

# 乗用車用ガソリンエンジン入門

林 義正



グランプリ出版

## 本書復刊に関して

本書『乗用車用ガソリンエンジン入門』は1995年(平成7年)に弊社で編集・刊行したものです。著者の林義正氏が、エンジニアを目指して大学で学ぶ学生たちのための入門用テキストとして執筆した本でしたが、実用エンジンとしてもっとも先進的な技術が導入されている乗用車用エンジンについて詳しく解説された本は他に類がなく、学生のみならず、自動車を好きな一般読者はもちろん、自動車メーカーで働く技術者などにも幅広く読まれ、活用された技術解説書です。

初版発行から10年以上がたちましたが、いまでも、本書を求める声弊社に数多く寄せられていることから、著者の林氏の了承のもと、復刊を企画しました。

復刊に際しては、林氏に依頼して内容の確認を行い適正な修正を施し、さらに装丁を一新した新装版として、新たに刊行することにいたしました。

## はじめに

本書の初版は企業でのエンジン開発現場から、大学の教育現場に移ったときに工学教育に危機を感じ、一気に書き下したものである。将来、エンジニアとして研究開発を夢みる学生たちが使っていた教科書は、あまりにも古い技術が取り上げられていた。例えば、最大ピストン速度は10m/sが限度、シリンダー内の火炎伝播速度は20数m/s、キャブレターやディストリビューターの説明はあるがEGIには触れられていない。

入門用のテキストのつもりであったが、エンジンの開発に携わっている方からも活用しているとお言葉をいただき、復刊を決意した。エンジンの技術に興味のある方、さらには広くクルマ関係の仕事に携わる方にも興味をもっていただける内容である。さらに専門的な知識を有している人にとっても、エンジン全体を広く理解するのに何らかのお役に立つと考える。

エンジン設計者の観点から、なぜこのような形状や構造になるのかを、図や写真を使って多角的に述べている。エンジンはもっとも複雑な総合機械であり、機械工学の4力学や材料学、制御工学を駆使して開発される。また、抽象的な学問である熱力学もエンジンのあるべき姿を考察するのに不可欠であり、実際の現象と対比して理解しやすくなるように工夫した。なお、エンジンの技術は広範囲におよぶため、インジェクターや燃料ポンプなどは完成品とみなし、システムの一部として取り上げるのにとどめた。

本書の初版が出た1995年の秋頃には、従来の工学単位からSI単位への移行期であった。そこで、一足早くSI単位に統一するかどうか迷ったが、まだ工学単位に慣れている方が多いと考え、敢えて工学単位を使うことにした。本書でとくに多く使用した工学単位からSI単位への換算表を27ページの表1-2にまとめている。

私は、モータリゼーションの黎明期に日産自動車(株)に入社し、幸運にも研究開発畑を歩むことができた。名神、東名高速道路の開通や鈴鹿サーキットなどの誕生がトリガーとなりエンジン高出力化技術の開発、大気汚染が問題化すると排気の清浄化、騒音規制の強化に対応し騒音振動低減技術の開発、モータースポーツブーム

が訪れると、当時人気のグループCカー用の予選時には千馬力を越えるV8のターボエンジンの開発に携わることができた。いずれの開発においても理論的に追求し、成功体験を反芻して、既存概念にとらわれない発想を加えれば、次の難題でも必ずブレークスルーできることを学んだ。

本書が少しでもお役に立てれば幸いである。

林 義正

## 目次

序論	9
第1章 自動車用エンジンの概要	14
1-1. エンジンの変遷	14
1-2. レシプロエンジンのサイクル論	19
(1)オットーサイクル	20
(2)ディーゼルサイクル	24
(3)サバテサイクル	25
1-3. エンジンの性能や特性を表わす評価尺度	26
(1)力と仕事と仕事率	26
(2)トルクと出力およびこれに関連する諸特性	28
①トルクと仕事と仕事率	29
②正味と図示と摩擦損失	29
③正味平均有効圧	31
④図示平均有効圧と摩擦平均有効圧	33
⑤正味平均有効圧と軸トルク	35
⑥図示平均有効圧と図示馬力	36
⑦機械損失と機械効率	37
⑧熱効率と燃料消費率	38
⑨2サイクルの場合	40
1-4. エンジンの性能に影響を与える諸因子	41
(1)エンジンに関連するもの	41
①吸入効率	41
②燃焼特性	44
③圧縮比	46
④空燃比	47
⑤点火時期	49
⑥冷却水温度	50
⑦回転数	51
⑧フリクション	52
(2)エンジンの運転環境に関連するもの	53
①大気圧, 温度, 湿度	53
②排圧	54
(3)熱力学的な考え方	55

