

車両軽量化により 走行エネルギーを低減する



高垣 昌和
Masakazu Takagaki
鉄道力学研究部
計算力学研究室
上席研究員

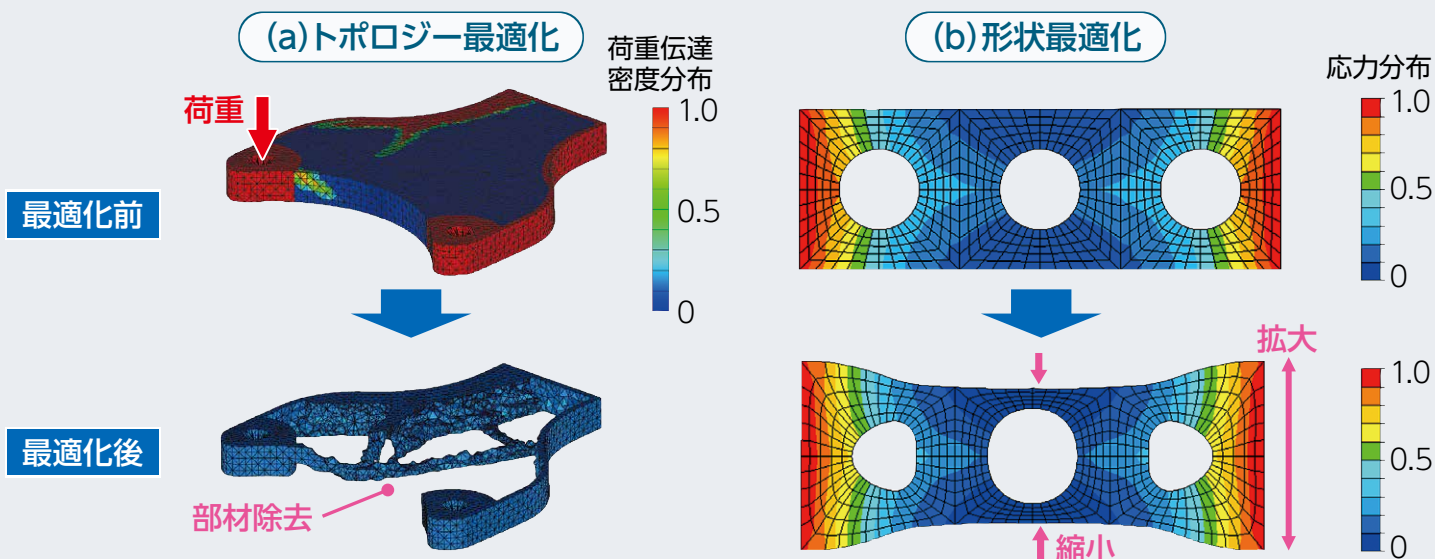
はじめに

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質量が増加する傾向にあり、走行時のエネルギー消費が増大しています。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。車両を構成するものとして、「構体」「台車」「制御機器（駆動装置など）」「内装」「空調機器」などがあります。そのなかで構造を検討して軽量化できるものとして「構体」が考えられますが、従来のように経験的な設計手法では、

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おこなう手法であり、設計において広く活用されるようになってきています。鉄道車両の設計では、わずかな活用事例や基礎検討レベルの事例¹⁾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化手法とその活用例とともに軽量化による走行時のエネルギー消費低減効果について紹介します。

