

ボデー構造におけるロードパス分布の類似性に関する考察

Study on Similarity of Load Path Distribution in Body Structure

小 林 広 和*

Hirokazu KOBAYASHI

内 藤 正 志*

Tadashi NAITO

漆 山 雄 太*

Yuta URUSHIYAMA

要 旨

乗用車ボデー構造の設計では、複数の荷重条件において、構造内にどのようにロードパスを分布させるかを構想し、それを検証することが重要と考える。また、ロードパス分布は、荷重条件によらず構造内の結合剛性が高いところに密に分布する傾向を持つので、荷重条件が異なっても類似性があると考えられる。

そこで本研究では、構造内のロードパス分布を指標化できる指標 U_{sum}^* を用いたロードパス把握方法と、応力によるロードパスの把握方法を対比させて解析をおこない、二種類の方法の違いを明確にすると共に、乗用車ボデー構造に4種類の荷重条件を負荷した時のロードパス分布の検証をおこなった。その結果、 U_{sum}^* を用いれば応力を用いた時よりも少ない指標で視覚的なロードパス分布の解析が可能であることを示す。また、ねじり荷重条件はロードパス分布が構造全体に広がるため、他の荷重条件に対して類似性が高くなることがわかった。

ABSTRACT

Consideration and verification of the way in which load paths will be distributed throughout the structures under various loading conditions is an important element in the design of automotive body structures. Furthermore, given the tendency that load-path distribution becomes denser where coupling rigidity is high irrespective of the loading conditions, it is conjectured that similarities exist in the load-path distributions even under differing loading conditions.

The research discussed in this paper therefore conducted a comparative analysis of two methods for identifying load paths: using U_{sum}^* , which functions as an indicator of the distribution of load paths in body structures, and using stress. The difference between the two methods was clarified, and the distribution of load paths when four different loading conditions were applied to automotive body structures was studied. As a result, it was demonstrated that using U_{sum}^* , load-path distributions can be visually analyzed employing less indicators than was the case when using stress. In addition, the level of similarity of load-path distribution to distribution in other loading conditions was high for torsional loading conditions in which load paths are distributed throughout the structure as a whole.

1. はじめに

近年、環境負荷の低減や商品性向上に対する要求から、乗用車のボデー構造に対して要求される必要な性能を満たした上で最大限の軽量化が求められている。重量効率の高い自動車のボデー設計をおこなう際には、構造に負荷される荷重をどのように構造内に伝達させ、所定の性能を満足させるかを考えることが重要である。この荷重の伝達経路であるロードパスは、構造のどこに存在するのかを直接特定することは難しく、現状では応力やひずみを用いて間接的に推定をおこなっている^{(1), (2)}。これらの方法では、構

造の急変部や穴部などの応力集中が発生する場所のように、実際にロードパスとして使われていない場合でも応力が高く出る場所があるため、応力の大小をたどってロードパスを特定することは難しい。さらに、ロードパスを推定するためには、主応力や変形図、セクションフォースなど多くの指標を用い、総合的に判断する必要があった。

そこで、ロードパス解析のためにFEMを用いた構造内部の荷重伝達経路解析が提案されている。荷重の負荷点や拘束点と、構造上の任意点との結合の強さを、指標 U^* および指標 U_{sum}^* によって表現することによりロードパスの特定が可能になる^{(3), (4)}。この指標 U^* および指標 U_{sum}^* を用

*四輪 R&D センター

いと、構造の急変部や穴部で応力集中のような値が急変する現象が起こらないので、視覚的にロードパス分布が理解しやすいという利点がある。

構造にさまざまな荷重を加えると、構造内にはその荷重条件に応じたロードパス分布が現れる。それと同時に、構造内で周囲との結合状態が良く剛性も高い部分にはロードパスが多く分布し、逆に弱い部分にはロードパスの分布が少ない傾向も荷重条件によらず共通してみられる。つまり、ロードパス分布にはなんらかの類似性があると考えられる。

構造内部でロードパス分布の類似性が高い領域では、荷重伝達に寄与する部品、あるいは寄与しない部品がさまざまな荷重条件によらず共通になるといえる。その結果、ある一つの荷重条件で荷重伝達に寄与しない領域を改善し、有効に機能する構造が作れば、その他の荷重条件に対しても同時に有効な構造になる。

従来の構造解析では、荷重条件ごとに解析をおこない、それぞれの荷重条件で構造の改善や対策をおこなっていたため、場合によっては別々の場所が改善対象になっていた。しかし、各荷重条件におけるロードパス分布の類似性を解析し、類似性の高い荷重条件や場所を把握することができれば、その類似性の高い場所に対策をおこなうことで複数の荷重条件に共通して有効に作用する構造を構想することができ、軽量化につながる。これは、自動車ボデー開発の先行検討段階での大まかな骨格配置など、ボデー構造を巨視的に捉えた解析から、詳細設計段階でのスポットの打点位置やパネルの板組みなどの部品間の結合部分における微視的な解析まで、幅広く用いることができる。

そこで本研究では、 U_{sum}^* を用いたロードパス分布解析手法の妥当性を示すとともに、乗用車ボデー構造にさまざまな荷重条件を与えた時のロードパス分布を指標 U_{sum}^* を用いて解析をすることで、ロードパス分布の類似性が高い荷重条件を探索することを目的とする。

