

「試製的」航空発動機の技術：ライト,アントワネット,アンザニー

坂上 茂樹

Citation	Lema. 481, 79-91
Issue Date	2005-10
Type	Journal Article
Textversion	Publisher
Rights	このコンテンツは、「私的使用」や「引用」など、著作権法上認められている適切な方法にかぎり利用できます。その他の利用には、著作権者の事前の許可が必要です。

Self-Archiving by Author(s)
Placed on: Osaka City University Repository

「試製的」航空発動機の技術

—ライト, アントワネット, アンザニ—

On the Technology of Early Aeronautical Engines : Wright, Antoinette, Anzani

坂上 茂樹*

Shigeki Sakagami

はじめに—技術サブシステムの鼎立と技術進歩

航空機、航空発動機などを、その具体的構成要素として包摂する近現代技術の体系は構造技術、動力技術、制御・情報通信技術という三つの技術サブシステムからなる複合領域の相貌を呈している。個別アイテム自身も、内燃機関のようにある程度複雑なモノは、これらの技術サブシステムの複合体としての内部構造を有する。

総体としてあれ個別アイテムの消長としてあれ、技術進歩は鼎立する技術サブシステムの予定調和なき発展の結果として発現する。技術サブシステム間に大きなアンバランスを抱えたままの状態で、技術「進歩」ないしその成果の実用化が追求されるような社会情勢の下では、このアンバランスによって、時に悲劇的結果が招かれ、あるいは経済的破綻が準備される。原子力発電はその好例である。

社会的要請そのものが変化し、あるいはこのアンバランス自体が人智の投入によって解消に向かえば、当該技術の領域に相対的安定期が訪れる。しかし、各技術サブシステム内部における進化発展を調整する自律的機構は存在しないわけであるから、技術進歩は常に安定化要因と不安定化要因の非選択的産出過程としてしか実現されえない。不安定化を恐れている限り進歩はない。しかし、これに全く目をつぶってしまっては、無責任、没倫理の誇りを免れまい。

本稿ではガソリン機関、すなわち、近代機械技術の古典領域に一角を占め、主として航空発動機

および自動車用機関という分野で発展を遂げてきた動力技術の航空搖籃期における姿を、ライト、アントワネット、アンザニ発動機に尋ねてみたい。航空という領域は、機体にも発動機にも厳しい要求を課す分野であるから、技術サブシステム間アンバランスは往々にして奇怪な発現形態を呈する。本誌 No.478 ~ 480 で 3 回にわたって掲載した「回転気筒空冷星形発動機」などは、その最も極端な発現形態とするに足ろう。

さて、動力機械そのものもそれ自身の内部構造として、上記三つの技術サブシステムに還元せしめられるべき要素を包蔵している。この命題を語る時、ヨリ直截なのは速度形機関である。その設計は熱計算 (=エネルギー変換にかかる狭義の動力技術) と強度計算 (機械として“もたせる”ための構造技術) とに判然と区分されており、さらに実地の運転は、制御機構によって統括されている。

この基本構造は、容積形機関においても大局異なるものではない。ただ、その一つたるガソリン機関の発達史をひもといいていかにも歯がゆいのは、第一に混合気形成・分配機構 (燃料噴射ないし気化装置プラス吸気管系) および点火装置という、ボイラなどとの比較においてはもちろん、機関本体と比較してさえ極めて矮小な、しかも機能上、計量であるとか調時であるとかいった制御面を司る機器が動力発生原理の基幹に位置し、機関本体はむしろそれによって規定される発生熱量の限界の中で、最大の変換効率なり機構的健全性なり使い勝手なりを引き出すための“カラクリ”という、やや従属的とも取れる役割を担わされるという事実である。

第二に、くだんのクリティカルパートにしても“カラクリ”本体にしても、その作動様式がターピン機関におけるノズルや静動翼、回転体ほど理

* 大阪市立大学教授

Osaka City University, Prof.

詰めに開発され、発展し、今日に至っているわけではないという点が挙げられる。

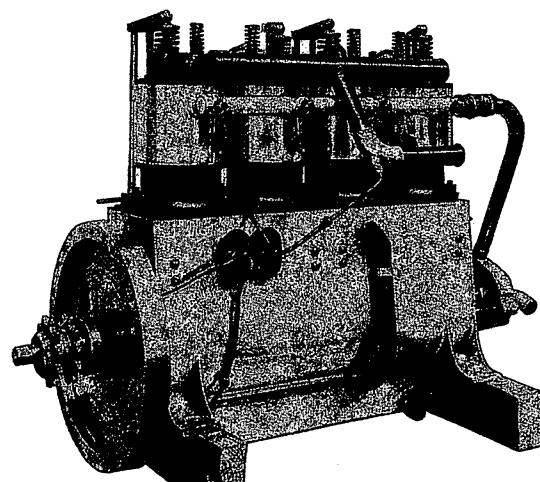
混合気形成・分配機構、点火装置の発達史は機関本体のメカニズム発達史に比べ、相対的に“隠微な”世界をなすがゆえに、ガソリン機関技術史の記述はここにはあまり深入りせず、性能比較をからめた大向う受けする勧善懲惡的・趣味的“カラクリ”談義に走りがちとなる。筆者とて、この混合気形成・分配機構、点火装置分野の技術発達史をふかんできるほどの知識と資料的裏づけを持っているわけではない。ただ、“カラクリ”談義におけるこの弊を幾つかでも回避するため、本稿では「試製的¹⁾」航空発動機の技術を可能な限り技術サブシステムの緊張関係の中に位置付け、さらに動力技術サブシステムの内部構造レベルでの問題として筋道立てるという姿勢を採りたい。

それは安定化要因と不安定化要因の予定調和なき産出過程としての技術進歩の実相を近現代技術の古典領域における具体的な事例に即して検証し、今という時代が位置する技術史的位相を解明するための一助にしたいと思う筆者なりの試みである。こんな悠長な作業の中間報告として、旧著『船用蒸気タービン百年の航跡——現代技術史の基本構造と日本技術のアイデンティティー』(ユニオンプレス、2002年)がある。参照していただければ幸いである。

1. ライトのオリジナル作品群

広く知られているように1903年12月17日、ライト兄弟は動力飛行のパイオニアとなった。ライト兄弟が自作した最初のガソリン発動機は燃料噴射装置、あるいはヨリ適切に表現すれば、おおむね定速で運転される産業動力用すえ付けガソリン機関に使われていたような燃料連続滴下・気化装置を有する機関であった²⁾。それは機関本体と同様、気化装置においても彼らが要求したような諸元を有する既製品を入手できなかつたために自製された作品であった。

この発動機に有効な出力制御装置はなかった。言い換れば、それは絶えず最大出力(MCR)で回り続けることだけを求められていた。しかし、機体をバンクさせながら旋回する航空機においては、旋回中、高度を維持しようとすれば、揚力の反重力方向分力を発生させねばならぬわけである。



諸元：4-111.13 × 101.60, 30 ~ 35hp/1200rpm. ラジエータ、冷却水を除く重量 81 kg. *Cyclopedia of Automobile Engineering*. Vol. IV. 1913. p.178, Fig.8.

