

論文・解説

44

## 自動車車体構造の設計支援技術の開発 Development of Computer Aided Designing Technology for Car Body Structure Design

釧持 寛正\*<sup>1</sup> 小平 剛央\*<sup>2</sup>  
Hiromasa Kemmotsu Takehisa Kohira

### 要 約

マツダでは、軽量かつ高性能な車体構造の実現のため、車体構造最適化技術（MDO：Multidisciplinary Design Optimization）を用いている。しかし、シミュレーションで定量的に解析できない性能は取り扱えないため、MDOで求められた結果からだけでは商品に反映する仕様を設計者で判断できないという問題を抱えていた。そこで、性能と設計変数との関係を関数式で表現し、設計変数の性能への影響度を質量効率として定量化する新たな寄与・可視化分析手法を開発した。本手法の特徴は、設計者の意思決定・判断の支援を目的に、設計者の構造発想を促すための可視化方法を取り入れていることである。本手法を商品開発に適用した結果、性能間のトレードオフ関係の定量的な可視化が可能になり、質量効率の高い構造仕様決定を効率的に行える開発プロセスへ改善することで、軽量化と性能の両立に貢献した。

### Summary

Aiming at a lightweight and high-performance vehicle body structure, Mazda uses Multidisciplinary Design Optimization (MDO) technology. However, as the MDO handles only quantitatively analyzable performances in simulations, designers are unable to make decisions on vehicle body specifications only by result of MDO. As a countermeasure, a contribution and visualization analysis method was developed, which expresses the relation between vehicle performance and design variables by polynomial regression models, and quantifies the contribution of design variables to the vehicle performance as a mass efficiency. The “visualization analysis”, a feature of this method, prompts designers to conceive structural ideas, supporting their making judgments/decisions. Application of this method to product development allowed the quantitative visualization of the trade-off relations between vehicle performances, and contributed to the efficiency of the development process, weight reduction and improvement of the vehicle performance.

**Key words** : Vehicle Development, Body Structure, Body Design, Weight Reduction

### 1. はじめに

近年、顧客ニーズ等の多様化に伴い、自動車の構造や制御・安全システムは複雑化の一途をたどっており、商品性能の向上が求められる一方、各市場の環境（CO<sub>2</sub>）規制強化に伴い、燃費に直結する軽量化も同時に図る必要がある。そこで、自動車業界では、自動車を丸ごと机上で効率的に開発を行う手法として、モデルベース開発（MBD：Model Based Development）<sup>(1)</sup>に着目している。

ボディー設計領域では、MBDの技術の一つとして、性能と設計変数との関係を実験計画法のサンプル点から、応答曲面という近似モデルを導出し、応答曲面内で性能を満足しながら軽量化構造を探索する車体構造最適化技術（以下、MDO）<sup>(2)</sup>が提案されている。しかし、Fig. 1に示すように、商品性能開発の中で、MDOで取り扱える要件は衝突、車体剛性などシミュレーションで定量化できるものに限られるため、デザインや製造方法などの要件は取り扱うことができない。そのため、MDOにより、

\*1～2 技術研究所  
Technical Research Center

商品性能を満足する構造仕様が決まったとしても、MDOで考慮していない要件で性能を満足しない場合、MDOの結果をそのまま図面に反映することができなかった。

そこで、設計者がデザインなどの他要件を含め構造検討ができるようにするため、最適仕様の結果を示すのではなく、性能に影響のある設計変数のみを抽出し、各変数の性能に対する影響度合いを定量化する設計支援技術を考案した。また、設計者が軽量化や商品性能間のトレードオフ関係を考慮しながら直観的に構造発想できる可視化方法も取り入れた。本論文では、本手法の概要と商品開発での適用事例について報告する。

