合がある。この場合は、調合という手法を用いてパラメータを減らすことが行われる。この方法は難易度が高いため、専門家のアドバイスを利用しながら取り組むのが良い。

なお、直交表による因子の組み合わせは、表計算ソフト等によって容易に可能である。また、最近のソフトウェアの中には、直交表実験のパラメータの組み合わせを自動作成して、解析ツールを自動実行させるものが広く使われている。目的に応じて適切な方法を利用することで、業務の効率化に繋がると考えられる。

表 5.3-1 L18 直交表

No.	A	B	C	D	E	F	G	H
	1,2	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3
実験1	1	1	1	1	1	1	1	1
実験2	1	1	2	2	2	2	2	2
実験3	1	1	3	3	3	3	3	3
実験4	1	2	1	1	2	2	3	3
実験5	1	2	2	2	3	3	1	1
実験6	1	2	3	3	1	1	2	2
実験7	1	3	1	2	1	3	2	3
実験8	1	3	2	3	2	1	3	1
実験9	1	3	3	1	3	2	1	2
実験10	2	1	1	3	3	2	2	1
実験11	2	1	2	1	1	3	3	2
実験12	2	1	3	2	2	1	1	3
実験13	2	2	1	2	3	1	3	2
実験14	2	2	2	3	1	2	1	3
実験15	2	2	3	1	2	3	2	1
実験16	2	3	1	3	2	3	1	2
実験17	2	3	2	1	3	1	2	3
実験18	2	3	3	2	1	2	3	1

次に、制御因子を縦軸（内側因子）、誤差因子・信号因子（動特性の場合）を横軸（外側因子という）に配置し、縦横で組み合わせた実験(図 5.3-4)を作成する。制御因子の組み合わせは必ず直交表を使って作成する必要があるが、誤差因子・信号因子については計算数を削減するために、直交表を使用せずに代表的な組み合わせだけに絞って計算する場合もある。

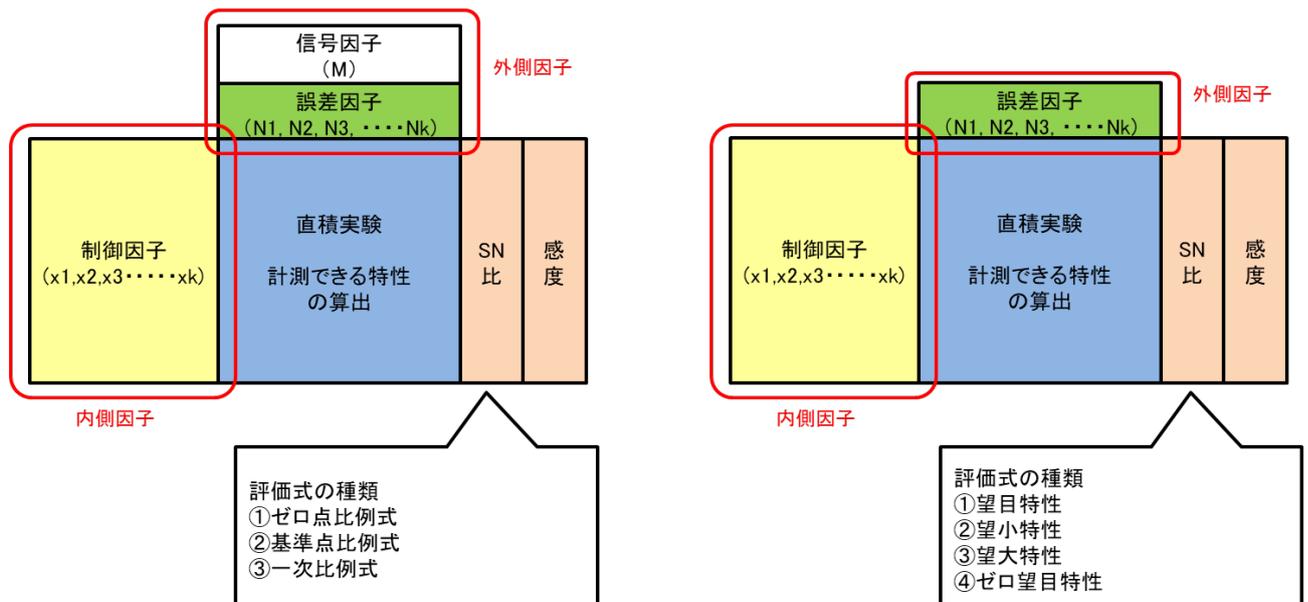


図 5.3-4 直積実験の概念図（左：動特性、右：静特性）

(4) 得られた結果から SN 比 η と感度 S を計算する。

ここで、SN 比 η と感度 S の計算については、品質工学の長年の蓄積をもとに、いくつかの評価式が提案され、実用化されている。課題に応じて適切な評価式を選択することが重要である。なお、これらの計算式は原理を理解すれば、ロジック自体はそれほど難しくないので、表計算ソフトなどに記載して利用される例が多くみられる。評価式の詳細については「付録 A 品質工学の評価式」を参照のこと。

(5) 要因効果図を作成し、ロバスト最適解を推定する

得られた SN 比 η と感度 S について、要因効果図(図 5.3-5)を作成し、評価を行う。要因効果図を利用することで、ロバスト最適解の算出が可能になるだけでなく、それを他の設計者との間で共有することで、製品に対する共通認識が生まれることが期待できる。

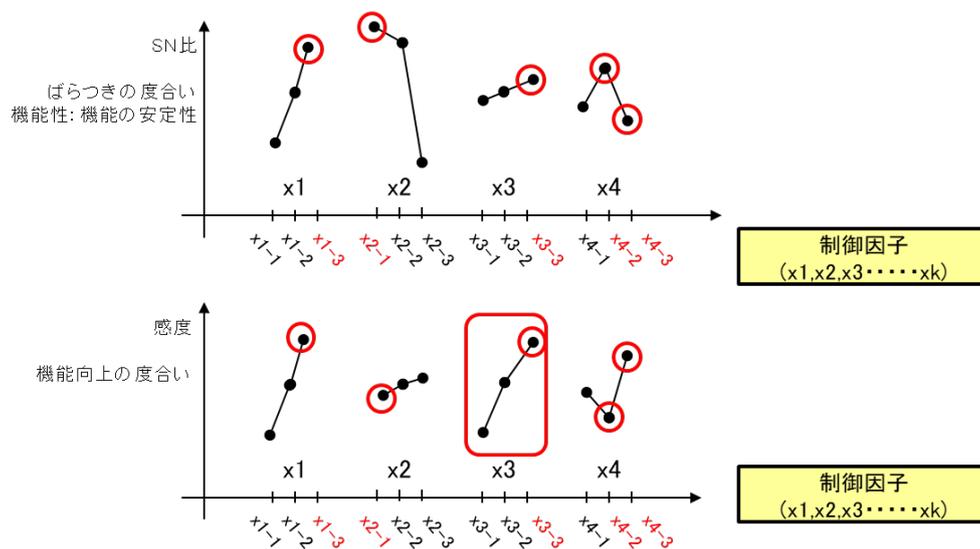


図 5.3-5 要因効果図の概念図 (上: SN 比、下: 感度)

SN 比の値が大きいものは機能性が高く (ばらつきが小さく)、感度は値が大きい方が機能向上の度合いが高いことを意味する。したがって、SN 比と感度の 2 つのグラフを見て両方が上になっている因子を選択するのが最善である。図の x_1 の例がそれに該当し、 x_1 の 3 番目の値を選択することとなる。

SN 比が大きく、感度が変化しないものは特に優先して SN 比が高い値を選択することが推奨される(例: 図中の x_2-1)。製品開発においては、様々な検討を同時並行で行う場合が多く、要因効果図に現れない因子を扱った検討が進んでいる場合もことから、目の前の検討は機能を安定させておいた方が、全体として良い製品になることが多いからである。

SN 比と感度のグラフが逆に傾いている場合や、どれが良いか判断が付きにくいもの(例: 図中の x_4)についても同様に、SN 比を重視することが推奨される。ロバスト設計は、複数の因子を総合的に扱うことで実現できるものであり、それは、SN 比で機能のばらつきの抑制 (機能性の向上) を優先して行い、他の因子の感度を利用し

て目標とする機能に合わせることで実現される。この SN 比、感度の順でロバスト設計を行う方法を 2 段階設計といい、品質工学の過去の事例で良好な結果が報告されている。

また、SN 比は大きく変化しない(機能性に悪影響がない)因子で、かつ感度が大きく変わる因子(例：図中の x_3) は、機能の調整用の因子として利用できる。望み特性の場合は、こういった因子に着目して、目標とする値に合わせこむことが有効である。

(6) 確認実験を行い、再現性をチェックする。

ロバスト最適解として選択された因子の組み合わせはあくまで推定値であるため、実際にその組み合わせを用いた実験(もしくは解析)を行い、所期の性能が得られるかどうか確認する。具体的には、SN 比の再現性(目安は 3dB とされている)と、感度の再現性を確認することであり、これは市場で利用できるかどうかの確認をしている事を意味する。ここで、再現性が良くない場合は、機能の考え方が悪い場合が多く、この場合、(1)に戻って再考することが推奨される。機能の本質を考えた事例としては、マツダ社の SkyActive エンジンの開発事例があり、燃焼プロセスの機能を考えることにより、7つの制御因子を洗い出し、それらを検討することにより燃費の改善につながったとの報告がある。「2.1 参考文書(8)」

5.4 パラメータ設計のロバスト性評価の考え方

パラメータ設計のSN比は、その目的に応じて、複数の定義式及び計算式が用意されている。また、その評価式は大きく動特性と静特性に分類される。

製品の使用条件が変化し、出力(y)が入力(M)に応じて変化する場合のトータルとしての機能性を評価したい場合は、動特性を利用する。一方で、特定の使用条件のもとで、一定の目標出力(y)を評価したい場合は、静特性を使用する。

品質工学の歴史を遡れば、最初に静特性が開発され、それではカバーできない複数使用条件が変化する製品の評価のために、動特性が開発された経緯がある。

複数の使用条件をもつ製品のロバスト設計のニーズが増えていることから、近年では動特性の利用が広まっている。

5.4.1 動特性の分類と概要

図 5.4-1 に示すように、動特性はゼロ点比例式、基準点比例式、一次比例式、非線形特性の4つに分類される。図 5.4-2 に動特性の例を示す。図中の例は自動車関係の分野の事例であることをお断りしておく。また、④非線形特性については、基本機能を考えて変数変換などの工夫をおこない、線形にもっていくことがよいが、品質工学においても研究中の方法であるため、本ハンドブックでの解説は省略する。

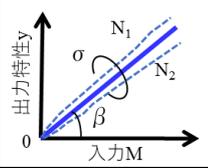
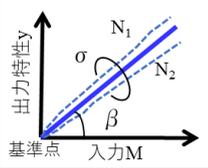
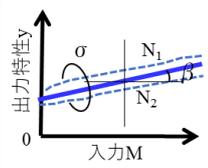
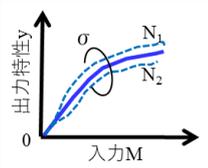
<p>①ゼロ点比例式</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● 入力がゼロのとき、出力もゼロ、入力の増加に比例して出力が増大することを理想とする特性 ● ゼロ点比例式のSN比と感度(傾き)の解析を行う。 <p>SN比 $\eta = \frac{\beta^2}{\sigma^2}$ 感度 $S = \beta^2$</p>
<p>②基準点比例式</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● 技術的にゼロ点とは別のある基準点からの比例関係を理想とする特性 ● 基準点比例式のSN比と感度(傾き)の解析を行う。 <p>SN比 $\eta = \frac{\beta^2}{\sigma^2}$ 感度 $S = \beta^2$</p>
<p>③一次比例式</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● 入力がゼロでも出力がゼロにならない特性で、データ群の中心(入力、出力の平均値)を基準点とする比例式を理想とする特性 ● 一次式のSN比と感度(傾き)の解析を行う。 <p>SN比 $\eta = \frac{\beta^2}{\sigma^2}$ 感度 $S = \beta^2$</p>
<p>④非線形特性 (研究中の特性であり、本ハンドブックでは詳細は割愛する)</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● 入力に対して出力が非線形の目標曲線を有する特性 ● 平均出力を信号とし、出力との間の比例関係を解析 ● 標準SN比と感度(目標曲線からのずれの1次係数、2次係数)の計算を行う。 <p>SN比 $\eta = \frac{1}{\sigma^2}$ 感度 $S = \beta_1(1次係数) 、\beta_2(2次係数)$</p>

図 5.4-1 動特性の分類

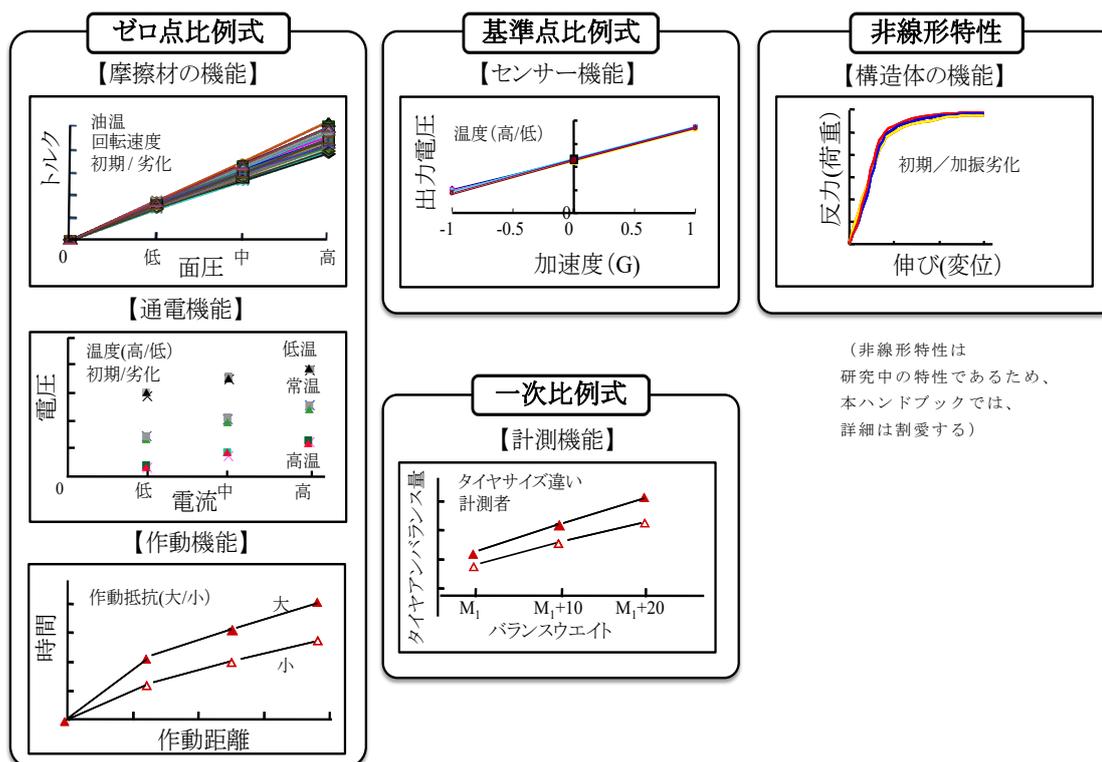


図 5.4-2 動特性の例

(1) ゼロ点比例式の例

① 摩擦材と使った機能のロバスト性(機能性)の評価

摩擦材を利用した機能は、一般的に、摩擦力は摩擦面に対して鉛直方向の力に比例する法則（アモン・クーロンの法則という）に従う原理を用いた機能が多い。ブレーキやストッパーなどが該当する。複写機の紙送りロールの場合などは、ローラに摩擦材をもちいてその回転摩擦力により上を移動させる。ブレーキの場合は、面圧（液圧荷重/摩擦材面積の2信号の組み合わせとしてもよい）を入力 M 、制動トルク（制動力×回転半径）を出力 y としたとき、 $y = \beta M$ （ゼロ点比例式）を理想機能と定義できる。現実には、回転速度、劣化、摩擦材温度、湿度などの内乱、外乱の影響を受けて理想状態からずれるので、ブレーキ材の材質や形状などが制御因子となりその面圧のばらつきをなくすよう機能性評価を行う。

② 通電機能のロバスト性の評価

電球や、ヒータなどのような通電機能を利用したデバイスでは、オームの法則に従うことを前提に設計されている。つまり、通電電流を入力 M 、電圧降下を出力 y としたときに、 $y = \beta M$ （ゼロ点比例式）を理想機能とすることが多い。しかし、現実には、デバイスの使用される環境温度やヒートサイクルなど、外乱の影響を受けて理想関係からずれる。

なお、目的によっては入力－出力を入れ替えて、電圧を入力 M 、通電電流を出力 y とするケースもある。

③ パワーウィンドウシステムのロバスト性の評価

ガラス昇降システムでは、一定の速度で昇降することが理想である。これに対し、移動距離を入力 M 、所定の距離を通過するまでの時間を出力 y とした時に、 $y=\beta M$ （ゼロ点比例式）が成立することを理想機能とする場合がある。現実には、ガラス昇降時に摺動部の抵抗力が、組み立てばらつき（内乱）や、外気温、湿度の変化（外乱）の影響を受けて変動することで、理想関係からずれる。

(2) 基準点比例式の例

① 加速度センサのロバスト性の評価

加速度センサは入力された加速度の変化を歪ゲージやセラミックなどの物理電気変換現象を利用し、加速度の変化を電圧の変化として出力するシステムである。加速度の変化に対して電圧変化が比例することが理想である。この場合、加速度がゼロであっても一定の出力電圧があり、その時の電圧を基準（原点）として比例関係が成立すること（基準点比例式）が理想である。現実には、環境温度などの外乱によって理想からずれる。

(3) 一次比例式の例

① タイヤアンバランス量を計測するシステムのロバスト性評価

バランスマシンの測定は、遠心力による回転体の偏心変位の距離を複数の変位電気変換するセンサを利用した計測装置で計測される。タイヤの質量などが不明でも、その偏心の絶対値が真値不明でも、重量が分かっているバランスウェイトを付加し、その増加量に応じてタイヤアンバランス量の読み値が比例することが測れば目的機能を達成する。付加増加量に比例した関係が理想となる。現実には、タイヤサイズ違いや計測者の違い、セット時のばらつき、治具の劣化などが外乱となり、理想からずれる。

5.4.2 静特性の分類と概要

図 5.4-3 に示すように、静特性は、望目特性、望小特性、望大特性、ゼロ望目特性の4つに分類される。検討の目的に応じて、適切な特性を選択することが望ましい。なお、一般的には研究開発時点では、より大きく／小さくする検討が多いので望大特性、望小特性が使われる傾向があり、詳細設計では目標に合わせこむ検討が多いので望目特性が使われる傾向がある。図 5.4-4 にその一例を示す。

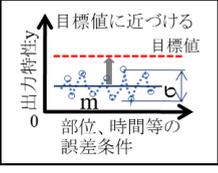
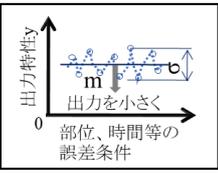
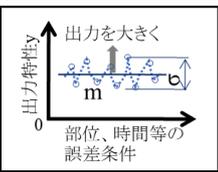
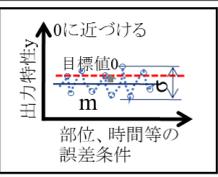
<p>①望目特性</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● 非負の目標値があり、目標値に近ければ近いほど良い特性 ● 望目特性のSN比と感度(平均値)の解析を行う。 $SN比 \eta = \frac{m^2}{\sigma^2} \quad 感度 S = m^2$ <p>(例)塗装膜厚、定抵抗、製品寸法など</p>
<p>②望小特性</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● 非負で小さいほど良い特性 ● 望小特性のSN比の解析を行う。 $SN比 \eta = \frac{1}{\sigma_{小}^2} \quad \sigma_{小}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$ <p>(例)表面粗さ、摩耗量、騒音レベル、有害物質濃度など (一般に望ましくない特性は望小特性)</p>
<p>③望大特性</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● 非負で大きいほど良い特性 ● 望大特性のSN比の解析を行う。 $SN比 \eta = \frac{1}{\sigma_{大}^2} \quad \sigma_{大}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i}\right)^2$ <p>(例)強度など(現実的に無限大は取りえないが無限大が理想と考えて扱う)</p>
<p>④ゼロ望目特性</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● 目標値が0で値が正にも負にもなる特性 ● ゼロ望目特性のSN比と平均値の解析を行う。 $SN比 \eta = \frac{1}{\sigma^2} \quad 感度 S = m \text{ (データ平均値)}$ <p>(例)板金加工やプラスチック成形の反りや段差など (基準からのズレを扱うデータなどはゼロ望目として扱うことが多い)</p>

図 5.4-3 静特性の分類

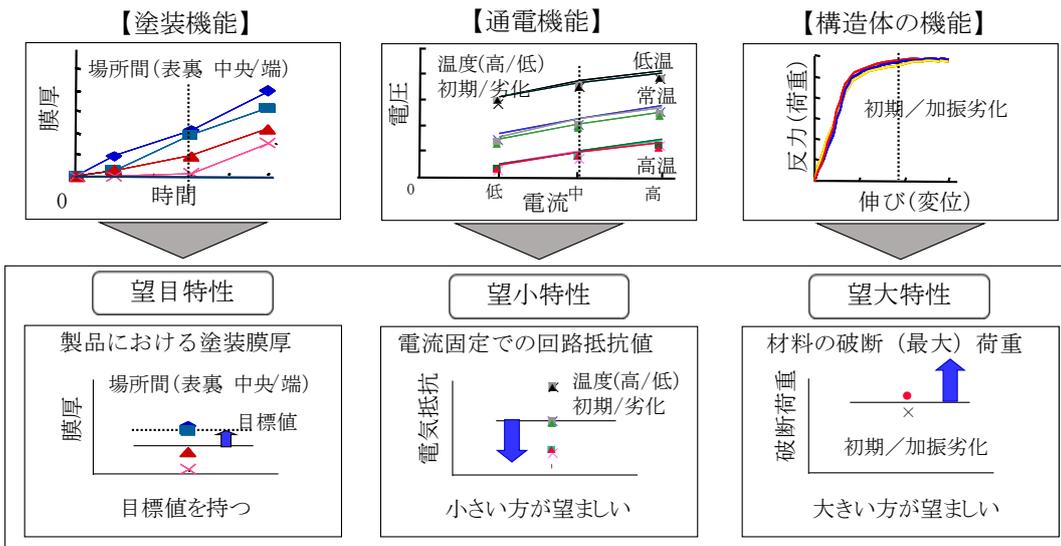


図 5.4-4 静特性の一例

(1) 望目特性

塗装機能についてみると、例えば電着塗装では、通電時間（あるいはクーロン量）と塗膜厚の比例関係（動特性ゼロ点比例式）を理想機能と定義できる。技術開発ではこの比例関係を評価、改善することが行われるが、1つの製品を前提にすると、目標とする膜厚とその膜厚を確保するために必要な通電時間の関係になる。つまり、動特性の信号である通電時間がある値に固定したときの膜厚を特性値とした望目特性と捉えることができる。この場合、事前に動特性でロバスト化されていれば、信号因子を通電時間とすれば簡単に時間を変えて目標値にすればよい。通常調整とかチューニングと呼ばれる。しかし、このような動特性でロバスト化していない場合がしばしば生じる場合がある。この場合は、目的機能の特性である膜厚を目的特性の近傍でパラメータ設計をすることになる。そのような場合は、望目特性のSN比を用いてばらつきを改善し、制御因子の中から目標を変える因子を見つけて目標に調整することになる。品質工学は、望目特性でロバスト化するときでも、可能な限り動特性でロバスト化できないかを検討するのが良いとする。

言い換えれば電着塗装の技術的手段を考えてロバスト性を評価するのが動特性で、技術的手段を考慮しなくても製品の目標値にばらつきなく最適化するとき望目特性を用いる。

(2) 望小特性

電気のコネクタやリレーの接点などの通電機能を例にすると、原理的に通電電流と電圧降下の比例関係（動特性ゼロ点比例式）の関係となるが、電圧降下が低いほど良い。理想機能は接触抵抗がゼロである。信号である電流が変化する場合はこの比例関係を評価、改善することになる。一方、製品によっては電流（あるいは電圧）を固定した状態で使用される場合があるので、この場合は、使用電圧内で印加したときの電圧降下を測り、その値が低いほどよい。ゼロ以下にはならないが低いほどよい特性となるので、望小特性である。望小特性のSN比でその機能性を評価する。

(3) 望大特性

構造体の機能では、さまざまな材料の物理特性を利用して構造を維持させる機能をつくる。この場合、弾性変形、塑性変形全体を評価する場合で弾性領域で使う場合が多い。その場合は、1次線形式になることを理想とする。しかし、破壊まで考慮すると弾性領域を超えて破壊変形が小さく、破壊応力が高いほど良いとして機能を与える場合もある。この場合、最大変位に焦点を当てた場合、破断荷重又は最大荷重が大きいたことが望ましい。このような機能の場合は、望大特性として扱われ、望大特性のSN比で計算される。破壊加重や最大荷重が大きくばらつきが少ない特性が良い評価が得られる。

5.5 ロバスト設計の実践例

パラメータ設計（ロバスト設計）の手順について、公開されている事例を基に解説する。ここで取り上げる事例は、『紙で簡単に実験した冷却システムのパラメータ設計』で、品質工学誌 Vol.4 No.4(1998)に掲載されたものである。マイクロリーダー・プリンター光源ランプ部の発熱にともなう温度上昇に対して、ファンを回転させて温度上昇を抑制する冷却システムが設定されている。この冷却システムの機能が十分発揮できていないと温度が設計基準を超えてしまい、安全上の問題が出てくる。開発途中で温度上昇が問題となったため、冷却システムの設計を見直すこととし、パラメータ設計を適用し、短時間で効率よく対策できた取組みである。

オリジナル論文「2.1 参考文書 (9)」を尊重しつつも、評価法、パラメータ設計の手順の理解を深めるため、オリジナルに対し異なる視点も織り込んで解説を行う。

5.5.1 テーマの背景

温度上昇が問題なのだから、一般的には温度そのものを測定しながら設計改善を進めていくことになるが、温度を測定するとなると、使用する部品の熱伝導率や反射率、熱放散率などを実機と同じにする必要があり、対策検討を行う上で非常に効率が悪く、期間も対策コストもかかるため、温度計測をしない方法を考えた。

温度は製品としては重要な品質特性の一つであるので、設計者としては温度を評価特性としたいところであるが、パラメータ設計では、結果系の特性を取り上げた実験をおこなうことは上記の通り効率が良くないので、できるだけ対象システムの機能に関する特性を取り上げることを勧めている。

光源ランプ部の構造概要を図 5.5-1 に示す。光源ランプ部は発光システムと冷却システムの2つのシステムから構成されている。

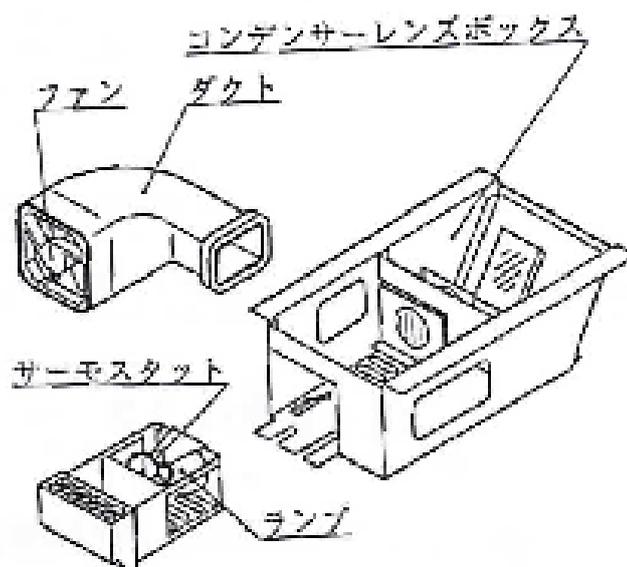


図 5.5-1 光源ランプ部の概要

温度低下の対策として

- 1) 発光ランプ自体の発熱を抑えることで、温度上昇を抑える。
- 2) 冷却システムの機能性を上げることで、温度上昇を抑える。

の2つが考えられるが、1)はランプメーカを巻き込んだランプの根本的な技術開発が必要となる。

一方、2)はセットメーカ側での改善の自由度が高く、対策期間を短縮できるので、冷却システムの機能性を改善することにした。機能性とは、機能の確実性、ロバスト性を意味する。冷却システム自体は様々なアイデアが考えられるが、この事例のように、ファンを利用して温度上昇した空気を移動、除去する方法が最も一般的で安価な方法である。

