

はじめに

乗り物の動力源として、エンジンは小型化、軽量化、高性能化を目指して開発され、同時に排気ガスや燃費の規制にも適合することが求められました。動力源としての効率性と社会的な要求との両立です。

しかしながら、乗り物のエンジンとしてはそれだけでは不十分です。快適性も重要です。快適性に大きな影響を及ぼす因子としては、振動や騒音があります。振動や騒音が低く感じられるほど高級感が増してゆきます。従来のエンジン開発では、振動や騒音対策に費やすエネルギーはわずかでした。振動や騒音は大きいからといってクランクから発生する動力が低下することは少なく、出力などとは異なり数値としてカタログにも載らないため、直接的なセールスポイントになりにくいものだったからです。しかし、出力を高めるために高回転化を目指してゆくと同時に振動、騒音も増えてゆき、その低減は不可欠なものとなってきました。加えて、時代の変化に伴い、乗り物に求める価値観の変化も生まれてきました。快適性が効率や経済性と同じように重要視されるようになってきた結果、かつての“我慢できる”レベルから“気にならない”までのレベルが求められるようになったわけです。

また、自動車や二輪車は速く走るだけでなく、走ることの楽しさも重要です。エンジンから発生する力強さを感じる鼓動や官能的なエンジンサウンドは、出力以上に魅力的な要因となってきているかも知れません。出力や燃費など数値で表せる物理的機能ではなく、“心地よい”とか“楽しい”といった感覚的な機能が重要になってきているのも、社会の価値観の変化であると思います。そのためには、まずはその源でもあるエンジンから発生する振動、騒音を低減することが不可欠です。その上でないと感覚的な魅力づくりは可能とならないからです。

エンジンは、往復動するピストンがコンロッドによってクランクで回転に変換される機構ですから、どうしても振動や騒音は発生するものです。だからといって、後からそれを何とか低減しようとしても効果的な対策はできません。初めから理屈に沿った対策を織り込むことが必要です。

新たなエンジンの開発にあたって、メーカーは常に前のエンジンよりもすべての機能を良くしようと努力してきました。その改良技術は、目立たない手段の積み重ねともいえるものも多いです。その結果、積極的に説明されたりアピールされた例は多くはなく、これまであまり多くの人に知ら

れてこなかった技術でもあります。加えて、その数値は改善程度が馴染みのない単位で表されるため一般には理解しづらかったということもあり、カタログなどに掲載することもなかったのです。けれどもこれらの振動や騒音の低減技術についてまとめることは、エンジン技術の進化を知るうえで意味のあることだと考えました。

さらに、排気ガス規制によってエンジンは長期間にわたって初期の性能を維持することが求められるようになりました。性能の劣化を感じることなく使用できるという、信頼性の向上もまた振動や騒音と同様に、特に目立たない技術のひとつです。そのため、これについても説明するようにしています。

企業にとって売れた商品はよい商品だと評価されます。しかし売れた商品は技術的に優れているものかという、そこに直接的な関係がない場合もあります。そのため、本書では売れた商品かどうかということではなく、技術的な視点から事例を選んで説明するようにしました。

自動車ではこれまで4気筒かそれ以上のエンジンが一般的でした。単気筒や2気筒は自動車では用いられることのないエンジンです。しかし、二輪車は用途ごとにエンジンが開発されるなどしてきたので、気筒配列も含めてエンジンの種類は多岐にわたります。さらに、モデルチェンジごとに新しいエンジンが開発されることが多いため、エンジンの種類も豊富です。エンジンが小型だからといって技術が低レベルで構わないというわけではありません。どのエンジンでも理屈に沿った対策が織り込まれる必要があり、二輪車エンジンから生まれた技術も多くあります。そのため、本書では二輪車エンジンの事例が多くなっていますが、それはこのような理由によるものです。

快適性は出力や燃費に比べて目立たない技術なので、このことを説明した書籍も多くはないと思います。しかし快適性は、動力源としてのエンジンで積み上げられてきた重要な技術です。そのため単なる乗り物用エンジン技術の紹介だけでなく、それ以外のエンジンも含めて技術をできるだけ平易に説明するようにして、エンジンに関心のある方に“そういうことなのか！”と理解していただけることを目指しました。騒音、振動という快適性や信頼性のためのエンジン技術に関心を持っていただき、その内容に満足していただければ幸いです。

