

3210 走行条件が車軸応力に与える影響の分析と説明

○酒井 宏樹 (新日鐵住金) 山村 佳成 (新日鐵住金)
 田邊 尚紀 (JR 西日本) 山之口 学 (JR 西日本)

The Analysis of the Effect of Track and Running Condition on Railway Axle Stress

Hiroki SAKAI, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation 5-1-109, Shimaya, Konohana-ku, Osaka
 Yoshinari YAMAMURA, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation 5-1-109, Shimaya, Konohana-ku, Osaka
 Naoki TANABE, West Japan Railway Company 2-4-24, Shibata, Kita-ku, Osaka
 Manabu YAMANOKUCHI, West Japan Railway Company 2-4-24, Shibata, Kita-ku, Osaka

Though it is useful for future design or maintenance to know the actual stress on railway axle, not many cases has been reported. The dynamic stress was measured and clarified for some vehicle and root. The effect of track and running condition was also analyzed. Some difference by track variation was observed. The stress and also the speed dependency on stress were found to be higher on tighter curve. The stress increasing rate on each curve was same even if the vehicle is tare or loaded.

Keywords : railway vehicle, wheelset, axle, design, stress

1. はじめに

走行中の鉄道車両用車軸に発生する曲げ応力（以下、単に「車軸応力」と呼ぶ）は走行速度や軌道条件により変動する。現在、国内では車軸の損傷による事故は皆無であり、強度設計上の問題はないと考えるが、実際の車軸に発生する応力を把握することは、今後車軸の強度設計や検修方法を発展させる上で意義が大きい。しかしながら、これまでまとまって報告された例は少ない^{1,2)}。そこで、在来線の複数車種および線区で車軸応力を測定し、実働応力を明らかにするとともに、走行条件や軌道条件が車軸応力に与える影響を分析したので報告する。

2. 試験の概要

2.1 試験条件

表1に本報告の対象をまとめる。区間の記号は、列車本数が多く比較的頻繁に整備され、積極的にロングレールが敷設されている区間をA、そうでない区間をBとする。

Table 1 Vehicle type and measured roots

車種	輪軸	区間	備考
電車1	T	A1,A2	都市近郊
電車2	M	A3	都市近郊
		B1	地方幹線
気動車1	T	A1	都市近郊
		B2	地方幹線
		B3	地方線
		B4	地方線
気動車2	T	B2	地方幹線, 振り車両

2.2 応力測定方法

段付き部による応力集中位置を避けるため、図1に示すように車輪圧入部（車輪座）の車軸中央寄り端部から80mmまたは100mmの位置の非圧入部（中央平行部）にひずみゲージを貼り付けて応力を測定した。

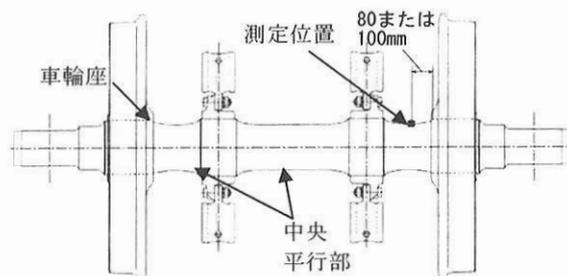


Fig.1 Stress measurement dimension

3. 分析方法

車軸曲げ応力波形は車輪の回転に合わせて正弦波状に得られる。応力は正弦波のピーク値を頻度解析することで整理した。動的応力への影響要因としては図2が考えられる。これらを分別することに配慮し、以下の要領で応力頻度解析をした。

- (1) 計数法はMax-Min法とする(図3)。膨大なデータをソフトにより自動処理するが、波形と照合してノイズによる著大値は除去する。
- (2) 走行条件によるわずかな違いを検証できるように、階差を0.5MPaとする。
- (3) 図3中の軌道要因を分析する際には、測定データを