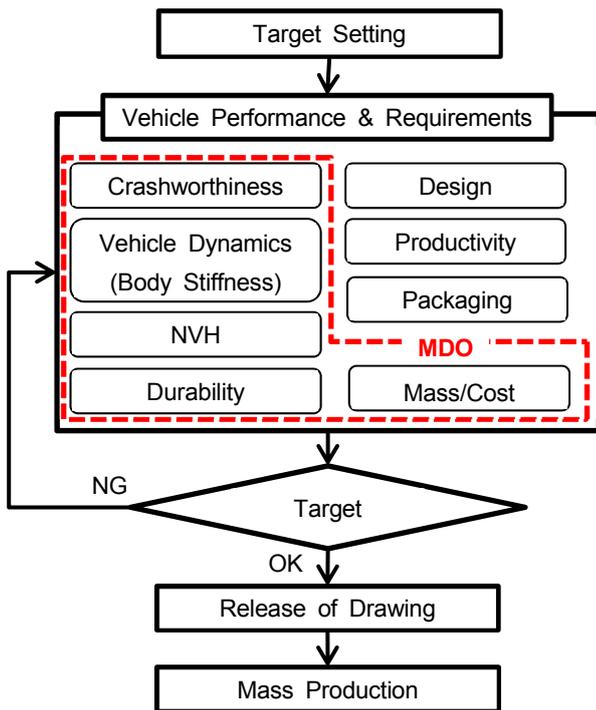


Fig. 1 Flow of Vehicle Performance Development

## 2. 部品影響度を明らかにする技術

### 2.1 従来の寄与分析手法の問題点

本手法の特徴は、性能と各設計変数との関係を関数式で表現し、設計変数にかかる偏回帰係数を性能に対する設計変数の影響度として定義することにある。これは、性能は設計変数の仕事により成り立っていることから、各設計変数の仕事の足し合わせで性能を表現できると考えたためである。影響度を計算する一般的な統計手法の一つとして、式(1)に示すような関数を考える重回帰分析がある。

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^D \beta_j x_j + e \quad (1)$$

y は商品性能の応答値、x は設計変数、βは偏回帰係数、e は残差である。本論文では、この偏回帰係数 β を

影響度と定義している。ここで重要となるのが、式(1)の応答値y に影響のある設計変数のみを選択し、重回帰分析で影響度 β を導出することである。影響のある変数のみを選択する手法としてはステップワイズ法が広く用いられている。ステップワイズ法は、設計変数を取り入れたり、取り除いたりしながら、ある評価指標を満足するか否かを判定し有意な関数式を求めるとの手法である。評価指標には、各変数にかかる偏回帰係数 β の信頼度(変数の影響度の有無の判断に使える指標)を表すp値が用いられる。しかし、p値の閾値によって選択される変数が変化するため、影響のある変数のみを選択できないという問題がある。

Fig. 2は、ステップワイズ法について、正解の分かっている関数式(影響のある変数30と影響のない変数10を組み合わせた式)で、p値の閾値を変化させた時の選択される設計変数を正解率として検証した結果である。閾値は、一般的に偏回帰係数の信頼度の判別に用いられる0.05未満と、より閾値を厳しくした0.03未満、0.02未満の3ケースで検証した。どの場合も正解率が目標の100%に達しておらず、影響のある変数を選択できていないことが分かる。よって、閾値により制約(上限)を設け変数選択を行う従来手法では、影響のある変数を全て選択することができないリスクを抱えており、設計者が誤った意思決定・判断をする可能性がある。

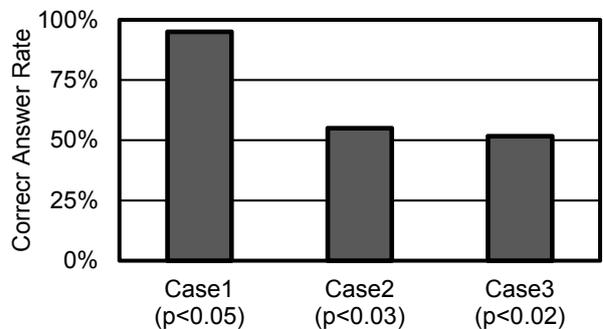


Fig. 2 Correct Answer Rate of Methods

### 2.2 寄与分析手法の問題点の解決手法

2.1節で説明した影響のある変数を選択できない問題の要因は、選択される変数によって変化するp値に対し最適な閾値を決定できないことである。本要因については、近年、アメリカ統計学会でも問題提起されており<sup>(3)</sup>、閾値に依らない変数選択手法が必要である。

そこで、閾値を変数の選択の指標に用いず、選択された変数の偏回帰係数のp値の総和を求め、そのp値の平均値が最小となる、変数組み合わせを最適化手法で選択し、重回帰分析する寄与分析手法を開発した(Fig. 3)。これによって、選択された変数全ての信頼度が高い関数式を求めることが可能になる。なお、重回帰分析で用いる

