

鉄道車両用足回り重要部品の安全性

○「機」坂本東男 (高知工大)

Security of Critical Components for Railroad Vehicle Bogie Truck

○ Haruo Sakamoto (Kochi University of Technology)

Abstract: Railroad products suffer fatigue since they are used in a condition of cyclic loading when railroad vehicles run. Key products are the most important mechanical parts, which are wheels, discs, truck frames, and axles. They are such fail-out components, as can cause the fatal failure of vehicles, when the components fail. Among such components, wheels and axles are the most critical railroad components, since they can cause the derailment. This paper summarizes how the railroad products in Japan were developed using the knowledge of fatigue characteristics and fracture mechanics, and the future research is considered. The issues are whether fatigue limit exists based on a scientific explanation, whether the retardation of crack extension can happen with appropriate ground, and whether a crack extends under large compressive cyclic loading. The last issue is discussed in the last topic. The other topic regarding fatigue limit needs to be continuously investigated in the future.

キーワード: 鉄道車両、新幹線車両、車輪、ブレーキディスク、台車枠、車軸

Key Words: Railroad Vehicle, Shinkansen Vehicle, Wheel, Brake Disc, Bogie Truck Frame, Axle

1. 緒言

鉄道車両用台車の足回り部品は繰り替えし荷重を受けるため、疲労強度に関する配慮が必要である。また車輪、車輪のような Fail-out 部品は破壊力学による検討で最終破壊が生じない設計が重要である。本報告では報告者が経験した鉄道車両用台車重要部品の開発で疲労強度および破壊力学を取扱い、安全性を確保した例を紹介する。即ち、車輪、ブレーキディスク、台車枠、車軸の安全性に関して報告する。また安全性を確保するために今後の検討課題に関して述べたい。

2. 鉄道車両用足回り部品の強度

2.1 車輪

鉄道車両用車輪はレールとの接触による摩耗が避けられない。摩耗に対する抵抗性を考慮して高炭素鋼が使用されている。例えば JIS (Japanese Industrial Standard) E5402 では炭素量 0.60-0.75% の普通炭素鋼が規定されている。このような高炭素鋼は脆性材料であり、き裂があり引っ張りの残留応力が作用すれば破壊する可能性がある。米国鉄道では1985年の統計で約100件が貨車用車輪の破壊が原因での脱線事故が生じていた。米国鉄道では貨車が100万両と日本より桁違いに多いだけでなく、メンテナンスが不十分であることおよび使用条件も日本と比較にならないほど過酷であるため、事故が多い。一番の悪影響は脱シューとシューの間違い (铸铁シューの車両に合成シューを使用) である。ブレーキをかけっぱなしにして坂道を下る場合、高速と高荷重ではブレーキ熱による温度上昇が著しい。製造

されたままであればレールに接触するリムと呼ばれる部分は圧縮の応力であるが、温度上昇が著しい場合にはそれが引っ張りに反転する。さらにブレーキの繰返しで車輪踏面 (レールと接触する面) に微細熱き裂、さらにそこを起点とした熱き裂が生じる。き裂長さと引っ張り残留応力から得られるき裂先端の応力拡大係数が破壊靱性値を越えた時に脆性破壊が生じる。

このような脆性破壊の対策としては次のようになる。

1. き裂を生じさせない。しかしながら、日本の例でも踏面には微細き裂さらに熱き裂は生じており、踏面ブレーキを使用する限り生じることは避けがたい。
2. 次は製造時の圧縮残留応力のままで、過大なブレーキ熱が生じても引っ張り残留応力に反転させない。あるいはその引っ張り残留応力を出来るだけ小さくする。
3. さらに材料の破壊靱性値を出来るだけ高くして、き裂長さと残留応力から計算される応力拡大係数が破壊靱性値を越えないようにする。

最初に鉄道車輪の脆性破壊の実験室再現を実施した。図

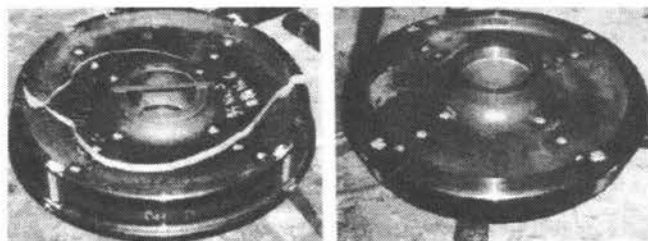


Figure 1 Reproduction of Wheel Brittle Fracture (left: Fracture)

