



鉄道用車軸と車輪の特性

高 澤 克 朗*

Properties Required for Axis and Wheel of Railway Rolling Stocks

Katsuro TAKASAWA

1. はじめに

鉄道車両の車輪と車軸（この組立品を輪軸と称する。以下これを用いる）は鉄道車両を構成する部品の中で、最も安全性を要するものとされている。この理由から、求められる品質、保守方法等はきわめて熟成し練磨されたものとなつているが、しかしまだ技術的に未解明の事項も多い。

以下、本稿は主として国鉄における使用状況を中心として、輪軸の材質、使用条件、保守方法及び技術的問題等について解説を進めてゆく。

2. 輪軸の構成

輪軸の構成について、図1により簡単に説明する。鉄道車両の輪軸は一本の丸棒の両側に、圧力ばめ等により、車輪をかん合し構成される。車軸の両端には軸受が配置され、車軸の滑らかな回転を維持する。車輪のかん合部を輪座、軸受を配する部分をジャーナルと呼称する。一方、車輪は軸の両側の対称位置に同形のものが背中合わせに配置されている。車輪はレール上を転動するが、この転動面を踏面といい、2本のレールにはまつた形で、輪軸を案内する部分をフランジと称する。車輪踏面には、若干の勾配が付与され、これを踏面勾配という。

3. 車 軸

3.1 車軸の一般形状

車軸の形状の代表的なものを図2の(a)、(b)に示

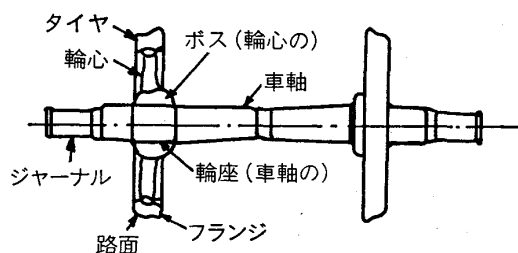
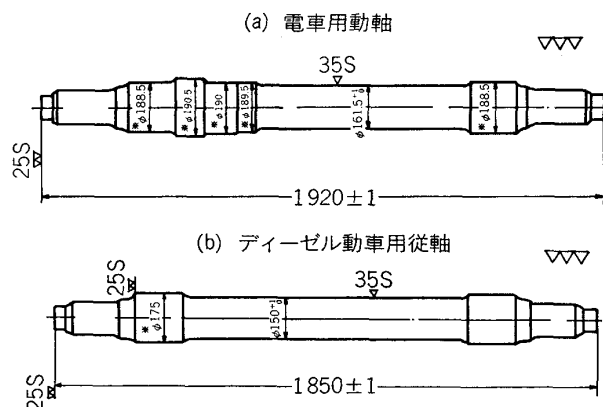


図1 輪軸の構成と名称

す。鉄道車両は大別して、動力車と、これにけん引される付随車に分類されるが、(a)は動力車の例として電車用動軸、(b)は付随車用としてディーゼル動車従軸を示している。(a)では、輪軸、ジャーナル軸受けのほか、駆動力を伝達するための歯車、歯車箱を支持するための軸受けが余分にかん合され、(b)では余分に、制動用のブレーキディスクがかん合されているものもある。

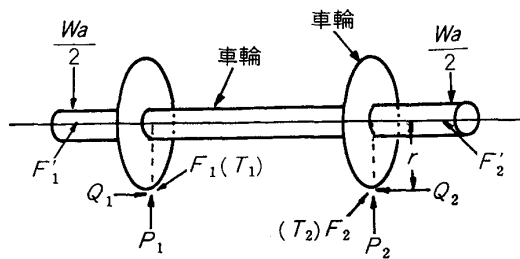
3.2 車軸の強度設計

車軸の両端のジャーナル部で垂直荷重と水平荷重を受け、この反力はレールと車輪の接触点に生じる。従つてこの応力条件は図3のように、両端支持の回転曲げと、走行中生じるねじり応力の条件に簡単化して記述される¹⁾。



備考 仕上がり車軸の※印寸法の許容差は、縮め代によって算出し、表面粗さを6.3Sとする。また、その他の表面粗さは、3.2Sとする。

図2 車軸の代表例 (単位 mm)



$4Q=Q_1\sim Q_2$ P : 輪重 W_a : 軸受部荷重 F : 前後力
 Q : 横圧 T : ねじり荷重

図3 車軸にかかる荷重の説明図

昭和 60 年 5 月 28 日 受付 (Received May 28, 1985) (依頼解説)

* 鉄道技術研究所 (現: (株)不二越技術部 (Railway Technical Research Institute, Now Robot Division, Nachi-Fujikoshi Corp.))

