

Title	クランク車軸の技術史：「C53 型蒸気機関車試論：近代技術史における 3 気筒機関車の位置付けと国鉄史観, 反国鉄史観」補遺
Author	坂上 茂樹
Citation	経済学雑誌, 111 巻 1 号, p.1-80.
Issue Date	2010-06
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

Osaka Metropolitan University

クランク車軸の技術史

——「C53 型蒸気機関車試論——近代技術史における 3 気筒機関車の
位置付けと国鉄史観、反国鉄史観——」補遺——

坂 上 茂 樹

目 次

はじめに	3. RR 鍛造の登場
I. クランク車軸の創生	4. 最終発達局面を示した並列 4 気筒蒸気 機関車用組立式クランク車軸の態様
1. 19世紀における中・小形機関用クラン ク軸の基本的態様	結びにかえて
2. 内側 2 気筒機関車とそのクランク車軸	追 記
3. 並列 4 気筒機関車の登場	1. ミカエの使用実績から
II. 並列 4 気筒機関車用クランク車軸の具体 的实施例	2. ミカエのクランク車軸折損事故につい て
1. フランス	3. “付セショベル” について
2. イギリス	4. C53 における Alco 式動力逆転機の採 用初期の状況について
3. ドイツ	5. 気筒油の不足対策としての混成油使用 について
4. アメリカ	6. C53 の合成弁装置におけるころがり 軸受のガタと耐久力について
III. 鍛造技術の進歩と 3・4 気筒機関車用ク ランク車軸	7. C53 の“出渋り”について
1. 火造り＝自由鍛造の系譜	
2. 型鍛造あれこれ	

はじめに

レシプロ蒸気機関を有する最もありふれた蒸気機関車における動力伝達はピストンから動輪上に植えられたクランクピンへと主連棒を介して駆動力を移転することによって実行される。この場合、動力取出し軸は通常の機関におけるクランク軸とは区別される「クランクディスク」と「車軸」との組合せという形を採る。

然しながら、“機関車トーマス”やその仲間の一部に見られるような内側気筒式蒸気機関車および 3、4 気筒蒸気機関車においては左右の動輪＝クランクディスク（連結動輪型の場合、連接棒のためのクランクピンを担持）を結合する車軸自体が 1 ないし 2 個のクランク・スローを有する「クランク車軸」とならざるを得ない。

内側気筒などという酔狂な設計が愛好されたのは、機関主要部の砂塵からの防御に関してこ

の方式が有利とされた点を除けば、気筒が真中に寄っているため往復運動部の不釣合慣性力の作用点間距離が小さく、ヨーイングやローリングのモーメントが小さくなるという専ら走行安定性＝速度向上可能性に係わる理由からであった。

3気筒機関車はこのせせこましさをからの積極的解放を志向した試みの一典型であり、内側2気筒に屋上屋を架したかの如き4気筒機関車は、後述されるように、バランスングの更なる改善とこれによる回転数向上、クランクピン軸受負荷の低減等を目指して開発された今一つのアンチテーゼをなす。そして実際、欧米においては多くの複式・単式3・4気筒機関車群が永らく活躍している。

これらに組込まれたクランク車軸は、当然のことながら、他の用途に用いられる蒸気機関や内燃機関のクランク軸と設計、製造法を共にする存在となる。従って、機関車用クランク車軸の歴史を追うことはクランク軸一般の歴史を跡付ける作業に通ずる。

これを真正面から企てるとすれば、全体として膨大な一次資料ならびに関連情報の収集、処理を要する課題となってしまう。これは到底、筆者の能力を超える作業となる。

しかし、3気筒機関車のクランク車軸については先に一瞥を試みざるを得なかったという事情もあり¹⁾、そこで不十分にしか言及し得なかった製造工程の問題や内側2気筒機関車及び非・連接式4気筒機関車に用いられたが故に事実としてクランク車軸の主流をなした2スロー・クランク車軸について、二・三次文献に拠ってではあれ、かつ、国別の情報量の多寡には目を瞑り、せめてその設計並びに製造法に着目したデータ整理のメモを残し、翻って日本技術の自画像を描くためのピースの一つを提示しておく位の義務はあろうと愚考し、本稿を問うこととした。前稿への補遺と銘打つ所以である。

なお、追記1～7は純然たる追記＝不手際の証明であるが、満鉄ミカエのクランク車軸折損に係わる情報は出現頻度のかなり低い技術史的資料である。

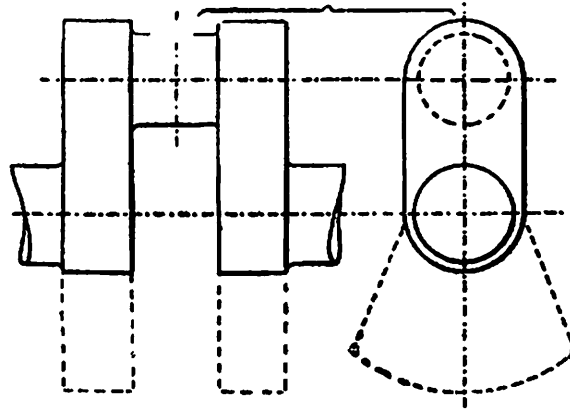
I. クランク車軸の創生

1. 19世紀末から20世紀初期にかけての中・小形機関用クランク軸の基本的態様

さて、クランク軸粗形材一般の製造方法として古くから頼られていた方法は削り出し、曲げ、組立の3つである。削り出しは盛金・鍛接法で得られた粗形材、太い棒材ないし厚板材から機械加工によって削り出すか、自由鍛造（芋鍛造）に拠って得られた凸状の粗形材から削り出す、といった工法である。曲げは文字通り棒材の曲げ加工で、棒材は鉄の塊から火造りされたから「鍛錬比のごく小さい鍛造」とも形容可能である。組立は各部を別個に火造りし、機械加工を施した後、圧入して組み立てる方法である。

1) 拙稿「C53型蒸気機関車試論(1/4)～(4/4)」『経済学雑誌』109巻4号～110巻3号、2009年3月～2010年1月、参照。

図1 削り出し (slotted-out) クランク



Herman Haeder, translated by H. H. P., Powles, *A Handbook on the Steam Engine With Especial Reference to Small and Medium-Sized Engines*. London, 1902, p. 49, Fig. 168, 169 より。

破線は釣合錘。わが国の業界においてはウェブ間の削り出しを“枅抜き”、“ピン抜き”などと通称した。勿論、前者は除去される金属塊の形状に、後者はクランクピンを切出す工程の主旨に因む命名名である。図29、図38A、参照。

図1は削り出しのクランクである。素材は不明であるが、まさに“為せば成る”式機械加工の賜である。また、素材が盛金・鍛接によって調達された場合は元より、自由鍛造粗形材であれ圧延材であれ、機械加工はクランク軸の長手方向に沿うその鍛流線を断ち切ることになるため、一体型であるとは言え、このテのクランク軸に高い疲労強度を期待することは出来ない²⁾。

なお、破線のように釣合錘を配する場合、これ毎、ウェブを削り出してしまうか、別途、機械加工された錘をアリ組み・ボルト締め等の方法で後付けするか、何れかの方法が可能である。また、このテの削り出しクランクにおいても、時代が下れば軽量性を求め、ピンならびにジャーナル部に中空加工が施されるケースの出現が認められる。

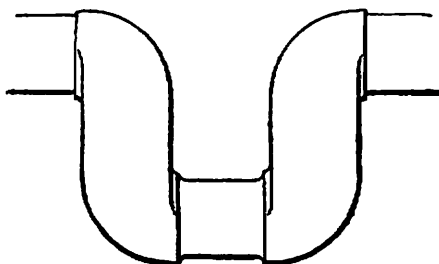
図2は曲げクランクである。ごくアッサリした物で、Haeder に拠れば、可搬式の小形蒸気機関には専らこれが用いられていた。この方式なら疲労強度に優れ、使用現場での修理が不可能な可搬式機関のクランク軸として好適であったろう。

しかし、複数気筒を有する据付機関や単気筒でも機関の前後長を特に詰めたい機関の場合、かように間延びしたプロフィールのクランク軸では意図に合わぬため、他の回りくどい工法を以ってするクランク軸が使用されざるを得なかった。

図3左は組立式クランクの一例である。圧入部の滑りや亀裂がこの種のクランク軸に付いて

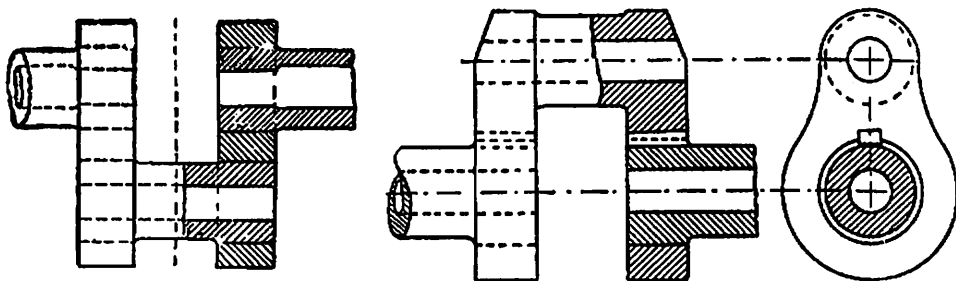
2) 鍛流線 (fiber flow, grain flow) とは鍛錬により鋳塊内部の粗大結晶組織が破壊され、併せて鋳巣、空孔等が圧着されることにより均一微細化された組織が鍛伸方向に伸ばされたもの。繊維長手方向の引張強度・靱性は高められ、同直角方向のそれは低下する。

図2 曲げ (bent) クランク



ditto, p. 50, Fig. 170.

図3 組立式 (built-up) クランクと半組立式クランク



ditto, p. 46, Fig. 148.

David Allan Low, *Heat Engines Embracing The Theory, Construction, and Performance of Steam Boilers Reciprocating Steam Engines Steam Turbines and Internal Combustion Engines*. London 1930, p. 266, Fig. 296.

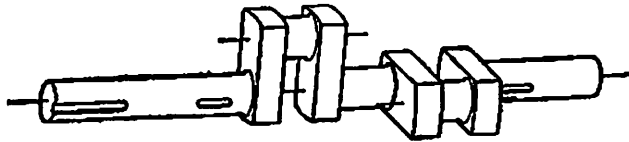
回る不安である。組立式は如何にも安易、低級な工法に見えるかも知れぬが、空冷星型航空発動機のクランク軸はほとんどがこの組立式であった。本図の例においても比較的高速の高級な機関のクランク軸であったと見え、軽量化（と若干の応力分散）のための中空加工がピンとジャーナルに施されており、左図の例ではジャーナル部に段付き加工まで施されている³⁾。

半組立式クランクは完全組立式より同一強度に対して軽量である。これは一体鍛造式に近い比強度を得るため、後年に開発されたモノのようである。

並列ないし直列2気筒蒸気機関においては2スロー・クランク軸（図4）が用いられた。内燃機関であれば2つのスローの位相は360°ないし180°となるが、始動電動機等によってではなく自立的に起動し、かつ、大きな起動トルクの発生を求められる蒸気機関においては90°位相のクランクが用いられねばならない。蒸気機関は普通、複動であったから、かくすることに

3) 中空加工により、ピン、ジャーナルのフィレット部において若干の曲げ応力の分散が図られることについては cf. Charles Fayette Taylor, *The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice*. Vol. II: Combustion, Fuels, Materials, Design. 2nd. ed. MIT Press, 1968, p. 493 Fig. 11-35, pp. 496~497 Fig. 11-37.

図4 一般的な蒸気機関の2スロー・90°クランク軸



北原鐵雄編『機械時代（上）』アルス，最新科学図鑑(6)，1930年，66頁，
第二十二図。

よって発生トルクの脈動も一応，我慢出来るレベルに押えられる。

因みに，外側2気筒式蒸気機関車はこの2つのクランク・スローを両端に移すと共に，動輪という名のクランク・ディスクに置換えたモノである。内側2気筒式蒸気機関車においては左右の動輪がこのようなクランク軸＝クランク車軸によって繋がれる。連結動輪型であればこの動輪にも連接棒のためのクランクピンが植えられるため，それはクランク・ディスクの形態を取ることになる。

既に前稿で触れておいたように，蒸気機関車において小形の内側気筒方式が一般的であったイギリス初期の時代，クランク車軸は鍛鉄製で，盛金・火造りによって別々に打出された1スロー分の左右ビースを中央部で鍛接することによって90°クランク車軸が造られた。具体的な工程については後ほど改めて紹介するが，こんな粗形材からの加工であったから，その削り代は甚大であった。

なお，一部には組立式も用いられたようであるが，素材が鍛鉄とあっては圧入部の緊締力が弱きに過ぎたため，これを用いた組立式クランク車軸は鍛接粗形材を用いるものより壊れ易かった。

もっとも，何れの製法を採ったにせよ，当時のクランク車軸は強度が低く，かの Robert Stephenson などは1833年に6輪連結（3動軸）C型機関車の曲線通過時における内側第2動輪への横圧による中央クランク車軸折損防止策として第2動輪の円筒踏面化ないしフランジレス化に関する特許を取得したほどである⁴⁾。

クランク軸粗形材の製造工程における進化についてはⅢにおいてより体系的に取り上げられることになる。

2. 内側2気筒機関車とそのクランク車軸

後に見るように，アメリカではクランク車軸は嫌われモノであった。アメリカが単純な外側2気筒蒸気機関車で速度並びに牽引力を確保出来る独自の設計思想に到達した点については既に前稿にて言及した通りである。

4) cf. Zerah Colburn, *Locomotive Engineering and the Mechanism of Railways*. Vol. I, Text. London and Glasgow, 1871, p. 97.

しかし、鉄道発祥の国、イギリスにおいては往時、このクランク車軸を用いる内側2気筒機関車が主流であった。これに用いられていたクランク車軸の一例を図5として掲げておく。19世紀後半のモノであるから、素材は自由鍛造＝芋鍛造による粗形材であろう。板台枠を内外二重構造とし、車軸軸受を動輪の内外に配しているのはクランク車軸の強度に大いなる不安が在ったことの証左である。

なお、普通の陸舶用機関や内燃機関などでは当り前のことであるが、蒸気機関車においてもクランク車軸が用いられる場合には主連棒の太端、即ち“中ビク”を“open end”＝分割構造としなければ組立にも検修に不都合を来す。

図5においては十分に描写されていないが、この“中ビク”の分割法については各種、実用化されており、一見、最も直截なのは文字通り大端部を割ってしまう遣り方である。

付言すれば、機関車界においてはこの大端部を割る設計でありさえすれば何でもかんでも“marine type”とか“marine practice”と称す慣わしであったかに見受けられる。しかし、これは余り適当な表現とは言えない。

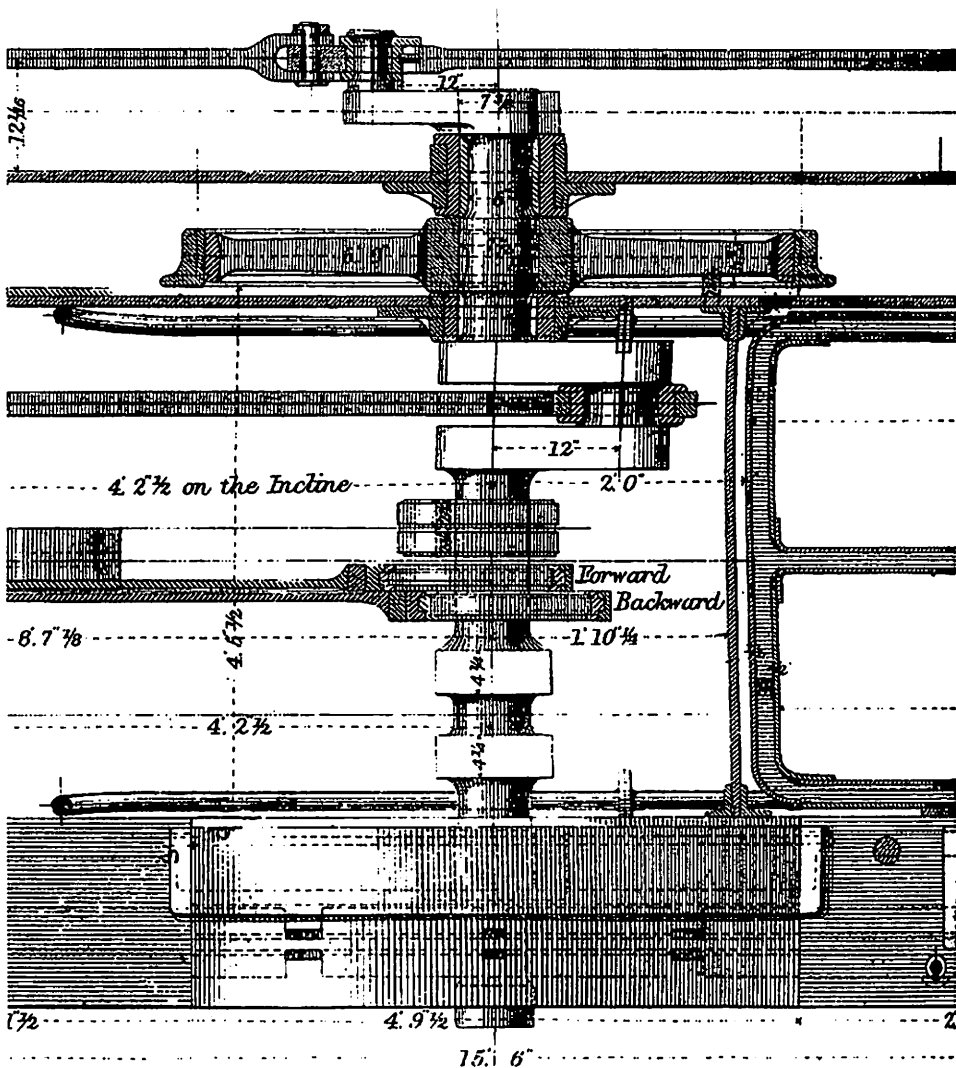
そもそも、舶用蒸気機関にしばしば用いられた“正調”、“Marine Type of Connecting-rod”とはロッドのクランクピン側端部が「T」型に成形され、この「T」とアウター・キャップとの間にスペーサを挟んで相対する半割の軸受金（内面にメタル）が2個挟まれ、2本のクランクピン・ボルトで全体が共締めされる構造を意味した（*Machinery's Encyclopedia*. 1929 ed. Vol. VI p. 17）。即ち、“二（通しボルト2本）+ 1【】ト”。

無論、古い書物を繙いてみても舶用機関全般にこのテの構造が用いられていたワケではないが、それでもこの“Marine Type of Connecting-rod”は現在の舶用中・大形ディーゼルの連棒大端部において主流をなす「平割り3締め法」、即ち、「T」型連棒と上部軸受冠、下部軸受冠の3ピースから構成され、これらを別々の、あるいは共通の通しボルトで締結する構造＝“【】ト”の先祖に当たっている。

当初、Gresley パシフィックにおいて実用された非・ストラップ式分割型太端部がこの“正調”、marine type や「平割り3締め法」より更に高度な2分割入れ子構造であった点については既に前稿にて確認済みである。

然しながら、蒸気機関車における分割型太端部の主流は圧倒的に“ストラップ”を用いるヨリ簡便な構造であった。後述する4気筒平均複式機関車の祖、de Glehn などは内側主連棒太端側を「ト」状に形成し、そこに半割の軸受金「【】」を収容する「□」状の“ストラップ”を当てがい、シムを介して2個のナットで固定する、という到ってシンプルな設計を編み出した。しかも、de Glehn の設計においては図6に見られるように、ストラップ「□」自体が異形のUボルトをなし、シンプル性、軽量性が徹底的に追求されていた。この“□【】ト”構造は後に述べるような経緯でイギリスに伝播し、“Franco-Swindon pattern”とも“Churchward-de Glehn type”などとも呼ばれるに到った。

図5 Sharp, Stewart & Co. 製内側2気筒C型貨物用機関車のクランク車軸



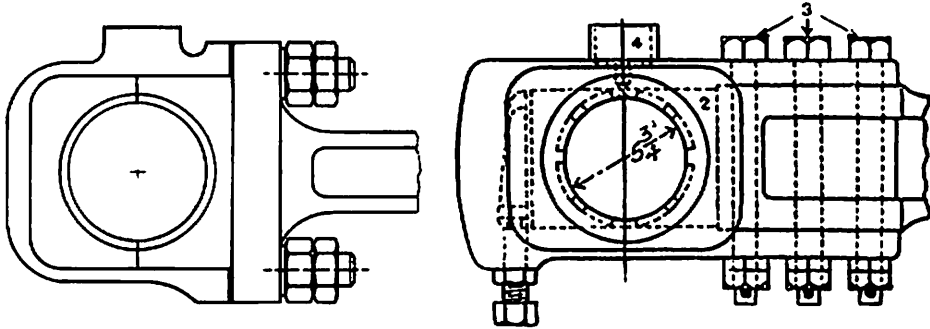
Colburn, *Locomotive Engineering and the Mechanism of Railways*. Vol. II, Plates. Plate V.

この機関車は Manchester の Sharp, Stewart & Co. によってエジプト向けに製造され、1862年の国際博覧会に
展された。同型機はイギリス国内でも使用されていた。軌間は 1359 mm。

他方、同様にストラップを使用しながら、これを主連棒中心線に直交するボルトで固定し、
コッタで隙間調整を図る構造があった。これは20世紀初頭にはアメリカでは外側気筒の主連棒
においてさえ、ごく普通に見られた、造り易さという点において de Glehn 式より更に一歩進
んだ構造である。C52 や C53 に採用されることになったモノはその洗練版に他ならない⁵⁾。

5) 前稿「C53 型蒸気機関車試論」の第 V 章における中ビクの “Franco-Swindon pattern” ないし
“Churchward-de Glehn type” に拘わる説明は誤りであった。関連の図、本文共に本稿のようにノ

図6 分割式太端2種：“Franco-Swindon pattern”（左）とアメリカ流“open end”方式（右）



A., Morton Bell, *Locomotives*. Vol. I, (London, 1935), Frontpiece, J., T., van Riemsdijk, *Compound Locomotives An International Survey*. (Cornwall, 1994), pp. 53, 87, 98 を参考に筆者作成。

森彦三・松野千勝『機関車工学』中巻, 187頁, 第746図より。

それはともかく、イギリスにおいては如何にも面倒な内側気筒方式がその後も長らく愛好され続け、Worsdell and von Borris 式と称する内側2気筒複式などというゲテモノまで誕生した。ゲテモノとは言え、1890年4月の時点において同方式の機関車はイギリス全土で約600両も保有されており、とりわけ North Eastern 鉄道は120両もの同方式機関車を抱えていた⁶⁾。

因みに、鉄道局神戸工場で1893年に製造された初の“国産”機関車221号、後の860型1B1タンク機関車は正しくこの Worsdell and Von Borris 式内側2気筒複式であった⁷⁾。

ここでは図6としてN.E. 鉄道における標準クランク車軸を示しておこう。クランクウェブの肉厚が下げられた代りに形状を円盤化させることで強度を確保する設計になっており、ある種、進化の跡が窺われ、車軸軸受も左右各1個に簡素化されている。

20世紀初頭、1905年に出版された *The Locomotive of To-Day*. 6th. ed. London, に拠れば、当時は一体モノに代って組立式クランク車軸が幅を利かし出しており、圧入・キー止め方式だけでなく、ピン、ジャーナル、ウェブをネジ結合するタイプの組立式クランク車軸も存在したとある。但し、ネジ結合した後、キーでも打ち込んだのか、あるいはテーパネジでも用いたのか、については不明とせざるを得ない⁸⁾。

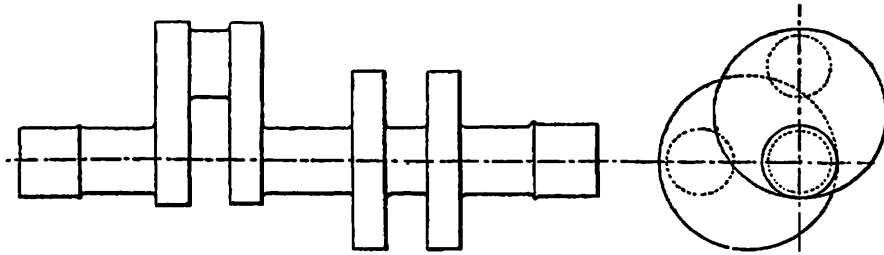
※訂正させて頂く。なお、これら以外にも様々な“open end”方式が存在したが、本稿ではこれ以上、この問題に深入りしない。

6) cf. Daniel Kinner Clark, *The Steam Engine: A Treatise on Steam Engine and Boilers*. Vol. II, London, et al. 1895, p. 625. Worsdell and von Borris 式なる呼称はそれがイギリスの機関車技師 Thomas William Worsdell (1838~1916) とプロイセン国鉄の機関車技師 August von Borris (1852~1906) との共同開発に拠る成果である事蹟に因む。

7) 川上幸義『私の蒸気機関車史(上)』交友社, 1978年, 184~187頁, 参照。

8) cf. *The Locomotive of To-Day*. 6th. ed. (1915 *The Locomotive Magazine* の記事を編集したもの), p. 137.

図6 イギリス、N. E. 鉄道における内側2気筒複式機関車用標準クランク車軸



Clark, *The Steam Engine: A Treatise on Steam Engine and Boilers*. Vol. II, p. 786, Figs. 1054.

この時代、イギリスではちょっと変わった設計も各種、試されていた。図7は釣合錘無しの削り出しクランク車軸で、ウェブには鋼鉄製のタガが焼嵌めされており⁹⁾、かつ、内側ウェブ(側面図は片スローのみ表示)には余分の厚味が付与されている。

内側ウェブが厚くされたのは軸受から遠いこの部分に曲げモーメントに起因する折損事故が最も起こり易かったからである。折損頻度について示す具体的データは未見であるが、この頃においてもなお、クランク車軸の折損を恐れ、前掲図5の如き4軸受方式を採る設計例もしばしば見られたと教えられれば状況についてある程度の察しは付こう。

また、クランク車軸における折損事故中、第2位を占めたクランクピン部を強化するためとして、当時、ウェブとピン部とを貫通する孔を明け、ボルトを通してその先端をかしめたり(リベットの代り)、ボルト・ナットで締め上げたり、添え図Gに示されるように、一方のウェブに雌ネジを切ってボルトを締め込んだりする方策が講じられる場合もあった。

North British Locomotive Co. Ltd. の手になる South Indian 鉄道向け 0-6-0 内側2気筒機関車のクランク車軸はGのような設計であり、タガの材料はクランク車軸とほぼ同一の材料特性を有する鋼であった¹⁰⁾。

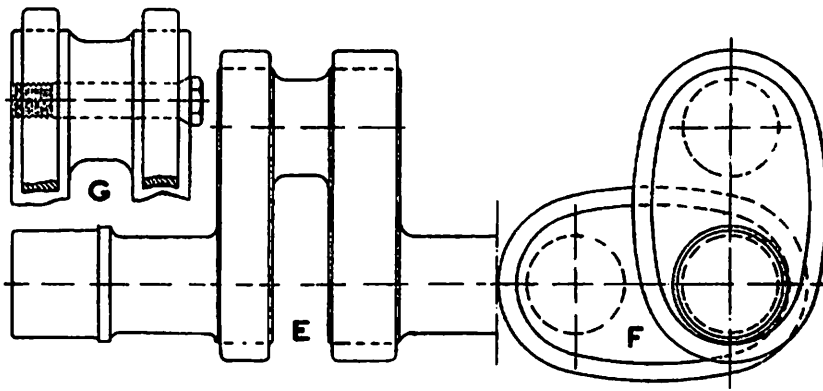
9) 焼嵌めとは加熱炉や加熱油槽を用いて部材を鋼材の焼き戻し温度以下=タイヤの場合、加熱炉(Tire Expander)で通常250~300℃強に均一に加熱し、膨張させた後、常温の相手方に遊合させ、その冷却・収縮により相手方との間に締め込みを得る工程。タイヤの焼嵌めについては東鉄運転部客貨車課『近代客貨車の理論と構造』第3版、交友社、1968年、47~49頁、参照。

序でながら、南満洲鉄道や朝鮮鉄道ではタイヤは焼嵌めのみで固定され、故障を生じていなかったが、鉄道省・国鉄は焼嵌めオンリー化を試みては失敗を重ねている。焼嵌め後の“止輪”(retaining ring)の要不要に係わる鉄道省・国鉄における試行錯誤の経過については広重巖『輪軸』交友社、1971年、143~144頁、また、焼嵌め工程については車輪の車軸へのそれについてではあるが、同書、171~173頁、参照。

アメリカでは“止輪”の使用例が時と共に漸減して行った形跡がある。但し、Alco は相当早い段階から“止輪”無しで一貫していた。満鉄はこれに倣ったのであろう。欧州では“止輪”を用いたり、半径方向にボルトを打込んで固定する手法が愛好された。

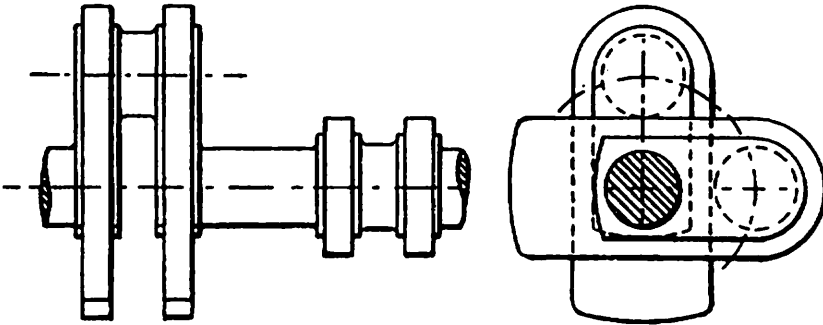
10) cf. E., A., Philipson, *Steam Locomotive Design: Data and Formulae*. 1936 (2004), Plate No. 16.

