

物理学基礎 II (1/4)

S. Yamauchi

2017年03月12日

目次

0	ガイダンス	2
0.1	力学と熱力学の歴史概観	3
1	熱と温度	4
1.1	古代ギリシャ人の熱思想	4
1.2	温度計	4
1.3	ブラックの熱学	8
1.4	今日の熱と温度	11
2	気体の法則	13
2.1	大気圧に関する知識	13
2.2	ボイル・シャルルの法則	15
2.3	今日の気体の法則	21
3	初期の熱機関の歴史	24
3.1	産業革命前の社会と技術	24
3.2	パパン	26
3.3	セイヴァリ	28
3.4	ニューコメン	30
3.5	ワット	34
3.6	今日の熱機関	45

0 ガイダンス

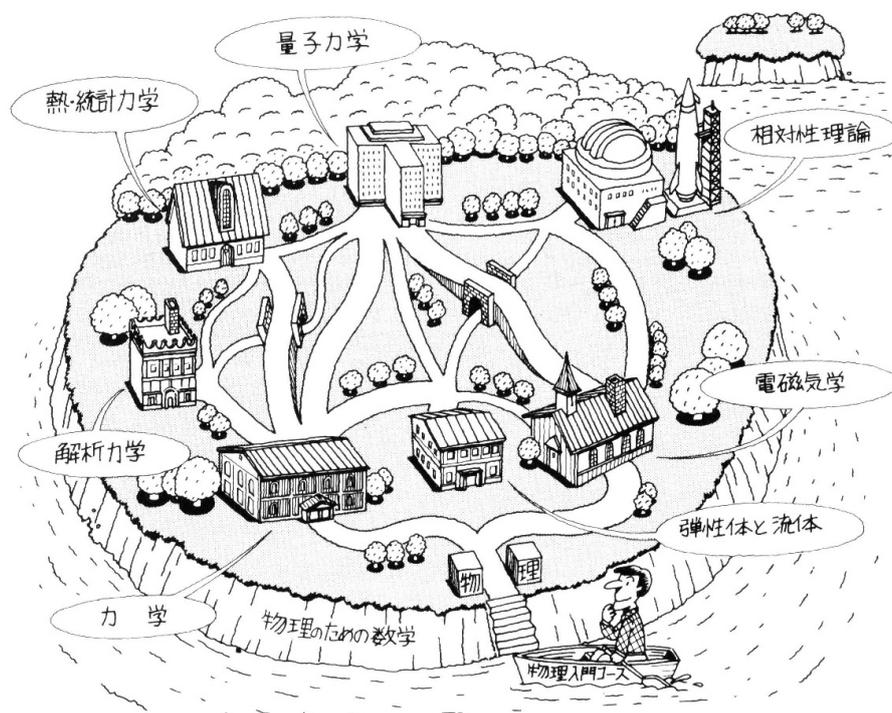


Fig. 1 物理入門コース (戸田・中嶋)

3年生の物理基礎 I では、おもに力学を中心に学んだ。物理基礎 II では、熱力学について学ぶ。

Fig.1 は、物理を専門としない理工系学生の教科書として広く使われている「物理入門コース」全 10 巻 [1] のイラストである。入口に「力学」に並んで、分かりにくい「電磁気学」が置かれている反面、熱力学は統計力学と合わせて「熱・統計力学」となって、奥の方に「量子力学」や「相対性理論」と並んで置かれている。この図から分かることは、(1) 熱力学(熱・統計力学)は物理学の 5 本の柱の一つに挙げられるほど大切だが、(2) 奥が深く理解しにくい。ということになるのか。

熱は体温保持や調理に不可欠であり、古代より我々の生活に深くかかわってきた。また熱機関は 18,19 世紀の産業革命の牽引力となり、現在でもエネルギーと地球環境問題の主役(または主犯)であり続けている。にもかかわらず、熱は理解しにくく、得体の知れないモノである。

機械系の学生は、熱機関も専門的に扱わねばならないので、熱力学を学ぶことは必須の要件となっているが、分かりにくい科目の代表格になっている。

建設系の学生が熱や熱機関を専門的に扱うことは多分ないと思われるが、エネルギー・環境問題など、人間と自然とのかわり方を考えるうえで、熱を抜きにしては何もできなくなっている。この授業では、熱力学の基本とその意味する内容を、熱の歴史を通して理解することに主眼を置く。過去の人々が熱をどのように考えて扱ってきたのかを調べながら、かれらと同じ目線に立って、熱力学の考え方を学ぶことにする。マクロな視点から扱う熱力学(古典熱力学)をおもな対象とするが、分子・原子のミクロな視点から見る分子運動論と統計力学にも、少しだけ触れる。

0.1 力学と熱力学の歴史概観

Table 1 力学・熱力学関連の年表

世紀	年	人名	内容			
14				ルネサンス		室町時代
15						
16	1543	コペルニクス	地動説	科学革命	市民革命	
	1586	ステヴィン	てこの原理、斜面の法則			
17	1601	ティコ・ブラーエ	惑星の正確な観測結果を残す			
	1609, 19	ケプラー	ケプラーの第一・第二・第三法則			
	1632, 38	ガリレオ・ガリレイ	慣性の法則、落体の運動法則			
	1662	ボイル	ボイルの法則			
	1687	ニュートン	運動の法則、万有引力の法則			
1690	パパン	大気圧蒸気機関の作動原理(模型)	イギリス産業革命	スフラン	江戸時代	
18	1702	セイヴァリ				蒸気機関を考案
	1712	ニューコメン				最初の蒸気機関の建設
	1724	ファーレンハイト				正確な温度計(華氏目盛)
	1738	ベルヌーイ				「流体力学」
	1750	オイラー				「力学の新しい原理の発見」(力学の確立)
	1760頃	ブラック				熱容量の概念、融解・蒸発の潜熱の概念
	1769	ワット				分離凝縮器の特許
1787	シャルル	シャルルの法則				
1788	ラグランジュ	「解析力学」を著す				
1798	ランフォード	熱の運動説を主張				
19	1803	トレビシッック				最初の蒸気機関車
	1807	フルトン				蒸気船の運行開始
	1811	アヴォガドロ	アヴォガドロの法則(仮説)を発表			
	1824	カルノー	カルノーの法則、カルノーサイクル			
	1842	マイヤー	熱の仕事当量を計算			
	1847	ジュール	熱の仕事当量を繰り返し実験			
	1850	クラウジウス	熱力学第二法則			
	1851	トムソン	熱力学第二法則			
	1854	トムソン	絶対温度目盛			
	1865	クラウジウス	エントロピを導入			
	1866	マクスウェル	気体の速度分布則			
	1876	オットー	4行程サイクルガス機関			
1885	ダイムラー	ガソリン機関2輪車	明治時代			
1885	ベンツ	ガソリン機関3輪車				
1893	ディーゼル	ディーゼル機関を製作				

力学および熱力学の歴史上重要な発見、発明のいくつかを Table 1 に示す (別紙年表も参照)。

17世紀、ニュートンは、ティコ・ブラーエの観測結果を用いたケプラーの法則と、ガリレイの慣性の法則と落体の運動法則を組み合わせ、天上と地上を支配する運動の法則を確立したとされている [2] *¹。

一方、熱を定量的 (科学的) に扱うようになったのは、力学が一応完成した 18 世紀後半になってからであり、さらに、その後 19 世紀前半までは、熱は物質 (熱素、元素の一種) であると考えられていた。その誤りが認識されて、熱力学 (第一法則、第二法則) が確立されたのは 19 世紀後半であった*²。

人類にとって身近であったはずの熱が、いかに理解しにくいものであったかが分かるし、その歴史は力学の歴史以上に波瀾に満ちたドラマであり、興味を持って学習してほしい。

*¹ ただし、現在の形 (運動方程式と微積分法) の力学になったのはその 100 年後であり、ヨーロッパ大陸のベルヌーイ族、オイラー、ラグランジュなどに負っている。

*² 19 世紀前半に電気分野の発見が続き、最後にマクスウェルが電磁気学を確立したのも、19 世紀後半であった。

1 熱と温度

1.1 古代ギリシャ人の熱思想

古代ギリシャのターレス (BC640-BC546) やアナクシマンドロス (BC610-BC546) などは、世の中は水、空気、土、(および火)の三つ(四つ)の元素から作られており、それらは、あるものから他のものへ変化していくと考えた。アリストテレス (BC384-BC322) は、その背後に物体に含まれる熱、冷、湿、乾の感覚を引き起こす 4 種類の質(要素)があり、この質は二つずつ組み合わせられて、土(乾と冷)、水(湿と冷)、空気(湿と熱)、火(乾と熱)の基本元素が作られていると考えた。元素の中の質が反対の質に変わることによって、水が凍って土になったり、蒸発して空気になったりするとした [3][4]。

この考えでは、熱と冷とは正反対ではあるが別の性質であり、その性質をもたらす何らかの物質的なもの(要素)の存在が主張されている。このような考えは多少の形を変えながら、18~19世紀頃まで西欧の人々の考えを支配していた。

1.2 温度計

科学としての力学のためには、位置と時間を定量的に表すことが必要であるのと同じように、熱を科学的に扱うには、熱い、冷たいという感覚を定量的に表すことが、まず必要であろう。

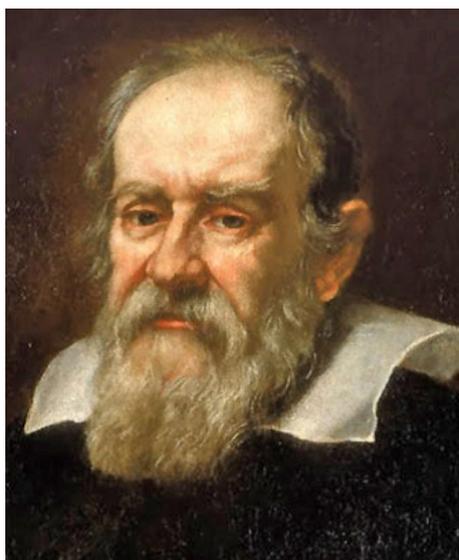


Fig. 1 ガリレオ・ガリレイ

ガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei, 1564-1642) は、イタリアの物理学者、天文学者 [5]。

イタリア・トスカーナのピサで生まれ、1581年ピサ大学入学後、ユークリッドやアルキメデスに強い興味を持った。1589年からピサ大学、ベネツィア近郊のパドヴァ大学で教授となり、数学や天文学、測量や砲術計算などを教えた。1610年にトスカーナ大公付き主席哲学者兼数学者とピサ大学特別数学者となり、フィレンツェへと移った。

地動説を主張したため、ローマ教会の異端審問所に2度告発され、2度目の1633年に有罪判決を受けた。『天文対話』(1632年)、『新科学対話』(1635年)を出版し、地動説と力学法則の啓蒙に努めた。物体の落下法則と投射体の軌道の発見は、その後の力学の基礎となった。

気体温度計 力学の基礎を築いたガリレオ・ガリレイは、最初の温度計を作ったとされる (Fig.2)。フラスコ状のものに気体(空気)と液体(水かワイン)を入れて倒立させ、管内の液の高さで温度を測ったとされる(1593年)。目盛がついていたかどうかは不明だが、同時期の記録では温度目盛の付いたものも作られていた。ガリレオの友人のサグレドは、その温度計を利用して、夏の最高の暑さを 360° 、雪の温度を 100° 、雪と塩の混合物の温度を 0° と決めたとされる [4]。

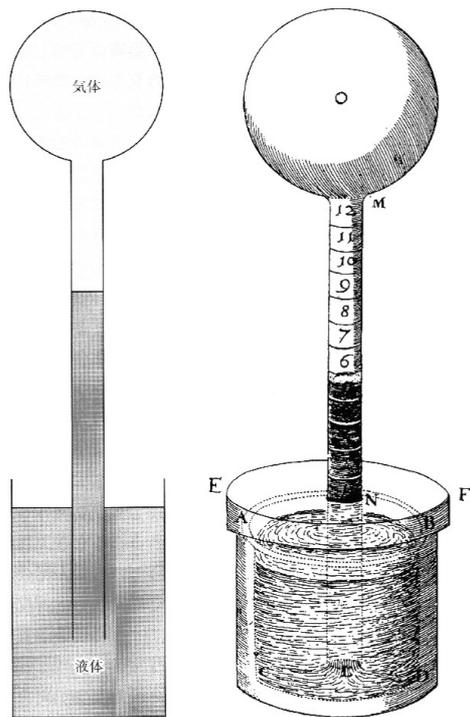


図 1.1 ガリレオの温度計

図 1.2 ロバート・フラッドの温度計 (1626)

Fig. 2 ガリレオらの温度計

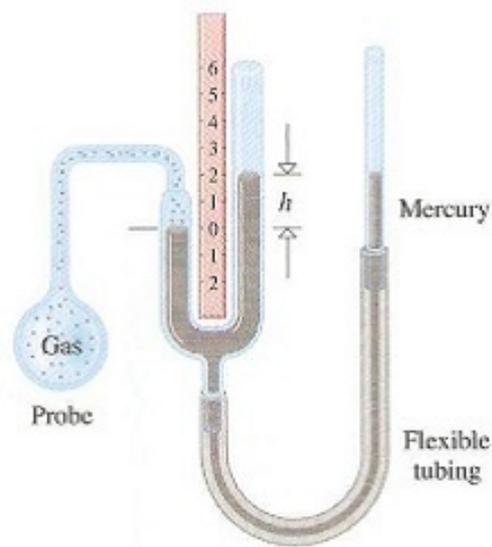


Fig. 3 アモントンの気体温度計

ガリレオの温度計では液柱の高さによって気体の圧力も変わることになり、気圧も影響するが、ガリレオもそのことには気づいていなかったようである。17世紀を通じて、この器具のさまざまな形と大きさのものが用いられた。

後年1700年頃、フランスの物理学者ギヨーム・アモントン (Guillaume Amontons 1663-1705) は、これらを改良して定容積形の気体温度計をつくった (Fig.3)。フレキシブルチューブにつながる右側の管を上下させることにより、左側の感温部の気体の体積を一定にすることができ、その時に圧力 h を用いて温度を検出できる。ただし、気圧変化の影響はまだ残っている。アモントンは、常温から水の沸点まで温度を上げると空気の圧力が $4/3$ 倍となることも見出し、空気の圧力がゼロとなる絶対零度の存在にも気づいていたとされる。シャルルの法則の先駆けともいえるが、当時は温度も含めて正確さに欠けていた。後年、ゲイ=リュサックが温度と気体の体積の関係を導くヒントになったとされている。

液体温度計 温度を検出するには、気体より液体の体膨張を用いるほうが、より簡単で使いやすい。今日使われているような型の液体温度計は、18世紀の間に徐々に進化した。しかし、温度計に使用すべき液体の選択に関して、決まった考え方は存在していなかった。何人かの人が、温度の目盛を考案した。

オランダに住んでいたドイツ人ダニエル・ガブリエル・ファーレンハイト (1686-1736) は良い温度計の製造者としての名声を博した (Fig. 4)。1714年にアルコール温度計を、1724年に水銀の洗浄方法を発見して水銀温度計をつくった (Fig. 5)。そして、水・氷・塩の混合物の温度を最低温度の 0° 、水の氷点を 32° 、口の中の温度を 96° とした温度目盛りを定めた (1724年)。これがその後のカ氏 (華氏) 温度目盛となった。

フランスの万能学者レオミュールは、水の氷点を 0° 、沸点を 80° とした温度目盛りを作った (1730年)。

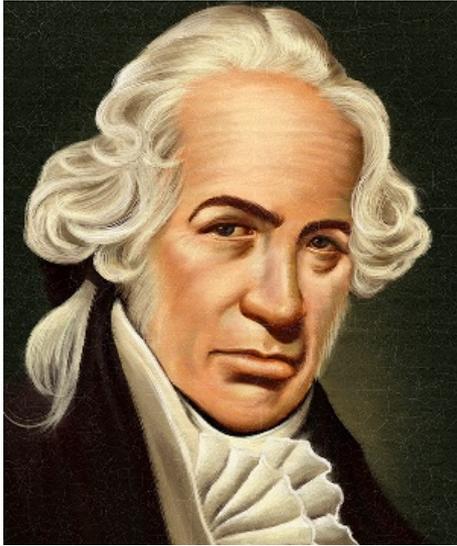


Fig. 4 ダニエル・ガブリエル・ファーレンハイト

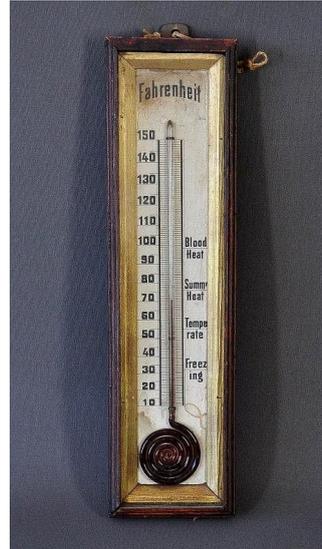


Fig. 5 ファーレンハイトの温度計



Fig. 6 アンデルス・セルシウス

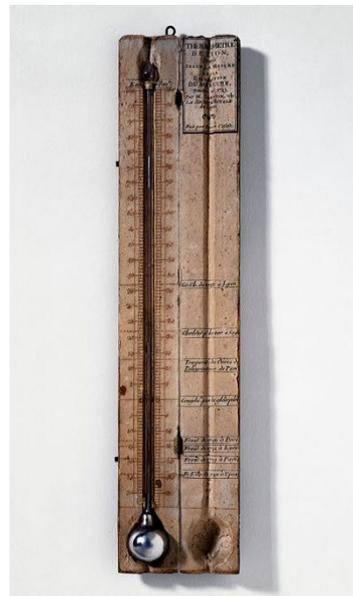


Fig. 7 セルシウスの温度計

水・アルコール混合物がこの間に 8% だけ体膨張することを基にしたとされている。その後、レオミュール度 (列氏温度) とよばれた。

水の氷点と沸点を固定点として、その間を 100 度に分ける目盛は、スウェーデン人のアンデルス・セルシウス (Anders Celsius, 1701-1744) によって 1742 年に導入された (Fig. 7)。彼は 氷点を 100 度に、沸点を 0 度に決めたとされている。7 年後に、この方式を後継者のメンテン・ストレーマーが上下逆に変えたとされており、これがその後のセ氏 (摂氏) 温度目盛となった。

そのほかにも多くの温度目盛が現れたが、不合理なもの多くは淘汰されていった。

物質の熱膨張を温度計に用いる場合、気体の場合は気圧の影響の除去が課題であり、また扱いにくかった。液体を用いる場合は、水銀の精製法とガラスの質の安定性が問題であり、この方面では多くの発見があった。

温度計の改良のなかで、純粋な物質の融解や沸騰は一定温度で起こることが認識されるようになった。その一定温度は、圧力によって変わることが、まず沸点についてボイルにより発見された*³。温度計の定点を定めても、用いる物質により途中の温度にずれが生じることも知られていた。どの物質を用いるのが良いかは、最初から重要な問題であったが、19世紀後半まで解決されなかった [6]。

