

# 新幹線電車用車軸の疲労安全性評価と30年の実績

Fatigue Reliability Assessment and Thirty Years Maintenance History of Axles for Shinkansen

外山和男/Kazuo Toyama・総合技術研究所 機械システム研究部 部長

井上 純/Jyun Inoue・関西製造所 輪軸鍛鋼品製造部 部長

## 要 約

車軸は鉄道車両の走行安全性を支える最も重要な部品の一つである。東海道新幹線が開業して30年以上が経過し、この間車軸に起因する事故は皆無である。これは車軸の疲労安全性を設計・製作・保守の3者が一体となり確保したからである。

ここでは車軸圧入部の疲労強度についての研究結果と実際の製造方法への反映及び使用実績について紹介するとともに、この実績を基に、さらなる高速化への対応、検査方法の見直しに対する今後の課題について検討を加えた。

## Synopsis

The axle is one of the most important parts for the safe operation of railway vehicles. Thirty years have passed without any passenger casualties since the Shinkansen started operation. This is due to the satisfactory results of reliability assurance systems including design, manufacture and maintenance. This review presents a study of fatigue strength, history of manufacturing specifications and change in replacement ratio of axles for Shinkansen trains. Running at higher speeds, and better maintenance methods are also discussed.

## 1. 緒 言

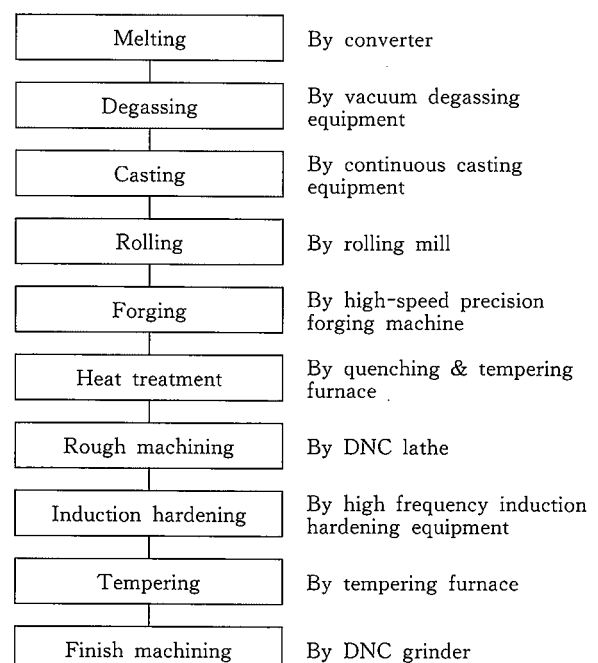
東海道新幹線が新たな鉄道輸送の時代を切り開いて既に30年以上が経過した。この間更に山陽、東北、上越新幹線が順次開通し、現在北陸・秋田新幹線の建設が進んでいる。この様に新幹線網が整備・拡大されている背景の1つにはこれまで大きな事故が一度もなく、極めて安全性に優れた輸送手段であるということによると思われる。特に走行安全性を決定する台車、中でも輪軸に起因する事故は皆無である。これは輪軸はその構造上フェールセーフ設計の出来ない極めて冗長度の低い部品であり、小さな不具合でも大事故に直結するため、設計・製作・保守の3者が一体となって疲労安全性を確保してきたことによる。ここでは製作者としての立場から新幹線車軸の強度評価への取り組み、保守・点検結果とその製造方法への反映、今後の課題について述べる。

## 2. 新幹線電車用車軸

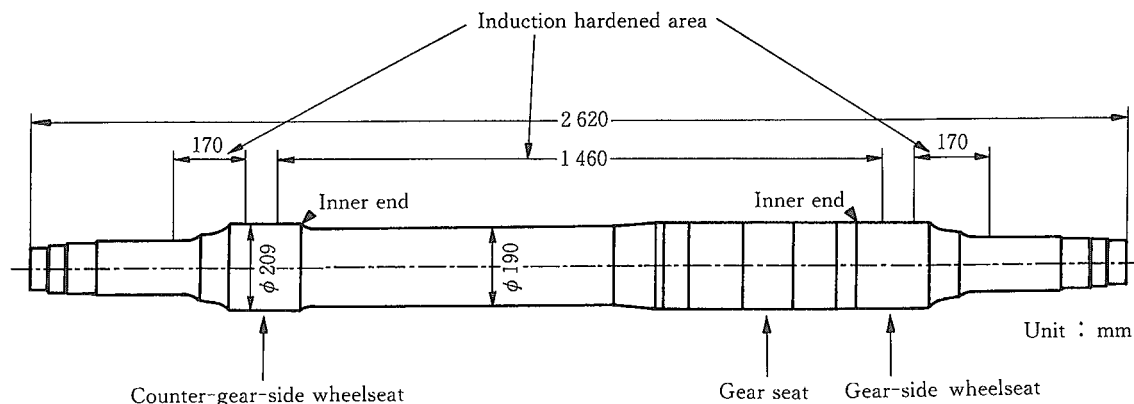
新幹線車軸は JIS S38C を用いて、JIS 規格“鉄道車両用車軸 (E 4502)”に定められた特性を満足するよう製作されている。製造過程を第1図に、形状の一例を第2図に示す。新幹線車軸は高い疲労強度を確保するため全て第2図