ロバスト設計では、できるだけ技術手段としての機能（基本機能と呼ぶことがある）に着目して機能の確実性を上げることで、温度上昇などの結果の品質特性をも同時に改善することを狙うことがうまいやり方として推奨されている。

以下に手順に沿って、ロバスト設計のプロセスを解説する。

5.5.2 動特性による解析

(1) 冷却システムの機能と計測特性

対象とする冷却システムは、ファンモータを回転させて、光源ランプで熱せられた空気を機械の外に排出して、光源とその近傍を冷却するものである。ファンの回転数と風速が比例関係にあり、比例定数が大きいことが理想である。ファンの回転数はある範囲ではモータに与える電圧に比例すると考えてよいので、実際には、回転数の代わりに電圧を評価のための信号因子としている。

したがって、冷却システムの技術手段の理想機能を、

「ファンモータの電圧 M と熱源位置の風速 y の間に、 $y = \beta M$ (β : 比例定数) が成立し、変換効率に相当する β ができるだけ大きいこと」とした。(図 5.5-2)

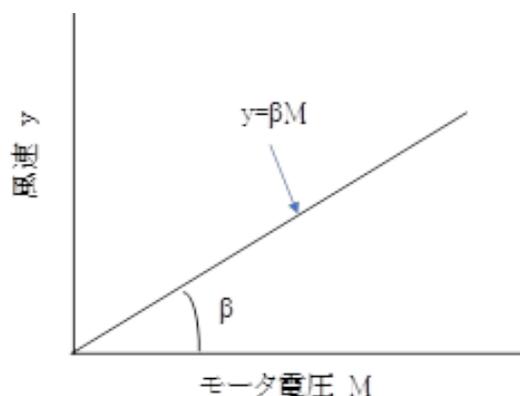


図 5.5-2 冷却システムの技術手段の理想機能

モータの機能は電気エネルギーの変換機能であるので、厳密には、回転数 N と負荷トルク T 、電流 I 、電圧 E としたときに、

$$2\pi NT = \alpha EI \quad (\alpha : \text{エネルギー変換係数})$$

が成立することである。これに対し、本事例では負荷トルク T と、電流 I を固定して機能を定義している。

製品としてはある電圧に固定されるが、例えば現設定の電圧のみで実験を行う（静特性の実験で、後章で解説する）方法では、温度上昇に対し風速が不足していた場合には、再度電圧を変えた実験を行う必要があり、開発のやり方としては非効率である。電圧と風速の比例関係と変換効率 β の大きさを評価、改善することで、必要な風量を得るための電圧設定が容易となる。つまり、比例定数が大きければ少ない回転数で多くの風量を得られ、冷却効率が良くなり、騒音の面にも有利になる。このようなことが、開発研究では静特性よりも動特性により、また、品質特性よりも技術手段の機能性（ロバストネス）を評価することを推奨している理由である。

機能性評価を行う際に、どのようなノイズを取り上げるかが重要である。主に製品の使用条件、環境条件から機能を阻害する重要な要因をノイズ因子として取り上げる。

本事例では、プリンターがどのような場所におかれて、どのような環境で使用されるかを考え、経験上最も影響が大きいと考えられる、排気口近傍の障害物の有無をノイズ因子としている。

冷却システムの P-diagram (Parameter diagram) を図 5.5-3 に示す。なお、P-diagram はシステムチャートとかエンジニアードシステムと呼ばれることもある。

パラメータ設計を行っていく前段階として、システムとしての入力信号と出力、及びノイズ因子を整理し、機能性評価の全貌を一望できるようにしておくことは、自分の思考をまとめ、関係者の合意を得る上でも有効である。

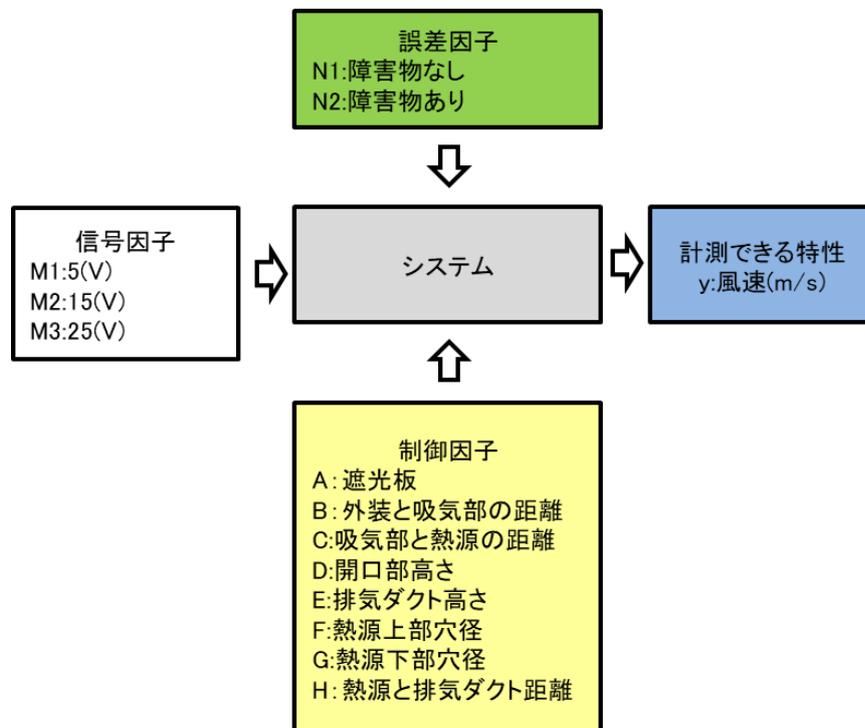


図 5.5-3 P-diagram

(2) 実験計画

① 信号因子及びノイズ因子(誤差因子)とその水準

信号因子は冷却システムに負荷するモータ電圧で

$$M_1=5 \quad M_2=15 \quad M_3=25 \quad (\text{V})$$

とした。

ノイズ因子は排気口近傍の障害物有無で、

$$N_1=\text{障害物なし} \quad N_2=\text{障害物あり}$$

とした。

信号因子とノイズ因子は、2元配置に割り付けた。(表 5.5-1)

表 5.5-1 冷却システムの機能性の評価条件

信号因子(モータ電圧)	V ₁	V ₂	V ₃
誤差因子	5 V	15 V	25 V
N ₁ 排気口に障害なし			
N ₂ 排気口に障害あり			

(3) 制御因子とその水準

温度を計測せずに風速を計測するので、実験のために実物と同じ素材で作らなくてもよいというアイデアが出され、この実験では紙で部品を製作した。このように実物によらない研究は、開発段階では重要なことである。

制御因子は、風速への影響が大きいと考えられるものの中から、直交表 L₁₈ に割り付けることを前提に、各部の距離や穴の大きさ、径など、変更しやすく他のブロックに設計変更の影響を及ぼさないものを 8 因子選択した。具体的な制御因子とその水準を表 5.5-2 に示す。また、表 5.5-3 に直交表への割り付けた内容を示す。

表 5.5-2 制御因子とその水準 (*印は現行水準)

因子	水準	1	2	3
A 遮光板		無*	あり	
B 外装と吸気部の距離		20*	40	60
C 吸気部と熱源の距離		110*	60	40
D 開口部高さ		30*	15	0
E 排気ダクト高さ		30*	15	0
F 熱源上部穴径		大*	中	無し
G 熱源下部穴径		無し*	中	大
H 熱源と排気ダクト距離		60*	50	40

表 5.5-3 直交表 L₁₈ への制御因子の割付結果

実験 No.	A	B	C	D	E	F	G	H	遮光板	外装と吸 気部の距 離	吸気部と 熱源の距 離	開口部高 さ	排気ダク ト高さ	熱源上部 穴径	熱源下部 穴径	熱源と排 気ダクト 距離
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1	無し*	20*	110*	30*	30*	大*	無し*	60*
2	1	1	2	2	2	2	2	2	無し*	20*	60	15	15	中	中	50
3	1	1	3	3	3	3	3	3	無し*	20*	40	0	0	無し	大	40
4	1	2	1	1	2	2	3	3	無し*	40	110*	30*	15	中	大	40
5	1	2	2	2	3	3	1	1	無し*	40	60	15	0	無し	無し*	60*
6	1	2	3	3	1	1	2	2	無し*	40	40	0	30*	大*	中	50
7	1	3	1	2	1	3	2	3	無し*	60	110*	15	30*	無し	中	40
8	1	3	2	3	2	1	3	1	無し*	60	60	0	15	大*	大	60*
9	1	3	3	1	3	2	1	2	無し*	60	40	30*	0	中	無し*	50
10	2	1	1	3	3	2	2	1	あり	20*	110*	0	0	中	中	60*
11	2	1	2	1	1	3	3	2	あり	20*	60	30*	30*	無し	大	50
12	2	1	3	2	2	1	1	3	あり	20*	40	15	15	大*	無し*	40
13	2	2	1	2	3	1	3	2	あり	40	110*	15	0	大*	大	50
14	2	2	2	3	1	2	1	3	あり	40	60	0	30*	中	無し*	40
15	2	2	3	1	2	3	2	1	あり	40	40	30*	15	無し	中	60*
16	2	3	1	3	2	3	1	2	あり	60	110*	0	15	無し	無し*	50
17	2	3	2	1	3	1	2	3	あり	60	60	30*	0	大*	中	40
18	2	3	3	2	1	2	3	1	あり	60	40	15	30*	中	大	60*

(4) 実験データとデータ解析の実施

① 実験データの取得

表 5.5-3 の各実験 No 毎に紙でボックス形状を製作し、表 5.5-1 のノイズ条件で、風速のデータを取得した。その結果を表 5.5-4 に示す。なお、風速の測定点は、熱源のランプ部とし、排気口と排気ダクトを結ぶ方向の風速を測定した。

表 5.5-4 風速の実験データ

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	V ₁ (5V)		V ₂ (15V)		V ₃ (25V)	
	A	B	C	D	E	F	G	H	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.12	0.09	0.31	0.26	0.44	0.41
2	1	1	2	2	2	2	2	2	0.18	0.15	0.28	0.23	0.44	0.32
3	1	1	3	3	3	3	3	3	0.36	0.31	1.20	0.96	1.56	1.46
4	1	2	1	1	2	2	3	3	0.25	0.22	0.77	0.66	1.24	1.20
5	1	2	2	2	3	3	1	1	0.24	0.19	0.84	0.73	1.26	1.08
6	1	2	3	3	1	1	2	2	0.23	0.20	0.79	0.67	1.24	1.02
7	1	3	1	2	1	3	2	3	0.13	0.08	0.14	0.34	0.30	0.56
8	1	3	2	3	2	1	3	1	0.23	0.19	0.57	0.26	0.91	0.56
9	1	3	3	1	3	2	1	2	0.24	0.19	0.86	0.68	1.32	1.12
10	2	1	1	3	3	2	2	1	0.26	0.17	0.86	0.67	1.30	0.98
11	2	1	2	1	1	3	3	2	0.06	0.04	0.23	0.28	0.37	0.27
12	2	1	3	2	2	1	1	3	0.36	0.34	1.14	1.04	1.70	1.58
13	2	2	1	2	3	1	3	2	0.21	0.12	0.77	0.60	1.18	1.04
14	2	2	2	3	1	2	1	3	0.31	0.30	1.12	0.93	1.66	1.42
15	2	2	3	1	2	3	2	1	0.10	0.04	0.33	0.24	0.56	0.47
16	2	3	1	3	2	3	1	2	0.28	0.23	1.10	0.82	1.66	1.24
17	2	3	2	1	3	1	2	3	0.27	0.23	0.83	0.72	1.30	1.08
18	2	3	3	2	1	2	3	1	0.28	0.19	0.76	0.57	1.06	0.71

② SN 比と感度の計算

表 5.5-4 のデータを基にゼロ点比例式の SN 比と感度を計算する。実験 No.1 の計算例を示す。

全変動

$$S_T = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 y_{ij}^2 = 0.12^2 + 0.09^2 + 0.31^2 + 0.26^2 + 0.44^2 + 0.41^2 = 0.5479 \quad (f_T = 6)$$

有効除数

$$r = 5^2 + 15^2 + 25^2 = 875$$

線形式

$$L_1 = 5 \times 0.12 + 15 \times 0.31 + 25 \times 0.44 = 16.25$$

$$L_2 = 5 \times 0.09 + 15 \times 0.26 + 25 \times 0.41 = 14.60$$

比例項の変動

$$S_\beta = \frac{(L_1 + L_2)^2}{2 \times r} = \frac{(16.25 + 14.60)^2}{2 \times 875} = 0.5438 \quad (f_\beta = 1)$$

比例項の差の変動(誤差条件間の変動)

$$S_{N \times \beta} = \frac{L_1^2 + L_2^2}{r} - S_\beta = \frac{16.25^2 + 14.60^2}{875} - 0.5438 = 0.001557 \quad (f_{N \times \beta} = 1)$$

誤差変動

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{N \times \beta} = 0.5479 - 0.5438 - 0.001557 = 0.002501 \quad (f_e = 4)$$

誤差分散

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{0.002501}{4} = 0.0006253$$

総合誤差分散

$$V_N = \frac{S_e + S_{N \times \beta}}{f_e + f_{N \times \beta}} = \frac{0.002501 + 0.001557}{4 + 1} = 0.0008117$$

SN比

$$\eta = 10 \log \left[\frac{\frac{1}{2 \times r} (S_\beta - V_e)}{V_N} \right] = 10 \log \left[\frac{\frac{1}{2 \times 875} (0.5438 - 0.0006253)}{0.0008117} \right] = -4.17 \text{ (db)}$$

感度

$$S = 10 \log \left[\frac{1}{2 \times r} (S_\beta - V_e) \right] = 10 \log \left[\frac{1}{2 \times 875} (0.5438 - 0.0006253) \right] = -35.08 \text{ (db)}$$

同様にして計算した結果を表 5.5-5 に示す。

表 5.5-5 SN比と感度の計算結果

実験 No.	A	B	C	D	E	F	G	H	SN比 (db)	感度 (db)
1	1	1	1	1	1	1	1	1	-4.17	-35.08
2	1	1	2	2	2	2	2	2	-12.77	-35.86
3	1	1	3	3	3	3	3	3	-5.99	-23.94
4	1	2	1	1	2	2	3	3	1.76	-26.29
5	1	2	2	2	3	3	1	1	-4.81	-26.36
6	1	2	3	3	1	1	2	2	-5.35	-26.74
7	1	3	1	2	1	3	2	3	-15.93	-35.41
8	1	3	2	3	2	1	3	1	-14.45	-30.67
9	1	3	3	1	3	2	1	2	-5.35	-26.15
10	2	1	1	3	3	2	2	1	-8.82	-26.58
11	2	1	2	1	1	3	3	2	-11.40	-37.24
12	2	1	3	2	2	1	1	3	-1.08	-23.41
13	2	2	1	2	3	1	3	2	-5.57	-27.06
14	2	2	2	3	1	2	1	3	-4.92	-23.97
15	2	2	3	1	2	3	2	1	-8.00	-33.99
16	2	3	1	3	2	3	1	2	-9.13	-24.54
17	2	3	2	1	3	1	2	3	-4.89	-26.25
18	2	3	3	2	1	2	3	1	-11.99	-28.41

SN比最良条件は No4 で 1.76(dB)、最悪条件は No7 で-15.93(dB)となっている。これらのグラフを図 5.5-4 に示す。SN比最良条件は視覚的にも N_1 、 N_2 の差が少なく、また、電圧に対する風速の比例関係が良いことが分かる。また、電圧に対する風圧の傾きも大きく、効率よく風の流れを生じさせていることが分かる。

一方、SN比最悪条件は、電圧が低いところでは N_1 、 N_2 の差は少ないが、電圧が大きいところでは差が大きくなっている。しかも、障害物の無い $N1$ 条件の方が風速が出ていない。障害物がある方が風の流れが悪いと考えるのが一般的だと思われるが、公開されているデータでは逆転現象が起こっている。

このようなノイズ条件間で傾向が異なる結果が出てきたときには、データが正しいかどうかチェックが必要である。取得した生データから、SN比、感度を計算するだけでなく、グラフを描いて、データの確認を行うことと併せて、特徴的な結果となっている条件については、技術知見に照らしてどのようなことが起こっているのか考察することが望ましい。

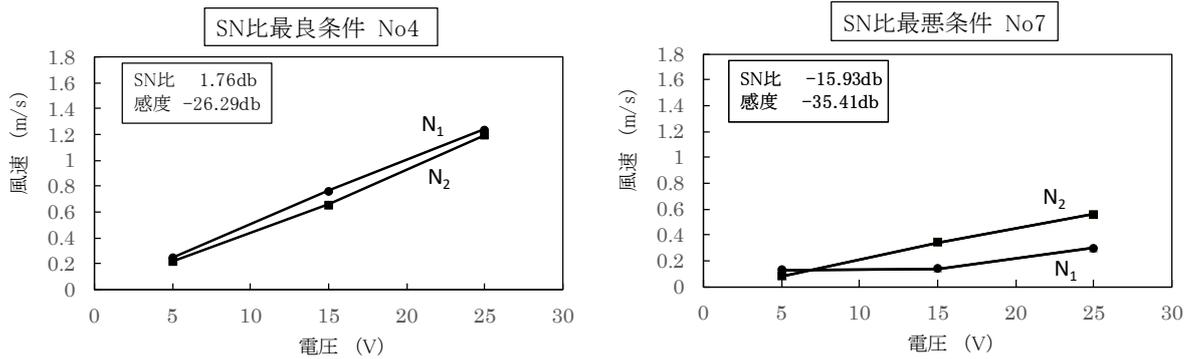


図 5.5-4 L₁₈ 実験における SN 比最良条件と最悪条件の比較

③ 要因効果図の作成

次のステップでは表 5.5-5 の結果をもとに、水準別平均を計算する。ここでは、第 2 列の因子 B：外装と吸気部の距離について計算内容を示す。因子 B の B₁、B₂、B₃ 水準の平均値を $\bar{B}_1, \bar{B}_2, \bar{B}_3$ と表す。

SN 比の水準別平均は、18 個の SN 比の値から各水準の 6 個のデータの平均値として求める。

$$\bar{B}_1 = \frac{-4.17 - 12.77 - 5.99 - 8.82 - 11.4 - 1.08}{6} = -7.37$$

$$\bar{B}_2 = \frac{1.76 - 4.81 - 5.35 - 5.57 - 4.92 - 8.00}{6} = -4.48$$

$$\bar{B}_3 = \frac{-15.93 - 14.45 - 5.35 - 9.13 - 4.89 - 11.99}{6} = -10.29$$

感度の水準別平均は、18 個の感度の値から各水準の 6 個のデータの平均値として求める。

$$\bar{B}_1 = \frac{-35.08 - 35.86 - 23.94 - 26.58 - 37.24 - 23.41}{6} = -30.35$$

$$\bar{B}_2 = \frac{-26.29 - 26.36 - 26.74 - 27.06 - 23.97 - 33.99}{6} = -27.40$$

$$\bar{B}_3 = \frac{-35.41 - 30.67 - 26.15 - 24.54 - 26.25 - 28.41}{6} = -28.57$$

他の因子についても同様に計算して、まとめたものを表 5.5 6 に示す。

なお、第 1 列の因子 A は 2 水準なので、各水準別平均は 9 個のデータの平均値として求める。

表 5.5-6 SN比と感度の水準別平均の補助表

SN比水準別平均		総平均 -7.38		
要因		1	2	3
A	遮光板	-7.45	-7.31	
B	外装と吸気部の距離	-7.37	-4.48	-10.29
C	吸気部と熱源の距離	-6.98	-8.87	-6.29
D	開口部高さ	-5.34	-8.69	-8.11
E	排気ダクト高さ	-8.96	-7.28	-5.91
F	熱源上部穴径	-5.92	-7.01	-9.21
G	熱源下部穴径	-4.91	-9.29	-7.94
H	熱源と排気ダクト距離	-8.71	-8.26	-5.18

感度水準別平均		総平均 -28.77		
要因		1	2	3
A	遮光板	-29.61	-27.94	
B	外装と吸気部の距離	-30.35	-27.40	-28.57
C	吸気部と熱源の距離	-29.16	-30.06	-27.11
D	開口部高さ	-30.83	-29.42	-26.07
E	排気ダクト高さ	-31.14	-29.13	-26.05
F	熱源上部穴径	-28.20	-27.88	-30.24
G	熱源下部穴径	-26.58	-30.80	-28.94
H	熱源と排気ダクト距離	-30.18	-29.60	-26.55

水準別平均の内容を図示したものが要因効果図(図 5.5-5、図 5.5-6)である。

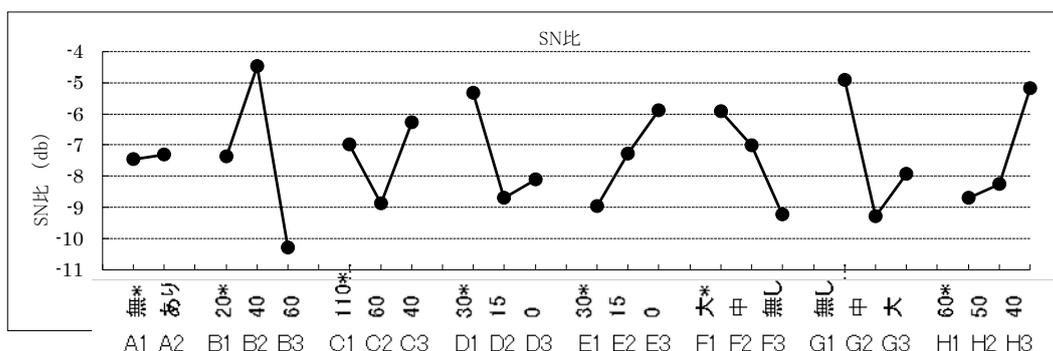


図 5.5-5 SN比の要因効果図(*印は現行水準)

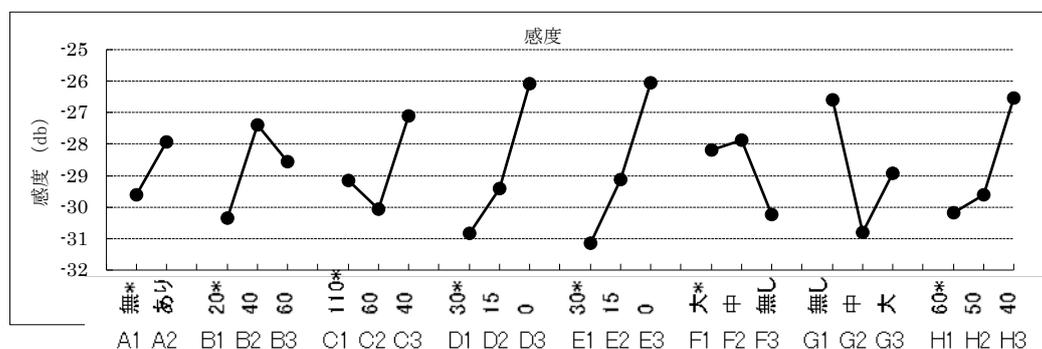


図 5.5-6 感度の要因効果図(*印は現行水準)

④ 最適条件の選定

この取組みでは、障害物の有無で風速の差が少なく、同じモータ電圧に対して風速がより高いことを理想としているので、最適水準の選定にあたり、SN比はより大きく、感度もより大きくできる水準を選定することになる。

因子 A、B、C、E、G、H の 6 因子は SN 比、感度の望ましい水準は一致するので、制約条件がない限り、それぞれ A₂、B₂、C₃、E₃、G₁、H₃ を選択する。矛盾が生じるのが因子 D と F である。因子 F は熱源上部の穴径で、SN 比は単調の効果より F₁ が良く、感度は F₂ が若干良いので、最適な水準は異なる。しかし、F₁ と F₂ の感度の差は小さいが、SN 比は感度の差以上に F₁ と F₂ の差は大きいため、SN 比の要因効果を優先して F₁ を選択する。一方、因子 D の開口部の高さは逆の傾向を持ち、SN 比は D₁ が良く、感度は逆に D₃ が良い。このような場合は一般論として、SN 比の増減と感度の増減によるメリット・デメリットを考慮して優劣を検討することになる。D₁ と D₃ の利得差は SN 比では 2.77dB、感度では 4.76(dB) あるので、利得差の大きい感度を優先させて、D₃ を選択するということが考えられる。この事例の場合、感度は効率に関係するので重要である。しかし、最適条件選定の段階では、SN 比のより高くなる D₁ を最適水準として選定している。なお、オリジナル論文の Q&A の中で、製品化の段階では D₃ を選択したことが言及されている。

D₁、D₃ のどちらを選択するか悩ましい時は、矛盾なく決められる水準を先に固定しておいて、その最適条件の基で、D について D₁ と D₃ の 2 水準について追加の実験を行い、総合判断することを勧める。これに関する検討は 5.5.5 項で示すこととし、ここではオリジナルの論文で決定されている最適条件、現行条件を基に話を進める。

最適条件と現行条件は以下のとおりである。

最適条件：A₂B₂C₃D₁E₃F₁G₁H₃

現行条件：A₁B₁C₁D₁E₁F₁G₁H₁

⑤ 選定条件の SN 比、感度の推定と利得の推定

直交表実験から選定した条件は、一般に実験を行った中には含まれていないことが多い。したがって、最適条件として選んだ条件の SN 比や感度は実験を行わなければ真の値は不明である。しかし、要因効果図を基に各要因の平均的な効果を加算することで推定が可能である。

推定の方法はいくつか提案されているが、最近では簡便なため全因子の効果を加算する推定方法が最も一般的に使用されている。ここではまず、全因子の効果を加算する推定方法について解説する。

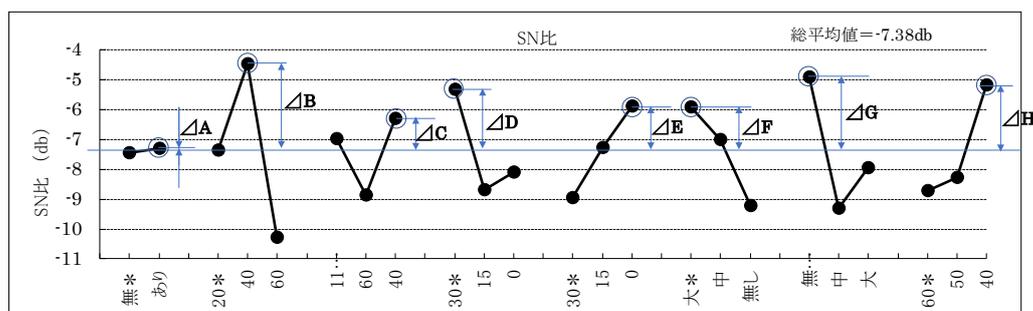


図 5.5-7 選定水準の総平均値からの利得(*印は現行水準)

図 5.5-7 に示すように各因子の選定水準の SN 比の値と総平均値の値-7.38dB との差 ΔA から ΔH までを加算することで、その水準を選定したときの総平均値からのトータル利得として推定する。つまり、

$$\begin{aligned}\Delta \text{Total} &= \Delta A + \Delta B + \Delta C + \Delta D + \Delta E + \Delta F + \Delta G + \Delta H \\ &= (\overline{A_2} - \overline{T}) + (\overline{B_2} - \overline{T}) + (\overline{C_3} - \overline{T}) + (\overline{D_1} - \overline{T}) + (\overline{E_3} - \overline{T}) + (\overline{F_1} - \overline{T}) + (\overline{G_1} - \overline{T}) + (\overline{H_3} - \overline{T}) \\ &= \overline{A_2} + \overline{B_2} + \overline{C_3} + \overline{D_1} + \overline{E_3} + \overline{F_1} + \overline{G_1} + \overline{H_3} - 8\overline{T}\end{aligned}$$

だから、最適条件の SN 比 $\eta_{\text{最適}}$ は以下のように推定できる。

$$\begin{aligned}\eta_{\text{最適}} &= \overline{T} + \Delta \text{Total} \\ &= \overline{A_2} + \overline{B_2} + \overline{C_3} + \overline{D_1} + \overline{E_3} + \overline{F_1} + \overline{G_1} + \overline{H_3} - 7\overline{T} \\ &= (-7.31) + (-4.48) + (-6.29) + (-5.34) + (-5.91) + (-5.92) + (-4.91) + (-5.18) - 7 \times (-7.38) \\ &= 6.33 \text{ (db)}\end{aligned}$$

