

設計意図を反映した評価指標に基づくロバスト設計手法の提案

—フロントサイドメンバの構造設計への適用—

Proposal of a Robust Design Method Based on Evaluation Indices Reflecting Design Intent

: Application to Structural Design of Automotive Front-Side Frame

○宮澤 健太郎 (明治大学大学院理工学研究科) *1 安藤 聖和 (明治大学理工学部) *2
 中川 裕介 (明治大学理工学部) *3 井上 全人 (明治大学理工学部) *4

*1 Kentaro Miyazawa, Graduate School of Science and Technology, Meiji University
 1-1-1 Higashi-Mita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan, ce222081@meiji.ac.jp

*2 Seina Ando, Department of Mechanical Engineering Informatics, Meiji University

*3 Yusuke Nakagawa, Department of Mechanical Engineering Informatics, Meiji University

*4 Masato Inoue, Department of Mechanical Engineering Informatics, Meiji University
 1-1-1 Higashi-Mita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan, m_inoue@meiji.ac.jp

キーワード: ロバスト設計, セットベース設計, 多目的満足化, 設計支援

1. 緒言

製品には誤差要因の影響を受けないロバスト性の高い設計を行う必要がある。従来、製品の設計においては高いロバスト性を確保するためにパラメータ設計が用いられてきた。しかし、パラメータ設計では最適条件が制御因子の水準値外に存在する可能性があることや、設計初期段階での設計パラメータには不確実な設計情報が含まれることが指摘されていた。

そこで、本論文では、不確実な設計情報が含まれる設計初期段階においても対応するために、多様な多目的満足解を導出するロバスト設計手法を提案する。不確実性を有する設計変数および性能を範囲値で表現することで、多目的性能を満足する設計解集合を導出可能なセットベース設計手法に基づき、全ての要求を満足する解集合を導出し、導出した解集合を設計者の設計意図を数値化した指標により評価することで、得られた多様な設計解集合を可視化する。提案手法を自動車のフロントサイドメンバの構造設計に適用することで、設計初期段階における設計者の意思決定支援としての有効性を示す。

2. 設計意図を反映した設計解の評価指標

本研究で用いるセットベース設計手法⁽¹⁾は、不確実性を有する設計変数と要求性能の値を範囲値として定義し、範囲値を有する設計解（以下、範囲解）を導出し、設計の進行とともに設計解を絞り込むことで設計解を導出する。設計者の設計意図を選好度として数値化することで、設計変数と性能に対する設計者の満足度合を評価する。設計者が最低限許容する値を好みさ 0、最も望ましい値を好みさ 1 と定義する⁽²⁾。

定義した設計変数を任意の分割数に等分割し、実験計画法などにより得られた設計変数と性能の関係式を基に、設

計変数の各分割範囲が実現可能な性能の範囲値を粒子群最適化アルゴリズム(PSO)により導出し、全ての要求性能の範囲を同時に満足する設計解を範囲値で導出する。設計変数の分割数を 2 に設定した場合の範囲解の導出例を図 1 に示す。

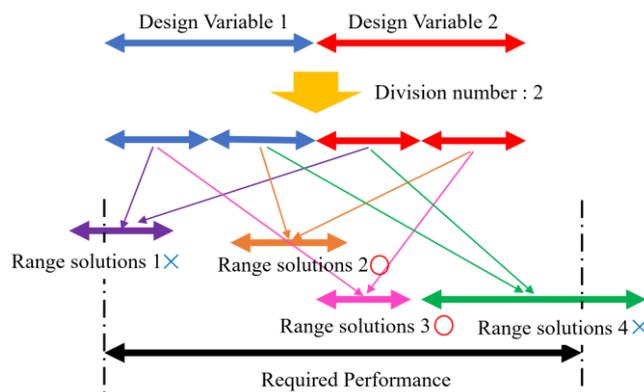


Fig.1 Deriving range solutions (division number 2)

