

自動車用エンジン発達の歴史的な考察 (第1報)

荒井久治

まえがき

人類は、いつ頃からエンジンを作りだし、発展させていったかを歴史的に追う。エンジンは生物の進化のように、突然変異により新しい形のエンジンへと発展する。その要因は何かを考察する。

世界最初の自動車が作られたのは1763年で蒸気エンジンを搭載していた。それまでの動力は人力、畜力、風力、水力で船や乗物を動かし、農耕作業、粉ひきや、鉱山の鉱石の引き揚げ、粉碎などに使われていた。もっと使いやすく強力な動力が求められ、火力を用いたエンジンが長い年月を経て、蒸気エンジンとして出現した。

1. 人類がニューコメンの蒸気エンジンを得るまでの軌跡

1.1 ヘロンからソロモン・ド・コーまでの時代

- ① 人類がほかの動物と異なる点は「火を使うこと」と言われている。火力を使ったものでは、古くは紀元前3～2世紀に、アレクサンドリアのヘロンが蒸気の噴き出す力で回転するオリパイルという球体を作り出した。球体の直径の2点を回転軸とする支柱を立て、回転軸に直角な球面に二つの蒸気噴出孔が来るように球面の接線方向にパイプを使い取り付けていた。そのころは、なぜ回転するのか理由は分からなかったが、蒸気力がある力を持っていることは、多くの人々に経験的に知られていた。
- ② その後の1800年ほどの長い空白があってから1601年にジャンバティスタ・デラ・ボルタはフラスコ内に蒸気を入れておき、それを冷やすとフラスコの底につながっているパイプを通じ、下方の水がフラスコ内に重力に抗して吸い込まれてくることを実験によって知った。
- ③ 1630年にダビッド・ラムゼーは「火を用いて、鉱山の水を上昇させる装置」のスコットランド特許を得た。それはジャンバティスタ・デラ・ボルタの真空力を用いた装置の、鉱山への具体的な応用であった。
- ④ 1659年にイギリスのソーントンは液体を吸い上げる実験をした。水銀で2.5フィートと数インチ(0.8m)、水では32フィート(10m)の高さまで引き上げる力があることを見出した。その結果からソーントンは蒸気を凝縮させてできる真空を使って水を揚げる装置を考え出した。
- ⑤ 具体的に蒸気力を利用することを考え始めたのは、フランスのソロモン・ド・コーで、1615年

に、フラスコ状の容器に水を入れ、下から火であぶって蒸気を作り出し、フラスコ状の容器の下面の水を蒸発面上の蒸気圧力で、水面下のパイプから外に向かってフラスコ状の容器の水を噴出させることを考え出して実験したのだ。

1.2 サマーセットの蒸気利用の実験とセヴァリーの揚水エンジンの出現

① イギリスのエドワード・サマーセットは1650年ごろに最初の蒸気機関による揚水機を作り、1663年に特許を得た。シリンダーに蒸気を吹き込み凝縮させ、続いて弁を開くと蒸気の凝縮の結果、シリンダー内に真空を生じ、水は吸い込まれてシリンダーは水で一杯になる。次に弁を閉じ、別な蒸気弁を開け、蒸気を送り込み、その力でシリンダー内の水を外に力強く排出するという揚水ポンプで、12m (蒸気圧力は約1.2気圧) の高さまで水を飛ばすことができた。

② サマーセットの考えを実用化したのはイギリスのトーマス・セヴァリーであった。1698年に鉱山から水をくみ出す機械の特許を取り、火を使って蒸気を得ることから「火力エンジン」と呼んだ(図1.1)。この火力を使ったエンジンは球状のボイラーで蒸気を作り、細長いボンベ状の容器を2個を並べ、手動の切り換え弁を一つの容器当たり3個、計6個を用いて地下水を排出した。図1.1で、Bコックを閉じ、A、Cのコックを開くとボイラーの蒸気は容器に充満する。次にA、Cを閉じ、容器を外から水で冷やすと容器の内の蒸気は凝縮し、水になり、容器内の圧力は真空に近づく、次にBを開けると地下水が容器の内に真空力によって吸い込まれる。容器内を水で充満してから、Bのコックを閉じ、AとCを開くと蒸気は容器に勢いよく流入し、その蒸気圧力でCコックの上方につながる排水パイプから、容器内に吸い込まれた地下水は勢いよく上方の大気中に向かって排出される。容器中の水の排出が終わると、A、Cを閉じる。以上のサイクルを繰り返して、地下水を地上に排出した。このエンジンは毎分5回のサイクルを行なった。

セヴァリーの火力エンジンは容器と切換弁のコック以外に動く機構はなく、簡単な構造で寸法精度も必要としない、当時として画期的なエンジンの出現であった。セヴァリーは沼地の排水、鉱山の揚水、都市での給水、消防用の消火ポンプとして使われることを考えていた。このエンジンは最初にコーンウォールの銅山で使われ、1706年にはスタフォードシャーの炭鉱で使われた。その性能は一時間に3000ガロン(13.6m³)の水をくみ上げ、「鉱夫の友」と呼ばれるようになった。

エンジンの性能はせいぜい1馬力、作動速度も12秒に1回程度で遅く、100フィート(約30m、この時の蒸気圧力は約3気圧)程度の揚水性能であった。しかし、人力や馬の力では成しえない力強い水の排出力があった。すでに排水の不可能な水に埋まった鉱山も再開発できるようになり、馬の力でも不可能なことのできるエンジンとしてうわさが広まった。人びとは蒸気の利用に関心を持つようになり、「蒸気の時代」の幕開けとなった。

