

Title	1930~'60年代前半における本邦鉄道車軸とその折損事故について(1/2)
Author	坂上 茂樹
Citation	経済学雑誌, 117 卷 2 号, p.1-41.
Issue Date	2016-09
ISSN	0451-6281
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	Publisher
Publisher	大阪市立大学経済学会
Description	
DOI	

Placed on: Osaka City University

1930～'60年代前半における本邦鉄道車軸と その折損事故について (1/2)

坂 上 茂 樹

目 次

はじめに

1. 戦前期……鉄道省と南満洲鉄道における車軸とその折損事故
2. 復興期日本の鉄道車軸とその生産技術体系
3. 復興期の国内鉄道路線において多発した車軸折損事故（以上、本号）
4. 在来線車両への中空車軸採用……大物車・“あさかぜ”客車・“こだま”型特急電車
5. ブルートレイン 20 系客車における車軸折損と中空車軸の後退
6. 東海道新幹線へ
7. 戦後国鉄の機械式ディーゼル動車における車軸折損事故について
むすびにかえて

はじめに

鉄道車両の命である車軸に生ずる折損事故の原因としては材料不良、工作不良、疲労・腐食が挙げられ、かつ、それらが幾つか競合して事故へと至る場合がほとんどである。車軸折損は重大運転事故に結び付きがちであるが故に、八方手を尽くしたその抑止策は鉄道車両の運用に際して最も肝要な保安項目となっている。

平川賢爾『ドイツ高速鉄道 ICE-3 ケルン脱線事故：鉄道用車軸の金属疲労はなぜ起こったか』（慧文社、2009年）はこの方面に関する工学的論文であると同時に 5W1H を押さえた車軸折損事故の技術論ともなっているが、誠に残念なことにその内容はタイトル通り外国のことばかりである。この点に関しては車輪やレール破損事故に係わる平川氏の他の著作についても同様である¹⁾。

車輪と言え、まとまった邦語文献としては平川氏の住友金属工業時代の同僚、坂本東男氏

1) 平川『ドイツ高速鉄道脱線事故の真相 — 技術者の責任論から』慧文社、2006年、『英国高速鉄道ハットフィールド脱線事故の真相 — レールの金属疲労は何故起こったか』同、2008年、平川・久保田祐信『欧米鉄道脱線事故 — 鉄道用車輪の金属疲労の諸事例』同、2010年、参照。

による『鉄道用車輪の破壊に関する研究』（私家版，1986年，'87年に大阪大学博士論文）をも挙げることが出来る。但し，その内容は平川氏の上記著作に輪をかけて純工学的であり，車輪に係わる事故の技術論を筆者の如き素人が導き出すべき糸口は見出せない。

しかし，わが国においても車軸や車輪に係わる事故や事故一步手前の状況は現に永年に亘って繰返し生起して来たのであり，素人代表(?)としての，あるいは乗るのは大方，日本の鉄道ばかりである筆者如きが知りたいのはむしろ国内における事故や事故寸前の事態の具体的記述であり工学的分析であり採られた対策についての解説……悪く言えば国民かどのような格好で持参金付モルモットにされて来たのか……である。

本稿は輪軸技術一般については旧稿「20世紀前半アメリカの鉄道輪軸について」（大阪市立大学学術機関リポジトリ掲載）を前提としつつ，これまで参照された形跡の無い工作局『車軸折損について』（1959年5月）なる資料を活かすことにより，戦前～戦後復興期から成長期，東海道新幹線に至る前の本邦鉄道における車軸折損事故とそれに対する技術的諸施策について，やや体系的な概観を試みようとするものである。

1. 戦前期……鉄道省と南満洲鉄道における車軸とその折損事故

1) 鉄道省関連の事故データ不足

戦前期の我国における鉄道車軸関連の工学文献の中には期待して繙けば海外文献の単なる抄録に過ぎなかった，という例が結構，存在する。勿論，それらにも工学的価値は備わっていたワケであり，鉄道省の笹村越郎，北島顯正，山口貫一の他，ペンネーム K. T. の文章がこれに当たっている²⁾。

日本人技術者自身による輪軸絡みの独自研究としては鉄道大臣官房研究所の池田正二による車軸強度の研究や住友金属工業の永島菊三郎によるスポーク輪心の強度についての研究を挙げることが出来る。しかし，それらは通常構造の電車車軸（図3，左）における折損事故が車輪座と歯車座との中間部（内ボス）に多発することを純工学的・材料力学的に研究した，あるいは車輪に係わる材料力学的諸力について研究した学術論文であって具体的事故例への言及は見られない³⁾。

2) 笹村越郎「鐵道車輛の車軸折損に就て」2（『機械學會誌』Vol. 35 No. 184, 1932年）はドイツでなされた研究の，北島顯正「車軸の折損と車輪の圧入に就て」（『機械學會誌』Vol. 38 No. 220, 1935年）は円錐コロ軸受の Timken とミシガン大学との共同で推進された研究の，K. T. 「組合せ曲げ及び振りを受ける車軸の疲労破損」（『造船協會雜纂』1938年2月号）はイギリスでなされた研究の，山口貫一「車軸の疲れ傷の影響」（『機械學會誌』Vol. 33 No. 156, 1930年）はアメリカイリノイ大学で為された研究の紹介である。

3) 池田正二「車軸の輪心嵌入部に作用する反覆内力と車軸設計の基準」（『機械學會誌』Vol. 36 No. 190, 1933年，永島菊三郎「輻車輪の強さに關する研究（第1報）」『機械學會論文集』第2巻第9号，ノ

戦前期における車軸関係事故のデータとして唯一例外的な質を備えているのは既に“時効”になったとの判断の下に戦後、漸く引張り出されたと思しき次のような私的蒐集物だけである。

表1 昭和7年頃運輸省折損車軸例(池田博士のしゅう集)

発生年月	車号	折損箇所	使用開始年月
6-10-24	モニ 3012	歯車輪心間	鍛成 大正 12-5
6-10-28	モハ 31035	〃	かん入 昭和 4-9
6-11-17	〃 10061	〃	〃 昭和 2-10
6-12-8	〃 30103	〃	〃 昭和 4-9
6-12-10	〃 30008	〃	〃 大正 11-8
6-12-14	〃 31051	〃	〃 昭和 4-7
7-5-14	〃 31054	〃	—
7-5-25	〃 1044	〃	鍛成 大正 12-5
7-9-12	〃 30105	〃	〃 大正 12-12
7-9-22	〃 30105	〃	かん入 大正 13-4
7-10-29	〃 10032	〃	〃 大正 13-12
7-11-12	〃 30197	〃	〃 大正 13-10

中村 宏「車軸の強度(第2号)歯車輪心間の強度について」『鉄道業務研究資料』Vol. 8 No. 9, 1951年4月, 第2表。

2) 満鉄における車軸とその折損事故

そこで、筆者としては戦前期のわが国に係わる情報開示として国有鉄道関係より遥かに良質の資料が残されている点に鑑み、“外地”の代表たる南満洲鉄道(以下、満鉄)の事蹟紹介を以て読者の御寛恕を願わざるを得ない。

満鉄鐵道技術研究所技師、菊地 清に拠れば満鉄においては内地、ドイツ及びアメリカ製の車軸が使用されていた。満鉄における車軸折損事故は大部分が貨車において発生し、機関車炭水車車軸がこれに次ぎ、客車車軸の折損はごく稀であった。1938年10月16日、朝鮮京釜本

↘1936年, 同「力嵌めした軸の疲限度特に鉄道車輛用車軸の疲限度に就て」『日本機械學會誌』第42巻第262号, 1939年1月, 「同」『日本機械學會論文集』第5巻第18号, 1939年2月, 「スポーク輪心とタイヤの焼嵌め圧力を一様にする焼嵌め代に就て」『日本機械學會誌』, 第43巻第284号, 「スポーク輪心とタイヤの焼嵌めに就て」『日本機械學會論文集』第6巻第25号, 1940年, 参照。因みに、永島はスポーク輪心の材料力学に係わる彼の研究を戦後、第6報まで継続している。海外の技術動向に詳しい優れた、それもメーカーの技術者が何故、かようなテーマにかくも拘泥し続けたのか不思議でならない。

線上にて奉天行き列車の2・3等寝台車車軸に生じた車軸折損と'39年1月10日、安奉線上にて鮮満支直通列車の手荷物車に生じた折損とが目立った例であるという。菊池は車軸の折損が貨車において頻発したのは貨車の両数が突出していたことに加えて貨車車軸の安全率が比較的 low に計上されていたためではないかと述べている。満鉄はタイヤの破損事故に悩まされていたが、車軸については当時、折損事故が頭打ちから減少に転ずる傾向が観察されていた⁴⁾。

車軸の折損部位としては図1にも反映されている通り、中央部・中央平行部とテーパ部との境界付近がかなり多く、これに続き、車輪間の左右何れかに偏した箇所、車輪ボス内側(上記の寝台車車軸がこれ)、ジャーナルの根元(盛金溶接で補修した軸に特に多発)、ジャーナル中央より根元寄り(発熱車軸)、というようなところであった。'38年にアメリカから購入されたB軸は「昨今頻々として此の附近より折損し或は断裂を発生する」とある。本件については後程、詳しく紹介しよう。

折損原因としては材料欠陥、鍛造ないし熱処理不良、ジャーナル根元の盛金補修、車軸の発熱(軸受焼損)、取扱い不備に因る外傷や不適当な打刻等が挙げられた。軸焼けによる車軸折損は車軸軸受側のトラブルであり、これが発生すれば車軸の側に対抗する手立ては無く、現在でも厄介な事故であり続けているが、多くの場合、一つの折損事故には複数の原因が錯綜していた。もっとも、図1(1, 5)に示されるような材料欠陥に直接・間接に起因する事故例は少数であった。また、実際の破断面のほとんどには図1(3)に示されるような疲労破壊の相が現れていたが、その出発点たる疲労亀裂の発生要因や成長要因の判定は通常困難とされた。

発熱車軸は軸受メタルの焼損によりジャーナルが高温に曝され、最も温度が高くなるその中央よりやや根元に近い辺りに熱亀裂を生じて折損へと至るケースであるが、走行と停車の繰返しによる熱サイクル疲労を伴う場合もあった。表面から入った亀裂は多くの場合、ある深さで枝分かれしており、浅い部分の金属組織は高温により変態を来していた。強度の低下によって大きな変形を生ずるために生じた亀裂も観察されたが、折損の主因は熱亀裂にあった。発熱車軸として材料試験に供された個体5本は1909年クルップ製1、1924年住友製鋼所製2、不明2であった。

熱亀裂発生部位は比較的低い応力が作用する部位であるため(後掲図6、図7、参照)、亀裂を生じてから折損に至るまでにはかなりの時間経過を要するため、定期入場の際などに発見し、折損が未然に防がれる場合が多かった。また、仮令、折損してもその部位故に事故は内ボス付近や中央部折損の場合よりも「比較的軽微に終る」ことを特徴とした。

溶接盛金車軸における折損事故はジャーナルの摩耗補修用盛金工事時の加熱によって車軸材料表層部に変質を来し熱応力が残留せしめられその疲労強度が低下せしめられることを原因

4) 以下、菊池 清『毀損せる鐵道車輛鋼製部分品の破面寫眞及其の説明』南滿洲鐵道(株)鐵道總局、1939年、1～41頁、参照。

とし、比較的応力値の大きいその根元部に多発した。事故リストには貨車・炭水車車軸のみならず、撫順炭鉱用の1916年沙河口工場製F50噸電気機関車、'18年GE製50噸電気機関車の各動軸といった顔触れが並んだ。かくて、この問題は満鉄鐵道技術研究所によって取り上げられ、その報告に依拠して鐵道部は盛金補修の施工を禁止あるいは制限し、1928年以降、この種の事故は根絶された。なお、車輪圧入代を稼ぐためか、車輪座に溶接盛金を施された貨車車軸1本も内ボス折損に至っており、この不適当な過去の補修事蹟を発覚させる結果となっている。

材料に起因する車軸折損は上述の通り僅少であったが、これには本来の材料欠陥によるものと鍛造や熱処理における瑕疵に起因するモノが含まれた。リムド鋼に係わると思しき材料欠陥としては著しいSとCの偏析、機械的強度の著しい不均一が挙げられており、亀裂は内部から成長し折損へと至っていた。別件につき「収縮管の遺存」とあるのは収縮空孔の謂いで恐らくキルド鋼に係わるそれであろう。これも材料内部の欠陥であったが、折損の副因となっていた。

造塊に際し溶鋼へのMn等の添加により軽度の脱酸を施して造塊した0.15~0.25%炭素鋼はリムド鋼と称された。そのインゴット内部には気泡が散在し、その周囲にP、Sといった不純物が偏析し、それらの偏析が著しい部分は“ゴースト・ライン”、Sのそれはサルファ・バンドと呼ばれ、何れも成品亀裂の原因となった。また、凝固が早く炭素含有率の低い外層部は“リム”と呼ばれた。リムド鋼は収縮空孔を生じず、内部に分布する気泡も圧延、鍛造を通じて圧着除去されるため歩留まりは高かった。

他方、キルド鋼と称されたのは溶鋼への主としてSiの添加(0.3%程度)により強制脱酸を促した0.25%C以上の中~高炭素鋼である。Siの添加により凝固中のCとOとの反応に因るCOガス気泡の発生が抑制され、機械的性質が高められる反面、気泡膨張に因る支えの無い分、インゴット上下部に大きな収縮空孔を生ずるため、一般に当該部分合計8~30%は切除されねばならなかった。Siの添加により気孔発生を抑える技術は古くから鑄鋼の品質向上策として行われてたが、1930年代にはこれが造塊工程に導入されてキルド鋼なる呼称が用いられるようになり、「高炭素鋼車軸」、高張力鋼、熱間圧延鋼板等に用いられ始めていた⁵⁾。

また、両者の中間物は半キルド鋼と称された。機械的性質はキルド鋼の方がリムド鋼より降伏点、抗張力の点で若干優り、伸びはやや低く、対クリープ性、対衝撃性に優れた他、Alをも添加したキルド鋼は焼入れ時効の現れ方が小さいとされた⁶⁾。

