

## 自動車用エンジン発達の歴史的な考察（第3報）

荒井久治

### 12. 内燃エンジンを動力とした自動車のめばえ

#### 12. 1 内燃エンジンを使った自動車の動き

(1) 1826年にイギリスのサミュエル・ブラウンが大気圧式ガス・エンジンを使い、ガス自動車を造った。

(2) 1858年にイタリアのバルサンチとマテウッキはガス自動車を造った。

(3) ドイツのベルリンの北145kmのマルキンの町のジークフリート・マルクスは1864年に2サイクル・エンジンを搭載した木造りの車を造った。エンジンは直接後輪に付けられ、原始的な車に仕立てられた。更に1874年に別な形の試作車を造り、マルクスは「シュトラークセン・ワーゲン」と呼んだ。この車は1874年から1875年にかけて公開され、成功を収めたが、それ以上の進展はなかった（図12. 1）。

(4) 1884年にフランスのドラマル・ドブットビュがガソリン自動車を造り、その特許を取った。

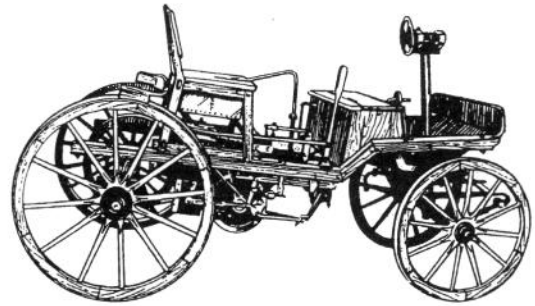


図12. 1 マルクスのガソリン自動車

#### 12. 2 カール・ベンツとゴットリーブ・ダイムラーの最初の自動車

(1) 1886年にドイツのカール・ベンツとゴットリーブ・ダイムラーは、それぞれ独自にガソ

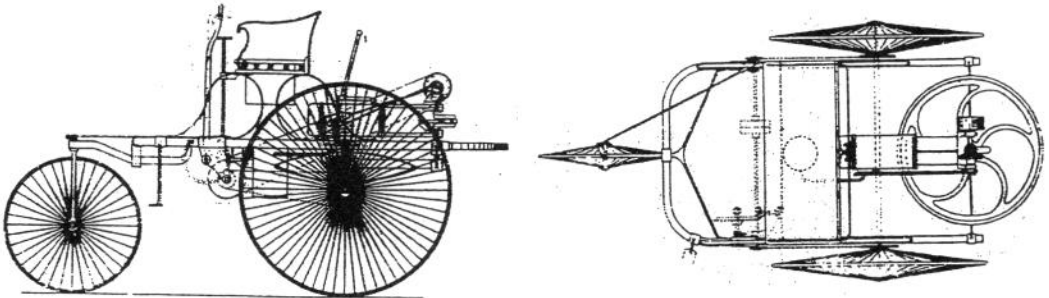


図12. 2 ベンツ・パテント・モートルヴァーゲンの特許証より

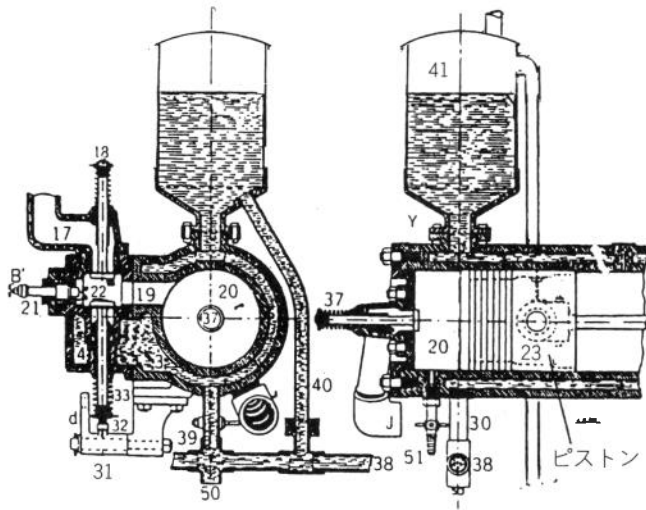
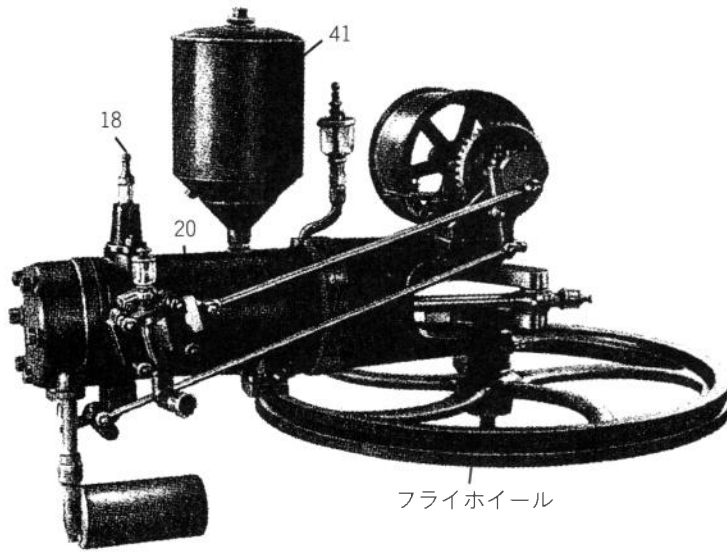


図12. 3 ベンツの最初のエンジン (1886年)

リン自動車を造り、ベンツはマンハイムでダイムラーはコンスタットで走らせた。どちらが先に走らせたかは定かではない (図12. 2, 12. 3, 12. 4)。

(2) 定説では世界で初めてのガソリン自動車はベンツとダイムラーによるとされている。しかし国により異論がある。例えばイギリスではサミュエル・ブラウンが1826年に大気圧式ガソリン・エンジンの自動車を、オーストリアではジークフリート・マルクスの1874年から1875年にガソリン・エンジンを搭載した自動車を、イタリアではバルサンチとマテウッキが1858年にガス・エンジン自動車を走らせた。フランスではドラマル・ドブットビュが1884年にガソリン自動車の特許を、アメリカではジョージ・セルデンが1875年にガソリン自動車の特許を申請した時をガ

ソリン自動車の初めと主張とする人がいる。

しかし、自動車の発達に影響を与え、発展させる原動力となった自動車はベンツとダイムラーの自動車である。他は個人的な試作に終りその後の発展に結び付いていない。

### 13. ベース・エンジンから派生したエンジン

オットーの発見した4サイクルエンジンは産業用に広く使われた。同時に19世紀末にヨーロッパのドイツ、フランスを中心に自動車用に使われ始めた。その頃の新大陸のアメリカで広大な大陸の交通機関としてフォート、GMを中心に20世紀に入り自動車大量生産されるようになった。ディーゼルエンジンも考え方によってはオットーの4サイクルエンジンから派生したもので点火により燃焼し始めるか、空気を圧縮して圧縮の発熱により自己着火するかの差である。

ディーゼルエンジンはオットーのガソリンエンジンに較べ遅くかつ取扱いの難しさから主としてトラックから使われ始めた。乗用車には1927年から使われ始め、ガソリン車より遅れること51年後であった。その間にオットーのエンジンの風変わりな使われ方をした「ロータリーシリンダーエンジン」とドイツのバンケルの考えた「ロータリーピストンエンジン」を考察する。

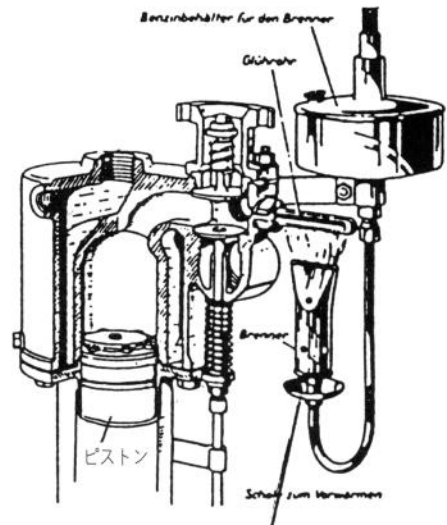


図12. 4 赤熱管（ホット・チューブ）点火のダイムラー1号車（1886年）

## 13. 1 ロータリーシリンダーエンジン（シリンダーが空中で回る）

### 13. 1. 1 自動車への採用

(1) 自動車に使われているガソリンエンジンやディーゼルエンジンは、エンジン本体が回らないようにシリンダーを車体に固定している。ピストンの動きはクランク軸を回転させ、クランク軸から動力を取り出している。この一般的な内燃エンジンの動力の取り出し方から、完全に逆の発想を行ない、クランク軸を固定し、エンジンを空中に浮かした状態にしてエンジンキーを回す。するとクランク軸を中心にシリンダーが回転を始める。このエンジン本体の回転を、そのまま動力として利用した「シリンダーが回る不思議なエンジン」がロータリーシリンダーエンジンである。

(2) ロータリーシリンダー式ロータリーエンジンを最初に搭載した自動車は、アメリカのステファン・バルツァーにより1894年に造られた。三つのシリンダー（3気筒）のエンジンを120度間隔で、クランク軸を回転中心として星形に配列し、エンジンがスタートするとシリンダーがぐるぐると回り、側面に取り付けられたギヤを回転し、かみ合ったギヤで変速して自動車の後輪の

車軸を回して走らせた。この3気筒ロータリーシリンダーエンジン付き自動車は、リヤエンジン、リヤドライブのRR車であった。そのエンジンはボア径102mm、ストローク121mmの2960ccのエンジンで、毎分600回転して3馬力を発生した。そのエンジンを搭載した車体は、自転車を二つ平行に配置して、パイプでワイヤ形フレームで構成し、それに前後の車軸を取り付け、車体の後方の上方に箱形の座席を置いたものだった。運転用のかじ取り装置は前輪の方向をコントロールするため、牛のしっぽ形のかじ取りレバー、いわゆるティラーを設けた。この車は自動車の原型に近い、素朴な形であった(図13. 1)。

