

Title	三菱内燃機・三菱航空機の V 及び W 型ガソリン航空発動機(6/6)：補論：90° V8 型発動機用クランク軸の進化
Author	坂上 茂樹
Citation	経済学雑誌, 114 巻 1 号, p.22-42.
Issue Date	2013-06
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

三菱内燃機・三菱航空機の V 及び W 型ガソリン航空発動機 ($\frac{6}{6}$)

——補論：90° V8 型発動機用クランク軸の進化——

坂 上 茂 樹

目 次

はじめに……富塚清の見解

1. わが国における発動機振動解析の系譜

1) 田中敬吉による解析……180° 対称クランク

2) 中西不二夫の論文……90° 非対称クランクの提唱

2. 海外における所説

1) A., Sharp (1907) 及び A., W., Judge (1921) の所説

2) C., F., Taylor (1971) の伝える挿話

3. 自動車工業における展開

1) Cadillac V8 機関に採用された 90° 非対称クランクと動釣合技術の進化

2) Ford V8 機関に採用された 90° 非対称クランクと鋳鋼生産技術の進化

3) 戦後日本における 90° 非対称クランク採用の嚆矢, いすゞ DA80 型機関

むすびにかえて

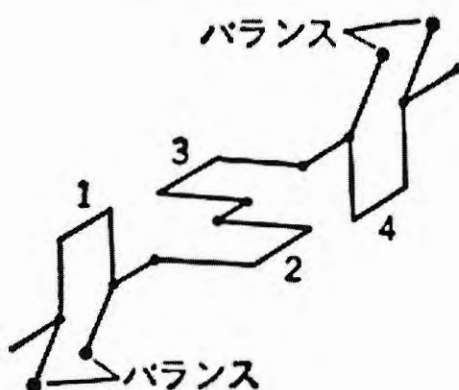
はじめに……富塚清の見解

V 型 8 気筒機関の起源について、樋口健治は“1903 年, クリスチー”との説を唱えている。この分野でクリスチーと言え、高速戦車の祖, John Walter Christie (米) であろう¹⁾。しかし、その使途, 出典については不記載であり、この点に係わる筆者独自のクロスチェックも調査も出来ていない。クリスチーは後年、彼が開発した戦車の機関として Liberty の 45° V 型 12 気筒や Hispano-Suiza の 60° V 型 12 気筒を用いているから、自前の発動機の製造は事業的には成功しなかったであろう。直列 6 気筒機関の V 型 12 気筒化という形で開発された Liberty 系列には振動理論からすれば誠に不都合な 45° V 型 8 気筒発動機という型式も加えられていた。しかし、こちらは当然のことながら相対的にマイナーな存在に終わった²⁾。

1) 樋口健治『自動車技術史の事典』朝倉書店, 1996 年, 49 頁, 参照。

2) Liberty について簡単に拙稿「リバティーと第 1 次世界大戦期の水冷航空発動機」(上, 中, 下) を

図補-1 富塚の図3.82



『内燃機関の歴史』第6版, 119頁より。

とまれ、1906年のAntoinette(仏)以来、航空分野においてV型8気筒発動機は、試製航空発動機の技術を論じた旧稿でも触れ本編においても縷々述べた通り、一世を風靡し、自動車機関としても独自の発展を遂げた。

V型8気筒の中でもとりわけ重要な地位を占めたのが力学的に有利なバンク角 90° のそれであった。そして、この 90° V型8気筒機関における最大の進化はクランク軸設計手法並びに製造技術の革新によってもたらされた。 90° V型8気筒発動機用クランク軸の進化について富塚清(1893~1988)は次のような見解を開陳している。

4気筒の常例のクランク(角距 180° のもの)を使った場合は、2次慣性力の和が横方向に出る。これで激しい振動を起こすが、第1次世界大戦中の航空発動機(たとえばイスパノ、カーチス…)は全部無方策でひどい振動のまま使った。おそらくは取付部の弾性によって救われていたのだろう。アメリカの高級車キャデラックなどもそのまま。しかし1930年ごろになり、これに改良の手がのばされた。先駆者の1人は日本の東大航研の中西不二夫博士である。これでは第3.82図の如くするのである。これで爆発は支障なし。不平衡力はクランクについた一次偶力となるので、クランクに釣り合い重りを附して、うまく相殺ができるのである。日本でこれが発表されると、外国でも、ほぼ言い合わせたようにこの方式を採用した。日本のにならったのでなく、どうやら同時に気づいたもののようにわれわれは理解している(『内燃機関の歴史』第6版, 三栄書房, 1993年, 119~120頁)。

因みに、1918年の夏に開発された 45° V8 = Liberty 8のクランク軸も4気筒や当時の 90° V8

▽『LEMA』No. 485, 486, 487, 2006~'07, 参照。世紀末この方、アメリカでは往事の航空発動機を個別型式毎にまとめた重量級の技術史的モノグラフ刊行が盛んとなっているが、2009年にはRobert J., Neal, *A Technical & Operational History of the Liberty Engine*. なる大版616頁の名著が出版された。Liberty 8に係わる記述についてはcf. pp. 157~165, 200~201(写真), 587~589(写真)。

用と同じ180°対称クランクであった。

90°V型8気筒発動機における平衡とクランク軸について語る富塚の論は1969年以来、同書各版で繰返され、その没後、索引を充実して刊行された第6版にも同様に再掲されている。これはとりもなおさず、富塚並びにその周辺が当該箇所の記述について特段の訂正の要を認めなかったからであろう。

ところが、これが実は間違いだらけなのである。上の文中、「しかし」以降の主張は歴史的 facts に齟齬していること夥しい。「1930年ごろ」というのも誤りなら、「先駆者の1人」が中西不二夫だというのも誤り、「同時に気づいた」というのも誤りである。これらはどう「理解」しようとヒトの勝手、に属するような事柄ではない。

本補論は富塚の事実認識における錯誤を正すと共に、航空発動機技術と自動車機関技術との体系的分離に係わる客観的理解の深化を課題としている。

1. わが国における発動機振動解析の系譜

1) 田中敬吉による解析……180°対称クランク

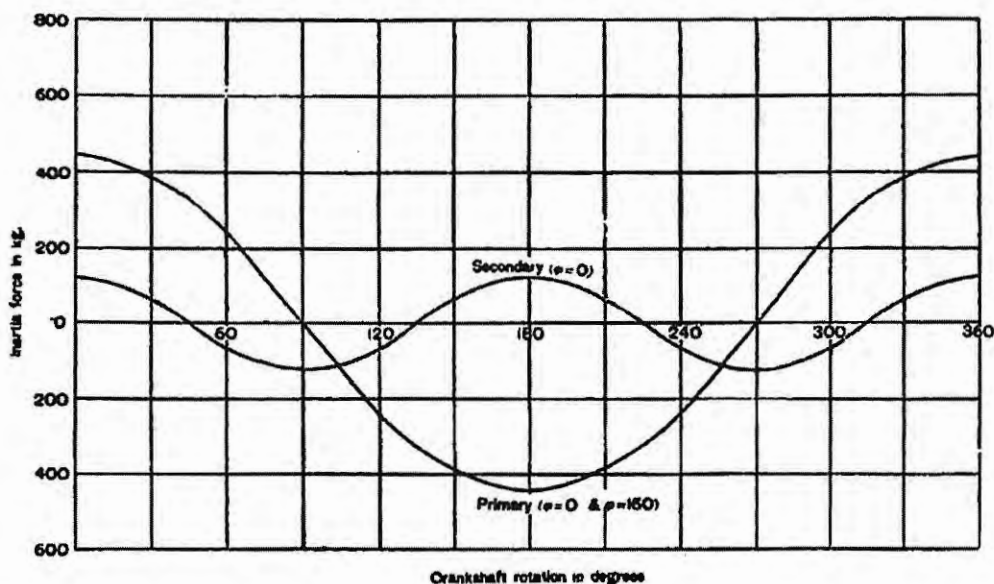
本編でも述べた通り、発動機の平衡理論、とりわけ星型発動機のそれに関する世界的なパイオニアの一人として東京帝大、航空研究所の田中敬吉の名が挙げられる。田中は『航空研究所報告』No. 10として現れたその完成論文において星型以外の気筒配列を有する発動機諸形態の平衡についても論じ、その中には直列4気筒機関に用いられるのと同じ、クランクピンが全て同一平面状にあり、鍛造が容易な180°対称クランクを有する90°V型8気筒機関……単傾斜の場合と複傾斜の場合と……が含まれていた。

