

高速走行を支える 新幹線のブレーキ技術

1964年(昭和39年)10月10日から開催された東京オリンピック直前の10月1日に東海道新幹線は開業した。以来、日本を象徴する技術の一つとして、新幹線は進化し続けてきた。高速・高密度運転の実現を支えてきたキーテクノロジーの一つである東海道新幹線のブレーキ技術の開発について紹介する。

進化を続ける新幹線には、日本を代表する技術が搭載されている。

画像提供：東海旅客鉄道(株)(以下、JR東海)

新幹線の高速化の変遷

東海道新幹線は1日あたり約47.7万人の乗客を、373本の列車で運んでいる(2019年)。東京駅と新大阪駅(515 km)を最短2時間22分で結ぶ東海道新幹線は、文字通り日本の「幹線」になっている。

東海道新幹線は開業以来、50年以上にわたってさまざまな技術開発により、高速化や安全性の向上、快適性が追求されてきた。最高速度は、開業当初(1964年)は210 km/hであったが、1986年に220 km/h、1992年に270 km/hと高速化が図られ、2014年から現在までは285 km/hで運行されている。(山陽新幹線区間の一部では300 km/hで運転されている。)

東海道新幹線の高速化を実現しているのが、車両の進化である。車両の設計は、0系、100系の第1世代と300系以降の第2世代の大きく2つに分類される(図1)。第1世代と第2世代では、車体、台車、動力とも、大きく進化している。例をあげると第1世代の車体は鋼製であったが、第2世代の車体はアルミニウム合金が使用されている。また、第2世代の台車には、台車枠と車体を繋ぐ「枕梁(ボルスタ)」を使用しないボルスタレス台車が採用されている。さらにパワーエレクトロニクス技術の進歩によって、動力も直流電動機から交流誘導電動機へ変更されている。

これらの進化によって、N700系では0系と比較して約26%の軽量化を実現し、約49%の省エネルギー化(220 km/h走行時)を達成している。現在運行されている車両は、2013年から運用されているN700Aと、2020年から運用されているN700Sである。

高速化を支えるブレーキ技術

東海道新幹線の高速化に不可欠なのが、ブレーキ技術である。新幹線は電気ブレーキと機械ブレーキを併用している。電気ブレーキの方式として、第1世代車両の0系と100系では発電ブレーキが採用され、発生した電気エネルギーを車両に搭載した抵抗器で熱として放散させていた。300系以降の第2世代からは、交流誘導電動機のインバーター制御による電力回生ブレーキが採用された。回生ブレーキでは、発生した電気エネルギーを架線に戻すことができるため、省エネルギー化に大きく貢献している。

一方、車輪の回転を摩擦力で低下させる「機械ブレーキ」は空気圧で動作させることから空気ブレーキとも呼ばれている。新幹線は通常、ATC(Automatic Train Control:自動列車制御装置、最高速度を運転士に示しながら一定の制限速度を超えた場合に電気ブレーキで速度を落とすシステム)により制御され、走行速度が30

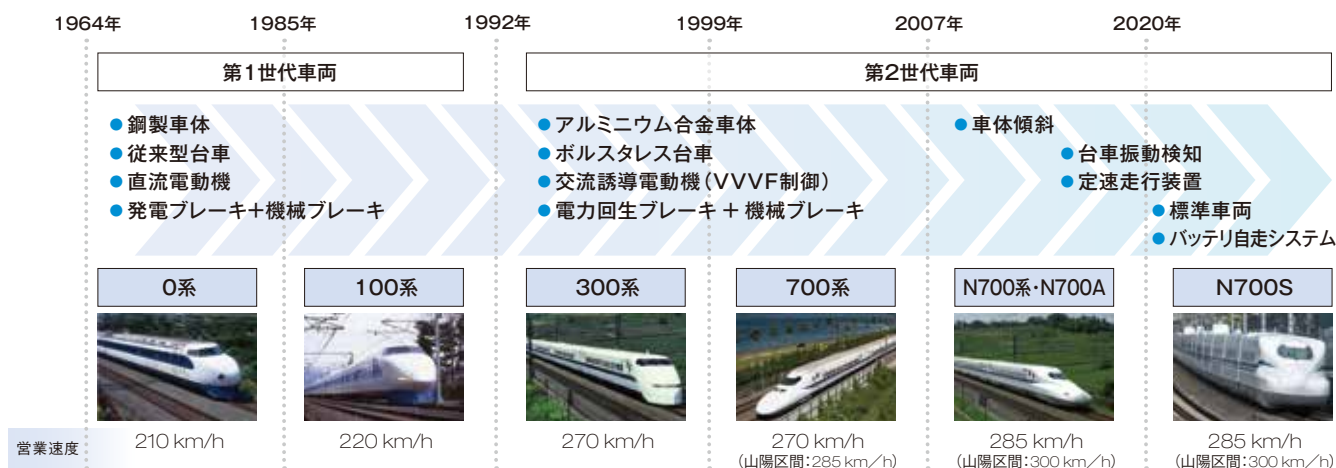


図1 東海道新幹線の車両の変遷

JR東海の資料を基に作成。

km/h以下になったところで、機械ブレーキが使用される。30 km/h以下から停止位置に正確に合わせて止めるところが運転士の「ウデ」の見せ所だという。

また、鉄道では、レールと車輪の摩擦力を「粘着力」と呼んでいるが、効果的にブレーキをかけるためには適正な粘着力を維持する必要がある。そのため、車輪にはさびや汚れを取り除き、車輪踏面を適度な粗さに保ち、鏡面化を防ぐために、踏面清掃装置と呼ばれる砥石のような装置が取り付けられている。そのほかにも、ブレーキ使用時の車輪の滑走を防ぐために、車両の位置によってブレーキの強さを変えたり、粘着力が高くとれる低速ほどブレーキを強くするなどの制御が行われている。

