

11. ガソリンエンジン

この章では、10章でみた熱機関のサイクルとして、身近なところで現在も実際に使用されている**ガソリンエンジン**を取り上げることにする。…とはいっても、この本はガソリンエンジンの専門書ではないので、その原理がわかる程度の説明にとどめておく。しかし、**これまで扱ってきたようなシリンダとピストンであることには何も変わらない**。乗用車や原動機付自転車といった身近なガソリンエンジンは、シリンダとピストンからなるシンプルな熱機関と原理的にはまったく同じなのだ！

ガソリンエンジンの歴史

ガソリンエンジン (gasoline engine 又は petrol engine) の先駆けは、ルクセンブルク生まれのフランスの技術者・事業家である**ルノアール** (Jean-Joseph Étienne Lenoir) が 1859 年に、世界で初めて発明した**内燃機関** (internal-combustion engine) である。内燃機関とは、“装置の内部で燃料を燃焼させて動力を取り出す機械” のことであり、それ以前の 1801 年に同じくフランスの**ルボン** (Philippe Lebon) が特許をとっていた**ガスエンジン** (燃料がガスであるエンジン) をもとにして、ルノアールが改良したものであった。実際にルノアールが開発したエンジンは、後ほど紹介する“**2 ストローク・1 サイクルエンジン**”であった。1861 年にはこのエンジンを搭載した世界初の**モーターボート** (motorboat) が、パリのセーヌ川で使われた。

その後、1862年にフランスの技術者であるロシャス（Alphonse Beau de Rochas）が提唱した、ガスの燃焼前に燃料と空気の混合気を圧縮させるという、いわゆる“4ストローク・1サイクルエンジン”（←こちらも後述）の理論特許を元にして、1863年にルノアールは、世界初の4ストローク・1サイクルエンジンも開発している。なお、ルノアールはそのほかにも電気に関する多くの研究もあり、80を超える特許を得ている。そして、フランスの最高勲章であるレジオンドヌール勲章（Légion d'honneur）が与えられている。

同じころ、オットー（Nicolaus Otto）も、“4ストローク・1サイクルエンジン”を開発している。オットーのエンジンは、ルノアールのエンジンを元にしていたが、ガスではなく液体燃料であるガソリンを使っていた点が大きく異なる。つまり、オットーのエンジンが、ガソリンエンジンのはじまりというわけだ。

その後、1883年には、ドイツのダイムラー（Gottlieb Wilhelm Daimler）が実用的な小型4ストローク・1サイクルガソリンエンジンを開発。1885年に二輪車を、1886年には四輪車を走らせている。同じ1886年には、ドイツのベンツ（Karl Friedrich Benz）も4ストローク・1サイクルガソリンエンジンをつくって、三輪車を走らせている。このように、ガソリンエンジンは、乗用車用のエンジンとしてその後現在まで発達・改良され続けてきている。ちなみに、ダイムラーも、ベンツも、現在でもその名前は乗用車メーカーやブランドとして残っているので、よくご存知のことと思う。

ところで、1903年12月17日に、ライト兄弟（Wilbur Wright [←ライト家の3男] & Orville Wright [←4男]）が、ノースカロライナ州のキティホークにて、“ライトフライヤー号（Wright Flyer）”で、人類初の飛行機による有人動力飛行に成功しているのはご存知のことと思う。このとき積んでいたエンジンが、何を隠そう、ガソリンエンジンであった。この成功を皮切りに、航空エンジンとしてもガソリンエンジンは改良されてきたのだが、第二次世界大戦末期にイギリスやナチスドイツで実用化されたジェットエンジン（jet engine）が登場すると、航空エンジンとしては、ガソリンエンジンはジェットエンジンに敗れることになったため、現在では、ガソリンエンジンは主に乗用車用のエンジンという印象が強いはずだ。

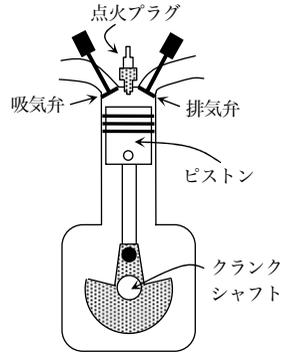
4 ストローク・1 サイクルエンジン

オットーが開発し、現在もなお実用化され続けている、“4 ストローク・1 サイクルエンジン (four-stroke cycle engine)” についてその仕組みを簡単に説明しよう。