図1 1907年ごろ設計され、'09年、機体に搭載されたライト発動機

から、発動機の出力制御は機に操縦性(制御性)を付与するための絶対条件であり、これを実現することが、飛行機実用化のためには至上命題となる。もちろん、さまざまな高度を取るためにも出力制御は不可欠である。

オービル・ライトは、この要請に応ずるための技術として、カム軸から駆動されるギヤポンプでガソリンを圧送する最初の方式を踏襲した。この目的で使用されるギヤポンプが、斯界でライト式燃料ポンプなどと通称されるゆえんである。オービルは既に自動車用、自動二輪車用機関の分野で有用性が証明されていた気化器では、高度変化に対処する能力を欠けると考えたのである。とは言え、1909年時点でも世界高度記録はわずか172mという水準ではあったのだが……。

それはともかく、彼が1912年ごろまで採用し続けたのは、ガソリンをギヤポンプによって吸気マニホールド屈曲部の“混合室”に圧送する途中にinjectorと称する一種のメータリングオリフィスを配し、機関回転数に比例した燃料供給量を確保する方式であった。従前どおり吸気絞りを行なう装置は存在せず、出力制御は燃料の絞り→回転数変動という形でしか果たされなかつた。これでは、制御範囲はごく限られていたであろう。

気筒は錆鉄で頭部一体、胴部のみアルミ製のジャケットを設けた水冷式。吸入は自動弁、出力制

御は当時のオートバイ機関のそれにならって、点火の停止または排気弁の啓開（デコンプ）によってなされたとも伝えられるが、これでは機関停止には使えても、細かい出力制御はできなかつたはずである。

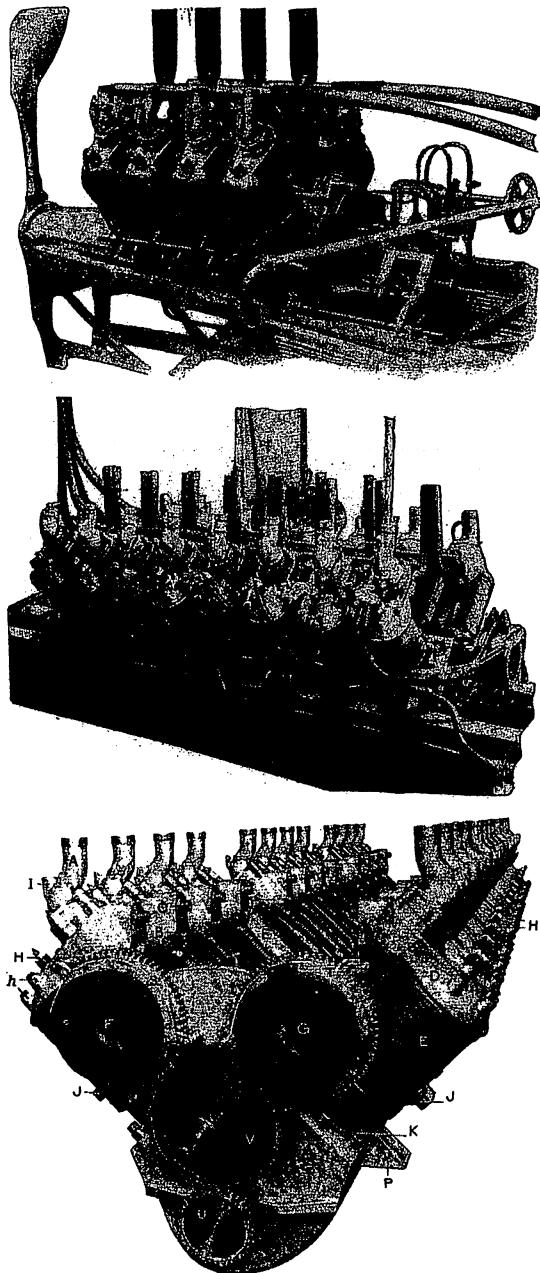
クランク室横にはすみ車側から潤滑油ポンプ、燃料ポンプが並ぶ。外部（右端）は水ポンプ。図からは判然とせず、筆者としては疑わしく思うのだが、ウォータージャケット下方の気筒壁には孔がうがたれていたという。これは排気・新気ポートとでも呼べそうなしろもので、ここからの排気吹出しにより排気弁の熱負荷軽減を図る一方、啓開後、弁孔から吹き出す本来の排気流れの慣性によって、この排気・新気ポートからの空気取入れを図ることで、膨張行程終わりから排気行程始めにかけてのガス交換を促進し、気筒、気筒頭回りの冷却を多少なりとも改善するという狙いを体現したモノであったらしい³⁾。

当時、こんな小細工をろうするメーカーが散見され、たとえば1909年のDarracq（仏）、「10年のGreen（英）機関にもそれがあった。ガストンによれば、次に述べるアントワネット機関には手動制御方式のそれがあった」という⁴⁾。当時、この程度の小細工で機関出力が向上する、というのが実態であったらしい。

しかし、オービルも1913年の設計より一般的な気化器方式に転換する。それは制御性を高めるために、そしてもちろん、自動車機関用、航空発動機用気化器の発達という時流を受け入れてなされた当然の改変であった。しかし、このオリジナリティの喪失以後ほどなく、斯界のパイオニアは第一線から身を引くことになる。

2. アントワネット発動機各種

1908年夏のル・マンにおけるライト兄弟のデモ飛行に刺激され、翌年企画されたドーバー海峡横断飛行にアンザニ発動機搭載のブレリオ機とともに挑んで敗れたアントワネット機にもまた、ある種の燃料噴射方式のV形8気筒50PS形アントワネット発動機が搭載されていた。90° V8をモジュールとしてアントワネット発動機はV形16、V形24、V形32気筒形へと展開した。左右バンクはオフセットされており、コネクティングロッドは一つのVユニットの2本を前後に並べた複傾



諸元：90° 8V-110×115, 資料によれば出力は原型の鋳鉄製バルブシート嵌入形鋳鉄製ヘッド付きの物が50PS、重量95kg, 1909年開発のバルブシート一体削り出し形落錫鋳造製ヘッド付き機関が55ないし60PS(重量不明)とある。いずれも回転数は表示されていない。写真は新形ヘッド付き。
 : 90° 16V, ポア×ストロークは同上と思われる。競技機に1～2基使用されたのみ。出力100PS。旧形ヘッド付き。
 : 90° 24V, ポア×ストロークは同上と思われる。旧形ヘッド付き。Aは吸気管、Bは排気口、Cは冷却水出口、Dはシリンドヘッド、Eは銅製カバーでおおわれた銅製シリンド、FGはディストリビュータ、Hは点火プラグ、hはヘッドボルト、Iは吸気弁上方の燃料入口、Jはオイル供給口、Kはシリンド固定ナット、STはディストリビュータ駆動ギヤ（原表記は「カム軸車」であるが、動弁機構のカムギヤは次に見るVであるため、このように表記する）、Uはクランクギヤ、Vはカムギヤ。
Cyclopedia of Automobile Engineering Vol IV, p.204, Fig.32, p.203, Fig.31, L.Baudry de Saunier, *L'AUTOMOBILE Th orique & Pratique* (1912?), Tome I- Le Moteur, p.457, Fig. 274.

