

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

# 省エネルギーのために 鉄道車両を軽量化する

最近の鉄道車両は、走行性能、利便性、安全性などの点で高性能化が進んでいます。その一方で、省エネルギーの観点では、高性能化にともなって車両重量が増加することにより、走行時の消費エネルギーが増大する要因となります。このため、消費エネルギーを抑制するために、車両を軽量化することが求められています。そこで、軽量化された車両構体を設計するための技術として、構造最適化による軽量化手法を開発しました。ここでは、構造最適化とともに軽量化された車両の事例を紹介します。



高垣 昌和  
Masakazu Takagaki  
鉄道力学研究部  
計算力学研究室長



沖野 友洋  
Tomohiro Okino  
車両構造技術研究部  
車両強度研究室  
主任研究員(上級)



小柳 勝敬  
Katsuhiko Koyanagi  
車両構造技術研究部  
車両強度研究室  
研究員

## はじめに

最近の鉄道車両は、走行性能、利便性、安全性などさまざまな点において高性能化が進んでいます。その一方で、新たな機器の搭載や衝突安全設計が取り入れられることにより車両重量が増加する傾向にあり、走行時の消費エネルギーが増大する要因となります。このため、省エネルギーの観点から車両の軽量化は重要な課題となっています。車両のなかで軽量化できるものとして車両構体が考えられますが、経験的な設計による軽量化には限界があります。

そこで、軽量化構体の設計手法として有効と考えられる構造最適化の適用を検討しました。構造最適化手法は、数値解析により形状の最適化を行う手

法であり、設計において広く活用されるようになってきました。とくに自動車、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ます。

鉄道車両の設計においては、わずかな活用事例や基礎検討レベルの事例<sup>1)</sup>はあるものの、まだ一般的とはいえません。ここでは、在来線の車両構体の軽量化に向けた構造最適手法とその活用例を紹介します。

## 構造最適化手法

従来設計の構造をもとに、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<sup>2)</sup>。その中で、主な手法としてトポロジー最

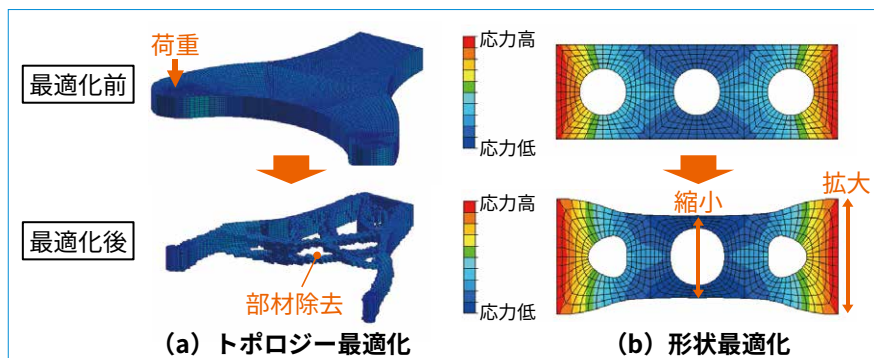


図1 構造最適化の概念

適化および形状最適化があります。トポロジー最適化は、初期構造に荷重が与えら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手法で、構造の概念設計に適しています（図1 (a)）。形状最適化は、負荷に対して初期構造に発生する応力や変位などが増加しないようにしつつ形状を拡大／縮小して、目的（軽量化であれば質量を最小）に応じた最適な形状を算出する手法で、詳細な形状設計に適しています（図1 (b)）。最適化では、質量、応力、剛性などのデータ量を関数で定義して、その関数の最小あるいは最大を求めます。このことから、最適化するデータ量のことを目的関数といいます。また、設計条件を満たすようにするために最適化に関係するパラメーターが指定の値を超えないようする条件(制約条件)を与えることもできます。これらの目的関数や制約条件は複数の条件を同時に設定できるため、最適化の自由度は高く、既存概念に囚われない構造を導出することができます。本研究では、より軽量の構造を得るために、トポロジー最適化と形状最適化を組み合わせた手法を構築し、鉄道車両の軽量化構体を検討しました。

ここで、構造最適化手法により得られる形状は、適切に制約条件を置くことなく実行すると、ほとんどの場合、加工ができない構造であったり、機能的に設計要件を満たさなかったりして、得られた形状は製造できないものとなります。そのため、構造最適化において、応力や剛性などの物理量が指定値を超えないようにする基本的な制約条件とあわせて、製造制約条件を設定することが重要になります。骨組構造の車両構体を対象として、構造最適化により軽量化を実施する際の製造制約条

