

物理学基礎Ⅱ (1/4)

S. Yamauchi

2017 年 3 月 31 日

0 ガイダンス

配布資料：

シラバス、単位換算表等、年表

テキスト：物理学基礎 (1/4)

熱力学を学ぶ。

熱力学は奥が深い。全ての分野につながっている。まともにやると大変！

過去の人はどう考えたのか？

熱力学はどのようにして形作られたのか？

歴史的に学ぶ。

熱力学の概要を学ぶ。

1 熱と温度

1.1 古代ギリシャ人の熱思想

ターレス (BC640-BC546) やアナクシマンドロス (BC610-BC546) :
世の中は水、空気、土、(および火) の三つ (四つ) の元素から構成。互いに変化。

アリストテレス (BC384-BC322) :
元素の背後に熱、冷、湿、乾 の感覚を引き起こす 4 種類の質 (要素) がある。
二つの質の組み合わせで元素が作られる。

湿 + 熱 = 空気

乾 + 熱 = 火

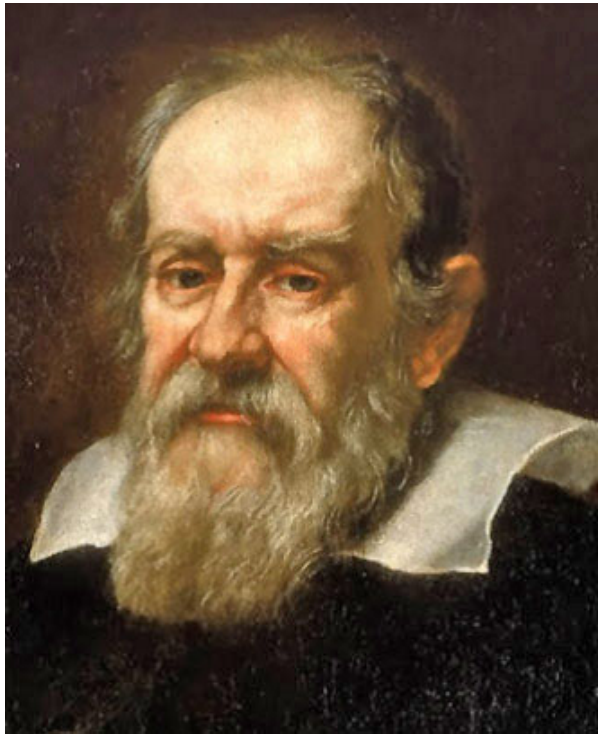
湿 + 冷 = 水

乾 + 冷 = 土

質が変化することにより、元素が変化。

- (1) 熱と冷とは、正反対だが別の性質。
- (2) 熱と冷は、何らかの物質的な存在。

1.2 温度計



ガリレオ・ガリレイ (1564-1642)

イタリアのピサで生誕

ピサ大学、パドヴァ大学、フィレンツェで活動。

天文学や**力学**に大きく貢献。

望遠鏡で天体観測 (月面、木星衛星、太陽黒点)。

地動説を主張。2度のローマ教会異端審問

物体の**落下法則**と投射体の軌道の発見。

仮説演繹法の適用。その後の力学の基礎

主な著書：『天文対話』(1632)、『新科学対話』
(1635)

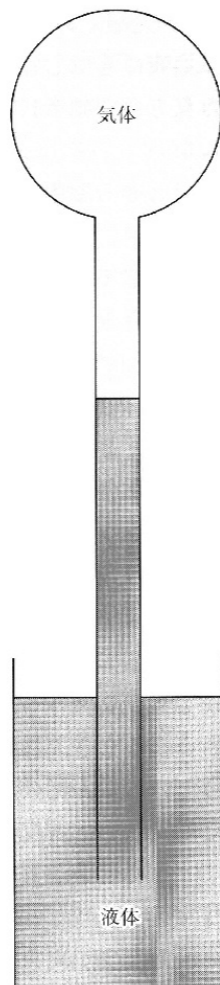


図 1.1 ガリレオの
温度計

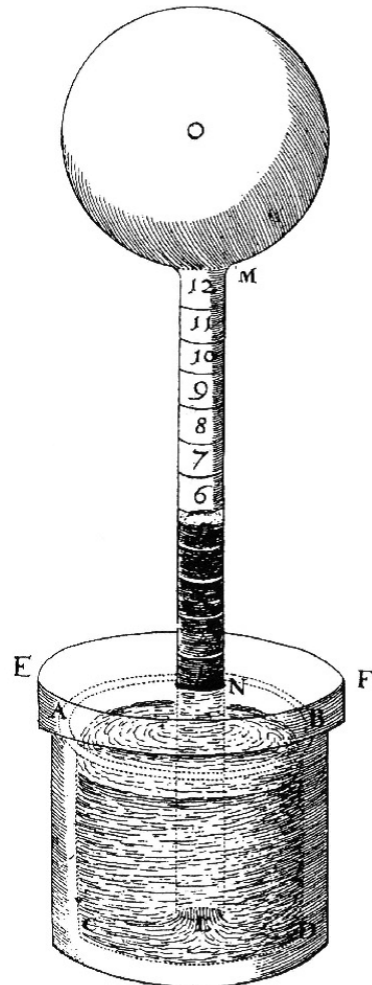
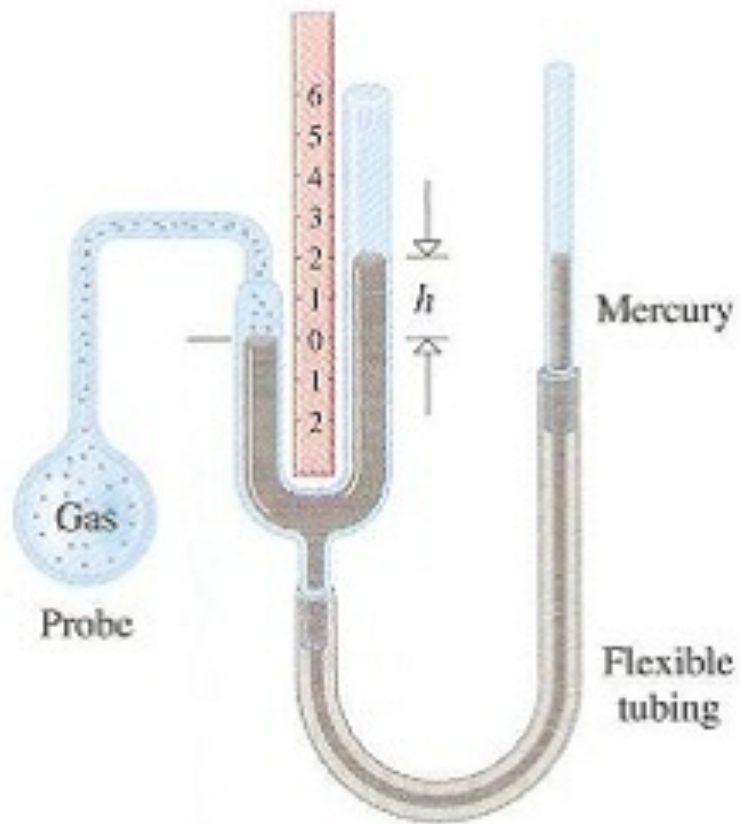


図 1.2 ロバート・フラッドの
温度計 (1626)

ガリレオの温度計

フラスコに空気と水を入れて倒立。
水柱の高さで温度を測定 (1593 年)。

ただし、
液柱の高さにより気体圧力が変化。
気圧も影響する。



後年の定容積形気体温度計
アモントンによる (1700 年頃)

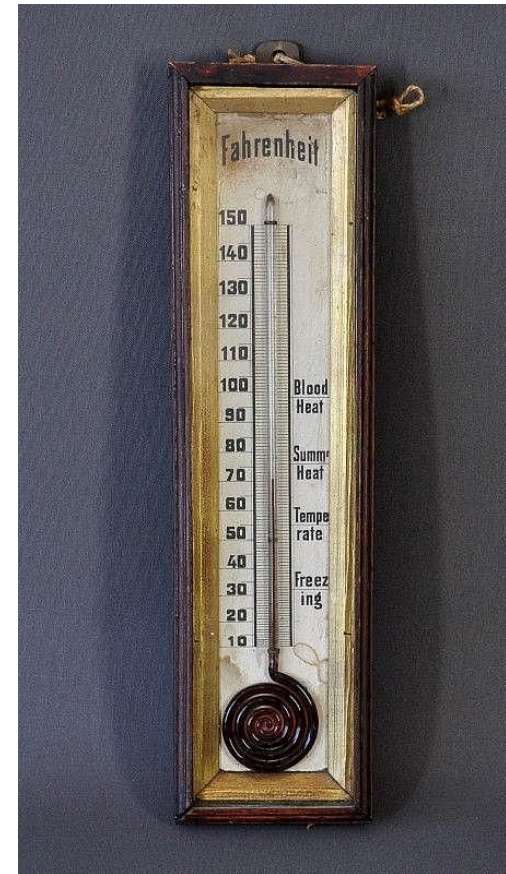
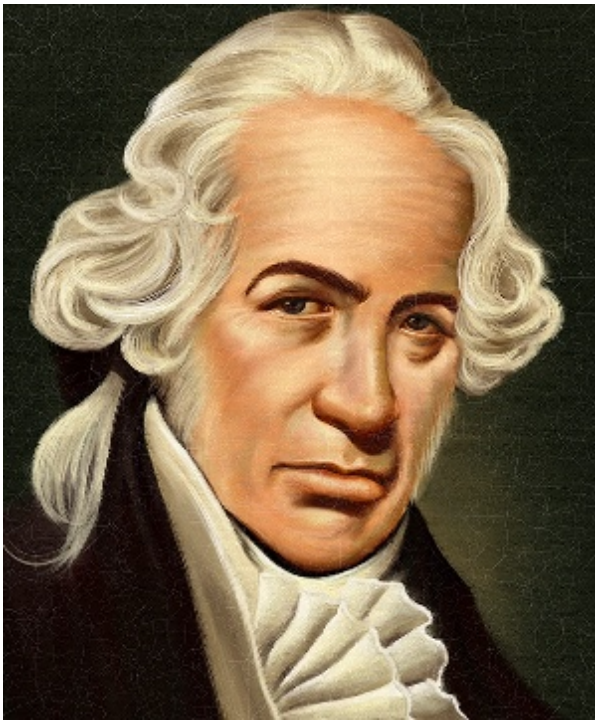
- (1) 右側の管を上下させ、感温部の気体体積を一定にする。
- (2) 水銀柱高さ h を測定する。
- (3) 水銀柱 h に比例して温度目盛りを定める。

$PV \propto T$ より、 $V = \text{const.}$ のとき

$$T \propto P \propto h$$

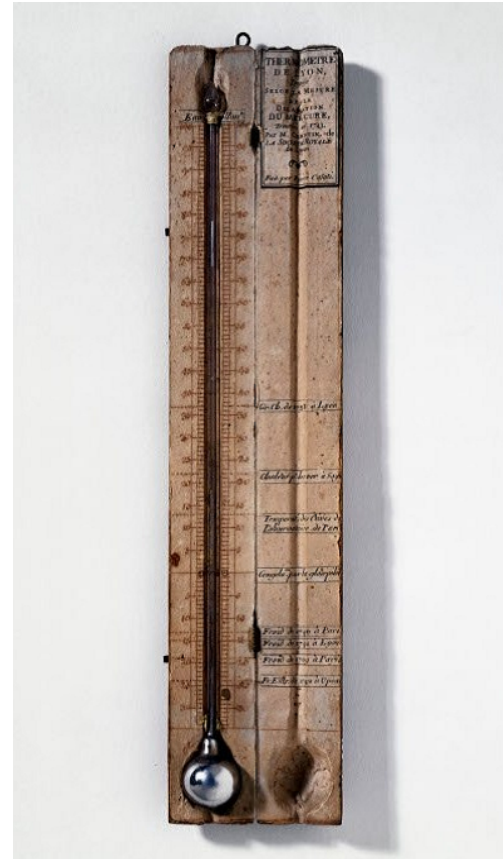
ただし、気圧変化の影響が残る。

ダニエル・ガブリエル・ファーレンハイト (1686-1736) オランダ居住ドイツ人



アルコール温度計、水銀温度計を製作。力氏 (華氏) 温度目盛を考案 (1724 年)。

スウェーデン人のアンデルス・セルシウス (1701-1744)