図2 アントワネット発動機3例(90°V8, V16, V24)

斜（あるいは複偏差）を伴わない side by side 方式であった⁵⁾。

アントワネット発動機の燃料供給装置の概要については、たとえば：

燃料は、可変ストロークポンプにより、各気筒の頭部にある燃料だめに直接供給され、そこから隣接して付いている自動吸気バルブが開くたびに細かい霧状になって吸い出される⁶⁾。

とある。これは毎回転「噴射」と取れそうな説明である。その一方：

吸気弁は自動であり、各気筒独立のプランジャポンプが開いている弁に向けて燃料を直接に噴射するために用いられている。ポンプは偏心距離可変の偏心板によって駆動され、その行程は機関後部、操縦士の手が届くところにある手回しハンドルによって調節される⁷⁾。といった、やや詳しい、しかし、吸気行程噴射を思わせる説明がなされていました。ポンプはカム軸上の三次元カムによって駆動されたと思われるから「開いている弁に向けて」噴射した、すなわち、吸気行程噴射と解するほうが自然であるように思われる。

いずれにしても、Single Point Injection のハシリであるライト発動機より高級な、Multi Point Injection の古典的形態というべき機構である。当時のガソリン機関技術界においては各気筒間の混合気分配の均一化が難問とされており、これが確保されにくかったために機関のトルク変動ははなはだしく、回転はラフとなり、とりわけ列形機関においては、クランクケースおよびクランク軸に不必要と思われるほどの余裕強度を賦与せざるをえない状況が展開されていた。アントワネット発動機が、これほどまで多気筒化され得たという事実についての最も重要な技術的背景は、この MPI 方式の採用にあったと見て良い⁸⁾。

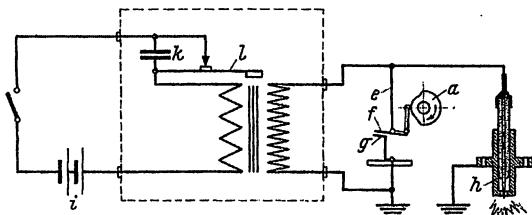
ライト発動機について「米國のライト式は鑄鉄の四圓筒を垂直に排列した水冷却發動機である。氣化はポンプでする。口徑四吋八分の三[111.1 mm]、衝程四吋[101.6 mm]、重量百八十封度[81.5kg.]、千三百回の回轉に對して三十馬力である」([内引用者]と素氣なく紹介した本邦初期民間飛行士の一人、武石浩波はアントワネットについては一転、次のように詳しく述べている。

飛行機の發動機として最も古き歴史を有すと同時に、水冷却裝置發動機を代表するものは佛國のアントアネット式である。八圓筒五十馬力が普通で、口徑 110 ミリ、衝程 105 ミリ、回轉度數千二百回、重量 190 封度[86.1kg.]、一馬力の重量三封度十分の八[1.72kg.]である。鋼鐵製の圓筒は相互に九十度の角をなして並んで居る。活塞は鑄鐵製で曲柄軸は四個の軸串を有し、八個の連接桿が之に連なって居る。冷却水はポンプ仕掛で銅製の水套に入り、熱したる水はアルミニウム製の放熱器に行く。曲柄房には區割があつて四個の分房になって居る。その底に減摩油を貯えて置きポンプで洩れなく給油する。氣化法には氣化室を用ひず、やはりポンプで之を行ふ。百馬力は十六圓筒で重量三百三十封度[149.5kg.]、一馬力の重量三封度十分の三[1.50kg.]を有する⁹⁾

アントワネット機およびその發動機を創案した設計者のレオン・ルヴァヴァッソールはパリのガスタンピード・マンジャン社の設計技師で、1903 年ごろからモータボート用の機関を設計してきた経験上、氣化器よりもこうした方式がヨリ高い信頼性を有するとの見解を抱くに至っていたようである。

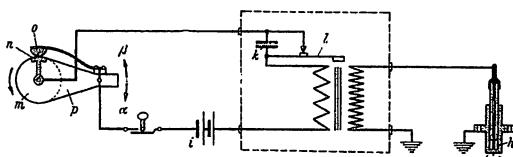
もう一つ、ルヴァヴァッソールの信頼性重視の現われと言えるのが、この V8 後期形發動機に「昇圧振動コイル」が採用されていた点である¹⁰⁾。ガソリン機関にとって、混合気形成・分配機構と並んで点火装置が決定的に重要である点については、冒頭に触れたとおりである。ライト発動機においては当初、低圧マグネットと電流断続（make and break）形点火器（燃焼室内で開閉する接点）とを組み合わせたシステムが用いられていたが、くだんの 1909 年形においては Mea 高圧マグネットの採用に至っている。本形式においては手動の進角/遅角動作に界磁が連動追隨するため、点火時期のいかんにかかわらず最大の起電力発生点を利用できる、という点が謳い文句で、往時は自動車用としてかなり知られた存在であった¹¹⁾。

アントワネット發動機に新たに採用された「昇圧振動コイル」とは、通常「振動子式点火法」（vibrator ignition system）ないし「バイブレータ回路」などと呼ばれる方式である。この方式は自動車由来の技術で、創案者は自動車の祖カール・ベンツその人であった。ベンツの 1886 年の第 1



F. Sasse. *Geschichte des Deutschen Verbrennungsmotorenbaus von 1860 bis 1918*. (1962). SS.121-122. Bild.59.

図3 1886年のベンツ三輪車に採用されていた
振動子式点火法の概念



F. Sasse. *op. cit.* SS. 263-264. Bild. 131.

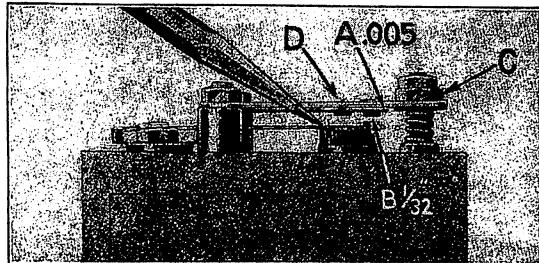
図4 1893年にベンツが開発した振動子式点火方式
号3輪車にはSummerzündung(ブザ一点火), す
なわち, ここに言う「振動子式点火法」が採用さ
れており, その開発は1885年にさかのばる。

その後, 1893年にベンツは「タイマ」を2次回路側から1次回路側に移した新方式に移行し, これが標準的な「振動子式点火法」として周知せしめられ, あるいは普及した¹²⁾.

なぜにかかる評価が形成されたのかについては, 考察してみる意味がある. 本方式の作動要領は, 最近まで広く用いられていたコンタクトブレーカーを有するバッテリ点火の原型とみなしうる. コンタクトブレーカ方式のバッテリ点火においては, コンタクトブレーカーが1次電流を断つ瞬間に高圧2次電流が誘導される (single spark system). これに対して「振動子式点火法」においては, 整流器 (timer) が接触片を通過するごく短い時間だけ1次回路が形成される.

点火コイルの1次コイルには振動子が付されており, これがブザーの振動板よろしく電磁的吸引と弾性振動により, この短い時間内に回路を高速で ($\sim 160\text{Hz}$) 断続する. これによって高圧2次電流がくり返し誘導される (succession spark system). それゆえ, 点火の確実性という面から見れば, 「振動子式点火法」に歩がある.

最も単純なシステムにおいては, 気筒数だけ振動子付き点火コイルが配された. 始動時にはバッテリを, 始動後ははずみ車組込みの低圧マグネットを1次電流起電力源とするT形フォード ('08)



調整法: バイブレータ (ここでは鉛筆を用いて) コイルの鉄心に押し付けた状態においてバイブレータの接点とクッションスプリング接点とのすきま (B) は $1/32\text{in}$ (0.79 mm) となるように調整ねじ (C) で調整. 部品としては, 一体供給されるクッションスプリングとブリッジ (D) とのすきま (A) 標準値は 0.005in (0.127 mm). その微調整はブリッジをクッションスプリング・リベットに当たる箇所 (D点) で軽く打撃することにより行なう. 振動中の1次電流平均値は $6\text{V } 1.3\text{A}$. 電流値を加減するにはバイブレータ支持部左端を軽く打撃し, あるいはこじ上げる.