表 1 車軸の化学成分 (%)

| | 名称 | C | Si | Mn | P | S | その他 | 用途 |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|------------------------------|----------------|
| JNR (日本国有鉄道) | SFA 55 | 0.3~0.43 | 0.15~0.4 | 0.4~0.85 | <0.035 | <0.035 | Cu<0.30 | 客貨車 |
| | SFA 60 | 0.35~0.48 | " | " | " | " | " | 動力車 |
| | S38C (調質) | 0.35~0.41 | 0.15~0.35 | 0.60~0.90 | <0.03 | " | " | 新幹線電車 |
| DB (西独国鉄) | C35 | 0.32~0.4 | 0.15~0.35 | 0.4~0.7 | <0.045 | <0.045 | | 客貨車 |
| | 30Mn5 | 0.27~0.34 | " | 1.2~1.5 | <0.035 | <0.035 | | 軸重 30t 用将来使わない |
| | 25CrMo4 | 0.22~0.29 | " | 0.5~1.5 | " | " | Cr: 0.9~1.5 Mo: 0.15~0.25 | EL. DL 動力車すべて |

表 2 車軸の機械的性質

| | 名称 | 降伏点 kg/mm | 引張強さ kg/mm | 伸び % | 絞り % |
|----------|-----------|--------------|---------------|-------|-------|
| JNR (日本) | SFA 55 | 28 以上 | 55 以上 | 23 以上 | 35 以上 |
| | SFA 60 | 30 以上 | 60 以上 | 20 以上 | 30 以上 |
| | S38C (調質) | 45 以上 | 62 以上 | 20 以上 | 50 以上 |
| DB (西独) | C35 | 28 | 50~60 | 22 | |
| | 30Mn5 | 55 | 80~95 | 24 | 45 |
| | 25CrMo4 | 65 | 90~105 | 12 | 45 |

設計時の応力の模式化は、我が国においては、永島-中村の方法²⁾に基づく鉄道車両用車軸の強度設計方法 (JIS E 4501) に定めている。この方法は上述の荷重条件に、実走行時のデータをもととする動的荷重量を、走行速度によつて変る荷重係数としてとりこんだものであるが、西欧諸国では速度増加に伴う荷重係数は採用していない³⁾。JIS E 4501 のように、速度に応じて荷重係数を変えて計算する必要性はそれなりに了とされようが、しかしこの際の走行時のデータはある限定的使用条件のみ反映したものとならざるを得ず、特に、高速化実現のため、その後積み重ねられた多くの技術改良策まで予見してとり込む形にし難い。従つて JIS E 4501 によると、技術改良にもかかわらず、高速化すると、必然的に軸径は太つてくることになる。この理由から JIS E 4501 の見直しが図られつつある⁴⁾。

3.3 車軸の材質

車軸の材質について、日本国鉄および西独国鉄で使用しているものの化学成分を表 1 に、同じく機械的性質を表 2 に示す。在来線用は鉄道車両用車軸 (JIS E 4502) に規定した炭素鋼 1~4 種で、表 1 に見るように、さらに国鉄では別途規格を設けて、とくに C, Si, Mn, P, S, Cu の化学成分を規程している。新幹線用は JIS G 4501 の機械構造用炭素鋼 S38C である。車軸の強度特性として最も重要なものは疲労強度である。我が国においては、速度向上による動荷重の増加に対する軸径増を抑制するため、材質強化法として高周波焼入法を用いている。諸外国では、取扱いが後述の理由により繊細であるとして、高周波焼入車軸はほとんど使用されず機械構造用低合金鋼の調質材が専ら用いられている。

3.4 高周波焼入車軸の特性

高い疲労強度を付与するには、一般に高い表面硬度と、良好な内部靱性を実現すればよい。このためには高周波焼入法がきわめて適合する加工法であり、国鉄では圧入部の疲労強度を向上させる方法として採用している。高周波焼入車軸の深さ方向の硬度分布および圧縮残留応力分布の測定例を図 4 に示す。図 4 の例では、有効硬化層深さは表面下 2mm 程度で、表面での圧縮残留応力は 60 kgf/mm² が得られている。これらは高周波焼入れによつて表面部に生成するマルテンサイトがもたらしたもので、表面部の高硬度はき裂生成防止に、また表面近傍の圧縮残留応力はき裂進展抵抗として有効に働くと考えられている。高周波焼入車軸の残留応力、硬化層深さと疲労きず入限度 σ_{W1} 、疲労破壊限度 σ_{W2} の関係を

