

高速・高性能鉄道用台車の開発

Development of High Speed and High Performance Bogie Trucks for Railway Vehicles

住友金属工業株式会社

1. 研究開発の背景と目標

鉄道は交通機関の中で中距離大量輸送に最適な交通システムであるが、一方では自動車と航空機とも競合する関係にもあり、これらに打ち勝つために、高速化による到達時間の短縮や、乗り心地の向上が強く求められてきた。さらに地球環境保全や、労働情勢からメンテナンス時のいわゆる3K問題の追放などの要求が強くなってきた。これらの要求を満たすためには、高速・高性能で省エネルギー、メンテナンスフリーの台車開発が必要である。

ここで台車の構造と機能を簡単に説明する。

台車は1両の車体に2台装備されており、高速化や乗り心地の性能を決定する最も重要な部分である。図1に台車の主な構成部品を示すが、2対の輪軸（2個の車輪と1本の車軸が組み立てられたもの）で荷重をささえるとともに、各種の部品が取り付けられる台車枠、乗り心地を確保するための軸ばねと空気ばね、輪

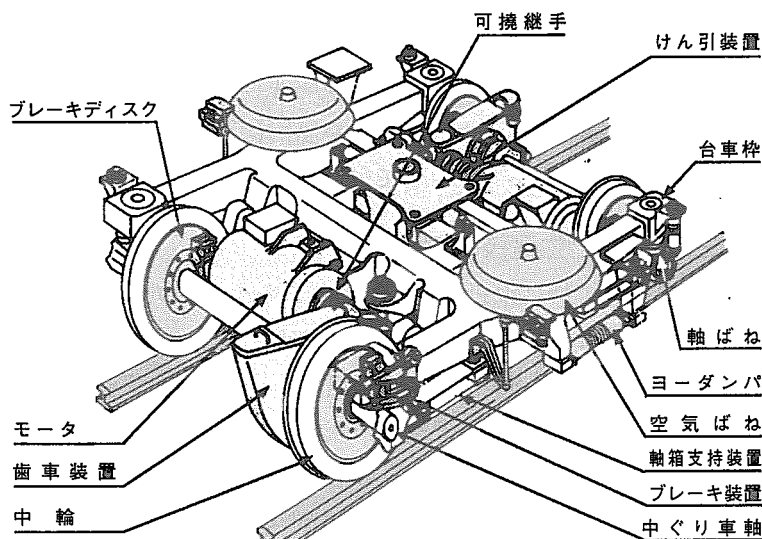


図1 台車の構造例

軸を台車枠に支えその構造やばね定数が走行性能に大きく影響する軸箱支持装置、加速力を与えるためのモータと歯車装置、減速力を与えるためのブレーキ装置、これらの前後方向の力を車体に伝えるためのけん引装置、高速走行性能を確保するためのダンパなどから構成されている。台車はこのように異なった多くの機能を各部品が互に関連して達成しているため、新しい台車を開発するためには、台車の構成要素及び部品をまず開発し、それを台車に総合化する必要がある。これらの開発に当たって共通する課題は軽量化であり、これに高強度・高信頼性、さらにブレーキに関連する部品では耐熱性も同時に満足する必要がある、メンテナンスフリーの観点からは長寿命・簡素な構造も同時に要求される。

2. 研究開発の経過

当社は台車の専門メーカーとして多くの画期的な製品を開発・実用化してきたが、なかでも新幹線の開発には開業前から積極的に参画し、多くの納入実績を有している。このような研究開発実績を基礎として、1980年頃から来るべき速度向上の時にそなえ、高速で曲線通過性にも優れ、メンテナンスフリー化を指向した次世代の高速・高性能台車の開発を開始した。台車の開発は総合化技術であるので、まず要素・部品を世界に先駆けて開発し、そしてこれらを総合化するために、新たに開発した車両運動シミュレーションプログラムや台車試験機を駆使して世界のトップレベルの高速新幹線用台車を開発した。またこれらの技術を通勤電車用台車にも展開して、高性能で画期的なメンテナンスフリータイプの台車を開発した。