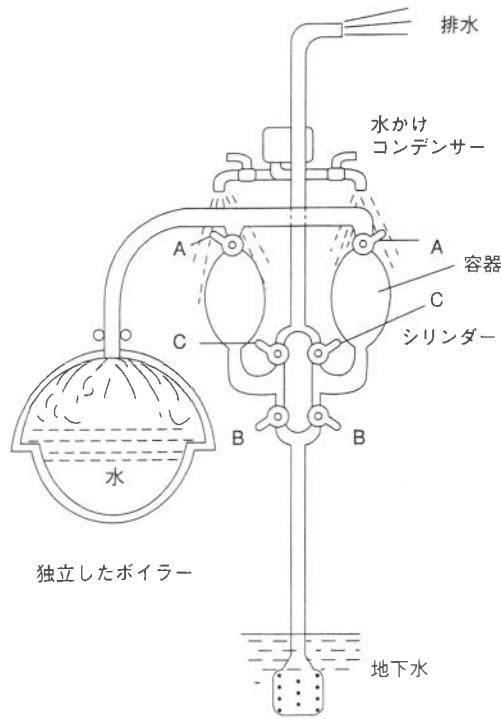


図1.1 セヴァリーの火力エンジンの構造

2. トーマス・ニューコメンの蒸気エンジン

2.1 巨大エンジンの登場

中世のヨーロッパでは木炭を使って製鉄・製塩・ガラス等を作っていた。しかし、豊かな森林は人類の経済の活発化と共に消失し、17世紀になると木炭から石炭が使われるようになった。さらに18世紀に入るとコークス炉が発明され、製鉄に石炭が多量に使われることになる。イギリスの炭鉱では深く掘らないと石炭が手に入らなくなり、地下水の湧き出しに悩まされるようになっていった。排水には馬が使われたが、深くなる一方の鉱山からの沸き水の排水問題は深刻化し、馬に代わる動力の出現が待たれたちょうどそのとき、救世主として登場したのがニューコメンのエンジンであった。

2.2 ニューコメンのエンジンの構造

イギリスのトーマス・ニューコメン(1663~1729)は蒸気エンジンを発明し、1711年に「火によって揚水する発明者の会社」を設立した。その会社は翌1712年に、それまでだれも見たこともない巨大な奇妙な形の蒸気エンジンを作り出した。それは、かまのような形をしているボイラーを持ち、石炭をたいて蒸気を作り出す構造だった。シリンダーは垂直に立てられ、直径は非常に大きく1m

以上もあり, その中に2m以上の大きなストロークを持つピストンが収められていた。ボイラーから2~3m離れ, 垂直に立つ壁状の高い柱があり, その上方に大きな横置ききのビーム(Beam: はり)の支点が置かれていた。(図2.1)

ビームの両端は円弧状をし, チェーンが垂らされ, ピストンから出るロッドにつながっていた。ビームのもう一方の円弧状の先端からもチェーンが垂らされ, 長いロッドを介して排水ポンプを動かす。その姿はあたかも巨大な「てんびんばかり」が天を突くようにそびえたち, てんびん皿の一方に相当する部分にシリンダーやピストン, ボイラーが置かれて動力を発生し, もう一方の側に駆動されるポンプ等の機械装置類が置かれていた。そのほかにエンジンの補助装置として, シリンダー内へ水を注ぐための注水コック, その水をくみ上げるための注水ポンプ等が取り付けられていた。

最初のエンジンは毎分120ガロン(0.5466m³)の水を153フィート(46.6m)までくみ上げ・ボイラーを含む総合熱効率は0.5%であった。[最初のエンジン出力は4159W(=5.7PS(馬力))]

それは今まで人類が見たこともない, 文字どおり恐竜のような巨大なエンジンであった。

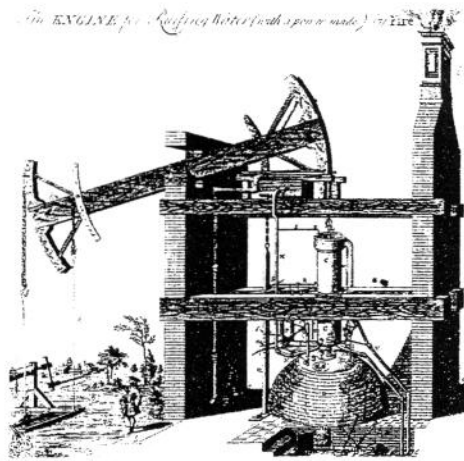


図2.1 ニューコメンのエンジン(1717)