同様にして、現行条件は

$$\begin{aligned}\eta_{\text{現行}} &= \overline{A_1} + \overline{B_1} + \overline{C_1} + \overline{D_1} + \overline{E_1} + \overline{F_1} + \overline{G_1} + \overline{H_1} - 7\overline{T} \\ &= (-7.45) + (-7.37) + (-6.98) + (-5.34) + (-8.96) + (-5.92) + (-4.91) + (-8.71) - 7 \times (-7.38) \\ &= -3.97 \text{ (db)}\end{aligned}$$

感度についても同様に計算を行い、

$$S_{\text{最適}} = -19.24 \text{ (dB)}, \quad S_{\text{現行}} = -34.64 \text{ (dB)}$$

となった。

最適条件と現行条件の差は、SN 比、感度の利得で議論される。すなわち、設計を現行条件から最適条件にすることにより、何 dB 改善できるかである。

$$\text{SN 比の推定利得は、} 6.33 - (-3.97) = 10.30 \text{ (dB)}$$

$$\text{感度の推定利得は、} -19.24 - (-34.64) = 15.40 \text{ (dB)}$$

となる。

ところで、要因効果の大きさを意識せずに、要因効果を加算する方法は簡便ではあるが、全因子を用いて推定すると過大な推定になることがある。要因効果図の効果は、割り付けた因子の主効果（純粋な効果）と要因間の交互作用効果が合算された効果である。主効果と交互作用効果を分離できないので、主効果が小さい要因の場合、主効果ではなく交互作用効果で要因効果があるように見える場合がある。その結果、要因効果の小さいものも主効果として効果を加算すると、過大な推定になってしまう。

過大評価を避けるために、相対的に効果の大きい半分くらいの因子を用いて推定する方法がある。以前はこの方法が中心であった。本事例もオリジナルは SN 比、感度ともに相対的に効果のある上位 4 因子を用いて推定している。SN 比は B、D、G、H の 4 因子、感度は D、E、G、H の 4 因子である。SN 比と感度で推定に用いる因子が異なってもかまわない。計算方法は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{最適}} &= \bar{T}_{(\text{SN比})} + \triangleleft 4 \text{因子} \\
 &= \bar{B}_2 + \bar{D}_1 + \bar{G}_1 + \bar{H}_3 - 3\bar{T} \\
 &= (-4.48) + (-5.34) + (-4.91) + (-5.18) - 3 \times (-7.38) \\
 &= 2.23 \text{ (db)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{最適}} &= \bar{T}_{(\text{感度})} + \triangleleft 4 \text{因子} \\
 &= \bar{D}_1 + \bar{E}_3 + \bar{G}_1 + \bar{H}_3 - 3\bar{T} \\
 &= (-30.83) + (-26.05) + (-26.58) + (-26.55) - 3 \times (-28.77) \\
 &= -23.70 \text{ (db)}
 \end{aligned}$$

同様にして、現行条件についても同じ 4 因子を用いて SN 比、感度を推定し、

$$\eta_{\text{現行}} = -4.19 \text{ (dB)}, \quad S_{\text{現行}} = -32.42 \text{ (dB)}$$

となった。

$$\text{SN比の推定利得は、} 2.23 - (-4.19) = 6.42 \text{ (dB)}$$

$$\text{感度の推定利得は、} -23.70 - (-32.42) = 8.72 \text{ (dB)}$$

となる。

全因子を用いた推定利得と半分の因子を用いた推定利得の差が、SN 比では 3.88(dB)、感度では 6.68(dB)ある。どちらの値がより正しいかはこの段階では不明である。したがって、次の確認実験が必要である。

⑥ 確認実験結果

⑤ で求めた値は推定値なので、最適条件と現行条件について確認実験を行い、利得の再現性の確認を行う。L₁₈ 実験と同じノイズ条件で実験を行い、再現性の確認を行った結果を示す（表 5.5-7、図 5.5-8、）。

表 5.5-7 の確認値から、利得の再現性、各条件の値の再現性ともあることが確認できた。

全因子を用いた推定値からは SN 比、感度とも数 dB 低い値となっているが、推定に使わなかった要因の効果は、交互作用を含む誤差成分と考えられる。

表 5.5-7 再現性の確認結果

条件	SN比(db)		感度(db)	
	推定値	確認値	推定値	確認値
最適条件	2.23	1.66	-23.70	-24.00
現行条件	-4.19	-4.17	-32.42	-35.10
利得	6.42	5.83	8.72	11.10

図 5.5-8 の確認実験の風速データからも、現行条件に対して最適条件は、感度 β が高くなっているし、 β の大きさに比べてノイズである N_1 と N_2 の差も小さいことが分かる。

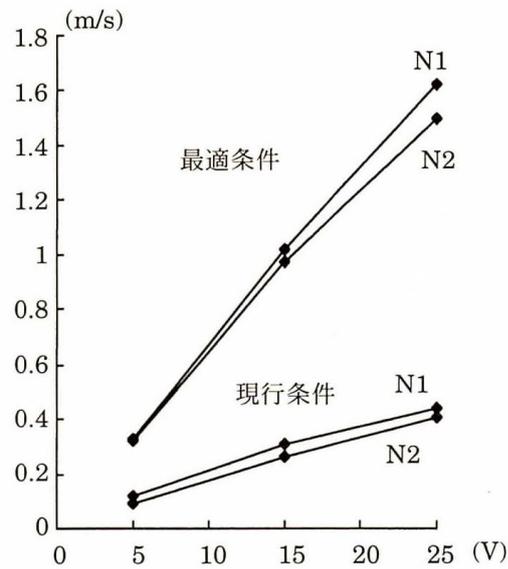


図 5.5-8 電圧と風速の関係

⑦ 温度による改善効果の確認

もともとの目的は、上昇温度の抑制である。最終確認は実機を使って温度を測定することになる。

その結果を図 5.5-9 に示す。

図 5.5-9 から分かるように、現行条件では 21 分後もまだ温度が上昇し続けているが、最適条件では現行条件よりも温度が上昇せず、3 分程度で安定しており、温度上昇が抑制されていることが確認できた。

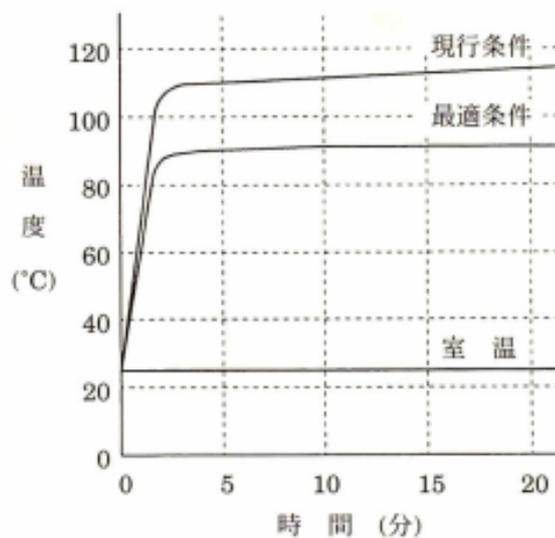


図 5.5-9 サーモスタット感熱部の温度変化

(5) まとめ(動特性)

本事例では、品質である温度を計測せずに、「冷却システムの技術手段」である「風」を評価することで、ランプの温度上昇対策を短時間に行うことができた。

また、システムを技術手段から考えたことで、実機部品を用いずに紙を利用することを発想できた。その結果、実験機の作成から実験終了までを約 4 時間に短縮できたとともに、試作コストも抑えることができた。

一般に、最終目的である品質特性に目を奪われがちであるが、技術的手段の機能を考え、そのロバストネスを改善することの重要性を示した事例である。

5.5.3 静特性による解析

5.5.2 項において、オリジナル論文を基にパラメータ設計の解析手順を解説した。その中で、手段としての機能を定義し動特性で評価することの有効性を示した。

一方、製品の改善の場合、電圧がすでに決められていて、その電圧の下でできるだけ風速を高め、ばらつきも小さくしたいというケースが考えられる。その場合、動特性ではなく、静特性による解析を行うことになる。

本章では、仮に既定の電圧 V が 15(V) の場合について、静特性の望目特性で解析を行う手順を示すことで、動特性との違いを解説する。(図 5.5-10)

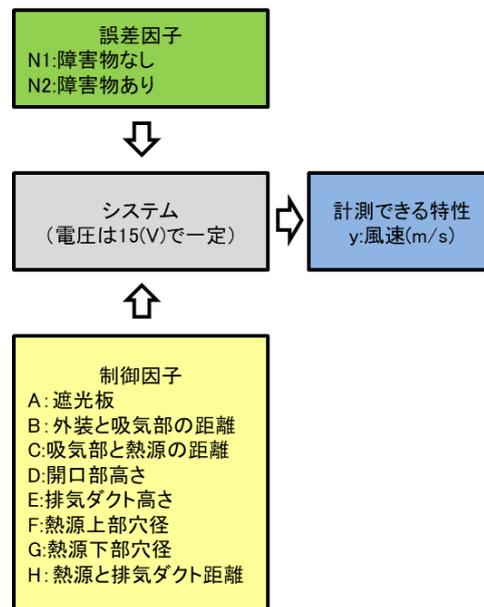


図 5.5-10 静特性の P-Diagram

(1) 実験データとデータ解析

① データの取得

ここでの解析は、表 5.5-8 のデータで電圧が $V_2=15(V)$ のときのデータを解析することになる。表 5.5-8 に再掲する。

表 5.5-8 モータ電圧が 15V ときの実験データ

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	V ₂ (15V)	
	A	B	C	D	E	F	G	H	N ₁	N ₂
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.31	0.26
2	1	1	2	2	2	2	2	2	0.28	0.23
3	1	1	3	3	3	3	3	3	1.20	0.96
4	1	2	1	1	2	2	3	3	0.77	0.66
5	1	2	2	2	3	3	1	1	0.84	0.73
6	1	2	3	3	1	1	2	2	0.79	0.67
7	1	3	1	2	1	3	2	3	0.14	0.34
8	1	3	2	3	2	1	3	1	0.57	0.26
9	1	3	3	1	3	2	1	2	0.86	0.68
10	2	1	1	3	3	2	2	1	0.86	0.67
11	2	1	2	1	1	3	3	2	0.23	0.28
12	2	1	3	2	2	1	1	3	1.14	1.04
13	2	2	1	2	3	1	3	2	0.77	0.60
14	2	2	2	3	1	2	1	3	1.12	0.93
15	2	2	3	1	2	3	2	1	0.33	0.24
16	2	3	1	3	2	3	1	2	1.10	0.82
17	2	3	2	1	3	1	2	3	0.83	0.72
18	2	3	3	2	1	2	3	1	0.76	0.57

② 望目特性の SN 比と感度の計算

表 5.5-8 のデータを基に望目特性の SN 比と感度を計算する。実験 No.1 の計算例を示す。

全変動

$$S_T = y_1^2 + y_2^2 = 0.31^2 + 0.26^2 = 0.1637 \quad (f_T = 2)$$

平均変動

$$S_m = \frac{(y_1 + y_2)^2}{2} = \frac{(0.31 + 0.26)^2}{2} = 0.16245 \quad (f_m = 1)$$

誤差変動

$$S_e = S_T - S_m = 0.1637 - 0.16245 = 0.00125 \quad (f_e = 1)$$

誤差分散

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{0.00125}{1} = 0.00125$$

SN比

$$\eta = 10 \log \left[\frac{\frac{1}{n}(S_m - V_e)}{V_e} \right] = 10 \log \left[\frac{\frac{1}{2}(0.16245 - 0.00125)}{0.00125} \right] = 18.09$$

感度

$$S = 10 \log \left[\frac{1}{n}(S_m - V_e) \right] = 10 \log \left[\frac{1}{2}(0.16245 - 0.00125) \right] = -10.94$$

同様に実験 No2 から No18 まで計算を行い、結果を表 5.5-9 にまとめた。

表 5.5-9 V=15(V)の時の SN 比と感度の計算結果

実験 No.	A	B	C	D	E	F	G	H	SN比 (db)	感度 (db)
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	18.09	-10.94
2	1	1	2	2	2	2	2	2	17.12	-11.91
3	1	1	3	3	3	3	3	3	16.02	0.61
4	1	2	1	1	2	2	3	3	19.24	-2.94
5	1	2	2	2	3	3	1	1	20.06	-2.12
6	1	2	3	3	1	1	2	2	18.66	-2.76
7	1	3	1	2	1	3	2	3	3.77	-13.22
8	1	3	2	3	2	1	3	1	4.89	-8.29
9	1	3	3	1	3	2	1	2	15.57	-2.33
10	2	1	1	3	3	2	2	1	15.04	-2.39
11	2	1	2	1	1	3	3	2	17.12	-11.91
12	2	1	3	2	2	1	1	3	23.75	0.74
13	2	2	1	2	3	1	3	2	15.05	-3.35
14	2	2	2	3	1	2	1	3	17.61	0.18
15	2	2	3	1	2	3	2	1	12.91	-11.01
16	2	3	1	3	2	3	1	2	13.62	-0.45
17	2	3	2	1	3	1	2	3	19.95	-2.24
18	2	3	3	2	1	2	3	1	13.80	-3.63

③ 要因効果図の作成

表 5.5-9 の結果をもとに、水準別平均を計算する。

表 5.5-10 V=15(V)の時の SN 比の水準別平均

要因	SN比水準別平均			総平均 15.68
	1	2	3	
A 遮光板	14.83	16.54		
B 外装と吸気部の距離	17.86	17.26	11.93	
C 吸気部と熱源の距離	14.14	16.12	16.79	
D 開口部高さ	17.15	15.59	14.31	
E 排気ダクト高さ	14.84	15.26	16.95	
F 熱源上部穴径	16.73	16.40	13.92	
G 熱源下部穴径	18.12	14.57	14.35	
H 熱源と排気ダクト距離	14.13	16.19	16.72	

表 5.5-11 V=15(V)の時の感度の水準別平均

感度水準別平均	総平均 -4.89		
	1	2	3
A 遮光板	-5.99	-3.79	
B 外装と吸気部の距離	-5.97	-3.67	-5.03
C 吸気部と熱源の距離	-5.55	-6.05	-3.06
D 開口部高さ	-6.89	-5.58	-2.18
E 排気ダクト高さ	-7.05	-5.64	-1.97
F 熱源上部穴径	-4.47	-3.84	-6.35
G 熱源下部穴径	-2.49	-7.26	-4.92
H 熱源と排気ダクト距離	-6.40	-5.45	-2.81

表 5.5-10、表 5.5-11 の水準別平均から SN 比と感度の要因効果図を作成し、図 5.5-11、図 5.5-12 に示す。動特性の図 5.5-6 と比較して、感度は似た傾向をしているが、SN 比は一部の因子で、効果の傾向が異なることが分かる。

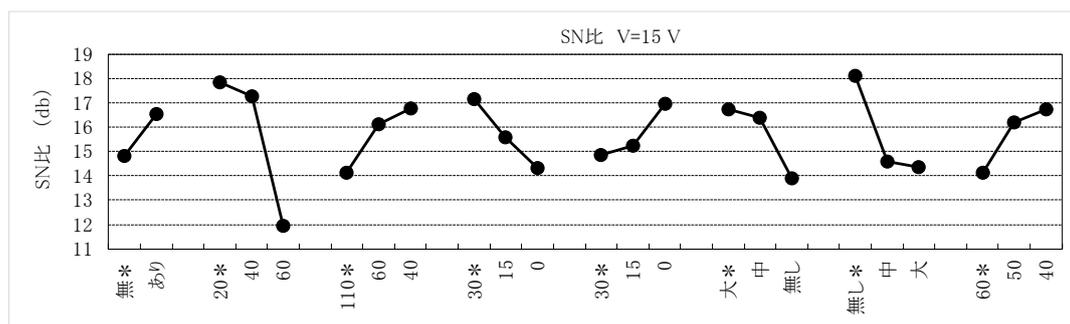


図 5.5-11 V=15(V)の時の SN 比の要因効果図

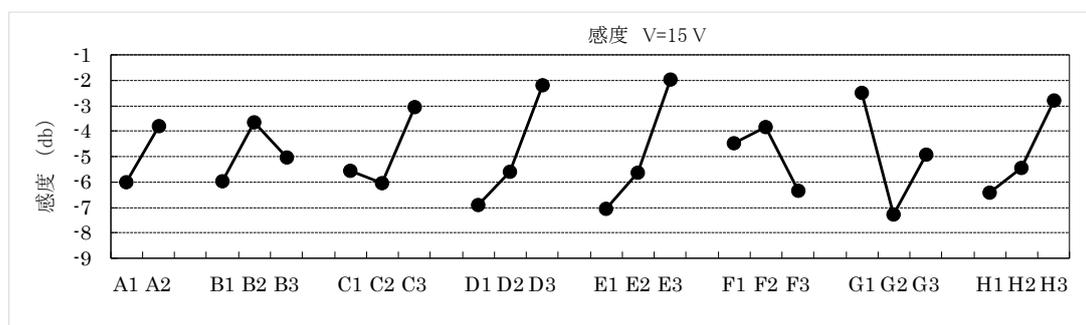


図 5.5-12 V=15(V)のときの感度の要因効果図

④ 最適条件の選定

SN比、感度ともに大きい水準を選択することになるが、A、C、E、G、Hの5因子はSN比と感度の傾向が一致しているのそれぞれ、制約がなければA₂、C₃、E₃、G₁、H₃を最適水準として選択する。

矛盾が生じるのが因子B、D、Fである。因子BはSN比と感度で最適な水準が異なるが、SN比のB₁、B₂の差は小さく、感度のB₁、B₂の差はSN比よりも大きいので、一般にはB₂を選択する。因子FはSN比と感度で最適な水準が異なるが、SN比、感度ともにF₁、F₂の差が小さいので、SN比を優先し、F₁を選択する。一方、因子Dの開口部の高さはSN比と、感度で逆の傾向を持ち、SN比はD₁が良く、感度は逆にD₃が良い。どちらを選択するか、あるいは中庸をとってD₂を選択するか正解はないが、5.5.2 (4) ④ で述べたように、一般論としてSN比の増減と感度の増減によるメリット・デメリットを考慮して優劣を検討することになる。D₁とD₃の利得差はSN比では2.84(dB)、感度では4.71(dB)ある。この事例の場合、感度は効率に関係するので重要である。そのため、利得差の大きい感度を優先させて、D₃を選択するということが考えられる。しかし、5.5.2 (4) ④ ではSN比を優先したD₁を選定しているので、ここでもD₁を選定しておく。その結果、最適条件はA₂、B₂、C₃、D₁、E₃、F₁、G₁、H₃とした。これは、動特性の解析と同じ最適条件である。

⑤ 選定条件のSN比、感度の推定と利得の推定

5.5.2 (4) ⑤ と同様に最適条件と現行条件のSN比と感度の値を要因効果図から推定する。推定には全因子を用いて推定した。結果を表 5.5-12 に示す。

SN比の利得は8.46(dB)、感度の利得は15.65(dB)と推定される。4.3.2.3.5項で述べたように、推定に全因子を使うか、半分くらいの因子で推定するかは自由である。状況によっては、簡便のため、過大推定もあり得ることを承知の上で全因子を用いた推定を行っているケースが多い。

表 5.5-12 V=15(V)のときのSN比と感度の推定値

	SN比(db)	感度(db)
最適条件	26.48	5.06
現行条件	18.02	-10.59
利得	8.46	15.65

SN比と感度は(dB)単位なので、平均風速、風量のばらつき量をイメージしにくい。そこで、以下のように特性値の単位に換算して推定することができる。

平均風速を m とし、標準偏差を σ とする。

感度の定義式は、

$$S=10\log(m^2)$$

であるから、最適条件の平均風速 $m_{\text{最適}}$ は、

$$10\log(m_{\text{最適}}^2)=5.06$$

これより、

$$m_{\text{最適}} = 10^{\frac{5.06}{20}} = 1.79$$

SN比の定義式は、

$$\eta = 10 \log \left(\frac{m^2}{\sigma^2} \right)$$

これを変形して、

$$\sigma = m \times 10^{-\frac{\eta}{20}}$$

これに、最適条件のSN比 $\eta_{\text{最適}} = 26.48$ (dB)、 $m_{\text{最適}} = 1.79$ を代入して

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{最適}} &= m_{\text{最適}} \times 10^{-\frac{\eta_{\text{最適}}}{20}} \\ &= 1.79 \times 10^{-\frac{26.48}{20}} = 0.085 \end{aligned}$$

と推定できる。

同様にして、現行条件は

$$m_{\text{現行}} = 0.30、\sigma_{\text{現行}} = 0.038$$

と推定できる。

最適条件は現行条件に対し、平均風速は6倍程度大きくなるが、ばらつき量も2倍強大きくなるのが推定される。

SN比は $\frac{m^2}{\sigma^2}$ で定義される量であるので、ばらつき量が多少増えてもそれ以上に風速が増えればSN比は大きくなる。そういうことで今回の事例は、SN比の高い条件を選定することは、結果的に N_1 、 N_2 の差が小さくなるのではなく、感度である平均流速をより大きくした仕様が選択されたことになる。このこと自体は本来の温度上昇を抑えるという目的に合致しており、問題はない。

動特性同様ここまでは推定なので、確認実験で実際の改善量を確認することになる。

5.5.4 動特性と静特性の違いについて

動特性と静特性の一番大きな差は、動特性がモータ電圧（電気エネルギー）を風速（風のエネルギー）に変換するという技術の改善を行っているのに対し、静特性は既定の製品の固定された電圧に対する風速の改善を行っている点である。静特性でも温度抑制という点ではそれなりの改善ができるが、所定の電気エネルギーしか評価しない静特性では、必要な風速が得られなかった場合や、逆に必要以上の風速が出て同時にモータの作動音が大きくなってしまったといった弊害が出る場合もあり得る。一方、動特性で評価していれば、温度上昇を抑制するために必要な風速に対し、まだ風速が不足していれば電圧を上げることで目標の風速にチューニングすることは容易になるし、必要以上の風速が出ていれば電圧を落として目標の風速にチューニングすることも容易となる。電圧を落とすことができれば省エネになり、電圧を落として回転数が下げられれば、モータの作動音も低減できる可能性がある。

そういう意味で、直接の目的が製品品質の改善であっても、課題を一段高く設定し、技術手段の機能のロバストネスの改善を志向することを勧める。

5.5.5 補足：目的による信号の選択

(1) 計測特性と信号

品質工学では顧客の使用条件はノイズか信号になると言われている。冷却システムとして欲しいのは風速である（顧客の使用条件である）から、風速を信号としてそれに必要な電圧に対する SN 比を検討する方法が考えられる。この場合は、感度が小さい方がよい。

動特性の SN 比は β^2 / σ^2 であるから、比例定数 β が大きくなっても誤差分散 σ^2 が小さくなっても SN 比は向上する。しかし、比例定数が大きい場合は、その影響で SN 比が向上した可能性がある。冷却システムのオリジナルの解析ではそのような傾向が見られる。望ましいのは、比例定数 β が大きく、かつばらつきが小さい水準であるが、SN 比が大きい水準は比例定数 β の大きさが SN 比を押し上げた結果であるか、ばらつき量が低減できているのかの判断がしにくい。

そこで本章ではオリジナルの解析に対し、信号と計測特性を入れ替えて風速を信号として、それに必要な電圧を計測特性とする動特性の解析を行い、2つの評価内容の比較を行う。

(2) 計測特性と信号の入れ替え

冷却システムにおいて、信号 M と特性値 y を逆にして、 $M = \beta'y$ とする方法である。逆にしても風速と電圧の直線性の SN 比が大きい方がよいことには変わらないが、 β' は単位風速当たりの電圧であるから、感度は小さい方がよい。オリジナルに対し信号と特性値を逆にした P-diagram を図 5.5-13 に示す。また理想機能を図 5.5-14 に示す。

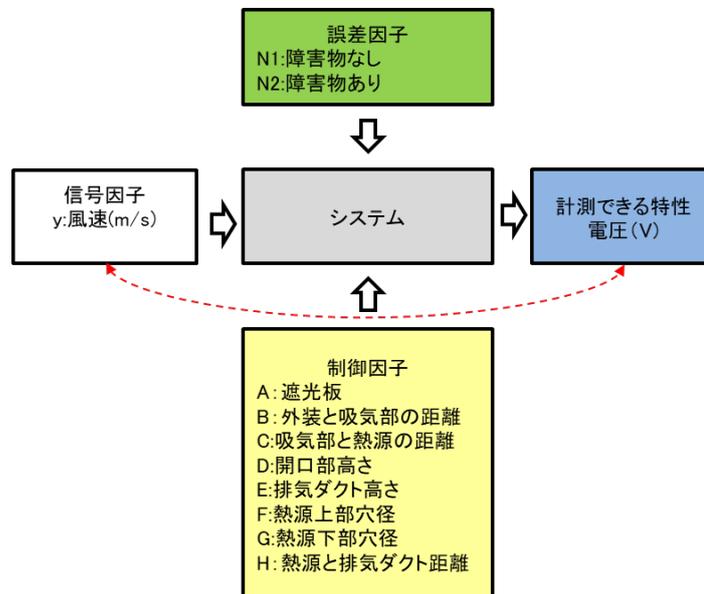


図 5.5-13 オリジナルに対し信号と特性値を逆にした P-diagram

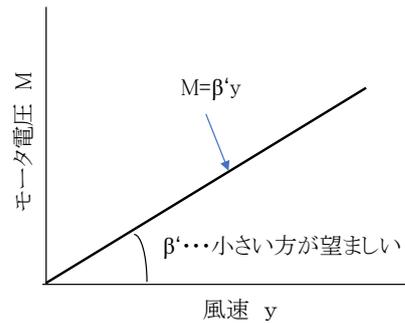


図 5.5-14 オリジナルに対し信号と特性値を逆にした理想機能

ここで、 $M = \beta' y$ について SN 比と感度を求めてみる。風速が信号、電圧が特性値となるが、記号は信号 y で特性値 M として計算を進める。計算方法は実験 No1 のデータで解説する。まず、表 5.5-13 のデータを基に実験 No1 は次のように書き改める。

表 5.5-13 オリジナルに対し信号と特性値を逆にした実験 No1 のデータ

N_1	y	0.12	0.31	0.44
	M	5	15	25
N_2	y	0.09	0.26	0.41
	M	5	15	25

全変動

$$S_T = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 y_{ij}^2 = 5^2 + 15^2 + 25^2 + 5^2 + 15^2 + 25^2 = 1750 \quad (f_T = 6)$$

有効除数

$$r_1 = 0.12^2 + 0.31^2 + 0.44^2 = 0.3041$$

$$r_2 = 0.09^2 + 0.26^2 + 0.41^2 = 0.2438$$

線形式

$$L_1 = 0.12 \times 5 + 0.31 \times 15 + 0.44 \times 25 = 16.25$$

$$L_2 = 0.09 \times 5 + 0.26 \times 15 + 0.41 \times 25 = 14.60$$

比例項の変動

$$S_\beta = \frac{(L_1 + L_2)^2}{r_1 + r_2} = \frac{(16.25 + 14.60)^2}{0.3041 + 0.2438} = 1737.0369 \quad (f_\beta = 1)$$

比例項の差の変動(誤差条件間の変動)

$$S_{N \times \beta} = \frac{L_1^2}{r_1} + \frac{L_2^2}{r_2} - S_\beta = \frac{16.25^2}{0.3041} + \frac{14.60^2}{0.2438} - 1737.0369 = 5.6274 \quad (f_{N \times \beta} = 1)$$

誤差変動

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{N \times \beta} = 1750 - 1737.0369 - 5.6274 = 7.3358 \quad (f_e = 4)$$

誤差分散

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{7.3358}{4} = 1.8339$$

総合誤差分散

$$V_N = \frac{S_e + S_{N \times \beta}}{f_e + f_{N \times \beta}} = \frac{7.3358 + 5.6274}{4 + 1} = 2.5926$$

SN比

$$\eta = 10 \log \left[\frac{\frac{1}{r_1 + r_2} (S_\beta - V_e)}{V_N} \right] = 10 \log \left[\frac{\frac{1}{0.3041 + 0.2438} (1737.0369 - 1.8339)}{2.5926} \right] = 30.87 \text{ (db)}$$

感度

$$S = 10 \log \left[\frac{1}{r_1 + r_2} (S_\beta - V_e) \right] = 10 \log \left[\frac{1}{0.3041 + 0.2438} (1737.0369 - 1.8339) \right] = 35.01 \text{ (db)}$$

