

新幹線台車の疲労寿命・安全性

Fatigue Life and Safety of Shinkansen-truck

中 村 宏
Hiroshi NAKAMURA



●1924年2月22日生
●車軸、高周波焼入れの疲労強度、新幹線台車の研究、試験、設計に従事、船用機器ガスタービン、実働応力の疲労強度、研究管理、新テーマ開拓、現在、理工学部設立準備に従事
●正員、龍谷大学理工学研究所（〒612京都市伏見区深草塚本町67）

Key Words : Shinkansen, Axle, Fatigue Life, Philosophy, S-N diagram under σ_w , Safety, Snakemotion, Lateral Force, Vertical Force, Hum

1. 緒 言

表記の題は著者が以前から書きたいと考えていたテーマであり、快くお引きうけしたが、さて筆をとるとなかなか書きにくい大きなテーマであることに気がついたがことわるには時、既におそく勇気をふるって日ごろ感じていることを書くことにした。“群盲象をなでる”の諺のごとく、狭い一面的な見方であると思うが、何はともあれ、今日までおかげで開業以来20数年大きな事故もなく、ここまで来たことは感慨無量である。

内容は二つに分かれ、一つは開業時しばらくの間まで、国鉄在職中のことについて記し、今一つは昭和42年以降、直接国鉄には関係がないが、川崎重工業(株)に移ってから、研究し考えた疲労寿命予測と安全性についての記述である。

2. 新幹線台車の研究、設計および試験

昭和39年9月から東海道新幹線が開業されたが、新幹線車両が無事走行するためには、すべての関係箇所がうまく連係し有機的に機能しなければならないが、ここでは車両、特に台車、又その中でも輪軸のことについてのべる。

車両が高速でつつがなく走るために、種々の要求があるが、その中でも最もたいせつなのは脱

線、転覆しないことである。この要求をみとすためには、(i) 高速における蛇行動防止のように、主として運動力学的な研究と(ii) 車軸折損や車輪の割損の防止の研究に集約される。

(i), (ii)のうち、振動関係については、戦後すぐ振動研究会がもたれ、その中でも蛇行動防止の理論計算について、松平博士ら、鉄道技術研究所車両運動研究室が中心になり精力的に研究され⁽¹⁾、これらの成果を参考にして、台車の振動関係の諸元が定められた。一方、車軸などの強度、輪軸負荷関係の資料を得るために、(1) 応力測定⁽²⁾、(2) これから発展した輪軸負荷の測定および、(3) 車軸の疲労強度の研究は鉄道技術研究所車両構造研究室(室長 三木博士)が中心となり分担した。

各種の研究、計算、測定データの出現に平行して車両設計事務所を中心に車両・輪軸メーカーも交えて設計会議がもたれ、諸元が定められ、試作車両による各種の性能試験が関係各局の協同によって行われ開業に至った。これらの経過の詳細は文献(3)に譲るが、多くの出来事のうち、著者の印象、記憶に残っているものを二、三記載する。

2.1 横圧 Q 、垂直荷重 P 、脱線係数 Q/P の測定 車輪、車軸の応力測定のために、抵抗線ひずみ計やスリップリングが開発された⁽²⁾が、ひずみ計のブリッジの組み方を工夫して、車輪踏面に働く Q 、 P が測れるようになった⁽⁴⁾。

振動理論の考え方は、上記松平博士らの計算によるが、実際の車両（特に車輪踏面）の条件や線路条件の変化に対応するデータの取得は実車の測定によらざるを得ない。特に、高速車両の安全運転のための保守を安全かつ経済的に進めるためには、上記 Q および P の測定ができるようになった⁽⁴⁾ことが非常に役立ったと考えている。

2.2 左右加速度の全車両測走 $Q, Q/P$ の絶対値測定には 2.1 節で述べたことを実施する必要があるが、抵抗線ひずみ計やスリップリングの設定、又、正確な値を求めるためには輻車輪を必要とするので、常時資料をとるわけにはいかない。この代わりにものとして、左右振動加速度の全車両測定が東京—新大阪間において、4 時間運転から 3 時間 10 分運転へ移行する時期に義務づけられた。データ取得には歳月がかかるが、車両や線路の変化、保守状況の変化の状況をつかむ⁽¹⁹⁾ことができるので、地味ではあるが、貴重な資料が提供できた。又今後の高速化を計る時の好資料となるはずである。