図7 タガ入り削り出し crank 車軸の設計例



The Locomotive of To-Day. 6th. ed., p. 132, Fig. 27 より。

図8 釣合錘を兼ねる異形のタガを使用した crank 車軸



A. M. Bell, *Locomotives Their Construction, Maintenance and Operation*. Vol. I, London, c.a. 1935, p. 116, Fig. 15.

The Locomotive of To-Day. 6th. ed. の編集者に拠れば、車軸用鋼は平炉鋼ないしペッセマー鋼製で、引張強さ 49.6 kg/cm^2 のものが使用された。Crank 車軸においてはしばしば製造ロット毎に1本を抜き取り、ウェブ間に楔を打ち込んでこれを押し上げ、破壊に至らしめるテストが実施された。また、Crank 車軸は走行20万マイルに至る前に破損が生じた場合、メーカー負担で新品との交換がなされることを条件として受領された。

継目無の鋼製軋造タガを焼嵌め、楕円形のウェブを補強する所作は当時としては慣習的に行われていた。ウェブのプロフィールとしては楕円以外にも様々なものがあった。しかし、ディスク状ウェブの場合にはタガは嵌められなかった¹¹⁾。

図8は部分釣合のための釣合錘を兼ねる異形タガを用いた設計例である。

11) cf. *The Locomotive of To-Day*. 6th. ed., pp. 136~137.

元図のキャプションに Stroudley Crank-Axle と表記されているから、これは London, Brighton and South Coast 鉄道等で活躍し、タイヤのホイールへの結合（脱出防止）法にその名を留める19世紀イギリスの代表的機関車設計者の一人、William Stroudley (1833~'89) の設計になる、ということはかなり古いクランク車軸の一つであるらしい。あるいはこれが部分釣合が考慮されたクランク車軸の濫觴であったのかも知れない。

3. 並列4気筒機関車の登場

内側2気筒は振動面でこそ有利であるが、機関車のパワーアップという点においては、軌間に依りけりとは言え、早晚、気筒径の限界に行き当たってしまう。

これに対し、台枠の外側に気筒を配する、その後、ごく普通となる蒸気機関車において気筒径の限界を画す要素は軌間と車両限界の二つということになる。

しかも、気筒数が外側に2つしか存在しない場合、内側2気筒機関車とは対照的に、往復運動による慣性力と回転運動による遠心力の作用点間隔が互いに大きく隔たっているため、所謂、往復質量による慣性力が相殺され難いだけでなく回転質量や往復質量による慣性モーメントの値も大きくなる。つまり、それらに起因する振動が甚だしくなる。

そこで19世紀末、両者の欠点の克服を目指す試みとして並列4気筒とでも呼べそうな内側と外側に2気筒ずつを持つ機関車群が登場した。それらはハンマーブローやローリング、ヨーイング、トルク変動等、振動を相殺ないし軽減したという意味で“^{バランスド}平均機関車”などと呼ばれた。

平均式4気筒機関車の多くは複式であったが、中には単式とする設計例もあった。単複何れの方式にしても、この“並列”=平均式4気筒方式においては動的バランスが良好で、高速ないし高回転時の走行性能において、外側2気筒などとは隔絶した安定性が発揮される。振動面に関する理論的根拠については後にやや詳しく触れる。

なお、4気筒平均複式化のメリットはトルクの均斉化、振動の低減、クランクピン軸受面圧低減に止まらず、膨張比（即ち、 T_1 と T_2 との差）を大きく設定出来るため本質的に熱効率が高く、しかも、膨張過程において蒸気をより温度差の小さな膨張室壁面に接触させられるため、復水とその再蒸発による動力損失を抑えられるという複式一般の根幹に係わる点においても期待された¹²⁾。

この他、平均複式4気筒機関車はドラフトが大人しいため、ボイラの過剰通風を招き難いばかりか、同一サイズ・構造のボイラから単式2気筒や単式4気筒機関車におけるよりも大きな蒸発量が期待出来るという長所も有していた。

12) (初) 復水の再蒸発によって生ずる動力損失（背圧）とその回避策としての過熱については蒸気機関工学のどんな書物にも記述されている。過熱方式導入の技術史的意義については拙著『船用蒸気タービン百年の航跡』ユニオンプレス、2002年、20～22頁、参照。

複式化一般による熱効率のゲインについては時代によって相当、異なる評価が下されていたが、1906年の書物では単式の20～30%増し、1925年の書物においては温度が低く湿度の高い、即ち初復水し易い飽和蒸気が用いられている場合は13%程度（例えば6→6.78%）、過熱蒸気が用いられている場合は6%程度（例えば7→7.42%）と見積られていた¹³⁾。

単式と複式との公平な、即ち、他の条件を等しくした上での比較というのは物入りであるためか、余り為されていないようである。数少ない例外の一つは Lancashire and Yorkshire 鉄道の C. M. E. George Fughes によって 0-8-0 の、他の諸元において等しい 2 気筒単式、4 気筒平均複式機関車を用いて行われた各 3 回の走行試験である。その結果は 1910 年、*Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*。誌上に公表されているが、図示馬力当りの石炭消費量は複式の方が 16% 少なかった¹⁴⁾。

ともかく、陸船用など、広く蒸気機関全般を見渡せば多段膨張・凝結式が当たり前であり、一般に単式不凝結である蒸気機関車は極限的な低効率機関の典型をなしていた。蒸気機関一般における諸形式の熱効率は例えば表 1 のように比較データ化されている。

鐵装性に係わる厳しい制約故に、蒸気機関車においては熱効率の十分な向上を期待出来るような形態で凝結器を設置することが困難である。従って複式化がその熱効率向上の切り札的技術となることは理論的に見れば自然の成り行きであった。

そうした複式機関車の中でも、この平均複式なる型式は燃費の向上以外に均斉な駆動トルク、低いクランクピン軸受面圧、高いボイラ効率、少ない振動と高い粘着係数（後述）故に一時期、高速旅客機の本命と目された¹⁵⁾。

このメリットは、ブームが去った後にも、フランスやドイツ、イギリスにおいて様々な並列 4 気筒複式・単式蒸気機関車が長らく活躍を続ける基礎となっている。

13) cf. George L., Fowler, *Locomotive Dictionary—An Illustrated Vocabulary of Terms which Designate American Railroad Locomotives Their Parts Attachments and Details of Construction with Definitions and Illustrations of Typical British Locomotive Practice*. First Edition Compiled For the American Railway Master Mechanics' Association. N. Y. 1906 (通称, *Locomotive Dictionary 1906*, *Locomotive Cyclopedia* の前身), p. 19, Arthur Julius Wood, *Principles of Locomotive Operation*. N. Y. 1925, p. 219.

なお, J., T., van Riemsdijk, *Compound Locomotives An International Survey*. (Penryn, 1994), pp. 85～86 に拠れば、1938年から'40年にかけて 7 両、投入されたフランス北部鉄道, M., De Caso 設計の 4 気筒複式ハドソン 4 両とその 3 気筒単式版 3 両との比較では、後者の燃料消費量は前者より 14% 多かったが、これは技術的に厳密な比較ではなかった、とある。

14) cf. D., A., Low, *Heat Engines*. pp. 392～394. この試験においてはそれぞれに 580 t 強の貨車を牽かせ、平均速度 35 km/h ほどで約 100 分間走らせたのであるが、Low の要約に拠れば、牽引負荷、速度共に複式の方が若干大きかったにも拘らず、複式の方が低い平均図示馬力、平均連結器端出力しか発生させておらず、しかも機械効率は高いという信じ難い結果が得られており、数値の入組み等が疑われる。

15) 森 彦三・松野千勝『機関車工学 (上)』大蔵書店、1910年、80頁、参照。

表1 各種蒸気機関における熱効率（蒸気消費率）比較

機 関 種 別		蒸 気 消 費 率 lbs./IHP-h	
		不 凝 結 式	凝 結 式
単 式	高 速	32	24
	中 速	30	23
	コーリス	28	22
複 式	高 速	26	20
	中 速	25	19
	コーリス	24	18

Machinery's Encyclopedia with 1929 Supplement. N. Y. 1929, Vol. I p. 422, Table III, also Vol. VI, p. 27, Table IV.

コーリス機関はコーリス式回転弁を用いるもので、概ね低速機関に限定された。

実際、複式機関車においては一般に排気ドラフトが均斉であるため良好なボイラ通風が得られるが、とりわけフランスで Kylchap 排気システムを改造装備せしめられた平均複式機関車においてはボイラ蒸発量の増大とシンダ損失の減少が顕著に観測された。それは後述される“シャブロン・マジック”における枢軸的要素であった。

もっとも、複式機関車の濫觴は19世紀末に簇生した平均複式4気筒機関車などという理詰めモノではなく、1876年、スイスの Anatole Mallet によって考案されたマレー式機関車にあった。マレー式は2気筒機関車の下回りを2つ連節し、共通のボイラを戴いた実に鷹揚な構えの連節・複式機関車であり、従って立派な4気筒機関車であった。クランク車軸を用いないこのマレーはイギリスでは流行らなかったものの、ヨーロッパ大陸や英領インド、遅れてはアメリカでも重量貨物用機関車として需要された。わが国においても明治末期から大正期にかけて箱根越え等にこのマレー式機関車が用いられた実績がある¹⁶⁾。

アメリカにおけるマレーの嚆矢は Alco によって1904年に製造された Baltimore & Ohio 鉄道 No. 2400 (C-C) で、セントルイス博覧会に出展された後、同鉄道の勾配線区に投入された。同機はあらゆる点において期待を上回る成績を挙げ、爾後の発展の源流となったことから“Old Maud”（モード [マチルダ] 婆ちゃん）などとあだ名されるに到ったが、実際にはその誕生の時点においてヨーロッパでは4～500両のマレーが稼動しており、かつ、過熱化による平均複式4気筒を含む非連接型機関車の発展により既に陳腐化の段階を迎えつつあった¹⁷⁾。

16) わが国のマレーは日本鉄道4500型 (B-B, Maffei : 1両)、官営鉄道9750型 (C-C, Alco : 24両)、同9020型 (1B-B, Alco : 6両)、9800型 (Baldwin, C-C : 18両)、9850型 (Henschel, C-C : 12両) の総計61両のみで官営鉄道のものは箱根越えに投入された。鉄道知識普及会編『写真解説 機関車進歩の跡』交友社、1940年、参照。

17) cf. A., W., Bruce, *The Steam Locomotive in America Its Development in The Twenties Century*. N. Y. 1952, pp. 77, 314～315, Edwin P., Alexander, *American Locomotives A Pictorial Records of Steam Power, 1900-1950*. N. Y. undated. pp. 42～43.

特筆すべきは、早い時期にこれを単式として用いる例が現れていることである。この単式化改造の容易なることは Mallet 自身が彼の方式におけるメリットとして認めていた点でもある¹⁸⁾。

後年、マレーと共にこの“シンプルマレー”を徹底的に発展させたのがアメリカであった。大出力のマレーでは外側に置かれた低圧気筒に係わる巨大な往復運動部質量が禍して高回転化が困難であり、その劣速ぶりによってマレーにこの大国における高速重量貨物輸送仕業への不適合性の烙印が押された。その一つの解決策として前稿に見た通り、単式3気筒に期待が寄せられた時期もあったが、究極の打開策はマレーの単式化であった。

然しながら、やがてはシンプル・マレー巨人機の王国となるアメリカでも19世紀末期においては Baldwin の Vauclain 複式、Alco (1901年、8社合併で成立) や Baldwin のタンデム複式、Brooks Locomotive Works (→Alco) の Player タンデム複式、Colvin-Wightman 等々のクラシク車軸を用いない非連節4気筒複式機関車が開発・提案されていた¹⁹⁾。

1890年に特許が取得された Vauclain (Samuel M. Vauclain: 1856~1940後に Baldwin 社々長) の複式は一般に“duplex compound” (cf. *Machinery's Encyclopedia*. 1929 ed. Vol. VI pp. 24, 25) として分類される複式機関の恐らくは魁で、上下に一体鋳造された高低圧気筒ブロックを左右に持ち、高低両気筒のピストン棒を共通のクロスヘッドに作用させる型式、タンデム複式は Mallet の案同様、高低圧気筒を前後串刺しにしたモノで、同じく4気筒ながらピストン棒は左右各1本ずつである²⁰⁾。

これらは何れもマレー同様、クラシク車軸を用いない、否、むしろこれを用いたくないがために開発されたような諸型式であった。それらは皆、一見巧妙に映る設計ではあったが、如何せん振動面でメリットが無い割に複雑であることが嫌われたらしく、幾許もなく廃れてしまった。因みに、1903、'04年に Baldwin Locomotive Works によって製造され、Atchson, Topeka & Santa Fe 鉄道に納入されたタンデム複式の1E1貨物機、計76両の如きは、後に全て単式に大改造された事蹟が記録されている²¹⁾。

ここで、アメリカ人がどれほど徹底的にクラシク車軸を忌み嫌ったかについて、当時のイリ

18) cf. J. A. Ewing, *The Steam-Engine And Other Heat-Engines*. Cambridge, 1902. p. 397.

なお、Mallet 自身はまた、左右に高低圧気筒をタンデムに配した4気筒複式機関車についても提案を行っているが、こちらは余り普及しなかったようである。

19) これらの複式機関車と単式2気筒機関車との相違点は気筒数を除けば弁装置の構造に在る。この点については追って言及されるが、簡単にして要を得た邦語解説文献として本山邦久『機関車用 弁及弁装置 1931年増補改版』江島日進堂出版部、1931年、38~48頁を挙げておく。

20) 世紀転換期におけるアメリカのトップ機関車メーカー、Baldwin 社における経営革新、製品多様化、従来、価格協定の相方であった小企業群の結集に拠る Alco の成立と低価格攻勢によってそれが被ったダメージの一端については Philip Scranton・廣田義人他訳『エンドレス・ノヴェルティ』有斐閣、2004年、320~324頁、参照。

21) cf. Alexander, *ibid.* pp. 38~39.

ノイ大学機械工学教授, A., T., Woods と技術者, D., L., Barnes による機関車工学書から一節を引いてみることにしよう。

148. 4 気筒 4 クランクタイプ——この型式は車軸におけるより均一な回転力を提供するためとして機関車用に提案されて来ており、動的釣合いはより完全で、出発起動力も全く充分であるが、提案されているような設計は実用上、複雑に過ぎる。Appendix K を見よ²²⁾。クランク車軸はそれらが当地における仕業に耐えるに充分なほど堅牢に製造され得るとは言え、この国の機関車にとって望ましいものではない。アメリカでの仕業のためには車軸というものは常に可能な限り単純平明であるべきであり、あらゆる軸受は直ぐにアクセス可能であるべきである。クランク車軸においては軸受は直ぐには検査出来ない。機関車の全ての車軸を同じものにしておくことは補修用予備部品のストックが削減可能となる点においても幾分か利益となる。クランク車軸なるものは鍛造されたその日から廃棄されるその時に至るまで、倉庫に眠っている間を除いて、亀裂の発生を注意深く観察されねばならず、その使用は亀裂の発生頻度の最も高い部位へのアクセスが容易ではないだけに一層、動力車部門に追加的費用負担を強いることとなる。もし、クランク車軸の使用により、運用上あるいは効率性において何らかの実質的価値が得られるならば、それらは疑いもなくより好意的に見られているであろうが、実際の使用記録から見取り得る限り、単式であれ複式であれ、単純な 2 クランク・外側連結機関車は最も例外的かつ過酷な仕業の遂行に必要とされるあらゆる機能を有している。この 4 クランク式にはより単純な諸型式が持たぬような蒸気効率における理論的優位性も実際の運用における優位性も何一つ無いのであるから、133-134 での考察²³⁾以上のものには値しない (Arthur Tannatt Woods, David Leonard Barnes, *Compound Locomotives*. 1893, pp. 269~270)²⁴⁾。

この後に、1 スローのクランク車軸を有する 3 気筒機関車に対する“右同罪”的な短い判決主文が続く。もっとも、それまで引用する必要はなかろう。ここでは 1910 年、アメリカで初めて本格的に導入された Philadelphia and Reading 鉄道の過熱式 3 気筒機関車 (2B1: 3 両, 2C: 1 両) がクランク車軸折損事故の果てに総て 2 気筒に改造されてしまった事蹟があったことだけを述べておく²⁵⁾。

22) Appendix K (pp. 293~299) においては Nord 鉄道の G., Du Bousquet から提供を受けたと思しき Paris, Lyon, Meditteranee 鉄道の “de Glehn/du Bousquet” 平均複式機関車 3 型式の概要と高低圧気筒におけるカットオフの最適組み合わせについての理論的説明が与えられている。

23) 133-134 (pp. 248) においては 4 スロークランク車軸型複式機関車、その他有象無象についての短い総括がなされている。

24) first published in 1891, revised and enlarged 2nd. edition by David Leonard Barnes in 1893, reprinted by Kessinger Publishing in 2009.

25) cf. A., W., Bruce, *ibid.* p. 101.

実際、Woods と Barnes の書物の刊行から暫く経った19世紀最末期～20世紀最初期のアメリカにおいては究極の単純さを求めた、即ち、クランク車軸付き4気筒など言わずもがな、クランク車軸無し4気筒でさえない2気筒複式機関車群、つまり、大雑把に表現すれば、Worsdell and Von Borris 式の気筒を外側に移したようなそれらが Baldwin 式、Schenectady (→Alco) 式、Southern Pacific—Schenectady 式、Pittsburg Locomotive Works (→Alco) 式、Richmond Locomotive Works (→Alco) の Mellin 式、Rogers Locomotive Works ('05→Alco) 式、Brooks Locomotive Works の Player 式 (上述のタンデム4気筒とは別の2気筒)、Cooke Locomotive Works (→Alco) 式、Dickson Locomotive Works (→Alco) の Dean 式、Rhode Island Locomotive Works (→Alco) の Batchellor 式等々、多数提案され、かつ実際に稼働していた。

複式機関車は起動時、単式として、即ち低圧気筒にもボイラからの生蒸気を投入して牽出し牽引力を確保し、速度がついてから複式に切替える²⁶⁾。この間の制御弁 (intercepting valve) のカラクリに様々な工夫が提案され、かつ、降坂絶気運転時に大径の低圧気筒に生ずるポンピング・ロス及び排出空気によるボイラの過剰通風抑制策として幾つかの “drifting or over-pass valves” が編み出された結果、このような同工異曲の派生的型式の簇生を見るに到ったワケである²⁷⁾。

三度、念を押しておくが、これら大同小異の2気筒複式機関車群は何れもクランク車軸を用

26) 但し、Vauclain の “duplex compound” においては単純な単式化は行われない。起動時には高圧気筒の前後に生蒸気を作用させ、その一方を低圧気筒の片側にすり抜けさせ、低圧気筒を高圧気筒として作動させることで大きなトルクを得ることになる。cf. Joseph Bourke, *Modern Compound Locomotives A Practical Treatise on the Design, Operation and Maintenance of Vauclain, Schenectady, Richmond and Rhode Island Builds*. 1902, reprinted by Kessinger Publishing in 2009 (残念ながら元本自体に欠落があるらしく、page 11 は白紙である) pp. 119～121.

なお、Joseph Bourke の書は General Books LLC なる版元からも同じ *Modern Compound Locomotives* のタイトルで2009年に出版されているが、こちらはリプリントではなく、単なる不完全な翻刻・再版本で、図は無し、文字化け多数、同じ元本を用いたものか、やはり page 11 相当分は欠落。しかも、著者名は Jos Bourke などと略記、原著刊行年不記載と来れば、絶対に“買ってはいけない”本である。

27) “intercepting valve” は複式機関車に固有の部品であるが、“drifting or over-pass valve” の方はそうではなく、また、C52 等に用いられていた “drifting valve” とも紛らわしいが異なり、鉄道省・国鉄では「自動バイパス弁」の名の下に C10、C11、C12、C56 に用いられた。Richmond Locomotive Works の Mellin がその創案者である。

これに係わるアメリカの文献として Joseph Bourke, *ibid.*, pp. 84～86, Fred Herbert Colvin, *American Compound Locomotives: A Practical Explanation of the Construction, Operation and Care of the Compound Locomotives in Use on American Railroads*. N. Y. 1903, reprinted by ditto. in 2009, pp. 40, 108～110 (BiblioBazaar なる版元からも同じく2009年に reprint されている。元本は明らかに異なる個体であり版型も少し小さいが、内容自体は全く同一である)、を挙げておく。

日本での “drifting or over-pass valve” の呼称とメカニズム解説については機関車工学会『最新機関車名称辞典』第6版、交友社、1940年、114～115頁、細川武志『蒸気機関車メカニズム図鑑』グラフィック出版。143頁、参照。

いる必要の無いものばかりであった²⁸⁾。

然しながら、大局的には貫徹された Woods/Barnes 流の怨嗟にも拘わらず、また、Colvin がクランク車軸を用いる平均複式機関車は「ほとんどの動力者乗務員は既に多過ぎる型式リストに根本的に異なった機関車型を追加することを躊躇するであろうから、その導入はどの途、遅々たるものになろう」と極めて懐疑的に紹介したにも拘らず、その後のアメリカ機関車史を繙けば、20世紀初頭の一瞬、4気筒平均複式が結構流行り、その退潮とマレーの興隆を経て単式3気筒が盛行の兆しを見せ、やがて単式外側2気筒と低速マレー+高速シンプル・マレーの時代へ、という長期趨勢が浮び上がって来る。つまり、クランク車軸大流行の季節がこのさしもの怨嗟と懐疑の国においてさえ現出していた訳である。

この20世紀初頭におけるアメリカ機関車事情を Alco の技術者 Alfred W., Bruce は次のようなデータを掲げて再構成している。

これを要するに、技術的・商業的首尾・不首尾は措くとして、世紀転換期、アメリカの機関車メーカーは様々な試行錯誤を繰り返し、やがて独自のアメリカン・スタイルを確立して行った。そして、クランク車軸を用いる平均複式4気筒機関車はかかる過程の一翼を担ったのであり、その総数は表示の4気筒複式機関車の20%程度に達したのである²⁹⁾。

そこで改めて話題を戻し、初期における高速旅客用平均複式＝クランク車軸を用いる4気筒並列型複式機関車の設計例に立ち返ってみよう。その嚆矢は1889年、フランス Nord (北部) 鉄道のDe Glehn平均複式であった (1891年、連結動輪に改良＝“de Glehn/du Bousquet” 式)。更に、1900年にはアメリカにおいて Baldwin (米) の Vauclain 平均複式が、1904年には Alco (米) の

28) 参考文献として Woods and Barnes, *ibid.* (詳細な索引アリ) の他に Marshall M., Kirkman, *The Compound Locomotive: Supplement to the Science of Railways*. 1899, reprinted by Kessinger Publishing in 2009, pp. 50～149, Bourke, *ibid.* Colvin, *ibid.* 全体を挙げておく。

Kirkman の149総頁の小冊子には “European designs employ three and four cranks”, “Some French constructions, retaining the use of side rods, employ for the high-pressure cylinders two inside cranks on one driving axle (“de Glehn/du Bousquet” 式を指す) ……” といった簡略な記述以外、クランク車軸についての言及は一切見当たらない。

Bourke の書も内容はサブタイトル通りで、クランク車軸についての言及は皆無である。

Colvin も総計140頁の小冊子の中で、当時、アメリカで唯一出現していたクランク車軸付き平均複式機関車たる Baldwin の “DeGlehn type” について “cranked axle” を含め、ごく通り一遍の説明を与えるに留めている。

29) cf. Bruce *ibid.* p. 100. Scraton 前掲『エンドレス・ノヴェルティ』はアメリカ製造企業における「[専門生産]の系譜」、その中で発揮された「柔軟性」の解明を狙いとする論考であるが、遺憾ながら、蒸気機関車におけるノヴェルティ＝技術革新については1890年特許の Vauclain “デュブレックス複式” についての言及がなされているのみである。アメリカ蒸気機関車界においてはその製品技術革新のために深い研究開発と大胆な試行錯誤が重ねられた。この点において、それは平凡な過熱化の地平に安住し単式3気筒如きにさえ大騒ぎを演じた本邦機関車界とは画然と区別される存在だったのである。

表2 1904年12月31日時点におけるアメリカの幹線用機関車のタイプ別内訳

	4 気筒複式	2 気筒複式	単 式
1D	765	376	10,258
2B	60	5	11,258
2C	502	280	8,450
1C	148	149	5,168
C	2	30	4,732
B	—	—	1,172
2B1	159	—	693
2D	—	64	493
1C1	170	26	260
2C1	85	—	148
D	—	—	168
1B1	20	—	101
1B	—	—	51
1D1	31	—	3
2E	10	—	5
E	—	—	10
小 計	1,952	930	42,970
雑タンク機関車	256		

Bruce, *The Steam Locomotive in America*. p. 71 Chart 10.

著者は合計両数46,146両、内、複式2,884両と述べているが、表示の数値を合計しても総計46,108両、複式は2,882両にしかない。後者については雑タンク機関車の中に2両、複式が存在したのかも知れない。同年竣工の“*Old Maud*”がここに含まれていないことは軸配置から自明である。元データは Interstate Commerce Commission に対して報告されたもの。

顧問技師 Francis J. Cole (1856~1923) の平均複式が呱呱の声を上げ、ヨーロッパでは1903年、Hannover 機関車製造所(独)の von Borris 平均複式が名乗りを挙げている。それらは図9及び表3に示される通り、何れも基本的には分割駆動で、De Glehn 平均複式を除けば高圧2気筒は内側に在った³⁰⁾。

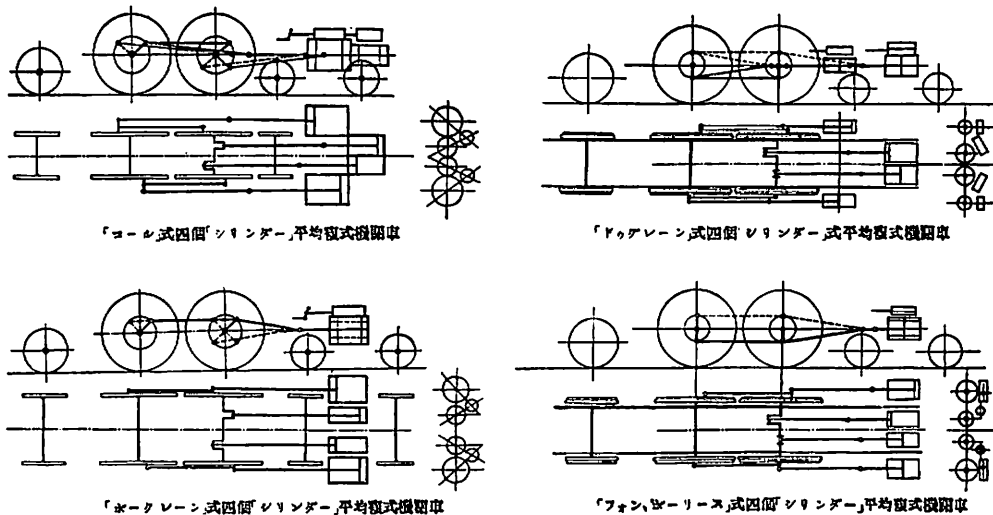
これは前後オフセット無しの並列4気筒における簾装性に鑑みれば当然の措置である。しかし、複式機関車の通常の作動状態においては高圧気筒にトラブルを生じれば低圧気筒は自ずとその機能を失うから、上流に位置する高圧気筒へのアクセス性を重んじ、外置きとする、という考え方にも一理はある。

これらの平均複式4気筒機関車のクランク車軸は一様に90°クランクで、内燃機関においては2サイクル直列4気筒機関に用いられるモノと同じ、図10のようなレイアウトを有するものであった。勿論、機関車の場合、両端のクランクはクランクディスク=動輪になる。

クランクピンは互いに90°ズレさえしておれば動力発生の等間隔性という必要条件は満たさ

30) 森・松野, 302~322頁, 参照。但し, De Glehn 式と通称されるモノが全て内側低圧気筒方式に限定される訳ではない。

図9 代表的な4気筒平均複式機関車の基本構成



森 彦三・松野千勝『機関車工学（上）』305頁，第265～276図。

表3 代表的な平均複式機関車の基本的特徴

型 式	高圧気筒の位置	主連棒取付け動輪	弁	弁 装 置
コール氏式	内部，低圧気筒の前	外側＝後，内側＝前	ピストン弁4個	2連スチヴンソン
ボークレン氏式	内部，低圧と並列	外側＝前，内側＝前	ピストン弁2個	2連スチヴンソン
ドゥ・グレン氏式	外部，低圧気筒の後	外側＝後，内側＝前	スライド弁4個	4連ワルシャート
フォン・ボーリース氏式	内部，低圧と並列	外側＝前，内側＝前	高圧ピストン弁・低圧スライド弁	

同上書306頁，第三十三表より。

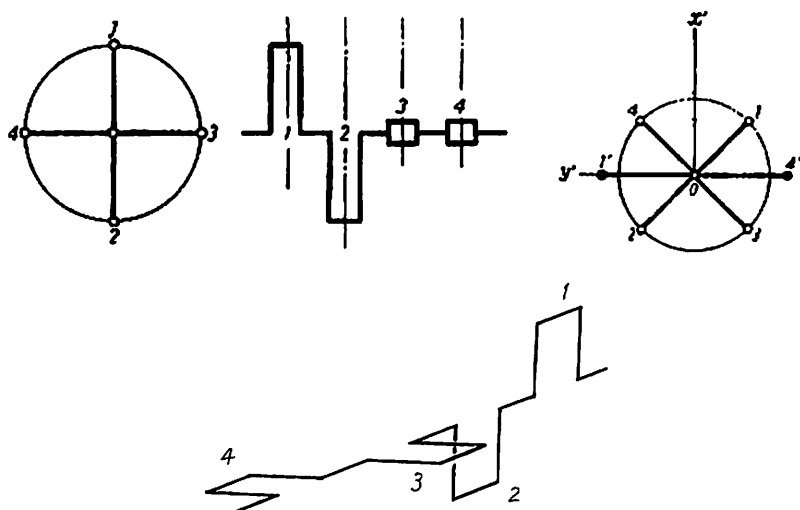
れる。中西に拠ると図10のレイアウトは中でも不平衡慣性偶力を可及的に小さくするために選ばれたものである。左側⊕の図を機関車左サイドからの透視図，中央を機関車正面からの図として見れば良い。

右側の図は回転質量による慣性偶力が1と3とのなす角の2等分線上に補助釣合錘4'を，2と4とのなす角の2等分線上に補助釣合錘1'を設けることによって釣合わせられることを示す。

無論，各スローにおいて部分釣合が完全に取りられるならば，回転質量に起因する偶力，即ち，内部モーメントの発生は防がれる。

これだけでは往復質量に起因する慣性力や慣性偶力が残るように見えるが，互いに180°の位置にあるクランク・スローの対から成る4気筒平均式クランクにおいては往復運動部分の運動に伴う慣性力は互いにほぼ相殺されるため，元々，往復質量による慣性力の影響については