*³ 氷点 0 °C、沸点 100 °Cとは、標準大気圧 760 mmHg = 101.375 kPa のもとでの値である。

1.3 ブラックの熱学

熱容量 (比熱) や相変化の潜熱などの、熱と温度の関係を最初に明らかにしたのは、産業革命を前にした 18 世紀スコットランド (UK) のジョゼフ・ブラックであるとされている。

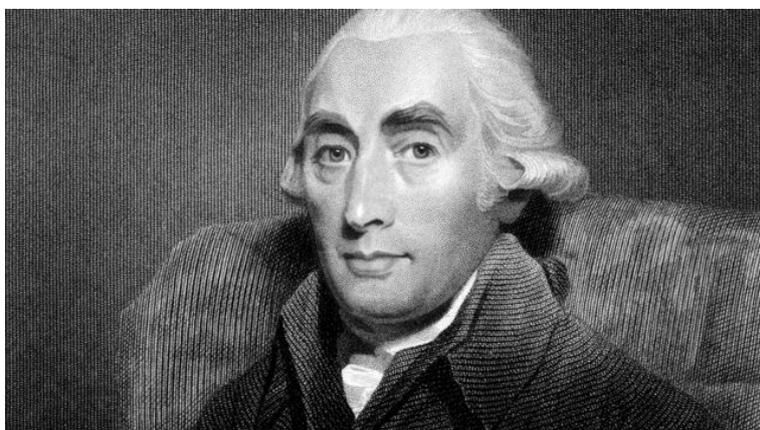


Fig. 8 ジョゼフ・ブラック

ジョゼフ・ブラック (Joseph Black, 1728-1799) は、スコットランドの物理学者、化学者、医学者であり、熱の保存則に基いて、比熱、潜熱の概念の確立、炭酸ガスの発見等でも知られる。

ジョゼフ・ブラックの生涯 ブラックはフランスのボルドーで生まれた。彼の父はアイルランド出身、母はスコットランド出身で、ボルドーを拠点にワイン商を営んでいた。

ジョゼフは北アイルランドのベルファストのグラマースクールから、16 歳でグラスゴー大学へ入った。1747 年に赴任してきた医学教授ウィリアム・カレン (William Cullen, 1710-1790) の講義を聞き、医学と化学に強い興味を持ち、医学の道に進んだ。カレンの実験助手を数年間つとめた。その後、医学をさらに学ぶためにエディンバラ大学へ移り、固定空気 (炭酸ガス) を発見した [4]。

1756 年に、解剖学と植物学の教授としてグラスゴー大学へ帰り、翌年に、医学の教授となった。師のカレンは 1755 年にエディンバラ大学の医学の教授となっていた。グラスゴーでは、熱に関する研究を行った。温度と熱量の区別を明確にし、熱容量 (比熱) 概念を導入して熱の定量的扱いを可能にした。氷が融解するときや水が蒸発するとき、一定温度で熱を吸収することを見出し、潜熱の概念を明確化した。当時同大学の数学機器メーカーであったジェームズ・ワットとも親しく、ワットが蒸気機関の開発や起業を行う際の良き相談者、支援者でもあった。

かれは 1766 年に、カレンの後をついでエディンバラ大学の医学と化学の教授となり、1797 年まで多くの受講者を引きつけた講義を続け、近代的化学の普及に大きく貢献した。

ブラックは、デービッド・ヒューム、アダム・スミス、ジェームズ・ハットンなど、スコットランド啓蒙主義運動の多くの知識人たちとも交友があった。ヒュームの主治医として最期を看取り、アダム・スミスの遺稿をハットンと共に編集した。ブラック自身は、小児期の感染症による肺疾患や後年ではリュウマチで苦しみ、決して健康ではなかった。1799 年 12 月 6 日にエディンバラで死去し、フランシスコ会修道士墓地に埋葬されている。

ブラックによる比熱概念 [4] ダニエルファーレンハイトは、プールハーフェ (オランダ) の指示にしたがって、温度の異なる水と水銀を混合する実験を行った (Table 2)。また、ジョージ・マーチンは同じ形の 2 個の

ガラス瓶に同体積の水と水銀を入れ、共通の熱源から等距離に置いて加熱したとき、および熱源を退けて冷却したときの温度変化の速度を比較した (Table 3)。

Table 2 ダニエル・ファーレンハイトの実験 (混合)

	実験 1		実験 2	
	水 (w)	水銀 (m)	水 (w)	水銀 (m)
体積比	1	1	2	3
初期温度 (°F)	100	50	100	50
最終温度 (°F)	80		75	

Table 3 ジョージ・マーチンの実験 (1739)
(加熱・冷却)

	水 (w)	水銀 (m)
体積比	1	1
温度上昇速度の比	1	2
温度降下速度の比	1	2

質量から考えれば、水は同体積の水銀の 13.6 倍容易に温度変化すると考えられるが、いずれの実験でも逆の結果となっている。ファーレンハイトの実験では、水銀 3 体積が水 2 体積に等価であり、マーチンの実験では、水銀 2 体積が水 1 体積に等価であるとの結果となっている。この結果は、熱運動説を否定する有力な論拠となっていた。

ブラックは、物質には力学的属性 (質量) とは別の熱的属性があると考え、熱容量 (または比熱) の概念を導入した。

$$\Delta Q = C\Delta t$$

$$(\text{熱容量 } C) = (\text{質量 } M) \times (\text{比熱 } c)$$

これを用いて、熱量測定は次のようにして可能となる。

- (1) 水との比較から物体の熱容量を求める。
- (2) 温度変化と熱容量から熱量を求める。

上のファーレンハイトの実験 1 から水銀の比熱 c_m を求めると、

$$\Delta Q = M_w c_w (100 - 80) = M_m c_m (80 - 50)$$

より、

$$c_m = \frac{M_w}{M_m} \frac{100 - 80}{80 - 50} c_w = \frac{1}{13.6} \times \frac{2}{3} c_w = 0.049 c_w$$

となり、またマーチンの実験からでは

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta t_w} = \frac{\Delta Q / (M_m c_m)}{\Delta Q / (M_w c_w)} = \frac{M_w c_w}{M_m c_m} = 2$$

より

$$c_m = \frac{M_w}{2M_m} c_w = \frac{1}{2 \times 13.6} c_w = 0.038 c_w$$

となる。現在知られている水銀の比熱は、0.0333 kcal/(kg °C) である。

ブラックによる潜熱概念 [4]

融解潜熱の測定 ブラックは、氷が融解して水になるときの潜熱を 2 種類の方法で測定した。一定温度の室内に等しい質量の冷水と氷を放置し、時間の経過による温度変化を観測した (加熱法)。また、適量の水と氷とを混合して前後の温度変化を観測した (混合法)。両実験の結果を Table 4, 5 に示す。

Table 4 加熱法による融解潜熱測定

	水	氷
質量比	1	1
初期温度 (°F)	33	32
最終温度 (°F)	40	40
所要時間 (min.)	30	630

Table 5 混合法による融解潜熱測定

	氷	水	容器
質量比	119	135	
容器の水当量			8
初期温度 (°F)	32	190	190
最終温度 (°F)	53	53	53

加熱法の結果では、32 °F (= 0 °C) の等質量の氷が解け始めて 40 °F の水になるのに、630/30 = 21 倍の熱量を要している。温度 (40-33) × 21=147 °F 分の熱のうち、147-(40-32)=139 °F 分が融解に要したことになるので、融解潜熱は $\Lambda = 139 \text{ °F } c_w (= 77.2 \text{ °C } c_w)$ と推定できる。

一方、混合法の結果では、

$$M_1[\Lambda + c_w(t_3 - t_1)] = M_2c_w(t_2 - t_3)$$

より

$$\Lambda = c_w \left[\frac{M_2}{M_1}(t_2 - t_3) - (t_3 - t_1) \right] = c_w \left[\frac{135 + 8}{119}(190 - 53) - (53 - 32) \right] = 143.6c_w$$

つまり、融解潜熱は 140 °F c_w ($\simeq 78 \text{ °C } c_w$) となる。

現在知られている水の融解潜熱は 80 kcal/kg であり、上の実験結果はかなり近い値である。

蒸発潜熱の測定と熱量保存則 ブラックは 2 種類の実験を行った。

第 1 の実験 (加熱法) では、50 °F の水を一定条件で加熱して 212 °F (= 100 °C) になるのに 4 分を要した。その後、212 °F のまま蒸発し、20 分で水はすべて蒸発した。この時、蒸発潜熱は (212-50) × (20/4) = 810 °F (= 450 °C) 相当の値となっている。

また、第 2 の実験 (冷却法) では、温度 212 °F の 3 質量の蒸気を蛇管式冷却器で凝縮して 103 °F の水にしたとき、38 質量の冷却水が 52 °F から 123 °F に上昇した。このとき、

$$3[\Lambda + c_w(212 - 103)] = 38c_w(123 - 52)$$

が成立し、これより

$$\Lambda = \left[\frac{38}{3}(123 - 52) - (212 - 103) \right] c_w = 790c_w$$

つまり、蒸発潜熱は 790 °F c_w ($\simeq 440 \text{ °C}$) となる。

現在知られている水の蒸発潜熱は 540 kcal/kg であり、上の両実験の結果は少し小さい値となっている*4。

*4 ブラックと親交の深かったワットは、後の 1781 年に水の蒸発潜熱を測定している。その結果によると、水の温度換算で 945.5 °F, 922.5 °F, 935.5 °F, 963.5 °F, 942.5 °F, 960.5 °F, 940.0 °F, 937.0 °F, 平均して 943.37 °F (摂氏に換算して 524 °C) となっている。これはブラックの得た値よりかなり正確である [7]。

1.4 今日の熱と温度

温度の定義と換算 温度は SI の基本単位の一つであり、次のように定められている。

熱力学温度、K (ケルビン, kelvin): 水の三重点の熱力学温度の 273.16 分の 1 を 1 K とする。
熱力学温度とは、カルノーサイクル(または理想気体)で定義される温度である。水の三重点とは氷、水、水蒸気が共存する状態のことをいい、定義により 273.16 K (= 0.01 °C) となる。

カルノーサイクル(後述)を完全に実現するのは困難なので、代用として理想気体による温度を用いる^{*5}。摂氏の温度(セルシウス度) t は熱力学温度 T を用いて、次式で定義されている。

$$\frac{t}{^{\circ}\text{C}} = \frac{T}{\text{K}} - 273.15$$

現在使われているいくつかの温度目盛の関係を Table 6 に示す。

Table 6 温度目盛の換算

	ケルビン度	セ氏度	カ氏度	ランキン度	レオミュール度 列氏度
水の沸点	373.15 K	100 °C	212 °F	671.67 R	80 °Ré
	$\left(\frac{t}{^{\circ}\text{C}}\right) = \frac{5}{9} \left[\left(\frac{t'}{^{\circ}\text{F}}\right) - 32\right]$				
水の氷点	273.15 K	0 °C	32 °F	491.67 R	0 °Ré
	$\left(\frac{T}{\text{K}}\right) = \frac{5}{9} \left(\frac{T'}{\text{R}}\right)$				
絶対零度	0 K	-273.15 °C	-459.67 °F	0 R	-218.52 °Ré

顕熱と比熱、熱容量 固体や液体の物体に熱を加えると、相変化等が生じない場合は温度が上昇し、それを冷やしてもとの温度まで下げると、同じ量の熱を取り出すことができる。このように温度変化を伴うときの熱は顕熱(sensible heat)とよばれる。

この場合、微小な加熱量 dQ と温度変化 dt の間には近似的に比例関係があり、 $dQ = mcdt$ と表される。 m は質量、 c は比熱(または比熱容量)であり、 mc は熱容量^{*6}とよばれる。

加熱により温度が t_1 から t_2 となるとき、比熱が温度に依存して変わる場合は $c = c(t)$ と表して、この間の加熱量 Q は次式である。

$$Q = m \int_{t_1}^{t_2} c(t)dt$$

^{*5} 実用的には、この温度定義に合うように、物質の相転移を用いた温度定点(定義温度)を定めて、その定点間で安定な温度計を利用して、国際温度目盛が定められている。常温を含む温度範囲では、平衡水素の三重点 13.8033 K と銀の標準気圧下の凝固点 1234.93 K との間では、「白金抵抗体の 273.16 K での抵抗値との抵抗比によって計測される」となっている [8]。

^{*6} 古くは水当量とよばれた。

比熱が一定とみなせる場合は、次式となる。

$$Q = mc(t_2 - t_1)$$

相変化と潜熱 固体が液体に変わる (融解、逆は凝固)、液体が気体に変わる (蒸発、逆は凝縮)、または固体の内部で結晶構造等 (電磁気的な特性変化も含む) が変わる現象は、相変化 (相転移) と呼ばれる。相変化が伴う場合は、一定圧力下で加熱・冷却すれば、温度は一定に保たれる。相変化を生じさせるのに必要な熱は 潜熱 (latent heat) (融解の潜熱、蒸発の潜熱、など) とよばれる。

加熱・冷却に際して相変化を伴う場合は、上の式の右辺にその潜熱分を付け加えればよい。Fig. 9 の場合であれば、全加熱量 Q は次式となる。

$$Q = m \int_{t_1}^{t_{LG}} c_L(t) dt + m \Lambda_{LG} + m \int_{t_{LG}}^{t_2} c_G(t) dt$$

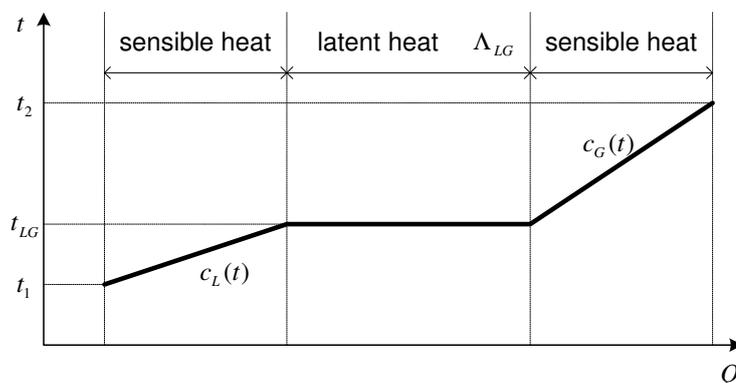


Fig. 9 液体を加熱して気体へ

例えば、水の比熱 $c_L = 4.2 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ 、蒸気の比熱 $c_G = 2.0 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ 、水の蒸発潜熱 $\Lambda_{LG} = 2260 \text{ kJ}/\text{kg}$ であるとき、標準大

気圧のもとで、 50°C の水 1 kg を 130°C の過熱蒸気にするのに必要な加熱量 Q は、次のように求まる。

$$\begin{aligned} Q &= m [c_L(t_{LG} - t_1) + \Lambda_{LG} + c_G(t_2 - t_{LG})] \\ &= 1 \times [4.2 \times (100 - 50) + 2260 + 2.0 \times (130 - 100)] = 2530 \text{ kJ} \end{aligned}$$

熱量の保存 このように、熱は物体の中に「蓄えられ」、後で「取り出す」ことができるので、熱量保存則が成立すると思われる。これは、熱を科学的に扱う第一歩である。しかし、これは加熱と冷却が同じ経路 (例えば圧力一定の同じ経路) をたどる場合に限られることに注意する必要がある。

固体や液体の場合は圧力の影響は小さいので、加熱冷却中に多少の圧力変化があっても、通常はこれを無視することができる。しかし、気体では圧力の影響は比較的大きく、加熱と冷却で途中の圧力が異なれば、熱量保存則は成り立たない。熱量保存則に代わって、熱と仕事を合わせたエネルギー保存則 (熱力学第一法則) が成り立つことになる。

物理量と単位 温度や圧力、体積などの物理量を用いて、対象を定量的に表すことができる。物理量は数値 (対象物理量と基準量の比) と単位 (物理量の基準量) の積で表される。

例えば、熱流束 $10 \text{ kcal}_{\text{IT}}/(\text{cm}^2 \text{ h})$ とは、

$$10 \text{ kcal}_{\text{IT}}/(\text{cm}^2 \text{ h}) = 10 \times \frac{1 \text{ kcal}_{\text{IT}}}{1 \text{ cm}^2 \times 1 \text{ h}} = 10 \times \frac{4.1868 \text{ kJ}}{(0.01 \text{ m})^2 \times 3600 \text{ s}} = 116.3 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \text{ s}}$$

のように換算することができる。

2 気体の法則

2.1 大気圧に関する知識

16 世紀から 17 世紀にかけて、大気の圧力が強大な力を及ぼすことが人々に認識された。

ガリレオと弟子たち 16 世紀の鉱山技師の間では、吸上げポンプでは水は 30 フィート (9.14 m) の高さまでしか上らないということが知られていた。ガリレオは、自然がこのようにある高さまでしか真空を嫌わないのは奇妙であると考えた。そしてもしこの限界が一定であるならば、他の液体は、その密度に依存する限界まで上昇するのではないかと考えた。

1643 年、ガリレオの弟子のトリチェリとヴィヴィアニは、水銀を用いて実験した。一方を閉じた管に水銀を満たし、開いた方を水銀槽につけて管を逆さにした。かれらは管の中の水銀面が水銀槽の面から約 76 cm の高さまで降下することを観察した。そしてこの高さは、管が鉛直であっても傾いていても一定であった。ヴィヴィアニは、管の中の水銀が 76 cm の高さまで上昇するのは、水銀槽の自由な液面に働く大気の圧力のためであるという見解を出した。

フランスのブлез・パスカル (1623-62, 哲学者・科学者) は、トリチェリとヴィヴィアニの装置を持って、ピュイ・ド・ドーム (南部フランスの火山、1464 m) の山に登り、山を高く上るにつれて水銀柱が下がることを見出した。パスカルはこの実験から、大気の圧力は高度が高くなるに連れて減少すると考えた。

マクデブルクの半球 イタリアおよびフランスの研究とは独立に、ドイツのマクデブルクの醸造家でもた技術家のオットー・フォン・ゲーリケ (Otto von Guericke, 1602-1686) は 1635 年から 1645 年の間に、同じような研究をおこなっている。マクデブルク市長 (1646-1676) でもあったゲーリケは、樽の中の水を吸上げポンプで抜き取り、真空を作ろうと試みたが、空気が漏れて樽の中へ入るのが分った。次にかれは直径 51 cm の銅の球から直接空気を抜き取って、今度は真空を作ることに成功した。ゲーリケは、二つの金属の半球を密着させて排気すると、16 頭の馬 (片側 8 頭) でも引き離すことができないことを人々に示した (1654)。1663 年には、ベルリンでも 24 頭の馬を使った同じ実験を披露した。かれは、周囲から働く大気の圧力が、莫大な力をおよぼすことを主張した。