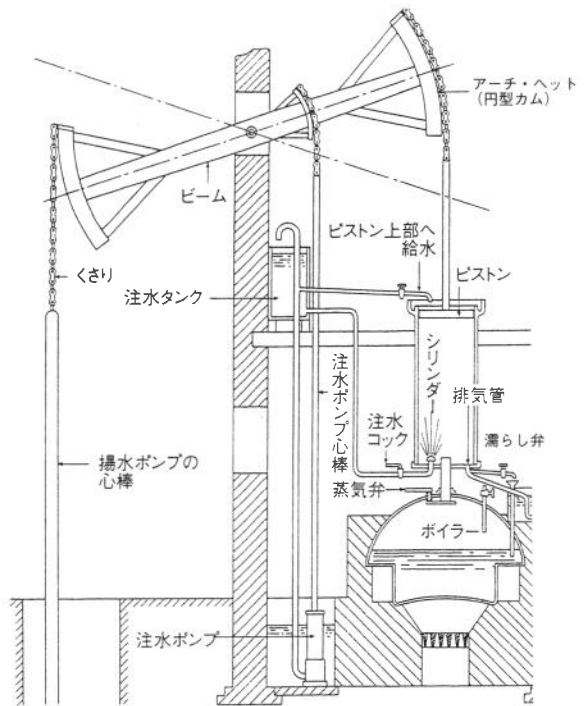


図2.2 ニューコメン・エンジンの構造

2.3 水くみが特技の恐竜形エンジン

シリンダーへの蒸気の供給は, 蒸気弁を手で開くことによって行なわれた。蒸気力によりピスト

ンがシリンダーの最上部に達すると、蒸気弁を手で閉じ、蒸気の供給は止められた。次にシリンダー内の蒸気を冷却するために注水弁コックを手で開け、冷却水をシリンダー内の蒸気に向かって噴射した。蒸気は冷水により熱を奪われ温水となる。シリンダー内は大気圧よりやや高い圧力から蒸気が水に変わるため真空が生まれ、ピストンをシリンダーの最上部から引き下げる力を発生した。この力を動力として取り出すため、シーソー運動を行なうビームをシリンダーの上方に高い支点でがっちりに取り付け、一方の端はチェーンを介してピストンに結ばれていた。もう一方の端にも動力を伝えるためのチェーンが垂らされ、ピストンが上下に動くときビームは支点を中心にシーソー運動を繰り返した。当時は鉱山の排水のため、この恐竜形エンジンは主として地下の水くみに使われた。ニューコメンの巨大な蒸気エンジンは非常にゆっくりであったが、恐竜が水を飲むように長い首を上下させ、いつまでも力強く確実な作動を繰り返し続けた。(図2.1と2)

2.4 エンジンはなぜ巨大化したか

ニューコメンエンジンの模型が現在イギリスのグラスゴー大学にある。それは1760年ごろにジェームズ・ワットが修理を依頼されたという歴史的なものである。当時の模型は原寸の24分の1に作られるのが一般的で、シリンダー直径が5cm、ピストンのストロークが9cm、シリンダー長さが14.5cmの模型から原寸を割り出すと、シリンダー直径は1.20m、ピストンのストロークは2.16m、シリンダーの長さは3.48mとなる。

このようにニューコメンの蒸気エンジンは排気量2443Lの超巨大な単気筒、2サイクルの大気圧エンジンであった。大気圧エンジンは、完全な真空であっても大気圧との差は最大1気圧(1atm)であるから、大きな出力を得るにはピストンの直径およびストロークを大きくした大型エンジンの設計を必要とした。これが巨大エンジンの誕生の理由である。

2.5 水から蒸気へ1700倍の変身

水が蒸気になるとその体積と保有する熱量がどう変化するか調べると、1気圧(1atm)下で、60℃の水が気化して100℃の蒸気になると1673倍に膨張する。おおざっぱに言えば水が蒸気になると、その体積は1700倍も膨張するのだ〔(注2.1)を参照〕。これが蒸気の持つ力となる。

(注2.1)

$$\text{ピストンの面積} A, \quad A = \pi D^2 / 4 = \pi 1.2^2 / 4 = 1.131 (\text{m}^2) \text{-----} (1)$$

1気圧での水が沸騰を始める温度は100℃で(この温度を飽和温度と呼び、その時の気圧を飽和圧力と呼ぶ)、この大気圧を飽和圧力P(100)と書くと、 $P(100) = 0.101325 \text{ (MPa)}$ (2)

蒸気や水の物性を日本機械学会の蒸気表より求めると

$$100^\circ\text{C} \text{ の蒸気の比体積 } V(100) = 1.673 (\text{m}^3 / \text{kg}) \text{-----} (3)$$

(比体積とは、単位質量(kg)当たりの体積(m³)をいう。従って単位はm³/kgとなる)

水の比体積は $0.001 \text{ (m}^3/\text{kg)}$ であるから、蒸気になると1673倍に膨張することが分かる。

なお、理想気体の性質を水から水蒸気になるときの体積変化に適用して求め(注2.1)の結果と比較する。

アボガドロの法則から「理想気体1キモルは全く同一の分子数を持ち、標準状態(0℃, 760mmHg)において 22.41m^3 の容積をもつ」

理想気体の状態式

$$pV = RT \text{----- (1')}$$

ここで $p = 101.3\text{kPa}$ (=760mmHg), $T = 273.15\text{K}$ (=0℃)

$$V = 22.41\text{m}^3/\text{kmol}$$

$$R = 8.314 \times 10^3 \text{ (一般ガス定数)}$$

0℃の水の比体積は $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$

100℃の水蒸気の1kmol当たりの体積(760mmHg)は、(1')式より

$$V = RT/p = 8.314 \times 10^3 \times (273.15 + 100) / 101.3 \times 10^3 = 30.626\text{m}^3 \text{----- (2')}$$

1kmolの水の重さは18kgであるから、その体積 30.626m^3 を割れば1kgの水蒸気の体積が求まる $V = 30.626 / 18 = 1.7014\text{m}^3/\text{kg}$

水1kgの体積は $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^3$ であるから、水の体積1に対し水蒸気の体積は $1.7014 \times 10^{-3} \text{m}^3$ となる。

これは水1kgが理想気体の法則により100℃の水蒸気になると体積が1700倍になることを示している。実測結果の1673倍の値に比べやや大きい(誤差1.6%)、気体の法則が成立していることを示す。

さらに100℃の水と蒸気を持つエネルギーを比較すると、100℃の水の持つ熱エネルギーは、419.1(kJ/kg)で、100℃の蒸気を持つ熱エネルギーは2676.00(kJ/kg)である。なんと100℃の蒸気を持つ熱エネルギーは、100℃の水の持つ熱エネルギーの約6.4倍も大きいのだ。[(注2.2)参照]

(注2.2)

