



鉄道車両用空気バネのシミュレーション技術

Simulation Technology for Air Springs of Railway Systems

豊川 修平*
Shuhei Toyokawa

塩崎 学
Manabu Shiozaki

吉田 淳
Jun Yoshida

渡部 大二郎
Daijirou Watanabe

澤 隆之
Takayuki Sawa

原口 浩一
Hirokazu Haraguchi

空気バネは鉄道車両の乗り心地を向上させ、安全な高速走行を実現するには必須の部品である。都市人口の増加や環境問題への関心の高まりを背景に、自動車や航空機と比較して輸送効率が高くCO₂排出量やエネルギー消費量を抑制できる鉄道に注目が集まっており、世界各国で鉄道網の整備が進められている。世界中に鉄道網が普及する中、路線や環境に応じて多種多様な空気バネ特性が要求されている。そのため、当社ではより迅速な設計を行うことで、より多様なニーズに応えた提案をするべく、革新的な設計手法としてシミュレーションによる設計技術を開発している。今回、空気バネの静的特性と動的特性をシミュレーションで精度良く予測する技術を開発した。

The air spring is an essential component for improving the comfort of railway vehicles and realizing safe high-speed driving. Due to the growing urban population and increased concern about environmental issues, railways are attracting attention because they have higher transportation efficiency than automobiles and aircraft, and contribute to the reduction of CO₂ emissions and energy consumption. As the railway network spreads all over the world, air springs with various characteristics are required depending on the route and environment. To respond to such market needs and make proposals in a speedy manner, we are developing innovative design methods based on simulation. This time, we have developed a simulation technology that accurately predicts the static and dynamic characteristics of air springs.

キーワード：空気バネ、複合材、シミュレーション、予測技術、振動特性

1. 緒言

都市人口の増加や環境問題への関心の高まりを背景に、自動車や航空機と比較して輸送効率の高い鉄道に注目が集まっており、世界各国で鉄道網の整備が進められている。世界中に普及の進む鉄道網において、空気バネは鉄道車両の乗り心地を向上させ、安全な高速走行を実現するためには必須の部品である。

鉄道が整備される路線や環境に対して安全で乗り心地の良い高速走行を実現するために、多種多様な空気バネ特性が要求されるようになってきている^{(1),(2)}。そのような状況下、より迅速な設計を行うことで、多様なニーズに応えた提案をするべく、当社では効率的な空気バネの設計手法としてシミュレーションを活用した設計技術を開発している。今回、鉄道車両の乗り心地を左右する空気バネの特性のうち特に重要である特性、即ち静的な状態で車体を支える反力特性を示すバネ定数と動的な状態での台車から車体への振動の伝わりやすさを示す振動伝達率を精度よく予測するシミュレーション技術を開発した。以下、詳細について述べる。

2. 空気バネの構造と機能

鉄道車両用空気バネの模式図を図1に示す。空気バネは主要部品であるダイアフラムと積層ゴムから構成され、鉄

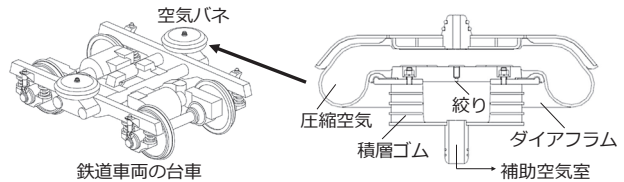


図1 鉄道車両の台車と鉄道車両用空気バネ

道車両を構成する台車と車体の間に設置される⁽³⁾。

前者のダイアフラムは、柔軟性と気密性に優れるゴムに補強繊維を埋め込んで強度を向上させており、圧縮空気を封入することで車体を支える部品である。ダイアフラムは“絞り”を含む配管を介して補助空気室と繋がっており、台車の振動時には圧縮空気がダイアフラムと補助空気室を行き来する。その際に配管で発生する流体抵抗により台車の振動が吸収されて乗り心地が向上する。