図1 構造最適化の概念



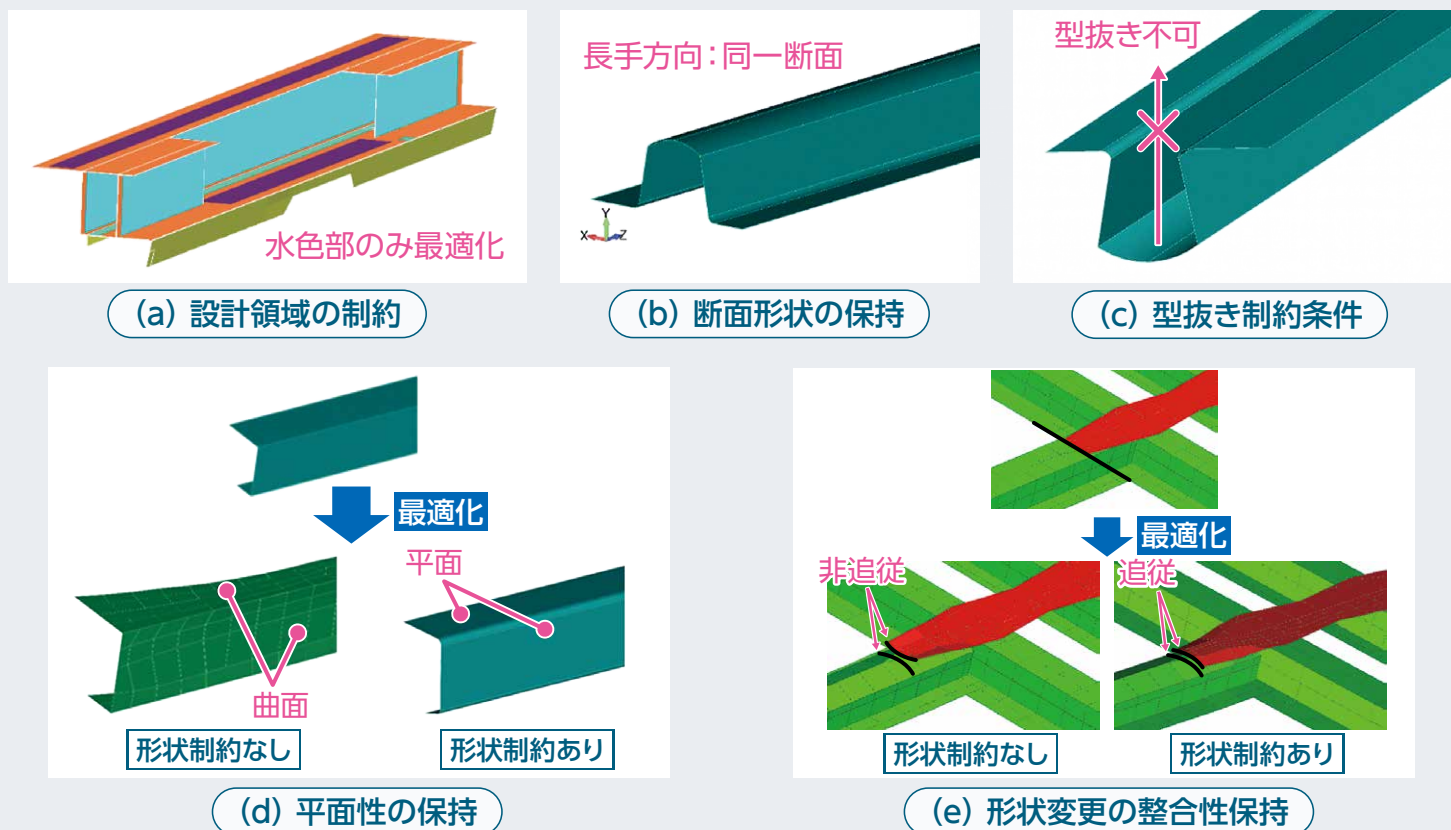


図2 構造最適化における製造制約条件

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²⁾。その中で、主な手法としてトポロジー最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荷重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)）。形状最適化では、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

最適化に関するパラメーターが指定の値を超えないようにする条件（制約条件）を指定します。これらの目的関数や制約条件は同時に複数の条件を設定できるため、形状変化の自由度は高く、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。

従来、トポロジー最適化と形状最適化は解析モデルの再構築が必要なため、個別に実施されていましたが、ここでは、解析モデルの連携を可能にすることにより、両手法を組み合わせた構造最適化手法を構築しました。これにより構造最適化の精度を高めるとともに最適化に掛かる計算コストや時間を低減しました。また、構造最適化手法により得られる形状は、適切に制約条件を定めることなく実行すると、多くの場合、製造が不可能であったり、機能的に設計要件を満たさない構造になったりします。そのため、応力や剛性などの物理量に対する制約条件とあわせて、製造制約条件が重要になります。骨組構造の部材に対する製造制約条件としては、

