

経過点としてのハイブリッド—歴史屋の眼

Hybridsystem as a Transitional Technology

坂 上 茂 樹*

Shigeki Sakagami

1. は じ め に

自動車用原動機の発展には、だれしも瞠目させられざるをえまい。乗用車用ガソリンエンジン(GE)を見るに、ひところ、排出ガス対策に追われる印象を否めなかったが、その一段落とともに、大排気量・多気筒化の波が押し寄せ、さらには可変制御など、いわゆるハイメカが玄人受けする技術と並んで矢継ぎ早に、所狭しと詰め込まれる時代が始まった。

機械式連続噴射を源流とする戦後派のガソリン噴射は電子式制御方式に途を譲り、後者は毎回転同時噴射、グループ噴射、独立噴射へと進化した。最近では80年代後半、しきりに研究された2サイクル筒内噴射方式への中間段階とも位置づけられるべき4サイクル筒内噴射方式GEが相次いで国産化された。

乗用車用ディーゼルエンジン(DE)においても電子化が進み、燃料噴射からEGR制御へと展開している。昨今は直噴化、ハイメカ化が注目の的である。

直噴化、排気量増大と過給、給気冷却による出力向上、燃料効率改善による b_e 向上が進められてきた商用車用DEに関しても、長期目標と称する排出ガス対策によりやく目処が付けられ、電子制御化されたコモンレール方式やユニットインジェクタなど、従来、この国の自動車技術界には馴染みのなかった技術に脚光が当てられる結果となっている。遠からず、これらの技術的成果を踏まえたターボコンパウンド方式のトラック用DEが国産化されることであろう。

また、以上とは別にパラレル方式のGEハイブリ

ッド、同方式のDEハイブリッド、パラレル方式、シリーズ方式、ならびに制動エネルギー回生方式の電気式・機械式DEハイブリッドという各種のハイブリッド車が提案されている。巨視的に見れば、ボトミングを含むエンジンの改良と電気エネルギーへの変換という手続きを併存ないし介在させる行き方とが、自動車推進システムとして初めて正面から対峙させられた時代、それが現代である。ここでは、乗用車用原動機のこれからを、内燃機関技術史の眼を通して眺めてみたい。

2. 技術進歩の常道(1) 航空発動機の歴史から

内燃機関ハイメカ化の先達は、なにを措いてもかつての航空発動機である。これらはデトネーションの関係でシリンダ径に、ピストンスピードの関係で行程および回転数に制約を受けたため、大出力をめざすには多気筒化の途を歩まざるをえなかった。それでいて軽小性を保たねばならぬわけである。部品の頻繁な交換、使い捨てなどレーシングエンジンと同様の運用形態を前提とする限界設計の塊、それが航空発動機であった。

空冷星形における多気筒化の雄は、1942年にP&W社が開発したR 4360“ワスプ・メジャー”すなわち、二重星形14気筒をタンデム化した28気筒3500 PSエンジンであろう。おそらく本機は先次大戦中実用域に達した航空発動機として頂点に立つ。

空冷星形でこれと並ぶ成果は1949年にカーチス・ライト社が試運転に成功したR 3350系“ターボサイクロン”二重星形18気筒ターボコンパウンドエンジンである。ベースはB 29の心臓をなしたターボチャージャー(TC)付き2200 PSエンジンであったが、戦後TCをパワータービンにすげ替え、機械式過給を施し、最終的に“ワスプ・メジャー”

* 大阪市立大学教授
Osaka City University, Prof.

を上回る大出力エンジンとなる。本機はパワータービンの耐久力に不安を抱えながらも軍用機やロッキードの“コニー・シリーズ”旅客機に用いられ、しばらく世界の空に君臨する。

数ある水冷航空発動機のなかでも、特に名作の誉れ高いロールス・ロイス“マーリン”は40年代に入って、同じV形12気筒のレイアウトを有する大排気量機“グリフォン”を生み、その最大出力は2500 PSに達した。これ以上の大出力を求めるには、なにか他の手立てが必要であった。同社では30年代にX形24気筒、40年代にH形24気筒エンジンを開発している。

また、一時は発想の枠を広げ、H.リカード仕込みの2サイクル筒内噴射層状給気エンジンにさえ手を染めている。それらはいずれも、同時代の12気筒機を凌ぐ出力で計画されたスリーブバルブ式エンジンである。40年代のH形24気筒“イーグル”は、実際に3500 PSをマークした。金に糸目をつけずに作られたかつての重量級航空発動機のなかでも、それらは突出した存在、いわばメカニズムの結晶であった。