2. 指標 U^* と U_{sum}^*

2.1. 指標 U^* とロードパス

有限要素解析を用いた構造物内部のロードパス解析指標 $U^{(3)}$ の定義を説明する。Fig. 1(a) は、構造物を模式的に表現したもので、点Aが負荷点、点Bが支持点、点Cが構造内の任意の点を表す。この構造に強制変位 d_A を与えた時のひずみエネルギー U は式 (1) のようになる。ここで、 p_A はA点を d_A 変位させるのに必要な荷重を表す。

$$U = \frac{1}{2} p_A \cdot d_A \quad (1)$$

Fig. 1(b) は Fig. 1(a) と同一の構造であるが、任意点Cが拘束されており、A点を d_A 変位させるのに必要な荷重は

p'_A になる。この時のひずみエネルギー U' は式 (2) のようになる。

$$U' = \frac{1}{2} p'_A \cdot d_A \quad (2)$$

点Cにおける指標 U^* は式 (3) で定義される。

$$U^* \equiv 1 - \frac{U}{U'} \quad (3)$$

ひずみエネルギー U' は必ず U 以上の値となるため、 U^* は0から1の間の値を取り、負荷点では1、支持点では0となる。

Fig. 2 に構造内の U^* 分布の模式図を示す。構造内で負荷点との結合剛性が高い部位ほど、 U^* 値は大きな値を示す。つまり、 U^* 分布の稜線は負荷点からの結合剛性が高い部位といえる。構造物に負荷される力は、構造内の剛性ができるだけ高い箇所を通して支持点まで伝達され则认为られる。したがって、主要なロードパスは U^* 分布の稜線をたどって支持点まで到達する経路となる。

2.2. ロードパス分布と指標 U_{sum}^*

構造内には主要なロードパス以外にも多数のロードパスが存在するので、ロードパスの分散状態を定量的に示すことができるロードパス評価指標 $U_{\text{sum}}^{*(4)}$ を導入する。

Fig. 3(a) にA点を負荷点、B点を支持点とした時の U^* 分布の概念図を示し、各節点の U^* 値を U_i^* とする。また、Fig. 3(b) には荷重の負荷点と支持点を入れ替えた時

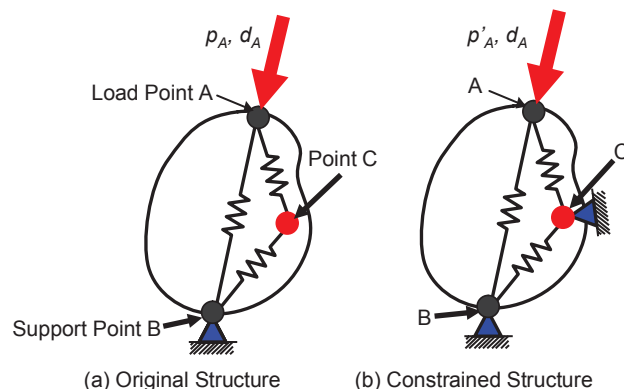


Fig. 1 Strain energy models

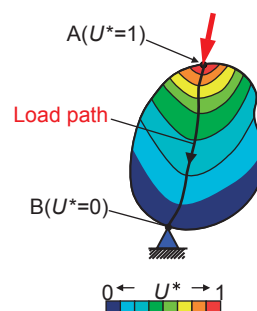


Fig. 2 Image of load path

の U^* 分布の概念図を示し、各節点の値は U_2^* とする。この時、それぞれの節点において、指標 U_{sum}^* を式 (4) で定義する。

$$U_{sum}^* = U_1^* + U_2^* \quad (4)$$

構造全体の U_{sum}^* 分布の概念図は Fig. 3(c) のようになる。

ここで、Fig. 4 に示すような 1 次元のばねモデルでは、構造全体に均一に荷重が分散されロードパス分布が一様となるため、 U_{sum}^* 値は一定で 1 となる。

穴あき平板で U を計算した例を Fig. 5(a) に示す。平板の一端に支持点を設け、その反対側の一端に引張方向に強制変位を加えた。Fig. 5(b) は同条件での応力分布、Fig. 5(c) には U_{sum}^* 分布を示す。Fig. 5(a) の U 分布では、穴をよける形で U 分布の稜線が存在し、そこに荷重点からのロードパスを描くことができる。それに対し、Fig. 5(b) の応力分布では、荷重点および穴の周辺に応力集中が見られ、ロードパスの特定が困難である。

ここで、荷重の荷重点から支持点まで到達したロードパスには大きな荷重が伝達することができるため、主要なロードパスになり得る。しかし、 U は荷重荷重点からの結合剛性が強い部分を示しているため、支持点まで到達する