1 サイクルを 4 つの行程 (stroke) でおこなうため、このような名前がついている。また、通称では“4 サイクルエンジン”が一般的だが、別に 4 サイクルでやっとクランクシャフトが 1 回転できるわけではないので、なんとなく違和感を覚える。ぜひ、正しく“4 ストローク・1 サイクルエンジン”と呼んでほしいものだ。

簡単に装置の説明をしよう。図 11-1 を見てほしい。典型的な 4 ストローク・1 サイクルエンジンの断面図を描いたものだ。上から見ていこう。点火プラグ (spark plug) とは、電気を流して高電圧を作り、火花放電 (spark discharge) をさせることで燃料に着火できる装置だ。吸気弁 (intake valve) と排気弁 (exhaust valve) には、クランクシャフト 2 回転のうちにそれぞれ 1 回転ずつするカムシャフト (camshaft) がついており [←図では略した]、タイミングよく開いたり閉じたりする。そのタイミングは次の図 11-2 で確認しよう。ピストンが上下して、その上下運動を回転運動に変える装置であるクランクシャフト (crankshaft) が一番下にある。ちなみに、“シャフト”とは日本語では“軸”なので、カムシャフトやクランクシャフトを、カム軸とかクランク軸という場合もある。

さて、実際にはこのエンジンが、高速でサイクルを繰り返さないと、乗用車などは走らない。毎回、新しい混合気を吸気し、爆発させることでピストンを押し下げ、爆発後の排気をし、また吸気し、爆発、排気を効率よく繰り返さねばならないのだ。現在では、二輪車では最高で 18000 [rpm] 程度、四輪車だと最高で 7000 ~ 8000 [rpm] 程度の回転数であるらしい。[rpm] とは、毎分回転数 (revolutions



4 ストローク・1 サイクルエンジン
図 11-1

per minute) のことで、1 分間あたりの回転数のことである。エンジンの話をする場合によく用いられる単位だ。つまり、それだけ速くサイクルを繰り返しているということになるわけだ。

それでは、図 11-2 を見ながら、このエンジンの 1 サイクルを確認していくことにしよう。

4 つの行程とは、吸気行程、圧縮行程、膨張行程、排気行程の 4 つである。これらの一連の行程で図 11-2 を見ればわかるように、クランクシャフトは 2 回転しているが、1 サイクルである。

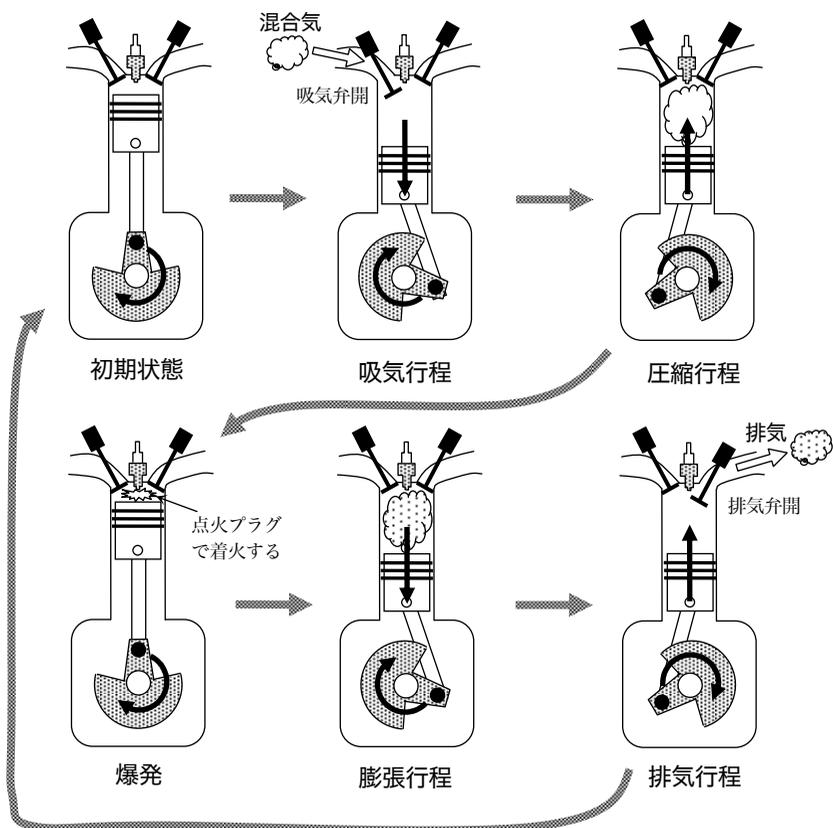


図 11-2

吸気行程 (intake stroke)

