

論文・解説

36

# 力学的エネルギー流れの動的可視化分析手法の開発

## Development of Dynamic Visualization Method of Mechanical Energy Flow

鈿持 寛正<sup>\*1</sup> 小平 剛央<sup>\*2</sup> 岡本 定良<sup>\*3</sup>  
Hiromasa Kemmotsu Takehisa Kohira Sadayoshi Okamoto

### 要約

マツダでは、軽量かつ高性能な車体構造を効率的に開発するため、対話型設計支援技術を開発している。本技術は、軽量化に対し弱点となっている性能や構造の領域（以下、ボトルネック）を明確化し、それらボトルネックへの対策構造の導出を支援する技術である。これまで、ボトルネックの発見は可能となっており、更なる開発効率化のためには、その要因の深掘りにより性能向上に寄与する部位を特定し、効果的に対策につなげることが必要である。そこで、複雑な車体構造においても、静的なエネルギー状態だけでなく、動的なエネルギー流れを可視化することにより、設計者が性能向上に寄与する部位を効率的に発見し、エネルギー流れを形成させる視点から対策構造を導出できる技術として、力学的エネルギー流れの動的可視化手法を開発した。本手法を実構造に適用した結果、車体側面構造が性能向上に寄与する部位であることを明らかにし、車体側面構造にエネルギー流れを形成させる構造案を導出した。

### Abstract

For the efficient development of lightweight and high-performance car body structure, Mazda has developed the interactive design support technology. This technology identifies the performance and an area of the car body structure that are bottlenecks in weight reduction (hereinafter referred to bottlenecks), and supports the derivation of an improved structure for them. In addition to the identification of bottlenecks in weight reduction, for further development efficiency, it is necessary to specify the part that can contribute to improving performance by thorough analysis of factors in the bottlenecks, and effectively leads to determination of countermeasures. Therefore, we have developed a dynamic visualization method of mechanical energy flow as a technique that enables designers to discover a contributing part for performance improvement, and derive a car body structure based on the concept of transferring dynamic energy by visualizing not only static energy states but also dynamic energy states even in the complex car body structure. As a result of applying this method to an actual car body structure, it was specified that the body side structure is the contributing part for performance improvement, and we derived a car body structure to transfer dynamic energy to the body side structure.

**Key words** : Vehicle development, Body structure, Body design, Weight reduction, Visualization analysis, Ustar, U\*

### 1. はじめに

近年、多様化する顧客ニーズへの対応や商品力の差別化のため、自動車の構造や制御・安全システムは複雑化の一途を辿っている。一方、各国のCO<sub>2</sub>規制強化に伴い、燃費に直結する自動車の軽量化も重要であるが、その両立は容易ではなく、開発費用や期間の増大化を招いている。そのため、自動車業界では、実験計測のデジタ

ル化、CAE (Computer Aided Engineering)、モデルベース開発 (MBD: Model Based Development)<sup>(1)</sup> などにより開発の効率化を図っているが、背反関係のある性能間のすり合わせや軽量化との両立に開発工数を要しており、軽量かつ高性能な車体構造を効率的に開発するためには、軽量化のボトルネックとなる性能や構造の領域を発見し、重点的に構造対策することが重要である。

そのための技術として対話型設計支援技術<sup>(2)-(4)</sup>を開

\*1~3 技術研究所  
Technical Research Center

発している。現在、対話型設計支援技術によりボトルネックの発見が可能になっており、効果的に構造対策するためには、その要因を探り性能向上に寄与する部位を特定することが必要である。これまで、軽量化のボトルネックとなる性能は、例えば、側面衝突、NVH、乗り心地に係る固有値（共振周波数）で、更に操縦安定性に係る自動車の剛性性能であることが分かっている<sup>(4)</sup>。衝突性能については、材料の高強度化、フレーム断面の多断面化<sup>(5)</sup>など、軽量化の対策構造が数多く提案されている。本論文では、構造対策が難しく、かつNVH、固有値に対しても寄与のある車体剛性性能を対象にする。

質量効率の高い剛性性能を実現するためには、車体構造全体が無駄なく機能している状態が望ましいと考えている。これに対し、歪エネルギーの変化から内部の構造状態を把握する荷重伝達指標（以下、 $U^*$ ）<sup>(6)(7)</sup>が提案されている。しかし、車体構造は多層構造であるなど構造が複雑となっており、複雑構造への適用において、構造内部まで含めたエネルギー状態を可視化できる分析手法の開発が課題であった。