ここで田中の複雑な解析を単に引用しても詮無いことであるから、図式的考察を以て引用に代えよう。180°クランクを有する90°V型8気筒発動機は直列4気筒発動機の抱合せと考えられる。それ故、1次慣性力は片バンク内でそれぞれに相殺済みとなる。問題は2次以上のそれであるが、2次だけを考えれば事は足りる。

2次慣性力について見る場合、90°V8はDucati様の90°Vツイン（通称Lツイン）の4連串刺しと考えると解り易い。無論、その前提となるのは単傾斜の単気筒発動機における慣性力である。そこで、田中の論文からこれを拾ってみよう。

90°Vツイン機関においては1番気筒について100%バランシング（50%オーバー・バランシング）を施してやれば、その1次慣性力はクランク軸を中心として当該気筒軸直角方向に発現する。これを2番気筒において発生する気筒軸方向1次慣性力とぶつければ両者は相殺される。例えば、図に示される90°Vツインの左側気筒のクランク角を基準とし、気筒軸上方を $\theta=0^\circ$ と表記し、左側気筒のクランク角 θ が90°に達した時を考えてみる。100%バランシングゆえ、1次慣性力は $\theta=90^\circ$ と $\theta=270^\circ$ を結ぶ直線上を往復するが、その動きは θ が90°左回りに進め

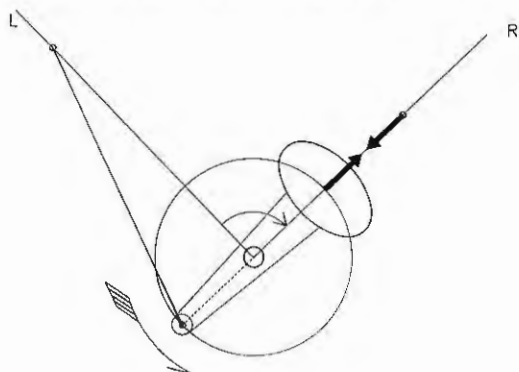
図補-2 星型発動機主気筒=単傾斜の単気筒発動機における慣性力



田中敬吉 The Inertia Forces and Couples and their Balancing of the Star Type Engine. 『航空研究所報告』No. 10, 1925. Appendix I, Fig. 2 より。

縦軸は慣性力 kg, 横軸はクランク角 deg.。ここでの議論に不要な曲線は消去されている。

図補-3 90° V型2気筒発動機の1次慣性力



ば- θ だけ、即ち90°右回りに進む50%バランシングにおける円環上のベクトルを押し潰したモノに他ならない。従って、それは左側気筒軸から右に90°回った方向、即ち右側気筒軸プラス方向にその最大の値として現れる。この時、右側気筒のピストンは下死点に位置し、気筒軸下向に最大の慣性力を発生させている。この両者は大きさが同一で向きが反対であるから互いに相殺し合う。

つまり、気筒軸が直交しているため、1番気筒の気筒軸直角方向成分に対しては2番気筒側

の気筒軸方向成分が、1番気筒の気筒軸方向成分に対しては2番気筒の気筒軸直角方向成分がそれぞれ1次振動バランスとして作用することになり、90° V ツイン機関において1次慣性力は特別なシカケ無しに自ずと打消されるのである。

他方、2次慣性力の波動はクランク軸の回転180°相当の周期を持つ。ここで、両気筒のクランク角のズレが90°であることから図に示される2次の波動を90°シフトさせてやると、元の波動との間に山と谷との重なりを生ずる格好となる。但し、気筒軸が直交しているため、この見かけ上の重なりはそれらが相殺し合うコトを意味しない。

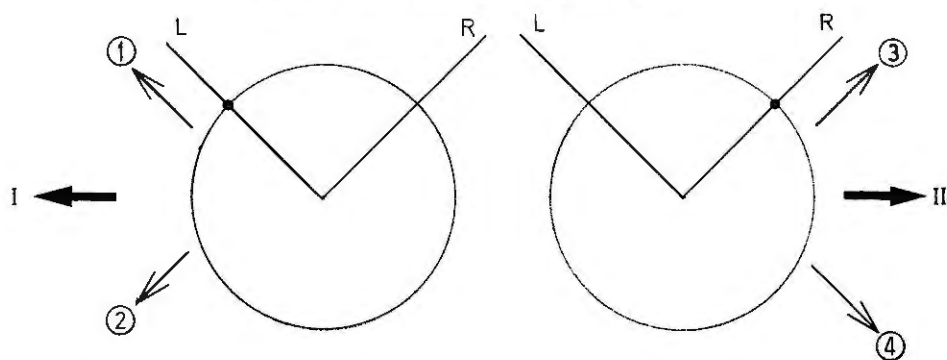
左側気筒のピストンが上死点に位置している場合、この気筒の2次慣性力は気筒軸方向上向きに作用し(①)、クランク位相を90°異にする前列右気筒のそれは気筒軸下向きに作用している(②)。互いの2次慣性力は相殺し合わず、この瞬間には左向きとなる(I)。

右側気筒が上死点に位置している場合、その2次慣性力は気筒軸上向きに作用し(③)、左側気筒の2次慣性力は気筒軸下向きに作用している(④)。合成2次慣性力は右向きである(II)。結局、左側気筒に気筒軸プラス(マイナス)方向の2次慣性力が作用する時、右側気筒には気筒軸マイナス(プラス)方向の2次慣性力が作用するという関係が常にあり、その合力は常にクランク軸と直交する左右水平方向振動の起振力となる³⁾。

さて、以上を前提に180°クランクを有する90° V型8気筒発動機について考えてみるに、第4クランクスローは第1クランクスローを、第3スローは同様に第2スローをそれぞれ平行移動しただけのモノに過ぎないことは直ぐに解る。第1と第4、第2と第3スローのVツインではそれぞれのペア内部において横振動が重なりを生じ、その単純な加算が生ずる。爆発間隔云々の問題を度外視すれば、それらは謂わば大きなVツインに見立てられる。

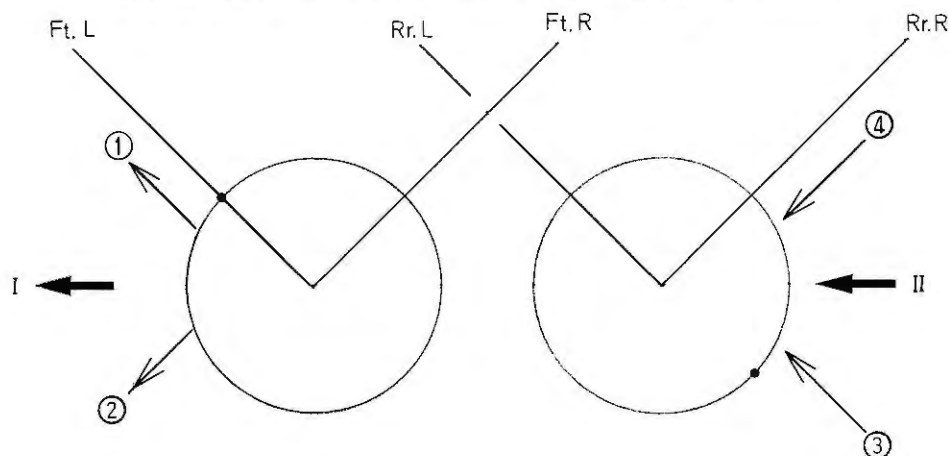
では、第1・4、第2・3スローという巨大Vツイン相互間で横振動は相殺されるであろうか？

図補-4 90° V型2気筒発動機の2次慣性力



3) 90° V ツインに回転質量と2気筒分往復運動質量の1/2との和に相当する釣合錘を与えれば「二次慣性力までバランスする」という中村良夫・蓮尾論吉『2・3輪自動車スクータ』山海堂、自動車工学講座5、1957年、18頁の記述はそれ故、誤りである。

図補-5 180°位相のクランク軸を持つ90°V型4気筒発動機の2次慣性力



残念ながらそのようにはなってくれない。この問題は180°位相のクランク軸を持つ90°V型4気筒発動機の2次振動という形に還元される。前列左気筒のピストンが上死点に位置している場合を考えてみよう。上図に拠りこの気筒の2次慣性力は気筒軸方向上向きに作用している(①)。この時、クランク位相を90°異にする前列右気筒のそれは気筒軸下向きに作用している(②)。つまり、前列Vツインの2次慣性力はこの瞬間には左向きである(I)。