5) A., W., Judge・浅川勇吉他訳『工業材料』第1巻、訂正再版、コロナ社、1937年(原著1929年)、74頁、島村哲夫『分塊壓延法(壓延法)』共立社實用金屬材料講座、1937年、3~7頁、参照。

6) 岡本正三他『機械材料』上巻、日本機械学会、1954年、84~86、106、108~109、125~126頁、参照。

なお、分塊工程を廃した連続鑄造法によって分塊に伴う上のような問題は解消され、均質かつ健

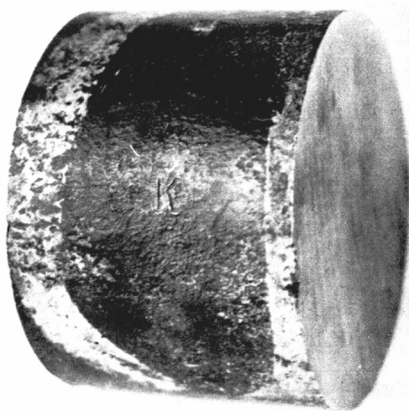
「結晶粒甚粗鬆」との診断が下った個体も存在した。これは「鋼材製造上の缺陷及熱處理の不適當」をも窺わせた。また、深い縦亀裂の周辺組織に酸化脱炭が認められるものは鍛造の際の亀裂発生を暗示していた。また、「満洲舊政權時代に購入せられた車軸」の表面に無数の浅い縦亀裂を生じたものが多くあり経過観察に付されたが、その原因も製造欠陥と推定された。材料欠陥として材料試験に供された車軸6本の内、メーカーが判明しているのは1909年クルップ製の1本のみである。

疲労破壊には疲労亀裂の起点がある。上述した輸入後1年に満ためアメリカ製B車軸は先ず数本が折損し、次いで中央部に横亀裂の入るものが頻々と現れ、約20を数えるに至った。鐵道技術研究所にて8本を調査したところ、亀裂や折損はその中央に冷間打刻されたK、LあるいはMの文字の縦棒が軸芯と直角方向になっている箇所から成長している事実が磁気探傷によって明らかにされた。加工硬化に因る脆性と応力集中とが微小亀裂発生の直接的原因と目された。

この車軸の折損・亀裂発生件数は「第1位を占むる」ものとも目された。それは本数の多さもさることながら常用応力の過大、換言すれば安全率の過小に真の原因があると考えられた。これは明らかな設計不良であった。図2の1、2は車軸中央部を切取ったピースであり、肉視

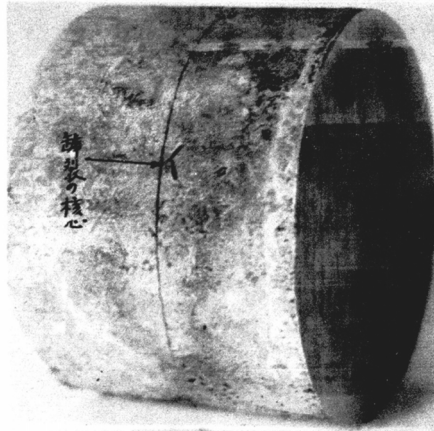
図2 アメリカ製B車軸中央部、刻印“K”と亀裂発生

1. 車軸表面の刻印



肉眼にては刻印Kの附近に発生せる横罅裂の検視困難なり、本刻印は製鋼番號を示す爲の標識と想はる

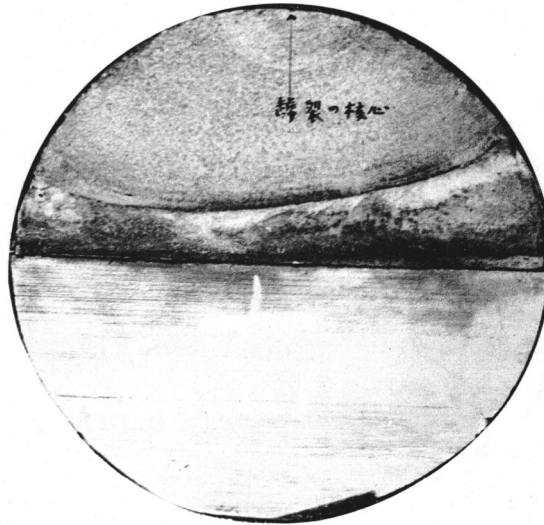
2. 刻印に沿ふて発生せる横罅裂(電磁探傷器による)



左圖の車軸を電磁探傷器により瞬時磁化し鐵粉により罅裂を顯出せるもの、圖中矢の先端は罅裂の核心を示す。

ㄨ 全な粗材が得られるようになる。また、鋼の二次精鍊に関しては真空脱ガス法が開発され、やがては連続鑄造法において純酸素上下吹き転炉と連鑄装置の間に位置付けられるようになる。橋口隆吉編『金属学ハンドブック』朝倉書店、1958年、623～626頁、作井誠太編『100万人の金属学〈技術編〉』アグネ、1966年、29～34頁、参照。

3. 疲労破壊面



車軸横断面の約半分を機械にて切断したる後横罅裂に沿ふて破断分離せるもの、疲労罅裂の起點は圖中矢にて示す一點にあり。

同上書, 183 頁, 第 103 圖 1, 2, 3。

不能な亀裂が磁気探傷により“K”の縦棒に沿って円周方向に走っている状況が明らかにされた状況が示されている。また、図2の3は当該ピースを反・亀裂側から亀裂を延長した面で半ばまで切断後、左右に引きちぎって破断面を見たもので、“K”の“|”と“<”との接点が亀裂の起点となり、そこから年輪状に疲労亀裂が見事に成長して行った痕跡が示されている。将に“蟻の一穴”と言えようが、安全率の不足もまた明らかであった。

この他、疲労亀裂には軸表面の打痕を起点とする場合や、切欠き（断面積変化）部の段付き摩耗部やバイト目における応力集中に起因する場合、盛金部の気泡や残留応力に発端が見出される場合、材料欠陥、圧延・鍛造欠陥に由来するモノなどがあり、その発生態様は区々であり、それら諸要因の錯綜はごく普通に観察される事象であった。また、菊地は車軸の疲労破壊は線路の状態、運行状態によっても左右される現象であると述べている。

2. 復興期日本の鉄道車軸とその生産技術体系

1) 復興期の国鉄における車軸関係事故データ

一方、戦後の事蹟となれば、同時代の研究論文、書物、から情報断片を集めることは可能であるし、新幹線 1961 年 4/25 事故については当時、国鉄鉄道技術研究所にあって戦後、この方面の開発に指導的役割を演じた中村 宏らの著作物等を参照することも可能である。しかし、

それらは事故情報の取り上げ方が包括的でも体系的でもない上、精粗区々である⁷⁾。

例えば、次のデータは私鉄のみに係わるモノで、何故か当然のようにその車両は「電車」とされているが、部位別については単に「車軸」の一括りである。

表2 私鉄の車両事故件数(1947年1月～'48年9月)

原因	件数	百分率
車軸折損	81	49.7
制動装置不良	17	10.4
車輪輪縁摩耗	12	7.4
歯車函脱落	12	7.4
担ばね折損または脱離	8	4.9
聚電装置不良	7	4.3
車輪輪縁欠損	3	1.8
車輪輪縁弛緩	2	1.2
その他	21	12.9
計	63	100.0

永島菊三郎・中村 宏「電車車軸の強度について」『日本機械学会論文集』第17巻第63号, 1951年, 第1表。

同じ文献の第2表は車軸折損の部位別比率を掲げたものであるが、こちらの対象は一転して国鉄及び私鉄となっている。時期に幅(起点と終点)があるのか、正味この1箇月分なのかについては不明であるが、幾ら復興期とは言え1箇月に510本でもあるまいから戦後の集計であろう。また、左右車輪内ボス部が示す高い比率は内地鉄道線路に占める急な曲線部の割合が満鉄のそれなどより遥かに高いことの反映のように想われる。

表3 国鉄・私鉄電車における車軸折損部位別比率(1949年10月現在)

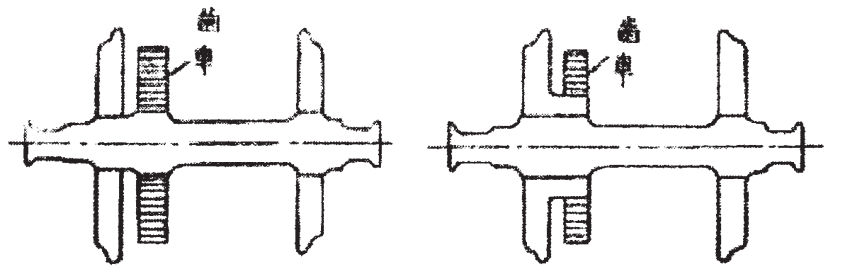
	折 損 箇 所						計
	歯車 輪心間	歯車反対 側ボス付根	ジャー ナル	電 動 機 座	中 央	不 明	
折損数	231	57	30	24	10	158	510
百分率	45.2	11.2	5.9	4.7	2.0	31.0	100

同上, 第2表。

7) 時期は離れているが、代表的単行書は廣重 巖『輪軸』(交友社, 1971年)、高速車両用輪軸研究委員会編『鉄道輪軸』(丸善プラネット, 2008年)である。前者は業界で永らく“バイブル”と称されて来た文献であるが、その実質は中村 宏らの研究と工作局『車軸折損について』とを巧くカクテル化した著作である。

なお、'49年当時の私鉄電車の動軸と国鉄電車動軸の一部（M-5=ED4641〔'33〕，M-7=ED4721〔'46〕）とでは次図に示されるように設計が大いに異なっていたのであって、この意味からも両者一括表示の意義は薄まらざるを得ないのである⁸⁾。

図3 私鉄電車と戦前派国鉄電車の一部とにおける動軸構造の相違



私鉄電車動軸

国鉄電車動軸 M-5=ED4641、M-7=ED4721

中村前掲「車軸の強度(第2号)」, 第1図。

中村はこれと同じ論文の中で国鉄電車車軸折損箇所調べとして次のような数値を掲げている。こちらは約5年間のデータであるらしい。電動機座というのは吊掛け式駆動であるため電動機重量の約半分が車軸にもたれかかる部位であり左右2か所ある。勿論、そこには軸受が設けられていた。

表4 国鉄電車車軸折損箇所調べ(終戦後昭和25年10月現在)

電動機座		ジャーナル
歯車側	歯車反対側	
6	8	2

同上, 第1表。

一方、次表に見る国鉄貨車車軸における折損部位別データは時期の取り方が広いことは良しとして、個別事故の5W1Hや原因分析などとは一切無縁である⁹⁾。

表5 貨車車軸12t長軸における折損箇所統計(1926~'60)

	輪座	チリヨケ座	軸中央	その他	合計
%	90.6	0.7	0.7	7.7	100.0

中村 宏・田中真一・初野耕三「実働荷重と疲労強度からみた車両用車軸」『材料』第17巻第173号, 1968年, Table I¹⁰⁾。チリヨケ座については後述(図24及び注75)。

8) 因みに、'51年のM-8=ED4746も同じ設計となっている。

9) この他、中村 宏「車軸の強度(第1報)設計方式について」『鉄道業務研究資料』Vol. 8 No. 7, 1951年3月, 『物と事と生の研究史—新幹線台車・金属疲労寿命・生命観—』永田文昌堂, 1997年, 同『新』

2) 鉄道省～国鉄における車軸材料仕様の変遷

JESにおいても戦後のJISや国鉄標準JRS (Japanese National Railways Standards)においても、車軸材料としては一般鍛造用鋼材ではなく車軸用の鋼材が指定されていた。復興期を通じて車軸鋼は鋼種としては平炉または電気炉で製造されたキルド鋼であった。これはリムド鋼では材質不均一でゴースト等の欠陥が発生し易いためである。キルド鋼への切替え時期についての詳細は不明であるが、上述の通り'30年代であったかと想われる¹¹⁾。

車軸鋼の製造においては、鋼塊上下端の不純物の多い部分は必要に応じて上部20%以上、下部5%以上を適宜、切除されるべきことが定められていた。鍛造前の粗材の断面積の鍛造粗形材のそれに対する比率を表す鍛造比は鍛造のみの場合4以上、圧延の後、鍛造する場合、8以上と規定された。鍛造粗形材は一律に適当な熱処理を施した後、機械加工にかけるべき旨、規定され、成品車軸には形状、寸法の正しさ、材料の均質性が求められた。

材料の機械的性質に係わる試験は同一溶鋼で同一熱処理に付される車軸50本またはその端数ごとに採った試験片または試験品1個について行うものと指定された。機械的性質に関しては引張試験、曲げ試験、落重試験を行うものとされ、引張試験は4号試験片(JIS 87702)を用いる¹²⁾、曲げ試験は25×19mmの矩形断面の試験片を折り曲げて割れぬことを確認するなど、何れも通常の方法試験である。落重試験については注文書に認められている場合には落重試験または曲げ試験の何れかを省略することが出来ると定められた。以上の内、復興期から高度成長期の国鉄における車軸材料仕様の変遷を化学成分と併せて一括表示したのが次の2つの表である。

3) 車軸用鋼材に関するJIS E4502規格の概要

国鉄標準JRSと戦時の日本工業規格JESとの間には無視し得ない差があった。即ち、JESの炭素鋼規格の内、鍛鋼品の車軸鋼相当品は第五種SF54にしても第六種SF60にしても、鍛鋼品一般用という位置付けであり、伸びに関するスペックは従来の車軸鋼が実態として有していたそれよりも低くなっていた。また、これを踏襲する形で1954年に制定されたJIS G.3201も同じであった。このため、国鉄工場にて単発で資材を購入し、車軸を内作する場合、材料不