目 次

はじめに／3

第Ⅰ章 乗り物エンジンに求められる快適性

1. レクサスが変えた高級車の定義 …………… 7
2. 振動・騒音低減技術の進化 …………… 14

第Ⅱ章 エンジンの振動低減技術

1. 振動が大きいのは回転を上げるから …………… 17
2. 慣性力を遠心力で相殺する …………… 20
3. 逆の振動を発生させて振動を打ち消す …………… 25
4. つりあったクランクで発生する振動 …………… 41
5. つりあって回転するバルンサー …………… 43
6. 4気筒エンジンの低振動化は …………… 47
7. 4気筒をもっと低振動にする …………… 53
8. V型は振動に優れたエンジンだが …………… 56
9. ラバーマウントすれば振動は良くなる？ …………… 73
10. こうすれば振動は減る！ …………… 77
11. スクーターも新幹線も …………… 81
12. エンジン低振動化で可能なリジッドマウント … 83

第Ⅲ章 エンジンの騒音対策技術

1. 騒音とは？ を理解する …………… 88
2. 排気騒音の規制 …………… 91
3. 排気系の概要 …………… 93
4. 排気騒音低減の考え方と事例 …………… 94

5. 加速走行騒音の規制値	106
6. 吸気系の概要	109
7. 吸気騒音低減の考え方と事例	110
8. 機械騒音の概要	118
9. 機械騒音対策	120
10. アクティブ騒音制御	143

第IV章 エンジンの信頼性向上と摩擦損失の低減

1. ピストンリングとピストン	145
2. バルブとバルブシート	152
3. バルブスプリング設計の変化	159
4. カム駆動系設計例	164
5. エンジンベアリング	202
6. 補機の効率化	214

第V章 特殊エンジンの技術

1. 低回転高耐久性ガスエンジンヒートポンプ エンジン	229
2. 携帯型エンジン技術	247

第VI章 効率的な問題解決

1. ニーズと魅力的品質	274
2. 発明レベル	279
3. 考え方を真似する	282
4. 技術進化を先取りする	287

第 I 章

乗り物エンジンに求められる 快適性

1. レクサスが変えた高級車の定義

～高品質、快適性こそ新たな高級車～

高級車といえば、どのようなブランド名が思い浮かぶでしょうか。かつて、高級車市場といえばベンツやBMWといったドイツメーカーや、アメリカのリンカーン、キャデラックといったブランドの独壇場でした。何をもちて高級車なのか、というしっかりした定義もあるように見えず、どうしてそのブランドが高級車なのかという質問にも明確な答えはありませんでした。「外国車＝高級車」というような当時のクルマの格付けは、単なる見栄や信仰に過ぎないように思えました。高価格の外国車を手に入れることが富裕層であることを認めてもらう手段ということであれば、日本に限らず高級車市場に日本車メーカーが入り込む余地はないと思われていました。当時の米国での日本車への印象は、小型で性能は良いけど安いクルマと思われていたからです。

新たに高級車市場への進出を果たすため、1989年にアメリカで販売開始されたのが図表1-1のレクサスLS400でした。高級車市場でレクサスという新たなブランドを認知してもらうため、ボンネットの上にシャンペンタワーを積みあけてエンジンを始動し、回転を上昇させてもグラスから滴一つこぼれないテレビCMが流されました。そうして“新参者”の日本製レクサスが注目されるようになりました。漠然とした“高級感”から、新

第Ⅱ章

エンジンの振動低減技術

エンジンは動力源です。初期には蒸気機関を用いた自動車があったと、エンジンの歴史書には載っています。個人の乗り物の動力源として、蒸気機関はあまり使い物にはならなかったものの、内燃機関(エンジン)は、誰もが簡単に使える動力源として普及し発展しました。動力源としては、重量当たりの出力が比較されますが、軽量で高出力であるだけでなく、取り扱いのしやすさも重要です。1サイクルごとに燃焼を完結できる内燃エンジンは取り扱いが容易で、加速、減速という過渡運転に適応できる点で優れたものです。そのため、蒸気機関に比べ圧倒的に利便性が向上し、普及したということです。

ピストン・クランク機構はエンジンを実用化するための優れたメカニズムです。しかし、出力を高めるために回転を上げようとするすると振動が発生し、これが障害となりました。

