

# 日本と欧州の車軸を比較する

石塚 弘道

車両構造技術研究部(主管研究員)



いしづか ひろみち

## はじめに

日本と同様に鉄道交通の盛んな欧州では、1990年代半ば頃からの欧州統合の流れを背景として、国境を越えた列車の運転がそれ以前にも増して活発となることに伴い、それまで各国ばらばらであった各種鉄道規格の統一化が図られるようになりました。車軸に関する規格も例外ではありません。現在では日常語にまでなった「金属疲労」の研究が鉄道車両の車軸折損事故原因を究明するために19世紀の半ば頃ドイツで始まった経緯もあって、車軸の設計・品質管理にかかわる規格には、折損事故を含む長年の使用経験に基づく知見が盛り込まれ、車軸の安全性および信頼性が確保されているのです。

車軸の設計・品質管理には製造会社のノウハウに属する事項も多数ありますが、それらについては触れることができませんので、ここでは、車軸の設計・品質管理に関する日本と欧州の規格を取り上げ、原則として、規格に記載されている文面に基づいて両者の比較を行います。

## 調査資料と調査項目

この解説文では、鉄道車両用車軸の設計・品質管理に関する以下の日本工業規格(JIS)、日本鉄道車輛工業会規格(JRIS)と欧州規格(EN)とを調査対象資料とします。

- (1) JIS E 4501：1995「鉄道車両－車軸強度設計方法」
- (2) JIS E 4502-1：2001「鉄道車両用車軸－品質要求」
- (3) JRIS J 0401：2007「鉄道車両－高速車両用高周波焼入車軸」
- (4) EN 13103：2009「Railway applications-Wheelsets and bogies-Non-powered axles-Design method」
- (5) EN 13104：2009「Railway applications-Wheelsets and bogies-Powered axles-Design method」
- (6) EN 13260：2009「Railway applications-Wheelsets and bogies-Wheelsets-Product requirements」
- (7) EN 13261：2009「Railway applications-Wheelsets

and bogies-Axles-Product requirements」

以下、本解説文では、これらの資料を個々に引用する場合は、“JIS E 4501”，“EN 13103”のように番号のみを記し、また、日本工業規格あるいは欧州規格を総括して引用する場合は、それぞれ“JIS資料”，“EN資料”と記すことにします。

JIS資料とEN資料では多くの項目に相違が見られますが、ここでは代表的な項目として以下の三項目について、比較を行います。

- (1) 材料および熱処理
- (2) 応力計算法
- (3) 許容応力と安全率

## 材料および熱処理

日本と欧州における代表的な炭素鋼車軸材料として、JIS E 4502-1の3種(SFA65A鋼)とEN資料のEA1N鋼を取り上げて、化学成分の規格値を表1に示します。JIS E 4502-1は車軸材料を主として機械的性質で規定し、化学成分は有害元素としてのP(りん)、S(いおう)のみを規定しているのに対して、EN資料はP、S以外の化学成分も規定しているのです。ただし、JIS E 4502-1でも、ISO規格との整合化を図って規格に取り入れた鋼種A1～A4については、表1においてNi(ニッケル)を除いた9元素の化学成分が規定されています。

日本と欧州の車軸材料における大きな相違点として、後者では、Cr(クロム)、Mo(モリブデン)を含有する合金鋼であるEA4T鋼がEN資料で規定されているのに対して、前者では合金鋼は規格化されていないことが挙げられます。EA4T鋼の主な機械的性質の規格値を表2に示します。EA4T鋼の引張強度はEA1N鋼よりも約20%高く、これが欧州においてEA4T鋼が車軸材料として広く採用されている理由と考えられます。ここで、鋼種記号末尾の“N”，“T”は、それぞれ熱処理として“焼ならし”，“焼入れ・焼戻し”を行うことを意味します。なお欧州では、EA4T鋼

表1 SFA65A鋼およびEA1N鋼の化学成分規格値

(質量%)

車軸材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
SFA65A	—	—	—	≦0.035	≦0.040	—	—	—	—	—
EA1N	≦0.40	≦0.50	≦1.20	≦0.020	≦0.020	≦0.30	≦0.30	≦0.08	≦0.30	≦0.06