↘ 幹線車軸の安全の研究—金属疲労, リスクマネジメント, 生命観—』同, 2004年, 参照。

- 10) 田中真一・中村 宏『鉄道車両用車軸の強度設計方法と今後の問題点』『車両技術』No. 121, 1972年6月, 表1として再掲。
- 11) 戦艦 長門主タービン車軸粗形材の両センチ加工による旋削時にワークが自重で折れたのは上記のゴーストが切欠き部に伏在していたことに因る。拙著『船用蒸気タービン百年の航跡』ユニオンプレス, 2002年, 140, 156頁, 参照。
- 12) 4号試験片の規格は標点距離50mm, 平行部長さ60mm, 平行部直径14mm, 両端シャックへの肩部半径15mm以上。

表6 鉄道省～国鉄における車軸材料仕様の変遷

仕様書 番号	制定	記号	化学成分%				材料試験			落重 試験	曲げ試験、曲 げ角度、内 径、半径	鍛造比		備考
			酸性炉		塩基性炉		抗張力 TS kg/mm ²	伸び E %	絞り (断面減少率)C %			鍛造	+ 鍛造	
			P	S	P	S								
SA 176	1928	SF54	<0.055	<0.050	<0.045	<0.050	54< E≥(90-TS)/1.5	20<	-	規定	規定無	4<	8<	~1944-7
SA 1014	1933-5	SF60	"	"	"	"	60< E≥(90-TS)/1.5	20<	-	"	"	"	"	" 上と併用
暫仕 13	1944-7	SA55	<0.070	<0.065	<0.065	<0.070	55< E≥(90-TS)/1.5	20<	-	"	落試で代用可 180° 20R	3<	6<	~1950-8
		SA60	"	"	"	"	60< E≥(90-TS)/1.5	20<	-	"	"	"	"	"
SA 30 【原表記 載無、本文 記載有】	1950-8	SF55R	<0.055	<0.050	<0.045	<0.050	55< E≥(90-TS)/1.5	20<	C≥(110-TS)/1.5 30<	"	"	4<	8<	~1958-8
		SF60R	"	"	"	"	60<	"	"	"	"	4<	8<	"
SA 30A (改正)	1958-9	SFA55	"	"	"	"	55<	23<	35<	"	"	4<	8<	現在適用
		SFA60	"	"	"	"	60<	20<	30<	"	"	4<	8<	"

『車軸折損について』35頁、より。

表7 1963年11月改正の国鉄 SA30B 規格

記号	化学成分%						機械的性質					落重 試験	曲げ試験		鍛造比	
	C	Si	Mn	P 酸 塩	S 酸 塩	Cu	降伏点 kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²	伸び %	絞 り %	衝撃値 kgm/cm ²		角度	半径	鍛造	圧延 鍛造
SFA55	0.30-0.43	0.15	0.40	<0.035	<0.040	<0.30	≥28	≥55	≥23	≥35	≥5	無	180	16	≥4	≥8
SFA60	0.35-0.48	~0.40	~0.85				≥30	≥60	≥20	≥32	≥4		180	22		

廣重『輪軸』102頁、表2.14、より。

良の車軸を調整してしまい、折損事故を招来する場合があった¹³⁾。

この欠陥を補うべき JIS E4502 は既に 1952 年時点で答申されていたが、最終決定に漕ぎ着けた漸く '54 年 3 月のことであった。これは通常の（中空構造ではない）鉄道車軸用炭素鋼に係わる日本標準規格であり、そこでは上表に無い第 3 種、SFA 65 が追加され、第 1 種 SFA 55、第 2 種 SFA 60、第 3 種 SFA 65 という体系が定められていた。第 1 種については機械的性質の充足は容易であり、化学成分や硬度、衝撃値については云々されなかった。

13) 『車軸折損について』37, 285~286 頁, 生産技術協会『実用工学便覧』山海堂, 1951 年, 262, 264 頁, 同『改訂版 実用工学便覧』同, 1963 年, 268, 271 頁, 参照。54 とか 60 とかは最低限確保されるべき抗張力(引張強度) kg/mm²。車軸は加熱炉とハンマー丁があれば粗形材として火造り可能であり, 機械加工も単なる旋削でほぼ事足りたから車輪に比してその製造は著しく容易であった。

表8 JIS E4502 車軸鋼規格

種類	記号	降伏点 kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²	伸び %	絞り %	曲げ試験	
						内側半径 mm	曲げ角度 °
第1種	SFA 55	-	≧55	≧23	≧35	16	180
第2種	SFA 60	-	≧60	≧20	≧30	22	180
第3種	SFA 65	≧35	≧65	≧28	≧45	16	180

『車軸折損について』186頁, 表3, 187頁, 表4, より。

第3種の制定を巡っては車両軽量化を望む積極派の関西私鉄と消極派の関東勢との間に鏝迫り合いが演じられ、最終確定までに時日を要した。関西勢の主張はそれが車両軽量化に有利であること、私鉄車両は安全率の低いモノが多く、しかも電動機等の関係でその増寸に制約があること、外国にも類例がありJISの国際化のためにも望ましいこと、関西私鉄は全て焼入れ・焼戻し車軸を使用しておりその優秀性が経験的に判明していること、であった。

関東勢の主張は圧入部の折損状況に関して焼ならし品と焼入れ・焼戻し品との優劣が定かではない、折損は焼ならし不十分な車軸において生起している、車軸程度の大型炭素鋼部品では焼入れ・焼戻しの効果が現れ難い、疲労強度向上効果に疑問がある、費用効果について疑問がある、などであった¹⁴⁾。

表9 車軸鋼第2種に係わる試験結果2例(鉄道技術研究所)

化 学 成 分 %					
C	Si	Mn	P	S	
0.50	0.30	0.90	0.040	0.032	
機 械 的 性 質					
	抗張力 kg/mm ²	伸び %	絞り %	硬度 HB	シャルピー
最小(軸中心)	63.5	24.9	41.5	196	4.6kgm/cm ²
最大(半径中心)	70.7	24.2	42.0	217	-
化 学 成 分 %					
C	Si	Mn	P	S	
0.49	0.23	0.44	0.029	0.020	
機 械 的 性 質					
	抗張力 kg/mm ²	伸び %	絞り %	硬度 HB	シャルピー
最小(軸中心)	67.6	25.6	35.2	190	4.3kgm/cm ²
最大(フチ)	70.7	25.6	38.9	197	3.7 kgm/cm ²

同上書, 181頁, より。

14) 『車軸折損について』186頁, 参照。

表 10 車軸鋼第3種に係わる試験結果 2例 (住友金属工業)

化 学 成 分 %					
C 0.48	Si 0.14	Mn 0.65	P 0.009	S 0.037	Cu 0.25
機 械 的 性 質					
	抗張力 kg/mm ²	伸び %	絞り %	硬度 HB	シャルピー
最小(軸中心)	67.9	28.8	54.8	192	-
最大(半径中心)	71.5	28.0	55.8	192	4.2kgm/cm ²
化 学 成 分 %					
C 0.49	Si 0.20	Mn 0.70	P 0.009	S 0.037	Cu 0.22
機 械 的 性 質					
	抗張力 kg/mm ²	伸び %	絞り %	硬度 HB	シャルピー
最小(軸中心)	65.7	31	58.6	174	-
最大(半径中心)	67.4	29	57.7	178	8.7kgm/cm ²

同上書, 182頁, より。

結局, 鉄道技術研究所, 住友金属工業における試験の結果, 第2種では第3種の規格に合致する引張強度が得られない場合があること, 伸び, 絞りの点で第3種が優り, 疲労強度の大きさが見込まれることが明白となったため, 第3種が新規格として認定された。関西私鉄と関東私鉄とでかように対立する技術論が支配していたというのは興味深い事実である。但し, 国鉄工作局はこれを含む規格改訂への意欲を示していたが, 結局, 国鉄標準に第3種が採用されることにはならなかったようである¹⁵⁾。

4) 落重試験の仕様

車軸ならではの試験項目としては落重試験があった。メーカーの間でも曲げ・落重必須論, 片方選択論, 片方削除論が行われていた。試験の合格難易度からすれば実態として落重試験の方が組み易かったが, 手間暇コストの点では小さな試験片で済ませられる曲げ試験の方が有利であった¹⁶⁾。

15) 同上書, 35, 186頁, 高速車両用輪軸研究委員会編『鉄道輪軸』96頁, 表6.1.2, 参照。

16) 『車軸折損について』188~189頁, 参照。なお, 本試験の全般的イメージについてはアメリカ輪軸技術史に関する拙稿にて紹介された実施例をご参照頂きたい。この方面に多少係わる研究論文として日本製鐵技師, 足立逸次「加工法異なる車軸の機械的諸性質に就て」『鐵と鋼』第27年第11号, 1941年, を挙げる事が出来る。ピレットからの鍛造品, 圧延棒鋼からの鍛造品, 圧延棒鋼からの削り出し品の比較で鋼材は何れも塩基性平炉鋼, 落重試験の結果は同じ熱処理を施せば3者に大差無し, とある。

本試験の規格について述べておくと、受け台のアンヴィルは重量 5000kg 以上で、1 個の鋳鉄または鋳鋼製であることが要求されていた。このアンヴィルは堅固な基礎上に固定されねばならなかった。錘は重量 1000kg で、案内面との接触部長さは案内面間距離の 2 倍以上、打撃面は半径 150mm の円筒面で、その軸は試験品の軸と直角方向に設定されており、打撃点が錘の重心の垂直下位にあることが求められた。受け台は 2 個の鋼製・90° の V ブロック (ヤゲン台) とし、両者の軸を通す格好でアンヴィル上に固定され、その内面間隔は試験対象に応じて 1000mm ないし 1250mm となるように定められた¹⁷⁾。

5～50℃の範囲に温度管理された試験品は受け台上に水平に支持され、機関車動軸および電車動軸は錘を 5600mm の高さから試験品の中央部に落下させ、1 回毎に 180° 反転させつつ 6 回打撃しても破損その他の欠点を生じてはならないとされた。

動軸以外の内、第 1 種、第 2 種の車軸はその中央に錘を 3000mm の高さから落下させた。試験品は回転させず、1 回の打撃毎に変形量を測定した。最終回は撓み (湾曲) が規定値に達するよう適当に高さが調整された。

表 11 落重試験における第 1 種、第 2 種車軸の撓み量の規定値

車軸中央部の直径	車軸中央部の撓み	受け台間の距離
130 以下	120	1000
130 超~140 以下	112	1000
140 超~155 以下	102	1000
155 超	95	1000

『車軸折損について』187 頁，表 5。

また、第 1 種および第 2 種車軸については同じ条件で錘を 5600mm の高さから落下させ、1 回毎に試験品を 180° 回転させて 6 回打撃を繰返しても破損その他の欠点を生じてはならないと定められた。

第 3 種車軸においては次表に示す条件で 180° 反転を繰返しながらか 5 回打撃しても破損その他の欠点を生じてはならないと定められた。

この JIS E4502 規格の内、落重試験に係わる部分は国鉄及び関西鉄道協会の仕様書を踏襲した規定となっていた。その制定過程においては曲げ試験と落重試験とを併用する意味についても上述の通り見解が分かれたが、この時点においては上記の通り、やや曖昧な規定となった。その廃止に至る経緯についてもアメリカ輪軸技術史に関する拙稿で先回りして述べておいた通りであるが、既に 1950 年代後半における実態としては曲げ試験のみを課すことが一般化していた¹⁸⁾。

17) 以下、暫くは同上書，187～189，201～202 頁，に拠る。

18) 『車軸折損について』205 頁，参照。

表 12 第3種車軸の破壊試験

車軸中央部の直径	落下の高さ	受け台間の距離
105 以下	5000	1000
105 超~115 以下	6000	1000
115 超~130 以下	7500	1000
130 超~140 以下	8500	1250
140 超	10000	1250

『車軸折損について』188頁, 表6。

表 13 復興期国鉄の車軸規格

図号	名称	原形 径力 #	全長 L	ジャーナル 中心距離 L ₀	クラウン		ジャーナル		軸受部		予備輪座		輪座		平行部		備 考
					D ₁	L ₁	D ₂	L ₂	D ₃	L ₃	D ₄	L ₄	D ₅	L ₅	D ₆	L ₆	
(1)	7軸甲	7	1784	1574	124	16	96	178	124	55	—	—	128	200	108	76	
	7軸乙	7	1784	1574	124	16	96	178	124	55	—	—	128	200	108	76	
(2)	7軸甲	7	2166	1930	136	16	108	204	150	50	156	180	168	200	140	76	
	10軸	10	1810	1574	136	16	108	204	150	52	—	—	152	200	128	76	
(3)	10軸	10	2166	1930	136	16	108	204	150	50	168	180	166	200	160	76	
	12軸	12	1824	1574	150	20	120	210	150	54	—	—	160	200	140	76	
	12軸	12	2180	1930	150	20	120	210	150	50	170	177	175	200	160	76	
(4)	7軸	7	1784	1538	70	32	85	182	95	35	—	—	128	208	—	—	キハ4 1000形軸受コロ継受
	7軸	7	1784	1538	70	32	85	182	95	35	—	—	128	200	108	76	〃 継軸 〃
	10軸	10	1784	1538	80	34	95	180	108	35	150	22	158	152, 178	—	—	キハ4 2000形軸 〃
	10軸	10	1784	1538	80	34	95	180	108	35	150	22	152	310	128	76	〃 継軸 〃
	12軸	12	2180	1930	100	33	110	197	130	50	170	177	175	200	160	76	コロ継受

(注) △知へ昭和26年度以降

横堀 進『鉄道車両工学』共立全書, 1955年, 205頁, 第8.35図, 206頁, 第8.4表。

5) 復興期の車軸生産体系

i) 戦後復興期における車軸5社体制

復興期の車軸生産体系は現在の住友(住友金属工業→新日鐵住金)のほぼ1社体制ではなく日本製鋼所, 神戸製鋼所, 住友金属工業, 大同製鋼, 日立製作所から成る5社体制であり, かつ, 時代を遡るほどに外注加工依存度が高かった。工作局修車課からこの5社に対して発せられた車軸加工に係わる問い合わせに対する各社回答が1956年2月5日付で総括されているので, 以下, これを紹介しておこう¹⁹⁾。

a) 日本製鋼所

1953年12月1日から1955年11月30日までの製作車軸総数4523本。従来, 室蘭製作所においてインゴット製作から最終仕上げまで施行していたが, 一部, 外注も行われるようになった。