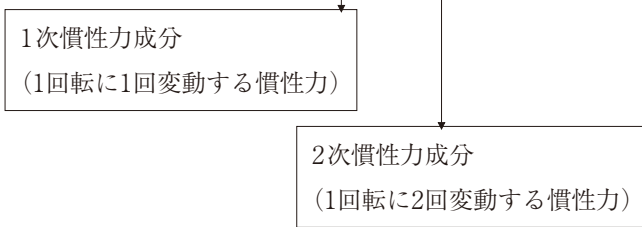
動力源としては出力が求められるのは当然ですが、単に出力を高めても、耐えられないような振動が発生するのでは使いものになりません。ピストンなどが往復運動するので振動は仕方ない、と思われていましたが、出力を高めつつ、広く普及させるには、振動の低減が重要な課題となりました。振動は理論に基づいて対策しなければ、効果的な対策ができません。

1. 振動が大きいのは回転を上げるから

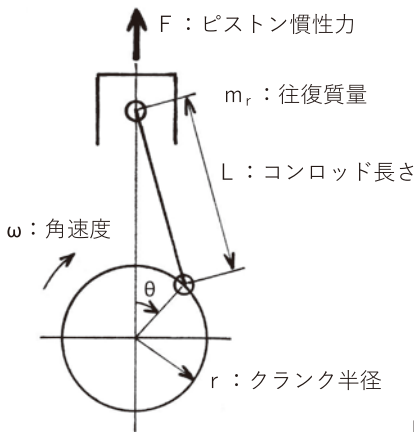
～振動の原因はピストンの往復運動による慣性力～

エンジンで発生する振動は、ピストンの往復運動によって発生する慣性力によるものです。上死点と下死点でピストンの速度が0になりますから、その加速度は最大になります。ピストンの往復する質量によって慣性力が発生しますから、慣性力Fは次の式で表されます。

$$\text{ピストンの慣性力 } F = m_r r \omega^2 \{ \underbrace{\cos \theta}_{\text{1次慣性力成分}} + \underbrace{(\cos 2\theta / \lambda)}_{\text{2次慣性力成分}} \}$$



ここでは「ピストンの慣性力」といいましたが、正確にはピストンやピストンピン、ピストンリングや、コンロッドの往復質量部分などを合計した、ピストン系の往復質量によって発生する慣性力です。

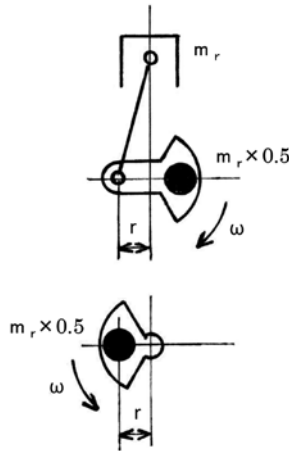


図表 2-1 ピストンの慣性力

のではありません。往復質量が1/2など大幅に軽量化できるわけではないからです。クランクバランスはベクトル方向を変えるだけなので、慣性力の総和は変わりません。エンジン自体から発生する振動を少なくできれば、ぐっと高級なエンジンになります。当然ながら搭載する車両は振動から逃れられるので、設計は楽になります。エンジンそのものの振動を抑える、そのために用いられるものが balancer です。

balancer とは、1次慣性力と逆の力を与えることによって振動を打ち消しあい、エンジン自体でつりあわせることにより、振動を低減しようというものです。いわゆる「毒を以って毒を制す」という考え方になります。

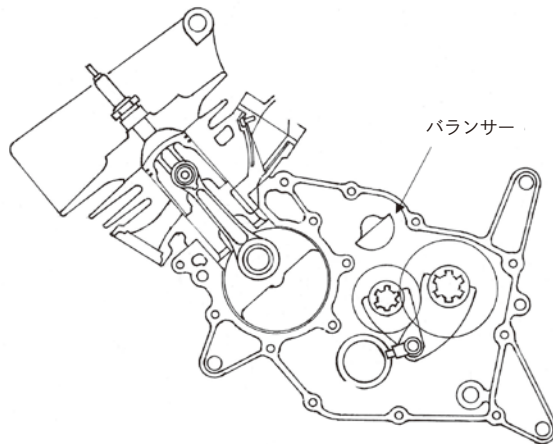
50% バランスでは、クランク角度ごとのベクトルは同じ大きさになるので円になると説明しました。ベクトルが円ということは、遠心力と同じ状態です。つまり、逆向きの遠心力を発生させれば良いということです。そうすると、逆向きのベクトルを持たせることでつりあわせることができます。50%と同じアンバランス質量を逆回転させることで、1次慣性力を0とできるようになります。図表2-9に示しましたが、位置はピストン軸の真下でなくても、どこでも良く、とにかく50%と同じアンバランス質量