3. 輪軸、特に車軸の疲労強度、寿命

金属の疲労の研究は、100 数十年前からなされているが、この研究の端緒は主として鉄道車両用車軸に関するものであるから、車軸の疲労の研究は最も基本的なテーマの一つである。しかし、実際に、材料、熱処理、形状、工作法、波形効果、寸法効果などを見きわめ、要求される機能を果たし、かつ経済性も考えて、“絶対に”折損しないようにする条件を定めることは決して容易なことではない。

20 年前に国鉄を退職したので、その後のことは直接知らないが、当時のことを思い出し、又その後直接車軸ではないが、機械の疲労寿命の研究や事故対策を川崎重工業(株)でもさせていただいたので、得られた知慧の一部を記述する。

3.1 車軸 車軸は (i) 過去の実績、(ii) 応力頻度、疲労強度の資料の収集、(iii) 応力頻度と $S-N$ 曲線から寿命を求め、实例にあうように設計された $S-N$ 曲線⁽⁵⁾ (実験室の研究と理論解析だけからできたものではない)などを参考にして設計された。設計方法も昭和 30 年後半までは

安全率設計で、学問的には寿命設計に移りかわる過度期であった⁽⁶⁾。

板車輪や電気機関車のたわみ板ばねの折損対策⁽⁷⁾のために、応力測定や疲労試験を行い、寿命計算結果と実寿命とを照合したところ、マイナー則（後述）では説明がつかないことが感じられた。又、当時の疲労破損事故例からみて、計算寿命と実寿命が一致するのは、数例しかない⁽⁷⁾ことを体験しており、真実のことはよくわからなかった。そのころ気をつけたこと、又その後気がついた若干の具体例を示す。

3.2 特急あさかぜの中空車軸が折損した時⁽⁸⁾

(i) 当時としてはかなりの疲労試験をし、(ii) 東京—博多間の応力測定（昭和 33 年ごろとしては最長距離）の結果もあったこと、(iii) 設計式の疲労限と測定した最大応力の比は 2 近くあったこと、から試験報告には、この車軸は“絶対大丈夫”と書いた記憶がある。しかるに、二、三年してちりよけ座（普通あまり折れたことがないので注意が不足していたところ）で 1 本折損した。いくら研究をしても、実際の体験がないと失敗することを“身にしみて”味わされた例であり、“絶対大丈夫”ということのはめつたに言うものではないことを痛感した。

3.3 疲労限度 σ_w 以下の応力が疲労寿命に影響を及ぼすこと⁽⁹⁾ 疲労寿命計算の時、次式を用いる。

$$\Sigma(n_i/N_i) = 1 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 n_i : σ_i の頻度、 N_i : き裂発生又は破断までの繰返し数、 N_i は σ_w 以下の応力に対しては ∞ である（この考え方をマイナー則と称している）。

上記の考え方は、応力振幅が一定の時には十分であるが、応力振幅が変動する時には、必ずしも正しくなく、 $\sigma_i < \sigma_w$ で N_i が有限になることがある。即ち、応力頻度 ($\sigma-n$ 曲線) のある一部が σ_w をこえていると、 $S-N$ 曲線は図 1 の ABC でなく、ABD になることがある。ABC が ABD になることの具体例としては、板車輪の例で体験した⁽⁷⁾(ABC を用いると寿命は“3000 年”, ABD を用いると“3 年”となる)。この考え方に気がつくまでには、たわみ板ばね、車軸などの实例⁽⁷⁾がでて、何かわれわれが見逃していることがあるの