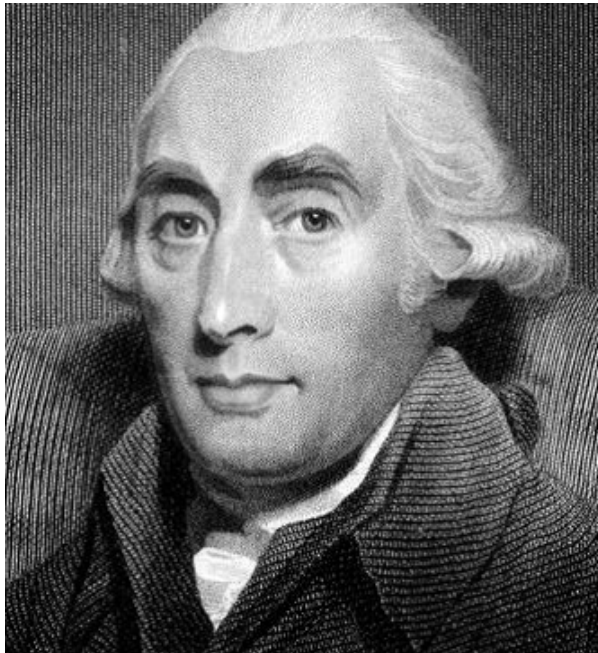


セ氏 (摂氏) 温度目盛を考案 (1742 年)。
100 °C ~ 0 °C; ただし、後継者が後年に変更。

(温度を測る？)

- 古代より、熱は身近な現象。
- 長さ (メートル)、重さ (キログラム)、時間 (秒) に比べて、熱や温度は定量化が難しい。
- 物質の熱膨張を用いて温度を定量化する。
気体温度計、液体 (アルコール、水銀) 温度計。
- 目盛や原点の定め方。セ氏温度 ($^{\circ}\text{C}$ 、 K)、力氏温度 ($^{\circ}\text{F}$ 、 $^{\circ}\text{R}$)、他にレオミュール度 (列氏温度) も過去には広く普及した。
- 問題点：
温度の原点はあるのか？どの物質を用いるべきか？
そもそも、温度とは何か？

1.3 ブラックの熱学



ジョゼフ・ブラック (1728-1799)

英国 (スコットランド) 生まれ
グラスゴー、エディンバラでカレンに師事。
同大学で医学、化学、熱学を研究。

熱量保存則、熱容量 (比熱)、潜熱の概念を確立。
固定空気 (炭酸ガス) を発見。

スコットランド啓蒙運動 (ヒュームら) の一員。
ワットの相談者、支援者の一人。

ファーレンハイトの混合の実験

	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	

(ブラックの解釈)

実験 1 では、重さ (質量) の比は $1 : 13.6$ で、温度変化の比は $20 : 30 = 2 : 3$

実験 2 より、水 2 体積と水銀 3 体積が熱的に同等。

つまり、重さ (質量) に直すと、 $2 : 3 \times 13.6 = 1 : 20.4$ が熱的に同等。

マーチンの加熱・冷却の実験

- (1) 同じ形の 2 個のガラス瓶に同体積の水と水銀を入れ、
- (2) 共通の熱源から等距離に置いて加熱したときの温度上昇速度を測定。
- (3) 熱源を退けて冷却したときの温度降下速度を測定。

	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

(ブラックの解釈)

温度変化速度の比は、加熱でも冷却でも同じ。

水 1 体積が水銀 2 体積に等価、質量比では $1 : 2 \times 13.6 = 1 : 27.2$ が熱的に同等。

(ブラックの考え)

物質には、力学的属性 (質量) とは別の熱的属性がある。

$$(\text{熱量} \Delta Q) = (\text{熱容量 } C) \times (\text{温度変化} \Delta t) = (\text{質量 } M) \times (\text{比熱 } c) \times (\text{温度変化} \Delta t)$$

ΔQ : 熱量, C : 熱容量, Δt : 温度変化, M : 質量, c : 比熱

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、

$$\Delta Q = M_w c_w (100 - 80) = M_m c_m (80 - 50) \text{ より}$$

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

マーチンの実験では $\frac{\Delta t_m}{\Delta t_w} = \frac{\Delta Q / (M_m c_m)}{\Delta Q / (M_w c_w)} = \frac{M_w c_w}{M_m c_m} = 2 \text{ より}$

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

現在知られている水銀の比熱は、0.0333 kcal/(kg °C)

(ブラックによる融解潜熱の測定 その1)

一定温度の室内に等しい質量の冷水と氷を放置し、温度変化を観測 (加熱法)。

	水	氷	32 °F の氷が解けて 40 °F の水になるのに、 630/30 = 21 倍の時間 (熱量) を要した。
質量比	1	1	
初期温度 (°F)	33	32	温度 (40 - 33) × 21 = 147°F 分の熱のう
最終温度 (°F)	40	40	ち、147 - (40 - 32) = 139°F 分が融解に
所要時間 (min.)	30	630	要した。

結論：水の融解潜熱は $\Lambda = 139 \text{ °F } c_w (= 77.2 \text{ °C } c_w)$ である。

(ブラックによる融解潜熱の測定 その2)

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)。

	氷	水	容器	$M_1[\Lambda + c_w(t_3 - t_1)] = M_2 c_w(t_2 - t_3)$ より
質量比	119	135		$\Lambda = c_w \left[\frac{M_2}{M_1} (t_2 - t_3) - (t_3 - t_1) \right]$
容器の水当量			8	$= c_w \left[\frac{135 + 8}{119} (190 - 53) - (53 - 32) \right]$
初期温度 (°F)	32	190	190	$= 143.6 c_w$
最終温度 (°F)	53	53	53	

結論：水の融解潜熱は $\Lambda = 140 \text{ }^\circ\text{F } c_w (= 78 \text{ }^\circ\text{C } c_w)$ である。

現在知られている水の融解潜熱は 80 kcal/kg

(ブラックによる**蒸発潜熱**の測定)

(一定条件での加熱蒸発)

50 °F の水 → 212 °F の水 : 4 min.

212 °F の水 → 212 °F の蒸気 : 20 min.

結論：蒸発潜熱は、 $(212-50) \times (20/4) = 810$ °F (= 450 °C) 相当の値。

(熱交換による凝縮) 50 °F の水 → 212 °F の水 : 4 min.

212 °F の 3 lb の蒸気を冷却凝縮して 103 °F の水にするのに、

38 lb の冷却水が 52 °F から 123 °F に上昇。

このとき、 $3[\Lambda + c_w(212 - 103)] = 38c_w(123 - 52)$ より、

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

結論：蒸発潜熱は、 790 °F c_w ($\simeq 440$ °C) 。

現在知られている水の蒸発潜熱は、540 kcal/kg 。

1.4 今日の熱と温度

SI による温度の定義

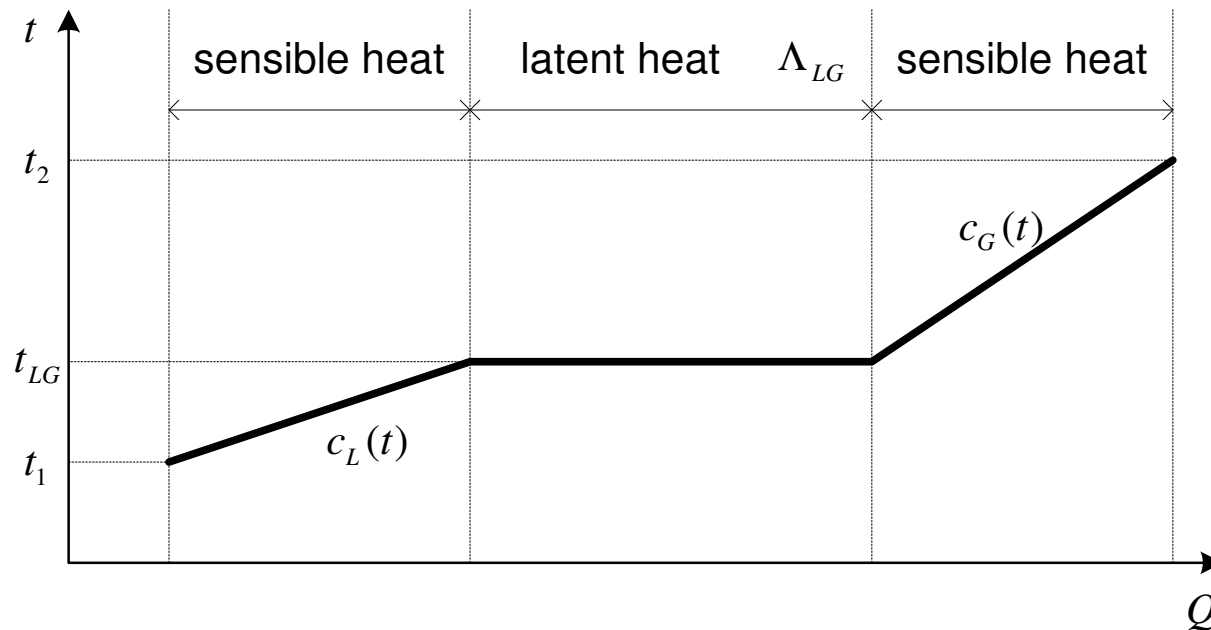
熱力学温度、K（ケルビン, kelvin）：
水の三重点の熱力学温度の 273.16 分の 1 を 1 K とする。

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。
水の三重点とは氷、水、水蒸気が共存する状態のことを言い、
定義により 273.16 K (= 0.01 °C)。

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

30 °Cの水 1 kg を加熱して 150 °Cの (過熱) 蒸気にする (標準大気圧)。



- (1) 100 °Cになるまで、ほぼ一定傾きで温度上昇。
(温度 t)/(熱量 Q) の傾きの逆数が**水の比熱** c_L 。
- (2) 100 °Cのままで温度一定。この間の加熱量 Q が**蒸発潜熱** Λ_{LG} 。
- (3) 100 °Cを越えて加熱すると、ほぼ一定傾きで温度上昇。