1 に実験の結果を示す。まず、抑速ブレーキをかけっぱなしにして走るとそのエネルギーでリム（レールに接する箇所）に過大の熱が入る。その後冷却したときには入熱量によるものの、引っ張り残留応力が生じる場合がある。図 1 の左は引っ張りが生じた車輪をノコ切断した際、脆性破壊した例であり。右は入熱が少ない場合で引っ張り残留応力が生じず、破壊が生じなかった例である。

ブレーキ熱による温度上昇が避けられないとしても冷却した後、残留応力を低減させることは可能である。板部（レールと接するリムと車軸が嵌め合いされる車輪ハブの間）の長手偏心量（リムの板部付け根とハブの板部付け根の位置関係で軸方向に変位している量）が冷却後の残留応力に与える影響を調査した。図 2 に板部偏心量と応力拡大係数（仮のき裂長さと残留応力で計算される）の関係を示す。この結果、米国車輪である A-28、J-36、A-40、D-28（数字は車輪径）とも板部偏心量が大きくなれば、応力拡大係数は小さくなることがわかった。次の図 3 に示すように車輪材料の破壊靱性値は $40\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以上であり、偏心量を 40mm 以上にとれば破壊の確率は小さくなる¹⁾可能性がある。車輪材料の破壊靱性値²⁾についても検討した。破壊靱性値に及ぼすフェライト量と旧オーステナイト粒径の影響を実験で求めた結果、図 3 に示す結果を得た。即ち、フェライト量が多く、粒径が小さい方が破壊靱性値は高くなる。以上の結果を配慮して製造された車輪が図 4 に示すものである。

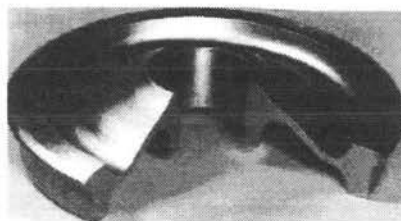


Figure 4 Developed New Wheel

2.2 ブレーキディスク

1964 年開業した新幹線には鋳鉄のブレーキディスクが使用されていた。当時は 210km/h の営業最高速度であったが、更なる高速化が検討された。現在の新幹線最高速度は 300km/h であるが 210→300km/h となればブレーキのエネルギーは倍となる。とても鋳鉄では対応出来ないと予想され鍛造のブレーキディスクが検討された。当初、鋳鉄のように冷却のためのフィンを鍛造で製造するのは困難であろうと考えられ、フィンのない帽子型のディスクで検討が始まった。しかしながら性能試験の際、脆性破壊事故が生じた。図 5 に破壊の状況を示す。この破壊に関しても破壊靱性値を向上させることが手段であることから材料の検討を行った。材料は摩耗に対する抵抗性と高靱性を考え Ni-Cr-Mo でオーステナイト粒径を小さくした 0.30% 炭素の 4330modify とした。さらに鍛造で現在のディスクと同様車輪内部に取り付けられるようにフィン付きディスクを製造した。図 6⁷⁾にそのディスクを示す。

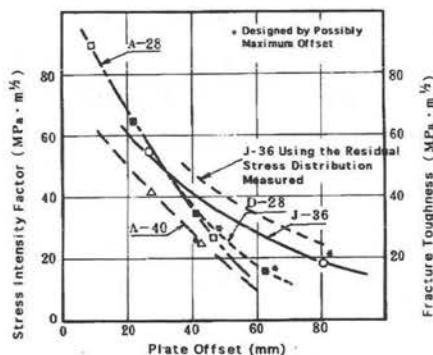


Figure 2 Relationship between Stress Intensity Factor and Plate Offset

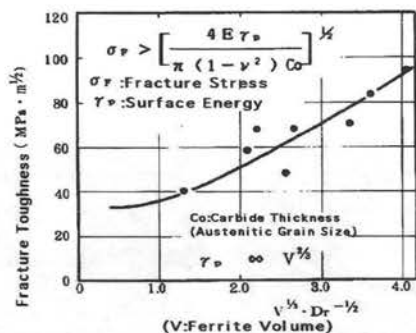


Figure 3 Relationship among Fracture Toughness, Ferrite Volume, and Prior Austenitic Grain Size