## 第2章 エンジンの構造および性能追求 ..... 59

### 2-1. 本体構造系 ..... 61

#### (1) シリンダーブロックと主軸受(メインベアリング) ..... 61

- ① 曲げ、ねじれ剛性の確保 ..... 63
- ② ハーフスカートとディープスカート ..... 64
- ③ クローズドデッキとオープンデッキ ..... 66
- ④ モノブロックとライナー入りブロック ..... 67
- ⑤ サイアミーズドシリンダー ..... 69
- ⑥ シリンダーヘッドボルトの配設 ..... 70
- ⑦ メインベアリング ..... 72
- ⑧ ウォータージャケット ..... 74
- ⑨ シリンダーブロックのバランス ..... 74

#### (2) シリンダーヘッド ..... 76

- ① 燃焼室 ..... 80
- ② 吸排気ポート ..... 87
- ③ バルブシートとバルブガイド ..... 90
- ④ カムベアリングとタペットチャンバー ..... 91
- ⑤ ウォータージャケット ..... 93
- ⑥ シリンダーヘッド全体の強度確保 ..... 95

#### (3) ヘッドカバーとオイルパン ..... 96

- ① ヘッドカバー ..... 97
- ② オイルパン ..... 98

### 2-2. 主運動系 ..... 101

#### (1) ピストンとピストンリング ..... 101

- ① ピストンおよびピストンピン ..... 101
- ② ピストンリング ..... 106

#### (2) コネクティングロッド ..... 110

#### (3) クランクシャフト ..... 114

- ① 剛性 ..... 116
- ② 軸受荷重とフリクション ..... 117
- ③ つり合い ..... 119

#### (4) フライホイール ..... 123

#### (5) クランクプーリー ..... 127

### 2-3. 動弁系 ..... 129

#### (1) バルブ ..... 130

#### (2) バルブとアッパーリテーナーとの結合 ..... 132

#### (3) バルブスプリング ..... 133

#### (4) バルブオイルシール ..... 136

(5)タペット .....	137
(6)カムシャフト .....	139
①バルブの作動特性 .....	140
②カムシャフトの強度 .....	144
③動弁系の潤滑 .....	146
(7)カムシャフトの駆動 .....	147
(8)ロッカーアーム式のバルブ駆動 .....	149
2-4. 吸排気系 .....	150
(1)吸気系 .....	151
(2)排気系 .....	159
<b>第3章 エンジンのサブシステム .....</b>	<b>163</b>
3-1. エンジン制御システム .....	163
3-2. 吸排気システム .....	167
3-3. 冷却システム .....	171
3-4. 潤滑システム .....	178
3-5. 点火システム .....	182
3-6. 過給システム .....	185
<b>第4章 エンジンの性能とマッチング .....</b>	<b>194</b>
4-1. 定常性能 .....	195
4-2. 過渡性能 .....	199
<b>第5章 排出ガスの清浄化と騒音低減 .....</b>	<b>202</b>
5-1. 排出ガスの清浄化 .....	202
(1)排気中のHC, CO, NO <sub>x</sub> の低減 .....	203
(2)ブローバイ対策 .....	209
(3)燃料の蒸発損失対策 .....	211
5-2. エンジン騒音の低減 .....	212
(1)エンジン騒音発生メカニズム .....	212
(2)騒音低減対策 .....	219