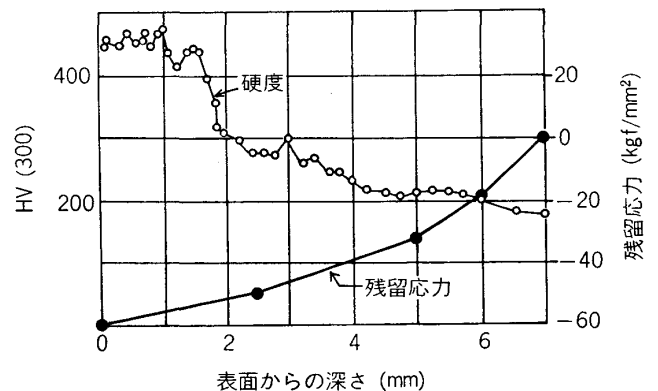


図 4 高周波焼入軸の硬度分布と残留応力分布 (注) 焼入れ後約 200°C 焼もどしを施す

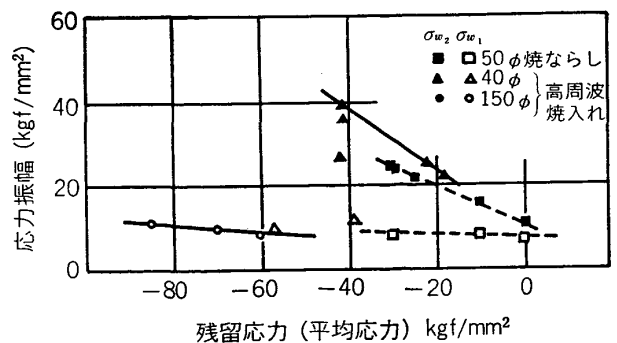


図 5 残留応力と疲労傷入り限度 σ_{W1} 、疲労破壊限度 σ_{W2} の関係

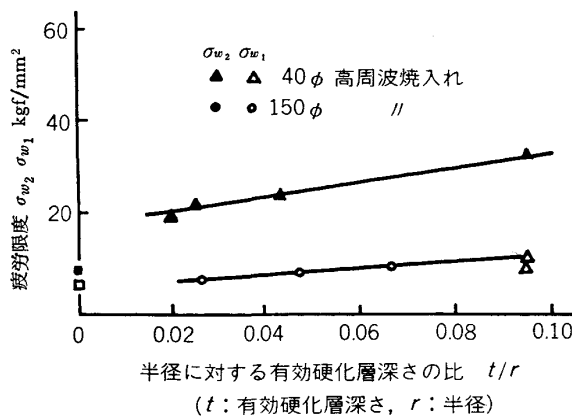


図 6 硬化層深さと疲労傷入り限度 σ_{w1} 、疲労破壊限度 σ_{w2} の関係

示す一例を図 5 および図 6 に示す⁵⁾。図 5 の、 $\phi 50$ mm の焼ならし試験片と $\phi 40$ mm の高周波焼入試験片の比較では疲労きず入り限度 σ_{w1} の値は余り変らない。すなわち圧入部のフレッチング損傷（後述する）による微細きずの発生限度は変化しない。しかし、疲労破壊限度 σ_{w2} は高周波焼入れの場合、表面に分布する圧縮残留応力の水準が高いほど、増加していることが分かる。 σ_{w2} の増加が表面の圧縮残留応力によるものとする、硬化層深さが関係してくるはずである。図 6 はその状況を述べたもので、有効硬化層深さ (t)、試験片半径 (r) として、この比率と σ_{w1} 、 σ_{w2} の関係を求めると、 σ_{w1} はさほど変化しないが σ_{w2} は t/r が増加するほど上昇していることが分かる。高周波焼入車軸の焼もどし温度は 200°C 程度とされ低温度のため表面付近は焼もどしマルテンサイト層で、硬さは HS 55~80 とかなり高い。従つて車軸表面の加工、使用・保守作業中の不慮の入熱・走行時の擦傷、車軸・軸受等のかん合、加工時の旋削・研削作業等…について特段の注意を要する。

3.5 車軸の保守

3.5.1 車軸の検査法

車軸の保守には各国とも非破壊検査を大幅に導入している。国鉄においては、超音波探傷法および磁粉探傷法を使用している。この検査周期は車種・形式により異なるがおおむね約 20~40 万 km ごと、使用年数では 2~3 年ごとにチェックする。各探傷法の意義は以下に述べるとおりである。

まず超音波探傷はパルス法により、垂直、局部、斜角の三方法とも採用し、垂直探傷法は感度調整と測定域を全長とする、表面下 2~3 mm にわたる大きき裂の発見に有効とされる。局部探傷は 1 mm 以上の局部的き裂の捕捉に、また斜角探傷は主にきず多発箇所である輪座部に使用し、0.5 mm 以上のきず発見に有効であるとされている。西欧諸国の一部では DGS (Distance Gain Size) 法により、きず発生位置ときず深さを、ブラウン管上の探傷エコーから読み取る方法を用いているが、計算過程

が必要とされるなど、手続きが複雑な割合に精度も十分とはいえないので、国鉄ではなんらかの異常エコーを発見した場合、車輪ずらしを行い磁粉探傷で確認している。(新幹線電車車軸では 30 万 km ごとに車輪ずらしを行い磁粉探傷で確認する。) 一方、磁粉探傷法については JIS G 0565 に感度規正法も含めて明確に定めてあるなど、我が国においては重要な方法と位置づけられているが、諸外国では磁粉探傷法がまだ十分に熟したものとなっていない。磁粉探傷法による探傷精度は高周波焼入車軸ではきず深さ 0.05 mm 内外にあると考えられている。

3.5.2 車軸の補修

国鉄では、車軸の各部に有害なきずが発見されると廃棄することを原則としている。例えば新幹線電車車軸では箇所により異なるが、深さ 0.15 mm 以内のきずを限度としてこれをサンドペーパー等で滑らかに除去した上で再使用を許容している。在来線車両の場合は、新幹線電車車軸のように定期的な 30 万 km ごとに車輪ずらしを行い磁粉探傷で確認するという方法ではなく、超音波探傷で異常エコーが見られた場合、磁粉探傷で確認するという方法であるので、超音波斜角探傷のきず発見限度以内の 0.5 mm 以下のきずが内在してくる可能性がある。

我が国の鉄道車両車軸の素材は、表 1 で述べたように通常の炭素鋼ではあるが、安全性の見地から不純物の含有量等には特段に配慮され、入念に加工された高級部品なので、この廃棄基準は安全性からの検討が第一であるとしても、経済性の観点からも議論されなければならない。これについて筆者らは多くの使用データ、実験例を収集してきた。その中で興味ある一例を図 7 に示す⁷⁾。図 7 はロンドン地下鉄の報告例で、走行距離 150 万 km で 7 mm のきず深さのあるものも発見されている。これにはもちろん、探傷システムの精度、探傷の周期す

