

解説

新幹線電車車軸の30年 —安全性確保と信頼性向上の歴史—

*Thirty Years of Shinkansen Vehicle Axles
—History of Security Maintenance and
Reliability Improvement—*



石塚 弘道
Hiromichi ISHIZUKA

◎1952年8月生まれ

◎1977年日本国有鉄道入社。1987年(財)鉄道総合技術研究所入所。実物の車軸を用いた疲労試験を実施してきた。研究・専門テーマは車軸の疲労強度とはめ合い部の信頼性向上

◎正員、(財)鉄道総合技術研究所(〒185 国分寺市光町2-8-38)

1. はじめに

1964(昭和39)年10月、東京～新大阪間に東海道新幹線が営業を開始して以来、新幹線はその路線網を博多、新潟、盛岡そして山形へとひろげつつ、まるまる30年が経過した。その間、乗客の死傷事故は1件も発生せず、極めて安全性の高い乗り物としての評価が確立している。あらかじめ傷害保険に加入してから新幹線に乗る人は、恐らく皆無であろう。

新幹線の安全は、広範囲にわたる分野において評価された安全性を総合した結果として、確保されている。車軸も新幹線電車の安全な走行を支える、重要な走り装置の一部品である。しかし、車軸はフェイルセーフ構造とはなっていないので、万が一高速走行中に折損するようなことがあれば、極めて重大な事故に結び付く可能性もある。このような車軸の安全性は、どのようにして確保されているのであろうか。

2. 設 計

東海道新幹線の開業以来走り続けている0系新幹線電車は今や姿を消しつつあり、代わって100系(東海道・山陽新幹線、2階建てグリーン車)、200系(東北、上越新幹線、従来タイプ)、300系(東海道・山陽新幹線、のぞみ号)、400系(東北新幹線、つばさ号)、E1系(東北・上越新幹線、オール2階建て車両)といった新しい車両がつつぎに

開発され、これらの車両が現在の新幹線の主役となっている。新しい車両に応じて車軸の形状も変化する。例えば、100系、200系、300系、E1系新幹線電車には付随車があるため、車軸も電動車軸のほかに付随車軸がある。また、300系、400系、E1系新幹線電車は、電動車軸、付随車軸ともすべて、軽量化と超音波探傷の精度向上を目的として、図1のように軸方向に直径60mmの中ぐり加工を施した、中空の車軸となっている。

このように車軸の形状が変化しても、その設計法は0系新幹線電車以来変わっていない。永島-中村の式⁽¹⁾に基づいて車軸各部の安全率を計算し、その値が1を越すある値—これは経験上の値であり、部位によって異なる—となるように直径が決められる。永島らの経験から安全率=1が確保されれば、20年間は疲労によって折損することがないからである。実際には車軸各部の直径は、安全率だけではなく曲げ剛性も考慮して決められ、さらに誘導加熱焼入れ作業による制約も生ずるが、いずれの形式の車軸においても、安全率

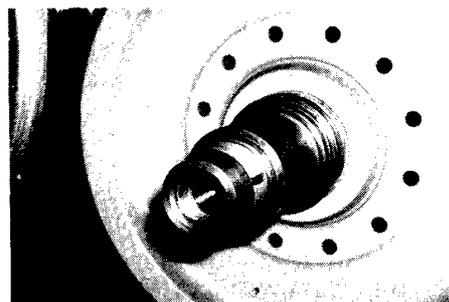


図1 φ60mm中ぐり車軸

および曲げ剛性の値は同一となるように設計されている。

車軸の安全率は、許容疲労限度と走行中に発生しうる最大応力—これは計算によって求めるが、実測した応力の最大値は一般にこれの7割程度である—との比として定義される。新幹線電車に採用されている誘導加熱焼入車軸の車輪圧入部（車輪座）における許容疲労限度は、JIS⁽²⁾によって147 MPaと定められている。最近、本松ら⁽³⁾は片持梁式疲労試験機により、実物の新幹線電車車軸を用いて疲労試験を行い、磁粉探傷によって検出可能なき裂の発生疲労限度は、177 MPa以上であると推定している。したがって、破断の疲労限度はさらに高い。上に述べたように、車軸の安全率とは破断に対する安全率なので、実際の破断疲労限度を用いて安全率を計算すると、現在の設計において計算される安全率よりもかなり高い値となる。

