

新世代の鉄道車両台車「efWING」

“efWING” New-Generation Railway Bogie



西村 武宏① Takehiro Nishimura
 多賀 之高② Yukitaka Taga
 小野 貴也③ Takaya Ono
 鴻池 史一④ Fumikazu Konoike
 津村 洋祐⑤ Yosuke Tsumura
 稲村 文秀⑥ Fumihide Inamura
 永田 純平⑦ Junpei Nagata

鉄道車両の台車フレームの一部をCFRP（炭素繊維強化プラスチック）で製作し、さらに、コイルばねサスペンションの役割もCFRP製フレームに持たせることで、2つの機能を1つに集約した。また、航空機で使われている先進材料であるカーボンファイバーを、世界に先駆け鉄道車両台車に適用した。その材料特性から大幅な軽量化を達成し、運行時のエネルギーコストの削減を可能にした。

Kawasaki's innovative railway bogie efWING uses carbon fiber reinforced plastic (CFRP) in its frame components. This product integrates a suspension function into its CFRP frame, eliminating the need for coil springs. Kawasaki is the first company in the world to use carbon fiber — an advanced material increasingly adopted in aircraft — in a railway bogie. The unique properties of this material have enabled significant weight reduction as well as energy cost savings during operation.

まえがき

昨今、地球環境問題を顧みて省エネ気運が高まっており、鉄道車両に対しても同様に省エネが求められている。省エネすなわちランニングコスト低減やCO₂排出量の低減を達成するためには、鉄道車両の軽量化が最も効果的である。

1 背景

鉄道車両は車体と台車に二分され、旅客や貨物を載せる車体に関しては、ステンレス鋼やアルミニウム合金などの採用による大幅な軽量化がなされてきた。一方、走行を担う台車については、これまでは有限要素法などの数値シミュレーションによる最適化解析技術を駆使し、部材の薄板化や軽量穴の配置などによって軽量化対策を講じてきた。しかし近年、鉄道車両の走行性能向上や状態監視のために、台車にはダンピング装置やセンシングデバイスなど多様な装置・部品が追加装備される傾向にある。それらが重量増の要因になっており、既存策の延長線上では、これ以上の軽量化は容易に達成できないため、設計思想そのものを抜本的に変える必要があった。

一方で、鉄道車両のみならず航空機や自動車業界でも軽量化の観点から複合材の適用範囲は拡大の一途をたどって

おり、ボーイング787などをはじめとして民間航空機の主構造にもCFRP（炭素繊維強化プラスチック）が積極的に採用され始めている。鉄道車両でも、新幹線の先頭部やカバーにも採用が拡大しており、台車への採用にも弾みがついた。

これまで、鉄道車両の台車は、走り装置であり最重要部品であるとの認識から、運用実績を重視した設計が数十年来なされてきた。しかし、以上のような背景をベースに、台車構造の抜本的な変更や適用材料の見直しを検討し、軽量かつ走行安全性を向上させた台車「efWING」の開発を推進するに至った。

2 開発の経緯

(1) CFRP製板ばねの開発

2011年からCFRP製板ばねの開発を進めてきており、国内在来線の荷重条件を基に両端を支持し、中央に上下方向の荷重を負荷する3点曲げばね要素として設計を展開した。なお、軸箱の前後および左右方向の支持には、営業運用実績のある軸ハリ式軸箱支持装置を採用し、この部分において大きな開発要素を取り入れず商品化の段階で受け入れられやすい構成とした。

まずは、ばね単体の強度と剛性を確認するために静荷重

試験を行い、所定のばね定数を有すること、ならびに実運用上の最大負荷荷重となる満車荷重条件に対して十分な安全率を持った静強度を有することを実証した。また、鉄道車両に適用する材料として必須となる難燃性を確認するために鉄道車両用材料燃焼試験を実施し、当該CFRP製板ばねが「不燃性」であることを明らかにした。

