

# 鉄道関連製品の疲労に関する研究開発とその展望

## Research and Development of Fatigue Issues for Railway Steel Products and Future Prospects

山本三幸\*  
Miyuki YAMAMOTO

### 抄 録

鉄道構成要素の強度信頼性、特に疲労特性は、社会の安心、安全と密接に関わる重要課題である。新日鐵住金(株)はレール、車輪、車軸、台車枠等の鉄道構成要素を提供しており、これら製品を対象として、材料としての疲労特性の研究や高性能な材料の開発に努めているとともに、強度設計に必要な構造解析シミュレーションや実体を用いた評価試験、さらには強度設計方法までを含めた研究開発に取り組んでいる。本報告では、最近の研究開発の事例を紹介するとともに、これら鉄道構成要素の強度信頼性向上の観点から今後の展望を述べた。

### Abstract

**Strength reliabilities, or fatigue issues, of railway steel products are very concerned matters for social safety and easiness. Since NSSMC has been supplying the railway steel products, such as rail, wheel, axle, and bogie truck, the research and development (R&D) fields in NSSMC are widely spread from material R&D with high fatigue performance to structural R&D by using numerical analyses and actual body endurance tests, furthermore, technology R&D of strength design methods. The present paper shows some recent R&D results and future prospects in these fields.**

### 1. はじめに

現在のような鉄道交通システムは、その起源が1825年のイギリスのDarlington-Stokton間の営業運転に遡ると言われているが、日本における歴史は1872年の新橋、横浜間の運転開業に始まった。当時の営業最高速度は約60km/hであったが、その後年代とともに速度向上が図られ、特に1964年の東海道新幹線の開業以降は飛躍的に走行速度が向上し、現在では300km/hの営業運転がなされるまでに至っており、目覚ましい技術発展が成し遂げられてきた。この間、レール、車輪、車軸、台車等に代表される鉄道構成要素では鉄鋼材料が構造用材料として使用され続けてきているが、鉄道交通システムの高い社会性、公共性を考えると、これらの強度信頼性は社会の安心、安全と密接に関わる重要課題である。

強度信頼性としては、これらの鉄道構成要素がその使用中に受ける繰返し荷重に対する強度特性、すなわち疲労特性が、一つの重要な検討分野である。それは、疲労現象が1結晶粒程度のすべり変形に起因したき裂発生とその後のき裂進展によるミクロな破壊現象<sup>1)</sup>であり、静的な荷重に

対する強度特性(例えば、引張強度)以下の負荷応力でも生じることや、マクロな塑性変形が生じることなく突然最終的な破壊に至ること等の危険性があるため、疲労特性を適切に考慮することが求められることによる。なお、疲労特性の重要性は鉄道に限らず他の機械、構造物においても同様であるが、1860年代にドイツのWöhlerが蒸気機関車の車軸を対象として疲労に関する系統的な実験を行い、最も基本的な疲労特性データとして現在でも使用される応力(S) - 寿命(N)関係を研究し、疲労研究の基礎を築いた<sup>2)</sup>ことから、疲労と鉄道との深い関わりを感じている。

新日鐵住金(株)は鉄鋼会社としてこれらの鉄道構成要素を製造し顧客に提供しているが、幾つかの構成要素では疲労特性を考慮した形状設計(強度設計)まで手掛けている。このため、材料としての疲労特性の研究や高性能な材料の開発に努めているとともに、強度設計に必要な構造解析シミュレーションや構成要素実体を用いた評価試験、さらには強度設計方法までを含めた研究開発に取り組んでいる。本報告では、鉄道構成要素としてレール、車輪、車軸、台車枠を取り上げ、使用される材料、疲労に関わる損傷、強度設計法に関して現状を概説した後、最近の研究開発事例

\* 技術開発本部 フェロー 工学博士 兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891

を紹介するとともに、これら鉄道構成要素の強度信頼性向上の観点から今後の展望を述べる。

## 2. 鉄道構成要素の現状

### 2.1 レールの材料、損傷の現状

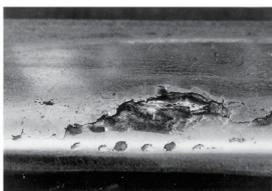
日本国内におけるレールは JIS<sup>3)</sup> に規定されており、その化学成分、機械的性質を表 1 に示す、パーライト組織の高炭素鋼である。ここで、種類の数値は長さ 1m 当たりの重量を示すものであり、それぞれの断面形状も細部に至るまで同じ規格で規定されている。なお、新幹線では 60kg レールが使用されている。