このように、ゲーリケの実験から、もし機械的でない方法によって真空を作ることができたならば、大気圧によって大きな機械的な力が得られそうに思われたのである。

ボイルとフック ゲーリケの研究は、イギリスでロバート・ボイルとロバート・フックとによってくり返され、また拡張された。かれらは空気ポンプでいろいろな実験をおこない、一定量の空気の圧力はその容積に逆比例することを発見した (後述)。

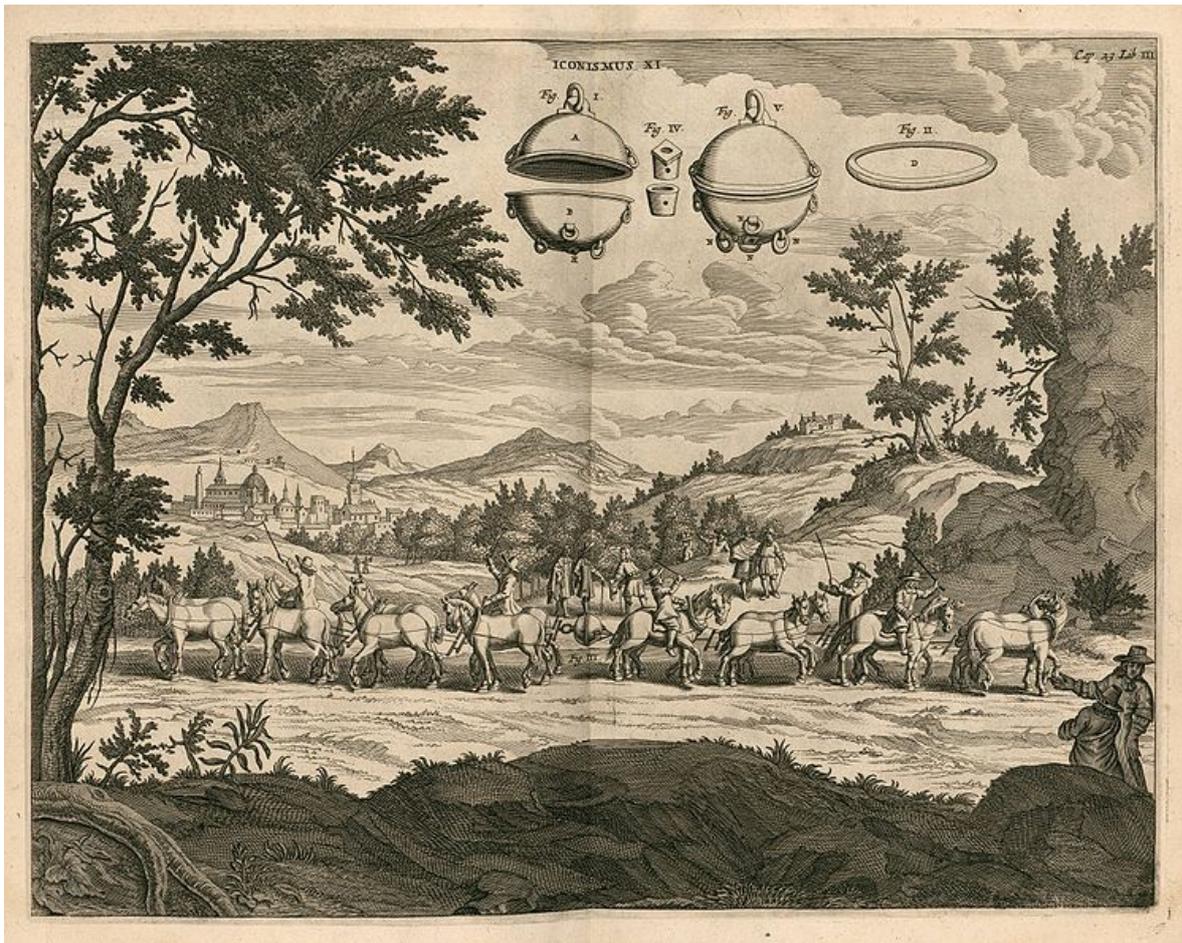


Fig. 10 マクデブルクの半球実験

2.2 ボイル・シャルルの法則



Fig. 11 ロバート・ボイル

ロバート・ボイル (Robert Boyle, 1627-1691) は、アイルランド王国のリスマア (Lismore) に生まれた。父は、初代コーク伯爵 (Earl of Cork) であり、かなり裕福な中で育った。1641 年頃、フランス人家庭教師と共にヨーロッパ大陸やイタリアをおとづれ、ガリレオやその弟子たちの仕事も学んだ。1644 年にイングランドへ帰り、父の遺産を引きついで、科学的研究に生涯をささげるようになった。

王立協会の母体となった科学者集団に加わり、1660 年の王立協会 (世界で最初の学会) の設立と発展に尽力した。

ゲーリケの空気ポンプを知り、フックと共に空気ポンプを作って一連の空気の実験を行った。気体の体積が圧力に反比例するとの結果は 1662 年に発表している。他に、音の伝播、水の凍結、光の屈折、結晶などの研究も行った。

宗教活動にも深く関わり、イギリス東インド会社の重役として、東洋への布教に尽力し、聖書の各種言語への翻訳に資金提供した。



Fig. 12 ロバート・フック

ロバート・フック (Robert Hooke, 1635-1703) は、イングランド南部のワイト島フレッシュウォーターで生まれた。父は王党派の英国国教会の聖職者で、ロバートに自宅で勉強を教えた。幼いころから機械や製図に興味を示した。父の死後ウェストミンスター・スクールに入学し、力学に出会った。

1653 年、フックはオックスフォード大学に職を得た。1655 年ごろから 1662 年までロバート・ボイルの助手として、空気ポンプの製作、操作、実演を担当した。ボイルの実験の多くはフックが行ったとも言われている。

その後、設立された王立協会専属の実験主任、幹事として活躍した。反射望遠鏡の製作と天体観測、化石の研究、初期の進化論、光の波動説、物体の熱膨張、測量法、ロンドン大火後の建築設計など、多彩に活躍した。

重力の逆 2 乗則をめぐって、ニュートンと争ったことでも知られる [9][10]。

ボイルの法則 ボイルの文通相手の一人のリチャード・タウンレイ (Richard Towneley, 17世紀後半) は、密閉された空気の体積と圧力とは互いに反比例することをボイルにほのめかした。ボイルは実験によってこの推測を確かめ、水銀の入った深い容器に管を立てて、同じ関係が一気圧以下の圧力にも適用されることを示した。このようにしてボイルは、今なお彼の名でよばれている法則を発見し、1662年発表の論文に記載した。これは物体の運動現象以外では、はじめての定量的な法則である。彼は、外圧が減ると空気が膨張するのは、気体の粒子は広がろうとする性質 (弾性、ばね力) を持っていると考えていた。

この法則はフランスのエドム・マリオットが1676年にボイルとは独立に (?) 発見したとの説もあり、マリオットの法則、ボイル=マリオットの法則とよばれることもある。

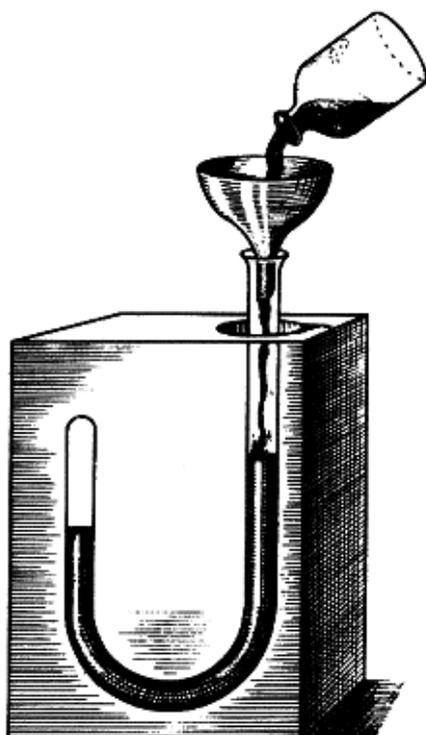


Fig. 13 ボイルの実験装置

A table of the condensation of the air.

A	A	B	C	D	E
48	12	00		29 $\frac{1}{8}$	29 $\frac{1}{8}$
46	11 $\frac{1}{2}$	01 $\frac{1}{8}$		30 $\frac{1}{8}$	33 $\frac{1}{8}$
44	11	02 $\frac{1}{8}$		31 $\frac{1}{8}$	31 $\frac{1}{8}$
42	10 $\frac{1}{2}$	04 $\frac{1}{8}$		33 $\frac{1}{8}$	33 $\frac{1}{8}$
40	10	06 $\frac{1}{8}$		35 $\frac{1}{8}$	35
38	9 $\frac{1}{2}$	07 $\frac{1}{8}$		37	36 $\frac{1}{8}$
36	9	10 $\frac{1}{8}$		39 $\frac{1}{8}$	38 $\frac{1}{8}$
34	8 $\frac{1}{2}$	12 $\frac{1}{8}$		41 $\frac{1}{8}$	41 $\frac{1}{8}$
32	8	15 $\frac{1}{8}$		44 $\frac{1}{8}$	43 $\frac{1}{8}$
30	7 $\frac{1}{2}$	17 $\frac{1}{8}$		47 $\frac{1}{8}$	46 $\frac{1}{8}$
28	7	21 $\frac{1}{8}$		50 $\frac{1}{8}$	50
26	6 $\frac{1}{2}$	25 $\frac{1}{8}$		54 $\frac{1}{8}$	53 $\frac{1}{8}$
24	6	29 $\frac{1}{8}$		58 $\frac{1}{8}$	58 $\frac{1}{8}$
23	5 $\frac{3}{4}$	32 $\frac{1}{8}$		61 $\frac{1}{8}$	60 $\frac{1}{8}$
22	5 $\frac{1}{2}$	34 $\frac{1}{8}$		64 $\frac{1}{8}$	63 $\frac{1}{8}$
21	5 $\frac{1}{4}$	37 $\frac{1}{8}$		67 $\frac{1}{8}$	66 $\frac{1}{8}$
20	5	41 $\frac{1}{8}$		70 $\frac{1}{8}$	70
19	4 $\frac{3}{4}$	45		74 $\frac{1}{8}$	73 $\frac{1}{8}$
18	4 $\frac{1}{2}$	49 $\frac{1}{8}$		77 $\frac{1}{8}$	77 $\frac{1}{8}$
17	4 $\frac{1}{4}$	53 $\frac{1}{8}$		82 $\frac{1}{8}$	82 $\frac{1}{8}$
16	4	58 $\frac{1}{8}$		87 $\frac{1}{8}$	87 $\frac{1}{8}$
15	3 $\frac{3}{4}$	63 $\frac{1}{8}$		93 $\frac{1}{8}$	93 $\frac{1}{8}$
14	3 $\frac{1}{2}$	71 $\frac{1}{8}$		100 $\frac{1}{8}$	99 $\frac{1}{8}$
13	3 $\frac{1}{4}$	78 $\frac{1}{8}$		107 $\frac{1}{8}$	107 $\frac{1}{8}$
12	3	88 $\frac{1}{8}$		117 $\frac{1}{8}$	116 $\frac{1}{8}$

Added to 22 $\frac{1}{8}$ makes

AA. The number of equal spaces in the shorter leg, that contained the same parcel of air diversly extended.

B. The height of the mercurial cylinder in the longer leg, that compressed the air into those dimensions.

C. The height of the mercurial cylinder, that counterbalanced the pressure of the atmosphere.

D. The aggregate of the two last columns B and C, exhibiting the pressure sustained by the included air.

E. What that pressure should be according to the hypothesis, that supposes the pressures and expansions to be in reciprocal proportion.

Fig. 14 実験データ (C 欄の 22 1/8 は 29 1/8 の誤り)

実験方法 ボイルとフックは、Fig.13のように、長いガラス管を曲げて U 字管を作り、その短いほうの端を塞いで密閉した。長い方は 8 ft (2.44 m) で、短い方は 12 in. (30.5 cm) であり、それぞれに、1/4 in. 刻みの目盛を書いた紙帯を貼り付けた。吹き抜けの階段を利用して管を鉛直に保ち、長い開いたほうの端から少しずつ水銀を流し込んで、短いほうの端に最初 12 in. 長さの空気を閉じ込めた。U 字管を破損して水銀を床にばらまく失敗の経験から、U 字管の底部は四角い木箱の中に収めた [11]。

実験結果 彼らの実験結果 (Fig.14) を書き直して Table 7 に示す。この表の E 欄は D が A に反比例するとしたときの予測値であり、E 欄が D 欄にほぼ一致しているため、ボイルは圧力体積に反比例すると結論した。参考までに、体積 A 欄と圧力 D 欄の逆数をグラフに描くと Fig.7 のようになる。

ボイルの時代には、数値は小数でなく分数として扱うのが普通の方法であり、グラフを用いて結果を比較することも一般には行われていなかった [11]。

Table 7 A table of the condensation of the air

A 気柱長さ V/断面積 (in.)	B 水銀柱差 P (in.)	C 大気圧 P0 (in.)	D =B+C P (in.)	E 予測値 P_e (in.)	1/D
12.00	0.0000	29.1250	29.1250	29.1250	0.034335
11.50	1.4375		30.5625	30.3913	0.032720
11.00	2.8125		31.9375	31.7727	0.031311
10.50	4.3750		33.5000	33.2857	0.029851
10.00	4.1875		33.3125	34.9500	0.028319
9.50	7.8750		37.0000	36.7895	0.027027
9.00	10.1250		39.2500	69.9000	0.025478
8.50	12.5000		41.6250	41.1176	0.024024
8.00	15.0625		44.1875	43.6875	0.022631
7.50	17.9375		47.0625	46.6000	0.021248
7.00	21.1875		50.3125	49.9286	0.019876
6.50	25.1875		54.3125	53.7692	0.018412
6.00	29.6875		58.8125	58.2500	0.017003
5.75	32.1875		61.3125	60.7826	0.016310
5.50	34.9375		64.0625	63.5455	0.015610
5.25	37.9375		67.0625	66.5714	0.014911
5.00	41.5625		70.6875	69.9000	0.014147
4.75	45.0000		74.1250	73.5789	0.013491
4.50	48.7500		77.8750	77.6667	0.012841
4.25	53.6875		82.8125	82.2353	0.012075
4.00	58.1250		87.2500	87.3750	0.011461
3.75	63.9375		93.0625	93.2000	0.010745
3.50	71.3125		100.4375	99.8571	0.009956
3.25	78.6875		107.8125	107.5385	0.009275
3.00	88.4375		117.5625	116.5000	0.008506

(1 in. = 25.4 mm)

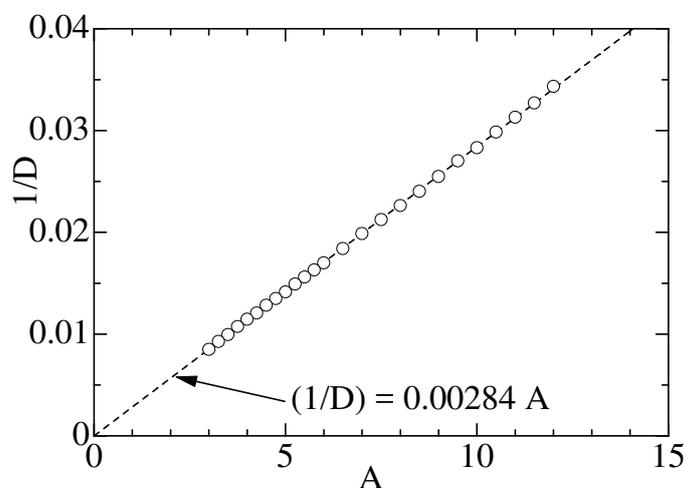


Fig. 15 ボイルの実験結果



Fig. 16 ジャック・シャルル

ジャック・アレクサンドル・セザール・シャルル (Jacques Alexandre Cesar Charles, 1746-1823) はフランスの発明家、物理学者、数学者、気球乗り。1783年8月、ロベール兄弟と共に世界で初めて水素を詰めた(有人)気球での飛行に成功。同年12月には有人気球で高度約1,800フィート(550メートル)まで昇った。シャルルの法則は気体を熱したときの膨張の仕方を示したもので、ジョセフ・ルイ・ゲイ＝リュサックが1802年に定式化した。ゲイ＝リュサックは公表されていないジャック・シャルルの研究を知り、シャルルの法則と名付けた。シャルルは1793年、科学アカデミー会員に選ばれ、その後フランス国立工芸院の物理学教授となった [12]。

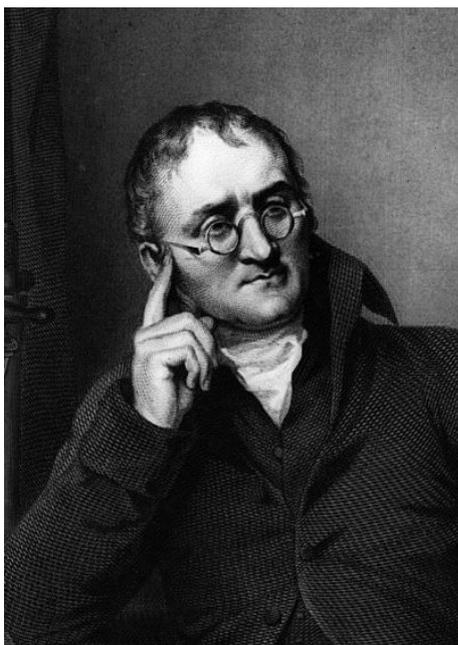


Fig. 17 ジョン・ドルトン

ジョン・ドルトン (John Dalton, 1766-1844) は、イングランド北部のカンバーランド州で、クエーカー教徒の一家に生まれた。地元で初等教育を受けた後、マンチェスターに移り、その後、新たに創設されたマンチェスター・アカデミーの数学と自然哲学の教師をし、また、個人的な家庭教師としても働いた。1800年に、マンチェスター文学哲学会の職員となり、気体の熱膨張に関する法則(シャルルの法則)、混合気体の分圧の法則(ドルトンの法則)を発見し、原子説を強く主張した。ドルトンによると、(1) 元素はそれぞれの質量の異なる原子から作られる。(2) 化合物は異なる原子が一定の比率で結合している。(3) 化学反応は原子と原子の結合の仕方が変わるだけであり、原子が生成・消滅することはない。等々。熱の仕事当量を求めたジェームズ・プレスコット・ジュールは家庭教師ドルトンに師事した。