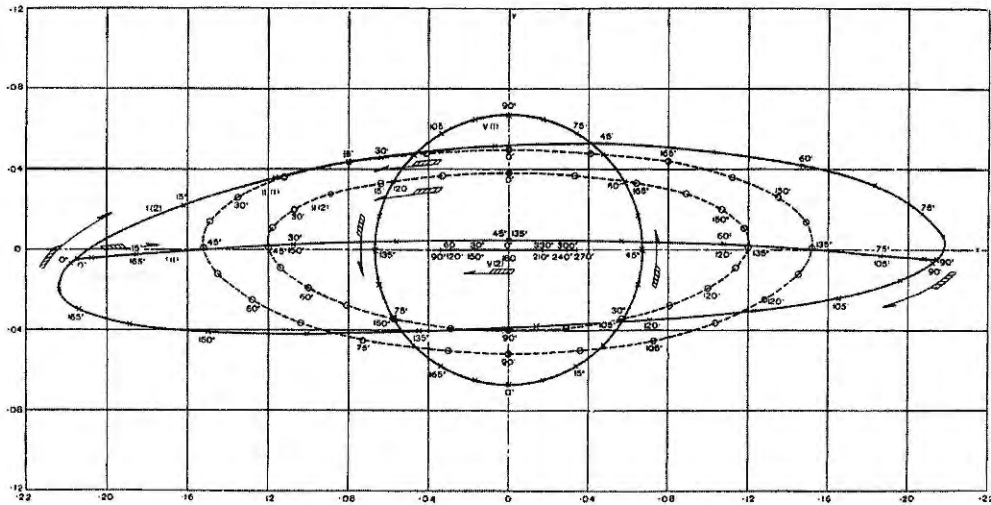
この時、後列左気筒は下死点に位置している。2次慣性力は気筒軸上向きに作用している(③)。90°位相を異にする後列右気筒の2次慣性力は気筒軸下向きに作用している(④)。従って、後列Vツインの合成2次慣性力も左向きである(II)。

かようなワケで180°位相のクランク軸を持つ90°V型4気筒発動機の2次振動が前後列間で相殺されることは無く、それらは単純に加算される。それ故、180°クランクを有する90°V型8気筒発動機のそれらも相殺し合うことなく重畳されるのみとなる。

その総括図が同 p. 290 に掲げられた Fig. 9 であり、これを焼き直したのが本編に図 1-4 として引用した神蔵信雄の図である。ここでは田中の元図を再掲しよう。ほぼ水平に展開する長い線が単傾斜の90°V8機関における2次以上の慣性力の極線図である。純粹に2次慣性力だけなら、これは水平な直線になる。複傾斜なら上下方向に厚味が出て平たい楕円状となる。つまり、単傾斜、複傾斜何れの場合においても、この180°対称クランクを持つ90°V型8気筒機関は等間隔爆発の実現と両バンク内での1次振動相殺との引換えに、猛烈な2次横振動を耐え忍ばざるを得ない次第となったワケである。因みに、次項で取上げる中西不二夫の解析に拠れば、その横方向2次慣性力の大きさはイスパノ220馬力、正規回転数にて1070 kg、同300馬力では1290 kgにも達した⁴⁾。

4) これに対して、上下方向2次慣性力はそれぞれ28 kgと39 kgに過ぎなかった。

図補-6 高次慣性力に関する田中の総括図



田中、同上 p. 290 Fig. 9.

横軸両端目盛、正しくは“0.24”である。神蔵はそうように訂正している。

しかし、同じ往復運動質量を有する直列4気筒発動機ならその $\sqrt{2}$ 倍もの2次縦振動を甘受しなければならない。かように単筒当り排気量の大きな発動機は航空用ガソリン発動機としてはまず成立不可能であるが故に埒外とされるに若くはないが、同じ単筒当り排気量の制約の下、優等生の直列6気筒を以って総排気量ないし出力の調達が難しく、直列8気筒の長いクランクでは搭載性も強度も不安という状況があった以上、この激甚な2次横振動を我慢して90° V8を駆るしか仕方無いとされていたワケである。

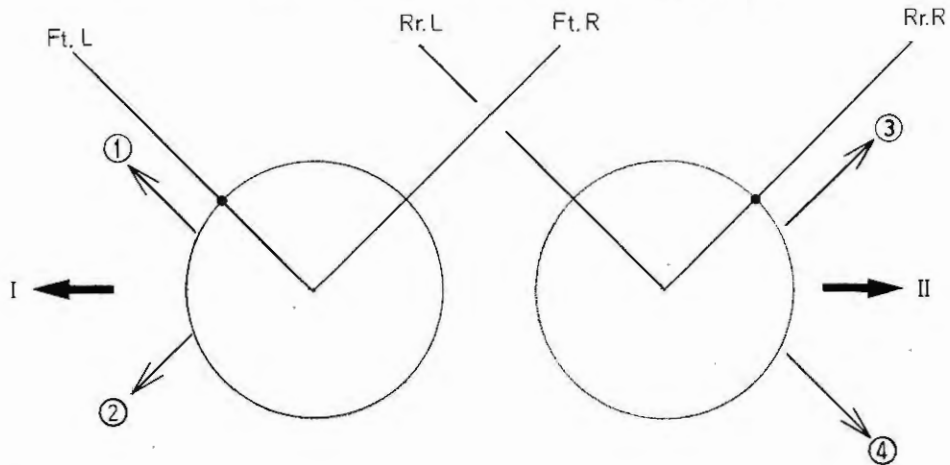
2) 中西不二夫の論文……90°非対称クランクの提唱

富塚がこの方式の創案者の1人と見做した中西不二夫による90°非対称クランク軸の平衡解析は1923年7月、『航空研究所雑録』第4号所収のA Method of Balancing 8-Cyl. 90V° Engine. というタイトルの日本語論文として世に出された。翌年2月3日に開催された機械学会第96回大会で中西はその内容の講演を行い、1925年4月に刊行された『機械學會誌』第28巻 第96号にはこれが同一タイトルの英語論文として掲載され、広く世に知られることとなった。

1次慣性力を片バンク内で相殺することは激甚な2次振動を招来することに繋がったから、90° V8発動機における2次振動対策の基本は180°クランクに因るバンク内での1次慣性力の相殺を諦めることにある。180°クランクが駄目なら90°クランクでは如何に……？

とは言え、ここでも中西の解析をそのまま引用することは避け、視覚的考察を用いて考察を進めて行こう。前項同様、2次振動問題はV8を90° Vツインの4連串刺しと考えると解り易い。この90° Vツインは1次振動を内部で相殺させてしまう今一つの巧いカラクリであった。2次

図補-7 90°位相のクランク軸を持つ90°V型4気筒発動機の2次慣性力



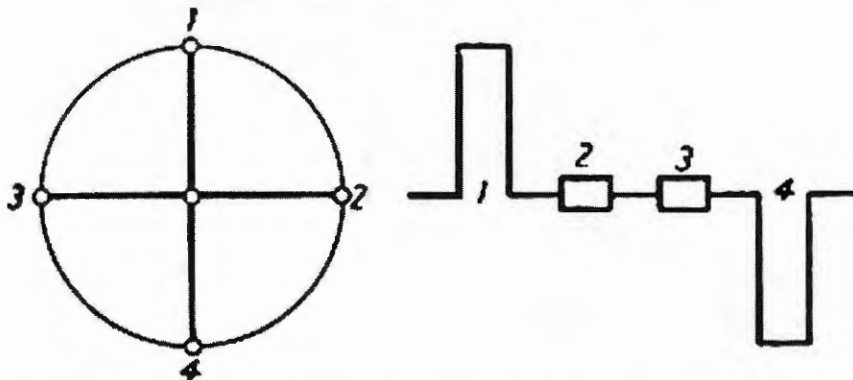
振動は残るがそれをVツイン相互間で首尾良く打消し合わせることが出来ればそれも解決されることになる。

この問題を90°位相のクランク軸を持つ90°V型4気筒発動機の2次振動の形で見てみよう。前列左気筒のピストンが上死点に位置している場合、この気筒の2次慣性力(①)、前列右気筒のそれ(②)を合せた前列Vツインの2次慣性力(I)は左向きである。