一方、海外では、北米、豪州の石炭、鉍石等の資源輸送用貨物鉄道において、輸送効率向上を目的に重積載化が顕著に進んでいる。新日鐵住金(株)ではこれに対応した高強度レールとして共析鋼、さらには過共析鋼のパーライト組織のレールを実用化しており、その詳細は本特集号の別報に説明されている。

レールに発生する損傷には、車輪との接触による摩耗の他、疲労が関係するものとしてフレーキングやシェリングと呼ばれる頭部表面損傷、および内部疲労損傷等があり<sup>4,5)</sup>、その一例を図 1 に示す。頭部表面損傷は後述の車輪踏面に生じるシェリングと同様な転動疲労損傷であり、重積載化にともなう荷重増加により発生件数が増加することが懸念されるが、高強度レールではそれが抑制される。一方、内部疲労損傷は表面から 5～10mm 深さの内部を起点とした疲労破壊であり、その発生には非金属介在物や頭部断面硬度分布が関係している<sup>6)</sup>が、近年では製鋼技術の進歩による鋼の清浄度向上と高強度レールで硬化深度を深くすることにより殆ど発生しなくなっている。

表 1 普通レールの化学成分、機械的性質  
Rail steel specification in JIS

Mark	Chemical compositions					Mech. properties	
	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	TS (MPa)	Elong. (%)
37kg	0.55-0.70	0.10-0.35	0.60-0.90	<0.045	<0.050	>690	>9
40kgN	0.63-0.75	0.15-0.30	0.70-1.10	<0.030	<0.025	>800	>10
50kgN							
60kg							



a) Flaking damage



b) Internal fatigue failure

図 1 レールに生じる疲労損傷の例  
Examples of fatigue damage appearance in rails

### 2.2 車輪の材料、強度設計法、損傷の現状

鉄道用車輪の材料、強度設計法に関しては、本特集号の別報に詳しく説明されているため、ここでは、日本国内で使用されている車輪が JIS<sup>7)</sup> に規定されているパーライト組織の高炭素鋼であり、前述のレール材とほぼ同等な材料であること、また強度設計は板部の疲労を考慮した疲労限度設計法であることの 2点を言及するのに止める。

車輪に生じる損傷形態は、レールとの接触による摩耗の他、疲労が関係するものとして熱き裂、スポーリング、シェリング、フラット剥離、シャッタードリムなどがある<sup>8)</sup>。互いに接触して使用されるレールと比較すると、車輪では踏面にブレーキが負荷される場合があることが使用条件として異なっており、これに関連した熱き裂やフラット剥離といった損傷は車輪に特有な損傷であるが、それ以外の損傷は名称の違いはあるもののほぼ同様な原因、機構で生じている。

このような車輪損傷の発生状況に関して、米国鉄道協会 (AAR) では北米内の貨車用車輪の取替え実績をその原因別で整理している。表 2 は 2005 年の結果<sup>9)</sup>をまとめたものである。これより、何らかの形で疲労が関係すると考えられる損傷 (Environment と Wheel failure) が全体の約 29% と、摩耗の約 14% より多いこと、シェリングや熱き裂などの損傷による寿命は摩耗による寿命より 20% 程度短いこと、などが分かる。日本国内での状況として纏まったデータは無いが、少なくとも強度設計で考慮している板部の損傷は発生していない。

表 2 北米貨車車輪の取替え原因 (2005 年)  
Exchange cause of freight train wheels in North America (2005)

Why made code	No. of wheels		Ave. life (year)
		Ratio	
Administrative	398 039	57.1%	9.8
Good conditoin	375 244	53.8%	
Mate wheel	22 206	3.2%	
Others	589	0.1%	
Environment	199 168	28.6%	8.8
Out of round	2 699	0.4%	
High impact	111 709	16.0%	
Thermal cracks	3 322	0.5%	
Tread shelled	50 273	7.2%	
Slid flat	19 845	2.8%	
Others	11 320	1.6%	
Worn out	98 926	14.2%	11.0
Thin flange	23 830	3.4%	
High flange	62 001	8.9%	
Thin rim	10 573	1.5%	
Others	2 522	0.4%	
Wheel failure	766	0.1%	12.2
Rim spread	96	0.0%	
Flange cracked	244	0.0%	
Rim cracked	320	0.0%	
Rim shattered	106	0.0%	
Total	686 899	100.0%	9.7