表2 EA4T鋼および34CrNiMo6鋼の主な機械的性質規格値

車軸材料	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
EA4T	≧420	650~800	≧18	—
34CrNiMo6	≧600	800~950	≧13	≧55

よりもさらに20%程度引張強度の高い34CrNiMo6鋼 (EN 10083-3:2006「Steels for quenching and tempering. Technical delivery conditions for alloy steels」で規格化されています)も高速鉄道などで使用されています。表2には、34CrNiMo6鋼の主な機械的性質の規格値も併せて示してあります。

ここで、欧州でEN資料に規定されていない34CrNiMo6鋼が高速車両用車軸の材料として採用されたのは、EN資料では、EN資料に明示されていない材料であっても、直径10mmの試験軸による疲労試験によって安全率(後述します)を求め、実物大の試験軸によって各部の疲労限度を求めれば、車軸用として使用が可能のためです。ただし、実物大の試験軸による疲労試験は、中央平行部、車輪座、中空表面(中空軸の場合)それぞれについて15本の試験軸

によって行い、疲労限度を決定することが推奨されていて、時間的、費用的な面からハードルが高くなっています。

一方、JIS E 4502-1およびJRIS J 0401には高周波焼入車軸が規定されているのに対して、EN資料には規定がありません。高周波焼入れは、車軸の表層部を硬化させ、かつ図1に示すように表層部に圧縮残留応力を付与することにより、車軸の疲労強度の向上を図ることを目的として施工されます。日本では、高周波焼入車軸は新幹線電車に100%採用されています。

### 応力計算法

車軸設計に関するJIS E 4501とEN13103, EN13104を比較すると、曲げモーメントとねじりモーメントの合成モーメントおよび断面係数から、発生応力を計算するという基本的な考え方は同一ですが、以下の三点で相違がみられます。

- (1) 動軸の駆動時に発生する応力
- (2) ブレーキ時に発生する曲げモーメントおよびねじりモーメント
- (3) 動的負荷の走行速度依存性

ここでは、動的負荷(車両が走行することによって車軸の上下方向および水平方向に追加的に加わる荷重負荷のこと)の速度依存性について述べます。

車両の走行速度向上に伴う動的負荷の増大については、JIS E 4501では、車両と軌道の整備状態に応じて、システム1(高速鉄道システム)と2(在来鉄道システム)に分け、さらに速度範囲を設けて適用を区分(SA, A, B)し、速度の関数として上下方向および水平方向の動的付加係数を