データは、従来のMDOの実験計画法を用い、また、最終的な収束判定は、決定係数 $R^2$ 、情報量基準量BICなどを用いて総合的に判断している。

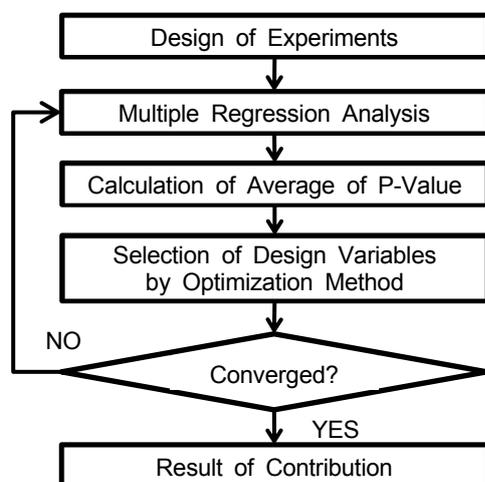


Fig. 3 Flow of Development Method

2.1節で従来手法の検証に用いた関数式に関して、本開発手法を適用した結果をFig. 4に示す。従来手法で一番正解率が高かったCase 1の約95%に対して、本開発手法では100%となっており、影響のある設計変数全てが選択できていることが分かる。

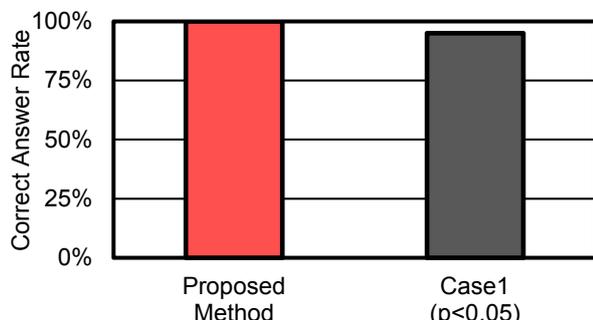


Fig. 4 Correct Answer Rate of Methods

### 3. 設計者の構造発想を促す可視化方法

開発した寄与分析手法によって性能に影響のある設計変数のみ抽出できるが、影響度には各設計変数の質量が考慮されておらず、また各性能で評価指標の単位系や水準が異なっているため、経験の浅い設計者の場合、設計知見の発掘において誤った解釈をする可能性がある。

そこで本章では、設計者が容易に理解でき構造発想を促すことができる可視化手法として、軽量化視点の導入と性能間の影響度水準の統一化について述べる。

#### 3.1 軽量化視点の導入

2.1節の式(1)のように本開発手法により得られたモデル式は、以下のような線形重回帰式で表される(再掲)。

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^D \beta_j x_j + e \quad (1)$$

更に、各変数の影響度はこの式を設計変数で次式のように偏微分することでも求めることができる。

$$\frac{\partial y}{\partial x_j} = \beta_j, j = 1, 2, \dots, D \quad (2)$$

式(2)で求められた影響度は、すなわち、各設計変数の単位当たりの応答値 $y$ への影響度と解釈できる。これを、次式のように単位板厚あたりの質量 $M$ で偏微分すると、単位質量あたりの影響度 $\beta'$ となり、影響度と質量を考慮することが可能になると考える。

$$\frac{\partial \beta_j}{\partial M_j} = \beta'_j, j = 1, 2, \dots, D \quad (3)$$

Fig. 5は、現行量産車を対象にねじり剛性を応答値とした場合の分析結果と対象設計変数の単位板厚あたりの質量を表しており、棒の長さが長いほど、それぞれ影響度が高い、質量が大きいことを示している。今回は5個の設計変数のみ表示しているが、実際にはそれ以上の設計変数を考慮に入れる必要があり、仕様変更時の性能の変化量と軽量化量を考慮しながら構造仕様を導出するのは困難である。