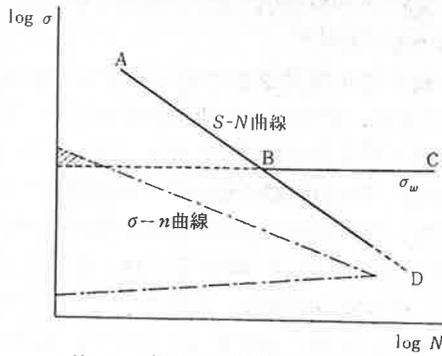


図 1 疲労寿命計算法の説明図。

ではないかと気づき、基礎実験で確かめるまで、10 数年の歳月を経た。変動荷重、重畳波形、間欠波形の実験⁽⁹⁾をここ 20 年ぐらいやってきて、今では図 1 の ABD のほうが ABC より実際に近いことを理解できるようになったけれども、40 年の疲労強度の研究の約半分の歳月は疲労限の研究にこだわっていたことを省みると、随分まわり道をしたように、今になって感ずることである。

3.4 基礎実験の不足 現在では、差しあたり疲労寿命計算には図 1 の ABC の代わりに ABD を用いればよいとしてはいる⁽⁹⁾が、よく考えると ABC から ABD になることを実証する実験（変動荷重や重畳波形）は時間がかかるので、さほど多くなく、特に切欠試片や圧入試片の資料は少なく、又普通の鋼以外の材料〔表面硬化材⁽⁹⁾や新材料〕についてのデータはこれまた非常に少ないので、基礎実験をもっと追加すべきと考えている。

3.5 寿命予知 疲労寿命は元来、対数表示をしてもなおかつばらつきがあるから⁽⁷⁾、使用者や乗客が望むように正確に予知することは学問的には無理なことである（注 1）。しかし、車軸の場合、人命に関係するから、何としても、寿命を正確に予測し、早めに手を打たねばならないが、一方経済性も考えその兼ねあいをどこへ持っていかかがポイントになる。

4. 他の機械の疲労寿命

鉄道車両の安全性や疲労寿命を検討する時に、

（注 1） 1 けたくらいのくるとすぐでてくるが、人間にとつては大きい影響がある。

車両そのものを研究することはもちろん重要であるが、他の機械の情報も参考になる。その理由は 3 章でのべたように、実験室の基礎研究や理論計算もたいせつであるが、小さい応力で長い時間をかけ、又複雑な波形や高温、腐食、焼食など環境の影響や実物特有のかかわりを考慮に入れ、相互作用を加味した実験は容易に実施しかねることにある。即ち、機械の実例⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾に多く触れ、できれば、傷が入ったり、破損のたびに応力測定や疲労試験を行い、それらの資料から判断情報を得ることがたいせつである。むしろ実例についての支えがないと、自信をもって結論を下せるほど基礎研究は発達していないと言えよう。

さて、著者の体験した実例⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾としては、次の例があり、判断の時の参考になった。たわみ板ばね、車両用歯車、台車枠、船用歯車、ピストンクラウン、プロペラ、送風機の翼（腐食疲労のからんだ σ_w 以下の S-N 曲線、繰返し数 10^{12} で応力 1 kg/mm^2 前後で壊れている例）、ガスタービン翼などである。

5. 寿命、安全性の研究、体験から得た人生哲学

研究、設計、製作、運用および長期間の社会条件の変動などを考え、必要かつ十分に重大事故が発生しないようにするにはどのようにすればよいか、初期決定は自由度があるだけに迷う。新幹線はその後の多くの人々の努力⁽⁹⁾により、現在に至っているが、著者の考えの一端をのべる。

5.1 使用走行 km をいくらかにおさえるべきか
開業当初の著者の考えでは約 10 年、約 300 万 km 程度以上（繰返し数で 10^9 ）使用したらよからうと判断した。その理由としては次のことを勘案した。(1) この走行 km は貨車車軸で約 100 年、電車で (20~40) 年に相当し、自動車の約 10 倍である。又車軸だけでなく歯車の摩擦限界や車軸の検査のために車輪を抜いているが、この時の損耗その他を総合して考える。(2) 通常疲労試験は 10^7 回まで実施するので、繰返し数で 100 倍ぐらいまでの推定は許されよう、又残留応力の減衰に対する経年変化の問題はよくわかっていないから、あまりそれ以上無理をしないほうがよいので

はないかということ。(3) ちなみに動物の寿命と比較するのはどうかと思われるが、ほ乳類の脈はく数は最高寿命に対して 10^9 (人間のみ 4×10^9)であるから、車軸も 10^9 使えばよいであろう。