(2) 試 作

このばねを搭載した台車として、在来線向け狭軌ボルスタレス台車を試作し、当社の保有の回転試験機で当該台車としての基本走行性能を評価した。その結果、在来線鉄道では十分な高速度域200km/hまで回転させた上で、引張加振など外乱を与えても問題なく走行できることを確認した。

さらに、2012年5月、実際の走行試験を見据えた二次試作台車を完成させた。二次試作では走行試験を見据え、標準軌のボルスタ付台車とした。完成後には、台車の静荷重試験や回転試験に並行して板ばねの疲労試験を実施し、試験走行に供しうる性能や強度・耐久性を有していることを確認した。

また、実走行試験に先立ち、輪重抜け試験を実施した。これは、1台車内の任意の1車輪が軌道不整により落ち込んだりせり上がった場合でも、車輪とレールの間の上下荷重（輪重）が抜けないことを要求する米国での過酷な仕様基準に基づいた試験である。本試験結果を図1に示す。従来台車は、図1にある在来線の限界値に対してほとんど余裕のない設計である。一方、「efWING」は、在来線に対して大幅に余裕があり輪重抜け量は従来台車の半分以下、すなわちレールに対する車輪の追従性が倍増していると解釈でき、走行安全性に対して優れた性能を有することを確認できた。これは、中央部が支点となりCFRP製板ばねがシーソーのように前後車輪の輪重バランスをとるためである。この高い輪重抜け性能が「efWING」の大きな特徴と言える。

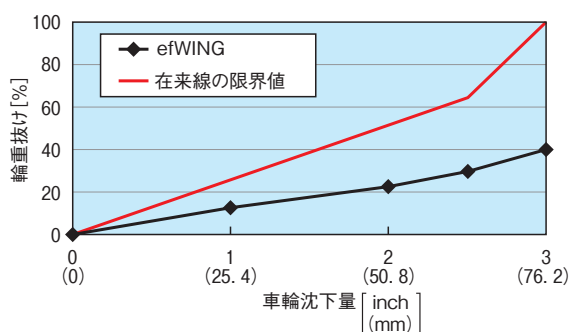


図1 輪重抜け性能
Fig. 1 Bogie equalization test result



図2 走行試験車両
Fig. 2 Running test vehicle

(3) 走行試験

2012年6月、米国のコロラド州にあるアメリカ鉄道協会運輸技術センター（TTCI: Transportation Technology Center, Inc.）にて走行試験を実施した。1両目が牽引する機関車、2両目が計測器を積んだ測定車、3両目が比較対象の従来台車の客車、4両目に台車を「efWING」に置き換えた客車の全4両編成である（図2）。

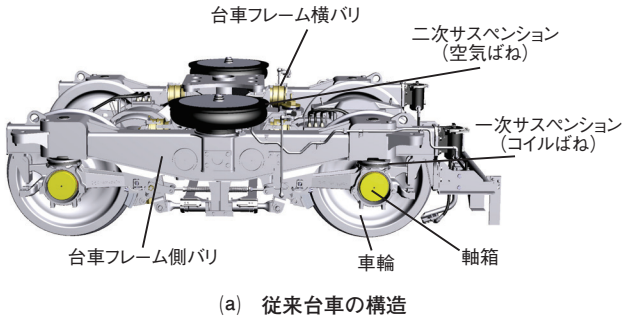
走行試験は延べ20日間にわたり、走行距離4,469kmを達成した。TTCIには複数のループ線があり、最も長い高速路線は全周が21.7kmある。最高速度は機関車の限界速度である160km/hで走行を繰り返した。また、曲線半径が145mの急曲線区間や8番分岐といった急分岐区間についても試験データを蓄積した。さらには、特殊な軌道不整区間として、左右のレールの上下不整を同位相としたPitch and Bounce区間、逆位相としたTwist and Roll区間、左右不整を同位相としたYaw and Sway区間の全てについても走行し、ひずみ履歴、加速度履歴、輪重履歴などの動的な特性を把握した。