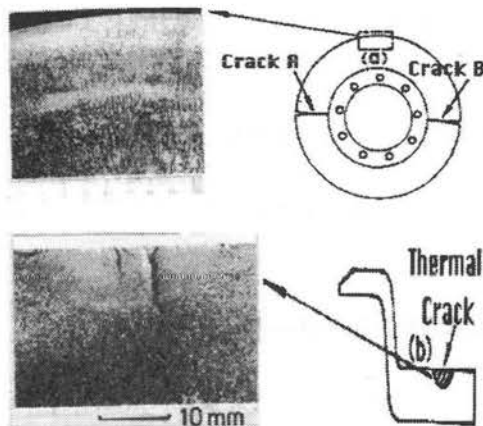


Figure 5 Brittle Fracture of Experimentally Tested Disc

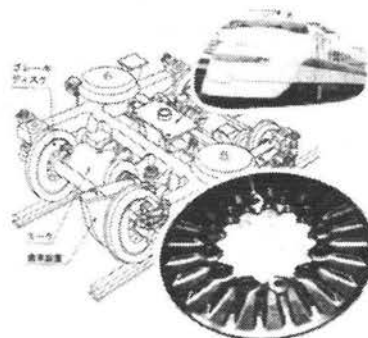


Figure 6 Nozomi Vehicle and Disc

2.3 台車枠

鉄道用台車枠の設計基準として、図 7 に示す JIS (Japanese Industrial Standard) E4207-1995 がある。しかしながら、疲労限度思想であり、元となったデータが示されていない。材料に疲労限度が存在するとの科学的根拠はないことと繰返し数がどのくらいまでの設計で使えるのが不明である。S-N を使えば繰返し数と応力により、損傷度が検出出来、航空機のように損傷許容設計が可能である。疲労限度であれば材料には破壊もき裂発生もあり得ない条件で設計することとなる。材料では損傷はあり得るものとして、設定した許容以内で設計すべきと考える。アルミニウム構造物の場合には図 8 に示すように英国に設計基準 (BS8118) が有るものの日本にはない。BS8118 ではデータのバラツキの中央値から 2 倍の標準偏差を引いている。そこで疲労試験のデータのバラツキから平均値より標準偏差の 3 倍を引いた線図 (破壊確率は 1.3×10^{-3}) で設計した。図 9 はその設計例⁴⁾である。

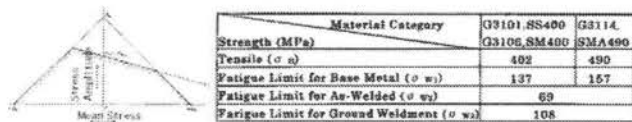


Figure 7 Design Guidance for Bogie Track Frame (JIS E4207)

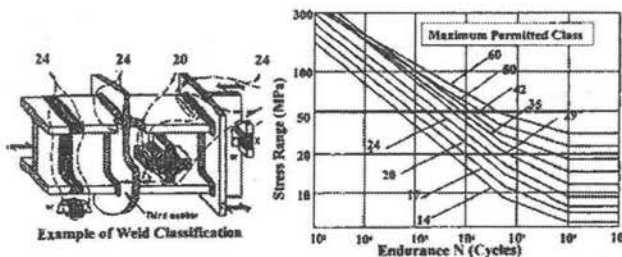


Figure 8 Aluminium Welded Structure Design Curve by British Standard, BS 8118

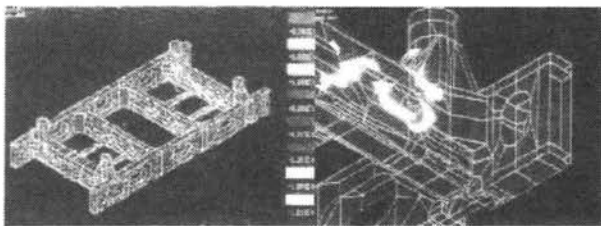


Figure 9 Aluminum Welded Bogie Truck Frame

2.4 車軸

車軸はFail-outの部品であり、新幹線用車両は一般車軸以上に細心の注意を払ってメンテナンスおよび検査を実施している。図 10⁵⁾に本車軸の高周波焼き入れ部分を示す。車軸の 2-3mm 深さ表層部には長手方向圧縮残留応力が生じている。これらの圧縮応力により、微細なき裂がフレットングコロージョンで生じたとしても、き裂は進展しないのではないかと予想される。JRでの検査では 0.15mm のき裂深

さも許容していない^{6),7)}ため、安全上の問題は生じていない。しかしながら、検査から安全は確保されているものの車軸自身の強度上の安全性は明らかとなっていない。JRによる検査の労力は大変なロードであり、車軸自身の強度に関する安全性を明らかにしておくことは意義のあることである。安全性を向上させつつ、合理的な検査の可能性があるように思える。