次に、単位質量(kg)の蒸気を持つ熱エネルギー(kJ)を「比エンタルピー(kJ/kg)」と呼ぶ、100℃の蒸気の比エンタルピー $h_S(100) = 2676.0 \text{ (kJ/kg)}$ ----- (4)

100℃の水の比エンタルピー $h_W(100) = 419.1 \text{ (kJ/kg)}$ ----- (5)

$h_S(100) / h_W(100) = 2676.0 / 419.1 = 6.4 \text{ (倍)}$ ----- (6)

$r = h_S(100) - h_W(100) = 2676.0 - 419.1 = 2256.9 \text{ (kJ/kg)}$ ----- (7)

このように同じ温度でも液体と気体では、保有する熱エネルギーは大きく異なるため、見掛けでは分からない「ひそんでいる熱」と研究者は考えて、「潜熱（せんねつ）」と呼んだ。100℃の蒸気と水の持つ熱エネルギーの差は2256.9 (kJ/kg) で、この値が水の“蒸発潜熱”である。

100℃の水が100℃の蒸気になるには、水の6.4倍もの熱エネルギーを必要とする。これが水から蒸気へ変身するためのカラクリだ。

2.6 ニューコメンのエンジンは大食漢

ニューコメンの蒸気エンジンは恐竜と同じように大食らいたったのだろうか。その熱効率を求めてみよう。それはエンジンに入った熱エネルギーとそのエネルギーが動力に換えられ、どのくらいの仕事をするかで求められる。

ある仮定の下で得られた熱効率は5.62%である〔注(2.3) 参照〕。

$$\text{ニューコメンの蒸気エンジンの熱効率} \quad \eta = \frac{\text{ピストンの1ストロークの仕事}}{\text{シリンダー内の蒸気の熱エネルギー}} = 5.62\%$$

(注2.3)

次にシリンダーの蒸気の中に冷却水を噴射し、60℃の水が得られたと仮定すると、その水が持つ性質は、

$$60^\circ\text{C} \text{ の } \begin{cases} \text{水の飽和圧力は } P(60) = 0.01992 \text{ (MPa)} & \text{————— (8)} \\ \text{水の比容積は } V(60) = 0.00101714 \text{ (m}^3\text{/kg)} & \text{————— (9)} \\ \text{水の比エンタルピー } h_W(60) = 251.1 \text{ (kJ/kg)} & \text{————— (10)} \end{cases}$$

が得られる。

シリンダー内の蒸気は冷却水によって液化され60℃の水となるため、蒸気のときは1気圧 [P(100) = 0.101325 (MPa)] であったシリンダー内の圧力は、60℃の水の飽和圧力は、P(60) = 0.01992 (MPa) であるから、大気圧よりも低い圧力となり真空に近づく。その値ΔPは、

$$\Delta P = P(100) - P(60) = 0.101325 - 0.01992 = 0.081405 \text{ (MPa)} \quad \text{————— (11)}$$

100℃の蒸気の比エンタルピーと60℃の水の比エンタルピーの差Δhは、

$$\Delta h = h_S(100) - h_W(60) = 2676.0 - 251.1 = 2424.9 \text{ (kJ/kg)} \quad \text{————— (12)}$$

以上で熱効率を計算に必要な蒸気や水の物性を示す値を得た。次に熱効率は、

$$\text{エンジンの熱効率} \quad \eta = \frac{\text{ピストンの1ストロークの仕事}}{\text{シリンダー内の蒸気の熱エネルギー}} = \frac{W}{E} = \frac{F \cdot L}{G \cdot \Delta h} \quad \text{————— (13)}$$

$$\text{ピストンの発生する力} \quad F = A \cdot \Delta P = 1.13 \times 0.081405 \times 10^6 = 91987.65 \text{ (N)} \quad \text{————— (14)}$$

$$\begin{aligned} \text{ピストンの1ストロークの仕事, } W &= F \cdot L = 91987.65 \times 2.16 \\ &= 198690 \text{ (J)} = 198.69 \text{ (kJ)} \quad \text{————— (15)} \end{aligned}$$

$$\text{ピストンとシリンダーの作る最大容積, } V=A \cdot L=1.13 \times 2.16=2.441 \text{ (m}^3\text{)} \text{ ————— (16)}$$

$$\begin{aligned} \text{ピストンとシリンダーの作る最大容積内の蒸気の質量, } G=V/V(100) &=2.441/1.673 \\ &=1.459 \text{ (kg)} \text{ ————— (17)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{シリンダー内の蒸気の熱エネルギー, } E=G \cdot \Delta h &=1.459 \times 2424.9 \text{ (kJ/kg)} \\ &=3537.94 \text{ (kJ)} \text{ ————— (18)} \end{aligned}$$

(13) 式よりニューコメンのエンジンの熱効率 η は

$$\eta = \frac{W}{E} = \frac{198.69}{3537.94} = 0.0562 = 5.62\% \text{ ————— (19)}$$

この値はいかにも低いですが、当時は馬の能力を超えて鉱山の排水には威力を発揮し、馬に比べて経済的で競争するエンジンもほかに無かったため、熱効率は問題外であった。

2.7 ニューコメン・エンジンの馬力

ニューコメンのエンジンの出力を計算で求めるため、エンジンの作動サイクルを毎分12回とすると、出力は39.738kWで、馬力に換算すると54馬力（1馬力は735.5W）である。〔(注2.4) 参照〕

(注2.4)

ニューコメンのエンジンの出力を調べる。エンジンの作動サイクル回数を毎分12サイクル ($N=12$) とする。1サイクルに要する時間は $T=60/N=60/12=5$ 秒 = 5 s ————— (20)

$$\text{(13) 式から, ピストンの1ストロークの仕事は198.69 (kJ) であるから, 出力, } P=W/T=198.69/5=39,738\text{kW} \text{ ————— (21)}$$