Ford Motor Co. *Ford Service*. pp.239-240, Fig.504.

図5 T形フォードにおけるバイブレータ調整法

のシステムはこれであった. 後年, ロバート・ボッシュはバッテリ点火とマグネット点火を併用した二重点火装置を商品化しているが, そこでバッテリ点火に用いられた点火コイルは振動子付きのそれであった. ちなみに本システムは, ディストリビュータを使用する單一コイル方式であった¹³⁾.

しかし, 本方式は構造的に複雑であり, T形フォードの例を見ても, 正しくこれを調整する作業はなかなかめんどうであった. しかも最初のスパークで点火してくれなければ, 理論上, 面白いわけがない. それゆえ, single spark systemの信頼性が増し, 他方で高圧マグネットが進化した結果, 「振動子式点火法」はほとんどすたれてしまった. けだし, 当然の帰趨と言えよう.

蛇足ながら, 1920年代にはアマチュア無線用送・受信機の変調変圧器として自動車機関用点火コイル, とりわけこのT形フォード用振動子付き点火コイルの使用が奨励されていた. 変圧器の自作は決してむずかしい行為ではないが, そんなことに手間暇かけるよりほかに腕のふるい所があつたため, 小形で安価, かつ信頼性に富む本品の流用が好まれたのであろう.もちろん, この場合には調整ねじ (C) を一杯まで締め込み, 振動子を作動させないで用いたわけである¹⁴⁾.

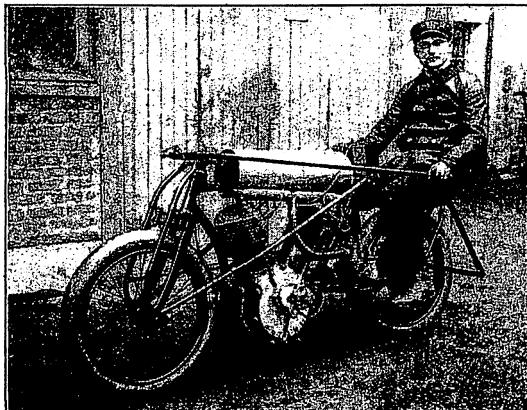
他方, 自動車機関用点火装置の分野からはまもなく退場した「振動子式点火法」であったが, レシプロ航空発動機界においては酷寒時の始動性確保のため, マグネットの大幅な遅角とスターティングバイブレータによる連続スパークの発生により,

ミスファイアの抑止を図る点火システムが現存する……と言うより、むしろその採用件数は増大してきたようである。もちろん、スターティングバイプレータであるから、発動機始動後は作用しない。よって熱効率うんぬんという点に障りはない。その意味でうまい遣い方である¹⁵⁾。開発者カール・ベンツももって瞑すべき、といったところであろうか？

3. アンザニの作品群

1909年7月25日、降雨を味方に付けてオーバーヒートを逃れ、ドーバー海峡横断初飛行の栄冠を巡ってアントワネット機にまんまと一泡吹かせたブレリオ11号機には、二輪車メーカー、アンザニの空冷発動機が搭載されていた。ただし、二輪車メーカーと言っても、アンザニの市販バイクについて筆者は寡聞にして知らぬので、ここではその「練習用モータサイクル」、すなわち、レーシングライダー養成用マシンなるしろものを紹介しておく。

ガストンは同社初の航空発動機は1908あるいは'09年開発の、そしてドーバー海峡横断飛行に

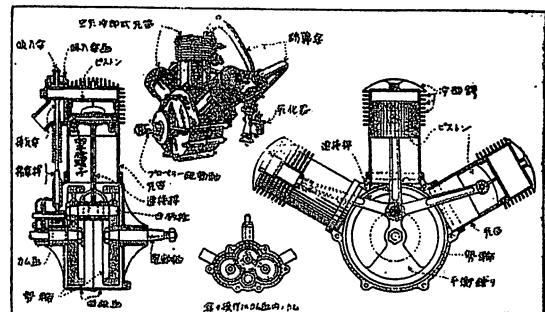


またがっているのはアレッサンドロ・アンザニその人。60°Vツインと思しき機関の出力は約20PS。吸気弁は自動弁。排気はポートから直接大気中に放出。ボア・ストロークは不明。化油器がこんな所に位置していると筆者はP47サンダーボルトを連想してしまうのだが、当時は前輪の上下動から逃れ、左右の振れを抑え込むために、これほど大きく後退したハンドルが必要であった。しかも当時は、適当なスロットルケーブルが得られなかつた。それでこんな場所に化油器を配して直接操作に及んだのであろう。

ついでながら、この約10PSという単筒出力は、第2次世界大戦直後までのオート三輪、大型バイク用4サイクル・サイドバルブ機関あたりにまで継承される値となる。

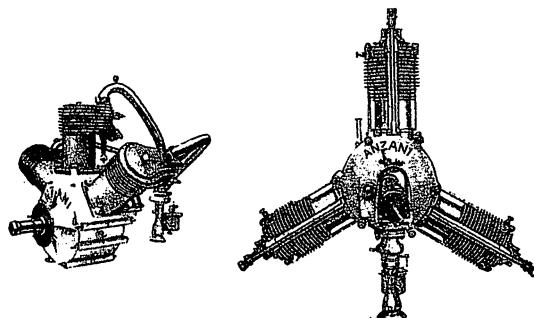
L.Baudry de Saunier, *L'AUTOMOBILE Thorique & Pratique*, Tome II - Le Chassis. p.384. Fig.280.

図6 アンザニの「練習用モータサイクル」



日本飛行学校『飛行機講義録（第壹卷）』五版 1930年 57頁 第二十四図、同『飛行機發動機講義』（第三卷 発行年不詳）57頁 第二十四図。富塚『内燃機関の歴史』初版～第3版 75頁、第4、5版 77頁 第3・19図と一部重複。

図7 アンザニ W形3気筒発動機



J. L. Nayler, E. Ower, *Aviation of Today*. (1930), 2B369. Pl.101.

図8 アンザニの W形3気筒、星形3気筒発動機

用いられた72° W形3気筒機関（105×130 mm, 出力 24PS/1600rpm, 重量 66 kg[うち26 kgははずみ車]）であったと述べている。わが国では、1910年10月30日、30 cmの浮揚に成功した奈良原三次の奈良原式1号機がこれを搭載していた。島津櫛蔵の手になる国産初の航空発動機（1911年）も、このアンザニ模倣機であった¹⁶⁾。

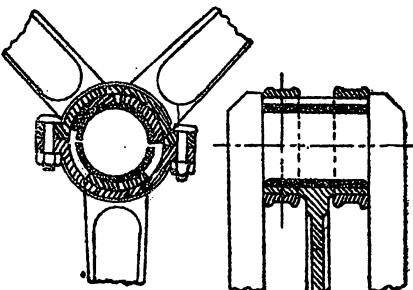
これでは不等間隔着火となるし、後述のとおり不つり合い慣性力も大きいから、巨大なフライホイールマスが必要であったのも当然である。ただし、前図のようにはずみ車と言っても、実体は外付けのそれではなく、ハーレーVツイン並みに2枚の円盤状クランクウェブに不つり合い重量が付与されたモノであった。また、クランクピン軸受部は、互いに若干ずつオフセットされた左・中央・右気筒のコネクティングロッド大端部が組立式クランク軸のクランクピンを抱く構造であった。これだと複傾斜はない反面、3気筒ともなればクランクピンが長くなり、組立式では剛性に不安を抱えざるをえず、出力増大には困難を伴う¹⁷⁾。