ジョセフ・ルイ・ゲイ＝リュサック (Joseph Louis Gay-Lussac、1778-1850) はフランスの化学者、物理学者。法律家の父の元で教育を受けたが、革命期の恐怖政治のなかで父が投獄され、1797年にパリへ出て、エコール・ポリテクニク、国立土木学校で学んだ。1802年にエコール・ポリテクニクの化学者アントワーヌ・フールクロアの助手になり、その後化学の教授になった。ソルボンヌ大学物理学教授、パリ植物園化学教授も務めた。シャルルの法則の発見、高度による大気組成の変化、ホウ素の単離、気体反応の法則、ヨウ素の発見、ビュレット、ピペットの開発、硫酸合成法開発、等、近代化学の発展に大きく貢献した。1821年、スウェーデン王立科学アカデミーの外国人会員に選ばれた。1831年、下院のオート＝ヴィエンヌ県代表に選ばれ、1839年には上院議員となった [13]。

Fig. 18 ジョセフ・ルイ・ゲイ＝リュサック

シャルルの法則 フランスのゲイ＝リュサックは、"すべての気体は一定圧力のもとでは、気体の種類および温度によらず一定の熱膨張率をもつ"ということを発見して、1802年にそれを発表した。0℃から100℃の間の体膨張は0.375であった。同様の内容は1年前の1801年にイギリスのジョン・ドルトン(1766-1844)も同様の結果を見出していたし、未公表ながら1787年にシャルルも同様の法則を見出していたことが、後でわかり、ゲイ＝リュサックもそのことを認めた。これは、今日シャルルの法則と呼ばれているが、ゲイ＝リュサックの法則と呼ばれることも多い。

140年前から知られていたボイルの法則とあわせると、0℃で圧力 P_0 のときの気体の体積を V_0 として、

$$PV = P_0V_0(1 + \alpha t) \quad (1)$$

$$\alpha = 0.375/100 = 1/267 \quad (2)$$

となる*7。当時は、気体のこれらの性質は熱素の斥力に起因するものと考えられていた。

式(1)の温度 t は水銀温度計で測ったものである。その点では、上の関係式は気体の膨張量と水銀の膨張量とが比例関係にあることを示しているだけであり、それらの膨張と温度との関係は不明であることになるが、この問題は、19世紀後半まで解決されなかった*8。

*7 現在であれば、 $\alpha = 1/273.15 = 0.0036610 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ となる

*8 後年のデュロンとプティの正確な測定(1817)によると、気体の膨張をもとに温度を目盛る(現在の温度)と、水銀その他の膨張率は温度と共に大きくなり、水銀の膨張に比例して(ガラスの膨張も補正して)温度を目盛ると、鉄と銅の膨張率は温度と共に増えるが、白金と空気の膨張率は温度と共に減少する [14]。



Fig. 19 アメデオ・アボガドロ

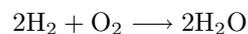
アメデオ・アボガドロ (Amedeo Avogadro, 1776-1856) は、サルデーニャ王国 (現イタリア) トリノの法律家で貴族の家に生まれた。大学では法学と哲学を修め、父と同じく法律家、弁護士となり法律事務所を開いた。

1800 年頃、数学と物理学に関心を示して研究を始め、1809 年にヴェルチェッリ王立大学の物理学教授となった。1811 年にのちのアボガドロの法則となる論文を発表した。1820 年にはトリノ大学で理論物理学の初代教授を務め、途中、政治的理由で 12 年ほど弁護士に戻ったが、1850 年までトリノ大学に留まった。1856 年にトリノで没した [15]。

アボガドロの法則 アボガドロの法則とは、「同一温度、同一圧力のもとでは、全ての気体は同じ体積中に同数の分子を含む」という法則である。

1811 年当時、物質が原子から構成されると主張する原子論は、ほとんどの化学者の共通の認識となっていた。すでにイギリスのジョン・ドルトンが原子量を初めて公開しており、近代的原子論が確立されようとしていた。ドルトンは一種類の元素からなる気体は一個の原子から構成されると考え、当初は分子の存在を認めなかった。この考えでは、水素 2 容積と酸素 1 容積が化合して水蒸気 2 容積となること (ゲイ=リュサックの気体反応の法則) を説明できなかった。

アボガドロは気体は原子ではなく、この場合は二つの原子が結合した分子から構成されると考えた。そして、それぞれの分子は同じ温度・圧力では同じ体積を占めると考えた。こう考えれば、酸素と水素の反応は



となり、ドルトンの原子説とゲイ=リュサックの気体反応の法則がうまくつながり、他の気体反応の多くもうまく説明できる。

幾人かの人々はアボガドロの主張に賛同したが、単一種の原子が結合して分子を形成するという考えは、容易には受け入れられず、長い間「アボガドロの仮説」と呼ばれていた。これが最終的に確かな法則として認められるには、20 世紀はじめのアインシュタインやペナンによるブラウン運動の研究まで待たねばならなかった。

アボガドロの法則によると、式 (1) の P_0V_0 は気体に含まれる分子の数 (またはモル数) に比例する量であり、気体の種類には依存しないことになる。これをモル数 n を用いて $P_0V_0 = nR_0 \times 267$ と置き換えると、

$$PV = nR_0(267 + t) \quad (3)$$

となる。

2.3 今日の気体の法則

物理・化学等で用いられる気体状態方程式 よく知られているように、圧力 P 、温度 $T = 273.15 + t$ 、体積 V の n mol の理想気体の状態方程式は

$$PV = nR_0T \quad (4)$$

で表される。 R_0 は 1 mol あたりのガス定数を表し、一般ガス定数とよばれ、気体の種類によらない定数である。

$$R_0 = 8.31447 \text{ J}/(\text{mol K}) = 8.31447 \text{ kJ}/(\text{kmol K})$$

式 (4) は次の 3 つの法則を合わせたものである。

ボイルの法則: 温度が変わらないとき、気体の体積と圧力とは互いに反比例する。

シャルル (ゲイ=リュサック) の法則: 圧力が変わらないとき、気体の体積は絶対温度に比例する。

アボガドロの法則: 温度と圧力が同じとき、すべての気体は同じ体積内に同数の分子を含む。

1 mol の気体とは、分子量を M とするとき、 M g の気体のことであり*⁹、この中に含まれる分子の数 (アボガドロ数) は

$$N_0 = 6.02214 \times 10^{23}/\text{mol} = 6.02214 \times 10^{26}/\text{kmol}$$

である。分子 1 個あたりのガス定数 (ボルツマン定数) は

$$k = \frac{R_0}{N_0} = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

となり、分子・原子を扱う統計力学では、一般ガス定数 R_0 に代わってこちらが用いられる。

技術分野で用いられる気体状態方程式 技術的応用分野では、気体の量を表すのに mol はなじみが薄く、標準状態 (0 °C、760 mmHg) に換算した体積 (N m^3) や質量 (kg) を多く用いる。 m kg の気体について、式 (3) を書き直すと、 $n = m/(\text{分子量 } M)$ と置き換えると

$$PV = mRT, \quad R = \frac{R_0}{M} \quad (5)$$

と表すことができる。ここで、 R は 1 kg あたりのガス定数 (単位は $\text{J}/(\text{kg K})$ 等) であり、一般ガス定数 (単位 $\text{J}/(\text{kmol K})$) を分子量 (形式的に 単位 kg/kmol) で割った値である。技術分野で気体定数 (ガス定数) という場合にはこちらを意味することが多い。実際にこの種の用語に出会ったら単位を見るなどして、どちらを意味しているのかを判断しなければならない。

気体の比熱 気体の比熱は、加熱の条件により値が大きく異なるので、体積を一定としたときの比熱 (定積比熱) c_v と圧力を一定としたときの比熱 (定圧比熱) c_p とを区別しなければならない。その他の条件で加熱したときの比熱は、この二つを組み合わせて表すことができる。理想気体であれば両比熱は温度だけに依存する (つまり、体積や圧力が変わっても比熱は変わらない。ジュールの法則)。

両者の間には次の関係がある。

$$c_p - c_v = R \quad (\text{マイヤーの関係式}) \quad (6)$$

*⁹ 技術分野では質量の単位に g でなく kg を多く用いるので、 M kg の物質が 1 kmol に対応すると覚えるほうが考えやすい。

また、 c_p/c_v の値は、気体分子の構造に応じて概ね一定の値 (単原子分子 5/3、2 原子分子 7/5、3 原子分子 8/6 等々) であり、この値は比熱比とよばれる。

$$\frac{c_p}{c_v} = \kappa \quad (7)$$

したがって、気体の定積比熱と定圧比熱は、ガス定数と比熱比を用いて次式で求めることができる。

$$c_v = \frac{R}{\kappa - 1} \quad c_p = \frac{\kappa R}{\kappa - 1} \quad (8)$$

いくつかの気体の分子量、ガス定数、比熱比等を Table 8 に示す。

Table 8 おもな気体のガス定数、比熱等 (比熱は 0 °C における値)

気体の種類	分子記号	分子量 M kg/kmol	ガス定数 R J/(kg K)	定圧比熱 c_p J/(kg K)	定積比熱 c_v J/(kg K)	比熱比 κ
ヘリウム	He	4.0026	2077.2	5238.	3160.	1.66
アルゴン	Ar	39.948	208.1	520.	310.	1.66
水素	H ₂	2.01565	4124.9	14200.	10075.4	1.409
窒素	N ₂	28.0134	296.9	1038.9	742.1	1.400
酸素	O ₂	31.98983	259.8	915.0	655.1	1.397
空気	—	28.95	287.2	1005.	717.1	1.400
一酸化炭素	CO	27.99492	297.0	1040.3	743.3	1.400
水蒸気	H ₂ O	18.010565	461.63	1861.	1398.	1.33
二酸化炭素	CO ₂	43.98983	189.0	816.9	627.9	1.301
アンモニア	NH ₃	17.02655	488.3	2055.7	1567.4	1.312
メタン	CH ₄	16.0313	518.7	2156.2	1637.6	1.317
エタン	C ₂ H ₆	30.04695	276.5	1729.	1452.4	1.20
プロパン	C ₃ H ₈	44.06	188.7	1551.	1362.	1.139
エチレン	C ₂ H ₄	28.0313	296.6	1612.	1315.3	1.225

物質の状態と状態量 すべての物質は分子・原子からできているが、熱力学では個々の分子や原子の挙動を問題にせず、圧力、体積や温度などの巨視的な量を用いて対象 (系) を扱う。気体の個々の分子は自由に飛び回っており、衝突を繰り返すたびにその速度も変化しているが、巨視的に見ると、圧力、温度や体積などが変わらない限り系は同じ状態であると考えることができる。このような巨視的な状態を熱力学的状態 (単に状態と略称) とよび、その圧力、体積や温度などを熱力学的状態量 (単に状態量) とよぶ。

示強性状態量と示量性状態量 同じ状態量とよんでも、2 種類の状態量があることに気付く。

圧力 P や温度 T などのように同じ物体を複数考えても値の変わらないものを、示強性状態量という。それに対して、体積 V や後述の内部エネルギー U のように、同じ物体を二つ考えると値が 2 倍になるものを示量性状態量という。

示量性状態量について、単位質量あたりの値を比体積、比内部エネルギー等と称し、対応する小文字で表記する (v, u)。示強性状態量については、大文字、小文字に特に意味はない。

一般の状態方程式 理想気体では、圧力 P 、温度 T および体積 V の三つの状態量の間、ボイル・シャルルの式 (5) が成立する。理想気体から外れると、式は簡単ではないかもしれないが、 P, V, T の間にある関係式が成り立つ。

気体だけではなく、液体や固体を含めた広い範囲について、純粋な物質 (または化学反応が生じない組成が一定の物質) では、圧力 P 、体積 V および温度 T の間にある関係式が成立することがわかっている。

$$f(P, V, T) = 0 \quad (9)$$

このような三つの状態量の間、関係式を状態方程式 (または単に 状態式) という^{*10}。

ボイル・シャルルの法則を表す式 (5) は状態方程式の最も簡単な例であり、式 (5) が成り立つ気体を理想気体 (完全ガス) という。実際の気体は、多少なりとも理想気体からずれているが、圧力が低くなって十分希薄になれば、すべての気体は理想気体に近づく。理想気体の式からずれた状態の気体を区別して実在気体という。実在気体に対する状態方程式も種々あるので、必要になれば調べるとよい。

状態変化と線図 系の状態が変化することを状態変化という。組成一定の物質の状態は二つの状態量で指定することができるので、 $P - V$ 線図等の平面上の点で表すことができる。状態変化が十分にゆっくり行われる場合^{*11}は、変化の途中の状態も平面上の点で表されるので、このような状態変化は平面上の曲線で表すことができる。

ピストン・シリンダ内に、ある量の気体を入れて膨張させる例を、Fig. 20 に示す。ピストンは背後から何かで適当に支えているものとし、ピストンの位置は横軸の体積 V に対応していると考えればよい。その時の圧力 P を縦軸にとれば、線図上の各点が決まる。

状態 1 から出発し、加熱・冷却しながらピストンを右へ動かし、状態 2 まで変化したとする。途中の加熱量を大きくすれば、温度が上がって圧力も高くなるが、逆に冷却すれば圧力は低くなる。適当に加熱・冷却量を調整すれば、任意の曲線に沿って膨張させることができるであろう。

もしピストンを速く動かし過ぎて、中の気体が大きく乱れ、場所により圧力や温度が異なるような状態 (非平衡状態) になれば、線図上に点を取ることはできなくなるので、その間の状態変化 (準静的でない変化、非可逆変化) も線図上で表すことはできなくなる。

座標軸としては、 P, V の代わりに温度 T やその他の二つの状態量の組み合わせを選ぶこともできる。

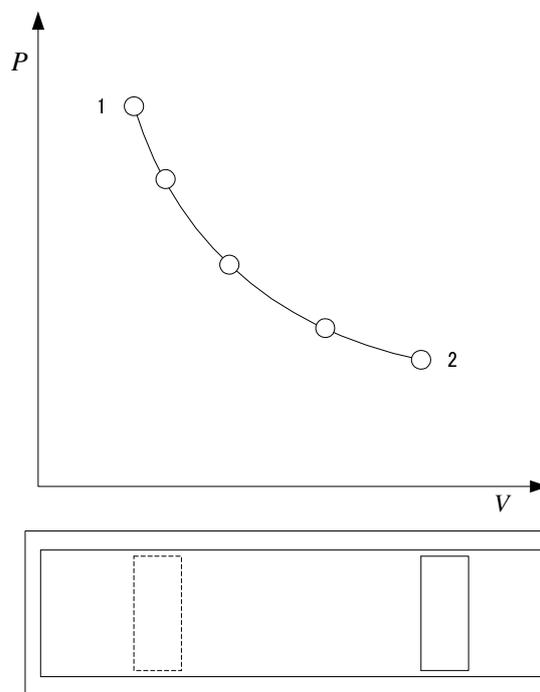


Fig. 20 $P - V$ 線図上での状態変化

*10 後で多くの状態量が現れるが、組み合わせる 3 つの状態量に何を選んでもよい。

*11 正確には、後述の準静的変化つまり可逆変化の場合

3 初期の熱機関の歴史

3.1 産業革命前の社会と技術

中世末期の 16, 17 世紀ヨーロッパにおいて、採鉱と冶金分野が急速に進歩拡大した。木から石炭への燃料転換により、石炭採掘の坑道が深くなり、鉱山の排水問題が深刻となっていた。当時のイギリスの炭鉱の深さは、1700 年で 400ft(120m)、1750 年で 600ft(180m) と急速に深くなっていた。鉱山の排水問題の解決のために馬や強力な水車が使われた。

鎖バケツのような水汲み装置、吸上げポンプ・押上げポンプなどは、古代から知られていた。何段ものポンプを動かせるには、大きな動力が必要であった。16,17 世紀には、鉱山の排水には水車の使えないところでは、主に馬が用いられた。科学史家のメイスン [16] によると、1556 年のドイツの金属鉱山で使われたポンプでは、93 頭の馬を必要とした。17 世紀の終りごろのイギリスの鉱山では、ポンプを動かすのに 500 頭の馬が使われていた。

この当時、応用力学や産業技術に関する最初の体系的な著作がいくつか公刊された。その代表的なものに、採鉱と冶金のあらゆる技術を扱ったゲオルク・アグリコラ (Georg Agricola, 1494-1555, ドイツ; 本名ゲオルク・パウエル Georg Bauer) の大著「デ・レ・メタリカ」(1556) には、当時の鉱山に関する最先端の技術(採鉱, 採鉱, 製錬, 精錬 等) が克明にスケッチされている (Fig. 21)[17]。

(a) 馬力による巻上機 (原図 095) 地上では何頭かの馬を操って歯車軸を回している。歯車軸は地下室の巻上機を回し、地中深くの採掘場から鉱石を地上近くまで運び上げる。巻上機のブレーキは地中の採掘場の操作員が操作している [18]。

(b) 強力な水車巻上機 (原図 116) 巨大な水車 (直径 36 ft(11 m)) で地中から水を汲み上げている。水車の上に二組の注水口があり、注水を切り替えることによって、水車の回転方向を変える。小屋の中の人々がどちらか一方のレバーを引くことにより、水車の回転を操作している。この図では水を汲み上げているが、鉱石の運び出しにも用いることができる。

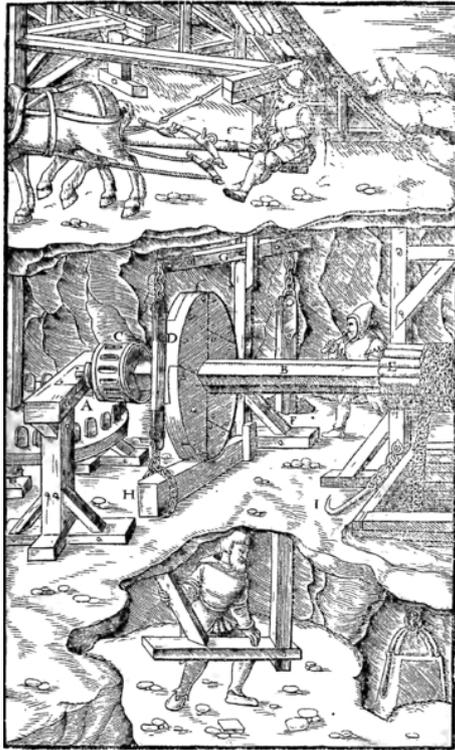
(c) 踏み車で動く鎖ポンプ (原図 115) 排水を汲み上げるのに鎖ポンプが多く用いられた。鎖についている玉 G は馬の毛でできており、鉛直の管の中をちょうど塞ぐ程度の大きさに作られる。鉛直の管の下部は地底の水溜りに達しており、鎖が上にあがるにつれて玉が水を地上に運ぶ。吸上げポンプだと 30 ft (9.14 m) 以上の深さでは吸い込めないし、押上げポンプだと、管の下部の圧力が高くなり過ぎる。鎖ポンプでは、水圧のほとんどは鎖が受け持つので、管が壊れる心配がない。