に示す部分を高周波焼入れしている。

1950年代までは少なからぬ頻度で車軸の折損事故が発生していた。折損は殆んどの場合、車輪とのはめ合い部分



第1図 車軸製造工程  
Fig.1 Manufacturing Process



第2図 新幹線車軸形状 (0系)

Fig.2 Shape and dimensions of axle for Shinkansen (Model 0)

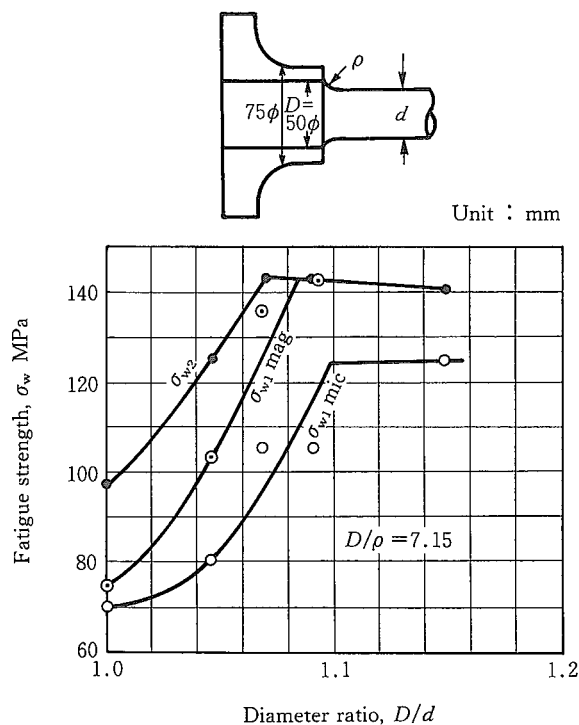
(以下圧入部) で生じていた。これは荷重が作用した時、車軸と車輪の間に微小なすべりが生じ、他の部位に比べ疲労強度が著しく低くなる、いわゆるフレット疲労となるためである。この改善には車輪の圧入部分を高周波焼入れすることが有効であることが知られており<sup>1)</sup>、新幹線車軸には高周波焼入れが採用されることとなった。しかし、開業当時フレット疲労強度に及ぼす圧入部形状や高周波焼入れ条件の影響が全て明らかにされていた訳ではなく、設計・製作・検査によって安全性の確保に万全を期しつつ、今日に至るまで絶え間なく研究開発が続けられてきた。その結果現在では新幹線車軸の平均寿命は400万 km を超える<sup>2)</sup>非常に信頼性の高いものとなっている。