筒内噴射GEの先達はDEの母国、ドイツであり、ダイムラー・ベンツのDB 601系、ユンカースのJumo 211系倒立V形12気筒エンジンは、いずれも最終的に2300 PS程度の最大出力をえている。DB 601系の凝りに凝った作りが日本の(ライセンスの)テコに合わず、散々な目に遇った経緯については周知のとおりである。

もちろん、これら複雑なメカの塊たちは単独では用をなさず、可変ピッチプロペラ(VPP)というそれ自体、複雑なメカと合体することによって、初めて航空機推進システムを構成したわけである。

実用品にせよ試作品にせよ、これらのメカの塊たちは大戦末期に登場したターボジェット(TJ)エンジンによって、戦後、急速に代替された。TJは構造的にシンプルであるだけでなく、圧縮と燃焼が異なった場所で行なわれ、しかも連続燃焼であるがゆえに、低オクタンの安い燃料を焚くことができる。TJは安価な、しかも大出力、高速飛行

向きのエンジンであった。もちろん、VPPなどというメカは不要であった。

もともと、ジェット噴流速度と機速との関係で、中・低速飛行に不向きというTJの弱点は、旅客機用としてこれを用いる場合には問題となった。この点をカバーするため、ガスタービンでVPPを回すターボプロップ(TP)エンジンが開発され、一時流行した。1958年に米軍より海上自衛隊に供与され、引き続き川崎航空機でライセンス生産されたロッキードP2V-7“ネプチューン”の心臓“ターボサイクロン”R 3350-32 W、3750 PSも69年にはTP化され、機名もP-2Jへと改められた。

しかし、より高い飛行速度を狙う旅客機用としてはタービンの高出力化に見合うVPPの容量増大が期待できなかったため、固定ピッチプロペラ(FPP)で押したソ連のTu-114のごとき例外はあるものの、大出力TPへの途はこのあたりで行止まりとなる。その後を襲ったのが、多翼のファンをエンジン前方のダクト内に収容したターボファン(TF)エンジンであり、逐年、そのバイパス比の向上が図られてきている。

技術的にはプロップファン、アンダクテッドファンと称し、従来とはかけ離れた形状を有するむき出しの二重反転VPPを用いる一種のTPエンジンが既に実用化段階を迎えており、今後、燃料価格が高騰していけば、十分、現行型のTFに代替しうるものと目されている。

一方、レシプロはと見れば、生き残ったのはわずかに小排気量機種のみである。これらにもターボ過給や機械式連続噴射などが導入されたものの、総じて構造的にさほど進化した形跡はなく、あたかも、かつてのトップランナーたちの廉価版のごときシンプルかつ保守的な設計が踏襲されている。それもそのはず、航空発動機は乗用車用GEのように部分負荷運転をこととせず、安全第一とくれば、メカニズム的に小細工を弄する必要性も、それによって進化を強調する必要性もない。もちろん、部分負荷運転のみの運用形態なればこそ可能な三元触媒による排出ガス浄化などといったことを要求

される筋合いもない。かくて、生き残ったレシプロ航空発動機たちは一種、定番の域に達した技術としてそこにあるわけである。

かたや大出力のガスタービン、かたや小出力のレシプロ……現代に至る航空発動機の進化は、各クラスで simple is best が勝ち残りの法則として貫徹してきた過程である。

3. 技術進歩の常道(2) 船用機関の歴史から

単機あたり要求出力が大きい反面、重量、占有スペースの点での許容度も広い船用主機、とりわけ大形船用機関においては、まさにこの理由によって蒸気機関、蒸気タービンが長らく主座にあった。かの“タイタニック”は3機3軸、中央主機は低速直結蒸気タービン、両舷主機は直結レシプロ蒸気機関であった。やがて単機あたり出力増大への強い圧力の下、レシプロは主役の座を追われ、低速直結タービンは高速ギヤードタービンへと発展していく。低速直結 DE や中速ギヤード DE を主機とする motor ship は、そんな土壌の上に誕生した。

減速ギヤの容量に制約されるため、船用蒸気タービンの出力は1基あたり6~7万PS程度に抑えられてきたが、DEの出力がそこまで到達したのは90年代を迎えたころである。この間、DEがレシプロ蒸気機関の上前を頂戴し始めてから天下を取るまで実に80年近くが経過している。というよりも、石油危機がmotor shipの後押しをしてくれたのである。