セットベース設計手法で導出した設計解集合に設計者の意図を反映する評価指標を適用する。評価指標についての詳細を以下に示す。

2.1. 設計変数の好みさ DVP

設計変数に対する設計者の好みさを表す指標 DVP (Design Variable Preference) を式(1)に示す。分割範囲の最小値を DV_{min} 、最大値を DV_{max} 、選好度の関数を $F(x)$ とする。また、DVP の算出例を図 2 に示す。赤色の範囲のような選好度の高い範囲は DVP も高くなり、青色の範囲のような選好度の低い範囲は DVP も低くなる。

$$DVP = \frac{\int_{DV_{min}}^{DV_{max}} F(x) dx}{DV_{max} - DV_{min}} \quad (1)$$

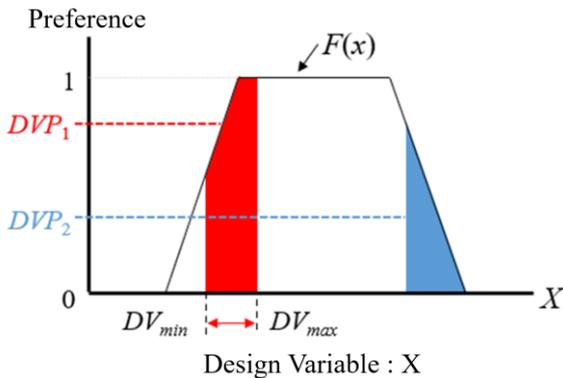


Fig.2 Design Variable Preference (DVP)

2.2. 性能の好ましき PP

性能に対する設計者の好ましさを表す指標 PP (Preference of Performance)を式(2)に示す. 分割範囲の最小値を P_{min} , 最大値を P_{max} , 選考度の関数を $G(x)$ とする. また, PP の算出例を図3に示す. 緑色の範囲のような選好度の高い範囲は PP も高くなり, 黄色の範囲のような選好度の低い範囲は PP も低くなる.

$$PP = \frac{\int_{P_{min}}^{P_{max}} G(x) dx}{P_{max} - P_{min}} \quad (2)$$

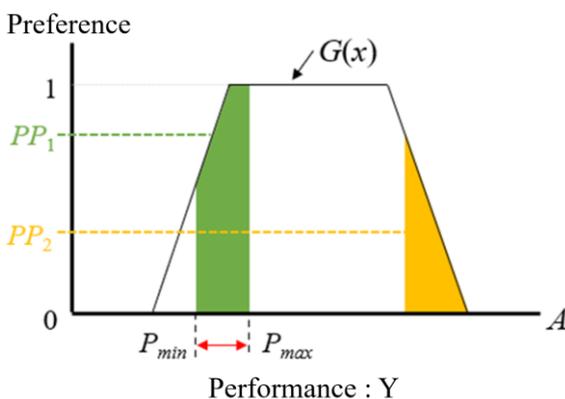


Fig.3 Preference of Performance (PP)

2.3. 性能のばらつき R

性能のばらつきを表す指標 R (Robustness of Performance)を式(3)に示す. 性能の最小値を P_{min} , 性能の最大値を P_{max} , 全体の性能の最小値を P_{min}^* , 全体の性能の最大値を P_{max}^* とする. また, R の算出例を図4に示す. 紫色の範囲の方がオレンジ色の範囲よりも性能の取りうる値の範囲が狭いため, 紫色の範囲の方が, ばらつきが小さく望ましい.

$$R = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}^* - P_{min}^*} \quad (3)$$

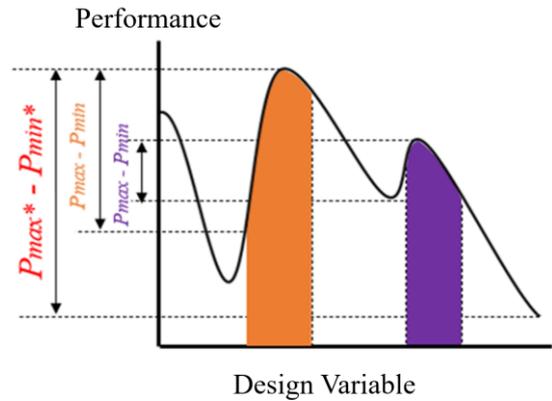


Fig.4 Robustness of Performance (R)