この図では、歯車と踏み車を介してポンプを動かしているのは何人かの人力である。

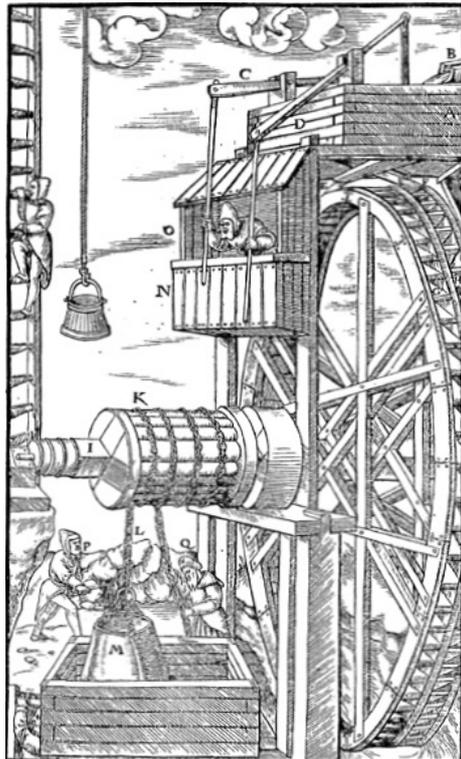
(d) 水車で動く多段吸上げポンプ (原図 108) 3 つの吸い上げポンプをつないで、20 数メートル深さから水を汲み上げる装置を示している。ポンプはクランクを介して 1 台の水車で動かしている。アグリコラは 1545 年頃の発明としている。

これだと、3 つのポンプを同時に引き上げることになり、かなりの力を要する。120 度の位相差をつけたクランクを用いて、ポンプを順番に動かせば、よりうまくいったと想像されるが、そのような例は描かれていない。

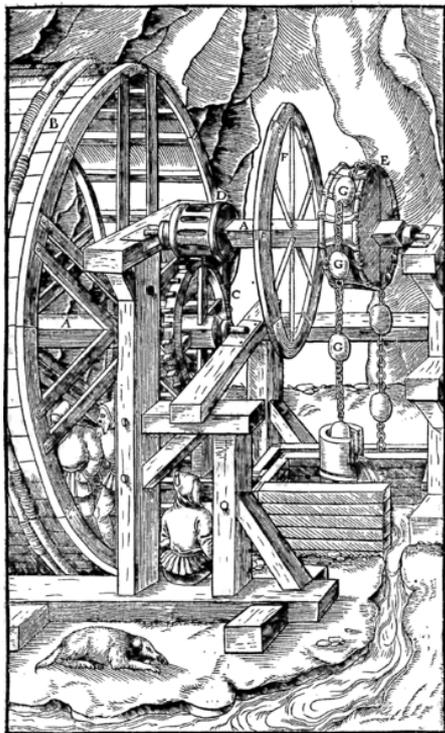
デ・レ・メタリカには、他にも多くの挿絵が載っているので、資料 [17] を見ると面白い。



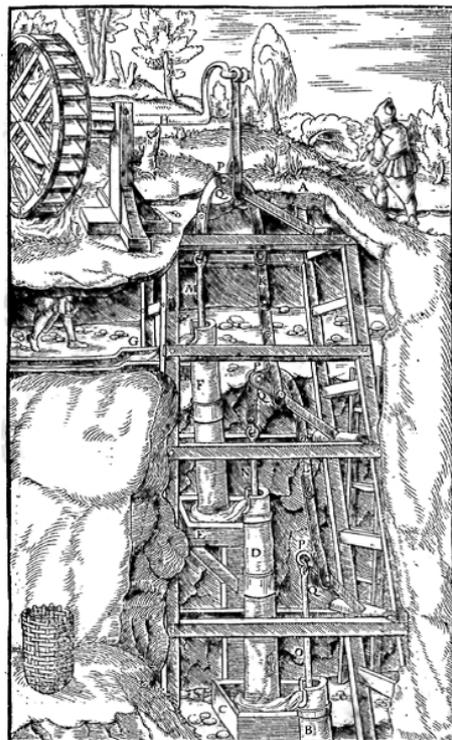
(a) 馬力による巻上機



(b) 強力な水車巻上機



(c) 踏み車で動く鎖ポンプ



(d) 水車で動く多段吸上げポンプ

Fig. 21 デ・レ・メタリカの鉱山スケッチ図例

3.2 パパン



Fig. 22 ドニ・パパン

ドニ・パパン (Denis Papin, 1647-1712) はフランスのユグノー教徒 (プロテスタント) の一家に生まれた [19][20]。地元のユグノー・アカデミーに通い、アンジェの大学で医学を学んだ。パリで、ホイヘンスの助手になり、ライプニッツと共に研究をし、動力源としての真空に興味を持つようになった。

1675年にロンドンに渡り、王立協会でボイルとフックの助手を務め、ボイルが病気になってからボイルのほとんどの実験と執筆をおこなった。この間、水の沸点が圧力に依存することを発見し、圧力調理器と安全弁を発明した。宗教的迫害のためにフランスへ帰れず、イギリスと大陸の間を何度か行き来し、その間、潜水鐘 (diving bell)、ピストン式蒸気機関等の考案・発明を行った。ロンドンで死去したとされている。

パパンの蒸気機関

パパンはシリンダを用いた最初の蒸気機関を考案した。かれは真空を作り、大気圧を利用しようとした。実用にはならなかったが、ピストンを用いていた点に特長があった。

1690年にパパンが考案した最初の蒸気機関を Fig. 23 に示す [19]。

その原理は、

- (1) シリンダ A の中に水を入れて上からピストン B で閉じておく。
- (2) シリンダの下に火をあてがってシリンダを直接火で加熱して、発生した蒸気でピストン B を持ち上げる。
- (3) ピストンが上がると、ピストン棒 D に横木 E を差し込み、ピストンを止める。
- (4) ピストン棒にはロープで積荷を取り付け、火を取り去り、横木を取り外してシリンダに水をかけて蒸気を凝縮させる。
- (5) ピストンが大気圧により下降して、積荷を持ち上げる。

というものであった。

シリンダがボイラと凝縮器を兼ねており、火をシリンダの下へ出し入れしたり、シリンダに外部から水をかける等、原始的である反面、ピストンを用いた点が注目に値する。

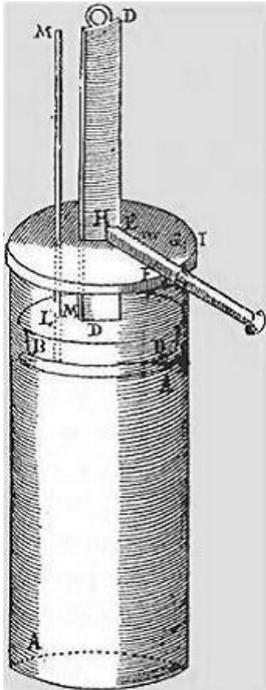


Fig. 23 パバンの蒸気機関

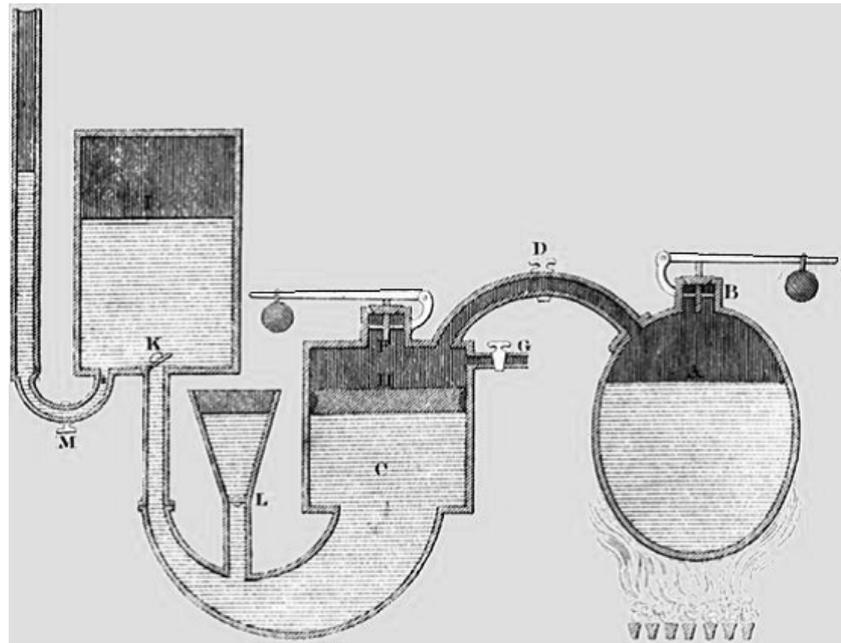


Fig. 24 パバンの 2 番目の蒸気機関

1707年にパバンが考案した2番目の蒸気機関をFig.24に示す[19]。ボイラー a の蒸気をシリンダ n へ導き、遊動ピストン h を下方へ押し水を出す。遊動ピストンは蒸気が水と接触して急速に凝縮するのを防ぐ。シリンダ内の蒸気を大気に放出すると、新しい水がロート k から供給されて、ピストンを押し上げて元に戻り、この動作を繰り返す。

パバンはセイヴァリの案に引きずられて、ピストンから動力を取り出すことを放棄し、蒸気の凝縮により真空を作り出すという利点も失っている。

3.3 セイヴァリ



Fig. 25 トーマス・セイヴァリ

トーマス・セイヴァリ (Thomas Savery, 1650 年頃-1715 年) はイギリスの発明家であり、商業的に使用された最初の蒸気機関を製作し、その特許を取得した [21][22]。

イギリス デボン州で生まれ、陸軍の技師、大尉になった。種々の機械の実験を繰り返し、ガラスや大理石を磨く機械、錨巻上機で回す外輪船などの特許を取った。

1698 年に、"火の機関 (Fire Engine)" と称する蒸気機関 (揚水ポンプ) の模型を完成し、それを国王の前で実演し、特許も認められた。翌年には、それを王立協会でも実演して好評を得て、1702 年にその解説書『鉱夫の友; または火で揚水する機械』を出版した。

セイヴァリの特許は「火力によって揚水する装置」という極めて広いものであったため、これ以降のイギリスの蒸気機関開発に大きな影響を与えた。その有効期限は当初 14 年であったが、取得翌年の 1699 年に 21 年の延長が認められ、1733 年まで有効となった。

セイヴァリの蒸気機関 セイヴァリの蒸気機関の原理を Fig.25 の右側の図に示す。

- (1) 容器 2(または 3) を水で満たし、ボイラ 4 と容器をつなぐ蒸気弁を開く。
- (2) 蒸気が容器から水を追い出し、上部弁 9 が水圧で開いて水槽 1 へ押し上げる。
- (3) 容器が空になると蒸気弁を閉めて、蛇口 6 から容器に水をかけて冷やすと、容器の蒸気が凝縮して圧力が下がり、水が入ってくる。水圧で下部弁が開いて、下のタンク 5 から水を吸い上げる。
- (4) 容器 2 内が水で満たされると、冷却をやめる。

以上を繰り返して、下のタンクから上のタンクへ水をくみ揚げる。揚水を円滑にするために、容器等は 2 セットを対にして、交互に吸揚水するように運転する。

セイヴァリの蒸気機関は、作業部分である容器からボイラが分離していることが特徴であるが、ピストンとシリンダが無い。

セイヴァリの蒸気機関には重大な問題がいくつか存在していた。

- (1) 蒸気で容器の水を排出して揚水するときに高圧の蒸気が必要とするが、ろう接した管継ぎ手が高圧蒸気に耐えられず、頻繁に補修が必要であり、また、ボイラ爆発の危険と隣り合わせであった。
- (2) ポンプは、くみ上げる水位面より約 30 フィート (9.1m) 以上に高い位置に設置することはできない。セイヴァリの蒸気機関はポンプと一体であるため、この機関全体を坑道の深い位置に設置して運転する必要があり、設置、運転に困難があった。さらに、故障時には水没して自力では回復できなかった。

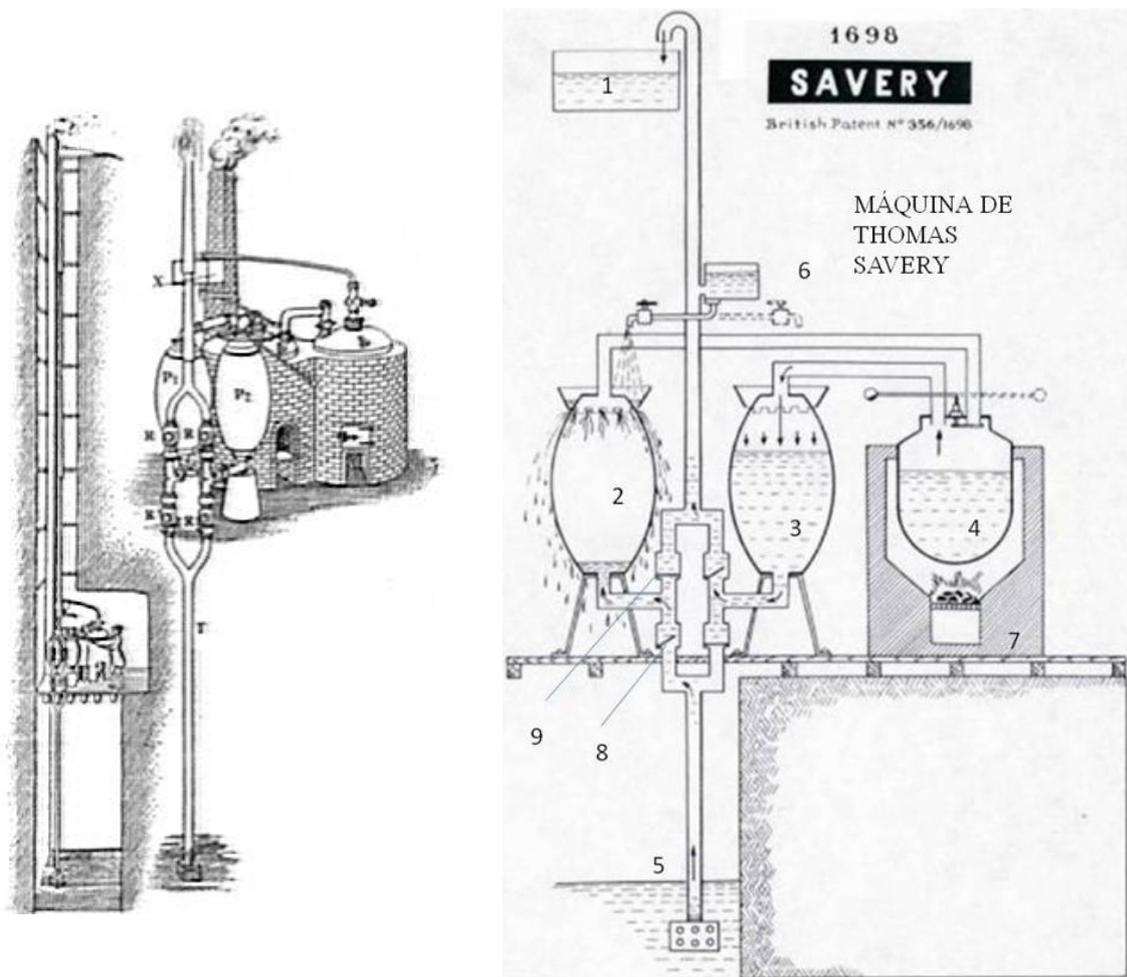


Fig. 26 セイヴァリのポンプ

- (3) 高圧にさえすればポンプから地表までの揚水高さには理論上の制限はないが、実際の安全性の面からは、中低圧のポンプを直列につなぐ方が好ましかった。
- (4) 水が容器内に入れられるたびに、熱の大半は揚水する水を加熱して失われる。

セイヴァリの機関は建物の給水や宮殿の噴水用に用いられた記録があるが、鉱山で事故なく動いた記録はない。

3.4 ニューコメン

ニューコメンの生涯 [23][24] トマス・ニューコメン (Thomas Newcomen ,1664-1729) はイギリスの発明家、企業家である (信頼できる肖像画なし)。最初の実用的な蒸気機関を製作して、鉱山の排水のための蒸気機関を商業的に世界で初めて実現した。またキリスト友会徒 (クエーカー教徒) であり、敬虔な信者であった。

ニューコメンはイギリス デボン州 (Devon) ダートマスの商人の家族として生まれ、聖救世主 (St.Saviour) 教会で洗礼を受けた。金属製品を扱う商人となり、またバプティスト信徒伝道者でもあった。

当時は、石炭や錫の鉱山の出水をいかにして排出するかが大きな問題であり、ニューコメンは間もなく、この鉱山の排水方法の改善に従事するようになった。鉱山産業のための道具を専ら設計・製造・販売することが、かれの金属商人としての仕事となった。

ニューコメンは、1710 年ごろに蒸気機関を開発した。セイヴァリの案のようにボイラをシリンダから分離し、パパンのアイデアのピストンつきシリンダを採用し、ピストンとビームを介して、ポンプを駆動するようにした。

ニューコメンの蒸気機関 最初のニューコメン機関は 1712 年に、Stafford 州 Dudley Castle の鉱山で運転され始めた (それ以前のものもあるようである)。シリンダの直径 21 インチ (533mm)、長さ 8 フィート (2.44m)、毎分 12 行程で、1 行程あたり 10 ガロン (45.5 リットル) の水を 150 フィート (45.7m) 深さの深い坑道からくみ上げた。5 馬力相当であった [25]。

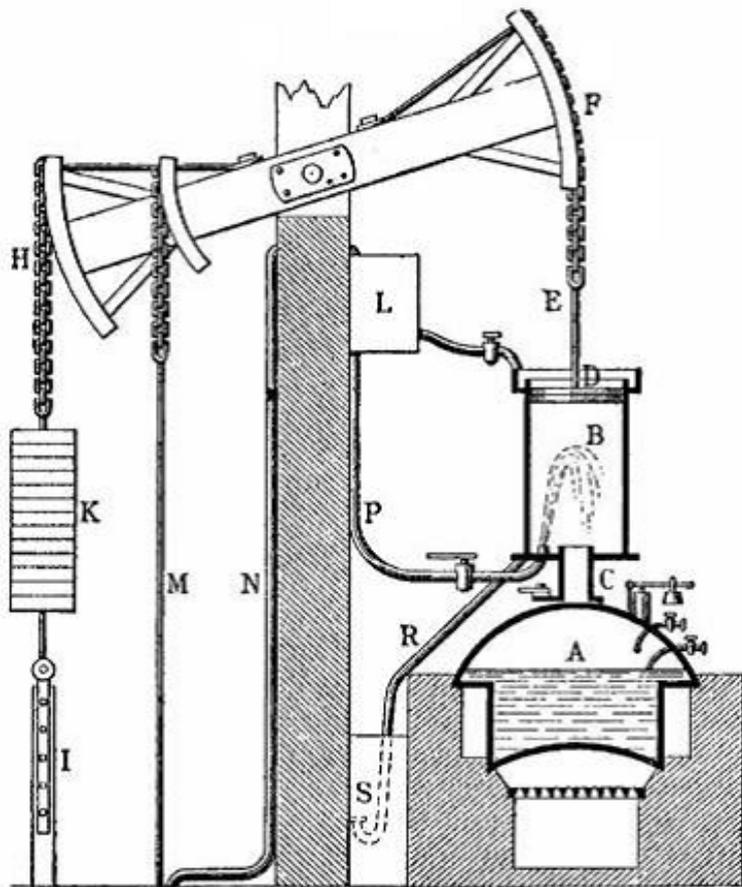
ニューコメンは実用的な蒸気機関を作ったが、セイヴァリの「火力によって揚水する装置」という特許が 1733 年まで有効とされていたので、ニューコメンはセイヴァリの特許のもとで、熱機関を建造販売せざるをえなかった。ニューコメン機関は、およそ 3/4 世紀の間、鉱山の排水設備として使われた。