傾きの逆数が**蒸気の比熱** c_L 。

2 気体の法則

2.1 大気圧に関する知識

16 世紀の鉱山技師たちの経験：「吸上げポンプでは 30 フィートが限度」

ガリレオはトスカーナ大公から問われたが、明確には答えられなかった。

ガリレオの弟子のトリチェリとヴィヴィアニ：水銀を用いて実験 (1643)。

水銀柱高さ 76 cm、真空の存在、大気圧力の発見。

フランスの哲学者ブレーズ・パスカル：南仏の火山で、大気圧変化を実測 (1648)。

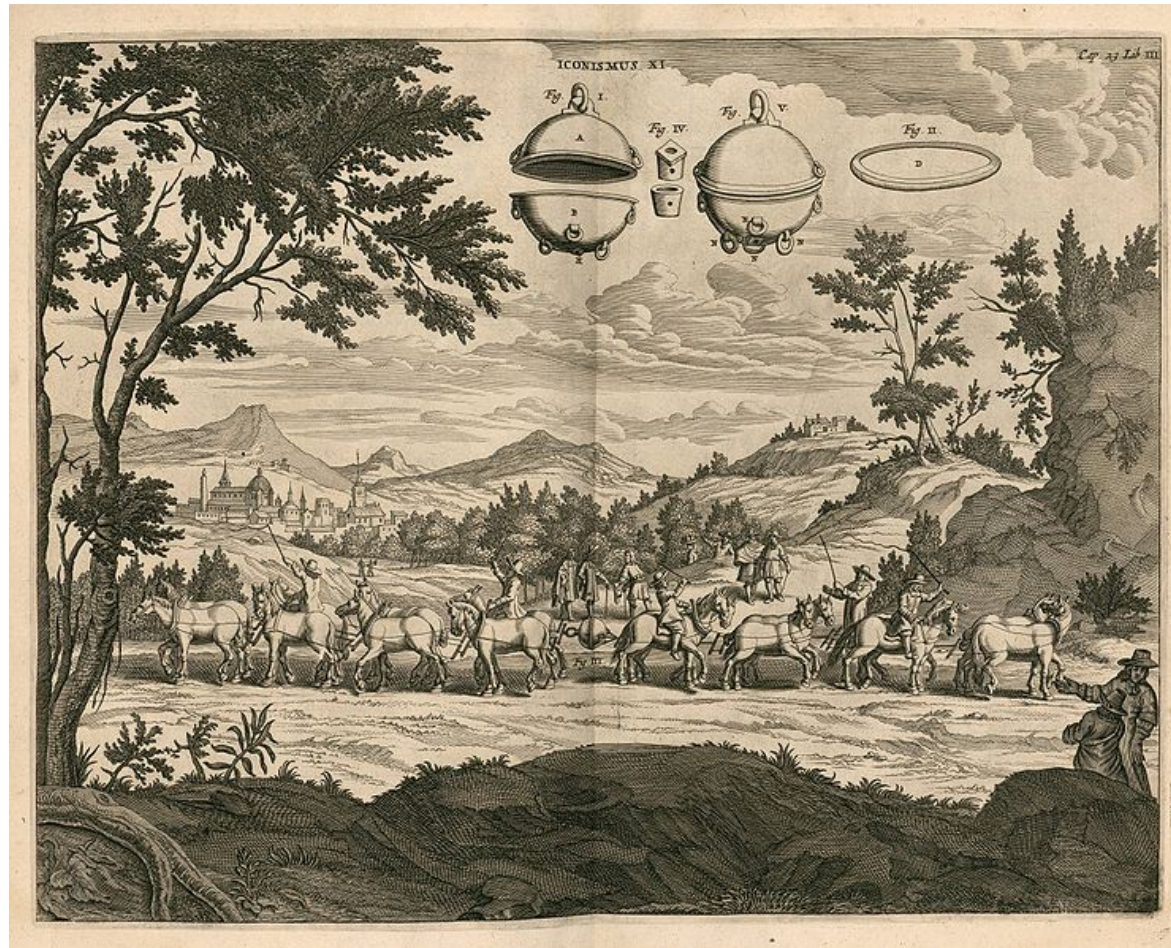
ドイツのマクデブルク市長 (醸造家、技術家) のオットー・フォン・ゲーリケ：

初の真空ポンプ、真空の実験 (1635-1645)

マクデブルクの半球 (公開実験)

Regensburg(1654), Magdeburg(1656), Berlin(1663)

マクデブルクの半球; 公開実験 (1656)



16 頭 (片側 8 頭) の馬で牽引。半球の直径 42 cm (50cm、51 cm の説もあり)

2.2 ボイル・シャルルの法則



ロバート・ボイル (1627-1691)

アイルランド王国のリスモア (Lismore) 生まれ。

父は初代コーク伯爵。

英国王立協会設立 (1660 年) と発展に尽力。

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製作し、種々の実験。

気体の「ボイルの法則」を発見 (1662 年)。

他に、音の伝播、水の凍結、光の屈折などの研究。



ロバート・フック (1635-1703)

イングランド南部のワイト島生まれ。

父は王党派の英国国教会の聖職者。

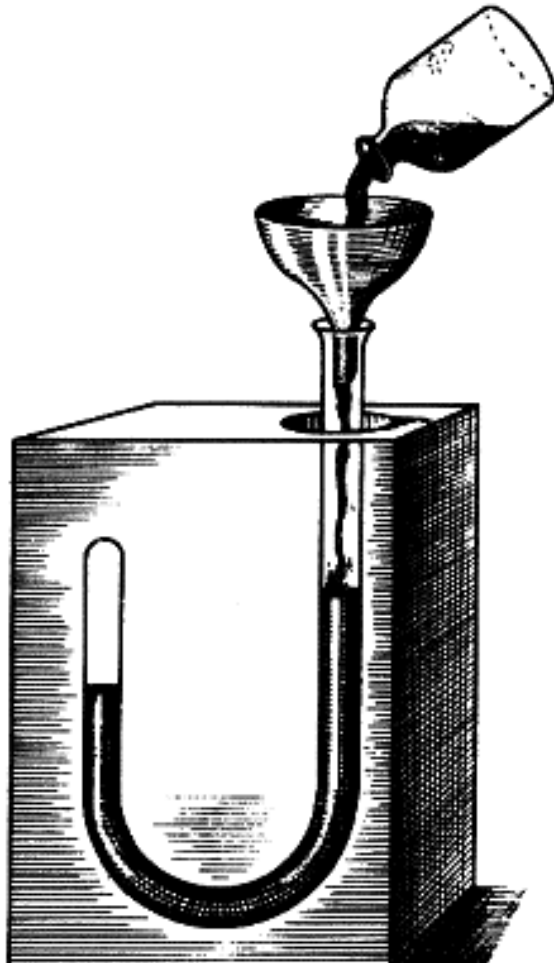
1655-1662 年の間、**ボイルの助手**を務める。

空気ポンプの製作、操作、実演を担当。

設立後の王立協会専属の実験主任、幹事。

反射望遠鏡の製作、化石の研究、初期の進化論、
光の波動説、物体の熱膨張、測量法等の研究。

重力の逆 2 乗則につき、ニュートンとその先取権
を争った。



実験方法

ガラス管の **U 字管**を作り、その一端を密閉。

短管：12 in. (30.5 cm)、長管：8 ft.(2.44 m)

1/4 in. 刻みの**目盛**

吹き抜けの階段を利用して、鉛直に保持。

短管の閉鎖端に最初 12 in. 長の空気を閉じ込め、
長管から**水銀**を追加して空気を加圧

空気の体積 (長さ) と圧力 (水銀柱差) の関係を測定

管を木箱に収容。 ← **飛散対策**

A table of the condensation of the air.

<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
48	12	00	Added to 22½ makes	29½	29½
46	11½	01½		30½	33½
44	11	02½		31½	31½
42	10½	04½		33½	33½
40	10	06½		35½	35 -
38	9½	07½		37	36½
36	9	10½		39½	38½
34	8½	12½		41½	41½
32	8	15½		44½	43½
30	7½	17½		47½	46½
28	7	21½		50½	50 -
26	6½	25½		54½	53½
24	6	29½		58½	58½
23	5½	32½		61½	60½
22	5½	34½		64½	63½
21	5¼	37½		67½	66½
20	5	41½		70½	70 -
19	4½	45 -		74½	73½
18	4½	48½		77½	77½
17	4¼	53½		82½	82½
16	4	58½		87½	87½
15	3½	63½		93½	93½
14	3½	71½		100½	99½
13	3¼	78½		107½	107½
12	3	88½		117½	116½

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 counter-balanced 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.

実験結果

A: 気柱長さ (in.) ← 体積

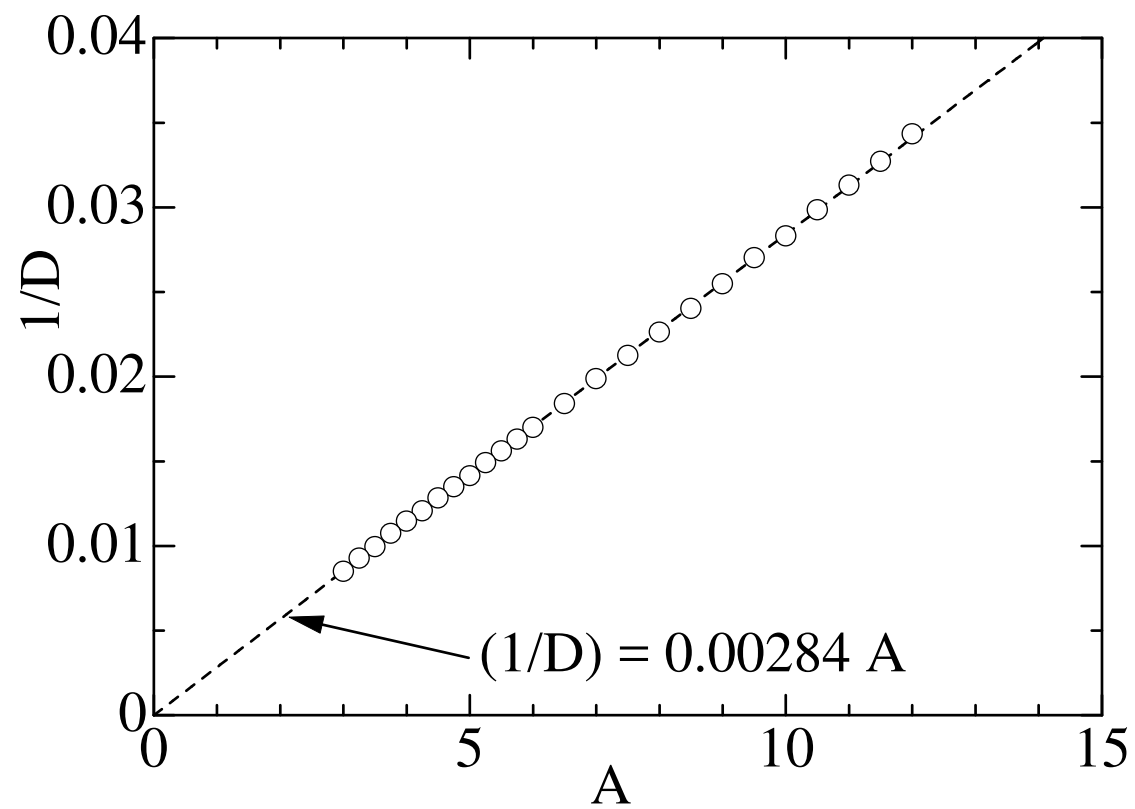
B: 水銀柱差 (in.)