1912年の“セランディア”(B & W, 4サイクル)と“モンテ・ペネド”(Sulzer, 2サイクル)とを嚆矢とする4サイクルvs2サイクル航洋船主機、つまり大形DEにおける競争の帰趨は既に戦前期、出力増強レースが複動化を要請するに及んで明らかとなった。4サイクル空気噴射複動などという錯雑たるメカに勝ち目はなかったのである。

だが、勝った2サイクルにしても吸排気弁を一切持たぬ複流掃気法と排気弁を有するB & W型の単流掃気法とが競合していた。エンジンのシンプ

ルさ、コンパクトさ、整備性ゆえに複流掃気法に分があった。しかし、複動に代わって単動過給機関が主流となるに及んで複流掃気法を採るにしても、たとえば回転弁による排気孔管制の導入など、やむをえざる複雑化が招来されている。

過給機も電動ブロワ、レシプロ掃気ポンプ、TCが実用化された。最後に生き残ったのは、TCを用いた静圧過給という熱力学的に最適な方式である。

第一次石油危機を引き金として、エンジンの燃焼効率向上(線図係数改善)ならびに直結型FPPの大径、低ピッチ化による推進効率向上による総合推進効率改善を図るべく、大形、中形船用DE界では長行程、低回転化が急展開し、80年代初めに大形DEはB & W型の排気弁付き単流掃気方式に帰一し、同方向とTCによる静圧過給方式との組合わせが、大形船用DEの標準的構造となった。

気筒あたり2個の燃料噴射弁、1個の排気弁と排気弁作動用ジャックポンプを有するのみならず、始動・軽負荷運転時用の電動ブロワセットまで併設した現行B & W型機関は、確かに複流掃気法は元より、4サイクルと比べても、かえって複雑なぐらいのメカである。しかし巡航運転中、掃気はシンプルに、効率的になされる。長行程化に伴い、掃気スワールを圧縮上死点付近まで保存することが困難になる恨みはあるものの、他形式よりはよほどましである。

このように、船用大形DEは小形高速エンジンのような高回転、高出力化の論理とは別の筋道に従って進化してきた。圧縮比を上げて P_{max} を高め、摩擦損失増大に目をつむりながら単体効率を引き上げるよりも、ブローダウンエネルギーとなる分を少しでも多くシリンダ内での膨張に回しつつ、高度にマッチングされた静圧過給方式を採用することで b_{mep} を上昇させるほうが、大形DEにとっては有利である。膨張比の不足は、ボトミングによって取り返せば良い。

プロペラ特性上、低速トルクは問題とならず、部分負荷効率の高さに気を遣ういわれもないから、メ

力的にあれこれ小細工する必要は見当たらない。第一、そんな小細工をしていたのでは、硫黄含有率の高いC重油で連続高負荷運転する機関として身が持たない。細かな改良は入出港時にもC重油を焚けるように、つまり機関士による燃料の切換えや2種類の燃料の携行を省略できるようにするための燃料油加熱・循環システムや潤滑油の管理システムなど、台所に直接響く分野でなされている。それ以外の点ではかなり保守的なエンジン、それが大形DEである。

船用主機としての大形DEの発展は、かくて、航空発動機のそれと同様、ないしはそれ以上に基本構造においてシンプルなものが生き残ってきた歴史である。目下、船用主機の世界では2サイクル長行程DEが中形、つまり低速直結型4サイクルDEや中速ギヤードDEとの競合領域にまで展開している。後者、とりわけわが国特有の低速直結型4サイクル中形DEが今後、いかに独自色を打ち出し、これを迎え撃っていくのか、注目に値する。

もとより、過度に複雑な技術に勝算はない。TC技術が高度に発展した今日、これを用いて、たとえば、1段TC・動圧過給によってミラーサイクルを甦らせる、といった狙いは P_{max} 、 T_{max} の低下によるNOx削減、 b_{mep} の向上による出力増強、あるいは充填効率向上による b_e の低下、といった面から期待できそうである。そして、その先にはさらなる長行程化……。

船舶推進システムの複雑化を招く要因として無視できないものに、排出ガス対策がある。水噴射や脱硝といった追加的要素は複雑化を招かざるをえない。しかし、産業廃棄物に等しい低質油を焚き、高い熱効率と信頼性を発揮する船用中・大形DEは、人類全体の立場から見てかけがえのない技術である。排出ガス対策に当たっては、この点に十分な配慮がなされるべきである。