### 2.3 車軸の材料，強度設計法，損傷の現状

図2に車軸の例として新幹線用車軸を示す。車軸には軸受，車輪，歯車等を取り付ける座やそれら近傍に段部が設けられているため，多段の段付き軸となっている。これらの座には相応する部品がはめ合わされ，全体として一体構造となるように組み立てられる。

表3に車軸の種類，機械的性質などをJIS<sup>10)</sup>を基に整理した概要を示す。車軸は1種から4種まで分類されており，1種から3種は熱処理により順次引張強度を向上させたものである。一方，4種は調質熱処理後に高周波焼入れ，焼き戻しを施したものである。使用される鉄鋼材料の化学成分は，JISでは不純物としてのP, Sの上限が規定されているのみであるが，現状ではC:0.30～0.48mass%，Si:0.15～0.40mass%，Mn:0.40～0.90mass%の中炭素鋼が適用されている。なお，欧州では同様な中炭素鋼の他にCr, Mo等を添加した低合金鋼も使用されている。

車軸の強度設計は，車両運行により発生すると想定される最大応力（設計応力）と材料および部位別に規定された許容応力から計算される安全率がこれまでの安全実績に基づいて設定された基準安全率以上となることを基本とした

疲労限度設計である。その詳細は，他の文献<sup>11,12)</sup>に記載されているため，ここではその流れを図3に示し，以下に概要を説明する。

まず，設計応力に関しては，車両運行中に車軸が受ける車体や台車の重量および慣性力，車輪からの反力，駆動装置やブレーキ装置からの力，およびこれらの搭載形式に依存して台車枠を介して負荷される力，等から車軸各部位の曲げモーメントと振りトルクをそれぞれ求め，その値を基に材料力学的な手法で曲げ応力と振り応力として計算する。

許容応力は，曲げ応力に関しては，車軸の材料種別および部位（はめ合い部，非はめ合い部）ごとに規定されており，その数値は小型試験片の回転曲げ疲労限度に寸法効果と，はめ合い部でははめ合い効果が，非はめ合い部では表面粗さ効果がそれぞれ考慮されている。また，振り応力に関しては，曲げ応力に比べ振り応力の発生頻度が極端に少ないこと，曲げ応力と振り応力とで発生有位相差があること，等を考慮して振り弾性限度<sup>13)</sup>が使用されている。車軸各部位の安全率の計算には図3に示した計算式が使用されるが，それは曲げ応力と振り応力の重畳作用を考慮するためである。また，基準安全率は車軸の部位ごとに決定されているとともに新幹線車両，通勤電車，特急電車等の車両種別の相違も考慮されている。

疲労が関係する車軸の損傷としては，車輪座などのはめ合い部に生じるフレットング疲労が重要である。それは，フレットング疲労では，はめ合いというマクロな形状変化にともなう応力集中，フレットングで生じる微細なピットあるいは凹凸によるミクロな応力集中，フレットングの摩擦力で生じる応力増加のため，その疲労強度は非はめ合い部に比べ大きく低下するためである。最近の損傷発生状況に関しては，JR各社で実施されている車軸検修の実績によると磁粉きず（フレットング疲労の初期段階である微細き裂）による車軸取替えは皆無ではないが，ほぼ零