軌道要因毎にキロ程で区切る。

- (4) 曲線毎にデータを区切る際、特記しない限り曲線の定義には緩和曲線も含める。

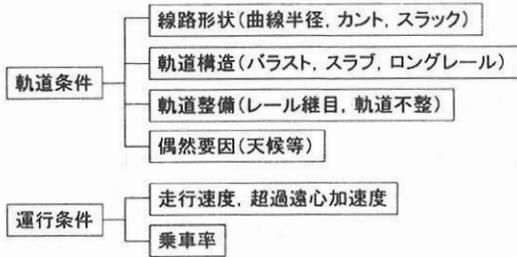


Fig.2 Factors effect on dynamic stress

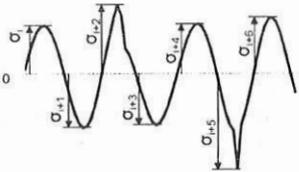


Fig.3 Peak counting by Max-Min method

4. 測定および分析結果

4.1 応力頻度分布

図4に電車1および気動車1,2の応力頻度解析結果を示す。空車(ただし測定機器と測定者は含む)での静止状態で発生する応力もしくは最頻出応力値(以下の(a)で検証する)を σ_{st} とし、これで動的応力を無次元化して σ/σ_{st} で表示した。また、それぞれの応力の発生回数を区間全体の応力繰り返し数で除し、相対頻度で表示した。

(a) 最も多く発生する応力値(最頻出応力値)

いずれの車種も、最頻出応力値 σ_{peak} は線区によらずほぼ一定だった。これは、静止状態で発生する応力と一致していた。すなわち、複数試番測定した各試番での最頻出応力値 σ_{peak} とそれらの平均値 $\bar{\sigma}_{peak}$ 、標準偏差 S_{peak} を、各車両の実測輪重値からジャーナル負荷荷重を求めて梁の曲げ計算で求めた静止状態での曲げ応力 $\sigma_{st(cal)}$ で除したものを表2に示すと、 σ_{peak} は静止応力と等しく、狭い範囲分布していることがわかる。なお本項ではサンプル数をできるだけ多くするため、表1で述べた以外の線区での試番も含めた。

(b) 走行区間による応力頻度分布の差異

車軸応力に影響する主な外力は、ジャーナルに負荷する垂直・左右方向荷重、輪重、横圧であるが、走行によ

る応力増加に与える要因としては横圧が最も支配的と考えられる。図4(a)の区間A1は比較的曲線が多い一方、区間A2は高速走行対応のため曲線は少なく、半径は大きく設計されている。また図4(b)の区間B2, B3, B4は小曲線が多い。曲線通過による横圧の発生頻度が車軸応力頻度分布の形状に影響を与えていると考えられ、走行する線区により応力頻度分布が大きく相違することがわかった。

(c) 最大応力値

図4の σ/σ_{st} の最大値と走行状況を表3に示す。最大応力は、区間分類Aでは駅構内で発生するのに対し、区間分類Bでは本線上の小曲線を比較的高速で通過するときに発生していた。区間分類により傾向が分かれることがわかった。

4.2 各種要因が車軸応力に与える影響

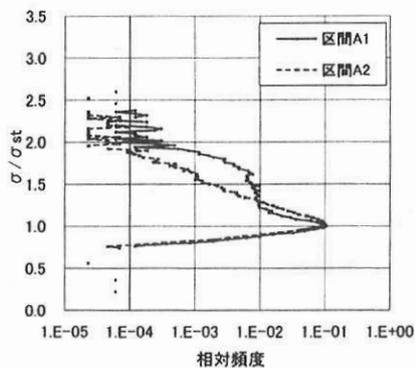
図2で示した要因のうちいくつかについて検証した結果を示す。なお、降雨で軌道がウェット状態になると車軸応力が下がることを確認しているので(横圧が低下することが原因と考えられる)、以後の検討では軌道がドライの条件のみを検討対象とした。

Table 2 Most frequently counted stress and static stress

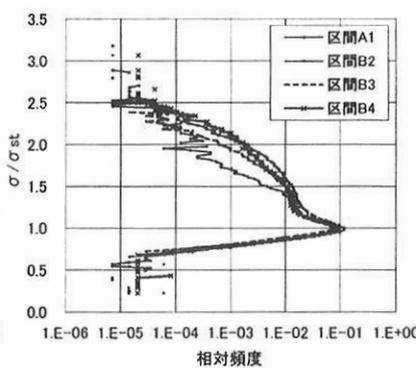
車種	試番数	$\sigma_{peak}/\sigma_{st(cal)}$ の範囲	$\bar{\sigma}_{peak}/\sigma_{st(cal)}$	$S_{peak}/\sigma_{st(cal)}$
電車1	25	0.993-1.094	1.030	0.0248
気動車1	17	0.968-1.037	0.996	0.0153
気動車2	15	1.007-1.023	1.011	0.0076

