

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

軽くて変形しにくい車体を設計する

鉄道車両に対しては、安全性、乗り心地向上、あるいは省エネ、高速化など多岐にわたる特性が求められています。これらの要求を満たすために、車両構体を軽量化し、変形しにくくするために高剛性化を同時に達成する必要があります。そこで、車両構体にプレス成型体による構造部材を採用するとともに、軽くて変形しにくい車体構造を解析的に導出するアルゴリズムを開発しました。これにより、省エネや高速化のために軽量化と、乗り心地改善のための高剛性化を両立した新たな車体構造を具体的な解析事例をもとに紹介します。



高垣 昌和
Masakazu Takagaki
鉄道力学研究部
計算力学研究室
室長
【専門分野】 構造解析、
損傷評価、車両の強度
評価



八木 毅
Tsuyoshi Yagi
車両構造技術研究部
車両強度研究室
室長
【専門分野】 台車の強度
評価、疲労破壊



加藤 祐貴
Yuki Kato
車両構造技術研究部
車両強度研究室
研究員
【専門分野】 台車の強度
評価

はじめに

最近の鉄道車両は、衝突安全設計を取り入れた構造が増えており構体質量が増加傾向にあります。その一方、省エネ、高速化の観点から構体の軽量化が求められています。また、乗り心地向上のために構体の剛性向上が望まれています。従来¹⁾の在来線通勤型車両は図1に示すように骨組構造になっていますが、側柱と横骨などは継ぎ手により結合されており不連続な構造となっています。さらに部品点数も多く複雑な構造となっていることから、軽量化や高剛性化が困難となっています。そこで、軽くて変形しにくい車両構体構造として、凹凸形状を有したプレス成型体による一体構造の適用を考えました。新たな構体構造を導出するため、構造最適化手法による設計法の検討¹⁾を行い、その有効性について確認しました。ここでは、

新たな構体構造を導出する構造最適化のアルゴリズムに基づいて、合理的な設計手法の確立を目指すとともに、プレス成型体を適用した新しい構体構造を提案します。

構造最適化手法とは

初期構造をもとに、設計要件を満たす形状を解析的に求める方法として構造最適化手法があります²⁾。その中で、主な手法として位相最適化、形状最適化、および寸法最適化があります。位相最適化は、初期構造に荷重が与えら