この時、後列右気筒は上死点に位置している。2次慣性力は気筒軸上向きに(④)、90°位相を異にする後列右気筒の2次慣性力は気筒軸下向きに(③)、それぞれ作用している。従って、後列Vツインの合成2次慣性力は右向きとなる(II)。

それ故、90°位相のクランク軸を持つ90°V型4気筒発動機の2次慣性力は前後列間で相殺され、気筒間隔に応じた2次慣性偶力へと転化することとなる。これは2次の現象ゆえ厄介な

図補-8 90°V型8気筒発動機における非対称クランク軸



ようであるが、V型8気筒発動機になれば、この2次慣性偶力は1番クランクスローと4番クランクスローとが 180° 間隔になるように 90° V4を2つ継合すれば互いに打消される。このクランクピン配置は対称クランクを打出してから2つのピンを 90° ツイストすることによって、あるいは鋳造によって得られる。

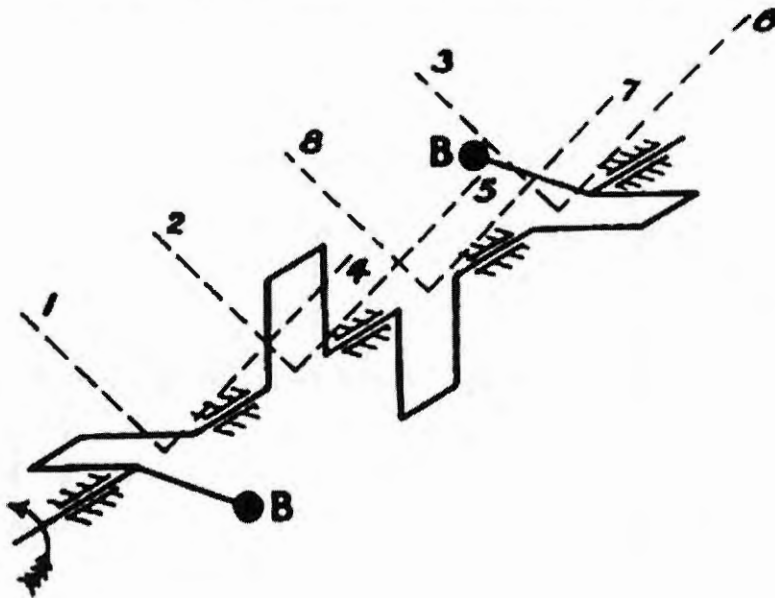
なお、この非対称なクランクスロー配置は回転質量の動的釣合を伴うため、これによって生ずる1次慣性偶力を概ね1, 2スロー間, 3, 4スロー間の反対方向に釣合錘を適宜追加することによって相殺させる必要を生ずる。逆に表現すれば、その動的釣合さえ出来ておれば 90° クランクは非常に優れた配置だということである。実際、それは決定版と言える技術であり、ある時期以降、 90° V型8気筒は須らくこの配置を採用ようになり、今日に到っている。

2. 海外における所説

1) A., Sharp (1907) 及び A.W., Judge (1921) の所説

田中の解析を一步進めた中西による1923年の解析が示すところとその意義は大略以上の通りである。しかし、中西の解析は数学的に厳密なモデルの体をなしてはいるが、中身としてこれ位のことなら思い付くのに材料力学の大家、中西ほどの頭脳は要らぬ筈である。実際、筆者自身はP.M., Heldtの版を度重ねた著書によって教えられ、その存在自体は随分前から知って

図補-9 A., Sharp, *Balancing of Engines*. (1907) p. 118, Fig. 11.



Reprinted by BIBLIOLIFE, L.L.C., USA, n.d..

いたものの、最近のリプリント・ブーム（著作権の関係か？）のお陰で漸く実物の面影に触れることが出来たのであるが、1907年にロンドン他で出版された Archibald Sharp なる人物の *The Balancing of Engines Steam, Gas, and Petrol*. というごく古い書物の中に、90° 非対称クランクの優れた振動特性についての理論的な記述が見られるのである⁵⁾。

また、わが国において比較的入手し易かった文献を当ててみれば、*Aircraft and Automobile Materials*. (1919)/ 浅川勇吉他訳『工業用材料』全5巻（コロナ社、1937～'42年）の著者として広く知られるイギリスの A.W. Judge が本編第1章でも言及されたその著書、*Automobile and Aircraft Engines*. 1st. ed. London, 1921 において同様な意味のことを語っている。該当箇所を挿図ごと翻訳すれば、

図 314

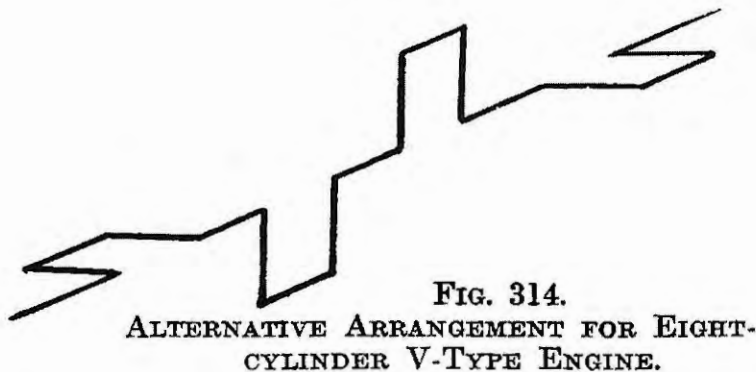


図 314 には 8 気筒 V 型機関のクランク配置に係わる代替法式が示されており、中央のクランクは従前のように並んでおらず互いに 180° に位置し、外側のクランクとは 90° の位置にある。

この場合、第 2 クランクの 2 次不平衡力は第 1 クランクのそれに対して $2 \times 90^\circ$ あるいは 180° ずれた位相にあり、つまり、対向している。同様に、第 3、第 4 クランクについても 2 次の諸力是对向せしめられており、総括すれば 4 つの 2 次慣性力は完全な平衡状態にあり、偶力も残存しない。4 次調和分については、それらが $4 \times 90^\circ$ ないし 360° 位相にあるため同調が見られ、回転数の 4 倍相当の不平衡力が発生するであろうが、その大きさは $8 (M\omega^2 R/4n^3) \sqrt{2}$ ないし $2 (M\omega^2 R/n^3) \sqrt{2}$ に等しいから他のクランク配置に伴う 2 次不平衡力に比して著しく僅少である。

5) cf. P.M., Heldt, *High-Speed Combustion Engines*. N.Y., 1939, pp. 56 ~ 57 (Sharpe と誤記), Archibald Sharp, *The Balancing of Engines Steam, Gas, and Petrol*. London, 1907, pp. 117 ~ 118. Heldt の書物は当初, *The Gasoline Motor* のタイトルで 1912 年の早い時期に刊行された著書の改題 10th. ed. である。初版の刊行次期からして A., Sharp の著書への言及は 1912 年から続いて来たものと思われる。

この【90°クランクの】場合における4次の不平衡力は通常型8気筒V型機関の不平衡2次慣性力の $\frac{1}{80}$ をなすに過ぎないと見積られて来ている【has been estimated】(p. 576【 】内引用者補)。

1921年時点の欧米において、90°V型8気筒発動機用90°クランクは未だ新たな実践課題に属してはいたものの、少なくとも理論的検討という面においては15年ばかり前からとうに周知の技術なのであった。筆者など、戦時下のイギリスにおいてはその試作計画ぐらいは俎上にのぼせられていたのではないかとさえ思う。

2) C., F., Taylor (1971) の伝える挿話

かく推測させるのは同時代のアメリカにおけるまさしくこの種の事蹟について伝えられるところがあるからである。即ち、この課題に関してはC., F., Taylorが1962年、M.I.T.で行った講演の記録、*Aircraft Propulsion*. (Smithsonian Institution, 1971)の中に次のような挿話が見られるのである。曰く、

1921年頃、300馬力イスパノ発動機を造っていたWright Aeronautical Corporationにおいて、90°に鈎合わせたクランクを有し、水平振動の排除を図ろうとする目的の下にその1基が製造された。当時の振動測定は原始的な状況にあり、得られた改善は試験台上にて90°クランクを持つ発動機においては運転中、クランク室上の1セント硬貨は載ったままでいたのに対し、180°クランクの発動機においてそれは忽ち跳ね飛ばされるという事実を以て証明された。