### 3. 車軸圧入部の疲労強度

#### 3-1 圧入部形状の影響<sup>3)4)</sup>

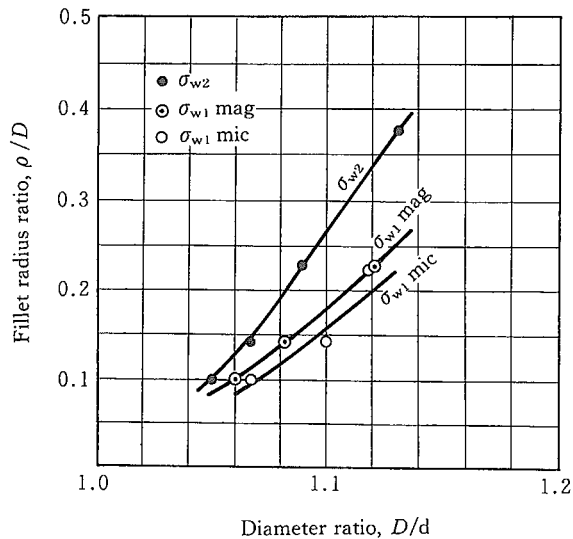
フレット疲労強度を向上させるには車軸と車輪の間に生ずるすべりを抑制する必要がある。第3図は段付軸とした場合の圧入部疲労強度に及ぼす段差の影響を示したものである。ここで  $\sigma_{w2}$  とは折損に対する疲労限度、 $\sigma_{w1mag}$ 、 $\sigma_{w1mic}$  とは各々磁粉探傷で見つけられる大きさの疲労き裂、光学顕微鏡で見つけられる大きさの疲労き裂の発生限度を意味している。前者は約100 $\mu$ m、後者は約5 $\mu$ m の大きさの疲労き裂である。疲労強度は段差を大きくする程向上するが、ある値以上になると一定値となる。これはある段差以上になると段部で破断するようになり、許容曲げモーメントから見た見掛け上の圧入部疲労強度は低下するからである。従って圧入部疲労強度を最大にする最適段差が存在する。また段差を一定にし段部の曲率半径を変えた場合、すなわち第3図の横軸  $D/d$  を  $D/\rho$  とした場合も、全く同じ傾向となる。つまりそれぞれの段差や曲率半径に対し、 $\sigma_{w2}$ 、 $\sigma_{w1mag}$ 、 $\sigma_{w1mic}$  を向上させるための最適な値が存在するということが明らかにされた。これを第4図に示す。

以上は圧入部のボス端面と段肩部が一致した場合であるが、一致していない場合すなわち相対位置もまた圧入部の疲労強度に大きな影響を及ぼすことが明らかにされた。その結果を第5図に示す。 $\delta$  が $-\infty$ すなわち真直軸圧入部に比べ、 $\delta > 0$ すなわちオーバーハング軸圧入部の疲労強度は著しく向上することがわかる。特にオーバーハングの効果は疲労き裂発生 ( $\sigma_{w1mag}$ 、 $\sigma_{w1mic}$ ) に対し効果的である。



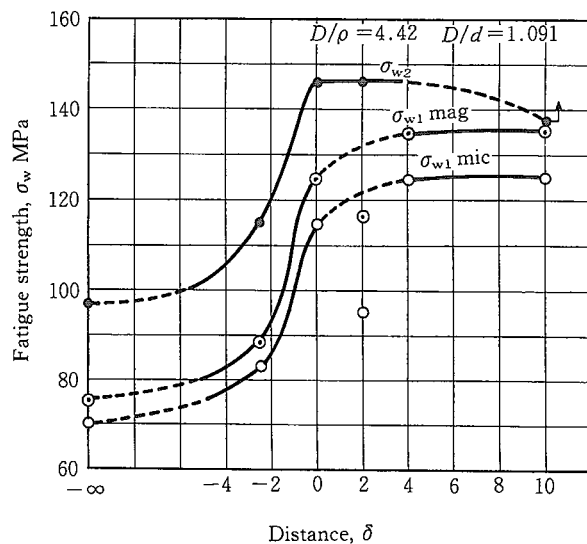
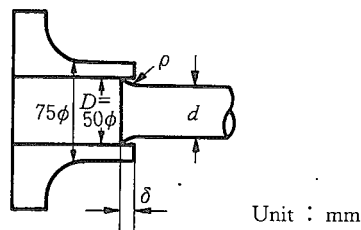
第3図 段部の段差と疲労強度との関係

Fig.3 Relationship between fatigue strength and diameter ratio of press-fitted axle



第4図 疲労強度を最大にする段差  $D/d$  と曲率半径  $\rho/D$  との関係

Fig.4 Relationship between diameter ratio and fillet radius to give maximum fatigue strength



第5図 ボス端面と段肩との相対位置  $\delta$  と疲労強度との関係

Fig.5 Effect of the distance between hub face and shoulder on fatigue strength

### 3-2 高周波焼入れの影響

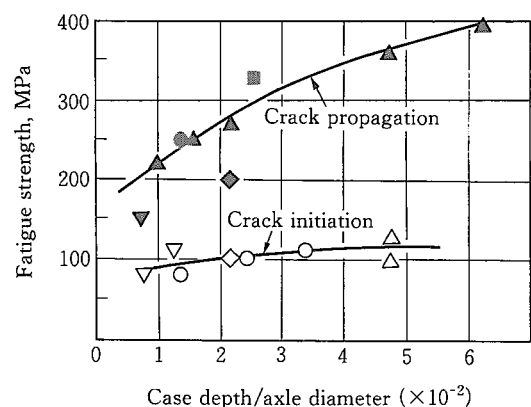
高周波焼入れによって車軸表面に適当な硬さ、硬化層深さ、圧縮残留応力を付与し、圧入部の疲労強度を向上させるため金相試験及び疲労試験による検討が行なわれた。高周波焼入れ処理は急速加熱後急速冷却するものであり、元素の固溶・拡散や変態挙動が通常の熱処理と異なる。そこ