# 序 論

人間が自分の体力以上の労働をしてくれる機械、すなわち原動機を発明したことによって人々の生活が豊かになった。原動機を使用することで人々は重労働から解放され、楽をしながら速く、また重い物を遠くへ運べるようになった。そして、陸や海や空を制し、さらに宇宙へと発展を続けている。エネルギーを仕事に変換する原動機が、人間社会に与えた影響は非常に大きいものがある。

一方、少しでも軽く物を移動させる手段としてコロが考え出され、車輪が使われ始めた。ピラミッドや万里の長城が構築されたときにも車輪が使われている。かつてモーターショーのポスターなどに、筋骨のたくましい男が木製の大きな車輪を全身の力を込めて、まわしている絵があった。それは、車輪が人間の生活に欠かすことのできないことを象徴しているものとして使用された(図1)。

図1. 人間と車輪の永遠の関係を訴えるポスターに使われたイラスト

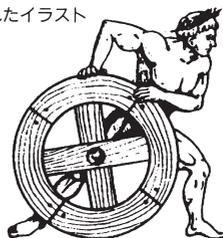
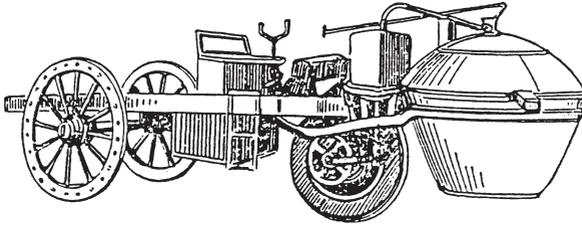


図2. ニコラス・キュニョーの蒸気自動車(1769年)



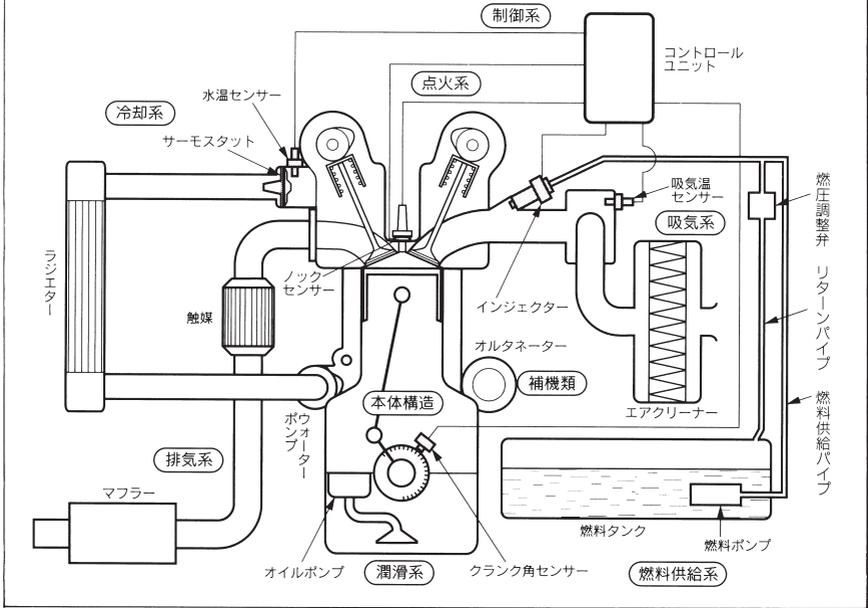
自動車は、道路運送車両法や道路交通法あるいは日本工業規格(JIS)などで定義されているが、いずれも原動機を用いることを条件としている。とくに前の二つの法律によれば、軌道や架線を使わない原動機と規定し、さらにJISでは、舵取装置があり、乗車して地上を走行できる車となっている。つまり、何らかの原動機が必要で、かつ自動車自身にエネルギー源を備えていなければならない。

この定義に基づいて自動車を考えてみると、16世紀頃に考案された帆かけ車などは、この範ちゅうには入らない。1769年にフランスのニコラス・キュニョーが製作した蒸気三輪車が、自動車の形態を整えた最初のものであろう(図2)。蒸気エンジンであれば、燃料は石炭や薪などかなり自由に使うことができるが、見方を変えるとエネルギー源に鈍感であることは、それだけ尖鋭化されていないことを意味する。それから100年以上後に、モーターによって車輪を駆動する電気自動車が出現している。1893年に英国のアンダーソンが電気自動車を製作したが、この動力源では自動車を広く実用化するには至らなかった。