19) 以下, 工作局『車軸折損について』1959年5月, 207頁, 第18表(その1), 210~211頁, 同(その2), より。但し, 多少の補足を加え, 明確な誤植や計算間違いについては訂正した。

た。即ち '54年6月～'54年12月製造の12t長軸363本(8%)は鍛造後、住友金属工業に指定半仕上げを委託²⁰⁾。

その後の受注分は日本製鋼所広島製作所にての加工に改められたが、黒皮むき792本(17.5%)のみは外注された。その内訳は仁井鉄工所201本、小川鉄工所12本、星木鉄工所24本、三葉工業46本、藤山工業90本、広重工業41本とある(これでは総計414本にしかならぬが訂正の様がない)。

外注は指定寸法より片肉1～2mm残し、各段は5mm削り代を残し、テーパ部は車輪座と同径。材料番号の打刻、疵見を主とする外観検査には社員が出向して実施。

検査は溶解チャージ代表分析試験、インゴット疵見検査、粗形材形状および疵見、焼鈍記録確認、材料試験、落重試験、材料試験、機械加工各工程における中間検査、刻印検査、完成検査(寸法、外見、疵見、超音波)、塗装および包装検査。

b) 神戸製鋼所

1953年2月3日から1955年9月20日までの製作車軸総数4739本。内、外注は648本(17.5%)で鍛造が538本(12%)、半仕上げ110本(2.5%)。鍛造外注の内訳は日本鍛工350本、関西鉄工110本、永田30本、日立造船48本。機械加工は全て播磨造船所。但し、'55年8月以降、外注は停止し、将来的にも再開しない旨、決定。

鍛造外注に当って素材は支給、鍛造後の熱処理は自社施行。機械加工外注に際し、ジャーナル加工は研磨仕上げ、その他は図面通りの仕上げとし、コロ軸受スリンガー圧入、ねじ下圧上、チリヨケ座の研磨仕上げまで委託。

車軸は鍛造熱処理後、熱加工しないことを周知徹底。旋削加工に際しては倣い旋盤を使用し、誤作防止を期す。検査には社長直属の検査体制を構築し、検査項目は材料規格(成分、引張強度、伸び、断面収縮率、曲げ)、加工(熱錬温度、焼準温度)、探傷(磁気および超音波)から成る²¹⁾。

c) 住友金属工業

1952年12月1日から1955年11月30日までの製作車軸総数5936本。内、外注は3643本

20) 鉄道省～国鉄の客貨車用車軸には長軸(ジャーナル中心間距離1930mm)と短軸(同1574ないし1584mm)とがあった。長軸は標準軌間への改軌を容易にするため車輪座とジャーナルとの間に予備輪座を設けたモノで、往時は短軸より汎用された。アンチ・ローリング性や車両限界云々は単なる屁理屈である。廣重はジャーナル中心間距離1640mmの中軸なるものの存在について述べているが、他の文献には見出されない規格である。朝倉希一『鉄道車輛』上巻、春秋社、1936年、162～163頁、廣重『輪軸』264頁、参照。

21) ここに云う倣い加工とは勿論、超硬工具による高速切削(ポイントカット)である。『車軸折損について』206、294頁、参照。

(61.4%)、その内訳は鍛造が913本(15.4%)、全て大阪鍛工所、半仕上げが2730本(46%)、全て杉本鉄工所。熱処理と本仕上げは自社。'54年4月以降、鍛造外注は廃止し、同年11月以降、機械加工外注も廃止し、完全社内一貫体制を確立させた。

車軸加工に当っては全面片側5~10mm取り代を設け、ジャーナルおよび中央部は絞る。半仕上げは両端面は中央部仕上げ、その他は指定半仕上げ(径で3mm取り代)。

d) 大同製鋼

1950年2月30日(ママ)から1955年4月30日までの製作車軸総数2219本。仕上げ加工は全て外注で、この間の総計は2255本。内訳は築地865本、関ヶ原製作所168本、形原鉄工所906本、内藤鉄工所13本、大同機械197本、永井鉄工所52本、神野工業54本。'55年6月以降、外注は廃止。現在能力25本/月を330本/月→620本/月に拡充を計画('56年8月より)。

車軸製造に当っては旋盤工の選定に留意し、誤作品の処置、誤作者の配置転換を実施。また、旋盤工と溶接工との馴れ合いを防止(運搬伝票の係長認印)。

検査は本社検査課が担当。項目は溶湯化学分析、インゴット疵見、ピレット疵見、鍛造粗形材の寸法および外観、中間加工後の超音波探傷、最終加工後の超音波ならびに磁気探傷、寸法検査、落重試験。

e) 日立製作所

1952年5月21日から1955年8月31日までの製作車軸総数3873本。自社生産率100%。インゴットに対しては差金確認、外観検査。鍛造工程については監督員が立会い、疵ハツリ、打刻、材料試験、超音波探傷、寸法検査を実施。熱処理工程においては同じく外観検査、硬度測定、曲り測定、亀裂検査を実施。材料試験としては化学成分分析、機械的性質の試験、落重試験を実施。荒削り後に寸法検査、外観検査。仕上げ完成後に超音波探傷、寸法検査、刻印検査を実施。

.....

戦前には八幡製鐵所や川崎製鐵、汽車製造なども車軸メーカーの一角を占めていたが、戦後復興期においては以上のような車軸5社体制が出来上がっていた。そして、それらの間の生産規模格差はさして大きくはなかった。また、それらの中には新たに外注依存を始めた事業者もあればこれを廃止した所もあって、事業動向について一律の描像を得ることは困難である。

しかし、日本製鋼所のデータがいい加減なのは残念であるが、車軸の粗形材鍛造や機械加工に当っての発注規模には大小区々の例があったことが観て取れる。これはごく零細な下請加工業者の存在証明ではなく、むしろ鉄道車軸依存度の低い加工業者が相当数存在したことの証と観られる。

船舶の推進軸系の構成要素は鉄道車軸を大形化したようなモノであるから、時代的には当時、

数多存在した造船系の腕の立つ鍛造業者や旋削加工業者が利用され得た筈である。車軸製造における外注はその受け皿を見出すという点において容易であった。自社一貫体制の構築は製品々位の向上そのものが目的というよりは造船業の繁忙への対処策であり、その後を生じた住金への傾斜も重機業界における棲み分けの個別具体的形態であったかとも想われる。ここで頻出した超音波探傷については後程、やや詳しく取上げる。

ii) 住友金属工業における戦前・戦時と戦後の車軸生産技術体系

当時からトップ・メーカーであった住友金属工業における戦前・戦時から復興期にかけての車軸製造技術体系の変遷については住友自身が工作局に対して「車軸の戦前、戦後における製造上の相違について」なる次のような報告を上申している。

i) 戦時中は原料及び燃料に種々の困難があつて昭和19年には仕様書暫定規格(暫仕13)に示す通り、P.S.の規格の緩和を計る様な時期があつたが車軸のSPの規定は現在では戦前と同様、酸性炉 $P < 0.055$, $S < 0.050$, 塩基性炉 $P < 0.045$, $S < 0.050$ になっている。戦前、戦後の製鋼法の変遷については種々の技術的改善がなされているが、その中2, 3の点のみ記す。平炉については戦後、燃料は発生炉ガスより重油に転換され、又燃焼研究の発展に伴い、平炉設計も画期的な改良が加えられた。電気炉についても、電極の調制装置改良等の設備的改善が行われている。製鋼作業で最も大きく改革されたものに戦后広く採用される様になつた酸素製鋼法を挙げることが出来る。その成果は製鋼能率の向上、燃料原単位の低減、成品々質の向上、標準作業の確立等、顕著な成果を挙げ得る様になつた。又戦后精錬出鋼温度を迅速適正に測定して精錬を容易にする方法が種々試みられ研究されて、昭和28年以降、イメージョンパイロメーターで鋼浴温度を直接測定することに成功し既に全面的に実用に供されており、これにより精錬出鋼温度を適正に加減し歩留の向上や材質の改善に大いに益する様になつた。

ii) 車軸鍛造比は戦時中暫定的に鋼塊 → 鍛造3以上、鋼塊 → 圧延 → 鍛造6以上と緩和された時期があつたが、昭和3年SA176仕様書制定の時以降、鋼塊 → 鍛造4以上、鋼塊 → 分塊 → 鍛造8以上と定められており、現在もこれにより製作されている。鍛造比は車軸の種類、従つて、これを作る鋼塊によつて異なるがその一例は次の如くである。

公称 3,800kg 鋼塊	12t 長軸プレーン	9.3	圧延+火作
〃	12t 長軸コロ,	8.8	〃
公称 1,300kg 鋼塊	12t 長軸コロ	4.2	火造のみ

iii) 車軸検査法として特記すべきは当所においては、昭和30年6月より国鉄大監事務所長より指示により国鉄向車軸製品全数につき超音波探傷を実施し且つ表面状況の疑わ

しきものには磁気探傷を併施する様になったことである。尚超音波探傷についてはその探傷法は基準が決められているが、検査基準については現在未制定であり、探傷実績の集計を計っている状況である。

- iv) 当所製国鉄向車軸の素材(鍛鋼品)は以前八幡製鐵所鋼材を購入して来た。この場合熔製はその殆んどが塩基性平炉に依るもので戦後は一部塩基性電気炉に依るものがある。この八幡材は大むね、ピレット圧延后、ハンマー火造して疵見半仕上軸で納入されて来たが、後には圧延鋼片で購入、製鋼所でハンマー鍛造を行い、車軸仕上加工を施工した。しかし最近では車軸の材質は車軸メーカーが直接保証するのが最も望ましいとの観点から国鉄向軸材は八幡より購入するのを全面的に廃止し、製鋼所において酸性平炉又は塩基性電気炉で熔製することに切換えられ現在に及んでいる。鍛造法については当所において、たえず深い関心を払い鋼塊の大きさと鍛造効果の関係、偏析、非金属介在物、砂疵と車軸表面疵材質との関係など問題があるので改善を計る様努めている²²⁾。

表 14 車軸加工から輪軸組立までの工程進捗と人工(標準作業時間)

車軸種類		客貨車 12t 軸	気動車	蒸機動軸	電機動軸
黒皮より粗仕上		1.800	1.500	0.150	0.180
輪心嵌合せ	輪心(孔)	0.300×2	0.300×2	0.350×2	0.350×2
	車軸	0.350	0.350	0.350	0.350
歯車嵌入部 合せ	歯車	-	0.250	-	0.350
	車軸	-	0.160	-	0.160
ジャーナル仕上		0.200	0.300	0.400	0.400
車輪抜き		0.150	0.250	0.150	0.250
車輪圧入		0.250	0.500	0.250	0.500
キー溝切り及び穴明		-	0.350	0.150	-
刻印		0.035	0.035	0.035	0.035
キー製作		-	-	0.050	-
合計		3.385	4.295	3.585	5.545
車軸が半成品の場合		1.585	2.795	2.085	2.745

『車軸折損について』8~9頁、より。

22) 『車軸折損について』37~39頁、より。八幡製鐵所製の住友製鋼所向け車軸粗形材における内部欠陥問題については金森九郎「車軸材に現れたる疵に就ての考察」『鐵と鋼』第25年第2号、1939年、参照。引用中にあった「国鉄大監事務所」とは国鉄大阪鉄道機器製作監督事務所の略である。大阪製監の「車軸検査要領」は言わば国鉄標準となった。

以上は車軸製造の実態と変遷を良く伝える文章となっているが、粗材としての車軸が輪軸になるまで、即ち車軸の仕上げの程度と加工工程の諸段階については粗加工から輪軸組立へと至る全工程との絡みでまとめられた国鉄の標準作業時間のデータがあるので表14として紹介しておこう。但し、これは既存の輪軸を分解し、新たな車軸を用いて再組立する場合の工程に係わる説明である。

なお、平炉における酸素精錬についてはアメリカ輪軸技術史に係わる稿にてその端緒と戦後のわが国における実施例について言及したところである。また、神戸製鋼所が尼崎製鉄所を傘下に収めて銑鋼一貫体制への糸口を掴んだように、住友金属工業が1953年の小倉製鋼吸収によりこの体制への足掛かりを獲得し、やがて'61年、和歌山製鐵所第一高炉の操業開始を以て本格的な銑鋼一貫メーカーに推転した功名譚は言わば本邦鉄鋼業史の常識に属するが、平炉メーカー時代の住金にして車軸用粗材や鋼片を永らく八幡から購入するような有様であったという事実は注目に値しよう。

また、ここでも非破壊検査、即ち超音波探傷法と磁気(磁粉)探傷法の活用が力説されている。これらは生産技術体系においても運用技術体系においても極めて重要となる支援技術である。何故、それが殊更に重要とならねばならぬのかについては追って明らかとなる²³⁾。

3. 復興期の国内鉄道路線において多発した車軸折損事故

1) 概況

戦前～戦後を通じた日本国有鉄道における車軸折損事故と対策の概要について述べれば、1936年度において3件(他に軽便貨車12)であった車軸折損事故は1946年度には13件へと急増、'47～'50年度については不明ながら、'51年度も6件、'52年度6件、'53年度8件、'54年度8件、'55年度10件、1956年も11件と高水準のまま推移し、漸く'57年度に至って4件、'58年度3件に低下、戦前レベルへと復帰した²⁴⁾。

表16に云う溶接軸とは満鉄の旧い例にあったような摩耗に対する溶接盛金補修ではなく、製造時の旋削ミス(削り過ぎ)を熔接盛金により補修したモノで、先に大同製鋼絡みで「旋盤工