1馬力は735.5Wであるから、(1 PS = 735.5J/s = 735.5W)

出力を馬力に直すと、何馬力になるかを調べると、下記の式で変換され54馬力を得る。

$$PS=P/735.5=39738/735.5=54\text{馬力} \text{ ————— (22)}$$

試みに作動サイクルを12から15サイクル/分に上げると、出力は1.25倍向上し、49.673kWすなわち67.5馬力となる。このようにエンジンの作動回数を上げることは出力向上の手段である。

現代のエンジンと比較すると、大きな構造の割に54馬力と出力は低いですが、エンジンの引く力を見ると(14)式の91987.65(N)と約10トン弱の荷重を引き上げる力を出す力持ちのエンジンであった。

ニューコメンの大気圧エンジンは大きな図体の割にパワーの小さいエンジンであった。これは既に説明したように大気圧エンジンの作動圧力は1気圧(1 atm)以下と低く、かつ速度が遅いためであった。大気圧エンジンと呼び「真空圧エンジン」と言わないのは、真空は相対的に大気の圧力

との差であるから、真空圧がピストンを引くのではなく、大気圧がピストンを押すと考え、当時の人々は“大気の圧力が作り出した動力”と捕らえて「大気圧エンジン」と呼んだ。

ガソリンやディーゼルエンジンのように非常な大きな高い圧力を利用するエンジンとは全く異なる原理で熱や材質的に対応しやすい“穏やかな力を作用させる単純なエンジン”を人類はまず手に入れたのだ。

2.8 ニューコメンのエンジンのまとめ

エンジンの大きさは目を見張らせるもので、これだけのエンジンを、熱や蒸気の特徴が科学的に分かっていない時代に作り上げたことに、ニューコメンの創造能力の偉大さを忍ばせる。ニューコメンの人となりについては、それを改良して発展させたワットの影に隠れてあまり知られていないが、ニューコメンの果たした役割は大きい。このエンジンは発展し、1769年にはイングランドの北部に100基も据えつけられ、中には100馬力のエンジンも作られた。馬150頭分(ワットが馬力の単位を作り出したが、エンジンの使用者に馬の能力と比較して文句がでないよう、蒸気エンジンの馬力を、当時の馬の50%増しに設定した。従って100馬力のエンジンは馬150頭分相当となる)に代わるエンジンができ、馬や飼育係、馬の仲買人を失業させたが、エンジン追放運動は起きなかった。それは馬の力では不可能なほど鉱山が深く掘られ、排水は困難を窮め、社会的に新しいエンジンが求められていたためである。「産業革命」への“めばえ”であった。

中世の人々の前に、人の身長何倍もある巨大メカニズムを持つ、強力なニューコメンの「恐竜型の巨大な大気圧エンジン」が突然現れた。それは人類の発展に大きな貢献をしたのである。

3. ジェームズ・ワットの蒸気エンジン

3.1 ワットのコンデンサー付き大気圧蒸気エンジン

ニューコメンの蒸気エンジンを、さらに改良し発展させたのがジェームズ・ワット(1736~1819)である。ニューコメンより73年遅れて生まれたワットは、ニューコメンのエンジンの模型の修理を依頼され、研究しているうちにエンジンの欠点を見つけ出した。ワットはその改良のためにエンジンの熱の無駄を少なくするコンデンサー(復水器)を発明し、熱効率のよい大気圧武の蒸気エンジンを1776年に作り出した。だから蒸気のをを使ったエンジンの祖としてはワットの方が有名である。(図3.2と3)

3.2 青年ワットが取り組んだ課題

ワットは19歳のときロンドンに行き、数学期械店に弟子入りして実務を習った。21歳のときグラスゴーに戻り、グラスゴー大学の器械類を修理する仕事を得て、1764年に物理学教授からニューコメンの蒸気エンジンの模型の修理を依頼されたわけである。そのエンジンはかってロンドンに送られ、修理工場の専門家によって修理されたのだが、動きがよくなかったという。ワットはニュー

コメンの蒸気エンジンの動きが悪い原因を調べていくうちに、ボイラーの能力がエンジンの負荷に釣り合っていないことに気がついた。

3.3 ワットは日曜日も考え続けた

ワットは、ニューコメンのエンジンは100℃の蒸気がシリンダーに入った後、次にピストンを動かすため、冷水がシリンダー内に噴射され、蒸気を水に変えるが、そのときシリンダーの壁面も水で冷却されてしまい、必要な蒸気量の5～6倍もの蒸気を消費していることに気がついた。せっかく100℃近くまで暖めたシリンダーをなるべく冷やさずに蒸気を凝固させ、ピストン下面に真空力を発生させることができないか。ワットは絶えず考え続けた。

ついに画期的な考えが浮かんできた。それはワットによると「1765年の、ある晴れた日曜日であった。シャロット街からグラスゴー草原に入り、洗濯屋の前を通り過ぎた。その間、私はエンジンのことばかり考えながら歩いていた。ふとある考えが浮かんだ。蒸気には弾性があるので、真空の中に突入し、シリンダーを冷やすことなく蒸気を凝結させることができるであろう、私はゴルフハウスまで行かないうちに頭の中で、この考えをまとめることができた」と語っている。