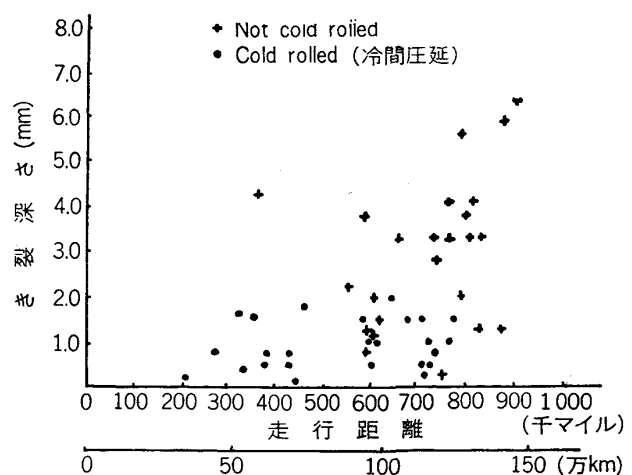


図 7 メトロポリタン線の Surfcestock に 1938 年以來使用中の車軸に生じたき裂の深さと使用走行キロとの関係

なわち広義の探傷能力が関係してくる。しかし概していうと、我が国の廃棄基準は厳しすぎるのではないかという見方がある。例えば外国では廃棄基準が我が国より緩かではないかと思われる補修法を採用していて、西独国鉄では最も損傷頻度の高い輪座部の修復に厚さ 2mm までの Mo 溶射を許容している。また英国鉄では後述する輪座内外ボス端部のフレッチング・コロージョン対策として、このきずも含めて輪座中心方向へ、許容値 2mm の深さで削正して新生面を出して車軸の再生による寿命延伸を図っている。

3.6 車軸の損傷と技術課題

車軸の損傷で最も特徴的なものとして、フレッチング・コロージョンの発生がある。フレッチング・コロージョンは特に車輪ボスの内外端面から数 mm 輪座中央に寄った輪座表面に多発し、その一部には、その後の使用経過にそつて、疲労きずとして進展するものもある。フレッチング・コロージョンの生成原因は車軸の微小ひずみに伴い、はめ合端部において、ボス内面と車軸表面間に微小な往復すべり(数 μm ~十数 μm)が生ずるため、フレッチング・コロージョン特有の擦か腐食を起こすことがその理由とされている⁹⁾。ところで、このさい生じる腐食は、同時に車軸表面に有害な腐食ピットの生成も招き、このピット底に往々にして進展過程の疲労きずが発見され、これらが超音波探傷きずまたは車輪ずらし後の磁粉きずとして捕捉されるのである。このようなフレッチング・コロージョン生成による圧入座の疲労強度の低下を求めたものとしては PETERSON の圧入座の切欠き係数⁹⁾などがある。またこの影響を緩和する方法として、新幹線電車車軸などに使用されているオーバハング軸の採用¹⁰⁾(図 8)、また前述の西独国鉄で用いられている表面被覆の方法等がある。筆者等は表面被覆の薄層として無電解めつき法により、10 μm 程度の厚さの Ni-P 層を表面被覆層として得て、フレッチングの発生(擦か傷の発生)はあるが、コロージョンの発生には顕著な抑止効果が得られること、ならびに約 10% 程度の疲労限度の改善が得られることなどを観察した¹¹⁾。車軸の損傷形態には、以上述べたフレッチング・コロージョンによるもののほか、擦傷、すきま腐食等種々の形態がある。

今後に残された最も大きな技術的課題は、すでに述べた安全と経済上の両観点からみた微小きずの評価の問題

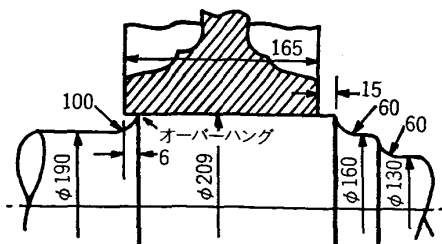


図 8 オーバハング形車軸(単位 mm)

である。微小きず生成の要因を、上記したどの損傷形態も多少とも有しているのであるが、圧入座のきずは被圧入物に隠れいされてきずの進展が測定され難いとか、腐食ではその外観形状だけでは、被害程度の評価判定がくだし難いとかの実用上の具体的な問題が残されている。

4. 車 輪

4.1 車輪の形状

鉄道車両用の車輪とは本来、鑄鍛鋼製の中心部(輪心と称する)にタイヤと称するレール上を転動する鋼製部品を焼ばめし構成したものである。しかし輪心を使った車輪はタイヤゆるみ等の事故を生じ易く、一方ではタイヤと輪心が一体として鍛造された一体車輪が、昭和 30 年代から、比較的安価に得られるようになり、我が国においては、現在、機関車用車輪等の需要量の少ない特殊な大径車輪を除いて、ほとんどの車輪が一体車輪となつている。

一体車輪は、図 9 の板部の傾き方向で A, B, C 形があり、このほかに板部にリップをもたせた波打ち車輪がある。波打ち車輪は板部の剛性を増加させたもので軽量化できるが、割高となるので、広汎には使用されていない。