3. 研究開発の内容と特徴

(1) 構成要素および部品の開発

台車の構成要素や部品はいずれも安全上重要で、専用軌道を必要とする鉄道の特性上、自動車のように市場投入前にテストコースで耐久試験を行うことができないため、実物大で試験するための各種試験機も自社開発した。当然必要な生産設備や生産技術も当社独自のものを数多く開発した。これらの中、主なものについて以下に述べる。

1) 各種実体試験機の開発と設置

安全上最も重要な車軸、車輪、ブレーキ、台車構造および性能を実物で試験するために、車軸疲労試験機、輪軸およびブレーキ試験機、台車試験機、1両モデル車両試験機を自社開発し設置した。この中一例として図2に輪軸およびブレーキ試験機の全体図と性能を示す。

2) 生産設備と生産技術の開発

今回の開発で特に重要な役割を果たしたのは、車軸の高周波焼入設備と技術、車軸の中ぐり加工技術、および車輪の回転鍛造技術と設備であり、いずれも車軸および車輪用としては世界初のものである。これらの設備の中、車輪の回転鍛造設備の原理を従来の据込鍛造と比較して図3に示す。図のように回転鍛造では上下型の接触が線接触となり、高い面圧が得られるため成型能力が大きく、より薄肉で正確な形状の車輪の製作が可能となり、軽量で良いバランスの高速に適した車輪の製造が可能となった。

3) 構成要素および部品の開発

前述の試験機の活用と生産技術の開発により、新しい台車の開発に必要な多くの要素や部品の開発を行ったが、その中でも特に重要な車軸、車輪、ブレーキディスク、ボルスタレス台車構造の開発の概要について以下に述べる。

① 車軸

車軸で最も弱いのは車輪が力ばめされている部分で、はめ合い端部に曲げモーメントによるひずみで微小滑りが発生し、これによるフレッティング疲労き裂が発生する。当社はこの

性能	最高速度：軌条輪 360km/h、ブレーキ用 450km/h
	最大負荷エネルギー：40MJ（新幹線車両の1車輪当り 400km/h に相当）
	輪軸用荷重負荷：上下 167kN、左右 57kN