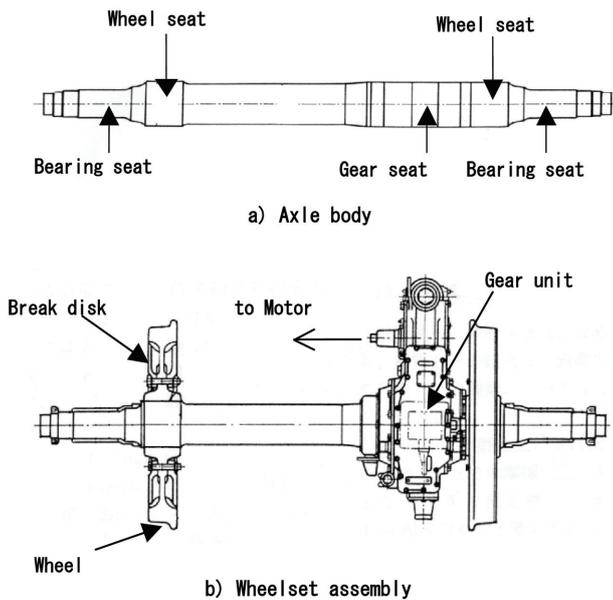


図2 鉄道車軸の例  
Example of railway axle

表3 鉄道車軸の種類規定  
Railway axle specification in JIS

Sort	Mark	Mechanical properties				Heat treatment
		YS (MPa)	TS (MPa)	Elong. (%)	Red. (%)	
1	SFA55	>275	>540	>23	>35	Normalizing or normalizing & tempering
2	SFA60	>295	>590	>20	>30	
3	SFA65	>345	>640	>23	>45	Quenching & tempering (QT)
4	SFAQ	>295	>590	>20	>30	Induction heating QT

\* Mechanical properties of SFAQ are those of before IHQT.

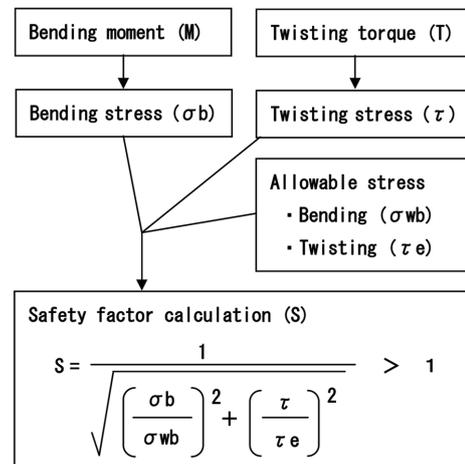


図3 鉄道車軸強度設計の流れ  
Design flow of railway axle

である<sup>14)</sup>とともに、ここ数十年に亘り折損に至る事例は国内では発生していない。

#### 2.4 台車枠の材料、強度設計法、損傷の現状

鉄道車両用台車枠の一例を図4に示す。台車枠は前後方向の側ばり、左右方向の横ばり、およびモーターや駆動装置等の部品を取り付ける付加構造物から構成されており、これら構成要素全体が溶接施工により台車枠として一体化されている。なお、溶接部にはグラインダー等で溶接ビード形状を滑らかに仕上げる箇所と、仕上げ加工せずに溶接ままの箇所の両方がある。また、通常の台車枠は溶接施工による残留応力を低減する目的で応力除去焼鈍熱処理が施されている。

台車枠に使用される鉄鋼材料は、SS400, SM400, SMA490に代表される構造用鋼板やSC450に代表される鋳鋼であるが、最近では板厚8～16mm程度の構造用鋼板が多く使用されているとともに、特に横ばりでSTKMに代表される機械構造用鋼管が使用される例も多くなっている。

台車枠の強度設計は、負荷荷重条件の決定、構造案の作成、各部の応力計算、強度評価の手順で、JIS<sup>15)</sup>に準じて行われており、疲労限度設計である。負荷荷重条件の決定では、鉄道車両の走行に伴い台車枠には極めて多種類の荷重が複合して作用するが、これらの荷重を静荷重と動荷重に分ける。静荷重は車両が停車している状態で作用する荷重であり、車体重量や積載重量などから成る。一方、動荷重は走行中の取付け部品の振動や駆動、制動により生じる荷重であり、上下方向、左右方向、前後方向が存在する。また曲線区間でのカント低減や軌道不整による振り荷重も考慮されている。各部の応力計算では、荷重の種類ごとに応力を計算する。JISでは計算手法に関する規定はないが、

FEMによる弾性応力解析が一般的になされている。そして、それぞれの荷重に対する発生応力を合成し、疲労強度評価に必要な平均応力と応力振幅を求める。強度評価は修正グッドマン線図に準じた疲労許容応力線と最大応力で考えた降伏許容応力線で囲まれた許容領域と先の合成応力(平均応力と応力振幅)を比較することで実施され、合成応力が許容領域に入るように設計する。このとき使用する許容応力値は、使用する材料ごとに母材、仕上げ溶接部、溶接まま部の3種類に分けて規定されている。