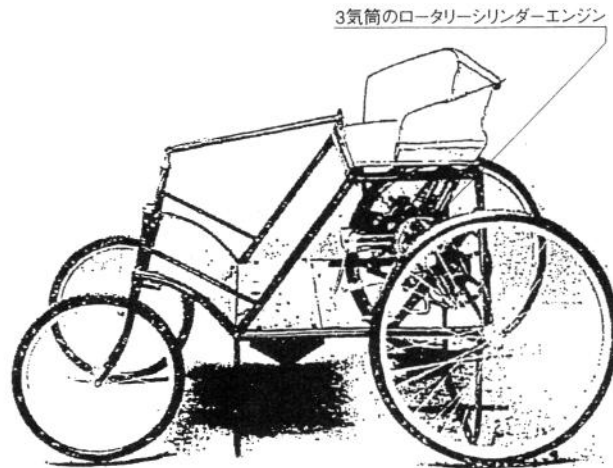


図13. 1 バルツァーの3気筒ロータリーエンジン (1894)

### 13. 1. 2 ロータリーシリンダーエンジンの飛行機での大活躍と衰退

(1) 1914年にはフランスのローンは7気筒の8400ccの星形のロータリーシリンダーエンジンを作り、毎分1250回転で65馬力の飛行機用エンジンを作った。続いて星形9気筒のうち43機種が

ロータリーシリンダーエンジンであったから、星形エンジンの66%を占めていたことになる(図13. 2, 13. 3)。

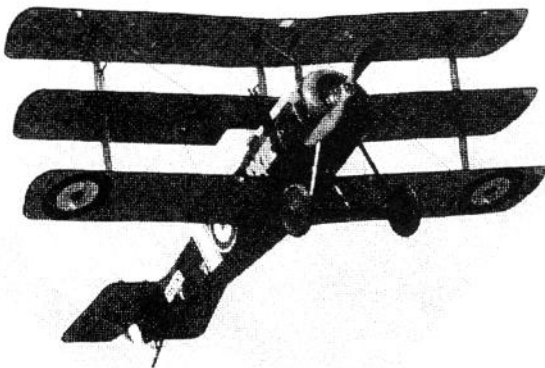
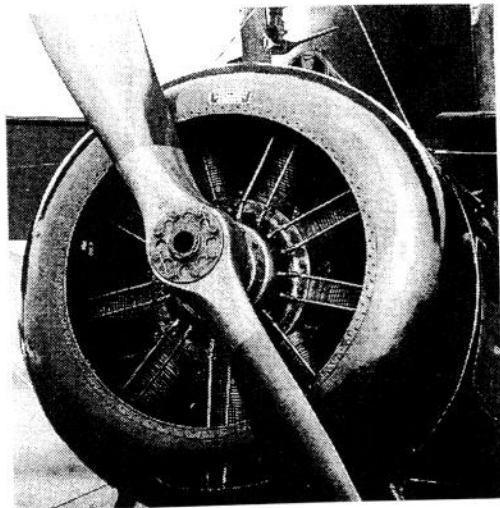
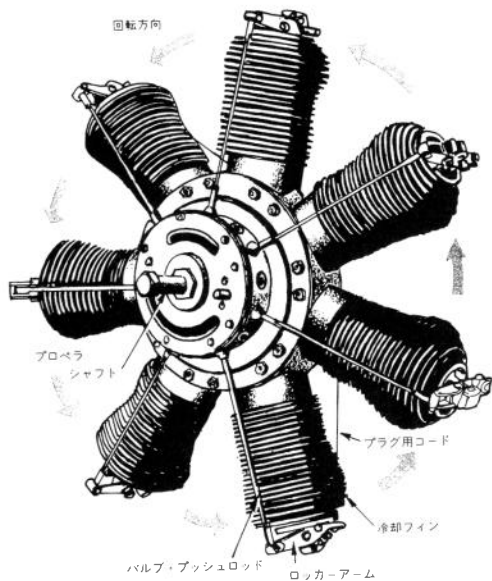


図13. 2(A) ロータリー・シリンダー・エンジンを搭載した飛行機

(2) ロータリーシリンダーエンジンは飛行機の実験がまだ低い初期のころ、飛行機用エンジンとして最適であると考えられ、一時期は隆盛を極めた。しかしその後の飛行機の高性能化で、エンジンの高回転化の時代の流れに追従できない状態となり、次第に衰退していった。



〔空冷〕ローン・ロータリー・エンジン

図13. 2(B) プロペラと一緒に回るロータリーシリンダーエンジン

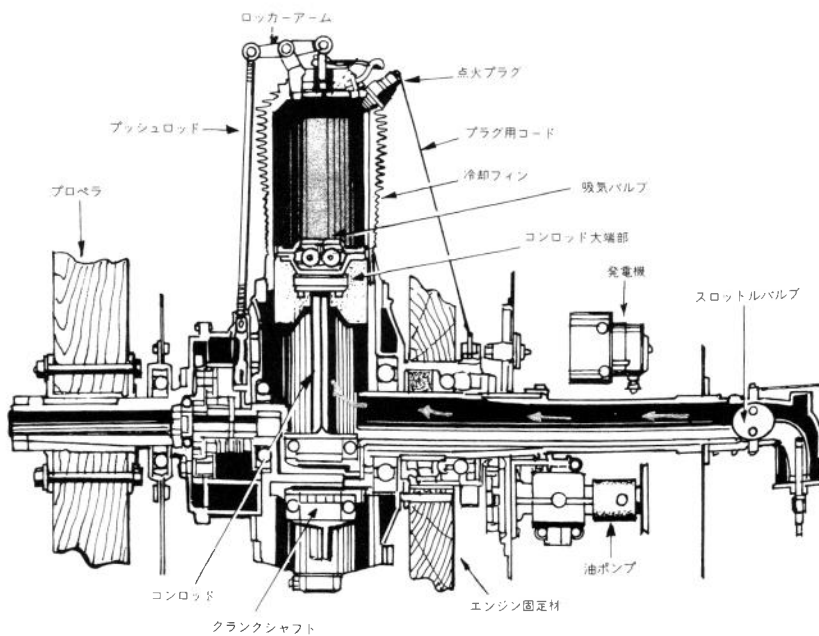


図13. 2(C) ローン・ロータリー・エンジンの断面

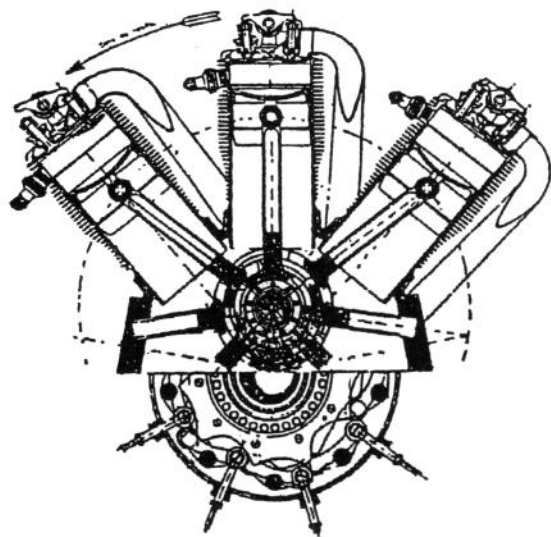


図13. 3 ローラのJ形110hpエンジン (1914)

## 13. 2 ロータリーピストンエンジン

### 13. 2. 1 歴史的な流れ

ドイツのF. ヴァンケルは長年、回転機械の研究をしていたがNSU社の技術協力を得て1954年にロータリーピストンエンジンを共同開発し、1958年に完成した。

この段階ではオットーやディーゼルのエンジンのように基本的に内燃エンジンとして完成した、実用的な耐久性のあるものではなかった。エンジンの基本原理が構成した段階であった。実用車用に完成させたのはマツダで1967年にコスモスポーツに搭載して発売した。なお、以降

ロータリーピストンエンジンを略してロータリーエンジンと呼ぶ。

### 13. 2. 2 ロータリーエンジンの作動

(1) ローターはハウジングの中を回転しながら燃焼のエネルギーを受け回転力を発生する。ローターと一体に取り付けられたローターギヤは回転力をローターより受け、固定されたステーションナリーギヤとかみ合い、エキセントリックシャフトを回転させる。エキセントリックシャフトがエンジンの出力軸となる (図13. 4, 13. 5)。

(2) ローターは一回転する間に3回の燃焼を行ないながらエキセントリックシャフトを3回転させ、出力軸の1回転当たり1回、出力を発生させるメカニズムが構成されている。レシプロエンジンと比較すると、ロータリーエンジンのローターの三つの作動面はレシプロエンジンの一つのピストンに相当し、ローターはあたかも三つのピストンを持つレシプロエンジンのように作動する。このようにローターは忙しく働くため、出力軸のエキセントリックシャフトの1回転に1回の燃焼があり、2サイクルのレシプロエンジンと同じ出力特性を持つ。出力軸の回転角度で示すと、ロータリーエンジンのローターの一つの面の作動は、出力軸が3回転する1080度 ( $3 \times 360$ 度)の間に、吸気から排気までの1サイクルを行なう。これに対してレシプロの4サイクルエンジンでは、出力軸 (クランク軸) 2回転で一回、燃焼が行なわれ、720度 ( $2 \times 360$ 度)で吸気から排気までの1サイクルが完了する (図13. 6)。