23) 超音波探傷関係については「車軸の超音波探傷法減衰度は、つぎの限度以上の透過度のものでなければならぬ、たゞし減衰度は、測定の前平均値をもって表わす。(1) DC探傷図形の場合、第1回目の底面エコーが微少(2) AC探傷図形の場合、第1回目の底面エコーの振幅が80mmまたは第2回目の底面エコーが微少」、「車軸の超音波探傷法減衰度試験はSZ 1A(車軸超音波探傷法減衰度測定方法)による」、「車軸は外観、寸法検査および超音波探傷法減衰度試験を1本ごとに行うとともに、JIS E4502により化学分析試験および曲げ試験を行い、各規定に適合しなければならない」とある。同上書、177～178頁、参照。工作局のSZ 1A規格、JISのE4502規格については上述の通り。

24) 『車軸折損について』46～49、296～298頁、参照。なお、機械式ディーゼル動車における車軸折損事故については本稿7を参照されたい。

表 15 1936, '46年度の国有鉄道における車軸折損による運転事故比較

年度	発生年月日	車 号	位 置	記 事
'36 年 度	'36 5/31	キハ 41068	第 6 位ボス内面	
	'36 8/19	28663	炭 第 1 位	古キズ 60%
	'37 1/31	ワ 17662	第 1 位	" "
蒸気機関車 1 ガソリン動車 1 貨車 1 計 3 但し、これ以外に軽便貨車 12				
'46 年 度	'46 5/5	C5328	炭 第 4 位	古キズ
	'46 5/10	レ 2900	第 1 位	"
	'46 7/23	トム 1753	第 3 位	" 60% ジャーナルサビ
	'46 8/11	ED201	第 2 動軸	" 80%
	'46 9/24	オハフ 2804	第 2 位	"
	'46 11/4	ト 8117	第 2 位	" 60%
	'46 11/10	モハ 4618	第 1 位	"
	'46 12/27	モハ 153	不明	"
	'47 1/31	クハ 212	第 3 位	"
	'47 2/1	モハ 153	第 3 位	" 85%
	'47 2/9	ト 3775	第 3 位	" 85%
	'47 2/20	モハ 318	第 3 位	" 60%
	'47 3/28	モハ 220	第 1 位	" 30%
蒸気機関車 1 電気機関車 1 電車 6 客車 1 貨車 4 計 13				

『車軸折損について』44～45頁、より。モハ 153 はモハ 15-3²⁵⁾。

表 16 1951～'58年度の国鉄における車軸折損事故

年度	発生年月日	車 号	位 置	記 事
	'51 4/23	D51515	第 3 動軸	鍛造の際の古疵
	'51 5/25	トキ 16363	—	古疵 90%

25) 「第何位」とあるのは鉄道車両においては前後の区別がある(一見、前後対称のように映る車両においてさえ機器配置は平面図上で点対称をなしているワケではなく偏りがある)ため様々な機器の配置に応じて車種毎にその前後が規定されており、前方から第1位、第2位、……と呼ばれる呼称法によるもの。但し、'51年7月29日のモハ 117の「第6位」に現れているように、車輪の如く左右に対称配置される部品の場合、最前位右を第1位、同左を第2位、第2列右を第3位(以下同様)とする呼称法による(後掲図20、参照)。車軸折損は車輪座やジャーナル付近が多いので、ここでの位付けはこの千鳥の呼称法に拠るモノかとも想われるが、それなら5以上の位置がもっと有っても良いような気がする。

'51 年 度	'51 7/29	モハ 117	第 6 位軸	古疵 第 1 期 50% 第 2 期 30%
	'51 11/3	クハ 507	—	古疵 90%
	'51 11/15	セキ 737	第 1 位軸	古疵 70%
	'52 2/16	C1247	第 2 動軸	古疵
蒸機 2[動軸]、電気機関車 2、貨車 2 計 6				
'52 年 度	'52 5/10	モハ 41025	1 位ボス	古キズ 85%
	'52 9/12	モハ 155	1 位ボス	古キズ 95%
	'52 12/8	モハ 151	1 位ボス	古キズ 84%
	'53 1/7	49600	炭 1 ボス	古キズ 60%
	'53 2/16*	C1247	D2 左ボス	—
	'53 2/17	ED343	D4 ボス	古キズ 80%
蒸機 2[先 1 炭 1]、電機 1、電車 3 計 6				
'53 年 度	'53 4/24	キハ 41569	3 位	古キズ 90%
	'53 8/2	D50217	炭 3 位	古キズ 65%
	'53 12/4	キハ 41636	1 位	不明
	'54 1/4	キハ 41301	3 位右	材質不良
	'54 1/8	ED202	D2 ボス	古キズ 50%
	'54 2/2	クハ 79224	3 位	—
	'54 2/21	モハ 2003	3 位	古キズ 12%
	'54 3/6	C58331	先輪ボス	古キズ 50%
蒸機 2[先 1 炭 1]、電機 1、電車 2、気動車 3 計 8				
'54 年 度	'54 4/12	モハ 1521	3 位	古キズ 84%
	'54 6/14	C58294	先輪	古キズ 80%
	'54 9/17	オハ 6121	4 位	古キズ 45%
	'54 9/24	モハ 1601	3 位	古キズ 80%
	'54 10/14	ワム 15090	1 位	古キズ 40%
	'54 10/21	レテ 7217	1 位	古キズ 25%
	'54 11/23	モハ 31009	4 位	古キズ 73%
	'54 12/23	テ 241	1 位	古キズ 91%
蒸機 1[先]、電車 3、客車 1、貨車 3 計 8				
'55	'55 5/21	ワム 90801	2 位	溶接軸
	'55 6/1	C58113	先輪	古キズ 80%
	'55 7/19	ED203	D3	古キズ 80%
	'55 7/20	トラ 10518	4 位	古キズ 30%
	'55 8/1	EF111	D6 右	古キズ 70%

年 度	'55	10/29	サハ 87032	7位	溶接軸
	'56	1/29	トキ 19123	1位	焼キレ
	'56	1/30	C51146	D2 右	焼キレ
	'56	3/3	スハ 4527	1位	古キズ 45%
	'56	3/9	モハユニ 44002	2位	古キズ 90%
蒸機 2[先 1 動 1]、電機 2、電車 2、客車 1、貨車 3 計 10					
'56 年 度	'56	8/5	ED1713	D4 ボス	古キズ 70%
	'56	8/11	セキ 612	3位テーパ部	古キズ 60%
	'56	8/17	セキ 786	1位中央	昼キズ 60%
	'56	9/15	スム 164	ジャーナル	秩父鉄道車
	'56	9/17	9666	炭 2 ジャーナル	ニセコ改造
	'56	10/17	ワム 9222	2位中央	古キズ 55%
	'56	10/18	58667	炭 2 ジャーナル	ニセコ改造
	'57	2/10	レ 12140	2位ボス内側	古キズ 43%
	'57	2/11	セキ 692	3位中央	140mm 軸
	'57	2/21	キハ 41419	4位チリヨケ座	古キズ 約 50%
'57	3/6	C56144	D2L ボス	古キズ 67%	
蒸機 3[動 1 炭 2]、電機 1、ディーゼル動車 1、貨車 6 計 11					
'57 年 度	'32	4/4	セキ 771	1位中央	140mm 軸
	'33	2/8	セキ 781	4位中央	140mm 軸 古キズ 約 60%
	'33	3/19	EF587	先 2 位	古キズ 30%
	'32	7/28	ワム 112	2位	秩父鉄道車
電機 1、貨車 3 計 4					
'58 年 度	'58	9/23	モハ 42009	2位	古キズ アリ
	'59	1/17	レキ 13	3位ボス内	古キズ 22%
	'59	3/4	レ 12715	4位ボス内	古キズ 60%
電車 1、貨車 2 計 3					

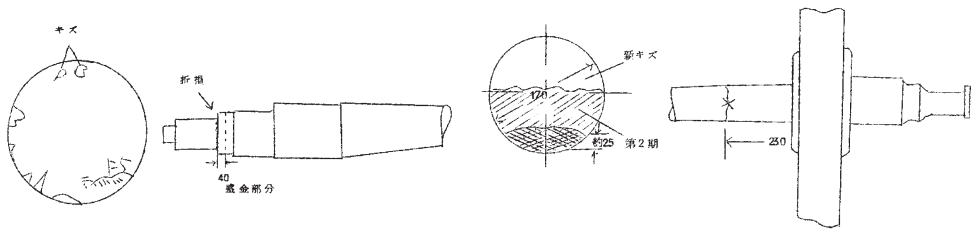
*上の '52 2/16 はこれとの重複と想われる。

『車軸折損について』46～53, 105, 296～298 頁, より。

と溶接工との馴れ合いを防止」云々とあったのはこの件を指す。ワム 90801 の車軸など、その大同製鋼における新製が 1954 年 12 月、折損が翌年 5 月 21 日であったから、会社のモットーにも拘らず、鉄道技術研究所の鑑定に拠れば、折損部の外周全面に亘って盛金補修に起因する変質層が形成されており、僅か半年足らずの寿命と相成っている²⁶⁾。

26) ワム 90801 の溶接車軸折損事故については廣重『輪軸』403 頁にも若干の記述がある。

図4 サハ 87032, ワム 90801 における溶接軸折損



サハ 87032

ワム 90801

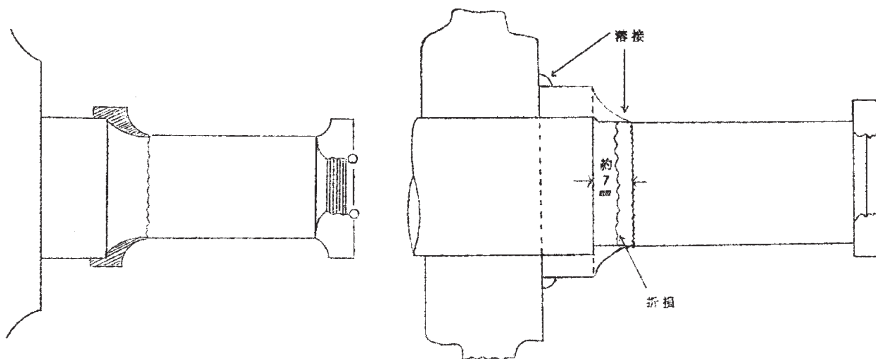
サハは46頁では87062, ワムは87頁ではワクとなっているが, 夫々, 訂正。

『車軸折損について』82, 87頁, より(同書掲載の図はどれもこの程度の粗末なモノばかりである)。

初代湘南型のサハ 87032 は 1950 年新製であるから 5 年目の折損事故であった。車軸メーカーは神戸製鋼所。鉄道技術研究所の鑑定に拠れば, 誤作ゴマカシのため油切り輪座(チリヨケ座)全面が溶接盛金補修され, かつ焼鈍せずに再旋削されていた。その結果, 若くして盛金部の外端=ジャーナルとの接続段付き部から折損を生じた。

同じくニセコ改造とは摩耗したジャーナル内端部を削正し鋼製カラーを焼嵌める補修(ニセコ車軸と同じ)で, 焼嵌めないし圧入+熔接という手口もあった。当然, これではカラーの下で亀裂が進行しても外部からは感知し難くなる。折損事故として次図のような例がある²⁷⁾。

図5 蒸気機関車 9666 及び 58667 の炭水車に生じたニセコ改造車軸折損



9666

58667

『車軸折損について』71, 73頁, より。

なお, '52~'58年度における車両別車軸折損件数は蒸気機関車 10, 電気機関車 6, 電車 11, ディーゼル動車 4, 客車 2, 貨車 17 の合計 50 件となるが, その部位別に関してはジャーナル

27) ニセコ車軸については廣重『輪軸』264~265頁にも図無しではあるが解説されている。それに拠れば, ニセコ車軸は1952年から'53年にかけて取替えが指示された。

10, 車輪座 29, チリヨケ座 1, テーパ部 4, 中央部 5, その他 1, 合計 50 件という数字が掲げられている。メーカー別では住友金属工業 7, 八幡製鐵所 15, 大同製鋼 3, 神戸製鋼所 2, 日本製鋼所 2, その他・不明 23 の計 52 とあり, こちらには詳しい事故履歴も記載されているが, 神鋼と大同の各 1 件は '59 年度の事故である²⁸⁾。

復興期における車軸折損事故急増は走行キロ数増大, 経年疲労の累積, 戦中戦後における材料・工作不良に起因していた。しかも, 当時の国鉄には製造後, 30 年以上を経過した老朽車軸が広く実用されているものと推定された。一方において総折損事故件数の低下傾向が発現しかけていたとは言え, 経年疲労の累積は老朽車軸の将来について些かも楽観を許さぬ病根として内攻しつつあった。とりわけ, 材料の疲労強度について未解明の領域が大であり, 車軸設計が多分に目の子勘定的手法で行われ, 事故が起れば材料のせいにして済ませられるような技術的背景の下であったが故に, 当事者の不安は殊更大きかった。

であればこそ, 工作局は謙虚にも:

以上の…中略…車軸折損数は運転事故に計上されたもののみであり, この他に工場に入場して入検の際或いは区における仕立又は交番検査の際発見されたもの並びに運転中折損したが運転事故に計上されなかつたものなどを考えると, 上記の表に示されたものは氷山の一角であり, 他に相当数の車軸折損が発生している事が推察される。

幸い, これ【ま?】では重大事故を惹起するに至らずにすんでいるが, 状況によつては如何なる人名災害を伴う重大結果を誘発するか図り難いものである²⁹⁾。

表 17 1957 年 1 月 10 日時点における国鉄車軸調査結果

車種	現車	予備	計	老朽軸数	比率%
蒸気機関車	41,068	350	41,418	3,936	9.5
電気機関車	4,609	29	4,638	149	3.2
ディーゼル機関車	30	6	36	-	-
電 (モハ)	8,104	695	8,799	687	5.0
車 (クハ、サハ)	4,920	380	5,300		
気 動 車	1,548	58	1,606	22	1.3
客 車	56,510	1,886	58,396	17,164	3.0
暖 房 車	288	0	288		
貨 車	273,233	4,092	277,325	31,807	11.5
計	390,310	7,496	397,806	53,765	13.5

