

解説

新幹線の高速化とトライボロジー

Speed up of Shinkansen and Tribology

大山 忠夫

Tadao OHYAMA



- 1940年1月生まれ
- 1963年東北大学工学部卒業後、国鉄入社、鉄道技術研究所にて、新幹線のブレーキ、車輪/レール間の粘着力、転動騒音などの研究に従事。工学博士
- 正員、(財)鉄道総合技術研究所高速低騒音新幹線開発部（〒185 国分寺市光町2-8-38）

1. まえがき

フランスのTGVが、1990年5月に515.3 km/hという粘着方式の鉄道における驚異的な世界最高速度記録を達成したことに象徴されるように、近年鉄道の高速化は世界的動向である。ヨーロッパでは、EC経済統合とも関連して、フランスを中心にヨーロッパ全域にわたって高速鉄道網を形成する計画もあり、フランス、ドイツ、イタリアなどヨーロッパ各国とも高速列車の開発に意欲を示している。

わが国においても、昭和62年に国鉄が分割され各JR会社として民営化されたのを契機に、列車の速度向上に熱心に取り組むようになった。とくに、今後、21世紀に向かって急速に変化していく社会的ニーズに対応していくためには、新幹線の速度向上が必須の事柄であるという認識が強い。

一方、既設の新幹線において、安定した走行、高い経済性、環境との調和などの条件を満たして新幹線の速度向上を図るためには、機械、土木、電気、材料などの種々の面から総合的な研究開発が求められる。とくに、高速化に際しては、トライボロジーの果たす役割が大きくなる一方、その関連技術に要求される条件がますます厳しくなる。

本稿では、新幹線の高速化に伴うトライボロジー上の諸問題について、二、三の点から解説してみたい。

2. 架線・パンタグラフ系のトライボロジー

新幹線の高速化に際して、一つの大きな問題は集電である。架線とパンタグラフのすり板は、しゅう動しながら集電という機能を果たすトライボロジーシステムであり、架線電流を入力として、車両の一次側電流をいかに有効に得るかがポイントとなる。列車速度が高くなって、トロリー線の波動伝播速度に近づくと、パンタグラフのすり板がトロリー線から離れる現象、すなわち離線が急激に増大する。その結果、スパーク音が発生して、騒音が増大するとともに、アークによるすり板の急激な摩耗およびトロリー線の波状摩耗(図1)が発生する⁽¹⁾。波状摩耗はさらに離線を助長する結果となる。

離線を抑制するためには、波動伝播速度を高くする必要があるが、それには、トロリー線の張力を大きくすることと、その線密度を小さくすることであり、さらにパンタグラフのしゅう動する可動部分の質量を小さくして押上力を増加させることなどが離線の低減にとって有効である。しかし、これらはトロリー線の寿命やすり板の摩耗とも関連するので、架線・パンタグラフ系のトータルシステムとして最適条件を見い出すべく研究開

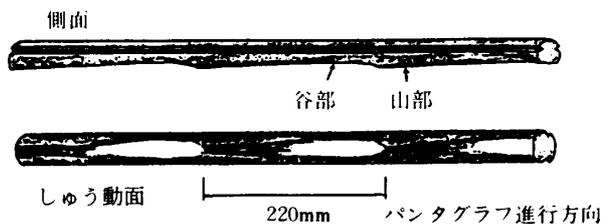


図1 新幹線のトロリー線の波状摩耗

発がなされている。

すり板とトロリー線の摩耗には、速度、接触力、電流および離線率が影響する。すり板の摩耗には、トロリー線とこすり合うことによる純機械的摩耗と、離線時に発生したアーク放電によって溶融したり、表面が変質したりすることによって増大する電氣的摩耗に分けられる。とくに、列車速度が高くなると、集電電流が増加するとともに離線も増えるので、電氣的摩耗が顕著になるが、それに対しては耐アーク性に注目して材料開発が行われており、すり板の材料としては現在焼結合金系の材質改善が進められている。さらに、トロリー線の摩耗を減らすという観点からカーボン系のすり板材料の開発も最近注目されている。

以上のように、架線・パンタグラフ系のトライブロギーには、通電という問題が関与しているために現象がより複雑であるうえに、車両の屋根上のパンタグラフは空力音の発生源ともなるので、今後環境問題とも関連して一層の研究開発が必要とされることである。

