

構造最適化技術を活用した車両構体の提案

高垣 昌和* 加藤 祐貴** 八木 毅**

Design of Car Body by the Method of Structural Optimization

Masakazu TAKAGAKI Yuki KATO Tsuyoshi YAGI

Recently, demands for the safety and comfortability of railway vehicles have been increasing. However, it is difficult that car bodies are so designed as to satisfy them by the current method under collisional subjects of the structure cannot be evaluated. Moreover, the stress analysis of the whole of the vehicle is indispensable for evaluating complicated load paths on the very long body. Accordingly, a method of structural optimization based on the finite element analysis was developed to establish a rational design method of car bodies. In this method, an analysis algorithm with an optimization method is adopted by zooming in the region to be estimated from the analysis results of the whole of a car body. The possibility of achieving the high-rigidity and light-weight of car bodies was indicated through conducting the structural optimization by the present algorithm.

キーワード：構造最適化，車両構体，軽量化，高剛性化，有限要素法，プレス成型体

1. はじめに

構造最適化手法は機器の設計において、広く活用されるようになってきている¹⁾。特に自動車、航空分野では設計ツールとして活用され、製品の設計に多用されるまでに至っている。一方、鉄道車両の設計においては、活用事例²⁾は僅かにあるものの、まだ一般的とはいえない。

鉄道の車両構体には、安全性向上、高速化、さらに乗り心地向上など様々な要求がある。安全性向上においては衝突安全設計が取り入れられ、構体質量が増加傾向にある。このようなことから、車両構体の軽量化や高剛性化といった構造面での性能向上が必要であり、構体の設計に対する構造最適化手法の適用が有用と考えられる。

先行研究において従来の柱や帯板による骨組構造の車両構体に対して、構造最適化手法を適用して車両構体の高強度化および軽量化の検討³⁾を行い、その有効性について確認した。

本研究では、更なる軽量化のために骨組構造に代わる構体構造として、自動車の内部構造に広く使われているプレス成型による凹凸形状を有した構造部材の適用を検討した。鉄道の車両構体として必要な強度、剛性が確保された軽量化構造を導出するための、合理的な設計手法の確立を目指し、有限要素法 (FEM) による数値シミュレーションに基づいた構造最適化手法の導入を検討し、具体的な解析アルゴリズムを構築するとともに、本手法

により構体構造の最適化を実施して、プレス成型体による構体構造を提案する。

2. 構造最適化手法

2.1 構造最適化手法について

ある原型となる構造をもとに与えられた設計要件を満たす構造を求める手法として形状最適化や位相最適化などの手法がある⁴⁾。外形形状を設計変数とする形状最適化や内部構造も設計変数とする位相最適化は、FEM 解析、感度解析、最適化手法の組み合わせにより構造最適化を実施する手法である。これらは、多数の設計変数を設定できるため、最適化の自由度は高いものの収束性の点で最適性基準法⁵⁾など適切な最適化手法の適用が必要となる。本研究では、位相最適化により荷重伝達経路を同定し、これをもとに形状最適化の初期形状を決定する。この手法の利点は、強度、剛性、局所座屈や幾何制約など多くの制約条件の考慮が可能なことである。形状最適化の欠点として、FEM 解析の初期メッシュへの依存性が高く、要素のゆがみが生じる場合にはメッシュ更新が必要となるという課題がある。しかし、本手法では予め位相最適化により荷重伝達経路を考慮することによって形状の変化量を抑制し、要素のゆがみによるメッシュモデルの更新を不要とした。

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

** 車両構造技術研究部 車両強度研究室

特集：鉄道力学

2.2 構造最適化アルゴリズム

構造最適化のアルゴリズムを提案する。本研究では構体構造としてプレス成型体の導入を前提としていることから、構体の形状自由度が大きいため、位相最適化と形状最適化を組み合わせた構造最適化手法を構築する。