C: 大気圧 (in. Hg) $29\frac{1}{8}$ の誤り

D: 圧力 (in. Hg) = B + C

E: (D の予測値)

体積 A と 圧力 D の関係は？



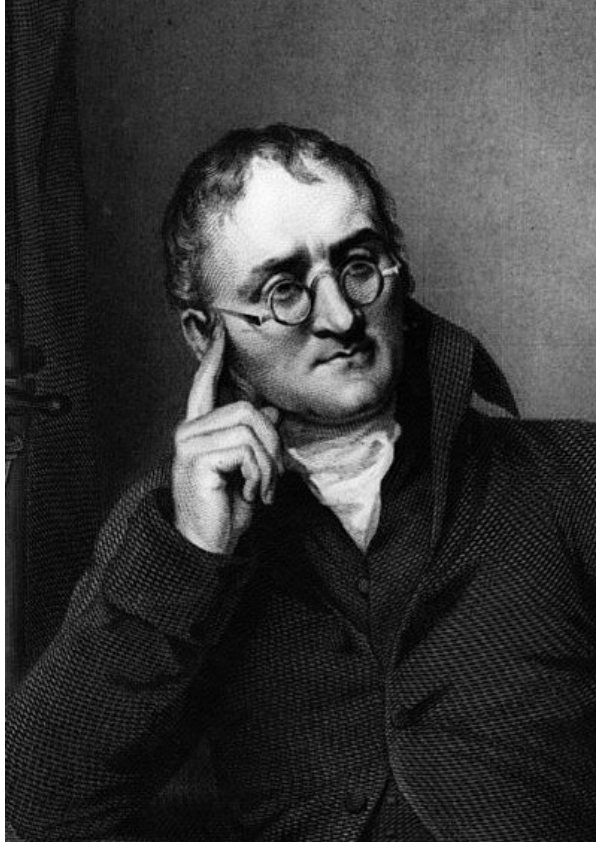
$1/D$: 1/压力
A : 体積



ジャック・アレクサンドル・セザール・シャルル
(1746-1823) フランスの物理学者、気球乗り。

1783 年、世界で初めて水素気球で飛行。
高度 1,800 ft. (550 m) まで上昇。

気体の温度と体積の関係を記述 (非公表)。
後年、フランス国立工芸院物理学教授となる。



ジョン・ドルトン (1766-1844)、
イングランド北部のカンバーランド州生。

マンチェスター・アカデミー教師。
気体の熱膨張法則 (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。

原子説を強く主張。

- (1) 元素は質量の異なる原子で構成される。
- (2) 化合物は異なる原子が一定比率で結合。
- (3) 化学反応は原子同士の結合の変化。
- (4) 原子の不生、不滅。

ジュールは家庭教師ドルトンに師事。



ジョセフ・ルイ・ゲイ＝リュサック (1778-1850)。
フランスの化学者、物理学者。

エコール・ポリテクニーク、国立土木学校で学び、
のち、エコール・ポリテクニーク、ソルボンヌ大
学、パリ植物園等の教授を務めた。

シャルルの法則の発見、高度に伴う大気組成の変
化、ホウ素の単離、気体反応の法則、ヨウ素の発
見等、近代化学の発展に大きく貢献した。

シャルルの法則

1802 年、フランスの**ゲイ＝リュサック**は、「一定圧力のもとで、気体は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発表。

同様の内容を 1801 年に**ドルトン**が、1787 年に**シャルル**が発見していたと判明。**ゲイ＝リュサック**もそのことを認めた。今日では「**シャルルの法則**」と呼ばれる。「**ゲイ＝リュサックの法則**」と呼ばれることも多い。

ゲイ＝リュサック測定による体膨張率は $\alpha = 0.375 / 100 = 1/267$ ^{*1}であり、0 °C の圧力、体積、絶対温度 を P_0, V_0, T_0 とし、**ボイルの法則**と合わせて、

$$PV = P_0 V_0 (1 + \alpha t) = P_0 V_0 \frac{T}{T_0} \quad \text{または} \quad \frac{PV}{T} = \frac{P_0 V_0}{T_0} \quad (1)$$

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



アメデオ・アボガドロ (1776-1856)

現**イタリア**、トリノの生まれ。
法学と哲学を学び、**法律事務所**を開いた。

1800 年頃、数学と物理学の研究

1809 年、ヴェルチェッリ王立大学の物理学教授。

1811 年、のちの**アボガドロの法則**を発表。

1820～1850 年、**トリノ大学**の理論物理学教授。

途中、政治的理由で 12 年ほど弁護士。

1856 年、トリノで没。

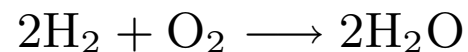
アボガドロの法則

「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」

ドルトンの原子論では、単元素気体は 1 個の原子から構成され则认为ていた。

水素 2 容積 + 酸素 1 容積 → 水蒸気 2 容積 (気体反応の法則)：不可解？

アボガドロの仮定： 気体原子は**分子**を構成、 分子は等しい体積を占有。



この主張は長い間「仮説」とされ、20 世紀初めになって分子の存在が確認された。

式 (1) の P_0V_0/T_0 は気体に含まれる分子数 (またはモル数 n) だけに比例。

$P_0V_0 = nR_0T_0$ と置き換えて、

$$PV = nR_0(267 + t) = nR_0T \quad (2)$$

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

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

$$PV = nR_0T \quad (3)$$

R_0 は一般ガス定数 (1 mol または 1 kmol あたりのガス定数)。

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

これは、ボイルの法則、シャルルの法則、アボガドロの法則を合わせたもの。

1mol(または 1 kmol) に含まれる分子数 (アボガドロ数) は

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

技術分野で用いられる気体状態方程式

気体の量を表すのに、多くは質量 (kg) を使用。

m kg の気体について、式 (2) は次式となる。

$$PV = mRT, \quad R = \frac{R_0}{M} = \frac{\text{一般ガス定数}}{\text{分子量}} \quad (4)$$

R は 1 kg あたりのガス定数 (単位は J/(kg K) 等)。

実際の気体では、上式から多少はずれる。

理想気体 (完全ガス) : 式 (3) または (4) に従う気体

実在気体 : 実在の気体

気体の比熱

体積を一定としたときの比熱：定積比熱 c_v

圧力を一定としたときの比熱：定圧比熱 c_p

その他の条件での比熱は、この二つの組み合わせで表示可

理想気体であれば、両比熱は温度だけに依存 (ジュールの法則)。
両比熱の間には次の関係がある (マイヤーの関係式)。

$$c_p - c_v = R \quad (5)$$

また、 c_p/c_v の値 (比熱比 κ) 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)

したがって、

$$c_v = \frac{R}{\kappa - 1} \quad c_p = \frac{\kappa R}{\kappa - 1} \quad (6)$$

いくつかの気体の分子量、ガス定数、比熱比等の値：テキストの表参照。

物質の状態と状態量

熱力学では、個々の分子や原子の挙動を度外視。

巨視的な量 (熱力学的状態量、単に**状態量**) を使用。例：圧力、体積、温度など

示強性状態量：同じ物体を複数考えても値の変わらないもの (圧力、温度など)

示量性状態量：同じ物体を 二つ考えると値が 2 倍になるもの (体積など)

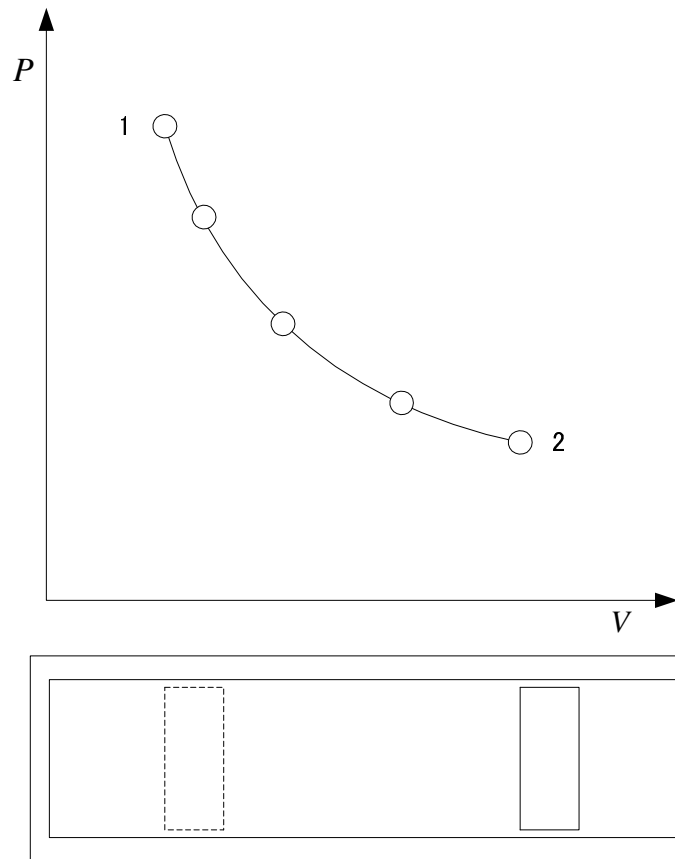
単位質量あたりの値を**比体積**等と称し、対応する**小文字**で表記 (v など)。

成分一定の物質では、 P, V, T の間にある関係式が成立：**状態方程式**

$$f(P, V, T) = 0 \quad (\text{気体・液体・固体を含めて成立})$$

$PV = mRT$ は理想気体の状態方程式

状態変化と線図



$P - V$ 線図の例

系の状態:

→ 2 つの状態量 (平面上の**点**) で表示。

ゆっくりした状態変化 (準静的変化):