図10 4気筒機関車用90°クランクのレイアウト



中西不二夫・西脇仁一・梅津喜代治「発動機の力学」第2.31図、第2.32図（共立社『内燃機関工学講座』第2巻、1936年、367頁）。下段実体図は筆者作成。

ほとんど考慮する必要が無い³¹⁾。

これは即ち、平均式4気筒機関車においては“過剰釣合鍾”が不要であることを意味し、そのことは同型式の機関車においては事実上、ハンマーブローが発生しないという命題と同義となる。先に述べた平均式4気筒機関車における高い粘着係数の所以は、それ故に、駆動トルクの脈動が小さいという特性と相俟って、このハンマーブローが発生しないという特性にも在ったワケである。

では、4気筒クランク車軸設計に関して、以上と全く異なる代替案というモノは有り得たのだろうか？

4サイクル90°V型8気筒機関の90°クランク軸（図11）は若干、気になる存在である。果たしてこれは4気筒機関車用90°クランクの代替レイアウト案に成り得たのだろうか？

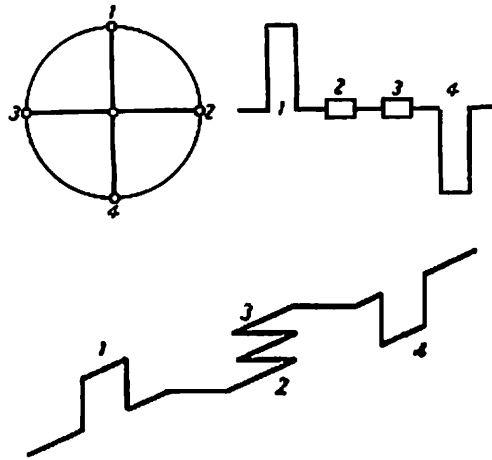
90°V8機関ならこれで実用上、完全バランスとなる。大雑把に言えば、Vバンクの片方における縦振動は他方の横振動によって、その縦振動は他方の横振動によって相殺されるからである。この90°クランクは非対称であるから偶力を生ずるが、この偶力は小さな鍾を図12のように両端ウェブに付加すれば簡単に相殺可能である³²⁾。

蒸気機関車においては2と3との間に中間軸受を設けることが難しいし、軽量化の足しにも

31) 現実にはクランク軸の回転速度に対して4の倍数次（4次、8次、12次……）の前後方向振動が残るが、その影響は無視されて良い程度に止まる（中西他、「発動機の力学」367頁）。

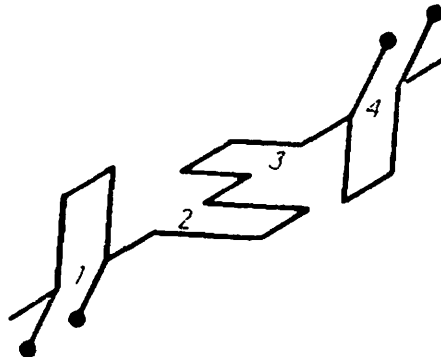
32) この点については中西不二夫によって世界で初めて解析的に証明された。例えば、同上書、360～361頁、374～375頁、参照。この問題についてはしかし、別稿に譲ることとする。

図 11 4 サイクル 90° V 型 8 気筒機関の 90° クランク軸



中西不二夫・西脇仁一・梅津喜代治「発動機の力学」第
2.44図, 2.22図（共立社「内燃機関工学講座」第2巻,
1936年, 374, 360頁）より。

図 12 中西による 4 サイクル 90° V 8 クランク軸の完全バランス法



同上書, 375頁, 第2.46図。

なるから 2 と 3 とを短絡したくなるが、かくするとしても、その重心は軸芯に合致しているから一層有利である。

しかし、2 サイクル直列 4 気筒や蒸気機関車におけるような並列 4 気筒において、この理屈は妥当しない。このレイアウトはあくまでも 4 サイクル 90° V 8 型機関の理想型であるに止まるのである。

Ⅱ. 並列4気筒機関車用クランク車軸の具体的実施例

1. フランス

フランスは近代的複式機関車の母国であり、これを最高度に発達させた国でもある。この国の石炭の品質が英国炭と比べて劣り、かつ高価であったことが熱効率を追求する方途としての複式機関車に独自の発展への誘因を与えた。

然しながら、フランスの蒸気機関車に関する技術的情報が元々、限られる上、筆者の浅学故に著作権の失効したフランスの古い機関車工学書を渉猟することも叶わず、状況を図と共に体系的に提示することは不可能であった。

以下では1994年にイギリスで出版された J., T., van Riemsdijk, *Compound Locomotives An International Survey*. (Cornwall, 1994) とオリジナルが1952年に第2版として刊行され、George W., Carpenter による英語版が同じくイギリスで2000年に登場した André Chapelon の書, *La Locomotive A Vapeur*. の記述に依拠しつつ、専ら要点の紹介だけに止めて義務の一端を果たすことにしたい。

Riemsdijk の書物は技術的な整理が周到で著者の識見の高さが滲み出た名著であるものの、如何せん図面の提示件数は限られ、古い貴重な図面が含まれるものの、時代が下ってからの図には Chapelon からの引用が多い。クランク車軸などという根暗な部品そのものについての図例は一切無い。

また、“シャブロン・マジック”を以て知られ、Paris, Lyon, Méditerranée 鉄道, Paris-Orléans 他で活躍した天才的蒸気機関車リビルド技師, André Chapelon (1892~1978)³³⁾の著書は刊行時点までの世界の蒸気機関車について紹介し、技術的検討を加え、独自の技術観を展開したもので、とりわけ複式機関車論はこの人の独壇場と言って良く、金字塔的作品である³⁴⁾。

しかし、不思議なことに、Chapelon はクランク車軸については相当まとまった記述を与えているにも拘らず、この重要部品そのものの図は1点たりとも掲げてはいないし、彼の掲げた

33) A., Chapelon の業績に関する概説書として Colonel H., C., B., Rogers, *CHAPELON Genius of French Steam*. London, 1972, 齋藤 晃『蒸気機関車200年史』NTT 出版, 2007年, 347~364頁, を挙げておく。

34) もっとも、Chapelon の書の1938年初版には高度な理論的諸章からなる第2部が含まれていたが、第2版はこれを除いた概論部を補訂した第1部のみで、予告されていた第2部は遂に刊行されなかった。英語版はこの第2版を更にアップデートしたもので、理論的諸章抜きながら630頁のヴォリュームとなっている。

但し、High Speed Locomotives の項では満鉄のダブナについての言及があるにも拘らず、バシナについては何一つ触れられてはおらず、また、C53の流線型(2両造られたとある!)やC55流線型(写真アリ)がかなり怪しげな説明と共に登場する辺りは頂けない。cf. English ed., pp. 186~187.

全体透視図でクランク車軸が綺麗に表現されているモノは少ない。彼のクランク車軸論については後ほど引用させて頂く。

さて、平均複式機関車の嚆矢は人も知る Société alsacienne de constructions mécaniques (SACM) アルザス機械製作所の技師、Alfred de Glehn (1848～1932) が1886年、Nord 鉄道向けに造った同鉄道701号機であった。これは 1AA という非連結動輪式の軸配置を有する 4 気筒複式機関車で、連結動輪を有する後年の “de Glehn/du Bousquet” 式＝普通に de Glehn 式と呼び習わされているモノの前駆形態であった。

“de Glehn/du Bousquet” 式の濫觴は1900年から1904年にかけて製造された Nord 鉄道向けアトランティック (2B1) で、2040 mm の動輪を有し、その許容運転速度は 120 km/h であった。外側に位置する高圧気筒は第 2 動軸を駆動し、内側に設けられた低圧気筒は第 1 動軸を駆動した。第 1 動軸であるクランク車軸はタガの嵌められたディスク状のウェブを有していた (Riemsdijk *ibid.* p. 53)。

この “タガ” については先にイギリスにおける内側 2 気筒機関車用クランク車軸の例について触れた通り、彼の国においてはディスク状ウェブの場合にタガは嵌められなかったと伝えられているから、フランスの 4 気筒用クランク車軸の設計手法は明らかに英国風とは趣を異にしていた。この点、後に紹介されるアメリカの事例は英国流に忠実な設計とドイツ流との混成部隊の体をなしていた。

1901年から製造が始まった Ouest (西部) 鉄道の 2C 機においても “de Glehn/du Bousquet” 式の採用を見たが、こちらの方には一転して、低圧気筒の動力を受け止めるクランク車軸にタガの嵌った楕円状のウェブが採用されていた (*ibid.* pp. 97～99)。

1904年より、Paris-Orléans 鉄道に投入された 1D 機も “de Glehn/du Bousquet” 式機関車であったが、こちらには再びタガの嵌められたディスク状のウェブを有するクランク車軸が第 2 動軸として用いられていた。もっとも、そのクランクピンは高圧気筒と連結されていた (*ibid.* p. 87)。

Paris-Orléans 鉄道は1907年、ヨーロッパで初めてパシフィック (2C1) 機、3500型を導入した鉄道として知られるが、1850 mm の動輪を有するこの機関車もまた 4 気筒複式であった。この機関車は1934年、天才的機関車技術者、André Chapelon の手によって全面的にリビルドされた。

リビルト後の図から読み取れば、内側低圧気筒に連結されるクランク車軸は第 1 動軸をなし、そのウェブは 140° ばかりの中心角を有する巨大な、回転方向に対して前後対称の扇型プロフィール……あたかも、江戸時代、両替用に用いられた “後藤分銅” の一極の角を丸坊主にしたような形状……を呈する釣合錘が一体成形された薄いウェブによって特徴付けられていた。リビルドの際には動輪径も 1950 mm に変更されたほどであるから、このユニークなクランク車軸もリビルド時の新製品であろう。

Chapelon の他の多くの仕事と同様、このリビルドも大成功で、同型機関車は Nord 鉄道にも供給され、全くの新製も行われた (*ibid.* pp. 103~105)。

Chapelon はアメリカ人が忌み嫌ったクランク車軸とその設計について、次のように語っている。

組立式クランク車軸は、長年、イギリスでは支配的であったが、近年、普及の度を増している。とりわけフランスにおいては Paris-Orléans 鉄道において長期間、使用されており、今や他の鉄道にも適用されつつある。

単スローの場合 5 つの、2 スローの場合 9 つの要素から成るこれらのクランク車軸は折損することも亀裂を生ずることも無いという非常に大きな利点を有している。対照的に、それらはアライメントに狂いを生ずる場合があるものの、この問題は構成要素の非常に注意深い組立ならびに締め込みとクランク鋼種との適合によって防止されることが可能である (弾性限度 60 kg/mm^2 の鋼材を用いる場合、3 % の締め代)。

更に、今日においては完全にバランスされた (*fully balanced*) クランク車軸の使用が益々増加している。これは、とりわけ高速走行を要求される 4 気筒機関車において、クランク車軸の寿命ならびに軸箱、太端ブッシュの過熱回避という両方の観点から良い結果を達成するために必要とされる予防措置である。

実際、釣合の取られていない (*non-balanced*) クランク車軸において、内方クランクによって生み出される遠心力は高速時には数トンに及ぶ。この力の作用下、車軸の撓みは、例えば 120 km/h の速度、直径 1.95 m の連結動輪において、車輪タイヤ内側相互間で計測される距離と直径の反対側外周部で計測されるそれとの間には 25 mm もの差が見られるほどに達し得る。これは完全にバランスされたクランク車軸の導入以前における Paris-Orléans 鉄道における実測値である。

かくて、車輪は車軸の理論的軸芯に対して垂直を保つのではなく、クランク車軸に作用する遠心力の合力に反応して垂直面から偏倚し、タイヤは車輪直径の両端において当初の位置から $6 \sim 6.5 \text{ mm}$ ずつ両側に動く。

かような条件の下において、軸箱は軸箱守の中で継続的振動の状態に置かれ、あるいは車軸との不良接触に起因する過熱によって正常な隙間を失う。

車輪もまた、タイヤ相互間距離の変化が最大値に達する際、数トンに達し得る力に曝され、この力は軌道に伝達される。

確かに、釣合の取られていないクランク車軸は将来の設計の中からは排除されねばならない。それにも拘らず、3 気筒機関車において用いられる単スロークランク車軸の場合、このタイプの車軸は 4 気筒機関車に用いられる 2 スロータイプのものより遥かに剛性が高く、その重量もかなり軽量であるが故に、完全な釣合は不可欠ではないように見える。釣

合の取られていないクランク車軸はドイツ国鉄の3気筒機関車や最新のイギリス、Southern 鉄道のパシフィックに用いられている (Chapelon, *La Locomotive A Vapeur*. English Ed. pp. 99, 101.)。

なお、引用中に在る“弾性限度”とは永久歪みを残さない最大応力値を意味する。確かに、機械部品の使用過程において材料に働く応力が降伏点や引張強さ（抗張力）の値にまで昂進することなどあってはならないし、材料の機械的強度＝“疲労は別にして、とりあえず壊れない範囲”を示すには弾性限度なる概念が解り易いようにも見える。

しかし、字義通りの“残留歪みゼロ”などという事態は現実世界においては起こり得ない。このため、古くは0.001～0.003%，下っては0.03%の残留歪み（特定許容歪み）を与える最大応力値を以って弾性限度とする便法が行われて来た。

但し、この0.03%でさえ測定器の誤差を考慮すれば実用的価値には乏しい。よって、現在、わが国においては弾性限度を材料の機械的性質の基本的指標として掲げることは不適当と看做されており、材料の機械的強度の代表的指標として降伏点応力や引張強さを掲げるのが通例となっている。

もっとも、*Machinery's Encyclopedia*. 1929 ed. Vol. I, “Alloy Steels”の項 (pp. 75～83) を参照しても、各種合金鋼（炭素鋼，Ni 鋼，低 Ni-Cr 鋼，中 Ni-Cr 鋼，高 Ni-Cr 鋼，Cr-V 鋼）の強度に関しては正しくこの Elastic Limit の値が掲げられており、元データは SAE 鉄鋼部門が1912年1月に発表した報告書である旨、記されている。

SAE にせよ Chapelon にせよ、何故、特定許容歪みのデータさえ掲げぬまま弾性限度なる概念を当然の如くに持ち出しているのか、今一つ理解に窮するところである。無論、“それが時代性だ”と言ってしまえばそれまでではある³⁵⁾。

同じく引用中、*fully balanced, non-balanced* というのは部分釣合の有無の謂いであり、ドイツ国鉄云々はプロイセンからドイツ国鉄に到る諸例＝前稿で筆者が“横着設計”と名付けたモノを指し、本稿の読者には既にお馴染みの筈である³⁶⁾。

35) わが国におけるこの概念の意義喪失感とは『機械工学便覧』（1954年）、6-29頁において「降伏点のことを弾性限度というものがあるが、これは全く誤りである」と強調した日本機械学会自身が、43年後、その百周年記念出版物『機械工学事典』（1997年）の816頁で弾性限（度）について、これを「通常、理論では降伏応力と一致すると考える」と変説している事実からも窺われる。

なお、わが国の機械工学便覧の書物で構造用特殊鋼の弾性限度が掲げられた例として、筆者は生産技術協会『実用工学便覧』山海堂、1951年、277頁、同『改訂版 実用工学便覧』同、1963年、290頁に Cr-V 鋼，Cr-Mn 鋼及び Cr-Ni-Mn 鋼のそれが表示されているのを知るのみである。

36) 件の Southern 鉄道、最新のパシフィック機関車とは一般に Merchant Navy 級として知られる、英国機らしからざる“ボックス風”動輪とケレン味たっぷり、トラブル多発の新基軸を満載した機関車である。本型式においては釣合錘なしの組立式クランク車軸が用いられていた。また、動軸の垂直移動による弁線図の偏倚を抑止するためとして加減リンク駆動にチェン・ドライブの中間クランクメ

J., T., van Riemsdijk と André Chapelon の書から窺い知ることの出来るフランスの複式機関車のクランク車軸についての一般的情報は以上である。

最後に、Chapelon が1932年にやって見せた手法の再現として成立した2D機＝1938年のフランス国鉄成立により240P1-25型となった4気筒複式、高過熱機関車（20気圧、高圧気筒440φ×650mm、低圧気筒640φ×690mm、火格子面積3.72m²）に採用されていたクランク車軸の概要図を掲げておく（図13）。

この機関車は国鉄成立後の1939年から'41年にかけて、旧 Paris-Orléans 鉄道の4,501級飽和複式2C1機関車25両を2D機4,700級へとリビルドするという手法によって誕生した旧 P. L. M. エリア向け機関車である。粘着重量確保のために従台車を取払い、代りに動軸を1軸追加するという Chapelon 流荒療治の賜で、無論、火室は広火室から狭火室に改造され、台枠自体も造り変えられ、ボイラも載せ替えられた。低圧気筒はボアもストロークも拡大された。また、そのクランク車軸には弾性限度60kg/mm²のCr-Mo鋼が使用された。先の引用中に在った鋼種は正しくこれであろう。

Cr-Mo鋼は低合金鋼の一種で、代表的な構造用特殊鋼であるが、1930年頃までのアメリカや日本では余り用いられていなかった鋼種ではある。その使用の動機は元々、Cr-Ni鋼を用いていたところを、Ni節約のため、Moに置換することになり、この点ではC52やC53などに用いられたCr-V鋼とも同類であるが、後者の方が先輩格である。互いの用途は似通っているが、大物部品には調質感受性が良好である（熱処理し易い）ため、Cr-Mo鋼の方が好んで用いられるようになった³⁷⁾。

さて、この図を注意深く観ると、釣合錘は上述の対称140°型とは似ても似付かぬ前進回転進み側に若干偏した非対称形状を与えられていることが判る。この設計は前掲図10に係わる中西不二夫の説明における1'を2と4の中間に置くことの代りに2の釣合錘前進回転遅れ側を削った措置、並びに4'を1と3の中間に置く代りに3の釣合錘回転遅れ側を削った措置と看做すことが出来る³⁸⁾。

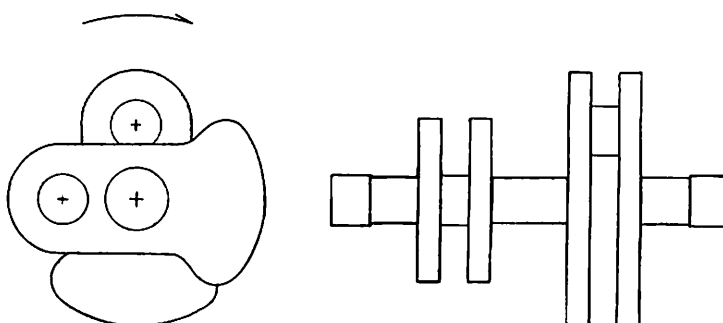
この1', 4'は1と4に、即ちクランク・ディスクとしての動輪の釣合錘に付加されても良

＼軸を用いる変った弁装置が採用されていた。しかも、この3気筒一括の弁装置は中央のクランク・コネクティングロッド機構と一緒にオイルパン付き密閉ケースに収納されていた（cf. *ditto*, pp. 71～72, 252, 255～257, 259）。この機関車は後年、弁装置の3連ワルシャートへの変更をはじめとする大改造を受けることになった（高木宏之『近代英国蒸機の系譜』私家版、1985年、80～85頁、参照）。

37) 日本材料学会『機械材料とその試験法』1975年、175～176, 179～180頁、参照。Moについては宮沢賢治『風の又三郎』にも登場しているので、機械や金属材料に馴染みの薄い向きにも広く知られていることであろう。

38) 図10下段を御覧頂きたい。2と4との二等分線上に位置すべき1'を2に設けるならば、あたかも2に付されるべき釣合錘の前進遅れ側が削られたのと同様の効果を得ることが出来、1と3の二等分線上に来るべき4'を3に設ければ、その釣合錘の前進遅れ側を削ったのと同様の効果が得られる。

図13 フランス国鉄 240P. 1-25 型のクランク車軸の概要



Chapelon, *La Locomotive A Vapeur*. English ed., p. 297, Fig. 200, p. 299, Fig. 201B より作成。

側面図は機関車右サイドからのもの。

かった。あるいは、完全な部分釣合を重ね、遠心力のその場相殺＝内部モーメント除去が図られるならば、かような補正錘はハナから不要であった。しかし、Chapelon はここで釣合錘の他に補正錘を2と3にも分担せしめ、クランク車軸に作用する内部モーメントの発生点付近での可及的抑制を図りつつ、完全な部分釣合を重ねさせて行く場合に比してクランク車軸の総重量並びに慣性能率を幾分なりとも削減することに成功したのではないかと想われる。

この Chapelon 流リビルドは再び大成功を収め、火格子面積 3.72 m^2 、機関車本体重量 113 t と、わが鉄道省の機関車かと思まがいかねぬ小兵の本機はテストランにおいて最大正味出力(引張棒出力) 3600 馬力をマークし、優れた速度並びに牽引性能を発揮した³⁹⁾。

しかし、複式3気筒で鳴らした F., W., Webb の終着駅が複式4気筒であった皮肉を髣髴させるかのように、複式4気筒機関車界の革命児、André Chapelon の代表作も2D2の軸配置を有する複式3気筒機関車、No. 242. A1 となった。高出力機関車におけるクランク車軸の剛性確保のためには1スローのクランク車軸を有する3気筒機関車の方が有利だから、という考えがそのリビルド開発の根底をなした思考である。

実際、クランクウェブの厚味は240Pの 104 mm から 180 mm に強化された、とある。この言い回しから判断する限り、その構成は“横着設計”ではなく正統的な組立品であったと推定

39) 240P と Chapelon 流 2C1→2D リビルドについては cf. Chapelon, *ibid.*, pp. 301～302, Rogers, *ibid.*, pp. 32～40, Riemsdijk, *ibid.*, pp. 107～108, 齋藤前掲書, 356～361頁。

なお、前稿でも触れた通り、Chapelon のリビルドによる2D型機関車は1940年に12.8%という正味熱効率を発揮したと伝えられている。しかし、その具体的型式については不詳とせざるを得ない。Stokes の語る 4C/4-8-0 (16b) といった型式称号は用いられていないからである。年代的にはこの240P1-25型が最も怪しいが、これでは Stokes の図に記入された $25 \cdot 6"$ 即ち 650 mm という低圧ピストン行程が合わない。cf. P., R., Stokes, *Shadows of Steam*. in ImechE [Institution of Mechanical Engineers], *Small Scale Basic Steam Plant*. London, 1990. pp. 14～18.

されて良い。しかし、ウェブの厚味増大と中央クランクの位相が左右に対して均等に 135° であったという事実以外、その設計の詳細については遺憾ながら不明である⁴⁰⁾。

もっとも、Webb のそれがある種の茶番に終わったのとは対照的に、1932年に製造された Etat 鉄道の単式3気筒急客機 No. 241. 101 (2D1, 内側 570×650 mm, 外側 530×760 mm) を複式3気筒にリビルドする格好で1946年5月、たった1両、落成した試作機関車、フランス国鉄 No. 242. A1 (2D2, 内側高圧 602×720 mm, 外側低圧 686×760 mm) はベース機の 2800 IHP の2倍になんなんとする 5500 IHP を発揮し、実測された正味最大出力も 4280 HP に達し、速力、燃費、水費共に極めて優れた成績を示した。242. A1 の正味熱効率は 240 P のそれをも若干、凌駕したと伝えられる。

但し、台上試験が行われたワケではなく、正確な相互比較のために不可欠な供試炭の低発熱量の如きデータも提示されていない。それでも、この Chapelon Magic の掉尾を飾る複式3気筒 No. 242. A1 が世界の蒸気機関車史上に燦然と輝く技術的成果であったという点だけは明記しておかれるべき事実である⁴¹⁾。

2. イギリス

フランスにおける De Glehn 複式アトランティック (2B1) 機関車の成功に関心を抱いた Great Western 鉄道は、1903年と1905年にこれを3両、サンプル輸入し、*La France*, *Alliance*, *President* と命名、G. W. 鉄道技術陣のトップ、G., J., Churchward 設計による自社のアトランティック2気筒機関車及び2C型2気筒機関車との比較試験を行った。この3両の内、

40) 言うまでもないことであるが、3気筒なら1気筒当り発生トルクも大きくなるからクランク車軸を高剛性化させれば即、応分の疲労強度向上が得られるというワケではない。C53 や後述されるミカエにおける組立式クランク車軸の折損例が示しているように、要はウェブ厚以外の寸法諸元、材料と圧入締め代とのバランス、油孔の配置と形状等、設計の巧拙である。

41) No. 242. A1 については cf. Chapelon, *ibid.*, pp. 160, 162~169, 339, 340~344, 531~537, Rogers, *ibid.*, pp. 83~92, 167~168, Riemsdijk, *ibid.*, pp. 30~32, 齋藤前掲書, 370~375頁。

もっとも、Rogers が次のように語っている件は如何にも手前味噌である。曰く、

性能に関して；軽量の列車を牽いた降坂走行時、つまり機関車に相対的に低い牽引力しか求められぬ条件下に達成される見かけの速度に恐らく過剰な注目が集められ過ぎていくことについてここで指摘しておくのが適当であろう。機関車の質に関してより重要かつ切実なのは、大きな蒸発量の下でカットオフを伸ばし、加減弁における絞り損失を計上しながら高い速度を維持することの方が遥かに困難であるが故に、重負荷牽引時ないし勾配路線上で発揮される性能である。本書において Chapelon の機関車の質が評価されて来たのは正しくかような基準に照らしてであり、No. 242. A.1 の顕著な能力が証明され得るのはこの同じ基準によってである (*ibid.*, p. 86)。

機関車の性能を如何なる速度・牽引負荷の組合せの下で測定するかはその意図・目的次第である。走行速度が高まれば、その自乗に比例して空気抵抗が増すから、機関車は益々重くなる空気の壁に行く手を阻まれることになる。これはブルドーザが排土板で土を押して行く仕事と何ら変わらず、引張棒牽引力は低く出ているものの仕事には大きな馬力が食われる。馬力 (power) を力 (force) と速度 (speed) の何れに振り向けるかはその国の文化である。

Alliance と *President* は Paris-Orléans 鉄道のアトランティックと同じモノで、Nord 鉄道のそれをやや大きくした機関車であった。

この3両は G. W. 鉄道のアトランティックを凌ぐ成績を示したが、牽引力においては 2C 型機関車に対して劣勢を託った。4 気筒でも複式^{かこ}というのは整備性の点で厄介であった。その結果、G. W. 鉄道における De Grehn 平均複式機関車の増備は沙汰止みとなる。

1906年、Churchward は De Glehn 機関車の蒸気圧と動輪径を踏襲しつつ、彼の標準大形ワゴントップ・ボイラーと 15×26 in. のサイズを有する単式 4 気筒 2B1 機 *North Star* を開発した。その軸配置を 2C へと改めた一連の Star 級機関車の増備は1907年に始まり、これが1923年の Castle 級、1926年の King 級と続く同鉄道の主力急客機の原点となった。

この間、1908年には Churchward によって1両の新型急客機、イギリスでは最初のパシフィック、*Great Bear* が開発されていた。ボイラー長が 9 ft. 延長されている点を含め、1922年に到るまでイギリスで最大の機関車であった本機は Star 級 2C 機を拡大した単式 4 気筒機であった。

Great Bear は性能的には成功策であったが、乗務員にその大きさ、重さが嫌われ、かつ、現実にその軸重や幅が過大で入線可能な線区が限られたため、G. W. 鉄道におけるこのタイプの 2C1 機は *Great Bear* 1 両のみに終わり、それさえ貨物列車や石炭専用列車の仕業に充当されることとなった。

これに懲りたか、G. W. 鉄道の主力旅客機は爾後、上述の単式 4 気筒 2C 機のみとなった。この鉄道省 88 シリーズの強力版のような 2C 機関車群は高発熱量の石炭が焚ける環境条件を有するイギリスの鉄道において広く選好された。かかる条件下にある鉄道においては常にそれほど大きな火格子面積が必要とされるワケではなかったからである⁴²⁾。

Southern 鉄道の King Arthur 級 2 気筒機関車、Lord Nelson 級単式 4 気筒機関車、その 3 気筒版である London Midland and South 鉄道、Royal Scot 級以降の急行旅客用諸型式および Gresley の B17 をその一つに数え、戦後のイギリス国鉄 BR5 を掉尾とする客貨両用機関車群など、多くの近代英国蒸気機関車がその実例に当る⁴³⁾。

図 14 はこの内、London Midland and South 鉄道の前身会社の一つ、London & North Western 鉄道、Sir Gilbert Claughton 級単式 4 気筒 2C 機関車（1913～'21年に130両製造）の組立式クランク車軸である。

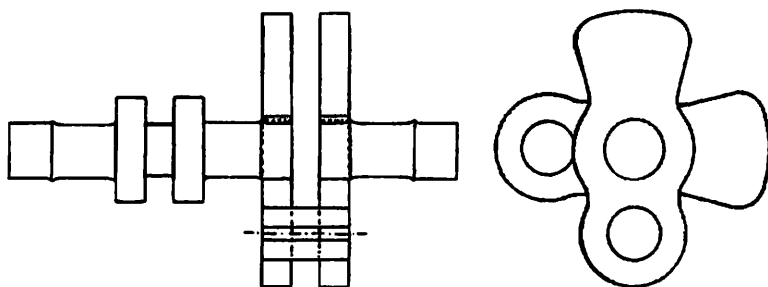
ウェブ上の釣合錘によって部分釣合が取られていることだけから見ても、これは従前のイギリス製内側 2 気筒機関車のクランク車軸と比べ、格段に進歩した設計であり、かつ、軸方向における間伸び感もかなりの程度、払拭されている。

因みに、1937 年、London Midland and Scottish 鉄道に投入された William Stanier の

42) cf. G., Gibbard Jackson, *The Book of The Locomotive*. London, 1924, pp. 169～170.