次の試験は180°クランクを有するものと90°クランクを有するものという2基の発動機を同じThomas-Morse戦闘機に搭載することであった。多数の技術者がこれらの発動機を地上運転し、多数のパイロットがそれらを飛ばした。飛行機の振動に関して気付かれるほどの差は無いというのがその共通した意見であった。恐らく、何れの場合においても発動機のトルク変動が横審同における改善効果を不分明にするほど甚だしかったのであろう。何れにせよ、90°クランクは是認されなかった。飛行機以外の用途においてそれは間もなくV-8機関の標準となったのであるが。これが1922年における振動解析の状況であった！(pp. 73~74)

要するに、当時の航空発動機は混合気分配の不均一に起因する気筒相互間の発生出力不均一ならびにサイクル変動に因るトルク変動に苛まれており、その影響によって主運動部の設計に起因する固有の振動はマスキングされてしまっていたワケである。

イスパノ発動機は第一次大戦中、イギリスのWolseley Motorsでもライセンス生産されていたから、Judgeが述べていることはこれと関係があるのかも知れない。アメリカ、ライト社と同様に、ウーズレイ辺りでも90°クランクの試作ぐらいは進められていた可能性は否定出来ぬと推測したくなるのである。

3. 自動車工業における展開

1) Cadillac V8 機関に採用された 90° 非対称クランクと動釣合技術の進化

さて、Taylor が語る「飛行機以外の用途」の最たるものが自動車機関である。そして少なくともアメリカでは、対戦中に製造された航空発動機部品を流用し、V8 カットの L4 機関を捻り出したイギリスないし欧州諸国とは違い、V 型 8 気筒機関を自動車用に開発製造することを是認する社会的・経済的背景があった。

当然予想されるように、V8 機関の用途は高級車用として始まった。アメリカを代表する高級車、Cadillac V8 機関の嚆矢は 1915 年型であった。そして、そのキャデラックの '24 年型 V-63 機関こそが 90° 非対称クランク付き 90° V8 機関の嚆矢であった⁶⁾。

その開発に大きな功績を残したキャデラックのチーフ・エンジニア E.W. Seaholm は、Archibald Sharp や Judge の業績を念頭に置いてか、V8 用 90° クランクが力学的に優れていることぐらいは相当以前から教科書レベルでも周知の事実であった、と述べた後、導入への最大の障害は、1 次慣性偶力を相殺するための釣合錘の設置法、それも実際の製品にこれをどう取付ければ生産性を上げられるかという何れも生産技術上の問題であり、製品の出来栄を客観的に測定するための静的・動釣合試験を取込んだ生産技術体系の構築も同様に不可欠の前提としてあったのだと論じている。彼が鍛造工程の複雑化について一言の愚痴もこぼしていないのは、この問題について彼が既に諦観の境地に達していたことの証しであろう⁷⁾。

この課題はオハイオ州デイトンの GM 研究所で徹底的に考究された。その支援の下で進められた Cadillac V-63 機関 (SV, 79.4×130.2 mm, 約 80 HP/約 2800 rpm.) の設計においてはとりわけ全面機械加工クランク軸における釣合錘数の合理的削減による製造コスト抑制が迫られた。その階梯は次の図に示されている。

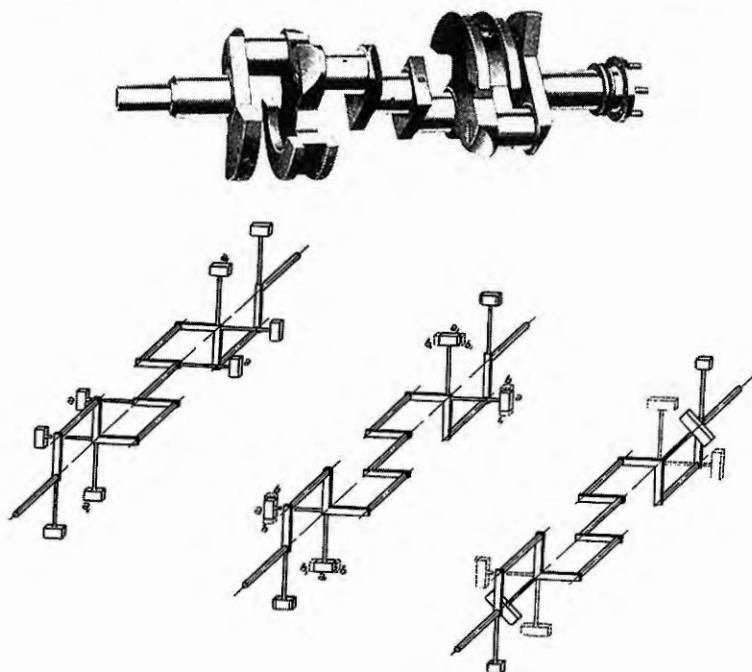
生産技術の一部として生産ラインに組み込まれるべき静的・動釣合試験については同社の設計技師 D.E. Anderson がかなり詳しく紹介してくれている⁸⁾。

6) 実際には、アメリカ高級車メーカーにして、Packard, Pierce-Arrow と並んで往事 "3P" と称された Peerless Motor Co. も同時期に 90° V8 用 90° 非対称クランクを開発し、このバランシング法については GM との共同特許を取得したようである。ピアレスはしかし、大恐慌の煽りを喰らい 1931 年 6 月 30 日に倒産してしまった。してみれば、後述の Ford はピアレスから特許を買取っていたのかとも想われる。

7) cf. E.W. Seaholm, Balance of the Cadillac V-63 Engine. *The Journal of the Society of Automotive Engineers*. Vol. XIV, Jan., 1924.

8) cf. D.E. Anderson, Practical Balancing of a V-Type Engine Crankshaft. *The Journal of the Society of Automotive Engineers*. Vol. XIV, Apr., 1924. 動釣合試験及び動釣合試験機については拙著『舶用蒸気タービン百年の航跡』ユニオンプレス、2002 年、178～182、186～187 頁にて論じておいた。

図補-10 Cadillac V-63 機関のクランク軸とそこに到る合理化の階梯



E., W., Seaholm, Balance of the Cadillac V-63 Engine. Fig. 6, Fig. 5.

下図、左から右へと釣合錘が省略（集約）されて行っている。3主軸受であることに注意。

P. M., Heldt, *High-Speed Combustion Engines*. N.Y., 1939, p. 57, Fig. 12は上写真を図に起したもの。

クランク軸は連桿ピストンと結合された状態で回転し、そのバランシングの真価を問われる。従って、単体でこれを試験するには工夫が必要である。90° V ツイン機関の往復運動質量に起因する1次慣性力が2気筒分の往復運動部質量の半分をバランスさせることによって平衡されることを利用し、キャデラックではクランクピンに Balancing Ring Weight と称する開閉スリーブ様のダミー・ウェイトを取付け、その動的平衡を迅速に取る方式が開発された。この際、理論的には連桿の回転部分の質量とその往復運動部分の質量、ピストンとピストンピン周りの往復運動質量をダミー・ウェイトとして各クランクピンに与えれば済むが、実際には部品毎の製造誤差による質量のバラツキが問題となる。

このため、まず、部品群を徹底的に検査し、連桿の例では組立総重量 3.98 kg のフォーク & ブレード型連桿一对の重量誤差が 9.1 g (± 4.53 g) という狭い許容範囲内に収まるような選択組合せを運用する手法が確立された。また、クランク軸側では運転中、その内部の油孔に入っている筈の油の重さまで、ある程度考慮に入れられた。以上によってクランクピン 1 個当り 3231.9 g というダミー・ウェイトの重量が決定された。

全面機械加工により高い形状精度を附与されたクランク軸は釣合錘を取付けられた後、静・動兼用の釣合試験機に掛けられた。まず静的釣合がチェックされ、堅型ボール盤と $3/4$ in. ϕ の

ドリルを用いた肉抜きによる釣合修正が図られた。これに続いてダミー・ウェイト4個をクランクピン4本に取付けた状態でクランク軸は動的釣合試験に供され、1次慣性偶力の釣り合いをチェックされ、同じく肉抜きによる釣合修正を施された。釣合試験機は同じものが2台あり、2名の作業員と1名の助手により1日に100本を超えるクランク軸が試験された。この高度なバランスングに対応して弾み車やクラッチ部品、自在継手等の回転部品にも静的・動的釣合試験が課せられることとなった。

自動車工業にとって重要なのは生産性、生産技術である。それが完備して初めて新機軸は自動車技術として意味を持ち、大量生産の戦場に投入される。GMの対応はこの意味で非常に迅速であったと評価されて良い。