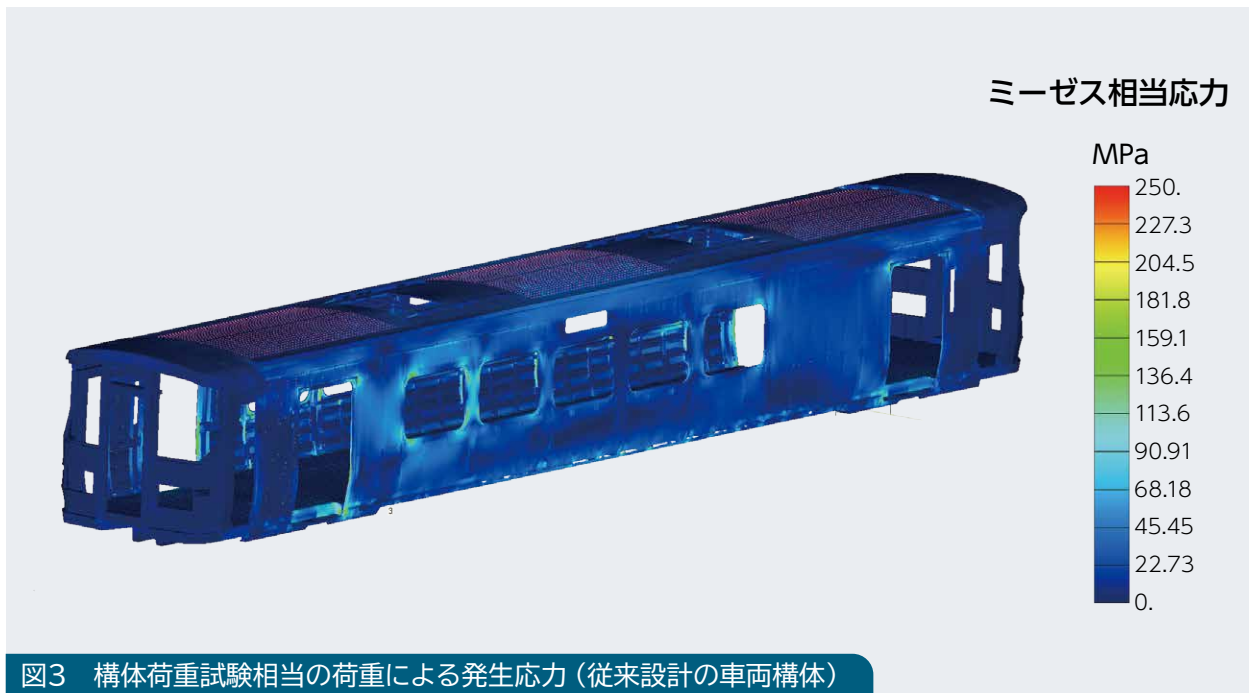


図2に示す (a) 設計領域の制約（原形を保持したいときに最適化の領域を制限する設定）、(b) 断面形状の保持（長手方向を同一形状で統一する設定）、(c) 型抜き制約条件（プレス加工の型が抜けない形状にならないようする設定）、(d) 平面性の保持（指定の平面に凹凸ができないようにする設定）、(e) 形状変更の整合性保持（結合部で2つの部材の形状変化を追従させ同一形状になるようにする設定）などの製造制約条件について検討しました。本手法により製造可能な軽量化構体が導出できるようになります。

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、在来線のステンレス鋼製車両は骨組構造のため、はりや柱など同一形状の多数の部材で構成されています。このため、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。以上のような考え方に基き骨組構造の各部材について軽量化形状を導出しました。

車両構体の構造最適化としては、はじめに対象とする部材に掛かる負荷条件（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を用いて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**[®]において載荷条件と同様の条件で応力解析を実施します（図3）。構造最適化における荷重ケースは、応力解析の結果より部材ごとに発生応力の