後者の積層ゴムは、ダイアフラム直下に連結し、車両走行中にダイアフラムが漏気（パンク）した際に最低限の乗り心地や安全性を保証する部品である。

今回、空気バネの機能にもっとも重要な部品であるダイアフラムのシミュレーション技術について述べる。

3. 空気バネ特性予測技術開発

3-1 開発目標

鉄道車両用空気バネでは、乗り心地に関わる重要な特性が2つある。1つは空気バネを圧縮（上下）方向、および、せん断（左右）方向に変位させるために必要な荷重を表した“バネ定数”であり、もう1つは台車振動に対する車体振動の振幅比を示す“振動伝達率”である。シミュレーション技術構築にあたって、これら特性値を精度良く予測することを目標とした。

空気ばねを構成する部品のうち、主にダイアフラムが“バネ定数”を担っており、配管を含むダイアフラムと補助空気室からなる系が“振動伝達率”を担っている⁽⁴⁾。

シミュレーション技術を構築するにあたり、最初に、“バネ定数”、“振動伝達率”の両方の特性を左右する“ダイアフラム”を精度よくモデル化することから着手した。そのモデルを用いて、空気バネの主要特性である“バネ定数”や“振動伝達率”の予測技術を構築した。

3-2 ダイアフラムのモデル化

ダイアフラムは内部に角度分布を持った補強繊維が曲面上に埋め込まれた複合材である。補強繊維は媒体となるゴムと比較して100倍以上も剛性が高く、空気バネのバネ定数に大きな影響を与える。そのため、空気バネ特性を正確に予測するためには、補強繊維の角度分布を実物通りにモデル化する必要がある。

補強繊維の角度分布を実物通りにモデル化するにあたり、ダイアフラムの製造工程に着目した。ダイアフラムの製造工程では、円筒状に成形した繊維補強ゴムを金型にはめ込み、高温高压ガスで円筒状繊維補強ゴムを加圧しながら所定のダイアフラム形状に加工する。ここで、初期の円筒状形状の繊維補強ゴムであれば、補強繊維の角度を明確に指示した設計図に基づいて精度の良いモデル化が可能である。変形とともにゴム内部の補強繊維角度が変化する非線形性を考慮した解析手法を用い、円筒形状の繊維補強ゴムからダイアフラム形状に変形させて、最終的なダイアフラム形状での補強繊維角度分布を予測するシミュレーション技術を開発した（図2）。

シミュレーションによって予測された補強繊維角度分布の妥当性を判断するため、ダイアフラム内に埋め込まれている補強繊維の角度分布をX線CT（Computed Tomography）

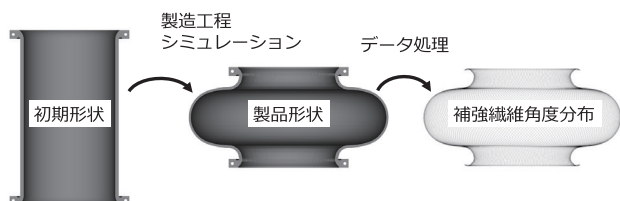


図2 補強繊維角度分布シミュレーション

測定による非破壊観察で検証を行った。検証にはテストピースとして鉄道車両用空気バネと比較して小型の産業用空気バネを用いた。図3にその結果を示す。ダイアフラムの製造工程を模擬することで、精度よくダイアフラム内の補強繊維角度分布をシミュレーションできることを確認した。

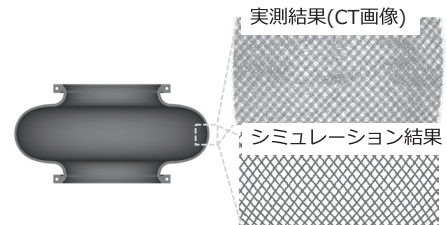


図3 補強繊維角度分布シミュレーション結果

3-3 バネ定数の予測

鉄道車両用空気バネの製造工程シミュレーションにより予測したダイアフラムモデルを用いて、上下、左右の二種類のバネ定数のシミュレーションを実施した結果を図4に示す。上下、左右バネ定数ともシミュレーションと実測は良く一致している。以上より、空気バネの重要部品であるダイアフラムの補強繊維角度分布を精度良く再現したモデルを用いて、空気バネの重要特性であるバネ定数を高精度で予測する技術を確立した。