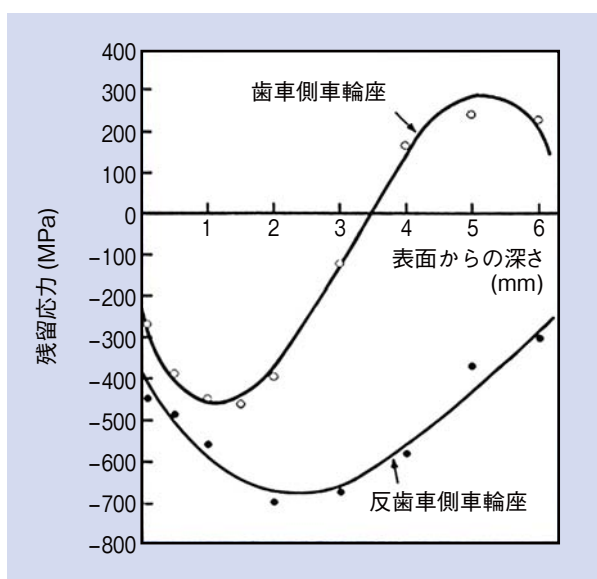


図1 高周波焼入車軸の残留応力分布の一例

求める計算式を与えています。図2に示すのが、上下方向および水平方向の動的付加係数です。同図によれば、新幹線では速度350km/h、在来線では速度160km/hまでの動的付加係数が与えられ、解説において、「規定した適用速度範囲を超える場合は、当面それぞれのシステムの $\alpha_v$ 及び $\alpha_L$ の関数を延長した値を採用することになるが、製作された車軸については、現車試験などによって強度を確認することが望ましい。」とされています。一方、車軸設計に関するEN 13103、EN 13104には上下方向および水平方向の動的付加係数の速度依存に関する記述は無く、走行速度によらずそれぞれ一律に0.25、0.175なる値を使用することとしています。この値も図2に示してあります。同図から、ENにおける上下方向の動的付加係数0.25は、JIS E 4501 においては93km/h時の $\alpha_v$ に相当し、水平方向の動的付加係数0.175は、242km/h時の $\alpha_L$ に相当することが分かります。なお、輪軸の品質要求に関するEN 13260および車軸の品質要求に関するEN 13261では、速度200km/h超の車両に適用されるカテゴリ1とそれ以下の車両に適用されるカテゴリ2に分類されています。例えばEN 13261では、車軸材料の清浄度、車軸の超音波減衰度測定条件、製造時に車軸表面に許容される軸方向欠

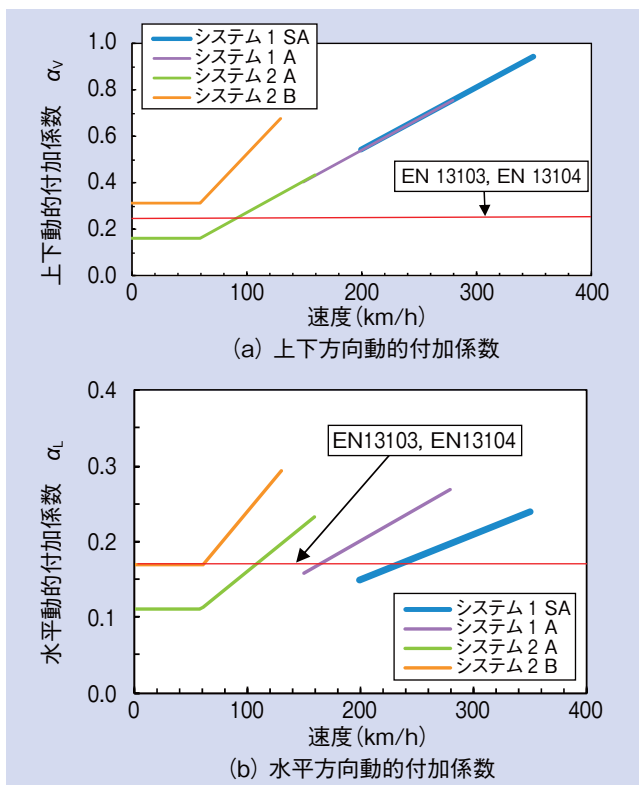


図2 動的付加係数の速度依存性

表3 車輪座における許容応力

(MPa)

鋼種	許容応力
SFA55A	98.1
SFA60A	103
SFA65A	108
SFAQA	147

陥の長さ(ちなみに、周方向など軸方向を横切る方向の欠陥の存在は許容されません)について、カテゴリ1とカテゴリ2のそれぞれに対して規定が設けられています。

### 許容応力と安全率

車軸に限らず負荷を受けて使用されるモノを設計する際に必要不可欠な許容応力と安全率について、材料力学に関する書物<sup>1)</sup>では、それぞれ「安全性の上から部材に許される最大の応力」、「安全率の値は部材が応力の作用下で十分な安全性を保持するための余裕係数を示す。」と述べられています。

JIS E 4501によれば、車軸の許容応力は式(1)から求められ、車輪座における許容応力が表3のように規定されています。

$$\text{許容応力} = \text{発生応力 (計算応力)} \times \text{安全率}^* \dots\dots\dots (1)$$

\* : 安全率は、1.0以上とする。

一方、EN 13103、EN 13104では、最大許容応力(以下、許容応力)は式(2)から求められます。

$$\text{許容応力}^{**} = \text{疲労限度} / \text{安全率}^{***} \dots\dots\dots (2)$$

\*\* : 計算応力  $\leq$  許容応力とする。

\*\*\* : EN 13104では、安全率を1.2以下に下げてもならない。

中実車軸および中空車軸の車輪座と非はめ合い部に対してEN 13103、EN 13104で規定されている疲労限度と許容応力を、それぞれ動軸と従軸に分け、さらに、鋼種(EA1N鋼、EA4T鋼)毎に表4に示します。なお同表に、34CrNiMo6鋼製車軸についても、EN 13103、EN 13104では規定されていませんが文献<sup>2)</sup>に記載された許容応力を、ごく一部ですが、併せて記載します。