これに引き続き、アンザニは改良形として、こ

の 60° W形3気筒発動機を 120° に展開した星形3気筒30hp発動機を開発した。固定星形発動機としてはこれが世界初、そしてもちろん最少気筒数であった。この気筒配置であれば、等間隔爆発が実現される。

アンザニはこの3気筒固定星形を開発した時点で、その複列化を念頭に置いていたと見える。その思想は、クランク軸およびコネクティングロッド大端部の設計から読み取れる。図に示されるように、大端部はスリッパ形で、主/副連桿の区別はなかった。クランク軸は一体形でクランクピン上に半割のメタルを被せ、三つのロッドのスリッパをその上に載せ、半割のキャップでその全体を包み込む構造であった。図からはキャップ内面とスリッパ外面との摺動部には、特別な減摩材は配されていなかったように見える。ともかく、この方式であればクランクピンを短く、かつ、全体を一体鍛造品とすることによりクランク軸剛性を確保しやすく、かつ複傾斜もない。

実際、アンザニはこれをベースに複列星形6気

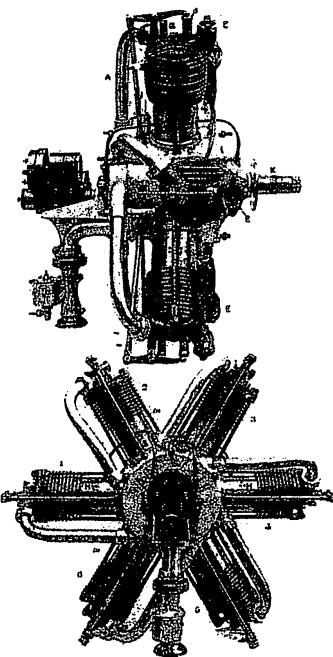


日本飛行學校「飛行機發動機學講義」101頁第四十八図。

図9 アンザニ星形3気筒機関のクランクピン回り

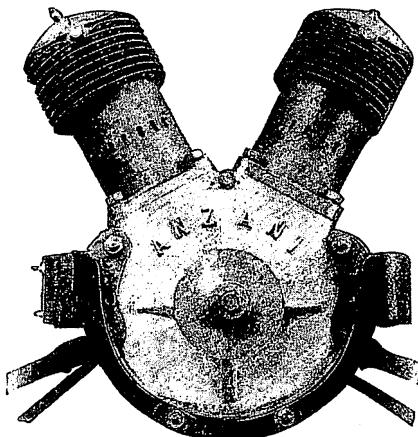
筒、複列星形10気筒、4列星形20気筒といった航空発動機を次々と開発した。筆者が知る限り、それらには皆、化油器が用いられている。W形に類似の扇形発動機としてM.A.B.（伊）4気筒、R.E.P.（仏）5気筒、複列扇形7気筒、Farcot 6気筒（仏）などが知られている。このうち、最後のメーカーは豎軸星形8気筒（X形4気筒を二重化したもの）にも展開した。しかし、いずれもアンザニほどメジャーな存在とはならなかった¹⁸⁾。

図10の複列星形6気筒発動機の気筒胴には、冷却フィンの下に多数の孔が帯状に分布している。また、研究用か？と思われるVツイン発動機においても、一列のまゆ形の孔がうがたれている。



宣文文句としてブレリオ機の25馬力機関以降、1200基のアンザニ機関が製造され、飛行家の75%はアンザニ航空発動機を搭載した練習機のお世話になっている、とある。吸気は自動弁、マグネットはボッシュ製である。2本のテンションボルトで極めてアッサリ留められている様子から見て、ヘッドとシリンダバーレルは一体であろう。また、シリンダ冷却フィンは焼きばめか？ L.Baudry de Saunier, *L'AUTOMOBILE Th orique & Pratique*, Tome II- Le Chassis. p.328. このほか、日本飛行學校前掲書いすれも59頁第二十六図参照

図10 アンザニの複列星形6気筒機関



この機関の冷却フィンは多数の孔を開けた鋼板にシリンダを圧入する方法で調達されたものである。

Cyclopedia of Automobile Engineering. Vol. IV. p. 212, Fig.40.

図11 アンザニの（研究用？）Vツイン発動機

これら掃気ポートのような孔はもちろん、ライト以来（？）の補助排気ポートである。まさしくそれは、アンザニ発動機を生み出した“経験的内燃機

関技術の世界”の象徴であった。

しかし、アンザニの作品はいずれも小出力の、主として練習機など、軽飛行機向けの発動機であった。そもそも放熱性の良いアルミ合金製シリンダヘッドおよびヘッド回りの通風を制御するリングないしカウリングの類が開発導入される以前、冷却を飛行速度に依存する固定気筒空冷発動機においては、気筒あたり出力がごく低いところに抑えられざるをえなかった。第1次世界大戦前においてはせいぜい 10PS 程度が上限で、アンザニの複列星形 10 気筒発動機でも、出力は 110PS 程度であった。単筒出力 10PS と言っても、バイク機関と比べれば航空発動機は負荷率が格段に高いから、条件は格段に厳しかったはずである。

機速を増そうとすれば 3 乗則が教えるとおり出力を激増させねばならぬから、固定気筒空冷航空発動機は当時、抜き差しならぬ境涯に置かれていた。アンザニ発動機の吸気弁が自動弁から機械的制御弁に切り替えられたのは、第1次世界大戦末期であったという。これは同社の退廃性の証と言えりは、固定空冷を取り巻く技術的状況のしからしむるところであった。

4. 「試製的」航空発動機の技術

20世紀初頭の航空発動機界は、多様なアイデアとそういったモノの出現を促した根本要因たる技術の未発展状況とに彩られた「個性の時代」であった。先陣を切ったライト発動機は制御性の不備、重量過大（比出力過小）といった欠点が目に付き、アントワネット発動機においては、メカ倒れ=機械的信頼性の不足という問題を抱えていた。アンザニの弱みは、なにをおいてもその低出力にあった。混合気分配の不均一による不齊燃焼とこれに起因するトルク変動を抑止する手立ては、これらのパイオニアたちによっては見いだされていなかった。

当時の内燃機関の吸気弁は、ガス流動損失の大きい自動弁であった。自動弁は単純幼稚、時を移さず陳腐化する技術、程度に捉えられやすい。この評価自体が、誤りというわけではない。しかし、事態は次の文章に示されるように今少し深刻であった。

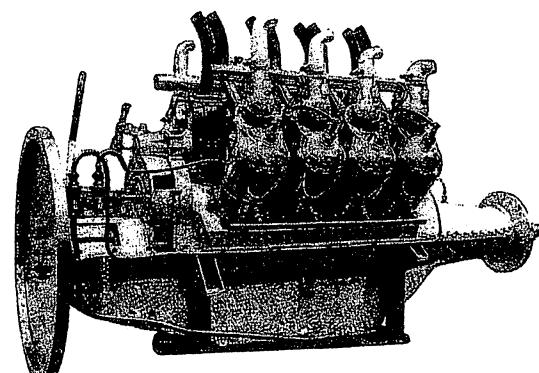
……自動吸収弁式の機関に於て、發條が餘りに強いと吸収作用が完全に行はれない、さりとて、餘りに弱いと、閉鎖が確實に行はれない。更に、複氣機関に於て、各氣の自動