Table 3 Maximum stress and situation

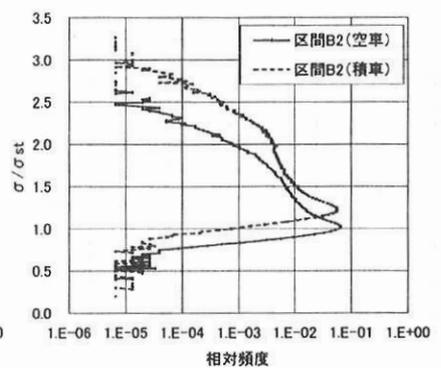
車種	区間	σ_{max}/σ_{st}	速度 km/h	発生状況
電車1	A1	2.81	42	停車駅構内 分岐器
	A2	2.52	40	停車駅構内 分岐器
気動車1	A1	2.53	112	通過駅構内進入時
	B2	3.17	78	R300m 曲線 レール継目
	B3	2.62	36	駅構内 R450m 曲線
	B4	3.06	67	R300 m 曲線 レール継目
気動車2	B2	3.21	96	R400m 曲線上分岐器



(a) 電車1



(b) 気動車1



(c) 気動車2

Fig.4 Stress histograms on different type vehicle, different operation root

4.2.1 軌道敷設状況

(a) ロングレールと定尺レール

図5に示す波形例(気動車1, R800m 曲線を約 105km/h で走行)では, 定尺レール(区間 B3)では 25m 毎にレール継目によるヒゲが輪重に表れている。外軌横圧もレール継目に合わせて増減を繰り返すような波形となっている。横圧に対応して車軸曲げ応力の振幅が増減していることがわかった。一方, 区間 A1 のロングレールでは輪重, 横圧の変動は少なく, 曲げ応力はほぼ一定である。車軸応力を頻度解析し, σ_t の平均値(以下, 平均応力 σ_{mean} とする)と標準偏差 S を求めると, 表4のとおり特に標準偏差に差異が認められた。現在のところ, 十分な標本数とはいえないので, 今後数を増やして評価する必要があると考える。

(b) スラブ軌道とバラスト軌道

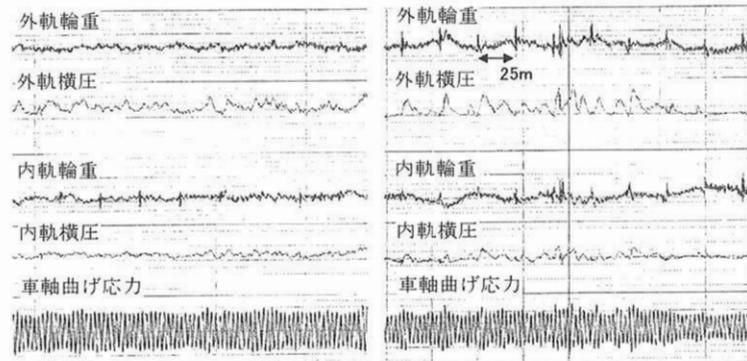
図6に示す波形例(電車2, 区間 A3 のロングレール・R600m 曲線区間を約 80km/h で走行)では, バラスト軌

Table 4 Effect of rail (R800m curve track)

レール種類	$\sigma_{mean}/\sigma_{st}$	$S/\sigma_{st(cal)}$
ロングレール	1.386	0.118
定尺レール	1.336	0.239

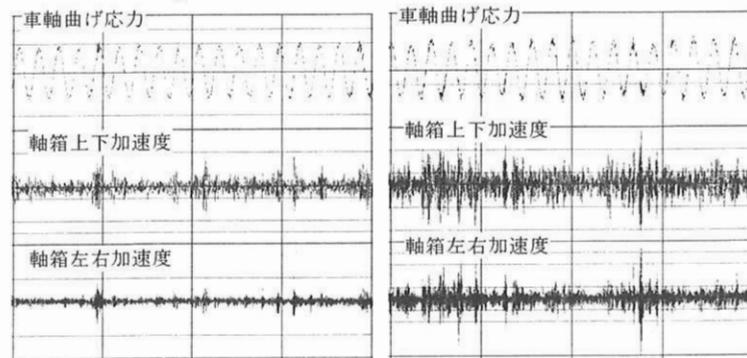
Table 5 Effect of track variation (R600m curve track)

軌道	$\sigma_{mean}/\sigma_{st}$	$S/\sigma_{st(cal)}$
スラブ	1.323	0.168
バラスト	1.358	0.176



(a) 区間 A1 のロングレール区間 (b) 区間 B3 の定尺レール区間

Fig.5 Effect of the rail (R800m curve track)



(a) 区間 A3 のスラブ軌道 (b) 区間 A3 のバラスト軌道

Fig.6 Effect of the track variation (R600m curve track)