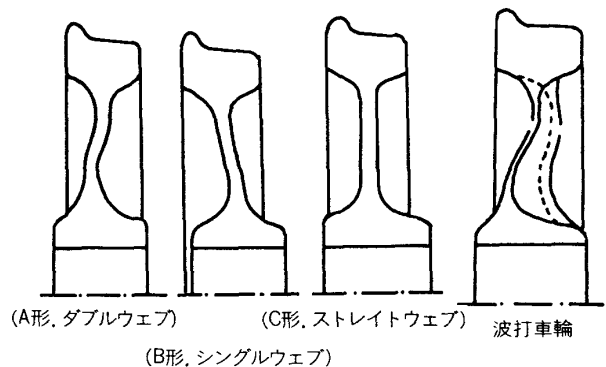


図 9 車輪の断面形状

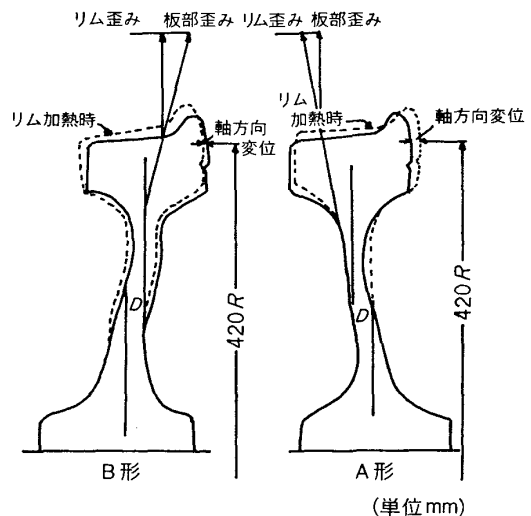


図 10 板部の湾曲方向と加熱時の歪み (単位 mm)

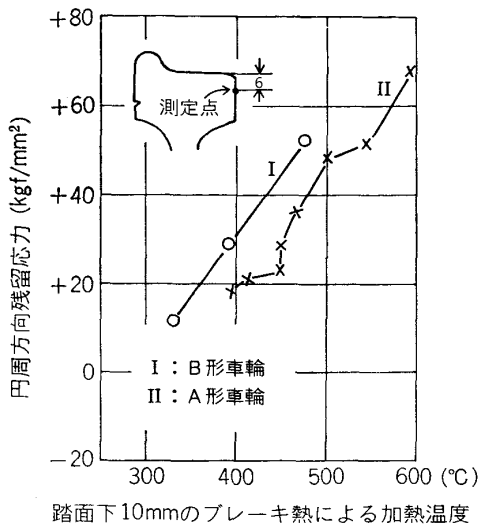


図11 リム側面における残留応力発生状況の比較

A形とB形は板部の湾曲方向が反対でC形はストレートとなっている。国鉄では付随車用にA形，動力車用にB形，新幹線電車および一部の気動車用として，車輪板部にブレーキディスクを設置するためC形を使用している。A形車輪とB形車輪では，図10に見られるように，ブレーキ時のひずみ発生について，B形の方がA形より残留ひずみが発生し易くタイヤ割損防止に不利である。応力条件の厳しい動力車でB形を使用している理由は，左右車輪間に装着される駆動装置，主電動機等の空間を確保する必要性による。A，B両形車輪のリム側面6mm下部における残留応力の発生状況とブレーキ加熱温度の関係を図11に示す。これから踏面に発生する熱き裂等を考慮すると，明らかに，踏面付近に引張残留応力が介在しやすいB形がA形より，割損しやすい条件にあることが分かる。

4.1.1 車輪の踏面勾配と摩耗

車輪には，冒頭で述べたように，踏面に若干の勾配が与えられている(図12)。これは自動調心型のベアリングと同じような効果を期待しているもので，レール上を一对の輪軸が転動するさい，左右車輪の微小な半径差，接触軌道面の高低差等により，輪軸は一方に偏寄しながら転動する傾向があるが，このさい，踏面勾配は，この偏寄を自動的に中正位置に復元する作用を与える。しかし，このさい，輪軸の復心力は慣性力として働き自励振動を誘起する。これをだ(蛇)行動という。これが過度になると，車両に横揺れ，ヨーイング等を招いて乗心地の悪化や，脱線の原因に連なることとなる。このさいだ行動の波長は，一輪軸について，(一台車としての運動は複雑となるが傾向は一輪軸の場合とほぼ同傾向なので，一輪軸として述べる。)次の(1)式で与えられる¹²⁾。

$$S_1 = 2\pi \sqrt{\frac{br}{\gamma_e}} \dots\dots\dots (1)$$

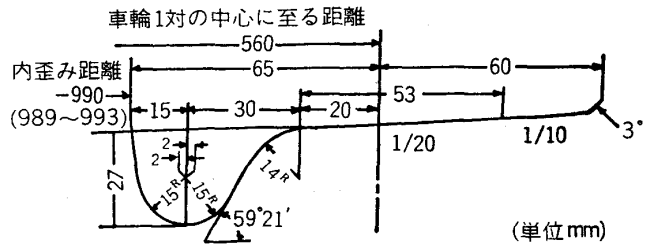


図12 車輪の踏面形状の一例

ここで

b: 左右の車輪のレール接触点距離の 1/2

r: その接触点における車輪半径

γ_e : 接触点付近の車輪踏面の等価勾配，すなわち

$$\gamma_e = \frac{r}{1 - \rho_R / \rho_W}$$

ここで r は接触点における踏面勾配， ρ_R は接触点におけるレール断面の曲率半径， ρ_W は接触点における車輪踏面形状の曲率半径である。

(1)式で，波長 S_1 を長くとり，だ行動を緩和する方策が考えられ，踏面勾配 γ_e を小さくとり，振動数をさげる方法がとられるが，輪軸の復心性が悪くなり，従つて曲線通過特性が悪くなる。