→ 平面上の**曲線**で表示。

3 初期の蒸気機関の歴史

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

採鉱と冶金分野が急速に進歩拡大

鉱石、石炭採掘の坑道が深くなり、**鉱山の排水問題**が深刻化。

排水動力：人力、馬、水車。より大きな動力源の需要。

応用力学や産業技術に関する当時の体系的な著作の例：

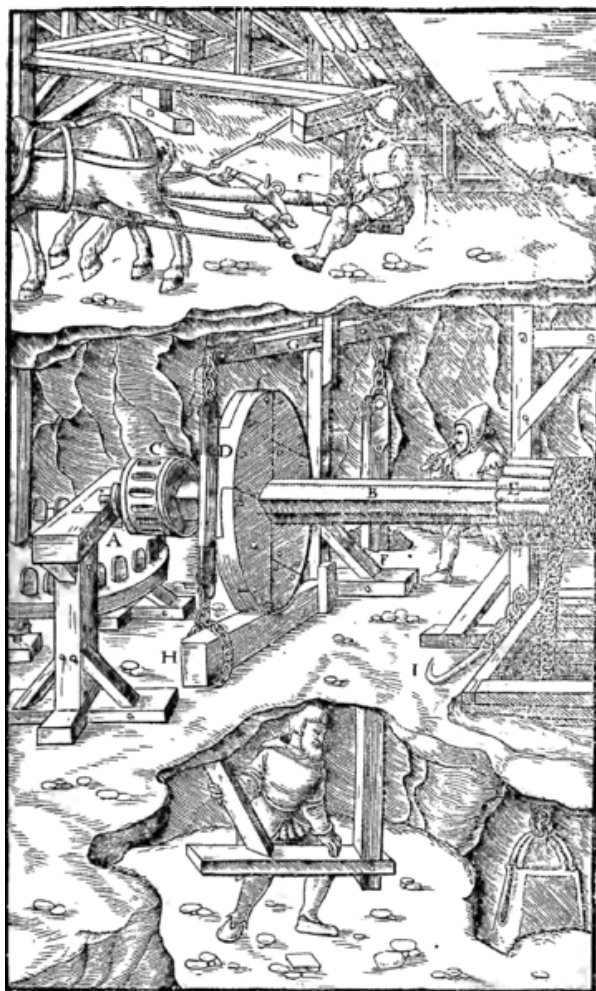
ゲオルク・アグリコラの「**デ・レ・メタリカ**」(1556)：

当時の最先端の鉱山技術 (採鉱, 採鉱, 製錬, 精錬 等) のスケッチ

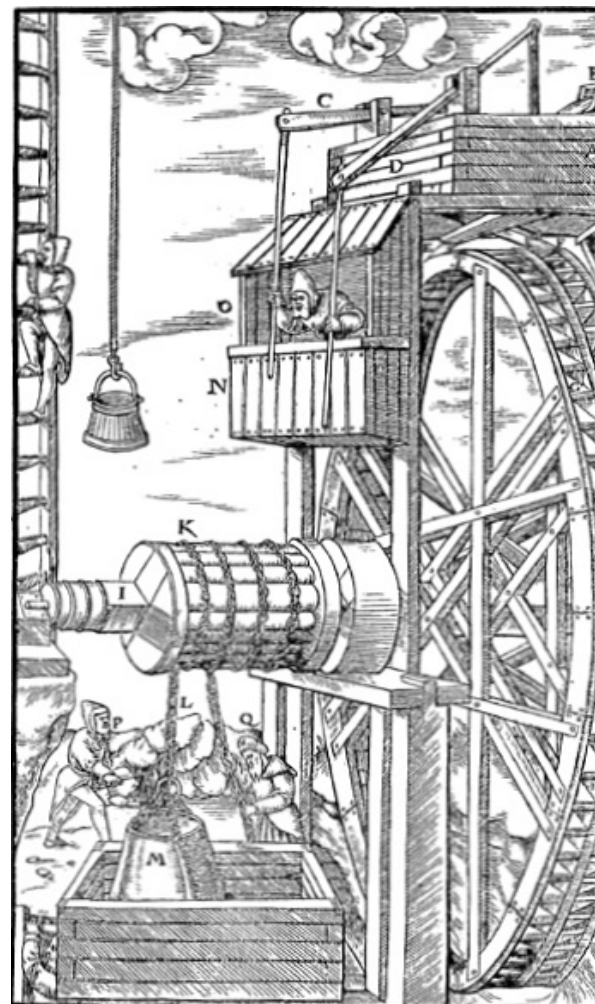
Q1: 産業革命は、なぜ生じたか？

Q2: 熱機関は、どんな役割を担ったか？

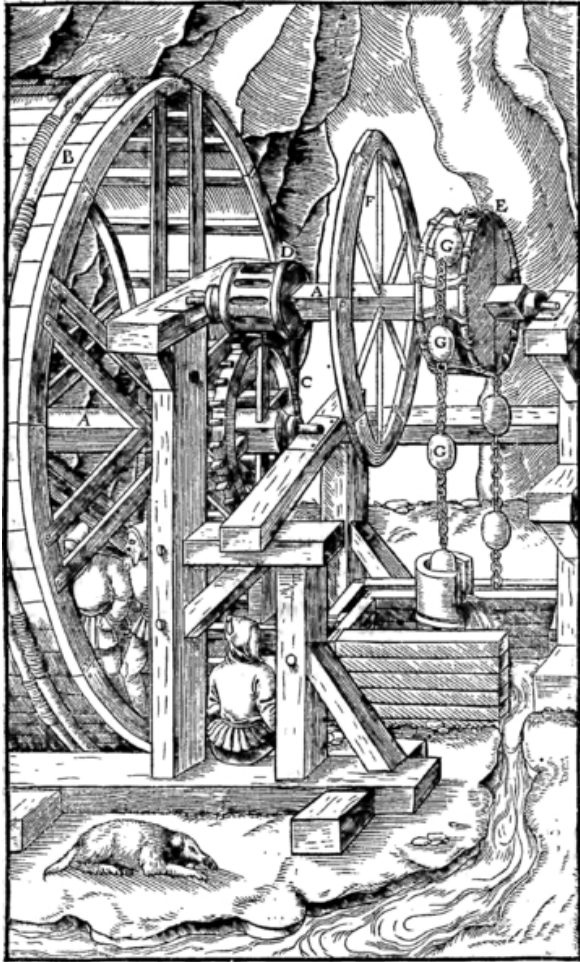
Q3: 最初の熱機関は、なぜ蒸気機関であったのか？



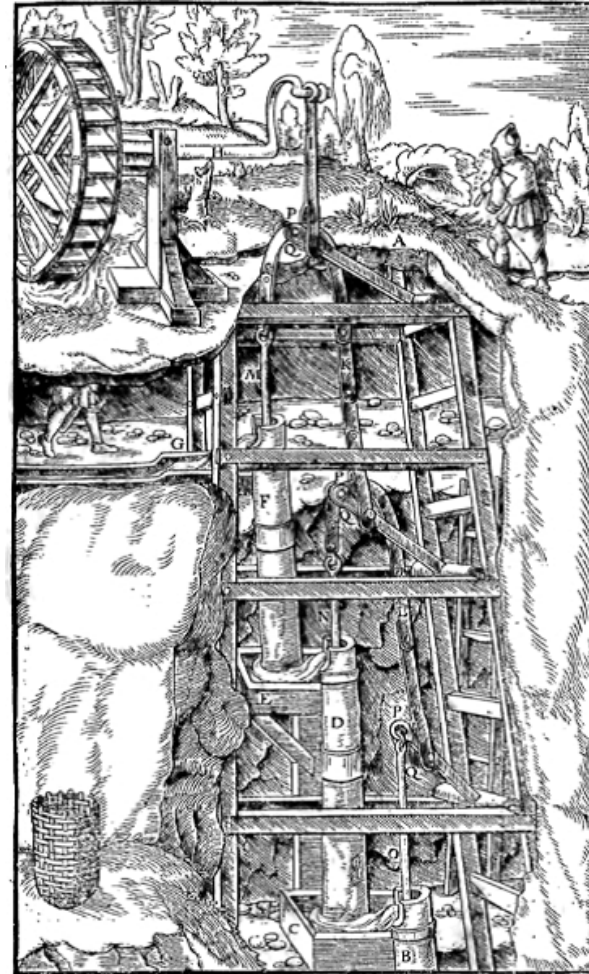
(a) 馬力による巻上機



(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

3.2 パパン

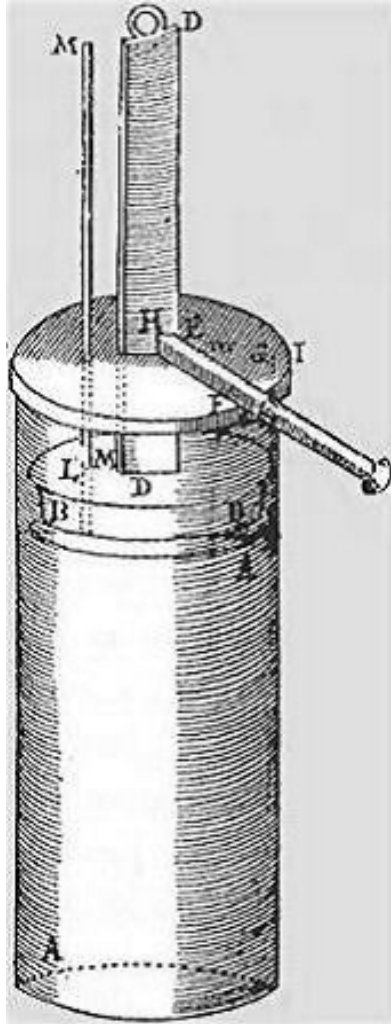


ドニ・パパン (1647-1712)、**フランス**出身。
パリでホイヘンスの助手、**真空**に興味。

1675 年にロンドンへ、ボイルとフックの助手、
沸点の圧力依存性。**圧力調理器**と**安全弁**の発明。

1687 年以降、現ドイツ (マールブルク等) で、
潜水鐘、**ピストン式蒸気機関**等の考案・発明。

1707 年に再度イギリスへ、ロンドンで死去。

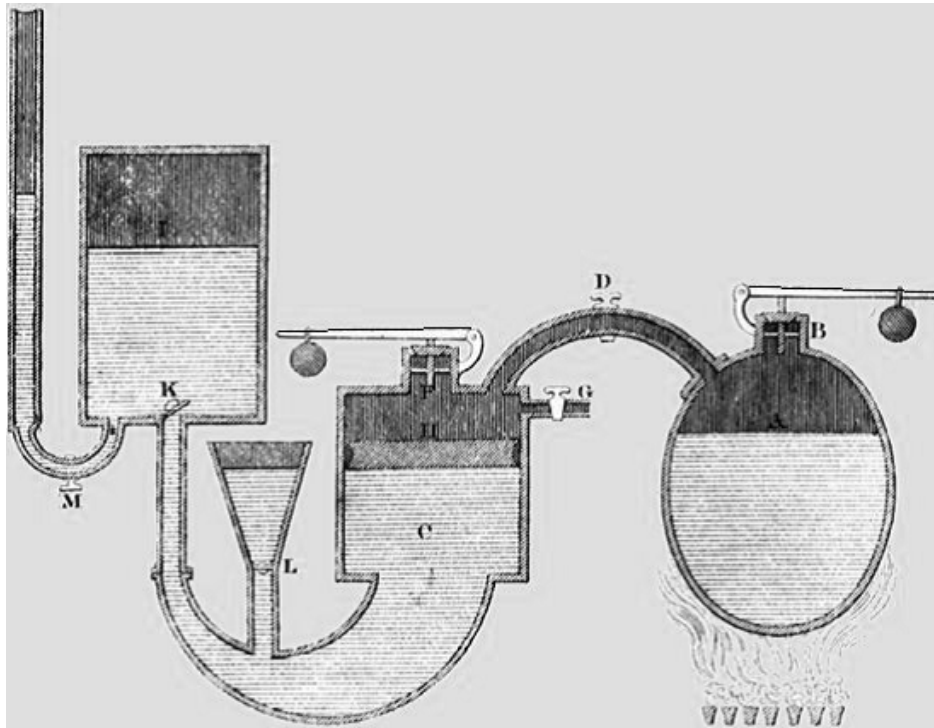


パパンの最初の蒸気機関模型 (1690 年)

動作：

- (1) シリンダ A とピストン B の中に少量の水。
ピストンの小孔から空気を排出して栓 M で塞ぐ。
- (2) シリンダの下に直接火を当て、
発生蒸気でピストンを押し上げる。
- (3) ピストンが上端まで上がれば、
ピストン棒 D に横木 E を差し込んで固定。
- (4) 火を取り去り、ピストン棒に結んだロープで
滑車を介して積荷を吊るす。
- (5) 横木を外して、シリンダに水をかけて蒸気を凝縮。
- (6) 大気圧によりピストンが下降し、積荷を引き上げる。

パパンの 2 番目の蒸気機関 (1707 年)



最初の案からの変更：

- (1) ボイラがシリンダから分離。
- (2) 蒸気の圧力で水を排出。
- (3) 蒸気は大気中へ放出。

← セイヴァリ機関の影響

これは、

- (1) ピストンを用いない。
 - (2) 蒸気の凝縮を利用しない。
- という点で、最初の案の後退。

3.3 セイヴァリ

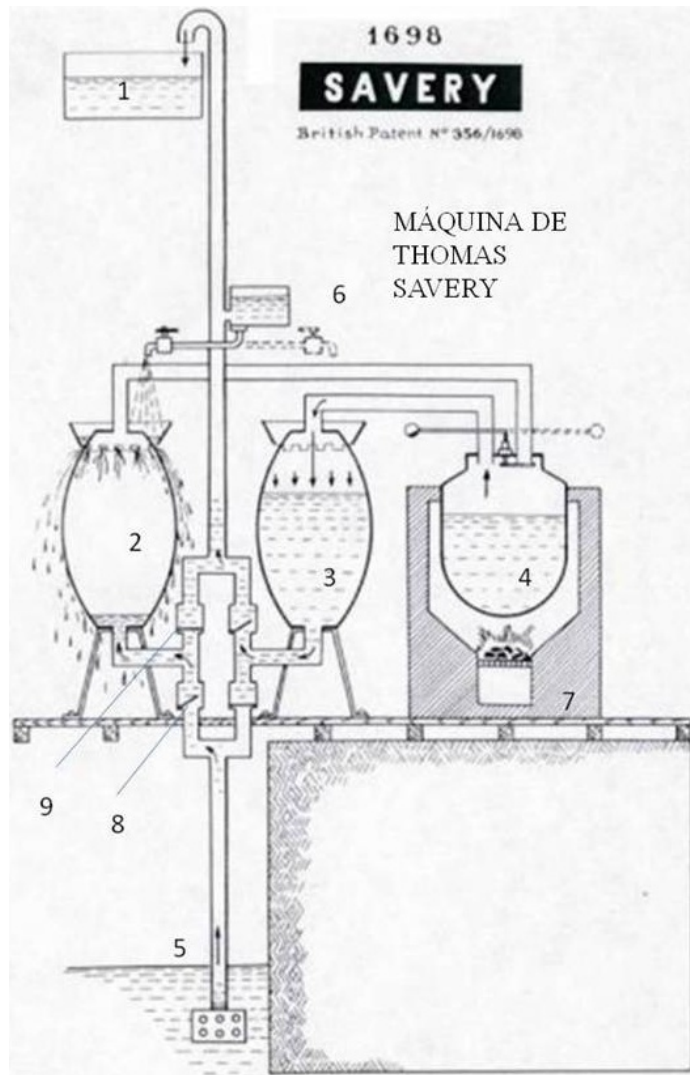


トマス・セイヴァリ (1650 年頃-1715 年)