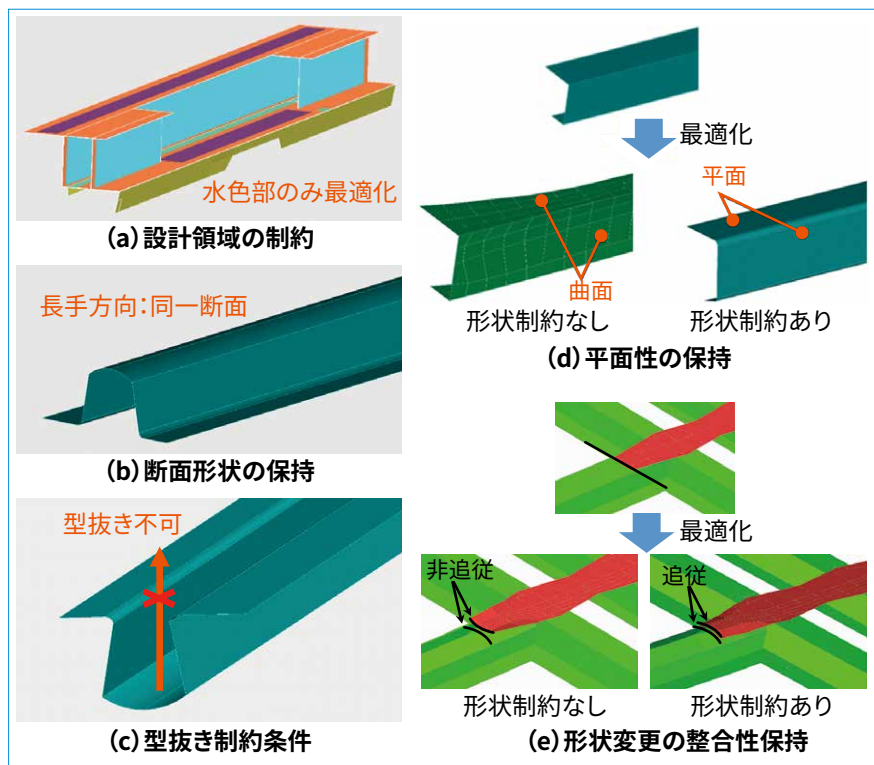


図2 構造最適化における製造制約条件

件としては、図2に示すような (a) 設計領域の制約（原形を保持したいときに最適化の領域を制限する設定）、(b) 断面形状の保持（長手方向を同一形状で統一する設定）、(c) 型抜き制約条件（プレス加工の型が抜けない形状にならないようする設定）、(d) 平面性の保持（指定の平面に凹凸ができないようにする設定）、(e) 形状変更の整合性保持（結合部で2つの部材の形状変化を追従させ同一形状になるようにする設定）などの製造制約条件を適用することで、構造最適化により製造可能な構体構造が導出できるようになります。

### 車両構体の軽量化

鉄道車両の構体は大規模な構造体であり、走行時の実挙動が複雑であるため、車両構体の部分的なモデルだけでは荷重伝達経路や応力評価が困難です。その一方で、高い負荷を受ける領域は限定的であり、また、在来線の一般的な車両構体は骨組構造となっており、はりや柱など多数の同一形状の部材で

構成されていることから一車両全体を対象として最適化を実施することは効率的ではありません。そこで、同一形状の部材の中でもっとも負荷の大きな部材を対象に軽量化した形状を求めれば、十分な強度を有していることからほかの同一形状の部位にも適用可能と考えられます。以上を踏まえ、骨組構造の車両構体を対象とした構造最適化による軽量化の手順を提案しました。

車両構体の構造最適化としては、はじめに構造最適化の対象とする部材に掛かる荷重条件（荷重など）を算出するため、従来設計の車両構体の解析モデル（一車両モデル）による応力解析を実施します。ここでは、JIS（日本産業規格）に準じた構体荷重試験（※参照）において車両構体に負荷する荷重

#### ※ 構体荷重試験

鉄道車両の構体における強度および剛性を確認するための試験。実体の車両（内装、付帯設備を除く）の試験体を用いて、乗客や走行時の負荷などを想定した荷重を加えたときに生じる応力や変位を測定する。



図3 構体荷重試験相当の荷重による発生応力(従来設計の車両構体)