3.4 ワットの科学的な取り組み方

早速、着想を具体化するため実験装置を作った(図3.1と2)。Aはボイラー、Bがシリンダーで、中にピストンDが納められた。Cが新しい発想の蒸気のコンデンサー(復水器)で、容器の中に冷却水があり、その細い管があつて、その末端にはポンプが取り付けられた。コンデンサーはシリンダーからの蒸気を取り除くため、その温度を下げる役割を持っている。水蒸気を液化するため「コンデンサー(復水器)」と呼ばれた。

蒸気がシリンダー内に充満しピストンを押し上げると、次にピストンを押し下げるストロークに入るが、ワットはこのときシリンダーが冷えるのを避けるため、ニューコメンのエンジンのようなシリンダー内への注水を止め(図3.1参照)、コンデンサーへの通路のコックを開けて蒸気を導いた。コンデンサー内の蒸気はすでに冷却水で液化されているため、真空力を発生しており、シリンダー内の蒸気を吸い込んでピストンに真空力を作用し、シリンダーを冷却することなくピストンに力を発生させることができることが確認できた。

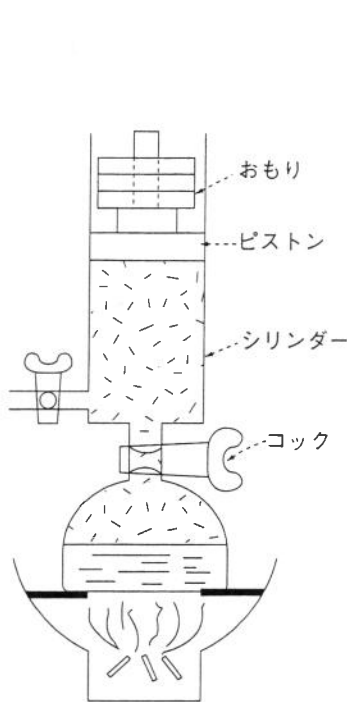


図3.1 ワットの蒸気に関する実験

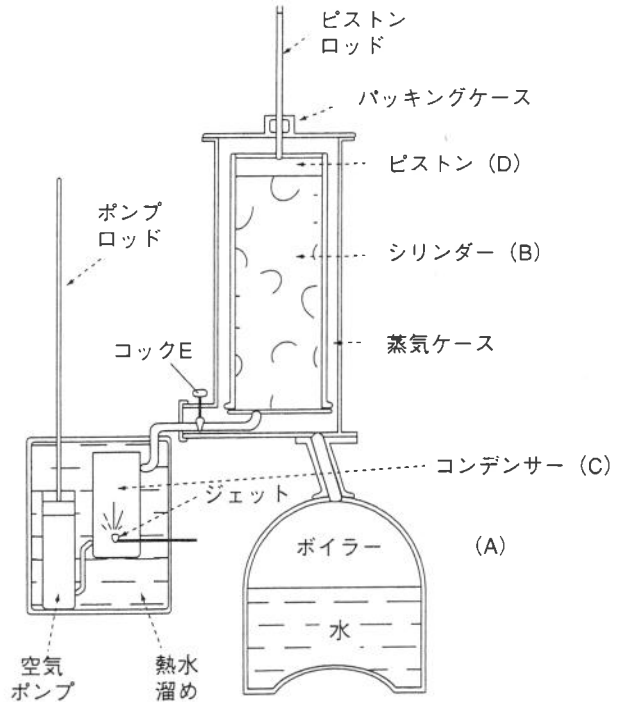


図3.2 コンデンサーを用いたワットのエンジンの構造

3.5 なぜ、コンデンサーは熱効率を上げたか

初期のニューコメンのエンジンは真ちゅうの鋳造された材質でシリンダーが作られ、厚みは3分の1インチ(8.5mm)であった。その後、鋳鉄が安く作られるようになって、鋳鉄製に変わっていった。しかしそのころの鋳鉄は1インチ(25.4mm)以下に鋳造できなかったため、エンジン運転時の加熱と冷却による熱損失を大きくしていた。ワットはニューコメンのエンジンの模型を修理したとき、シリンダーの冷却と加熱のために多量の熱エネルギーを無駄にしていることに気づいた。ワットはこの熱損失をなんとか少なくする方法はないかと考え、熱に関する多くの実験を重ね、ついに「コンデンサー」、すなわち「蒸気液化器」を発明したわけである。(図3.2)

シリンダーを冷却せずに蒸気を液化させるコンデンサーを採用した結果、ワットの蒸気エンジンはシリンダーの温度を常に蒸気の温度に近い状態に保つことができ、シリンダーを冷やさずに動力を取り出すことが可能となった。シリンダー壁面での蒸気熱がムダに奪われることがなくなり、エンジンの熱効率を大幅に向上させることができたのだ。ワットによると、ニューコメンの蒸気エンジンでは、エンジンに送られた蒸気の3分の1だけが本来の目的でシリンダーを満たし、真空を作ることに使われているだけであった。

このワットの観察結果を、ニューコメンの蒸気エンジンで求めた熱効率5.62%を当てはめると、

次のようにコンデンサーの効果として、ニューコメンの蒸気エンジンの熱効率を11.24%改善した結果、ワットの蒸気エンジンは熱効率16.86%が得られる。ワットの発明したコンデンサーは3倍も熱効率を向上させたことになる。(表3.1)

表3.1 ワットとニューコメンのエンジンの熱効率の比較 (コンデンサーの効果を示す)

No	エンジンの種類	蒸気の消費割合 (ワットの計算値)	熱効率	参 考
1	ワットのエンジン	1 ^{*1}	16.86%	^{*1} ワットの観察結果
2	ニューコメンのエンジン	3	5.62% ^{*2}	^{*2} 第2章の(19)式
—	コンデンサーの効果(1-2)	両者の差(-2)	(11.24%)	蒸気の消費を1/3にした