図表 2-9 1次1軸 balancer

を逆回転させれば良いわけです。追加する軸は1本ですみます。これを1軸バランサーと呼びます。二輪車では主に250cc以下などの小型エンジンをはじめとして、多くに採用されました。

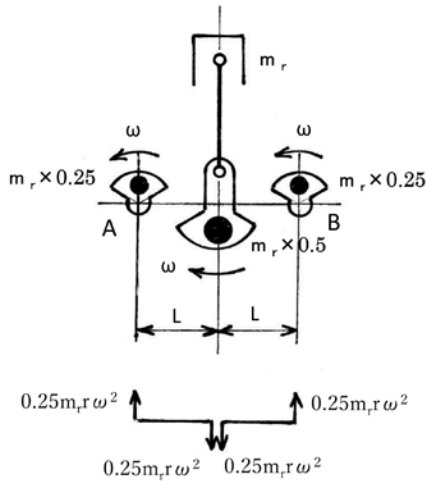
図表2-10に1軸バランサーを採用したホンダMB50を示します。1979年に市販されたモデルですが、50ccでバランサーを採用した初めての例でした。2サイクルで50cc市場に参入するに際し、先行する競合モデルとの差別化を図ったもののようですが、遅れて80ccも発売されたので、こちらと併せて開発されたということだったものと考えられます。



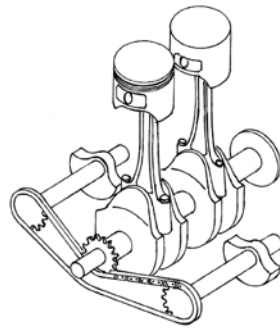
図表 2-10 1次1軸バランサーの例(ホンダ MB50)

クランク軸とを同一線上にすることがポイントです。そうすることによって1軸のように偶力を発生することがありません。

1次2軸バルンサーの例を図表2-17に示します。振動低減のために初めてバルンサーが用いられたのが、1971年に登場した軽自動車のホンダ ライフ360でした。ホンダN360の後継モデルとして、エンジンは水冷でバルンサー付きとされ、さらに日本で初めてカムシャフト駆動にタイミングベルトが使用されたものです。乗用車として、N360から振動や騒音を



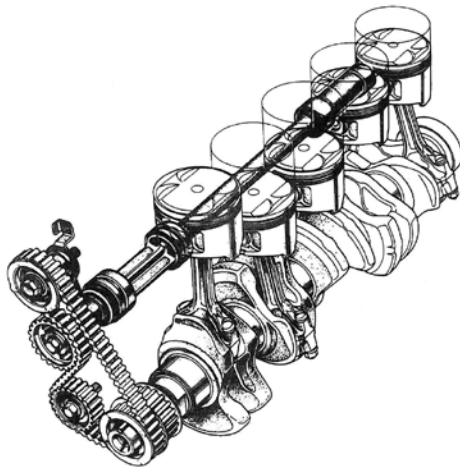
図表 2-16 1次2軸バルンサー



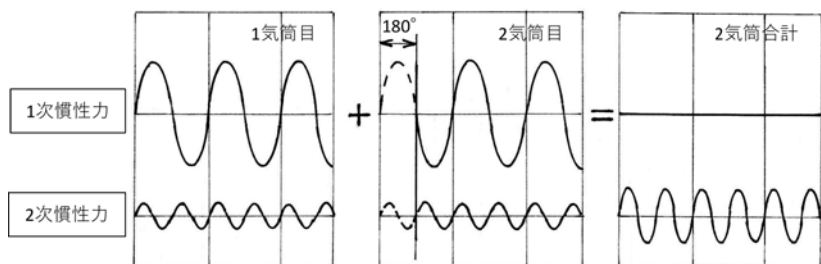
図表 2-17 1次2軸バルンサー（2つのバルンサーが等距離）の例（ホンダ・ライフ）

り回転変動が大きくなることによって、低回転での振動が感じられることがあります。例えば、電動モーターは回転バランスしているので滑らかに回転しますが、スイッチをON-OFFすれば回転変動を発生します。ON-OFFの時間間隔が大きくなれば変動は大きくなるのと同じです。点火間隔が大きくなったことによる回転変動の違いを、人間の身体は感じるのです。気筒数の少ないエンジンは慣性力をバランスさせても、回転変動は気筒数を増やしたエンジンと同じにはならないということです。