台車枠に生じる疲労損傷としては、形状変化が急激な部位で母材表面から、あるいは鋳鋼で内部の鋳造欠陥から、それぞれ疲労き裂が発生した例もあるが、損傷事例としては溶接部を起点とするものが多い。これは、溶接施工において、溶接部位、溶接形式が極めて多いことから、溶接ままの箇所ではアンダーカットのような欠陥や、仕上げ溶接部でも片側溶接となる場合には裏側に溶接されないルートが残る可能性があること等による<sup>16)</sup>。

### 3. 鉄道構成要素に関する研究開発事例

#### 3.1 車輪のシェリング損傷評価

ここでは、車輪踏面の典型的な転動疲労損傷であるシェリングに関する最近の研究事例<sup>17,18)</sup>を紹介する。車輪のシェリング損傷はウエット条件下で特に顕著となり、深さ方向に進展する主き裂と表面方向に進展する分岐き裂が複雑に絡み合い最終的に表層部が剥離して寿命に至ること、またすべり率の増加や材料強度の低下によりシェリング損傷寿命が短くなることが知られている。しかしながら、これらは実験結果として経験的に知られていることであり、その機構に関しては不明な点が多い。

そこで、平板上を斜め表面き裂を有する円盤が転動するモデルを対象にFEM解析を実施し、き裂先端での応力拡大係数を評価することによりき裂進展形態を検討した。このとき、接触応力下ではモードI、IIの混合モードとなることから、最大接線応力基準による進展方向( $\theta$ )とその駆動力( $K_{\theta, \max}$ )を評価した。

その結果、図5に示すように $K_{\theta, \max}$ には2つのピークがあり、それぞれの $\theta$ は深さ方向と表面方向となっていることが判明した。このことは、き裂が主き裂と分岐き裂の2形態となることと対応している。また、すべり率の増加とともに表面方向のピーク値は増加する結果も得られており、このことがすべり率の増加とともにシェリング損傷寿命が短くなることの一因である。さらに分岐後のき裂形態をモデル化した解析では、主き裂先端の応力拡大係数は減少するが分岐き裂では逆に増加する結果となり、主き裂がある程度の深さで停留することと分岐き裂の進展が加速することが分かった。一方、材料強度の影響に関しては、材料強度が高いほどき裂内の水圧が低減されるため深さ方向のピーク値は低下することが判明し、主き裂のき裂深さが浅