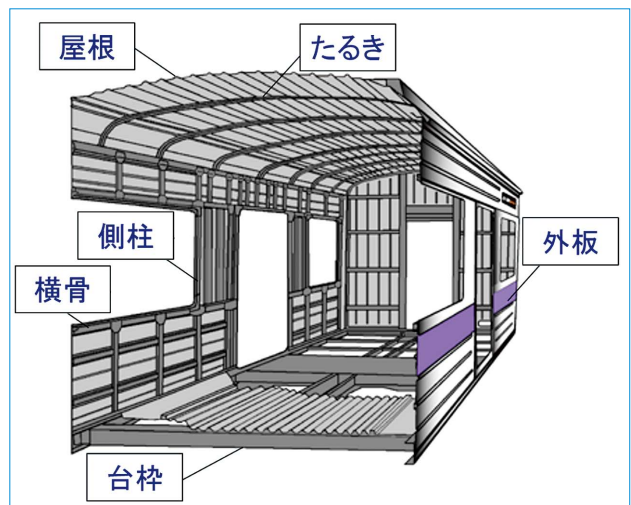


図1 従来の車両構体構造

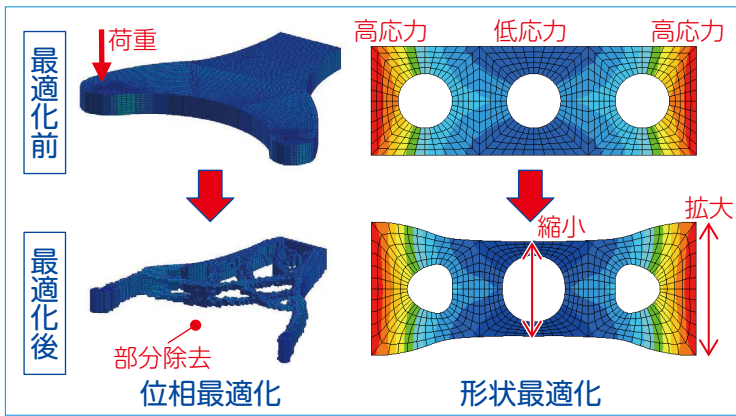


図2 構造最適化の概念

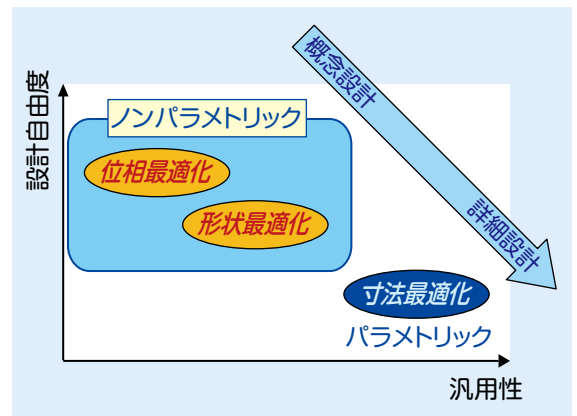


図3 構造最適化の設計概念

れた場合にその負荷に対する影響度合い（荷重伝達密度）を算出して、影響の低い部材を除去することにより部材配置の最適化を行うもので、構造の概念設計に適しています。形状最適化は、たとえば、最適化の条件として質量の最小化、発生応力が増加しないこととした場合、荷重により生じる応力が初期状態より増加しないように形状を拡大したり縮小したりして、質量が最小となる最適化形状を求める手法です（図2）。これらの手法は、初期形状に対してどのように変形させるかを負荷に応じて解析的に決定する手法（ノンパラメトリック）となります。また、最適化において評価対象として、強度、剛性、質量など多くの条件を考慮可能です。多数の設計要件を設定できるため、最適化の自由度は高く、既成概念にとらわれない構造を導出することができます。一方、寸法最適化は、部材の各寸法の中から変化させる寸法を指定して、その範囲で最適な寸法を算出する手法（パラメトリック）となります。この手法は、個別に最適化のための寸法を指定する必要がありますが、詳細設計には適しているとされています（図3）。