鉱山の排水に用いられたニューコメン機関の構造を Fig.27 に示す。機関はボイラ A、シリンダ B、ピストン D から成り、ピストン D はピストン棒 E と鎖により木製のビーム (梁) F につながっている。ビームの他方の端 H は鎖を介して排水ポンプの棒 I につながっている (排水ポンプはピストン式で、当時はポンプピストンが上昇する行程で下方から水を吸引し、同時に上方へ揚水する構造のものが使われていた)。ポンプ側には必要に応じて重り K を付加して、ポンプ側を重くしている。

ニューコメン機関の動作は次のようになる。

(アニメーション: Newcomen_atmospheric_engine_animation.gif)

- (1) 蒸気弁 C を開くと、ボイラ A の蒸気がシリンダ B へ入り、ピストン D はポンプ棒 I、錘 K に引かれて持ち上がる。
- (2) ピストンが上端近くへ上がると弁 C を閉じて、冷却水弁 P を開いて、冷水タンク L の冷却水をシリンダ内に所用量だけ噴射する。
- (3) シリンダ内の蒸気が凝縮するとシリンダ内は真空 (負圧) となり、ピストン背面の大気圧でピストンが下がり、負荷のかかった排水ポンプ棒 I が持ち上がる。
- (4) ピストンが下端近くまで来ると蒸気弁 C を開いて蒸気を入れ、シリンダ内を大気圧に戻す。
- (5) シリンダ内が大気圧になると、排水ポンプや重りが自重で下へ下がり、シリンダにボイラの蒸気が入ってきてピストンが持ち上がる。同時に、シリンダ内の凝縮水は排水管 R と逆止弁 S を通って排水される。
- (6) 以上の操作と動作を繰り返す。毎分 12 サイクル (5 秒周期) 程度の速度であった。



- A: ボイラ
- B: シリンダ
- C: 蒸気弁
- D: ピストン
- E: ピストン棒
- F: ピストン棒の鎖
- H: 排水ポンプの鎖
- I: 排水ポンプ棒
- K: バランス重り
- L: 冷水タンク
- M: 補助ポンプ棒
- N: 冷水配管
(床下貯水槽より)
- P: 冷水弁
- R: 排水管
- S: 逆止弁

Fig. 27 ニューコメンの蒸気機関

ニューコメン機関には種々の技術的工夫がされた。その主なものを下記に示す [26][27][28]。

シリンダとピストンの使用 パパンの考えた機関はボイラとシリンダが一体であり、シリンダを直接加熱するため、動作を反復することが困難である。セイヴァリの機関はシリンダとピストンがなく、蒸気が揚水に接触して出し入れしていた。ニューコメン機関はピストンとシリンダを持ち、分離したボイラからの蒸気(と大気の圧力)でピストンを駆動した。当時のポンプなどで使われていたシリンダの直径はせいぜい 18 センチ程度であり、直径 50 センチを越えるシリンダの製作は至難の業であった。ニューコメンらは、砂やグリスを使って内面を研磨した真ちゅう鑄物のシリンダを用い、ピストンとの隙間を埋めるために、ピストンの周囲に皮ひもや麻繊維を巻き、さらに、ピストンの上に水を張ることにより空気の進入を防いだ。

水噴射による凝縮 当初の試作段階でニューコメンらは、シリンダの側面を取り巻くように鉛製のジャケットを巡らし、そこに冷水を流してシリンダ中の蒸気を冷却していた。その場合は蒸気の凝縮速度は遅く、機関の動作は極めてゆっくりしたものにならざるを得なかった。実験中のある時、突然ピストンが急に下方へ引かれて鎖を引きちぎり、シリンダの底とボイラの蓋を破壊してしまった。その事故の原因を調べてみると、シリンダ壁の鑄物欠陥を補修して埋めていたハンダ(またはフラックス)が溶け、その穴から冷水がシリンダ内へ噴き出して蒸気が急速に凝縮し、ピストンが下方へ急に動かされたことが分

かった。この発見にヒントを得て、冷水を直接蒸気中へ噴射して凝縮する方法を思いついた。

スニフティング弁 (漏らし弁) 蒸気が凝縮した凝縮水だけを除去してサイクルを繰り返していると、蒸気や冷水と共に持ち込まれる 空気がシリンダ内にたまって濃縮 され、やがて機関は動かなくなる。ニューコメンらは試行錯誤するうちにこのことに気づいて、対策を考えていた。シリンダへ蒸気を入れる行程で凝縮水を排水管から排出するが、その行程の後半で数秒間だけ空気を含んだ蒸気をシリンダから外へ噴き出せば、空気の濃縮を防ぐことができる。このために弁 (逆止弁) は、動作時に鼻を鳴らすような音がするので、"スニフティング弁 (漏らし弁)" と呼ばれた (排水管と兼用の場合もあった)。

自動運転機構 この機関の動作のためには、シリンダ内でピストンが上端に来たとき蒸気弁を閉じて、冷水弁を開き、下端に来たときに逆の操作をして、冷水の噴射や蒸気の注入を正確に行うことが不可欠である。試験段階ではこれを手動で行っていたが、1712 年の最初の機関では、ビームの動きに応じて弁操作を自動的に行うようになっていた。ニューコメンらはピストンと共に上下に揺動する頭上のビームに棒 (プラグ・ロッド) をぶら下げ、プラグ・ロッドに取り付けた留め釘とリンクとを組み合わせさせて弁を開閉した。特に冷水噴射弁は、重りの落下を用いて急速に開き、プラグ・ロッドで重りを持ち上げながらゆっくり閉じるように工夫されていた。また、当時のボイラの蒸発量が不足気味であったため、蒸気量 (ボイラ圧力) が不足する際は冷水弁を閉じたまま機関を待機状態とする工夫もあった。

ボイラ ボイラは当時使われていた 醸造用の銅製ボイラ であり、給水のための配管、水面位置検出用の管、パバンの発明による安全弁などが追加された。必要な多量の蒸気をまかなうために、ニューコメンはボイラの背丈を高くして保有水量を増やした。当時は、ボイラの水量に比例して沸騰水から蒸気が立ち上がるとの誤った理解がなされていたようで、ニューコメンも例外ではなかった。伝熱面増加を含めたボイラの改良は、その後の発明家まで待たねばならなかった。

廃熱の回収 ピストンが上端にくるたびに、ピストン背面上の温水がオーバーフローして配管から流下する。また、シリンダから排水された凝縮水も温度が高い。これらを集めて、ボイラへの給水の一部として利用していた。

冷却水の補給 ビームの別の位置に補助ポンプ棒 M を取り付け、補助ポンプで貯水槽 L に水を補給していた。

パバンの機関はボイラとシリンダが一体であり、シリンダを直接加熱するため、動作を反復することが困難であった。セイヴァリの機関はシリンダとピストンがなく、実質的に熱機関としては動作しなかった。

ニューコメン機関はピストンとシリンダを持ち、分離したボイラからそこへ蒸気を供給することにより、反復動作を可能とした点に大きな特徴がある。

ニューコメン機関の普及 実際の鉱山での用途では、ニューコメンの機関は、セイヴァリの機関より次の点ではるかに優れていた [16]。

- 坑道の底でなく地上に置くことができたから、停止しても水びたしになることがなかった。
- ポンプを動かす力は大気圧から取り出していたので、低圧の蒸気があればよく、ボイラが爆発する危険がなかった。

ニューコメン機関はたちまち広まり、1712 年からイギリス中の炭鉱および鉱山にすえつけられた。1720 年以降は輸出されるようになった [24]。ワット機関が現れる 1775 年までにおよそ 600 台のニューコメン機関が建造された。

ニューコメン機関は効率のよい機関ではなかったが、炭鉱では商品にならない粉炭が利用できたので、このことはさほど重要ではなかった。しかし、炭鉱以外では、1775 年以後ワット機関に徐々に置き換えられて

いった。

ワットはその後、複動機関の開発等の多くの改良を行い、織物工場の動力源に多くのワット機関が使用された。はずみ車の使用と技術的改良により、単動のニューコメン機関も多く使われた。ワットの特許が切れる1800年までに、非ワット方式の回転機関は数100台建造され、特に不規則な運動が問題にならなかった炭鉱や鉄鋼所で、さらには織物工場でも使用された。

ニューコメン機関はワット機関より安価で、さほど複雑ではなかったので、長い期間使用され続けた。1800年までのワットの特許期間内でさえ、ワット機関より多くのニューコメン機関が建造された。18世紀間において建造された2200台の蒸気機関のうち、ワット機関は約450台だけであった。ワットの特許が切れた1800年以降も、ニューコメン機関は建造され続け、これらの機関には特許が切れた分離凝縮器が追加されるのが一般的であった。最後のニューコメン機関は1934年まで使われた。実に200年以上にわたって使用され続けたことになる。

1920年にロンドンに設立された科学史の学会は、ニューコメンの名にちなんで、ニューコメン協会(Newcomen Society)という名称になっている。ニューコメン協会は1922年より機関誌 Transactions of the Newcomen Society を発行し、その後アメリカなどにも支部(合衆国ニューコメン協会)が設立された [24]。

3.5 ワット

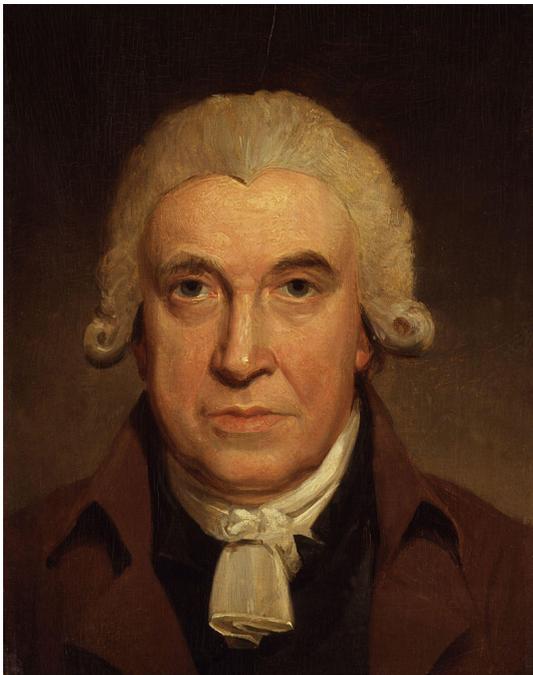


Fig. 28 ジェームズ・ワット



Fig. 29 マシュー・ボルトン

ワットの生涯 ジェームズ・ワット (James Watt, 1736-1819) は、スコットランド中部 (グラスゴーの西方) のレンフルーシャー州のグリーンロックで船大工、海運業者の一家に生まれた [29][30]。ワットは当初あまり学校に通わず母親からホームスクーリングを受けていたが、その後、グリーンロックのグラマー・スクールへ入った。彼は器用さ、技術的スキル、数学的素質を發揮した一方、ラテン語やギリシア語には関心を示さなかった。

母が亡くなり父も健康を害した 18 歳の時、ワットはロンドンで 1 年間、計測機器の製造技術を学び、スコットランドのグラスゴーへ戻った。1757 年、グラスゴー大学に天文学機器が導入された際、ワットが専門家として調整をおこない、これが評価されて大学内に小さな工房を設けることとなった。この折、大学にいた物理学者で化学者のジョゼフ・ブラック (1728-99) や経済学者のアダム・スミスの支援があった。

(蒸気機関の実験) 1761 年頃、ワットは友人ジョン・ロビソン教授を通じて蒸気機関を知り、興味を持って設計を試み、実験を行った。1763 年にグラスゴー大学所有の模型のニューコメン蒸気機関の修理を担当する機会を得て、修理と改良を行ったが、修理後もこの機関はかろうじて動く程度であった。

かれは小型のニューコメン機関の性能が極端に悪いことを見出し、この原因についてブラックらと討論した。それまでに、ブラックは異なる物質は異なる比熱を持つこと、また物質が固体から液体、液体から気体へと状態変化をするときは、莫大な潜熱を吸い取ることを発見していた。ブラックとワットは、ニューコメンの機関では凝縮の過程で冷やされたシリンダを毎回新しい蒸気が温めることにより、多量の蒸気が無駄に使われることを突き止めた。蒸気が水に変わるときの潜熱とシリンダの材料の比熱とから、ワットはいろいろな大きさの機関によって無駄に費される蒸気量を計算し、小型の模型では無駄が大きくなることを示した。小型の模型では、シリンダの容積に対する表面積の割合が、大型のものより大きいからである [16]。

ワットはシリンダを常に一定の温度に保持することが必要と考え、1765年に、凝縮器をシリンダから分離した改良版の模型を製作した。実寸の熱機関を製作して事業を行うには資金が必要であった。

(ローバックとの共同起業) ジョゼフ・ブラックは友人の一人で、ファルカーク近郊でキャロン製鉄所を営んでいた実業家のジョン・ローバック(1718-94)を紹介した(1766頃)。ローバックの支援を受けてワットは蒸気機関の製造に取り組んだ。分離凝縮器をもつ蒸気機関の実用機を作って、1769年に特許を取った。しかし、当時の加工技術の未熟さや資金運用のまずさも重なって、資金繰りが苦しくなり、8年余り後の1775年にローバックは破産してしまった。

(ボルトン・ワット商会) 1774年に、パーミンガムでソーホー鑄造工場を営んでいたマシュー・ボルトン(1728-1809)がローバックの持っていた特許使用権を取得し、ワットの支援に乗り出した。1775年には、その特許の1800年までの期間延長が首尾よく達成された。

ボルトンを通じて、ワットは優秀な職人にめぐり合うことができた。ピストンに正確に合う大きなシリンダの加工は、北ウェールズのレクサム近郊にあるパーシャム鉄工所のジョン・ウィルキンソンに依頼した。ウィルキンソンはそれまでに、大砲製造用に精密中ぐり技術を開発していた。ワットとボルトンはボルトン・ワット商会を設立し、25年間にわたって協力関係を続けることになる[29]。

(最初の動力機関) 1776年、鉱山のポンプ動力として最初の機関が建造され、商業的事業として稼働し始めた。ワットらは商業的成功をおさめ、主にコーンウォール地方の鉱山から揚水用に受注が舞い込んだ。これらの機関はかなり大型で、最初に製造されたものは、直径50インチ(127cm)以上のシリンダを備え、高さ24フィート(7.32m)もあり、それを格納する専用の建屋を必要とした。

これら機関はボルトン・ワット商会が製作するのではなく、ワットの設計を基に他の製造業者が製作し、ボルトン・ワット商会は技術コンサルタントの役割を担った。機関の当初の立ち上げや調整運転はワット自身が行い、その後商会の従業員に引き継がれた。この蒸気機関を使うことでニューコメン機関よりも節約できた石炭の1/3に相当する金額を、ボルトン&ワット商会が年額報酬として受け取る仕組みであった。

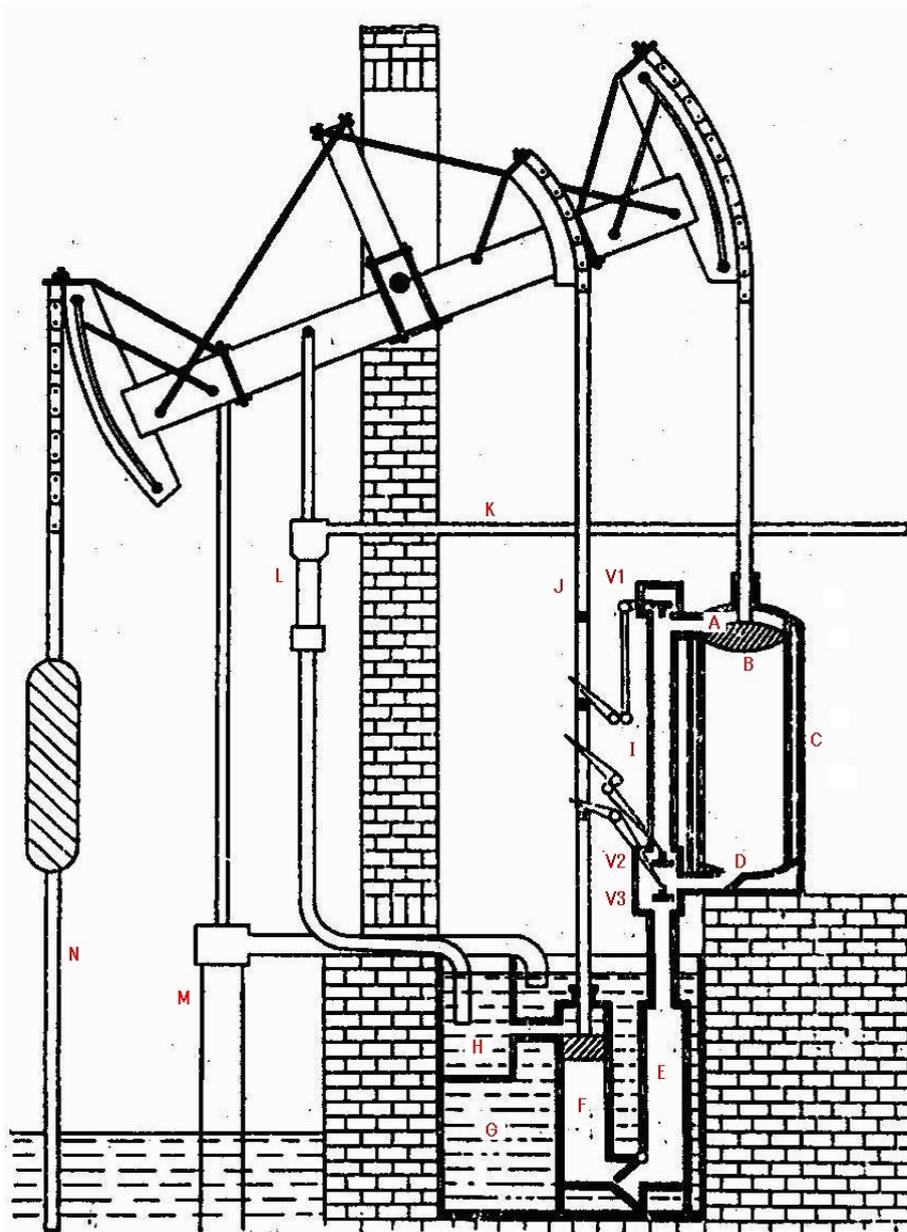
(動力機関の改良) ボルトンはワットに対して、研磨、紡績、製粉等にも使えるように、ピストンの往復運動を回転運動に変換する機構を開発するように求めた。これによって、ワットの蒸気機関の用途が急速に広がった。ワットと従業員のマードックは、水車で用いられているクランク機構を蒸気機関に適用する検討を始めたが、元部下であったピカードとワズブローがクランク機構とはずみ車の特許を申請取得してしまった。ワットは対向して、1781年に遊星歯車機構の特許を得てこれを用いた。