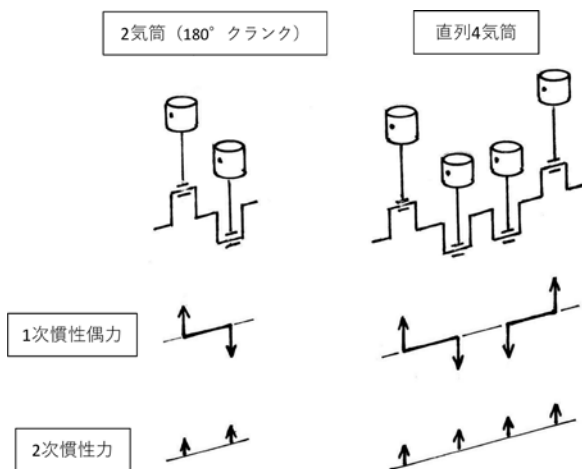
もっと気筒数が大きなエンジンの例として、1989年にホンダのアコードインスパイア／ビガーに搭載された5気筒エンジンがあります。FFで



図表 2-30 5気筒の1次慣性偶力バランスー (ホンダアコードインスパイア)



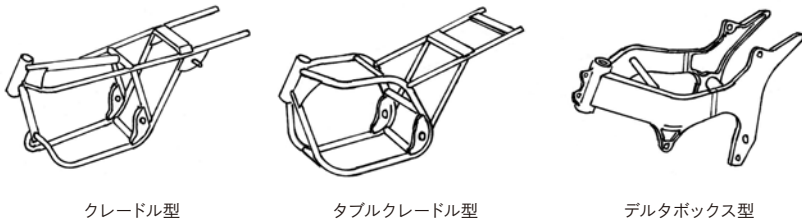
図表 2-31 2気筒 180度クランクの2次慣性力



図表 2-32 直列4気筒

2次慣性力が発生します。2次慣性力の大きさとしては、1気筒の1/4の往復質量が2倍の角速度で回っている状態と考えることができます。2,000ccの4気筒なら、500ccの往復質量のエンジンが2倍の回転数で回っている状態と同じということです。エンジンが軽量化されてきているので、低振動が求められると低回転ではともかく、高回転では2次慣性力は無視できない大きさになってきます。同じ加振力でもエンジンが軽量であれば振動としての変位が大きくなるからです。

これを打ち消すには1回転に2回変化し、かつシリンダ方向の力のみを



図表 2-68 二輪車フレームの剛性向上例

スポーティな走行を目指す、スクーターであっても高い車体剛性が求められるのは同じです。図表2-24で説明したヤマハTMAXは、スポーツスクーターという新しいジャンルを開拓したモデルです。スクーターながらスポーツバイクのような操縦性を持っています。フレーム剛性を上げるため、エンジンをリジッドマウントする、スポーツタイプの二輪車の設計が採られています。そのため、エンジンには往復動バルンサーが採用されているものです。車体剛性を上げるためには、エンジンを車体構成メンバーとして使うのが効果的で、その点から図表2-7のラバーマウント方式における振動以外からの限界、という見方ができます。エンジンを吊って揺動させるとバネ下荷重が大きくなるので、スポーツ走行が難しくなることも挙げられます。当たり前といえるかもしれませんが、乗り物のエンジンとしては、いかに振動を抑え込んだエンジンとできるかが、モデルそのものの商品に対する車両全体の基本にエンジンが大きく影響してくるということです。

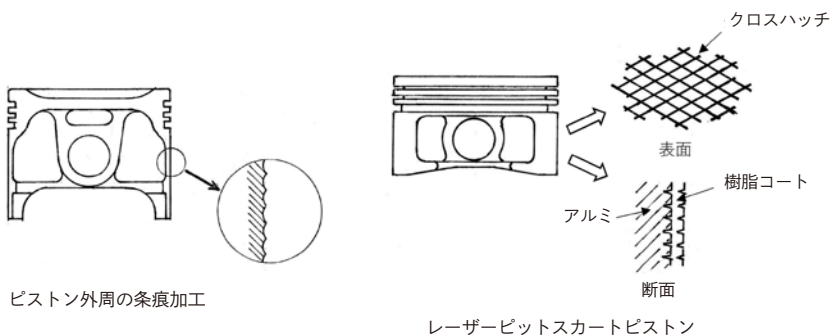
軽自動車や最近の小型自動車に3気筒エンジンが使われていますが、これまでの自動車エンジンの多くは4気筒です。4気筒エンジンの振動低減は2次慣性力バルンサーです。しかし、二輪車では単気筒や2気筒エンジンが多く用いられ、しかも高回転で使われるため慣性力は無視できるほど小さくないので、バルンサーやラバーマウントによって何とかして振動低減を図ってきたわけです。また、二輪車は車種ごとにエンジンが新設計されることが多かったため、技術事例も多くあります。そのため、これまで