3. 製 造

新幹線電車車軸の素材は機械構造用炭素鋼材 S38C であり、熱処理としては調質後、疲労強度の向上を目的として車軸のほぼ全長にわたって誘導加熱焼入れが行われる。誘導加熱焼入れによって車軸表層部に導入される圧縮残留応力分布の最適化を図るべく、誘導加熱焼入れの際の周波数、誘導加熱コイルのターン数、焼戻し温度等製造仕様の変更が行われてきた。1970 年以降は現在に至

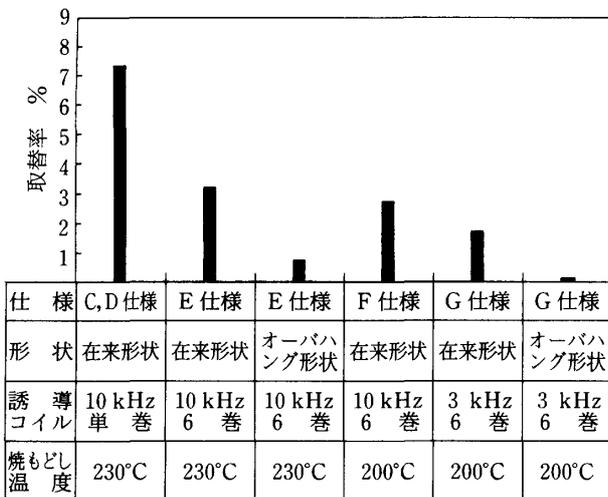


図 2 新幹線電車車軸の仕様別取替率（反歯車側車輪座に発生した疲労き裂による）⁽⁴⁾

るまで、G仕様(図2⁽⁴⁾参照)の車軸の製造が続けられており、極めて品質の高い車軸となっている。

車軸の疲労き裂は通常、車輪座の端部に生じるフレッチングに起因して発生する。そこでフレッチング対策として、車輪の内ボス端（車軸中央寄りのボス端）と車輪座との間の相対滑りを抑制するため、内ボスを車輪座端から6 mm オーバハングさせて車輪を圧入している。これによって図2に示すように、車輪座に発生した疲労き裂が原因となる車軸の取替率は、車輪内ボスをオーバハングさせていない在来形状軸と比較して大幅に減った。現在使用されている新幹線電車車軸はその形式を問わず、すべてG仕様オーバハング形状軸である。

4. メンテナンス

新幹線電車車軸は、3万 km 走行毎に車両に組込まれた状態で超音波探傷を受ける。中実車軸に対しては端面からの垂直探傷が、中ぐり車軸に対しては図3⁽⁵⁾のように中ぐり内面からの斜角探傷が行われる。さらに30万 km 走行毎（一部、45万 km 走行毎）には、工場において輪軸を台車から取外し、各部の精密な検査が行われる。特に車輪座は、車輪をずらすか外すかして露出させ、磁粉探傷が行われる。車輪座の磁粉探傷による、

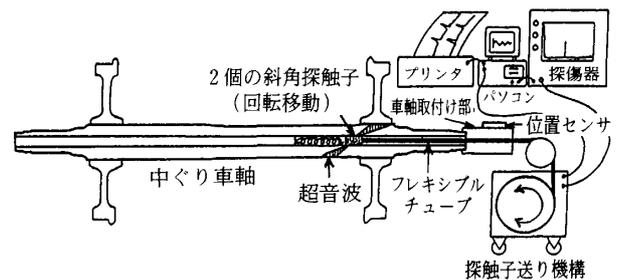


図 3 中ぐり車軸自動探傷装置の構成⁽⁵⁾

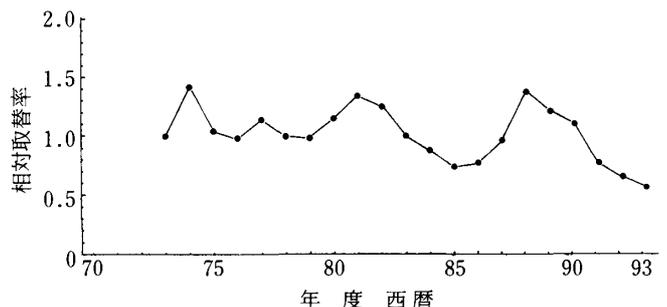


図 4 新幹線電車車軸取替率の年推移

車軸の取替基準は次のとおりである。

- (1) 深さ 0.15 mm 以上のき裂があったとき。
- (2) 深さ 0.15 mm 以下であっても、同一の車輪座に再度き裂が認められたとき。

この基準に抵触して取替となる車軸は最近極めて少なく、1991年度は0本、1992年度は4本、1993年度は1本、といった状況である（各年度とも、年間の延べ検査本数は約2万本である）。