で急速加熱時の CCT 曲線を作成し完全マルテンサイトを得る条件を検討した<sup>5)</sup>。その結果、焼入れ硬さが高く、結晶粒の粗大化を起こさず、焼割れも生じない最適加熱条件は S 38C であれば 880~900°C であることや、通常熱処理時より冷却速度を大きくする必要のあることが明らかにされた。また 150~230°C の温度範囲での焼戻しでは 200°C 近傍で硬度低下に停滞が見られることも判明した。

一方、圧入部疲労強度に及ぼす高周波焼入れの影響についても多くの知見が得られている。第 6 図、第 7 図はその一例で<sup>6)</sup>、圧入部疲労強度に及ぼす硬化層深さの影響と残留応力の影響を示したものである。ここで  $\sigma_{w1}$  に対する疲労き裂の大きさは必ずしも同一ではないがおおよそ表面長さで 100  $\mu\text{m}$  以下である。硬化層深さ、圧縮残留応力いずれも大きくなると圧入部疲労強度は向上するが、その効果は  $\sigma_{w1}$  に比べ  $\sigma_{w2}$  においてはるかに顕著である。

高周波焼入れ軸の寸法効果が焼ならし軸や調質軸よりも大きい原因の 1 つは第 6 図に見られる硬化層深さの影響が通常の寸法効果に重畳するためである。第 7 図には参考のため低温焼入れ軸（変態点直下からの焼入れ処理）の結果も併記されているが、高周波焼入れ軸の結果とほぼ一致している。このことは圧入部疲労強度が表面硬度よりもはるかに強く表面残留応力に依存していることを意味している。圧縮残留応力の影響が  $\sigma_{w1}$  と  $\sigma_{w2}$  で大きく異なるのは、結晶粒オーダの疲労き裂の発生挙動がせん断応力に強く支配されるのに対し、破断につながる疲労き裂の成長挙動は引張応力に支配されるためである。つまり圧縮残留応力は前者には有効でないが、後者に対して大きな低減効果を有するからである。このような高周波焼入れ軸の微小な疲労き裂の成長挙動は後述する寿命評価の考え方に関連する非常に重要な問題である。

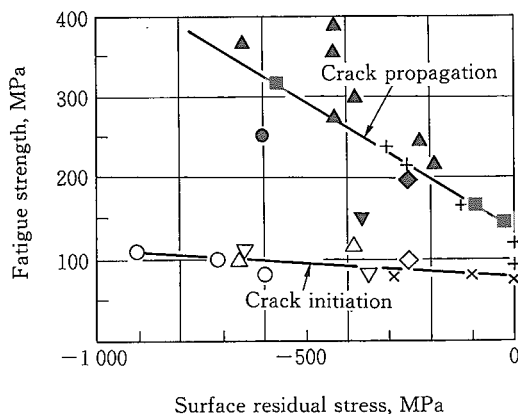
Axle diameter (mm)	40	52	100	150	209
$\sigma_{w1}$	△	□	◇	○	▽
$\sigma_{w2}$	▲	■	◆	●	▼



第6図 疲労強度に及ぼす高周波焼入れ硬化層深さの影響  
Fig.6 Effect of the case depth on the fatigue strength

## 技術解説

Axle diameter (mm)	40	52	100	150	209	Sub-critical quench
$\sigma_{w1}$	△	□	◇	○	▽	×
$\sigma_{w2}$	▲	■	◆	●	▼	+



第7図 疲労強度に及ぼす残留応力の影響

Fig.7 Effect of the residual stress on the fatigue strength

## 4. 使用実績

長期にわたって使用される車軸の安全性を最終的に保証するものは予防保全に基づく定期的な検査である。新幹線車軸は第1表に示す検査体制<sup>7)</sup>により実施されている。こうして得られた検査データは製造データなどと共に第8図に示す管理システム<sup>8)</sup>に取り入れられ、製造方法の改善や検査内容の見直しに反映されている。