道で軸箱振動が大きい。さらに車軸応力を頻度解析し, 平均応力 σ_{mean} と標準偏差 S を求めると, 表5に示すとおりわずかながら差異が認められた。現在のところ, 十分な標本数とはいえないので, 今後数を増やして評価する必要があると考える。

4.2.2 曲線半径と通過速度

図7および図8に気動車1, 区間 A1, B2, B3 での曲線半径と曲線通過時の平均応力 σ_{mean} , 標準偏差 S の関係を例示する。小曲線ほど応力も標準偏差も高い傾向であった。曲線半径ごとの通過速度に対する平均応力, 標準偏差の依存性としては, 図9, 図10のとおり, 応力, 標準偏差とも小曲線ほど高く, 速度依存性も高いことがわかった。この傾向は, 区間分類 A と B で大差がないこともわかった。

曲線通過においてはカント量も影響すると考えられる。速度, 曲線半径, カント量で定まる超過遠心加速度 α_{L0} をパラメータとして車軸応力を評価すると, 図11が得られる。

$$\alpha_{L0} = \frac{C_d}{G} = \frac{V^2}{R \cdot g} - \frac{C}{G}$$

ただし, C :設定カント量, C_d :カント不足量, G :左右車輪踏面間距離, R :通過速度, g :重力加速度である。なお, 本検討のみ, 緩和曲線は除き本体曲線だけで評価している。図11で明らかのように, 超過遠心加速度との相関性は低く, 曲線半径に依存していることがわかった。

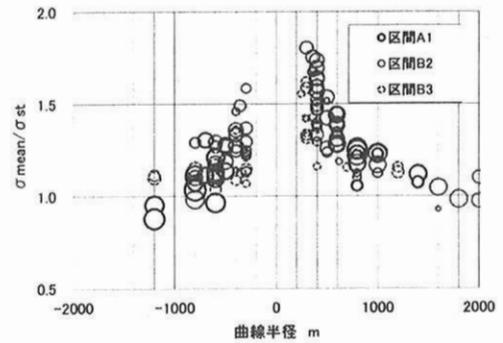


Fig.7 Correspondence between curve radius and stress (plot size shows passing speed)

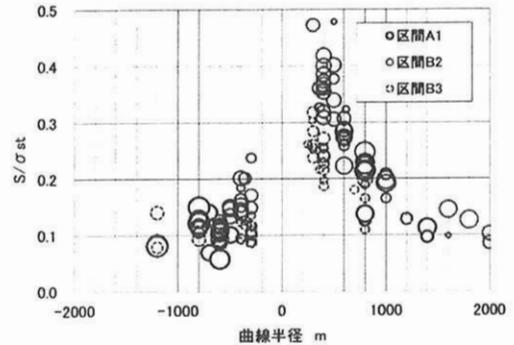


Fig.8 Correspondence between curve radius and standard deviation (bubble size shows passing speed)

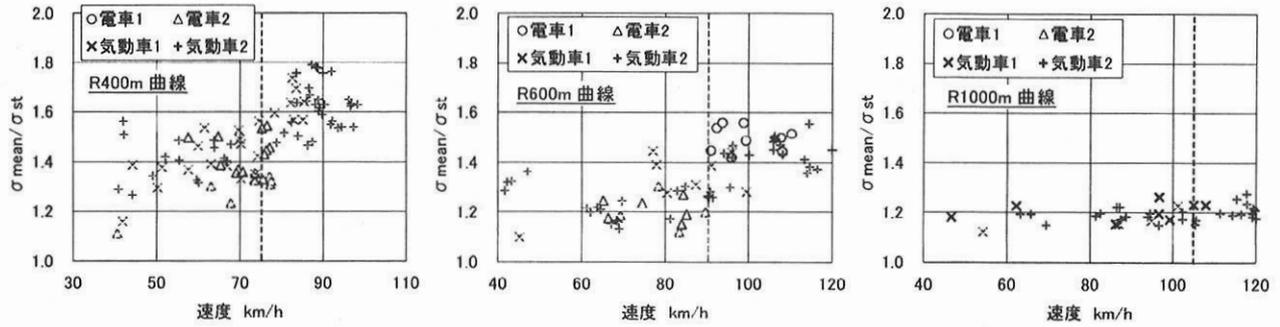


Fig.9 Speed and stress on each curve radius (solid plot: section A, dashed plot: section B)