そこで、 $U^*$  値の 1.0 から 0.0 を十数個～数十個の領域に均等分割し、1.0（入力荷重に対して歪エネルギー変化が大きい領域）から、0.0（入力荷重に対して歪エネルギー変化が小さい領域）へ動的に可視化することでエネルギーの流れを疑似的に表現する可視化分析手法を開発した。これにより、車体全体のエネルギー流れを俯瞰でき、かつ特定の  $U^*$  値の領域に着目することにより、性能向上に寄与する部位を効率的に発見できる。

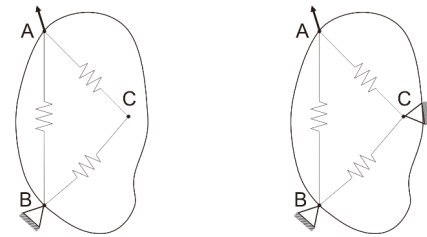
## 2. 構造内部のエネルギー流れを可視化する技術

### 2.1 従来手法とその問題点

$U^*$  解析により算出される  $U^*$  値は、各節点に拘束を負荷し、拘束有無の歪エネルギー変化から疑似的な剛性変化量を算出するものである。Fig. 1 のような単純な系において、荷重負荷部の点 A、固定部の点 B、また任意の点 C を考える。Fig. 1 (a) はオリジナル構造で、Fig. 1 (b) は、点 C に拘束を付加したときのものである。点 A に強制変位を与えたときに系 (a)、(b) の内部に蓄えられる歪エネルギーをそれぞれ  $U$ 、 $U'$  とすると、 $U^*$  値は点 C の拘束有無の歪エネルギーから式 (1) のように算出され、固定点 B で 0、荷重負荷点 A で 1 となる。仮に、任意の点 C が剛性に寄与する点の場合、強制変位させるために必要な力が大きくなり  $U'$  の増加に伴い  $U^*$  値も大きくなる。このように  $U^*$  値から入力荷重に対して寄与する部位を特定できる。

$$U^* = 1 - \left( \frac{U'}{U} \right)^{-1} \quad (1)$$

$U^*$  解析の有効性検証のため、Fig. 2 に示す四角断面の中空フレームを用いて  $U^*$  解析を実施した。境界条件は、Fig. 2(a) に示すように長手方向の端点の一方を 6 自由度

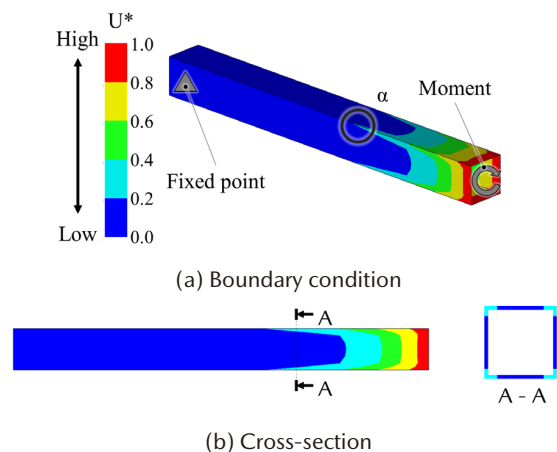


(a) Original structure (b) Restrained structure

Fig. 1  $U^*$  Analysis<sup>(6)</sup>

完全固定し、もう片方の端点に軸中心まわりのねじり荷重を与えた条件である。なお、 $U^*$  解析は強制変位を付与する必要があるため、実際には、ねじり中心から半径方向に伸ばした剛体要素の端点に強制変位を与えている。Fig. 2 (b) は、A-A 断面における  $U^*$  分布を示しており、稜線部が平面部と比較して  $U^*$  値が高くなっていることが分かる。理論上、ねじり剛性は、横弾性係数とねじり係数の積で表され、ねじり係数は、ねじり中心軸からの距離に依存し、距離が遠くなるほど高くなり、中心軸から遠い距離にある稜線部が高い  $U^*$  値を示した  $U^*$  解析の結果と一致する結果である。この結果から、 $U^*$  値を用いることにより、ある入力荷重に対する各部位の寄与を算出でき、本モデルにおいては、稜線部に荷重伝達すると考えられる。つまり荷重伝達経路の予測には、Fig. 2 (a) の  $\alpha$  部のような山部を見つけることが重要になる。なお、本論文では、 $U^*$  値は、内部の歪エネルギー変化から算出されることから、荷重伝達をエネルギー流れと定義し呼称する。