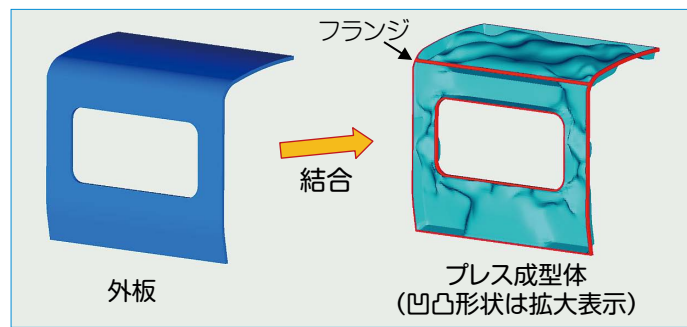


図4 プレス成型体による新たな車両構体構造

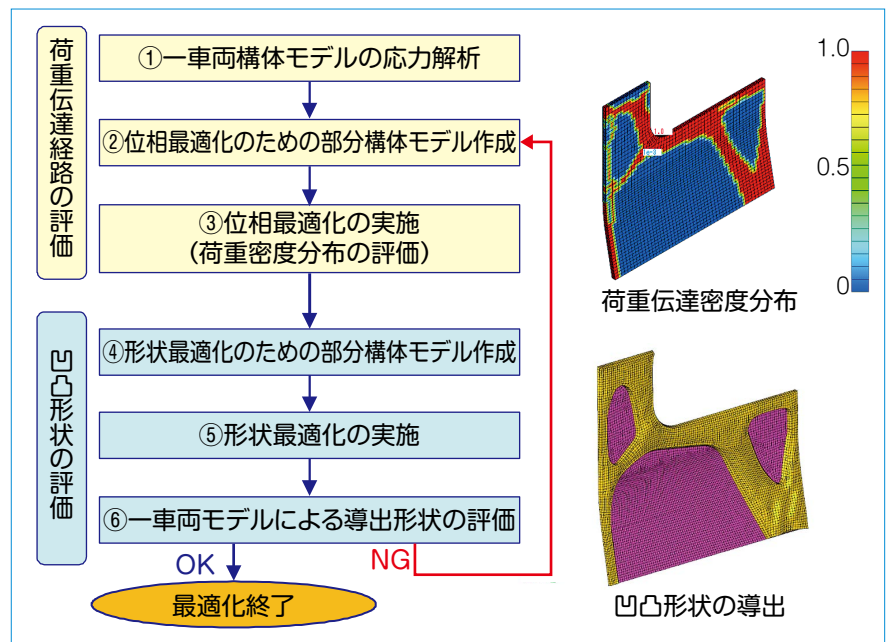


図5 構造最適化の解析アルゴリズム

なプレス成型体による一体構造の適用を考えた場合、これまでの設計概念では軽量化や剛性が向上した形状を導出することは困難であると考えられます。そこで、上述の構造最適化手法を活用してプレス成型体の形状を導出する設計手法を構築しました。ここでは、位

相最適化と形状最適化を組み合わせることにより概念設計からより詳細な最適化を可能とした解析アルゴリズムを構築しました（図5）。

鉄道車両の構体は大規模な構造体であるうえ、実挙動が複雑であるため、部分的なモデルだけでは十分な精

鉄道車両構体の構造最適化

(1) 構造最適化によるプレス成型体構造の導出

車両構体構造として図4に示すよう

度で構体に掛かる負荷を解析することは困難です。その一方で、高い負荷を受ける領域は限られており、一車両構体モデルにより構造最適化を実施することは効率的ではありません。そこで、**図5**に示した解析アルゴリズムの説明を兼ねて、車両構体の構造最適化の事例を示します。

①一車両モデルの応力解析

一車両部分領域の構造最適化に必要な負荷条件を算出するため、**図6**に示すような一車両の初期形状モデルをもとに、応力解析を実施します。この初期形状モデルの側面、妻面、屋根は、均一の板厚(30mm)とし、側窓、出入口については既定の開口部として設定しています。荷重条件としては、JISに定める構体荷重試験や実際の現車試験より得られた実測値の適用が考えられます。

②位相最適化のための部分構体モデルの作成

ここでは、**図6**に示す通り、中央寄りの構体側面、とくに窓コーナー部および出入口コーナー部付近において、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りました。一方、側窓と出入口の間では、高い応力は生じていないことから、構造最適化を行う部分領域として、**図6**に示すように開口部間を境界とした3つの部分領域に分割しました。