これに対し、Fig. 5の影響度に式(3)を適用したものがFig. 6であるが、棒の長さがFig. 5に比べ変化していることが分かる。本結果においては、設計変数3が、質量増加を最小限にしながら効果的に性能向上を図れる設計変数であるといえる。このように、これまで性能に対する設計変数の影響度情報に対して、各設計変数の質量情報を考慮しながら軽量化構造を検討していたものが、一つの指標で見ることができると、軽量化構造の導出の効率化とともに、検討漏れをも防ぐことができると考える。

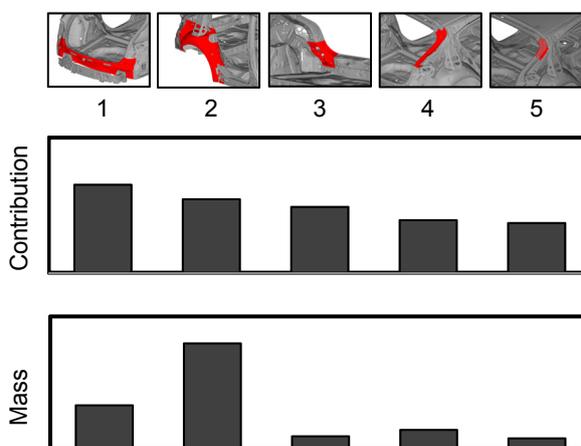


Fig. 5 Contribution and Mass

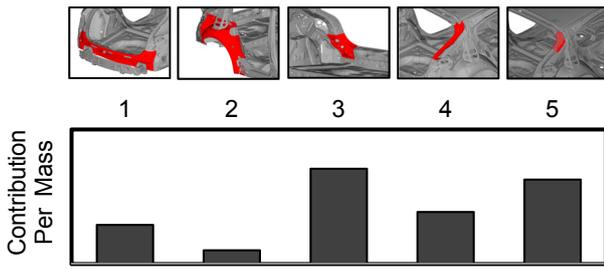


Fig. 6 Contribution per Mass

3.2 性能間の影響度水準の統一化

各性能に対する各変数の影響度を同じ水準で比較できるようにするため偏回帰係数を標準化する。標準化とは、サンプルデータを平均が0、標準偏差が1のデータに変換する操作のことをいい、以下の式で与えられる。

$$\beta_j'' = \beta_j' \cdot \frac{S_j}{S_y}, j = 1, 2, \dots, D \quad (4)$$

$S_j$  は  $x$  のサンプルの標準偏差,  $S_y$  は  $y$  のサンプルの標準偏差である。標準化のイメージをFig. 7に示す。左側には標準化前, 右側には標準化後の衝突, 車体剛性のサンプル分布の例を示している。左側では衝突, 車体剛性の両性能の分布が異なるため, サンプルから求められる影響度をそのまま比較できない。一方, 右側のようにサンプル分布を同一にすることで, 求められる影響度の水準を同一に扱えるので, 相対的に比較することができるようになる。標準化は, 一般的に単一性能における設計変数の係数の水準を揃え影響度を比較するために用いられるが, 今回, サンプル分布の同一性に着目し, 性能間の影響度の比較に応用したものである。

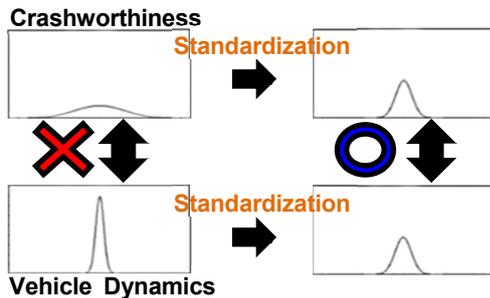


Fig. 7 Standardization

標準化処理前後の影響度の結果をTable 1, 2に示す。性能の応答値は, 衝突, 車体剛性, NVHの評価指標の一部を抜粋したものである。表中の値は各設計変数の性能に対する影響度を表しており, “-” は, 性能に対して影響がないことを意味している。Table 1より, 各性能の単位系が異なると各評価指標の値に二ケタ以上差がある。

この値をそのまま解釈すれば, 影響度の大きい性能のみに着目する可能性がある。このように, 単純に影響度を求めるだけでは, 性能間を定量的に比較・評価することができない。これに対し, 式(4)を用いて, Table 1の偏回帰係数を標準化したものがTable 2であるが, Table 1と比較して各性能間の影響度の水準が統一化されていることが分かる。この状態であれば性能間を同じ水準で比較・評価することができ, 影響度の大きさによって優先度を付け構造検討ができるため, 新たな構造仕様の発想が期待できる。