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。実物の車両（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掛けたときに生じる応力や変位を測定したり、構体を加振して固有振動数を測定したりして構体の機械的性能を確認します。また、走行時の荷重を負荷した測定結果より疲労強度についても評価します。

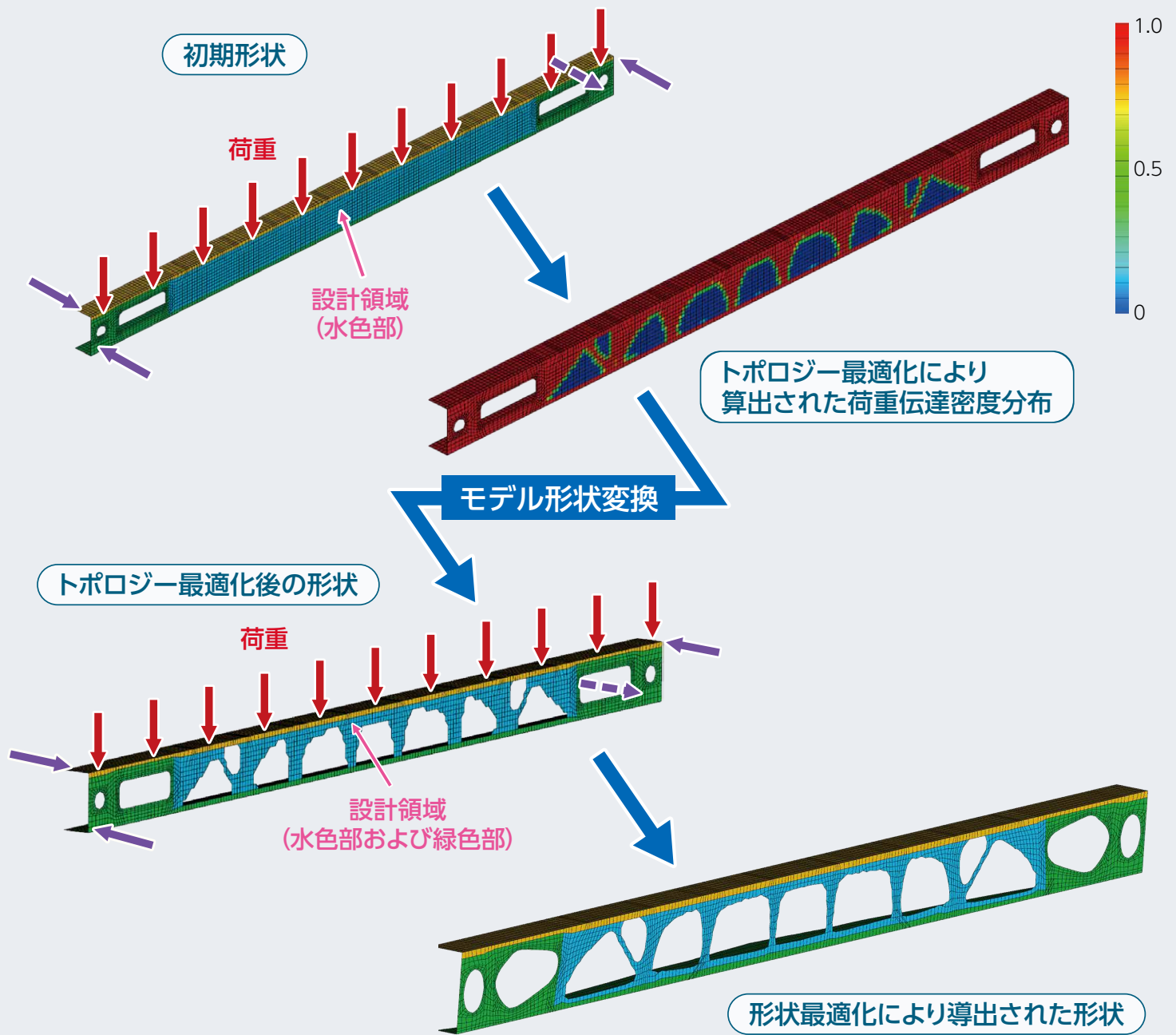


図4 構造最適化の流れ

もっとも大きい部位に掛かる荷重を適用します。

次に、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を行い、さらに軽量化された構造を導出します。本手法は、トポロジー最適化の結果から形状最適化の解析モデルを自動的に更新するアルゴリズムを実装しており、効率的に実用レベルで検討を進めることができます。具体例として、構体床面の横はりを対象として最