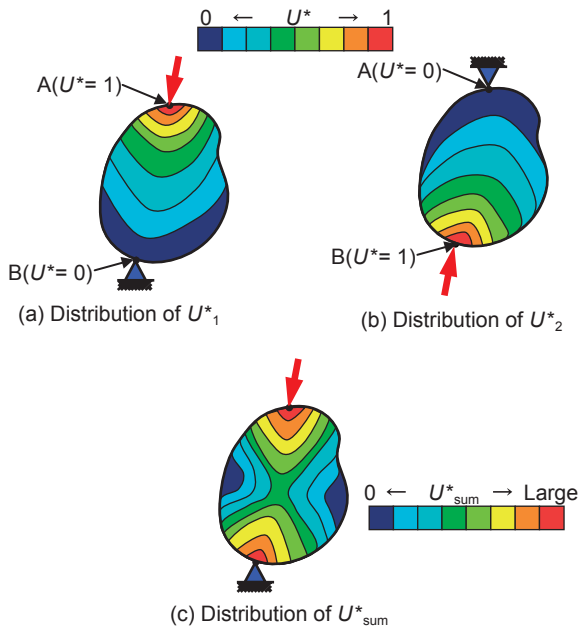


Fig. 3 Conceptual diagram of U_{sum}^*

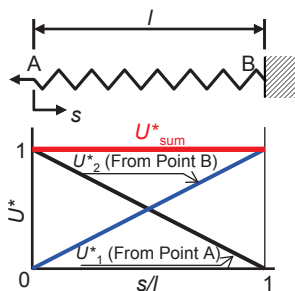


Fig. 4 Diagram for U_{sum}^*

かどうかは関係なく、荷重点からの一方向から評価した量である。そのため、複雑な形状になるとロードパスが長くなり、経路も複雑になるので、 U 分布から示されるロードパスが支持点まで到達するかどうかの判断が難しくなる。また、構造内の特定の場所だけがロードパスになる訳ではなく、ロードパスは構造全体に広く分布するので、 U による主要な数本のロードパスのみの解析では十分であるとはいえない。

Fig. 5(c) に示した U_{sum}^* 分布は、荷重の荷重点と支持点の両方からの結合の強さを表す。 U_{sum}^* 値が大きい部分では荷重の荷重点と支持点の両方からの結合剛性が高いので、荷重点から支持点まで到達するロードパスが多く分布する。逆に U_{sum}^* 値が小さい部分ではロードパスの分布が疎となる。

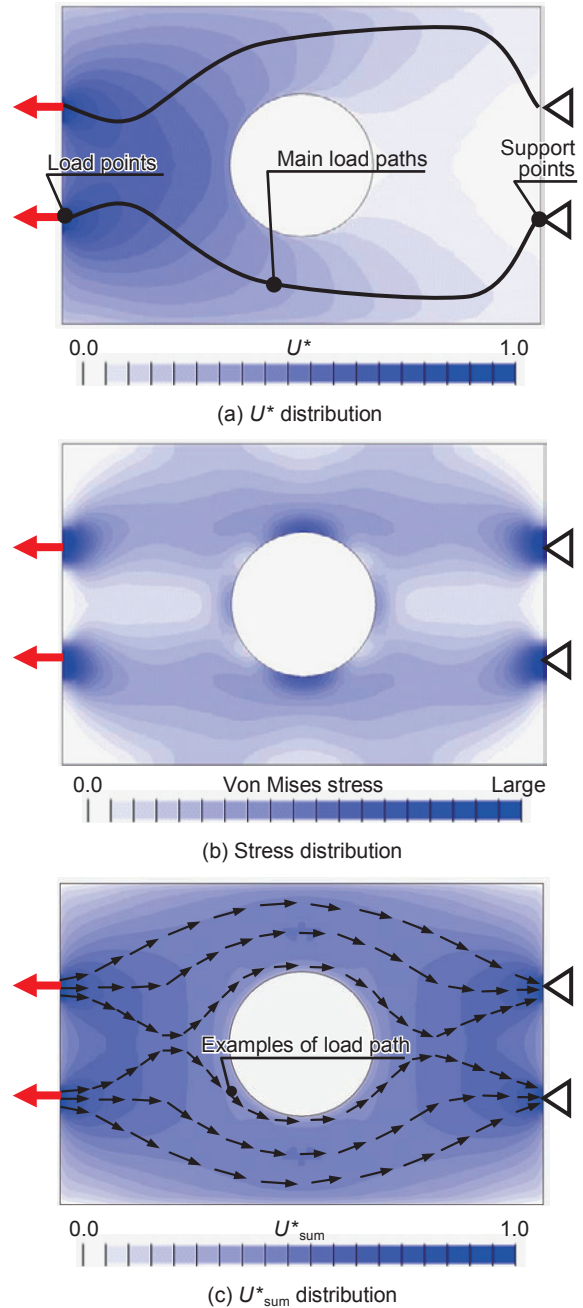


Fig. 5 U^* , stress and U_{sum}^* distribution in plate with hole

る。Fig. 5(c)で、負荷点から支持点までのロードパスの一例を図示する。もちろん、この他にも多数のロードパスを描くことができる。負荷点や支持点近傍などの U_{sum}^* 値が大きい領域ではロードパス分布が密になる。このように、 U_{sum}^* 値の大小によって実際に機能するロードパスの分布状態を視覚的に表現することができる。

3. ロードパス分布の解析手法としての応力値と U_{sum}^* 値の比較

3.1. 計算モデル

解析に用いる荷重条件を Fig. 6 に示す。荷重条件は、サスペンションからボデーに入力される代表的な4種

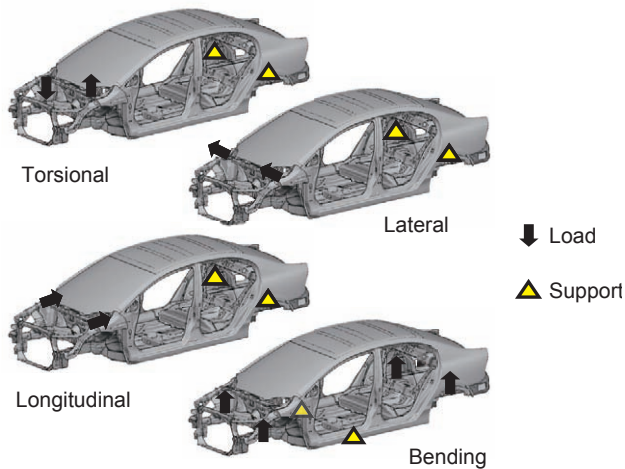


Fig. 6 Load and support conditions

類の荷重条件であるねじり荷重 (Torsion)、横方向荷重 (Lateral)、前後方向荷重 (Longitudinal)、そして曲げ荷重 (Bend) とする。基本的にはフロントダンパベースを荷重点とし、リヤダンパベースを支持点とし、曲げ荷重に関しては剛性が高く局所変形がしにくいサイドシル上を支持点とし、全ダンパベースを持ち上げることで曲げを再現した。