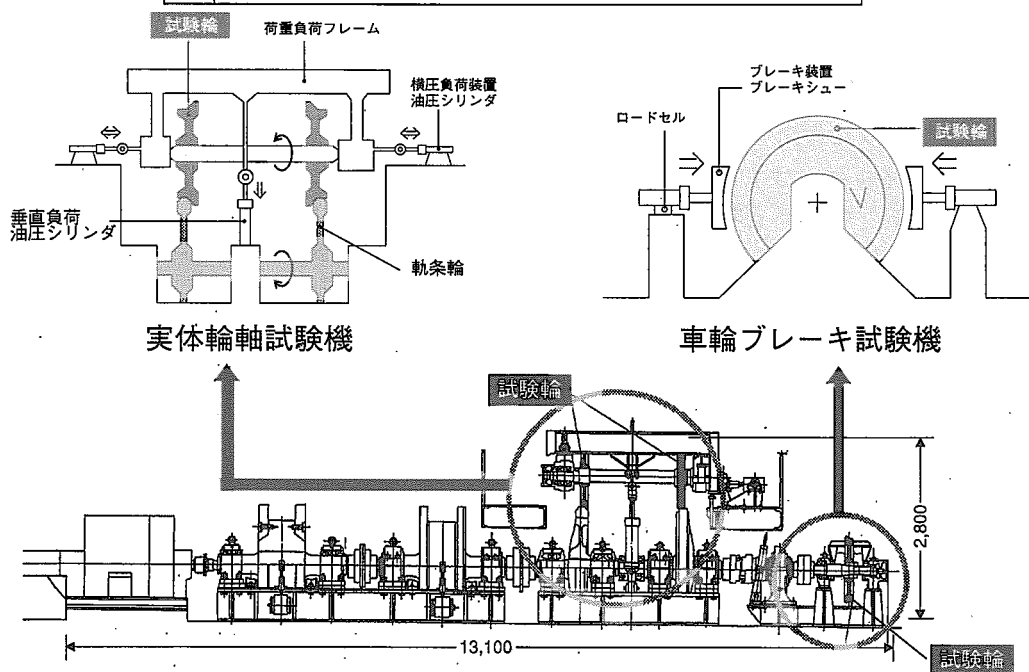


図2 実体輪軸試験機およびブレーキ試験機

フレット疲労現象を世界で初めて定量的に解明し、図4に示すように相対すべり量と疲れ強さの関係を明らかにするとともに、表面に圧縮残留応力を残せ

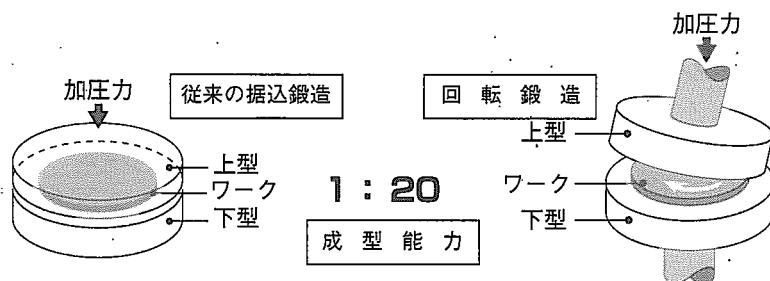


図3 回転鍛造の原理

ば強度が飛躍的に向上することを実体軸で定量的に明らかにした。さらにフレット疲労に強いはめ合部の形状を開発するとともに、当社独自の拡大中ぐり加工方法も実用化して、世界で最も高強度で軽量の車軸を完成した。

② 車輪

車輪は図5に示すように上下左右の機械的な力を受けるとともに在来線の多くの車輪踏面にはブレーキが直接作用するため、熱応力も同時に考慮する必要がある。高速化によりこれらの負荷が加速度的に増大するため、実体車輪によるブレーキ試験と破壊力学や計算力学を駆使して、車輪割損のメカニズムを世界で最初に定量的に解明し、車輪板部のボス側のオフセット量を一定値以上とするここにより、割損しないことを明らかにした。この結果と

回転鍛造技術の開発による正確な波形形状の成形により、写真1に示す軽量で高強度の、世界初の耐ブレーキ熱波打車輪を開発した。

③ ブレーキディスク

使用条件が従来新幹線の時速210 kmに対し270 kmとなれば、ブレーキディスクに作用する遠心力とブレーキエネルギーは1.7倍になる。従来の新幹線用ディスクは写真2に示すように摺動面の背面に薄い放熱用のフィンを一括に鋳出した2分割の特殊鋳鉄製であったが、実物大のディスクによるブレーキ試験と、破壊力学と計算力学を駆使して、熱き裂に対し画期的に強い特殊鍛鋼材を開発し、同時に放熱用フィンの効果を定量的に明らかにして、鍛造可能な厚肉フィンでも十分実用可能であることを実証し、世界初の一体鍛鋼ディスクを開発した。こうにして吸収エネルギーが1.7倍、寿命が2倍、1両当たりの軽量化が従来品に対して560kgのブレーキディスクを実用化した。