No2 以降も同様に計算し、
表 5.5-14 の結果が得られた。

表 5.5-14 オリジナルに対し信号と特性値を逆にした場合の SN 比と感度の計算結果

実験 No.	A 1	B 2	C 3	D 4	E 5	F 6	G 7	H 8	SN比 (db)	感度 (db)
1	1	1	1	1	1	1	1	1	30.87	35.01
2	1	1	2	2	2	2	2	2	22.82	35.33
3	1	1	3	3	3	3	3	3	17.89	23.83
4	1	2	1	1	2	2	3	3	28.04	26.28
5	1	2	2	2	3	3	1	1	21.51	26.28
6	1	2	3	3	1	1	2	2	21.35	26.65
7	1	3	1	2	1	3	2	3	18.99	34.44
8	1	3	2	3	2	1	3	1	15.87	29.98
9	1	3	3	1	3	2	1	2	20.75	26.06
10	2	1	1	3	3	2	2	1	17.66	26.38
11	2	1	2	1	1	3	3	2	25.63	36.83
12	2	1	3	2	2	1	1	3	22.31	23.37
13	2	2	1	2	3	1	3	2	21.44	26.96
14	2	2	2	3	1	2	1	3	19.01	23.89
15	2	2	3	1	2	3	2	1	25.90	33.82
16	2	3	1	3	2	3	1	2	15.30	24.33
17	2	3	2	1	3	1	2	3	21.31	26.17
18	2	3	3	2	1	2	3	1	16.22	28.00

これより水準別平均を計算し(表 5.5-15、

表 5.5-16)、要因効果図(図 5.5-15 図 5.5-16)を作成した。

表 5.5-15 SN比の水準別平均

SN比水準別平均	総平均 21.27		
	1	2	3
要因			
A 遮光板	22.01	20.53	
B 外装と吸気部の距離	22.87	22.87	18.07
C 吸気部と熱源の距離	22.05	21.03	20.74
D 開口部高さ	25.42	20.55	17.85
E 排気ダクト高さ	22.01	21.71	20.10
F 熱源上部穴径	22.19	20.75	20.87
G 熱源下部穴径	21.63	21.34	20.85
H 熱源と排気ダクト距離	21.34	21.22	21.26

表 5.5-16 感度の水準別平均

感度水準別平均	総平均 28.53		
	1	2	3
A 遮光板	29.32	27.75	
B 外装と吸気部の距離	30.13	27.31	28.16
C 吸気部と熱源の距離	28.90	29.75	26.96
D 開口部高さ	30.69	29.06	25.84
E 排気ダクト高さ	30.80	28.85	25.95
F 熱源上部穴径	28.02	27.66	29.92
G 熱源下部穴径	26.49	30.47	28.65
H 熱源と排気ダクト距離	29.91	29.36	26.33

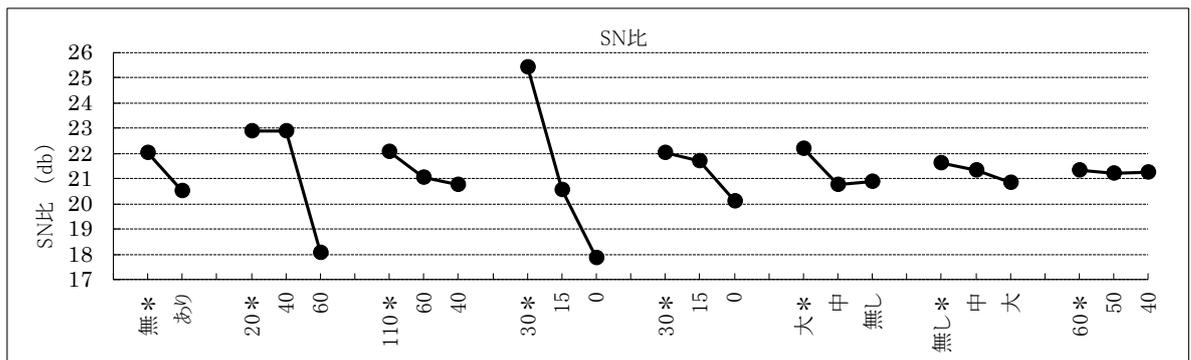


図 5.5-15 オリジナルに対し信号と特性値を逆にした場合の SN 比の要因効果図

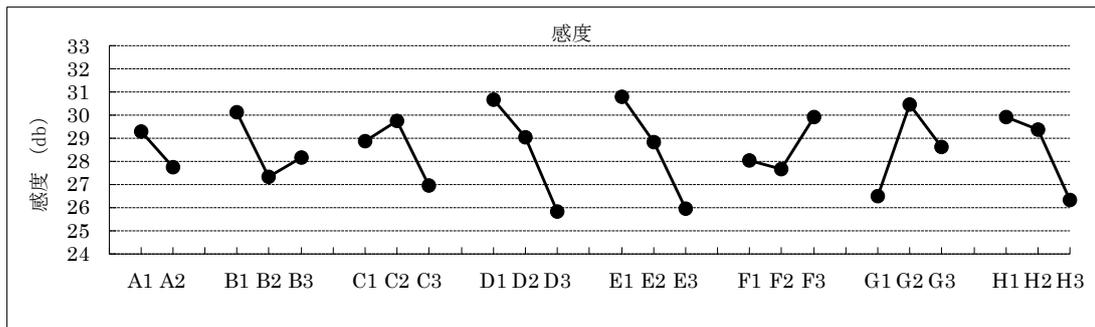


図 5.5-16 オリジナルに対し信号と特性値を逆にした場合の感度の要因効果図

要因効果図から SN 比は高く、感度を低くできる水準を選択することになる。B₂は SN 比は高く、感度も低い。この水準は感度が低くなっても SN 比が高いという意味では望ましい水準と言える。しかし、他の因子ではそのような好都合な水準は見られないので、矛盾のある選択となる。

M=β'y の場合、SN 比に効果の大きい要因は少なくなったので、SN 比があまり大きくない因子については、積極的に感度重視の水準選択ができる。それを考慮して、A₂B₂C₃D₁E₃F₁G₁H₃ を最適条件の候補とする。ただし、因子 D については、SN 比では D₁、感度では D₃ であるから、SN 比の増減と感度の増減によるメリット・デメリットを考慮して優劣を判断することになる。

ここでは、経済的評価はせずに、初期条件と最適条件の候補を D₁ の場合と D₃ の 2 条件について、SN 比、感度及び標準偏差を推定する。

表 5.5-17 現行条件と最適条件候補 2 条件の推定

	A	B	C	D	E	F	G	H	SN比 η (db)	感度S(db)	β'	σ
現行条件	1	1	1	1	1	1	1	1	30.87	35.01	53.25	1.57
最適条件1	2	2	3	1	3	1	1	3	25.84	19.77	9.73	0.50
最適条件2	2	2	3	3	3	1	1	3	18.27	14.92	5.57	0.68

なお、比例定数 β'、標準偏差 σ の推定は以下のように求めた。

感度の定義式は、

$$S = 10 \log(\beta'^2)$$

であるから、

$$\beta' = 10^{\frac{S}{20}}$$

として推定する。

また、SN 比の定義式は、

$$\eta = 10 \log\left(\frac{\beta'^2}{\sigma^2}\right)$$

であるから、これを変形して、

$$\sigma = \beta' \times 10^{-\frac{\eta}{20}}$$

として推定する。

欲しい風速が仮に 1 m/s であれば、 β' がそれに必要なモータ電圧である。すなわち、最適条件 1 では、9.7V、最適条件 2 では 5.6V である。 2σ を電圧のばらつきとしたときの電圧範囲は以下のようである。

$$\text{最適条件 1 : } M=9.73 \pm 2 \times 0.50 \quad \Rightarrow \quad 8.74 \sim 10.72 \text{ (V)}$$

$$\text{最適条件 2 : } M=5.57 \pm 2 \times 0.68 \quad \Rightarrow \quad 4.21 \sim 6.93 \text{ (V)}$$

最適条件 2 は、ばらつきは最適条件 1 よりも大きい、モータ電圧は低く抑えられる可能性があり最終的な最適条件と言える。

(3) まとめ

感度を大きくしたい問題に対して、信号 M と特性値 y を逆にして、 $M=\beta'y$ を想定して解析することで、SN 比の大きい水準が比例定数 β の大きさが SN 比を押し上げた結果であるかどうかを判断しやすくする。つまり、 $M=\beta'y$ で解析することで、SN 比が高く、感度を低くする因子は真にばらつき量も低減できる因子であると言える。

効率に関する問題は、基本的に感度を大きくしたい問題として扱うことが多いが、欲しい出力を得るのに、どれだけ少ないエネルギーあるいは仕事で達成できるかという視点で本章のような解析を行うことも有効であることを知っておいて欲しい。

6. セットベース設計

6.1 セットベース設計が求められる背景

この30年間における日本経済を支えてきた産業の労働生産性は、安価な労働賃金を求めた海外への生産拠点の移動や非正規従業員の大幅な雇用による対策にもかかわらず、もともとの人件費や材料費の高さ、大規模な設備投資やIT投資の不足もあって、名目GDPで見ると日・米・中のなかで日本は1990年代半ばからほとんど低迷していることが図6.1-1[1]からわかる。また付加価値労働生産性について日米の変遷を見ると図6.1-2[2]のように最近は大きく水をあけられていることが分かる。

一方で開発効率の観点からいえば、日本文化の伝統である縦型組織構造やその社会構造を背景にする人的すり合わせなどからくる開発設計の効率性の良い面が他文化国家の産業との比較において生じ、実際1990年代半ばまでは、開発効率化を推進し、多くの成果を上げてきていて、日本は有意に立っていたことは前述の図からも分かる。しかしその後は、日本の文化的保守性もあってそれまでの成功体験の延長線上でさらなる効率化に注力し続け、差分設計や流用設計が中心となったため、変更点で提供すべき新たな価値を製品に織り込むことができなくなってきているのが現状である。一方で、世界のデジタル化の波にも乗り遅れたことも開発効率の低さの原因であると思われる。太陽電池やリチウムバッテリーなどが後から参入した中国や韓国などに技術的にも抜かれ、引き離されている例にも典型的にみられる現象である。

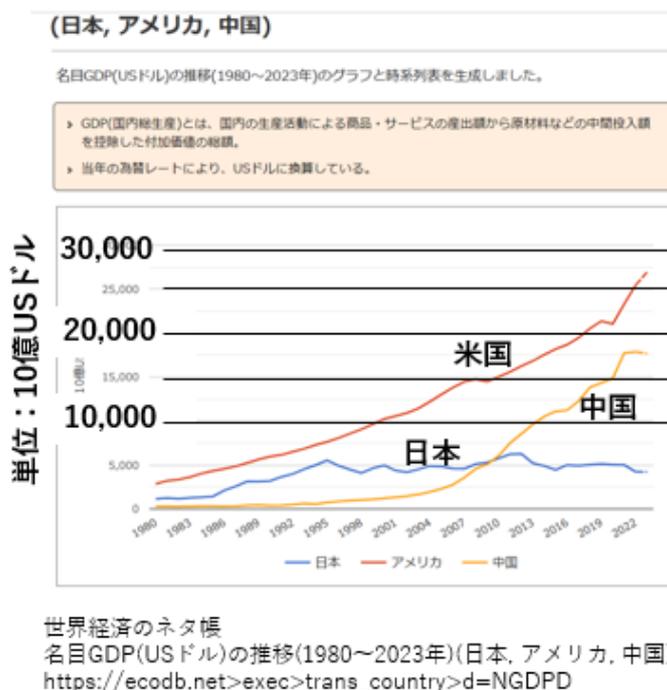
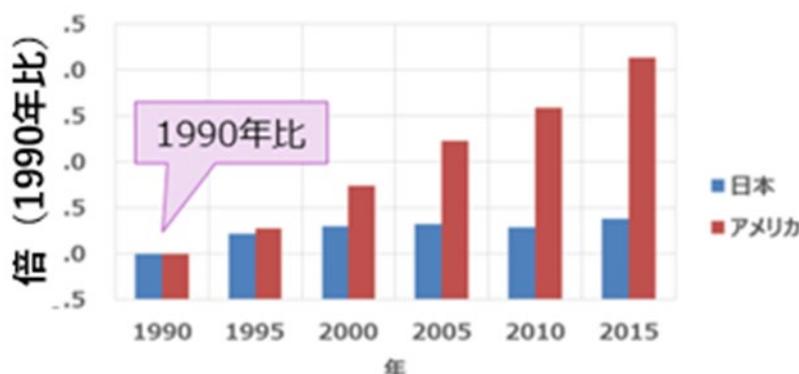


図 6.1-1 日本, 米国, 中国の名目 GDP の変遷

付加価値労働生産性 = 名目GDP ÷ 年間総労働時間



参考：第02回「日本の労働生産性は低い」は本当か？

<https://www.fujitsu.com/jp/group/fjm/mikata/column/shimizu/002.html>

図 6.1-2 付加価値労働生産性の日米比較

いずれにしても、こうした日本の製造業の状況を変革するには、結果として労働生産性（労働者数・労働時間あたりに生み出した成果）あるいは付加価値（労働者数・労働時間あたりの粗利としての価値）を上げることが求められる。このことを設計・製造の現場感覚でいえば、これまでの流用設計の一層の展開に加えて、ゼロベースの新しいアイデア出しから始まるイノベーションと設計・製造のプロセスとしての効率向上の方策に対する柔軟な対応が求められている。その一環として、世界から見ればその後追いではあるが、ポイントベースの数値解析を基軸にしたシミュレーション技術(CAE)とその展開形としてのモデルベース開発(MBD)があるものと一般的には思われている。MBDの定義も様々であるが、上流工程での1D-CAEによる実際のシステムの挙動の設計の観点からの検証の後、その挙動を満たす各サブシステム機能設計をシステム全体の評価のもとで実施し、各サブシステムの挙動を実現する3D-CAE設計（例えば形状設計としての3D-CADや流体の流れなど様々なシミュレーション設計としての3D-CAEなど）技術の適用の場面に移るといふ、いわばトップダウン的なモデルの展開が本稿でのMBDであるとする。したがってMBDにおいては、CAEは設計の機能空間を現実空間で実現する解空間をおもに経験的に想定した領域として設定しつつ数値解析を実行することになり、より適切な解（手戻りの解）を求めるための高精度のCAE技術の繰り返しの利用という形をとる。つまりCAEの適用プロセスでは、高精度の解の追求と対象とする解空間内での探索点を変更しつつ解探索を繰り返す（手戻りなど）という両面で計算処理時間の長大化を生じ、開発プロセスにおいて設計への負荷が大きいシミュレーションを繰り返すという意味で開発効率の低下に繋がることもある。また、多目的性能の実現という観点でも、一般的に目的ごとのCAEの利用と多目的性能解を得るための解の整合化が必須となり、この面でも開発効率の低下に繋がる。ただし実験的検証（試作も含めて）は開発プロセスの最終段階に位置付けているという意味では開発効率の向上が図れることになる。

さらにCAEの利用の発展形としては今後の製品開発の方向性の観点もある。つまり今後の世界的社会の潮流の原動力、そしてそこから来る製品開発の方向性の指針として、DXの一層の推進（例えば、高性能で操作性や理解可能性が良く、安価であること）や絶

対的必須アイテムとなりつつある GX(Green Transformation)の導入（環境対応），さらに UX（ユーザー体験）や CX（顧客体験）などである．こうした方向性に沿って製品開発が進むほど，分野の異なる複数性能の同時実現が求められる．

しかし従来あるいは現状の CAE に代表されるポイントベース設計では，そもそも設計対象現象ごとの解析が基本で，あるいは連成解析であっても設計を進めていく過程で，精度追及のために高い計算機能力に依存する方向ばかりになっている．加えて与える設計解探索範囲に真の根拠がない，または根拠がある探索範囲に絞り込むという考え方がないことや複数の設計対象現象を同時に扱うという発想と手段が連成解析や多目的最適化の場合を除いて存在しないことが指摘できる．しかしこうした連成解析や多目的最適化も扱える多目的数が多くはないこと，精度的課題，ソフトウェアの導入時のコストと必要な計算機の処理容量や高速性の必要性などの課題があり，普及はそれほどでもない．これらの指摘は最近，話題になるサロゲートモデルでも当てはまる．逆に言えば，以上のことが CAE に基づく設計プロセスでの手戻り（低い開発効率）の本質的原因であると考えられる．

以上の内容はこれまでの製品性能のスペックの向上にとどまらず，新しい価値となり得る地球温暖化や環境汚染など環境問題への（いわば負への）対応に関わる性能価値やユーザの感性に関わる機能などユーザーサイドからの価値を積極的に取り入れる製品設計が時代の潮流と関係していることを意味している．こうした付加価値の向上のためには必然的に多目的性能の同時実現を計算機力に頼らず，容易に可能とする設計の理論や手法が求められるが，これを再び従来の CAE のシミュレーションだけで解決しようとするれば前段の開発効率のさらなる悪化は避けられない．

これまでは以上述べたような困難性を有する製品の開発プロセスとそこにおける設計のよって立つ基本的考え方であり，人類が産業分野だけでなく，社会現象などにおける解析や分析そして設計の分野で営々として積み重ねられてきたポイントベース思考の世界だけがこの世のすべてと考える思考であった．この状況から脱却するために，社会現象を含む広い意味での解析・分析そして設計の思考原理として，さまざまな現象やその影響因子を範囲で大まかに捉えることから思考を開始する設計であるセットベース思考に刮目すべきであると考えられる．そうした新たな思考の原理に立つとき，絡み合った糸を計算機の巨大なパワーによらずに解きほぐした世界が見えてくる可能性がある．前述のような現実の設計課題における背反性（絡み合い）を持つ複数性能の同時実現というハードルを越える設計手法としてセットベース設計という考え方が具体的手法として定式化されていて，本稿ではその使用の段階にあることを示したい．セットベース設計手法の使用により，前述の背反性を伴う複数性能の同時実現が可能となり，人間が製品設計の新しいアイデアを出し，その実現性を計算機のパワーによらず短時間で確認することができる新たな設計の基本的考え方としてセットベース設計手法があることを具体的に示せると考える．このセットベース設計という基本的考え方には本稿の導入部として示した「労働生産性」といった経済的指標の概念レベルでは評価しきれない概念的訴求性がある．しかし冒頭に経済的指標の話を持ってきたのは，本稿ではセットベース設計の概念の話で終わるのではなく，現実世界の様々な困難で待ったなしの事象を分析や解析という段階ではなく，設計という観点で少しでも解決ができればという思いがあるからである．

以上のような様々な観点での議論に資することが可能なセットベース設計について解説するために，まず従来の設計手法であるポイントベース設計(CAE)の本質的特徴について明確にしておく．

6.2 ポイントベース設計の特徴

6.2.1 ポイントベース設計の由来と実際

従来あるいは現状の CAE に基づく設計では、設計変数や性能の設計解は数値の形で算出され、ポイント値として表現されることが多い。つまりポイント値をベースにする設計は、現在までの設計行為全般に通ずる基礎的な考え方であり、設計内容表現の構成単位であるポイント値がベースである。ポイントベース設計とセットベース設計の両者はひとつの水源から始まり、山並み、田園地帯、あるいは都市の中を流れ、やがて海に至る川のように母なる大地から生まれ、やがて母なる海にそそぐ大きな流れの両岸である。そこでまずポイントベース設計の由来と実際について物理現象の支配方程式の観点から以下に説明する。おもに離散的標本データを基本とする統計分析の観点でもポイントベース設計の由来に対する説明もあり得るが、ここでは前者の観点で説明する。

例えば、ニュートンにより体系化された古典物理学（古典力学の体系）における運動法則のひとつ（例えば、第二法則）である運動方程式は、質点の加速度と作用力に関する支配方程式として表現されていて、これは質点とは見なせない物体（剛体、弾性体、流体などの連続体）の力学に対する基礎を与えている。あるいは伝熱現象に対しては熱伝導の変化を表現（支配）する熱伝導方程式がある。仮に形状離散化を考える場合には、これらの式を用いて、任意の境界条件や初期条件を有する実問題の解を求めるためには、その方程式を離散化して有限要素法等により代数方程式化して数値解析としての近似解を求めることがある。このように離散化し、代数方程式化した時点で、得られる設計解は離散化された対象領域内の代表値であり近似性を有する（厳密解でない）ポイント値表現に至る

（図 6.2-1 に代数方程式化して近似解を得る有限要素法のイメージを示す）。このことによりポイントベースが知識の形式知化を行いやすい表現様式であり、人間の理解性や事象の再現性との結びつきを容易にしたと考えられる。

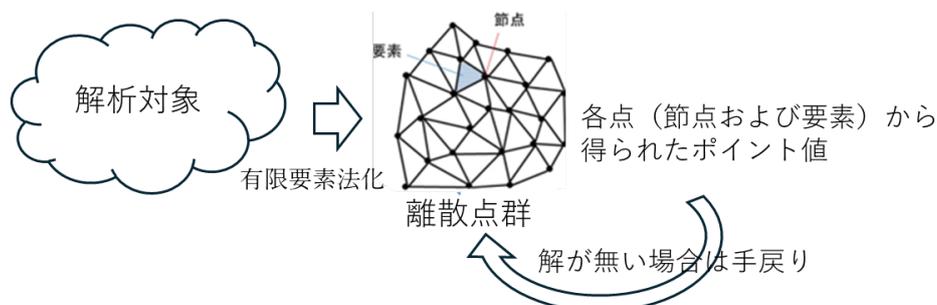


図 6.2-1 代数方程式化の例としての有限要素法化

一般にポイント設計に基づく数値解析においては、設計対象の連続体に対して解析対象領域を仮定し、その領域を離散点群で表現し、各点における設計値を求めることに主眼があるので、ポイント設計ではそもそも探索対象の初期設定領域を広域から絞りながら解探索をするという発想に至らなかった。その結果、設計解探索範囲は設計プロセスの当初から固定的であり、初期の探索範囲に解がない場合には、その結果の傾向や従来からの経験に基づいて探索範囲の修正（手戻り）を試行錯誤的に行うという本来的弊害も内在していることが明らかになってきた。このことにより試行錯誤性という意味で曖昧性があるとも

いえる。

実際、従来のポイントベース設計では、例えば複数の要求仕様の設計課題に対して設計プロセスを進めていく過程で要求仕様を同時に満足する解ではない、あるいは制約条件を満足しないことが分かり、そこから設計をやり直す、もしくはコストなどの要求仕様や制約条件に対する妥協が行われることも普通である。あるいはこうしたことが CAE に基づく設計プロセスでの手戻りの原因であると考えられる。

設計解の曖昧性のひとつである精度については、もともと設計対象である連続体を離散点群に置き換えているという説明も可能なので、その近似ゆえの誤差は本質的であり、誤差は離散点数の増加によって基本的には減少する方向に向かうが、増加に比例して解くべき代数方程式の次元が大きくなり、解法に依存した誤差が増加する可能性がある。また代数方程式の次元が大きくなることにより、計算を支える計算機の処理能力としては高速化と大容量化が必須となる。

マルチドメインにわたるマルチフィジックスでは支配方程式の連成化という観点もあるが、実際上の求解手法はポイントベースに基づく数値解析手法である。数値解析に基づく連成解析には強連成、弱連成があるが、いずれにしても数値解析であり、前述の設計解探索範囲や精度に関する曖昧性（近似性）は同様であるとともに、弱連成解析での誤差の堆積性の課題もある。

6.2.2 設計の文脈（分析と総合）の観点

設計の文脈において、分析（アナリシス）は「実体からその機能・属性・性能を明らかにする作業」とされ、総合（シンセシス）は新たに提案された設計対象や仕様の実体化に関して、「要求された機能・属性・性能を満足する実体を求める作業」とされる。ここで総合の結果においては、要求性能に対する満足度が議論される[3]。

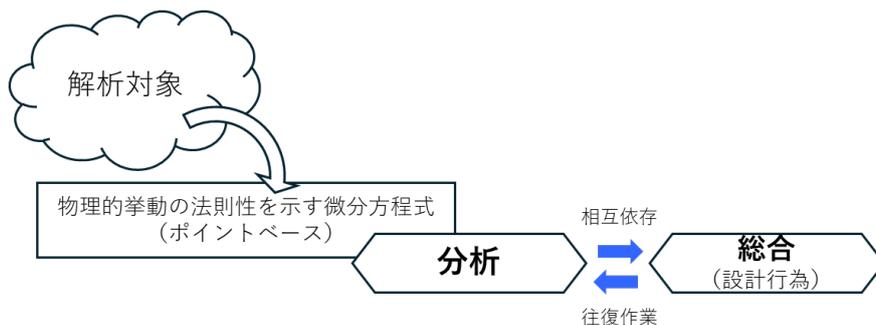


図 6.2-2 ポイント値ベースの分析と総合

設計行為が要求性能（合目的的機能）を満足する設計解を得るという最終的な結果のみにあるとすると、総合のみが設計行為であると考えられるものの、設計解を得る過程では、合目的性に合った既存の製品や機構に関する調査や設計解候補を想定した、例えば力学系・メカニズム系・制御系・電子系等の物理的現象等に対する理論的・数値的計算や実験などの分析も行われる。理論的計算は現象のおもに物理的変化挙動の法則性を示す微分方程式を解析的に解くことを意味する。理論的計算により得られた解は、特定の初期条件

や境界条件の下での式の形をとることが多い。その場合、解の値としては特定の初期条件、境界条件のもとでのポイント値として表現される。一方、数値的計算の場合は、微分方程式を代数方程式化して比較的任意に与えられ得る初期条件や境界条件の下で解を求める。数値的計算により得られた解は、数値の形をとる、すなわち、ポイント値として表現される。実際問題の初期条件や境界条件は単純ではないので数値的計算を用いることが多く、ポイント値の数値解が多い。

いずれにしても、設計の文脈の観点では、そこでの必須の行為である分析の実態はポイントベースとなっている。そうした分析を基盤とするので合目的な性能の実現を図る総合も必然的にポイントベース表現になる。したがって、一般的な設計は、ポイント値をベースにした分析と総合の相互作用（図 6.2-2 参照）といえる。

6.2.3 設計プロセスとしての1D（機能）設計と詳細設計の観点

総合において何をどこまで考慮するか（設計においていかになるべく多くの視点をもつか）が問われるが、このことは設計プロセスにも依存する。プロセスが異なれば、分析と総合の相互作用である設計の内容（対象機能）と粒度が異なると考えるのが一般的である。その意味もあり、またポイントベース設計の特徴が端的に表れる設計プロセスとして1D(機能)設計と詳細設計の段階に注目する。

まず、設計プロセスの比較的初期段階としての1D（機能）設計の段階では、機能設計における基本として機能と変数（影響因子）の因果関係が問われる。両者の関係を表す方程式が非因果であれば、力、熱量、電流、流量などに関する変数間の関係を釣り合いやポテンシャル量の連続性から関係する変数の物理的関連式を非因果方程式として表すフロー変数（接点方程式が成立する物理量）やポテンシャル変数（閉路方程式が成立する物理量）による表現になる。非因果方程式では各コンポーネントにおける物理量の関係式のみを定義しておき、入出力関係を決めておかなくてよいことになる。つまり代入式関係ではないことになる。そのこともあって非因果関係に基づく実際の設計としての機能設計では、設計上必要な入力変数の数に対応した数だけの機能関係を構築する必要が生じるが、その場合の機能が設計上の性能機能であるとは限らない。しかし設計としては最終的には性能機能と紐づける必要があり、生成された非因果に基づく機能モデル関係式も実際には連立微分代数方程式などの計算因果関係解析技術によって要求するモデル出力が計算機上で計算可能な方程式群に変換され、独立な方程式と未知変数の数を同じにすることにより、未知変数を求めることになる。

他方、因果方程式では、右辺に因となる入力変数（独立変数）を、左辺に果となる出力変数（従属変数）を配することになる。この場合でも、方程式が求解であるためには関係式の数（従属変数の数）と未知変数（独立変数）の数の同数性は必要となる。この場合は通常、出力変数が性能変数に対応する（図 6.2-3）。

いずれの場合も求解が可能になる場合は、既知変数や結果として得られる未知変数に対する解はポイント値で表現され、代数方程式の解としてポイント値解を求めることになる。つまり設計対象とする機能群を非因果、因果の方程式群を用いてポイントベースの世界で表現する場合は前述の同数性の制約が絶対条件（必要十分条件）になる。したがって1D(機能)設計をポイントベースで行う場合は、設計変数と位置づけられる独立変数にポイント値を与えて未知変数に相当する目標性能のポイント値を得る図式になり、目標とする複数性能の設計値を得るために両者のポイント値による繰り返し計算となる。

