

機能性、多目的性、不確定性、満足性そして詳細設計への連結性

その設計手法としてのポイントベース設計とセットベース設計

Functionality, versatility, uncertainty, satisfaction and connectivity to detailed design

Point-based design and set-based design as the method

○石川 晴雄（電気通信大学）

Haruo Ishikawa, the University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, haishikawa@yahoo.co.jp

キーワード:機能設計, 多目的性, 不確定性, セットベース満足化設計, 詳細設計

1. 緒 言

設計の対象が製品（システム）、モジュール、ユニット、部品のいずれであっても、それらの設計プロセスにはおおむね構想設計、初期設計（機能設計）、詳細設計がある。一般にそれぞれの定義は必ずしも確定的ではないが、本報告の表題の各種特性の観点からそれぞれの特徴とそれに取り組み設計手法について、ポイントベース設計およびセットベース設計の観点から図1および以下にまとめる。

2. 設計プロセスとポイントベース設計

2.1. 構想設計

構想設計は企画に対する立案（アイデア出し）の段階であり、基本的には設計者の経験も含めた知識等からの創出に基づく。企画の内容としては、製品（機器等）の性能、価格および軽量性、あるいは機構と構造と制御などの異種性や背反性等も含めた**多目的性**について、必要があればベンチマーキングも経て、複数案（**機能性**）を創出することであろう。またこの段階では、目標とする要求性能の種類と種類ごとの目標値レベルは構想設計段階の設計企画として与えられていることが一般的である。

2.2. 初期設計

初期設計は構想設計のアイデアに対して製品等の骨格を決める機能設計であり、1D設計のようなモデルの機能要素変数の組合せを用いて設計対象に付与する複数の要求性能の実現のための筋書き（広い意味でのメカニズム）を考える（設計する）段階（**機能性**）である（このような作業も構想設計であると考えられる場合もある）。複数の要求性能として、**must** 設計, **better** 設計, **delight** 設計という観点も有り得る。また前段階で与えられる性能の目標値レベルを実現するために、初期設計では各アイデアを構成する複数の要素機能の特性値をコスト等も含めて概略でも特定する必要がある。つまり**多目的性**および要素機能性の実現の判断（機能としての定性的・定量的な整合的**満足性**）（全体適正化ともいう）が必要となる。ここで重要なのは、特に今日的には初期設計段階での複数アイデアの妥当性の判断の即応性であると

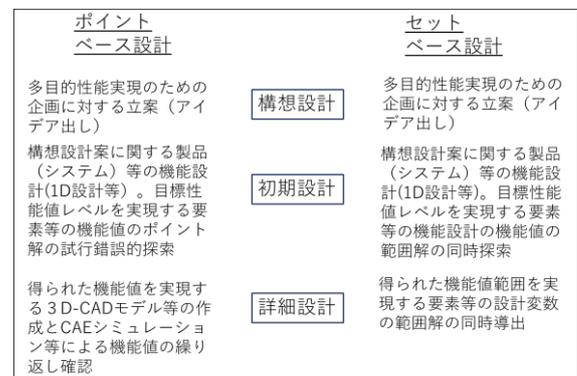


Fig.1 Point-based and set-based designs in design Process

考える。アイデアの実現性が早期に判断できることは重要である。

初期設計段階における定量的機能設計は、従来は製品（システム）等に対応する一つの機能モデルに対する妥当性（出力として目標性能レベルの実現性）の評価と修正の繰り返し（**ポイントベース設計**）が主流である（モデルベース設計も含めて）。こうした試行錯誤自体も**不確定性**を示しているし、その結果によっては製品システム自体（あるいはモジュール等）としての性能目標の変更が実際上あり得ることも性能目標自体の**不確定性**を示すことになる。

2.3 詳細設計

詳細設計段階では初期機能設計段階の結果を実体化（3次元化、構造化、配置可能化等）することになる。あるいは実体化の結果を初期設計に戻し、全体機能としての適正化を再検証し、場合によってはその結果の実体化の再確認を行う。以上のプロセスは目標性能の種類ごとに発生し、全性能を対象にした全体適正化は多目的最適化の手法でもカバーしきれないことも多い。このような意味での実体化はひとつの**不確定性**の表れである。この実体化は、通常3次元CADによるモデリングとレイアウトおよびそれに基づくCAEシミュレーションで実施されることが多い。これらの3D-CADによるモデリング、レイアウト評価およびCAEシミュレーションは**ポイントベース**手法で実施され、試行錯誤の繰り返しを伴うのが一般的である。