しかし、数百点数もある自動車車体構造においては、フレーム部が多層、多角構造 (Fig. 3) であるなど構造が複雑で、 $U^*$  解析結果をそのままコンタ表示するだけでは  $U^*$  値の山部を正確に判断できず、そこからエネルギー流れを予測するのは困難である。よって、複雑な車体構造においてもエネルギー流れを予測可能な可視化分析手法の開発が課題である。



(a) Boundary condition (b) Cross-section

Fig. 2 Result of  $U^*$  Analysis in Simple Frame

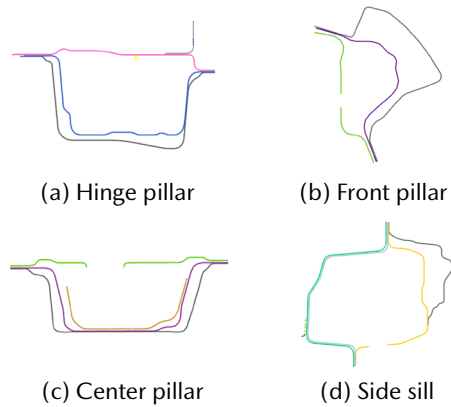


Fig. 3 Cross-section of a Car Body

## 2.2 力学的エネルギー流れの動的可視化手法の提案

自動車車体構造は、Fig. 3 に示したように多角断面を成しており、2.1 節でも述べたように稜線部（角部）が平面部と比較してエネルギー流れが形成される構造になっている。また、近傍の稜線部は、同時にエネルギーが流れるように設計されている。つまり、 $U^*$  解析によって、同時にエネルギーが流れているか否かを明示し、稜線部間の比較が可能になれば、剛性低下の要因となる構造の発見につながると考える。この考え方を基に考案した提案手法のフローを Fig. 4 に示す。本手法は、領域分割、動的可視化、エネルギー流れの予測、性能向上に寄与する部位の発見に大別でき、(1) 項より詳しく説明する。

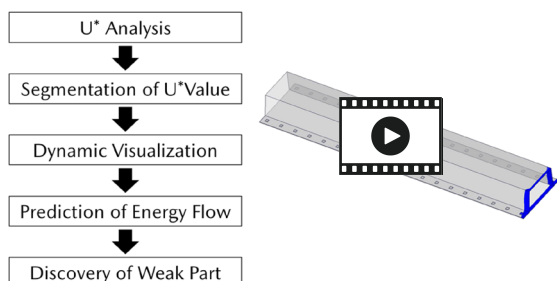


Fig. 4 Flowchart of the Proposed Method

### (1) 分割手法と可視化手法

性能向上に寄与する部位を効率的に発見する技術として、 $U^*$  値を十数個～数十個の領域に均等分割し、動的に可視化する手法を提案する。本手法を用いて、点接合のフランジをもつハット型断面フレームに適用した事例を Fig. 5 に示す。これは  $U^*$  値を 10 分割した時の結果を示しており、分割した各領域（青色部）を  $U^*$  値の高い方から低い方に動的に表示することで入力点から固定点へのエネルギー流れを疑似的に可視化できる。本手法は、設計者がインタラクティブに操作できるようにするため、有償ポストプロセッサー Animator4 と連携させたシステムで構築しており、設計者が見たい領域だけを表示させて見ることも可能で、詳細分析による効率的な設計知見の発見を可能にする。