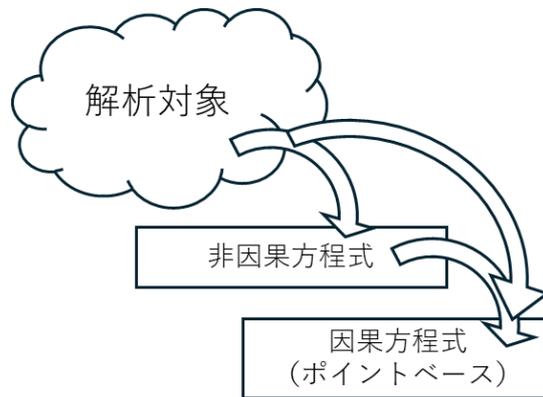


図 6.2-3 1D (機能) 設計における方程式の定義

次に詳細設計段階について述べる。本節のテーマである独立変数（設計変数，入力変数）と従属変数（機能変数）の数の同数性は詳細設計で多用されるシミュレーション技法でも必要な要件である。シミュレーション技法の主役である，例えば有限要素法は物理現象に関する変化の基礎方程式（微分方程式）の近似解法としての代数方程式化に基づいて，前述の同数化により近似ポイント値解を得ている。この近似解は解析対象の連続体を要素に分割し，要素間の繋がりを要素の代表点（節点）により実現する。換言すると連続体の無限自由度の挙動を有限自由度の有限離散点により表現し，その点における物理量を求めていることになる。したがって現状のいわゆるシミュレーションはポイントベース解析の典型であるといえる。

設計プロセスとしての詳細設計における設計対象物理量に注目すると，設計としては一般に精度の高いシミュレーション結果の利用が可能であることが望ましい。そのためには解くべき代数方程式の解法から来る誤差としての近似性もあるが，やはり連続体の分割要素を細かくする（高次要素の利用もあるが，一般的には要素分割数を増やす）ことによって数値解析の自由度を上げ，精度を向上させることが要請される。つまり解くべき代数方程式の大規模化が生ずることになり，計算機処理の速度の高速化と容量の大規模化が要請される傾向になる。複数設計変数の組合せ（各変数の水準値の組合せも含めて）によっても計算処理の負荷の増大化に繋がる。このことはシミュレーションがポイントベースで行われていることの帰結といえる。並列処理やサロゲートモデル化の考え方もあるが，計算処理の負担の増加は基本的には変わらない(サロゲートモデルでも相当量の適切な質と量の学習データが必要)。加えて境界条件を含めた解析対象領域の条件修正は経験的あるいは試行錯誤的であることが多く，ここからくる手戻りが一般的であり，前者の組合せ量や学習量の増大化と合わせて相当量の負担になっている。

また多くのシミュレーションは特定の物理現象を数値解析するために用いられるが，強あるいは弱連成の連成解析では複数の物理現象の微分方程式をそれぞれの考え方で一体化することで複数の物理現象を同時に数値解析する技術として提案されている。現状では実際の連成数は2ないし3であり，その増加は，微分方程式化表現できない性能も多分にあり，本質的にも実際的にも難しい。

連成解析を含むシミュレーション技法における解探索は対象物理現象の目標性能を満たすまで与えられた探索対象空間に対してシミュレーションを繰り返す（図 6.2-4）こと

が基本である。その繰り返しの探索は影響因子（設計変数や境界条件）の値や条件を経験に基づきつつ試行錯誤的に修正しながら行なわれることが多く、前述したような一定の解析精度を担保することも有り、その計算処理は多大な処理時間を要することになる。このような処理に後述の多視点性の観点が加わると図 6.2-5 に示すように繰り返し処理が多発し、多視点の観点をすべて満たすまでの収束には一層の処理時間の増加に繋がる。また得られた場合のポイント値解の根拠に対しては、経験から得ている傾向からの類推やコンピュータを用いたシミュレーション結果であること自体で自得することもあり、必ずしも論理的でないことも多い。さらに一般にシミュレーションソフトの導入・維持の経済的負担も厳しいものがある。

以上のことはポイントベースに基づくシミュレーション(CAE)の特徴であるといえる。

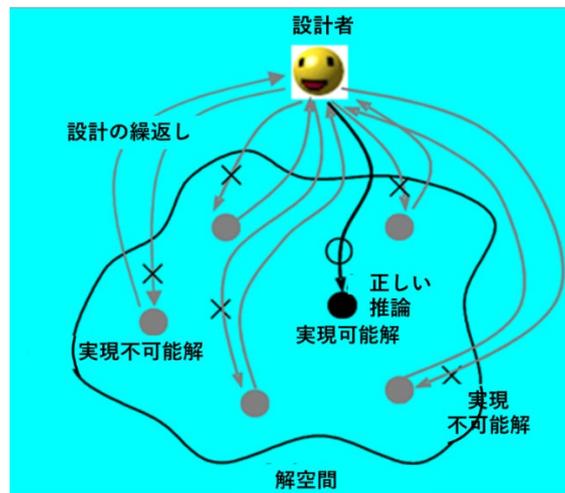


図 6.2-4 シミュレーション (CAE) に基づく解探索



図 6.2-5 多目的性能の実現のためのポイント値評価の繰り返し

6.2.4 製品開発プロセスにおける多視点性の観点

ポイントベース設計における多視点性の観点としてコンカレントエンジニアリングの観点から考える。コンカレントエンジニアリングにおける原点的考え方に Evans 流[4]の考え方 (図 6.2-6) がある。コンカレントエンジニアリングなので、時間軸としての製品開

発のプロセス（設計、製造、保守、廃棄（あるいはリサイクル）など）の並列的推進あるいはそれぞれのプロセスにおける多視点性を処理する方法が課題となる。したがってコンカレントエンジニアリングではそのような並列性（部分的同時性（オーバーラップ性））やそれぞれのプロセスにおける多視点間の同時的検討を扱うが、内容的にはいずれにおいても関係する設計変数群の解候補をポイント値として表現する。これらの状況を図 6.2-6 では点線と実線で表示している。コンカレントエンジニアリングにおけるオーバーラップ性や多視点性への対処はいずれにしても製品開発期間の短縮化が目的である。コンカレントエンジニアリングではそのために、例えばすり合わせや担当チーム間作業のサポートを目的とするエージェントシステム[5]、あるいは品質機能展開(QFD)や設計構造マトリックス(DSM)といった開発支援の考え方やその実施ソフトの提案などが行われている。さらに製造システムと経営システムをコンピュータで統合することにより、製造やそれを構成する様々な部門と経営に関わる業務の一体化を目的とし、1995年に提唱された国際的基準(ISA95)もある。いずれにしてもこれらのすべてに関係する情報自体あるいはその展開・連携はいずれもポイント値をベースに実施されている。

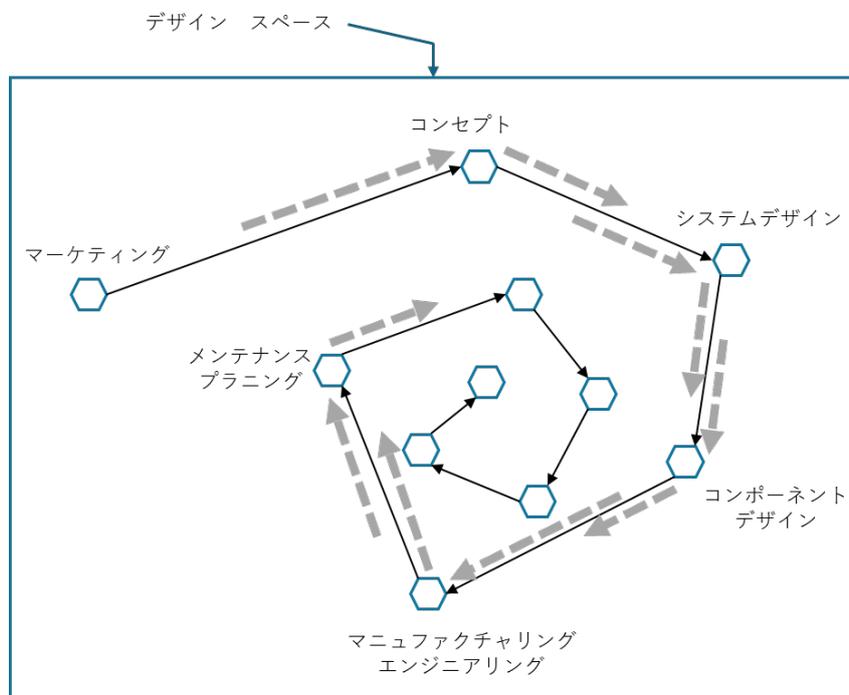


図 6.2-6 コンカレントエンジニアリングにおけるポイントベース設計[4]
(文献[4]の図に加筆)

6.2.5 最適化の観点

性能の最も良い（最適な）状態は最小値（最大値）として与えられる、と考えるのが数理的最適化法である。単目的最適化では最小値（最大値）は1点であるが、多目的最適化問題では目的関数間にトレードオフの関係が存在するので一般に全ての目的関数を同時には最小化（最大化）することはできず、従来の多目的最適化手法から得られる解は、パレート（最適）解という多目的を同時には最小（最大）化はできないポイント解の集合になる。つまりパレート最適解は一意に求めることはできず、図 6.2-7[6]のようにパレートフロントというパレートポイント解の集合として表現される[7],[8],[9]。さらにパレー

ト最適解は他のどの解にも優越されない解ともいい、例えばパレートフロント集合に非凸性がある場合（大域的で複数の極小値が存在する場合など）では最適解が与えられないという本質的課題があることになる。またパレート解集合から最適性のある解を求めるためにはなんらかの手段を用いて選好解を選択する必要がある。例えば、多次元チャート (Parallel Chart)を用いた絞り込みなどである。つまり従来の多目的最適設計では、パレートフロント（ポイント値）解集合を求める段階とそこから選考解を求める段階の2段階の探索で完結することになる。

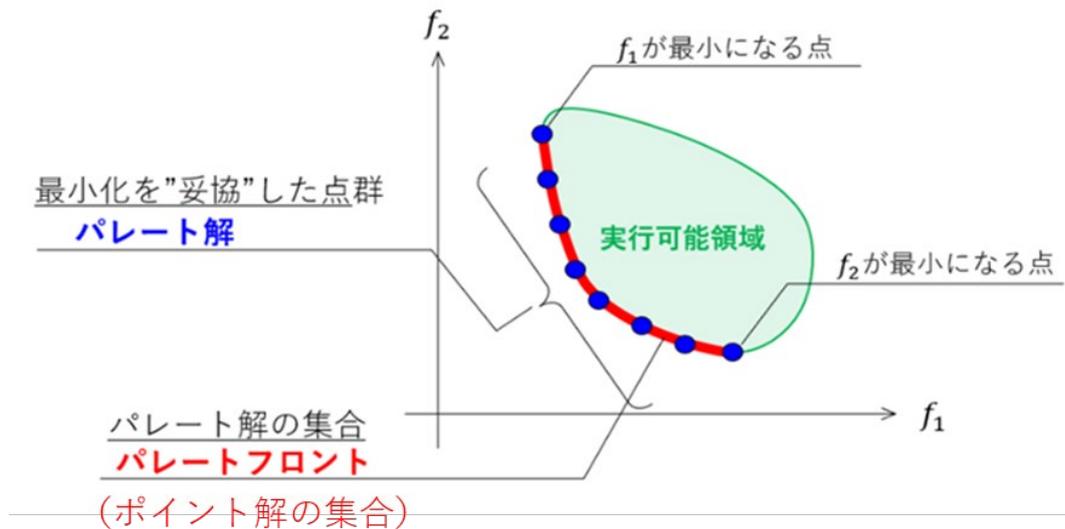


図 6.2-7 パレートフロント解[6]

一方で、多目的数に注目すると、従来の多目的最適化手法では4つ以上の目的数（このような場合を多数目的最適化という）になるとパレート解の精度が極端に落ちる現象が見いだされていて、正しいパレート解が得られないことが多くなる[10],[11],[12]。多数目的最適化に対応するために遺伝的アルゴリズムを含む進化型計算手法の分野での研究が重ねられている[10],[13]が、進化型計算手法そのものがポイント値に基づく計算処理であり、そこからパレート解を得る処理時間はかなり長大であるといえる。

6.2.6 不確定性の観点

「もの（モノ）」づくりは、俯瞰的な視点で価値自体を定義し、実現する価値の創造といえる。設計者は、価値を最大限に高めるために、価値の要因系のトレードオフ問題を扱う多目的性への対応と同時に、価値の評価基準を変動させる不確定性への対応を余儀なくされる。設計プロセスでいえば複数性能の実現を目指した不確定性の確定化（詳細化）のプロセスであり、初期設計段階ほど不確定性が課題になる。ここでいう不確定性とは設計において確定が容易でない課題の事であり、設計の後工程で発生する製造誤差や工学理論などに含まれる調整変数なども含まれる。主だった課題の一覧を図 6.2-8 に示す。これらは品質工学における誤差因子の概念と類似の概念である。ただし、調整因子などは制御因子の概念に含まれる場合がある。これらの不確定性をポイント値で確定的、あるいは一貫的に表現するのは一般には難しく、ポイント値の繰り返し修正に基づく表現になるため、その結果が設計手戻りに繋がる可能性が高いといえる。

- **設計者・開発者による確定が困難な状況**
(状況未確定、知識不足、不確実な知識、要求仕様決定の難しさなど)
- **他部門等からの影響や設計方針の変更**
(多目的設計の最適化の難しさ、「すり合わせ」の難しさ、他の設計者の意思決定の変動、企画やデザイン変更、製品の販売サイドの要望など)
- **物理現象の変動性、工学理論の調整変数**
(電気化学現象、電磁ノイズ、制御理論のゲインなど)
- **測定方法の違いによる変動、加工における変動性**
(加工精度のバラツキ、公差など)
- **ユーザーの嗜好性の変動** (製品の使われ方、官能性、感性など)

図 6.2-8 設計プロセスで扱う不確定性の例[14]

6.3 セットベース設計の特徴

なぜ設計理論や手法としてのセットベースを考えるのかとの命題に答えるために、前節で述べたポイントベース設計の特徴におおむね対応する形でセット（範囲）をベースにして設計を考える理論・手法（セットベース設計）の特徴について述べる。

6.3.1 セットベース設計手法の由来（3種類の提案）

ポイントベース設計手法の様々な課題を克服し得る考え方としてセットベース設計手法がある。セットベース設計手法の代表的な手法として3種類の手法がある。それは「セット」の意味として、グループ化された複数案，設計に関わる変数の範囲表現，選好度情報を導入した範囲表現という3種類である。この順で以下に説明する。

一つ目はコンカレントエンジニアリングの手法として推奨した Ward らによる考え方である[15]，[16]。これは設計の初期段階で様々な観点ごとに設計解候補（代替案）を複数用意し，それぞれについて解析・評価等も行い，考え得る段階まで検討を加え，それらが出そろったなるべく遅い段階での設計の意思決定のタイミング時に解候補を選択的に絞り込む考え方である（図 6.3-1 参照）。

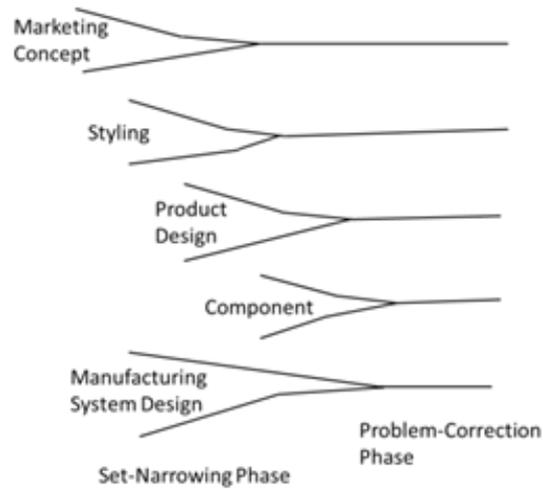


図 6.3-1 Wardらによるセットベース設計手法[17]

二つ目は性能や設計変数等を範囲で表現し、ファジーセット[18], [19]によりこれを一定の条件で絞り込む手法である。ファジーセットでは、ある特性をあらわす変数の性質の集合をファジーセットとする。その集合の具体的要素の曖昧な言語表現をメンバーシップ関数という。ファジィ推論は曖昧性を含むルールをファジィ論理に基づいて取り扱うもので、ルールの形式は典型的には

IF x is A AND y is B THEN z is C

の形となる。IF から THEN の前までの部分を前件部、THEN 以降の部分を後件部という。A,B,Cはファジーセットである。事実と前件部の比較にはあいまい性のあるファジィ論理を使う。前件部の論理演算結果から適合度を求め、この結果と後件部の論理積を求めることで前述のルールの結論が得られることになる。

ルールが持つ曖昧性(適合度, 図 6.3-2 参照)は範囲とそこにおけるメンバーシップ関数で表現される, という意味でセットに基づく設計手法となる。

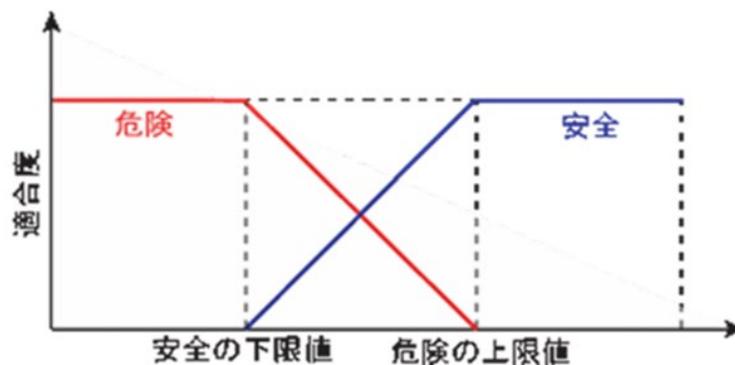


図 6.3-2 メンバーシップ関数の例

三つめは、要求性能およびそれに関する複数の設計変数をそれぞれ取りうる値の範囲とそこにおける選好性（ $[0, 1]$ の無次元量で表現する分布関数：選好度分布という）を与えて表現することを基本とする手法である。選好度分布を有する設計変数の範囲を性能と設計変数との関係性を用いて選好度分布を有する要求性能の範囲へと範囲伝播を行い、可能性分布範囲として求める。その可能性分布範囲と事前に与えておいた選好分布付き要求性能範囲との重なり（積集合）を評価する方法であり、選好度セットベース設計手法といわれる手法である[20],[21],[22],[23]。複数の設計変数の初期範囲を統一的なアルゴリズムで分割し、それらの部分集合の組合せの範囲伝播から背反性も含む複数性能の同時実現範囲を求める手法である。この手法で新たに提案された概念の一つが「選好度」であり、意味するところは範囲（セット）内における選好性である（図 6.3-3）。

選好度セットベース設計手法によれば、現状のシミュレーション技術（CAE）、AI（機械学習）、実験技術では原理的にあるいは実際上解くことが難しい多目的性に関わる設計課題についても、解の存在性の有無も含めて設計解を原理的には提示できる。

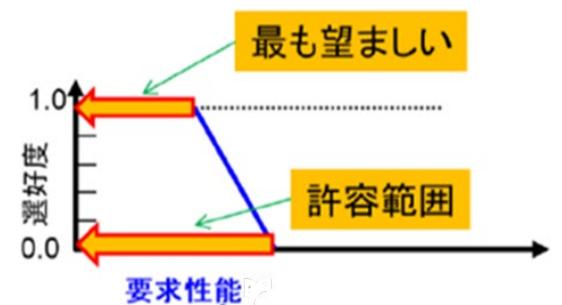


図 6.3-3 選考度分布による表現

6.3.2 セットベース設計における設計の文脈

6.2.2 ではポイント値をベースにした分析と総合の相互作業としての設計について述べた。すなわち設計における合目的な要求性能と、その影響因子である設計変数の関係性を理論的、近似的あるいは実験的に表現する作業である分析と、これを用いて、要求性能の合目的性を達成する設計変数の値を試行錯誤的に、あるいは代数的（設計変数の数と性能のそれらとの関係式数の一致という意味）に求める作業である総合を、合目的性の達成に至るまで繰り返すことが相互作業となる。ポイントベース設計ではその分析が試行錯誤的あるいは代数的であるがゆえに、これらの一連の作業をポイント値をベースに行うこととなる。

セットベース設計では要求性能の合目的性と設計変数自体の表現はポイント値ではなく、範囲表現で貫徹する。したがって設計としては、範囲表現された要求性能を満足する設計変数も範囲で表現される。また選好度セットベース設計ではそれらの範囲内での選好性の情報も与えられている。また設計行為としては一般に性能とその影響因子（設計変数）との関係(式)も必要であるが、それらの同数性は必要なく（図 6.3-4）、セットベース設計の場合の関係(式)は範囲表現された設計変数の要求性能空間への範囲伝播としての意味を持つ。すなわち、ポイントベースでいうところの変数値の1対1対応の関係性ではないことになる。範囲伝播された要求性能の範囲に対しては目標として与えられた性能範囲

との重なり（積集合）を求め、この結果が与えられた範囲に入るように設計変数の初期範囲を絞り込むという一方向作業が設計になる。

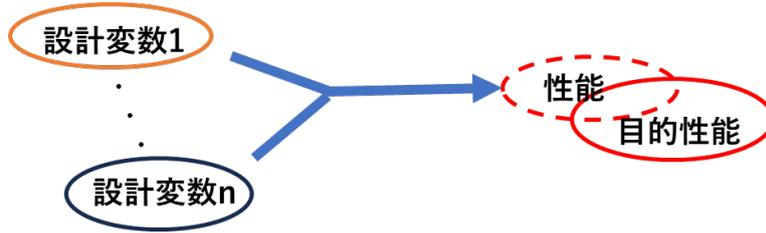


図 6.3-4 セットベース設計における設計変数数と性能数の非同数性

したがってセットベース設計においては設計変数空間から得られる性能の可能性範囲が目的性能空間に収まるように、初期に決めた比較的広い設計変数空間を絞り込むという作業が必要になる。つまり設計変数空間の都度ごとの再定義の繰り返しによる両者の往復作業というよりは、一度決めた設計変数空間の性能変数空間への絞込みによる合わせ込みといえよう。仮に目的とする要求性能空間が「正」であり、それに対する影響因子の初期空間からくる可能性性能空間が「反」とすると、それらを合わせこむ（絞り込む）という設計作業が「合」になるという弁証法的作業が設計である。

6.3.3 設計プロセスとしての 1D(機能)設計と詳細設計の観点

6.2.3 節では設計プロセスにおける 1D(機能)設計と詳細設計に注目し、それらにおけるポイントベース設計の特徴について述べた。本節ではそれらの特徴に対応する内容をセットベース設計の観点から述べる。

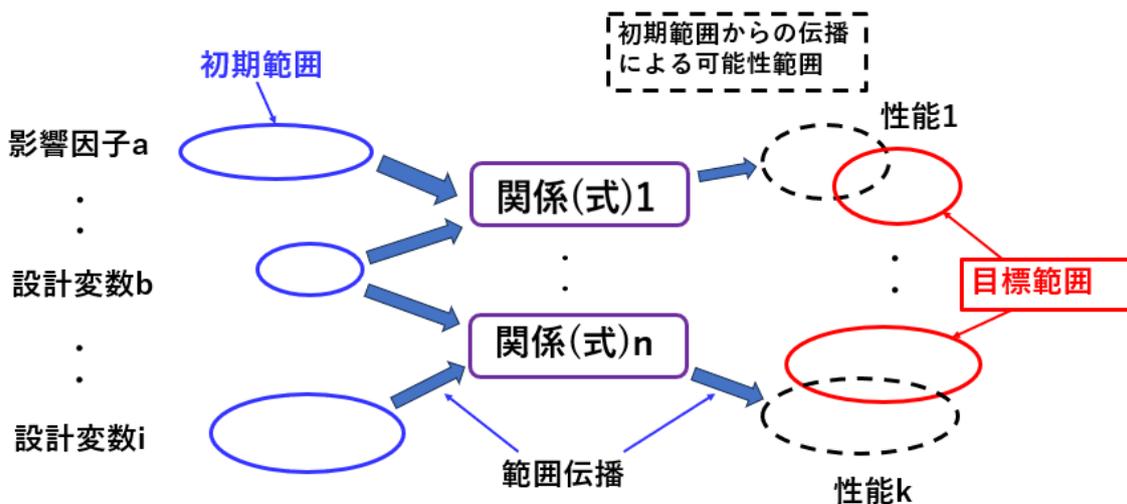


図 6.3-5 セットベース設計手法における範囲伝播

まず 1D（機能）設計における因果・非因果方程式の求解性に関連し、独立変数と従属変数の同数性についてである。図 6.3-5 に示すように、本節で主として説明する選好度セットベース設計手法では、複数の要求性能（従属変数）のそれぞれの影響因子である設計変数（独立変数）の初期範囲（図 6.3-5 の左側の因子の範囲）を基本的に広く取り、その範囲を各性能と影響因子（設計変数）間の関係(式)を用いて性能空間に範囲伝播を行う。ただし図 6.3-5 では、範囲は変数ごとに本来 1 次元表示されるが、視覚的理解の容易性からそれを 2 次元の楕円形状で示していること、およびそれぞれの範囲が有する選好度情報は描いていない状態である。また図中の関係(式)は理論式、数値近似式、実験式、機械学習システム関連関係である。範囲伝播に關係(式)を用いるのは、範囲は少なくとも設計上はその両端値（最大値と最小値）のみで規定されると考えるが、ここでは關係(式)で表される範囲内のポイント値群の変化挙動をベースにして範囲内の最大値と最小値を求めるのではない。その代わりに集合演算、ランダム性演算あるいは進化型演算を用いてその範囲の両端値を含めて範囲内の最大値と最小値を直接求める。なお影響因子と目標性能を対応させる關係性を關係(式)と表現したのは、式表現でない關係性、例えば機械学習における予測特性と特徴量とのビックデータ介した關係性、あるいは統計分野における統計データとその傾向性を示す回帰式などを含むためである。

範囲伝播の結果（可能性範囲といい、図 6.3-5 の右側の点線範囲）があらかじめ設定されている各性能の目標範囲（図 6.3-5 の右側の赤実線範囲）に収まるかどうか（それらの積集合があるかどうか）の判定を行い、すべての性能に関して部分的に収まる場合は、図 6.3-5 の左側の影響因子について設計者が当初、解が有ると判断した初期設定範囲を分割し、すべての性能の目標範囲に可能性範囲が入るまで、順次その範囲を狭め（分割し）、その狭める都度ごとに範囲伝播を行う。あるいは最初の範囲伝播において一つでも可能性範囲が目標性能範囲に完全には収まらない場合は範囲解無しの判定を行う。範囲解無しの場合は影響因子の初期設定範囲の修正が一つの対応となる。すべての設計変数の初期設定範囲からのすべての可能性範囲がそれぞれの目標範囲に入る場合は分割（絞込み）を行わず、初期設定範囲が設計変数の範囲解になる。

以上の範囲伝播と範囲の絞込み過程には性能変数の数と影響因子の数の同数性は問われない。つまりそれぞれの数は設計対象モデル（目標性能の種類とそれぞれに対する影響因子の關係性）をその同数性とは無關係にどのように構築・表現するかという設計者の考え方によって決めるのが選好度セットベース設計手法である。

次に詳細設計段階における選好度セットベース設計手法の特徴について説明する。

6.2.3 節では設計プロセスとしての詳細設計段階におけるポイントベース設計の特徴として、独立変数（設計変数あるいは入力変数という）と従属変数（機能変数）の数の同数性は詳細設計で多用されるシミュレーション技法でも必要な要件であること、用いられるシミュレーション技法はおもに代数方程式化された近似解析に基づいていて、その近似精度を向上させるためには代数方程式の大規模化に伴う計算機処理能力の大きな向上が必須であることを述べた。このことは詳細設計であるが故に対象とする設計空間の種類数の増加や境界条件の複雑性に基づいて適用する異種のシミュレーションの増加やそれぞれの適用回数の増加をもたらしていることも触れた。

一方、選好度セットベース設計手法は本来的に多目的性能の同時実現設計を目的とするのが基本方針であり、その方針に基づく設計対応には詳細設計や初期設計の区別はない。その同時実現を可能とする影響因子（設計変数）の解はセット（範囲）表現であり、得られる範囲の精度（これは範囲の両端値の精度と同等）は範囲伝播手法に基づく精度（誤差）であり、範囲分割の細かさで変動するものではない。例えば、設計対象が単調現

象を示す場合に適用可能な数学的集合論に基づく IPT (Interval Propagation Theory)[24]ではその原理的誤差は 0 であり、範囲解は厳密解としての範囲となる。また乱数の発生に基づいて範囲を伝播・特定する PSO(Particle Swan Optimization)[25]では乱数の発生状況に依存して範囲の両端値そのものに誤差が生じ、遺伝的アルゴリズムといった進化型演算を用いる場合は世代数等に依存する誤差になる。換言すれば範囲の分割自体に対して誤差を問うことはないが、両端値で規定される範囲自体の精度は伝播法自体の精度に依存していることになる。