られるようにしています。

ピストンリングでオイルを掻き落としても、ピストンとの間には潤滑のオイルが必要です。そのため図表4-6のようにピストンスカート部を条痕加工して、オイルを保持することも行なわれました。

また、シリンダ内面に設けるクロスハッチをピストンスカートに実施する考えも出てきています。ピストンのスカート部にレーザーによって微小なクロスハッチ溝を設ける加工が行なわれているものです。これによって、表面の樹脂コート部に油だまりのクロスハッチ溝を形成させるようになっています。樹脂表面を平滑にして摩擦を低減しながら、オイルを溜めて油膜を保持するものです。レーザーピットスカートピストンと呼ばれ、2018年登場のトヨタのレクサスUXなどに搭載されるM20A-FKS型エンジンなどに適用されています。

ピストンの摺動抵抗を低減するために、ピストンスカートに樹脂や二硫化モリブデンのコーティングが行なわれてきました。しかし、ただ一様にコーティングするよりも、部分的にオイル溜りとなる凹みを設けることによって、オイルの保持性を向上できるので、摺動抵抗を低減することに効果的であるとされています。2010年のホンダフィットに搭載された1,300cc L13A型i-VTECエンジンへのパターンコーティング例を図表4-7に示し



図表 4-6 ピストン外周の条痕加工とレーザーピットスカートピストン

参考資料

- Darrell Mann『体系的技術革新』創造開発イニシアチブ
富塚清『内燃機関の歴史』三栄書房
三樹書房編集部編『ホンダスーパーカブ』三樹書房
瀬名智和『エンジン性能の未来的考察』グランプリ出版
GP企画センター編『自動車用エンジン半世紀の記録』グランプリ出版
『内燃機関』山海堂
『HONDA R&D Technical Review』ホンダ技術研究所
『住友電工テクニカルレビュー』住友電工
『YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW』ヤマハ発動機
『自動車交通と騒音』(社)日本自動車工業会
『自動車技術』自動車技術会
『自動車の騒音低減技術と新たな課題』日本音響学会誌、日本音響学会

資料協力 (50音順)

- カワサキモータース トヨタ自動車 SUBARU 日産自動車 本田技研工業 マツダ
三菱自動車工業 ヤマハ発動機

おわりに

ニッケルやリチウムなどの電池資材の価格高騰によりEVの価格は大きく上昇しました。これまでのEUにおけるEV一辺倒とも思える政策も、EVの価格上昇によって推進に黄信号が灯りつつあるとの報道も見受けられるようになりました。

EVの価格は電池の価格が下がらない限り安くならないわけですが、現状は普及を推進するために、国からの補助金によってEVの価格競争力が保たれているのが現状です。「需要が増えればバッテリーはどんどん安くなる」と言われてきましたが、現実にはEVの需要増が原材料の価格上昇を招いてしまっており、安くなる構図にはならないことが分かってきました。電池の材料は中国など経済競争リスクの大きな国に依存しています。補助金が打ち切られた後のEV車の見通しはどうなるのでしょうか。価格の点から使われている電池は中国や韓国メーカー製が中心です。中国は、資源鉱山の確保から原材料の調達、製造、リサイクル、リユースを一貫して行なえるため、EVの心臓ともいえる電池を押さえられた場合、日本国内での電池生産はほぼゼロとなり、EVの対等な競争になりません。EV化を推進するにつれて中国に利益を持って行かれてしまうようになる産業構造を許容できるのでしょうか。

政府の発行している「ものづくり白書」をご覧になったことはあるでしょうか。日本企業の売上高・世界シェアを比較した表によると、日本企業が売上高10兆円以上の世界市場規模の品目は自動車(ガソリンやディーゼル)とハイブリッド車のみです。世界シェア60%以上の品目の7割はエレクトロニクス系や自動車等の部品素材となっています。ここからは日本が自動車産業に大きく依存している状況であるということが理解できます。これは自動車に頼った一本足打法ともいえますが、その自動車の世界シェアも決して大きいというわけではありません。それでも、中国やインドが躍進してきている中で、日本が3割近くの国際競争ポジションを維持しているのは素晴らしいことだと思います。