4. 自動車用原動機界に simple is best の原則はいかにして貫徹するか

いささか唐突に聞こえようが、バンケル型ロー

タリーエンジン(RE)の失敗(?)を手掛かりに考えてみたい。REは乗用車用原動機としての性能と表記の原則を照合してみるに、かなり模範的なGEである。“ル・マン”で唯一勝利に輝いた国産GEでもある。このレースがもっと長時間の耐久力を競うものであったなら、REの長所ははるかに強調されていたことであろう。

一方、商品技術としてはいかがであったか。出力や搭載性は優れているが、シンプルな2ロータ、3ロータREは、よく購入者の虚栄心に訴えたであろうか。この点においてバランス的に好資質とはいえぬV6、あるいはより豪華なV8、V12といったレイアウトのエンジンが勝っていること、多言を要すまい。4×8=32といえ、単にそれだけのことである。しかるに、部品点数の多さをひけらかさずには済まぬGEが存在する。これは機械としてよほど不健全なもの、と評されるべきである。

実用上、全く無意味な数値に過ぎぬ全負荷最大出力——状況が許しても短時間しか発揮できず、まかり間違っても相当時間これが発揮されれば、駆動系をたちまち消耗させてしまうような最大出力。不要な全負荷最大出力と実用上不可欠な部分負荷性能との“両立”をえるため、やむなく詰め込まれるに過ぎぬ各種の可変機構。そういった技術が“売り”になる浮かれた社会。

乗用車用原動機は、一貫して資本主義的企業競争の中でメーカーが追求し続ける製品差別化戦略の優等生であった。なればこそ、それに付いて回る偏差値は次の世代、人類の幸福を慮る知恵の働きぶりを表わしてはくれぬのである。

では、最近にわかに注目を集めているハイブリッド乗用車はどうか。筆者はGEハイブリッド車に大した意義はないと考える。なぜなら、それは単なる経過点……次世代乗用車用直噴DE単体のほうが実用熱効率の点で勝る可能性が高いからである。そうであってこそ、simple is bestである。

それならDEハイブリッドはどうか。こちらは複雑ではあっても、GEハイブリッドよりは、はるかに賞味期限の長い技術となろう。ただし、もうこ

のあたりにくれば、乗用車概念の転換，そのうえでシリーズ方式のシンプルなDE発電ユニット付きバッテリーカーといったものへの進化が取り沙汰されてしかるべきである。夜間電力で充電し，長距離走行時のみDE発電ユニットを積み込むようなところまで到達すれば，環境負荷の面でも省エネルギーの面でも合格点が与えられよう。

乗用車用内燃機関が製品差別化の先棒担ぎたることをやめ，それ自身として徹底的に物言わぬ，ガスヒートポンプエアコンのそのように存在感のない技術に成りきるとき，それは初めて人類との持続的調和を口にしうる技術となる。さなきだに不利な間欠燃焼を行なう内燃機関が部分負荷運転ばかりさせられていたのでは，いかに自己主張的技術を身にまとおうとも，人類との調和は望めない。そんなモノを原動機とする乗用車に，中・大形船用DEのような人類全体の大義を担う技術と同様の寛容さをもって臨むいわれはないのである。

ちょっと遠出を，とビデオをレンタルするような感覚で乗用車用発電モジュールを借りてみたら，

中に入っていたのは燃料電池だったなどという時代がこないと，だれが断言できよう。そうなればなったで構わぬ。なにも内燃機関のために人類があるのではない。逆である。

ただ，そこまで辿り着く前に内燃機関の側で試みておかれるべきことは多いはずである。定常回転型の発電モジュール用原動機としてならREは好適であろう。いっそ連続燃焼でいくならガスタービンがある。存在感のないエンジン作りなら，たとえそれが乗用車に用いられるとしても，自動車屋の独占事業となるとは限らない。衆知を集めるチャンスがそこに生まれる。そこでシンプルな，定番化した技術が創造されれば，人類の知性は人類自身の生き残りにかかわる，より困難な問題に振り向けられよう。ハイブリッドに象徴される現代技術もしょせんは経過点，これからの出発点に過ぎぬのであるから。

最後に，エンジン技術者の努力に頭を下げつつ筆を置く。