5.2 折損防止対策 折損事故を防ぐために種々のことが考えられた。そのうちの一、二の例を示す。

(1) 車軸は車輪圧入端部にまず焼食により微小傷が入り、その傷が進展して破断に至る⁽⁸⁾ので、まず傷を見つけるための最大限の努力をしている。即ち、頻繁に超音波探傷で調べ、修繕工場に入った時に車輪を抜いて、超音波探傷ではみえぬ小さい傷の有無を磁気探傷で調べている。又X線でも表面の残留応力の推移を調べて品質管理に役立っている⁽¹¹⁾。

(2) 以前に、12t長の貨車車軸は応力が若干大きいために、かなりな数にひびが入っていて、超音波探傷でチェックしていたが、いわゆる“停留き裂”でありき裂はすすまないはずのものである。しかしたまにき裂がすすみ、折損することが1年に3~4本あった。き裂がすすみ、破断したものについて調査してもほとんど材質に異常がなく、よくわからないことが多かった。とにかく、各種の原因が競合して折損したものと考えられた。要するに、1万分の一又は10万分の一の確率のものは、原因をはっきりつかむことは難しく、できるだけ安全側に諸条件を設定することである。従って、性能上許す限り材料を強化し〔新幹線車軸は高周波焼入れ⁽¹⁰⁾をしている〕応力を下げ(これは重くなるので限界がある)、歳月と共に蓄積される貴重なデータを逐次生かしていくことである。

5.3 機械の寿命と人間の寿命との関連の研究から得られた哲学 上記のように40数年間、疲労寿命の研究に携わってきたが、非才の故にまだよくわかっていないことが多い⁽⁹⁾。しかし、それでも(i)見方によれば比較的恵まれた環境で研究し、又多くの機械の事故例に遭遇できたことは幸いであった。(ii)小学校、中学校、大学の親友が室戸台風、東京の空襲、又フィリッピン、沖縄で戦死しており、著者自身も大阪、西宮の空襲で紙一重で3回命びろいをしたこと。(iii)安全を絶対要求される新幹線の車軸の研究にかかわるこ

とにより、機械の寿命とは、人の命とは、安全とは何かと考え、数多くの体験を通じて到達した哲学と申しましようか、考え方は次のようである。

すなわち、機械にも心がかよひ、たずさわる人々の誠が天に通じる時にはうまくゆき、大事故にはならない。逆に言えば、やれやれと安心し、心がおごったり、人の心や組織にすきまができる^(注2)と不思議に事故が起こっている。言いかえれば、機械も生物、人間と同じように考えられないかと。この考えが認められれば、機械(無生物)で得られた智恵の一部は生物(人間)の研究(ヒューマンサイエンス)理解に役立つし、又生物、人間で得られた情報は機械(物質)の今後のあり方に示唆をあたえるであろう。

このような考え方は、昔はなかったのかと調べたところ、昔の人が“山川草木悉皆成仏^{(13)(14)(注3)}”という言葉のをこしていることがわかった。この言葉を信ずれば、山も川も(無生物)草や木(生物)も差はなく、すべて仏になる。即ち、生きているということである。その考え方は一見突飛のようにみえるが、時間にしても、大いさにしても、オーダの違いで、例えば 10^{-10} cmのオーダのものを考えると、人間も岩石も鋼も連絡可能、通じあうことができるという考えである⁽¹⁶⁾。

又、無生物と生物は決して断絶的でなく、ウイルスのようにある時は無生物(結晶)ある時は生物(たばこの葉ウイルス)であるから⁽¹⁷⁾、これを媒介にすると無生物と生物は連続してつなげることができる。

前述した繰返し数 10^9 や 10^{12} 、又 10^{-10} という数字は見方によれば天文学的数字であるが、疲労寿命を研究する立場からみれば図1に示すように、横軸は対数で示すのでそれ程違和感はない。

要するに、できるだけ科学的に事をすすめるけれども、科学でわかる範囲は自然のごく一部分であり、実物の実験(人間で言えば生きたままの試験)又長時間の研究はなかなかなく、寿命予測の学問はそれほど進歩していないから、理由はわからなくても、実際にあらわれた結果をまず