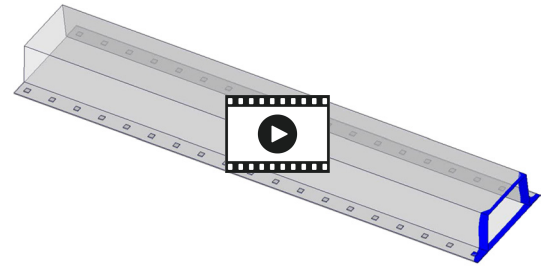


Fig. 5 Visualization Method

### (2) エネルギー流れの予測

本項では、(1) 項で提案した可視化手法から、詳細にエネルギー流れの予測を試みる。Fig. 6 は、Fig. 5 の分割領域のうち、 $U^*$  値が 0.0-0.1 の区間を青色、0.1-0.2 の区間を赤色、0.2-0.3 の区間を青色で示したものである。フレーム稜線部の点 a では、周辺と比べ  $U^*$  値が大きくなっているのが分かる。点 b も同様である。荷重は剛性の高い部分でより多くの荷重を受けもつと考えられるので、点 a → b のように周辺に比べ  $U^*$  値、つまり剛性の高い山部を入力点から固定点に追っていくことでエネルギー流れを予測できる。今回の場合、エネルギー流れが形成される部位は各稜線部であり、2.1 節で説明した、ねじり剛性の理論と一致しており妥当であるといえる。

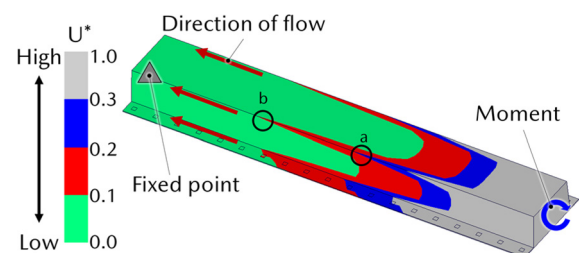


Fig. 6 Prediction Method of Energy Flow

### (3) 性能向上に寄与する部位を発見する手法

本論文の目的である、性能向上に寄与する部位の発見のためには、エネルギー流れを把握しエネルギーが流れていない部位を特定する必要がある。ここでは、エネルギー流れの有無の判断方法と性能向上に寄与する部位を発見する着眼点について説明する。Fig. 7 は、自動車車体構造のフレームを単純化したアウターフレームとインナーフレームの二重構造をもつハット型断面フレームに、境界条件として、長手方向の端点の一方を 6 自由度完全固定し、もう片方の端点に軸中心まわりのねじり荷重を与えたものである。その時の提案手法の適用結果を Fig. 8 に示す。領域分割数は 40 で、0.200-0.225 の範囲を青色で示している。2 章で、エネルギー流れの予測には、周囲に対して剛性の高い山部を見つけることが重要であると述べた。それを基に、Fig. 8 を見ると、(a) のアウターフレーム (A 部) に比べ、(b) のインナーフレーム (A' 部) の山部が顕著になっていることが分かる。これ

は、アウターフレームにエネルギー流れが形成されていない、つまり、アウターフレームが機能していないことを意味しているといえる。通常、(設計者が求める機能として) 稜線部には同等にエネルギーが流れることが望ましく、期待されるエネルギー流れと、実際の流れとの差異に着目することで性能向上に寄与する部位を効率的に発見することができる。

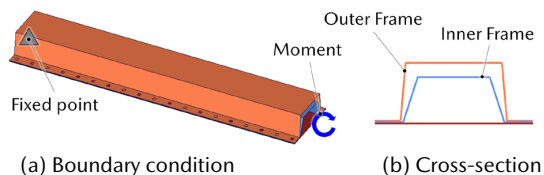


Fig. 7 Verification Model

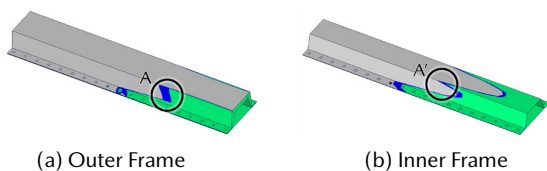


Fig. 8 Application Result of the Proposed Method

### 3. 自動車車体構造への適用事例

自動車車体構造への適用例として、MAZDA3 (有限要素モデル節点数: 約 60 万点) に本手法を適用した事例を紹介する。近藤らの研究<sup>(4)</sup>において、各性能で軽量化のしにくさ(軽量化阻害度)を算出した結果、軽量化のボトルネックとなる性能は、特に、乗り心地に係る固有値であることが分かっている (Fig. 9)。また、固有値を含むボトルネックとなる性能間の背反関係から、Fig. 10 に示す領域を含む車体の側面構造が重点的に構造対策する領域であることが分かっている。そこで、本検証では、性能として固有値を、領域として車体の側面構造を対象とする。なお、 $U^*$  解析は、有限要素法の静解析で行うため、Fig. 11 のように車体前側のサスペンションと車体との取り付け部にねじり荷重(強制変位)を与え、車体後方のサスペンションと車体との取り付け部を固定した境界条件で固有値のねじり変形モードを再現している。 $U^*$  値の領域分割数は 40 である。なお、自動車車体構造の各部位の名称は、ハンドブック<sup>(8)</sup> から引用している。