イングランド南西部のデボン州生まれ。
軍事技術を学び、海軍の軍人。
ガラス・大理石の研磨機や
人力の外輪船などの特許を取得。

鉱山から排水するための
最初の蒸気機関の特許を取得 (1698 年)。

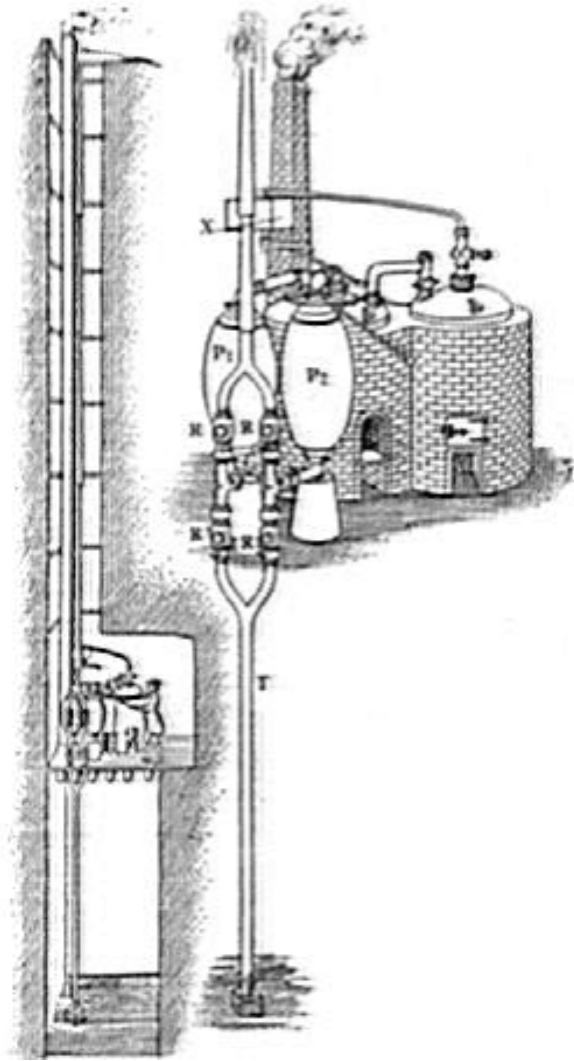
実際の鉱山での使用に不可。



セイヴァリ機関の動作

- (1) 容器 2 を水で満たし、ボイラ 4 からの弁を開く。
- (2) 容器 2 へ蒸気が入り、水を上部弁 9 から水槽 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る。
- (4) 容器内の蒸気が凝縮して圧力が下がり、下部弁 8 を介して水を吸い上げる。
- (5) 容器 2 内が水で満たされると冷却をやめ、以上を反復する。

容器等は 2 セットを対にして、交互に動作。



セイヴァリ機関の重大な問題点

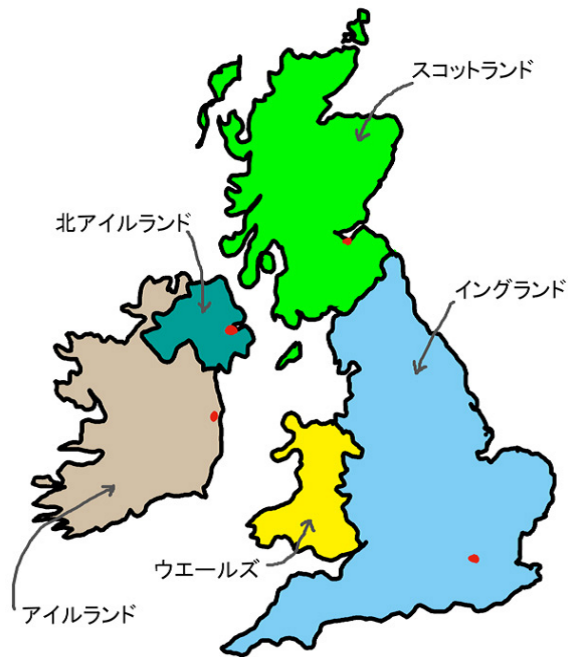
- (1) 容器内の水を押し出す**高圧の蒸気**を要する。
管継ぎ手の破損、ボイラ爆発の危険性大。
- (2) 機関全体を**坑道の深い位置に設置**を要す。
設置，運転に困難。故障時に水没。
- (3) 多段にするのが困難。
- (4) 熱の大半は、**揚水する水や容器の加熱**に費やされる。

鉱山への応用を試みたが失敗。

低揚程用途への適用例あり。

(宮殿や噴水への給水、水車への揚水など)

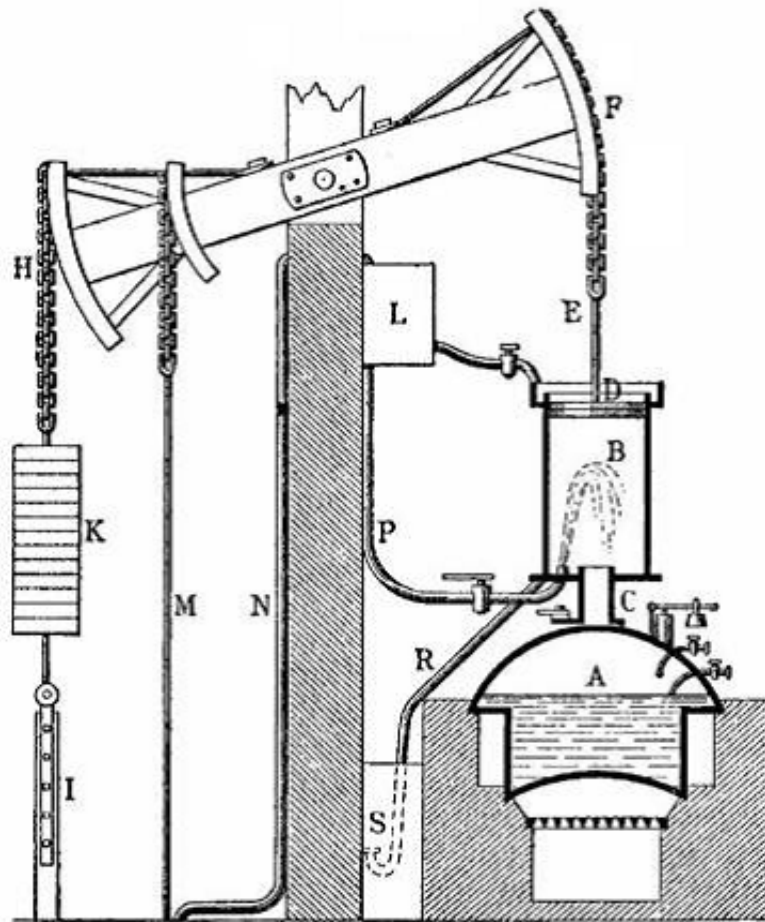
3.4 ニューコメン



トマス・ニューコメン (1664-1729)；肖像画なし
イギリス、デヴォン州生まれの職人、発明家。
一家は敬虔な**バプティスト**教徒。
産業革命の基礎の**蒸気機関**の**実質上の発明者**。

彼は家業の金物商となり、鉱山の排水問題に従事。

同僚の職人の**ジョン・コウリー**と共に、
最初の実用的蒸気機関を建造 (1712)。
自身でイングランド内に 7 台程度建造。
セイヴァリの特許のもとで、同形の機関が
英国・ヨーロッパ各地で建造された。



ニューコメン機関の構造

- A: ボイラ
- B: シリンダ
- C: 蒸気弁
- D: ピストン
- 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

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

ニューコメン機関には種々の技術的工夫があった。

(シリンダとピストンの使用) 当時のシリンダの直径はせいぜい 18 センチ程度で、大口径シリンダの製作は至難の業。

シリンダとピストン間の機密性保持に工夫が必要 (皮ひも、麻繊維、水封)。

(水噴射による凝縮) 当初の試作段階では、シリンダを外部から冷却していた。

実験中の事故を機に、冷水噴射方式を思いついた。

(漏らし弁) 蒸気や冷水と共に持ち込まれる空気の除去。

蒸気流入行程で凝縮水の排出 (排水管)、混入空気の排出 (漏らし弁)。

逆止弁機能を要する。

(自動運転機構) ビームにプラグ・ロッドを吊り下げ、留め釘とリンクで弁開閉。

重りの落下を併用して急開、緩閉を実現。

蒸気量不足時に機関を待機状態とする工夫。

(ボイラ) 醸造用の銅製ボイラの活用

(廃熱の回収) ピストン背面の温水、シリンダの凝縮水をボイラ給水に利用

(冷却水の補給) ビームで補助ポンプを駆動

ニューコメン機関の普及

鉱山での用途では、セイヴァリ機関よりはるかに優れていた。

1712 年の成功以降、イギリス中の炭鉱、鉱山に設置。

セイヴァリの特許期限 (1733 年) までに、イギリスとヨーロッパ大陸内で少なくとも 104 台のニューコメン機関が建造。

1769 年、ワットが**分離凝縮器の特許**を取得、ニューコメン機関を大きく改良。

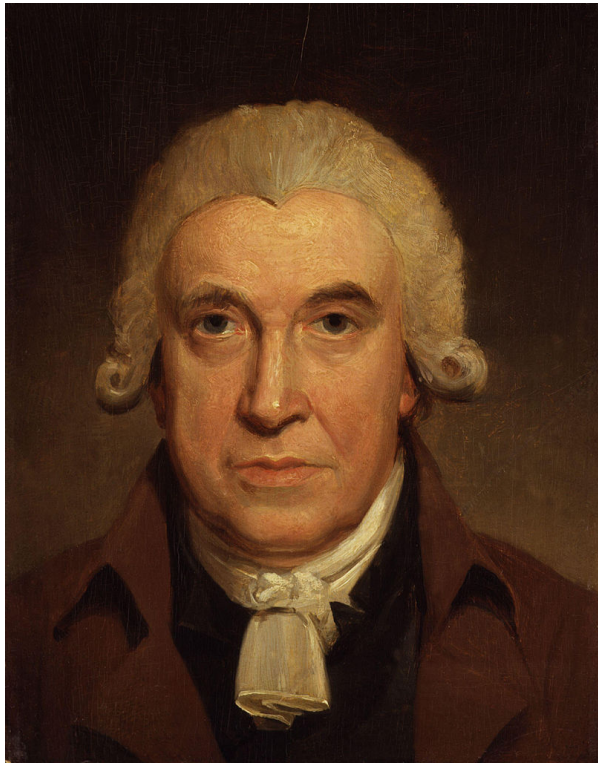
1776 年、ワット機関建造開始。

コーンウォールの錫鉱山等から、**徐々にワット機関**に置き換わる。

ニューコメン機関はワット機関より**安価で、容易**であったため、ワット特許期間内 (1770-1800 年) でも、ワット機関より多くのニューコメン機関が建造。

18 世紀の間でイギリスとヨーロッパ大陸で建造されたニューコメン機関は、**1500 から 2000 台**にのぼった。

3.5 ワット



ジェームズ・ワット



マシュー・ボルトン

ジェームズ・ワット (James Watt, 1736-1819)

スコットランド、グラスゴー近郊グリーンノックで船大工，海運業者の家に生誕。

18 歳の時，ロンドンで 1 年間，計測機器の製造技術を学ぶ。

グラスゴー大学内に実験機材の小さな工房を持つ。

大学所有の**模型のニューコメン蒸気機関**の修理を担当。

ニューコメン機関: シリンダの再加熱に多量の蒸気を消費。

改良策として、**分離凝縮器**を考案 (1765 年)。

同大学の**ジョゼフ・ブラック**等とも交流。

ブラックの紹介で実業家**ジョン・ローバック**と共に起業 (1766 頃)。

1769 年：分離凝縮器特許取得 1774 年：ローバックが事業失敗、破産

バーミンガムの**マシュー・ボルトン**が特許使用権を引継 (1774)

1775 年：特許期間が **1800 年**まで延長。 **精密中ぐり**技術開発者の協力。

ボルトン・ワット商会を設立。

(最初の動力機関)