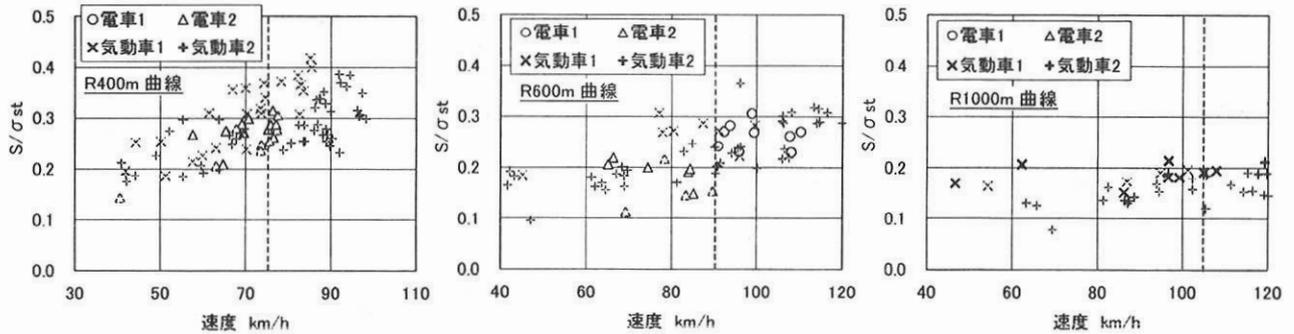


Fig.10 Speed and standard deviation on each curve radius (solid plot: section A, dashed plot: section B)

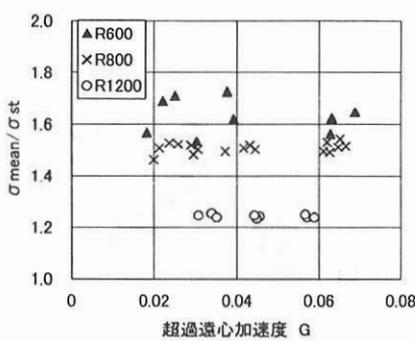
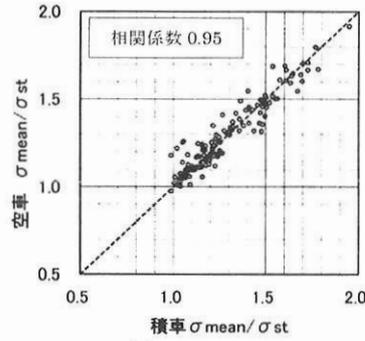
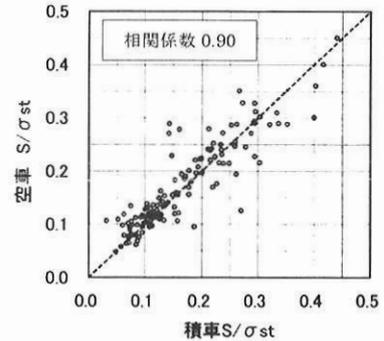


Fig.11 Excess centrifugal acceleration



(a) Mean stress



(b) Standard deviation

Fig.12 Effect of the load

4.2.3 乗車率

乗車率と動的な車軸応力の関係は線形関係にあると予測されるが、過去に実際の測定例は見当たらない。そこで、気動車2では空車および満載相当のウェイトを積載して走行した。曲線毎に平均応力と標準偏差を求め、それぞれの荷重条件における静的応力で除した値同士を図12にプロットすると、傾き1/1の直線に沿って分布し、それぞれの相関係数は0.95および0.90であった。したがって、各曲線を通過するとき、静的応力に対する動的応力の増加率は、空車でも積車でも等しいことがわかった。

5. 結言

走行中の車軸応力を測定し、以下の知見を得た。

- (1) 種々の車種、走行区間の応力頻度分布を明らかにした。
- (2) 軌道敷設状況が応力に影響を与えることがわかった。
- (3) 小曲線ほど応力と頻度分布における標準偏差が高いこと、これらの速度依存性が高いことを明らかにした。

- (4) 各曲線を通過するとき、静的応力に対する動的応力の増加率は、空車でも積車でも等しいことがわかった。

今後、得られた知見を設計、検修に反映させる手法の考案に取り組みたい。

参考文献

- 1) 例えば、中村宏、田中真一、小西正一：実働応力と疲れ強さ（その10、車軸の曲げ応力ひん度）、日本機械学会論文集 34-268, 1968.
- 2) 酒井宏樹、山村佳成、荻野智久、岩本厚、砥上靖弘、橋本通孝：営業走行車両における車軸の応力測定と強度評価（その2：実働応力の解明と分析）、第18回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2011)講演論文集, 2011.