そのほかに、ワットは蒸気機関に行った改良には、ピストンの両面に蒸気を交互に作用させる複動機関、複数の蒸気機関を連結した複合機関、シリンダ内の容積・圧力の変化を図示する蒸気指圧計(ただし、企業秘密扱い)、ビームの円弧運動をシリンダ棒の直線運動に変換する平行運動機構、遠心调速機(ガバナー)等があった。

注目すべき点として、蒸気の圧力に対するワットのかたくななまでの抵抗があげられる。この当時のボイラは初歩的な段階にあり、爆発の危険性や漏れの問題が伴っていた。ワットは高圧での使用を禁止したので、当時の蒸気機関はほぼ大気圧前後の圧力で運転された。ワットの蒸気機関は大した事故を起こすこともなく、大きな成功をおさめた。しかし、客観的に見て、後半では蒸気機関の進化の障害となった。

18世紀後半のイギリスでは、特許に大きな関心が寄せられていた。ワットは、分離凝縮器の特許をベースに多くの特許を取得し、何度か、特許侵害訴訟を起こして争った。

特許の有効期限が切れた1800年、ワットは引退した。マシュー・ボルトンとの契約関係も終了したがこの協力関係は彼らの息子たちに引き継がれ、長年工場に勤めた技術者ウィリアム・マードックもパートナーに加わり、会社は盛栄を維持した。ワットは、引退後も屋根裏部屋を工房にして、望遠鏡を使った距離計測法、石油ランプの改良、蒸気式絞り器、彫刻複写機等の発明に取り組み、83歳の時に自宅で亡くなった。



- A: シリンダ蒸気口
- B: ピストン
- C: 蒸気ジャケット
- D: シリンダ真空口
- V1-3: 弁
- E: 凝縮器
- F: 真空ポンプ
- G: 冷水タンク
- H: 温水タンク
- I: 蒸気連通管
- J: 制御棒
- K: ボイラ給水管
- L: ボイラ給水ポンプ
- M: 冷水ポンプ
- N: 揚水ポンプ棒
(ポンプは坑道)

Fig. 30 ワットの初期の蒸気機関

ワットの蒸気機関

ビーム機関 初期のワットの蒸気機関を Fig. 30 に示す。ワットの主な改良は次の点にあった。

(1) 蒸気はシリンダとは別の容器で凝縮する。

凝縮器はシリンダから分離されて、冷水タンク内で常に冷却されている。

シリンダの左の連通管には上から蒸気弁 V1、平衡弁 V2、排気弁 V3 の三つの弁があり、図の右枠外のボイラからシリンダの上の配管を通して蒸気を送られてくる。図のピストン位置の状態では、平衡弁 V2 が開き、蒸気弁 V1 と排気弁 V3 が閉じている。

ここで、平衡弁 V2 を閉じて、蒸気弁 V1 と排気弁 V3 を開くと、シリンダの下部の真空口から蒸気が凝縮器へ流出して真空となり、同時にシリンダの上部の蒸気口からボイラの蒸気が流入する。蒸気は一度シリンダの上部へためておく。

- (2) シリンダをできるだけ高温に維持するために、シリンダを蒸気ジャケットで包む。
ボイラから導かれた蒸気が蒸気ジャケットを常に満たしている。これにより、シリンダはほぼ蒸気温度(約 100)に保持される。排気弁を開いた際は蒸気が膨張流出してシリンダ内の蒸気温度は 30 程度まで下がるが、シリンダの温度は 100 程度に維持することができる。
- (3) シリンダ内の蒸気の膨張力を利用する。
ピストンが下降する時はピストン下面が真空となるのに加えて、ピストン上面の蒸気圧力を利用してことになる。ただし、ワットは蒸気の圧力を高くすることは極力避けていた。
ピストンが下端まで下がると、蒸気弁 V1 と排気弁 V3 を閉じ、平衡弁 V2 を開く。これによりピストン両端の圧力は等しくなり、図の左側の揚水ポンプの自重によりロッキングビームが左に傾き、ピストンが持ち上がり、図の状態となる。
- (4) 系統から空気を除去する。
凝縮器に溜まった凝縮水はその横の真空ポンプで吸引し、大気圧の温水タンクへ汲み上げる。この時、ポンプの容量が適当に大きければ、凝縮水と共に蒸気の一部も吸引するので、シリンダ内に混入している空気も同時に除去することができる。
真空ポンプは複数の弁の開閉切替動作を行う制御棒で駆動する。
- (5) 摺動部の気密保持に水でなく、オイル、グリース、場合によっては水銀を使用する。

また、温水タンク内の温水はボイラ給水ポンプと給水管を介してボイラへ送り、廃熱の回収を行っている。

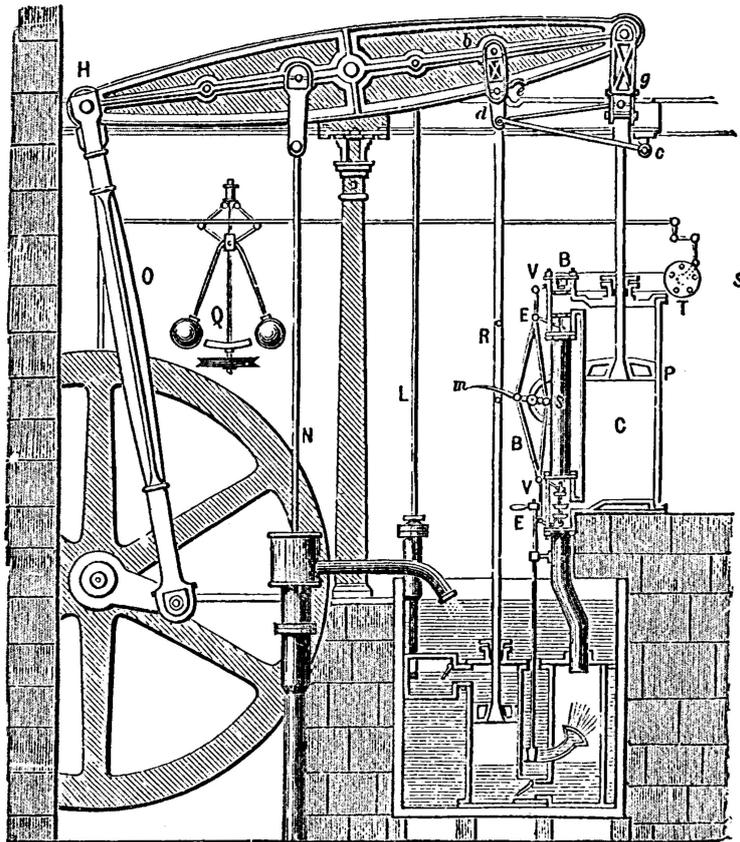


Fig. 31 ワットの遊星歯車機構 (ロンドン博物館に現存)

回転機関 (遊星歯車装置) ポールトン・ワット商会の従業員ウィリアム・マードックの発明とされるが、1781年にワットによって特許が取得された。クランク機構は、すでに ジェームズ・ピッカードにより特許が取得されていたので、それを避けるために考案された。ロンドン博物館に現存するワットの遊星歯車機構を Fig. 31 に示す。

- (1) 図の下中央の 2 枚の歯車は、左側が駆動軸に繋がる太陽歯車であり、右側が接続棒と一体の遊星 (惑星) 歯車である。接続棒の上の端はロッキングビーム (写真範囲外) に繋がっている。両歯車の後ろ側には太陽歯車の軸 (駆動軸) の周囲を回転するアームがあり、両歯車間の距離はかみ合った状態で一定に保たれている。
- (2) 蒸気機関の往復運動によりロッキングビーム (接続棒の上端) が上下運動すると、遊星歯車が接続棒に固定されたまま太陽歯車の回りを回り、太陽歯車 (およびそれに繋がる駆動軸) が回転する。両歯車の歯数が等しい場合、ビームの 1 往復運動 (遊星歯車の 1 公転) で太陽歯車と駆動軸は 2 回転することになり、歯数比を変えれば増速比を変えることもできる (これがワットの売りの一つ?)。
- (3) 遊星歯車をなくすれば (太陽歯車とアームはクランクアームとなる)、これはクランク機構そのものになり、余分な歯車をつけている点で不利であるが、ポールトンとワットはピッカードの特許を避けるために採用した。

ピッカードの特許が 1794 年に切れて以降も、ワットは遊星歯車機構を使い続けたが、やがてクランク機構が主流となった。



- g: 平行運動機構 g-d-c
のジョイント
- T: 蒸気絞り弁
(調速機 Q で制御)
- P: ピストン
- C: シリンダ
- V: 蒸気給気弁
- E: 蒸気排気弁
- R: 真空ポンプ棒
- m: 給排気弁制御レバー
(ポンプ棒 R で駆動)
- L: ボイラ給水ポンプ
- H: 接続棒とビーム
のジョイント
- N: 冷水ポンプ
- Q: 調速機
- O: 接続棒

Fig. 32 ワットの複動式回転機関

複動式機関 ワットは、ピストンが上下に往復する両行程で動力を取り出す複動式機関を考案した (1782 年)。ボルトン・ワット商会設計の複動機関の例を Fig.32 に示す。以下の特徴を見ることができる。

- (1) シリンダ C の上端および下端は左側の細い縦管に繋がっており、給気弁 V および排気弁 E を介して、ボイラまたは凝縮器に接続されている。これら給気弁と排気弁の切り替えに応じて、シリンダの上下端 (ピストンの上側および下側) はボイラまたは凝縮器に交互に接続される。このため、ピストンの片側にはボイラの蒸気の圧力が作用し、他方の側には凝縮器の圧力 (真空に近い低圧) が作用し、ピストンが上下に往復する両行程で、常にほぼ同じ力を及ぼして回転が滑らかになる。(ただし、ワット自身は安全性の面から、蒸気の圧力を高くすることを強く禁止していた。)
- (2) ボイラから給気弁へ送られる蒸気流量は、遠心式調速機 Q で蒸気絞り弁 T の開度を調整し、機関の回転数を制御する (後述)。
- (3) シリンダからの排気はシリンダ下方の分離凝縮器で冷水を噴射して凝縮し、凝縮器内を低圧に保っている。凝縮器にたまる凝縮水は復水ポンプ (真空ポンプ) R で排水する。凝縮水はボイラへの給水の一部に加えることにより、凝縮水の持つ廃熱を回収する。
- (4) 真空ポンプ棒 R は給気弁、排気弁等を開閉する制御レバー m を動かす制御棒を兼ねている。

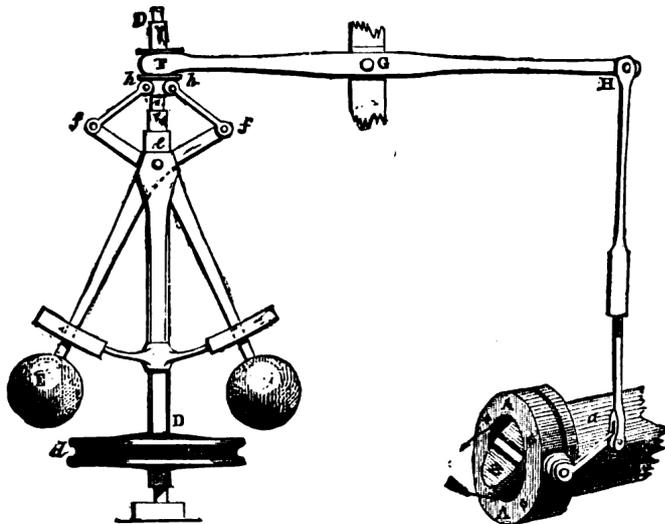


FIG. 4.--Governor and Throttle-Valve.

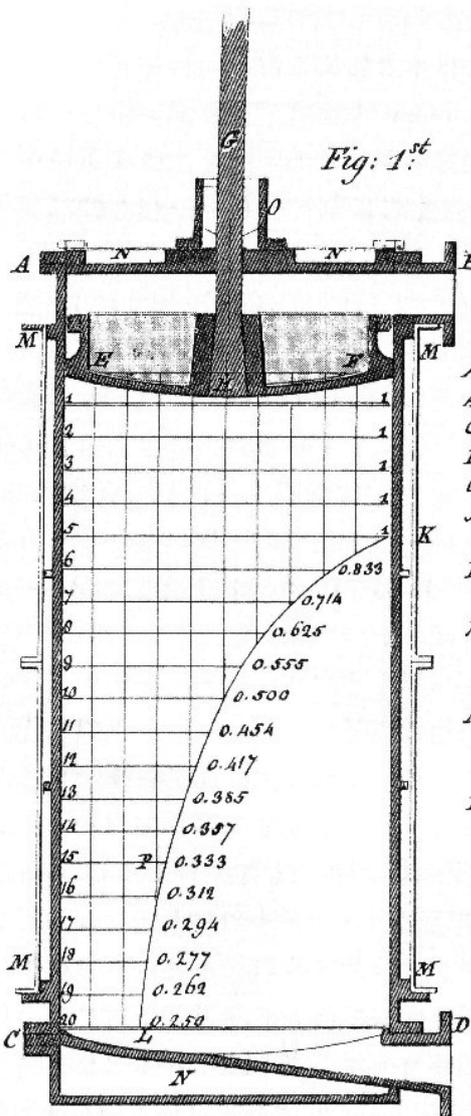


Fig. 33 ワットの調速機

- (5) 直線運動するピストン P と円弧運動するビームは、直接つなぐことはできないので、ワット考案の平行運動機構 g-d-c を用いている。
- (6) 複動機関では鎖で動力を伝えることはできない代わりに、ビームは自重で片方へ傾く必要はなく、重心位置近くを支点としている。また初期のポンプで使用された木製ビームに代わって、鑄鉄ビームが使われている。
- (7) Fig.32 の左側の回転部分にはクランク機構が用いられているが、ピッカードの特許を回避するために、ワット機関の多くでは前述の遊星歯車機構が用いられた。

遠心調速機 ワットは、ポルトンの要請をうけて、1788年に最初の調速機を設計した。それは、ワットが蒸気機関のために行った発明の最終のもの1つであった。Fig.33に模式図と現存する実機を示す [31]。

- (1) 機関の出力軸からチェーン（またはベルト）で回転を取り出して調速機を回転させる。
- (2) 調速機には1対の球形の重りがリンクを介して取り付けられており、中心軸と共に回転するので、回転速度に応じて重りが広がって持ち上がり、リンク上端部分 h が下方へ移動する。この動きを用いて、水平なてこ hGH を介して絞り弁の開度を小さくする。
- (3) 絞り弁はシリンダに入る蒸気流量を調整しており、これにより蒸気流量が抑えられて機関の回転数が低くなる（または増加しなくなる）。
- (4) 低速時には機関が停止するのを防ぐために、機械的なストッパーで調速機の重りをストッパーで止めて下限値を設定している。



ABCD The Cylinder
AB The Cover of the Cyl.
CD The Bottom of the Cyl.
EF The Piston.
GH The Piston rod
J The opening to admit
Steam from the Boiler.
D Opening to lett off the
Steam into the Condens
MM A Case containing
Steam and surrounding
the Cylinder.
NN Cases containing
Steam above & below
the Cylinder.
KL A Curve, the ordinates
of which represent
the powers of the Steam
when the Piston is at
their respective places

ABCD : シリンダ
 AB : シリンダ カバー
 CD : シリンダ 底部
 EF : ピストン
 GH : ピストン棒
 J : ボイラからの蒸気入口
 D : 凝縮器への蒸気出口
 MM : シリンダを包む
 蒸気ジャケット
 NN : シリンダ上部下部の
 蒸気ジャケット
 KL : ピストン位置による
 (ピストン上面) 蒸気圧力
 の変化を示す曲線

図 18.8 ワットの膨張原理の図解 (1782 年の特許明細書より)

Fig. 34 蒸気の膨張力の有効利用

この型の调速機は「ワットの调速機」と呼ばれて、フィードバック制御の最初の例として紹介されているが、類似の调速機は 17 世紀以来風車小屋等で、石臼の間の隙間や圧力を制御するために使用されており、ワットオリジナルの発明というわけではない。またワットも、遠心调速機を彼自身の発明であると主張したことはない。

現代の调速機は、ワットの调速機で重力をバネ等に置き換え、油圧で増幅して制御器を操作するのが普通である。

蒸気の膨張力の有効利用 先の Fig.30 に示したように、ワットの蒸気機関では、単動機関でもピストンの背面には蒸気が供給されていた。平衡弁 V2 を開いてピストンが上端まで持ち上がる時、ピストン上部の蒸気は、移送管を通してピストン下部へ移動する。その後、排気弁 V3 が開くと、シリンダ内の蒸気はほぼ真空の凝縮機内へ猛烈な速度で流入して凝縮することになっている。

機関開発の当初はよく分からないが、1769 年までに、ワットはここにも大きな無駄があることに気付いて、改良を加えており、1782 年の特許明細書の中で、次のように明瞭に記述している [7] (表現を少し分かりやす

く変更した)。

- (1) Fig.34 のシリンダにおいて、蒸気出口 D の先の排気弁が開いて凝縮器に繋がると、シリンダのピストン下方の空間はほぼ真空となる。
- (2) ボイラからの蒸気は蒸気弁を介して B から入り、ピストン上方の空間を満たす。ピストンの上下の圧力差により、ピストンが下方へ移動する。
- (3) ピストンが行程の 1/4 に対応する K の位置に来たとき、蒸気弁を閉じて蒸気の流入を遮断する。
- (4) 蒸気弁が閉じて以降は、シリンダのピストン上方の空間の圧力は徐々に下がっていき、この時のピストン位置と圧力の変化 (つまり P-V 線図) を曲線 KL で示している。
- (5) このときのピストン上部の空間の蒸気の状態変化は断熱膨張であり、かつ部分的な凝縮を伴うが、ワットは、これを気体の等温膨張 (ボイルの法則) で計算して図中に示している。
- (6) ピストンの全行程の圧力の和は 11.568 であり、蒸気弁を閉じなかった場合の圧力の和 20 の 57.8 % となる。つまり、シリンダを満たすに必要な量の 1/4 の蒸気しか用いていないにもかかわらず、1/2 以上の効果を生み出している。

ピストンが下端へきたときには、ピストン上方のシリンダの中は 1/4 気圧となっている。複動式の場合は、ピストン上方の排気弁が開いて、この蒸気が凝縮器へ直接流出する。