2.4. 性能の評価 Rp

性能は, 性能の好ましき PP と性能のばらつき R に基づき, 式(4)に示す指標により評価し, 式(5)に示す指標 Rp (Performance Rating)により正規化し, 範囲解を比較する.

$$value = \frac{PP}{R} \quad (4)$$

$$Rp = \frac{value}{value_{max}} \quad (5)$$

2.5. 設計全体の評価 Rall

設計変数と性能のバランスを評価するために, 設計変数と性能の評価値を統合させた全体評点 $Rall$ を定義し, 式(6)に示す. このときの DVP は各設計変数についての DVP を平均した値である. また, 式(7)に示すように, このときの性能の好ましき PP と性能のばらつき R はそれぞれ各指標に重み係数 α_i をかけて足した値である.

$$Rall = \sqrt{DVP \times Rp} \quad (6)$$

$$value = \frac{\sum_1^n PP_i \alpha_i}{\sum_1^n R_i \alpha_i} \quad (7)$$

3. フロントサイドメンバの構造設計への適用

3.1. フロントサイドメンバ概要

自動車車体構造の公開モデルから, フロントサイドメンバ部を抜き出し, 形状の特徴を抽出した図5に示すCADモデル⁽³⁾を用いた.

設計変数は, 図6に示すようにフレーム板厚・フレーム幅・フレーム高さ・折れ点位置・スティフナー板厚・スティフナー前端位置・スティフナー後端位置・スティフナーフランジの8変数を設定し, 設計変数のとりうる設計範囲を表1に示す. 性能は静的曲げ剛性・タイダウン強度・最大反力・平均圧壊荷重・質量の5性能を設定した.

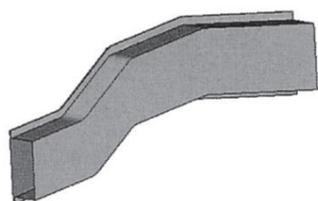


Fig.5 Parametric CAD model⁽³⁾

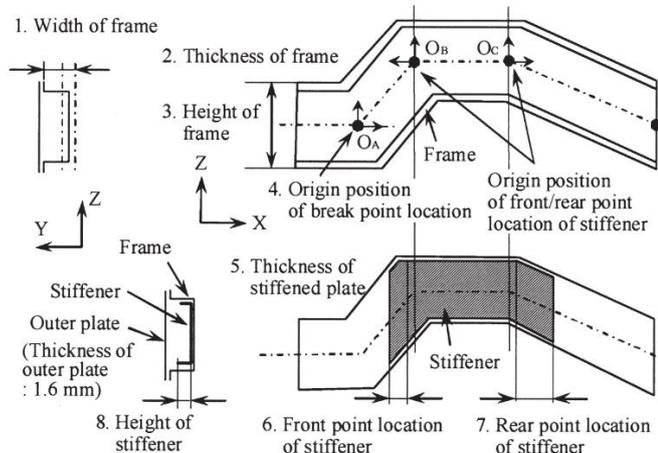


Fig.6 Design variables of front-side frame model⁽³⁾

Table1 Setting of design variables⁽³⁾

No.	Design variables	Domain (mm)
1	Width of frame	[47, 67]
2	Thickness of frame	[1.6, 2.3]
3	Height of frame	[150, 170]
4	Break point location (O_A)	[-30, 20]
5	Thickness of stiffener	[1.0, 2.0]
6	Front point location of stiffener (O_B)	[10, 50]
7	Rear point location of stiffener (O_C)	[10, 100]
8	Height of stiffener	[5, 30]

3.2. 設計変数および要求性能の選好度の設定

設計者の設計意図が設計解にどのように反映されているのかを検証するために、異なる3人の設計者の設計意図を選好度の違いにより表現した。本研究では、性能を重視する設計者A、性能とコストのバランスを重視する設計者B、コストを重視する設計者Cとした。3人の設計者の設定した設計変数の選好度の一部を図7に示す。要求性能の選好度については、図8のように設定した。