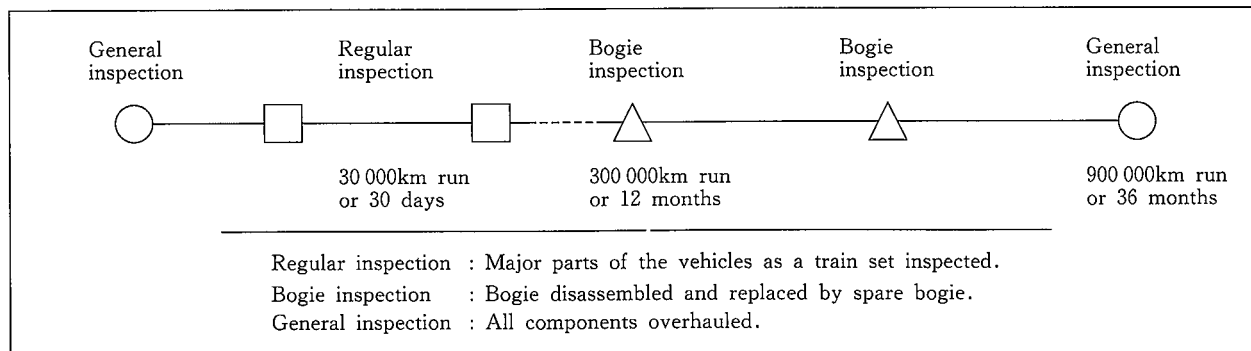
開業後しばらくは圧入部の磁粉きず、すなわちフレッテ

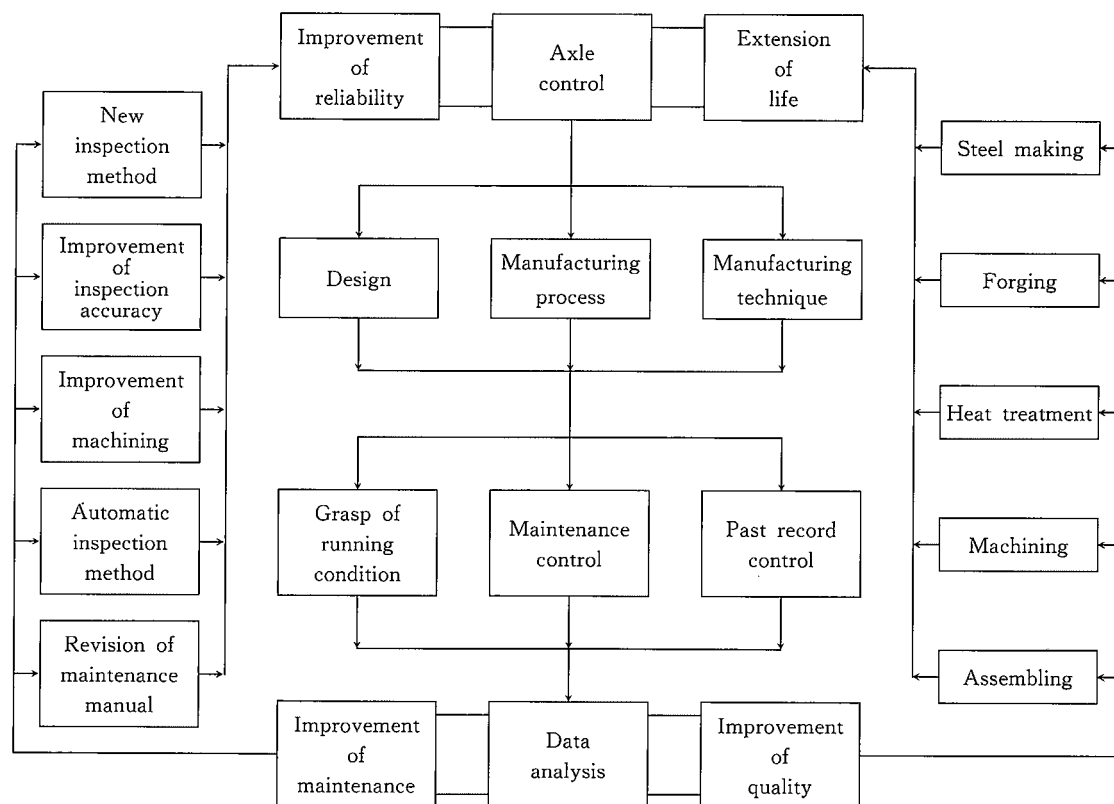
ィング疲労き裂が車軸取替えの最大の原因であった。そこで多くの対策が設計、検査及び製造方案に採用されたが、特に効果が大きかったのは3章で述べた知見に基づく、圧入部形状の変更と圧縮残留応力の増大であった。高周波焼入れ処理時の周波数、コイル形状、焼戻し温度と圧縮残留応力分布の関係を第9図に示す<sup>9)</sup>。開業時に使用されていた10kHz、単層コイルに比べ、現在使用されている3kHz、6層コイルでは表面の圧縮残留応力は200MPaから600MPaへ、引張へ変化する深さは5mm以下から10mm以上へと大きく改善されている。また走行に伴う表面残留応力の変化を把握することは安全性評価にとり重要な課題であり、多くのデータが蓄積されてきた。最近の長期走行軸のX線残留応力測定結果によれば残留応力の低下は認められず、車軸は全寿命にわたりほぼ初期の圧縮残留応力を保持していることが確認されている<sup>10)</sup>。