しかし，これに先だつて，輪軸を支持する輪箱の遊び等を小さくしなければ，この方法も意味が薄くなる。このため，輪軸支持が整い易いボギー台車が高速車両に用いられる。ボギー台車は四辺形の台車枠に2対の輪軸がばねを介してはめこまれた形をとり，この四辺形が，端的にいえば，曲線にそつて移動する。この結果，輪軸の支持剛性が大きくなり勝ちで，曲線通過抵抗はさらに増大する。このように高速鉄道車両においては，どちらかというのだ行動特性が重視され，これに背反する特性である曲線通過抵抗の改善のため線区の曲線改良までさかのぼる事例も希ではない。それだけに，曲線通過抵抗を考慮して車輪・レールの材質改善による耐摩耗性の要求は切実なものとなる。なお，このだ行動の影響は高速になるほど，くり返しの頻度，振幅とも増大し苛酷となる。

4.1.2 車輪の踏面形状と脱線

以上のように，曲線通過抵抗が増大すると，車輪は異常摩耗を生じ，特に車輪のフランジ部付根が摩耗するフランジ直摩が生じる。ここではこの車輪踏面形状と脱線の関係述べる。脱線の原因には幾つかあるが，踏面形状との関係で述べるとすると，乗り上がり脱線とすべり上がり脱線が直接の関係となる。これらは図13に示す条件で説明され，前者は曲線部でレール上をせり上がるようにして生じ，後者は高速時，車輪のフランジ部がレールに突き当たつてその勢いで車輪がすべり上がり脱線にいたるものである。この脱線に対する安全性は車輪

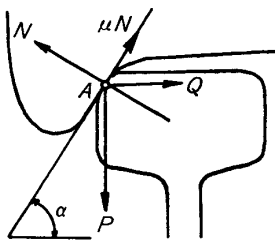


図13 車輪とレールの間に働く力

がレールを押す力（これを横圧といい Q で示す）と上下方向に押す力 P （これを輪重といい P で示す）の比 Q/P （これを脱線係数といい大きいほど安全とする）で判定する NADAL の求めた(2)式で議論される¹³⁾。

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan \alpha \mp \mu}{1 \pm \mu \tan \alpha} = \tan(\alpha \mp \beta) \quad \mu = \tan \beta \dots\dots(2)$$

ここで、 α : フランジの角度、 μ : 接触点の摩擦係数
 (2)式の複号の上符号は摩擦力が上向きに働く乗り上がり脱線に対応し、下符号は摩擦力が下向きに働くすべり上がり脱線に対応している。(2)式から、フランジの角度 α が大きいほど、脱線に対して有利になる。しかし α が余り大きいと分岐器通過時、支障を与えることになるので、国鉄内部の規程では α を 73° 以内におさえている。このように踏面形状については、設計時、最も理想的な形状が与えられ、日常の保守において、この形状の維持に努力されているが、これからも車輪の耐磨性の向上は実務に即した要求となつてくるのである。

4-2 車輪の材質・熱処理

車輪に要求される、第1の特性は以上述べた理由でまず耐磨性ということになる。車輪は数多く必要とし、国鉄では定期検査ごとに 10 mm 程度切削して標準形状にそろえており消耗のはげしいものである。それゆえよほど特殊な目的がない限り普通の炭素鋼を素材としている。表3は我が国とアメリカ圏(AAR規格)およびヨーロッパ圏(UIC規格)の車輪鋼の化学成分、熱処理、用途等を示したもので、日本、アメリカは高炭素鋼、ヨーロッパは炭素量 0.6% 以下の中炭素鋼が主流になっていることが分かる。(R3の0.7%は昭和59年からISO規格を考慮してとり入れられた)この炭素量の違いをもたらすもう一つの要求特性は、熱き裂に対する耐性をどう見るかである。踏面ブレーキ付きの車輪はブレーキ時、多大の摩擦熱を受けるが(ブレーキ・ディスク方式は異なる)、このため発生する踏面上の熱き裂が起点となり、内部に蓄積されている引張残留応力も呼応して車輪割損にいたる場合がある。この熱き裂の発生を軽減するには炭素量が少ない鋼が好都合であり、これを理由として、ヨーロッパ諸国の鉄道は中炭素鋼を使用している。このように、車輪に求められる基本特性は、耐磨性、耐熱き裂性の2つといえるが、始めに述べたとおり、車輪材質は普通炭素鋼とされているから、この二つの特性は含有炭素量をもととして、互いに対立する性質となる。この観点から日本・アメリカ圏の車輪は耐磨性にまさるが耐熱き裂性に劣り、逆にヨーロッパ圏のそれ