他方で、詳細設計のように要求性能数が多くなりがちな場合はそれぞれの目標範囲と設計変数範囲からの可能性範囲との重なり（積集合）は要求性能範囲の同時実現の追求の故に一般的な傾向として狭くなる可能性もあり得る。しかし選好度セットベース設計における設計変数解範囲は、結果がすべての場合に保証されるわけではないが、可能なら比較的広い範囲解として求めるために可能性分布範囲と要求性能範囲との選好度 0 における重なりに関してオーバーラップ率という概念を導入している。その概念の適用方法については後述する（6.3 節(10)項参照のこと）。オーバーラップ率の概念は、設計課題によるが、どちらかという対象とする性能の種類数が多いと思われる詳細設計で効果が発揮される可能性がある。オーバーラップが小さい性能の状況が起りやすくなると考えるのが一般的であるからである。いずれにしてもオーバーラップ率という考え方も範囲概念の範疇である。

6.3.4 多視点性の観点

6.2.4 節のポイントベース設計に基づく多視点性の観点についてはおもにコンカレントエンジニアリングの側面から説明を加えたが、本節のセットベース設計に基づく多視点性の観点（そのイメージを図 6.3-6 に示すように、多視点の同時性に注目）は最適化（満足化）の側面から説明を始める。

従来の多目的最適化でも同じであるが、多目的性には異種性能が含まれることによって背反性を生ずることが一般的あり、その設計解をいかに求めるかが大きな設計課題になる。従来は、ポイントベース設計の範疇において、多目的（多数目的）最適化手法を用いて数理的に最小（大）値のパレートフロントを求める方法や大域的に極小値を求める方法（例えば、GA（遺伝的アルゴリズム））などが提案されているが、目標性能数の実質的制約や処理時間の長大性などの課題がある。あるいは背反性を有する異種性能に関して同時に設計解を求めるのではなく、時間軸に沿って設計解を求め、場合によっては試行錯誤的な循環を経て設計解を得ることが多かったといえる（図 6.2-4 参照のこと）。例えば、機構（メカ）設計とそれを制御する制御系の設計という 2 つの設計は、従来は機構設計の後にそれを実現する制御系設計という順番が一般的であった。またはコンカレントエンジニアリングで指摘され始めた製品開発プロセスの一方向性に伴う課題もある。例えば、上流プロセスでの設計内容（メカや構造の設計）とそれを実体化する加工に関する課題（オーバーザウール問題）である。この種の課題はポイントベース設計手法では壁の両側の同時的設計ではなく、時間軸の後段側（加工側）の努力による解決に委ねるという本質的な設計課題が存在していた。

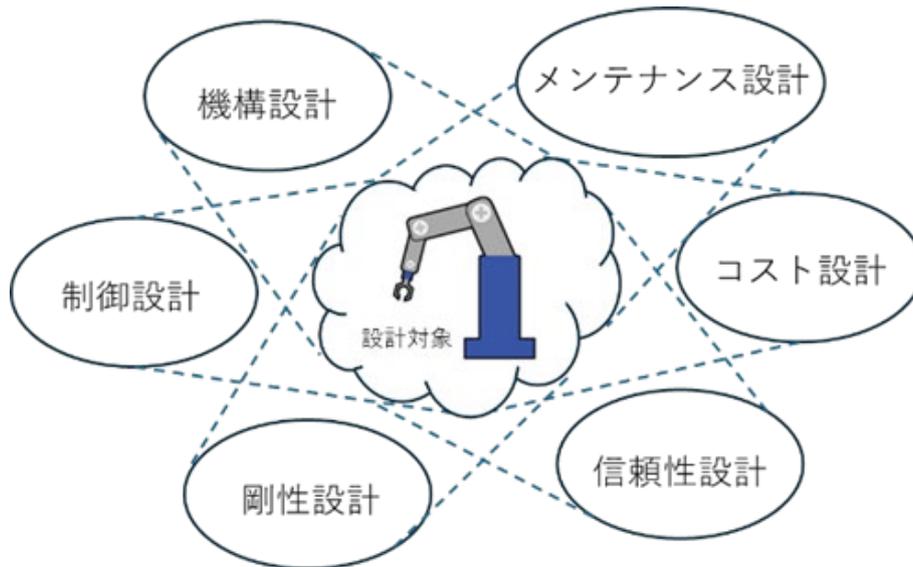


図 6.3-6 設計の多視点性

以上のように多視点性の観点からの設計課題をおもに多目的最適化や多目的性を部分的並列化で扱うコンカレントエンジニアリングの分野あるいはISA95のような設計も含む製造と経営的視点のネットワーク化で用いるポイントベース設計手法のアプローチに対して、それらの経営も含む大きな意味での設計課題の解決を本来的使命として提案されている設計手法がセットベース設計手法である。つまりセットベース設計手法は（特に選好度セットベース設計手法）は異種性を前提にした多目的性能のそれぞれの指定された範囲を同時実現する影響因子としての設計変数の範囲解を求める手法である。

一方で、設計目標特性はポイント値で与えられることは一般的には少ないと考えるのが自然である。品質工学では望大、望小、望目特性のように、バラツキの範囲内の変化傾向性を表現している。品質工学では例えば製品品質のバラツキの変化性に基づくS/N比も検討対象であるが、一般設計においても設計者が意思をもって設定する目標特性についても望大、望小、望目等の特性を付与することも含めて、以上、以下、程度等という情報を内包しつつ表現される範囲（セット）で与えられることが一般的である。設計目標の設定におけるこれらの範囲表現は必要条件としての範囲である。例えば、 y_1 以上と設定した場合は y_1 の値より大きいどこかの範囲であればよい、ということの意味している。また一般に範囲であるということは両端の2点情報で定義できることを意味している。設計目標変数が範囲で表現される場合はそれに関係する影響因子（独立変数）も範囲表現になる。設計目標変数（従属変数）は影響因子変数（独立変数）の広い意味での関数であるので、両者の関係（式）は、影響因子変数範囲から設計目標変数への範囲伝播（式）と解釈できる。

以上の内容に関して、従来の多目的最適化手法との特徴的比較については次節で、選好度セットベース設計手法自体の詳細は最後の節で説明する。また複数の設計変数の解探索領域としての初期設定範囲に対して、複数の目的性能範囲を同時に満足する範囲解の有無が明確になる点や計算処理が基本的に範囲演算であることによる計算機処理の容量の小ささや処理時間の短さも選好度セットベース設計手法の特徴になる。

6.3.5 多目的満足化手法の観点

従来の多目的最適化手法は、6.2.5節で述べたように現象の最小値（最大値）を求めるポイントベース設計であり、解の精度的観点によって目的数に実際上の限界があること、得られるパレート解集合からさらに選好性に基づく解探索が必要なこと（2段階処理として完結）、場合によっては進化型計算手法の利用の場合などにおいて計算処理時間が長大になることを指摘した。これに対して、セットベース設計における多目的性の処理の場合は、直接的に目的関数の最小値（最大値）を求めるという最適化は行わない。したがって多峰性の問題であっても峰としての存在は考慮せず、陰に対象現象の表現としてだけの位置づけとする。つまりある範囲内に極小(大)解（つまり峰）が複数あっても、対象とする全範囲における最小値と最大値を求める（図 6.3-7）、すなわち性能の変化現象の両端値を含めた最小値、最大値を求めることになる。よって従来の多目的最適化手法で採用されることがある性能関数の設計変数による微分可能性を問うことはない。セットベース設計では多目的性能の特性（異種性や背反性などを含めて）のそれぞれを相対的満足度という概念で標準化（無次元化）し、その上ですべての性能の相対的満足度の平均値としての最良化を求め、それを実現する設計変数解範囲を求める考え方に立っている。その故に多目的最適化に対応して多目的満足化手法と呼称している。満足度という概念は設計における総合化においても触れられている[3]。またセットベース設計手法による多目的性能満足化処理では、従来の多目的最適化手法の2段階処理に対して、多性能の満足化の処理に選好度という概念を初めから導入してすべての性能の相対的満足度を基盤にして設計変数解範囲を求めている。つまり範囲解とその選好性を一体化した概念で多目的性能の平均的最良性を与える範囲解を提示するのである。その最良化の収束性については設計変数の初期設定範囲の絞込みの概念で担保するが、その詳細については後述する。

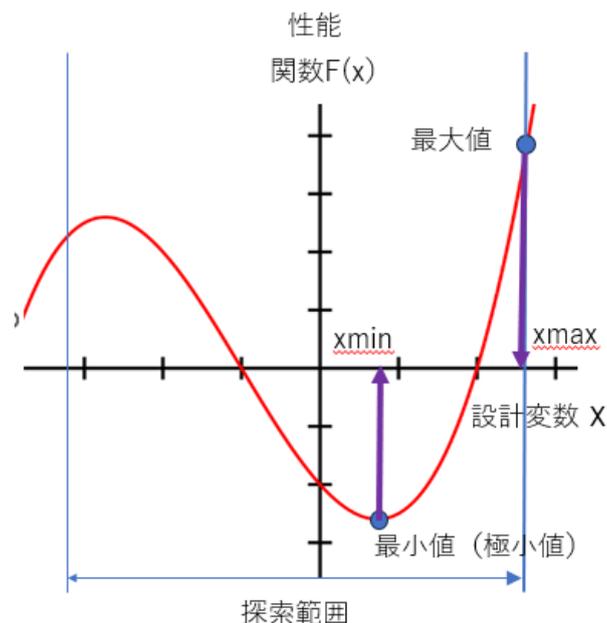


図 6.3-7 満足化範囲

またセットベース設計手法に基づく多性能満足化における性能数については原理的には限界はないが、範囲解が存在する設計課題であれば実際的には相当数の性能まで処理できることが分かっている。文末の適用事例「車の乗り心地に関する設計事例（後述）」では18性能を扱っている。また多性能それぞれの目標範囲を同時実現する設計変数範囲を求めるが、その際の演算処理は範囲演算となる。このことから次の2点がいえる。すなわち1)多目的性能範囲を満足する設計変数範囲解が存在しない場合はそのことが処理の最初の段階で分かること、2)範囲演算なので基本的に範囲の両端値に基づく演算となり、全体としての演算処理時間が短く、演算処理に要する計算機の容量も少ないことである。

6.3.6 不確定性の表現の観点

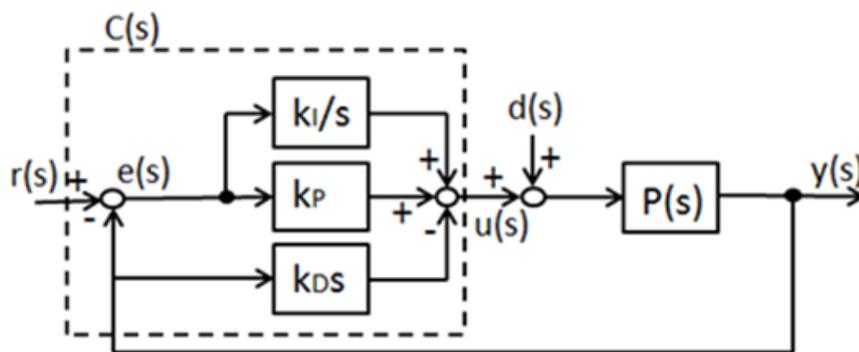


図 6.3-8 不確定性の例（制御系設計のゲイン， K_I, K_P, K_D ）

6.2.6 節で設計プロセスは不確定性をポイント値の試行錯誤的変更により確定化するプロセスであると述べた。またそこで扱う不確定性の種類の例を図 6.2-8 で示した。そのうちの一例をあげれば、図 6.3-8 に示す制御系設計における積分ゲイン K_I 、比例ゲイン K_P 、微分ゲイン K_D である。セットベース設計では、現象（目的性能）に対する不確定性を可能的あるいは許容的誤差の変動性あるいは影響因子（設計変数に対する制御因子）に対する不確定性を選択性（制御可能性）に関する幅で表現する。品質工学でいうところの誤差因子のパラツキの範囲と制御因子の変動幅に相当する意味合いの両者を含むものである。また各設計プロセスの段階で、不確定性の内容を最初から広い範囲で取り扱うことで、設計の手戻りを削減する狙いもあり得る。また範囲内における不確定性の傾向性、言い換えると範囲内における選好性を選好度分布（後述の図 6.4-3 の設計変数や図 6.4-4 の性能に関するの選好度分布に対応）として導入しておき、他の設計変数の不確定性に基づく範囲条件との共存を図るべく絞り込みを行い、成立範囲を求めるという考え方を取る。つまり不確定性に対してその許容あるいは制御できる範囲情報に範囲内選好性の情報を加えた表現である。場合によっては共存のあり方として、一部の影響因子は絞り込みを行わない対象とすることもできる。例えば、車の燃料電池性能の環境温度依存性の地域的特性を影響因子の不確定性の要素であるとする、変動範囲はその地域特性で決めることになり、不確定性の範囲を持つが、他の不確定性要素に対して絞り込みを行わない要素とすることもできる。

絞り込みの対象としない影響因子（設計変数）の存在を許すということは、逆に言えばその影響因子に強い重みを与えていることにもなる。

6.4 選好度セットベース設計手法 (PSD 手法)

6.4.1 選好度セットベース設計手法 (PSD 手法)のアルゴリズム

セットベース設計の理論およびその具体的手法として評価されている選好度セットベース設計(Preference Set-Based Design: PSD)[20],[21],[22],[23]について説明する. その手法の概念図は前述図 6.3-5 を加筆した図 6.4-1 になる. 併せて PSD 手法の手順としてのフローチャートを図 6.4-2 に示す. 以下, 両図を用いて説明する.

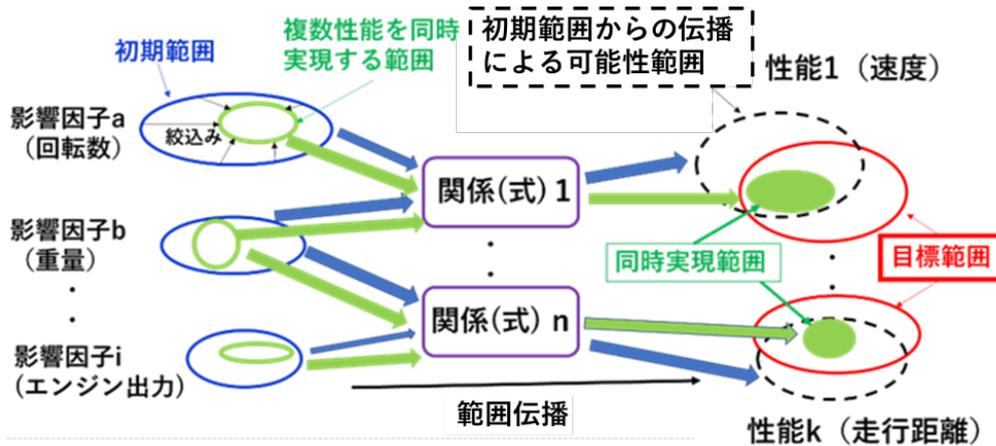


図 6.4-1 範囲の伝播と絞込み

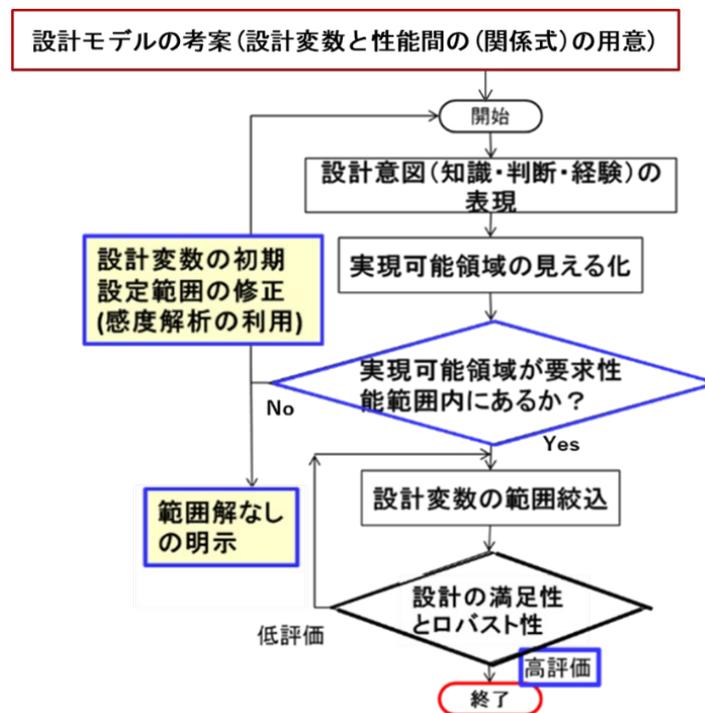


図 6.4-2 選好度セットベース設計手法のアルゴリズム (手順)

(1)設計変数と性能間の関係を示す関係（式）の用意

最初に設計開始が設計プロセスのどの段階かに基づき、設計すべき対象に関するモデルの入出力変数の関係性について考える。すなわち、どのようなもの（モノ）としての機能、性能を対象にするか、コストや環境負荷性等の制約的な条件をどこまで考えるか検討する。併せてそれらに対して互いに独立な影響因子を抽出するとともに両者の関係（式）をどのように構築するか、について検討する。この段階が図 6.4-2 の一番上の四角枠であり、図 6.4-1 の関係(式) 1～関係（式）n の検討、モデル化に当たる。これらの関係（式）は、具体的には理論式、実験式、近似式（応答曲面式、最小二乗式、補間式、数量化式、統計的關係式、機械学習関係など）になる。なお、これらの関係(式)で扱う影響因子としての複数の設計変数は互いに独立な変数を用いる。

以上より、ここでいうモデルの基本形は複数の目的性能としての出力、それぞれの出力に対する複数の影響因子（異なる性能の場合、部分的であっても共通性のある影響因子）としての入力および両者を関係づける関係（式）がそろった状態（実験、数値の世界を問わない状態）をいう。ここでいう関係(式)を如何に表現するかに関しては前述のような様々な求め方から得られ、その表現もそれぞれに応じた形になる。理論式があればその前提となる境界条件の下でそのまま使える。近似式であっても、実験データから求める場合は、多数のデータ点からの抽出は最小二乗式（その程度の変化傾向であれば）になるということもある。実験計画法で計画的に行われた計測実験や数値実験であれば応答曲面式が使用できる。影響因子の変数が多い場合も含めて実験計画法を用いる場合は交互作用の扱いも考慮した応答曲面式の構築が必要になるであろう。それぞれに意味のあるデータとしての実験（数値実験も含む）条件データの場合、あるいはデータの意味が明確な一部の社会現象的な事象の場合には、例えば放射基底関数による補間式、線形補間式あるいは重回帰式などが適切な場合もあり得る。現象が大きな非線形性を示す場合（例えば、多峰性の多発現象）は大型の直交表を用いた応答曲面式の作成が用いられることもある。あるいは同じく応答曲面の利用として、品質工学でいう制御因子と誤差因子を扱う場合もある。定性的な性能の表現の場合は数量化式の利用もあり得る。関数の変数的意味合いではなく、結果特性の発生確率に寄与する複数の特徴量に関するデータ（学習データ）が相当数ある場合は機械学習によって表現された関係性が利用できる場合もある。

(2)設計変数と性能の選好度数の初期設定

次に本手法で全く新しく提案された選好度[20], [21]という概念を導入する。その意味するところは 6.3.1 項で記述した。設計手法の手順としては「設計変数と性能の選好度数の表現」に進む。ここでは複数性能の背反性にも関連し、性能と設計変数の不確定性・選好性・背反性の表現としてそれぞれの初期範囲の表現と選好度関数を用いる。これらを合わせて選好度数と呼ぶ。設計変数の場合（性能でも同じ）で説明する。範囲の設計解集合を持つ設計変数 X_i ($i=1, 2, \dots, m$)とその要素を x とすると、選好度数は次のように定義される[20], [21].

$$\bar{X}_i = \{(x, p_i(x)) \mid x \in X_i, p_i(x) : x \rightarrow [0,1]\}$$

ここで、 $p_i(x)$ は選好度数の選好度関数である。選好度数の具体的意味は、範囲とそこにおけるどの値が好ましいかを設定するもので、例えば図 6.4-3, 図 6.4-4 のように設定できる。これらの図では縦軸が選好度を意味し、 $[0, 1]$ の値をとる。0 の値の範囲が許容

範囲であり，1の値の範囲が最も望ましい値の範囲であることを示している．図 6.4-3 の右図ではそれらの両者の範囲が等しいことを示している．図 6.4-4 の性能例の場合は許容範囲，最良範囲ともある値以下が良いことを示している．セット表現において，以上のように設計変数と要求性能に選好度を定義することで，設計者の意図（選好性）を設計に反映することが可能になる．なお図 6.4-1 では選好度関数は示していない．

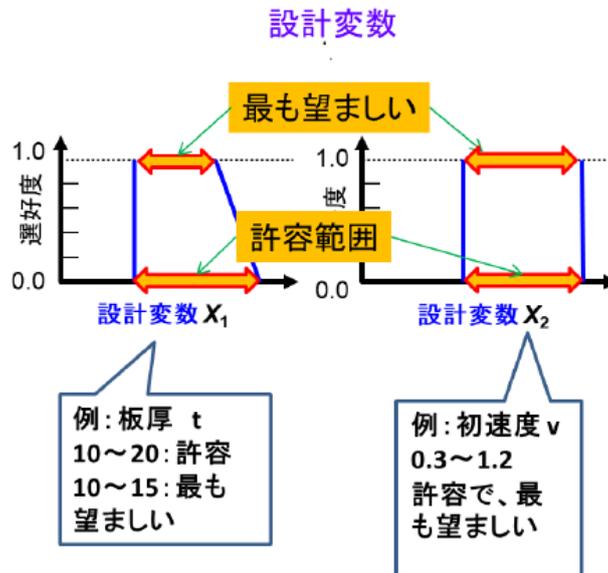


図 6.4-3 設計変数の選好度数

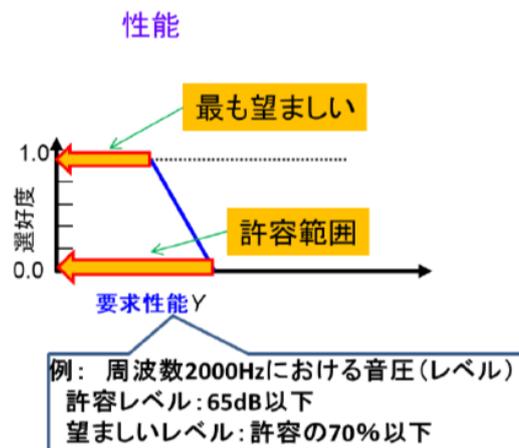


図 6.4-4 性能変数の選好度数

(3)設計変数の範囲と選好度関数の伝播[20],[21],[22]

図 6.4-3 および図 6.4-4 で定義した設計変数(X_i)および性能変数(Y_j)に対する初期設定としての選好度数が定義されると，設計変数選好度数によって達成できる性能範囲を求める必要がある．その際，入力値である設計変数が範囲とそこにおける選好度分布(選好度

関数)として与えられるので、出力値も範囲と選好度分布(この両者を合わせて可能性分布という)として求められる。出力性能の可能性分布を求める方法として、PSD手法ではファジー演算の α -cutの概念を導入する。すべての設計変数選好度数を α -cutによって縦軸を均等(間隔： Δp)に分割すると、次のようにある選好度レベル k (p_i^k)でのレベルセット(level set)が求められる。

$$X_i^k = [x_L^k, x_U^k]$$

次に、それぞれのレベルセットに対して範囲伝播演算を行い、その結果の範囲を組み合わせることで性能の可能性分布を求めることができる。範囲伝播手法としては、(a)粒子群最適化(PSO)法[25]、(b)範囲伝播理論(IPT)[24],[26]、(c)遺伝的アルゴリズム(GA)[27]などがある。(a)は範囲内で発生させた乱数を基にしていて、収束性はかなり良い。(b)は数学的集合論に基づく手法で、両端値に関する2回の計算のみでよく、誤差は原理的にないが、単調現象のみに適用できる。(c)は多峰性のある大域的探索も可能であるが、計算量が大きくなる。なお、単調現象を扱う場合はここにあげた範囲伝播手法の違いによる適用結果には本質的な違いはなく、非単調の現象では(a)と(c)による違いはない。

(4)可能性範囲解と性能範囲の共通集合の有無

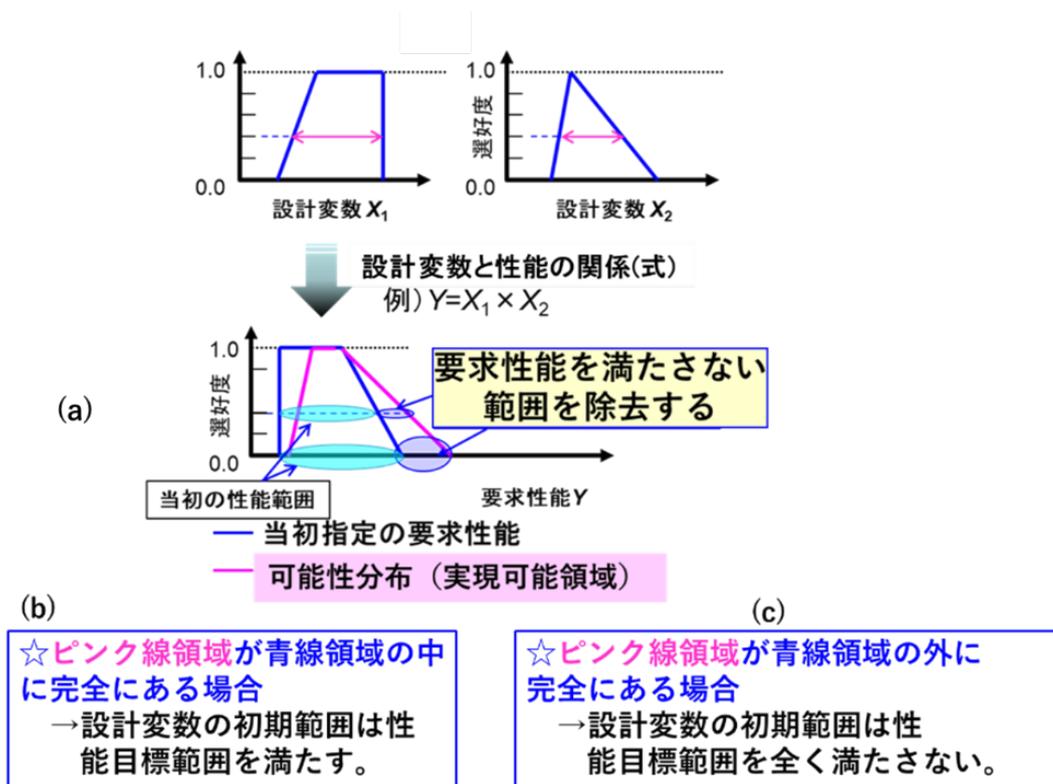


図 6.4-5 範囲伝播と伝播結果

例えば、図 6.4-3 の例として図 6.4-5 の上部（青色線）に示すように、設計変数（影響因子） X_1, X_2 の初期設定の選好度数から関係（式）を用いて範囲伝播を行い、要求性能の可能性分布（ピンク線）を求める。結果は図 6.4-5 の 3 種類（(a), (b), (c)）になる。要求性能の初期設定選好度数は図(a)の青色線で示している。(b)の場合はピンク線領域が青線領域の中に完全にあり、設計変数の初期設定の選好度数が性能の初期設定（目標設定）の選好度数内に対応していることを示している。つまり設計変数の初期設定がそのまま解になり得ることを意味している。(c)の場合はピンク線領域が青線領域の外に完全にあり、設計変数の初期設定の選好度数は要求性能の初期設定選好度数を完全に満たさないことを意味している。この場合は図 6.4-2 に示す初期範囲の修正プロセスに入り、最初（「開始」（設計変数の初期設定範囲））に戻る。その際、PSD 手法では当初の初期設定（図 6.4-2 の「開始」位置）の修正を感度解析等によって行う場合があるが、その内容については後述する（6.4 節(11)項、範囲解無しの場合（感度解析の利用））。(a)の場合はピンク線領域が青線領域と部分的に重なり、一部が青線領域の外側に來る場合である。この場合は設計変数の初期設定（図 6.4-2 の「開始」位置直後の「設計位置の表現」）で導入した範囲を絞り込む必要がある。