④ ボルスタレス台車構造

ボルスタは図6の左図に示すように車体と台車枠の間にあって、

- ・車体の荷重を支える
- ・曲線通過時に心皿を中心にして車体と台車枠間に偏倚を与える
- ・車体と台車枠間で前後方向の力を伝える、

3つの機能を果たしている。開発したボルスタレス構造は同図の右図のように、ボルスタを省略して、その代わり上下左右方向および偏倚の方向の動きを許容し、前後方向の力のみを伝える当社独自の門型けん引装置を開発して使用した。また空気ばねは水平面に大変位が可能で性能が優れた特殊ダイヤフラム型の空気ばねを開発して使用することにした。これによりこの空気ばねで車体の荷重を支えるとともに、水平面の変位により車体と台車枠間の偏倚も許容して前記の3つの機能を果たす構造を実用化した。ボルスタおよび付属部品の省略により、約7%の計量化と摩擦摺動部が無くなることによる性能の安定と向上、およびメンテナンスフリー化も図ることができた。

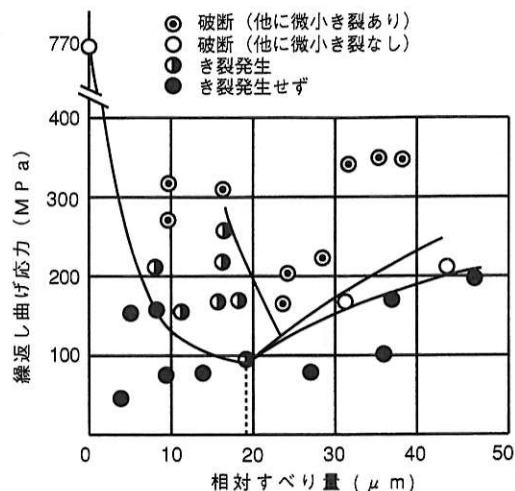


図4 フレッシング疲労における相対すべり量の影響

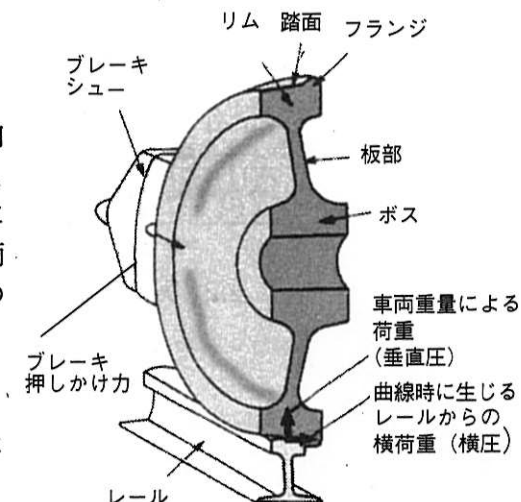


図5 車輪の機能

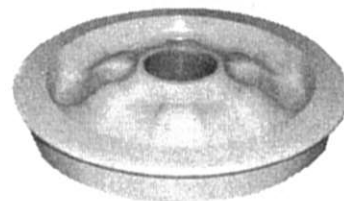


写真1 耐ブレーキ熱波打ち車輪

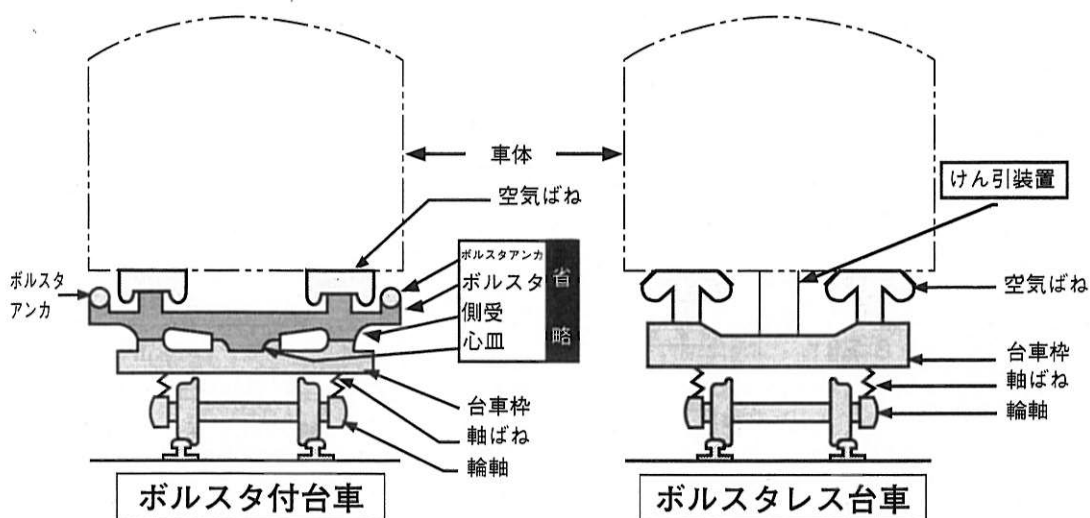


図6 ボルスタレス台車構造

(2) 台車への総合化

開発した台車の技術は前述の構成要素や部品を台車に総合化したもので、直線・曲線の両方で高速走行ができる画期的な技術で、高速新幹線はもちろん、高性能の通勤電車としても活用できるものである。ここでは例として山形新幹線用台車と通勤電車用台車について述べる。