吸収弁の發條の弾力が整一で無いと、機関の廻轉は不整となる、それ故、自動吸収弁の發條の調節は機関の取扱上最も大切なことである¹⁹⁾。

混合気分配の不整は過大なトルク変動を招来し、発動機および機体の損傷の原因となる。この意味において自動弁は簡易な見かけに似合わず、たいへんデリケートな扱いを要求する危険なメカニズムであった。ガソリンのトルエン価とかオクタン価といった性質さえ認識されていなかった時代背景ゆえ、このころの無過給航空発動機の圧縮比は軒並み低かっが、多くは吸気をこの気まぐれな自動弁に頼っていた。そんな航空発動機に、円滑な運転を望むことなどできはしなかった。

もう一つ、これらの発動機に共通したのが、気筒配置から生ずる力学的振動の問題である。直列 4 気筒 180° クランク式のライト発動機においても、同じ 180° クランクを有した（としか考えられない）V 形 8 気筒のアントワネット発動機においても、不平衡慣性力による 2 次振動が固有の問題として存在していた²⁰⁾。

60° W 形 3 気筒のアンザニ発動機においては、主運動系の不つり合い（不平衡慣性力）による 1, 2, 4, 6, 8, 10 次の振動が付いて回り、同 120° 星形 3 気筒発動機においても、複傾斜がなかったとは言え 2 次慣性力は残った。しかも 5 気筒以上の星形とは異なり、その大きさは一定しなかった（クランク角 120° ごとに極大化）。いずれの場合にも、4 次以上の高次振動は実用上問題外であるが、低次の振動ははなはだしかったと思われる。180° クランクを有する複列星形発動機においては各列の 2 次慣性力が反対方向に作用し、2 次慣



Cyclopedia of Automobile Engineering, Vol. I. p.125. Fig.43.

図 12 フライホイール付きのアントワネット発動機

性偶力を生ずる。アンザニの複列星形6気筒発動機は複傾斜がなかったうえ、前後列間隔が非常に近接していたため、2次慣性偶力自体は小さかつたはずであるが、各列の2次慣性力の脈動を考慮に入れれば、決しておとなしい発動機であったとは思えない。元より当の開発者たちが、これをどこまで科学的に認識していたかは不明である²¹⁾。

なおまた、初期の航空発動機の多くにおいては、混合気分配不均一、気筒配置およびクランク軸形式に固有の振動以外にも、設計・工作不良に起因する振動がはなはだしかったと思われる。ライト発動機やアンザニの3気筒発動機における巨大なフライホイールマスは、振動をともかく軽減したいという切なる思いの現われであったと解釈される。60PS形のアントワネット発動機には、振動子式点火装置導入と並んではずみ車が新設されたと伝えられている。これではせっかくの美人も台なしであるが、わざわざ重量増加を招くような改変が行なわれた狙いも同根、機関の前後にプロペラとこののはずみ車という二つのマスを配し、横振動やクランク軸のねじり振動、トルクの脈動などを抑え込むというところにあったろう²²⁾。次の文章に示されるように、発動機の振動は、この航空の黎明期における最も深刻な問題の一つであった。

振動の効果は微なる時間に反覆作用する撃力に等し。飛行機に於て鐵線緊張の度に強弱不同ある時は振動の爲、弱き部分は忽ち弛緩し、振幅はいよいよ愈大となり、十分に緊張せる鐵線のみに全作力を受け遂に切断するに至り切断は漸次他に及ぶものなり。計算上十分に安全率を有する鐵線および螺桿等、^{しばしば}破断することあるは皆振動の結果に依るものにして實に振動の効果は豫想以上にあり。……

……飛行機に於ける振動は主として發動機運転の際の反動に因り生ずる者にして、發動機の平衡不良なる時は振動は益々大となるべし。是れ發動機の選定上最も注意すべき點にして其の試運転に於ては單に馬力および回轉數のみならず振動の大小も厳密に審査するを要す。當今、製造家は發動機の平衡問題に特に留意し、既に發動機内回轉體の重心位置を不動ならしむる爲、特別の装置を施すものあり²³⁾。

そうは言っても當時、振動問題の解決は容易ではなかった。だからこそ、水冷航空発動機の設計者

は一方で重いはずみ車に頼りつつ、ライトのように、熱負荷の小さい部位にアルミを導入することによって「軽量化」を図り、あるいはルヴァヴァッソールのように、耐久性・信頼性を犠牲として「高い」短時間最大出力を狙うべく複雑精緻な技巧に、あるいはV8を単位とする多気筒化に走ったのであり、空冷時代のアンザニは小出力の練習機用発動機に活路を見いだすしかなかったのである²⁴⁾。

同時代の航空発動機の中では優れた耐久性で聞こえた'09年形ライト発動機の野暮ったさは、独創的な'03年形機関の開発やプロペラの性能に関する幾多の基礎実験にもかかわらず、兄弟が「自分たちのエンジンを彼らの飛行機の付属品以上のものとは見なさなかった」(ガントン『航空ピストンエンジン』138~139頁)というスタンスを堅持した事実の現われであったように見える。

彼らは不安定な大気中を自在に飛行するためには、固有安定性を持たない機体を制御装置たる人間の能力をフルに動員して、絶えず制御し続ける操作法が不可欠であると考えた。彼らの最大の独創性は、この事実誤認と紙一重の命題の中にこそ発揮されていた。

しかし、機体の固有安定性の有無にかかわらず、飛行機が一定の実用度を確保した段階において、航空機には機体(構造)技術、動力技術ならびに制御技術のヨリ高度なバランスが要求されるようになる。なかんずく発動機の出力、比出力および制御性は、飛行機そのものの運動性能を決定的に左右する。航空機において発動機は、単なる一部品ではない。航空発動機技術は、機体構造技術との絶えざるせめぎ合いを通じてのみ発展する。その出力、比出力、燃費、潤滑油消費率、振動特性、耐久性、整備制などにかかわるヨリ高度な妥協点の開拓を求めた努力が始まる。

残念ながらルヴァヴァッソールは、1909年に斯界から消えた。オービル・ライトもほどなく技術史の前景から退き、1916年にはイスパノ・スイザ(仮)水冷航空発動機のライセンシーたるべくライト・マーチン社が設立された。斯界のパイオニアの一人アンザニは両名とは対照的にW形から出發し、固定気筒空冷单列星形、同複列星形、同4列空冷星形など、意欲的作品を世に問ひ続けた。しかし、彼は永らく固定空冷の途を歩み、水冷への転換においては失態を演じてしまった。その事業

は1926年、ポテーズ (Potez) 社に吸収され、先覚者アンザニは指導的ないし先導的存在に成りえぬままに終わった。

彼らに続く次世代の航空発動機設計者たちに引き継がれた使命は、さしあたり大出力化、振動の低減および制御性の向上であった。だが、空冷発動機の気筒頭に放熱性の良いアルミ合金を採用して、気筒あたり出力を増大せしめようにも、気筒胴との結合法や弁座環の材料およびその嵌入法についての目処はなにも立っていなかった。このような状況下、一挙に開いたあだ花、それが、かの回転気筒空冷星形航空発動機であった。

注)