鉄道車両の構体は大規模な構造体であり、実挙動が複雑であるため、部分的なモデルだけでは荷重経路や応力の大きさの評価が困難である。その一方で、高い負荷を受ける領域は限定的であり、一車両構体モデルにより最適化を実施することは効率的ではない。そこで、部分領域の構造最適化を行うこととし、これに必要な負荷条件を算出するため、図1に示すような一車両の初期形状モデルをもとに、応力解析を実施する。このとき、荷重条件としては、JIS E7106：2006に定める構体荷重試験の垂直荷重、ねじり荷重、車端圧縮荷重を適用した。次に、一車両構体モデルの応力解析結果をもとに構造最適化を行うための部分構体モデルを構築し、これに対して、一車両構体モデルにより得られた負荷条件を与えて構造最適化を行う。車両構体は同一構造の部位が多くあるため、

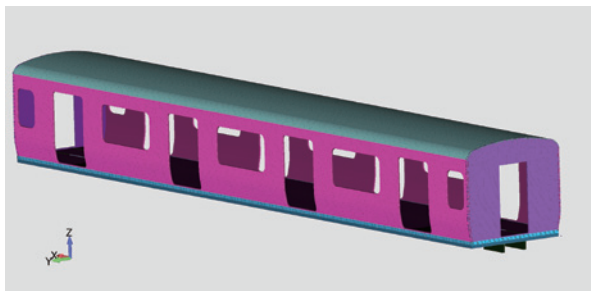


図1 一車両構体モデル

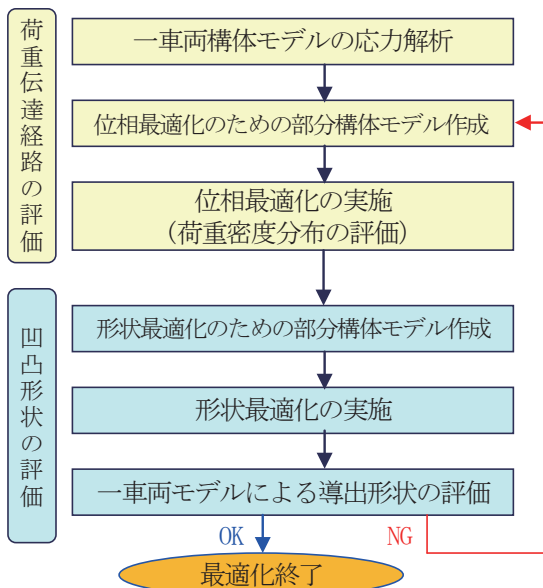


図2 構造最適化のアルゴリズム

構造最適化により軽量化および高剛性化された構造を当該部位だけでなくその他の同一構造部位へも適用して一車両を構成する。最後に、構造最適化より得られた構造を適用した一車両モデルにより応力解析を行い、その効果を検証し、最適要件を満たさない場合は、再度、部分領域の構造最適化を実施する。これらの解析の流れを図2に示す。

2.3 構造最適化によるプレス成型体の導出事例

本研究において提案する構造最適化アルゴリズムの検証として、側窓コーナー部の簡易モデルを用いて構造最適化を実施した。図3に示すような簡易モデルに対して、せん断、ねじり、圧縮方向の3ケースの荷重を側面の左右端部に与えて解析を行った。まず、3つの荷重条件を考慮した荷重伝達密度を求めるため、位相最適化を行う。ここで、目的関数を剛性最大とし、制約条件を「簡易モデルの初期形状に対して質量70%低減」とした。解析モデルの要素は、3次元ソリッド要素を用いた。位相最適化の解析結果として、部材が荷重を負担する寄与を示す荷重伝達密度分布が得られる(図4)。この結果を用いて、図5に示すように荷重伝達密度の大きさに従って、法線方向のくぼみ深さを大きくする。つまり、荷重伝達密度の大きさにより凹凸形状の高低差を付けるようにす