自動車の発展の大部分はエンジンが牽引している。19世紀の終わり頃から小型・軽量でパワーがあり、取り扱いが楽で、しかもエネルギーの携行が容易な内燃機関が次々と発明され、自動車への適用が試みられた。その中で、現在、自動車用の原動機としてもっとも多く使用されているガソリンエンジンのルーツは、1876年にドイツのニコラス・アウグスト・オットーが発明した4サイクルエンジンにさかのぼることができる。続いて、英国のクラークが2サイクルエンジンを製作している。4サイクルのガソリンエンジンを搭載した自動車を最初に製作したのは、ドイツのゴットリーブ・ダイムラーで、1885年のことであった(図3・図4)。

一方、日本では、1903年に輸入されたガソリンエンジンを搭載した自動車がつくられ、翌1904年になって純国産の蒸気自動車が製作されているのは興味深い。1907年には内山駒之助らがガソリンエンジンを載せた乗用車であるタクリー号を発表し

図1-1 エンジンの本体構造と各システムおよび補機の区分



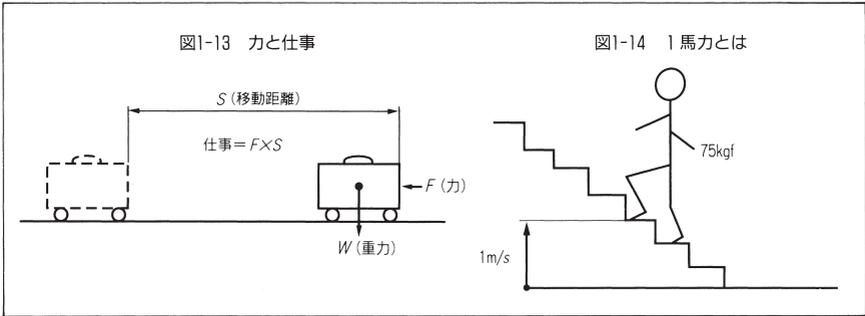
イミングに熱を発生させ、作動ガスの温度すなわち圧力の上昇に使うのが大切である。それは燃焼室のもつポテンシャル次第なのである。

後で述べるが、燃焼室は高速化による性能向上のポテンシャルを秘めている。したがって、燃焼室の形状を比較すればエンジンの性能を大まかに区分することができるが、先にも述べたようにバルブ配置と燃焼室の関わりは大きい。図1-2にバルブ配置と燃焼室の変遷を示す。

エンジンをバルブの配置とその駆動のためのカムシャフト位置や数によって分類すると、サイドバルブに始まり、OHV、OHC、DOHCと変化してきた。

サイドバルブ式はバルブの駆動が直動であり、部品の点数が少ない。バルブ駆動の面からは高速回転が可能のように見えるが、燃焼室がボアよりオーバーハングするほど大きく、点火プラグから燃焼室の隅までの距離が長くなって燃焼が遅い。また、燃焼室の表面積が大きく、冷却系への放熱が大きくなり、熱効率も悪い。圧縮比も高められず、高性能エンジン向きではない。動弁系としては高速化のポテンシャルがあっても燃焼面で大きな制約があり、現在ではその姿を見られなくなった。

燃焼室をコンパクトにし、燃焼速度を速くし、かつ冷却系への熱損失を小さくす



ところが、図1-13のように、この荷物を床に置いて横に押したとする。摩擦力に抗し、 $F$ の力で距離 $S$ だけ移動したとすれば、外部からカバンにした仕事は $F \times S$ である。たとえカバンを持って立っている力 $W$ より押し力が小さくても、 $F$ は仕事になるのである。ここで、力のSI単位 (*Systeme International d'Unites*, International System of Unites) はN(ニュートン)であるが、本書では従来の単位であるkgfを用いる。ちなみに  $1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N}$ である。