表3 車輪用材料の化学成分と熱処理

| 仕様 | クラス | 化 学 成 分 | | | | | | | | | | | 熱処理 | 用途 | 略号 | | |
|--------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|-----|------------|---------------|---------------------------|----|
| | | C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V | Cr+Ni+Mo+V | | | | | |
| JIS (日本) | STY 80W-1 | 0.60 ~0.75 | 0.15 ~0.35 | 0.50 ~0.90 | ≤0.045 | ≤0.045 | ≤0.30 | | | | | | | | 踏面焼入れ 焼もどし | 貨車・客車 | AR |
| | STY 80W-2S | " | " | " | " | " | " | | | | | | | 気動車・ 電車 | | S | |
| | STY 80W-2R | " | " | " | " | " | " | | | | | | | " | | 電車・新幹 線電車 | R |
| | AAR (アメリカ) | U | 0.65 ~0.77 | ≥0.15 | 0.60 ~0.85 | ≤0.05 | ≤0.05 | | | | | | | | | リム焼入れ 焼もどし | |
| L | | ≤0.47 | " | " | " | " | | | | | | | | " | | | |
| A | | 0.47 ~0.57 | " | " | " | " | | | | | | | | " | | | |
| B | | 0.57 ~0.67 | " | " | " | " | | | | | | | | " | | | |
| C | | 0.67 ~0.77 | " | " | " | " | | | | | | | | " | | | |
| UIC (ヨー ロッパ) | R ₁ | ≤0.48 | ≤0.50 | ≤1.20 | ≤0.04 | ≤0.04 | ≤0.30 | ≤0.30 | ≤0.30 | ≤0.05 | ≤0.05 | ≤0.70 | | 焼ならし | 踏面焼入れ 焼もどし | 客車 貨車・客車 機関車 機関車 | |
| | R ₂ | ≤0.58 | " | " | " | " | " | " | " | " | " | " | | " | | | |
| | R ₃ | ≤0.70 | " | ≤0.90 | " | " | " | " | " | " | " | " | | " | | | |
| | R ₆ | ≤0.48 | ≤0.40 | ≤0.75 | " | " | " | " | " | " | " | ≤0.60 | | " | | | |
| | R ₇ | ≤0.52 | " | ≤0.80 | " | " | " | " | " | " | " | " | | " | | | |
| | R ₈ | ≤0.56 | " | " | " | " | " | " | " | " | " | " | | " | | | |
| | R ₉ | ≤0.60 | " | " | " | " | " | " | " | " | " | " | | " | | | |

AR: As Rolled S: Slack quench (緩徐焼入車輪) R: Rimquench (踏面焼入車輪)

は熱き裂に耐えるが耐摩性に劣ると考えられる。使い易さはおのおのの欠点の補いやすさで評価できるが、ヨーロッパ圏では車輪の踏面焼入れの利用が一般的な耐摩性付与法として採用されている。

熱処理による車輪の使用区分は、国鉄では SQ 車輪 (表 3 の略号で S: Slack quench 緩除焼入車輪) は比較的ブレーキの使用頻度の高い車両に、RQ (略号 R: Rim quench 踏面焼入車輪) は、踏面ブレーキを使用しない (ディスク・ブレーキ付き) 高輪重の車両に、熱処理なし (As Rolled) の車輪は貨車と一部の客車等あまり高速でないあるいは比較的荷重条件が軽い車両に用いている。SQ および RQ 車輪の熱処理は、電気炉または純酸素転炉で製造されたキルド鋼またはセミキルド鋼を素材とし、圧延・鍛造・調整冷却・ショットブラスト、粗加工後、全体を 850°C に加熱、RQ では連続 7 min の噴水冷却、SQ では 4 min の噴水冷却・1 min 休止の条件で焼入れを行い、次いで硬さ調整ならびに内部応力の除去を目的として 490°C~540°C の焼もどしを行う[†]。SQ 車輪と RQ 車輪は最終的には表面硬度の差として表現され、SQ は HS で 37~45、RQ は 46~52 としている。これら全般については JIS E 5402 (鉄道車両用炭素鋼一体圧延車輪) にまとめられている。

4.3 車輪の保守

車輪の保守の第一は、すでに述べたように、だ行動の条件、曲線通過の条件に対応して生じた踏面、フランジ部の摩耗形状を基本形状に整正することで、このため定期的にチェックし削正する。また、前記の熱処理車輪の中で焼入深さが比較的深い RQ 車輪においても、その深さは 5 mm 程度であるが、初回削正量はこれ以上となるので、焼入層は消失する。これに対して、主に SQ 車輪を対象として、耐摩性を付与するため、火焰焼入れを施工している。次に、車輪割損に進展する熱き裂等があると、未然に摘発することが必要であるが、これは熱き裂等の表面きずだけでなく、表面に分布する残留応力の状況も関係してくるので、これらをもたらずブレーキ時の加熱状況を見るため、車輪の輪状 (リム) 部から板部へ移る曲線部の塗膜の剝離状況を、工場入場時チェックして、熱影響の過大なものは継続使用を中止している。

4.4 車輪の損傷

車輪に発生する損傷の代表的なものをあげると、フランジ部の直摩等の異常摩耗、踏面の剝離、割損の 3 形態である。フランジ部の直摩についてはすでに述べた。こ

の対策としては炭素量の多い鋼種の使用、フランジ部の焼入れのほか、急曲線走行時のフランジ根元あるいはレールの接触当該部に油を噴射して摩擦を軽減する試みが各鉄道で行われている。この装置を車両に設置したものをフランジ塗油器、レールに設置したものをレール塗油器と称するが、長期間、無人で安定した作用を保つことが前提となるので、まだ決定的なものは開発されていない。車輪の材質も、上記の炭素鋼以外の系列で、後述するように、耐熱き裂性の改善も含めて種々検討されているが、価格上の問題もありまだ十分なものは開発されていない。