現在JRでの新幹線車軸の傷検査は 30,000km (新製車軸では 1.07×10^7 回転) または 30 日走行毎の通常点検時に超音波探傷で実施されている。また 600,000km (同 2.1×10^8 回転) または 1 年毎の台車点検時さらに 1,200,000km (同 4.2×10^8 回転) または 3 年毎の一般検査時に磁粉探傷で傷を調べている⁸⁾。磁粉探傷の結果では最大でも 0.2mm のき裂発生との報告⁶⁾であり、0.15mm 以上の車軸は廃却されている⁶⁾。従って破壊を導く傷深さの 3 桁小さい傷を検査で見つけ、安全を確保している。

このような厳しい検査で新幹線車軸の安全性は確保されているが、検査にはかなりの費用と労力が必要であると同時に車軸自体の強度に関する安全度が明らかでない。そこで過大圧縮荷重下での繰返し疲労試験を実施した。使用条件から 10^8 - 10^9 サイクルの繰返し数が必要であるが、通常試験には時間がかかることから 10^7 で強度は判断されていた。今回はバイプロフォー試験機を用いて、 5×10^8 サイクルを目標に疲労試験を実施した。図 11 に試験片と試

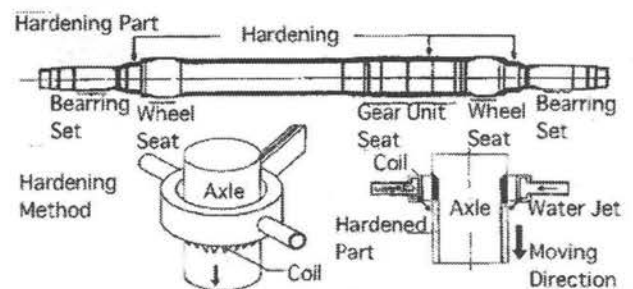


Figure 10 Induction Hardening for Shinkansen Axle

験機を示す。材料は機械構造用鋼の S38C である。実際の走行条件で車軸に加わる変動応力は最大でも $\pm 60 \text{ MPa}$ である。この条件では微細なき裂の進展はないとの予想から加速試験として試験条件を残留応力から $0 \sim 500 \text{ MPa} \sim 0$ (図 13 左の A, B, C カーブ) の繰返しとした。その結果図 12 に示すように約 5×10^8 サイクルで約 2.4mm の進展が認められた。き裂進展に関与した機構はき裂先端に生じた引っ張り応力と考えられた。そのため、き裂先端に生じた引っ張り応力を弾塑性解析で求めた。その結果、図 13 右に示すように $0 \sim 500 \text{ MPa} \sim 0$ (荷重は 382N (ほぼ 0 応力として) $\sim 7,822 \text{ N} \sim 382 \text{ N}$) のサイクルではき裂先端に 89MPa の引っ張り応力が生じていることが確認された。この応力がき裂進展に関与している。図 13 右の応力分布を用いて予き裂 0.8mm でのき裂先端の応力拡大係数を計算したところ、約 $200 \text{ MPa} \text{ m}^{1/2}$ であった。これは材料のき裂進展閾値に近値である。

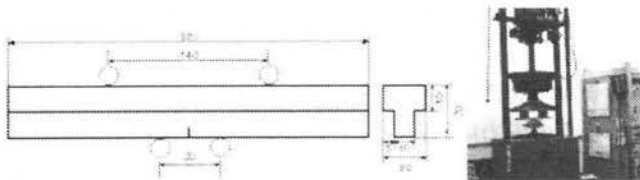


Figure 11 Test Piece and the Machine

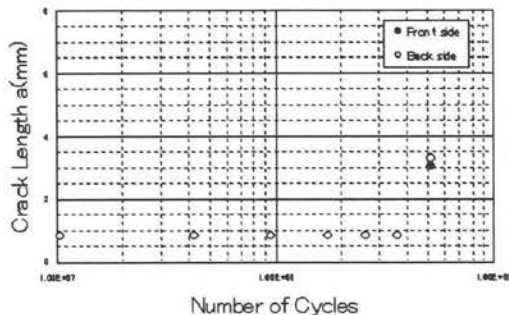
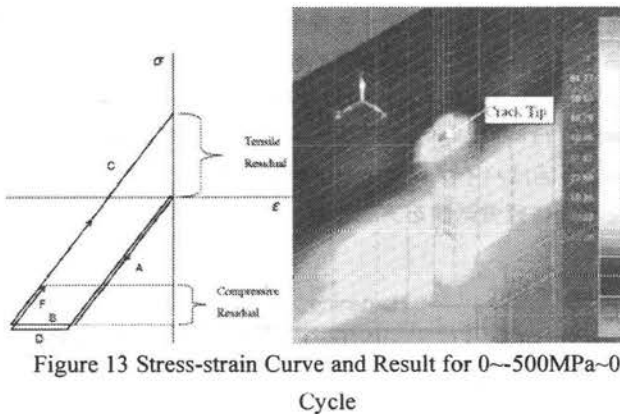