43) 高木前掲『近代英国蒸機の系譜』第 2、5、6、9 章、参照。

図14 L. N. W. 鉄道, Sir Gilbert Claughton 級単式4気筒2C機関車の組立式クランク車軸



The Locomotive of To-Day. 6th. ed., Plate I, 1A より作成。側面図は機関車右サイドより。

Duchess 級単式4気筒パシフィック急客機に採用されたクランク車軸もこれと瓜二つの形状であった⁴⁴⁾。

3. ドイツ

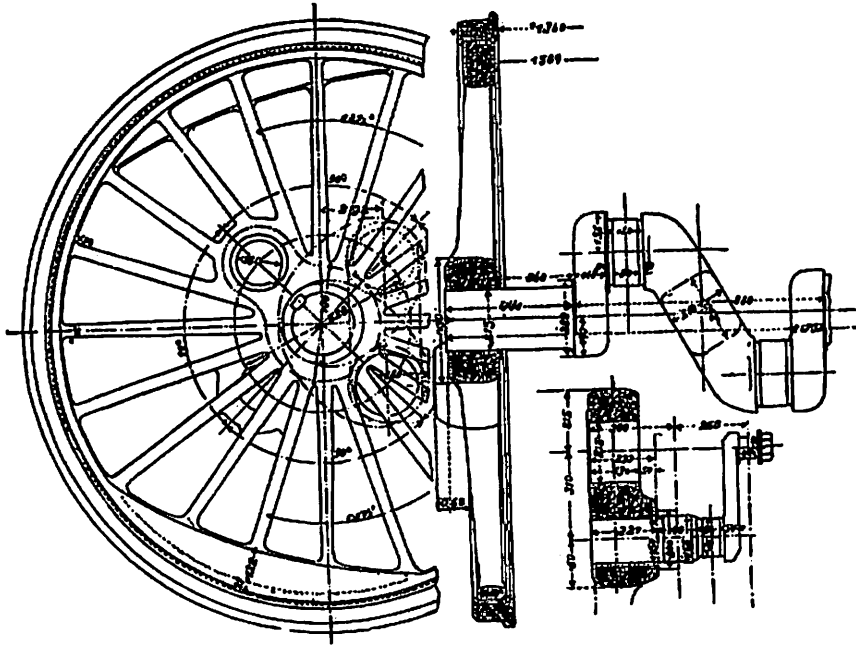
ドイツの例として森・松野によって掲げられているのはバーデン（彼らの表記はベーデン）官有鉄道Ⅱd型蒸気機関車（Maffei, 2B1, 動輪径2100mm, 後のドイツ国鉄14.4型）のクランク車軸のみで、これは型鍛造品であるらしい。読者諸賢におかれては、くれぐれも図15に始まるドイツ製4気筒クランク車軸が180°クランクではないという点に注意されたい（側面図並びに後掲図22の側面図をも凝視せよ！）。

1902年に登場したⅡd型機関車は144km/hの速度記録をマークするほどの快速機であったが、そのクランク車軸は後掲図22に見るAlcoの一体鍛造品の例と全く同様の設計で、中央部、2つの内側ウェブとこれらを繋ぐだけの役目を担う軸心部を省略し、クランクピンをSchrärgarm（傾斜腕）で直結した短絡構成を採っていた。この設計は当該部ウェブ2枚の省略故に軽量化という点においては合理的である。

また、これは間違いなく3気筒1スロークランク車軸におけるドイツ流“横着設計”の4気筒先行版として位置付けられ得るモノで、低回転での使用を主眼に据えた合理的開き直りの双壁を為す。傾斜腕という不釣り合い重量が軸芯の一方に偏倚しており、バランス上、不利である上、部分釣合を図る途は完全に放棄されている。審美的にも全く奇妙と形容するしかない形状で、後述されるAlcoの例と同様、醜悪との形容に相応しい。もっとも、その御執心振りから察するに、歴史的には恐らくドイツが4気筒機関車用“傾斜腕式”クランク車軸の発祥の地をなしていると見て間違いなからう。

44) cf. Chapelon, *La Locomotive A Vapeur*. English ed., pp. 248, 250~254, esp. p. 251, Fig. 161. このDuchess級機関車は一般にイギリスで最大の出力を有する蒸機と目されるが、それでも引張棒出力は240P1-25型に遥かに及ばぬ2500hp余りに過ぎなかった。高木同上書, 50~51頁。

図 15 バーデン官有鉄道 4 気筒平均複式機関車 II d 型のクランク車軸



森 彦三・松野千勝「機関車工学（中）」226頁，第840～842図。この機関車の概要については同書，上巻，115頁，第86図，参照。

なお，J. T. van Riemsdijk に拠れば，Hanomag（Hannoversche Maschinenbau A.G. 独）が1907年，デンマーク国鉄向けに製造した Vaclair 4 気筒複式アトランティック機関車のクランク車軸もこれと同じ様な傾斜腕式であった（Riemsdijk, *ibid.* pp. 126～127）。

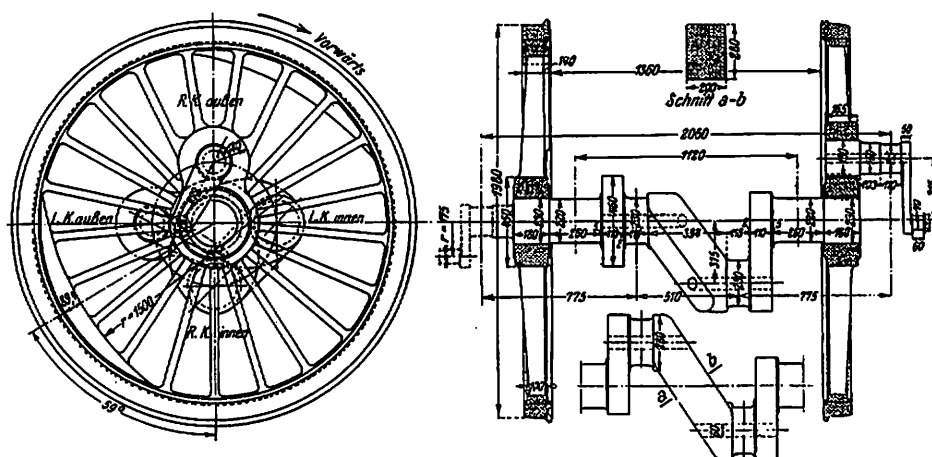
似たような構成はプロイセン国鉄の急客機 S10 型 4 気筒機関車（1910年，2C，単式，ドイツ国鉄17⁰⁻¹型）およびその改良版である S10¹ 型 4 気筒機関車（1911年，2C，複式，ドイツ国鉄17¹⁰⁻¹²型）のクランク車軸にも踏襲された（図16，17）。

S10 の気筒径が 430 mm であったのに対して S10¹ 型の方は高压 400 mm，低压 610 mm という寸法であり，しかも，De Glehn と同様，低压気筒の方が内側に設けられていた。このため，内側クランクは大いに間延びさせられ，その皺寄せを喰らい，ジャーナル幅は僅か 226 mm に制限されてしまっている。

それでも本型式は成功作であり，動輪径 1980 mm，最大運転速度 120 km/h と，スペック的には今一つ冴えなかったが，第二次大戦後暫くの間まで，長らく第一線の旅客機として活躍した。

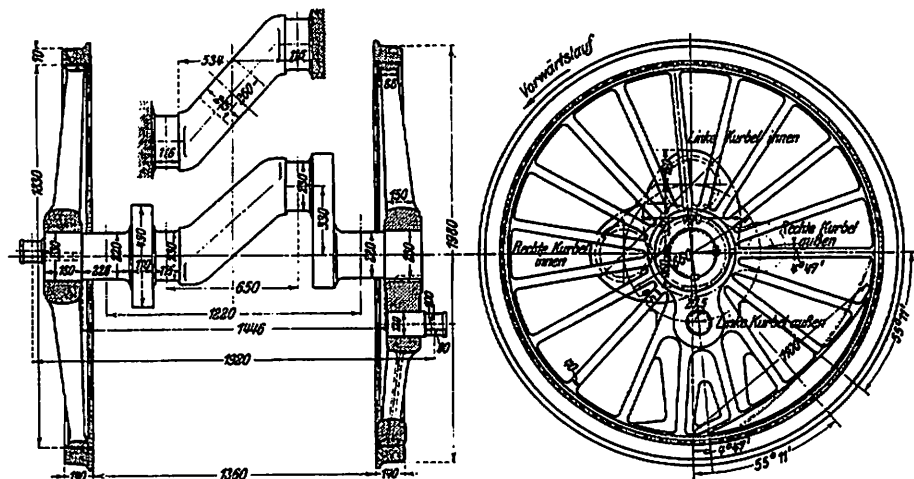
また，この傾斜腕型クランク車軸は1908年から製造が始まり，主として第一次大戦前後に増備され，ドイツ国鉄成立後，1931年の製造分を掉尾とする旅客機，旧バイエルン国鉄 S^{3/6} 型（2C1，複式，ドイツ国鉄18⁴，18⁴⁻⁵，18⁵，18⁶型）においても採用されている。本型式も動輪径

図 16 プロイセン国鉄 S10 型単式 4 気筒機関車のクランク車軸



Robert Garbe, *Die Dampflokomotiven der Gegenwart*. Berlin, 1920, Textband. S. 351, Abb. 485, 486.

ピン部には中空加工。

図 17 プロイセン国鉄 S10¹ 型複式 4 気筒機関車のクランク車軸

Garbe, *ditto*, S. 351, Abb. 483, 484.

2000 mm ながら最大運転速度は 120 km/h に過ぎなかったが、1950年代に燃焼室付きボイラへの遣らずもがな換装工事を受けた186型あたりは1960年代前半まで何とか現役に止まった。

この2つの図について解説するプロイセン国鉄の指導的機関車設計技師 Robert Garbe (1847~1932) の言を引けば、傾斜腕型クランク車軸などという奇妙な設計が採用されたのはマトモにクランクウェブを打ち出すよりもかくする方が型鍛造による一体成形が容易であったからに他ならない。

時代が下れば製造法もドロップフォージからプレスフォージへと移行して行ったものかと考えられるが、この難易度の点はどちらの工法であれ同じことである。

Garbe が 1 スローの 3 気筒用鍛造クランク車軸と比べれば、この傾斜腕式鍛造クランク車軸の製造はヨリ困難であり、製品の寿命も短かった、と述べている点についても既に前稿にて言及しておいた通りであり、当り前のハナシでもある。

わが鉄道省の蒸気機関車設計に多大の影響を与えた技術者として知られる Garbe は自らの大著を機関車用過熱装置の泰斗、Wilhelm Schmidt に捧げるほど忠実な彼のエピソードで、低圧の過熱蒸気を用いる単式 2 気筒機関車の熱効率は複式機関車のそれを上回るという Schmidt 命題の信奉者でもあったから、そもそも 4 気筒平均複式機関車やその胡散臭い 90° クランク車軸などというモノ自体が好きではなかったのであろう。

それはともかく、先に引いた Woods/Barnes の言との併せて考えるに、Garbe の偏見や信念とは無関係に、現場においては 4 気筒用傾斜腕式クランク車軸の取扱いに際して、後年の損傷許容設計された航空機部品のケースと通底する運用ないし検修思想を根付かせるしかなかったものと推測せざるを得ない⁴⁵⁾。

なお、オーストリア国鉄が 1911 年に 1 両投入した 1F の軸配置を有する Winner Lokomotivfabrik A. G. 製 4 気筒複式機関車 100 型 001 号機やこれをモデルとして 1917 年から Esslingen により総計 44 両製造されたウルテンブルク国鉄の K 型 (→ドイツ国鉄 59 型)、更にはノルウェー国鉄が 1936 年より投入を開始した 1D2 の貨物機関車、Dovregruben 級 14 両 (Oslo の Thunes Mek. Verksted 製 5 両及び Krupp 製 9 両) に採用されていたのもこの傾斜腕式クランク車軸であった⁴⁶⁾。

もっとも、ドイツ並びにその周辺なら傾斜腕方式のクランク車軸ばかりであったか、と問えばさに非ず、1925 年、Hanomag がスペイン、Norte 鉄道向けに 6 両製造した 2D1 の軸配置を有する機関車 Of 94 にはディスク状のウェブを有するクランク車軸が用いられていた。この機関車は 1948 年に到るまでの間にスペイン国内で総計 88 両リピート製造されたというから成功作であった (Riemsdijk, *ibid.* pp. 111~112)。

45) 損傷許容設計という考え方の前駆形態は 4 気筒蒸気機関車用クランク車軸だけではなく、航空発動機用軽合金ピストンにおけるピストンピン・ボス上のリブにおける亀裂の観察措置においてもその一例が見出される。Pratt & Whitney 航空発動機における鑄造用 Al 合金 Silico-nickel alloy (A. C. A 132-89) 使用のピストンにおける事例に拠れば、民間機で 300~600 時間経過後、当該部分において大部分に亀裂を生じていたという。シー・エフ・テラー講述『航空用発動機の設計に就て』海軍航空本部、1931 年、14~15、37 頁、参照。シー・エフ・テラーとは勿論、前出の Charles Fayette Taylor。

46) 100 型 001 号機については cf. Garbe, *Die Dampflokomotiven der Gegenwart*. Berlin, 1920, *Tafelband*. Tafel 30, Chapelon, *La Locomotive A Vapeur*. English ed., pp. 452~454 (p. 453 Fig. 331 は Garbe からの引用)、ウルテンブルク国鉄 K 型については cf. *ditto*. p. 454, ノルウェー国鉄 Dovregruben 級については cf. *ditto*. pp. 395~398, esp. p. 397, Fig. 285.

また、1932年、Henschel がポルトガルの Beria-Alta 鉄道向けに製造した 2D の機関車においては内燃機関のクランク軸に瓜二つの素っ気無いクランク車軸が使用されていた (Riemsdijk, *ibid.* pp. 114~117)。

4. アメリカ

さて、上述の通り、アメリカはクランク車軸嫌いの国であったが、マレー複式でパワーアップを図れば低圧ピストン回りの往復質量の巨大さ故に高回転・高速走行は叶わず、かつ、車両限界の制約にぶつかる。外側 2 気筒単式機関車でもアメリカ的設計思想を体現した後年の巨人機ならいざ知らず、手ごろなサイズのそれではパワーと高速走行性能の追求に関しては高が知れていた。

そこで、このクランク車軸嫌い、“simple is best”、“全てを外側に”を地で行ったこの国においてさえ、外側 2 気筒やシンプル・マレーの巨人機興隆前の一頃、背に腹は代えられぬとばかりにこれを用いざるを得ない平均複式に執心する時期が画され、4 気筒機関車用の様々なクランク車軸が提案されることとなった。そこには、元来の新機軸好きの血が騒がずには済まなかったという側面も窺取されて良からう。

同時代のアメリカにおける平均複式 4 気筒機関車用クランク車軸の具体的設計例について、森彦三・松野千勝『機関車工学』は、素性が明確で最も古典的と思しきサンプルとして Baldwin の Vaucrain 平均複式式に係わる図を掲げている (図18)。

これも上例同様、芋鍛造粗形材からの全面機械加工削り出し品であろうが、嫌にゴロゴロしたプロフィールから見れば、棒材からの削り出し品だとしても違和感はない。何れにしても上例同様、加工工数、余肉共に凄まじい、“為せば成る”的作品である。やや小ぶりの似たようなものが *Locomotive Dictionary 1906* に Figs. 1379, 1380 として掲げられているが、省略する。

図19は同じ Baldwin でも、組立式 (圧入・キー止め) に進化したクランク車軸である。ウェブ厚を落とすことなく、中央のデッドスペースを 1 in 切り詰めたことにより、剛性アップとクランクピン幅の増大に成功している。

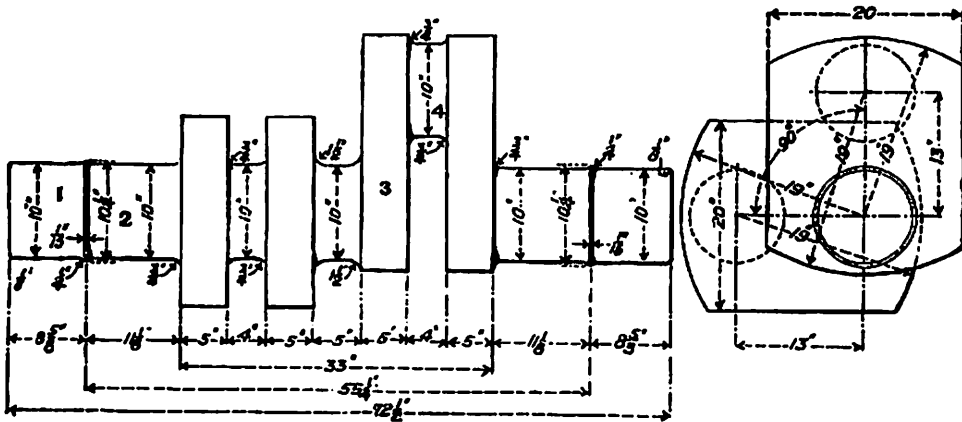
また図20に示される Baldwin の設計例は棒材ないし芋鍛造粗形材からの全面機械加工削り出し品ながら、軽量設計が推進されている。ウェブ面積は限界的に縮小され、その強度不足は英仏においても採用されていたような鋼製タガの焼嵌によって補償されており、かつ、クランクピンには中空加工まで施されている。

Locomotive Dictionary 1906 の元図にはこのタガの真円リングに仕上げられた粗形材の図が添えられているので、これを図21として掲げておく。

その説明によれば、素材はタイヤ鋼で、インゴットからリング転造された後、全面機械加工され、加熱、楕円整形の上、車輪のタイヤの場合と同様、ウェブに焼嵌される。

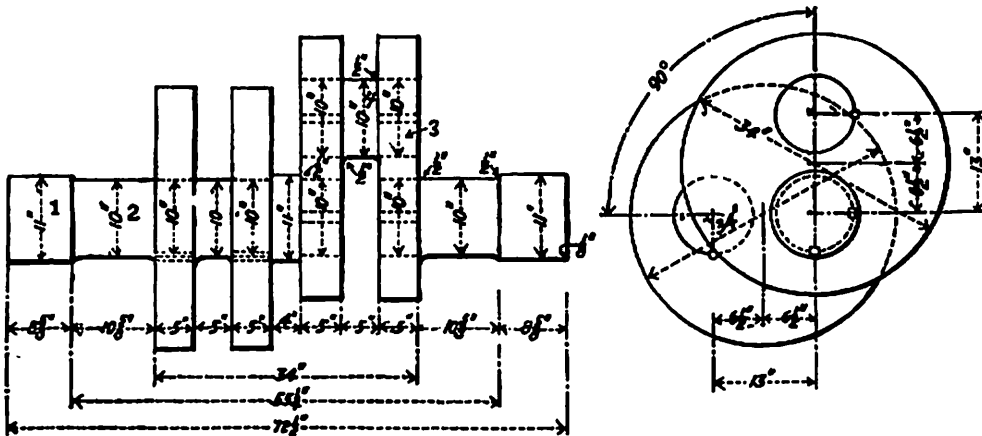
タイヤ鋼とは勿論、車輪々心に焼嵌されるこのタイヤの材料である。当然、それは靱性、耐

図 18 Vauclain 4 気筒平均複式機関車のクランク車軸 A



森 彦三・松野千勝『機関車工学（中）』245頁，第879～880図。元図は *Locomotive Dictionary* 1906. p. 180, Figs. 1377, 1378.

図 19 Vauclain 4 気筒平均複式機関車のクランク車軸 B



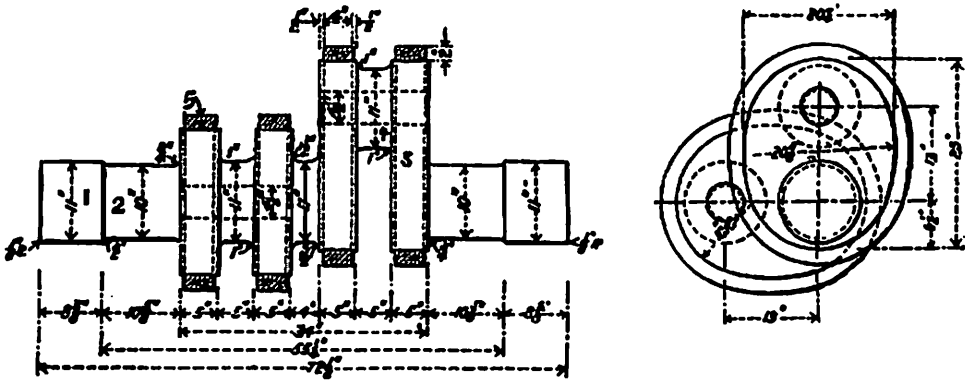
森 彦三・松野千勝『機関車工学（中）』245頁，第881～882図。元図は *Locomotive Dictionary* 1906. p. 179, Figs. 1371, 1372.

摩耗性，疲労強度の高い鋼材でなければならない⁴⁷⁾。

47) タイヤ鋼の材質のお国柄を巡っても興味深い挿話がある。即ち，イギリスを範としていた1909（明治42）年7月の鉄道院仕様書においては機関車用タイヤ鋼の引張強さは76～90 kg/mm²と定められていたが，新たに範をドイツに求めた1911年4月の改正より，その強度は70 kg/cm²以上へと切り下げられた。その結果，タイヤとりわけフランジ喉元の直立摩耗が激甚化し，鉄道省は1923年，焼入れ・焼戻しを施して引張強さを85 kg/cm²とした試験用タイヤ60個を機関車に取り付け，摩耗状況調査を開始した。

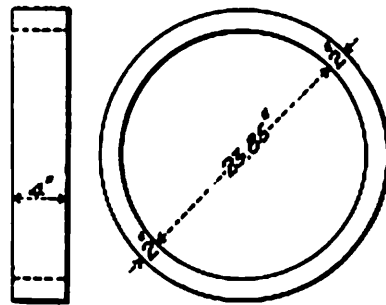
また，鉄道省及びメーカー（恐らく住友金属工業）は「タイヤとレールの摩耗の研究」を主催し，ノ

図20 Vaucrain 4 気筒平均複式機関車のクランク車軸



森 彦三・松野千勝『機関車工学（中）』253頁，第890～891図。元図は *Locomotive Dictionary* 1906, p. 179, Figs. 1375, 1376.

図21 同上のタイヤ鋼製タガの粗形材



Locomotive Dictionary 1906, p. 179, Figs. 1373, 1374.

今一つの巨大機関車メーカー、Alco における実施例としては面倒な鍛造工程と機械加工工程の賜たるドイツ流“傾斜腕式”相当品だけが参照可能であった（図22）。もっとも、これが型鍛造によって造られたという記述は無い。

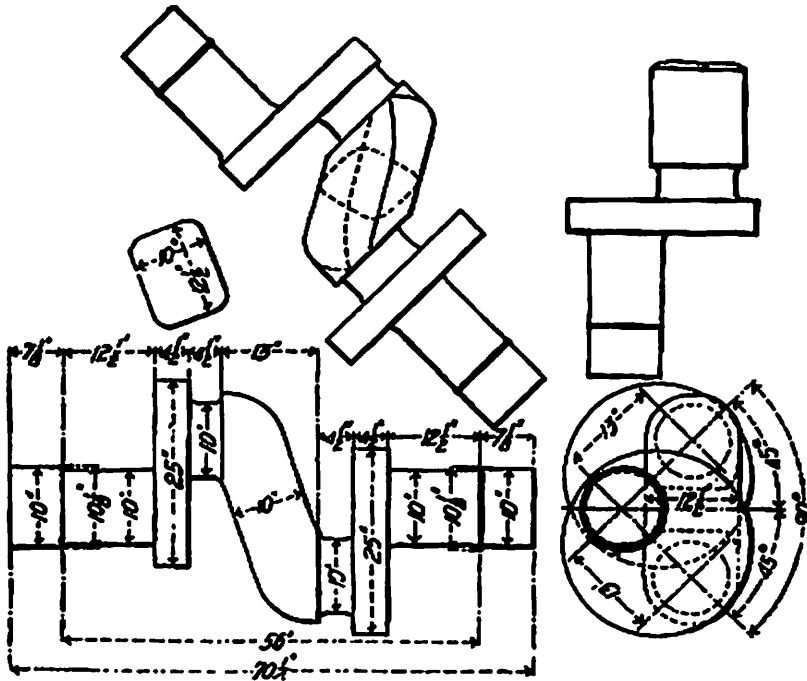
ともあれ、削り出しであれ一体鍛造，組立であれ，改めて図面を凝視すれば，この4気筒用

＼タイヤ硬度の向上がレールの摩耗を促進するものではない，との知見を得た。

その結果，1927年1月には引張強さを 75 kg/cm^2 以上とする新たな規格が制定され，翌年からは燐，硫黄，の許含有率に関する規程が酸性炉・塩基性炉別に定められた。1930年5月からは引張強さを 80 kg/cm^2 以上に高めた新規格が導入され， $80 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ の引張強さを有するタイヤ鋼が実勢として使用されるに到った。これは曲線および勾配の多いわが国有鉄道の線区に対してドイツ規格が不適合を示した事例である。この間，炭素含有率についての規程は存在しなかったが，1925年から1932年にかけて，その値は0.5%強から6.5%強へと漸増した（広重前掲『輪軸』67～69頁，参照）。

アメリカにおけるタイヤ鋼規格については不詳ながら，恐らく英国規格に準拠したものが定められていたと思われる。

図 22 Cole 4 気筒平均複式機関車の一体鍛造クランク車軸



森彦三・松野千勝『機関車工学(中)』253頁, 第886~889図。元図は *Locomotive Dictionary* 1906. p. 180, Figs. 1381~1385.

“傾斜腕式”クランク車軸などというものは不釣り合い重量の塊のような誠に醜悪な回転軸と言わねばならない。

次に、少しは醜さの程度の軽減された、即ち、部分釣合が若干考慮されたクランク車軸の実例を掲げておこう（図23）。

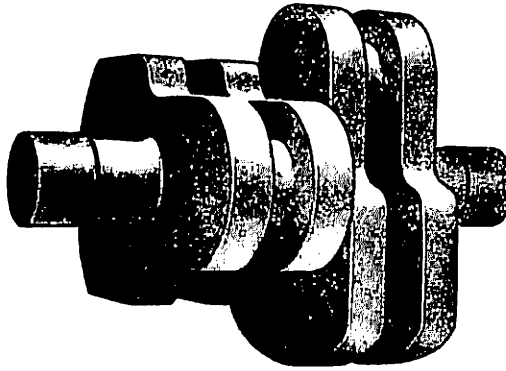
最後に確認し得たアメリカにおける実施例は機関車メーカーのそれではなく、Philadelphiaの部品メーカー、Standard Steel Works Co.の製品広告に見る組立型の“傾斜腕式”クランク車軸というゲテモノである(図24)。

複式が流行っていた時期に刊行された *Locomotive Dictionary* 1906. ではこの会社は自らを台車メーカーとして謳っていたから、クランク車軸に関しては後発企業であったのかも知れない。

もともと、科学的管理法と高速度鋼の父、Frederick W., Taylor (1856～1915) が実験研究を重ねた Midvale Steel Company が鉄道車輪・車軸メーカーであった事例に象徴されるように、アメリカの機関車メーカーにとっては古くから Midvale や Standard のような機械金属系部品メーカーからクランク車軸を購入するのが当たり前であった可能性もある。

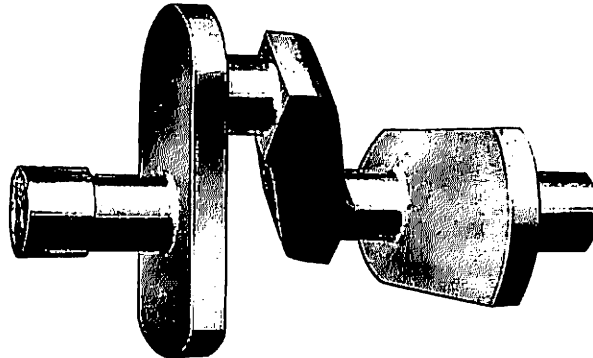
逆に、ジェットエンジン時代の到来と共に、P&W などがレシプロ航空発動機やその補修部品を下位の自動車会社に製造委託したような具合に、アメリカの機関車メーカーが3気筒機関

図 23 ウェブに釣合錘が一体成形された組立式クランク車軸



Locomotive Dictionary 1906. p. 225, Fig. 2205.