③位相最適化の実施

①の応力解析の結果より求められる負荷を荷重ケースとして、部分構体モデルの位相最適化を実施することにより荷重伝達密度を求めます。

④形状最適化のための部分構体モデル作成

この結果をもとに荷重伝達密度の高い部位に関して、法線方向のくぼみ深さを大きくします(**図5**)。つまり、荷重伝達密度の大きさにより凹凸形状の

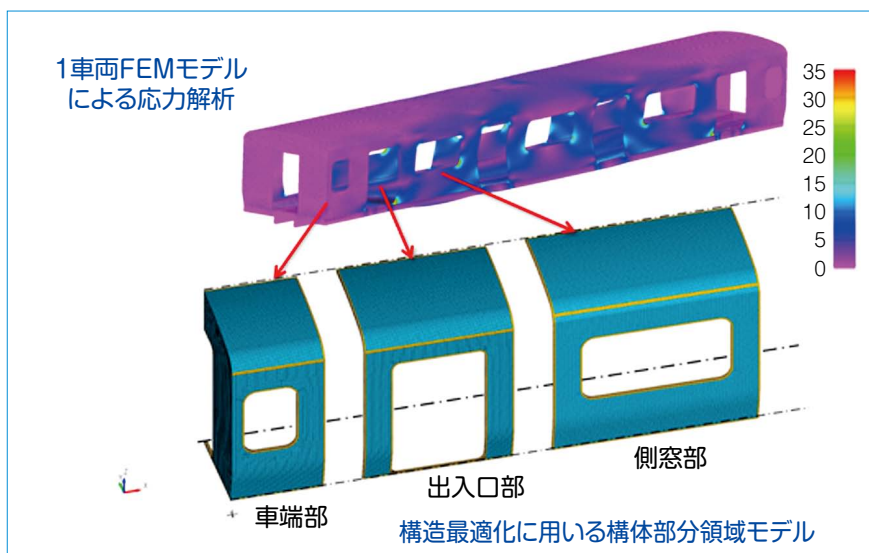


図6 垂直荷重時の解析結果(相当応力分布:MPa)と部分領域モデル

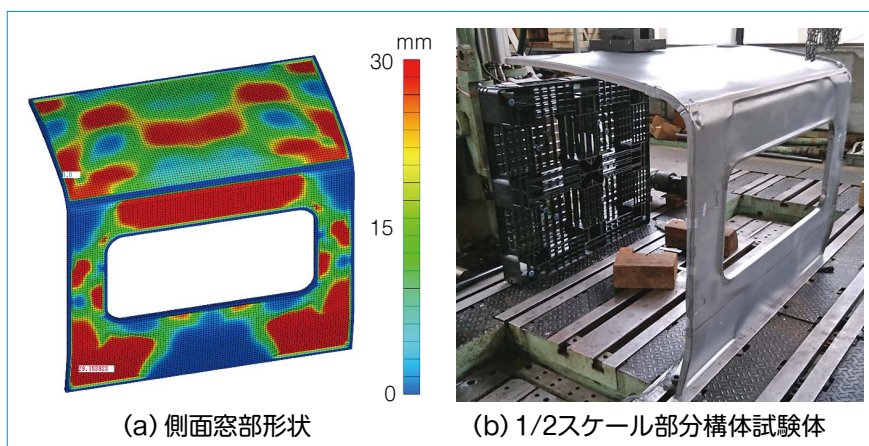


図7 構造最適化後の側面窓部形状と応力分布

高低差をつけるようにします。

⑤形状最適化の実施

この解析モデルをもとにさらに軽量化と剛性を高めるため、発生応力を最小化、剛性を最大化とし、質量は一定量低減する最適化条件で、形状最適化を実施することにより部分領域の構体構造が導出されます。

⑥一車両モデルによる導出形状の評価

鉄道の車両構体は同一構造の部位が多くあるため、構造最適化により得られた構造を当該部位だけでなくその他の同一構造部位にも適用して一車両全体を構成することが可能です。

最後に、最適化された部分構体の構

造を適用した一車両構体モデルを新たに作成して応力解析を行い、その効果を検証し、設計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します。

(2) 構造最適化により得られた部分領域の構体構造

一連の構造最適化を実施した結果、側窓部の構体構造として、**図7(a)**に示すような凹凸形状が得られました。朱色部が車体内部方向にくぼんだ形状となっています。また、青色部が外板と接する部位となります。