製造方案へ反映された仕様変更をまとめて第2表に示す。以上が設計及び製造両面での改善であるが、軌道条件の改善効果も大きく、高速化のために開発された車両による現車走行試験によってその効果は確認されている。こうした使用条件の改善と相まって、歴年の取替え率は第10図<sup>20)</sup>に示すように変化している。1965年を1とすると1975年以降はほぼ0.5前後で推移し、1989年以降さらに低下し、1993年には開業以来最も低い数字となっている。特に強調されるのは1991～3年の3年間に検査された約6万本の車軸のうち磁粉きずにより取替えられたものは僅か5本に過ぎないという点である<sup>2)</sup>。1980年以降の取替えの主な要因は歯車箱軸受のクリープと車輪取りはずし時のかじりである<sup>2)</sup>。これらについても適宜対策がとられ前述したように最近では極めて低い損傷率となっている。

第1表 輪軸の検査体制

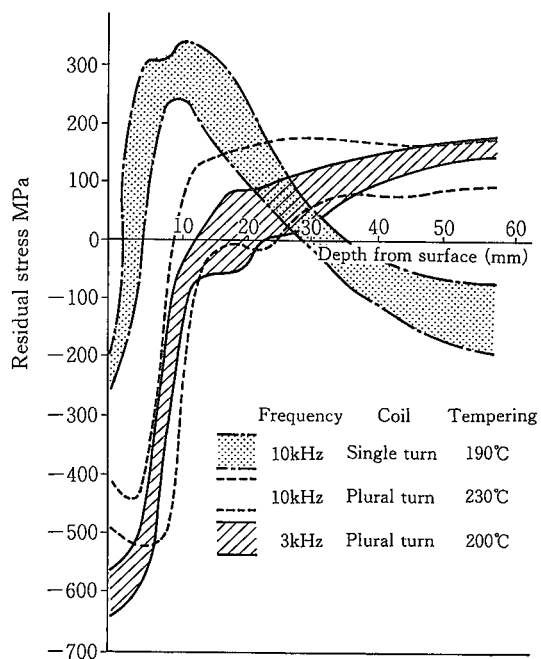
Table 1 Classification and cycle of Shinkansen electric car inspections





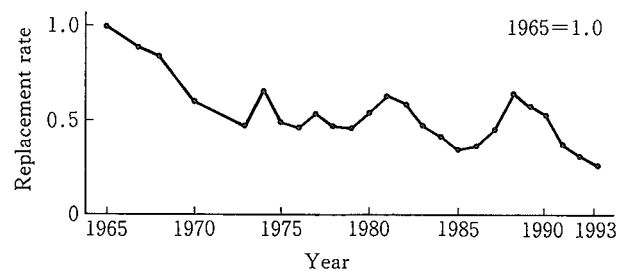
第8図 輪軸の管理システム

Fig.8 Reliability assurance system for axles



第9図 残留応力分布に及ぼす高周波焼入れ処理条件の影響

Fig.9 Effect of induction hardening condition on residual stress distribution of axles for Shinkansen



第10図 車軸取替率の年度変化

Fig.10 Annual change in replacement rate of axle

第2表 製造仕様の変遷

Table 2 Change in manufacturing specifications

Year	65	70	75	80	85	90
Steel making process	Electric arc furnace					Basic oxygen furnace
Forging process	Free forging		High-speed precision forging			
Induction hardening frequency	10kHz		3 kHz			
Coil	Single turn	Plural turn ( 6 turn)				
Tempering temperature	190°C	230°C	200°C			
Finishing	Grind- ing	Grinding after turning				
Shape of the hub edge	No-over- hanging		Overhanging			
Mounting process	Press fitting		Press fitting by oil injection			