- 1) この言葉は、富塚清『航空原動機』(工業図書1936年) 9頁から借用した。
- 2) 富塚清『内燃機関の歴史』三栄書房 初版(1969)、第2版(1978) 105, 305頁、第3版(1982) 105, 313頁、第4版(1984)、第5版(1986) 107, 327頁、ガンストン (Bill Gunston) 川村忠雄訳『航空ピストンエンジン—そのメカニズムと進化』(原著1993年 邦訳グランプリ出版1998年) 133, 136～138頁、ガンストン/見森昭・川村忠雄訳『世界の航空エンジン ①レシプロ編』(原著1995年 邦訳グランプリ出版1996年) 211～213頁参照。
- 3) *Cyclopedia of Automobile Engineering*. Vol. IV. Types of Aeroplanes, Aeronautical Motor, Building and Flying an Aeroplane. Chicago, 1913. pp.177～180, 補助ポートうんぬんについては, J. L. Nayler, E. Ower, *Aviation of Today*. (1930) pp.369-370 参照。なお、Ch. XVI Aircraft Engines (pp.362-399) の執筆者は W. J. Stern.
- 4) ガンストン『航空ピストンエンジン』144頁参照。
- 5) アントワネットのように1個のクランクピンを複数の連桿が同心的に抱く場合、各大端部の位置はクランク半径と角度のみにより決定される(単傾斜)。この方式は構造は簡素だがクランク軸が長くなる。他方、主連桿大端部に設けたリストピンを副連桿がつかむ関節式連桿の場合、主連桿、特にその大端部が重くなる反面、短いクランクが実現できる。
- しかし、関節式連桿においては副連桿大端部の位置は上記に加え、気筒軸線と主連桿軸線とのなす角度、クランクピン中心から見た主連桿軸線と当該リストピンに至る半径とのなす角度、クランクピン中心とリストピン中心との距離によって決定される(複傾斜)。この複傾斜のため、各副連桿および当該ピストンの運動(移動の軌跡・移動距離・加速度)および各気筒圧縮比に不同を生じたり、主気筒にそれ以外の気筒のガス圧が側圧として作用したりする。また、複傾斜はそれ自体が2次慣性力の発生源となる。もっとも、第5節で触れられるように、アントワネットV8発動機にとっては、複傾斜に伴う2次振動が発生しないことなど気休め程度の長所に過ぎなかった。
- アントワネットV8およびV16気筒発動機の機体搭載写真については、B. B. Mackworth-Praed-Praed. AVIATION The Pioneer Years. 1990. p.139を参照のこと。前者は'08年のもので旧形ヘッド付きだが、後者は'10年のもので新形ヘッド付きとなっている。なお、本文でも述べたとおり、アントワネット発動機には32気筒まで存在したとも伝えられるが、その詳細については不明。
- また、ブレリオ機とアントワネット機にまつわるヒューマンエピソードについては、佐貫亦男『航空情報別冊 空のライバル物語—死に絶える者と生き残る者—』(酣燈社1971年) 37～60頁参照。
- 6) ガンストン前掲『航空ピストンエンジン』141頁(傍点筆者)。
- 7) *Cyclopedia of Automobile Engineering*. Vol. .p.204(傍点筆者)。
- 8) J. L. Nayler, E. Ower, op.cit.. pp.364-365,367. ただし、アントワネットの燃料噴射システムをもってしても均一な混合気分配を得ることは困難であったから、後にこのシステムはすたれてしまったのだ、と述べる文献もある。Cf. Aircraft Engines — A Brief Historical Outline of Their Development. Automobile Engineer. Oct. 1935.
- 9) 『武石浩玻遺稿 飛行機全書』政教社 1913年 [執筆は1911年] 129～130頁。ルビ省略。
- 10) ガンストン『世界の航空エンジン ①レシプロ編』21頁。
- 11) *Cyclopedia of Automobile Engineering*. Vol. I. *Explosion Motors, Gasoline Automobiles*, Chicago. 1913. pp.74-75.
- 12) ちなみにこのシステムは W. W. Beaumont MOTOR VEHICLES and MOTORS Their Design

- Construction and Working by Steam Oil and Electricity* (1900)において紹介され、さらに L. Marchis. *Les MOTEURS A ESSENCE POUR AUTOMOBILES* (1904).にも同書から引用紹介されている (p.253, Fig.111). また、たびたび参考している *Cyclopedie of Automobile Engineering* も Vol. I, p.149 に高圧点火システムとしてこれを図解している (Fig.64). F. v. L w. *Das Automobil sein Bau und sein Betrieb.* (1912)においても、本システムは Batteriez_ndung のヨリ確実な形式として説明・図解されている (SS.168-173, Abb.129).
- 13) 「振動子式点火法」全般について簡単には菊地五郎『自動車工学』(岩波書店 1938 年) 676 ~ 682, 693 頁参照. T 形フォードのそれについては、Ford Motor Co., Ford Service. Detroit. 1925, pp.239-240, R.T.Nicholson, *The Book of the FORD.* 5th. ed. London. 1920, pp. 82-83, 151-162, 208-213, 日本フォード自動車(株)『フォード自動車部品型録』(1925) 42 ~ 43 頁参照. ロバート・ボッシュの二重点火システムについては、H. G_ldner. *Das Entwerfen und Berechnen der Verbrennungskraftmaschinen und Kraftgas-Anlagen Dritten.Aufl.Rerlin.1922*, SS. 334-336. Fig. 648 参照.
- 14) 中川昌雄『實用 無線電話の話』大阪毎日新聞社 1925 年 57 ~ 58, 131 ~ 133, 135 頁参照.
- 15) これについては川端清一『航空工学教室 ピストン発動機』(鳳文書林 1978 年) 349 ~ 350, 426 ~ 427 頁, 横山直行『私の整備ノート 航空発動機』(日本航空技術協会 1981 年) 31, 34 ~ 35, 43 ~ 45, 47, 48, 50, 54, 55 ~ 57, 59 ~ 60, 64, 65 ~ 74 頁, 江守康一『航空用ピストンエンジン』(日本航空技術協会新航空工学講座 6 1991 年) 172 ~ 175 頁参照.
- 16) ガンストン『世界の航空エンジン ①レシプロ編』21 頁. わが国ではアンザニ 25hp などと通称されている.

島津の事蹟については島津楳蔵「航空エンジンの国産と森田新造のこと」(日本航空協会『日本民間航空史話』1966 年所収), 出水力「国産ガソリン機関開発の先駆者・島津楳蔵」(『科学史研究』II, 21 [1982 年]) 参照. 島津自身は「アンザニ一型を少々拡大して、三五馬力の製作に着手……」と述べ、出水は「コピー」としている. いずれにせよ実機での飛行には単簡不発で失敗した.

奈良原式 1 号機の飛行失敗は発注したグノーム

50hp ではなく、誤ってこのアンザニ 25hp が到着、やむなくこれを装備したため. 奈良原はこの失敗を「これがかえって滑走練習になった」と前向きに捉え、翌'11 年 5 月 5 日、グノーム付きの奈良原式 2 号機にて国産機初飛行に成功した. 伊藤音次郎「奈良原式鳳号」(別冊航空情報『統・日本傑作機物語』酣燈社 1960 年所収 [別冊航空情報『日本傑作機開発ドキュメント 設計者の証言 (上)』酣燈社 1994 年にも「奈良原式 1 ~ 4 号鳳号」としてほぼ再録]). 奈良原、島津の当時の事蹟については日本航空協会『日本航空史 明治・大正篇』1956 年 27 ~ 28 頁参照.

- 17) 武石は「アンザニ式の中には種々あるが三圓筒、三十馬力、空氣冷却の種類が多く知られて居る. 口徑百五ミリ、衝程百三十ミリ、節動輪を合はせて重量百四十三封度 [64.8kg.], 一分間に千六百回の回轉度数である. この三圓筒は昨年迄は二十五馬力であったのが更に改良されて力を _ すに至ったのである」と述べている(『武石浩波遺稿 飛行機全書』129 頁). 星形とも Y 形とも述べていないから、多分、くだんの W 形に改良が施されたのであろう. この文章の脱稿は 1911 年 4 月である.