3. 設計プロセスとセットベース設計

3.1. 構想設計

多目的性を有する機器等の設計案（機能の連鎖案：**機能性**）のアイデア出しはポイントベースまたはセットベースの設計手法の適用以前の内容であり、両者に違いはないと考える。

3.2. 初期設計

初期設計段階における定量的機能設計の段階ではポイントベース設計手法とセットベース設計手法の適用は根本的に異なる。ただし、いずれにあっても機器等の設計対象の目標性能とその定量的レベルが存在するという点では同じである。定量的機能設計を 1D 設計における機器等の機能モデルにおけるモジュールや機能要素の変数を複数目的性能（**多目的性**）レベルの実現のために定量化する場合は、目標性能の繰り返し評価を基本的に伴わないセットベース設計手法はその特徴を發揮する。目標性能の種類と達成レベルは構想設計段階で与えられているが、その達成レベルも**不確定性**の対象となり得ることもあり、範囲表現となる。その結果、それを実現する機構や制御の特性あるいはそれらを構成する各モジュールや要素の機能の定量的評価結果も範囲解になる。異種性も含む様々な特性や要素等の機能特性を同時実現する範囲解を求める手法がセットベース設計手法（例えば、選好度を基盤としたセットベース設計手法:PSD 手法^{(1),(2),(3)}）になる。

この段階でセットベース設計手法により求まるのは各要素等の機能の範囲解である。構想設計段階で構想した複数の案のうち目標性能範囲を満足する各要素等の機能の範囲解がない場合があれば、その構想案は採用できないことになる。

3.3. 詳細設計

初期設計段階で機器等の全体システムの複数の目標性能範囲を満足する要素機能の範囲解が求まる場合は、それを実現する各モジュールや機能要素の実体化が必要である。

一方、各モジュールや機能要素の設計手法としては何らかの方法が存在すると考えられる。規格化された手法、設計理論・手法が明確な場合、企業ごとの独自の設計手法等である。前段階で求めた各要素機能特性の範囲解は、これらの手法のモジュールや機能要素の特性としての出力の範囲解であると考えられる。またその出力に影響する設計変数も前述の設計手法において一般には規定されている。

したがって各機構諸元や制御特性およびモジュールや機能要素の実体化のためには、前段階で求めた各機能要素等の特性値の範囲解を、それらのモジュールや要素等の出力としての目標範囲として設定したセットベース設計手法を再度適用し、これを実現する機構諸元や制御特性変数および各要素等の設計変数の範囲解を求めることによって実体化が可能になる（**詳細設計への連結性**）。

以上のセットベース設計手法の 2 回目の適用の段階では、機器（システム）等の本来の特性に加えて、コスト、重量、環境負荷性等を設計目標として導入することも原理的には可能である。

以上の考え方で機器やシステムを構成する機構諸元や制御特性およびモジュールや要素の実体化のすべてが終了す

るかどうかは様々な状況によるが、モジュールや要素等の材質を含めた実体的設計は一応可能である。

ポイントベース設計を基調にした詳細設計では、複数の目標性能ごとに、3D-CAD 化、CAE シミュレーション、あるいは特定の評価手法の適用等の処理の積み重ねを経ることもあり、解の存在が判明するため全体の処理に工数や時間がかかると考えられる。他方、例えば PSD のようなセットベース設計を基調にした場合は、性能ごとにそれに影響する複数の設計変数との関係を実験計画法や CAE シミュレーションデータを用いた応答曲面法等で表現しておけば、複数の目標性能範囲を同時に実現し得る多設計変数範囲解を 1 回の処理でも求めることが可能となる。またその際、解範囲が無ければ無いことを示してくれることでも設計プロセス全体の処理時間の縮小化に繋がる。

4. セットベース設計 (PSD) 手法の適用例 (乗り心地設計)

4.1. 乗り心地設計の例題

ここではトラックの振動乗り心地設計への PSD 手法の適用例^{(4),(5)}を紹介する。構想設計としてはトラックの運転手の乗り心地性能が設計対象であるが、乗り心地をトラックキャブ(運転席)の座席の振動状態(加速度や振動エネルギーなど)で表現する。それらの特性の状態やレベルの目標特性は、従来からの実車に基づく官能評価結果に基づくものとする。ここでいう目標特性の種類とレベルは初期設計、詳細設計を通じて、あるいは 1D 設計または 3D 設計(実体化・構造化)において変わらない設定目標である。