また、航空発動機との絡みで付言すれば、GMは混合気分配適正化技術の重要性を認識し、当時既にV型8気筒機関に90°クランクを導入した場合、その効果がユーザーに認識される程度にはその均等分配を実現する能力を身に着けていたことになる。かくて、航空発動機としてはパワー的に劣勢を託つV8機関に航空発動機に代る高級乗用車用原動機としての新天地が拓かれたのである。

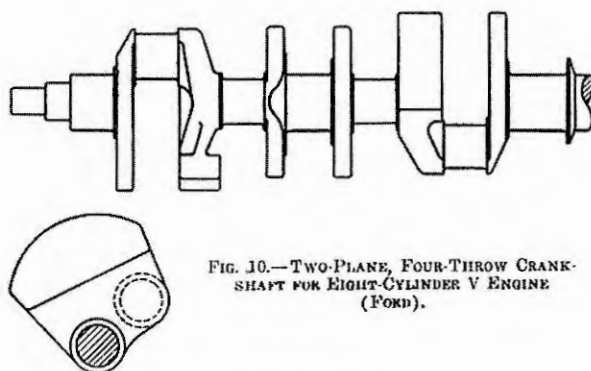
2) Ford V8 機関に採用された90°非対称クランクと鋳鋼生産技術

キャディラックの生産技術は時代の先端を行くレベルにあったが、自動車技術としては尚、生産性という点に未成熟の要素を含んでいた。高級車用機関であるから生産量自体も小さく、高コストでも採算は合ったのであろうが、全面機械加工のクランク軸などという航空発動機まがいの工法では大衆車への普及は論外であった。

1935年、生産技術の一大革新によってこの面に突破口を開いたのはGM積年のライヴァルFord Motor Companyである。T型の独壇場を追われ、続くA型においても劣勢を余儀無くされたHenry Fordは失地回復策として1932年投入の次期大衆車“V8”への90°V型8気筒機関(SV, 77.8×95.2mm, 65HP/3000rpm.)搭載への断を下した。それは直列6気筒の長いクランク軸を直感的に嫌う彼ならではの決断でもあった。そして、この英断を生産技術面で支えることとなったのが鍛造粗形材に代えて鋳鋼粗形材をクランク材料として用いるという技術革新である⁹⁾。

9) 以下の記述はCast Steel Crankshafts. New Electric Furnace at Ford Co. of Canada. *Automobile Engineer*. Jul. 1935, F.J., Walls/ 築山閔二訳「クランク軸の鋳造に就て」『日本機械學會誌』第41巻第257号, 1938年 (*Automotive Engineer*. Mar. 1938の記事摘録), F.J., Walls, Cast Camshafts and Crankshafts./ 山田英夫訳「鋳造カム軸及び鋳造曲軸」『内燃機関邦訳文獻献集』第1巻第16号, 1937年, W., West, Cast Materials for Crankshafts. *Automobile Engineer*. Feb. 1939/ 小林虎男訳「曲軸用鋳造材料」『内燃機関邦訳文獻集』第4巻第11号, 1939年, Cornelius, Berechnung und Gestaltund schnelllaufender Kurbelwellen. A.T.Z. Jahrg. 42, Heft 14, 1939/ 山川鹿三郎訳「高速内燃機関の曲軸の計算及形状」『航空學術外國文獻』第102号, 1940年, ditto/ 遠田榮次郎訳「高速機関用曲軸の計算と造形」『内燃機関邦訳文獻集』第5巻第10号, 1940年, に拠る。Westのものは材料力学的論考で、フォードV8ノ

図補-11 Ford V8 機関用鋳鋼クランク軸



P.M., Heldt, *High-Speed Combustion Engines*, p. 263, Fig. 10.
これもキャディラック機関同様に3軸受式である。

フォードの鋳鋼プラントは以前からデトロイト周辺に造られていたのかも知れぬが、1935年にはそのカナダ工場に\$425,000を投じた新鋳鋼プラントが竣工、3月よりデトロイト向けに操業を開始している。そして、情報が豊富なのはこの新プラントについてである。

カナダの新プラントにおいて、溶鋼は自家発電所から電力供給を受ける自動制御式5トン電気炉によって調達された。その原料は40%が自家スクラップ鋼材、他に同量の鉄鉄、更に返り屑、合金等であり、溶湯の組成は装入原料によりC 1.35～1.60%, Mn 0.60～0.80%, Si 0.85～1.10%, Cr 0.40～0.50%, Cu 1.50～2.00%, P ≤ 0.10%, S ≤ 0.06% 程度に厳密にコントロールされた。出鋼は1日5回＝クランク軸最大生産率475本/日(24時間連続操業の場合、1200本/日)であった。この数字、キャディラックのそれとはまさに雲泥の差である。

鋳造は砂型を用いて行われ、自動造型機で造られる中子には常に新しい砂だけが用いられ、中子の組付け精度は30/1000 in. (0.762 mm) に保たれた。完成鋳物は型バラシ、砂落し、研削、検査の過程を通じて4本セットでコンベアに懸垂され、移動せしめられた。この鋳物粗形材は20 mの自動連続炉の中を2度通過して熱処理された。先ず、900°に加熱、20分保持の後、空気中で650°Cまで急冷、再び805°Cに1時間加熱、炉内で1時間かけ540°Cに徐冷、その後、自然放冷された。熱処理後の機械的性質は抗張力66.5～77.0 kg/mm²、伸び2.5～3.0%、ブリネル硬度250～320であった。この硬度測定に合格した粗形材は機械加工に回された。

この鋼は加工が難しく、工具には特殊な高速度鋼が用いられ、旋削速度は鍛鋼の場合の55%、送りは鍛鋼なみ、回転工具の速度は35～40%とし、工具摩耗を防ぐため、敢えて重切削にて加工された。鋳鋼化によって粗形材の形状精度が高められたため、鍛造粗形材を加工する場合に対して8ないし12の機械加工工程が省略され、切粉の量は11 kgから4 kgへと激減

のそれ以外にも当時、アメリカでNiやMoを含むより高級な鋳鋼が広くガソリン機関、ディーゼル機関に用いられていた状況が窺われる。フォードの手法の特徴は飽くまでも低コストの追求にあった。

した。余肉の削減、とりわけクランクピンの中空化とこれに対応する釣合錘の軽小化により仕上り重量自体も30 kgから25.5 kgへと大幅に低減せしめられ、機関性能向上に結び付いた。もっとも、振り振動対策として後年、クランクピンは0.5 in. 増径されることになる。

粗機械加工の後、ワークは全点、トルクテストに供された。仕上げ加工を終えたワークは全点、バックトルク・テストに供された。印加トルクは何れにおいても45000 in.-lb. (517.8 kg-m)であった。これは計算上、このクランク軸に運転中、印加されると考えられる最大トルクの10倍に達し、鍛造クランクにおいては弾性限度に近い値でもあった。鋳鋼軸の弾性は鍛鋼軸と同程度であったが、逆方向反復振り試験で明らかにされたその疲労強度は鍛造品の2倍強に達した。疲労強度一般についても芯から表面まで一定の硬度を有するこのクランク軸は鍛鋼品の2倍強と評価された。また、鋳鋼は油との馴染みが良く、摩擦損失の低減も実現したと伝えられている。釣合試験等についてはキャディラック機関の場合と同様であったと推定される。

さて、この程度の情報が広く流布せしめられていたにも拘らず、肝心の造型プロセスの細部や溶湯鑄込み温度、注湯作業そのものについては何のデータも掲げられていない。鋼は鑄鉄よりも融点が高く、溶融状態における粘りも鑄鉄より強い¹⁰⁾ため湯流れが悪い。したがって、溶湯の温度はより高く、鑄型の方も高強度のものを用意する必要があり、これを完全に乾燥させ、その表面に塗型剤を施し表面を強化することが常套である。また、注湯時にも押し湯等に独特の工夫を凝らして鑄込むのが普通である。しかし、その辺りの技術については全面的に秘匿されている。

日産自動車の設立に関与した本邦自動車工業界の先人、久保田篤次郎はGraham-Paige Co. の設備買収に係わる件で滞米中、1936年にFerro Steel and Iron Foundry 副社長、ジョン・プライス氏なる人物にフォード社の鑄物工場の見学を奨められた。久保田に抱けばプライス氏は：