3.2. 計算結果の比較

乗用車ボデー構造に荷重を负荷した時に、ロードパス分布の解析手法を検証するため、応力分布と U_{sum}^* 分布について比較する。この時の荷重条件は前節のねじり荷重条件とする。

まずは応力を用いたロードパス分布の解析方法を示す。応力を用いたロードパスの解析では、変形図と主応力の方向と大きさによって力の流れを推定する。Fig. 7(b) で示した Part B 周辺の詳細図では、Part B から Part C にかけて高い引張方向の主応力が働き、方向も揃っているため、ロードパスは Part A から Part B を介して Part D 方面に分布すると推測できる。

ここで注意すべき点は、板部ではせん断方向剛性に比べて面外曲げ方向の剛性が著しく低いので、板の面外曲げ方向に荷重が负荷された場合は伝達できる荷重量が少なくなるため、主要なロードパスにはならない。加えて、主応力を用いた解析では、板部に面外曲げ力が负荷されているのかどうかを容易に判断することができないという課題がある。板部に负荷される荷重方向を理解するためには、板厚

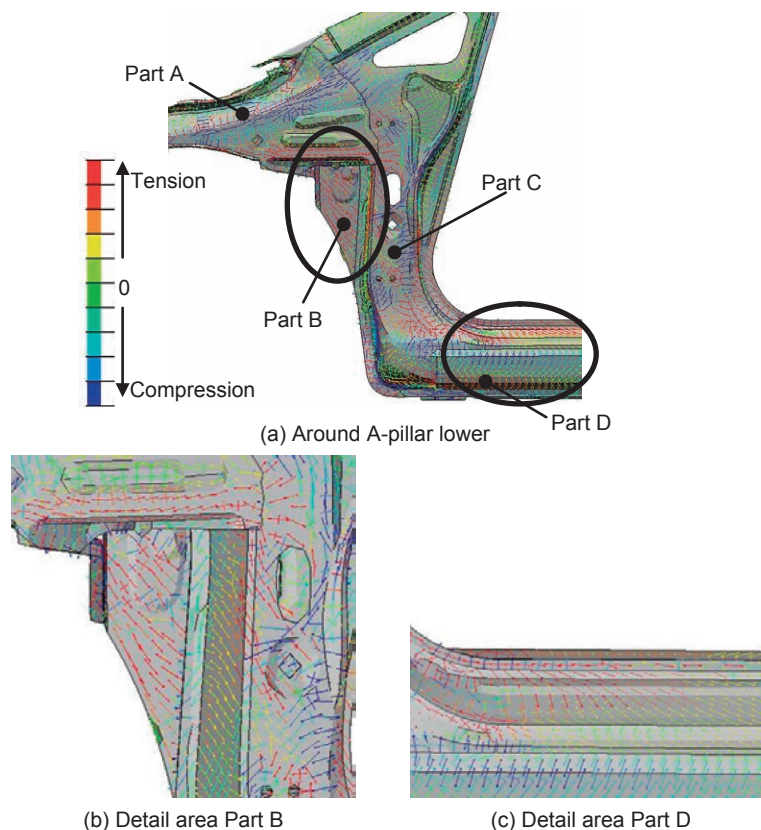


Fig. 7 Principal stress

を把握し、面内応力方向をたどって、その不連続な領域を変形図、あるいは板の両面の主応力の向きや大きさを用いて、面外変形をしているかどうかを判断する必要がある。Fig. 7(c)のPart D上面の詳細図では主応力が高く、強い荷重が負荷されているように見えるが、Fig. 9(a)で示したPart D断面の変形図を見ると、Part D上面が上方に変位し、面外方向の曲げ変形を受けていると考えられる。確認のため、Fig. 9(b)にシェル要素の表面の主応力から裏面の主応力の差をとった時のコンター図を示す。板の面外方向に曲げ力が加わると、表面は圧縮、裏面は引張になるように、両面の主応力の差が大きくなるので、図では赤色に示される。図中に丸印を付けたPart Dの上面は、赤くなっており面外方向に曲げ力が加わっていることが確認できる。よって、Part D上面はロードパスにはならない。

このように、主応力を用いた解析方法では応力が高く

出た部分がそのままロードパスになっているとは限らず、ロードパスに適正な板厚となっているかを把握した上で、さらに変形図など複数の指標を見比べて力の性質を解析する必要があるため、ロードパス分布の判断に工数と慣れが必要である。また、同じ対象物を解析しても、解析者によって結果に差が出る可能性がある。

一方、 U_{sum}^* を用いたロードパスの解析方法は、 U_{sum}^* 値が大きい場所はロードパスが密に分布しているので、構造内のロードパス分布が一目でわかる利点がある。