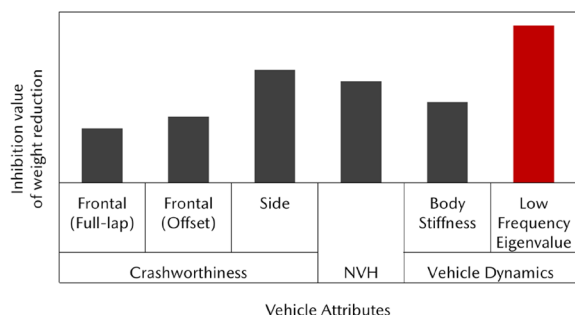


Fig. 9 Inhibition Value of Weight Reduction

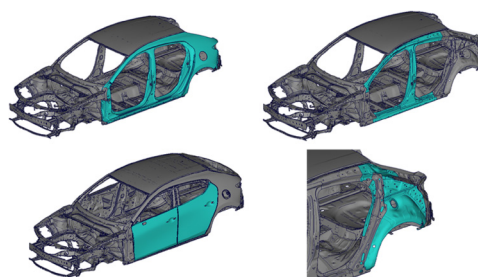


Fig. 10 Weakness Structures

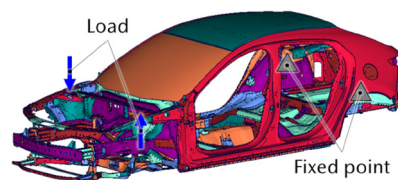


Fig. 11 Boundary Condition

#### 3.1 適用結果

Fig. 12 に適用結果のうち、エネルギー流れの差異が顕著であったフロントピラーとサイドシルについて、アウターフレームとインナーフレームの  $U^*$  値が同等の領域を示している。青色のコンタが同じ  $U^*$  値の範囲を示しており、インナーフレームでは山部が顕著になっている状態 (図中○印) に対して、アウターフレームでは山部が見られない。自動車の車体構造の場合、同一フレーム内の稜線部に同時にエネルギーが流れるように設計されており、アウターフレームとインナーフレームで山部が顕著になるはずであるが、本結果では、アウターフレームにエネルギーが流れておらずアウターフレームが機能していないと考えられる。このように、本来、機能すべき部品が  $U^*$  値の動的可視化によって、性能向上に寄与する部位として発見可能である。

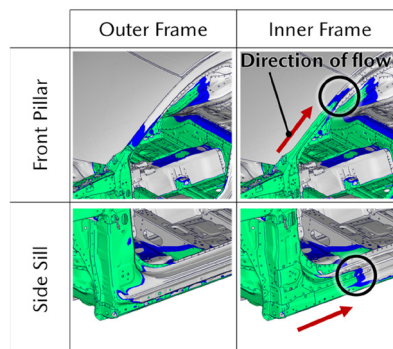
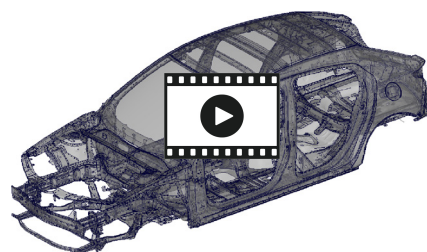
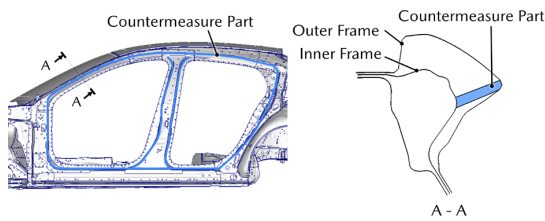