ここで台車への総合化に当たっては、台車の各部の要素・部品をその台車の使用条件に最適の諸元で組み入れる必要がある。このため車両運動をシミュレーションすることとし、図7に示すモデルで、33自由度のシミュレーションプログラムを開発した。このプログラムは各部の特性を非線形でシミュレートできる正確なもので、実物の台車を使用して台車試験機で良い精度であることを検証している。

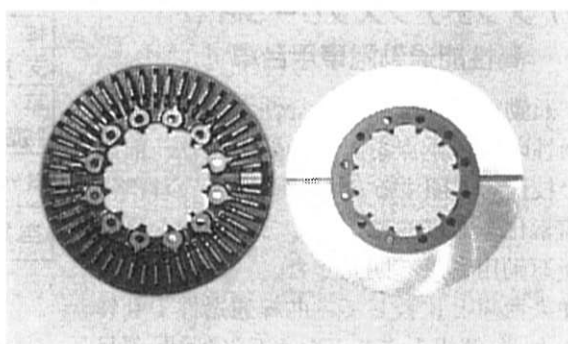


写真2 新幹線用ブレーキディスク

1) 山形新幹線用台車

山形新幹線は、福島・山形間は在来線を新幹線と同じレールの幅に変えただけの曲率の小さい曲線を高速で走る必要がある。従ってこの台車の開発課題を整理すると、①高速走行安定性、②曲線通過性、③軽量化、④保守の容易化の4項目となるが、なかでも高速走行性と曲線通過性の両立は最も困難な課題で、これを整理して表1に示す。これ等の問題点をシミュレーションプログラムや台車試験機などを活用して最適解を求めて解決した。1例としてこれらの問題の中で最も重要な軸箱支持剛性の検討結果を図8に示す。軸箱の前後支持剛性は表1に示すように、直線と曲線でまったく逆の特性が必要で、これをシミュレーションで実用高速域の安定性を確保しながらどこまで剛性を柔らかくできるかを検討し、図8に示すように非常に柔らかい値を採用した。ただしこのような柔らかい値でも高速走行安定性が得られたのは、各部の軽量化やボルスタレス化等の台車構造の改良も大きく寄与した結果である。

開発した台車は、実車高速走行試験で345km/hの短軸間距離台車での世界新記録を達成するとともに、曲線での走行性能も所期の目標を完全に満足することを確認した。重量も従来台車の10t/台車から7.3tと約30%軽量化するとともに、ボルスタレス化や新型軸箱支持装置の開発などにより、保守の容易化も図った。