例えば、Fig. 8(b)で示したPart B周辺は、 U_{sum}^* 値が大きく、応力で解析した結果と同様に、ロードパスが密に分布していることがわかる。また、Fig. 8(c)で示したPart D周辺の U_{sum}^* 分布図では、Part Dの上上面部は小さな U_{sum}^* 値となり、応力で解析した手法と同様にロードパス分布が疎である結果となった。

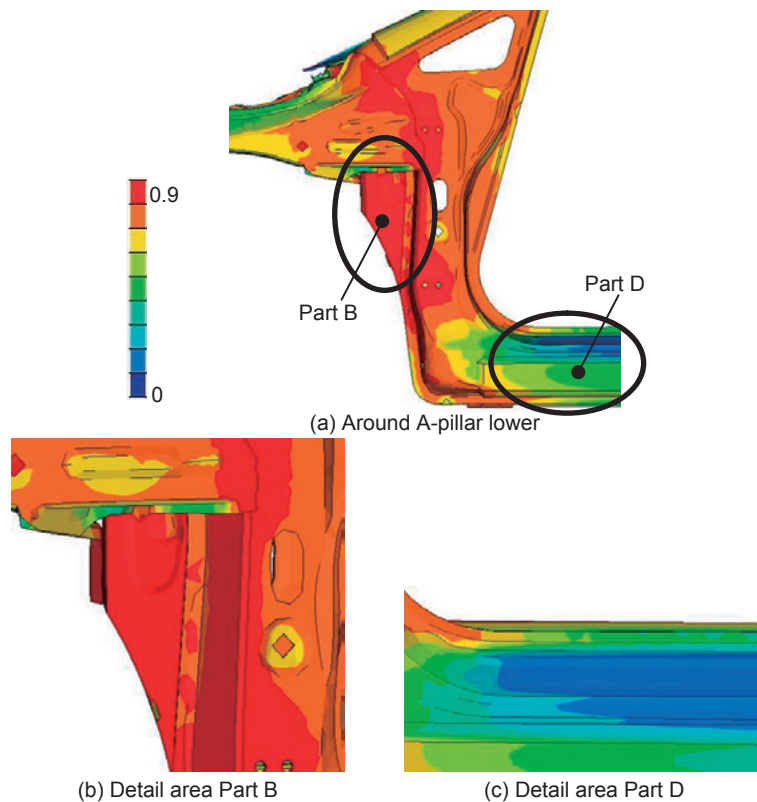


Fig. 8 U_{sum}^* distribution

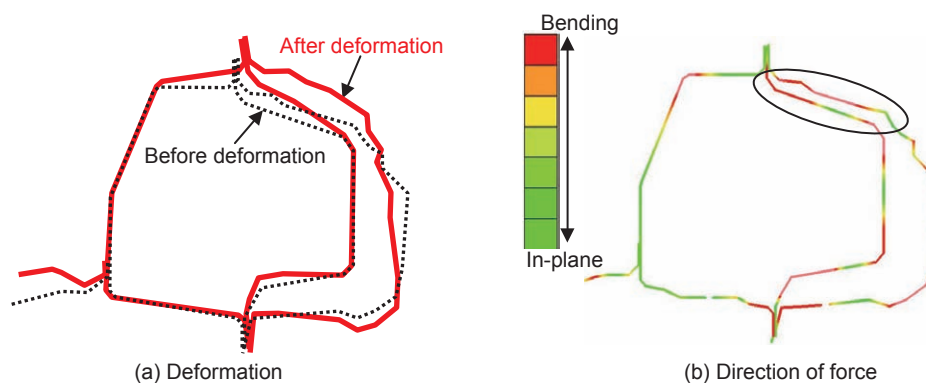
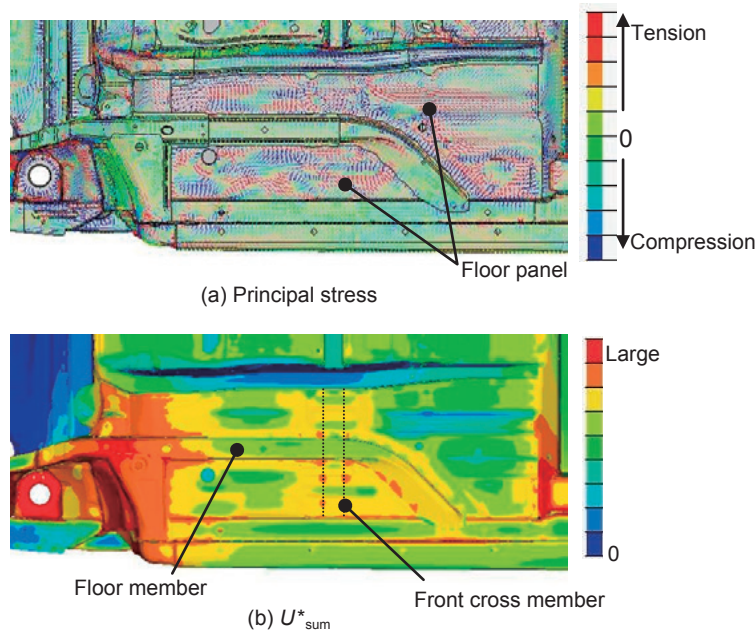


Fig. 9 Section of Part D



このように、 U_{sum}^* を用いたロードパス分布解析は、従来の応力を用いた解析法と同様の結果となり、ロードパス分布解析手法として妥当性がある。しかも、応力を用いた解析のように複数の情報を用いて解析者が総合的に判断するのではなく、 U_{sum}^* 値の大小のみで判断できるので、容易にロードパス分布を解析することができる点で優れている。