先ほどのカバンを重力  $W \text{ kgf}$ に抗して  $S \text{ m}$ 持ち上げたとする、その時の仕事は  $W \times S \text{ kgfm}$ である。ところが、この仕事には時間という概念が入っていない。1秒で  $S \text{ m}$ 持ち上げようと10秒かかろうと、仕事としては同じである。しかし、自動車を使って物を動かすときには、それにかかった時間が問題となる。そこで時間当たりの仕事量を仕事率と定義し、単位は  $\text{kgfm/s}$ となる。1馬力は  $75 \text{ kgfm/s}$ であり、図1-14のように体重  $75 \text{ kg}$ の人が、1秒に  $1 \text{ m}$ ずつ段階をかけ昇ったとすると、ちょうど1馬力となる。

表1-2 本書の工学単位へのSI単位への換算表

	工学単位	SI単位	換算係数
力	kgf	N	9.80665
トルク	kgfm	Nm	9.80665
仕事	kgfm	Nm	9.80665
エネルギー	kgfm	J	9.80665
熱量	kcal	kJ	4.1868
圧力	$\text{kgf/cm}^2$	kPa	$9.80665 \times 10$
慣性モーメント	$\text{kgfms}^2$	$\text{kgm}^2$	9.80665

図2-4 アルミ合金製のシリンダーブロック

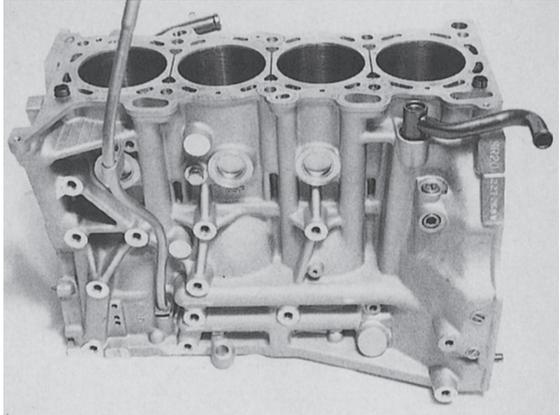
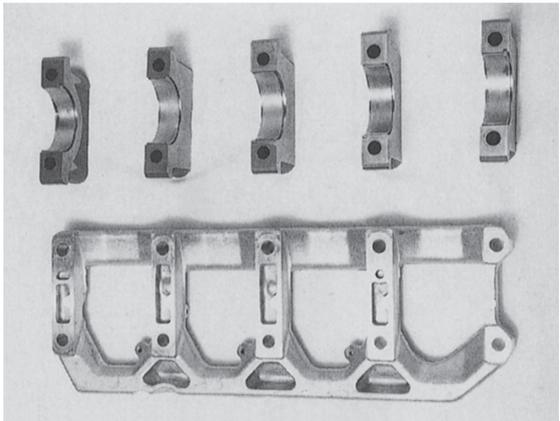


図2-5 ベアリングキャップとベアリングビーム



シリンダーブロックと、これに直接装着される主運動系を図2-3に示す。メインベアリングキャップは、シリンダーブロックに組み付けておいて内面が加工され、軸受ハウジングとなるので、シリンダーブロックの一部と考えてよい。以下、シリンダーブロックがなぜこのような形状になるかについて考えてみよう。

### ① 曲げ、ねじれ剛性の確保

剛性と一口にいても静剛性と動剛性がある。静剛性はぐいっと力が加わったときの変形のしにくさを表わすのに対し、動剛性は周期的に力が変化しながら作用するときの剛さを指す。図2-6のように荷重が周期的に加わる場合、その力が小さくても大きく変形することがある。とくに共振周波数のときには激しく振動し、第5章で詳しく説明するが、騒音特性に大きく影響する。ぐいっと力が加わったときにシ