例えば、性能を重視する設計者Aの場合、フレーム幅として最も幅が広がる67mmを選好度1.0として設定し、フレーム幅が狭くなる範囲は性能確保が難しいとして選好度を下げたが、フレーム幅が最も狭くなる47mmでも設計値としては設定可能として選好度を0.3とした。要求性能に関しては、質量は軽ければ軽いほどよく、目標としては7790g以下が望ましいが、5270g以下とすればクラストップの軽量化サイドメンバ構造が実現できるという設計者の設計意図を表現した。以上のように、設計変数と要求性能に関する設計者の設計意図を選好度により表現可能である。

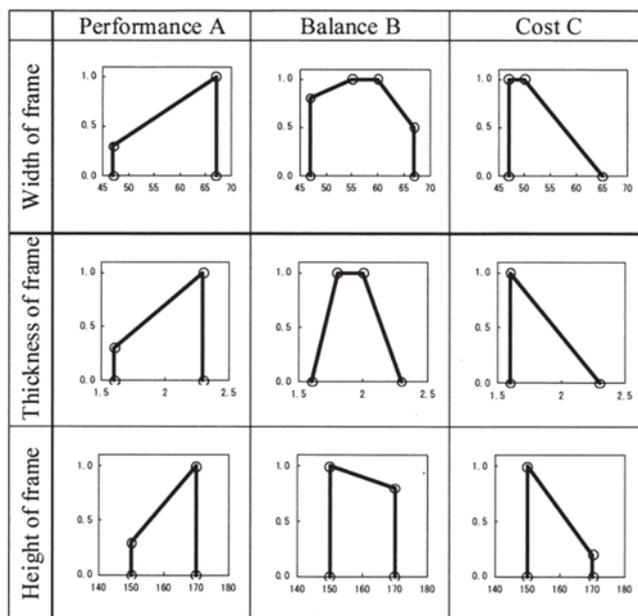


Fig.7 Preference of design variables⁽³⁾

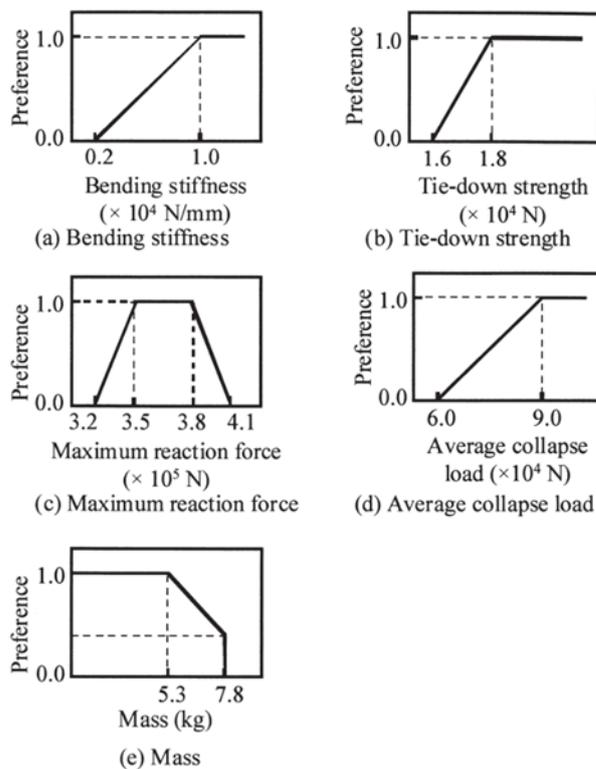


Fig.8 Preference of required performance⁽³⁾

3.3. 要求性能の重みづけ

設計対象に複数の性能が要求される場合、要求される性能間には重視する性能や、他の要求性能と比較すると重視度が下がる要求性能がある。要求性能に対する重視度をフロントサイドメンバの構造に反映させるため、図8に示した各要求性能に重みづけを行った。

性能重視、バランス重視、コスト重視の3パターンを表2に示す。重みづけには各要求性能間の重視度を相対的に表すため、1から10までの係数を各要求性能に割り振った⁽³⁾。2.5節の評価指標の際に重み係数として導入した。