「フォードのクランク・シャフトは鑄物だから見てこい。これを見れば鑄物の将来がわかる」ともいっていました。さっそく見に行きましたが、鑄型は刀の鐔のような型を縦に積み重ねたもので、それに湯を注ぐやりかたです。各セクション毎に番号の入った“ツバ”を順序に積み並べ、湯を注ぐのです。

ところが、フォード工場には鑄物の砂型工場がありません。型は町の小さい鑄物屋に外注し、外注によってマスコプロをしていたのです。あちこちの鑄物屋から納入される砂型を組み立てて、フォード工場では湯を入れるだけです。ミスター・プライスは、これがこれからの鑄物だからよく覚えておくとよい、ということでした¹⁰⁾。

カナダで操業を開始したばかりの新鋭鋳鋼プラントに果して自社造型ラインが在ったのか無かったのかまでは分らぬが、垂直的に統合された一貫生産体系のイメージとは裏腹に、デトロ

10) 久保田篤次郎「ゴルハム式三輪車からダットサンまで」自動車工業振興会 自動車史料シリーズ (2) 『日本自動車工業史後述記録集』1975年、所収。引用は72頁より。

イト(?)のフォード鋳鋼工場に内製造型ラインは存在しなかったようである。

ともすれば冗漫な文章と受け取られがちな「一般鑄造法——鑄鋼——」なる論文の著者、野上熊二は、そこで鑄鋼製品の製造において型の品質よりも溶鋼の品質の方が如何に重要であるかについて論じ、これを次のように理由付けている。

……若し鑄型に少し位の缺陷があつても完全な溶鋼を鑄込むと其製品の質並形態共に今日吾々の知る試験方法では何等缺陷を發見し得ない程度に出來上ることも珍しくない。そして一時に多數の鑄型に鑄造する場合其型に少數の不良型があつても失敗は其型だけに止り溶鋼の一部分を失ふに過ぎない。然るに型が如何に完全に出來てゐても溶鋼が不良であると鑄物は全部不良となるからである¹¹⁾。

今、引用されたばかりのフォードの実施例を想えば、これは実は極めて含蓄に富む指摘だったのではなからうか？

それはともかく、この重厚な鑄鋼技術体系は1947～'48年、イギリス鑄鉄研究協会のH. MorroghによるCa-Si、Ca-Mg添加による片状黒鉛球状化成功や1948年、アメリカのInternational Nickel Co.やMond Nickel Co.によるMg処理法の確立を契機とするダクタイル(球状黒鉛)鑄鉄の世界的普及以降、自動車機関用クランク軸の生産技術としては陳腐化を余儀無くされることになる。

また、残念ながらV8はフォード社の悲願たるトップシェア奪回のための救世主とはなり得なかった。それでも、1937年代から戦時中にかけて、フォード社の鑄鋼クランク製造技術は間違いなく時代の最先端に位置していた。だからこそ、多くの勘所がブラックボックスの中に留められていたのは致し方ないことなのであった¹²⁾。

3) 戦後における90°非対称クランク採用の嚆矢、いすゞDA80型機関

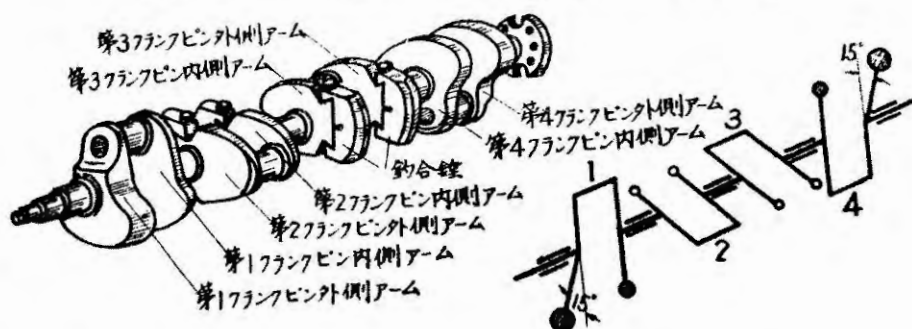
わが国の自動車機関界における90°非対称クランクの起源は必ずしも明らかではない。1942年10月、旧御三家が陸軍及び商工省から御料車としても使用可能な高級乗用車の試作命令を受けた際、トヨタはJaguar, Morris, Lanchesterを参考にV型8気筒機関の設計を開始したが、指定された納期に間に合う見込みが立たず、直列6気筒手持ち機関の改良型で間に合わせを図っている。設計に取り掛かったというだけなら、これが恐らく90°非対称クランク付き本邦自動車用V8機関の嚆矢であったのではなからうか？¹³⁾

11) 野上熊二「一般鑄造法——鑄鋼——」『岩波講座 機械工学』[IV 機械工作], 1942年。引用は3頁より。

12) 球状黒鉛鑄鉄については岡本正三「新材料“球状黒鉛鑄鉄”の解説」『機械の研究』第2巻第8号, 1950年, 吉原幸一・紅谷和男「ノデューラ鑄鉄」同, 第5巻第1号, 1953年, 参照。

球状黒鉛鑄鉄の普及により鍛造や鑄鋼に頼らずとも複雑な形状のクランク軸が容易に製造されるようになった点は戦後、工業化の歩みを本格化させた国が享受し得た大いなる後発性の利益であった。拙著『開放中国のクルマたち』日本経済評論社, 1996年, 90～91頁, 参照。

図補-12 いすゞ DA80 型ディーゼル機関の非対称 90° クランク軸



渡部要之助・櫻堂剛「いすゞ DA80 型 V8 デーゼル機関のクランク軸について」第1図。

1, 4 番のクランクピンのみ釣合錠質量軽減のため中空加工されていた。

他方、似たような手管で同じように急場を凌いだ御三家の一角、いすゞ自動車は1947年、戦後のバス界のリーダーたるべく、乗車効率の高いリヤエンジン・バスの計画に着手した。モノコック構造車体に新機軸満載の試作リヤエンジン・バス、BC10型は1950年10月、完成に到った¹⁴⁾。

BC10の機関は同年8月に完成していたDA80型ディーゼル機関(予:90°8V-95×120mm, 6.8l, 117HP/2600rpm.)であった。DA80は8.55lの直列6気筒機関DA60, 5.1lのルーツ式過給機付き直列6気筒機関DA45S(95×120mm)や等との比較の結論として誕生した。DA80にはAl合金製のクランク室上半部共一体铸造気筒ブロック等と共に90°非対称クランク軸が新技術として導入されていた。

確かに、100式統制発動機成立以前には日野重工業では60°V8という変った気筒配列の、恐らく渦流室式ディーゼルが試作(?)されている。結局、いすゞが勝ち取った100式統制発動機にもV型8気筒は系列化されており新潟鐵工所で分担生産されたことになっている。そのバンク角は当然90°となったが、こちらにはまず確実に180°対称クランクが用いられていた筈である。最初から自動車用として設計・製造された、それも90°非対称クランク式の本邦初のV8、それがいすゞDA80であった¹⁵⁾。

そのクランク軸の見取り図と釣合錠の配列図とを上に掲げておく。

往復運動部の組立重量誤差は20g以下と定められた。動釣合試験時のダミーウェイトは

13) 『トヨタ自動車30年史』1967年, 165頁, 参照。

14) 『いすゞ技報』第12号, 1951年, 菊地五郎『ジーゼル自動車工学』岩波書店, 1953年, 163~174頁, 参照。

15) 町田雅雄・清水洋三「いすゞDA80型V8デーゼル機関の設計について」, 渡部要之助・櫻堂剛「いすゞDA80型V8デーゼル機関のクランク軸について」『いすゞ技報』第11号, 1951年, いすゞ自動車特許・技術情報管理部『いすゞディーゼル技術50年史』1987年, 134頁, 拙著『日本のディーゼル自動車』日本経済評論社, 1988年, 292, 368~370頁, 参照。

GMのそれに似た半割りの、但しボルト2本で結合されるタイプの厚肉スリーブで、その重量は4715gに設定されていた。また、いすゞが当時、保有していた動釣合試験機はSchenk AI型であった。所謂、カール・シェンクである。

6台の試作DA80の実用試験データに基づき、AI合金製クランク室上半部一体気筒ブロックの熱変形や剛性不足が過大な摩擦損失の要因として取沙汰されるに到っていたため、翌年3月にはこれを鋳鉄に置換すると共にクランク・ジャーナル径を5mmアップして80mmとする(ピン径は70mmのまま)等の改良工事が行われ、最大出力は120HPへと強化された。GMやフォードの後追いという典型例がここでもまた観察された¹⁶⁾。