また、応力を用いた解析においては応力集中という課題がある。Fig. 10(a)にフロアパネルの主応力テンソル図を示す。ねじり荷重条件下のフロアパネルはせん断変形を受けるので、フロア全体にロードパスが分布するはずであるが、フロアパネルはビードや穴などにより形状が複雑なため、応力集中が発生し、主応力の方向や強弱が複雑に分布する。このため、フロア内にどのようなロードパスが存在するのかを解析することは困難となる。それに対して、 U_{sum}^* は応力集中のような問題は生じないので、Fig. 10(b)

に示すように、フロアパネルは黄色の領域が多く、ほぼ均一にロードパスが分布することが視覚的に認識できる。

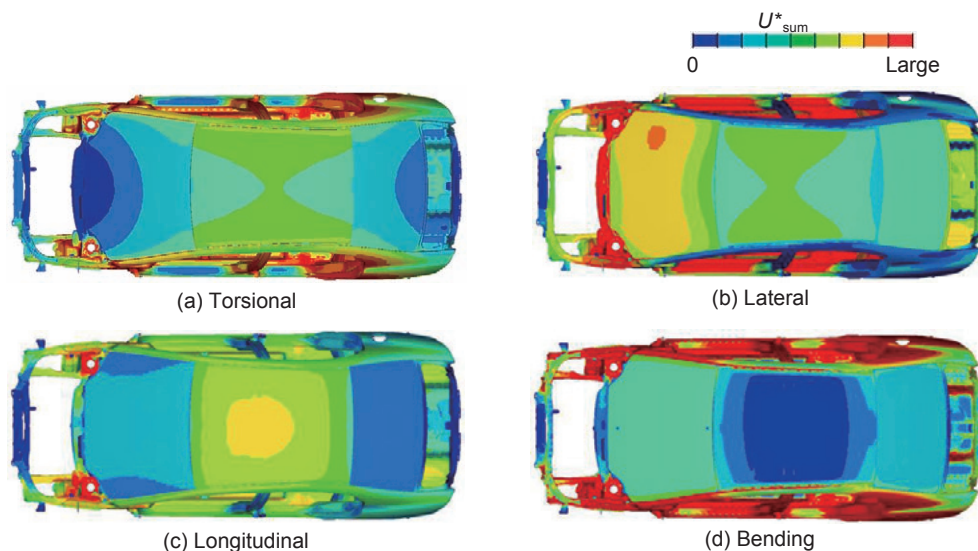
4. 乗用車ボデー構造のロードパス分布の類似性

4.1. ロードパス分布の類似性

乗用車ボデー構造にさまざまな荷重が負荷された時の U_{sum}^* 分布の類似性を比較する。

前章で挙げた荷重条件での U_{sum}^* 分布について、上面視をFig. 11、側面視をFig. 12、底面視をFig. 13に示す。それぞれ U_{sum}^* 値の平均値が異なるため、等高線の値はそれぞれの荷重条件ごとに最も見やすい値に設定した。

まず、Fig. 11の上面視を比較すると、Fig. 11(a)のねじり荷重とFig. 11(b)の横方向荷重のルーフ部に U_{sum}^* 分布の類似性がみられる。これは、ねじり荷重と横方向荷重で



はルーフには同じせん断力が加わるのに対して、Fig. 11(c)の前後方向荷重では曲げ、Fig. 11(d)の曲げ方向荷重では面外方向に力が加わるためにロードパス分布が変化するからである。

次に Fig. 12 の側面視について検討する。Fig. 12(d) の曲げ荷重ではサイドシル上に支持点があるのでサイドシル部分の U_{sum}^* 値が大きくなっているが、サイドパネルの全体的な分布の濃淡を比較すると Fig. 12(a) のねじり荷重と Fig. 12(d) の曲げ荷重の U_{sum}^* 分布に類似性がある。また、Fig. 12(b) の横方向荷重と Fig. 12(c) の前後荷重について、フロ

ントピラーロアやセンタピラーの縦骨の U_{sum}^* 値がサイドシルなどの横骨の U_{sum}^* 値に比べて小さいという点で類似性がある。しかし、Fig. 14 に示すサイドシルレインフォース部分を比較すると、Fig. 14(b) の横方向荷重と Fig. 14(c) の前後荷重は側面と上面の濃淡に違いがあり、ロードパス分布には類似性が見られない。これは、サイドシルに加わる荷重方向を考えると、横方向荷重ではサイドシルが車両横方向に曲げられるため、サイドシル上下面にせん断力が加わり、そこにロードパスが発生するが、前後方向荷重ではサイドシルには軸方向に荷重が負荷されるため、サイド