トラックの振動乗り心地設計では、サスペンション系の考慮すべき特性値として、乗員の乗り心地に関する官能性、荷台振動、操縦安定性などが関係する。これらの特性はピッチング、ローリング、ヨーイングなど車両の振動モードに依存し、さらに路面事情などのインフラや使われ方などの仕向地による条件によって異なるだけでなく、車両の仕様によっても異なる。言い換えると、サスペンション系の設計は、前述の複数の目的を持ち、キャブ(運転席)やシャシ(車体)のバネ定数、減衰力、サスペンションストロークといった多くの設計特性値で構成され、積載条件、路面条件など様々なシーンを考慮した最適な仕様を見出すこ

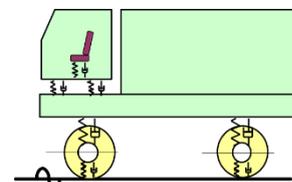


Fig.2 Vibration system of truck

Total : 13 DOF

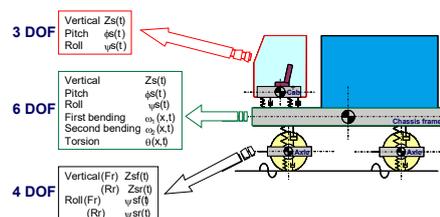


Fig.3 Physical simulation model

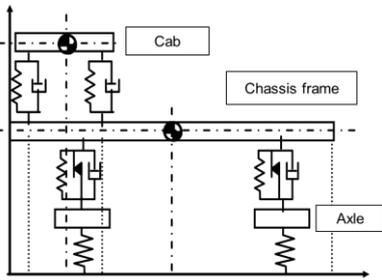


Fig.4 1D functional simulation model

Table 1 Required performances (18 performances)

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

とが必要で、設計上考慮すべき設計変数が多数であることを示している。初期設計段階としての車両振動のモデル化に当たって、今回は図3に示すような13自由度のモデルを設定した。この自由度の下でMATLAB & Simulinkで1D設計のシミュレーションモデル(図4)を構築し、要求性能である加速度、変位、振動エネルギーのピーク値やその周波数特性(その一例(キャブ)を図5に示す)に注目し、実車との比較からモデルの同定を行った。1Dモデルでの結果は実車の結果と概ね合致している、図4に示す13自由度の1Dモデルは乗り心地に関わる実車の振動状態に対応していると判断できる。

実際に設定した要求性能を表1(18性能)に示す。設計変数は寄与率解析の結果から、表2にはキャブとシャシのサスペンションの設計変数として12個のバネ定数と減衰力を選定した結果を示している。表2においてショックアブソーバの粘性減衰力(damping force)は伸び側を(G)、圧縮側を(H)としている。

4.2. 選好度を基盤とするセットベース設計手法

多目的性能範囲を同時に満足する多設計変数の範囲解を求める手法として、選好度を基盤とするセットベース設計(PSD)手法が提案されている^{(1),(2)}。PSD手法の概略を図6に示す。図6の各段階は以下になる。

- ① 複数要求性能の選定とそれに影響する設計変数の選定
- ② 各要求性能と設計変数に対する初期範囲と範囲内選好度の分布の付与
- ③ 各要求性能とそれらの設計変数の関係式(厳密式、数値近似式、実験式)の準備
- ④ PSDソルバーへの①~③の入力
- ⑤ 選好度付き設計変数範囲から③の関係式を用いた性能範囲への伝搬(性能の可能性範囲分布の導出)
- ⑥ すべての要求性能範囲を同時に満たす設計変数範囲の絞り込み
- ⑦ 上記⑥の絞り込み範囲が存在すれば、その結果の出力なお、範囲内の選好度分布の例を図7に示す。選好度1が

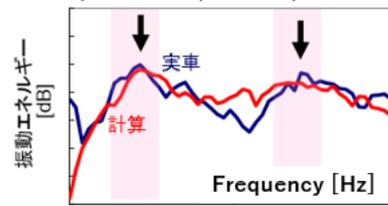


Fig.5 Vearification of Simulation Model

Table 2 Design variables (12variables)