3. 新幹線車両構成要素のトライブロギー

3.1 駆動装置と歯車 新幹線車両の電動機としては、従来から直流機が用いられてきたが、高速化するほど所要パワーが増加し、それに従って電気機器の重量も増える。そのため、主抵抗器を省いて交流回生ブレーキとしたPWMコンバータ・VVVFインバータ・誘導電動機方式が軽量化にとって有望とされ、一部の試作車に採用され始めた。誘導電動機の採用は、ブラシレス化になるので、トライブロギー上の一部の問題は解消される。

電動機軸に発生するトルクと回転を、歯車およびたわみ継手などを介して車軸に伝達し、車両を駆動する機構が動力伝達装置である。車両の軽量化、とくにばね下質量の軽減が高速化にとって必要とされ、そのため歯車箱も小形化が進められ、また、その材料も従来の鋳鉄からアルミ合金とするなどの工夫も加えられている。

小歯車の材質は現在SCM 23で浸炭焼入れ、大歯車はS 40 Cで歯面が高周波焼入れされ、潤滑方式としては、大歯車がかき上げた潤滑油によ

り歯車自身と軸受へ給油する油浴潤滑方式が採用されている。高速連続走行条件では、潤滑油がかくはんされて温度が高くなり、潤滑性能が低下して歯面の損傷、焼付き、摩耗などが生じる心配がある。そのため、150°C程度までの温度上昇を想定して、耐熱性ギヤ油の開発が進められ、また、歯車に新素材を用いることも検討されている。なお、TGVの動力車ではトリポードという動力伝達装置(図2)が用いられている。これは、車体に装架された電動機の回転トルクを輪軸の駆動装置に伝えるもので、車体と台車間の上下・左右方向の大きな変位に追従できる機構である。ただし、重量が大きいので、このままでは軽量化の方向で進んでいる動力分散方式の新幹線車両には適用できない。そこで新幹線でも、ばね下質量の軽減のために新しい考え方により、電動機を車体装架する方向の研究開発が進められている。

3.2 軸受 これまでの新幹線車両の車軸軸受は、ラジアル荷重を支える円筒ころ軸受とスラスト荷重を負担する玉軸受で構成され(図3)、重量増の原因となっていた。ちなみに、TGVやドイツのICE車両の軸受は円すいころ軸受でラジアル荷重とスラスト荷重を同時に受けるので、小形で重量も小さくなっている(図4)。そこで、

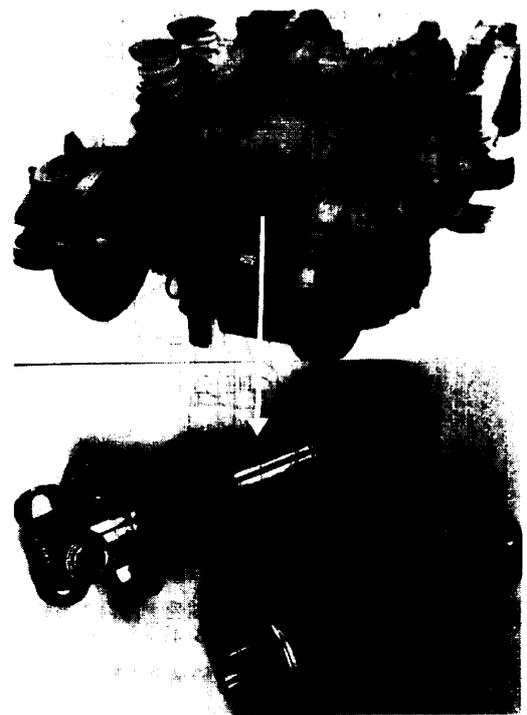


図2 TGV動力車のトリポード

新幹線では軽量化対策として、スラスト荷重を軸受軌道輪のつばとこころ端面の滑り面で受けるつば付き円筒ころ軸受が、一部試作車に採用されている(図3)⁽²⁾。潤滑剤は現在タービン油による油浴潤滑であるが、軽量化とメンテナンスフリーの点からグリース潤滑方式も検討され、耐久性と焼付き防止などの点からウレア系グリースの試作・開発が進められている。軸受の高速使用条件に対する指標として、 $d_m n$ 値が一応の目安として用いられ、車軸軸受では、350 km/h 走行で、ほぼ 40×40^4 であるが、歯車装置軸受や電動機軸受では 55×40^4 程度に上昇するから、今後の高速化に際してはその点に留意した設計が必要となる。また、鉄道の軸受では、漏えい電流のために、油膜を通してスパークが発生し、転動面にピッチングが生じる電触という現象があり、その対策も必要とされる。