Figure 12 Test Result of Cyclic Large Compressive Stress

Figure 13 Stress-strain Curve and Result for 0~500MPa~0
Cycle

き裂は約 5×10^8 サイクルで 2.4mm 進展している。

3. 考察

3.1 車輪

米国鉄道用車輪の破壊に関してはその対策が検討されたが、国内の新幹線以外の車両でも今後の高荷重、高速化の可能性を考える必要がある。国内では板部が波打った波打車輪が使用されているが米国鉄道用と同じく板部偏心量を大きくすることにより、ブレーキ熱による引っ張り残留応力が低減出来ることは確認されている。使用条件の変化に応じて形状や材料の変更をすることも有り得る。

3.1 ブレーキディスク

一般車両のブレーキディスクは現在も鋳鉄製と考えられるが、今後の高速化を考えて廉価な鍛造ディスクの検討と採用を検討することが望ましい。

3.2 台車枠

現在の JIS における鉄道車両用台車枠設計基準は疲労限度思想である。疲労限度の存在は科学的根拠のないことであり、損傷許容設計の基準を検討するべきと思われる。このためには走行での変動応力のデータ蓄積も必要となる。

JR や民鉄が協力してデータ収集と規格の整備が望まれる。

3.4 車軸

新幹線車軸の嵌め合い部に生じる微細き裂は 0.15mm の深さも許容していない。このような厳しい検査で新幹線車軸の安全性は確保されている。しかしながら、製造時には高周波焼き入れで表面に圧縮残留応力が生じているので車軸自身の安全性を十分把握出来ていないこととなる。やはり車軸自身の強度に関する安全性や余裕の度合いを十分理解して検査を実施することは重要である。現在では余裕の度合いを無視して厳しい検査を実施していることとなる。今回、微細き裂が生じてでも進展しにくい結果は得られているが 1 つの結果のみであり、今後、データを積み上げて十分な根拠を得て、適正な検査を実施することが望ましい。

4. 結言

報告者の経験を踏まえて鉄道車両台車部品の安全性に関してまとめてみた。現在では破壊力学や弾塑性解析を使えば台車部品に作用する応力とそれによる強度判定が十分可能であり、より安全性を高める技術の向上が期待される。

5. 文献

- 1) Sakamoto, H. and Hirakawa, K.: Prevention of Railroad Wheel Fracture, JSME International Journal, Series A, Vol. 46, No.4, pp 613-619, 2003
- 2) Sakamoto, H., Toyama, K., and Hirakawa, K.: Fracture Toughness of Medium High Carbon Steel for Railroad Wheel, Material Science and Engineering-A (MSE-A), A285, pp 288-292, 2000
- 3) Sakamoto, H. and Hirakawa, K.: Fracture Analysis and Product Development of Brake Disc, JSME, International Journal, Series A, Vol. 48, No.4, pp458-464, 2005
- 4) Sakamoto, H.: Fatigue Design Code and Practice for Aluminium Welded Structure, Engineering Structural Integrity Assessment, EMAS, pp249-256, 1998
- 5) 石塚弘道: 新幹線電車車軸の探傷作業の効率化、鉄道総研報告、Vol.11, No. 9、1-6、1997
- 6) Ishizuka, H. and Sato, Y.: Fretting Fatigue Strength of Axles of Bullet Train and Their Maintenance, Proc. of the 10th International Wheelset Congress, pp 195-199, 1992
- 7) Ishizuka, H.: Thirty Years of Axles Maintenance for Japanese Bullet Train-Shinkansen, Proc. of the 11th International Wheelset Congress, pp 43-46, 1995
- 8) Ishizuka, H. and Sato, Y.: Probability of Omitting Magnetic Particle Flaw Detection and Extending Ultrasonic Test Cycle of Shinkansen Vehicle Axles, Proc. of the 12th International Wheelset Congress, pp 357-362, 1998