(注2) 「天網は恢々として疎にして漏らさず」(老子)⁽¹²⁾という言葉がある。造物主のみえないネットワークがはられていて、言葉も心も通ずる事例を機械部品の事故などで体験した。

(注3) 草木国土悉皆成仏という言葉が謡曲にてでくる⁽¹⁵⁾。

尊重し、そのために少しでもかかわりのある事象は最大限に活用し、加速度的に情報を増やしたらよいのではあるまいか。この意味で森羅萬象^{しんらばんしやう}すべて、大なり小なり何らかの関連(縁)があると考へて、お互い垣根をつくらず助けあい、人間も動物、植物も又自然も本当のしあわせをつかみたいものである。ただ理想はそこにあつても、過去からのもろもろの累積が物にも心にもあり⁽¹⁸⁾、これらの束縛から脱しきれないのが人間であるからできにくいことであろう。人間は、科学、技術、情報とあくせくして進歩しているつもりであろうが、どうどうめぐりをしているような気がしてならない。何か眼を開いて一つ大きく高いものはつかめないものであろうか。それとも、何かわからないが、多くのむだをした後に光明が見えるのかもしれない。

6. 結 言

標題のことについては、詳しく書かないと誤解を起こすおそれがあるが、紙数の制限から一部しか書かなかつた。詳しくは参考文献などを読まれ、意とするところを汲んで頂きたい。

機械の疲労寿命と人間の命、安全⁽¹⁹⁾と結びつけ、疲労現象を社会現象、人間と結びつけると、非線形性⁽⁹⁾⁽¹⁶⁾、時間論⁽²⁰⁾、繰返し効果(右脳と左脳の問題)⁽¹⁴⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾長時間かかる研究が残っている⁽¹⁹⁾などの点で共通性がある。従つて、疲労寿命の研究や新幹線車軸での体験を人間のあり方に結びつけて⁽²³⁾、人として歩むべき道の模索に少しでも役立てば幸いである。

文 献

- (1) 例えば、松平、機論、19-87(昭28)、135。
- (2) 中村(和)・ほか2名、鉄道業務研究資料、13、11(昭31)、1。
- (3) 例えば、鉄道技術研究所監修、高速鉄道の研究、(昭42-3)。
- (4) 小西・中村、機論、25-151(昭34)、221。
- (5) 中村、疲労強度研究こぼれ話、機械設計、29-3(昭60-3)、139より、31-14(昭62-10)、139まで。
- (6) 永島・中村、機論、17-63(昭26)、54：田中、機誌、87-790(昭59)、1056。
- (7) 中村・田中、機械の疲れ寿命算出法、(昭47)、養賢堂。
- (8) 中沢・中村、軸と軸継手の設計(昭41)、オーム社。
- (9) 中村・ほか3名、機械の疲労寿命設計、(昭58)、養賢堂。
- (10) 中村、高周波焼入と疲労強度、(昭38)、日刊工業新聞社。
- (11) 石井、機誌、82-726(昭54)、468。
- (12) 中村、日本機械学会編、技術のこころ一二、(昭60)、55、丸善。
- (13) 梅原、聖徳太子一IV、(昭60)、196、小学館。
- (14) 中村、機械の研究、38-6(昭61)、709。
- (15) 磯部、日本人の信仰心、(昭58)、178：41、講談社現代新書。
- (16) 関、サイ科学の全貌、(昭56)、工作舎。
- (17) 日沼、新ウイルス物語、(昭61)、83、中公新書。
- (18) 太田、凡夫が凡夫に呼びかける唯識、(昭60)、大法輪閣。
- (19) 黒岩、JREA、24-11(昭56)、1。
- (20) 梅原、佛教の思想、下、(昭55)、230、角川書店。
- (21) 中村、舶用機関学会誌、21-9(昭61)、511。
- (22) 角田、続日本人の脳(昭60)、大修館書店。
- (23) 中村、機械の寿命推定、舶用機関学会講習会資料、(昭62-6)。

(原稿受付 昭和62年5月1日)