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。最適解（最適形状）を得る解析では、これらの条件を満たすまでに50回程度の繰り返し計算を行います。

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う変化

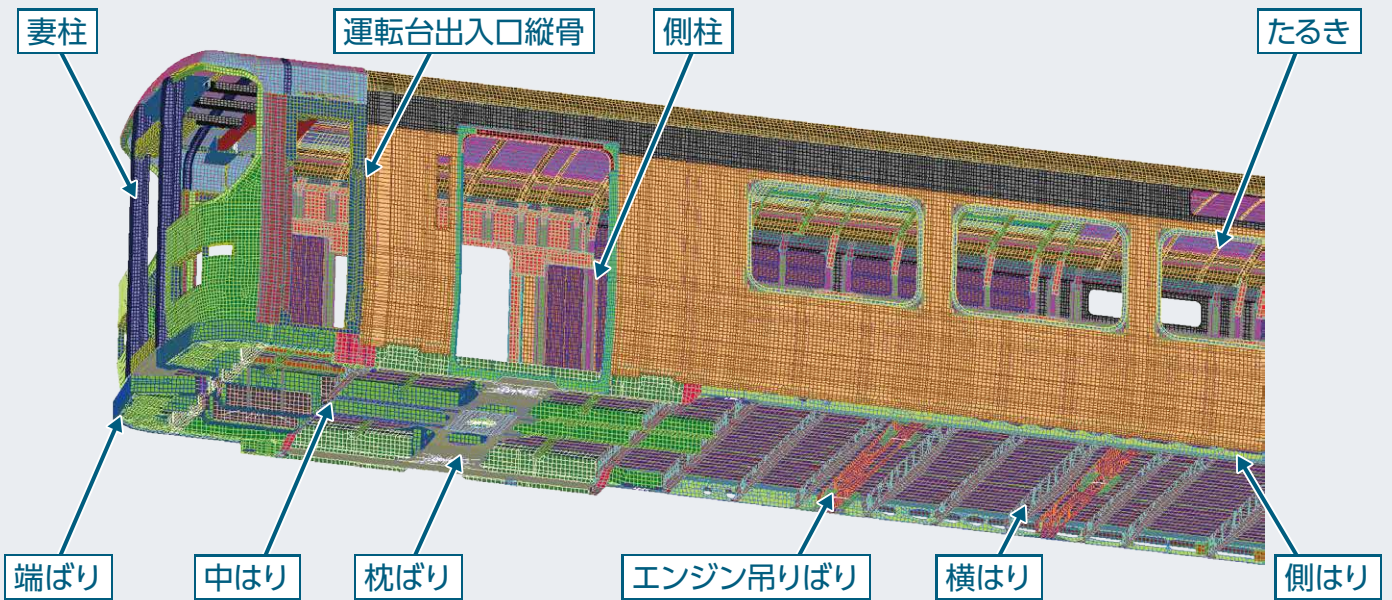


図5 構造最適化を実施した部材

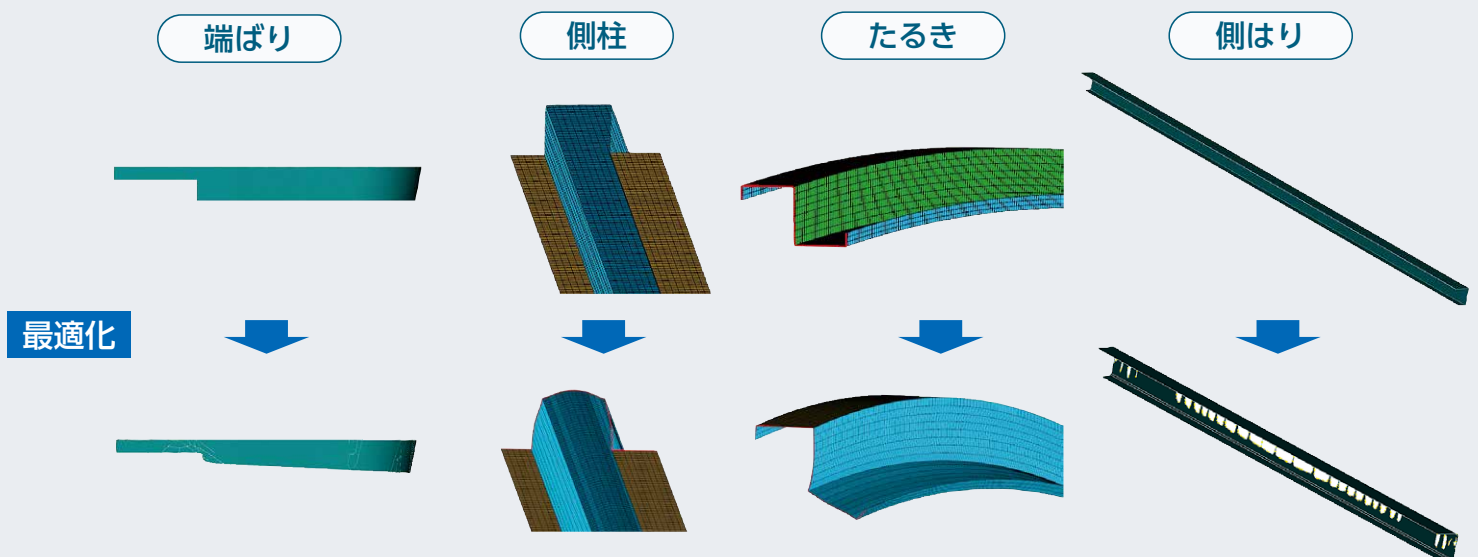
したかを比較するため、主要な部材の最適化前後の形状を図6に示します。側柱やたるきなどは、従来にない独特の断面形状となっていますが、製造制約条件により製造および実使用が可能な構造となっています。構体の床面に用いられる側はりは、最適化前の形状のように開口部のないものが一般的ですが、構造最適化の結果としては、長手方向の中央寄りの側面に多数の開口部を有する形状となりました。また、図4に示されている横はりも従来にない大きな開口部を有する形状となりました。各部材の軽量化

の効果については、最適化前後で12～30%程度の質量低減を達成できました。特にたるきの質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質量は、約7%減となりました。

走行エネルギー低減効果

鉄道車両に関して生涯のCO₂排出量を評価すると、製造、解体における割合に比べ、運用時のCO₂排出量が大半を占めています。排出量低減のためには、運用時のエネルギー消費を