## 5. 今後の課題

東海道新幹線は高速鉄道のモデルとなり、その後ヨーロッパにおいても高速鉄道が実現し、仏 TGV では1989年より営業最高速度300km/hで運転されている。また新幹線電車もいまや第二世代に入りつつあり、1996年からは500系電車で300km/h運転が予定されている。このような高速化、或いは新幹線車軸と異なる TGV 車軸の設計や保守の実績<sup>11)</sup>、そしてここで述べた新幹線車軸の30年の実績、等より今後検討すべき課題は

(1)更なる高速化への対応

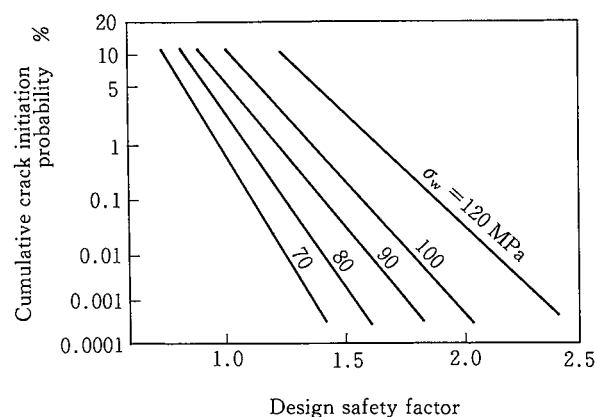
(2)検査方法の見直し

の2点であろう。(1)は走行安定性や乗り心地の改善といった点から軽量化をどのように実現するか、(2)はフレット疲労き裂がほぼ発生しなくなったという現状をどのように検査方法へ反映させるか、ということである。

現在の車軸強度設計方法 JIS E 4501は疲労強度設計であり、疲労寿命設計ではないので走行距離という基本的な数値を反映させることが出来ない。従って軽量化は現在の方法では作用応力の低減すなわち車体の軽量化と軌道の整備等によって可能となる。JIS 規格制定時に有限の疲労寿命設計についても検討されているが、当時は実働応力や実体車軸のS-N曲線のデータが整備されておらず見送られている<sup>12)</sup>。しかし今日では精力的に実働応力のデータも採取されており、寿命予測が可能となりつつある。例えば第11図は1日当りの走行距離を1000km、使用年数を10年と仮定し疲労強度をパラメータとして累積疲労き裂発生確率と JIS 規格より計算される安全率の関係を示したものである<sup>7)</sup>。これより10%の軽量化は約10倍の累積疲労き裂発生確率の増加となることがわかる。この計算は損傷則として修正マイナー則が用いられているが、疲労損傷則については不明な点が残されており<sup>13)</sup>、さらに検討する必要がある<sup>14)</sup>。

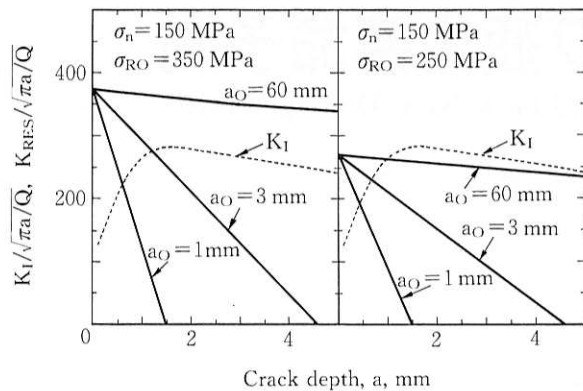
る<sup>14)</sup>。

また検査方法、特に検査周期の検討においては微小き裂の成長挙動が不明であることが第7図に示したように高周波焼入軸では $\sigma_1$ と $\sigma_2$ が大きく異なるという試験結果にも拘わらず、見直しの大きな制約となっていた。しかしこの点についても今日では破壊力学的検討により定量的評価が可能となりつつある。例えば第12図は圧縮残留応力領域の大きさ( $a_0$ )をパラメータに残留応力による応力拡大係数と曲げ応力による応力拡大係数を比較したものである<sup>6)</sup>。これにより疲労き裂が成長するか否かを評価することが出来る。また第13図は確率論的破壊力学により1mmの欠陥から疲労き裂が成長して破壊する確率を計算したものである<sup>15)</sup>。これにより台車検査までの間に破壊する確率は交番検査をすれば $10^{-9}$ のオーダーであり、しない場合でも $10^{-8}$ のオーダーであることがわかる。この確率は非破壊検査の精度にも依存する。また非破壊検査の精度向上は色々な意味において検査方法への影響が大きく、重要な研究課題となっている<sup>16)17)</sup>。