「efWING」は、48~160km/hの全ての速度域で、アメリカ連邦運輸局の鉄道車両の走行安全性に関する規定の要求を満足し、安全に走行できることが証明された。

3 基本構造

一般的に鉄道車両用の台車は、車輪・車軸、車軸ベアリングを格納している軸箱および軸箱支持構造体、台車枠構造体などの主構造部品で構成される。さらに、モーターやギア、ブレーキ、サスペンションなど走行に必要な機器から構成されている。

「efWING」は、これまでの台車構造にとらわれることなく抜本的に機能を見直した台車である。車体荷重の伝達経路に注目し、図3に示すように従来台車での「車体」→「二次サスペンション（空気ばね）」→「台車フレーム横バ



(a) 従来台車の構造



側バリ・コイルばね

CFRP 製板ばね

(b) 新世代台車の構造

図3 設計コンセプト
Fig. 3 Design concept



図4 熊本電気鉄道株 6000形電車
Fig. 4 Kumamoto Electric Railway 6000 series

5 国内への展開

2014年3月14日、熊本電気鉄道株は、従来の台車2台を「efWING」に置き換えて、6000形電車の営業運転を開始した(図4)。

また、2015年3月には、四国旅客鉄道株において国内営業車への適用試験が行われた。その結果を以下に示す。

(1) 試験車両

図5(a)に示す試験用台車を121系直流近郊形電車に装着して、走行試験を実施した。

試験区間は予讃線の多度津-多喜浜間(66.7km)とし、最高速度100km/hで5日間にわたり、走行試験を実施した。

(2) 走行安全性

脱線係数・輪重減少率・横圧の3つの評価項目¹⁾で走行安全性を評価した。「efWING」試験台車については、いずれも目安値²⁾を満たしていることを確認した³⁾。また、車体床面振動加速度の著大値での走行安全性評価も行った。評価の際の目安値¹⁾は、上下振動加速度は0.5G、左右振動加速度は0.4Gとした¹⁾。上下・左右いずれの振動加速度も目安値を満たしていることが、図6から確認できる。

6 さまざまな車両への展開

熊本電気鉄道株においては引き続き、01形台車2両分が2015年3月16日より営業運転を開始し、さらに2016年3月1日からは01形台車の追加2両分も営業運転を開始した。

四国旅客鉄道株に続いて、2015年4月に図5(b)の九州旅客鉄道株、2015年10月に図5(c)の西日本鉄道株で台車を「efWING」に置き換えて走行試験を実施した。

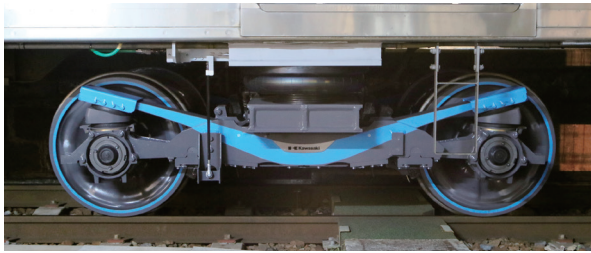
また、2016年春より四国旅客鉄道株では121系直流近郊型電車の主要機器を更新し、併せて台車に図5(d)の「efWING」を採用した7200系が営業運転される予定である。

り)→「台車フレーム側バリ」→「一次サスペンション(コイルばねなど)」→「軸箱・車軸・車輪」→「レール」のうち、「台車フレーム側バリ」と「一次サスペンション」をCFRP製板ばねに置き換えて、構造の簡素化・軽量化を実現することをコンセプトとした。