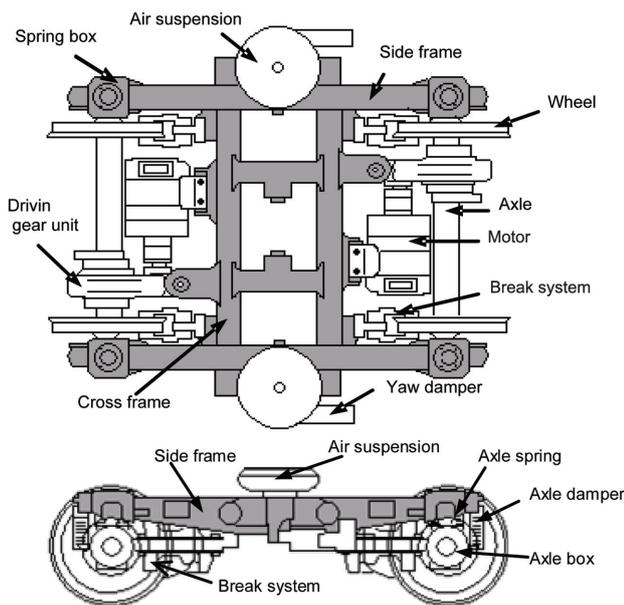


図4 鉄道台車の例 (■: 台車枠)  
Example of railway bogie truck

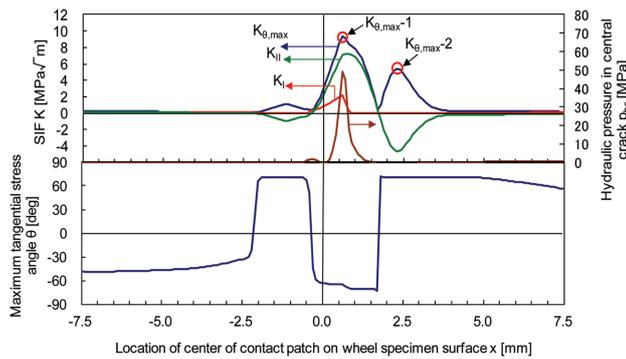


図5 転動にともなう応力拡大係数の変化<sup>17)</sup>  
Change of stress intensity factor

くなること、これに伴い表面方向のピーク値が小さくなり、表層部剥離の発生が遅れることが分かった。

### 3.2 車軸はめ合い部の変動応力下における疲労特性

車軸はめ合い部のフレット疲労特性に関して、実際の使用条件下では応力振幅は一定ではなく変動しているため、その影響を明確にする必要がある。そこで、高周波焼入れ小型軸を用いた三点曲げ回転疲労試験を実施し、はめ合い部のフレット疲労き裂の発生に及ぼす変動応力の影響を調査した。ここで、疲労試験は二段多重の変動応力パターンを基本として応力レベル、応力頻度比を変化させるとともに、一部では多段多重の試験も行い応力段数の影響も評価した。また評価パラメータとして次式の修正マイナー損傷値 ( $D$ ) と等価応力 ( $\sigma_{eq}$ ) を用いた<sup>19)</sup>。

$$D = \sum_{i=1}^k (n_i / N_i)$$

$n$  : 負荷繰返し数,

$N$  : 定応力振幅下の S-N 線で予測される寿命,

$i$  :  $i$  番目の応力,  $k$  : 応力段数

$$\sigma_{eq} = \left( \sum_{i=1}^k n_i \cdot \sigma_i^{-m} / \sum_{i=1}^k n_i \right)^{1/m}$$

$m$  : 定応力振幅下の S-N 線の傾き

図6に等価応力で整理した試験結果を示す。これより変動応力下では定応力振幅下でのき裂発生寿命より短い応力繰返し数でき裂が発生すること、この傾向は等価応力の低下とともに顕著となることが分かった。さらに、実際の鉄道車軸が受ける変動応力条件を仮定して本試験結果に基づいてき裂発生における  $D$  値を試算すると  $D = 0.02$  となることが分かった。このように  $D$  値が大きく低下する現象は疲労限度以下の応力変動の頻度が多い場合に生じることが一般に知られており、車軸はめ合い部のフレット疲労でも同様な現象が起こることに注意が必要である。

### 3.3 台車枠溶接部の強度評価

台車枠溶接部では片側溶接の裏側に溶接されないルートが残る可能性があり、これを起点とした疲労損傷の懸念が

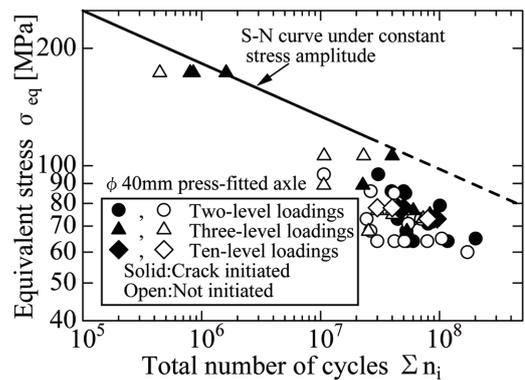


図6 変動応力疲労試験結果<sup>19)</sup>  
Result of variable stress fatigue tests

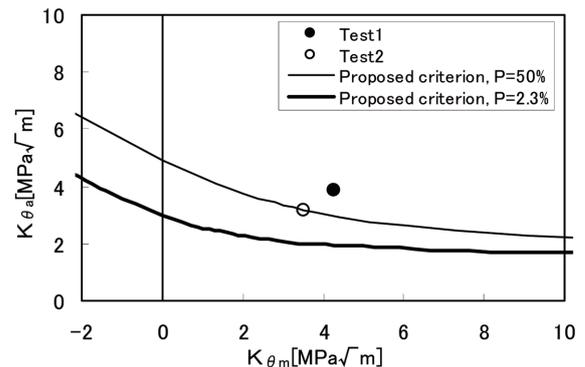


図7 実体疲労試験と強度基準の比較<sup>20)</sup>  
Comparison of strength criterion to test results

あるため、これを適切に評価し台車枠の設計や製造に反映する必要がある。そこで、SM400 鋼板を用いて4水準の長さのルート有する T 型溶接継手試験片を作製し、引張および曲げ疲労試験をそれぞれ2水準の荷重比で実施した。そして、疲労試験で得られた疲労限度を、ルートをき裂としてモデル化した FEM 解析で求めた最大主応力方向応力拡大係数 ( $K_\theta$ ) を用いて整理し、 $K_\theta$  の平均値と振幅の関係式として定義される強度基準を導出した。