図6 構造最適化による軽量化構造



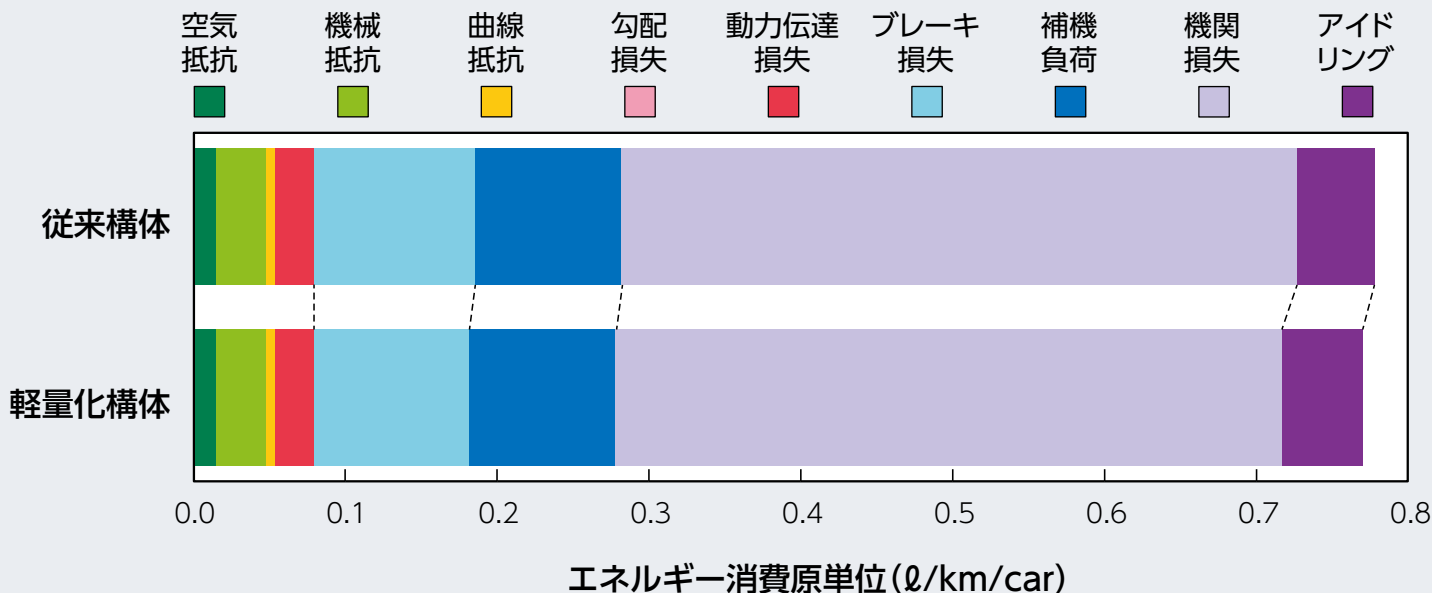


図7 走行エネルギーの比較

低減することが重要となります。鉄道総研では、これまでに車両のエネルギー消費原単位[※]を簡易に計算する方法³⁾を開発しました。この計算手法を用いて車両の軽量化により走行時のエネルギー消費原単位がどの程度、減少するかを計算しました。一例として、通勤型のディーゼル気動車を対象に、運用条件や線区を仮定して、従来の構体と軽量化した構体の車両におけるエネルギー消費原単位を比較したところ、軽量化によりエネルギー消費原単位は、1.2%低減される結果が得られました。ディーゼル車両では、軽量化により機関損失に対して効果が大きく、次いでブレーキ損失となっています。その他については、軽量化によるエネルギー消費量への低減効果はほとんどないものと考えられます(図7)。

車両走行によるエネルギー消費は、距離に応じて大きくなるため、軽量化した車両は、運用

年数が長いほど、エネルギー消費が抑えられ、CO₂排出量の削減に効果が得られると考えています。

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、トポロジー最適化と形状最適化を連携させることにより構造最適化の精度を高めるとともに最適化に掛かる計算コストや時間を低減した手法を構築しました。あわせて、製作可能な構体構造を導出するための制約条件を検討しました。構造最適化の事例として、ステンレス鋼製車両構体の軽量化構造を導出しました。さらに、軽量化された車両の走行エネルギー低減効果について評価しました。

本手法の適用により、車両構体の軽量化が進展し、走行時のエネルギー消費の削減の一助となることを期待しています。RRR

※ エネルギー消費原単位

原単位とは、各種エネルギーがどれだけ効率良く生産に使われたかを見るための指標です。エネルギー使用量と密接に関連をもつ値に対するエネルギー使用量となります。走行エネルギーとしては、距離と車両数に対するエネルギー使用量となります。

文献

- 1) 高垣昌和, 沖野友洋, 小柳勝敬: 構造最適化による車両構体の軽量化設計手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.12, pp.35-40, 2020
- 2) 西脇真二, 泉井一浩, 菊池昇: トポロジー最適化, 丸善出版, pp.1-17, 2013
- 3) 近藤稔, 小川和行, 宮部実: ディーゼル車両のエネルギー消費原単位簡易計算法, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 2011