(5)設計変数の初期設定範囲の分割と絞り込み[20],[21],[22]

PSD 手法では複数の要求性能の同時実現を目標にしているので、図 6.4-1 に示すように設計変数（影響因子）と要求性能の関係は多様になる。PSD 手法では関係の多様性に対しても普遍性のある一定のアルゴリズムを用いて絞り込みを行う。つまり対応する性能に関わらずすべての設計変数範囲に対して統一的な分割（後述の「(9)範囲の絞込み手順」における分割）を行い、各分割範囲の組合せを用いて対応する性能への伝播を行う。伝播結果がその分割に対応した選好度分布を持つ可能性範囲であるが、その情報と対応する要求性能範囲の情報から分割範囲の範囲解としての満足度と安定性を評価する。これらの評価結果より、全体絞り込み時における当該分割範囲の棄却性の判断を行う。そこでまず分割に伴う範囲の満足度と安定性について説明する。

(6)満足度の定義

棄却判定の際に用いる満足度とは、設計変数ごとの分割範囲の異なる設計変数間の組合せを伝播して得られる性能ごとの可能性分布と初期設定性能の選好度分布の面積的重なり、として定義される。具体的には、以下のように範囲内の可能性分布 $pos(x)$ と対応する性能の選好度分布 $req(x)$ は同じ性能という次元なので、平均という処理が可能である。それらの平均分布 $avg(x)$ を用いて、重なり範囲を積分した DPI という指標で満足度を定義する。

$$avg(x) = \left((pos(x))^\alpha \times (req(x))^\beta \right)^{\frac{1}{\alpha+\beta}}$$

$$DPI = \int avg(x) dx$$

ここで、 α と β は可能性分布と要求性能の重み付けである。

次に安定性の定義である。この定義については 3 種類の定義を提案している。いずれも設計変数の選好度数の伝播結果である可能性分布の選好度数と要求性能の選好度数に基づく定義である。

(7)安定性の定義

以下に 3 種類の定義として(I)ロバスト性の安定性 (DAI) , (II)設計判断の安定性 (DCI) , (III)先行度分布の安定性 (DSI) を示すが、一般には全ての定義を同時に用いるが、設計課題によってはその一部だけを用いてもよい。

(I)ロバスト性の安定性 (DAI)

設計変数の値を設計変数がとり得る範囲値 (選好度 0 の範囲) の最小値から最大値まで変動させたときに、その可能性分布が最大でどのくらい変動する可能性があるかを示す、いわばロバスト性を安定性(I)として評価する。設計変数の範囲を大きく変動させて (入力信号 (S) を大きく取って) も性能の変動幅 (N) が小さい場合をよりロバスト (S/N 比) であると定義する。具体的には求めた可能性分布の選好度 0 での範囲が狭ければ狭いほど、その設計案のロバスト性は高くなると言い換えることができる。つまり安定性の定義(I)としてのロバスト性指標 (これを DAI と呼ぶ) は選好度 0 における可能性分布の範囲を用いることにする。

(II)設計判断の安定性 (DCI)

2 つ目の定義は設計のまさに安定性の観点から見た定義である。すなわち設計者の判断に関わる基準であり、①設計者が満足する設計が容易にでき、かつ②その設計が変更される可能性が少ない状態を安定であるとする。

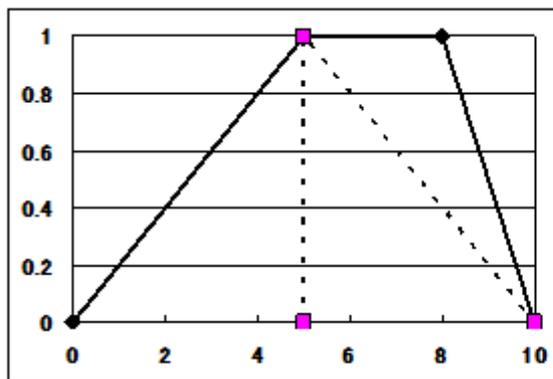


図 6.4-7 安定している設計例

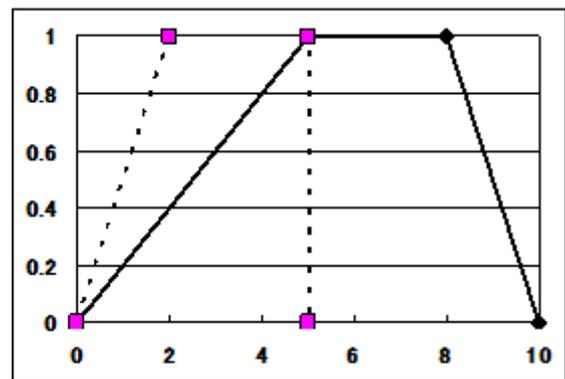


図 6.4-6 不安定な設計例

図 6.4-7 と図 6.4-6 は①の視点で見たときの、安定している設計と安定していない設計の例である。これらの図 (性能の範囲と選好度関数) の実線は要求性能の選好度数、破線は可能性分布を表している。通常的设计では、求められた解集合の中から設計変数の値を選ぶ際に、選好度が最も高い値から選択する可能性が高い。設計変数の値として選好度が 1 となる値を選択したとき、性能がとり得る値の範囲は図 6.4-7 の場合、可能性分布から [5, 5] となる。このとき性能の値が [5, 5] のときの要求性能の選好度は 1 である。設計変数の選好度も 1 であり、要求性能の選好度も 1 となるので、これ以上好ましい設計案は存在しない。設計者がこのような満足度の高い設計を自ら変更する確率は低いと考えられる。よってこの設計は変更される確率が少ない、安定している設計と判断することができる。

一方、図 6.4-6 の場合は可能性分布に関して選好度が 1 になる [2, 5] の範囲のとき、要求性能の選好度が 0.4~1 と大きく変化する。要求性能の選好度は性能変数が 5 のときに

最も高くなるが、設計者は設計変数のどの値を選択したら性能の値が5になるのかを判断することができない。つまり性能の値を5に近づけるために、設計者は設計変数の値を直ちには決め難く、試行錯誤があって要求性能の選好度が高い領域を見極め、性能の値を5に収束させていく。このように設計が頻繁に変更される可能性が高いため、不安定な設計となる。よって、**図 6.4-7**の方が安定性の高い設計であるといえることができる。

以上のような観点での安定性は選好度が高い設計解範囲の見つけやすさともいえる。あるいは、「設計変数の選好度が高い領域で、要求性能の選好度がどの程度選好度の最大値に近づいているか」であるといえることができる。このような考えを指標化したものがDCIであり、次式で定義する。

$$DCI = \sum_{k=0}^n \frac{pos(x_k)}{pos_{max}} \times \left(\frac{req(x_k)}{req_{max}} - 0.5 \right)$$

ここで $pos(x_k)$ は x_k における可能性分布の選好度を表し、 pos_{max} は可能性分布の最大選好度を表している。同様に、 $req(x_k)$ は x_k における要求性能の選好度を表し、 req_{max} は要求性能の最大選好度を表している。

DCIでは要求性能の選好度の目安($req(x_k)/req_{max}$)が0.5以上となる設計を良い設計、0.5未満となる設計を良くない設計と考え、0.5以上の場合はプラスの値を、0.5未満の場合はマイナスの値を与える。よって、可能性分布の選好度が高い領域で要求性能の選好度が高ければ0.5に近い値が総和され続け、DCIの値は大きくなる。すなわち要求性能の選好度の最大値が1($req_{max}=1$)が存在する場合で、可能性分布の選好度が高い領域で、要求性能の選好度 $req(x_k)$ が1に近ければ、 $(req(x_k)/req_{max})$ は1に近い値になり、 $(req(x_k)/req_{max}) - 0.5$ は0.5の値に近くなる。このような傾向が続く選好度分布であれば、DCIの値は大きくなる。逆に可能性分布の選好度が高い領域で要求性能の選好度が低ければマイナスのペナルティが与えられることになる。

DCIの値が大きな設計は、設計者がより簡単に満足できる設計（修正の少ない安定な設計）を見つけることができることを表す。

(III) 選好度分布の安定性 (DSI)

3つ目の定義は、満足度の定義の項で用いた平均分布 $avg(x)$ に注目し、その変化傾向に関する定義である。

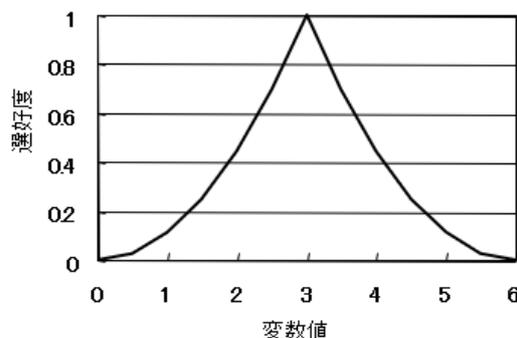


図 6.4-8 安定している設計例

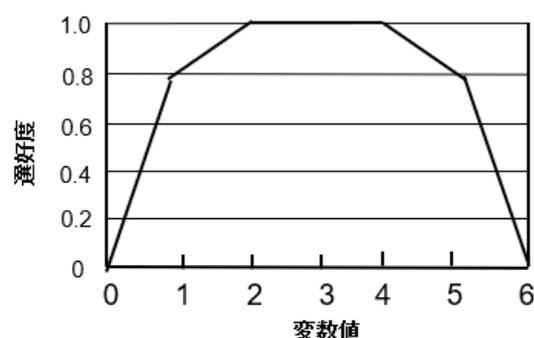


図 6.4-9 不安定な設計例

図 6.4-8 を見ると選好度数の形状が三角形に近くなっていることが分かる。このような設計は安定している。何故なら、変数の値を選好度 1 に対応する 3 から変更すると急激に選好度の値が悪くなってしまい、好ましい設計ができなくなってしまうからである。よって、設計者が設計を変更する可能性は低くなる。図 6.4-8 には変数の値は 3 が好ましいという設計者の明確な意思がある。このような意思がある設計案は変更されにくい。

一方、図 6.4-9 では選好度数の形状が台形に近くなっていることが分かる。このような設計は不安定である。実線を見れば分かる通り、変数の値が [1.5, 4.5] の範囲で平均選好度の値が 1 となり、一定になっている。選好度が一定ということは一見すると安定しているように思えるが、実はそうではない。なぜなら選好度が一定ということは、変数としてどの値を選択してもよいということを表しているからである。この例の場合、この設計者にとっては 1.5~4.5 の範囲であればどの変数値を選んでも設計の好ましさは変わらないため、1.5~4.5 の範囲で設計が変更される可能性がある。図 6.4-9 のように平らな部分が多い設計には設計者の明確な意思が少なく、あいまいな状態である。よって選好度が高い領域にこのような平らな部分が多く存在する場合、安定性は低くなる。以上のような場合の安定性の指標として、DSI(Design Stability Index)指標を定義する。

この指標は、設計が変更される可能性が少なく、いかに安定しているかを表すための指標である。前述の図 6.4-8 と図 6.4-9 の例でいえば、図 6.4-9 より図 6.4-8 の設計案の方が安定している設計となる。図を比較すると、図 6.4-8 の方が選好度の高い領域で選好度グラフの傾きが大きいことが分かる。つまり、「選好度が高い領域で選好度グラフの傾きが大きい設計の方が、より安定した設計」であるということが出来る。この考えを数式化した定義式が次式になる。

$$DSI = \sum_{k=0}^{n-1} \Delta p(x_k) \times \sum_{k=0}^{n-1} \frac{PR(avg(x_{k+1})) + PR(avg(x_k))}{2 \times (n+1)} \times \left(\frac{\Delta p(x_k)}{\Delta p_{max}} \right) \tag{1}$$

$$PR(avg(x_k)) = \sum_{l=0}^n pr(avg(x_k), avg(x_l)) \tag{2}$$

$$pr(avg(x_k), avg(x_l)) = \begin{cases} 1, & \text{if } avg(x_k) \geq avg(x_l) \\ \frac{avg(x_k) - avg(x_l)}{avg(x_k) - avg(x_{k+1})}, & \text{if } avg(x_k) < avg(x_l) \end{cases} \tag{3}$$

$$\Delta p(x_k) = ABS(avg(x_{k+1}) - avg(x_k)) \tag{4}$$

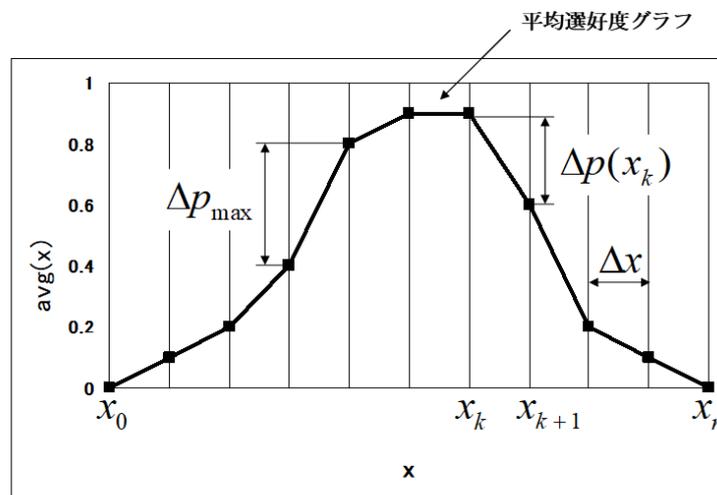


図 6.4-10 DSI の求め方

以上の考え方や数式の説明図として図 6.4-10 を示す。図 6.4-10 は図 6.4-8, 図 6.4-9 と同様に可能性分布の選好度と要求性能の選好度を平均化した平均選好度グラフであり、横軸を n セグメントに等分割した図である（図 6.4-10 は説明のために $n=10$ とした）。

$avg(x_k)$ は x_k における平均選好度の値である。 $\Delta p(x_k)$ は x_{k+1} と x_k の間の平均選好度の差である。 Δx が一定であるため、 $\Delta p(x_k)$ は x_{k+1}, x_k 間の傾きに比例する。 Δp_{\max} は全領域における $\Delta p(x_k)$ の最大値であり、 $PR(avg(x_k))$ は x_k における優先度である。

DSI は平均選好度が高い領域で平均選好度グラフの傾きが大きいほど評価値を大きくする（解の安定性（確定性）を高めるために）必要があるため、平均選好度が高い領域の優先度を高く設定する。優先度（式（2））は式(3)の総和をとることで求めることができる。つまり優先度は x_k における平均選好度の値が n セグメントに分割された平均選好度の中で何番目に低いかを表したものである。図 6.4-10 の x_k は全領域中で最も平均選好度の値が高い。よって図 6.4-10 のように 10 分割した場合、 $x_0 \sim x_{10}$ の 11 個の平均選好度の値と比較すると、図 6.4-10 の x_k の平均選好度の値はそれらより高いか同じになる。よって式(3)の値が全て 1 となるため、式(2)より優先度は 11 となる。図 6.4-10 では $n=10$ 分割だが、実際には $n=100 \sim 1000$ 程度に分割して求める。このように求めた優先度と平均選好度グラフの傾きの積をとり総和することで、DSI の値を求めることができる。DSI の値は、最大の傾きに近い傾きが平均選好度の高い領域に多く分布している場合に大きくなる。よって、DSI の値が大きな設計はその設計が変更される確率が少ない、安定した設計であることを表す。

(8)設計の満足度と安定性（ロバスト性）を表す指標：PRI

設計案の満足度と安定性を同時に評価するための指標として PRI という指標を提案している。前節では 3 種の安定性の定義を与えた。一方で、様々な外部の影響によって影響されにくい性質のことを一般にロバスト性という[28]。したがって前述の 3 種の手法はロバスト性の指標ともいえる。(6)項より設計案の満足度は DPI の値で評価され、(7)項より設計案の安定性は DAI, DCI, DSI の値で評価される。よって設計案に対してこれらを同時に評価するためには、これらの値を無次元化し、それぞれを $NDPI, NDAI, NDCI, NDSI$ とすればそれらの積 PRI を使用すればよい。式(5)が PRI を求めるための式である。

$$PRI = \left((NDPI)^{\omega_p} \times (NDAI)^{\omega_d} \times (NDCI)^{\omega_c} \times (NDSI)^{\omega_s} \right)^{\frac{1}{\omega_p + \omega_d + \omega_c + \omega_s}} \quad (5)$$

$NDPI, NDAI, NDCI, NDSI$ はそれぞれの指標を正規化したものであり、後述の式(7)と式(8)で与えられる。式(5)はそれらの値について幾何平均を用いて平均化したものである。または ω は各指標の重み付けである。

また、安定性（ロバスト性）に関する指標として DAI, DCI, DSI の 3 つの指標をまとめ

た *DRI* (Design Robustness Index) という指標を定義する。 *DRI* は式(6)より求めることができる。

$$DRI = \frac{\omega_A \cdot NDAI + \omega_C \cdot NDCI + \omega_S \cdot NDSI}{\omega_A + \omega_C + \omega_S} \quad (6)$$

以上の一連の正規化は具体的には *DPI*, *DAI*, *DSI*, *DRI* について次の式(7)によって行う。しかし、*DCI* はマイナスの値をとる可能性があるため、式(8)による正規化を行う。なお、式(9)の n は図 6.4-10 の分割数と同じ n である。

$$\begin{aligned} NDAI_i &= DPI_i / DPI_{\max}, NDAI_i = DAI_{\min} / DAI_i, \\ NDSI_i &= DSI_i / DSI_{\max}, NDRI_i = DRI_i / DRI_{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

$$NDCI_i = (DCI_i - DCI_{\min(n)}) / (DCI_{\max} - DCI_{\min(n)}) \quad (8)$$

$$DCI_{\min(n)} = -0.5 \times (n+1) \quad (9)$$

DPI, *DSI*, *DRI* の値は大きい方が良く、*DAI* の値は小さい方が良いため、*DPI*, *DSI*, *DRI* は得られたそれぞれの値の最大値を使用し正規化を行い、*DAI* は *DAI* の最小値を使用し正規化を行う。 $DCI_{\min(n)}$ は *DCI* の値としてとり得る値の最小値を表している。添え字 i はある性能の選好度数に対して、設計変数の分割結果の組合せを示す。添え字 **max** あるいは **min** は 同じく設計変数の分割結果の組合せに対する各指標の最大値あるいは最小値を示す。

正規化はそれぞれの性能評価のための絞込み過程で行う。つまり分割が収束する範囲内で各性能に関する分割範囲の *PRI* の最大値、最小値を求めることになる。

(9) 多目的性の評価

式(5)で求められた *PRI* は、ある性能に対する設計案の満足度と安定性を表すため、この値を用いることで、その性能に対する設計案の良し悪しを判断することができる。しかし、一般的に多目的設計では、ある設計案に対して複数の性能を評価する必要があるため、1つの性能だけではなく全ての性能を評価する必要がある。そこで *PSD* 手法では各性能に対する *PRI* を求め、その値を統合することで性能全体に関する評価を行う。その際に異なる性能に共通な設計変数がある場合は、関係するすべての性能の選好度数に対して可能性分布がそれぞれの要求性能範囲に入るまで設計変数の絞込みを行うことになる。こうして求めたすべての性能 (N 個) の評価結果 PRI_i ($i=1, \dots, N$) を統合して多目的性能の評価を行う。

この統合された *PRI* を *APRI* と呼び、*PSD* 手法ではこの *APRI* の値を設計案の評価に使用する。 *APRI* は多目的意思決定問題でよく使われる重み付きべき乗平均を利用することで、式(10)のように求められる。 ω_i は性能ごとの重みである。

$$APRI_s = \left\{ \frac{\omega_1 (PRI_1)^s + \dots + \omega_N (PRI_N)^s}{\omega_1 + \dots + \omega_N} \right\}^{\frac{1}{s}} \quad (10)$$

式(10)の変数 s の値を変えることで、式(11)のような一般的な平均演算子が得られる。

$$\begin{aligned}
 APRI_{-\infty} &: \min(PRI_i) && \rightarrow MIN \\
 APRI_{-1} &: \frac{1}{\sum_i \omega_i \sum_i \left(\frac{\omega_i}{PRI_i} \right)} && \rightarrow Harmonic\ Mean(HM) \\
 APRI_0 &: \left\{ \prod_i (PRI_i)^{\omega_i} \right\}^{\frac{1}{\sum_i \omega_i}} && \rightarrow Geometric\ Mean(GM) \\
 APRI_1 &: \frac{1}{\sum_i \omega_i} \sum_i \omega_i PRI_i && \rightarrow Arithmetic\ Mean(AM) \\
 APRI_2 &: \sqrt{\frac{1}{\sum_i \omega_i} \sum_i \omega_i (PRI_i)^2} && \rightarrow Quadratic\ Mean(QM) \\
 APRI_{+\infty} &: \max(PRI_i) && \rightarrow MAX
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

(10) 範囲の絞込み手順

図 6.4-1 の設計変数（影響因子）の範囲伝播から可能性分布を求めることにも対応して、設計変数の分割は基本的にすべての段階で等分割であり、かつ目標性能が異なることによる影響因子である設計変数が異なっても等分割の方針はすべてに一律に適用される。実際の分割は以下の手順で行う。

- ① 分割数 $D=2$ で開始。
- ② 各設計変数の範囲（選好度 0 における範囲）を D 分割する。
- ③ 可能性分布範囲とその範囲に対応した要求性能範囲との選好度 0 における範囲に関するオーバーラップ率（%）の閾値 R を設定する。
- ④ 設計変数の分割した範囲の複数設計変数区間の組合せに対して、それぞれの組合せ範囲で範囲伝播計算を行い、可能性分布範囲とその範囲に対応した要求性能範囲とのオーバーラップ率およびそこにおける可能性分布範囲の選好度と要求性能選好度から組合せ数だけの PRI 値を求めるとともに、複数性能評価としての APRI を計算する。
- ⑤ APRI が最大となる分割範囲の組合せになる領域を最適領域とする。ただしオーバーラップ率 100% の領域があればそちらが優先される。
- ⑥ 最適領域（⑤の領域）のオーバーラップ率が 100% であればそこで完了とする。最適領域を出力する。
- ⑦ 最適領域のオーバーラップ率が指定値（閾値 R ）未満であった場合、 D を 1 増やして分割を細かくして②からやり直す（最大 5 まで）。
- ⑧ 指定値以上の場合は再び $D=2$ に戻し、最適領域に対して次のステップの計算を②から順次行う。

(11) 範囲解無しの場合の対応（感度解析の利用）

図 6.4-1 の左側の影響因子の初期範囲の組合せを範囲伝播した結果、右側の性能のいずれかの初期範囲との重なり（共通集合）がない場合は性能群の同時満足範囲解がないことになる。この場合は図 6.4-2 でいえば、手順図の左上のルート（範囲修正）を通り、影響因子（設計変数）の初期設定という最初のステージに戻ることになる。範囲解がないことを知り得ることは非常に重要だが、影響因子（設計変数）の初期範囲の許容される修正で同時満足範囲解の求解が可能であれば、このことも重要である。

PSD 手法では、設計対象の性能がある程度線形的な現象である場合には感度解析を利用して影響因子（設計変数）の初期範囲をどの程度、どの方向に修正すれば範囲解が存在するかの指針を提示する。その際の修正には 2 つの考え方があり得る。

1) 設計変数範囲の順次変更

2)設計変数範囲の同時変更

1)の方法では不確実性をもとに1つの設計変数ごとに順次修正するが、1つの設計変数のみでは可能性分布の変動量が小さく、十分な可能性分布を得て性能の選好度数とのオーバーラップを得るためにはその修正量がかなり大きくなる可能性がある。2)では、設計解集合の修正は修正すべき可能性分布の性能変数に関わるすべての設計変数を同時に修正することであり、その方法について説明する。

ここでは設計変数の性能に対する影響度（感度）および重要度の考え方をを用いる。まず影響度について説明する。影響度は性能変数と設計変数間の比例関係 ($Y \propto X_n$) という Quantitative Dependency（定量的依存性）[29],[30]を次式のように用いることにより、Yの値の変更を求める方法である。

$$\Psi_{x,y} = (Y_{new} - Y_0) / Y_0 \quad (12)$$

ここで Y_0 は変数の現在の値であり、 Y_{new} は変数 X の値を r%変動させて得られる新しい値である。しかし、定量的依存性は変数間が線形関係であることを仮定しているため、非線形の関係式が与えられた場合には要求性能を満たすための正確な設計解修正量を求めることが困難であるので、ここでは一応の目安を求める手法として採用する。

影響度に加えて、重要度の考え方を導入する。新たに設計変数 x_1, x_2 に関する例題を用いて説明するため、次の課題を用いる。

設計変数： x_1, x_2
 性能変数： y
 関係式： $y = x_1 + 3x_2$

で表されるものとする。各パラメータの許容範囲（選好度=0の範囲）は、設計変数 $x_1 = x_2 = [0, 2]$ 、要求性能 $y = [13, 19]$ であり、それぞれの選好度数は図 6.4-11 に示す内容であるとする。また関係式を用いた可能性分布の許容範囲は $[0, 8]$ である。

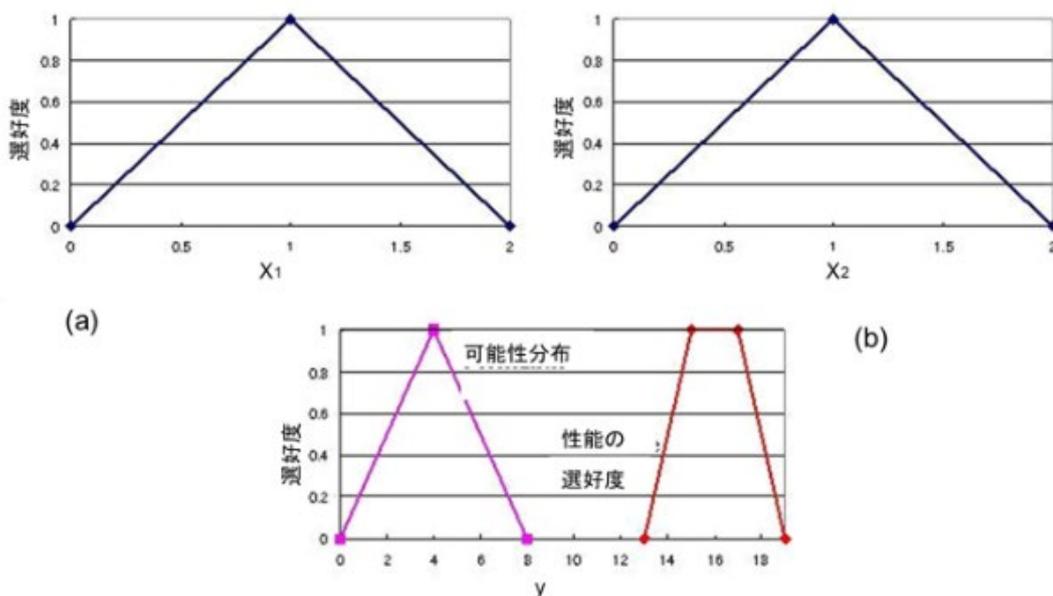


図 6.4-11 範囲解無しの場合の対応に関する例題

次に重要度を導入する[31]. 例題の場合は, 設計変数 x_1 と x_2 の重要度の比を 1:2 とする. 以上の例題を用いて設計変数の性能に対する影響度と重要度の両者を考慮する. すなわち, 影響度の大きい設計変数は大きく変え, 重要度の大きい設計変数は小さく変えるものとする. 影響度は式(12)によるが, 解の修正においては, 設計変数の重要度が高いものほど修正する量を小さくするため, 式(13)を用いて修正量の決定をする. ω_i は設計変数 x_i の重要度を表す.

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_j &= \sum_{i=1}^k f_{x_i, y_j} (\Delta x_i) \\ \Delta x_i &= \left(\frac{\psi_{x_i, y_j} / \omega_i}{\psi_{x_0, y_j} / \omega_0 + \dots + \psi_{x_k, y_j} / \omega_k} \right) \cdot \Delta d \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Δd は設計変数 x_i に対する基準変動量である. 式(13)は影響度 ψ の大きい設計変数, 重要度 ω の低い設計変数ほど変動量が大きくなることを示している. これを実際に図 6.4-11 の例で, 具体的には式(8)の x_i, y, ψ, ω x_1 と x_2 でそれぞれ計算すると, 式(14)のようになり, 変動量 Δx_1 と Δx_2 の比が 2:3 であることがわかる.

$$\frac{\psi_{x_1, y_1}}{\omega_1} = \frac{1}{1} = 1 \quad \frac{\psi_{x_2, y_1}}{\omega_2} = \frac{3}{2} = 1.5 \quad (14)$$

その結果, 修正後の設計解集合は, $x_1=[0, 4], x_2=[0, 5]$ となり, x_1 と x_2 の変動量の比と一致していることから, 正しい解が提示されていることがわかる. 以上の結果として可能性分布の範囲が要求性能の範囲すべてを満たすように設計変数の範囲を修正した結果が図 6.4-12 である.