構造最適化により得られた構体構造が強度的に問題ないことを確認するた

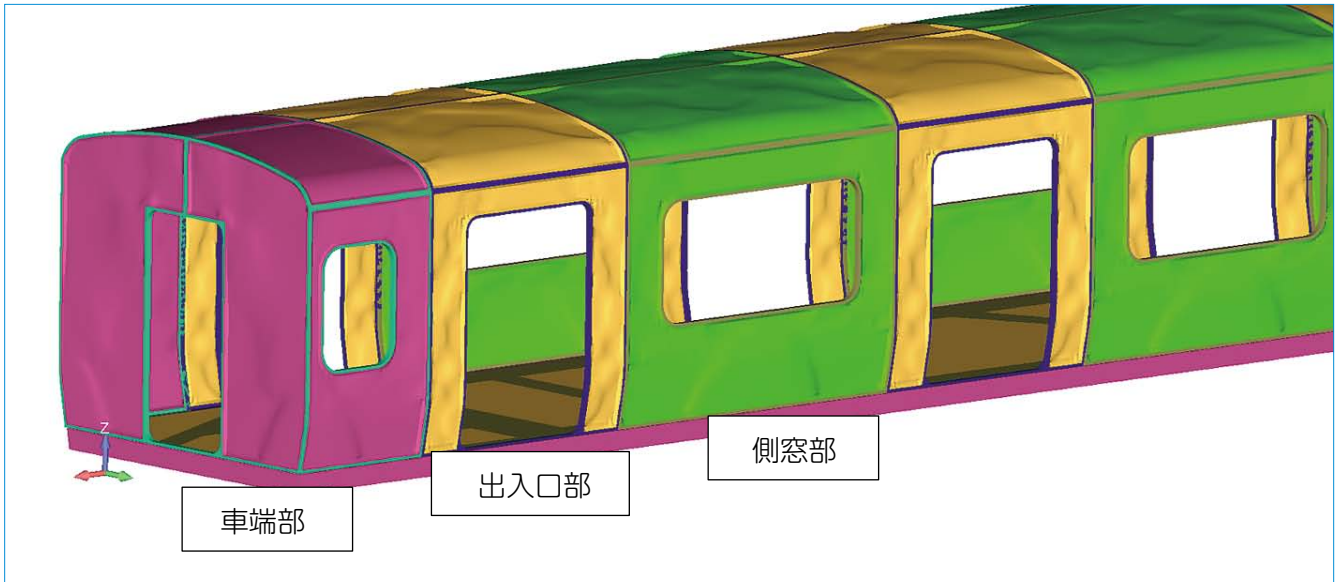


図8 構造最適化により得られた凹凸形状を適用した車両構体構造

め、1/2スケールの部分構体試験体を製作し、強度試験を行って所定の強度を有していることを確認することにより構造最適化手法の妥当性を確認しました(図7(b))。出入口部と車端部の部分領域についても同様に構造最適化を実施して凹凸形状を導出しました。

構造最適化により軽量化および高剛性化された車両構体構造

導出した部分領域の構造を結合して台枠を含めた一車両構体モデルを作り、再度応力解析を実施したところ、構造最適化により得られた構体構造のみでも強度的には問題ないことが確認されています。得られた車両構体構造は、図8に示すような凹凸形状を有した構造となりました。いびつな凹凸があると外観上、外板を取り付ける必要があると考えられます。このため、最終的な車両構体としては、自動車のボンネットなどと同様に図4に示すような外板を取り付けた二重構造となります。実際の製造においては、隣接する部分構体構造および外板をそれぞれ

レーザー溶接などで接合することになります。提案する構体構造(台枠と外板を含む)と、既存の在来線ステンレス鋼製車体と比較したところ既存車両の構体質量がおよそ6.8tですが、これと比較して17%の質量低減となり、曲げ剛性については、既存構体の中央部のたわみ量を10mmとした場合に12%の向上を達成しました。

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、位相最適化と形状最適化手法を組み合わせた構造最適化手法を提案し、在来線車両の具体的な構体構造の導出を行いました。その際、従来の骨組構造よりさらなる軽量化、高剛性化を実現するため、凹凸形状のプレス成型体を適用した構体構造を導出しました。一車体全体のFEM解析結果をもとに、位相最適化と形状最適化を組み合わせて部分領域の構体形状を決定しました。これを所定の目標値に達するまで繰り返し実施する解析アルゴリズムを構築しました。

本手法によりプレス成型体を適用した一車両の構体構造を導出しました。軽量化と剛性向上の効果を検証したところ、省エネや乗り心地向上に寄与する質量低減と曲げ剛性向上を同時に実現できるレベルであることを確認しました。

今後は、構造最適化手法を適用した衝突安全設計の検討や本手法の実用化への取り組みとして試作車などへの最適化構造の導入に向けてさらなる検討を行い、設計手法として確立させたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 高垣昌和, 沖野友洋, 八木毅, 山本勝太, 高野純一: 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
- 2) 西脇眞二, 泉井一浩, 菊池昇: トポロジー最適化, 丸善出版, pp.1-17, 2013