3.3 摩擦ブレーキ 新幹線車両では、高速時には電気ブレーキが用いられる。しかし、このブレーキがフェールすることも考えられるので、フェールセーフ系のブレーキシステムとして、摩擦によって車両の運動エネルギーを吸収する機械ブレーキがバックアップとして使用される。新幹線の機械ブレーキとしては、ディスクブレーキが採用されているが、高速で電気ブレーキがフェールした場合には、機械ブレーキがすべて負担することになるので、ブレーキディスクにかかる熱負

荷は、列車速度が高くなるに従い急激に増加する。そこで、300 km/h 以上の高速域で用いるために、耐熱変形性、耐摩耗性ならびに耐熱き裂性に優れ、しかも軽量のディスクの形状と材質に関して研究開発が行われている。従来から、材質としてニッケル・クロム・モリブデン鋳鉄からなる二分割形の車輪側ディスクが使用されてきたが、最近、Ni-Cr-Mo 鋼を用いて高温強度を大幅に向上した一体形鍛鋼ディスクが実用化され、熱き裂の発生防止と軽量化に貢献している。さらに、次のステップとして、アルミ合金基複合材料やカーボン複合材のディスクへの適用についても検討が進められている。なお、ディスクをしゅう動するライニング材として、これまで銅系焼結合金が用いられているが、今後は相手ディスク材に合わ

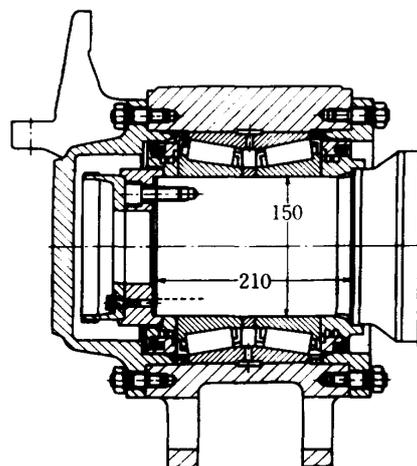


図4 ドイツ ICE 動力車の円すいころ軸受

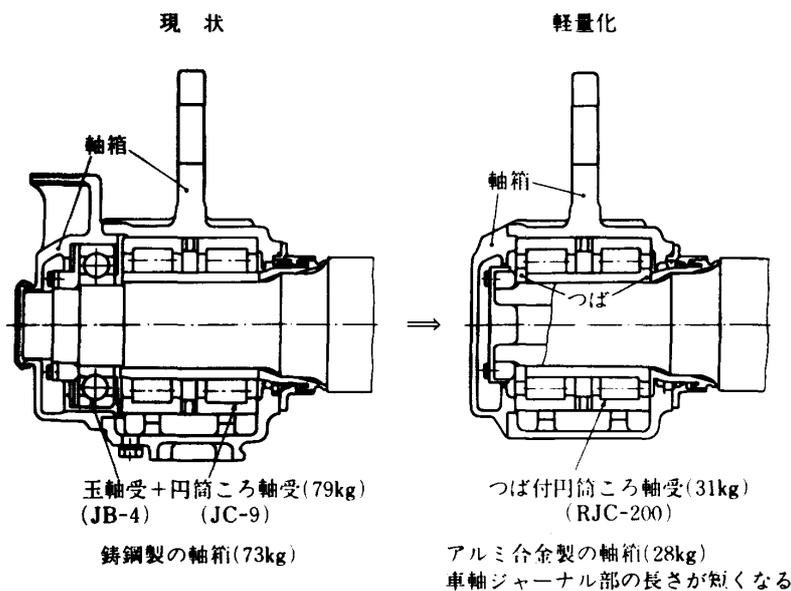


図3 新幹線電車の円筒ころ軸受

せて、安定した摩擦特性と高温時の耐摩耗性向上を図る方向で開発を進めていく必要がある。

4. 車輪/レール間のトライボロジー

4.1 粘着力 現在の車輪/レールシステムにおいて加減速力の限界は「粘着力」によって定まる。粘着力とは、車輪にトルクが負荷されて転がるときに、接触部分で微小な滑りを伴って伝達される力を意味する。これを定性的に示したものが図5であり、走行している車輪にトルクが加えられると、伝達される力は滑り率とともに増加し、ある滑り率のもとで飽和する。その後は負荷トルクの増加とともに、滑り速度が急増し、駆動時には空転、ブレーキ時には滑走という状態になる。ここで、伝達される最大の接線力（粘着力の限界）を接触荷重で除した値が粘着係数である。