### 13. 2. 3 ロータリーエンジンの特長

(1) ロータリーエンジンは大きさ、重さともレシプロエンジンの3分の2ほどの、比較的コ

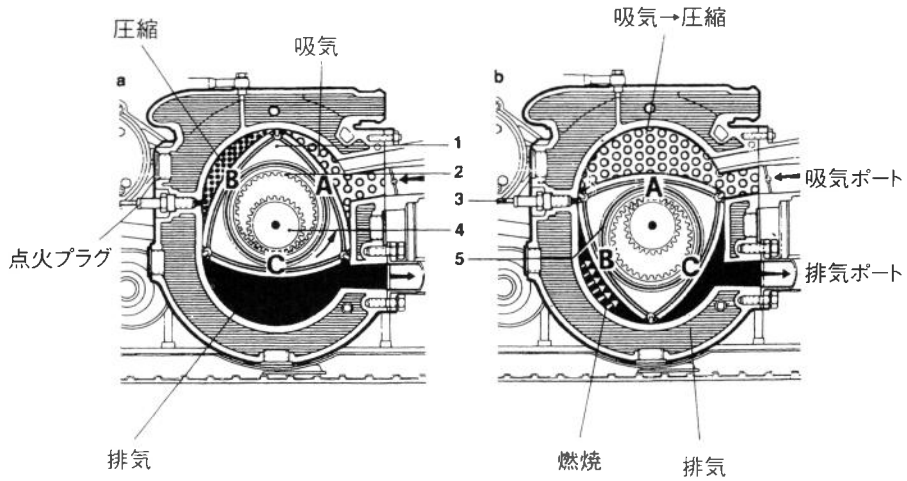


図13. 4 ロータリーエンジンの作動

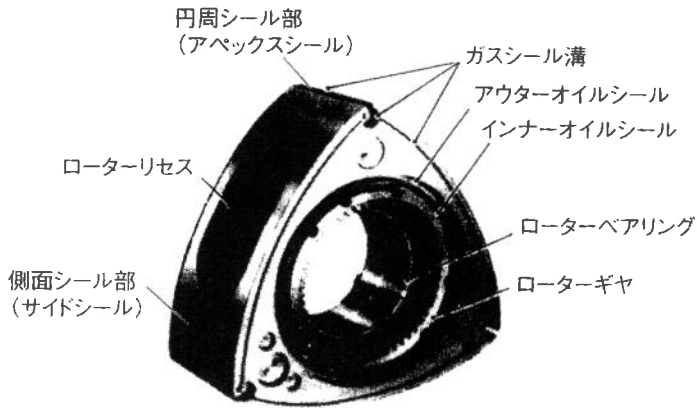


図13. 5 ローター各部の名称

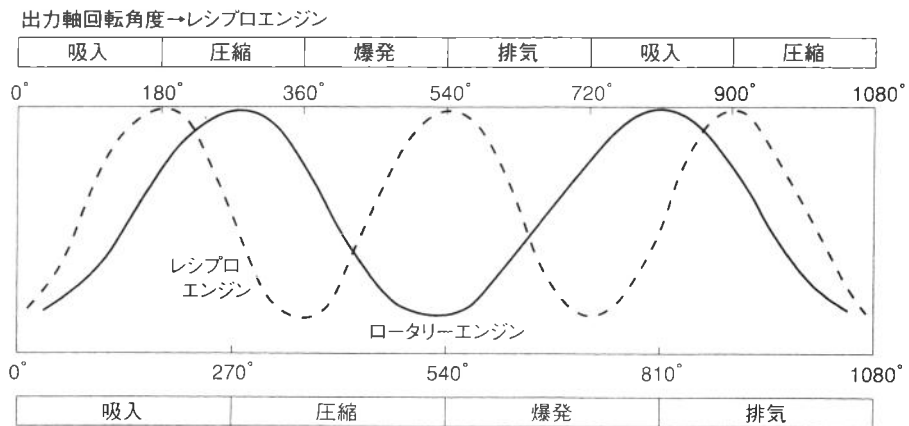


図13. 6 ロータリーエンジンの作動と出力軸の回転角度の関係

コンパクトなエンジンである。4サイクルのレシプロエンジンに使われるポペット形の吸・排気バルブは、ロータリーエンジンではハウジングに設けられた単なる固定穴の吸気と排気ポートで、レシプロエンジンのバルブ、バルブガイド、オイルシール、弁ばね、バルブリテーナー、さらにはそのバルブを動かすカムシャフトや歯付きベルトはない。2サイクルのレシプロエンジンに似て部品点数が比較的少ないシンプルな構成だ。

(2) 性能面では小さなエンジンから大きな出力を発生することができる。さらにローターが円形に近い形状であるため回転のつり合いがよく、高速回転を容易にし、振動の発生や騒音が小さい。ローターの回転慣性質量はレシプロエンジンのピストンのクランク軸を含む回転慣性質量に比べ小さく、加速するとすぐにエンジン回転が上昇し吹き上がりやすい。いわゆるレスポンスのよいエンジンである。

### 13. 2. 4 ロータリーエンジンの本質とは？

ロータリーエンジンは、なんとなく電気モーターのような完全な回転体であると考えている人が多いだろう。ローターは確かに回転しているために、このように考える人がいても不思議ではない。問題はローターの回転軸中心が回転に従って絶えず変化し、一定の回転中心を持っていないことである。

ローターギヤの回転中心は、ステーションナリーギヤの回転中心から  $\epsilon (= R - r)$  の距離を保って回転し、この偏心量  $\epsilon$  が、燃焼で生じた高圧力をローターに作用し、発生した力を回転トルクに変える役割を果たしている。この作用はとりも直さず、レシプロエンジンのクランク軸の偏心効果に相当する。

このように、ロータリーエンジンの本質はあくまでもレシプロエンジンなのだ。それは吸気から排気までのサイクルがレシプロエンジンと同じであることからもうかがえるのだ。

## 14. 大気汚染と排出ガス対応

### 14. 1 大気汚染と歴史的に見た対応

#### 14. 1. 1 アメリカにおける大気汚染問題の発生と日本

(1) 第2次世界大戦の戦勝国アメリカの経済は多いに発展し、乗用車も好景気に支えられ大型化し、V8エンジンを付け航空機のようなティール・フィンを付けたものが大量生産され、1955年には900万台を越し、1965年には1100万台を突破した。

ロサンゼルスは、一方は太平洋に面し内陸部に向かって砂漠との間に山があり、年間を通じ温暖な気候で雨量も少なく、太陽光線に恵まれた気候の良い所で多くの人々が移り住むようになった。空気の淀み易い地形のなかに戦後フリーウェイが市内を縦横に結んで建設された。

多くの車が走り回るようになると、1950年後半には、晴天にもかかわらずハリウッドの高級住宅地の山の上に白い雲が浮かび上がり、眼が刺激されるようになった。



早速自動車との関係が調べられ、沢山の自動車が多岐形状のなかで走り回ると、排出ガス中の HC や  $\text{NO}_x$  が空气中に淀み、太陽の光線により光化学スモッグが発生していること、CO は人の呼吸器から血液に入り有害な作用を生ずることが判った（図14. 1）。

カリフォルニア州の大気保全局は1963年にエンジンのプロバイ・ガスを大気中に放出していたのをクランクケース・ベンチレーション・バルブを採用して再燃焼させる排出ガス規制を世界に先駆けて行った。

(2) 日本も1966年にエンジンのアイドリング時のCOの濃度を3%以下にする規制を開始した。キャブレタのアイドリング調整ねじを調節し、COメータで3%以下にセットし封印するもので、比較的容易なものであった。

(3) 運転モードは市内走行に近い4モードから更に厳しい10モード運転とし、昭和48年排出ガス規制、昭和50年、51年規制と連続して規制を次第に厳しくし、昭和53年（1978年）規制では当時アメリカのマスキー上院議員が提案していたマスキー法案よりも厳しい排出ガス規制が適用された。

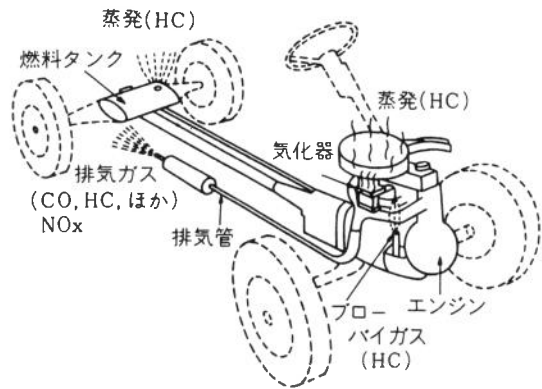


図14. 1 自動車からの排出ガスと排出源

#### 14. 1. 2 日本におけるリーン・バーン・エンジンの開発

(1) 空気とガソリンの混合気を薄くして18~20以上にすると、CO, HC,  $\text{NO}_x$  の3つの排出ガスの濃度が低くなるため、各社共このリーン・バーンに取り組んだ。全体の混合気はリーンで円滑な出力を得るため層状給気方式が考えられるようになった。

(2) 1975年にホンダは副室付き成層給気燃焼方式 (CVCC) を1500ccの直列 SOHC 4気筒エンジンに採用した。副燃焼室用バルブを持つ3バルブ・エンジンで、キャブレタは副燃焼室用と主燃焼室用2バレルを一体に組み合わせ、副燃焼室に濃い目の混合気を供給し、点火プラグにより副燃焼室で点火した燃焼ガスは副燃焼室の孔から火炎を吹き出し主燃焼室の薄い混合気に燃え広がる方式であった。

(3) 1976年には、昭和51年排出ガス規制に対応し、トヨタが乱流生成ポット (TGP) を設け、この内部での燃焼火炎によって主燃焼室の希薄混合気を効率良く燃焼させ、排気中に残る HC, CO は保温マニホールド内で酸化させる方式を一部のエンジンに採用した。

(4) 1977年に三菱は昭和53年排出ガス規制に対応して、小型のジェット・バルブを設け、キャブレタより濃い目の空燃比の混合気を取り入れ、シリンダ内の希薄混合気に向かって強い乱流を生じさせ、良好な燃焼を得るジェット・バルブ式希薄燃焼方式を採用した。

### 14. 1. 3 欧米におけるリーン・バーン・エンジンの開発

(1) 1954年“リーン・バーン”エンジンとしてフォードは PROCO エンジンを発表した。それは主室のみを持ち、空燃比は12~20に設定された。その後フォルクス・ワーゲンは PCI と称するホンダの CVCC と同じように副室を持つエンジンで、空燃比を14~20で運転するものを発表した。