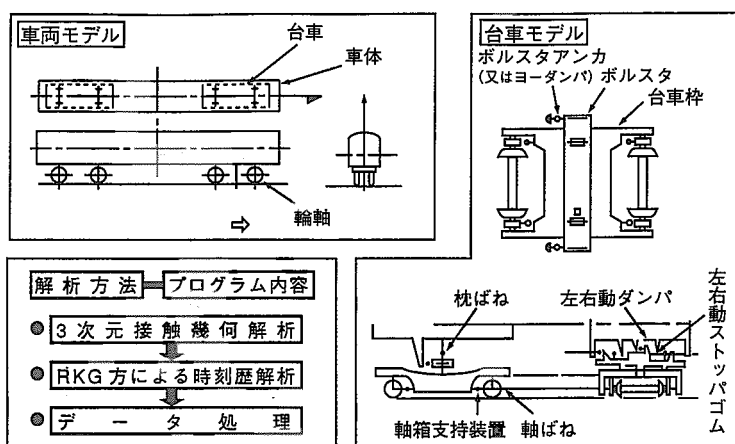


図7 車両運動シミュレーション計算モデル

2) メンテナンスフリータイプ 高性能通勤電車用台車

通勤電車では高速走行性よりも曲線通過性の方に重点を置く必要があり、前記の技術を展開するとともに、部品の省略・簡素化を徹底的に追求して画期的な高性能通勤用台車を開発した。この台車は従来台車と比較して、曲線通過性10%向上、分解組み立て工数40%削減、部品点数30%削減等、高性能であると同時にメンテナンス性も非常に優れた台車である。

4. 研究開発の成果

開発した構成要素や部品とこれらを総合化した台車は、部品単体でも1992年開業の「のぞみ」にボルスタレス構造、高周波焼入中ぐり車軸、一体鍛鋼ブレーキディスクが100%採用されるとともに、台車は1992年開業の山形新幹線に全面採用されたのを初めとして、JR東日本の総2階新幹線等にも採用されている。また通勤電車の分野でもメンテナンスフリータイプの高性能台車として、1992年から営団地下鉄に全面採用されたのを初めとして、多くのユーザーに採用され好評を得ている。

これにより当社の台車の販売は最近の10年間で約3倍の110億円に増加し、開発部品単体の販売も年間145億円に達している。

表1 高速走行性と曲線通過性両立の問題点

影響因子	新幹線区間	従来線区間
軸箱支持剛性	剛い方がよい	柔らかい方がよい
車輪路面こう配	小さい方がよい	大きい方がよい
ヨーダンパ	減衰大	減衰小
空気ばね	減衰小	減衰大

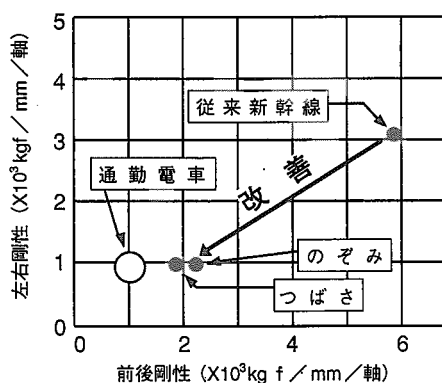


図8 前後軸箱支持剛性検討結果

5. 学会発表、特許等

関連特許および実用新案は登録されたものが国内124件、外国27件、公開特許および公開実用新案は合わせて168件である。

発表論文は国内外で94件を数え、講演数も15件に達している。さらに構成要素・部品の開発の段階で、個々の開発成果に対し、日本機械学会の技術賞やASMEの論文賞等数多く受賞するとともに1992年には総合化した台車も日本産業技術審査会の内閣総理大臣賞等合わせて19件の表彰を受けている。

6. 今後の展望

今回開発した高速・高性能台車の技術は、昨年6月に運輸技術審議会から運輸大臣に答申された「21世紀に向けての鉄道技術開発のありかたについて」に示された高速化、快適化、安全性向上、および効率化の、4項目全ての基礎となる開発であり、今後も鉄道のますますの発展に大きく寄与するものと考えている。