『車軸折損について』6～7 頁, より。

28) 同上書, 1～9, 48～49, 50～54, 59～109 頁, 参照。

29) 同上書 5 頁。

との自戒の弁を述べていたのである。

かような状況にあって、国鉄は1957年1月8日、工作局長・運転局長連名で各地の現業部門の長に「車軸の一斉調査について」なる依命通達を発し、老朽車軸に係わる一斉調査を実施させた。この大がかりな調査に拠って国鉄における現車390,310本、予備7,496本、計397,806本の車軸中、製造後30年以上を経過した老朽車軸数は53,765本であり、総数の13.5%にも達しているという事実が判明した(表17)³⁰⁾。

とは言え、各種車軸の半製品購入単価、最終の輪軸組立までに要する追加工作費用を勘案すれば、それらの一斉取り替えを計る場合の総費用は30億7500万円に達し、到底、実行不可能であると判断された。固より、これは直接的経費のみならず、大量の車両を集中的に休車させることから派生する問題をも含めての結論であったろう。そこで、実際に採られることになった対策は2つあり、その一方は現有車軸の非破壊検査による探傷であり、他方は車軸の設計変更であった³¹⁾。

2) 工作局において考究された車軸折損の防止対策

i) 検修面における防止対策

a. 超音波探傷機の採用と配備

従来、車軸の検査と言えばテストハンマによる打音確認か虫眼鏡で覗く程度のことだけに終始する有様で、内部欠陥についてはほぼ見過ごされて来た。しかし、1951年3月の大井工場での電車動軸検査を皮切りに、国鉄では非破壊検査装置の一種である超音波探傷機が導入され、車軸検査に新次元が画された。

これは車軸の一端から超音波を1～3MHzの間で変化させつつ発射し、他端での出力をブラウン管上に増幅表示するモノで、内部組織に生じた微小じり、不純物の偏析、亀裂等、不連続面で短波長の振動が散乱・吸収あるいは総じて減衰され、透過率が低くなることを利用して表面のみならず内部の傷をも探知するシカケである。周波数を変えるのは高い振動数(短い波長)の波ほど透過力が弱く減衰し易く感度が高い反面、大きな疵に対して減衰が強くなり過ぎるからである。波長が長ければその逆で感度は低い大きな疵を見付けるのには適している。テストハンマによる打撃はより波長の長い可聴域の波を用いるワケであるから、余程大きな欠陥でもない限り探知され難い。

診断に当っては様々な疵を入れた標準試験片を提供しておき、その診断画像と実物のそれとを照合し、実態を把握させることになる。1956年度末での国鉄工場における超音波探傷機の配備台数は40台、増備計画+45台、客貨車区においてはそれぞれ7台と+15台であっ

30) 同上書、6～7、110～124頁、参照。

31) 同上書、8～9、259～260頁、参照。なお、この金額自体は半仕上げ軸の購入単価を平均5万円とし、前掲、表14の標準作業時間に賃率3,600円を乗じて計算された値である。

た³²⁾。

b. 超音波探傷機による探傷実績

1956年4月から10月にかけての蒸気機関車車軸の超音波探傷実績は総本数9,698本、この内、疵が発見されて取替えられたのは59本であった。'55年8月から'56年6月にかけての電気機関車車軸は検査総数1,448本、取り替え18本で4本が要注意と判定された。電車においては総数46,178本、取り替え753本、要注意1,928本であったが、貨車までは手が回らず、石炭車のみについて検査数272本、取り替え6本、精密検査14本に留まった。要注意とは微細な疵があるため、次回、工場入場時には慎重な検査を要する軸の謂いである。

工作局では車軸の超音波探傷については工場が主たる実施部署で、区はポータブル探傷機を以て「サイドチェック」を分担すべきものと位置付けていた。その配備が間に合わぬ間においては検査掛が打音判定で異常を発見し、工場に検査を依頼した結果、破断が発見され取り替えが行われる、といった新旧検査技術の協調が頼りにされた³³⁾。

表 18 1958年度における各工場超音波探傷実績

客 貨 車 軸				気 動 車 軸			
総本数	良好	要注意	取替え	総本数	良好	要注意	取替え
125,718	93,850	31,969	170	3,411	3,039	368	4
電 車 軸				蒸 気 機 関 車 軸			
総本数	良好	要注意	取替え	総本数	良好	要注意	取替え
12,277	10,839	1,479	11	35,810	30,375	3,350	85
電 気 機 関 車 軸				合 計			
総本数	良好	要注意	取替え	総本数	良好	要注意	取替え
8,144	7,394	711	39	183,360	145,497	37,877	309

『車軸折損について』136～137頁、第12表の7。

このような検査や取り替えを通じて多くの車軸折損事故が未然に防がれた。また、かような検査実績は逐年、拡大され、1958年度においては表18のような実績が挙げられている。これらについては個々の車両や損傷部位・程度、軸の固有番号まで詳細に記録されているが、ここでは深入りを避ける³⁴⁾。

32) 同上書、26～31、126～127、268～269頁、参照。

33) 同上書、27、30頁、参照。尻内(八戸)駅→盛岡工場の連携。

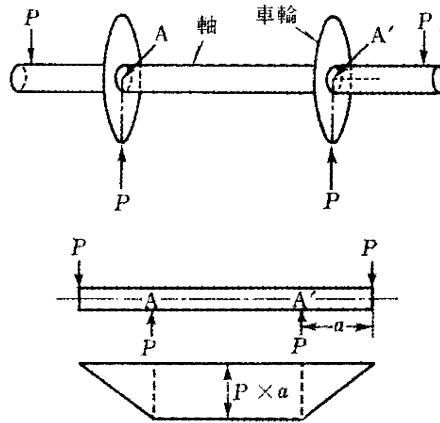
34) 同上書、27～29、126～175頁、参照。

ii) 設計面における対策

a. 車軸の力学と応力線図

車軸にかかる曲げモーメントの最も簡略な計算法はドイツ T. V. (Technische Vereinbarung über den Bau und die Betriebseinrichtungen [Verein Deutscher Eisenbahn Verwaltungen]) の方法である。これは水平力を全く考慮に入れず、静的垂直荷重のみを考慮して計算する簡略法であり、状況は材料力学における「はりの図表 7」そのものである。日常的には両手の親指と人差し指とを使って長い物指を曲げる場合に等しい。簡略化されている分、車軸材の許容応力は十分に低く……国鉄の実施例においてはジャーナル部で客車車軸 5.6 kg/mm^2 、貨車車軸 7.0 kg/mm^2 、車輪座で客車車軸 4.5 kg/mm^2 、貨車車軸で 5.6 kg/mm^2 に設定されていた³⁵⁾。

図 6 T. V. の方法による車軸曲げモーメント線図



軸の全長を l 、 PA 、 PA' を l_1 、軸左端からの距離を x とした場合、左端から A までの曲げモーメントは $-Px$ 、 AA' 間では $-Pl_1$ 、 A' から右端までは $-P(l-x)$ 。

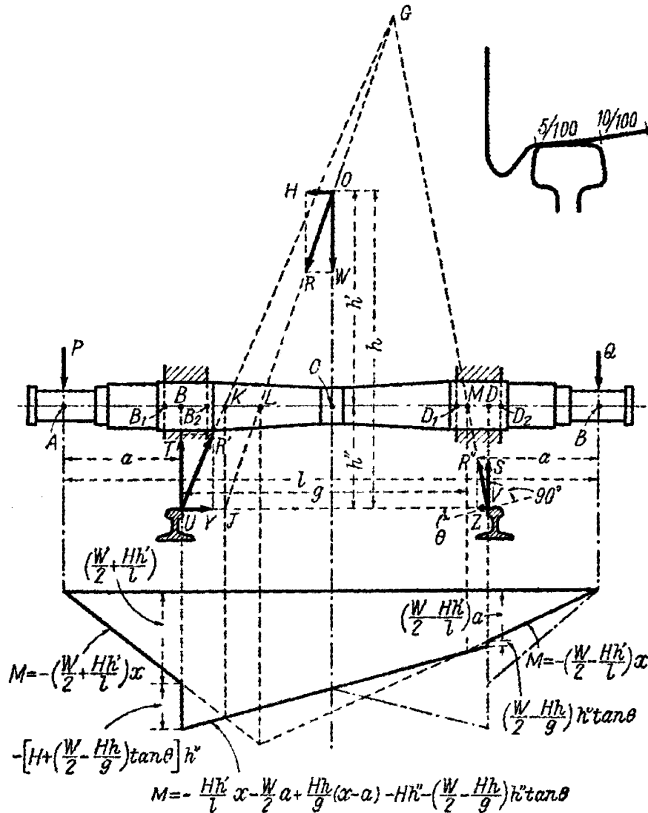
上図は中村 宏・田中真一『機械の疲れ寿命算出法』養賢堂、1972年、167頁、図 11.3 を簡略化したもの。下図は同、図 11.4 (a)。

横風や曲線通過時の遠心力、蛇行動等に起因する横圧を考慮に入れたモーメント線図は Franz Reuleaux (独：1829～1905) によって提示された。次図がそれで、上例より遥かに難し

35) 同上書、10～11頁、参照。余談ながら、自動車の全浮式リジッド・アクスルのハウジングに作用する垂直荷重由来の曲げモーメント線図はこれを上下反転させたようなモノになる。ただ、こちらの場合、通常、中央に差動装置を収容する膨らみが来る関係上、曲げモーメントをこの大きな半径の部分で受ける格好となるため当該部に作用する応力は小さく、その肉厚が薄くても耐えられることになる。但し、トルクチューブ方式が採られる場合はここに駆動力やブレーキ反力がマトモにかかるから状況は違って来る。前田利一「自動車」前田利一・渡部一郎『自動車・航空發動機』アルス、1938年、119～126頁、抽稿「自動車部品企業における技術形成」中岡哲郎編『技術系性の国際比較』筑摩書房、1990年、第8章、参照。

い計算を伴うモノとなっているが、左側の車輪の下に見られる曲げモーメントの跳ね上りが横圧の結果である点について疑義は無からう。ルーローは車軸材の許容応力に関しては古典的な安全率の考え方に依拠しており、許容応力としては12~15 kg/mm²が用いられた³⁶⁾。

図7 Reuleauxの方法による車軸曲げモーメント線図



横堀『鉄道車両工学』208頁，第8.39図。

横堀の書には付記されていないが、 W =軸重 $\times 1.26$ ， H =水平力 $=0.4W$ ， $R=W$ と H との合力， R' ， R'' =左右の軌条における R の反力， T ， $Y=R'$ の垂直・水平分力， S ， $Z=R''$ の垂直・水平分力， O =車軸にかかる重量の重心点， $G=H$ ， W ， R' ， R'' が釣合うために R ， R' ， R'' の方向線が一致する点である³⁷⁾。

実際にはモーメントのかかり方は左右対称となるので、左側の実線と右側の一点鎖線を合わ

36) 4~5倍の安全率が計上されていたということになる。古典的安全率に関しては拙稿「南満洲鉄道及び鉄道省の初期国産ディーゼル機関車(Ⅱ) 第1部：新潟鐵工所製初期機関車用ディーゼルについて」(大阪市立大学学術機関リポジトリ掲載)の中で紹介しておいた。

37) 工作局『車軸折損について』12頁，参照。

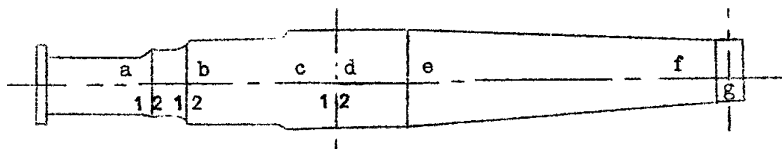
せたものが一般車軸におけるモーメント線図となる。これは一般車軸が何故、真ん中に向うテーパ断面を有していることの説明となっている。機関車や電車の動軸がずん胴であるのは駆動トルクの伝達(左右配分)をその機能の一部としていることに由来する。

b. 車軸の疲労強度設計

戦前期、鉄道省においてはルーローの方法を設計用に使い易くした永島菊三郎の式が開発され、実用されていた。もっとも、これらの計算法は車軸に作用する応力を弾き出すためのモノであって、疲労強度を直接的に算出するための手段ではない。

当時の実態としては計算された応力を元に如何程の安全率を計上するかということが疲労強度設計の具体的手口となるしかなかった。しかし、永島・中村に拠れば、永島の式から得られる応力を元にして計算された当時の現用車軸における安全率は0.9から2.9まで実に幅広くバラついており、設計者の恣意的ドンブリ勘定が浮き彫りにされた³⁸⁾。

表 19 ルーロー及び T. V. 法によって計算された国鉄基本車軸各部の曲げ応力



		基本軸内力											
		7 t 長軸				10 t 長軸				12 t 長軸			
		ルーロー	%	T.V.	%	ルーロー	%	T.V.	%	ルーロー	%	T.V.	%
a	1	747	49.8	411	73.4	825	55	454	81.1	732	48.8	403	72
	2	346	23	190	34	308	20.5	119	30.3	375	25	206	36.8
b	1	540	36	297	53	459	30.6	252	45	553	36.9	304	54.3
	2	428	28.5	235	42	378	25.2	208	37.2	380	25.3	209	37.3
c	1	1020	68	563	100	825	55	454	81.1	814	54.2	448	80
	2	701	46.8	386	85.8	763	50.8	420	93.4	746	49.7	410	91.1
d	1	856	57	471	105	930	62	512	114	910	60.7	500	111
	2	1246	83			1357	90.5			1325	88.4		
e		1135	75.7	471	105	1243	83	512	114	1215	81	500	111
f		1364	91	787	140	1170	78	673	120	1142	76	655	117
g		1316	87.8	787	140	1128	75.3	673	120	1096	73.3	655	117

『車軸折損について』13頁、より。「車両局客貨車本設計課 S-27-2-18」とある。

%は本文言及の客車車軸材料許容応力に対する百分率。∴60%なら安全率1.67, 20%なら同5.00。

38) 永島・中村「電車で用車軸の強度について」第1図、参照。但し、部位については不明。また中村「車軸の強度(第1報)」の内容もほぼ同じ。工作局『車軸折損について』14～21頁はこの中村 宏論文の紹介となっている(出典記載は不完全)。