1970年代前半は大気汚染防止のため、各社共層状給気成層燃焼に取り組み、エンジンの燃焼室内の混合気の燃焼状態と生成ガスの関係が研究され、燃焼に関する研究が急速に進んだ。

(2) 1975年にクライスラーの6600ccと7300ccのV 8 エンジンに電子制御点火方式を用いた“リーン・バーン”システムを採用した。これはエンジン回転速度、マニホールド負圧、吸気温度、水温、スロットル弁開度、トランスミッションの速度位置などの変化を検出し、コンピュータにより点火時期を最適に制御するもので、空燃比は約18の薄さで運転された (図14. 2)。

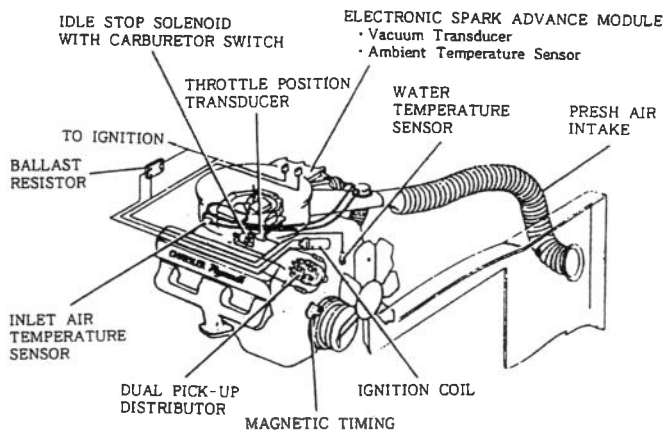


図14. 2 クライスラー“リーン・バーン”システム

### 14. 1. 4 理論空燃比での燃焼と三元触媒の開発と利用

(1) リーン・バーンの希薄燃焼により、排出ガスを浄化するエンジンと、もう1つは理論空燃比 (14. 7前後) にして未燃焼ガスの HC と CO は酸化し、無害の水と二酸化炭素にして排出し、もう1つの NO<sub>x</sub> (窒素酸化物) は還元して N<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> にする効率の良い三元触媒が開発されそれを用いたエンジンが造られた (図14. 3)。

(2) 三元触媒の場合、ガソリン中の鉛はこの触媒を早期に劣化させるため、有鉛から無鉛ガソリン化が進められ、次第に三元媒体方式のエンジンが主流を占めるようになった。

14. 2 ホンダの CVCC エンジンに見る  
排出ガス対応

14. 2. 1 国内メーカーの排出ガス対応

(1) 自動車の国内生産の増大と共に輸出も増え、1970年にはアメリカへの輸出車は年に80万台にも達した。この輸出車にも、厳しい「マスキー法案」の排出ガス規制が実施される見通しとなってきた。もし規制値に合格しないと輸出できない事態となり、メーカーにとっては死活問題となる。

日本の環境庁は昭和50年、51年の二段階に分けて規制を強化し、53年には「マスキー法案」並みの規制を実施することにした。特に窒素酸化物については「マスキー法案」より厳しい値とすることが検討された。国内のメーカー各社は一斉に対策を求め、会社の総力を上げ研究開発に取り組んだ。

(2) 初期の排出ガス規制への対応は、エンジンモデフィケーションと呼ばれる、エンジンの燃焼の基本を見直して有害ガスの発生を減らす方式であった。規制値が次第に厳しくなるとそれだけでは不十分であると考えられ、各社は世界各国の自動車メーカーの排気ガス対応の動向を調べながら新しい対応策を求めて研究が進められた。排出ガス情報は社会的な共通の課題としてオープンにされ、各社の対応状況は比較的容易に入手できる状態におかれた（表14. 1）。

(3) その情報により、世界的な大勢として触媒による浄化方式の採用に向かって進められていることが次第にはっきりしてきたため、各社の開発の中心は触媒方式の実用化に移っていった。

14. 2. 2 本田宗一郎の哲学と CVCC エンジン

(1) ホンダも世の流れに沿った触媒方式の研究開発をしていたが、社長であり、かつ根っからのエンジン屋であった本田宗一郎は、彼独特の哲学から“触媒なんか付け焼き刃に過ぎない、何ら問題の本質的な解決にならない。燃焼で生じた有害物質ならば、燃焼の改善によって解決するのが根本療法だ”と、エンジンの燃焼を改善することで規制を解決することに挑戦した。

(2) そこで若い技術者を集め「新しい燃焼方式のエンジンの開発」を指示した。それはエンジンに供給する空気と燃料の重量割合を変えたものだった。すなわち「空燃比」を変えて排出ガ

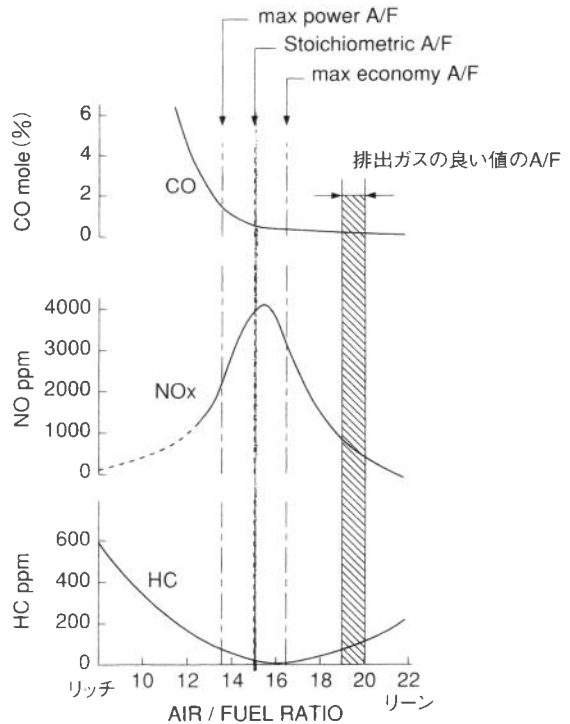


図14. 3 排出ガスと空燃比

表14. 1 ガソリン自動車排出ガス対策の実施方法

規制対象ガス	規制実施方法の内容		対象関連要素
一酸化炭素 (CO)	エンジン モディフィ ケーション 方式	機関の燃焼の改善	燃焼室形状 (含副燃焼室の付加), 混合気の燃焼室内でのスワール効果 空燃比, 吸気管形状, 混合気加熱条件, 点火時期制御など
		適性混合気の供給	気化器, ガソリン噴射, 各種補機構
炭化水素 (HC)	排気系での処理		アフタバーナ方式, リアクタ方式, 2次空気噴射装置 酸化触媒装置
窒素酸化物 (NO <sub>x</sub> )	エンジン モディフィ ケーション 方式	機関の燃焼の改善	燃焼室形状 (含副燃焼室の付加)
		適性混合気の供給	気化器, ガソリン噴射, 各種補助機構 (排気再循環装置を含む)
	排気系での処理		還元触媒装置
炭化水素 (HC)	エバポレーションロスコントロールデバイス (ELCD)		燃料タンク系を含む燃料系統 掃除空気による混合比変化と気化器調整
	ポジティブクランクケースベンチレーション (PCV)		ベンチレーション弁と付属装置空燃比が変化するので気化器調整が必要

規制に関係する CO, HC, NO<sub>x</sub> の排出量を計測すると, 希薄な空燃比の燃焼によってのみ, 規制のクリアが成し遂げられる見通しだったからである (図14. 3)。

(3) 問題は, 薄い空燃比では点火プラグでスパークを発生させても, なかなか着火から燃焼に入ることができないことであった。そのため, 点火プラグ付近を着火・燃焼しやすい濃い空燃比とし, 遠ざかるにしたがって薄い空燃比にすることにした。いわゆる「成層燃焼」である。そして燃料と空気をよくかくはんし, 素早く完全に燃焼させるため, シリンダー内で渦を巻いた混合気流を作り出すことが試みられた。多くの試験研究の結果生まれたのが, 複合渦流燃焼室と呼ぶ燃焼室を持つ, CVCC エンジン (Compound Vortex Controlled Combustion Engine) であった。

### 14. 2. 3 風変わりな燃焼室

(1) CVCC エンジンはガソリンエンジンではあるが, 予燃焼室を持つディーゼルエンジンのように, 副燃焼室と主燃焼室を備えている。普通のガソリンエンジンとは大きく変わった構造を持っていた (図14. 4)。

(2) 副燃焼室は細い穴で主燃焼室につながり, CVCC エンジン用に特別に設計されたキャブレターから副燃焼室には濃い混合気を送られ, 主燃焼室へは薄い混合気を送られた (図14. 5)。主燃焼室に送られた混合気は, シリンダー内で強力な旋回流を発生するように吸気通路が設計されていた。このエンジンのねらいは, 薄い混合気を完全に燃焼するため, スパークプラグの先端

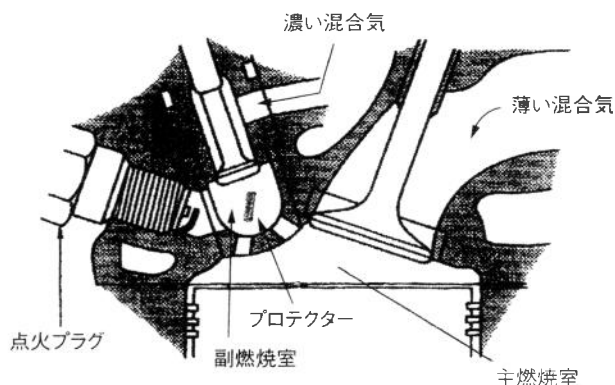


図14. 4 CVCC エンジンの燃焼室

に近い所の火炎の発生源には濃い燃料を供給し、スパークの火花を確実に捕え、副燃焼室内の混合気を一気に燃焼させ、その火炎トーチを主燃焼室に噴き出させ、渦を卷かせた薄い混合気一気に伝播（でんぱ）して完全燃焼を図るというエンジンであった。