Table 1 Contribution of Vehicle Performance

Design Variable	Crashworthiness [mm]	Vehicle Dynamics [mm]	NVH [Hz]
1	-	0.11	0.36
2	15.46	-	0.38
3	47.35	-	-
4	-	0.05	0.27
5	16.91	0.03	0.27

Table 2 Standardized Contribution of Vehicle Performance

Design Variable	Crashworthiness [-]	Vehicle Dynamics [-]	NVH [-]
1	-	0.19	0.18
2	0.12	-	0.17
3	0.42	-	-
4	-	0.10	0.16
5	0.13	0.05	0.12

4. 商品開発への適用事例

本章では, 本設計支援技術を商品開発に適用し, 軽量化構造仕様の導出に貢献した事例について報告する。設計変数は最大104変数(184部品の板厚), 性能評価項目は, 衝突, 車体剛性, NVHなど129項目である。なお, 設計変数として取り扱う部品には, フロントフレーム, サイドフレーム, リアサイドフレーム, ルーフレールなど車体骨格部品が主に含まれている。

適用した結果の一部を抜粋したものをTable 3に示す。セル内の色は各性能に対する設計変数の影響度を表しており, 赤は板厚を上げると性能が向上するもの, 青はその逆で板厚を上げると性能が悪化するものを表している。

色の濃淡は影響度合いを示しており、濃いものほど影響度が高く、無色のものは影響がないものである。設計変数3のように性能間（AとE）で赤、青が存在する場合は、トレードオフの関係があることを意味している。これが軽量化を阻害している要因である可能性がある。このように各評価項目を横並びにし比較することで、性能間の関係を把握でき、的確な意思決定が可能になり軽量化構造の導出が効率的に行える。

また、本結果は質量効率として影響度を算出しているため、単一性能内だけでも質量増加を抑えながら性能を向上させる部品の発掘にも有効である。例えば、性能項目Fの設計変数6は、青で示されており、板厚を下げて性能向上するもの、つまり軽量化と性能向上を同時に達成できるもので積極的に採用したい設計変数である。

更に本適用においては、これまで設計者が持っていた知見を裏付ける結果とは別に、これまで考えていなかった新たな知見も見つかっており、新知見発掘にも本手法は有効であると考えられる。

Table 3 Contribution of Vehicle Performance

Design Variable	Vehicle Performance					
	A	B	C	D	E	F
1				Red		
2				Blue		
3	Red				Blue	
4	Red				Red	Red
5				Red		Blue
6						Blue
7			Red	Red		
8				Red		
9	Blue			Red		
10	Red	Blue	Blue			

## 5. おわりに

本論文では、従来の車体構造最適化技術（MDO）<sup>②</sup>では、困難であった軽量化視点での設計者支援技術として、設計変数の影響度を複数性能間で統一的に比較・可視化分析できる寄与分析手法を開発した。本手法では、影響のある設計変数の選択手法の工夫、影響度の質量効率への変換、複数性能間で統一的に比較できる標準化計算、それらを設計者が直感的に理解する可視化手法を考案した。

実際の商品開発へ適用した結果、これまで設計者が持っていた知見を裏付ける結果とともに、新たな知見も見つかり、今後、設計知見の検証や発掘も期待できる。

しかしながら、実際の商品開発のような設計変数、性

能評価項目ともに、100を超える場合、設計者の分析負担が大きいことも新たに分かった。

今後も、設計者の分析負担の低減技術や、本論文では割愛したが、本手法は、一部非線形性の強い性能の影響度計算に課題が残っており、それらの課題解決のための技術開発にも取り組んでいく。

## 参考文献

- (1) 藤川智士：マツダの目指すモデルベース開発，[マツダ技報, No.31, pp.44-47 \(2013\)](#)
- (2) 小平剛央ほか：複数性能を扱う車体構造最適化手法の開発，[マツダ技報, No.29, pp.104-109 \(2011\)](#)
- (3) <https://www.amstat.org/newsroom/pressreleases/P-ValueStatement.pdf>

## ■ 著 者 ■



釘持 寛正



小平 剛央