新型ブレーキ装置の開発

緊急時には、車両を早く、確実に、短い距離で停止させることが重要になる。特に地震発生時は安全のために送電が自動的に停止されるため、電力回生ブレーキを使用することができない。そこで重要な役割を担うのが

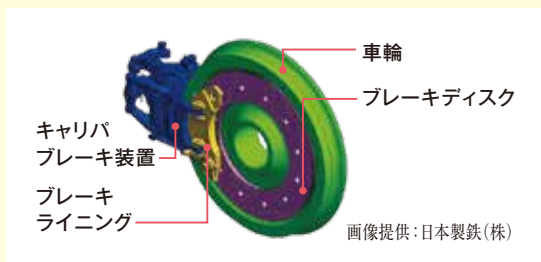


図2 新幹線のブレーキディスク付き車輪の構成例



図3 ブレーキ試験装置

緊急停止試験の際には、ブレーキディスクとブレーキライニングが接触する部分が摺動熱で赤熱するほど高温になるという。

画像提供：日本製鉄(株)

機械ブレーキである。最高速度の285 km/hから停止するのに要する時間・距離は、ブレーキの強化により、最高速度が270 km/hであったときよりも短縮されている。

機械ブレーキは、車輪に取り付けられたブレーキディスク、ブレーキライニング、ブレーキライニングをブレーキディスクに押し当てるキャリパブレーキ装置から構成される(図2)。基本的な原理と構造は、自転車のブレーキと同様であるが、自転車とは速度と質量が大きく異なり、そのためにブレーキ部品に使用される材料には高い強度や耐摩耗性、耐熱性などが要求される。以下、最近の機械ブレーキの開発例を紹介する。

機械ブレーキ(図3)を使用した際には、ブレーキディスクとブレーキライニングは摺動部で加熱され、緊急停止の場合には赤熱するほどの高温になる。このため、ブレーキディスクの裏面は放熱しやすいフィン状の構造になっている。さらに高温になるとブレーキディスクが変形する(反る)場合があり、ブレーキライニングとの接触面積が減少するため、ブレーキ性能を十分に発揮できなくなるという問題があった。

新幹線の技術開発を行う小牧研究施設

2002年に開設されたJR東海総合技術本部技術開発部小牧研究施設は、愛知県小牧市にあり、東海道新幹線やリニア中央新幹線に関わるさまざまな技術開発が行われている。「営業線の走行状態の忠実な再現」と「営業線では決して実施できない試験の模擬」を実現できる多彩な装置が設置されている。

車両走行試験装置



新幹線を1両まるごと使用した各種試験が行える大型の試験装置。

雨や雪など、荒天時のブレーキ試験が行える装置。

ブレーキ総合試験装置



画像提供：JR東海

この課題を解消するために、従来の内周締結型から中央締結型への変更が行われた。ブレーキディスクと車輪を固定するボルトの位置は従来、ブレーキディスクの内周側であった。ディスクの片側（内側）のみが固定されているため、外側の反りが大きくなっていたが、固定する位置をブレーキディスクの摺動面の中央にすることで、変形を抑える設計とした（図4）。

ブレーキディスクに使用する低炭素合金鋼の開発も行われた。具体的には、入熱による体積変化（変形）を繰り返すことで発生する反り変形や熱き裂の進展を抑制した材料が開発されている。低炭素合金鋼では熱膨張に加え、炭化物の析出が体積変化に関与している。

炭素量を低減することで、体積変化を抑制できるが、その一方で強度を確保するための焼入れ性が低下する。そのため、ニッケルやクロム、モリブデンを添加することで焼入れ性の低下を防いでいる。開発された低炭素合金鋼を使用した中央締結型のブレーキディスクはN700Aから実用化されている。

また、ブレーキライニングの改良も行われている。摺動による発熱が原因となるブレーキディスクの微小変形は避けることができないが、ブレーキライニングをブレーキディスクの変形に追従させることができれば、高温時でも接触面積の減少によるブレーキ力の低下を抑えることが可能になる。これを実現するために採用したの