現在EVでは中国が世界一の生産国となり、インドも近く大きな自動車生産大国になることが確実視されています。各国が国を挙げて自動車産業の強化に邁進しているときに、日本では国としてどのような具体的支援策をとるのでしょうか。分野の広さから、その影響が自動車産業だけの話ではすまないことは、火を見るより明らかです。

日本は菅政権の2020年に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」として、「2030年代にガソリン車販売禁止」、「2035年を目途に電動車100%」が打ち出され、それに伴って各メーカーのEV化目標が出されました。さ

らにエンジンにとって非常に厳しい欧州委員会(EU)のユーロ7と米国環境保護庁(EPA)のティア4という2つの排出ガス規制案が2020年代後半に発効する見通しです。

ユーロ7は、路上走行にて排気ガスを測定するRDE(Real Driving Emission)試験が導入されます。温度や路面状況という試験対象条件の幅が拡大し、エンジン車にとっては認証を得るのが非常に難しくなるといわれています。EPAのティア4は、2032年に現行規制から約50%のCO₂排出量の削減を求めるものです。いずれもEVへの移行を促すために、“エンジンの息の根を止めようとする”規制案だと受け止められています。しかし、これまでの規制対応がそうであったように、日本メーカーには技術で何とかこれをクリアして欲しいものです。技術の進化は、人間の意志によって変更することはできないといわれています。技術的な視点からは、解決できない問題がある技術は進化できないという歴史があります。そうすると、EVは電池にともなう諸問題が解決できないのであれば、政治的な施策だけでは普及してゆかないのではないのでしょうか。電動車としてハイブリッド車やプラグインハイブリッド車などへの移行が進行するように思います。

長期的に見ればEV化が進展するものと考えられています。ただ、上記のようにこれからもまだしばらくはエンジンはなくならないように思います。

日本企業は、海外メーカーのような「組み合わせ」だけではできない「すり合わせ」技術によりエンジン技術を高めてきました。今回紹介した振動騒音低減や信頼性向上のための技術は、熱効率向上や排気ガス低減のための技術とともに、今後も改善を続けて世界をリードしていくための重要な技術だと考えています。

最後に、本書をまとめるに際しては、元ヤマハ発動機で数田エンジン設計代表取締役である数田久氏から貴重な技術情報やアドバイスをいただきました。また、本書の出版に当たってはグランプリ出版代表取締役社長の山田国光氏、編集に手を尽くしてくださった編集部の松田信也氏に大変お世話をいただきました。お三人様に感謝しお礼を申し上げます。

井坂義治

〈著者紹介〉

井坂 義治(いさか・よしはる)

1946年徳島県生まれ。

ヤマハ発動機入社後、二輪車エンジン設計部門で2サイクル、4サイクルエンジンの設計に従事。その後、技術開発部門にて排気ガス対策技術開発に従事した後、二輪車初のV型4気筒エンジンの開発や世界で初めての7バルブエンジンの開発、吸気制御装置の開発などを担当。これらを通して400件以上の特許を出願。その後、品質推進部門や振動・騒音技術部門などを担当し、MC事業本部技術統括部エンジン開発室主管で退職。

退職後は、静岡大学客員教授、静岡理科大学非常勤講師、(株)アイデアシニアコンサルタント(TRIZ)、小型エンジンメーカー技術コンサルタントとなる。

現在は、中部品品質管理協会講師。その他、ASQ(アメリカ品質協会)認定CQE。著書に『技術者のための問題解決手法 TRIZ』『QFDとTRIZ』(ともに養賢堂)、『製品開発の問題解決アイデア出しバイブル』(日刊工業新聞社)、『第3世代のQFD事例集』(共著、日科技連出版社)、『進化するエンジン技術』(グランプリ出版)がある。

エンジンの振動・騒音低減技術 二輪・四輪・汎用	
著者	井坂義治
発行者	山田国光
発行所	株式会社 グランプリ 出版 〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-32 電話 03-3295-0005(代) FAX 03-3291-4418 振替 00160-2-14691
印刷・製本 組版	モリモト印刷株式会社 松田香里/近野裕一