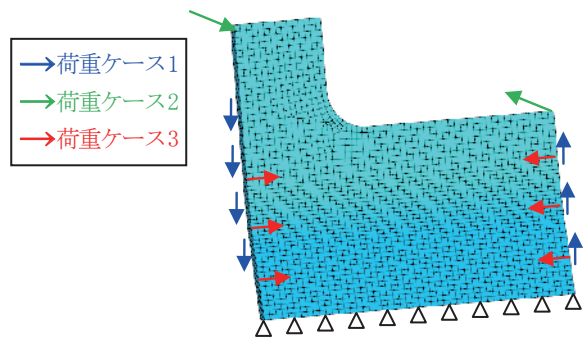


図3 側窓コーナー部のメッシュモデル

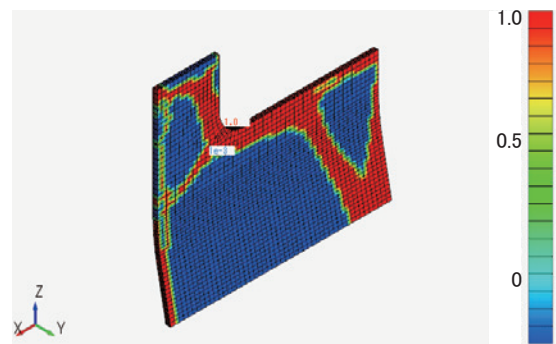


図4 荷重伝達密度分布図

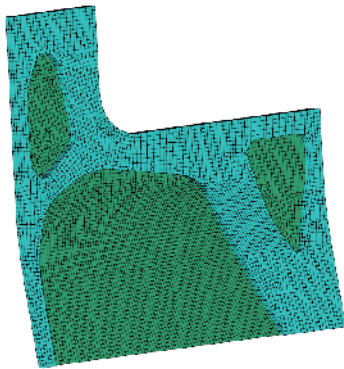
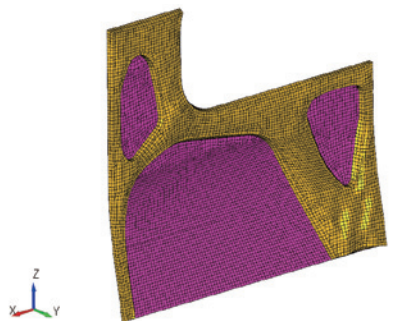
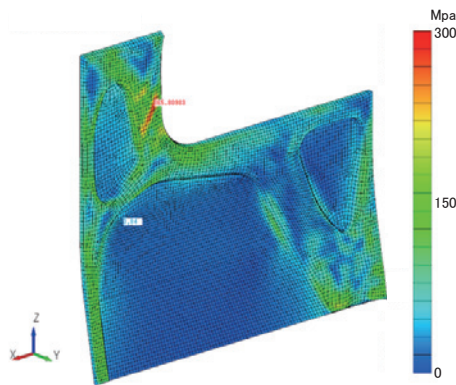


図5 形状最適化の FEM モデル



(a) 最適化後の凹凸形状（板厚一定）



(b) 相当応力分布

図6 形状最適化の結果

る。このとき、部材は薄板構造であるため、解析に用いる要素をソリッド要素からシェル要素に変更する。また、位相最適化から得られた荷重伝達密度の分布は、局所的に変動が大きいため、形状モデルのスージングを行う。次に、この形状をもとに軽量化と剛性の向上を両立する形状最適化を行う。負荷条件は、位相最適化と同様に3つの荷重ケースとする。また、目的関数は、剛性最大および応力最小とし、制約条件は、質量70%低減として、

形状最適化を実施した。材料定数は、ステンレス鋼の弾性係数：210GPa、ポアソン比：0.3として計算した。

図6(a)に形状最適化により得られた構体形状を示す。曲面形状に変形させることにより剛性が向上しており、さらに、図6(b)に示す通り相当応力の分布に関しては、部分的に応力の高いところがある。しかし、最大でも235MPaであり、ステンレス鋼製車両で一般的に使用される材料の耐力（例えば、SUS301L-ST鋼の耐力410MPa）を充分下回っている。さらに応力を低減させる必要があるれば、再度、制約条件等を修正し、形状最適化を実施することとなる。