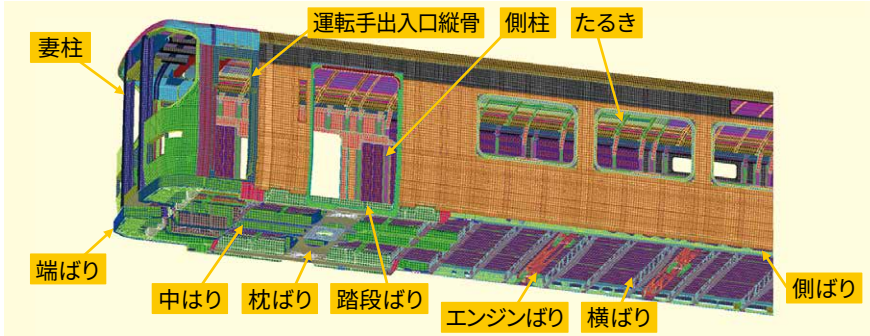


図5 構造最適化を実施した部材

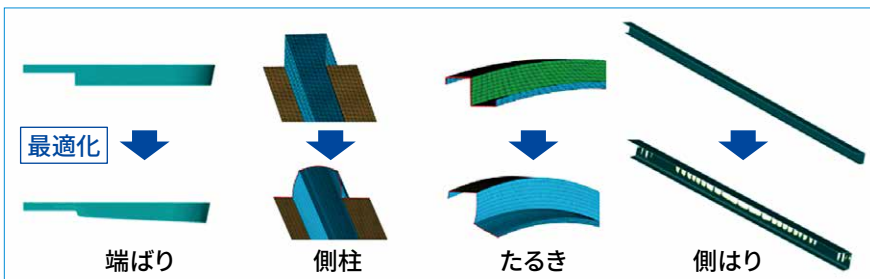


図6 構造最適化による軽量化構造

条件と同様の条件で応力解析を実施して、発生応力を算出します(図3)。応力解析の結果より部材ごとに発生応力のもっとも大きい部位を抽出します。この部位に掛かる荷重を構造最適化における荷重ケースとして設定します。

つぎに、各部材に対して、トポロジー最適化により荷重伝達密度分布を求め、解析モデルの低密度の部分を除いたモデルに更新します。つづいて形状最適化によりさらに軽量化を行い、軽量化された構造を導出します。部材の具体例として、構体の床面を構成する横ばりを対象として最適化の流れを図4に示します。最適化の条件としては、対象領域の質量を最小化、剛性を元の形

状と同等(剛性保持)、部材内に生じる発生応力が基準値以下とし、さらに前述の製造制約条件を適宜与えます。

以上のような手順で、図5に示す部材について構造最適化を実施して軽量化された形状を導出しました。構造最適化により形状がどのように変化したかを比較するため、主要な部材の最適化前後の形状を図6に示します。側柱やたるきなどは、従来にない独特の断面形状となっていますが、製造制約条件により製造および実使用が可能な構造となっています。構体の床面に用いられる側ばりは、最適化前の形状のように開口部のないものが一般的ですが、構造最適化の結果としては、長手方向

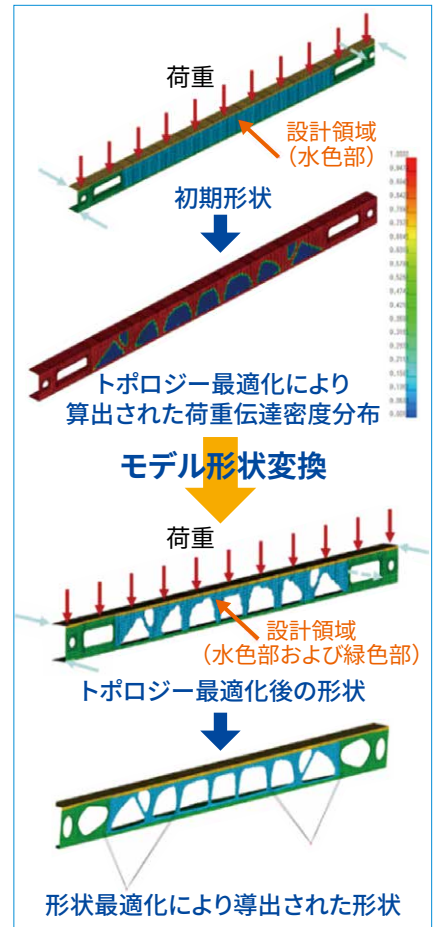


図4 構造最適化の流れ

表1 構造最適化による軽量化

部材	構造最適化による重量低減率(%)
横ばり	16.6
側ばり	16.2
中ばり	22.0
枕ばり	16.9
端ばり	15.5
エンジン吊りばり	19.1
踏段ばり	12.6
妻柱	23.9
運転手出入口縦骨	11.7
側柱	22.6
たるき	29.4