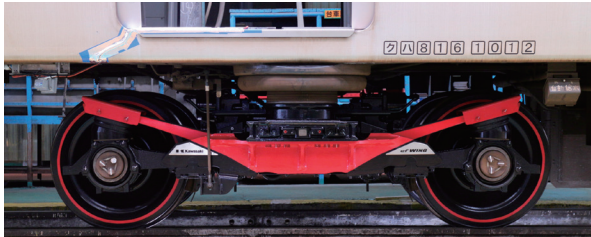
これにより、フレーム構造が一変し、側バ리를なくすことができた。北米向け従来台車とTTCI試験台車を比較すると、台車フレームの重量を従来比で約40%削減、1両当たり900kgの軽量化を達成した。CFRP製板ばねは、軸箱および台車フレーム横バリに対してボルトやピンなどで固定しておらず、軸箱上に板ばねを、板ばね上の中央の支点を介して台車フレーム横バリを乗せているだけの簡素な組立構造となっている。

4 デザインの追求

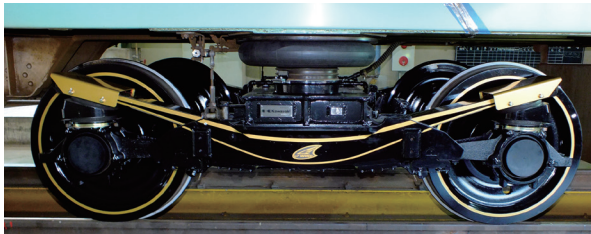
開発当初より、従来の台車にないカラーリングで印象付けるように配慮し、台車の存在をアピールできるデザインを目指した。これまで、車体ばかりが注目されていたがCFRPの性能を生かした弓状ばねは、視覚的にも新しい台車を導いた。かねてから受賞を目指していたグッドデザイン賞に応募し、2013年度金賞を獲得した。今回、審査委員からは「日本が誇る新素材技術と構造開発によって、高性能で機能的な美しさをもった台車が生まれたことを高く評価したい」などのコメントを頂いた。台車でデザイン関連の受賞は初めての快挙である。



(a) 四国旅客鉄道株式会社 121系台車



(b) 九州旅客鉄道株式会社 817系台車



(c) 西日本鉄道株式会社 7000形台車



(d) 四国旅客鉄道株式会社 7200系台車

図5 各社走行試験用台車および営業用台車
Fig.5 Bogies for running tests (by railway company)

あとがき

走行安全性と乗り心地の向上を確認し、営業投入も始まりつつある。今後さらなる技術改良を行い、「efWING」

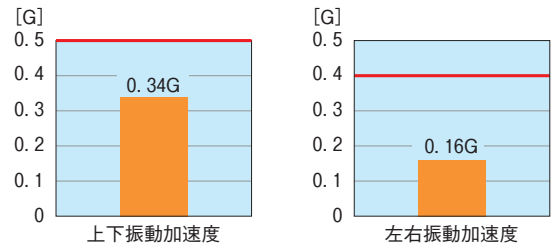


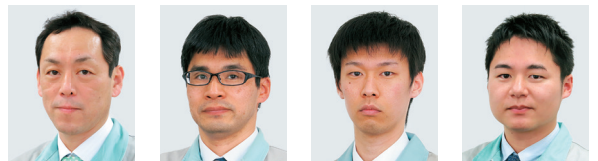
図6 車体床面振動加速度の著大値の比較
〔efWING〕試験台車
Fig.6 Comparison of car floor vibration acceleration
(efWING test bogie)

が鉄道車両技術の革新となり日本および世界の鉄道事業者に普及できるよう取り組んでいく。

営業運転に使用できるまでご支援・ご協力いただいた皆様に、この場を借りて深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：“在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説”，研友社（1993）
- 2) 新山，吉本，川田，西村，佐藤，多賀，鴻池，小野：“新世代台車efWINGの走行試験結果”，日本機械学会第22回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2015）講演論文集（2015）



西村 武宏 多賀 之高 小野 貴也 鴻池 史一



津村 洋祐 稲村 文秀 永田 純平