#### 14. 2. 4 CVCC エンジンで世界のホンダに

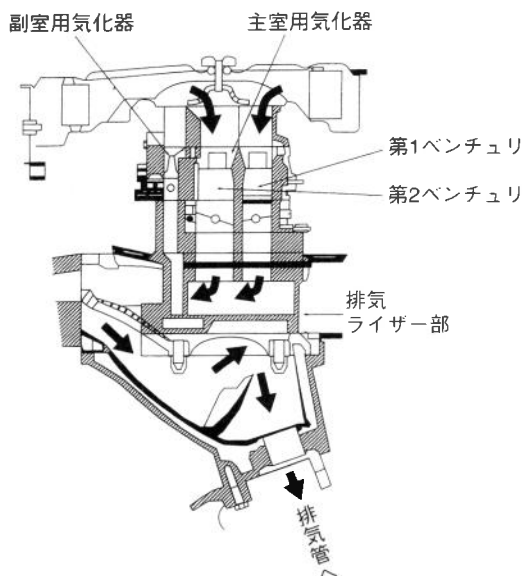


図14. 5 CVCC エンジンのキャブレター

(1) 本田宗一郎を有名にしたのは、アメリカの環境庁 (EPA) がマスキー法案に対する各社の規制値の対応の可能性を聴くため、1972年に公聴会を開いたときであった。アメリカのビッグ3を初めとして、日本の自動車製造メーカー各社が呼ばれた。どの会社も規制値達成を目指して技術開発を行なっているが、まだ量産化のめどは立っていない、もうしばらく規制を延期して欲しいと主張した。

(2) ところが本田宗一郎は公聴会で、ホンダはCVCCと呼ぶ新しいエンジンの開発により規制値クリアが可能になったと証言した。これはアメリカを初め各国のマスコミから大きく採り上げられ、世界の自動車業界に

大きな衝撃を与えた。

(3) 本田宗一郎とホンダのCVCCエンジンは一躍脚光を浴びることになった。CVCCエンジンの自動車への採用は、まず1971年に低公害エンジンとしてCVCCエンジンの全容を発表し、翌1972年にCVCCエンジンを搭載した1169ccの「シビック」を発売した。シビックは低公害車として爆発的な売れ行きを示した。

1973年に画期的なCVCCエンジンの開発関係者は、科学技術庁長官賞を受賞した。このように日本の各社は生き残りをかけ必死に排出ガス対応に全力を注ぎ、リーンバーンでかつ完全燃焼を図ったエンジンを作り出し世界一の性能を達成した。

## 15. 燃費規制と対応

### 15. 1 燃費規制と対応の経過

#### 15. 1. 1 アメリカにおける燃費規制および日本の対応

(1) アメリカでは、1973年の石油危機から1975年に自動車の消費エネルギーの節約を求める法律が成立した。これは各自動車メーカーの企業別、販売車別の調平均燃費を規制するもので、CAFE と呼ばれた。年度毎の燃費規制値が示され、規制にあわない自動車メーカーは未達分1台、0.1マイル/ガロン毎に5ドルの罰金を課すとした。

(2) 日本でも1979年「エネルギーの使用の合理化に関する法律」が施行され、車両重量と燃費の関係のガイド・ラインが公示された。

(3) アメリカの規制や日本のガイド・ラインの設定により、エンジンの燃焼の改善が一層進み、吸気の充填効率の向上、吸気の渦流生成の強力化、高圧縮比化、摩擦損失・冷却損失の低減などの改善が進められた。

吸・排気バルブ・リフトおよび開閉時期の可変化など、1980年以降に多くみられるようになった。

### 15. 2 三菱の筒内直接噴射に見るリーンバーンエンジン

#### 15. 2. 1 直接噴射エンジンの発達

ガソリンの直接噴射エンジンは、古くからドイツで実用化の動きが始まっている。それはまず、飛行機のエンジンへの採用であった。1934年にドイツの最大の航空機エンジンメーカーのダイムラー・ベンツ（現在のベンツ社）は、ボッシュのディーゼル噴射ポンプを使い、単気筒エンジンの直接噴射テストを開始した。ノズルはピントル型から多孔型に変えられ、V型12気筒の3400ccのDB601型のカソリンエンジンが直接噴射エンジンに改造された。キャブレター付きのエンジンに比べ、出力は1050馬力から1200馬力と14%向上した。燃料消費率は235から210 g/PS・hと、10.6%低減した。このエンジンは1937年よりドイツ空軍に採用された。

乗用車への採用は、やはりベンツとボッシュがガソリンの噴射について共同開発を1946年より行ない、直列8気筒の3000ccのM186エンジンに直接噴射が試みられた。噴射ノズルは各シリンダーヘッドに取り付けられ、77.5kg/cm<sup>2</sup>の高圧で燃焼室に直接噴射された。出力は240PS/6000rpmであった。このエンジンは1954年に300SL ガルウイングクーペに標準装備され、1957年にかけて4000台ほど販売された。

#### 15. 2. 2 ガソリンエンジンへの燃料供給方式の変遷

(1) 1886年のベンツとダイムラーのカソリン自動車の出現以来、ガソリンエンジンは、空気と燃料の混合気をキャブレターにより作り出し、エンジンの吸気管の上流からシリンダーに供給

してきた（図15. 1）。

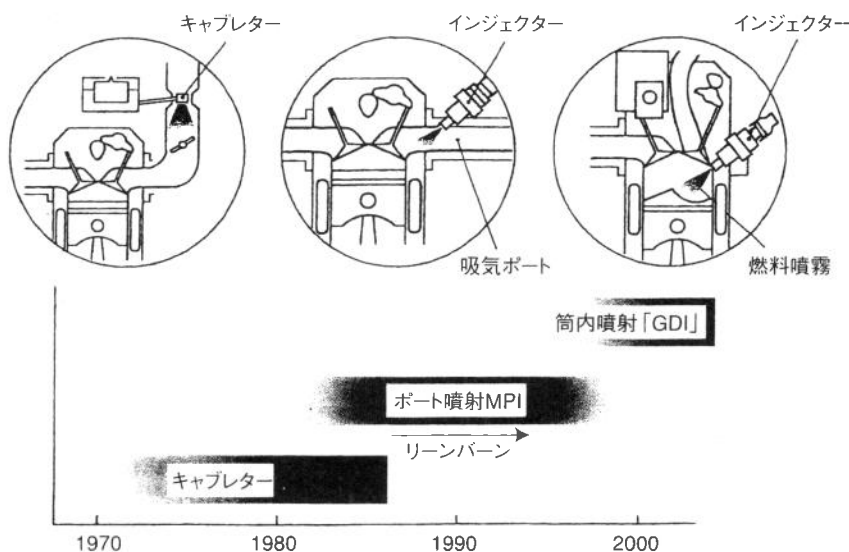


図15. 1 ガソリン・エンジンの燃料供給系の変遷

（2） 1970年ごろから排出ガス規制の強化と共に、ガソリンの噴射弁（インジェクター）は吸気ポートに近い吸気マニホールド内に噴射するように変化してきた。それは燃料の吸気管の内壁への付着が少なく、加速・減速時の応答遅れも少なく、適量の燃料が精度よくエンジンに供給できるためである。これは排出ガスの浄化と燃料の経済性に好都合であった。これは“吸気ポート噴射”と呼ばれる。

（3） 1995年の5月に三菱自動車よりガソリン筒内直接噴射エンジンの成功と量産計画が発表され、翌1996年9月から販売された。ディーゼルエンジンのように燃焼室に直接燃料を噴射する方式へと発展したガソリン直接筒内噴射エンジンの三菱 GDI エンジンは、この吸気ポート噴射よりもっと近く、燃焼室そのものにガソリンを噴射するもので、世界を“アッ！”と言わせた（図15. 2）。

三菱のガソリン直接噴射エンジンと上述のベンツのエンジンとの相違点は、ベンツは出力中心の馬力を出すためにガソリン噴射を行なったことに終始したのに対して、その後40数年を経て発売した三菱のエンジンは、時代の要求に合わせて、燃費・排出ガス・出力の三つの矛盾する課題を、電子制御とエンジン構造の画期的な変更、すなわち「直立吸気ポート」、「ピストンキャビティ」と「電磁スワールインジェクター」の採用により解決したことだ。時代に応える新しい考えのエンジンをいち早く発売し先駆者の役割を果たしたことである。

三菱自動車はベンツとの相違を「直接噴射方式による層状吸気・希薄燃焼の実用化」とし、“世界初”と表現している（GDI：Gasoline Direct Injection）。

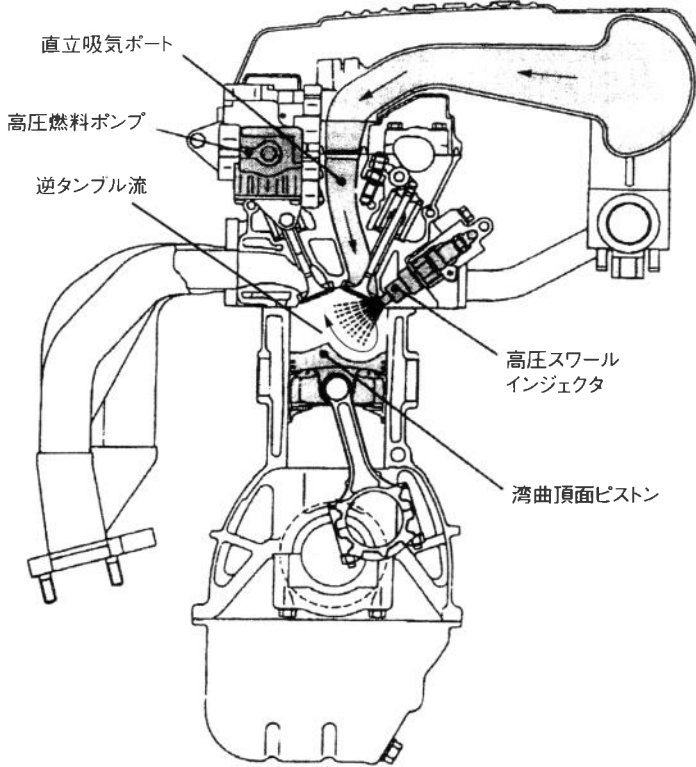


図15. 2 筒内噴射ガソリンエンジンの構成

### 15. 2. 3 GDI エンジンの負荷に対する空燃費特性

(1) 〔低燃費ゾーン〕：低燃費ゾーンは、定常走行で120km/hまでをカバーする広い実用走行域である (図15. 3)。

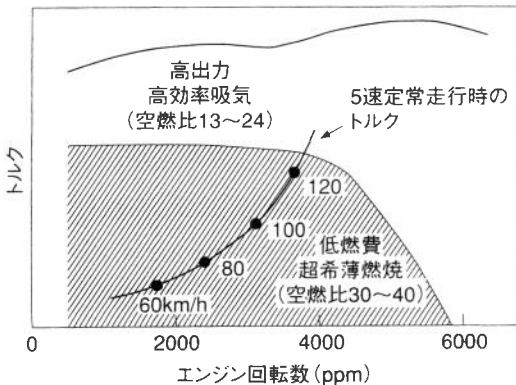


図15. 3 三菱 GDI エンジンの 5 速定常走行時のトルク曲線

(2) 〔高出力ゾーン〕：高出力ゾーンは、アクセルペダルの全開運転を含む高負荷・高速運転域を指す。これを「高負荷域」と呼び、ピストンの吸気ストローク中に燃料を噴射する。これを「吸気行程噴射、または前期筒内噴射」と呼ぶ。この領域の空燃比は24から出力空燃比の13まで、エンジンの要求に応じて供給する (図15. 3)。