吸気弁が開き、混合気（燃料であるガソリンを含んだ気体）がピストンが下がると同時にシリンダ内に入る。ピストンが一番下（**下死点**という）まで下がりきるまで吸気される。

圧縮行程 (compression stroke)

弁は両方とも閉じた状態でピストンが上に上がるため、混合気は圧縮される。ピストンが一番上（**上死点**という）に上がりきる直前に点火プラグで火花放電を起こし、燃料に着火し、爆発させる。

膨張行程 (power stroke)

混合気の爆発でピストンが押し下げられ、下死点まで下がりきる。

排気行程 (exhaust stroke)

慣性によってピストンが上がるのと同時に排気弁が開いて、燃焼後の気体（排気）をシリンダから外へ追い出す。

吸気行程→圧縮行程で、クランクシャフトは1回転し、膨張行程→排気行程でさらに1回転しているのがおわかりになるだろう。つまり、**1回の爆発で、クランクシャフトが2回転**ということになる。図を見ながら順番に確認してほしい。

この4つの行程が、想像を絶する速さで繰り返されているわけだ。ここで、爆発で得た熱量（吸収熱量 Q_1 ）が、どれだけ外にする仕事 W に変わるのかという熱効率をすこし考えてみると、排気されるとき燃焼ガスがかなり高温であることは、自動車の排気ガスが熱いといった経験がある方は容易におわかりになるように、放出熱量 Q_2 がかなり大きいので、熱効率はさほどよろしくない（図11-3参照）。

ガソリンエンジンの現在の熱効率は20~30 [%]程度だというから、**燃料爆発によって得られる熱エネルギーの8~7割は大**

気中に放熱しているわけだ！ あ〜、もったいない！ 限りある化石燃料なのに・・・。あ〜〜、もったいない！！ 将来技術開発が進んで、排気ガスがかなり低温にならないと、熱効率が良くならないばかりではなく、地球温暖化防止にも貢献できない。あ〜〜つ、環境にもやさしくないっ！！

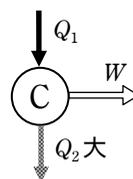


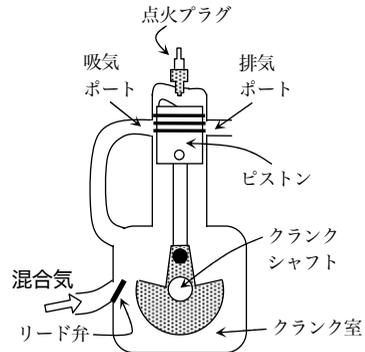
図 11-3

2 ストローク・1 サイクルエンジン

4 ストローク・1 サイクルエンジンよりも先に登場した、2 ストローク・1 サイクルエンジンについて簡単に紹介しておこう。“2 ストローク・1 サイクルエンジン (two-stroke cycle engine)” は、現在でも芝刈機や原動機付自転車などのエンジンとして現役だ。こちらも、“2 サイクルエンジン” と呼ばれることが多いが、その呼び方は僕は気に入らないので正しく呼んでほしい。

さて、まずは、断面図から。図 11-4 を見てほしい。4 ストローク・1 サイクルエンジンといろいろ異なっているので、確認していこう。

一番上の**点火プラグ**。これは同じだ。吸気弁や排気弁がなく、**吸気ポート** (intake port) と**排気ポート** (exhaust port) と呼ばれる弁の無い管がある。ピストンは、上面が平らではなく、少々出っ張っている部分がある。シリンダの下の**クランクシャフト**



2 ストローク・1 サイクルエンジン
図 11-4

のある**クランク室** (crankcase) に吸気ポートがつながっており、2 ストローク・1 サイクルエンジンでは、このクランク室の中にも混合気が入りこむという構造だ。つまりクランク室も密閉されたエンジンの内部であるから、クランクシャフトのメンテナンスは、大変困難となる。混合気に、潤滑油などを混ぜるという方法でしかメンテナンスができない。また、混合気の入ってくる部分には**リード弁** (reed valve) があり、タイミングよく開閉するようになっている。