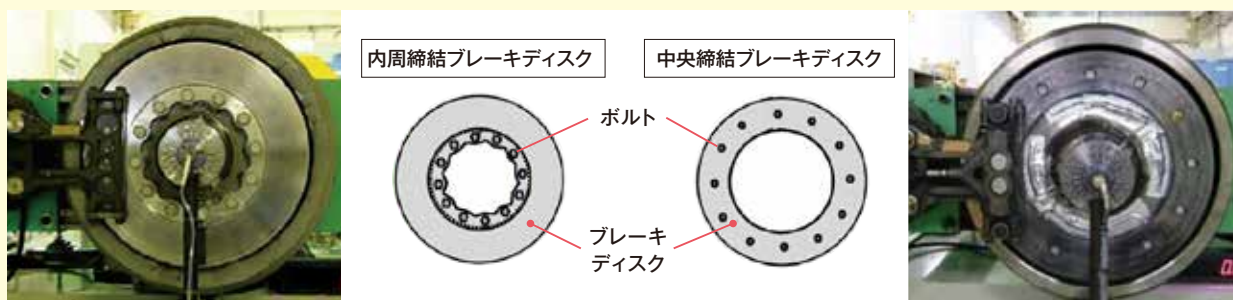


図4 内周締結型と中央締結型のブレーキディスク

画像提供：JR東海



図5 ブレーキの摩擦材の改良

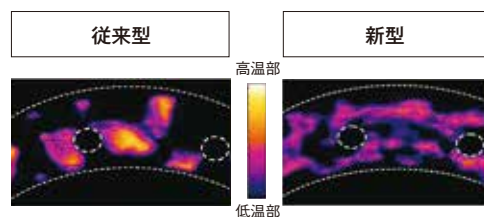
画像提供：日本製鉄（株）

が、ブレーキライニングに取り付けられる摩擦材の構造変更である(図5)。摩擦材をブレーキディスクの変形に追従させるために、皿バネで摩擦材を支える方式が採用された。摩擦材の配置を最適化するために、FEM(有限要素法: Finite Element Method)によるシミュレーションが繰り返されたという。これにより、局所的な高温部分(ヒートスポット)の発生を抑制することに成功している(図6)。

同時にブレーキライニングの交換頻度が低減され、メンテナンスの省力化にも寄与している。

これらの改良により、安定したより強いブレーキ力を実現することが可能になり、N700Aタイプと比較して、停止距離を約5%短縮している(図7)。

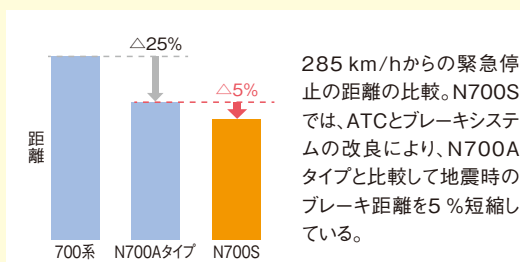
また、ブレーキディスクの形状変更は、ブレーキ性能の向上だけでなく、軽量化にも貢献する結果になった。中央締結ブレーキディスクでは1枚あたり、約20kgの質量削減が実現されている。新幹線には1両あたり2台の台車を使用され、各台車には4つの車輪に各2枚のブレーキディスクが取り付けられている。ブレーキディスクの軽量化は、16両編成の新幹線全体では約5,120kgの削減になり、この点でも高速化に貢献していることになる。



従来型で高温になっている部分が、新型では温度上昇が抑えられていることが分かる。

画像提供: 日本製鉄(株)

図6 ブレーキ時のディスク表面温度



285 km/hからの緊急停止の距離の比較。N700Sでは、ATCとブレーキシステムの改良により、N700Aタイプと比較して地震時のブレーキ距離を5%短縮している。

JR東海の資料を基に作成。

図7 地震時のブレーキ距離の短縮

いち早く地震を検知して、新幹線を安全に停止するシステム

東海道新幹線の地震対策では、線路、高架、橋梁、トンネルなどの補強に加え、地震の早期検知システムの構築が早くから進められてきた。

東海旅客鉄道(株)では、1992年に鉄道技術研究所(現 鉄道総合技術研究所)で開発された地震動早期検知警報システム「ユレダス(UrEDAS: Urgent Earthquake Detection and Alarm System)」を採用し、2005年には「東海道新幹線早期地震警報システム: テラス(TERRA-S: Tokaido shinkansen EaRthquake Rapid Alarm System)」を構築している。

これは50か所の「沿線地震計」と、沿線から遠く離れた地点に設置した21か所の「遠方地震計」に加え、海底地震観測網と連携することで、地震の早期検知を実現するシステムである。



JR東海の資料を基に作成。

高速化と快適性の両立を求めて

高速化を進める一方で、快適性を重視した技術開発も行われている。

たとえば最新型のN700Sでは、乗り心地を損なわずにカーブでの高速走行を実現する車体傾斜装置に加え、横揺れを防止するフルアクティブサスペンションが導入されている。

また、バッテリー自走システムを高速鉄道で初めて搭載し、自然災害などで長時間停電した場合にも、乗客の避難が容易な場所まで自力走行できるようにするなど、快適性を追求した技術開発が続けられている。

東海道新幹線開業の3年後の1967年に東京駅に設置された「新幹線記念碑」には、「東海道新幹線 この鉄道は日本国民の叡智と努力によって完成された」と記されている。進化を止めることのない新幹線は、これからも日本の技術のシンボルの一つであり続けるだろう。