Fig. 12 Application Result of the Proposed Method

3.2 構造対策検討

3.1 節の妥当性検証として、機能していないアウターフレームへエネルギー流れを形成するため、Fig. 13 のようにアウターフレームとインナーフレームの稜線同士をつなぐ構造対策を行い、性能検証とアウターフレームへのエネルギー流れの検証を行った。まず性能について対策前、後のねじり固有値の性能を評価した結果を Fig. 14 に示す。対策前の性能を 100 % とした時、構造対策により 6 % 性能向上しており、対策により大幅に性能向上している。また、主要な車体骨格を対象とした軽量化検討により、約 14kg の板厚低減効果があることも分かっている (Fig. 15)。続いてエネルギー流れについて、対策構造に本手法を適用した結果のうちフロントピラーの例を Fig. 16 に示すが、Fig. 12 で山部が顕著でなかったアウターフレームに山部が形成されており (図中○印)、アウターフレームへエネルギーが流れていることが分かる。Fig. 17 に、本境界条件での対策前後の歪エネルギー分布と対策部位である車体側面構造の歪エネルギーの総和を示すが、対策前後で歪エネルギー量は 7% 以上と大幅に改善し、更には、対策前には発生していなかったアウターフレームのフロントピラー前部・後部に歪エネルギーが発生している (図中○印)。これは、アウターフレームにエネルギー流れが形成された結果であり、本結果からも、提案手法は性能向上に寄与する部位の効率的な発見が可能であるといえる。

また、Fig. 18 に、固有値の横曲げ変形モード、縦曲げ変形モード、側面衝突を含む性能評価結果を示すが、今回、対象とした全ての性能が向上しており、基本性能である剛性性能の向上に寄与する部位の発見により、複数の性能を同時に満足する車体構造を導出できる可能性があると考えられる。



(a) Setting area (b) Cross-section

Fig. 13 Countermeasure Structure

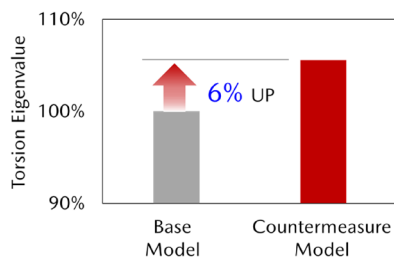


Fig. 14 Evaluation Result of Torsion Eigenvalue

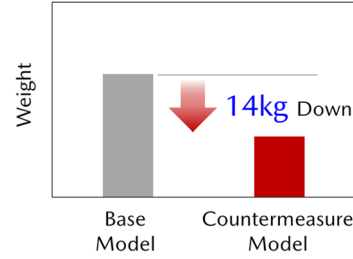


Fig. 15 Effects of Weight Reduction by Countermeasures

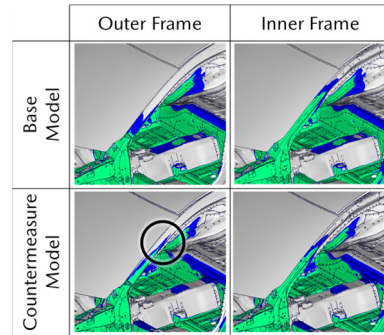


Fig. 16 Result of Energy Flow before and after Countermeasures

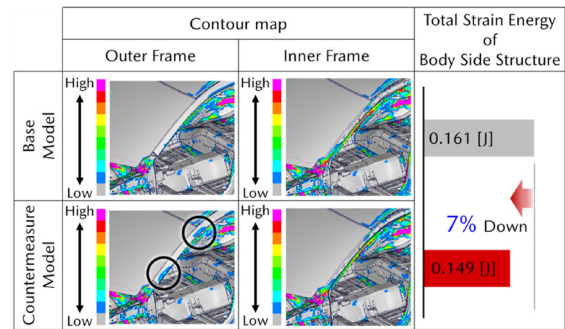


Fig. 17 Result of Total Strain Energy and Distribution

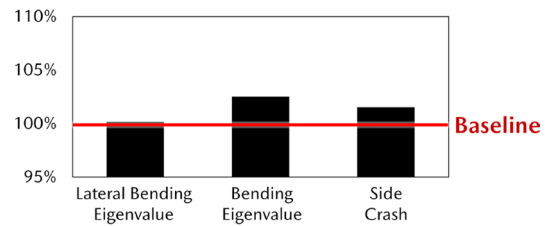


Fig. 18 Result of Other Evaluation

4. おわりに

今回、構造内部のエネルギー流れから性能向上に寄与する部位を効率的に特定する技術として、U\* 値を等分割し、U\* 値を動的に可視化する可視化手法を開発した。軽量化のボトルネックである固有値のねじり変形モードを対象に、本手法を自動車の実構造に適用した結果、フロントピラー、サイドシルのアウターフレームとインナーフレームとの周囲に対して剛性の高い山部の顕著性から性能向上に寄与する部位を発見した。更には、構造対策