踏面の剝離は、我が国では冬期間の発生が多い¹⁴⁾。ブレーキ熱による熱影響が高炭素鋼では熱き裂、ヒートスポット等が発生させ、これが成長して剝離を招くとして、ヨーロッパ諸国鉄道は専ら炭素量が 0.6% 以下の中炭素鋼を用いていることはすでに述べた。しかしこの場合は、耐摩性に問題が生じるので、種々の合金元素 Cr, Ni, Mo, V 等を添加した低合金鋼により強度を増強する試みが広範に行われている¹⁵⁾¹⁶⁾、価格問題もあり、まだ実用上硬度、靱性ともにすぐれたものは得られていない。剝離の前駆症状として、熱的な変質層 (0.3% ナイタル液程度では腐食され難い 0.5 mm 程度の層が車輪踏面表面層に分布する。観察すると腐食されないで白く見えるので白色層と呼ばれる。) が随伴する。最近、筆者のところで、実車両に発生したものと同性状の白色層の再現に成功し、これをパラメーターとして、耐剝離性をもつ鋼種の両整理を試みている¹⁷⁾。

車輪の割損は上記の車輪踏面の熱き裂、剝離の進展結果の場合が多く、この対策の第 1 は熱き裂、剝離が生じ難い鋼種の選定、使用条件の調整にある。しかし、その破壊進展過程に、かなりの程度で疲労き裂としての過程が観察されるので、材料強度上の観点から、靱性の高い材料の使用と、圧縮残留応力の分布を利用することが考えられる。前述の低合金鋼車輪をこの見地からとりあげそのすぐれた靱性と、熱歪みの蓄積し難い形状の採用から解決策を得ようとする研究もある¹⁸⁾¹⁹⁾。

車輪の転動時、レールと接触する踏面は常時加工され、圧縮残留応力が分布しやすいがここにブレーキ熱が加わると、表面のごく薄い層に圧縮力が残留しても、すぐ引張残留応力の分布層となり、熱き裂、剝離等の表面欠陥がある深さに達すると、急激なき裂進展へいたる事態が想定される。このため、すでに述べた塗膜の監視を入念に行っているが、さらに近年の車両運用の苛酷さも考慮して、安価で精度の良好な示温塗料の開発を急いでいる。

5. おわりに

輪軸は、これまで述べたように、その特性として、可能な限り安全性を保つように考えられている。しかしそ

† 踏面の熱処理方法は車輪全体を約 850°C に加熱後、回転台にのせ回転させながら踏面に散水して急冷する。急冷を激しくして表面層を焼入硬化したものを RQ 車輪、急冷の度をゆるくして焼は入れず組織の微細化だけを目的としたものを SQ 車輪と言う。一般に RQ の表面組織は焼もどしマルテンサイト、SQ のそれは微細パーライトである。熱処理の目的は表面硬さの調整もさることながら、後の 490°C~540°C の焼もどしも含めて残留応力の調整が行われ、踏面近傍に引張力が残留しない一割損に強い一特性に着目される場合が多い。

の挙動は、実用の観点にたつと、きわめて複雑で未解明のまま残されている問題も多く、中でも安全性と経済性の両立を図るという問題が輪軸のもう一つの本質的な問題であるから、この解決にはなお多くの時間と労力が必要である。つまり、WÖHLERの鉄道車両用車軸の破壊原因調査に端を発して疲労の概念が形成されたなど鉄道用材料には常に、材料使用にあつての基本問題が介在していることを小稿からくみとつていただければ幸いである。

終わりに、本稿の整理に協力いただいた鉄道技術研究所金属研究室、漆原、木川両主任研究員始め研究室の方々、御助言いただいた鉄道技術研究所田中副所長に心から感謝の意を表す。

文 献

- 1) 田中眞一：鉄道技術研究所報告 (1976) 987, p. 9
- 2) 永島菊三郎, 中村 宏：日本機械学会論文集 17-63 (1952・12月), p. 54
- 3) ORE (Office de Recherches et d'Essais) : Rep No. 136
- 4) 田中眞一：日本機械学会誌, 87-790 (1984), p. 82
- 5) 田中眞一：材料学会 2 第回強度設計安全評価委員

会資料 (1984・2月)

- 6) S. TANAKA: Proc 6th Inst wheelset Congr. Colorado Springs paper No. 1-3 (1978-10)
- 7) J. SHAW and F. G. RUTTY 同上 paper No. 3-2 (1978-10)
- 8) 例えば, 石橋 正: 金属の疲労と破壊の防止 (1980), p. 227 [養賢堂]
- 9) 例えば, 川田雄一: 金属の疲労と設計 (1979), p. 139 [オーム社]
- 10) 田中眞一: 文献 (1), p. 58
- 11) 西坂 強, 漆原 昭, 高沢克朗: 潤滑学会北陸大会前刷集 A-23 (昭59)
- 12) 例えば, 丸山弘志. 景山允男編著: 鉄道工学 (1981), p. 132 [丸善]
- 13) 同上: (1981), p. 118 [丸善]
- 14) 大山忠夫, 木川武彦, 太田明宏: 潤滑 27-12 (1982), p. 915
- 15) L. BRAZZODURO, P. BROZZO, R. De MARLINI and T. VENTURELLI: Proc. 6th Inst Wheelset Congr. Colorado Springs paper No. 1-4 (1978)
- 16) K. FORCH: 同上, paper No. 2-1 (1978)
- 17) 木川武彦, 木本栄治, 小野秀博, 小松 正: 潤滑学会秋田大会予稿集 B・19, p. 297
- 18) F. IBERRETA, J. G. GIMÉNTZ, J. G. De JALON and R. MUGUERZA: Proc. 6th Inst wheelset Congr. Colorado Springs Paper No. 6-3 (1978)
- 19) V. K. GARG: 同上, paper No. 6-6 (1978)