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

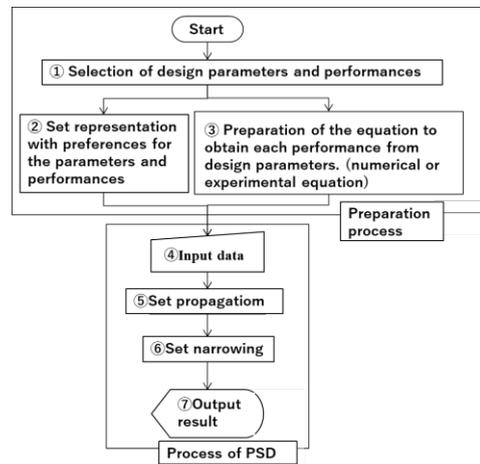


Fig.6 Preference set-based design method

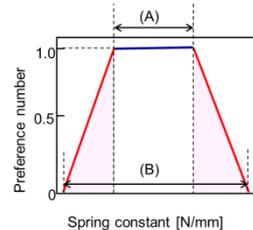


Fig.7 Definition of preference number

最良の範囲(Aの範囲)、選好度0が許容範囲(Bの範囲)を示している。

以上の手法を用いて、図2のモデルに対して、表1の18性能範囲を同時に満足する表2の12設計変数範囲を求めた。

4.3. PSD手法の適用結果(ステップ1)

製品(システム)であるトラック全体の1Dモデル(図4)に対する要求性能や設計変数の初期範囲(表1,表2)を用いてPSD手法を適用した適用結果を示す。

要求性能の範囲結果の例を図8に示す。いずれも左側の棒グラフが現行(実車)であり、右側が今回の結果である。上図((a))がアスファルト道路で、最大積載の場合であり

加速パワースペクトル密度が改善していることが分かる。下図 (b) はボトミング道路で、無積載の場合であり、加速度が改善していることが分かる。

18 個の要求性能の範囲をすべて満たす設計変数の選好度付き範囲解に関する代表的な例 (6 例) を示したのが図 9 である(中央の 100%は現行値を示す)。図 9 の下段ではピンク色は(G)サイドの結果、オレンジ色は (H) サイドの結果を示している。図の 9 下段の右図は(G)と(H)が重なっている。図 9 は設計変数範囲解の 6 例のみ示したが、他の 6 例も含めて加速度、変位、振動エネルギーのピーク値やその周波数特性に関する 18 性能範囲を同時に満足する 12 設計変数の範囲解が求まった。

4.4. PSD 手法の適用結果 (ステップ 2)

ステップ 1 では機器 (システム) 全体に対して多性能を同時に満足する複数設計変数の範囲解が PSD 手法で求めることが可能となった。しかし設計解は 1D 設計における機能変数の範囲解であり、その機能を実現する機能モジュールや要素の物理的実体 (形状, 寸法, 材質等) が分からないと製品化設計に到達しない。

前章の 3.3 節で述べたように、その機能要素やモジュールは単独でも設計対象と考えることができる。そこで、ステップ 1 で得られた当該機能の設計変数範囲解を機能要素や機能モジュールの目標性能範囲解と設定し、モジュールや要素単独の設計に対して、新たに PSD 手法を適用する (ステップ 2) ことで、機能要素の実体化が可能となると考えるものとする (詳細設計への連結性)

どの要素やモジュールでも、その設計手法は存在する。図 4 のモデルでも様々なバネやダンパーが配置されているが、バネを例にすると、バネであってもコイルバネや重ね板バネもあり得る。それぞれの設計手法としては、トラックメーカーとしての社内手法や JIS 規格としての設計方法 (JIS B 2704-1 : 2018, JIS B2710-2:2020) もある。

ここではキャブの座席のフロントバネを例題として選び、ステップ 2 としての PSD の適用を行い、そのバネの実体化を試みるものとする。

ステップ 1 で得られた設計変数範囲解の 1 例として、キャブのフロントバネについて検討する。図 9 の左上図からそのバネ定数は現行値の 81%から 88%の範囲であればよいことが分かる。現行値は 47.4 (N/mm) であるので、ステップ 1 での範囲解は、[38.39, 41.7] (N/mm) であり、その境界値の選好度は図 5 より、それぞれ 0.5 と 1.0 となる。

前述したように対象とする機能要素の実体化のためのなんらかの設計手法は機能要素ごとに存在する。キャブのフロントバネの場合、対象とするばねが JIS B 2704-1 : 2018 で規定される圧縮・引張のコイルバネであるとする、そのバネ定数 k は

$$K = Gd^4 / (8NaD^3) \quad (1)$$

で与えられる。ここで G (N/mm²): 横弾性係数, d (mm): 材料の直径(mm), Na: 有効巻数, D (mm): コイル平均径である。したがって k を性能とし, d, Na, D を設計変数として (G は材料定数とし, 設計変数から外す), 再度 PSD 手法を適用する。つまりキャブのフロントスプリングモデルとして与えられた k の範囲を実現する d, Na, D のそれぞれの範囲を求めることになる。

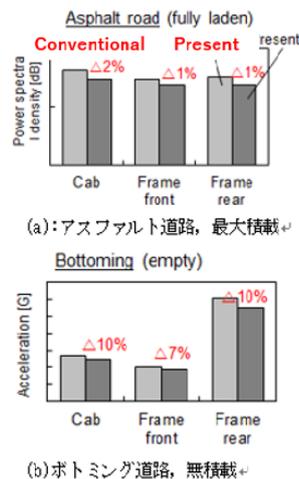


Fig.8 Performance Results obtained by conventional design method and PSD and PSD method