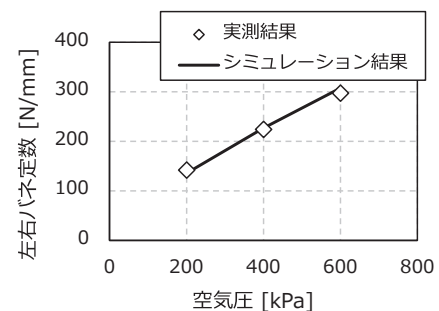
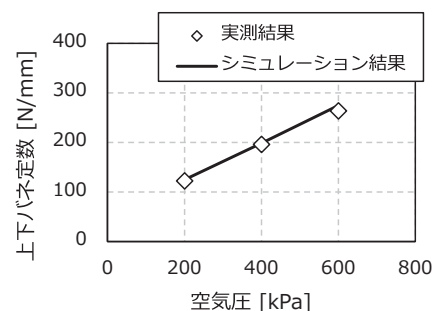


図4 車両用空気バネのシミュレーション結果
(上) 上下バネ定数、(下) 左右バネ定数

3-4 振動伝達率の予測

空気バネの振動特性を示す概念図を図5(a)に示す。台車に振動が起きた際、空気バネが伸縮し、空気バネ内部と補助空気室との間を圧縮空気が配管を介して行き来する。その際の流体抵抗により振動エネルギーが吸収されて、車体の振動が減衰する。人間が感じる不快な振動には周波数依存性があるため⁽⁵⁾、空気バネは人に敏感な周波数帯の振動を減衰させるように設計する必要がある。空気バネに要求される振動特性は、低周波で不快を感じない程度の共振が起こり、高周波で振動が減衰していくような特性である。

空気バネの振動は図5(b)に示すようにバネとダッシュポットを組み合わせたモデルにより表現できる⁽⁶⁾。“M”は車体の荷重、“ k_1 ”は空気バネの上下バネ定数、“ k_2 ”はダイヤフラムの内圧変化、“N”はダイヤフラムと補助空気室の容積比、“ Nk_2 ”は補助空気室の内圧変化、“C”は配管の流体抵抗を表す。

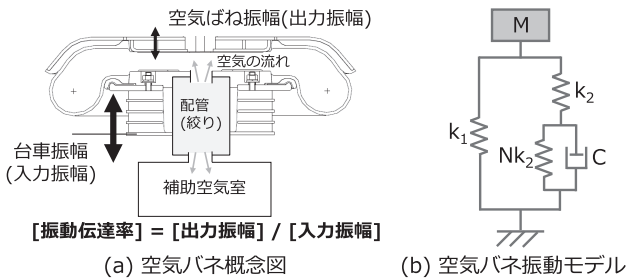


図5 空気バネ概念図と振動モデル図

ここで、上記の流体抵抗“C”以外は先述した上下バネ定数のシミュレーションにより求めることができる。残る流体抵抗“C”については、空気バネ配管のモデルを作成し、空気バネ加振時の配管内部の圧縮空気の挙動を流体シミュレーションすることにより算出した。空気バネの上下

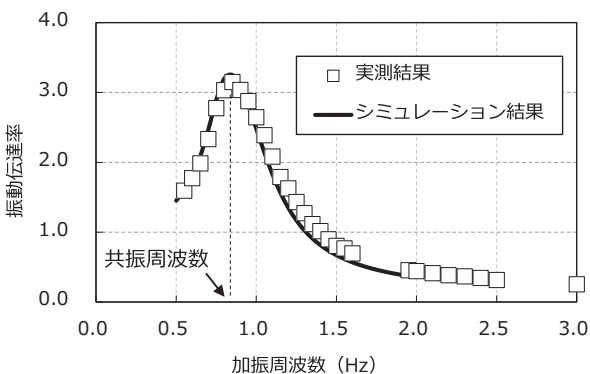


図6 振動伝達率のシミュレーション結果

バネ定数のシミュレーション、および、空気バネ配管の流体シミュレーションによって振動モデルの各定数を求め、振動伝達率を計算した結果を図6に示す。乗り心地への影響が大きい共振周波数と振動伝達率ピーク値、高周波での減衰特性など、十分な精度でシミュレーションできることを確認した。