2 ストローク・1 サイクルエンジンでは、4 ストローク・1 サイクルエンジンの、**吸気行程と圧縮行程が同時**におこなわれ、**膨張行程と排気行程も同時**におこなわれるため、1回のピストンの往復運動 (クランクシャフト1回転) で、1サイクルになる。

それでは、実際の行程を図 11-5 を見ながら確認していこう。

11. ガソリンエンジン

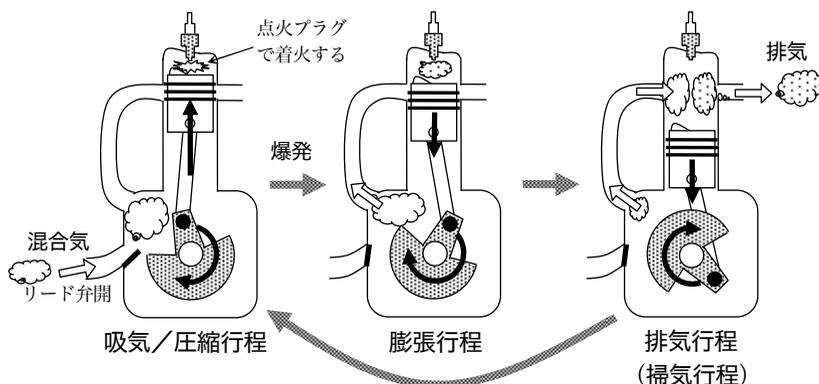


図 11-5

まずは図 11-5 の左図から。ピストンが上昇することで、クランク室の圧力が下がり、リード弁が開き、混合気がクランク室内へ入る。これが**吸気行程**だ。このとき、同時に点火プラグ側では、すでに送り込まれていた混合気が**圧縮**される。これは**圧縮行程**だ。つまり、ピストンが上昇する**上昇行程**では、**吸気行程**と**圧縮行程**を同時に行っているわけだ！

ピストンが上死点に達する直前に点火プラグが火花放電をし、燃料の**爆発**が起こる。すると、ピストンは気体の爆発により下へ押し出される。これが**膨張行程**である（図 11-5 の中央図）。ところが、シリンダの途中には吸気ポートと排気ポートがあるため、そこを過ぎると、図 11-5 の右図のように、クランク室内に入っていた混合気がピストンに押される形で、吸気ポートからシリンダ内へ入ってくる。同時に、燃焼後の排気が、その吸気ポートから入ってきた混合気に押される形で、排気ポートよりシリンダの外へ追い出される。つまり、**排気行程**となるのだ。このとき、うまくシリンダ内の気体の入れ替えができなければ、排気が残ったり、混合気が燃焼する前に排気ポートから出てしまうということもありうる。また、気体の入れ替え行程なので、排気行程とは呼ばず、“**掃気（そうぎ）行程**”という場合もある。このように、ピストンの**下降行程**では、**膨張行程**と**排気（掃気）行程**が同時に行われるわけである！

2ストローク・1サイクルエンジンは、4ストローク・1サイクルエンジンと異なり、クランクシャフト1回転で、1サイクルとなるから、**1回の爆発で、クランクシャフトが1回転することになる。**つまり、クランクシャフトを回転させる力が大きいという違いがある。また、弁をうまいタイミングで開け閉めするカム装置が不要なので、**エンジン自体の構造も簡単で、軽量化もできる**メリットがある。一方、掃気が完全に効率よくできるのは困難で、混合気が燃焼しないままで素通りしてしまうため、ガソリンエンジンでは排気中に未燃焼炭化水素が多いのがデメリットだ。また、**燃料の素通り損失によって燃料の効率が悪いものとなること**もお分かりになるだろう。実は、4ストローク・1サイクルエンジンに比べると、かなり燃料が多く必要となる。

現在では、2ストローク・1サイクルエンジンは、軽油を燃料に用いる**ディーゼルエンジン** (diesel engine) で幅広く使われている。具体的には、バスやトラックなどの大型自動車用として、雪かきのラッセル車等の鉄道用として、そのほか、航空用、船舶用として現在も使用されているばかりではなく、新型のものも開発されている。