図 24 アメリカ、Standard Steel Works Co. における組立クランク車軸の実施例



*American Railway Association — Division V, Mechanical, Locomotive
Cyclopedia of American Practice. Seventh ed. — 1925. N. Y. 1925,
p. 587, Fig. 1371.*

車の流行や2気筒機関車の大型化によって最早、時代遅れとなった4気筒機関車のサービス用クランク車軸の供給を下請けに任せた可能性も否定は出来ない。従って、この広告の背後にある事実の探求は容易ではない。

それはともかく、長い広告文の原表記はかなり入組んだ、意図的とさえ疑われかねない不分明な記述で誠に解り難い。しかし、これを整理補足すれば、その製造方案は大略、次のようになる。

クランクウェブ、クランクピン、ジャーナルは鍛流線の向きが製品稼働時に作用する応力に対して最も強くなる方向を取るよう別々に鍛造されている。材料はウェブにはタイヤ鋼が用いられ、ジャーナル、「Zピース」=傾斜腕+クランクピンには炭素鋼・焼入れ/焼戻し品が使用された。特別な重負荷機にはこの部分に合金鋼を用い、焼入れ/焼戻しが施された。

設計上、クランクピン圧入部の緊締力を確保するためとしてクランクピン座の直径の2倍を下回らないだけのウェブ幅が確保されていた。ジャーナルは円柱状に鍛造後、中空加工が施され、端面にプラグ嵌入の後、外周センター加工による旋削ならびに研削に回された。中空であることにより熱処理の均一性と若干の軽量化効果が得られている。

「Zピース」は直線直角断面に鍛造（荒地成形）の後、最終「Z」形状にプレスで熱間型鍛造された（finally bent hot in a die under a powerful press to the required shape）。ピン部は中心の穿孔の後、プラグを嵌入して外周をセンター加工により旋削し、熱処理、研削加工の後、圧入組立に回された。

後に見るように、自由鍛造粗形材が大量の切粉を出す削り出しという非能率の事後加工を強要するのに対して、最終製品形状に近い仕上がり寸法を有する型鍛造粗形材は機械加工の能率向上に貢献するばかりか金属内部組織たる鍛流線の切断を最小限に抑制するため、製品疲労強度の向上や設計寸法そのもののシェイプアップを実現させる要素となる。

この型鍛造にも重力、蒸気／空気圧等を利用して金型を取付けたハンマーを繰返し叩き付ける drop forge：落鍛鍛造と鍛圧機＝forging press（水圧式／機械式プレス機等）を用いて押圧する press forge とが在り、戦前、単に型鍛造と言え、少なくともわが国においては、概ね前者を意味した。

然しながら、材料は通常の範囲においては変形・流動の速度が高まるほど内部摩擦の急増を来すため、変形に対する抵抗・反発力を増し、変形範囲が極限されることとなって全体にバランス良く変形してくれなくなる。このため、急速打撃をこととするドロップフォージにおいてはハンマーは撥ね返されがちとなり、作業自体が危険であるばかりか成品形状誤差が大きかった。

また、^{かまびす}しく打撃を繰返す間にワークは冷却・硬化を来す。変形抵抗はいよいよ増大し、ハンマによる打撃のエネルギーの益々多くはハンマの躯体から基礎へ、基礎から地盤へと伝わる振動や、音響、更にはハンマを跳ね返すエネルギーへと転化するようになり、加工の効率は急落する。これを防ぐため、数次に亘って加熱炉に入れ直す必要も生じた。

従って、ドロップフォージはエネルギー効率も低かった。こんな欠点だらけの加工法に頼らざるを得なかったのは何としても削り出しだけは避けたいものの、静かに、しかし程よいテンポで鍛圧する機動的な鍛圧機が無かったからに他ならない。

このドロップフォージの欠を幾分なりとも補うため、1930年代のアメリカでは1つの金型に粗材荒打・準備成形・仕上成形用の型を3つ彫り込み、高速ハンマによってトランスファ・ブローして行く“ワンヒート・システム”の普及が進んでいたが、これで対応可能なのは小物部品に限られた⁴⁸⁾。

48) ドロップフォージの概要、実施例については雲野陶藏『型鍛造（ドロップフォージング）』工業図書、1937年、参照。この著者は海軍技師で、彼の著作は型鍛造と兵器製造との関連を雄弁に語る技

これに対して、Standard Steel Co.における本実施例はその成品形状が極めて単純で鍛造工程もほぼ曲げに等しいような場合の事例ではあるが、鍛圧プレスを用いるプレスフォージの早期実用化事例として記憶されるに足るように思われる。同社としては、そうまでして組立化を図った方が、この厄介な粗形材を一体鍛造で調達するよりは余程、楽だったのであろう⁴⁹⁾。

なお、アメリカでは A. R. A. の前身、American Railway Master Mechanics' Association の時代から、表面のごく浅い所に潜む材料欠陥を嫌い、車軸には全面機械加工を施して黒皮を剥くべし、との規程が定められていた⁵⁰⁾。

この主旨からすれば、一番厄介そうに見える「Zピース」の傾斜腕部については組立の後、手持ちグラインダーを用いて仕上げる位しかテが無かったのではないかと考えられる。いすゞ“117クーペ”のルーフサイドからリア・クォーターに到る長いモールを厚いステンレスの帯材から手持ちグラインダーで日本刀のような形に削り込み、仕上げて行った作業と比べれば、こんなことは大した仕事ではない。

形状設計面についてみれば、このクランク車軸に付された釣合錘は申し訳程度のマスで、部分釣合は誠に不徹底である。

機関車の下に潜ってしか整備することが出来ない内側駆動機構とクランク車軸を有する内側2気筒、3気筒、非・連接式4気筒機関車はアメリカでは一度もメジャーな地位に就き得なかった。内側2気筒機関車の製造は遠く1860年頃に終焉に到っており、世紀転換期の寵児＝平均複式4気筒機関車も20世紀初頭の一時기에集中して400両ばかり造られただけに終わった⁵¹⁾。その中には“時計のような”作動を賞賛されたにも拘わらず、クランク車軸折損事故の後、2気筒に改造された例も皆無ではなかった。

3気筒ならクランク車軸も1スローで済むため、検修が相対的に容易であると考えられた点

ゝ術史的に興味深い書である。“ワンヒート・システム”については150～152、153頁、自動車機関用らしき小形内燃機関クランク軸の鍛造風景については51頁、成品としてのクランク軸粗形材や金型については169、175頁、参照。当然ながら、機関車用クランク車軸のような大物についての言及は無い。

濱住松二郎『鍛造法』共立社、実用金属材料講座10 加工編、1937年、もかなりの部分はこのドロップフォージ関係の記述に充てられている。

49) 戦前期、鍛圧機を用いるプレスフォージと言えば、少なくともわが国においては、水圧プレスによる大物自由鍛造を指すのが通り相場であった。水圧プレス並びにこれを用いた自由鍛造や様々な設備による型鍛造等については後述する。

50) *Locomotive Dictionary* 1906, p. 5によれば、動軸は平炉鋼で造られ、燐、硫黄、マンガンの含有率各0.5、0.5、0.6%を超えず、引張強さ（破断荷重÷変形前断面積）80000 lbs/in² (55.8 kg/mm²)、2 in 試験片の伸び20%、断面収縮率25%を下回らぬことと指定され、メーカーには各溶解毎に規定の試験片を採取し、材料試験を実施することが義務付けられていた。製品は平バイトを用いて全周、粗旋削するよう指定され、全点、目視検査に供され、継目、穴等の欠陥の無いことが確認されねばならなかった。

51) 従って、1904年末における4気筒複式機関車稼働数1952両なる上記の数字も8割方はタンデム複式やデュープレックス複式の機関車によって占められていたものと考えられる。

はアメリカでも同じであるが、その総製造両数はマレー代替用重量貨物機を中心とした僅か250両ほどに止まった。400両といい250両といい、大きな数字であるかのように見えるかも知れぬが、これは輸出向けを含む製造両数である上、この大国においては最盛期＝機関車が相対的に小さかった1920年には7万両になんなんとする、巨人機に溢れていた第二次大戦期においても45,000両ほどの機関車が活躍していたから、これ位ではほんの一つまみに過ぎなかった。所詮、日本などとは桁が違っていたワケである。

最終局面における成果たる件の U.P. 鉄道 Class 9000 は高い完成度を誇り、機関士達の中には Alco の推奨する 35 mph. (56.3 km/h) はおろか 60 mph. (96.5 km/h) ないしそれ以上で飛ばす者もあったが、3 気筒専従の検修陣を控えさせられるほどの両数が揃っている場合、Alco-Gresley タイプの 3 気筒機関車は大きな技術的破綻を示さなかった。それでも、整備性の悪さという本質的欠点とクランク車軸はアメリカ的な大軸重に耐え得ないという状況判断がこの大陸における 3 気筒機関車の息の根を最終的に止めることになった。

勿論、その背景には石炭資源に恵まれ燃料価格が低廉であったこの国において、熱効率の僅かなマージンと引換えに機関車構造を複雑化し、稼働率を低下させるより “simple is best” を徹底的に追求する方が得策であるという大局的判断が在った。アメリカにおける 3 気筒機関車の製造は蒸気機関車に対するところがり軸受の本格的導入の発端が画された1930年、Class 9000 の第4次増備25両を以て終了している⁵²⁾。

Ⅲ. 鍛造技術の進歩と 3・4 気筒機関車用クランク車軸

1. 火造り＝自由鍛造の系譜

さて、アメリカにおける組立型“傾斜腕式”クランク車軸に関しては幸いにもその製造方案を些か詮索することが出来たが、クランク車軸全般、なかんずく一体鍛造型“傾斜腕式”クランク車軸などという極め付きのゲテモノについて同様のことを試みるには、往時、エンジン製造工程におけるボトルネックをなしたクランク軸鍛造技術に関するやや立ち入った理解が不可欠である。

内燃機関製造工程におけるクランク軸製造の重要さ、ないし厄介さ、とりわけ材料欠陥の問題について、鉄鋼メーカーでありクランク軸製造企業であった（今でも同じだが）神戸製鋼所の技師長 永井 博はかつて次のように述べた。

クランク軸は云ふ迄も無く、陸船及び車輛用発動機は勿論、他のあらゆる原動機の根本をなすものであるから、材料、工作、検査は最も厳格でなくてはならない。……

クランク軸の工作は非常に時間を費すもので、鍛造法、熱処理、機械加工、検査等に念を入れる程多くの時日を要するし、又そう無くてはならないのであるが、通常、発動機の

52) cf. Bruce, *ibid.* pp. 99～102.

設計が終つて、愈々工作に着手するに当り、第1番をクランク軸工作から初めても、このクランク軸が全部仕上る時と、他の部分品の殆んど全部が製作を終る時とは、殆んど同時である位である。而も、クランク軸の材料に欠点があるとすれば、その欠点は機械加工の終了間際の最後仕上になつて最も厄介なゴースト、(Goast line) 砂喰ひ、或はヘアー・クラック (Hair crack) 等に発見せらる場合が多いので、加工費は全部無駄となるし、発動機の完成はずつと遅れて了ふし、散々の体に逢ふ。材料の悪い個所が鍛造物の内部にあつて外からは窮知出来ないものが、機械加工の進むに連れて表面に現れて来るのである。蓋し、深部にある砂喰ひ、ヘアー・クラック等は完成後も見えないのだが、長年使用する間に材質の疲労となり、内部破壊の成長ともなり、遂に軸を破壊する迄になる。これ等より材料製作者はクランク軸材料の鋼塊製作には最善の努力が必要である (永井博「発動機工作法—陸・舶・車輛用発動機—」共立社『内燃機関工学講座』第7巻、1936年、193~194頁)。

勿論、この点は通常内燃機関より少ない気筒数を有するとは言え、蒸気機関の製造についても相通ずる問題をなした。

以下、暫く蒸気機関、内燃機関用クランク軸の様々な製造工程を概ね時系列的に振り返ってみることにしよう。

最初に見るのは最も原初的な盛金・鍛接法による 90° 2 スロー・クランク軸粗型材の製造工程であり、内側 2 気筒蒸気機関車用のクランク車軸も旧くはかような工法に拠つて製造された訳である (図25)。

これは大形の鉄塊が得られず、マテハン能力にも制約があった時代の工程であろうが、この有様では鍛造ないし鍛錬に附随して云々される鍛流線の繋がりなど“何処吹く風”である。取敢えず、格好をしたモノが出来れば良い、という水準の技術である。

次に見るのは大形の鉄ないし鋼塊を鍛錬し、成形して行く工法である (図26)。EやHで軸部の成形に用いられているのは“タップ”と呼ばれる工具である。FでCの孔を明けるのは“目打ち”と呼ばれる工具である。Gでは“焼き切りタガネ”と呼ばれる柄付きタガネを用いて切断が行われる。何れにおいても横座が材料に工具を当て、先手がハンマを振るう。

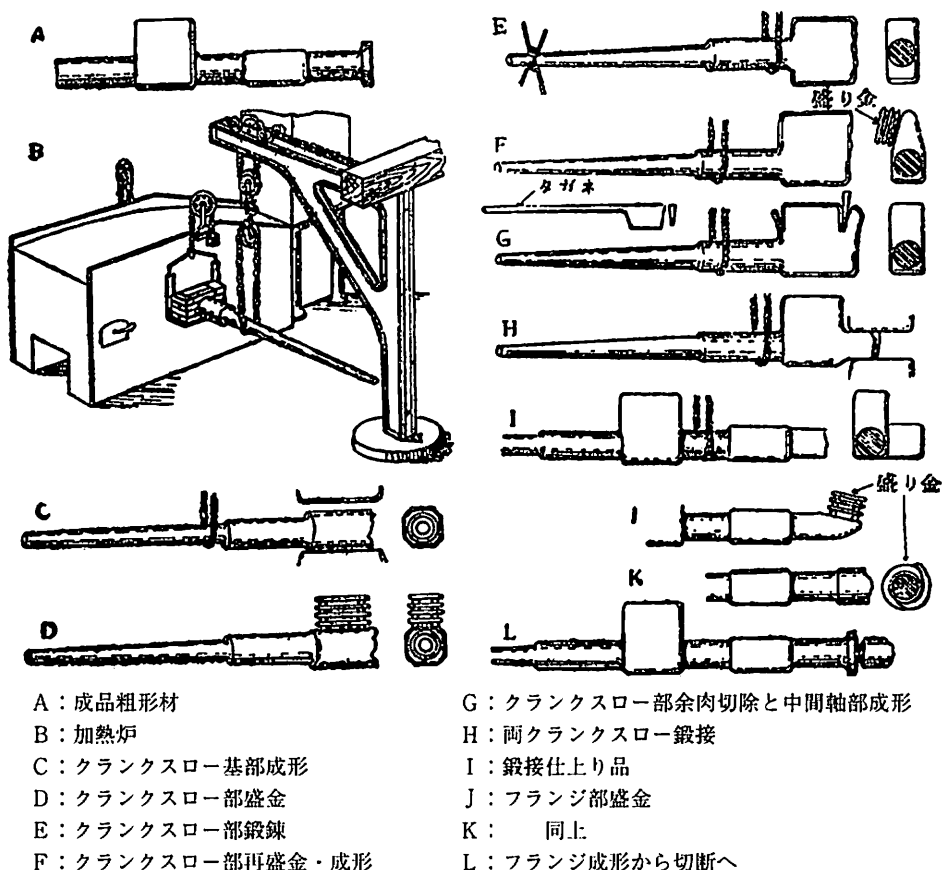
恐らく、かような工法によって蒸気機関車用 90° クランク車軸が作られた時代が第二期と言えるであろう。

では、完全 2 スローの 90° クランクではない、ドイツで謂うところの“傾斜腕式”クランク車軸はどのようにして製造されたのであろうか？

この点に関する資料は乏しく、推論を重ねるしか致し方ないのであるが、その際に参考にされるべきは多気筒機関用クランク軸の製造技術である。これを最も原始的と言える工法から順次、見て行くことにしよう (図27)。

先ず、鋼塊からの自由鍛造による 3 気筒クランク軸粗材の平打ち鍛錬の要領 (図26)。鍛錬比 (断面積の縮小率の逆数) 3 を確保するため成品断面積から逆算して断面積 57 dcm^2 (760×760

図 25 盛金、鍛接による棒材からの 90° クランクの火造り例



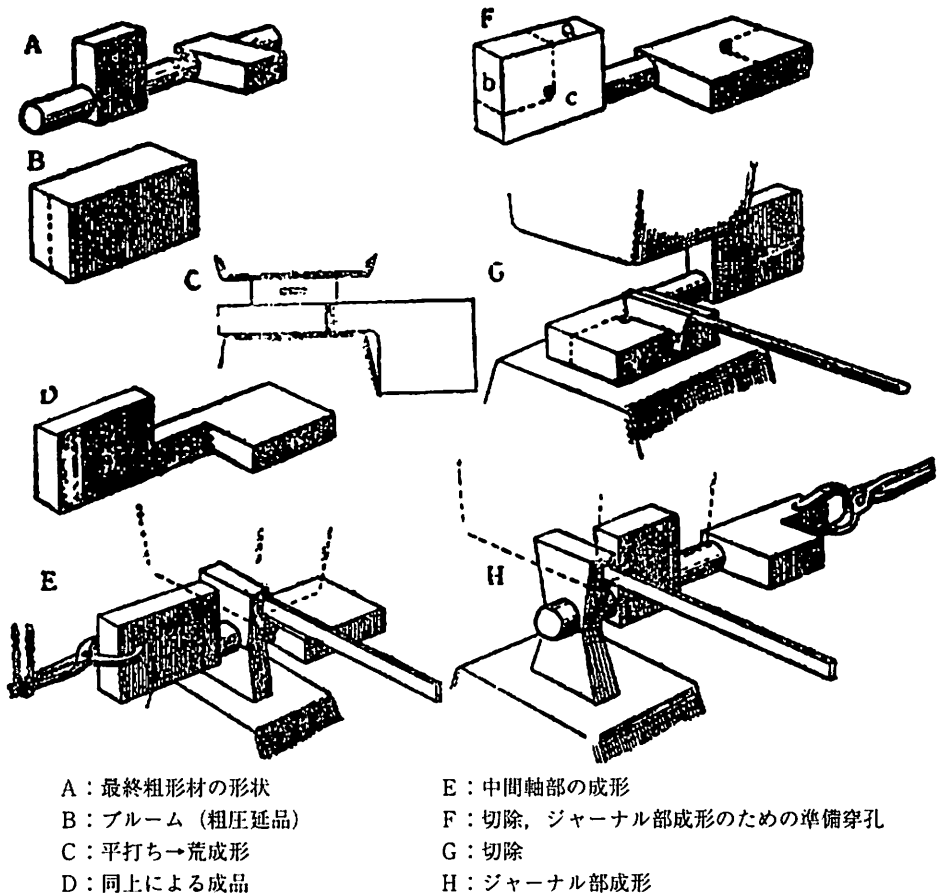
堀岡米吉『鍛錬鍛造』上巻、河出書房、1943年、265頁、第245図。

mm)、長さ 1400 mm の鋼塊を用意し、不純物が多く含まれるその頂部40%を切捨てる（Aハッチング部）。これをA右部のように対角線長さ 650 mm の 8 角形に鍛錬し、更に矩形断面 600×300 mm の棒材Bに鍛錬し、最後にジャーナル部を1つずつ絞り延べてCの如くする。つまり、鋼塊の断面積を不均等に縮小させつつ伸ばして行く訳である。ジャーナル部の成形にはある時点以降は“タップ”が用いられたのであろう。これは、自由鍛造に拠るクランク軸粗形材製造法として最も古典的かつ非能率的工法である。

但し、この粗形材のままではクランク軸として用を為さない。これが蒸気機関や2サイクル3気筒のクランク軸粗形材だとすれば、各スローは 120°位相に振られねばならない。これが所謂“ツイスト”（twisting）である。

今一步、立ち入ってこの点を理解するためには4サイクル4/6気筒内燃機関用クランク軸粗形材の成形法について検証してみるのが便利である。それらのクランク・スローはbalancingと等間隔爆発の確保のため、180°(I)ないし120°(IV)の位相を与えられねばならないか

図 26 鉄ないし鋼塊からの 90° クランク火造り例



同上巻, 266頁, 第246図より。

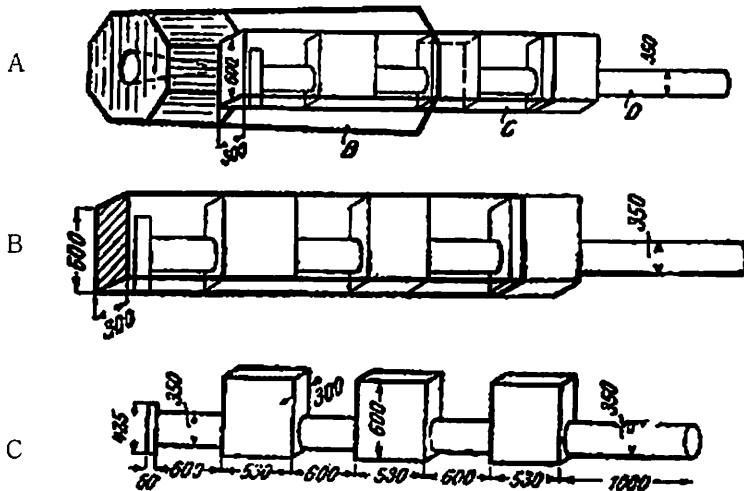
らである (図28)。

4 気筒用において, IIはツイスト=ゼロ, IIIは中央2気筒分についてツイスト180°である。6 気筒用においてVは中央部4気筒で左右に60°, VIでは同じく左右に120°捩られることになる。

果たして180°も捻って大丈夫なのか, と訝りたくもなるが, このツイストの適否について永井は:

c. iv. 捻りのクランク軸に及ぼす影響 これは先づ無いと云つていい。理論的に考へて充分な焼鈍を行へば組織の変化は消滅する筈である。然しこれを少しでも除けたいならばII又はVの様に鍛造をするが, 時間と労力との多くを費し, 又これ程金をかけた利益は無い。若し絶対に捻らない方法に依る鍛造物を希望するならば出来るには出来るがこれこそ非常なる努力を要し, 機械加工費が嵩む。即ち, 現在のプラクティス (Practice) では悉

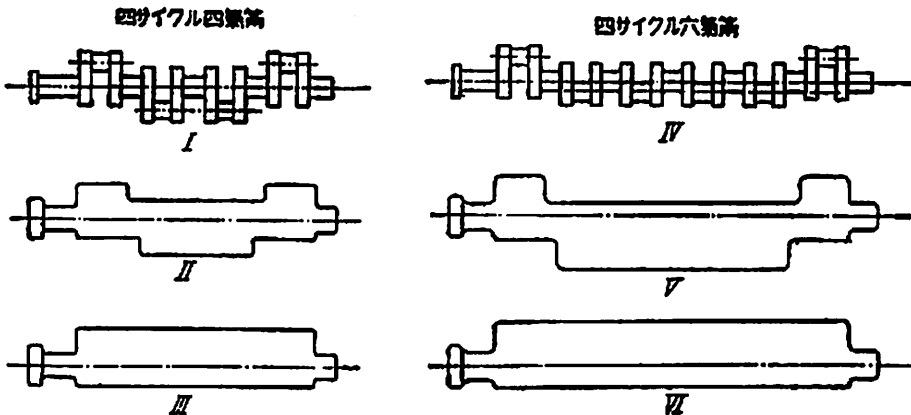
図 27 銅塊からの自由鍛造による3気筒クランク軸粗材の平打ち鍛錬の要領



濱住前掲『鍛造法』72頁，第107図。図と記号を入替えてある。

図 28 自由鍛造による直列4/6気筒クランク軸粗材の成形法

——ツイストを最小化する場合(II, V)と普通にツイストする場合(III, VI)——



永井 博「発動機工作法——陸・舶・車輛用発動機——」(共立社『内燃機関工学講座』第7巻，1936年，所収)，203頁，第9図。

くが捻り作業に依ってゐるのである(『発動機工作法』202～203頁：多少読み易くしてある)。などと、やや開き直り気味の説を開陳している。

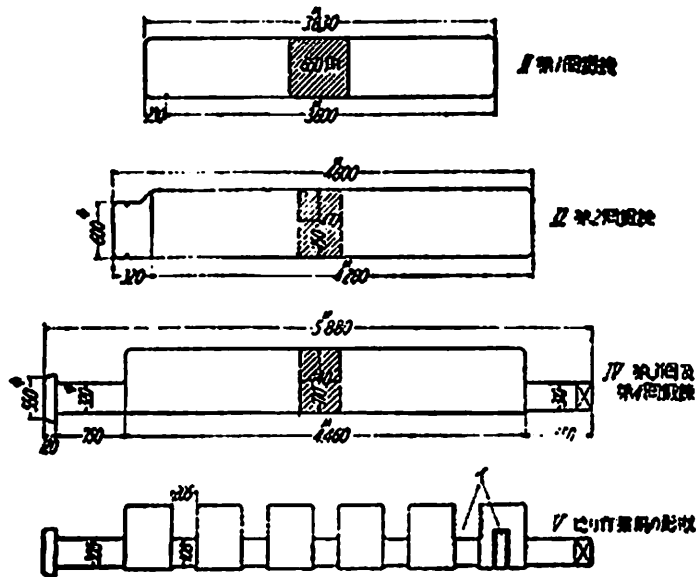
ツイストを前提としたクランク軸粗材の成形から“枅抜き”までを示したのが図29である。

「イ」の部分はボール盤で並列に、マシン目を入れるように穿孔の後，除去する(後掲図36 A)。この際，ガス切断は材料の局所の変質を招くので絶対に避ける。

“枅抜き”ないし“ピン抜き”を行うか，鍛造によってこの凹部を成形するかの選択を巡っ

図 29 自由鍛造による直列 6 気筒クランク軸の製造手順

— 普通にツイストする場合：粗形材の成型から“折抜き”まで —



永井同上書，205頁，11図。

でも永井は：

b. iv. 腕部の余肉取り 鍛造で腕間を押し出して凹みを附する事は、材料費を極端に喧しく云ふか（材料を他所より購入して鍛造のみを行ふ工場では凹みを造る方が得策の場合がある）、鍛造の繊維を懸念する重要物の外、行はない。一般には捻りの前にボール盤で並列に穿孔してこの部の余肉を取り去る。この仕事は【上の図のように】都合では捻り後、焼鈍してから行ふこともある（『発動機工作法』205～206頁：同前，【 】内引用者）。

などと居直っている。

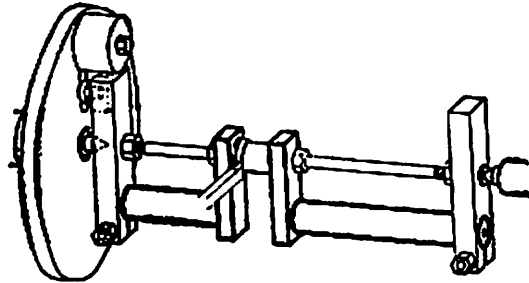
一般のクランク軸工作としては矢張りクランクを鍛造材より切り取り、捻りに依って製出するのである。但し実際に於てはこの繊維の為に生じた災害は未だ嘗つて聴かざる所である（『発動機工作法』202頁）。

との念押し的言い回しからも、ディーゼル機関が無過給・低出力に甘んじていた当時としては、こんなモノでも持った、ということであろう。

それはともかく、C53 最初期の一体鍛造型クランク車軸がこの「切り取り」に拠って製造されたことはほぼ間違いないところである。

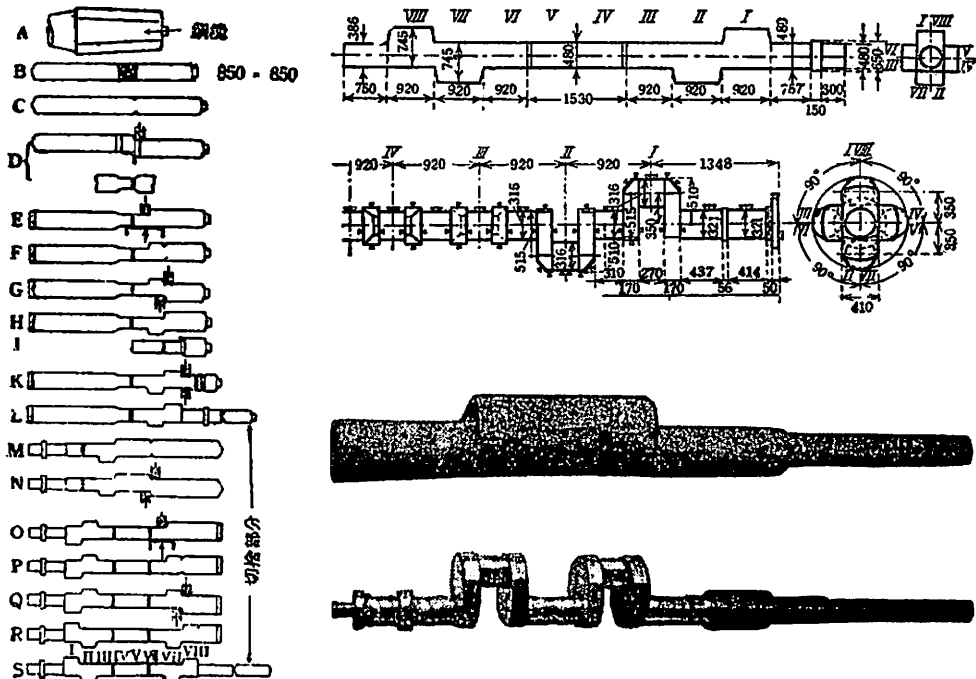
続いて旋盤によりジャーナル部を旋削し、ピン部はワークを“ダルマ”により偏心させた状態で旋盤に取付け、旋削する（図30）。これは余程の量産機種でない限り、また、粗形材の素性がどうあれ、今日でも基本的に踏襲されている加工法である。

図 30 クランクピンの旋削



永井同上書, 207頁, 第13図。

図 31 自由鍛造によるクランク軸粗形材の製造手順と最終製品形状 (直列 8 及び 2 気筒の例)



堀岡前掲『鍛錬鍛造』上巻, 285頁, 第276図, 伊東久米蔵『新編工業大意』杉本書店出版部, 1934年, 62頁より。

これまでの例は 1 スローずつブロックから“拵抜き”する場合であるが, 多気筒機関用クランク軸においては隣接する 2 つのスローのウェブとその間にあるジャーナルまで一塊に成形された粗形材から削り出す工作法も行われた。図 31 右の例えば I と II との間の部分がそれに当る。

これまでに見た蒸気機関車用クランク車軸の内, 初期の一体モノは全て芋鍛造粗形材からの削り出し品と考えると差し支えない。90°位相は鍛造後これを捻ったり, 粗形材の段階からそのような形状に成形しておくことで附与されたのであろう。

何れにしても面倒な工程である。このような厄介事を解消してくれるたのが型鍛造である。

2. 型鍛造あれこれ

型鍛造の何たるかについてはアメリカにおける組立式クランク車軸に関連して言及済みであるから、ここではいきなり最も簡単な1スロー・クランク軸の丸棒からの曲げによる成型型から紹介を試みよう(図32)。前掲図2程度のモノならこれで成型可能であるし、Webbがその3気筒機関車に採用したクランク車軸などはこれより遙かに安易・横着な曲げクランクであった(「C53 型蒸気機関車試験」図3-3)。

そもそも、Webbが3気筒複式などという型式にこだわったのは内側2気筒や4気筒方式における2スロークランク車軸、なかんずく鍛接工法によって造られたその脆弱性に対する嫌悪感が有ったのことはなかったかとさえ想われるのである。

続いて、同じく1スロー・クランク軸の曲げ→型打ち鍛造による成型法の紹介を試みよう(図33)。

まず、この工程においては1200℃に加熱された丸棒を自由鍛造により鍛伸し(a)、再加熱後、曲げ型(b)を用いて大まかな形状(c)に荒地成形(preforming)し、三度目の加熱後、最後の型打ち(die forging)を行い、④のように成形後、バリ取り(trimming)する。鍛流線が形成されるのは鍛伸と曲げの工程においてである。

もっとも、自由鍛造云々は時代の制約で、使用される設備は様々で有り得、発達した生産ラインならリデュース・ロールで荒地成形された素材は鍛圧プレスに並んで取付けられた荒取り(曲げ)用の型と仕上げ用の型で連続して鍛圧成形され、バリ取りプレス、曲がり直し(整形)プレスへと送られ、成品粗形材となるところである。そこへ行き着く前にはハンマによるドロップ・フォージが工程の主役であった件についても既に述べておいた通りである。

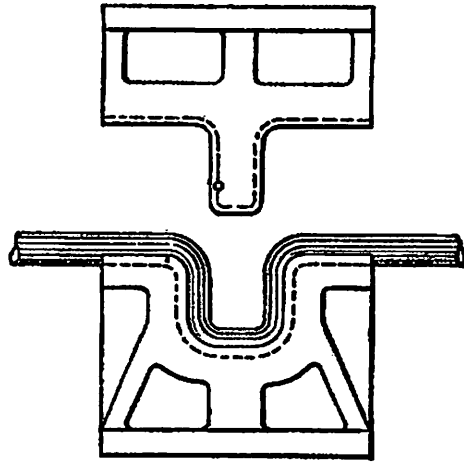
ドイツ流の3気筒機関車用1スロー“横着設計”クランク車軸などは自由鍛造又は荒打ち用の型によって荒地成形された棒材を曲げ型を用いて曲げクランクに類する粗形へと荒地取りし、これを仕上型で打ってからバリ取りしたモノであったと思われる。

では、クランク・スローが位相を異にする多気筒機関用クランク軸粗形材を打つ場合はどうするかと言えば、勿論、1スローずつ割出しながら打っては送って行くことも可能ではある。しかし、図32、図33のような設備に依拠する限り、それは各スローの間隔が余程、間延びしている場合のみ可能な工法である。

そうでない、通常のケースにおいては同一平面内に各スローを一気に打ち出し、成形後、ツイストするか、初めから所定の位相を与えつつ鍛造するか何れかになる。まず、前者から見て行こう(図34)。

直列6気筒用クランク軸は軸方向から見ればピンが120°3分割となっているため、これを図34のように同一平面内に千鳥に打出してから事後的にツイストする“180°平打方式”ばかり

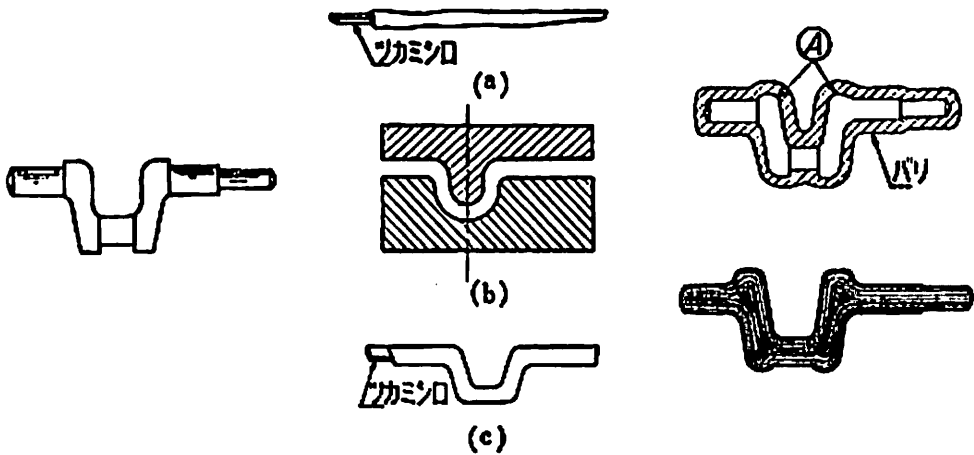
図 32 1 スロー・クランク軸の曲げによる成形法



Machinery's Encyclopedia. 1929 ed. Vol. II, p. 477 Fig. 27.