図6は、これまで新幹線で各種形式の車両によ

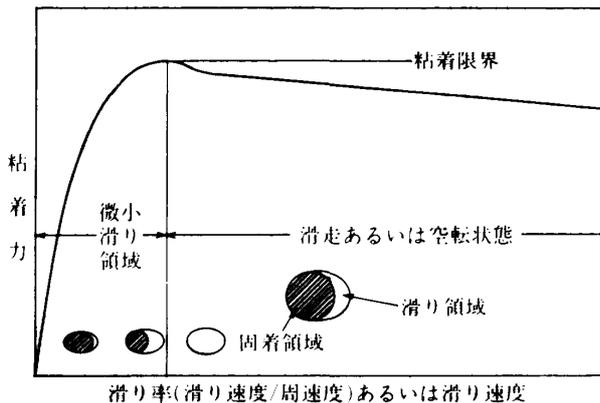


図5 車輪/レール間の粘着力

って主として散水時に測定した粘着係数を示した例である。これまでの研究結果によると、乾燥状態では粘着係数の速度依存性はほとんど認められないが、水が存在すると図6のように、高速になるに従って大きく低下する傾向を示す。これは接触部に介在する水の力学的作用、すなわち弾性流体潤滑効果によるものと考えられ、表面粗さが大きいほど、粘着係数は大きくなることが認められている⁽³⁾。

これまで、車輪/レール方式の鉄道では、図6のように降雨条件では粘着係数が速度とともに低下するので営業運転としては350 km/h程度が限界と考えられていたが、粘着力低下のメカニズムが明らかにされることによってその改善の方法も見出され、また、スリップをコントロールすることによる粘着力有効利用の技術も進歩してきているので、限界速度をさらに向上できるというのが最近の考え方である。なお、フランスのTGVによる515.3 km/hは、乾燥状態で達成されたものである。

4.2 車輪踏面損傷 ブレーキ力が限界の粘着力を上回ると、車輪が巨視的に滑り、ついには、ロックして車輪踏面にいわゆる「フラット」という損傷を生じる。一方、完全にロックに到らない場合でも、滑走による発生熱のために車輪表層部の金属組織が変化して表面き裂が発生し、それが起点となり、繰返し荷重を受けて「はく離」となることもある。

これらの踏面損傷は、騒音・振動の発生源とな

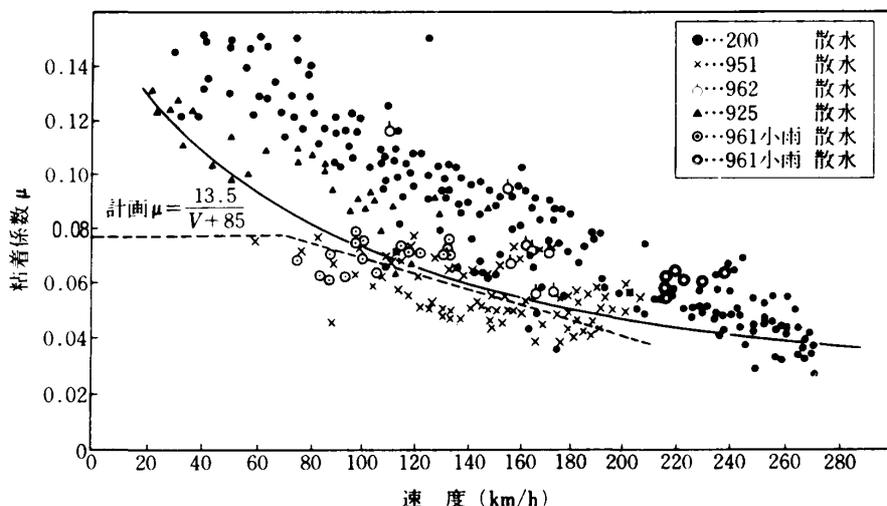


図6 新幹線電車の粘着係数

フラット発生率 (1両1万回あたり)