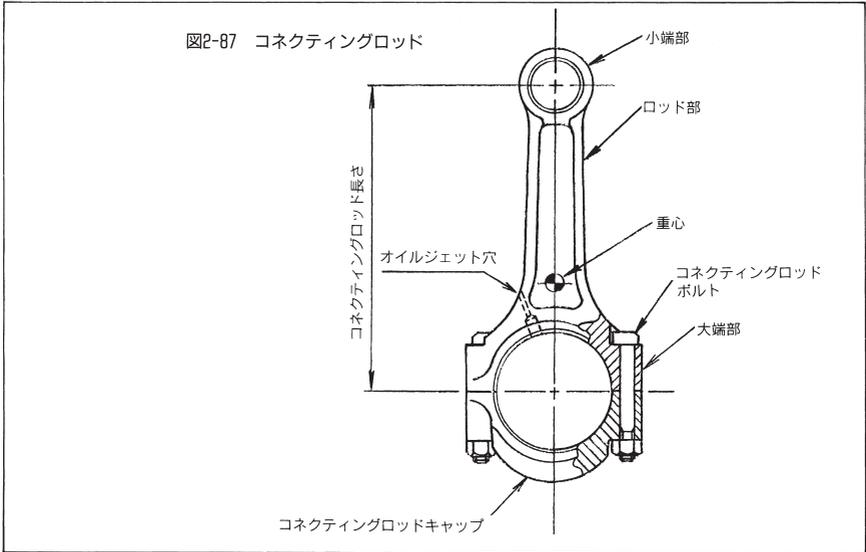
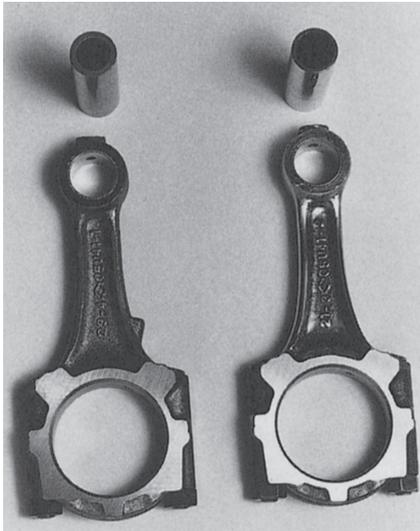


図2-88 スティール製のコネクティングロッド



右側がチェーンアップ用、ピストンピンにも注意。

図2-89 コンロッドボルトおよびナットの座の加工

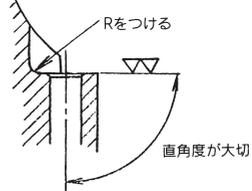
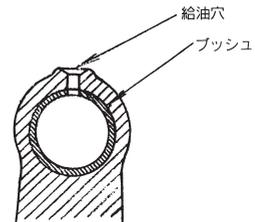


図2-90 ピストンピンの潤滑



また、座とボルト穴の直角度が確保されないと、ボルトの首部に応力が集中し、ボルトの切損が起こることがある。

次に、ピストンピンの潤滑はオイルの飛沫によって行う。また、ピンは小端部に

図5-29 ベアリングビーム付きのハーフスカート式の  
シリンダーブロック

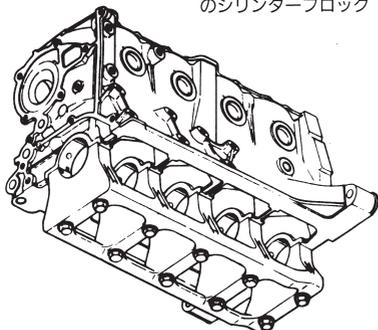


図5-30 V6エンジン用のベアリングビーム

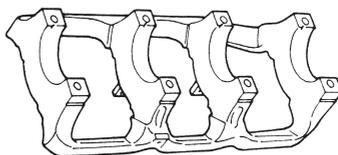
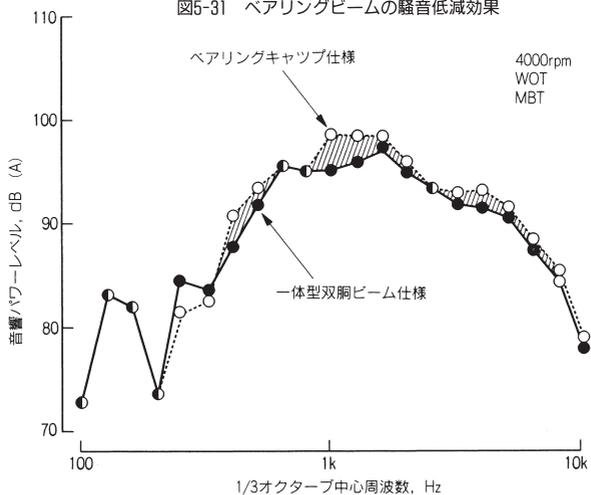