鍛压机はドロップハンマである。

図 33 1 スロー・クランク軸の曲げ→型打ち鍛造による成形法



成品形状

(a)鍛伸, (b)曲げ型, (c)荒取り

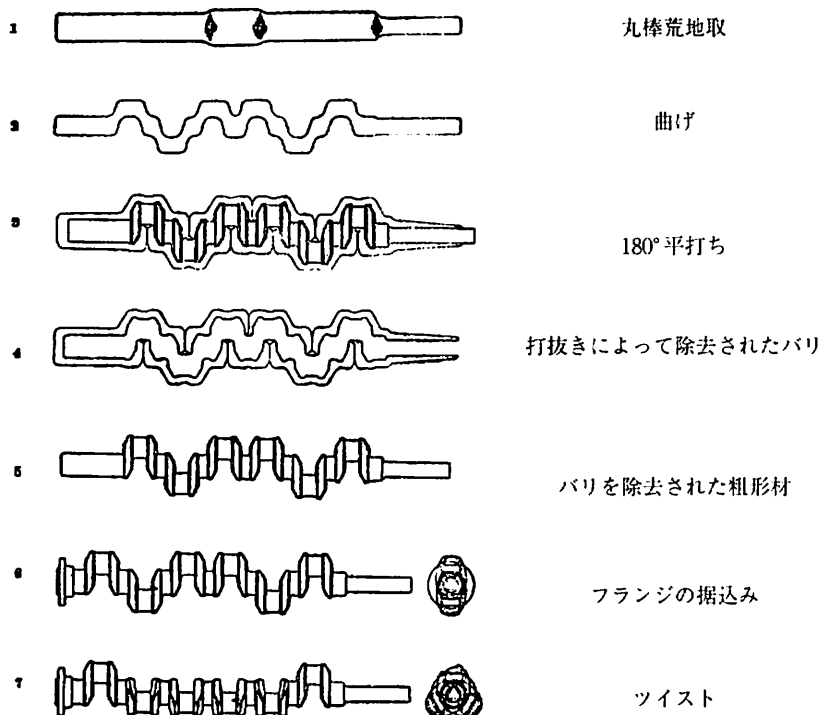
型鍛造品 (成品とバリ), 鍛流線

黒滝忠茂『よくわかる鍛造・熱処理作業法』理工学社, 実用機械工学文庫25, 1964年, 8-17頁, より。

ではなく、荒取した素材から一発で打出す、換言すればツイストを行わない“120°振り打方式”も可能である。しかも後者は鍛流線の保存という点でより理想に近い。現に、この“120°振り打方式”は単に可能とか良いとかいう理屈上の問題としてだけではなく、40 ton・m カウンターブロー・ハンマ等を用いた車両用・船用 200～300 PS 級高速ディーゼル機関クランク軸の製造に関してドイツ他に実施例が知られていた。

しかし、堀岡米吉は、「多量生産としては型の寿命を長くして作業を容易になす」「後振り」

図 34 型鍛造（180°平打ち法）による4サイクル直列6気筒クランク軸粗形材の成形手順



堀岡前掲『鍛錬鍛造』下巻, 177頁, 第179図。4サイクル4気筒用クランク軸に関する似たような図解は Hugo Kaessberg, *Gesenkschmiede*, Berlin, 1938・鈴木正男訳『型打鍛造法』化学主義工業社, 1940年, 72~74, 103~104頁においても掲載されている。

方式に歩がある, と述べている⁵³⁾。

その言葉通り, やがては“180°平打方式”オンリーの時代が訪れ, 今では“120°振り打方式”などというモノを知る鍛造技術者がほとんど皆無と断言して良いような状況になってしまった。

なお, 戦前戦時期のわが国においてはドロップフォージは上出来といえる技術で, プレスフォージなどは“夢のまた夢”であった。日産自動車にとっては“ダットサン”(直列4気筒, 722 cc)の3スロー・2軸受式などという簡易なクランク軸が ERIE 社製 5000 lbs. (2265 kg) エア・ハンマ等によるドロップフォージで製造されていたことが自慢であった。トヨタが鑄造クランクへの逃げに走っていたことを想えば, それも理解の範囲内, と言える挙動である⁵⁴⁾。

53) 堀岡米吉『鍛錬鍛造』河出書房, 1944年, 上巻, 245, 247, 249, 250頁, 下巻, 175, 176頁, 参照。

54) “ダットサン”に関しては日産自動車『国産の誇り ダットサン の出来まで』無刊記 (1936年頃), 国際自動車協会出版部『最新 小型自動車講義録 第四巻』(ダットサン自動車講義), 無刊記 (1937年頃), 26~27頁, 杉谷宗一『発動機潤滑油の実用的研究』山海堂, 1944年, 3頁, 参照。

トヨタについては差し当たり, 拙稿「戦前戦時のトヨタ貨物自動車用ガソリンエンジンについて(1), (2)」[LEMA] No. 468, 470, 2002, '03年, 参照 (この稿は国産三社の大形車用ガソリン機関の技術形成全般を扱ったものに近く改稿の予定)。

これに対して、欧米においては1930年代から戦時下にかけて、クランク軸粗形材製造工程におけるハンマから鍛圧プレスへの部分的以降（即ち、プレスフォージ化）が観察されている。とは言え、高速機械式鍛圧プレス導入の主流は小物部品からせいぜい小形機関用クランク軸粗形材鍛造やバリ取りまでであり、大形高速ディーゼル機関用クランク軸粗形材の鍛造の如きは超弩級の基礎工事を必要としない各種のカウンターブロー・ハンマが専ら使用されていた⁵⁵⁾。

この種の遣い分けは境界線がアップシフトしたとはいえ、ほぼ通時的に観察される現象である。因みに、世界最大の16000t高速鍛造プレス1基を擁する本邦高速内燃機関クランク軸用一体鍛造粗形材のトップメーカー、住友金属工業（製鋼所：大阪市此花区）においては1991年当時、16000tプレスには荒地成形用と仕上げ用の型を併設して240kg級までの粗形材を高速鍛造させ、重車両機関用クランク軸粗形材の鍛造には11000t1基、及び6000tプレス2基を、更に大きな機関車用・舶用ディーゼル機関向け等、素材重量350kgを超えるクランク軸粗形材の成形には35ton-mカウンターブロー・ハンマ2基を充当していた⁵⁶⁾。

何れにせよ、型鍛造はその前提をなす高価な型材やこれまた高価な型彫盤、本工程前段の荒地取り用設備から後段のツイスタやバリ取りプレス、整形(coining)プレス、熱処理炉を含め、主役をなす加熱炉と鍛圧機器以外に多大の附帯設備を要する工程であり、製造ロットが余程大きくなければペイしない訳である。

さて、以上のクランク軸型鍛造に係わる予備的考察を前提に、その余りにも奇妙な形態故に2スロー・クランク軸の単なる一種であることを超え、本稿における中心的テーマの一つとならざるを得ぬところの対象物＝平均式4気筒機関車用2スロー・“傾斜腕”式クランク車軸粗形材を一体鍛造モノとして成形する際の工程について推論してみよう。

すると、どう頭を捻ってもこの奇妙な完成品形状に対して“振り打ち”を以って臨むことは出来そうな相談ではなく、①：最終的にホイール・シート部とジャーナル部とに成るべき“I”状突起が書き始めと書き終わり部に設けられた“角付き”Z型を荒取りし、②：カウンターブロー・ハンマなり鍛圧プレスなりを用いた型鍛造に拠り、何とかしてホイール・シート部、ジャーナル部、Z両角のクランクピン部を一平面内に成形し、③：Zのタスキ＝傾斜腕部を押さえ込んでからその両端に位置するクランクピン部をバーナーで焼き、④：この状態で加熱を終えるや2つの“I”状突起部を掴み、それらの軸部が同一の芯を共有するに到るまで“角付き”Zの“L”部と“┐”部とを引起す、つまり、ジャーナル部ならぬクランクピン部をツイストする、といった工程位しかイメージのし様がない。

55) 同上書、上巻、250頁、第223図、265～272頁、第256図、下巻、174～202頁、参照。先にも図を用らせて貰ったこの書は戦前戦時期間における鍛造技術の状況を具体的に教えてくれる唯一の第一級資料である。著者は呉海軍工廠教習所に学び、三菱重工業川崎機器製作所で鍛造工場長を務めていた人物。

56) 住友金属工業㈱「製鋼所」1981年、同「型鍛造品」1991年、参照。現在、同社のHPではクランク軸粗形材鍛造用プレスとして16000t、10000t高速鍛造プレス、6500t、5000t高速自動鍛造プレス、35ton-mカウンターブロー・ハンマの名が挙げられている。

これは事後の整形による歪み取りを含め、実に面倒な工程である。①～②の工程で理想的な鍛流線の繋がりを得ることなど蓋し至難の技であったろうし、④のツイストや、鍛造終了後における旋削、研削のためのクランクピン部の芯出しも、専用機械や治具が用いられたにせよ、十分に厄介そうである。自由鍛造→削り出し品にしても然りであったが、この面倒さを想えば、Woods や Barnes, Garbe などが4気筒機関車用クランク車軸一般を忌み嫌った道理も理解出来よう。

なお、クランク車軸については不明ながら、戦時中のドイツではまだまだドロップ・フォージ頼みの分野が多かったらしい。因みに、ドイツ国鉄は42型及び52型2気筒1E戦時型貨物機の主連棒、連接棒の製造工期短縮のため従来の一体成形（自由鍛造→削り出し）を取り止め、中間平行部と両端部を別々にドロップ・フォージし、3つのピースを電気突合せ溶接で接ぐ工法を編み出した。この転換によって生産性は大いに向上し、結果的に両型式は戦争末期から戦後にかけて、それぞれ総計838両、6248両も造られることが出来た⁵⁷⁾。

3. RR 鍛造の登場

さて、再び内燃機関に範を求めれば、重量数トンを超えるような中形内燃機関用クランク軸ともなれば、その太さからしても長さからしても型鍛造は一層困難となる。さりとて、これを自由鍛造→削り出して造っていたのでは如何にも工程煩雑、モノ入りである。

57) なお、Chapelon はこのドイツ国鉄42型及び52型の主連棒、連接棒における工期短縮工法について、それがI断面中間部とリブ付き楕円状両端部とから成る最も合理的な最終形状に近付くための便法であったと位置付け、それによって「満足な結果が得られたように思われる」と述べている (*La Locomotive A Vapeur*. English ed. p. 92, Fig. 30=主連棒, p. 95)。

他方、篠原正瑛はこの2型式は速成工法で製造されたロッド類の過重量により釣合不良を生じ、走行中の振動が甚だしかったと述べている (『全盛時代のドイツ蒸気機関車』, 誠文堂新光社, 1971年, 287～289, 314～317頁, 参照)。

筆者は何れの言が正しいのかを最終的に判定出来る材料を持たぬが、D51のそれより76mm長い3176mmの中心間距離を持つ42型の主連棒における“I”断面の寸度はピストンに作用する蒸気力が強い分、D51の(130→140)×80mmより大きく、172×108mmもあった。しかし、中央部の厚さはD51の20mmに対して僅か12mmに過ぎず、周縁部も抜き勾配のため、内燃機関のコネクティングロッドの断面のようにシェイプアップされていた。楕円状両端部・細端部にしても、リブ付きに彫り込まれてこそのなかったにせよ、決して厚ぼったい設計などではなかった。

型鍛造であれば各ピースは図面通りに造られるしかなかったワケである。長さも当然、決められていた。かような単純形状の主連棒の如きを1ピース芋鍛造削り出し品から3ピース電気溶接品に改めたことによって過重量を生ずるとは考え難い。

序でに述べれば、ロッド中間平行部について篠原の「I形の圧延鋼」なる言は誤りで、Chapelon 英語版には明確に“drop stamped rods”, “produced by drop stamping”と表記されている。

恐らく、状況からすれば、篠原の所謂「顫動」はロッドの過重量に起因する現象ではなく、630φ、600φと大径の気筒を持つ、即ち往復運動質量の大きい外側2気筒機関車に固有の振動の各部工作程度劣化による顕現と看做されるべきであろう。

また、最大成品重量 400t といった大形機関用クランク軸や一部の小形高速機関なみの組立式で中形低速機関や中速機関用クランク軸を軽くかつ強く造ろうとすれば材料や加工に特別な配慮が必要となる。即ち、これまたコストが嵩む。

以上の積年の憤懣を解消すべく開発されたのかの RR 鍛造法である。鍛圧プレスに特殊な装置を取付け、丸棒から中形機関用クランク軸を作り出す RR 鍛造法は第 2 次世界大戦期、ドイツ占領下のフランス、Compagnie des forges et aciéries de la marine de St. Etienne (通称 AM 社) で開発され、少数の製品も造られた。発明者は G. Ruget なるポーランド人で、彼と Creusot-Loire 社々長 M. Roederer の頭文字から RR 鍛造の名が付けられたとする文献もあるが、両社名の異同については不詳である。

ともかく、クランク車軸付き 4 気筒複式機関車の牙城フランスでかような技術が誕生したのも何かの因縁かとさえ思いたくなるのだが、登録商標の由来となった 2 人はこのアイデアをドイツ人に気付かれぬよう秘匿、その降伏・撤退後に装置を再組立し、6000t プレスと 1500t プレスに取付け、試作を行った上、1944年12月にフランス政府に特許を申請した。

RR 鍛造法 (図35) によって造られる製品の優秀性は程なく世に知れることとなり、イギリスとオランダの企業が逸早くライセンスーとして名乗りを挙げた。1952年 3 月にはわが国においても中大形機関用クランク軸製造に長い経験を有する神戸製鋼所が AM 社より RR 鍛造法の技術導入を断行。同社では RR 鍛造装置を 5000t 水圧プレスに取付け、1955年 6 月よりこの鍛造法による中形ディーゼル用クランク軸粗形材ならびに完成品の販売を開始した⁵⁸⁾。

この RR 鍛造法とはフランジ、ジャーナル、ウェブ、ピン……、と節付け荒地成形された棒材を部分加熱し、当該部を左右の“クランクウェブ据込ダイ”で鷺掴みにして中央に向けて据込みつつ Y 型の“ずらしパンチ”を上方より押込み、1 スローずつクランクを形成して行く鍛圧加工法である。

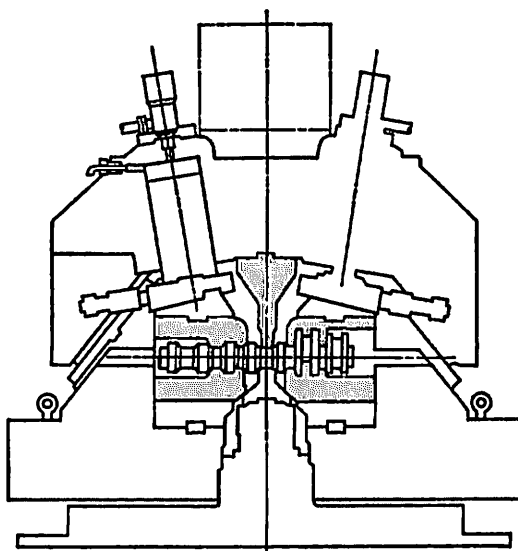
素材は各スロー毎に割出しつつ挿入されるため、通常の型鍛造による粗形材などとは異なり、ジャーナル部でツイストされることは一切無く、鍛流線の繋がりは理想的に保持される。

ここに掲げられたのは直列 6 気筒クランク軸における自由鍛造粗形材と RR 鍛造粗形材との比較 (図36) 並びに RR 鍛造による直列 6 気筒クランク軸粗形材の予備加工された棒材と成品の対照 (図37) である。自由鍛造品とは言え、良く出来た粗形材であるが、そうであるとしても、こんなモノから“柀抜き”し、削り込んで行くのではやはり大変な手間である。

RR 鍛造前の荒地成形は量産品ならリデュース・ロールで転がせば速いが、非量産品の場合には適当に振れ止めを手配した上で長尺旋盤によって旋削されることになる。

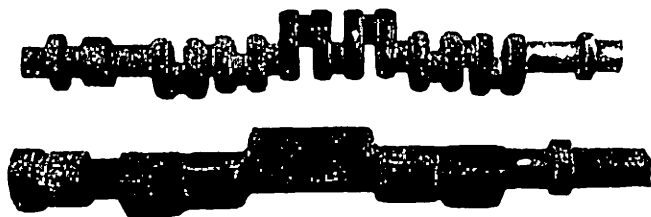
58) 宮下幸好・早良俊昭「RR 鍛造法によるクランク軸の製作と機械加工」(『マシナリー』1956年 4 月号)、磯貝 誠他『ディーゼル機関Ⅱ (熱機関体系 7)』山海堂、1956年、126～127頁、日本船舶発動機会『日本漁船発動機史』1959年、135頁、裏表紙見返し広告、神戸製鋼所『神戸製鋼所70年』1974年、87頁、『神戸製鋼八十年』1986年、60頁、参照。

図 35 RR 鍛造法の概要



五弓勇雄『金属塑性加工の進歩』コロナ社、1978年、63頁、
図2・13を若干修正。

図 36 直列 6 気筒クランク軸粗形材……自由鍛造粗形材と RR 鍛造粗形材との比較

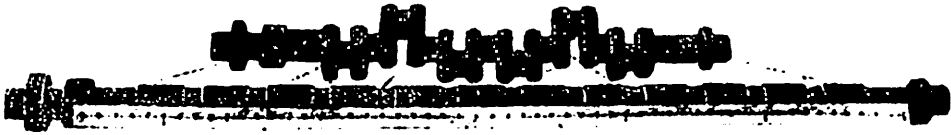


日本船用発動機協会『日本漁船発動機史』1959年、135頁、第2.97図より。

この工法に拠って成形されたクランク軸粗形材（図38 B）は“Continuous Grain Flow Crankshaft”の名の通り、従来の自由鍛造品（図38 A）と比べ、①：事後加工において鍛流線が切断、捻転されることがないため、強度が高く、疲労強度は30～40%増しとなる他、②：材料は鋼塊から丸棒へと大きな鍛錬比を以って鍛錬されるため、製品となった時、大きな応力を受ける表層付近の不純物は押出され、その組織は健全である上、従来のように不純物の存在箇所を機械加工によって中心部付近から表層部近へと移動させてしまう恐れもない。また、③：粗形材は余肉が少ないため、製造工程の起点に素材として不純物管理の容易な小形鋼塊を充当することが出来、更に、④：加熱・鍛錬時間が短縮され、エネルギー消費が少なく、⑤：機械加工時間も短縮される。

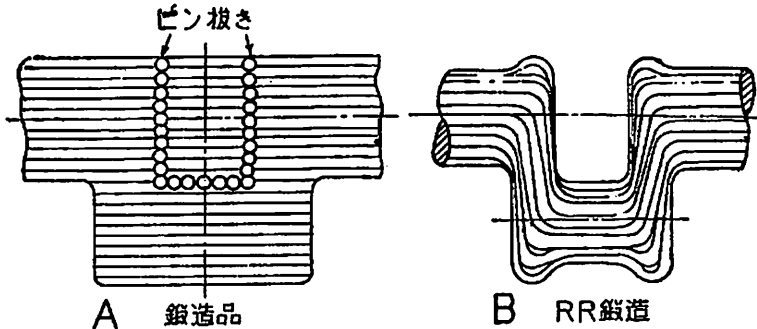
成形される粗形材のサイズは当初、ストローク 200～600 mm、ピン 110～275 φ×96～192

図 37 RR 鍛造粗形材：直列 6 気筒クランク軸の予備加工された棒材と成品



同上書，135頁，第2.98図。

図 38 自由鍛造粗形材と RR 鍛造粗形材との内部組織の相異



仲谷新治『ディーゼル機関講義（中巻）』漁船機関士協会，1963年，499頁，10・2図。

Bは単なる概念図，絵空事ではない。これに関する実物切断写真としては日本機械学会
【新版 機械工学便覧 B2 加工学 加工機器】1984年，B2-100頁，図218を見よ。

mm，ジャーナル 130～280 ϕ $\times$ 88～196mm，ウェブ厚 43～141mm であったが，その後，ストローク 1000mm を超えるものまで製造可能な装置への増強がなされている。

中型 4 サイクル船用ディーゼル機関の高過給化・高出力化を可能にした一つの要素はこの RR 鍛造法によって製造された高疲労強度のスリムな一体型クランク軸粗形材であった。この RR 鍛造法を以てすれば，蒸気機関車用クランク車軸のサイズは容易にカバーされ，4 気筒用 2 スローでも 3 気筒用 1 スローでも，高剛性・高疲労強度のモノが確実に得られる。問題は生産量であるが，これも中形ディーゼル用クランク軸と同じ寸度を選べば，装置の共用も可能となり，極度の低コスト化が可能になる。余り寸度の離れたモノから削り込むことだけは肝心の鍛流線の繋がり喪失を結果するので回避されねばならない。

かような技術さえ存在していたなら，Woods のクランク車軸嫌いも Garbe の 4 気筒嫌いも気持ち程度には緩和されていたであろう。少なくとも Henschel のボルトガル Beria-Alta 鉄道向け 2D 機関車のクランク車軸などはずっと容易に製造されていたことであろう。

4. 最終発達局面を示した平均式 4 気筒蒸気機関車用組立式クランク車軸の態様

以上要するに，RR 鍛造は中形内燃機関用クランク軸粗形材の調達技術としては極めて優れた技術である。その後，RR 鍛造法と型鍛造との合いの子のような TR 鍛造法が開発され，欧

州や中国に実施例を見るようになったが、本邦においては今日に到るも神鋼の手で改良されたRR鍛造法によって中形ディーゼル用クランク軸粗形材が製造され続けている。

とは言え、回転数を抑えた遣われ方をする3気筒機関車用のクランク車軸についてなら何もこのRR鍛造法に依らずとも、遠くWebb辺りに淵源を發し、プロイセン→ドイツ国鉄によって鍊成された“横着工法”程度で間に合うし、十分に合理的でもある。

高回転化が迫及される場合には軸の剛性と疲労強度に頼るのではなく部分釣合が確実に詰めておかれるべきであるが、この場合、RR鍛造等で造られた一体粗形材への後加工による釣合錘取付はこれらの工法が持つメリットを幾分減殺する結果を招来せざるを得ない。

一方、平均式4気筒蒸気機関車においてはクランク車軸への中間軸受の装備などという仮定は非現実的である。よって、2スロー・クランク車軸にRR鍛造粗形材が適用されたとしても、内側ウェブと中央ジャーナル部は半分遊んでいるようなモノとなる。それは4枚ウェブの組立式よりも一体及び組立型の傾斜腕式よりも高い剛性と疲労強度とを発揮するであろうが、総重量並びに不釣合重量面ではとりわけ傾斜腕式^{かこ}に対して不利を託つ。

しかも、Chapelonの言にもあったように、中形中低速ディーゼルなどの数倍という高回転域での使用が前提とされる高速4気筒蒸気機関車のクランク車軸ともなれば内部モーメント対策は必至である。部分釣合が図られねばならず、ウェブに対する釣合錘の後付けは不可欠となる。そのベースという限りにおいてRR鍛造粗形材はメリットを発揮出来るが、ここでも3気筒用の場合以上にRR鍛造が持つ折角の高い生産性は減殺されてしまう。

そこで、3気筒機関車用クランク車軸における場合と全く同様、クローズアップされて良いのが一見、面倒に見える組立式の高い潜在的可能性である。つまり、部分釣合を取るという点において一見煩瑣に映る組立式は却って有利な製造方案なのである。

とりわけ、ここでは平均式4気筒機関車用クランク車軸技術史の掉尾を飾る個体として4枚ウェブ型とも傾斜腕型とも異なるレイアウトのそれに注目してみたい。

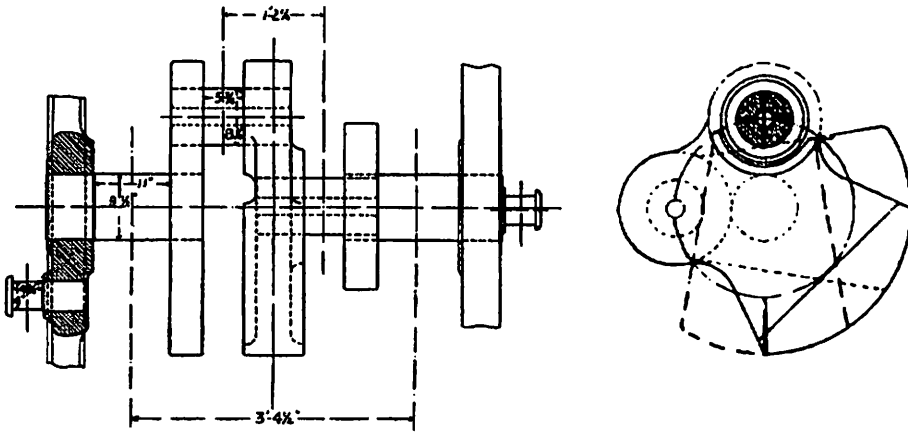
それは平均式4気筒機関車用組立式クランク車軸の究極としてのNigel Gresleyの設計になるL.N.E.鉄道No. 10000の設計例である。この2C2(2C1+1)の軸配置を有する水管ボイラ付き試作4気筒複式機関車はイギリスで最後の本線用大形複式機関車として1929年に竣工したものの、燃費を含め性能全般について期待を大いに裏切り、メンテナンス・コストが嵩んだことも癪のタネで、1937年には単式3気筒にリビルドされてしまっている。甚だ意欲的な試みではあったが、全くの失敗作、それがこのNo. 10000である⁵⁹⁾。

しかし、そのオリジナルのクランク車軸(図39)は注目に値する秀逸な一品であった。

これは内側ウェブ2枚が省略され、クランクピンに生ずる遠心力の合力の方角を睨む釣合錘が中央に位置し、そこに中央2気筒のクランクピンが嵌入されるというユニークな、

59) No. 10000について、管見の限りではO., S., Nock, *Great Locomotives of the LNER*. London, 1988. pp. 159~169が最も詳しい。

図 39 Gresley No. 10000 のクランク車軸



A., M., Bell, *Locomotives*. Vol. I, p. 80, Fig. 19, p. 116, Fig. 16.