図7は、実体台車枠のばね帽溶接部を含む側ばりを用いた疲労試験で当該溶接部の疲労特性を評価した結果と強度基準を比較したものである。実体疲労試験結果は50%破壊確率の強度基準と良く対応しており、強度基準としての妥当性が検証できた<sup>20)</sup>。なお、このような評価技術を実際の設計実務へ展開するため、現実的な計算規模と計算精度を両立させる FEM 解析手法も検討しており、これら技術は2007年に(社)日本材料学会より技術賞を受賞している。

## 4. 今後の展望

鉄道構成要素における強度信頼性の要求は今後ますます高度化することが予想される。例えば、北米や豪州における貨物鉄道では輸送効率の更なる向上を目指して重積載化が一層進められることや社会全般でのエネルギー問題の観点から公共交通機関として軽量化が求められること等が指

摘できるが、これらは鉄道構成要素の強度信頼性の向上なくしては実現不可能な要求である。新日鐵住金(株)は鉄道構成要素を製造しており、材料としての疲労特性の研究や高性能な材料の開発に努めているとともに、強度設計に必要な構造解析シミュレーションや構成要素実体を用いた評価試験、さらには強度設計方法までを含めた研究開発に取り組んでいる。このような広い分野の研究開発は新日鐵住金(株)の強みであり、それぞれの分野で技術発展を目指すことは勿論、分野を超えたシナジー効果を発揮することが重要である。

#### 4.1 レールと車輪のシナジー効果

レールにおける最新技術は過共析パーライト組織の高強度レールであり、今後の更なる重積載化に対応すべく、本技術の一層の展開が望まれる。このとき、レールの疲労に関連して注意すべき損傷であるシェリングについては、車輪でも同様な損傷があり、その機構に関する力学的な評価が3.1項のように進んでいることから、本知見を材料開発に反映することが望まれる。一方、車輪に関しては重積載化への対応として合金元素の添加や熱処理の適正化といったレールとは異なる技術開発が指向されている。これは、車輪ではブレーキ負荷による熱の影響があることや強度設計を実施する板部も同一材料となることなど、レールとは異なる性能が必要となるためであるが、車輪とレールは互いに接触して使用されるという基本を忘れることなく、基礎的な検討も含めて研究開発を推進することが必要である。

冒頭で述べたように鉄道システムの歴史は190年弱にも及び、また発展途上国を中心としてグローバル化が進んでいることから、今後もレールと車輪の組合せで走行する基本構成は変化することがないと思われる。したがって、レールと車輪に関わる研究開発課題は上記以外にも将来的に絶えることがなく、両者同時の最適化という観点に立ち、材料や評価、設計といった分野を超えた研究開発シナジーを継続的に発揮できるものと思われる。

#### 4.2 強度設計法の目指す方向

新日鐵住金(株)では車輪、車軸、台車枠などで強度設計を実施しており、その設計手法は疲労限度設計法である。それぞれの設計法に現状で大きな不具合はないが、今後進むと予想される軽量化要求に対応するためには新たな視点を導入する必要がある。すなわち、強度信頼性を確保しつつ軽量化を達成するには強度設計でのより一層の緻密さが必要となるが、疲労限度設計では設計応力が使用中に発生すると推定される最大応力であり、材料強度が定応力振幅下の疲労限度であることに起因した限界がある。実際に作用する応力は変動応力であり、変動応力下の疲労特性は定応力振幅下とは異なる。

そこで、設計法として将来的に目指す方向としては、3.2項で説明した変動応力を考慮した評価を取り入れることである。このためには、まず変動応力パターンを明確化すること、明確化した変動応力パターンによる疲労特性への影響を把握することが必要となる。前者に関しては、車軸において営業使用中の発生応力を長期に亘って直接測定する技術<sup>21)</sup>や台車枠において数値シミュレーションで評価する技術<sup>22)</sup>などが開発されており、今後これら技術を発展させるとともに変動応力パターンに関する多くのデータ収集・蓄積が望まれる。後者においては、検討すべき変動応力パターンが多岐にわたることや疲労特性は統計量であり確率論的検討が必要となることから極めて長期的、計画的な取組により破壊確率を考慮した疲労損傷値に関するデータの蓄積が重要<sup>23)</sup>であり今後の研究が望まれる。