Table2 Weighting of required performances⁽³⁾

	Emphasis on performance	Emphasis on balance	Emphasis on cost
Bending stiffness	7	2	2
Tie-down strength	10	8	3
Clash	Reaction force	4	6
	Collapse load	10	6
Mass	3	6	10

3.4. 結果および考察

3.4.1. 多目的満足解の導出 セットベース設計手法で導出した解集合に、評価指標を適用することで可視化された多目的満足解に関する有効性を検証する。

コストを重視する設計者 C により導出された設計変数の設計解集合の分布を図 9 に示す。図中の点は要求性能を満足する範囲解を示す。三角の点は最も性能の好ましき R_p の高い範囲解、四角の点は設計変数の好ましき DVP の高い範囲解、大きい丸点は全体評価 $Rall$ の高い範囲解を示す。

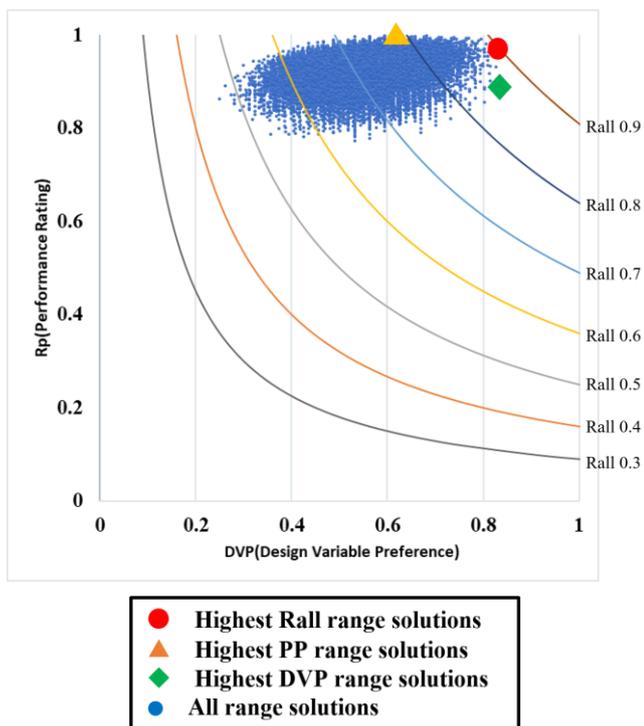


Fig.9 Relation between DVP and Rp (Designer C)

これより、設計者 C は設計変数の好ましき DVP を重視するか、設計変数の好ましき R_p を重視するかによって、設計解の選択をすることが可能である。また、 $Rall$ と R_p が最も大きい範囲解の設計変数と要求性能の領域をそれぞれ図 10 と図 11 に示す。設計変数と要求性能の領域が、設計者が設定した選好度内に収まっており、5 つの性能を同時に満足する多目的満足解が導出されたことが確認された。