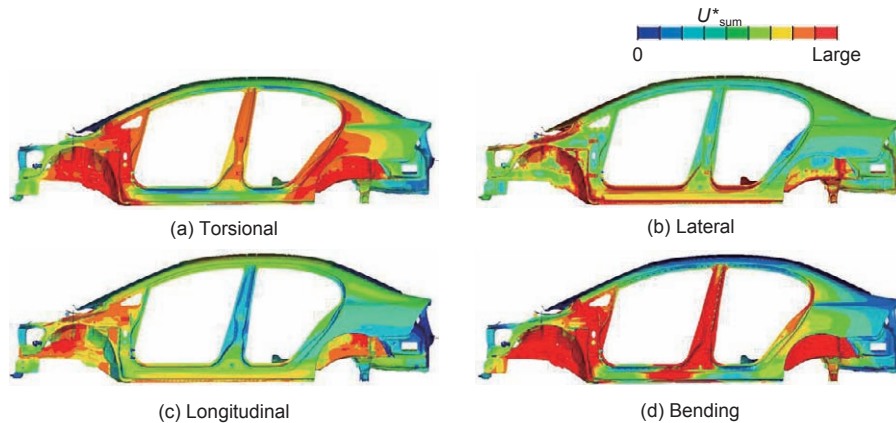


Fig. 12 Side view

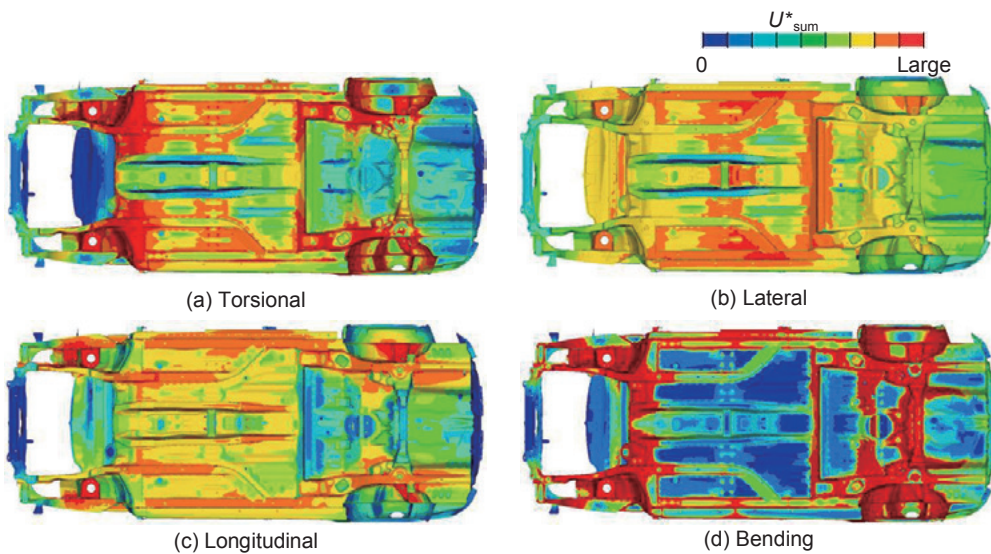


Fig. 13 Bottom view

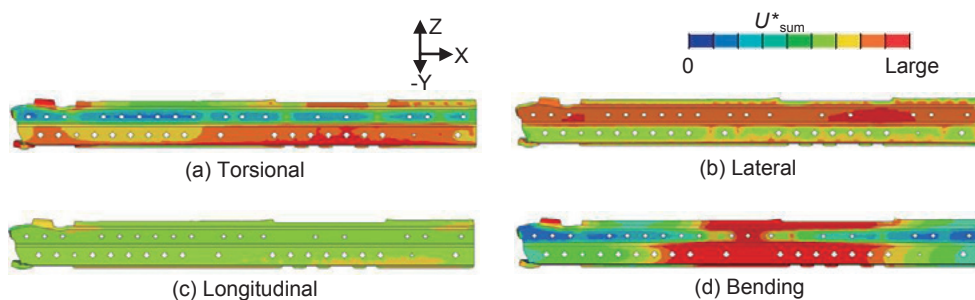


Fig. 14 Side sill reinforce

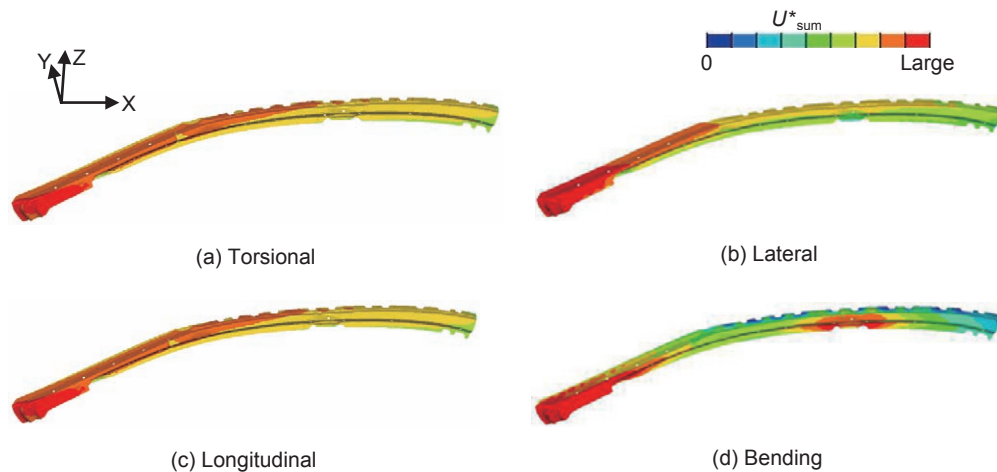


Fig. 15 Side roof rail

シル側面と上面の U_{sum}^* 値に大きな差はなく、サイドシル全体がほぼ同一の値になるからである。

側面視のもう一つの着眼点として、Fig. 15 にサイドルーフレール部分を示す。これらの比較では、Fig. 15(a) のねじり荷重と Fig. 15(c) の前後方向荷重の U_{sum}^* 分布に類似性がみられる。これらの時にサイドルーフレールに加わる荷重方向の模式図を Fig. 16 に示す。サイドルーフレールにはねじり荷重時には曲げと引張方向の力が加わり、前後方向荷重では曲げと圧縮方向に力が加わる。曲げの方向は同じで、引張と圧縮の違いがあるものの、共に軸方向に荷重が加わるために力学的条件が同一になり U_{sum}^* 分布が類似する。