しかし、その改良の効も無くDA80は結局、試作のみの存在に終わった。高々120HP程度の商用車用ディーゼルにV8などという気筒配列を持って来たのではコスト的に間尺に合う道理が見付かるワケがない。流石の力学的合理性も産業技術としての合理性基準＝経済原則を前にしては形無しとなるだけである。かくて、DA80を槿花一日の榮として、いすゞ大型車用機関の主力は当面、2系列の直列6気筒によって賄われて行くこととなる。

むすびにかえて

ガソリン機関は外部点火を契機として生起する予混合燃焼というその燃焼様式の基本構造故に、気筒当り容積、とりわけ気筒内径に厳しい制約を受けざるを得ないため、その大出力化は多気筒化を通じて追求された。水冷航空発動機における直列4気筒から直列6気筒への進化は平衡上、問題が無いどころか、むしろ理想的な展開として実現され得たが、直列も8気筒に到れば発動機全長、クランク軸前後長は著しく増し、クランク軸の振り振動への危惧も尋常ではなくなる。そこで、一時期は固定気筒水冷星型9気筒などという気筒配列までが航空界において実用化された。

90°V型8気筒という気筒配列は同格の直列配置に比して発動機全長もクランク軸前後長も控え目となり、コンパクトな多気筒発動機を実現する方途として有利である。しかし、この気筒配列を巡っては、製造容易な180°対称クランクは激甚な2次横振動を伴い、力学的に合理的な90°非対称クランクは製造コストという点において経済的合理性を欠くという欲求不満の時間が長く経過した。

後者の粗形材鍛造工程には厄介な捻りが組込まねばならない。それにも増して、その機械加工工程においては単なる寸法精度や静的釣合のみならず、動的釣合の確保が求められた。仕上り品は動的釣合が精密に測定され、かつ、その結果に応じた正確な修正を施す加工を迅速確実に施されねばならない。これは非常に面倒な要求であると考えられた。他方、仮にそれらが

16) 清水洋三「いすゞディーゼル機関の改良について」『いすゞ技報』第15号、1952年、参照。

実現されたとしても、当時、混合気分配の不斉一に起因する発動機のトルク変動はその平衡改善効果を覆い隠してしまいかねないほどに大きかった。

アメリカ自動車工業に依ってブレイクスルーは見出された。1923年、GM キャデillac 事業部は高級車なればこそ許される範囲内での工程合理化を実現させ、その商品の声価を一層高からしめた。1935年にはFord社が低価格車分野における90° V型8気筒機関の採用を可能とする画期的な技術革新をやったのけた。90° 非対称クランク軸の鋳鋼化がそのキーテクノロジーであった。戦後、ダクタイル鋳鉄の普及により、この流れに沿った工程簡易化は一段と加速し、今日に到っている。

然しながら、GMが初めて90° 非対称クランクを導入・商品化した時点において、既に水冷航空発動機の主力はRR *Eagle* やアメリカの *Liberty* をはじめ、素性の良い60° V型12気筒へとシフトしていた。それ故、出力的に劣る90° V型8気筒発動機の2次振動が解消されても航空界に大した興味の喚起されよう筈は無かった。

航空発動機と自動車機関、この二つの血脈はその源流において互いに近接し、幾度と無く接点を切り結びながらその後も発展を遂げて行った。その具体的局面の幾つかについては固定気筒空冷星型航空発動機の技術史を扱う次の稿にて回帰することにもなるのだが、重要なのは90° 非対称クランク量産開始時点において既に両者は体系的分離という恰好で互いの発展軌道に載せられていたという事実である。むしろ、90° 非対称クランクの開発と受容とを巡る温度差の中に、その体系的分離の実相が最も色濃く投影されていると観る方が至当であろう。

中西不二夫は優秀な研究者としてその後も数々の独創的業績を重ねて行ったが、こと90° 非対称クランクの発想という点に関する限り、彼は技術進歩の流れを理論的に予見したワケでも具体的工程革新の方案を提示したワケでもなかった。彼はその力学的意味を正しく理解し、厳密な定式化をなした。但し、この問題の本質は欧米の研究者によって少なくとも16年前には明らかにされていた。

90° V型8気筒内燃機関には90° 非対称クランクという取合せは1920年代中葉より定番技術としての歩みを開始し、現在に及んでいる。今後ともこの関係は普遍的であり続けるであろう。

もっとも、実際の技術は多かれ少なかれ、そこからの乖離を含んで進歩する。特殊ではあるが極端に大きな乖離の実例はトヨタのF1用機関における180° クランクの採用である。Vのバンク角は90° のようであるが、クランク軸の剛性さえ確保されていれば180° クランクを採用した方が13000～18000 rpm. にかけて90° クランク式の場合より発生トルクが大きくなるというデータが得られている。この例はV8機関を直列4気筒の抱合せと看做し、各バンク4気筒毎に排気の脈動効果を利用して体積効率向上を図った方がVツインの寄せ集めという枠組み内で最適化を図るより有利な場合があるとの意味に解される。その上、かような高回転下では2次振動の影響も目立たぬのであろう¹⁷⁾。

小さな乖離の事例は1997年より系列化が始まったいすゞのトラック用ディーゼルにおける

T系 V6, V8, V10 機関 (330 ~ 600 PS) において観察された。即ち、そのバンク角には 90° ではなく 80° が採用されていた。これはキャブ下への艤装性という観点から選択された仕様であったと観て間違いない。また、V6 などは RV 用 V6 機関で練成されたクランクピン・オフセット設計技術、あるいはバランスに係わる技術、更には機関マウント技術といった艤装技術上の進歩にも依拠して成り立ち得た作品であり、技術進歩の個性性を示す好例でもあった¹⁷⁾。

しかし、その後、T系 V 型機関群はシンプルかつ合理的で排煙脱硝装置をはじめとする排ガス対策部品等、追加補機類の艤装性において圧倒的に優位に立つ直列 6 気筒 6W, 6U 系機関 (380 ~ 460 PS) に代替され、今日に到っている。

100 年の歳月の後、V 型機関は乗用車においては高級車用ないしレーシング・エンジンとして生き残り、トラック用ディーゼルにおいてさえ高過給化技術の向上により多数の気筒を V 型に配し只管大排気量にモノを言わせようとする志向や流行病の如く過去幾度か繰返されて来た V6 への浮気心は背景へと退いて直 6 全盛、V 型 8 気筒は特殊な大出力機関のみに生き残るという棲み分けの秩序が固められたのである。

謹告

本連載稿を 15% 補足・訂正し 1 本のファイル化した「訂正版」を Discussion Paper:『三菱航空発動機技術史——ルノーから三連星まで—— 第 I 部: 三菱内燃機・三菱航空機の V 及び W 型ガソリン航空発動機——ルノー, イスパノ・スイザ, ユンカース, 93 式, W 型——』として近く大阪市立大学学術機関リポジトリに登載させていただきます。

また、これと同時に続稿についてはその連載を止め、Discussion Paper:『三菱航空発動機技術史——ルノーから三連星まで—— 第 II 部: ガソリン噴射, 水メタノール噴射技術の展開と三菱重工業』『三菱航空発動機技術史論——ルノーから三連星まで—— 第 III 部: 固定気筒空冷星型発動機の進化と三菱航空機・三菱重工業——モングースから金星ファミリーまで——』として一挙登載させていただきます。

3 つ合せて 1,100 頁程の長文となりますが、発動機技術史、日本の近・現代史に関心をお持ちの皆様には是非、御高覧下さい。

17) 竹内一雄・矢嶋 洋「トヨタ F1 エンジンの開発」『エンジンテクノロジーレビュー』Vol. 2 No. 1 2010 年、参照。排気系のチューニングについては Philip H. Smith/大塚二郎・梅宮弘道・林 巖訳『競技用エンジンの設計とチューニング』八重洲出版、1970 年 [原著 1967 年]、156 ~ 157 頁、中嶋泰夫・村中重夫編著『新・自動車用ガソリンエンジン』山海堂、1994 年、182 ~ 183 頁、石川義和『自動車用ガソリンエンジン設計の要諦』山海堂、2002 年、217, 218 ~ 219 頁、参照。

18) 中西晋一・水城 徹・執行英明「いすゞ 6TE1 型 V6 ディーゼルエンジンの開発」『エンジンテクノロジー』Vol. 3 No. 5 2001 年、参照。