#### 4.3 客先とのコラボレーション

鉄道構成要素の強度信頼性は我々製造者側の努力のみならず、使用者側の努力で確保されている。すなわち、客先で定期的に行われているメンテナンス(検修)が重要であり、そこで不具合が検出された場合には適切な対応が為されることで折損や割損といった大事故の発生が抑制されている。我々製造者側は、ややもすると検修結果にのみ注目し、発生した不具合を解決する研究開発に注力する傾向にあったように思われるが、今後は検修自体にも注目し、設計、製造、検修のトータルとして強度信頼性を効率よく確保する技術の研究開発も考えるべきである。

具体的な課題の一つとしては検修周期の最適化がある。上述のように現状の強度設計は疲労限度設計であり寿命の概念がないため、検修周期に対して有益な情報を提供することができないが、変動応力を考慮した評価では、修正マイナー損傷値( $D$ )が寿命に関連した指標であることから検修周期の最適化に役立つ可能性がある。

また別の課題として検修作業の効率化に関する研究開発も考えられる。現状では磁粉探傷や超音波探傷が実施されているが、より高精度の探傷技術が開発されれば疲労損傷が進行する過程をきめ細かくモニタリングすることが可能となる。また、構造上の制約等により検査や補修に苦勞する場合には設計段階から検修容易性を考慮することや、さらに進んで検修手法・要領自体を設計から提案すること等も考えられる。いずれにしても、このような研究開発には従来以上に客先とのコラボレーションが必須であり、客先のニーズに的確に合った具体的課題を設定することが必要である。

#### 5. まとめ

鉄道構成要素としてレール、車輪、車軸、台車枠を取り上げ、使用される材料、疲労に関わる損傷、強度設計法に関して現状を概説し、最近の研究開発事例を紹介すると

もに、これら鉄道構成要素の強度信頼性向上の観点から今後の展望としてレールと車輪のシナジー効果、強度設計法の目指す方向、客先とのコラボレーションを述べた。今回の会社統合も契機として当該分野のますますの精進に努めたい。

#### 参考文献

- 1) Forsyth, P. J. E.: Acta. Met. 11, 703 (1963)
- 2) 日本材料学会疲労部門委員会編：金属疲労研究の歴史. 1988, p. 32
- 3) JIS E 1101 普通レール
- 4) 上田正治 ほか：新日鉄技報. (375), 150 (2001)
- 5) 上田正治：日本鉄鋼協会九州支部秋季講演会概要集. 2002, p. 43
- 6) 影山英明 ほか：新日鉄技報. (343), 77 (1992)
- 7) JIS E 5402-1 鉄道車両炭素鋼一体車輪－品質要求
- 8) 山本三幸：日本鉄鋼協会九州支部秋季講演会概要集. 2002, p. 30
- 9) Sullivan, R. et al.: Tech. Conf. of RWMEC. 2005
- 10) JIS E 4502 鉄道車両用車軸
- 11) JIS E 4501 鉄道車両－車軸強度設計方法
- 12) 高速車両用輪軸研究委員会編：鉄道輪軸. 2008, p. 98
- 13) 永島菊三郎 ほか：日本機械学会論文集. 17 (63), 54 (1951)
- 14) 高速車両用輪軸研究委員会編：鉄道輪軸. 2008, p. 171
- 15) JIS E 4207 鉄道車両用台車枠－設計通則
- 16) 長瀬隆夫：鋼製溶接構造台車枠の疲労強度. 研友社, 2010, p. 27
- 17) Makino, T. et al.: Inter. J. Fatigue. 36 (1), 68 (2012)
- 18) 加藤孝憲 ほか：材料. 61 (8), 698 (2012)
- 19) 牧野泰三 ほか：材料. 46 (10), 1178 (1997)
- 20) 近藤修 ほか：第10回機械・構造物の強度設計・安全性評価シンポジウム. 日本材料学会, 2006, p. 9
- 21) 橋本通孝 ほか：J-RAIL2011. 2011, S1-1-4
- 22) 近藤修 ほか：J-RAIL2011. 2011, S1-2-1
- 23) 平川賢爾：ドイツ高速鉄道ケルン脱線事故. 慧文社, 2009, p. 143



山本三幸 Miyuki YAMAMOTO  
技術開発本部 フェロー 工学博士  
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891