3.6 ワットの商売上のホースパワー(馬力)単位の設定

このエンジンは、資本家のボルトンとワットが共同で創設したボルトン・ワット社で作ら、1800年には500基以上が生産された。38%が揚水用に、残りが紡績、圧延、製粉工場などに使われている。しかしエンジンの市場での売買上、その性能を評価する必要を生じてきた。古くから馬を使って作業していたから「ホースパワー:horse power:馬力」の単位が自然発生的に生まれてきた。

セヴァリーは彼の「火力エンジン」を評価したとき、エンジンが馬にとって代わったとき、それまで使っていた馬の数と比較し、エンジンの馬力とした。しかしこれは物理学的にみて信頼できる単位ではなかった。その後、ニューコメン型のエンジンを精度よく作り、性能を上げたジョン・スミトーンは、1馬力を「毎分、重力に逆らって1フィート(30.5cm)の高さに、22916ポンド(約10トン)の重さを持ち上げる仕事」とした。

ワットは彼のエンジンが馬に比べ安く性能がよいかを示す「馬力」の単位を正確に定めた。

4. ワットの高圧蒸気のレシプロエンジンの開発

4.1 大気圧エンジンから高圧蒸気エンジンへの道のり

ワットは真空を利用した大気圧エンジンから脱却し、蒸気を持つ高い圧力をそのまま使った「高圧蒸気エンジン」の開発に取り組んだ。

新しい高圧エンジンの開発のための実験装置(図4.1)が作られ、研究が開始された。

実験装置は、ボイラーからシリンダーの上部に入る蒸気の通路にコックA、ピストンと一体に構成されエンジンの動力を外部に取り出すロッドD、さらにロッドDの間げきからの蒸気漏れを防ぐ気密ケースE、シリンダーの上部と下部をつなぐ蒸気通路を開閉するコックC、シリンダーからコンデンサーへの入り口のコックBで構成されていた。

この新しい考えの高圧蒸気エンジンは、停止状態ではビームのバランス作用によりピストンは必ず上がった状態にされていた。運転にあたりコックAを開くとボイラーからの蒸気はシリンダー上部を満たし、コックCとBが開かれているときは、シリンダーの下部からコンデンサーまで

蒸気が満たし、次にコックCを閉じるとピストンの下部からコンデンサーまでの蒸気はコンデンサーの作用により水になりシリンダー下部に真空を生じた。

ピストンの上面と下面に、それぞれ蒸気圧と真空力を受ける新しい高圧エンジンは、ピストンが引き下げられ、最も下がったとき、コックBを閉じ、続いてコックCを開くと蒸気はピストンの上下面に作用し、作動圧はバランスしてピストンは上昇し、最初の位置に戻り、エンジンの1サイクルが成された。エンジンの連続運転はピストンの上下運動に合わせてコックA, B, Cをタイミング良く開閉すれば運転でき、ピストンの動きはビームの動きと連動しているのでビームに取り付けられたリンクメカニズムにより、コックA, B, Cがタイミングよく開閉され、自動運転ができるよう設計された。このような実験を経て次第に高圧エンジンは実用化されていった。

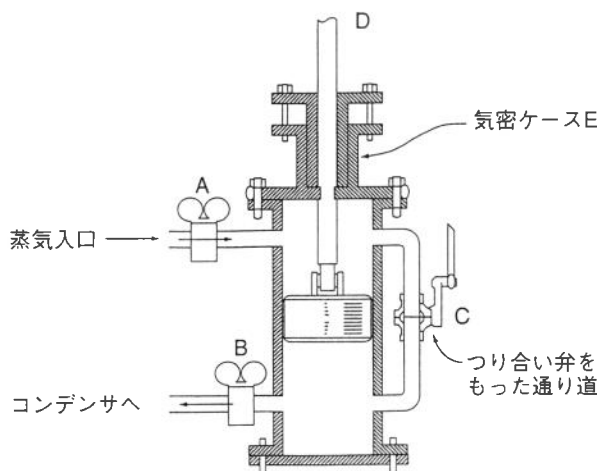


図4.1 ワットのコンデンサーに関する実験と高圧エンジンへの取り組み

この新しいエンジンは、従来の真空力のみを利用する大気圧エンジンに比べ、蒸気圧をそのままピストン上部に作用させるものだった。出力の大きなエンジンへと変化し、熱効率を良くするためコンデンサーで作られた温水は再びボイラーに送られ、蒸気として使われた。

4.2 ワットの高圧エンジンの蒸気圧

ワットは、エンジンのピストンのストロークとシリンダー内の蒸気圧の関係を測る装置(インジケーター)を発明し、その圧力を測定したところ、次の値を得ることができた。

表4.1 ワットの高圧エンジンとニューコメンのエンジンの平均有効圧

No	エンジンの種類	エンジンの平均有効圧
1	ニューコメンのエンジン	$P_N=7.0$ ポンド/平方インチ (48.263kPa)
2	ワットの高圧エンジン	$P_W=10.5$ ポンド/平方インチ (72.395kPa)
3	両エンジンの平均有効圧の比	$P_W/P_N=10.5/7.0=1.5$

ワットの高压蒸気エンジンとニューコメンの蒸気エンジンの性能を比較するため、ビームのリンク機構やピストン径とストロークを同じにし、同じ作動速度で運転した場合を考えると、発生するトルク(回転力)と出力はワットのエンジンの方が1.5倍大きい。これはピストンの上面に蒸気圧を直接作用させたためで、ワットのエンジンの平均蒸気圧を求めると、125.457kPaが得られる。〔(注4.1)の(2)式を参照〕

(注4.1)

$$P_s = P_w - P_N = 72.395 - 48.263 = 24.132 \text{ kPa} \quad \text{————— (1)}$$