1776 年：鉱山のポンプ動力用として建造、コーンウォール地方で好評。

シリンダ径 50 インチ (127cm) 以上、長さ 24 フィート (7.32m)

ワットの設計を基に、他の製造業者が製作。ワット商会在技術指導。

技術料：節約できた石炭の 1/3 に相当する金額。

(動力機関の改良)

回転運動機構 (研磨, 紡績, 製粉等への応用)

当初、**クランク機構**の適用を検討。元部下のピッカードが別途に特許取得。

ワットは 1781 年に**遊星歯車機構**の特許取得。

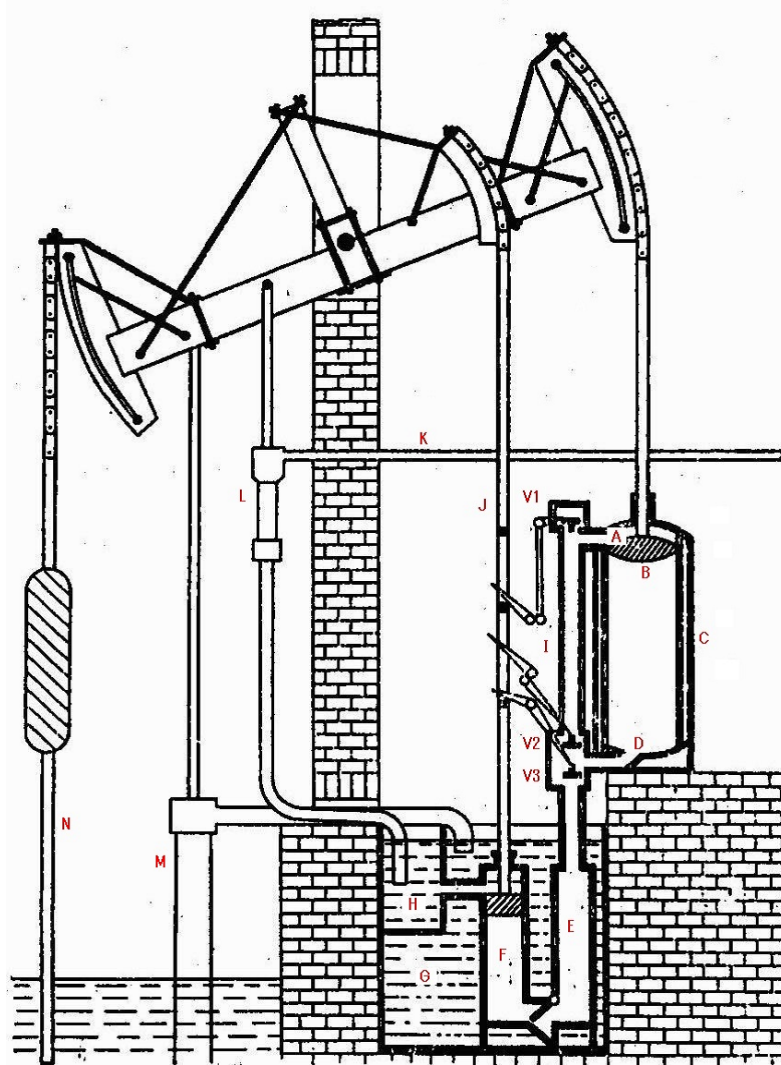
その他の改良

複動機関 ピストン両面に蒸気が作用。

蒸気指圧計 (ただし、企業秘密扱い)、シリンダ内の P-V 関係測定。

平行運動機構、ビームの円弧運動をシリンダ棒の直線運動に変換

遠心调速機 (ガバナー) 回転数の制御。



ワットの主な改良点

- (1) 独立した容器 (**分離凝縮器**) で蒸気を凝縮。
- (2) シリンダを**蒸気で包む**。
- (3) **蒸気の膨張力**を利用する可能性 (ただし、ワットは固く禁止)。
- (4) 系統から**空気を除去**する方法。
- (5) 摺動部の**気密保持**の工夫。



遊星歯車機構

往復運動を回転運動へ変換。

一般的方法に、クランク機構あり。

ワットが試験中に、当時の従業員

ジェームズ・ピッカードが取得。

対抗して、遊星歯車機構の特許を取得。

(1781 年)

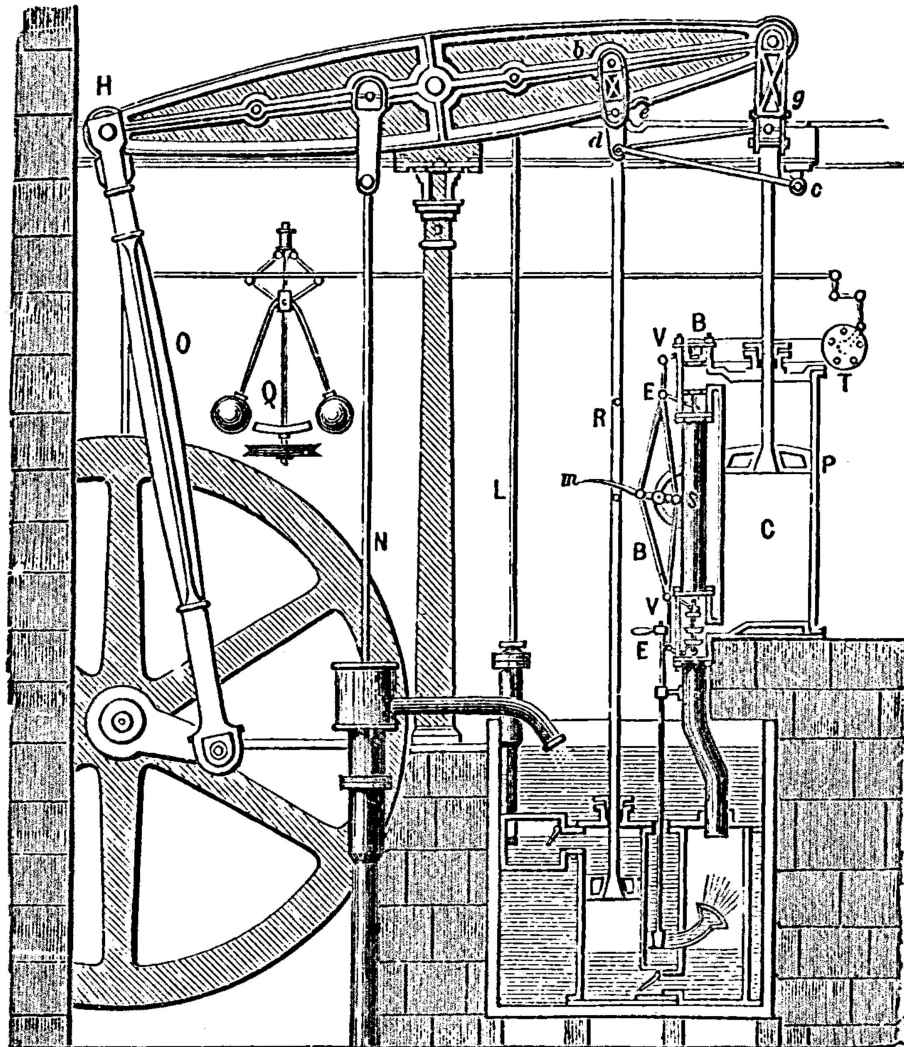
従業員ウィリアム・マードックが考案。

ロンドン博物館に現存。

図の下中央左側の歯車は駆動軸に繋がり回転する (太陽歯車)。

右側歯車が連接棒と一体となり (回転せずに)、太陽歯車の周りを回る (遊星歯車)。

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?)。



複動式機関

(1) シリンダ C の左上端・下端
にスライド弁。

給気口 V ・排気口 E に切換え。
給気口はボイラに、
排気口は凝縮器に繋がる。

(2) 凝縮器で冷水噴射、凝縮。
復水ポンプ (真空ポンプ) R で
凝縮水と空気を排出。

(3) **遠心式調速機** Q で
蒸気弁 T の開度調整、
機関の回転数を制御。

- (4) 真空ポンプ棒 R は**制御棒**を兼ね、スライド弁を動かす制御レバー m を操作。
- (5) **平行運動機構** g-d-c で、ピストン P とビームを繋ぐ。
- (6) **鋳鉄ビーム**を用い、重心位置近くを支点とす。
- (7) 回転部分には**クランク機構**。

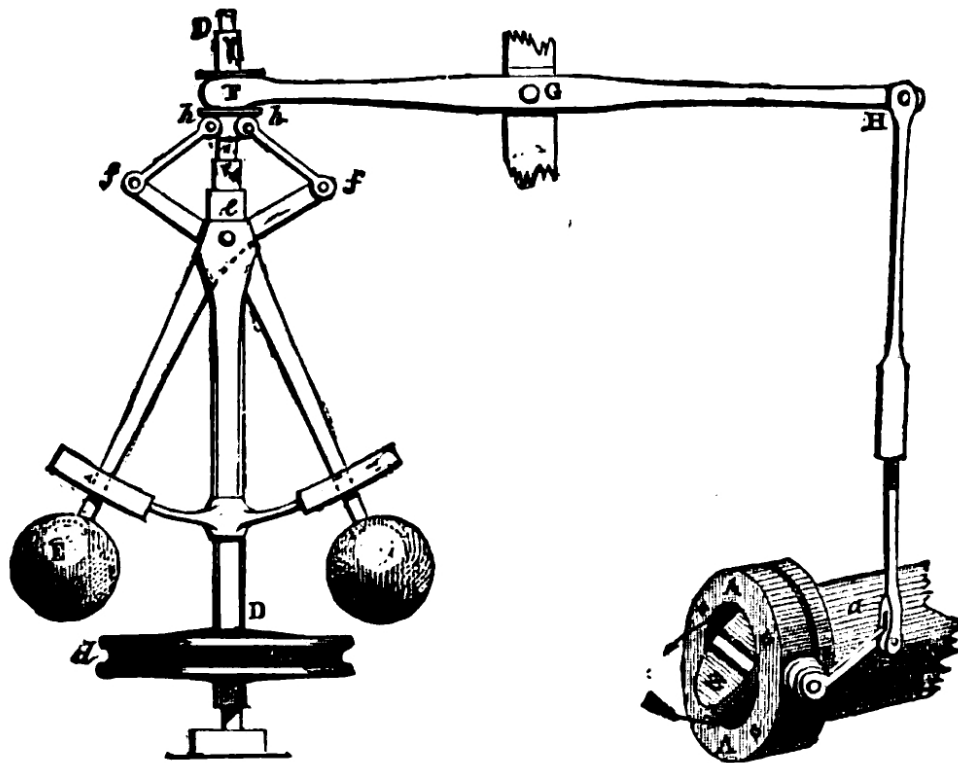
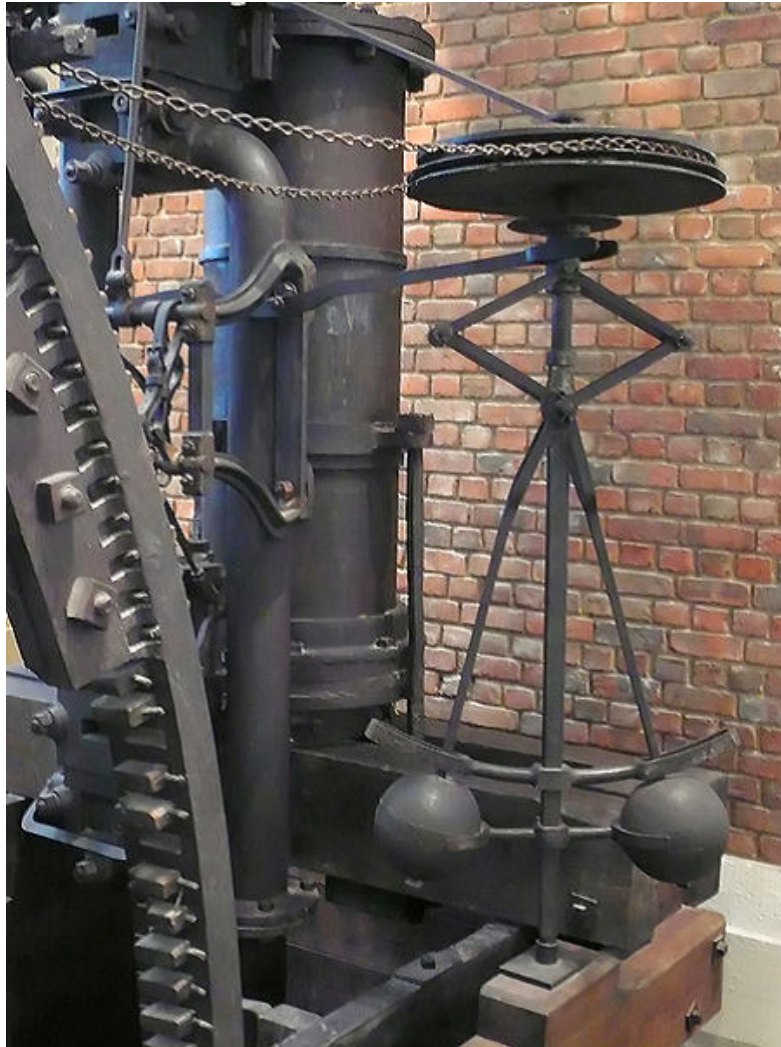


FIG. 4.—Governor and Throttle-Valve.