ちなみに、**ディーゼルエンジン**とは、パリ生まれの、ドイツの機械工学者・発明家であった**ディーゼル** (Rudolf Diesel) が1892年に発明した内燃機関のことである。簡単に紹介すると、圧縮して高温になった空気に**ディーゼル燃料** (軽油や重油、さらには石炭の粉末) を吹き込んだ時に起きる**自己着火**での発火による爆発を利用したエンジンの仕組みである。圧縮するのは空気のみなので、ガソリンエンジンとは仕組みが大きく異なる。また、空気の圧縮率が上昇するほど燃料がよく燃焼するので、現在のディーゼルエンジンでは、熱効率が30~40 [%] と、ガソリンエンジンに比べてよくなっている。ディーゼルはこの発明で、1893年2月23日に特許を取得している。

オットー・サイクル

ガソリンエンジンの理論的なサイクルは、オットーの提唱した“オットー・サイクル (Otto's cycle)” にかなり近い。そこでここでは、2ストローク・1サイクルエンジンとオットー・サイクルを比較しながら、 p - V 図上で、ガソリンエンジンを考察していくことにしよう。

オットー・サイクルのそれぞれの行程を p - V 図にかいてみると、図 11-6 のようになる。定積変化と断熱変化だけで 1 サイクルがなっている。2ストローク・1サイクルエンジンと比較しながら順に確認していくことにしよう。

まずは、 $A \rightarrow B$ の変化から。図 11-5 のまさに爆発の瞬間が図 11-6 の A 点である。A 点で圧縮された混合気に着火され、ピストンが上死点へ向かい、降りてくるわずかな瞬間に爆発が起こるため、ほとんど体積が変わらないから、定積変化と見なせるのだ。爆発により、気体の圧力が一気に上昇し、B 点の状態になる。

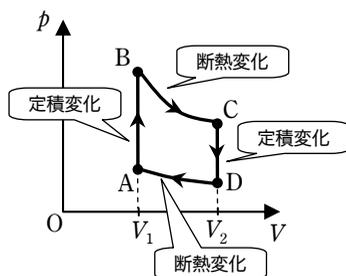


図 11-6

続いて、 $B \rightarrow C$ の変化。ここは、図 11-5 の膨張行程にあたる。爆発によって、気体がピストンを押し下げるので、体積が増えるのはわかると思うが、あまりにそのスピードが速いので、シリンダから外に熱が逃げる暇が無く、ほとんど断熱膨張となるのだ。

次の $C \rightarrow D$ の変化は、図 11-5 の排気行程にあたる。体積が最大となるので、ピストンの下死点に該当する。なぜ一気に圧力が下がっているかという、排気ポートと吸気ポートがシリンダ内にあらわれるため、圧力が下がっているわけだ。実際は、 $B \rightarrow C$ および $C \rightarrow D$ が同時におこなわれる（ピストンの下降行程）ため、理論サイクルからやはずれると考えられる。

そして $D \rightarrow A$ が、図 11-5 の吸気行程および圧縮行程にあたる。クランクシャフトの慣性によってピストンが上昇するときに、新しく吸気された混合気が圧縮

されることで、無駄なく燃料を燃焼できるので、とてもうまく仕組みになっている。B→Cと同様に、圧縮するスピードが速いため、こちらもほとんど断熱圧縮となる。

実際には、やや断熱変化と定積変化のみからなるオットー・サイクルの p - V 図からはずれるのだが、それでも、ほとんど**2 ストローク・1 サイクルエンジンはオットー・サイクルの理論どおりとなる**。ちなみに、理論どおりであれば、オットー・サイクルの熱効率 η は、気体が理想気体であるとき、比熱比 γ を用いて、

$$\eta = 1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

となる。これは、気体の種類で決まる比熱比 γ と、シリンダとピストンの装置で決まる体積 V_1 や V_2 で、このエンジンの熱効率 η が決まってしまうことがわかつて思う。実際のエンジンでは、そこからさらにずれるので、理論値の熱効率は維持されず、もっと熱効率がよろしくないということは容易に想像できるだろう。

さて、こうやって見てくると、ある熱機関の熱効率 η は、そのサイクルによって決まってしまうことがわかる。では、もっとも熱効率 η の大きくなるようなサイクルはどんなサイクルなのだろうか？・・・この答えはすでに出ている。それを次の12章で紹介することにしよう。