Chapelon 辺りによっても言及されていない、3 ウェブ・7 要素型組立式クランク車軸である。

このようにすれば、4 ウェブ・9 要素型よりも両側ウェブの厚さが稼げるし、中央部の剛性も強化される。内側 2 気筒のシリンダ・ピッチは制限を余儀無くさせているように見えるが、試作機関車、No. 10000 は 450 psi (31.6 kg/cm²) という高圧のヤロー・ボイラを有する平均式 4 気筒複式機関車であったから、前方内側、第 1 先輪間に位置した高圧気筒の直径は小さく、シリンダ・ピッチも図示の通り 1 ft. 2 1/4 in. (362 mm) しか無かったからこれで充分であった⁶⁰⁾。

もし、より低圧の蒸気を用いる単式の平均式 4 気筒機関車にこのレイアウトのクランク車軸を用いるなら、例えば Duches 級のように 16 1/4 in. (412.75 mm) の気筒径に対して 1 ft. 10 in. (558.8 mm) 程度のシリンダ・ピッチが必要となる。かような場合なら、車軸軸受としてこがり軸受を採用するだけで 11 in. (279.4 mm) も確保されているジャーナル幅を大幅に、左右両側合計で 4 in. ほど詰めることが出来るし、ウェブ厚削減のマージンも若干は有った筈である。奥の手としてなら両高圧気筒の前後オフセットというワザも使えなくはない⁶¹⁾。

言うまでも無く、このクランク車軸の本質的特徴は中央に位置し、クランクウェブの機能を併せ持つユニークな形状の釣合錘にある。仮に、隣接する 2 つのクランク・ウェブの役割を代行するこの部品が円盤状^{ディスク}をなしていたとすれば、このレイアウトは後年の大形高速ディーゼル機関設計において広く採用されることになる手法の先取りとなっていたであろう。

もっとも、この種の大形高速ディーゼル機関用クランク軸において、クランク・ディスクはその外周面が主軸受をなす大径の円筒コロ軸受の内輪コロ転走面となっており、外輪を担持するトンネル型クランク・ケースと相俟って V 型機関における全長短縮と摩擦損失軽減、機関本

60) Nock, *ibid.*, p. 165 に拠れば、当初、高圧気筒の直径は 12 in. (304.8 mm) であったが、20 in. 径の低圧気筒との間の発生出力均等化を図るため、10 in. 径 (254 mm) に改造された。

61) これと似た実際の設計例については齋藤前掲『蒸気機関車 200 年史』206～207 頁、参照。

体剛性向上に寄与する要素として機能している。従って、中間軸受とは無縁の蒸気機関車用クランク車軸とは所詮、その発想からして似て非なる存在であるとは言えよう⁶²⁾。

内燃機関の世界に非なるが相似たアイデアの具象化物を求めれば、川崎航空機工業によって1966年に投入された2輪車、4サイクル並列2気筒624 cc, “W1”のクランク軸は正しくこれに該当するモノであった。“W1”の機関は4サイクル並列2気筒で、そのクランクピン位相は 360° ＝同位相であった。クランク軸全体の構成はジャーナルと釣合錘付きウェブ及びピンを一体鍛造した左右ピース、即ち“”と“”のピン端を中央釣合錘“”に穿たれた共通の孔に圧入する3要素組立式であった。

クランクピンが同位相であるという点を除けば、これはNo. 10000のクランク車軸に近い内容を有する設計である。そして、従来の一体鍛造品にカウンタウェイト付きフライホイール・リングを嵌め込む方式に代るこの組立式クランク軸の採用によってコネクティングロッド大端軸受の針状コロ軸受化が可能となり、日本製モーターサイクル機関高速化への一階梯が画されたのである⁶³⁾。

この2例を蒸気機関車の世界に引き寄せて観るに、流石に前者から派生する“釣合錘付きクランク・ディスク＋中間軸受”といった組合せは非現実的であるにせよ、その後発達した軸受やグリス、オイルシール関連の技術を以てすれば、後者に倣った“高剛性の組立式クランク車軸＋ころがり軸受化されたクランクピン軸受”といった程度の技術でNo. 10000方式のクランク車軸を超復活させる位のコトなら充分に達成可能な課題であろう。無論、この場合、主連棒太端は分割型で差支えない。

結びにかえて

ジャン・コクトーは“芸術、それは肉づけする科学である”などと^{のたま}宣ったそうだが(マルグリット・ロン／室淳介訳『ドビュシーとピアノ曲』音楽之友社、新版、2005年、109頁)、同じ命題は技術においてこそ真理であろう。

材料力学に回転曲げ試験なる手管がある。これは曲げによる材料の疲労特性を確かめる試験

62) 著名な例は Maybach や Daimler Benz (共に独), Saurer (瑞) である。前2者については cf. Stafen Zima, *Entwicklung Schnellaufendeer Hochleistungsmotoren in Friedrichshafen*. Düsseldorf, 1987, SS. 635～639, 665～667, Wilhelm Treue/Stafen Zima, *Hochleistungsmotoren Karl Maybach und sein Werk*. Düsseldorf, 1992, S. 74 Tafel 9, SS. 326～327, S. 367, Bild 3. 後者については大井上 博『高速ターゼル機関』山海堂, 1940年, 365～366頁, 参照。

なお, Maybach と Benz のクランク軸は工芸的な一体品で, Saurer のそれは円盤部とクランクピンとが一体成形された“”状ピースをボルトで接いで行く組立式。この点からすれば, Tatra (チェコ) は Saurer の亜流ということになる。Tatra とその血を引く中国のトラック用機関については拙著『開放中国のクルマたち』日本経済評論社, 1996年, 159～172, 197～201頁, 参照。

63) 葛森 樹『W1 FILE W1の技術文化史』山海堂, 1986年, 31, 138～141頁, 参照。

の一つで、普通の曲げ伸ばしを多数累積させるのが面倒なので試験片を片持ちに回転支持し、自由端に錘を付けることで試験片が曲りながら回転するよう仕向け、累積回転数で累積曲げ度数をカウントする便法である。

鉄道車両の車軸は実使用過程において終始、この回転曲げ試験にかけられているような部品であるから、その具体的設計は材料力学の教えに忠実でなければならない。問題は使用年月ではなく、その間の累積回転数である。本川達雄『ゾウの時間、ネズミの時間——サイズの物理学』（中公新書、1992年）に紹介されている動物の寿命と累積心拍数との相関は機械部品における疲労寿命と通底している。

“103系”通勤電車1号車（クハ103-1）が阪和線をゴロゴロと走り続けている傍らで、同じ頃造られた新幹線“0系”車両が引退を余儀無くさせられたのも、100年以上も前に造られた蒸気機関車が稼働しているのを尻目に、新型電車が早々とスクラップ化されるのも、第一義的にはそれらの設計上の物理的寿命の然らしむるところとである。

それにしても、その中空車軸が役買つてのコトか否かまでは与り知らぬが、近年においては“300系”新幹線電車の早期引退例に象徴される如く、恰も“ゾウをネズミに”近付けようとする短命化戦略が目に見え余る。“光あるうちに光の中を歩”もうとするその姿勢が結局のところ、闇＝低エネルギー社会の到来を早めずに措かぬことを知らぬかのように……。

然しながら、現代エネルギー浪費社会の歴史的特異性に鑑みれば、低エネルギー社会、即ち、投入可能な一次エネルギーが質的に劣化し、かつ量的にも不足を来すような時代の到来そのものは早晚、不可避と言って良い。

その暁には“ネズミをゾウに”、“ゾウを恐竜に”近付けるような技術のみが人類生き残りの杖となる。速度向上と社会的陳腐化のための無責任な競争に代って雑食性と長寿命の追求こそが人類生き残りのための“肉づけ作業”に際してのキーワードとなる。

熱効率という単純明快な対抗軸に即して蒸気機関車を語る場合、フランスで、とりわけChapelonによって追求された複式機関車に注目したくなる。遺憾ながら、サイクル中における作業物質の最高温度 T_1 が根本的に抑えられており、かつ、膨張比も小さなレシプロ蒸気機関を2段膨張にする程度の小細工を以てディーゼルに対抗する勝算など、4気筒であれ3気筒であれ原理的に有った筈も無く、今後も左様な理屈など成り立ちはしない。

しかし、“合理的熱機関”の合理性を支える周辺技術の体系はそれ自身、極度の、しかも歴史的には異例と形容されるべき発達を遂げた石油浪費文明の一隅においてのみ成立し得る存在である。浪費の報いとして現代文明の存立基盤自体が傾く時、原理的に約束された高い効率を骨肉化するための方途は果し無き道のりに、あるいは限り無き迷路に転化されずには済まない。しかし、そのような“負の迂回生産”は所詮、長続きし得ない。かくて、技術の生命誌の頁が繙かれ、輪廻転生の輪が再び回り始める。

唯一の例外たる終局的滅亡というその結末を除く限り、人類の将来が予め定められているか

のように信ずべき理由は見当たらない。従って、この結末に到るまでの各瞬間における逐次的問題解決の渦中で何が選好されるかについても、当面、“具体的状況とこれに対する考え方、ならびに当事者の能力次第”といった程度の理解で良い。そしてこの場合、重要なのはそれらの在り様次第で過去からの、技術史の基底に沈積した如何なる声に耳が傾けられるべきか、という点についての状況判断も異なって来る、ということである。

往時、イギリスの一部の、しかし少なからざる鉄道においては2スロー・クランク車軸の折損を恐れる余り4軸受方式を採用してまで内側2気筒の機関車が投入され続けた。実のところ、単純な車軸と言えどもその安全性は回転曲げ試験で得られる類の知見にランダム荷重下での疲労進行に係わる様々な実績・経験知が肉づけされることによってしか担保され得ないものであったから、奇怪な形状を有するクランク車軸の扱いが厄介なのは当然で、折れたり曲がったりは致し方無い現象であった。

それにも拘わらず、イギリスやドイツ、そして特にフランスの多くの鉄道においては単式・複式を問わず、2スロー・クランク車軸を有する4気筒蒸気機関車が永らく開発され、活躍し続けた。

Gresleyの単式3気筒機A4やChapelonリビルドの複式3気筒機No. 242. A1の威容を思うにつけ、4気筒/3ないし4ウェブ・クランク車軸なる発想が3気筒/1スロー・2ウェブ・クランク車軸という対案以上に合理的な選択であったのか否かについては根本的疑義を差し挟む余地無しとはしない。それでも、コトの当否とは別に、何が4気筒化の背景をなしたのかについては冷静に顧ておく必要はあろう。

2スロー・クランク車軸付き4気筒機関車は単式であれ複式であれ、高速走行時における振動抑制、従ってその際の走行安定性と乗り心地向上を本旨とする思想の究極的表現であった。

それは外側2気筒を基本としつつ機関車における高圧化と往復運動質量の相対的削減と軌道強化とを通じて大量・高速輸送を実現させたアメリカ蒸気鉄道の技術思想とは決定的に異なっていた。

それはまた、“定時運転こそが最大の使命”と囁ききつつ低い営業運転速度に終始し、機関車設計においてはシンプルを是とし、低規格の軌道に対する衝撃緩和を優先する余りドンツキを出るに任せたドイツ以上にGarbe的な、あまつさえ力行時においてすらブローを作用させ、熱エネルギーの不可逆的散逸に輪をかけねばならぬような機関車を開発し、これを平然と「名機」なりとして憚らなかったわが官営鉄道の技術思想とも天地ほど隔たっていた。

これら三者は鼎立する技術思想であったが、各々は論理必然的かつ超歴史的に排他的存在として在らねばならなかったワケではない。技術を巡る状況と基本的なスタンス次第でそれらは様々なニュアンスを以って並存せしめられ得た。時にはおかしい非技術的压力が作用したが、こういった点は将来に亘ってもまた同様であろう。そして、このような思想やノイズを含め、近未来の現役世代は技術の具体的な歴史から学ぶことが出来るし、学ばねばならなくなる。

本来、このような課題に資すべき技術論を標榜するのであれば、対象を直接的生産過程に即して捉えると共に、2スロー・クランク車軸その他の使用実績に係わる亀裂や折損の発生状況・頻度等の一次データに基づいた議論を徹底的に展開するのが筋である。

しかし、本稿では以下に「追記」で取上げられる事例のような具体的データの利用が不可能な状況の下、何が技術を変化・発展させたのかを基底に据え、その技術的合理性について結果から判断しようとする際、当面利用し易い技術情報を収集し整理するという純然たる予備作業の水準に終始せざるを得なかった。この安直性については読者の御諒解を乞う他ない。

追記

前稿「C53 型蒸気機関車試験」に対する補遺というその役回りからして緊要度の極めて高い技術情報を5点、以下に紹介しておく。第1は、3気筒機関車、満鉄ミカエの使用実績の一端を窺わせるデータであり、第2は同じくミカエのクランク車軸折損に関する生データ、第3はC53の合成弁装置における軸受摩耗についての証言、第4はC53の“出洩り”について、第5は気筒油の不足対策としての混成油使用についての追加情報である。

1. ミカエの使用実績から

ミカエの使用実績についての具体的記述、資料は乏しい。華北交通 北京鉄路局輸送處長であった樋口與内はその著書『機関車の構造及理論』（華北交通(株) 北京鉄路局, 1941年）の中で三気筒機関車、Gresley（古雷斯……但し“ジョイス”と誤記）式合成弁装置、ミカエ等々について断片的記述を残しているが、3気筒機関車の運用実績、稼働率に対する樋口の評価は概ね冷めたモノであった。曰く：

三気筒機車、雖在理論方面、具有上述之各種重大利益、但非修理合宜、保養得當、使用者不能收其实际効。且在事实上、因其構造複雜、修養兩事均難確臻完善、故通常採用三汽筒機車、難免有下列之結果。

A. 如欲常使此類三汽筒機車、保持完善狀態、其修理日數、必較二汽筒機車為、勢必增多予備機車兩數、方敷分配運用。故機車運用效率不免因此減低。

B. 倘欲維持機車使用效率、而不令修理日數過分增多、則必須多增人工、多增保養或修繕費用。

是以人多樂用二汽筒機車、而不樂此也（同上書, 125頁）。

日本語的中国語であるからか、日本人にも良く解る文章である。但し、前振りの「臻」は「到る」、B. の「倘」は「もし」の謂いである。

實際、一時期、ミカエのクランク車軸に折損が頻発し、検修陣は気の抜けぬ日々を送らされた。曰く：

クランク軸之易於折損是為美中之不足、其クランクピン嵌入釣合錘部分之折損尤多、惟以發見困難、應在中央汽筒主連棒拆卸檢修時、須特別注意該部之檢查（同上書, 387頁）。

この事実に樋口が言及している点については既に若干、触れておいたが、やはりここでも具体的情報は掲げられていない。このクランク車軸折損事故の内容については次項にて資料引用を試み

る。

ミカエの使用実績として筆者が見出し得た資料に吉林鐵道局機務處車輛科『昭和十二年四月 機關車動車破損故障調査』なるものが在る。これは1935年度から1936年10月末日までの間、管内各機務段（機關區）における機關車・動車の破損データを集計し、コメントを付加した資料集である。ミカエに関しては「煙管漏洩大」（事故、電氣溶接部亀裂←機關區点検粗漏）、「スロットルバルブボデー欠損」（早期発見により事故に至らず←古垢ガス溶接不良）、「ブローパイプ、ペーチコートパイプニ接触」（蒸氣不昇騰のため事故を惹起←工作不良）、左第二位動輪クランクピン剥離（材質不良）の4件が拾われている。以上は他の型式と比べれば僅少ではあるが、在籍両数の比が不明である上、期間も短く、ミカエの使用実績の大局的把握には役立たない。

他方、朝鮮總督府鐵道局の技術者、加藤公俊はその著書、『受験準備 朝満機關車技術問答集』（交友社、1938年）の248頁において、機關車的一般検査における標準回帰軒数を掲げている。彼に拠ればミカエのそれはミカイやミカフ、プレイ、プレニ、プレフなどと同様、90,000 kmであった。

これに対して、プレシ以降の“プレーリー（1C1）”は100,000 km、プレハとテホイ、テホニなどの“テンホイラー（2C）”群は120,000 km、アメ（アメリカン：2B）、テホコ、テホロは150,000 km、パシイ〜パシシは180,000 kmとなっていた（但し、新造機關車においてはこれらの標準値の二割増し）。

大局的には動輪径が大きく足の速い機關車ほど回帰距離が長く取られていたワケで、ミカド（1D1）機の中でミカエが少なくとも回帰距離の点において特別扱いされていた事実は無かったということになる。

加藤はまた、灰箱^{フンバ}風戸の開閉と石炭消費率との関係についての実測値を紹介し、給気運転中の開放と絶気運転中の閉塞の要を説いているが、そこで引用されているのはテホニとミカエについての測定値であった。これをほぼ原表通りに再録しておく。

加藤の本は運転技術者用の受験参考書であるため、初歩的用語解説は見られないが、「機1 km」とは「機關車1 km 当り石炭消費量」の謂いで、“機關車1 km 当り石炭消費量＝実際の石炭消費量×換算率÷機關車走行キロ”である。「換算率」とは使用炭重量を発熱量ベースで標準炭のそれに換算した値である。よって、「機關車1 km 当り石炭消費量」は機關車列車走行1 km 当りの標準炭消費量となり、当然、その値は牽引負荷の多寡によって変動する。

これに対して、「車輛100 km」とは「換算車輛100 km 当り石炭消費量」の謂いで、“換算車輛100 km 当り石炭消費量＝換算石炭消費量×100÷合計換算車輛走行キロ”である。換算石炭消費量とは上の機關車1 km 当り石炭消費量であるから、これを合計換算車輛走行キロで割ることにより、ある線路上における10 t＝1両とする換算車輛1両・1 km 走行当りの石炭消費量が得られ、更にそれを100倍することで換算車輛1両・100 km 当りの、ないし、より実用的にはある機關車で以って当該の機關車を含む総重量1000 tの列車をある線路上で1 km 走行させた場合の石炭消費量が示される。

走行抵抗の大きい機關車と貨客車とを一元的に10 t＝1両とする換算法によって現実には忠実に反映され得ないが、他に判り易い指標も無く、この換算車輛100 km 当り石炭消費量は現場では広く用いられていた（運転教育研究会〔奈良坂 盛・櫻井三郎・鶴見一二〕『最新 燃焼の理論と給油』交友社、1935年、101～103頁、参照）。

但し、これでは同一線区におけるよほど体系的な測定データでも無ければ型式間の比較は不可能

灰箱風戸の開閉状態とテホ、ミカニにおける石炭消費量（何れも3回の平均値）

型式	試験番号	順位	石炭消費量 kg		試験方法 (灰箱風戸の取扱)
			機 1 km	車輛 100 km	
テホニ	1	5	25.8	159.9	前後共密閉
	3	4	22.8	155.9	前ノミ開放
	3	3	23.8	153.2	後ノミ開放
	4	1	20.1	128.2	前後共開放
	5	2	20.1	130.9	前ノミ開（但給汽運転中ノミ）
	6	6	25.0	160.2	前ノミ開（但絶汽運転中ノミ）
ミカニ	1	3	36.0	139.5	前後共密閉
	2	4	35.2	136.4	前ノミ開放
	3	2	35.4	145.0	後ノミ開放
	4	1	34.0	131.8	前後共開放

加藤公俊『受験準備 朝満機関車技術問答集』（交友社、1938年）、307頁、より。

である。管見の範囲内においてはミカニやミカシのデータはおろか、満鉄における標準炭の発熱量さえ見出せておらず、勿論、D52 辺りの対応データも手に入っていない。

因って、これらとの比較は一切、不可能であり、加藤の掲げるデータを活かす途は閉ざされている。それでも、ミカニの運用に関する具体的データが余りにも乏しいため、せめて2C機との対照を示すこのデータを以って往時の一端を偲ぶ縁となれば、と考える。他日、突破口が開かれんことを念じつつ。

2. ミカニのクランク車軸折損事故並びにその対策について

ミカニの場合に限らず、クランク車軸の折損事故については公開された客観的資料が乏しく、“全て闇の中”と嘆かざるを得ぬ状況があった。しかし、幸いにも満鉄鉄道技術研究所調査役 井上愛仁の執筆になる貴重な資料、菊地 清 編輯『毀損せる鐵道車輛鋼製部分品の破面寫眞及其の説明 昭和14年5月』（南満洲鉄道株式会社 鉄道総局）、にその一端が紹介されているのを発見したので、以下、ひとまず私見を交えることなく該当箇所（132～143頁）を載録し（【 】内引用者補）、読者の便に供した後、その対策に関して若干のコメントを試みたい。

3. メーンクランクピン（第85圖乃至第87圖）

第85圖に示すクランクピンは三汽筒機関車の中央クランクピンでクランクアームの内側に於て折損した、直径 264 mm で相当大なる直径を有するものが運中行自然に折損したもので注目に値する折損事故と思はれる。

材質試験の結果炭素含有量0.55%内外あり、ワ⁷ ナヂユウム鋼で抗張力平均 78 kg/mm² で抗張力も相当高く材質上には之と云ふ缺陷を発見しなかつた、クランクピンが相当發熱し全周邊に深さ 20 mm 内外より 30 mm 内外に及ぶ熱罅裂（Heat Crack）が発生しピンの發熱を實證する以外折損の原因と認むべき有力なる何ものをも材質試験の結果だけでは発見する事が出来なかつた。

折損面より約 89 mm を隔てたる所にある油孔附近のピン表面は寫眞第85圖及第86圖に示す如く

熱罅裂発生し其の深 20 mm 乃至 32 mm に達し其の内部に軸受砲金が熔解充填し（写真にて白く線状に表はる）ピン表面が相当高温度に發熱により上昇せし事を物語つて居る、其の罅裂は第85圖 4 に示す推定圖の如くに全圓周に發生せりと想はれるが残部面積尚相当残存する爲め此の罅裂面より折損するに至らなかつた。然し若しクランクアーム内にて本ピンが折損しなかつたとするも此の熱罅裂は漸次進展し近き將來是より折損を見るに至つたであらう事は容易に想像せられる所である、此の油孔を通じて熱罅裂が発生した事は孔の周邊に多少共集中内力が存在し罅裂発生を容易ならしめた事が與つて力ある様にも思はれる。

熱罅裂の先端は發熱車軸（第3圖乃至第6圖参照【→省略】）の場合と異り樹枝状又は毛根状に分散しては居ないが、之は罅裂が未だ浅い爲で漸進し更に深部に達した暁は車軸同様の状態に進展するものとも想像せらる。即罅裂面の拡大によりピンの屈撓が容易となれば繰返内力の影響を受けて罅裂の先端が分散する傾向を帯びるものと思はれる、ピンの發熱により軸受砲金が熔解し罅裂内に充填する例は珍しい現象と考へ特に附添し参考に供した次第である。

4. 材質試験結果

毀損ピン類の材質試験結果は第8表に示す通である。

第 8 表 既存ピン類の材質試験結果総括表（第82図乃至第87図参照【第87図＝バシロは略】）

III

1	名 称		メインクランクピン	
2	参照す可き写真図		第 85 図 86 図	
3	報告番號及年月		昭和 7.4.30 第 8-B 號	
4	車輛の番號		機関車 第 1623 號	
5	事故發生又は發見年月日		昭和 6.7.4	
6	毀損の種類		疲労破損	
7	毀損起點の位置		クランクアーム内にて外周邊より發生	
8	毀損の主要原因		不明	
9	試片及試料採取位置		折損部附近	
10	抗張試験結果 (平均)	抗張力 kg/mm^2	78.0	
11		伸 % ($L=50 \text{ mm}$)	22	
12		断面収縮率 %	43.4	
13	衝撃値 M.kg/cm^2 (平均)		1.780	
14	硬度試験結果	ブリネル硬度	204—216	
15		ショア硬度	33—34	
16	化学試験結果 (平均)		外周部	中心部
		炭素 %	0.56	0.54
17		珪素 %	0.32	0.30
18		錳 %	0.73	0.72
19		燐 %	0.049	0.044
20		硫黄 %	0.030	0.031
21		その他の元素 %	ワ" ナヂューム 0.257	ワ" ナヂューム 0.272

備考 1. 抗張試験片は直径 4 mm 標點距離 50 mm のものを使用せり。

2. 衝撃値は 30 M. kg シャービー型試験機による衝撃屈曲破壊に要するエネルギーを示す。試片は 10 mm 角 V 型溝（溝の深 2 mm 角度 45°）を使用せり。

【引用者注：ミカニに関する部分のみを載録。硬度試験はその名の通りであるが、ブリネル硬度とは規定の鋼球圧子を規定の静的荷重で規定時間押し付け、除荷後の永久窪みの表面積で荷重を除した値。ショア硬度とは球状のダイヤモンドチップ有する規定のハンマーを 10 in. 落下させ、その撥ね上がり高さを測定して求めた値。衝撃試験とは試験片に瞬間的に強い衝撃を与え、材料の粘りを測定する試験で、シャルビー型衝撃試験機は特異な形状を有する回転ハンマーを持上げた後、解放して軸直下に拘束された試験片を切断させ、落下始めの位置と切断後の振り上がり位置との差から試験片切断に要したエネルギーを求め、これを切欠部原断面積で除した値】

第85圖 クランクアーム内にて折損し表面に熱破壊発生せる主働輪中央クランクピン (其の一)

寫 眞 説 明

1. 破 断 面



昭和6年7月4日機関車第1623号は第286列車を牽引し満鉄本線金州駅附近進行中左右動輪の反動激しく異常あるに気付き、低速運転を以て甘井埠頭に到着し点検せるに主働輪バランスウエートの一部とサイドロッドと接触し中央クランクピンに異常あるを認めたり。よつて大連鉄道工場に入場取調の結果、圖2毀損位置に示す如く中央クランクピンがクランクアーム(右側車輪に近き)内に於て折損せるを發見す。

(本ピンの材質結果及毀損原因の極大要は132頁にあり之と第8表Ⅳ欄とを参照せられ度し)

寫眞1はクランクピンの破断面にして、幾分湾曲し平面を爲さず、中空部の上方に位する細長き孔は油孔を示す。

2. 毀 損 位 置

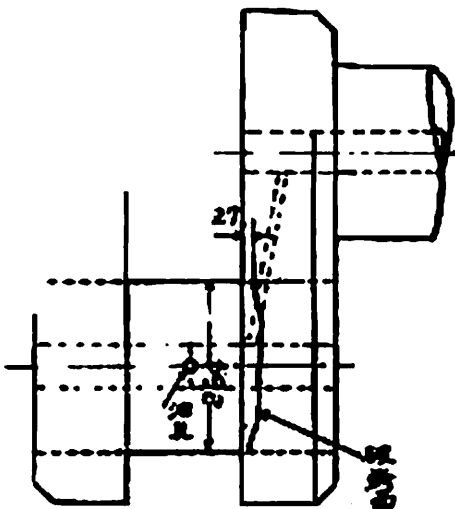


圖2は右側動輪側のクランクアーム内に於ける折損位置を示し外面よりの巨離一樣ならざるも或る部分は27 mmに達す。

【ここには描かれていないが、グリース孔の配置は左右対称である。ミカニのクランク車軸におけるグリース孔配置については、本図とはやや異なるが、「C53型蒸気機関車試験」の図6-9を参照されたい】

3. 破断面のマクロ写真



破断表面の一部破断はる所あり

写真3は破断面のマクロ写真にして不純物の偏析を示さず（マクロ写真の上下2箇所旋削不充分的爲破面を其の儘残せる部分あり）

4. 罅裂進展の程度

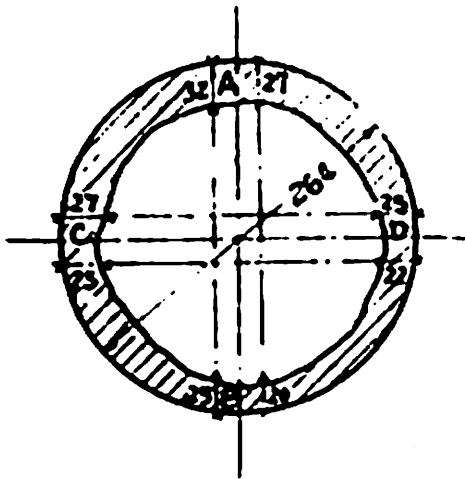


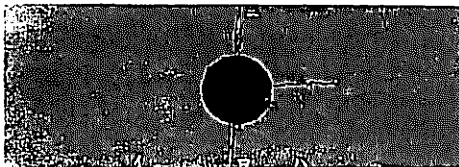
図4はクランクピンの外表面より中空部に向け直角に穿孔せられある油孔を過りて生ぜる横罅裂（全周に亘り発生）の深さを概測せる結果を図示せるもので、測定せる範囲に於ては最大 32 mm 最小 20 mm 内外に達す。

5. クランクピンの表面其の1 (4図のA部に該当す)



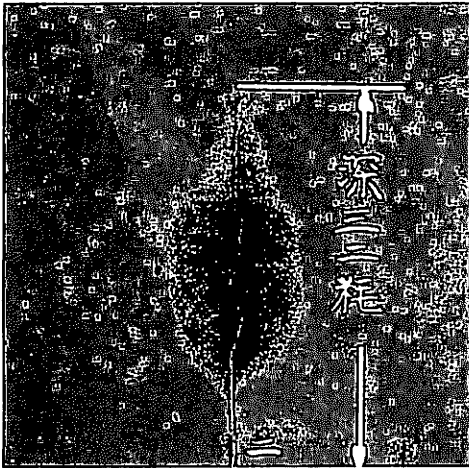
寫眞5はクランクピンの表面の一部にして肉眼にて観察すれば條痕の存在は認め得るも寫眞6に示すが如き無数の熱罅裂の存在を明瞭に認識する事困難なり。

6. クランクピン表面の熱罅裂其の1 (圖4のA部)



寫眞6は寫眞5の油孔附近の表面のマクロ寫眞にして圖中ニ及口の罅裂は横罅裂にして其の深さは夫々6-A, 及6-Bのピン縦断面のマクロ寫眞に示す如く夫々32mm及27mmに達し, 寫眞に白く表れ居るは軸受金(砲金)が罅裂内部に充填せられしものとす。

6-A 横罅裂の深度



6-B 横罅裂の深度

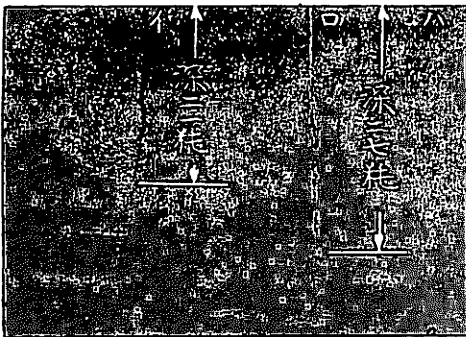


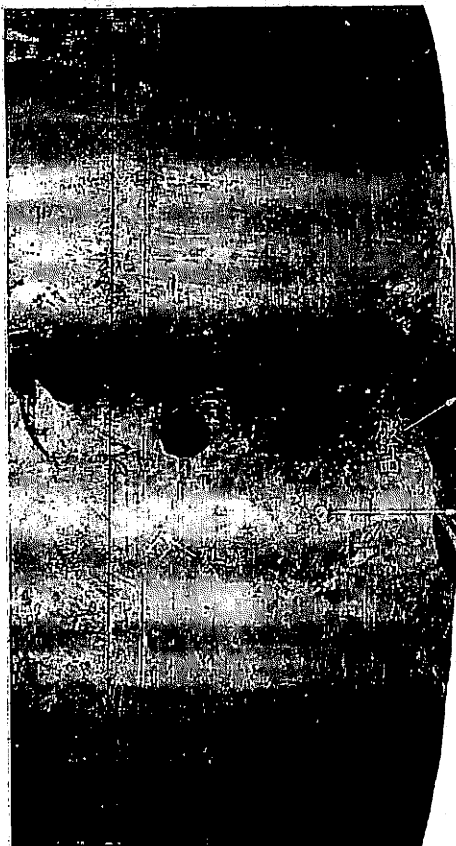
写真 6-A 及 6-B は共に写真 6 のピン表面に発生せる罅裂、イ、ロ、ハ及ニの深さを測定せんが爲ピンを縦断し其の面をマクロ写真に撮影せるものにして、表面の罅裂微小なるが如き罅裂イが深さ 21 mm あり、外見上相当差異ある罅裂ロと深さに於ては大差なく又罅裂ハは殆んど内部に進展し居らず外表面よりする罅裂深度の推測の至難にして誤り易きを實證する好資料と云ひ得る。