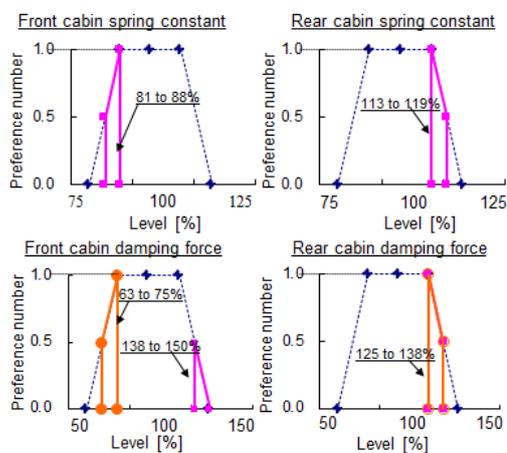


Fig.9 Interval Solutions with Preference for Design Parameters

Table 3 Initial interval of spring constant of front spring in cab and its narrowed interval by PSD method

Initial interval	Narrowed interval
[38.39, 41.7]	[39.65, 40.78]

Table 4 Initial intervals of dimension specifications of front spring in cab and its narrowed intervals by PSD method

Design variable	Initial interval	Narrowed interval
d	[7, 7.4]	[7.39, 7.4]
Na	[6, 8]	[6.0, 6.01]
D	[50, 100]	[50.0, 50.4]

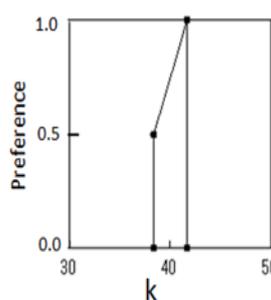


Fig.10 Initial interval with preference for spring constant (Front spring in cab)

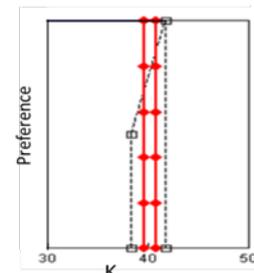


Fig. 11 Narrowed interval for the spring constant (Front spring in cab)

文 献

ステップ2としてのPSDの適用について説明する。性能としてのバネ定数の初期範囲と選好度分布は表3および図10に示す。式(1)の設計変数 d, Na, D のそれぞれの初期設計範囲は表4に示す。選好度分布は範囲内で同等と考え、すべて1とした。性能と設計変数の関係式は式(1)として与えられている。

PSD手法を適用した結果である性能 K について、図11の赤線の範囲および表3に示す。性能の範囲を実現する3設計変数の範囲解を表4に示す。

以上のステップ2の結果より、 d, Na, D の結果範囲内の任意の数値の組合せにより、性能 K の値はその範囲解内に実現できるので、これらの情報をもとにバネの販売業者から購入するか、製作依頼することになる。すなわち1D設計の結果から実際の機能要素の実体化がPSD手法により達成されたことになる。

5. まとめ

設計プロセスとしての構想設計、初期設計、詳細設計における機能性、多目的性、不確定性、満足性、そして初期設計から詳細設計への連結性について、一般的な設計の考え方や1D設計等の考え方をい、ポイント設計手法およびセットベース設計手法の比較対照を行って、後者に優位性があることをおもに工数、処理時間の観点から整理・説明を行った。またこれらの諸特性を一貫した整合性をもって実現する手法として、著者らが提案している選好度を基盤とするセットベース設計手法(PSD)手法を2段階に適用する手法に関する考え方を提案・説明した。

提案した考え方の有効性を示すために、具体的設計課題としてトラックの乗り心地設計を用いた。その結果として提案手法の考え方が有効であることを示した。なお、例題に関して、PSDのステップ1での適用内容については株式会社日野自動車との共同研究であることを記して謝意を表す。

- (1) Nahm, Y.E. and Ishikawa, H. , Representing and aggregating engineering quantities with preference structure for set-based concurrent engineering, Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol.13, No.2(2005), pp.123-133.
- (2) 南, 石川, 初期設計段階におけるセットベース多目的最適化(第1報), 自動車技術会論文集, 36巻6号(2005), pp.157-162.
- (3) 石川, 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).
- (4) 柿沼, 榎本, 石川, 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 pp.1916-1920.
- (5) 石川, 1DCAE+MBD シンポジウム 2019, (2019,12), No.19-334.