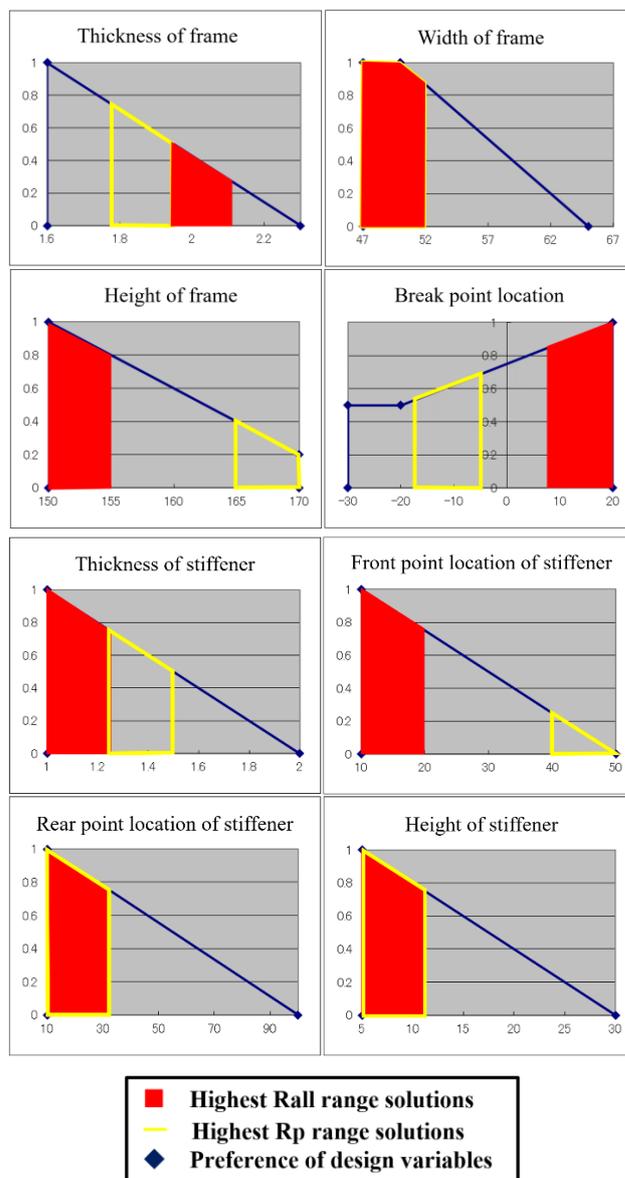


Fig.10 Preference of design variables (Designer C)

同様に、性能を重視する設計者 A とバランスを重視する設計者 B についても検証した結果、5 つの要求性能を同時に満足する多目的満足解が導出されたことが確認された。

3.4.2. 設計意図の違いによる解の比較 前項で得られた性能重視、バランス重視、およびコスト重視により導出された 3 つの設計解集合を比較し、設計者の意図が設計解集合にどのように反映されているのかを考察する。

5 つの性能のうち質量と他 4 つの性能がトレードオフの関係にあるため、図 12 に示すように静的曲げ剛性と質量の関係について考察する。また、要求性能を満たす範囲解は多数存在するため、性能重視、バランス重視、コスト重視の場合において $Rall$ が最大のときの性能で比較を行った。図 12 より、コスト重視の設計者 C は質量が軽い分布を得ており、性能重視の設計者 A は、質量は大きい、性能の高い分布になっており、バランス重視の設計者 B はその中間付近の分布になっている。したがって、各設計者の設計意図が反映された多目的満足解が導出されていることが示された。

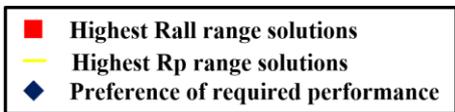
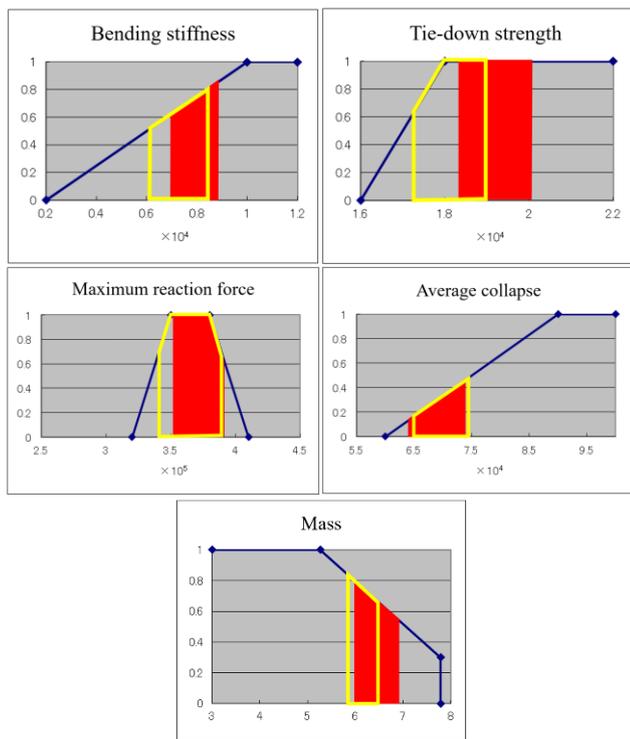