一般に W 形発動機の長所は、剛性の高い短いクランク軸を用いて多気筒化しやすい点にある. それゆえ、後年の W 形 12 ないし 18 気筒発動機においては、主連桿の重量や 2 次振動には目をつむって分割式大端部を有する関節式連桿を用いた複傾斜を伴う機構が普及した(一般論としては神蔵信雄『航空發動機の設計』工業図書 1936 年 194 ~ 195 頁, 富塚清編『航空發動機』共立出版 1943 年 515 頁, 神蔵『高速ガソリンエンジン』丸善 1960 年 261 頁参照).

後年のネピア(英)“ライオン”, ローレン(仏)“12E 系”, “18K 系”, イソタ・フラスキーニ(伊)“Asso 1000 系”がこれを用いており、イソタの“Asso 750 系”, “Asso L180IRCC 系”, ファルマン(仏)の“12WK”なども、これに準ずるようである.

1917 年に開発され、船用も含め長く製造されたネピア“ライオン”とローレンについては内丸第一郎『内燃機関(後編)』(改訂版)丸善 1931 年 815 ~ 824 頁, 折込第 733 図, 小川清二『航空發動機工學(改訂版)』河出書房 1944 年 174 ~ 175 頁, 同『航空發動機(改訂版)』同社, 同年 上巻 300 ~ 311 頁, 中巻 217, 238, 241 頁参照.

なお、ガントンは海軍広工廠が 90 式、91 式発動機をネピア“ライオン”から派生させたとしているが、誤りである（『世界の航空エンジン①レシプロ編』105 頁）。広の技術的基盤は 1920 年ごろに開発された V 形 12 気筒のローレン “12Db” の導入にあり、W 形への転換にあたっても基盤はこれであった。もちろん、1922 年に開発されたローレン “12Ed” 450 馬力は大いに参考にされたと考えられる（日本機械学会『日本機械工業五十年』1949 年 1040 頁、日本航空学史編集委員会『日本航空学史 1910 - 1945』丸善 1990 年 234 頁参照）。このローレン 450 馬力発動機については中島飛行機が'24 年に製造権を購入、'30 年には愛知時計電機でもライセンス生産が開始された。

また、富塚は「以前回転式機関や Lorraine の W 形機関等で slipper 型を使ひ、全部の連杆がピンの中心に向けて作用する様にした例があるが、重くなり信頼性に乏しいので今日は誰も顧みる者はない」（『航空原動機』68 頁）、と述べている。そう即断に「誰も顧みる者はない」などと言われては、戦後の三菱 24WZ 魚雷艇用ディーゼルの開発者も浮かばれまいが、ローレン “12E 系” 450 馬力は同社最初の量産 W 形発動機であった。そしてこれには関節式連桿が採用されていた。富塚の語るスリッパ形連桿の事例は'20 年ごろ同社で試作された W 形発動機に関係するモノかと思えぬこともないが、かなり不自然な記述ではある。

日本海軍が先次大戦中、船用 “Asso 1000” を導入し、魚雷艇用 71 号 6 形内火機械として量産を図り、340 基ばかり製造した曰くがあるためか、イソタ機関の構造についてはかえってよく知られていない。日本造船学会『昭和造船史（第 1 卷）』原書房 1977 年 678 頁「第 16 図 艦本式 71 号（ガソリン）機械」はその構造をうかがうことができる貴重な断面図である。なお、小川によれば、イソタは V 形発動機にも関節式連桿を採用していた（『航空発動機（中巻）』11 頁第 225 図）。

イスパノ・スイザ（仏）は三菱航空機でもライセンス生産されたその令名高い V 形発動機に複傾斜を伴わない²⁺²叉状形（ただし長尾不二夫『第 3 [2] 次改著 内燃機関講義（上巻）』養賢堂 1967 [’56] 年 356 [325] 頁 図 6・64 [6・42] (A) 型の）連桿を用いていた。このイスパノも一時期、W 形 12, 18 気筒発動機を開発製造している。このうち、W

形 12 気筒発動機は、1924 年に三菱航空機でも 1 基製造されたが連桿構造は不明。

- 18) ガントン『航空ピストンエンジン』143 ~ 144 頁、『世界の航空エンジン①レシプロ編』21 ~ 23 頁参照。ただし、単列で 5 気筒ともなると 3 気筒張りの同径スリッパでは回転に伴い干渉が生ずる。この問題に後年のル・ローンのような異径スリッパ/異長連桿が用いられたのか、主/副連桿を組み合わせる通常の方式で解決したのかについては不詳。多分、後者であろう。
- 19) 金井武一『飛行機之實地設計』日本飛行研究會 1915 年 附録「發動機の故障及修繕法」50 頁。
- 20) 周期的に変化する振動現象は、三角関数を用いて解析される。振動の次数の表現において“n 次振動”とは当該の振動を表す関数をテーラー展開した際、クランク回転角度 θ に対して $\sin/\cos n\theta$ を含む項として表わされる振動成分。直列 4 気筒機関の場合、上下 2 次振動が、180° クランク式 V8 機関の場合、左右 2 次振動が問題となる。中西・西脇・梅津『發動機の力學』365 ~ 366, 373 ~ 376 頁、富塚編『航空發動機』329 ~ 330, 334 ~ 336 頁、日本機械学会『自動車（上巻）』（1950 年）104 頁、第 5・4 表、神藏『高速ガソリン機関』148 ~ 149, 154 ~ 155 頁参照。『熱機関体系 2（基礎理論Ⅱ）』山海堂 1956 年 12 ~ 20 頁などのほか、八田桂三・浅沼強編『内燃機関ハンドブック』朝倉書店 1960 年、古浜他『エンジンの事典』朝倉書店 1994 年などにも理論的、体系的な記述が見られる。
- 21) W 形 3 気筒については、さすがに文献が限られる。中西不二夫・西脇仁一・梅津喜代治『發動機の力學』（『内燃機関工學講座（第 2 卷）』共立社 1936 年所収）381 ~ 382 頁、富塚編『航空發動機』343 ~ 344 頁、前掲『内燃機関ハンドブック』296 頁、表 3・1・26 参照。3 気筒に始まる星形発動機については神藏『航空發動機の設計』127 ~ 131 頁、中西・西脇・梅津『發動機の力學』387 ~ 393 頁、山海堂『熱機関体系 2（基礎理論Ⅰ）』20 ~ 25 頁、神藏『高速ガソリンエンジン』144 ~ 146, 151 ~ 155 頁参照。なお、富塚編『航空發動機』の当該部分（343 ~ 344, 350 ~ 351, 354 ~ 355 頁）は実質的に『發動機の力学』の再録であるが、複列星機発動機の 2 次慣性偶力に関する 355 頁の式に再度誤植があり、正誤表によって訂正されて

- いる (a ではなく d).
- 22) アントワネットについてはガンストン『世界の航空エンジン①レシプロ編』21頁参照.
 - 23) 陸軍省発表「武石氏墜落原因取調報告」(『武石浩玻遺稿 飛行機全書』所収の「京阪都市聯絡飛行記事」) 185 ~ 186 頁. 句読点を挿入し, ルビの大半を省略.
 - 24) 当時の航空発動機が, 耐久性と引き替えに「高出力」を実現していた状況について富塙はランチエスターの推定を紹介しており, ここに取り上げた「試製的」航空発動機の中ではアントワネットの数値がサンプリングされている。「内燃機関史」(共立社『内燃機関工学講座』第1巻 [1936年] 所収) 61 ~ 62 頁, 『内燃機関の歴史』初版~第3版 77 頁, 第4, 5版 79 頁参照.