永島-中村の電車車軸強度計算式はこの状況を改善するため、国鉄・私鉄含め、件の510本という折損車軸に係わるデータとの照合を踏まえて、つまり、折損事故を説明出来るモノとして開発された実用的計算手法である。その後、抵抗線歪み計とスリップ・リングを用いた走行状態での実応力測定法が中村らによって導入され、実用状態で車輪や車軸に作用する応力が把握されるようになると、応力頻度を考慮に入れて車軸の疲労を推計する中村-初野(耕三)の式が提唱され、更には「マイナー則」に代わる画期的な中村-堀川(武)の所謂「修正マイナー則」が提起され、斯界に共有物となるに至っている³⁹⁾。

かような状況は一方において、一連の強度計算法が継続的に開発されていたにも拘わらず、車軸折損が一向に終息せず、疲労強度計算法が必ずしも十全の効果を発揮していなかったことの、他方においては車軸の増径を以てするその疲労強度向上と安全対策が経済性や高速化、車両軽量化、バネ下重量低減の掛け声の前に退嬰の技術として疎まれたことの反映である。

後者の内、経済性について工作局は：

……車軸強度の強化策としては、ウイークポイントの必要部分の直径を大きくすれば、例へば10%太くすれば理論的に永久に折損しないと云えるわけで最も簡単にして完全な方法である。但し、径を太くすることにより、これに関連して他の部品の寸法をすべて変更しなければならぬ不便が生ずる⁴⁰⁾。

と述べている。

一方、高速化との絡みにおいて中村は：

……高速化にとって軽量化は避けがたい条件であり、軸径を太くする重量化の疲労対策では将来性に問題があった⁴¹⁾。

と歯切れ悪く語っている。

つまり、一寸、太くしておけば丸く収まることを、太くしたくないばかりにヤヤコシイ計算が動員され、しかも、理論的予測がしばしば外れるということにもなっていたワケである。

39) 抵抗線歪みゲージとそれを用いた実応力測定については拙稿「三菱航空発動機技術史第Ⅲ部」(大阪市立大学学術機関リポジトリ登載)においても触れておいたが、そこで取上げられたのは戦時期の炭素ゲージであり、戦後はNiCr線による歪みゲージが用いられるようになっていた。

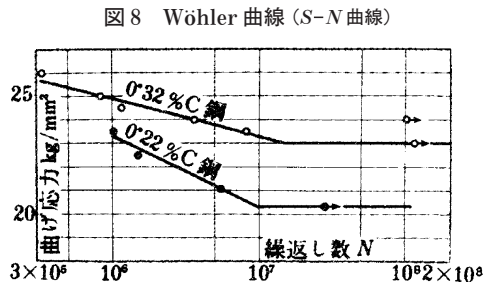
中村-初野の式については中村 宏・初野耕三「車軸圧入部の疲れ強度曲線の求め方の一試案」『鉄道技術研究所報告』No. 424, 1964年, 中村-堀川の式については『日本機械学会誌』第73巻618号, 1970年7月, 112頁に1968年9月の学会報告抄録, 全文は中村 宏・堀川 武「最小の $\Sigma(n/N)$ を与える応力パターンに関する一実験」『日本機械学会論文集』36巻287号, 1970年7月, 参照。当時, 中村は川崎重工業(株)技術研究所に転じていた。中村・堀川論文のタイトルは些か奇異な印象を与えるが, 要するにランダム応力下における現実の破壊は $\Sigma(n/N) = 1$ ではなく, $\Sigma(n/N) = 0.01 \sim 0.001$ といった処で生起するという主張である。中村『新幹線車軸の安全の研究』9~11頁も参照。

40) 『車軸折損について』32頁, より。

41) 中村『新幹線車軸の安全の研究』59頁。

そのこと自体は人智の限界であるとして措くしかあるまいが、以下では一旦、憎まれ口を蓋をしつつ、「マイナー則」から「修正マイナー則」へと至る思考進化の痕を少しく辿ってみることにしよう。

次図は19世紀中葉、疲労研究を創始したかの鉄道技師、August Wöhler (独：1819～1914)に因んでヴェーラー曲線と呼ばれる線図……S-N曲線である。



日本機械学会『機械工学便覧』1951年、4-55頁、第65図。

これは彼によって創始された回転曲げ試験により部材に一定の荷重が繰返し印加された場合における破壊現象を表現する図であり、鋼においては曲げ応力がある水準＝疲労限以下になると疲労破壊は生起しなくなるという事態を示している。この図はまた、疲労限の目安は概ね 10^7 の累積度数に在り、これだけの繰返しに耐えられた部材は無限大の寿命を持つということの意味している。

もっとも、変動荷重あるいはランダム荷重の下において疲労破壊現象が如何に理論付けられるべきかについて、このS-N曲線は何も語ってくれない。そして、この問題に初めて切り込んだのがころがり軸受工学の泰斗、A., Palmgren である。彼は1924年、ころがり軸受の寿命＝転動面に生ずる疲労破壊の推定にある仮説……総累積回転数を含む実験式を提示した⁴²⁾。

その後、パルムグレンの軸受負荷＝寿命理論は大幅な進化を遂げたが、1945年、アメリカのM. A., Miner によってその初期の仮説は材料力学の一般命題として定式化された。このため、この仮説はPalmgren-Miner 則とも単に「マイナー則」とも呼ばれている。

「マイナー則(線形累積損傷則)」とはある材料に応力 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ が単独で印加された際、破壊に至るまでの総繰返し数を N_1, N_2, \dots, N_m 、実際に作用した $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ の累積度数をそれぞれ n_1, n_2, \dots, n_m と表した場合、その破壊は：

42) 中村 宏・恒成利康・堀川 武・岡崎章三『機械の疲労寿命設計』養賢堂、1983年、39頁、参照。

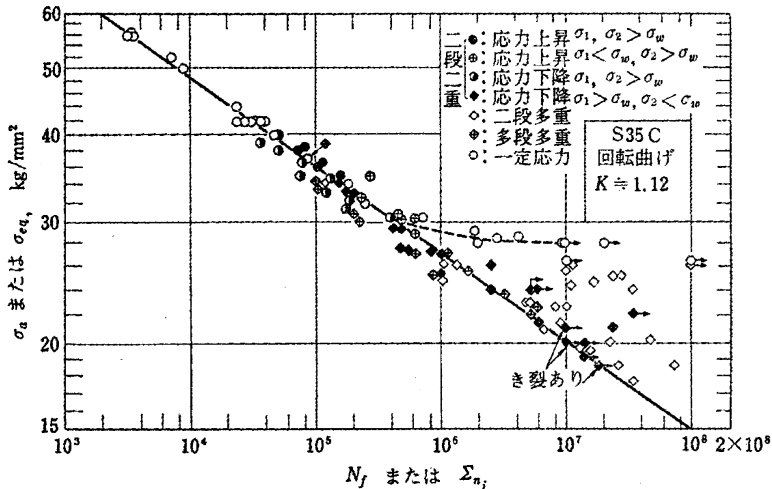
Palmgren の業績については拙稿「鉄道車輛ころがり軸受と台車の戦前・戦後史—蒸気機関車、客貨車、内燃動車、電車、新幹線電車から現在まで—」(大阪市立大学学術機関リポジトリ登載)にてごく表面的に紹介しておいた。

$$\Sigma(n_i/N_i) = n_1/N_1 + n_2/N_2 + \dots + n_m/N_m = 1$$

となった時点で起こるとする仮説であり、小さな応力も大きな応力も等しく n_i/N_i に寄与し、それらの単純和を以て材料の破壊が表現されるとする考え方である。しかし、実際の車軸折損事例はこれでは説明出来ない場合がほとんどであり、車軸の実寿命は「マイナー則」で計算された寿命より甚だしい場合、1000分の1程の短さであった。そこで中村らによって提唱されたのが所謂、「修正マイナー則」である⁴³⁾。

中村らは段付き試験片を用いた回転曲げ試験において疲労限以下の応力負荷によって材料に損傷が発生する事実を掴んでいた。その状況は次図に示される通りである。

図9 段付き試験片の一定及び変動応力の回転曲げ試験における損傷発生例



中村・恒成・堀川・岡崎『機械の疲労寿命設計』29頁，図Ⅲ.1.5。
 σ_a ：応力振幅 N_f ：破断繰返し数 σ_w ：疲労限 K ：切欠き係数⁴⁴⁾

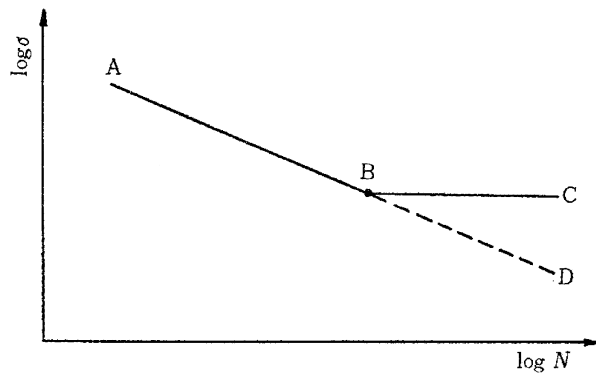
この図を言葉で表現すれば、両対数表示のS-N曲線における傾斜部分（時間強度部分）を疲労限以下まで延長した線上に損傷発生事例が認められるということである。そして、これを理論化したのが所謂「修正マイナー則」である。即ち、ランダム応力下における真のS-N曲線

43) 鶴戸口英善・川田雄一「材料の疲れ強さ」（日本機械学会 材料力学・機械材料部門委員会 材料の疲れ強さ資料調査分科会・切欠効果，寸法効果，仕上効果に関する調査分科会編『金属材料 疲れ強さの設計資料Ⅰ 一般・寸法効果・切欠効果』1961年，第1章 概説）には実物疲労試験機も無く実物のS-N曲線が得られていない状況下，小さな試験片を用いて得られたS-N曲線を下方にシフトさせた推定S-N曲線と「マイナー則」に依拠しつつ実働応力測定値を放り込んで推計を行い，電車車軸の寿命16.9年を算出する事例を紹介しているが，これはやや“初めに答えありき”的なアプローチとなっているようである。

44) 試験片の切欠き（段付き）に起因する応力集中度（切欠効果）を表す指標。この値が大きいくほど段差が大きく応力集中度も高くなる。平滑試験片なら1.00。これについては中村前掲「車軸の強度（第1報）」，そこからの引用として廣重『輪軸』34頁，参照。

は ABC ではなく ABD として表現されるということである。この学説について中村は「現在では……あたり前のこととされているが、昭和 43 年頃私達が言いだした時は奇異の眼でみられたものである」と述べている⁴⁵⁾。

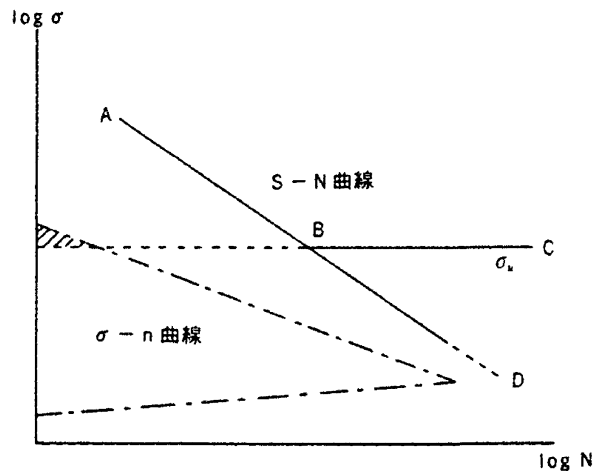
図 10 修正マイナー則の説明



同上書, 30 頁, 図Ⅲ.1.7 を大幅に簡略化。

実際にサンプリングされた応力頻度を基に一定の使用期間を想定した場合の累積応力頻度曲線, 即ち σ - n 曲線が S-N 曲線 ABC の十分下に位置する場合においてさえ, 真の S-N 曲線が ABC ではなく ABD であったなら決して安閑としては居られなくなる。即ち, 対数目盛で

図 11 S-N 曲線と累積 σ - n 曲線との関係



中村『物と事と生の研究史』37 頁, 図Ⅱ・66。

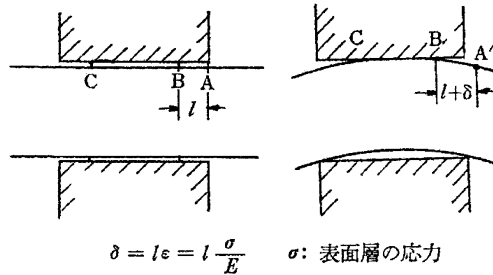
45) 中村『物と事と生の研究史』22 頁。なお, 中村は「修正マイナー則」について「自分でいうのはおこがましいが, 最初に言いだしたものとして“中村-堀川則”としてもよいのではなからうか」, 「通常修正マイナー則」といっているが, みつけたのは著者らであるので“中村-堀川”則といってもよいと考えている」とも語っている。中村『物と事と生の研究史』39~40, 139 頁, 参照。

はあるとはいえ、 σ - n 曲線がもう少し上に位置していたとすればこの部材は何時か必ず疲労破壊することになる。換言すれば、車軸なら嫌でも軸径を上げ、 σ - n 曲線と真の S - N 曲線とが交錯せぬ処まで応力切下げが図られねばならないということである。

但し、かような理論的アプローチを以てしても推計寿命と実寿命との間にはしばしば大きな誤差を生ずる。この誤差の発生要因としては形状によって異なる切欠き係数、圧入部の疲労強度低下といった問題があり、圧入部の疲労強度に対してはその表面粗度……ヘールバイト仕上げか研削仕上げか……の影響が関係して来る。これは車軸の撓みによって圧入部に発生する相対送りとこれに起因するフレッチング損傷が当該部の寿命に係わる大きな要素となるからである⁴⁶⁾。