写真 6-A 及 6-B のピン縦断面のマクロ写真には印刷の關係にて發熱による組織の變化を表現し得ざるも最大深さ約 21 mm 位迄マクロ組織に變異を來し其の内方と趣を異にす而して其の變質の深さはピンの長さの中央（油孔附近）最大にしてクランクアームに近づくに従ひ漸次減少す上記の如く罅裂ロ及びニは夫々深さ 27 mm 及 32 mm に達するを以てマクロ組織の變化せる領域を通り越し更に深く進展せる事を知る。

写真 6 及 6-A、6-B 等よりして本クランクピンは相当發熱し其の表面に熱罅裂を生じ又油孔を過る横罅裂は圖 4 に示す如く全円周に生成進展しありし事更に第 96 【86】圖の横罅裂写真より確認する事を得、故に本ピンはよしクランクアーム内に折損せざりしと仮定するも早晚油孔を通り全周に生成進展せし横罅裂の爲折損す可き運命にあつたものと思惟せらる。

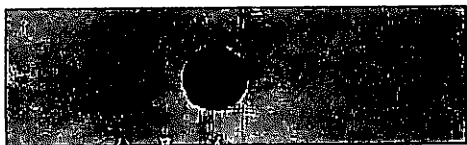
第86図 クランクアーム内にて折損し表面に熱罅裂発生せる主働輪中央クランクピン（其のニ）

7. ピン表面其の2（4圖のB部）



寫眞7は第85圖寫眞5に示す面と直径上正反対側の表面を撮影せるものにして横罅裂（イ及ニにて其の位置を示す）及條痕（ロ及ハにて其の存在を明にす）の存在並に表面の損傷状態を示す。

8. ピン表面の熱罅裂其の2（圖4のB部）



寫眞8は写真7の油孔附近の表面のマクロ寫眞にして其の表面の横罅裂イ及ニは夫々寫眞8-B及8-Aに示す如く其の深さ25mm及20mmに達す。罅裂イが寫眞に白く表はれ居るは云う迄もなく軸受金（砲金）が罅裂内に充填せる爲である。

8-A 横罅裂の深さ

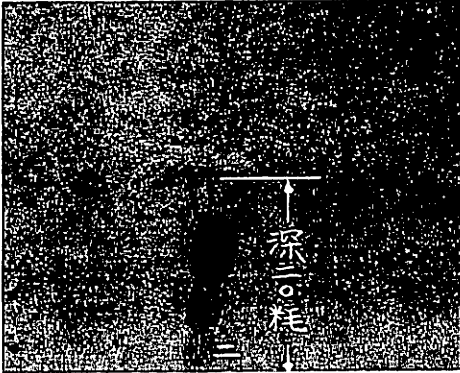
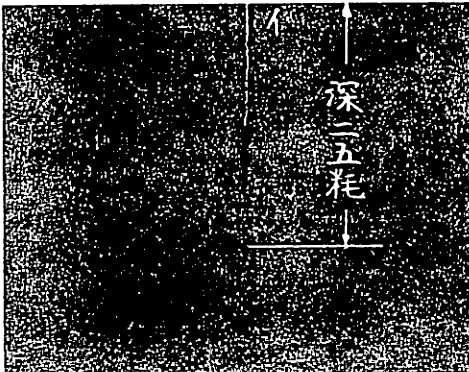
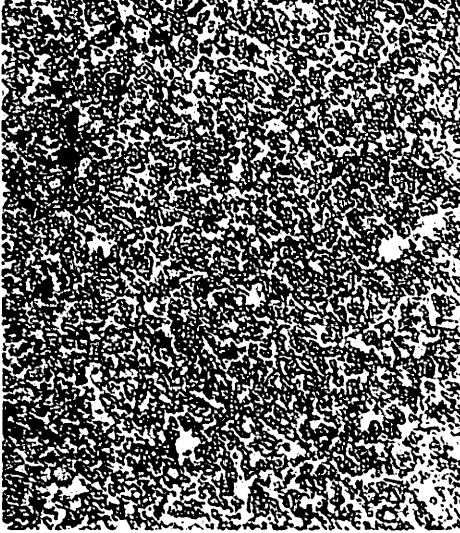


写真 8-A 及 8-B は共に写真 8 のピン表面の横罅裂の深度及條痕の深さを測定せんが爲ピンを縦断し其の面をマクロ写真に撮影せしものにして写真 7 及 8 に表はる、條痕口及ハは單に表面疵にして少しも内方に進展せるものにあらざる事を實證し、横罅裂の方は上記の如く深さ 20 mm 又は 25 mm に達する事を示して居る。

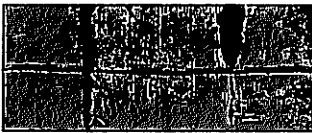
8-B 横罅裂の深さ



9. 顕微鏡組織 (100倍)



寫眞9は寫眞8の油孔附近の表面組織にして結晶粒頗る微細なり、此の部分は發熱の爲表面より深約20mm位迄マクロ組織に變化を來せる範囲内の極表面なれば當然發熱により顯微鏡組織にも影響ありしものと想像せらる、之を熱影響を受けざる内方中空部より採取せる試料の組織寫眞13と對比すれば夫より結晶粒稍微細にして、是或は發熱の影響かと考へらる、本ピンはワナヂウムを含有するを以て微細組織を呈するを當然とす。

10. ピン表面の熱皸裂其の3
(圖4のC部)

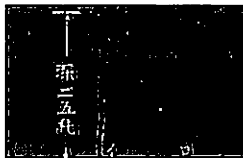
10-A 横皸裂の深さ



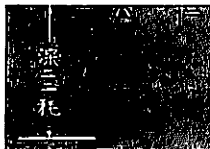
10-B 横皸裂の深さ

11. ピン表面の熱皸裂其の4
(圖4のD部)

11-A 横皸裂の深さ

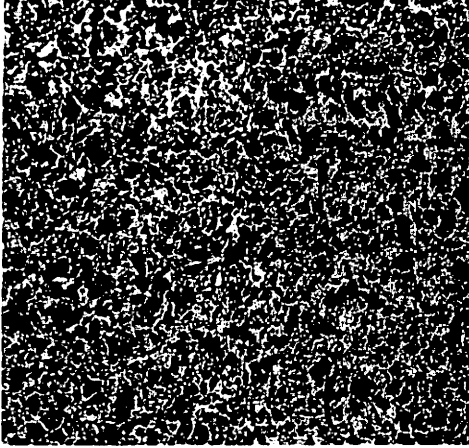


11-B 横皸裂の深さ



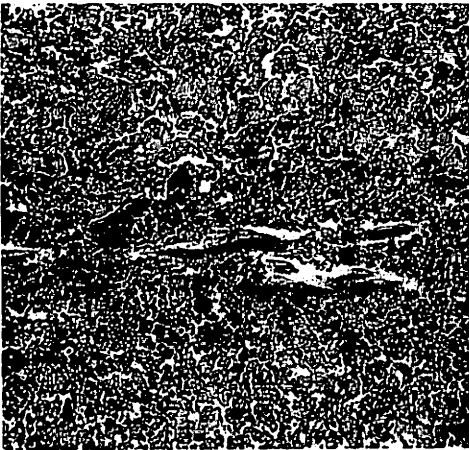
第85圖Bの圖4に於けるA及B部表面の熱皸裂の状態は夫々寫眞6及8に示したが、夫等と直角の位置にあるC及D部表面の状況は夫々寫眞10及11に示す、而して該部に於ける横皸裂の深さは夫々10-A、10-B及11-A、11-B示にす、此等よりして全周囲に亘る横皸裂の存在並に其の程度の大體を窺知する事を得。

12. 顕微鏡組織 (100倍)



第85図写真1の破断面油孔上邊より採取せる試料の組織。

13. 顕微鏡組織 (100倍)



第85図写真1の破断面の中空部周囲の組織にして多少不純物の介在せる所を撮影す、發熱により組織に變異を來さざる内方は概ね之と同大の結晶粒を有す。

技術史的総括

資料引用は以上である。結局のところ、ミカエにおけるクランク車軸折損の原因は材質不良ではなかった。材料は流石に優良なものであった。

同書、「Ⅷ 結言」には「本書に於て見受けたものは主として熱罅裂であつて車軸及クランクピンに發生せるものは興味ある問題を提供するものと思ふ」とあり(177頁)、熱罅裂(Thermal crackないし Heat crack)については「鋼材の表面に繰返し加熱、又は冷却を與ふる時は罅裂を發生する、之を熱罅裂と云ふ」(附録4頁)、とした上、「クランクピンの表面に此の種罅裂が發生せる實例を示して置いた」(同5頁)とまで念押しされている。

實際、ミカエ1623号機は“中ピク”が焼けるような走行状態に度々陥っていた。クランクピン中央部の半径方向グリース孔は熱応力の集中する箇所に明けられた切り欠きに他ならず、これを起点

として見事な円周方向亀裂が生成していた。

そもそもミカエのクランク車軸のグリースラインにおいてはグリースを圧送する機構など存在しなかったから、給脂の間隔が開き過ぎたり、グリースラインに一旦、空気を入れたりしてしまえば潤滑不良に陥ることは必定であった。従って、1623号機におけるような潤滑不良状況はどのミカエにおいても生じ得た問題と言える。

しかし、それはそれとして、また、同書が熱亀裂の問題にばかりデータと論を傾注しているのとは裏腹に、現車においてはクランクピンのウェブ圧入部、比較的浅い箇所からの亀裂成長がこの熱亀裂の進行に勝っており、これによって遂に折損に到るという事実経過が辿られている。然るに、この点については同書においてほとんど何一つ積極的に論じられておらず、原因探求らしきモノはカケラも見られない。つまり、折れるには折れたがその原因は判らぬ。然しながら……、という論法になっているワケである。

結局、当事者達は折損の原因探求を放擲してしまったのである。しかし、それも止む無きことであった。この1623号機におけるクランクピン折損の原因究明に光を当ててくれるのは全然異なる、とは言え、他ならぬ鉄道車両において軸の孔への圧入によって成立するところの重要部品、輪軸に生じた損傷、とりわけ車軸折損事故に係わる住友金属工業や鉄道技術研究所における戦後の研究であったからである。

車輪（輪心）に圧入される車軸のやや太くなった、車軸全体を通じて最も太い部位を輪座と称する。実は、この部位に係わる車軸の折損や亀裂損傷が戦後、相当な頻度で発生した。

車軸は車重を受け、全体として上に凸に撓みながら回転する。この時、車軸の一部である輪座も僅かに撓みながら回転するが、相手の輪心ボスは軸と同じようには撓んでくれない。この際、軸の伸び側においては引張による接触面圧の低下が、圧縮側においてはその上昇が生起することになり、伸び側端部付近においてはこの接触面圧の低下に乗じて輪座とボス内面との間の一体性が崩れ、微小な相対滑りが発生しフレッチング損傷が惹起される⁶⁴⁾。

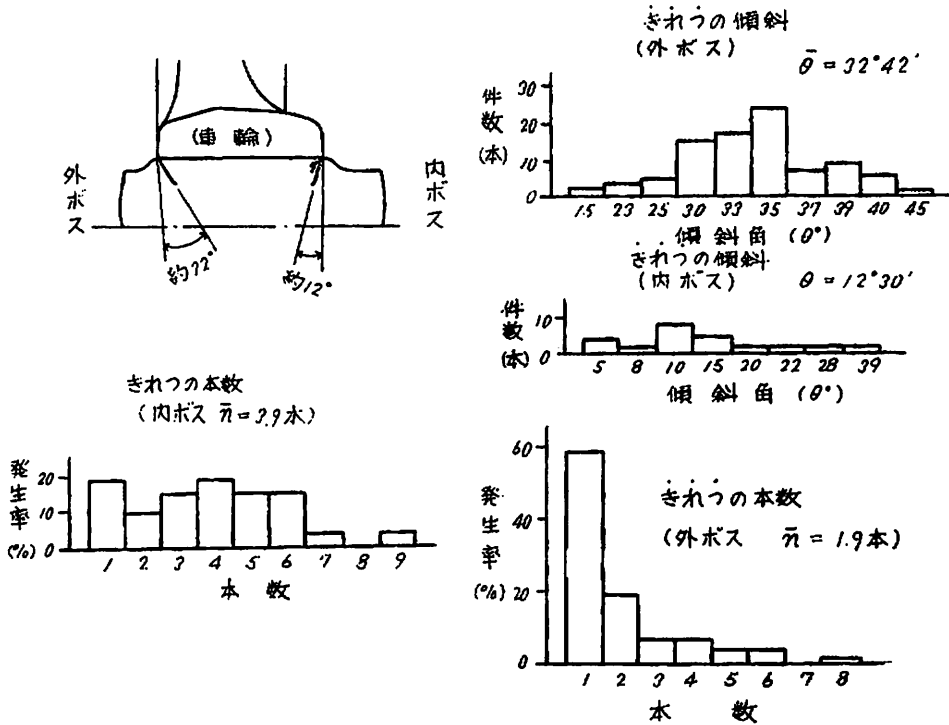
勿論、軸は回転するものであるから伸びによる微小な滑りは輪座の全周に亘って発生する。そして摺動面の双方がフレッチング損傷を被ることになる。フレッチング損傷により輪座表面が粗面化すれば、その微小凹部が応力集中点となり、これを起点とする亀裂が輪座部に発生、究極においては疲労破壊が招来されるに到る⁶⁵⁾。

実際の亀裂発生状況は図に模式化されているように、軸箱側に位置する外ボス部と反対側の内ボス部とで相当異なっている。

64) フレッチングとは接触する2固体間に100 μm 以下の振幅を有する微小な接線方向振動が与えられた時に生ずる表面損傷の総称で、金属同士の直接接触の場合、2固体相互間に原子レベルの「凝着」と剪断が繰返されることによって微細な摩耗粉が生成され、接触面の荒れを招き、嵌合の弛緩や部材の疲労強度低下に到る。日本トライボロジー学会『トライボロジーハンドブック』養賢堂、358～360、787～788頁、参照。

65) 広重 巖『輪軸』交友社、1971年、353～360頁、中村 宏『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、53～57頁、高速車両用輪軸研究委員会『鉄道輪軸』丸善ブラネット、2008年、111、112～129頁、参照。疲労に関する専門工学書、例えば中村 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、233～243頁、においても同じ問題が理論的に扱われている。

図補-1 輪座に発生する亀裂の特徴



広重 巖『輪軸』交友社、1971年、359頁、第8.37図（原出典については当該部への注記を参照）。

即ち、外ボス部においては車輪に働く横圧によるその倒れが相対滑りをキャンセルする方向に作用するのに対して、内ボス側においてはこの倒れが相対滑りを加重する方向に作用する。この差により、等しく上に凸に撓んだ軸上に発生するとは言え、外ボス附近の亀裂は切欠き効果に起因する損傷の、内ボス附近のそれはフレッチング損傷に起因する亀裂の様相を色濃く呈し、前者が軸芯に対して平均約 58°の傾斜を有するの、後者は軸芯に対して同 78°と、ヨリ直角に近い初期進行角を有し、かつ、実体として亀裂の本数もフレッチングの影響甚だしい内ボス側の方が平均で 3.9 本：1.9 本と 2 倍以上多いという傾向が示されている。

ミカニの中央クランクピンにおいてウェブ圧入部の比較的浅い所から奥を目指すかのように生成し、遂に湾曲面を描いてその破断に到らしめた亀裂は正にこの“輪座内ボス部に特徴的な、フレッチング損傷に端を発する亀裂と同根のもの”としてのみ理解可能な現象である。

かようなモノとして、それはまた、あらゆるミカニに共有される、クランク車軸折損事故の続発性を裏付ける機序として位置づけられ得る現象である。

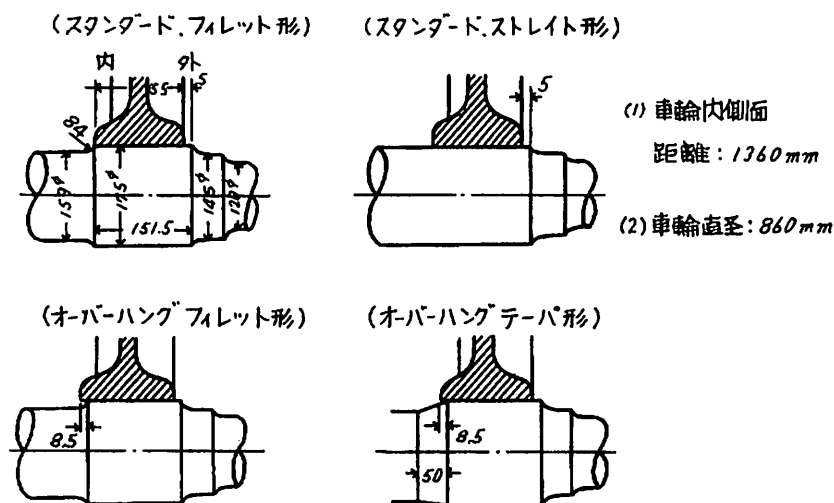
他方、その後、ミカニが示した健全振りを思うにつけ、この点について何等かの対策が採られ、かつ奏効したものと推理して間違いないのであろうが、その対策の中身たるや、現時点においては全くのブラックボックスと言わざるを得ない。

では、対照事例たる輪軸の嵌合部においては事故防止のために如何なる措置が講じられているの

であろうか？

文献はこれについて、嵌合部形状の最適化という策が考案され、成功したという事実を教えてくれる。即ち、鉄道技研 中村 宏らの実大試験装置を用いた実験（1967年頃）により、同一の曲げ応力が作用した場合でも相対滑りの振幅は圧入部の形状によって異なり、オーバーハング型がもっとも小さく、スタンダード・フィレット、スタンダード・ストレイトの順に振幅は増大する事実が究明された。この実験結果を承け、実車においても順次、オーバーハング・フィレット型への転換が推進され、新幹線電車においては1974年にはオーバーハング化が実施された⁶⁶⁾。

図補-2 車軸嵌合部の仕様



広重同上書、357頁、第8.35図。

高速車両用輪軸研究委員会前掲書、114頁、図6.4.6もほぼ同じ。

ミカエのクランク車軸における対策については現時点においては一切不明である。また、圧入部の接触面圧が高ければフレッチング損傷が防止されるという単純な理屈が成り立つワケでもない。しかし、一先ず、軸方向に漸減する厚味を有する輪心ボスのように端部の接触面圧の低くなる箇所を避け、内ボス部の接触面圧向上を実現するオーバーハング・フィレット化が成功した事実は踏まえられるべきであろう。

無論、クランクウェブのような厚さ一定でピン側周縁部の肩が面取りされているだけの部材においてクランクピンに対する拘束力の軸方向変化は大した問題にならないから、オーバーハング方式のような改良を施しても同様の効能は発揮されない。しかも、熱亀裂の発生状況が上記の通りであったとすれば、仮にそのような手口が着想されたとしても、更にまた潤滑法に改善が見られたとしても、やはりピンの軸径を落すのは危険である。逆に、ピン孔を拡径するとすればウェブ側の強度不足を招きかねない。

しかし、輪軸改良成功の本質は面圧向上によるフレッチング摩耗抑止と疲労強度低下阻止にあつ

66) 高速車両用輪軸研究委員会前掲書、111頁、表6.3.1、113～114頁、参照。

た。同じことを実現するために当該部分の締め代を大きく設定し直し、嵌合を強化すると共に、熱亀裂対策としてピン外周面におけるグリースライン開口部の縁に丸味付けを施す程度の改善策なら容易に実行し得た筈である。その後のミカエの健在ぶりを思えば、恐らくミカエにおいてはこのテの対策が奏効したものと推定される次第である⁶⁷⁾。

なお、クランクピン拘束力を重視するならば、ウェブ内のグリースラインは傾斜を持たせることなく、半径方向に穿孔されるべきであったと考えられる。

3. “伏せシヨベル”について

連載 (3/4) 第七章 (1)

“伏せシヨベル”の考案時期については不明であるが、本山邦久に拠ればそれは永らく放擲されていた後、再発見されたもので、その功労者は本山自身であつたらしい。

……従来九州一体に行はれて居つた火室後方の投炭に対する引シヨベルと、シヨベルの刃先きを上げること、を止め、全然顧みられなかつた伏せシヨベルの徹底的練習と実用とに全力を注ぐ外、局員自ら陣頭に立つて機関車審査、伏せシヨベル投炭法の審査等、寧日なき迄に現場員と堅く手を握り合つて、実に血の出る様な努力をしたのである。其の実情は知る人ぞ知る。……斯くして生んだのが【昭和】四、五年の石炭成績であつた（門司鉄道局機関車課長時代 [1929・4～1931・6] についての回想。【見たま、聞いたま、】交友社、1939年、257頁。【 】内引用者）。

……私が名鉄の現場を観察した時、門鉄で実施した前期の実行項目は其儘取り来つて名鉄に用ふることの妥当なるを知つた。……

【伏せシヨベルの教養】完全燃焼は石炭の撒布。又強通風に対する投炭に速度を付け速に火床上に落す。此の二つの目的を果す為には伏せシヨベルを使用するに在る。處が伏せシヨベルの熟達は相当難事であるのと、非常に労力を要する等の点から、易きに付くの習ひで何時とはなしに忘れられ、当時新しい機関助士中には伏せシヨベルの言葉さへ知らなかつたものが相当あつた。其處で模型火室投炭練習を充分にする事、指導する者即ち指導員自身達人となること等大に全員の熟達に努めた（名古屋鉄道局機関車課長時代 [1931・7～1934・6] についての回想。同上巻、260～261頁）。

67) この推定はあくまでもその後におけるミカエの健在ぶりに根差すものである。他方には“コーナーR”の無視ないし不足が往時の機械設計に通有であつたという現実がある。

第1次大戦中の製造になるイスパノ・スイザ航空発動機の吸排気弁桿上部には弁隙間調節用パネ座を嵌入するためのスプラインが切られていた。その溝底の角（入り隅）部はR無しであつたため短時間の内に疲労破壊に到つた。それにも拘わらず、対策は打たれず仕舞いに終つた（Bill Gunston・川村忠男訳『航空ピストンエンジン——そのメカニズムと進化』グランプリ出版、1998年、163頁）。

日本海軍が水上艦艇用無気噴射複動ディーゼル機関の開発にかつた1930年代、燃料噴射ポンプ各角隅部への亀裂発生に見舞われ、一律1.0 mmの丸味付けが奨励された。しかし、戦後の常識に照らせば10%丸味付けが妥当であつたという（生産技術協会『旧海軍技術資料 第1編 (2)第4章』1970年、218頁）。

日本海軍における艦艇用無気噴射ディーゼル機関設計の概要については生産技術協会『内燃機関設計計算書』1957年、参照。水上艦艇用2サイクル複動機関「11号機械」については72～160頁。

4. C53 における Alco 3 式動力逆転機の採用初期の状況について

連載 (3/4) 第Ⅶ章 (1)

動力逆転機は欧米では広く普及していたが、C52 を踏襲して C53 にも Alco 式動力逆転機が採用されたのは 3 気筒であるが故に逆転機の操作が重いという理由からであった。

Alco 式動力逆転機はエア・ブレーキの技術を基礎とするもので、ピストンの両面に作用する空気の圧力を変化ないし均衡せしめ、その位置を変更ないし保持せしめる機構であり、片側の空気を抜き、反対側に応分の空気を充填することで作動は完結する。因みに、基本的には現在の油圧式パワーステアリングも似たようなカラクリである。

然しながら、鉄道省における Alco 式動力逆転機の定着は新技術の通例として茨の道であったようである。本山邦久は C53 における動力逆転機導入期に関して、

……蒸気又は圧縮空気が漏れる時は、ピストン前後に働き居る圧力の釣合を失ひ、爲にピストンが働き、自然にカットオフに変化を與ふることゝなる。彼の C53 が始めて配置された頃運転中 5 % 以上もカットオフが自然伸縮して停止する處を知らずと云ふ状態となつて、パハーレバースアーは全然用ゆべきに非ず迄云はれたものである。但し其れ以後研究の結果、柔弱であつたリーチ・ロッドを強固にして、撓みや遊間を出来得る限り僅かにし尚弁の重りが内外等分になつて居つたものを給気重りを零、吐出重りを一耗としたことにより、従来の如き自然にカット、オフが変化するやうなことが無くなつた。

…C53 の如く、圧縮空気と蒸気との何れをも働かしむることが出来得る場合、ピストン詰輪は其の何れにも耐え得るものでなくてはならない、C53 の夫れは皮を用ひてある爲め、之れに蒸気を働かせれば皮を硬化変質せしめて、大失敗を招いたこともある（『機関車用 弁及弁装置 1931 年増補改版』161 頁）。

と述べている。

Alco 式動力逆転機においてはピストンの漏洩のためその位置に狂いを生ずるとエア・ブレーキのシリンダにおけると同様の補正機構が発動するよう仕組まれていたが、漏洩量が過大になるとハンチングが発生して振動が収束しなかったようである。

ともあれ、*Locomotive Cyclopedia of American Practice 7th. ed.—1925. pp. 512~513, ditto 9th. ed.—1930. pp. 622~623* や『機関車の構造と理論』各版、『最新機関車名称辞典』等の文献を当たっても動力逆転機の作業物質としては圧縮空気のみが記述されている。この事実を鑑みれば、圧縮空気でも蒸気でも作動可能とする本山の記述は最初期の変則的運用法についての貴重な証言なのかも知れない。

因みに、エア・ブレーキのように圧縮空気作動のみとすれば同工の革製のパッキングとエキスパンダの組合せで十分実用に耐えたが、このタイプの動力逆転機は鉄道省ではその後 D51 や C57、C59、入換用機関車等に部分採用されるに止まり、手動式に改造された個体も多かった。

5. 気筒油の不足対策としての混成油使用について

連載 (4/4) 第Ⅸ章 (2)

飽和蒸気には水滴が含まれるため多少の自己潤滑性が備わっている。これに対して過熱蒸気は乾

き度が高く自己潤滑性に乏しい。温度が相対的に高いのと自己潤滑性の欠如故に過熱式機関車の気筒油にはより引火点と高温粘度の高い潤滑油が用いられるべきところであるが、本山邦久に拠れば鉄道省では漸く1925ないし'27年頃から気筒油として過熱油が用いられるようになるというテイタラクであった。それ以前は過熱式機関車においても引火点230℃程度の飽和用気筒油が用いられていた。鉄道省の過熱蒸気用気筒油の仕様は引火点290℃であった。もっとも、油種を替えてもそれ程顕著な効能は現れなかったようである。

然しながら、内燃機関の発達と共に蒸気機関車用に高規格の気筒油を回すことが世界的に難しくなり、1910年頃のドイツで先鞭がつけられた乳化法（気筒油に水と薬品、石灰水等を混ぜて乳化させ、“水増し”する油脂節約法）が欧米一般でも鉄道省でも復活した。

この外、気筒油への植物油、獣脂等の添加といった節約策も広く行われたが、鉄道省においては主連棒太端に鉋油に種油を添加した混成油が試みられたのみで気筒油としての混成油の使用は実施されなかった（『機関車用 弁及弁装置 1931年増補改版』36, 353, 355～364, 370～371頁、参照）。

満鉄における気筒油としての植物系混成油試用はかなり例外的な策で、乳化法等に対する研究能力の欠如の証左と見られる。鉄道省でも結局不首尾に終わった乳化油導入の顛末については今村一郎『機関車と共に』ヘッドライト社、1962年、174～177頁、参照。

6. C53の合成弁装置におけるころがり軸受のガタと耐久力について

連載（4/4）第X章（1）

この点につき、本山邦久は、

連結部の全部は球状軸承装置で、ピン・ジョイントの摩擦を最も少なからしめようとしたのであるが、内側玉軸受の内面【内輪軌道面】及外側球軸受の外表面【外輪軌道面】又は球及球に接する部分等に可成の摩擦を生じ、使用開始後二ケ年を出ずして其の摩擦は、中央弁に数倍以上の遊間を與へ、バルブ・セツティングの変調を来すに至つた。（各部の球状軸受の遊間は新製当時既に中央弁にて一耗位の徒動を與へる）

と述べている（『機関車用 弁及弁装置 1931年増補改版』214頁。【 】内引用者）。

これは鉄道省関係者としての貴重な証言である。当然のことながら、C53に関する記述はこの増補改版にのみ見られる

7. C53の“出波り”について

連載（4/4）第X章（2）

この点についても本山邦久は3気筒機関車の特徴を一般的に論じた条項の中で、

二気筒に多く見る處のクランクが死点の位置で停車して牽き出し困難であるに反し、クランクの角度が120度を保つて居るから如何なる位置に停車するとも牽き出しの困難の場合が少ない。但し、二気筒に比し、気筒直径が小さいから力が不足し事實は出波ることが多い。

と述べている（『機関車用 弁及弁装置 1931年増補改版』208頁。傍点引用者）。

この記述からもC53における公知の“金縛り”事故2件は氷山の一角、と考えられるワケである⁶⁸⁾。

68) 本多邦康氏所蔵の旧版との照合に拠れば、この「但し」以下は増補改版における追加挿入である。

付記

本稿を含む「C53 型蒸気機関車試論」は後刻、一応の完成稿「C53 型蒸気機関車試論 [訂正版]」としてネット上にアップされる予定である。