の中央寄りの側面に多数の開口部を有する形状となりました。また、図4に示されている横ばりも非常に大きな開口部を有する形状となりました。各部材の軽量化の効果については、表1に示すとおり、最適化前後で12~30%程度の重量低減を達成できました。とくにたるきの重量の低減率が大きくなっています。また、これらの軽量化部材を適用することにより構体全体の重量は、約7%減となりました。

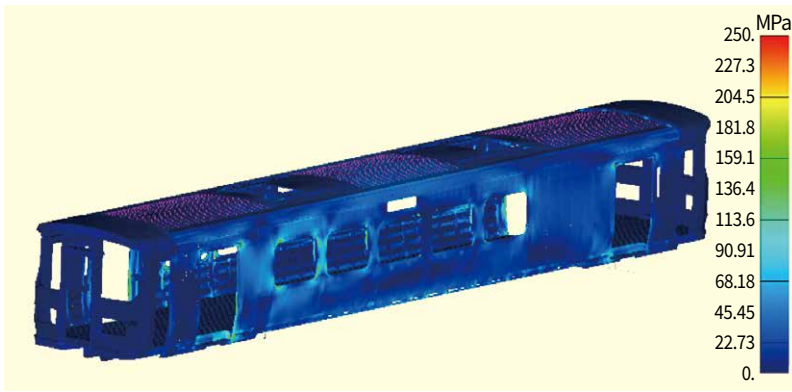


図7 構体荷重試験相当の荷重による発生応力  
(軽量化部材を適用した車両構体)

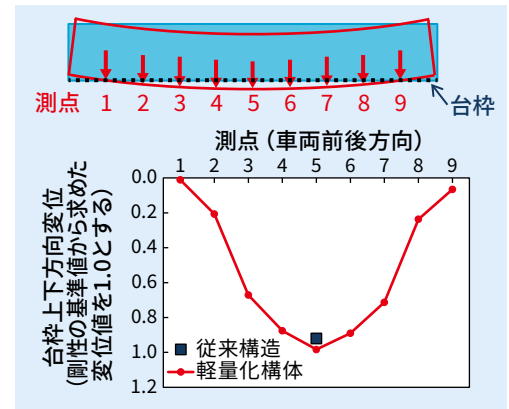


図8 台枠上下方向変位



(a) 構体全体



(b) 構体床面の構造

図9 軽量化構造を適用した試験車両構体

### 軽量化構体の検証

軽量化された部材およびそれらの部材を適用した車両構体を検証するため、軽量化構造の車両構体の解析モデルを作成して、応力解析により各部の発生応力を確認し、強度評価を行いました。荷重条件および拘束条件は、構造最適化の対象部材を抽出するために実施した応力解析と同条件です。解析結果として応力分布を図7に示します。図3に示す最適化前の応力分布とくらべて一部応力が大きくなっているもののほとんど差がなく、各部材の応力は強度の基準値となる値(耐力)を超えませんでした。部材レベルでは形状が大きく変わりましたが、構体構造としては、一車両モデルによる応力解析の結果より強度上、大きな変化はないことがわかりました。つぎに、車体の曲げ剛性について検証するため、図8に示すよう

に試験荷重に対する台枠の上下方向変位(剛性の基準値から求めた変位値を1.0とする)を算出しました。軽量化構体のもととなった従来構造(気動車)にくらべて最大の変位は大きくなりましたが、台枠の変位から求めた軽量化構体の剛性はJISに定める剛性の基準値レベルに収まる結果となりました。

さらに解析的な検証とあわせて、本手法により導出した軽量化構造を適用した構体構造の強度検証を行いました。図9に示すような実物大試験車両構体を製作して、JISに定められた条件による構体荷重試験を実施しました。170箇所の応力測定において、試験荷重での実測値が耐力を超える測定点はありませんでした。

以上より構造最適化により導出した軽量化車体がおおむね妥当であることが確認されました。

### おわりに

車両構体の軽量化の設計技術として構造最適化手法の適用を考え、この手法の実用化に向けて、骨組構造の在来線車両を対象として手法の検討および製作可能な軽量化構造を導出するための制約条件の設定法を提案しました。本手法を適用することで車両構体の軽量化が進むことにより走行時の消費エネルギーの削減の一助となることを期待しています。[RRR]

### 文献

- 1) 高垣昌和, 加藤祐貴, 八木毅: 構造最適化技術を活用した車両構体の提案, 鉄道総研報告, Vol.31, No.4, pp.17-22, 2017
- 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