(3) 中負荷域は、「吸気行程噴射」により、空燃比20~25の希薄な混合気を供



給する。

以上のように薄い燃料（リーン）を供給することと、その完全燃焼を図ることにより燃費・排出ガス・出力の3つの課題を見事クリアさせた。

## 16. ハイブリッドカーの登場

### 16. 1 ハイブリッドカー登場の背景

(1) ガソリン車は加速や減速時に有害成分を多く含む排出ガスを発生し、燃料消費を悪化させるが、加速や減速の少ない安定した速度で走ると有害な排出ガスの発生は比較的少なく、かつ、燃費も良いことが分かってきた。そのために排出ガスと燃費対応の手段として、GM、フォード、クライスラーのビッグ3はハイブリッドカーに注目し、1969年より開発を開始した。

(2) 1973年には産油国からの石油の供給が制限され、世界的な「第一次石油危機」が発生し、パニックになった。このような事態からアメリカ連邦政府は輸入車を含め、各自動車メーカーごとに米国内で販売している車の総合的な燃費規制を行ない、未達成のメーカーにはその状況に応じてペナルティーの罰金を課すことになった。

この厳しい排出ガスと燃費規制を満足する手段として、内燃エンジンを絶えず安定した回転域で回して常時バッテリーを充電し、モーターを回転することにより、自動車の車輪を動かす「ハイブリッドエンジンシステム」が有望な車として採り上げられるようになった。

### 16. 2. 1 世界最初のハイブリッドエンジンシステム（トヨタ）

ハイブリッド (Hybrid) とは、生物の「雑種」とか「複合」と言う意味の言葉である。2種類以上のエンジンを組み合わせて、それぞれのエンジンの持つ特徴を生かし、不得意なところを相互に補うよう、巧みに組み合わせたものをハイブリッドエンジンシステム (Hybrid engine sys-

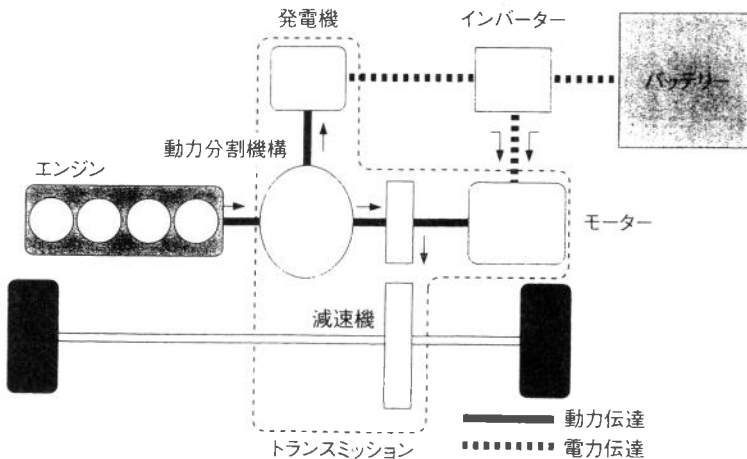


図16. 1 トヨタ・ハイブリッドシステム

tem) と呼ぶ。この種のエンジンを搭載した自動車が「ハイブリッドカー」だ。

世界最初のハイブリッドエンジンシステムは、トヨタ自動車のハイブリッド乗用車の「プリウス」に搭載され、「トヨタ・エコプロジェクト」の一環として1997年12月に発売された。この車は居住性と燃費を良くするため、新しくデザインしたスタイルで空力特性を満足させ、従来の同クラスの車に比べ約50万円アップの売値(約1.3倍)で約2倍の燃費を達成した。排出ガス面では従来車に比べCO<sub>2</sub>を半減させ、CO・HC・NO<sub>x</sub>を10分の1と大幅に減らした。この画期的なハイブリッドカーは新しい形式のエコ自動車として世界的な注目を浴びた(図16. 1)。

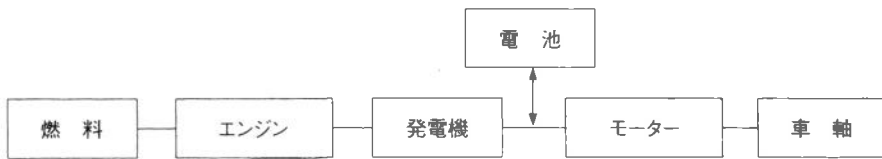
### 16. 2. 2 ハイブリッドの動力の組み合わせ

ハイブリッドカーの動力の組み合わせには、次の三つの方式がある。

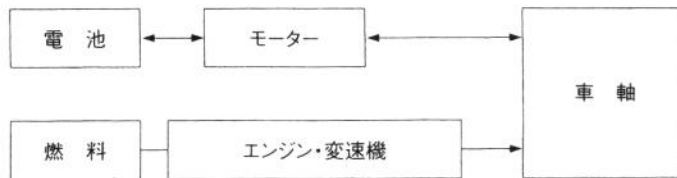
(1) [フライホイール式]: 減速時にはエネルギーをハイブリッド用フライホイールの回転エネルギーとして蓄え、加速時には蓄積したフライホイールのエネルギーを直接または電気的なエネルギーに変えて、車の加速を助ける方式。原動力のエンジンは安定した回転速度で回すことができるため、排出ガスの有害成分の排出が少なく、燃費向上が期待できる。フライホイール式はスペースを要するため、大型バスやトラックなどに最適である。

(2) [蓄圧エネルギー式]: エンジンの発生するエネルギーの一部を油圧や空気圧にして蓄圧エネルギーとし、減速時には蓄え、加速時には放出することにより車の加速を助ける。原動力のエンジンは安定した回転速度域で回すことができる。この方式は関係部品の点数が増えるため、大型車ほど搭載性が有利になる。

(3) [バッテリー式]: この方式は乗用車でも使える方式で、エンジンを安定した回転速度域で発電し、その電気をバッテリーに蓄えておき、必要なときにモーターに送り、モーターの力で



(A) 【シリーズ式】



(B) 【パラレル式】

図16. 2 ハイブリッドエンジンシステム

けで車を動かしたり、エンジンとモーターの力を併用して車を動かすことを行なう方式。

以上の三つの方式とも、原動力のエンジンはガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、天然ガスエンジン、メタノールエンジンなどの内燃エンジンで行なうのが一般的であるが、新しい形のエンジンとしては、ガスタービン、燃料電池（燃料を用いた化学的な発電器）などが考えられている。

### 16. 2. 3 ハイブリッドエンジンシステム

バッテリー式のハイブリッドエンジンシステムには「シリーズハイブリッドシステム」と「パラレルハイブリッドシステム」と、この二つを合わせたシステムの三つの方式がある。略してそれぞれをシリーズ式、パラレル式、併用式と呼ぶ〔図16. 2の（A）と（B）〕。

## 17. エコ・ビークルのエンジン

### 17. 1. 1 エコ・ビークルとは

（1）地球環境問題がクローズアップされてきた。産業革命以来、人々の生活水準が向上してエネルギーが大量に消費されるようになった。各国間の交流や貿易が活発になって輸送機関が発達すると、動力機関が直接・間接的に排出する大気・水・土壌等の汚染物質は、人類に対して公害として健康を害する問題を提起してきた。例えば、電気はクリーンなエネルギーであるが、発電により作り出されるため、火力発電であれば燃料の燃焼によるばい煙、二酸化炭素、一酸化炭素、窒素酸化物、硫化物等が発生し、大気を汚染し、必ずしもクリーンとは言えないのだ。

（2）地球環境にやさしい商品とか、エコロジー（Ecology：生物と環境の関係を研究する学問）と言った言葉が使われ始めた。エコロジーとエコノミー（Economy：経済）のエコ（Eco）を取り出し、地球環境にやさしく、かつ燃料の経済性に優れたエンジンと自動車を、ここでは「エ