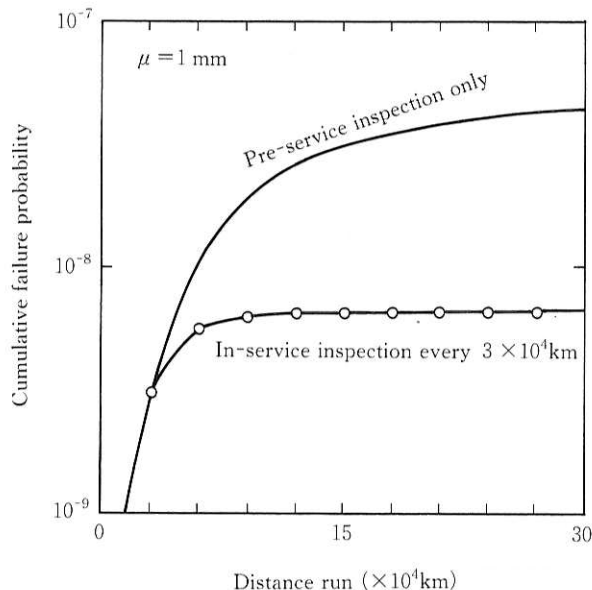
第11図 設計安全率と累積疲労き裂発生頻度の関係

Fig.11 Relation between safety factor and cumulative crack initiation probability



第12図 曲げ応力と圧縮残留応力による疲労き裂先端の応力拡大係数の比較

Fig.12 Comparison of the stress intensity factors for residual stress and applied stress (Solid lines are for  $K_{res}$ )



第13図 累積破壊確率に及ぼす初期き裂深さの影響

Fig.13 Effect of initial crack depth on the cumulative failure probability

## 6. 結 言

地球環境保護の高まりの中、大量高速輸送手段としての新幹線の役割はその安全への高い信頼性を背景に今後益々大きくなるものと思われる。走行安全性を支える最も重要な部品である車軸についても本報告で述べた多くの観点から、これまで同様運行関係者と一体となりこれまで以上の安全性確保に努めていきたい。

おわりにあたり貴重な御意見、データを頂戴しました運行関係者、特に財鉄道総合技術研究所に対し厚く御礼申し上げます。



外山和男/Kazuo Toyama

総合技術研究所 機械システム研究部  
部長

(問合せ先: 06(489)5732)

## 参考文献

- 1) 中村宏; “高周波焼入と疲労強度” (1963) 日刊工業新聞社
- 2) H. Ishizuka; 11th Int. Wheelset Cong. (1995) 43
- 3) 西岡邦夫, 小松英雄; 日本機械学会論文集, 33 (1967) 503
- 4) 西岡邦夫, 小松英雄; 同上, 38 (1972) 27
- 5) 邦武立郎, 大谷泰夫; 住友金属, 23 (1971) 168
- 6) K. Hirakawa and K. Toyama; “Fretting Fatigue”, ESIS 18 (1994) 461 Mech. Engg. Pub. (London)
- 7) K. Tezuka and S. Tanaka; 9th Int. wheelset Cong. (1988) 3-4-1
- 8) 石井堅太郎; 日本機械学会誌, 82 (1979) 468
- 9) S. Isomura and K. Yomoda; 11th Int. Wheelset Cong.

(1995) 51

- 10) 外山和男他; 材料, 41 (1992) 957
- 11) G. Thonut; 9th Int. Wheelset Cong. (1988) 1-3-6
- 12) 田中真一, 中村宏; 車両技術, 121 (1972) 26
- 13) 中村宏他; 日本機械学会論文集, 33 (1967) 1027
- 14) M. Yamamoto et al, 11th Int. Wheelset Cong. (1995) 29
- 15) 赤間誠, 石塚弘道; 日本機械学会論文集A編, 60 (1994) 46
- 16) 戸田裕己他; 非破壊検査, 40 (1991) 158
- 17) 養祖次郎, 坂本博; RTRI REPORT 4-7 (1990) 47