ワットのエンジンの蒸気圧力を求める。標準大気圧(1 atm)は101.325kPaであるから、(1)式の値を加えるとワットのエンジンの蒸気圧 P_s が求まる。

$$P_s = 101.325 + 24.132 = 125.457 \text{ kPa} \quad \text{————— (2)}$$

$$\text{標準大気圧とワットのエンジンの平均蒸気圧 } P_s \text{ との比較 } 125.457 / 101.325 = 1.24 \quad \text{— (3)}$$

この値は標準大気圧の1.24倍であるから、当時のワットのエンジンを動かす蒸気圧は大気圧よりわずかに高い圧の蒸気をエンジンに供給していたと考えられる。〔(注4.1)の(3)式を参照〕

4.3 ワットの往復運動から回転運動エンジンへ取組

工業が発達してくると、支点を中心にシーソーのように上下運動するエンジンから、回転運動をするエンジンが求められるようになってきた。ワットは、そのメカニズムとしてクランク機構を使おうとして、特許申請を準備していた。しかしそのとき彼の会社の工具のジェームズ・ピッカードがワットの競争者にその機密を漏らし、ワズブローと共に1780年に特許を取ってしまった。ワットは激怒したがやむを得ず、別な回転運動を作るメカニズムについて考えた。遊星歯車方式である。それは図4.2のワットの蒸気エンジンに示すように、回転軸に歯車Nを取り付け、回転軸のしんからアームを出す。アーム先端に歯車Mを取り付け、上方のビームの右端GからコネクティングロッドJを下方に伸ばし、歯車Mの軸心にロッドJの下端を結合させて、ビーム端の上下運動はロッドJを介してアームに伝えられる。歯車Mは、歯車Nの周りを回りながら歯車Nに回転を与え、フライホイールの採用によりピストンの上下運動は円滑な回転運動に変換するというメカニズムである。

歯車Nがサンギヤ(太陽歯車)、Mがプラネタリーギヤ(遊星歯車)で、両歯車の歯数を変えることにより、回転数を変えることができる利点があった。しかし当時の歯車の設計と生産技術は極めて低く、歯車の表面は鋳造されたままで、その摩擦が大きいため回るときは大きな音をたてることになった。歯車の摩擦も大きく伝達効率もよくなかったので、ワットはクランク機構の特許が切れた1794年以降は遊星歯車方式をやめ、クランク機構を採用した。

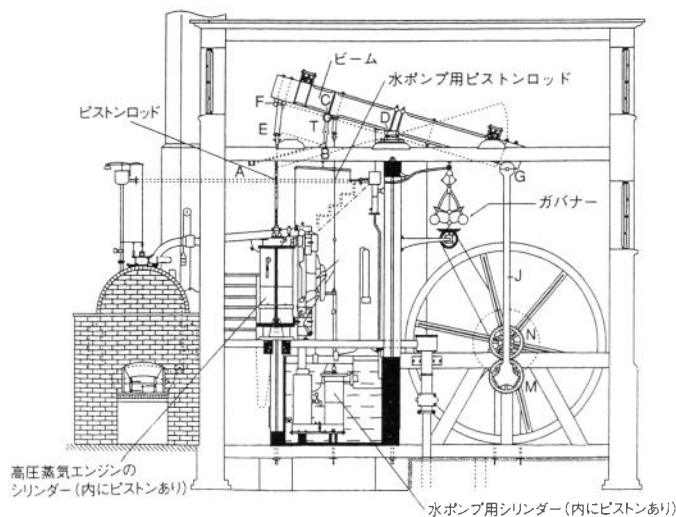


図4.2 ワットの回転式高圧蒸気エンジン

4.4 ワットの高圧蒸気エンジンの総合熱効率

蒸気エンジンは、エンジン単体の熱効率だけでなく、ボイラーの蒸気を作り出すための熱効率を考慮しないと、その経済性の評価を誤ることになる。そのためエンジンに関する全体の「総合的な熱効率」について考えてみる。

ニューコメンの初期のエンジンの総合的な熱効率は0.5%程度の値であったが、その後改良され1.2%程度にまで向上した。現代から考えると、非常に石炭を食うエンジンであったが、人力や馬の力でもできない仕事をする力のある新しい動力源であったから、当時はなくてはならないエンジンであった。

その後、ワットのコンデンサー付きの効率のよい蒸気エンジンが同じ仕事をしたときの石炭の消費量を測ったところ、ニューコメンのエンジンの4分の1になった。このことからワットの蒸気エンジンの熱効率は4.8%という数字になる。

表4.2 ワットの高圧エンジンとニューコメンのエンジンの総合的な熱効率の比較

No	エンジンの種類	総合的な熱効率
1	ニューコメンのエンジン	約 1.2%
2	ワットの高圧エンジン	約 4.8%

燃料費が4分の1になることから、ニューコメンのエンジンは次第にワットのエンジンに替えられていった。

4.5 ニューコメンとワットの蒸気エンジンは内燃エンジンへの先導役

現代の自動車のエンジンの元祖の蒸気エンジンはシリンダー、ピストンをはじめとして、ピストン・リング、クランク機構、スライド弁など内燃エンジンの基を創造した。次世代のルノアールの複動式ガス内燃エンジン、オットー・ランゲンの内燃フリー・ピストンエンジンなどの「初期の内燃エンジン」は蒸気エンジンの原型を外燃式から内燃式に変えながら進化して行ったことを第2報で述べる。

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 (鳥尾 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 (粟野 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 (粟野 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(株) 広報誌
トヨタ ハイブリッド システム トヨタ自動車(株) 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