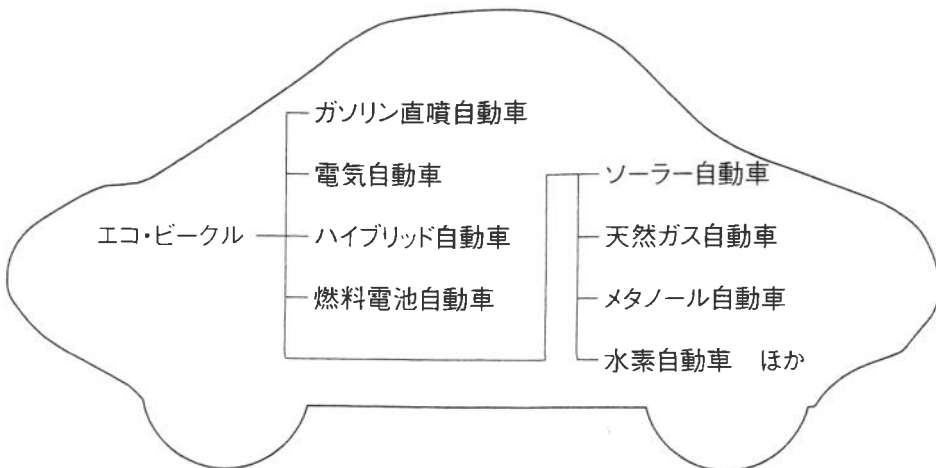


図17. 1 エコ・ビークル

コエンジン」(環境エンジン) および「エコ・ビークル」と呼ぶことにする(図17. 1)。

### 17. 1. 2 考えられるエコ・ビークルの種類

(1) 石油も枯渇に向かうことになると、次の燃料としては天然ガスがその貯蔵量から有望とされている。液体燃料より良好に燃焼する可能性があり、エコ・ビークルの動力源となりえそうである。またキャッサバやサトウキビ殻から作り出すエタノールも、液体燃料としてすでにガソリンと混合して使われ、次世代のエコ・ビークルに結びつけて改良することが考えられる。

(2) このように地球上から得られるあらゆるエネルギーから、全くクリーンな太陽光エネルギーまでを用いてエコ・ビークルを動かすことが考えられる。21世紀は、エレクトロニクスの制御と物理・化学・生物工学(Biotechnology)を組み合わせ、思いがけないエコ・ビークルの出現も期待されている。

(3) 現在考えられる具体的なエコ・ビークルとして、1. ガソリン直噴自動車、2. 電気自動車、3. ハイブリッド自動車、4. 燃料電池自動車、5. ソーラー自動車、6. CNG自動車、7. メタノール自動車、8. 水素自動車がある。ガソリン直噴自動車と、ハイブリッド自動車は既に採り上げたので、残りの六つのエコ・ビークルについて、その特徴と課題および発展の可能性を考える(図17. 1, 17. 4)。

燃料電池自動車は、燃料電池と呼ぶ発電器を搭載した電気自動車である。燃料がある限り走ることができるため、ガソリン自動車のように燃料さえ供給すれば走ることができる。非常に使い

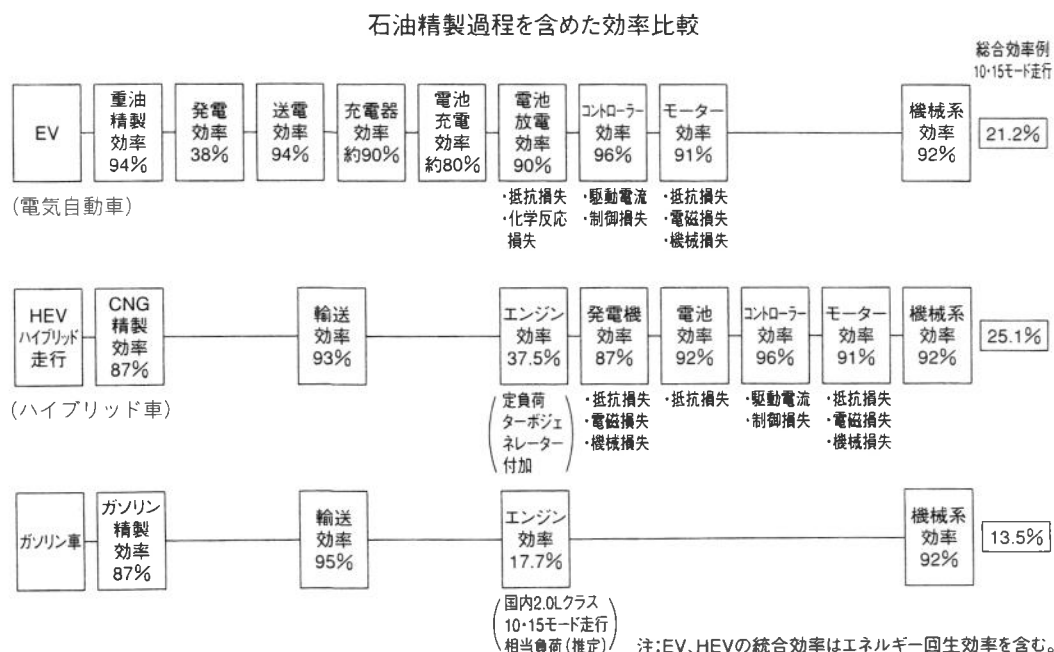


図17. 4 各種動力のエネルギー効率の比較

やすい車となりえる。さらにそのエネルギーの電気への変換効率も40～60%と、ガソリンエンジンの約2倍と経済性も高いから、電気自動車の欠点を補うハイブリッド自動車に続く自動車として有望視される(図17. 2)。

〔自動車用燃料としてのCNG〕：天然ガスが燃焼により発生する二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)量は、石炭を100とすれば、天然ガスが57と40%以上も低い。自動車用燃料の石油を100とすれば天然ガスは69と約30%も低く、地球温暖化に対する影響も少ないことを示している(図17. 3)。

### 18. 自動車用エンジン発達の歴史的考察まとめ

自動車用エンジンの開発から、どのように発達してきたかの流れをまとめ、今後どのように変化して行くかを考察する。

全体を5つの時代に分けて展開する。

#### ■——第一段階 蒸気エンジンの時代

18世紀の産業革命から19世紀末のエンジンは蒸気エンジンが主力で、そのエンジンの進化の要素は蒸気の高圧化による小型化と高熱効率の追求であった。その流れに乗れない熱効率の悪いエンジンは経済性に劣るため衰退していった(表18. 1と2)。

#### ■——第二段階 内燃エンジンの時代

1886年にベンツやダイムラーによって生まれたガソリン自動車は、先行する蒸気自動車に対して、スタート時の待ち時間がなく、かつ燃料費用も少ない。また電気自動車に対しては、