3. 一車両構体モデルによる応力解析

3.1 解析モデル

車両構体全体の構造最適化を行うにあたり、図2の最初のステップである一車両モデルによる応力解析を実施する。ここでは、FEM解析により構体荷重試験に相当する外力を構体に与えた時の応力分布を評価し、構造最適化を実施する部分領域を決定する。本研究では、図1に示す在来線用ステンレス鋼製車両の一車両構体モデルを初期形状として、車両構体の静荷重試験相当の応力解析を実施した。解析において適用した要素は、3次元ソリッド要素である。メッシュ分割は構体構造のみとし、床下機器やクーラー等の付帯設備は、質点として付加している。また、本車両構体モデルは、構造最適化による構体構造の導出を目的としていることから、窓や出入口部などの開口部はあらかじめモデル化し、構体の各面の厚さは30mm厚として、均一な板材により構成した。ここでは、内装品は考慮していない。

3.2 解析条件

応力解析における負荷条件として、JIS E7106に規定されている静荷重試験の荷重条件を適用し、表1に示す垂直荷重、ねじり荷重、車端圧縮荷重に相当する荷重を負荷した解析をそれぞれ実施した。荷重点は、垂直荷重では床面全面とし、ねじり荷重では空気ばね位置、車端圧縮では連結器取り付け部とした。なお、クーラーユニットによる荷重は、7.35kNと想定してユニット取り付け部に集中荷重として負荷する。

3.3 構造最適化の領域と負荷条件

一車両構体モデルを用いて静的応力解析を実施した結果として応力分布を得た。図7には、負荷条件が垂直荷重の場合のミーゼスの相当応力分布を示す。この結果より、枕ばりから中央寄りの側構体、特に側窓コーナ一部および出入口コーナー一部付近において、応力集中による顕著に高い応力が発生していることがわかった。同

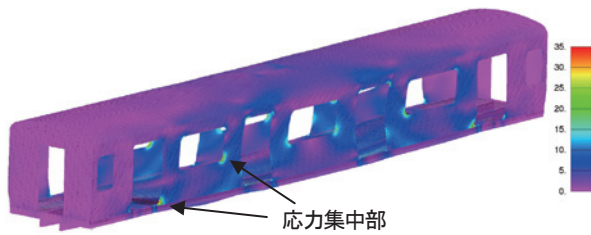


図7 垂直荷重時の解析結果
(ミーゼス相当応力分布：単位 MPa)

表1 一車両モデルの荷重条件

条件	荷重	荷重位置
垂直荷重	392 kN	車内床面全面
ねじり荷重	40 kN・m	3,4位空気パネ部
車端圧縮	490 kN	連結器取り付け部

様に、ねじり荷重や車端圧縮においても側窓コーナー部および出入り口コーナー部で同様に高い応力が生じていることがわかった。一方、側窓と出入り口の開口部間では、高い応力は生じていない。そこで、これらの結果より構造最適化を行う部分領域として、図8に示すように開口部間を境界として3つの部分領域に分けることとした。車両構体全体としては台枠部を除く領域を18分割している。

構造最適化のプロセスでは、一車両構体モデルから高負荷領域を部分構体モデルとして切り出し、それぞれの部分構体モデルを対象に応力解析を行う、いわゆるズームング法³⁾を用いる。部分構体モデルの境界条件は、一車両構体モデルの境界節点の変位値を強制変位として与えることにより、部分構体モデルの応力状態が一車両構体モデルの応力負荷状態と同等となるようにした。