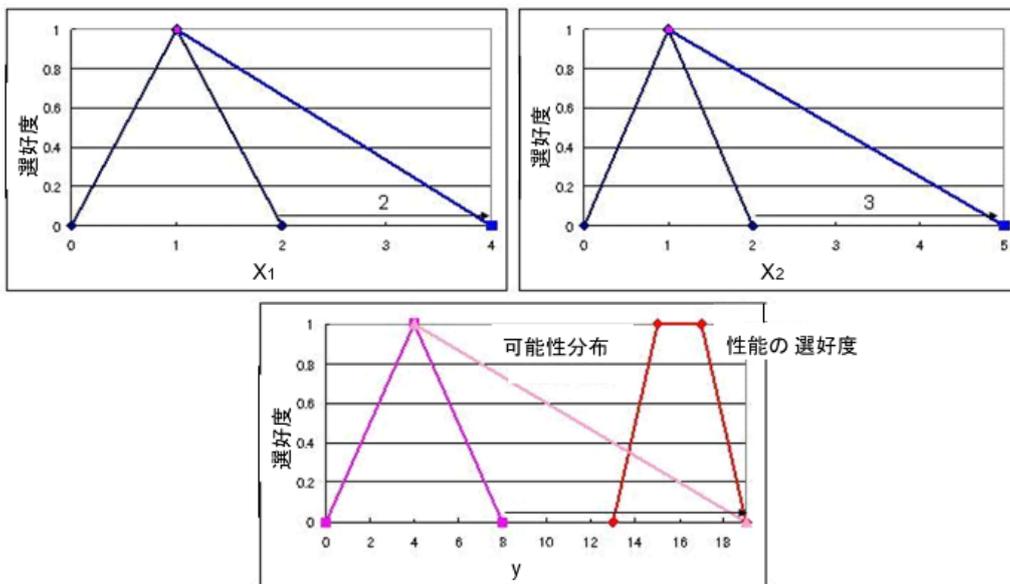


図 6.4-12 影響度と重要度を考慮した設計変数範囲の修正

以上の範囲解無しの場合への対応について, 実際のある線形の設計課題 (土地面積, 通勤環境等の条件に基づいて用意すべき住宅購入資金の見積り設計) で範囲解無しの場合に

ついて、PSD ソフト上の様子を以下に示す。

図 6.4-13 は範囲解がなく、式(13)の感度評価に基づいて設計変数の範囲修正または各設計変数の重み（重要度）の修正を促す画面である。画面で了解ボタンを押して、各設計変数の初期設定範囲画面をみると、図 6.4-14（一例として土地面積: AI）のようにその上限値を 260.0 から 370.5 に修正することを求めている（緑線）ことが分かる。またそのような修正を仮に行うと、図 6.4-15 に示すように可能性分布の上限が指定された要求性能範囲に入ることが分かる（緑線）。これらの情報を基に各設計変数の初期範囲を修正することになる。

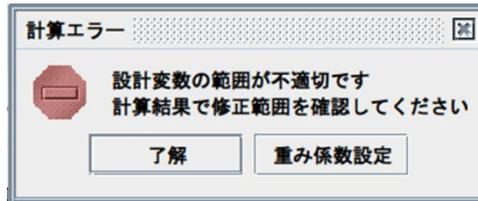


図 6.4-13 PSD ソフトにおける範囲解無しの場合の対応

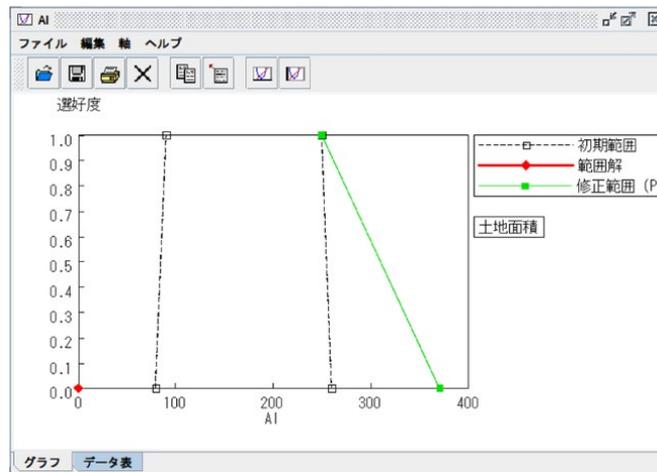


図 6.4-14 範囲解無しの場合の設計変数初期修正量表示

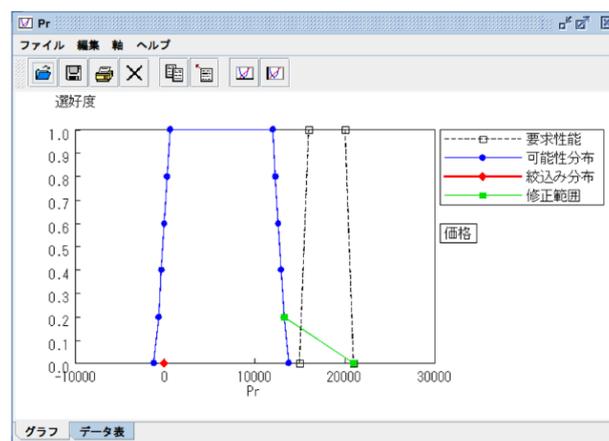


図 6.4-15 範囲設計変数範囲の仮修正に範囲の伴う可能性分布範囲の変更

また図 6.4-16 に示すように式(13)で示した各設計変数の重み（重要度）を修正する選択肢もある（図 6.4-14, 図 6.4-15 は重みはすべて 1 の場合）。図 6.4-13 の重み係数設定ボタンを押すと図 6.4-16 のように重みを修正する画面が現れ、その修正が可能となる。

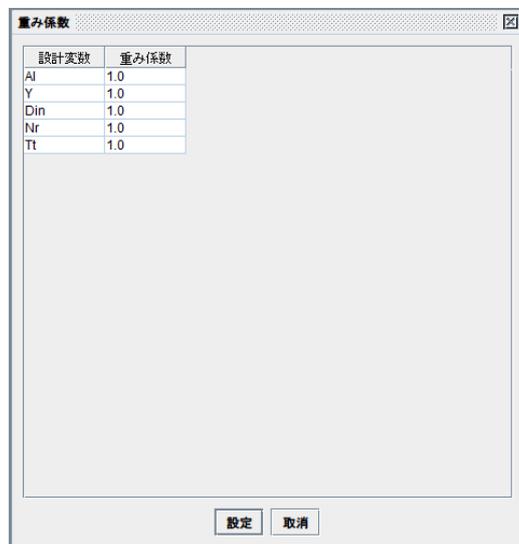


図 6.4-16 設計変数の重み修正画面

(12) まとめ

多目的性能の目標範囲を同時に満足する複数設計変数の範囲解を求める設計理論と手法である選好度セットベース設計手法では以下のようにいくつかの新しい概念や特徴の提案を行っている。これらの内容の記述をもって本節のまとめとする。

- 1) 設計変数範囲，目的性能範囲，その両者間の範囲伝播，解探索などすべて範囲による表現や処理を行っている。
- 2) それらの範囲には選好度という概念を与え，範囲内の選好性の表現と範囲の絞込みにおける指標を構成する重要な要素となっている。
- 3) 具体的には，選好度情報（選好度数）により範囲解の満足度，安定性，精密性，ロバスト性の定義を可能にしている。
- 4) 選好度情報に基づく各種指標は全て正規化され，範囲の存在位置（例えば，ある性能における範囲に関して，同一の範囲を設定する位置）や範囲の大きさという範囲情報も含めて各種変数の異種性は解消され，また背反性は吸収され，同一の空間における処理に落とし込むことを可能にしている。
- 5) したがって性能の背反性，異種性の表現と処理を可能にすることにより設計対象自体あるいはそれが所属する分野は問わない。
- 6) 複数の性能と影響因子間の因果関係（式）用いた範囲伝播という概念で性能範囲解の探索を行う。
- 7) 解探索は複数性能範囲の同時実現を可能にする手法を用いる。
- 8) 解探索は初期設定範囲内を試行錯誤的に探索するのではなく，上記の同時実現性を求めて絞り込みという概念で行う。
- 9) 変数は範囲表現なので，その両端（2点）値を主に用いて様々な処理を行う。したがって演算処理も早く，計算機能力への負担も小さく，通常のパソコンがソフ

トの稼働環境となる。

- 10) 探索範囲に解がないこともわかる。
- 11) 結果として、設計プロセスにおける手戻りが減少し、開発期間の短期化と低コスト化（工数削減）が可能になる。
- 12) PSD 手法においてセットベース手法として新たに提案された概念は以下になる。
 - a) 選好度数
 - b) 範囲伝播
 - c) 満足度
 - d) 安定性
 - e) 範囲の絞込み

6.4.2 セットベース設計におけるロバスト性の評価の考え方

(1)設計変数範囲の部分集合化

本稿で提案するセットベース設計手法は多目的性能範囲を同時満足する多設計変数範囲解を求めて、設計に資する手法である。ここまでの説明の中にロバスト性、あるいはその評価という用語も用いている。その理由は、多目的性能の範囲を同時に満足する設計変数の範囲が解範囲として実際に存在していたとすれば、一般的には、それぞれの初期性能範囲の部分集合になるであろうことは想像に難くないことだと思われるからである。またその同時満足範囲を実現する各設計変数の範囲解も初期設定範囲の部分集合になる。この複数の設計変数の部分集合の探索の場合に、各設計変数の初期範囲の大きさとその設計変数が関連する目的性能範囲の大きさは設計課題ごとに変化する。こうした状況の中で、設計変数の初期範囲から部分集合を求める（その範囲の大きさを決める）方法には一般的には任意性があるが、ここでは、まず各設計変数の初期範囲を n 等分し、各設計変数ごとの等分割された範囲の組合せ（複数個あり得る）から求まる可能性分布範囲が目標性能範囲に入る複数個の組合せを求める。ここでは各設計変数範囲の n 等分という考え方を採用しているため、部分集合範囲としての平等性が保たれている。

(2)範囲解になり得る部分集合の存在状態としてのロバスト性

ここでは設計の立場でロバスト性を定義している。つまり解候補に入っている部分集合の範囲は、式(7)、式(8)のように、設計変数の初期設定範囲とそこにおける選好度分布から得られる各指標（満足性:DPI, ロバスト性の安定性:DAI, 設計判断の安定性:DCI, 選好度分布の安定性:DSI）の最大値、最小値で正規化（無次元化）された範囲として求められている。したがってどの解候補の評価もそれぞれの指標、あるいはそれらの総合化された指標に関する $[0,1]$ 空間内で同等に評価されている。その上で選択し得る解候補（部分集合の組合せ）が複数ある状態を絞り込みの際には”Noise”が高い状態（設計としての選択肢がたくさんある状態）と考え、ロバスト性は低いとみなすという考えを採用している。逆に言えば、選択可能な解候補の中から各指標の総合的評価が最も高い解候補（部分集合の組み合わせ）を範囲解として採用することになる。つまり解候補が選択的に決められる状態という設計者の立場から見て揺るぎない状態をロバスト状態と定義していることになる。

6.5 セットベース設計の実践例

6.5.1 自動車の乗り心地設計への適用[32]

トラックの乗り心地は図 6.5-1 に示すように路面の凹凸状況や積載量にも関係し、関連機能要素も多い振動設計課題となる。今回の全体のモデル化は 13 自由度の振動問題（図 6.5-2）に対応するように MATLAB を用いた 1D モデリングによる因果的關係式群として表現した。このモデルの妥当性は各部署の振動エネルギーの周波数特性により確認した（図 6.5-3）。設計課題としては、空荷、定格積載時の各部位でのパワースpektral 密度、加速度、変位などに関する 18 性能（図 6.5-4）範囲を同時に満足するキャブ、シャーシーにおけるバネ定数、ダンピング定数に関する 12 設計機能変数（図 6.5-5）の範囲解を求めることにある。つまり設計対象である目標性能数と影響因子としての設計変数の数は一致しない場合である。この問題では 12 設計機能変数としたので関連式としては 3 水準である L27 直交表に基づく応答曲面法を用いた。PSD を適用した結果を図 6.5-6（18 性能）および図 6.5-7（12 設計変数）に示す。図 6.5-6 の 18 性能は範囲内で選好度の高い値での dB 表示で、左側の棒グラフが現行車、右側の棒グラフが PSD の適用結果の評価である。いずれも改善されていることが分かる。図 6.5-7 は設計変数の結果である。選好度付き範囲（点線）を横軸の 100% である現行車の場合に対してかなりの程度（ $\pm 25\%$ から $\pm 50\%$ ）広げた初期状態および PSD 手法で求めた結果の設計変数の範囲解を示している。

以上より、PSD 手法によれば、18 機能関連式で表現される 18 性能目標範囲を同時に満足する 12 設計変数範囲を求めることが可能であることを示した。

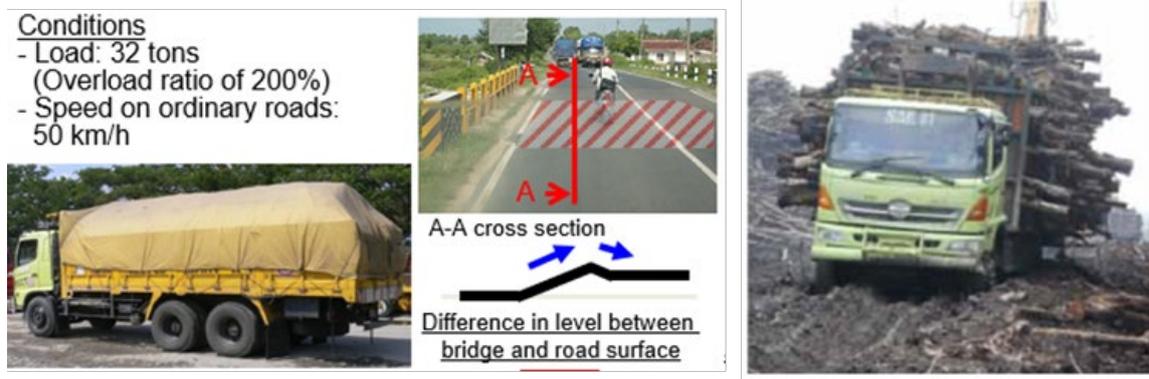


図 6.5-1 トラックの走行路面状況

13 Degree of

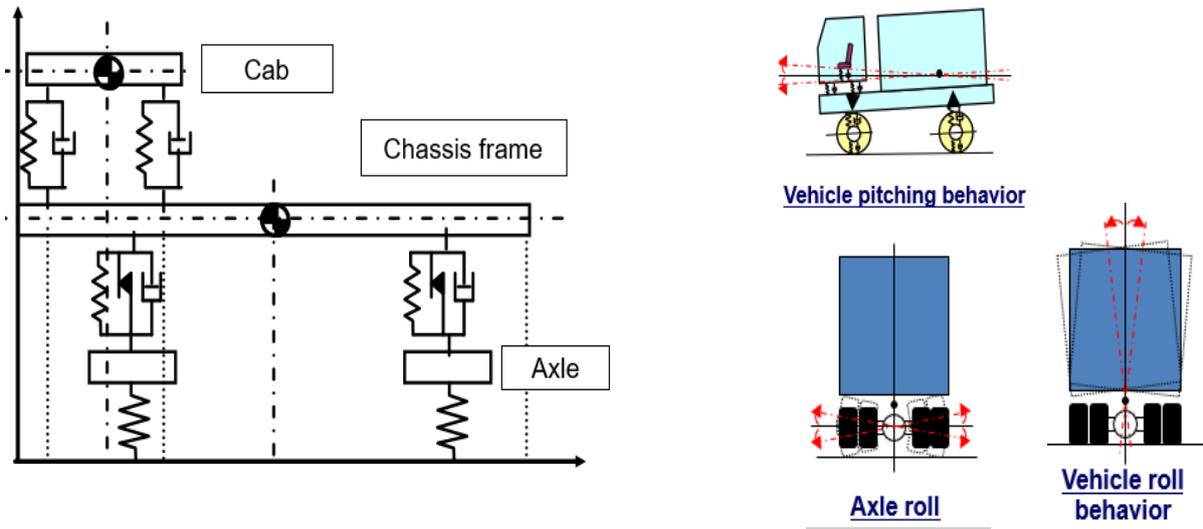


図 6.5-2 モデルとその自由度

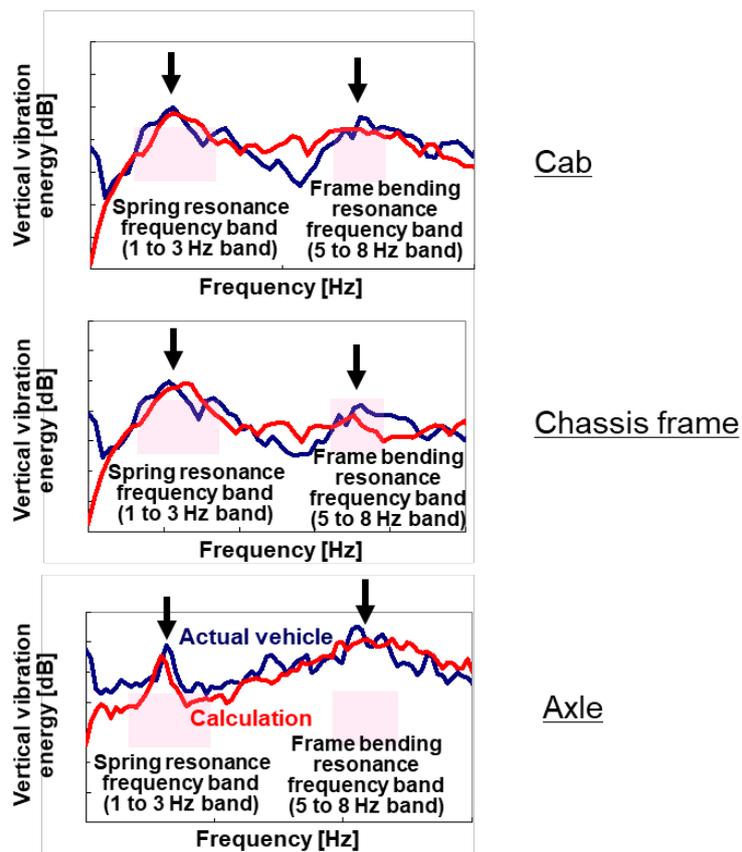


図 6.5-3 振動エネルギーの周波数特性

	Load capacity	Road	Characteristics	Position
Performance aspects	Fully laden / Empty	Asphalt track	Acceleration Power spectral density [dB]	Cabin
				Front frame
				Rear frame
		Bottoming track	Acceleration [G]	Cab
				Front frame
				Rear frame
		Stroke [mm]	Cab to Frame	
			Frame to Axle (Front)	
			Frame to Axle (Rear)	

図 6.5-4 要求性能特性 (18 性能)

Design parameters	Position	Parameters		
	Cab	Spring constant	Fr	
Rr				
Damping force		Fr	(G)	
			(H)	
		Rr	(G)	
			(H)	
Chassis		Friction between spring leaves	Fr	
			Rr	
	Damping force	Fr	(G)	
			(H)	
		Rr	(G)	
			(H)	

G:elongation side, H:compression side

図 6.5-5 12 設計変数

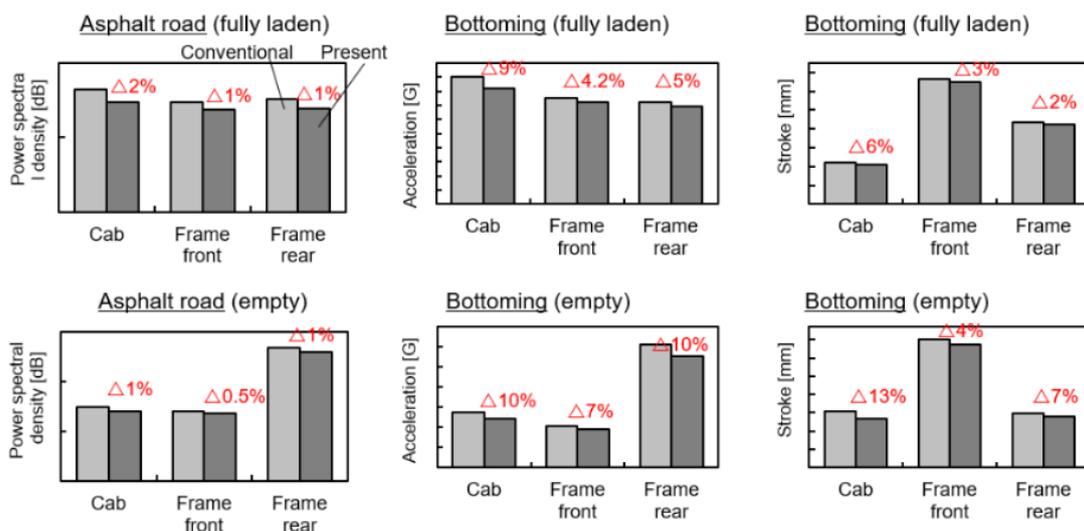


図 6.5-6 18 性能の設計結果

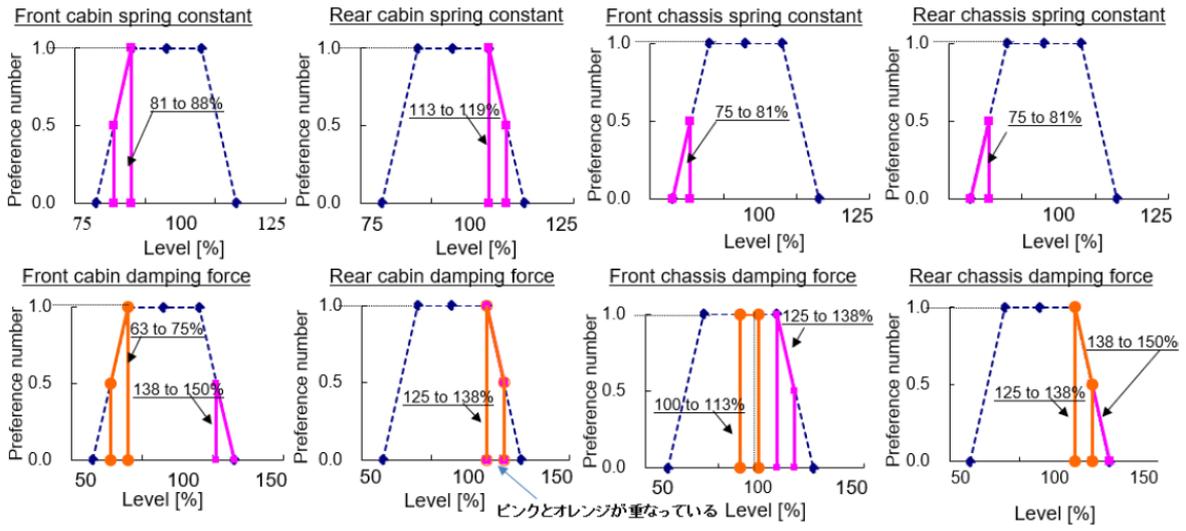


図 6.5-7 12 設計変数の解範囲

参考文献 (6章)

- [1] https://ecodb.net/exec/trans_country.php?d=NGDPD&c1=JP&c2=US&c3=CN
- [2] <https://www.fujitsu.com/jp/group/fjm/mikata/column/shimizu/002.html>
- [3] 富山哲男, 設計の理論, 現代工学の基礎 15, 岩波書店, 2002
- [4] Evans, J.H., Basic Design Concept, Naval Engineers journal, 71,4 (1959),pp.671-678.
- [5] Y.-E.Nahm and H.Ishikawa, A hybrid multi-agent architecture for enterprise integration using computet networks, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 21 (2005)pp.217-234.
- [6] 中山, 岡部, 荒川, 尹, 多目的最適化と工学設計—しなやかシステム工学アプローチ, 現代図書, 2008.
- [7] 中山, 谷野, 多目的計画法の理論と応用, コロナ社, 1994.
- [8] 山川(編集), 最適設計ハンドブック: 基礎・戦略・応用, 朝倉書店 (2003) .
- [9] <https://oceanone.hatenablog.com/entry/2020/06/29/030012>
- [10] 佐藤 寛之, 石渕 久生, 進化型多数目的最適化の現状と課題, オペレーションズ・リサーチ, (2017年3月号), pp.156-163.
- [11] J. S. Angelo, I. A. Guedes, H. J. C. Barbosa, and L. E. Dardenne, Multi-and many-objective optimization: present and future in de novo drug design, Front Chem. (2023,11) Published online 2023 Dec 18. doi: 10.3389/fchem.2023.1288626.
- [12] P. J. Fleming, R. C. Purshouse, and R. J. Lygoe, Many-Objective Optimization: An Engineering Design Perspective, Proc. Third International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, EMO 2005, Mexico, (2005, March)pp.14-32.
- [13] H. Ishibuchi, N. Tsukamoto, and Y. Nojima: “Evolutionary Many-Objective Optimization: A Short Review”, Proc. of the 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp.2424-2431 (2008-6).
- [14] 石川, 加藤, セットベース設計手法に関する実態調査 (セットベース設計とポイントベース設計は, 何が本質的に違うのか) , 設計工学, 57,9(2022)419.
- [15] Ward, A., Liker Jeffrey, K., Liker, Cristiano John, J., Durwad Sobek K. II, The Second Toyota Paradox: How delaying Decision Can Make Better Cars Faster, Sloan Management Review, 36,3 (1995)pp43-61.
- [16] Durward K. Sobek II, Allen C. Ward, Jeffrey K. Liker, Toyota's Principles of Set0Based Concurrent Engineering, Sloan Management Review, 40 ,2 (1999)pp.67-83.
- [17] W.W. Finch, et al. : A set-based system for eliminating infeasible design in engineering problems dominated by uncertainty, Proc. of the ASME Design Engineering Technical Conference, DETC97/DTM-3886 (1997)
- [18] <https://ocw.hokudai.ac.jp/wpcontent/uploads/2016/01/IntelligentInformationProcessing-2005-Note-09.pdf>
- [19] https://sagaweb.csse.muroran-it.ac.jp/htdocs_fuzzy/fuzzy1/node12.html
- [20]南 允議, 石川晴雄: 初期設計段階におけるセットベース多目的設計最適化、(第一報) 一理論—自動車技術会論文集 36, 6, pp. 157 - 162 (2005)
- [21] Y.E. Nahm and H. Ishikawa. : Novel space-based design methodology for

- preliminary engineering design, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, pp. 1056- 1070 (2006).
- [22] 石川晴雄, 多目的最適化設計 (セットベース設計手法による多目的満足化), コロナ社 (2010) .
- [23] Boris Toche, Robert Pellerin and Clement Fortin , Set-based design: a review and new directions, *Design Science, Int. J.*, Cambridge.org, vol. 6 (2020,May) pp.1-48.
- [24] W. W. Finch, Predicate Logic representations for Design Constraints on Uncertainty Supporting the Set-Based design Paradigm, PHD Dissertation in The University of Michigan, 1997.
- [25] J. Kennedy and R. Eberhart : “Particle swarm optimization”, *Proc. of IEEE Int. Conf. Neural Networks*, Vol.4, pp.1942-1948 (1995-10)
- [26][19] W.W. Finch, et al. : Quantified relations: a class of predicate logic design constraints among sets of manufacturing, operating and other variables, *Proc. of the ASME Design Engineering Technical Conference, DETC96/DTM-1278* (1996)
- [27][20] John H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, (1992) The MIT Press.
- [28][21] <https://www.cybernet.co.jp/ansys/learning/glossary/robustsei/>
- [29] A. Kusiak, and J. Wang, Dependency Analysis in Constraint Negotiation, *IEEE Transactions on System, Man. And Cybernetics*, 25, 9(1995)pp1301-1313.
- [30] A. Kusiak, J. Wang and D. W. He, Negotiation In Constraint-Based Design, *Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design*, 118(1996)pp.470-477.
- [31] 斎藤智彦, 南 允議, 石川晴雄, セットベース概念を用いた設計支援システム (目的仕様に合う変数空間設計), *Design Symposium 2004 講演論文集*, (2004)pp.327-330.
- [32] 柿沼道子, 榎本満, 石川晴雄, セットベース設計手法を用いた車両振動の最適化, *自動車技術会学術講演会予稿集, 2016 春季大会*, (2016)pp.1916-1920.