図 12 車軸・車輪圧入部に生ずる相対送り

車輪はほとんど変形しないが、車軸は曲げ応力を受けて表面が伸び縮みするので相対送りが起きる。



$\delta = l \varepsilon = l \frac{\sigma}{E}$ σ : 表面層の応力
(BC 間は車輪内面と車軸外面の摩擦係数のため、
すべらないと仮定している)

中村・田中『機械の疲れ寿命算出法』171 頁, 図 11.10。

結論的に、車軸の疲労強度を完全に見通すような便利な理論は今日においてさえ得られておらず、あるのは「確率論的破壊力学」や安全率を大き目に（ドンブリ勘定で）計上する「決定論的破壊力学」と呼ばれる体系だけである。よって、厳しい安全管理が問われる新幹線車軸の場合、今日においても 3 万 km 毎の在姿超音波探傷や 45 万 km 毎に車輪を外すかざらすかして行われる磁粉探傷等を通じて得られる経過観察結果を踏まえた個体毎の寿命の検討ないし健全性評価が不可欠となっている⁴⁷⁾。

46) 標準試験片の表面は鏡面研磨された平滑面となっている。これに対してヘールバイト仕上げされた表面を有する部材の疲労限はその 95%と見積もられた。永島・中村「電車用車軸の強度について」、中村「車軸の強度（第1報）」、工作局『車軸折損について』19～20 頁、参照。ヘールバイト仕上げについては拙稿「20 世紀前半アメリカの鉄道輪軸について(%)」において言及しておいた。

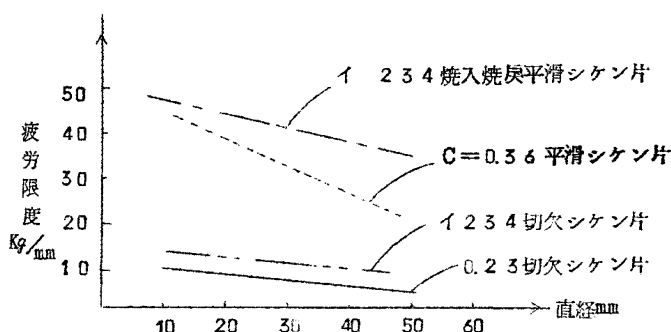
47) 赤間 誠「計算力学による新幹線車軸の健全性評価に関する研究」『鉄道総研報告』特別第 22 号、1998 年、序論と結論、高速車両用輪軸研究委員会編『鉄道輪軸』第 2 章、参照。赤間論文で簡単明瞭確実なモノとして称揚されている直流電位差法は今のところ車軸の非破壊検査には実用されていないようである。

iii) 車軸寸法・形状の変更を伴わぬ改善の個別的諸要素……材料, 熱処理, 表面処理

a. 車軸材料を特殊鋼とすること

車軸材料に Ni 鋼ないし Ni-Cr-Mo 鋼等を使用すれば, その寸法・形状を変えずに強度を上げることが可能となる。しかし, これについても実験的に切欠き感度が高く, 圧入部における改善効果にも問題があることが判明していた。また, 肝心なのは強度というよりも疲労強度である。なお, 次図に示されるイ 234 は如何なる意図に因ってか如上の鋼種とは異なり, モリブデン節約代用鋼の内の強靱鋼に分類された 90kg Si-Mn-Cr 鋼である⁴⁸⁾。

図 13 疲労限と切欠き感度に係わる特殊鋼と炭素鋼との比較



『車軸折損について』, 33 頁, より。

この他に現用材料の範囲内での高品位化が論じられている。もっとも, その内容は既に車軸用鋼の規格の処で述べられた程度のコトに過ぎない。

b. 現用車軸材への焼戻し処理

軸径の全般的増大を避けるという前提の下で鉄道技術研究所と工作局とによって検討された車軸折損防止策ないしその疲労強度向上策の第 1 は車軸の熱処理 —— 焼ならしに代わる焼入れ・焼戻し —— である。これについては表 20 のようなデータが掲げられている。

中村技師とは勿論, 中村 宏であろうが, 要は, 焼入れ・焼戻し処理は疲労強度一般の向上には有効である反面, 車軸に付きものの切欠き(段付き)部や輪軸の形で用いられる場合に不可避となる圧入部の疲労強度向上には役立たないということである。

c. 浸炭または窒化の採用

これらの化学的表面硬化は材の表面硬度を高めるだけでなく表面に圧縮残留応力を作用させ,

48) 生産技術協会『實用工學便覧』山海堂, 1951 年, 296 頁, 参照。それらは更に甲～丁へと 4 分類されていたが, それらの化学成分は何れも同じで C: 0.33~0.4%, Si: 0.3~0.8%, Mn: 0.8~1.2%, P: <0.03%, S: <0.03%, Cr: 0.8~1.2%で, 熱処理は 850~900°C 焼準, であった。

表 20 車軸材料の熱処理と疲労強度

熱 処 理		焼入れ・焼戻し		焼 準	
実 験 者		中村技師	H.F. Moore	中村技師	永島博士
抗張力 kg/mm ²		-	68.0	67.4	64.7
疲労限 kg/mm ²	標準試験片	39	-	-	26
	圧入試験片	16	-	17.5	16
	切欠試験片	17	16.5	-	14

同上書, 32頁, より。

微小亀裂を抑え込んでその成長を止めるため疲労強度向上に役立つ。また、表面硬度の向上には形状係数(応力集中度)を引下げ効果もある。ただ、車軸材にかように長い時間のかかる処理を施すことはコスト的負担が過大となるため実現性は乏しいと見做された⁴⁹⁾。

d. ショット・ピーニング

この物理的表面硬化法も材の表面に圧縮残留応力を作用させる工法である。しかし、車軸程度の大型部材にこれを施して成功した事例は無く、その実効性のほどについては今後の研究課題とされるしかなかった⁵⁰⁾。

e. 軸表面のローリング

これもアメリカ輪軸技術史との係わりで紹介済みの工法である。国鉄でも1950年代後半には車輪座や平軸受用のジャーナルに関して旋削仕上げ後、ローリングを施すようになっていた。圧入部位における疲労強度向上効果は明らかであったが、その具体的処方最適化についてはなお研究の余地ありとされていた⁵¹⁾。

f. 高周波焼入れ

これについて工作局は：

49) 『車軸折損について』33頁, 参照。浸炭や窒化そのものについては拙稿「三菱航空発動機技術史 第I部」, 「同 第III部」にて取り上げておいた。ショット・ピーニング及び次項ローリング一般については山本有孝「表面冷間加工」(日本機械学会 材料力学・機械材料部門委員会 材料の疲れにおける表面効果資料調査分科会編『金属材料 疲れ強さの設計資料 II 表面硬化』1965年, 第6章), 参照。

50) ショット・ピーニングそのものについても同上「第III部」にて触れられている。

51) 表21については直刀力とあるのを直圧力に, 単位もkg/cm²とあるのを訂正。直圧力とは嵌め合い面に作用する面圧の謂いで, 締め代, 材の弾性係数, サイズおよび車輪の型式(一体車輪, 板輪心, スポーク輪心)に応じて定まる値であるが, 普通は8前後で4.2までというのは過小な値である。廣重巖『輪軸』交友社, 1971年, 160頁も参照。

表 21 ローリングの仕様と効果

試験片	圧入による直圧力 kg/mm ²	ロール 1 個 当り圧力 kg	ハブを圧入せぬ場 合の疲労限 kg/cm ²	ハブ圧入時の 疲労限 kg/cm ²
0.42%C 炭素鋼	~8.4	ロールせず	22.2	13.0
	~4.2	180	〃	16.7
	~4.2	360	〃	20.4

同上書, 34 頁, より。

車軸の圧入部に高周波焼入れを施すことは圧入部の強度増強の方法としては有効であり、今迄の各種の試験片による結果も良好である。但し、熱影響部即ち焼入れ境界部をどこにおさめるかという事と寸法効果の影響を充分に研究する必要がある。圧入部の両端をワンショットで焼入れし焼入れ境界部をボス中央にもってくることは興味ある焼入れ方法であり、特に高周波焼入れによる疲れ限度の上昇については技研中村技師の研究が数多く発表されている。

と述べている⁵²⁾。

中村による開発実験の流れについては後程、簡単に取上げる。

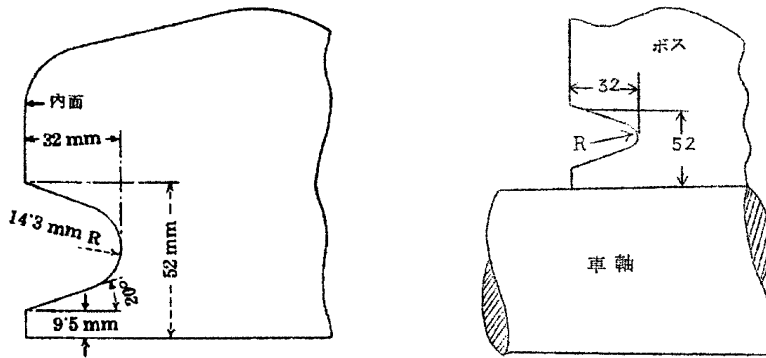
g. 輪心ハブへの逃し溝加工

次図のようなストレートの軸にごく普通の車輪を圧入すれば嵌合い部に作用する直圧力分布はハブの両端で最大となり、中間部ではそれより低い均一の値をとる。この時、輪軸は一体モノのような性質を帯び、ハブと車軸との境目は大きな切欠きとなって応力集中を生ずる。車輪に横圧が作用し、軸の伸び側の嵌合い部外端に直圧力とは別のモーメント荷重が印加される場合には尚更である。

この応力集中を回避する最も普通の方策は車輪座の径をやや大きく取り、その両端部に丸味やテーパを付けて軸径を徐々に落して行くことであるが、図のようにハブ外端面に円環状の逃し溝を加工することによって面圧を下げ、応力集中を防ぐ方法も提唱されていた。勿論、両者を併用することも可能である。上述の通りこれは 1935 年にアメリカで発表されたアイデアそのものである。

52) 『車軸折損について』34 頁。寸法効果の意味については拙稿「20 世紀前半アメリカの鉄道輪軸について」の中で触れておいた。『金属材料 疲れ強さの設計資料 I 一般・寸法効果・切欠効果』第 3 章は寸法効果と切欠効果、圧入軸の疲労強度低下に係わる資料となっている。高周波焼入れに関しては中村前掲「車軸の強度(第 3 号)」『鉄道業務研究資料』第 8 巻第 9 号、1951 年 4 月、の 3、同『高周波焼入れと疲労強度』日刊工業新聞社、1963 年、同「高周波焼入れ」(『金属材料 疲れ強さの設計資料 II 表面硬化』第 7 章)、参照。

図14 ハブ外端面への逃し溝加工



北島前掲「車軸の折損と車輪の圧入に就て」第2圖、『車軸折損について』34頁、より⁵³⁾。

但し、上述の通り、車軸と車輪との嵌合い部は完全に一体化するワケではなく、嵌合い面においては車軸が弯曲しつつ回転することによって軸と孔との間に絶えず相対迂りを生ずる。この迂りは大きくなり、当該の迂り部位にフレッチングを招来し易くなる、これによる表面欠陥は車軸の疲労強度低下の要因となる⁵⁴⁾。

iv) 中空軸の採用

こちらは掲げられた諸施策の内、唯一、抜本的な設計変更を伴う案である。同一重量であれば中空軸の方が曲げ剛性は大きい。直径を大きくすることが出来るからである。また、比強度の高い特殊鋼を用いてより軽量化を進める場合、熱処理が不可欠となるが、中空構造になっておれば質量効果の抑制に有利である点についてもアメリカ輪軸技術史に絡んで述べておいた通りである。この中空車軸について、工作局は「現在オロ40及び形式貨車各一両に採用試験中である」と述べている⁵⁵⁾。

オロ40というのは特に変哲もない二等客車である。それに続く「及び」の後、「形式」の前には勿論、何かが抜けている。これについては後程、立ち帰る。

工作局は「車軸の設計方面よりの防止対策は以上の様に多く考へられ今後の研究課題として現場の実験と相俟って他日の完成が期待されている」と結んでいる。遺憾ながら、「実験」が研究現場での基礎実験を意味するのか、営業車両による現車実験を指しているのかについては

53) 中村「車軸の強度(第2號)」には第21圖として左図寸法を31.8, 52.4としたモノが収められている。大塚誠之監修『鉄道車両－研究資料－』日刊工業新聞社、1957年、233頁、第6・39図(a)は右図の大衆化版のようなモノである。

54) 大塚監修『鉄道車両－研究資料－』233～234頁、廣重同上書、177～178、356～357頁、中村・田中『機械の疲れ寿命算出法』170～172頁、参照。

55) 『車軸折損について』34頁、より。

些か不分明なのではあるが……。

もっとも、この点以上に問題視されるべきは、以上、iii) a～g 並びにiv) は工作局『車軸折損について』から要約した文章であるにも拘らず、その中身が8年も前に出された中村 宏「車軸の強度(第3号)」2の2)～7)、及び3の丸写ししないし紹介に過ぎぬという事実である(一部は上述の通り同じ号に掲載された「同(第2号)」の内容とも重なっている)。先に指摘しておいた車軸強度計算式の例と併せて観るに、この方面においては工作局独自の研究や理論的見識といった世界は存在しておらず、工作局は単なる工作屋であったかの如くである。

それはともかく、内々の文書ではあれ、^{いやしく}苟も工作局名で発行された『車軸折損について』において車軸の中空化が折損防止のための一方策としてリストアップされていたという事実は重要である。その期待は真っ向から裏切られることになるのだが、これとは全く対照的に、併記されていた高周波焼入れは後年、新幹線電車をはじめ車軸、電動機軸の疲労強度向上策の極め付けとしてメジャー化の途を辿って行く。そして、その2つの可能性を提示して見せたのが鉄道技術研究所技師、中村 宏であったことは本邦機械技術史において記憶されるに値する事蹟の一つと言って良い。

(以下、次号)