4. 部分領域の構造最適化

4.1 構造最適化の解析条件

一車両構体モデルを用いた応力解析より決定した各部分領域モデルに対して、解析により得られた各領域端部の変位を荷重条件として与え、構造最適化のアルゴリズムに従って位相最適化および形状最適化を行った。なお、垂直荷重およびねじり荷重に関しては、図3と同様にモデルの左右で正負が異なるため、正負を入れ替えた負荷条件も加え、全部で5ケースの負荷条件を構造最適化に用いた。位相最適化においては、目的関数を剛性最大とし、制約条件を質量70%低減として、それぞれ部分領域ごとに荷重伝達密度分布を求めた。これより形状最適化に用いるFEMモデルを作成し、解析を実行した。形状最適化では、目的関数を、剛性最大および応力最小とし、制約条件については質量70%低減とし、さらに凹凸形状の最大高低差は最大30mmとして与えて形状最適化を実施した。また、プレス加工の製造制約として凹凸の曲面が鋭角形状にならないよう制約条件を与えた。

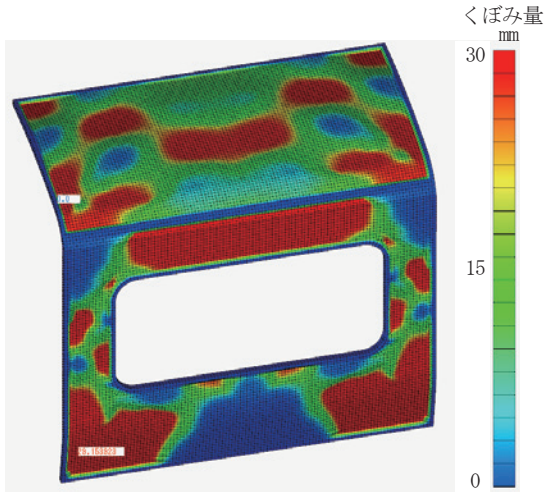
4.2 構造最適化の解析結果

一連の構造最適化を実施した結果、図9に示す凹凸形状のプレス成型体形状が得られた。赤色部ほど内部に窪んだ形状となっている。車端部の屋根は、最適化による形状変化が非常に小さい。これは、この部位が枕ばりより外側にあるため、構体に作用する負荷が小さいためと考えられる。一方、妻面については、ねじりの荷重を与えた場合の負荷が大きいため、明瞭な凹凸形状変化が得られている。

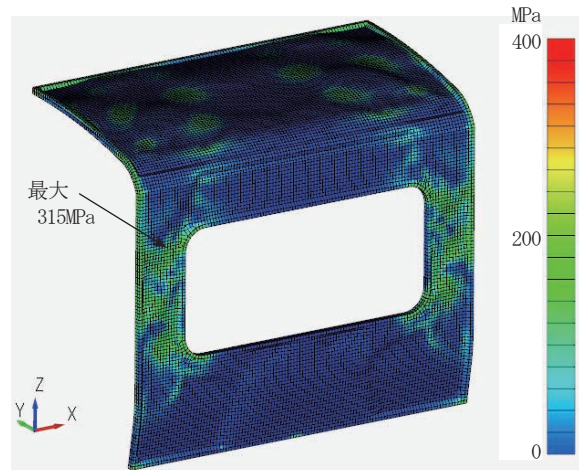
次に、部分領域モデル単体での応力分布を確認した。図10は構造最適化後の部分領域モデルに垂直荷重を与