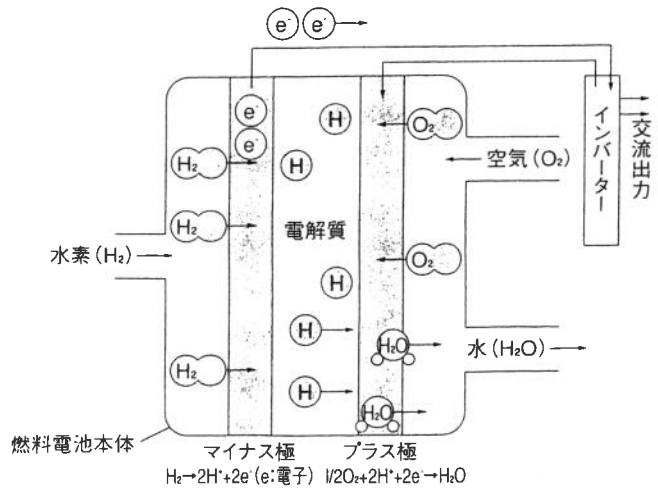


図17. 2 燃料電池の原理

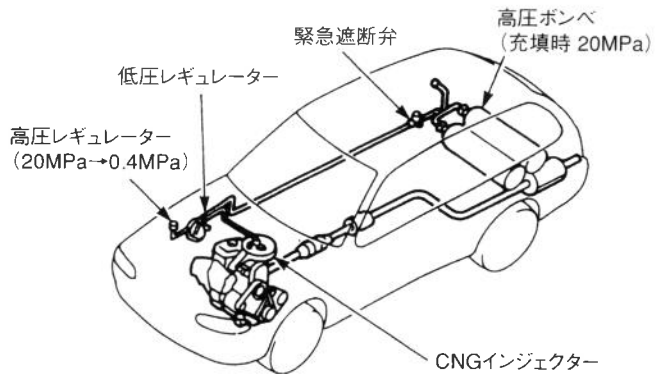


図17. 3 CNG自動車

※の付いた自動車は20世紀末の時点では実用化に向かって試験的に市販されている状態で少量にとどまっている

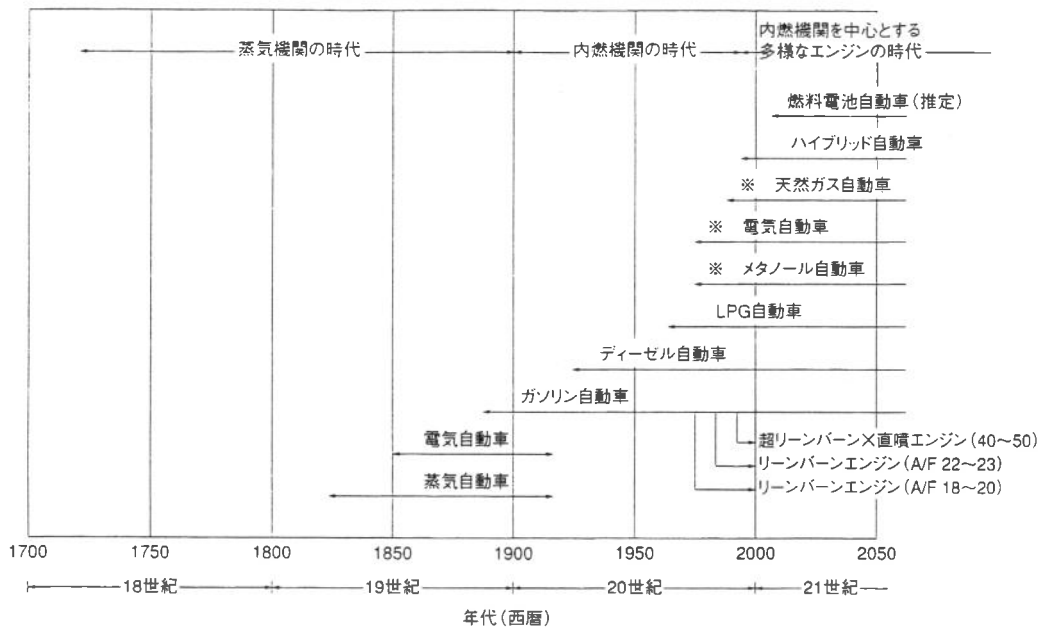


表18. 1 歴史的にみたエンジンと自動車の変遷

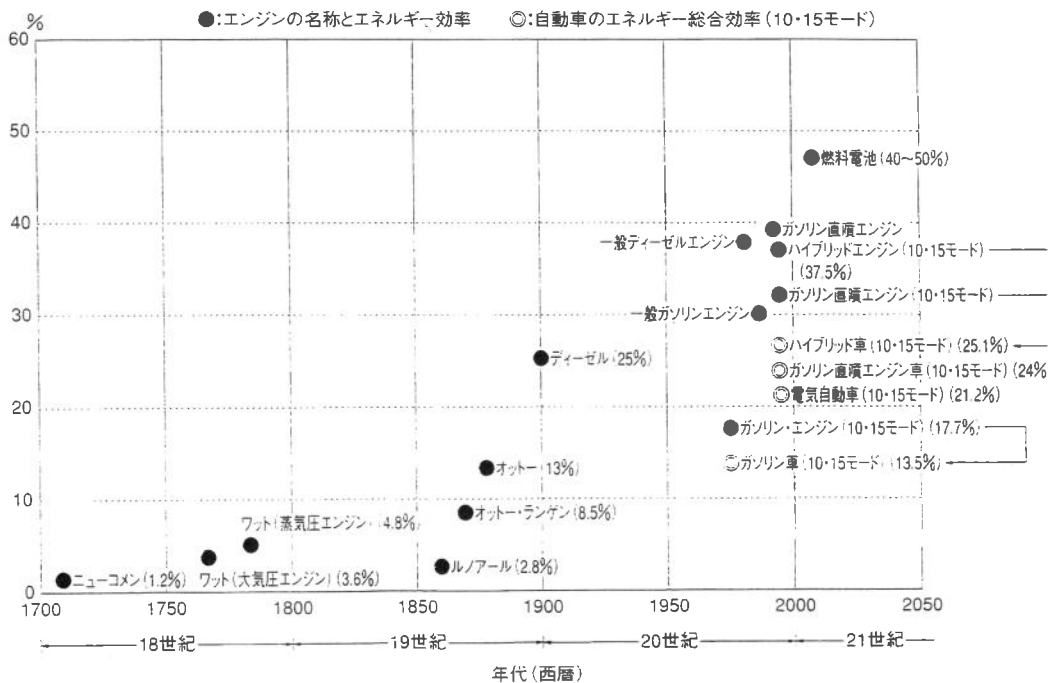


表18. 2 歴史的にみた各種エンジンの効率と自動車のエネルギー総合効率

そのバッテリーの充電時間が長い、一充電当たりの走行距離が短いのに比べ、ガソリンの充てん時間の短さと、走行可能距離の長さが長所となった20世紀に入るとこれら蒸気・電気自動車を圧倒し、1920年代には完全に衰退させてしまった。ガソリンエンジンは時代と共に、小型・軽量・高出力・高速化が図られて、20世紀前半には内燃エンジンの優位性が確立した。内燃エンジンの優劣は動力性能と熱効率の高さで決まり、内燃エンジンの進化の要因となった（表18. 1と2）。

#### ■——第三段階 排出ガス対応の時代

20世紀中ごろからガソリンエンジンは全盛期を迎えた。1950年代のアメリカでは高速道路網の発達に伴う高出力化と高速化が図られ、大排気量の高速回転のエンジンが作られた。1960年代に入るとアメリカと日本で光化学スモッグによる大気汚染の発生により、炭化水素・一酸化炭素・窒素酸化物の排出ガス浄化の大きな課題が課せられた。一時はガスタービン、スターリングエンジン・スチームエンジン等も検討されたが、ガソリンエンジンは新しい技術の電子制御による空燃比のフィードバックと、三元触媒の採用による有害ガスの無害化により日本・アメリカの厳しい規制を乗り切った。続いて燃費向上に課題が移り、急速に発達する電子制御技術を駆使し、燃費の低減と乗り心地の両立が図られた。エンジンと駆動系との最適制御が行なわれた結果、エンジンの熱効率の向上はもとより、車の走行抵抗の低減、軽量化等により走行エネルギーの効率化が図られた。

20世紀の後半は、内燃エンジンおよび車本体のハイテク武装が行なわれた結果、自動車全体として排出ガスの浄化と燃費向上、および車の運転性能の向上、安全性の向上が図られた時代であった（表18. 1と2）。

#### ■——第四段階 地球環境の時代

1980年代に入るとオゾン層の減少、地球温暖化を中心に地球環境問題が大きく取り上げられるようになった、電気自動車の開発を促進させながら、同時に自動車の経済性と排出ガスをよりきれいにするため、内燃エンジンの燃焼を根本的に変えた新しい概念のエンジンが登場した。それは成層燃焼方式の空燃比が22~23のリーンバーンエンジンで、続いて1996年以降は、空燃比が30~50の超リーンバーンで燃焼させる直噴ガソリンエンジンが生まれた。その効果は燃費の向上と排出ガスの浄化を両立させ、燃費を画期的に向上すると共に、排出ガスを驚異的な水準まで低減した。

それは高度な電子制御技術と触媒技術を内燃エンジンに用いた結果、成し遂げたものであった。それは100年以上の歴史を持つ内燃エンジンの持つ潜在能力の強さを示すもので、ハ

イテク内燃エンジンに生まれかわった（表18. 1と2）。

■——第五段階 クリーンな動力を求めるカオス（chaos）時代

（1）21世紀の環境エンジンの要素

これから発展する自動車用動力は、どんな条件を満足すべきかを考えると、一国だけでは解決できない地球的な規模での考え方が要求される時代である。エネルギーを何に頼るか、どんな動力が地球環境にとって望ましいか、その経済性はどうかなど、多くの評価項目を考え、人類の英知を集め評価し、世界的なコンセンサスを得ながら方向付けをする必要がある。その基本的な要素を挙げると次の項目が考えられる。

- 1) 製造費が安く、製造過程での環境汚染物の排出が少ない
- 2) 車の使用過程での地球環境を悪化させる排出物が少ない
- 3) 1回の走行可能距離は現在のガソリン車並み
- 4) 走行性能は現在のガソリン車並み
- 5) 使用するエネルギーは、容易に入手でき比較的安い
- 6) 車の日常のメンテナンスは、利用者が容易にできる
- 7) 車の購入時の価格は高くない（ガソリン車並み）
- 8) 車の維持費が少ない（ガソリン車並み）
- 9) 車の廃車後のリサイクル率が高い
- 10) 廃車後のリサイクル時の廃棄物の環境汚染が少ない

これから発展する動力の必要条件は、1) 項から、6) 項までとし、充分条件としては、7) ~10) 項の費用を合計した、「車の購入からリサイクルまでの“総合費用”が最も少ない」であると考えられる。

（2）21世紀の環境エンジンの姿

21世紀の自動車用エンジンは従来の経済性のみを追求した考えから、地球環境を最優先にした考えで、企画、設計段階から、生産、使用、廃車、リサイクルまでを考えた取組が必要である。さらに近い将来のエネルギーは何か？ これは最大の問題であるが、一国だけでは解決できない。限られた地球上の資源をいかに有効に使うかは地球構成員の総意に基づく時代である。このようにエネルギー問題から地球環境問題まで、複合世界国家的な発想のエンジン開発が求められ、「次世代のエンジンは何か」を追求する混沌（こんとん）とした“カオスの時代”の到来である。

21世紀は、人類の英知を結集した、スマートで地球環境にやさしく、エネルギー消費が少なくし、エコ・エンジン、すなわち環境エンジンを搭載した車が望まれる。さらに車の購入から維持、廃車までの“総合費用”が少ない乗り物が求められ産み出されるべき時代なのである。



参 考 文 献

- 熱機関（ジョン・F・サンフォート）河出書房新社  
蒸気動力の歴史（H. W. ディキンソン）平凡社  
高速ガソリンエンジン（神蔵 信雄）丸善出版社  
内燃機関の歴史（富塚 清）三栄書房  
動力物語（富塚 清）岩波書店  
Auto Album (Edward I. Throm, James S. Crenshaw) Hawthorn Book Inc.  
Vom Motor zum Auto (E. Diesel, G. Goldbeck, F. Schildberger) Deutsche Verlags-Anstalt GmbH  
Combustion engine processes (Lester C. Lichty) Mc Graw Hill Book Co.  
Dyke's Automobile and gasoline engine encyclopedia (A. L. Dyke)  
The goodheart-willcox co. Inc.  
[世界の歴史] 技術 ワットと仲間たち 朝日新聞社  
[技術の歴史] ワット（井野川 潔）けやき書房  
[岩波新書] ニュートン（島尾 永康）岩波書店  
スターリング エンジンの開発（一色 尚次）工業調査会  
熱力学（栗野 誠一）山海堂  
熱力学（一色 尚次，北方 直方）森北出版  
身近な物理学の歴史（渡辺 まさる）東洋書院  
基礎熱力学（谷下 市松）裳華房  
工業熱力学（谷下 市松）裳華房  
内燃機関工学（栗野 誠一）山海堂  
内燃機関講義（長尾 不二夫）養賢堂  
水力学（植松 時雄）産業図書  
ロータリーエンジン（山本 健一）日刊工業新聞社  
ロータリーエンジンの20年（大関 博 他）山海堂  
自動車の発達史（荒井 久治）山海堂  
自動車公害とその対策技術（柳原 茂）ナツメ社  
自動車技術（月刊誌）自動車技術会  
自動車工学ハンドブック（1957）自動車技術会  
機械工学便覧 日本機械学会  
三菱筒内噴射ガソリンエンジン GDI 三菱自動車工業㈱広報誌  
トヨタ ハイブリッド システム トヨタ自動車㈱広報誌  
自動車用ピストンリング（編集委員会）山海堂  
交通機械工学（富塚 清）山海堂