最後に Fig. 13 の底面視について検討する。4 種類の荷重条件の U_{sum}^* 分布を比較すると、ボデー全体で類似性が高い荷重の組み合わせは無い。しかし、フロントフロアパネルのみに絞ると、Fig. 13(a) のねじり荷重と Fig. 13(b) の横方向荷重の類似性が比較的高い。これは、ねじり荷重と横方向荷重ではフロアにせん断力が加わるのに対して、前後方向荷重ではフロア面内圧縮力、曲げ荷重では面外曲げ力

が加わるために U_{sum}^* 分布が異なるからである。

以上、4 種類の荷重条件による U_{sum}^* 分布を比較すると、ねじり荷重による U_{sum}^* 分布は他の荷重条件による U_{sum}^* 分布に対して類似性を持つ部材が多いことがわかる。

4.2. 類似性に対する考察

ねじり荷重が他の荷重条件と類似性が高い理由について考察する。

ねじり荷重時に各部品に働く力の方向を考えると、サイドシルなどの横骨には曲げ荷重、センタピラーなどの縦骨には軸方向荷重、各パネル部にはせん断荷重が発生する。そのため、ねじり荷重はキャビン全体に大きい U_{sum}^* 値が分布する。

一方、横方向荷重と前後方向荷重では、センタピラーには主要なロードパスが存在せず U_{sum}^* 値が小さいという共通点があるが、その他の部位ではお互いの類似性はあまり高くはない。部材に働く荷重方向を考えると、横方向荷重と前後方向荷重ではフロアパネルやルーフレールの面内で力の方向が 90° 入れ替わるため軸力方向が変化する。その結果、ミッドクロスメンバ付近やトンネルフレーム付近に現れるように、 U_{sum}^* 値が大きい部分と小さい部分が荷重条件によって入れ替わる部分が存在するので、お互いの類似性よりも全体的に U_{sum}^* 値が大きいねじり荷重との類似性の方が高くなる。

曲げ荷重では、フロアとルーフが面外方向の力を受けるためロードパスが分散せずに U_{sum}^* 値が小さくなるので、他の荷重条件との類似性が低くなる。しかし、縦骨に主要なロードパスが存在することはねじり荷重と同一なので、これがねじり荷重との類似性だけが高くなる要因である。

5. まとめ

(1) U_{sum}^* を用いたロードパス分布の解析手法は、応力、変

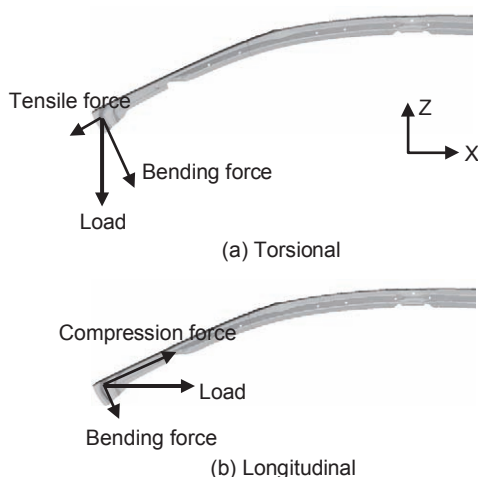


Fig. 16 Image of direction of load on side roof rail

形状態、板厚の把握による総合的なロードパスの判断と同等な結果が求まり、ロードパス解析手法として妥当性があることを示した。

- (2) U_{sum} を用いる手法では一つの指標のみで構造内のロードパス分布を示すことができ、前述の応力などを用いる手法と比べて容易にロードパスの状態を判断できる。その応用事例として、乗用車ボデーのような複雑な構造物において、 U_{sum} を用いると構造内に広がるロードパスの分布状態まで判断できることを示した。
- (3) U_{sum} を用いた解析により構造全体のロードパス分布が一目で理解できるので、異なる荷重条件においてロードパス分布が類似する部材を定性的に把握できる。その結果、乗用車ボデーのような複雑な構造物において、異なる荷重条件間でも部材単位で同一性質の荷重が負荷される部位を容易に特定できることを示した。
- (4) ねじり荷重条件は構造内の各フレーム部には曲げや軸方向荷重、各パネル部にはせん断荷重が発生するため、構造全体に広くロードパスが分布し、他の荷重条件とのロードパス分布の類似性が高いことを明らかにした。

参考文献

- (1) Kelly,D.W., Tosh,M.W.: Interpreting Load Paths and Stress Trajectories in Elasticity, Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software, Vol. 17, No. 2, p.117-135(2000)
- (2) Waldman,W., Heller,M., Laya,R., Rose,F.: Advances in Two-Dimensional Structural Load Flow Visualisation, Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software, Vol. 19, No. 3, p.305-326(2002)
- (3) 高橋邦弘, 櫻井俊彰: 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) 71-708, p.1097-1102(2005)
- (4) 鳥飼真吾, 郭秋実, 漆山雄太, 小林広和, 高橋邦弘: 乗用車車体のねじり条件下の荷重伝達とウィンドシールドガラスの荷重分担, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.5, p.963-968(2010)

■ 著 者 ■



小林広和



内藤正志



漆山雄太