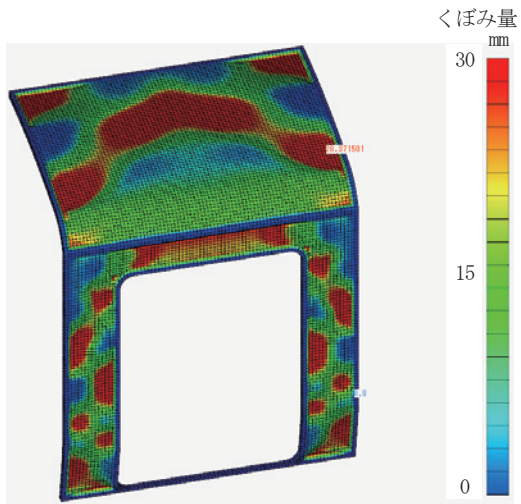
図8 構造最適化のための部分領域モデル



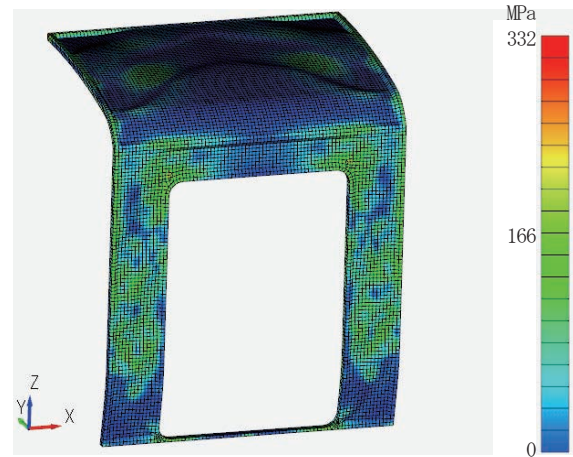
(a) 側窓部



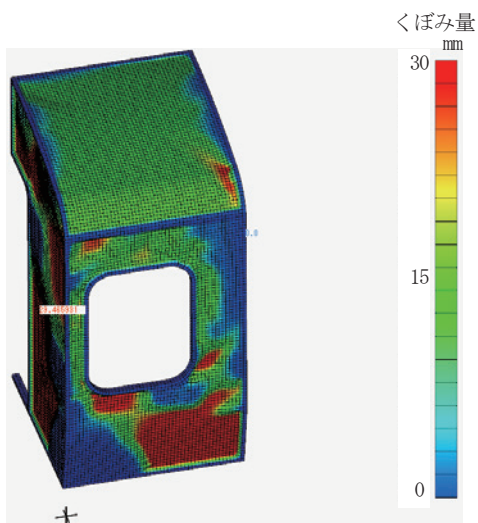
(a) 側窓部



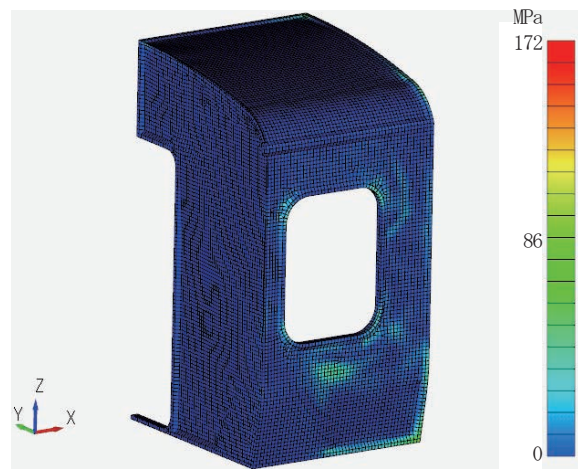
(b) 出入り口部



(b) 出入り口部



(c) 車端部



(c) 車端部

図9 構造最適化による導出したプレス成型体形状

図10 構造最適化後の応力分布（垂直荷重時）

特集：鉄道力学

えた場合の応力分布である。これらを見ると最適化前の形状では応力集中があった開口部の応力が分散して緩和されていることがわかる。また、各部の応力は最大でも315MPaであり、強度上問題ない応力となっている。

4.3 車両構体構造の検証

導出した部分領域の構造を結合して一車両構体モデルを作り、再度応力解析を実施した。ただし、構造最適化により得られた形状は表面に凹凸があるため、最終的な車両構体としては、図11のように外板を取り付けた二重構造とする。

一車両構体モデルによる解析の結果より、図12に示す垂直荷重を与えた場合の相当応力分布をみると、1車両の構体としていずれの部位においても高い応力が生じていないことがわかる。ねじりや車端圧縮荷重においても同様であった。

構体質量および剛性に関しては、外板、台枠を含む構体全体として、既存の在来線ステンレス鋼製車体と比較して17%の質量低減となり、曲げ剛性については12%

の向上を実現できた。

5. まとめ

鉄道車両構体の軽量化および高剛性化を目指して、構造最適化手法として位相最適化と形状最適化手法を組み合わせた手法を提案し、具体的な構体構造の導出を行った。従来の骨組構造とは異なる凹凸形状のプレス成型体を適用した構体構造を導出するため、一車両全体のFEM解析においてゾーミング法を用いて解析の効率化をはかったうえで、位相最適化と形状最適化を組み合わせる部分領域の構体の形状を決定し、これを所定の目標値に達するまで繰り返し実施する構造最適化アルゴリズムを構築した。