Fig.11 Preference of Required Performance (Designer C)

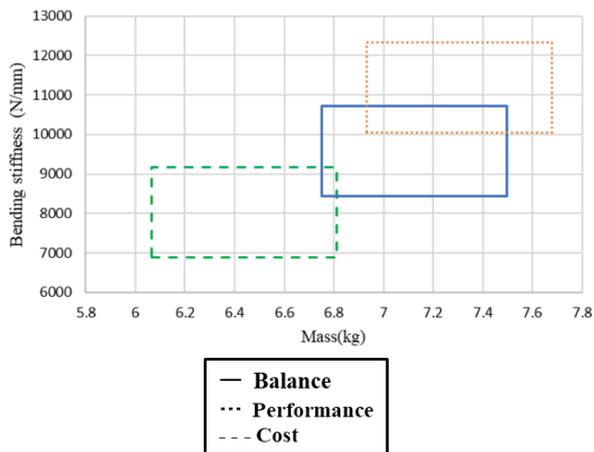


Fig.12 Relation between Mass and Bending Stiffness

3.4.3. 異なる設計意図のすり合わせ 前項で各設計者の設計意図が設計解に反映されていることを示したが、設計者によって好ましい設計解の領域は異なる。そのため、実際の設計では設計領域のすり合わせを行う必要がある。図13に設計者A~CのRall, Rp, DVPが最大のときの設計解の領域を、質量と曲げ剛性の関係を例に示した。3人の設計者の設計解の領域が重なる部分を塗りつぶした。

この塗りつぶした領域周辺の設計解集合が3人の設計者にとって望ましいと考えられる。仮にお互いの設計解集合が一致していない場合でも、分布の傾向に沿ってすり合わせを行える。

このように、多様な設計解集合を可視化することによって、設計者の意思決定支援が可能であることが示された。

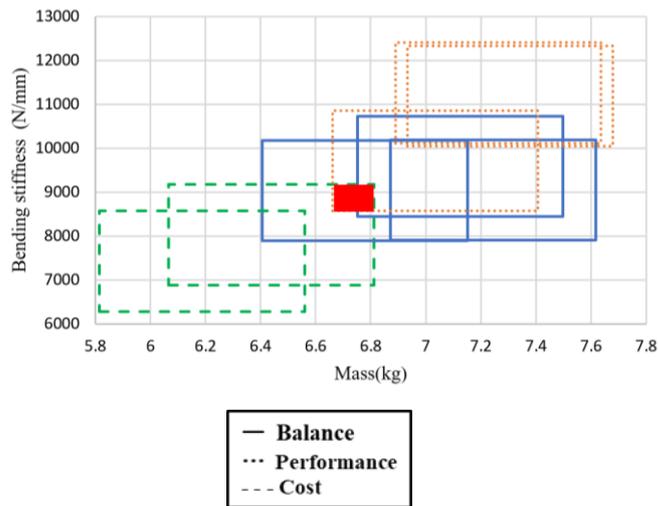


Fig.13 Alignment of different design intents

4. 結 言

本研究では、複数の要求性能において、多様な範囲解を導出するロバスト設計手法について提案した。設計者の意図を反映した評価指標を用いることにより、設計者が多様な設計変数と要求性能の中から選択を行うことができるように可視化を行った。

自動車のフロントサイドメンバの構造設計に適用することで、設計初期段階における設計者の意思決定支援としての有効性を示した。

文 献

- (1) Inoue, M., Nahm, Y-E., Okawa, S. and Ishikawa, H.: Design Support System by Combination of 3D-CAD and CAE with Preference Set-Based Design Method, Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol. 18, No. 1, 41-53, 2010.
- (2) 小野田裕太, 佐藤伸樹, 山田周歩, 井上全人: 設計変更に対応するための意思決定支援システム, Design シンポジウム 2019(2019), 224-228.
- (3) 井上全人, 他: 初期段階におけるセットベース多目的設計最適化 (第4報: 3D-CAD, CAE との連携によるフロントサイドメンバへの適用), 自動車技術会論文集, Vol.39, No.6, 283-288, 2008.