図5-31 ベアリングビームの騒音低減効果



バルクヘッドの強化やリブによる方法については第2章で説明したので、ここでは省略する。剛性向上はほとんどの場合重量増加を伴うため、トレードオフを考慮しながら重量効果を最大限に発揮させるようにする。たとえば、ほとんど重量を増加させずにシリンダーブロックのねじれ剛性を向上させる方法として、図5-33のように断面形状を台形とし、クランクケースの下部を円弧として、これとスムーズにつながる方法がある。これにベアリングビームを併用すると、さらに効果は大きくなる。しかし、この方法は軽金属製のオープンデッキ式のシリンダーブロックに適用するのは難しい。それは、ウォータージャケットを成形する金型中子を上方に抜き

## おわりに

オットーが自動車用ガソリンエンジンの原型である4サイクルエンジンを発明して、すでに140年以上が経過している。その間にいろいろな改良が加えられてきたが、まだ完成されたとは言いがたい。確かに、現時点で使われているエンジンは自動車用として課せられた要求を満たしている。

しかし、かつての排気や騒音などのように新たな社会的なニーズが現れると、それに対応して技術は進歩する。地球温暖化対策として、従来の燃費対策とは別の次元の熱効率の改善が要求されると、またその方向の技術が急速に進歩する。ハイブリッドシステムとして、究極の総合熱効率を追求するのに最適なエンジンも必要になる。

一方、新技術や新材料が開発されれば、それを適用して一段とレベルアップされる。シーズがリードする開発である。かつて、電子制御技術を採用することにより、空燃比や点火時期の制御に革命をもたらした。それまでの機械式の制御では不可能であった運転変数を自由自在にセットできるようになった。

また、現在のピストン・クランク機構にまさるメカニズムは実用化されているとは言いがたい。だが、そのニーズが高まるとそちらの技術も進歩するだろう。エンジンは社会の要求に沿って進化してゆく。これほど多くのエンジニアが係わって、まだ発展の段階にある機械はまれである。そこにエンジニアの夢がある。

林 義正

## 著者紹介

林 義正(はやし よしまさ) 工学博士

1939年3月東京都生まれ。九州大学工学部航空工学科卒業。1962年日産自動車(株)入社。中央研究所(当時)で高性能エンジンの研究、排気清浄化技術の開発、騒音振動低減技術の開発などを経て、スポーツエンジン開発室長、スポーツ車両開発センター長を歴任。日産のレース活動を率い、全日本スポーツプロトカー耐久レース3年連続選手権獲得。米国IMSA-GTPレース4連続選手権獲得、第30回デイトナ24時間耐久レースで数々の記録を樹立して日本車として初優勝。1994年2月に退社。同年4月に東海大学工学部動力機械工学科教授に就任、総合科学技術研究所教授を歴任。2008年、学生チームとしてル・マンに世界初出場。2012年退官と同時に(株)ワイ・ジー・ケー最高技術顧問。主な受賞歴にSpirit of Le Mans Trophy, 科学技術庁長官賞, 日本機械学会賞, 自動車技術会賞などがある。著書に『林教授に訊く「クルマの肝」』『レーシングエンジンの徹底研究』、『レース用NAエンジン』、『エンジンチューニングを科学する』(共にグランプリ出版), 『世界最高のレーシングカーをつくる』(光文社新書)などがある。

## 乗用車用ガソリンエンジン入門

2018年11月21日 新装版初版発行

著者 林 義正

発行者 小林謙一

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 モリモト印刷株式会社