ワットの调速機

- (1) 回転数が増加すると、
- (2) 回転重りが広がり、
- (3) リンク上端 h が下がり、
- (4) てこの右端 H が上がり、
- (5) 蒸気弁開度が減少し、
- (6) 蒸気流量が減少し、
- (7) 回転数上昇が止まる。



現存する「ワットの調速機」

フィードバック制御の最初の例。
類似の調速機は風車小屋等で既に実用。
ワット自身も特許申請せず。

現代の調速機は，これを油圧増幅。

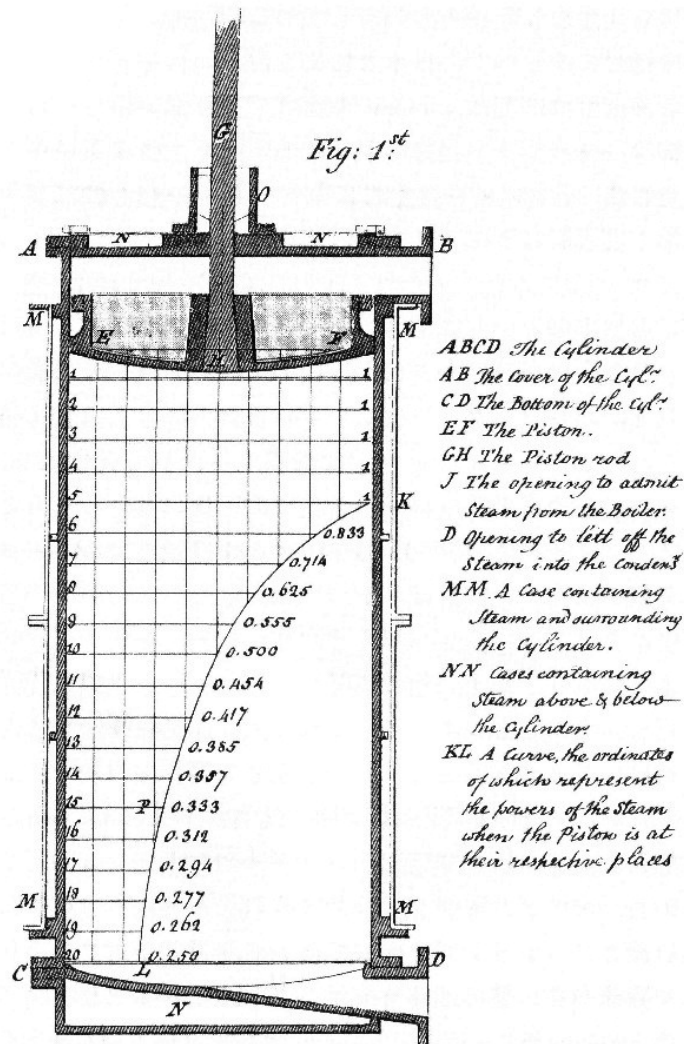
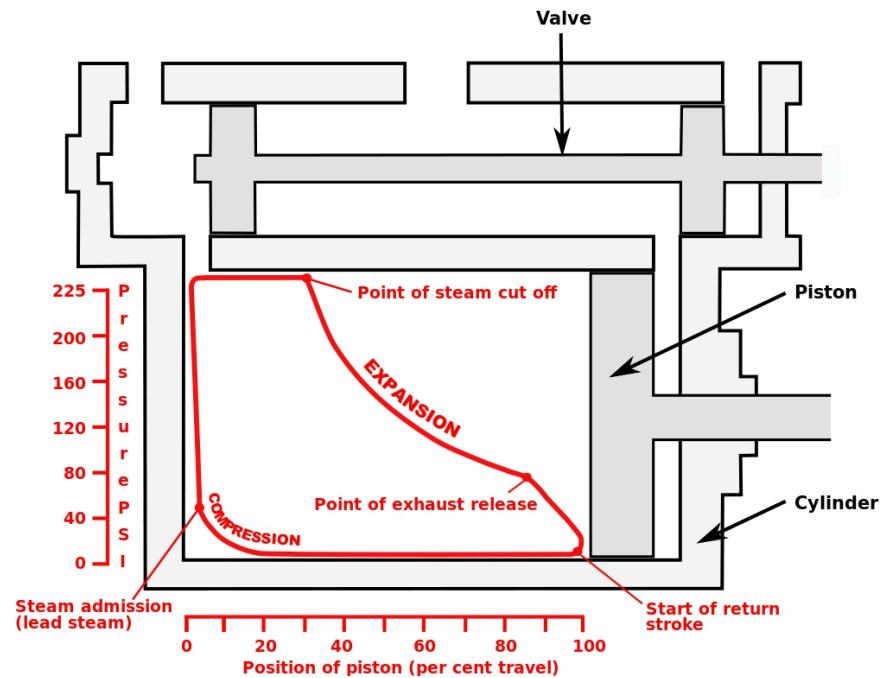


図 18.8 ワットの膨張原理の図解 (1782 年の特許明細書より)

蒸気の膨張力の有効利用

- (1) 蒸気出口 D の排気弁が開いている時、**ピストン下方はほぼ真空**となっている。
- (2) ボイラの蒸気を B から**ピストン上方**へ入れ、ピストンを押し下げる。
- (3) 行程の $1/4$ の位置 K に来たとき、蒸気弁を閉じる。
- (4) ピストン上方の圧力 KL は徐々に低下。
- (5) ピストンが下端に來れば、ピストン上方の排気口を開き、蒸気を凝縮器へ排出。
- (6) $1/4$ 量の蒸気で $1/2$ 以上の効果 (仕事、図の面積) が得られる。



ワットは機関の性能の改良のために**インジケータ線図** (P-V 線図) を使用し、
そのことを長い間**商業上の秘密**にしていた。

ワット以降の蒸気機関とワットが果たした役割

(1) ニューコメン機関を大きく発展させたのはワットの功績。

(2) ワットは高圧蒸気の使用を頑なに拒んだ。

利点：事故防止に繋がった。名声・事業が維持できた。

欠点：性能向上が制限された。

(3) 1800 年に基本特許が切れると、高圧機関が多数作られた。

1781 年: ジョナサン・ホーンブローワーが複式機関 (多段機関) の特許取得。

(ワットとの係争に敗れる)

1799 頃: リチャード・トレヴィシックが高圧機関を稼働。1802 年: 特許取得。

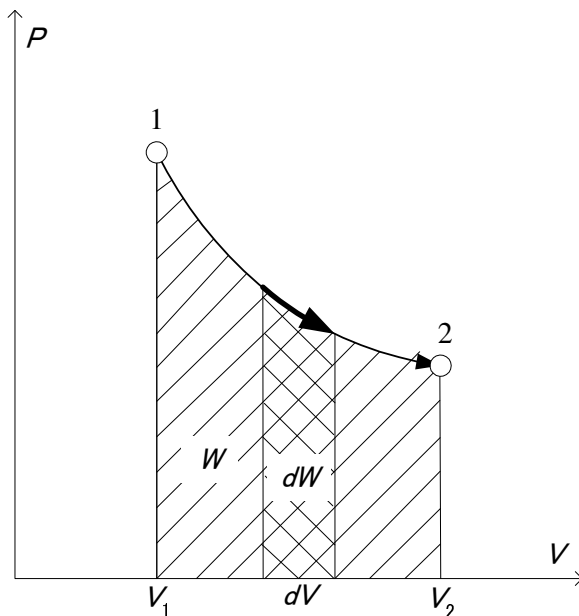
1804 年: アーサー・ウールフが高圧複式機関を発明し、翌年特許取得。

(4) 蒸気圧力は、1810 年の 3.5 気圧から 1830 年には約 5-6 気圧に上昇。

蒸気機関の小型大出力化、陸上・海上輸送への応用。

3.6 今日の熱機関

P-V 線図



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。

ピストン表面に働く力：(圧力) $\times$ (面積) $= PA$

ピストン移動距離： dx

ピストンになす仕事：

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

最初の体積 V_1 から最後の体積 V_2 まで積分。

$$W = \int_1^2 PdV$$

P-V 線図の下側 (V 軸側) の面積が仕事。

体積 V 増加：正の仕事 (系がピストンに対してする仕事)

体積 V 減少：負の仕事 (系がピストンからされる仕事)

サイクル (一巡して元に戻る変化) では、

1 サイクルで外部へなす正味の仕事が、囲まれる面積。

右回り：正味 正の仕事 (系が外部へする仕事)

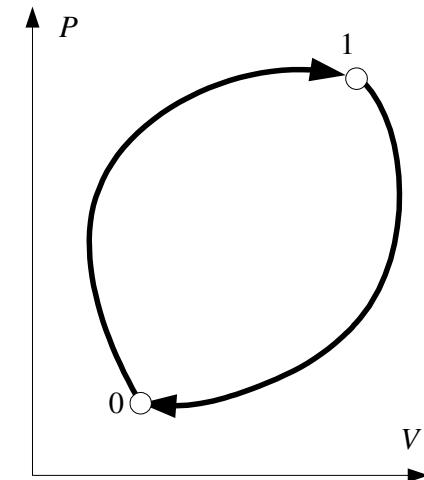
左回り：正味 負の仕事 (系が外部からされる仕事)

＊組成一定の物質の

状態：二つの状態量 (P と V など) で表される。

状態変化：平面上の曲線で表される。

(ただし、途中の状態が確定できると仮定)



熱機関の常識

熱機関：熱から仕事を取り出す機械

出力 (仕事率)：機関の大きさ
ワットの定義では、

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

SI 単位 (kW) での表示、

$$1 \text{ kW} = 1.341 \text{ HP(フートポンド法)} = 1.360 \text{ PS(メートル法)}$$

概数：

平均的なニューコメン機関：4 kW 程度、 平均的ワット機関：10 数 kW、
現在の原付バイク：数 kW、 火力発電用ボイラタービン：100 万 kW 前後

熱効率：熱機関の性能

$$(\text{熱効率}) = \frac{(\text{得られる仕事})}{(\text{供給した熱量})} = 1 - \frac{(\text{放出した熱量})}{(\text{供給した熱量})}$$

熱も仕事も同じ単位で評価。

概数

ニューコメン機関: 0.5 % 程度、 ワット機関: 1.2 % 程度、
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 %、
ガスタービンとボイラ・蒸気タービンのコンバインドサイクル機関: 45 ~ 55 %

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 (後述)。