式(1)と式(2)を比較しますと、JIS E 4501の許容応力はEN資料の疲労限度に相当することが分かります。また、式(1)と式(2)によれば、使用中に(走行中に)車軸に発生する計算上の最大応力は、JIS E 4501では表3に規定された許容応力を安全率で割ることにより得られ、一方、EN 13103、EN 13104では表4に示した許容応力となり、この許容応力は疲労限度を安全率で割ることにより得られ

表4 EN資料で規定されている各種車軸の疲労限度と許容応力

(MPa)

車軸種類	車軸材料	非はめ合い部			車輪座			
		疲労限度	安全率	許容応力	疲労限度	安全率	許容応力	
従軸	中実	EA1N	200	1.2	166	120	1.2	100
		EA4T	240	1.33	180	145	1.33	110
	中空	EA1N	200	1.2	166	110	1.2	92
		EA4T	240	1.33	180	132	1.33	99
		34CrNiMo6	不明	不明	不明	不明	不明	不明
動軸	中実	EA1N	200	1.5	133	120	1.5	80
		EA4T	240	1.66	145	145	1.66	87
	中空	EA1N	200	1.5	133	110	1.5	73
		EA4T	240	1.66	145	132	1.66	80
		34CrNiMo6	不明	不明	不明	不明	不明	97

表5 日本、ドイツ、フランスにおける高速列車用車軸(動軸)の比較(例)

車 両	実用最高速度	軸重	材料/熱処理	車輪座径	中央平行部径	ジャーナル径	中空径
E5系	300km/h 320km/h*	13.9ton	S38C/ 高周波焼入れ	203mm	186mm	125mm	60mm
ICE-3**	300km/h 320km/h***	16ton	34CrNiMo6/ 焼入れ・焼戻し	179mm	160mm	130mm	70mm
TGV-POS	320km/h	17ton	EA1N/焼ならし	215mm	185mm	150mm	0mm

\*：2013年春以降

\*\*：2008年7月の車軸折損事故以前

\*\*\*：フランスLGV(東ヨーロッパ線)乗り入れ時

ます。したがって、許容応力の定義に違いはありますが、JISもENも計算上の最大応力をいかに見積もるか、すなわち安全率としていかなる値を採るかが、車軸の疲労に対する安全性を保証する上でのキーポイントとなります。

例えば、JIS E 4502-1のSFA65A鋼製車軸とEN 13104のEA1N鋼製車軸(動軸)について両者の車輪座における計算最大応力を比較しますと、JIS E 4501には安全率の具体的な数字は記載されていませんが、車軸設計の際には1.2(通勤電車の場合)などの車種に応じた基準安全率(実際の安全率はこの値以上とします)が採られます<sup>3)</sup>ので、この場合、車軸の車輪座における計算上の最大応力は90MPa、一方、EN 13104では、許容応力の80MPaとなります。

### 日本と欧州における高速車両用車軸

JIS資料とJRIS J 0401およびEN資料によって設計・製作されました日本のE5系新幹線電車およびドイツのICE-3とフランスのTGV-POSの車軸につきまして、材料・熱処理および主要各部の寸法を比較して表5に示します。ここで、ICE-3の車軸は2008年7月の折損事故前のデータです。折損後は、材料はEA4T鋼に変更され車軸各部の寸法も太くなったようです。また、TGVは中空車軸から

中実車軸に戻したようです。なお、ICE-3、TGV-POSとも一括した公表データがないため、筆者が各種情報源から得た数値を一つの表にまとめたものであることをお断りします。

### おわりに

車軸は車両の安全走行にとって極めて重要な部品であり、高速走行時の万が一の折損事故を考えれば、その設計・製造(品質管理)・メンテナンスは保守的にならざるをえません。しかし、長年にわたる使用実績ならびに学術的な根拠に基づき、それらをより合理的なものにするべく見直しを図っていくことも必要です。[RRR]

### 文 献

- 1) 日本機械学会：JSMEテキストシリーズ 材料力学，pp.28-29, 2007
- 2) V. Grubisic and G. Fischer：Sichere Bemessung von ICE-Radsatzwellen, ETR, Vol.60, No.1+2, pp.18-25, 2011
- 3) 高速車両用輪軸研究委員会：鉄道輪軸，pp.98-104, 2008