本手法により1車両の構体構造を導出し、軽量化と剛性向上の効果を検証したところ、17%の質量低減と12%の曲げ剛性向上を同時に実現できることを確認された。

文献

- 1) 山田崇恭, 西脇眞二: トポロジー最適化の基礎とその展開, 計算数理工学レビュー, No.2014-1, pp.25-42, 2014
- 2) 宇治田寧: 軌道用車両構体に対する構造最適化解析, 第19回交通・物流部門大会講演論文集, 2010
- 3) 高垣昌和, 沖野友洋, 八木毅ら: 構造最適化手法による車両構体の強度向上に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.28., No.7, pp.39-44, 2014
- 4) 西脇眞二, 泉井一浩, 菊池昇: トポロジー最適化, 丸善, pp.1-17, 2013
- 5) 横山正明: 高精度計算力学, 朝倉書店, p.119, 1998

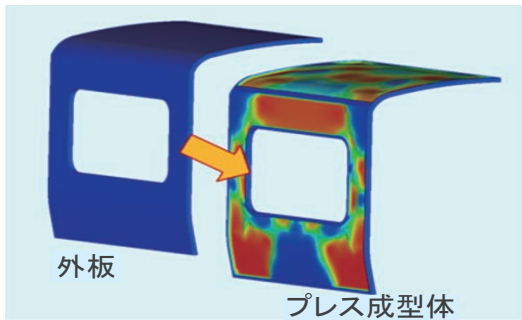


図11 プレス成型体による構体構造

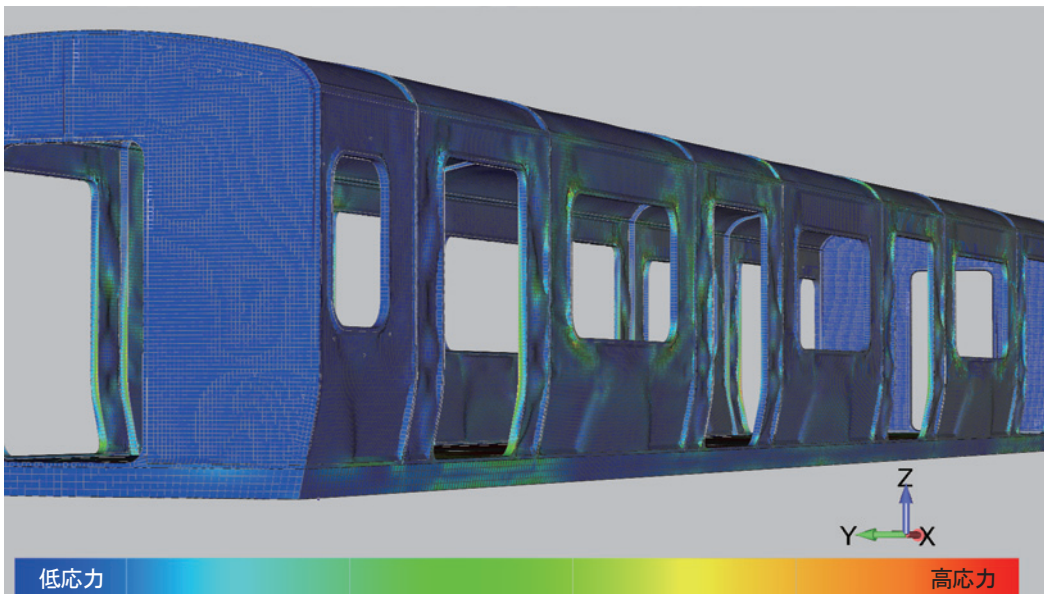


図12 一車両モデルによる応力解析結果（ミーゼス相当応力）