により車体ねじり剛性、ねじり固有値が向上することを示し、本手法の妥当性も検証により明らかにした。また、車体ねじり剛性を改善させることで、側面衝突や他の固有値の改善も見られ、本手法の適用により、複数の性能を同時に満足する設計解を発想できる可能性を示した。

本研究を含む対話型設計支援技術は、Fig. 19(b)に示すプロセスに対応しており、Fig. 19(a)の従来プロセスに対して構造検討サイクルの極小化が期待できる。今後は、寄与分析などの分析技術との連携により弱点となり得る部位を明示し、より効率的に性能向上に寄与する部位を発見できる可視化分析手法を開発していく。また、大幅な計算工数、リソースを要するU\*解析の計算短縮化を行い、更なる開発の効率化に向け取り組んでいく。

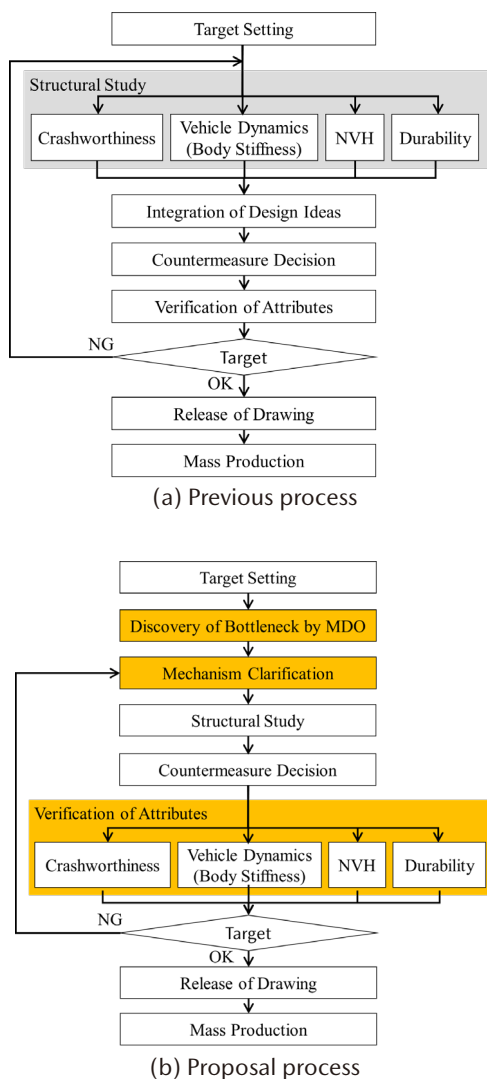


Fig. 19 Structural Design Process

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：複合領域最適化とトレードオフ分析

による車体構造の軽量化に向けた設計知見の抽出，電気学会論文誌C（電子・情報・システム部門誌），Vol.134，No.9，pp.1348-1354（2014）

(3) 立川智章ほか：インタラクティブ散布図行列可視化ツール iSPM の開発，計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015（SSI2015）講演論文集，pp.648-652（2015）  
 (4) 近藤俊樹ほか：自動車車体における構造知見の効率的発見のための設計支援技術の開発(1) 進化的因子抽出と因子選択確率を利用した非線形スパースモデリングの提案，第31回設計工学・システム部門講演会前刷集，No.2202，pp.1-10（2021）  
 (5) 本田正徳ほか：高強度・薄板中空フレーム曲げ強度の質量効率を向上させる断面形状の研究，日本機械学会論文集，Vol.87，No.900，pp.21-00096（2021）  
 (6) 信夫学ほか：乗用車車体構造における荷重伝達とその経路，自動車技術会論文集，Vol.26，No.3，pp.126-131（1995）  
 (7) 高橋邦弘ほか：構造物内部における荷重伝達経路の新たな表現方法，日本機械学会論文集A編，Vol.71，No.708，pp.1097-1102（2005）  
 (8) 自動車技術会：自動車技術ハンドブック設計（デザイン・車体）編（第4分冊），pp.60-65（2016）

■ 著 者 ■



鈎持 寛正



小平 剛央



岡本 定良