単動式の場合は、Fig.30 で示したように、平衡弁 V_2 が開くとピストン上方の蒸気が移送管を通過してピストン下方へ移動し、ピストンが上端まで持ち上がり、次に排気弁が開いたとき、1/4 気圧の蒸気が凝縮器へ流出して冷却される。

上記の特許明細書の記述から、以下のことがうかがえる。

- (1) ワットは、機関の動作について、経験だけでなく理論的かつ定量的に検討している。
- (2) ワットは、圧力が高いままの蒸気がいきなり真空の凝縮器へ流出するのは、無駄が多いと考えた。後世の熱力学から考えれば、これは非可逆変化に伴う損失であり、ワットの判断は的確であったといえる。その後的高圧機関ではこの膨張力の利用は重要であり、ワットは、高圧機関を開発するのに必要不可欠な技術をすでに講じていたことになる。ただし、ワット自身はボイラの圧力を高くすることには安全性の面から極力反対していた。
- (3) ワットは各ピストン位置での圧力の総和の比率を使って機関の効果を評価しており、P-V 線図の面積がサイクルの仕事を表すことを理解していたことを示している。

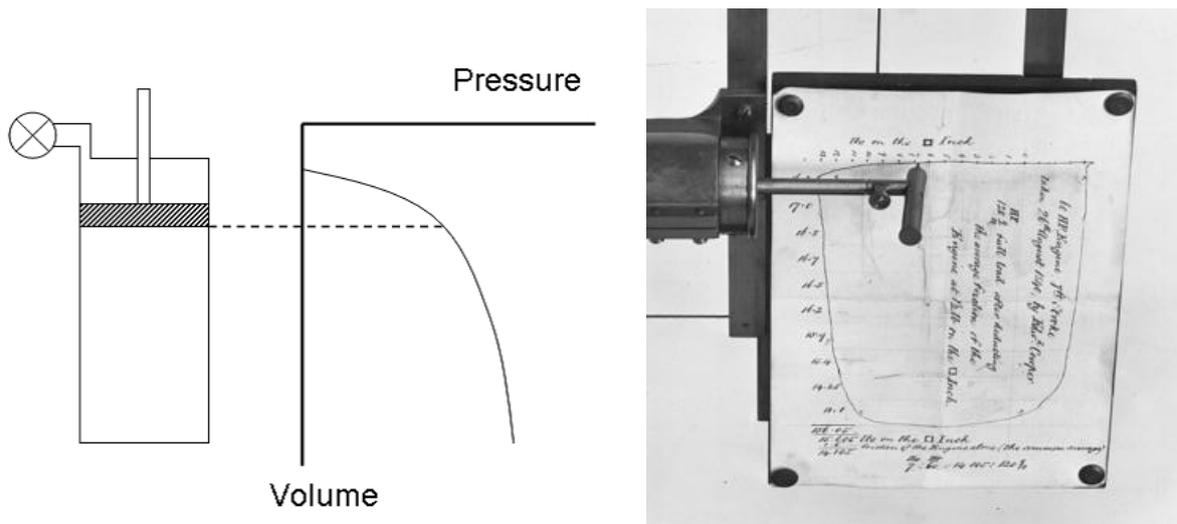


Fig. 35 ワットの指圧計

蒸気指圧計 1796年ワットと従業員のジョン・サザン(1758-1815)は、シリンダ内の体積と圧力の時間変化(P-V線図,インジケータ線図)を描く装置(指圧計,インジケータ)を開発した[32][33]。

- (1) 記録紙を乗せた板をピストンに取り付けて、ピストンと一緒に動かす。
- (2) 一方、シリンダの圧力を圧力ゲージ(ばねで支えた小さなシリンダ・ピストン)で受けて、その先にペンを取り付け、ピストンの動く方向と垂直方向にペンを動かす。
- (3) 記録紙の上に、ペンの動き(圧力P)と板の動き(シリンダの体積V)、つまりP-V線図(インジケータ線図)が描かれる。

ワットは、蒸気機関の性能の改良のために線図を使用し、それを長い間商業上の秘密にしていた。P-V線図は、弁開閉のタイミング決定、蒸気消費量、機関出力等の算出に有効である。

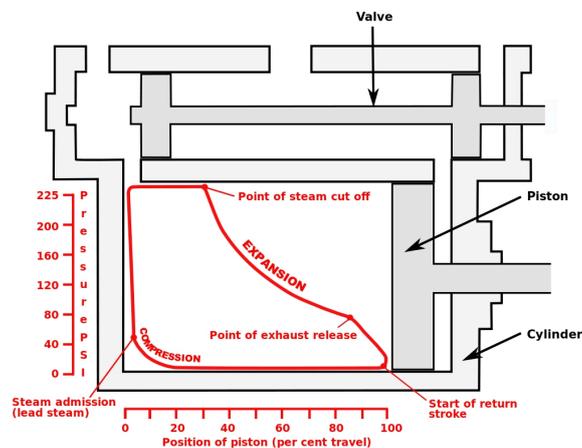


Fig. 36 インジケータ線図と弁開閉タイミング

ワット以降の蒸気機関とワットが果たした役割 ニューコメン機関を大きく発展させたのはワットであるが、ワットは高圧の蒸気を用いることを頑なに拒んでいた。

ワットの基本特許が1800年に切れたのを契機に、その後の半世紀で高温高圧の蒸気を使用する高圧機関が多数建造され、蒸気機関は原動機の第一線にまでおどりた。それに伴って、多くの関連技術が開発された。

1781年にジョナサン・ホーンブローが最初の複式機関(多段機関)の特許を取った。当初はワットの特許に阻まれて、成功しなかったが、後の高圧機関と組み合わせられて発展した。

蒸気自動車や蒸気機関車を作ったリチャード・トレヴィシックは、1799年頃に高圧機関を稼働させ、1802年に特許を取得した。またこの頃アメリカでも、オリバー・エバンスが蒸気自動車用に高圧機関を開発した。蒸気の圧力は1810年の3.5気圧から1830年には約5-6気圧に上昇した。それは、蒸気機関の単位重量当りいっそう大きな出力を意味した。それはまた軽い機関と道路交通および水上輸送への応用の可能性を示すものであった。

蒸気自動車、蒸気機関車に加えて、蒸気ポンプ(ウォーシントンポンプ)の発明(1841年)、蒸気巻揚機(1830年)、蒸気ハンマー(1839年)などの発明があり、緻密な金属パッキングも開発された。

機関の高圧化に応じて、高圧蒸気をつくるためのボイラの改良もなされた。ワットの世代の古い蜂の巣型のヘイストックボイラは、高圧に耐えられず、トレヴィシックによるコーンウォール(コルニッシュ)・ボイラ(1812年)、ウィリアム・フェアパーン設計のランカシャー・ボイラ(1844年)などが開発された。石炭を効率良く燃やす「移床給炭機」(1841年)や、給水を煙道ガスで予熱する「節炭器」(1845年)が開発され、1876年にはパブコックとウィルコックスが高性能な煙管ボイラを開発した。

1800年ころには、約500台のポールトン・ワット機関が動いていた。そのうち160台は、水車に水を汲み上げるのに使われ、他はほとんど、ほかの機械を動かす回転機関であって、24台が溶鉱炉に空気を送るのに使われていた。それらの平均の出力は15-16馬力であった。その後、1850年頃までに、蒸気機関の平均出力はおおよそ40馬力になっていた(当時の風車や水車の15馬力であった)。

1700年に、イギリスはおおよそ、3,000,000トンの石炭を消費したが、その大部分は住民の暖房用であった。蒸気機関が稼働して、1800年までに2倍になり、1850年には、蒸気機関と製鉄用コークスのおかげで、石炭消費は20倍の60,000,000トンにまでのぼっていた。

産業革命と技術者 周知のように、ニューコメン、ワットの蒸気機関は動力革命を引き起こし、やがて工場制機械工業の導入による産業革命、それに伴う社会構造の変革へと結びついた。それまで科学は技術とは無縁の内容であったが、科学と技術の距離が急速に縮まった。

蒸気機関は、科学が技術に応用されて大きな成功を収めた最初の例であった。蒸気機関が力を発揮するには、加工法をはじめとするモノづくり技術が当時なりに進歩することが必要であった。そのような知識と技術を身につけた熟練技術者が不可欠であった。

中世の徒弟制度を基礎にした古い生産方式が、資本主義を基礎にした新しい生産方式に変わり、科学的知識を身につけた熟練労働者が大量に必要とされるようになった。国家として、技術者を養成することが必要となった。

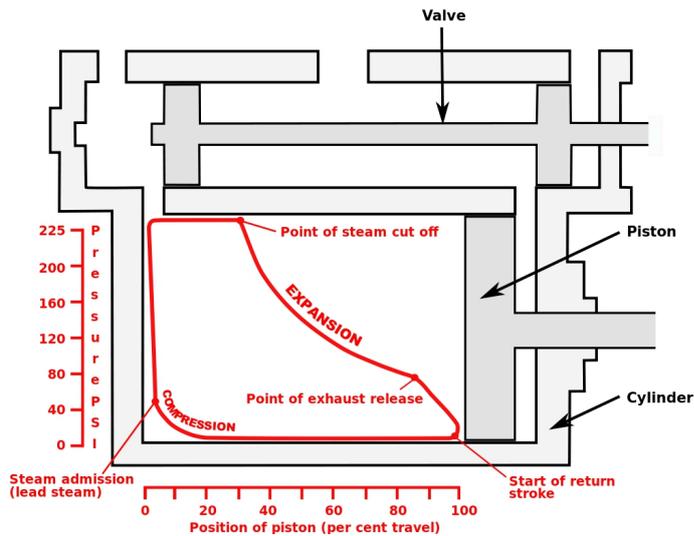


Fig. 37 P-V 線図と弁開閉タイミング

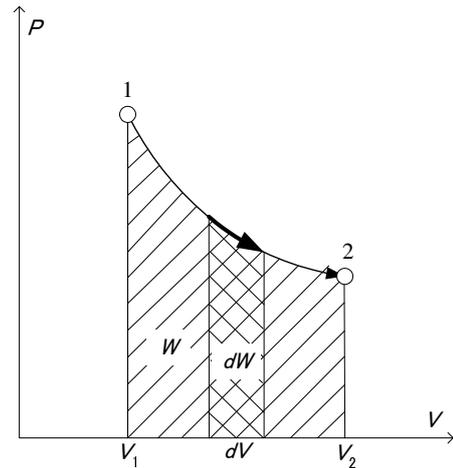


Fig. 38 P-V 線図の仕事

3.6 今日の熱機関

$P-V$ 線図と仕事 ワットは、蒸気機関の性能を改良するために $P-V$ 線図を使用した。その中で、線図で囲まれる面積が仕事なることを理解しており、弁の開閉時期を調整することにより、線図で囲まれる面積と吸気量の比を大きくしようとした。 $P-V$ 線図は現在でも広く用いられる有効な手段である。

簡単のためにピストンの裏面は無視する(真空と考える)。ピストン表面に働く力は、(圧力) \times (面積) $= PA$ であり、このままゆっくりと^{*12}、ピストンが dx だけ移動してシリンダーの体積が増えたとすると、この間に、シリンダーの中の蒸気(またはその他の気体や液体であり、系という)がピストンになす仕事 dW は

$$dW = PA \times dx = P \times (Adx) = PdV$$

となる。ここで、 $dV = Adx$ は系の体積の増加量である。この間の微小な仕事 dW は Fig.38 の縦長の矩形の面積に等しい。

これを最初の体積 V_1 から最後の体積 V_2 まで積分すると次式となる。

$$W = \int_1^2 PdV$$

結局、仕事は $P-V$ 線図の下側 (V 軸側) の面積で表されることになる。右方向 (V が増加する方向) へ変化すれば系がピストンに対して仕事をしたことになり、左方向 (V が現象する方向) へ変化すればピストンが系に対して仕事をした(系がピストンに対して負の仕事をした)ことになる。

$P-V$ 線図が一巡してもとに戻る変化(サイクル)を描けば、右回りなら系がピストンに対して正の仕事をしたことになり、左回りなら負の仕事をしたことになる。

組成が一定の物質の状態変化は、 $P-V$ 線図のような二次元の線図上に表すことができる。 $P-V$ 線図は意味が分かりやすい上に、面積が仕事を表すので非常に重要である。

*12 ピストンがゆっくりと動くことは、後節で述べる準静的変化であることを意味している。

熱機関の常識 ニューコメンやワットの蒸気機関は、熱 (および得られる蒸気) を使って真空を作り出し、大気圧を利用してピストンを動かし、そこから仕事を取り出す。その後の熱機関も含めて、熱から仕事を取り出す機械が熱機関であるといえる。熱機関の重要な性能に、出力 (仕事率) と熱効率がある。

ワットは、出力を表すのに馬力 (HP) と呼ばれる単位を作り出した。

$$1 \text{ HP} = 33000 \text{ lb}_f \text{ ft}/\text{min.} = 550 \text{ lb}_f \text{ ft}/\text{s}$$

現在の SI 単位に換算すると

$$1 \text{ kW} = 1.341 \text{ HP} = 1.360 \text{ PS}$$

となる (HP: フートポンド法馬力、PS: メートル法馬力)。平均的なニューコメン機関の出力は、4 kW 程度であったと推定される。ワットが特許期間中に製作した蒸気機関は平均して 10 数 kW であった。

現在の熱機関の出力は、小は 1 kW 程度 (ガソリン機関) から大は 100 万 kW (ボイラ・蒸気タービン機関) 程度となっている。

ワットは同じ出力を得るのに必要な石炭の消費量を用いて、熱機関の性能を表した。今日では、熱機関の性能を表すには次の熱効率が用いられる。

$$(\text{熱効率}) = \frac{(\text{得られる仕事})}{(\text{供給した熱量})}$$

熱も仕事もエネルギーであるので、同じ単位で評価して無次元の数値 (パーセンテージ) となる。

ニューコメン機関の熱効率は 0.5 % 程度であったと推定されている。これに対してワット機関は 1.2 % 程度となり、倍以上に改良されている [34]。

一般の「効率」は、技術的な改良により限りなく 100% に近づくが、後述のように、熱機関の熱効率は、カルノーサイクルの熱効率を超えることはできない。熱機関の熱効率は温度範囲により原理的な上限があるということが、熱力学の重要な結論の一つである。現在の熱機関の熱効率は、ガソリン機関 15 ~ 35 %、ディーゼル機関 30 ~ 50 %、ガスタービン機関 20 ~ 40 %、ボイラ・蒸気タービン 40 ~ 45 % コンバインドサイクル機関 (ガスタービンとボイラ・蒸気タービンの複合) 45 ~ 55 % 程度の値となっている。船用大型ディーゼル機関や発電用コンバインドサイクル機関で、熱効率 50% を越える熱機関が出現し始めたことが、この 10 数年のホットな話題となっている。

参考文献

- [1] 戸田盛和 ほか、"物理入門コース 1～10"、岩波書店 (1983).
- [2] Web Page、"特別講義 I (科学技術史) 資料 20"、<http://sho-yama.c.ooco.jp/lecture/history/h20.pdf>.
- [3] R.J. フォーブス、E.J. デイクステルホイス (広重徹 ほか訳)、"科学と技術の歴史 I"、みすず書房 (1963).
- [4] 山本義隆、"熱学思想の史的展開 (熱とエントロピー) 1"、筑摩書房 (2008).
- [5] Web Page、"<http://ja.wikipedia.org/wiki/ガリレオ・ガリレイ>"、(2014.02.15).
- [6] R.J. フォーブス、E.J. デイクステルホイス (広重徹 ほか訳)、"科学と技術の歴史 II"、みすず書房 (1964).
- [7] 山本義隆、"熱学思想の史的展開 (熱とエントロピー) 2"、筑摩書房 (2009).
- [8] 計量標準総合センター HP、"計量標準総合センター ; 温度"、
<https://www.nmij.jp/library/units/temperature/>、(2015.02.23).
- [9] Web Page、"<http://www.ariga-kagakushi.info/portrait/Hooke.html>"、(2015.02.18).
- [10] Web Page、"<http://ja.wikipedia.org/wiki/ロバート・フック>"、(2015.02.18).
- [11] J.W.West、"The Original Presentation of Boyle's Law"、Journal of Applied Physiology、
<http://jap.wphysiology.org/content/87/4/1543>、(2015.02.18).
- [12] Web Page、"<http://ja.wikipedia.org/wiki/ジャック・シャルル>"、(2015.02.24).
- [13] Web Page、"<http://ja.wikipedia.org/wiki/ジョセフ・ルイ・ゲイ＝リュサック>"、(2015.02.24).
- [14] 高林武彦、"熱学史"、海鳴社 (1999)、ISBN 4-87525-191-2.
- [15] Web Page、"<http://ja.wikipedia.org/wiki/アメデオ・アヴォガドロ>"、(2015.02.24).
- [16] S. F. メイスン (矢島祐利 訳)、"科学の歴史 上"、岩波書店 (1955).
- [17] Web Page、"[http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Illustrations_from_De_re_metallica_\(1556\)](http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Illustrations_from_De_re_metallica_(1556))"、(2014.05.06).
- [18] S. リリー、(伊藤新一 ほか訳) "人類と機械の歴史"、岩波書店 (1968).
- [19] Web Page、"http://en.wikipedia.org/wiki/Denis_Papin"、(2014.05.03).
- [20] Web Page、"<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Papin.html>"、(2014.05.08).
- [21] Web Page、"<http://ja.wikipedia.org/wiki/トーマス・セイヴァリ>"、(2014.05.03).
- [22] Web Page、"http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery"、(2014.05.08).
- [23] Web Page、"<http://ja.wikipedia.org/wiki/トーマス・ニューコメン>"、(2014.05.03).
- [24] Web Page、"http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Newcomen"、(2014.05.10).
- [25] Web Page、"<http://www.cottontimes.co.uk/newcomen02.htm>"、(2014.05.14).
- [26] Web Page、"http://en.wikipedia.org/wiki/Newcomen_atmospheric_engine"、(2014.05.16).
- [27] Web Page、"<http://www.egr.msu.edu/lira/supp/steam/newcomen.htm>"、(2014.05.18).
- [28] Web Page、"<http://technology.niagarac.on.ca/people/mcsele/newcomen.htm>"、(2014.05.18).
- [29] Web Page、"<http://ja.wikipedia.org/wiki/ジェームズ・ワット>"、(2014.05.03).
- [30] Web Page、"http://en.wikipedia.org/wiki/James_Watt"、(2014.05.18).
- [31] Web Page、"http://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_governor"、(2014.05.24).
- [32] Web Page、"http://en.wikipedia.org/wiki/Indicator_diagram"、(2014.06.03).
- [33] Web Page、"<http://euclid.psych.yorku.ca/SCS/Gallery/milestone/sec4.html>"、(2014.06.03).
- [34] 石谷精幹、浅野弥、"新版 熱機関通論"、コロナ社 (1978).