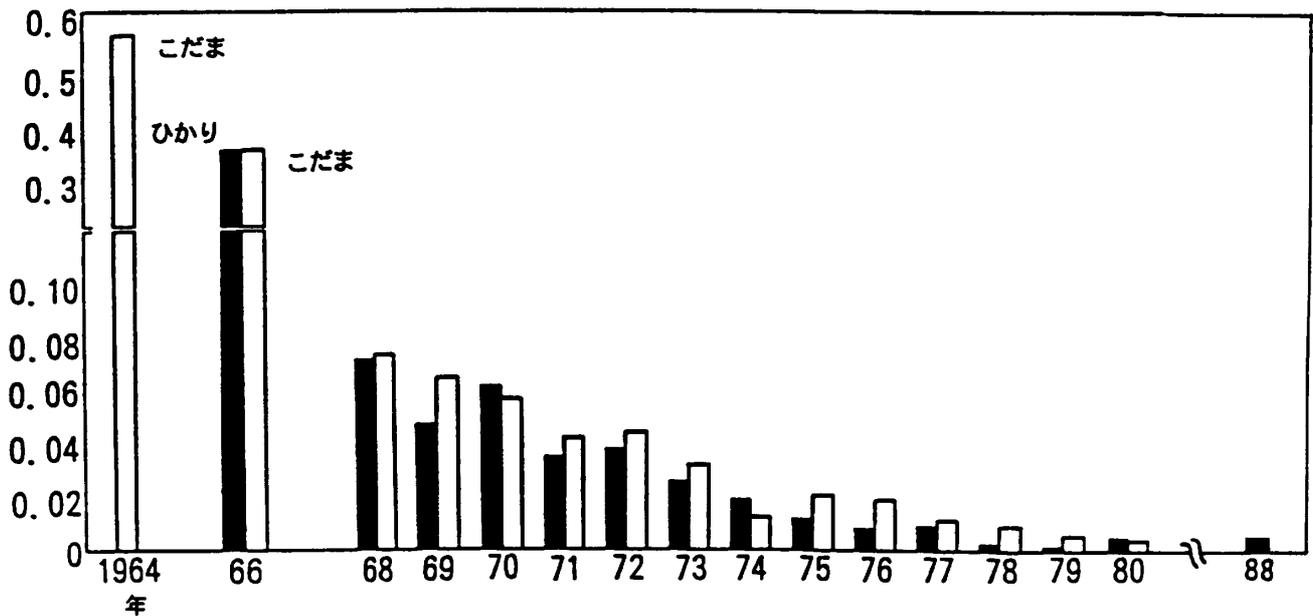


図7 新幹線開業後の車輪踏面フラット発生率の推移

るとともに、乗り心地を悪くし、また、軸受や車軸あるいはレールに過大な衝撃荷重を与え、それらの寿命を短くするなど種々の問題につながる。

新幹線車両では、昭和39年開業以降10年近くにわたって、フラットの発生に悩まされたが、その後、滑走制御方式や粘着力改善の考え方が採り入れられるに従って、車輪踏面損傷の発生は急減し、最近では、最大でも100万kmの走行に対して数件というオーダーとなっている(図7)。

車輪と同様にレール表面にも、転がり疲れに属する「シュリング」という損傷が生じ、これはレール折損にもつながるので、その防止策は重要な課題である。この発生メカニズムは、あまり明確となっていないが、トンネル内ではほとんど発生していないことから、これに対しても水の作用がかなり関与していると推察される。

4.3 レールの波状摩耗 新幹線の高速化にとって、騒音の発生をできるだけ抑えることが必須のこととなっている。トライボロジーに関連する発生源として車輪/レール間の転動音がある。その発生メカニズムとしては表面の凹凸の存在によって、車輪がレールを加振することで発生するというのが定説である。レール表面の凹凸は、波状摩耗といわれ、波長が3~8cmの短波長のも

のから、200cmに到る長波長のものまで含まれ、その発生機構については幾多の報告が出されているが、実際には多くの原因が競合して発生するものと考えられる。現在、その対策として削正以外に抜本的方法は見当たらず、新幹線では転動音の低減のためにレール研削車によって定期的に削正がなされている。

5. あとがき

今後、新幹線は300km/h領域の営業運転を目指すことになるが、環境問題など、まだまだブレークスルーを要する問題がある。本文でも述べたように、この中にはトライボロジーと関連する技術分野が多く含まれ、メンテナンスの問題を含めて鉄道の高速度化技術の進展がさらに期待される。

文 献

- (1) 長澤広樹・網干光雄, トライボロジスト, 35 (1990), 79.
- (2) 手塚和彦・新田幸雄, Railway Research Review, 45 (1988-9), 17.
- (3) 大山忠夫, 鉄道総研報告, 1-2 (1987).

(原稿受付 1990年10月5日)