以上のように、空気バネの設計情報から、“バネ定数”、“振動伝達率”のいずれも精度良く予測する技術を開発した。

4. 設計への活用

空気バネに対する要求特性は、鉄道車両の車体の重量や路線上で車体が受ける加速度を想定した上で、最適な乗り心地を実現するために設定される。さらに、車体の重量と受ける加速度は乗客人数によって変動するため、それら変動分は圧縮空気の空気圧の調整によって補われる。そのため、空気バネの要求特性は複数の空気圧における上下バネ定数や左右バネ定数などの複数の特性があり、設計時にはこれら特性を同時に実現する構造を考案する。しかし、現状ではこれら空気バネ特性を同時に実現することは熟練の空気バネ設計者でないと難しい。そこで、本解析技術を活用することにより、経験の浅い設計者でも効率的に設計と検証のサイクルを回すことができるようになり、要求を満たすための試作工数を削減できる。

実際に空気バネのシミュレーション技術を設計に活用した一例を紹介する。ある路線において、左右方向に鉄道車両が受ける加速度が他の路線よりも大きくなる見積もられた。そのため、左右バネ定数が従来の空気バネと同等では、鉄道車両が大きく左右に揺れてしまい乗り心地悪化に繋がる。乗り心地悪化を回避するために、上下バネ定数を従来の空気バネと同等に維持しつつ、左右バネ定数だけを向上させた特性が要求される。このような要求に対し、開発した空気バネのシミュレーション技術を活用して、実際に設計変更した例を図7に示す。事前のシミュレーションによって客先の要求に沿った空気バネ設計を実現した。

以上のように、開発したシミュレーション技術の活用により、設計変更の影響を事前に調査することが可能となり、

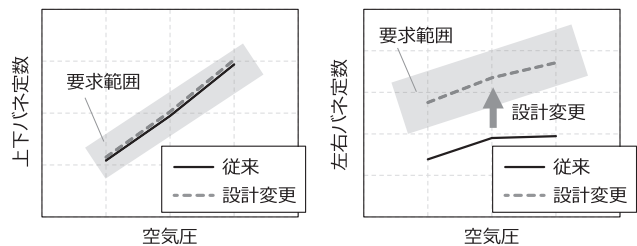


図7 構造変更時の空気バネ特性予測結果

空気バネ試作後の設計への手戻りを防止し、設計工数の削減に繋げることができた。

5. 結 言

空気バネの試作前の設計段階から空気バネの“バネ定数”と“振動伝達率”を精度良く予測するシミュレーション技術を開発した。本技術により、設計時の試作工数を削減可能になった。今後、本技術が世界各国の多種多様な空気バネのニーズへの対応や、更なる車両技術の進化に貢献することが期待される。

参 考 文 献

- (1) 北田秀樹、「新幹線用空気ばねの開発の歴史」、SEIテクニカルレビュー 第190号、pp.105-110 (2017年1月)
- (2) 前田修平 他、「極低温環境に適応した鉄道車両用空気バネ」、SEIテクニカルレビュー第187号、pp.66-69 (2015年7月)
- (3) 岡本勲、「ボルスタレス台車」、RRR Vol.65 No.7 pp.34-35 (2008年7月)
- (4) 横山輝義、加藤清之輔、「車両用空気ばね」、住友電気第82号、pp.113-122 (1963年10月)
- (5) 中川千鶴、「鉄道分野の振動乗り心地評価研究とその活用」、バイオメカニズム学会誌、Vol. 41、No.1、pp.15-20 (2017年)
- (6) 小柳忠郎、「空気バネ防振系の最適設計法」、日本機械学会論文集 (C編) 49巻439号 (1983年3月)

執 筆 者

豊川 修平* : 解析技術研究センター



塩崎 学 : シニアスペシャリスト
解析技術研究センター 主幹



吉田 淳 : SHC(株) 主査



渡部大二郎 : ハイブリッド製品事業部 主査



澤 隆之 : ハイブリッド製品事業部 グループ長



原口 浩一 : ハイブリッド製品事業部 部長補佐



*主執筆者