図4は、1973年度における新幹線電車車軸の取替率を1として、それ以降の取替率の年推移を相対的に示したものである。1974年度付近に見られる取替率のピークは、実は車輪座に発生したフレッチング疲労き裂によるものである。これは上に述べたように、車輪ボスのオーバハング等の対策により大幅に減った。次に1981年度付近のピークであるが、これは主として歯車箱支え軸受内輪のクリープによるものである。その対策として内輪の締め代アップを行い、現在では内輪クリープの発生は少ない。一方、1988年度付近に見られるピークであるが、これについては明瞭な理由が見当たらない。いくつかの原因による取替がそれぞれ増加して、ピークとなった。1988年度以降は取替率は年々減少し、ついに1993年度は1973年度以来、最低の取替率となった。速度が開業時と比べて高くなっているのにこのような結果になったのは、車軸の品質が向上したことに加えて、軌道がよくなったこと、台車構造を改良したこと等によるものと考えられる。現在車軸の主たる取替原因となっているのは、車輪座かじりと腐食である。車輪座かじりとは、車輪座を磁粉探傷するために車輪の圧抜きおよび圧入を行う際、車輪座表面に生じる軸方向のきずのことである。車輪座に発生したき裂による取替がせいぜい数本であるのに対して、かじりによる取替が数百本に達するのは皮肉である。

5. おわりに

「こぼれ話」でも述べられているように、中村⁽⁶⁾によって開業当初から新幹線電車に投入された誘導加熱焼入れ車軸は、疲労強度において極めて優れており、安全上まったく問題なく使用され

ている。最近、著者ら⁽⁷⁾は実物の車軸を用いた疲労試験を行うことにより、また赤間ら⁽⁸⁾は確率論的な計算を行うことにより、車輪座表面に発生したフレッチング疲労き裂の進展性に関する破壊力学的な観点からの定量的な評価を試み、新幹線電車車軸の疲労に対する極めて高い安全性は、誘導加熱焼入れによって車軸表面に導入された、絶対値が大きくかつ深い圧縮残留応力層に依拠していることを明らかにしている。前述した車輪座におけるフレッチング疲労き裂の取替基準である深さ 0.15 mm は、相当に余裕のある数値なのである。しかも、0.15 mm 以下の深さのき裂を許容して使用しているわけではない点に注意されたい。0.15 mm 以下の深さのき裂は、車軸への熱影響を避けるために紙やすりによる手作業で除去したうえで、再使用しているのである。

一方、養祖ら⁽⁹⁾は最近使用が増大している中ぐり車軸の、工場における超音波探傷の精度向上を目指して、探触子の移動に伴うエコー高さとビーム路程の変化をパターン化し、そのパターンからき裂エコーか妨害エコーかを自動的に判断する探傷装置を開発し、実用に供されている。

新幹線電車車軸は30年の使用経験を踏まえて、より合理的な設計およびメンテナンスを行うべく、設計時の負荷の算定方法の改良など、新たな展開が図られつつある。

文 献

- (1) 永島・ほか、電車用車軸の強度について、日本機械学会論文集、17-63 (1951), 54.
- (2) JIS E 4501 (鉄道車両用車軸の強度設計法)。
- (3) 本松・ほか、新幹線電車用車軸の疲労試験結果、鉄道総研報告、6-3 (1992), 29.
- (4) 石塚、新幹線電車車軸のフレッチング対策、トライボロジスト、37-8 (1992), 624.
- (5) 養祖・ほか、夜番検査用新幹線中ぐり車軸超音波自動探傷装置の開発、鉄道総研報告、5-6 (1991), 15.
- (6) 中村、疲労強度研究こぼれ話(17)、機械設計、30-9 (1986), 139.
- (7) 石塚・ほか、人工きず入り新幹線電車車軸の疲労試験結果に対する破壊力学的評価、日本機械学会論文集、60-578, A (1994), 2200.
- (8) 赤間・ほか、破率論的破壊力学を用いた新幹線車軸の健全性評価、日本機械学会論文集、60-569, A (1994), 46.
- (9) 養祖・ほか、全搬検査および台車検査用新幹線中ぐり車軸超音波自動探傷装置の開発、NDI資料、No. 21452 (1994), 61.

(原稿受付 1994年9月13日)